

□ PROCEEDINGS

**运营安全与节能环保的隧道及地下空间暨交通
基础设施建设第五届全国学术研讨会**

会议论文集

**2014年8月
中国·云南昆明**

**主办单位：中国土木工程学会隧道及地下工程分会
隧道及地下空间运营安全与节能环保专业委员会
地下空间专业委员会
风险管理专业委员会**

**协办单位：云南省公路学会
云南省交通规划设计研究院
陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室
上海市土木工程学会岩土力学与工程专业委员会
International Association of Chinese Infrastructure
Professionals (IACIP)**

前 言

由中国土木工程学会隧道及地下工程分会、隧道及地下空间运营安全与节能环保专业委员会、地下空间专业委员会及风险管理专业委员会主办，云南省公路学会、云南省交通规划设计研究院、陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室、上海市土木工程学会岩土力学与工程专业委员会及International Association of Chinese Infrastructure Professionals (IACIP)协办的运营安全与节能环保的隧道及地下空间暨交通基础设施建设第五届全国学术研讨会将于2014年8月5日在云南省昆明市召开。会议将对国内外近年来在隧道及地下空间暨交通工程基础设施中的安全防灾、节能、环保等问题的应用经验及最新研究成果进行广泛的学术交流。本次会议的主要议题包括：

- (1) 隧道及地下空间的防灾、环保新技术；
- (2) 隧道及地下工程的通风节能新技术；
- (3) 隧道及地下工程的照明节能新技术；
- (4) 城市地下空间的规划、设计与管理；
- (5) 交通基础设施建设中的防灾、节能与环保新技术。

自会议通知发出以来，国内外专家学者积极投稿响应。根据会议安排，投稿论文会后将以《地下空间与工程学报》增刊的形式正式出版（部分高质量的论文将以正刊的形式发表）。为方便会议期间参会专家、学者的交流和讨论，特以预出版的形式，出版了本论文集（仅收录了部分论文）。

会议组委会

2014年7月

目 录

系统集成与水下道路隧道运营安全管理	陈韶章, 苏宗贤, 陈越 (1)
巴朗山隧道利用自然风节能通风技术研究	周仁强, 李海清, 王明年, 李玉文 (10)
秦岭特长输水隧洞长期气象监测研究	郭 春, 孙志涛, 王明年 (15)
特长隧道自然风超静压差计算方法研究	郭 春, 孙志涛, 王明年 (21)
光源可替换标准化 LED 隧道灯在公路隧道照明中的示范应用——上海市大连路隧道照明 LED 节能改造项目综述	施永泉, 张 良, 吴海滨 (27)
隧道入口段复合照明节能试验研究	吴桂林, 肖尧, 梁波, 潘国兵, 何世永, 赵宾 (36)
运营隧道感温火灾自动报警系统状态参数在线评估	杜新民, 吴海滨, 张良, 施永泉, 王文青, 闫治国 (41)
单洞单向交通特长公路隧道救援通道方案比选	陈树汪, 李志厚 (47)
单洞铁路隧道火灾列车紧急出口停车模式研究	李琦, 王明年, 于丽, 罗欣宇, 李博 (54)
长大铁路隧道及隧道群防灾安全分级的研究	于丽, 王明年, 李琦, 谢文强, 姜志毅 (60)
长大铁路隧道及隧道群救援设施的规划探讨	李琦, 于丽, 王明年, 罗欣宇 (66)
铁路隧道事故调查标准化方法的研究	颜冠峰, 王明年, 范宇, 李睿峰, 陈英军 (74)
高海拔单洞+服务隧道横通道间距设置研究	严涛, 王明年, 张子晗, 刘祥 (81)
盾构隧道管片热力耦合理论模型研究	朱合华, 沈奕, 沈安迪 (92)
高温后盾构隧道管片-钢板界面粘结性能试验研究	

.....	杨成, 闫治国, 朱合华, 朱立琦 (103)
轨道交通隧道病害对结构承载的影响	
.....	周帅, 朱合华, 闫治国, 董泽宇, 陈庆 (112)
高速公路隧道结构检测车的关键技术研究	
.....	朱爱玺, 刘学增 (120)
基于 GIS 的矿山边坡数字化安全管理系统研究	
.....	刘林贵, 李晓军, 李耀基, 刘高扬 (127)
基于 BIM 的预制装配式住宅虚拟施工模拟	
.....	徐可豪, 胡珉, 周丽 (132)
国内外城市公共交通运营管理模式对比分析	
.....	何莎 (138)
自然团粒土喷植技术于崩塌地生态复育稳坡成效与机理探讨 自然團粒土噴植工法於崩塌地生態復育穩坡成效與機理探討	
.....	張達德, 聶豫珍, 王正皓 (143)
山岭隧道限量排放设计标准	
.....	陈树汪 (152)
基于模糊综合评判的隧道施工环境质量评价	
.....	孟景辉, 邱成虎, 陈寿根, 赵玉报 (158)
复杂地层盾构刀具磨损试验研究现状及发展	
.....	胡群芳, 李敏 (166)
深埋硬岩特长隧道合理爆破循环进尺研究	
.....	李自强, 王明年, 于丽, 徐活源 (175)
钢管约束再生混凝土柱力学性能综述	
.....	唐昀超, 冯文贤, 蔡杨, 宝鼎晶 (183)
衬砌错台裂损隧道预应力加固与安全性分析	
.....	张靖炜 (190)
地铁盾构隧道对既有铁路箱涵的安全影响分析	
.....	王 凯, 蒋玉龙, 何一韬 (197)
微型桩-锚组合抗滑结构变形和受力特性数值分析	
.....	胡田飞, 梁龙龙, 朱本珍, 郑静 (204)

系统集成与水下道路隧道运营安全管理

陈韶章¹, 苏宗贤², 陈越²

(1. 广州市地下铁道总公司 广州 510030; 2. 港珠澳大桥管理局 珠海 519015)

摘要: 隧道一直以来都是城市道路和高速公路的事故多发区域, 各种灾害、交通事故或设备设施故障不但会引起人员生命财产的损失, 处理不当还会引起二次事故甚至危及隧道结构安全。水下道路隧道的运营管理需要依赖由各种设备和设施组成的多个系统, 要保证水下道路隧道的运营安全, 需要结合运营管理的需求, 以联动控制为目标, 以系统集成作为手段发挥各个系统、各个设备的功能, 实现总体功能的先进性。

关键词: 水下隧道; 运营管理; 联动控制; 系统集成

Systems Integration and Operational Safety Management of Underwater Road Tunnel

CHEN Shaozhang¹, SU Zongxian², CHEN Yue²

(1. Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou, 510030;

2. Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai, 519015)

Abstract: Tunnels have always been the traffic accident prone sites of the urban roads and highways. A variety of disasters, accidents or equipment failure will not only cause loss of lives and property, but also cause secondary accidents and even endanger the structure of the tunnel if misconduct. The operational management of underwater road tunnel rely on multiple systems consist of various equipments and facilities. To ensure the safe operation of underwater road tunnel, inspiring the functions of each system and equipment, combined with operational management needs, taking the linkage control as a target and taking the system integration as a method, is needed to achieve the overall advanced features.

Keywords: underwater tunnel; operational management; linkage control; system integration

1 前言

我国目前已建或在建水下道路隧道已超过 30 座, 其中, 已建成通车的跨越长江的大型隧道有武汉长江隧道、南京长江隧道、上海长江隧道等; 已建成的跨海峡隧道有厦门翔安海底隧道、香港红磡海底隧道和香港东区、西区海底隧道等, 正在建设的海底隧道有青岛胶州湾海底隧道、大连海底隧道、港珠澳大桥海中沉管隧道等。在建设快速发展的过程中, 水下道路隧道的建设理论与技术得到了快速发展, 积累了很多宝贵经验, 然而水下道路隧道的安全运营安全管理并未得到同步发展。隧道一直以来都是城市道路和高速公路的事故多发区域, 各种灾害、交通事故或设备设施故障不但会引起人员生命财产的损失, 处理不当还会引起二次事故甚至危及隧道结构安全, 因此, 运营期隧道内安全事故的预防、预警和处理显得非常重要。

水下道路隧道的运营管理需要依赖由各种设备和设施组成的多个系统, 这些系统之间、设备之间又存在着紧密的联系, 要保证水下道路隧道的运营安全, 需要以系统集成发挥各个系统、各个设备的功能, 实现总体功能的先进性, 没有良好的系统集成, 以单个设备或单个系统的先进性并不能有效提高水下道路隧道的运营安全性, 同时, 单个设备或单个系统的先进性也未必能得到充分有效地发挥。

2 水下道路隧道运营管理需求

水下道路隧道的运营管理包括收费管理、交通管理、路政管理、紧急救援管理、安全环保管理、节能管理和辅业管理等; 维护管理主要包括对隧道主体结构、路面及内装、机电系统及设备、沿线设施和健康监测系统等的检修和养护。为了做好这些管理, 首先需要做好对交通监控、环境

监测和水位监控，以及火灾报警、事故后的人员疏散及交通组织预案等专项工作。

2.1 交通监控

隧道内的交通监控主要是监视隧道内的交通状况，包括对交通流量、交通组成和道路服务水平等参数进行监测和统计，以及对交通事故和交通设施的监视，其范围不限于隧道内部，还应包括隧道口部外属管理区域和收费广场，为运营管理提供第一手基本资料。其监控手段有视频摄像检测、雷达测速、环形线圈检测、微波车辆检测等，当隧道内发生堵塞或灾害时，能及时将有关信息反馈给运营管理监控中心、隧道口部和收费广场以便及时进行交通控制。

2.2 环境监测

隧道内的环境监测主要是对隧道内的 CO 浓度、烟雾浓度（能见度）、风速、照度、温度、噪声以及隧道口部外环境亮度等与车辆行驶关系密切的环境参数进行监测。当隧道内出现堵塞时，空气中的 CO 等有害气体、烟雾浓度将会升高，超过标准值时应及时反馈给运营管理监控中心启动备用风机加大通风力度。当隧道口外部亮度发生明显变化或进入夜间运营时，隧道内照明应能及时调节相应的照明方案，在缓解隧道入口处的“黑洞”效应和出口处的“白洞”效应的同时实现节能减排。当隧道发生火灾时，空气温度、烟雾浓度等监测数据应能实时反馈给运营管理监控中心，作为指挥人员疏散逃生、启动消防设施和调节通风排烟等决策的重要依据。

2.3 水位监控

对于水下道路隧道，隧道内的水位是判断隧道是否发生渗漏水甚至涌水的重要依据。水下隧道的纵断面一般设成 V 型或 W 型坡，在一个或两个坡底处设有排水泵房，在洞口处设有雨水截流设施，正常情况下，隧道内的进水量与排水量应达到平衡，水位监控也可作为判断排水设施工作状态的依据，当水位超过警戒值时应及时向运营管理监控中心报警并增加启动备用排水设备，否则将会危及车辆行驶安全和隧道主体结构安全（隧道内部水荷载剧增将引起隧道沉降和接头张开或混凝土开裂）。

2.4 火灾报警

由汽车碰撞或自燃而产生的火灾是隧道内较为常见的灾害，火灾产生的浓烟、毒气和热辐射对人员生命和隧道主体结构产生严重威胁。火灾发生时应能实现及时报警、封闭车道、组织人员疏散和救援，以及启动通风排烟和消防灭火等措施。由于目前大部分水下道路隧道采用集中排烟方式，火灾发生时仅开启火源附近的排烟阀进行排烟，此外，还需要指引火灾上、下游的车辆和人员通过合适的路径尽快撤离，必要时需安排救援人员到达火灾现场，火灾及时报警和火源位置的准确判断显得非常重要。然而当火灾发生时隧道内的自然风速或射流通风风速往往较大，使得监测出来的“火灾点”随风漂移，在监控系统获得火灾报警和火源位置信息时，最好还应及时得到运营管理监控人员通过视频监控的确认。

2.5 事故后的人员疏散及交通组织预案

事故后的人员疏散及交通组织需要结合水底隧道疏散通道的设置方式，目前国内外水下道路隧道结合其修建工法和结构形式主要有三种疏散通道类型：（1）以服务隧道为逃生救援通道；（2）以双孔隧道间的联络横通道作为逃生救援通道；（3）在隧道行车道板下设置逃生救援通道。这三种疏散通道类型分别主要应于平行导洞法、矿山法（或沉管法）和盾构法修建的隧道中，其疏散效率、救援车辆的到达效率、结构受力影响和施工风险等各有优劣。运营管理者应针对隧道内事故（或灾害）发生的种类、规模（或影响程度）和可能位置建立人员疏散及交通组织预案，包括确定人员疏散最优路径和救援到达最优路径，评估安全疏散时间、救援到达时间和事故处理时间等，甚至还应包括结合区域路网指引外部车辆绕行其它通道的方案。这样，当事故发生时，相关人员和设备设施便可立即启动相应的应对措施和处理程序。

3 水下道路隧道交通运营模式

水下道路隧道的交通运营模式主要有正常运营模式、堵塞工况模式、灾害工况模式、节能模

式和检修状态模式等。

3.1 正常运营模式

正常运营模式是隧道内外环境和交通流处于正常设计标准状态下隧道提供正常标准服务的运营模式，所设备设施等资源按标准工况投入并均处于正常工作状态，按既定的设计参数稳定运行。

3.2 堵塞工况模式

堵塞工况模式是隧道内发生交通拥堵，道路服务水平下降的运营模式，此时隧道内 CO 浓度升高、烟雾增加、能见度下降，隧道内风机应根据环境监测参数加大投入，提供合适的风速和风量，形成闭环控制。此外，运营管理人员应根据拥堵原因（交通事故、天气等）在收费广场公布交通信息，对车辆组织限行和提示绕行。

3.3 灾害工况模式

灾害工况模式是隧道内发生火灾、水灾或严重交通事故等危害生命安全和隧道主体结构而必须禁止通行的工况模式，往往具有突发性和快速恶化性，需要隧道运营管理人员、各设备、各系统快速投入、联合工作、联动控制的运营工况，此时应及时快速地组织人员逃生救援、临界风速控制和排烟灭火等工作，同时，在隧道口外区域及收费广场须及时公布灾害信息，禁止车辆通行并组织绕行。文献[1]在对上海长江隧道的疏散排烟系统在正常运营和阻塞两种工况下的安全性进行了评估时发现，在正常运营工况下发生火灾时隧道内人员可以安全疏散，但在阻塞工况下发生火灾时火源下游人员并不能全部安全疏散。因此在灾害工况模式下还需考虑灾害发生时的工况模式状态。

3.4 节能模式

当进入深夜时段或由于天气原因路网封路时，交通流将大大降低，按正常运营模式投入设备运行将会造成资源浪费，此时可启用节能模式，减少风机、照明等设备的投入。

3.5 检修状态模式

当隧道检修工作需要占有部分车道甚至全部车道时，隧道运营进入检修状态模式，此时需根据具体情况做好交通信息指引，处理好封闭车道与通车道的关系，做好防护设施，必要时还应进行加强照明和通风，保障维修作业人员安全。

4 水下道路隧道运营管理架构及系统配置

4.1 管理架构

水下道路隧道运营日常管理架构一般设两级或三级，两级的为管理中心（或控制中心 OCC）——现场（或救援站），三级的为管理中心（或控制中心 OCC）——区域控制中心——现场（或救援站）。前者一般适合相对独立的水下道路隧道，后者一般适合与周边路网联系紧密，作为路网或线路（如高速公路）其中一部分的水下道路隧道。管理结构的设立将决定管理系统的功能与配置。

4.2 供电模式

目前水下道路隧道的供电模式有集中供电模式和分散供电模式，集中供电模式使用较多，线缆较少，便于敷设，但主干线缆的线路故障可能会引起所有用电设备的停电；分散供电模式一般用于特长隧道或隧道群的机电设备供电，其特点是将整座隧道或隧道群进行分段供电，出现故障往往只影响其中一段的用电，若采用双回路电源则可避免造成停电，这对于隧道内排水和设备用房散热显得尤为重要。

4.3 系统配置

水下道路隧道的系统配置主要有交通信号系统、行车信息系统、通信系统、通风与排烟系统、照明系统、给水与排水系统、收费与清分系统、防灾与报警系统、机电设备监控系统、电力监控系统和结构健康监测系统等^[2]。其中，通信系统还包括传输系统、公务电话系统、专用电话系统、

无线通信系统、广播系统、时钟系统和闭路电视监视系统（CCTV）等。可以看出，每个系统都由若干个子系统或若干设备设施组成，如何将这些系统和设备进行有机结合，联合发挥作用，是现代水下道路隧道运营管理需要解决的问题。

5 系统的联动控制

实现各系统的联动控制是确保水下道路隧道安全、高效及节能运营的关键手段，亦是系统集成化的核心目标。以下以水下道路隧道火灾消防联动控制为例阐述灾害发生时系统间的联系和联动控制过程。

当隧道内发生火灾时，联动控制的原则应该是：早疏散→早灭火→早救援。隧道中一旦发生火灾，火灾自动报警系统应能及时发出报警和对火源准确定位，并报控制中心或现场人员确认，开启路政指示标志照明引导隧道内火源上、下游人员紧急疏散。由于火灾产生的烟气会在热浮力作用下上升，在顶板限制下向洞口两个方向扩散，在风速很低的情况下，烟气分层明显，不受扰动，烟气下方的空气仍然是相对清晰的，这给人员疏散提供了条件，同时，集中排烟系统仅开启火源附近的排烟阀，有效发挥其排烟作用的前提条件也是保持烟气分层的稳定性，因此，纵向通风系统在收到火灾报警信息时应及时调节控制隧道内的风速在临界风速（临界风速的大小还与隧道断面和火灾规模有关）以内，保持烟气分层的稳定性。

在港珠澳大桥海中沉管隧道的足尺模型火灾试验研究中发现^[3]，在火源位置开启泡沫水喷淋灭火措施，火源断面视觉通透性明显降低，但烟雾层并未明显下降，若在离火源一定距离开启泡沫水喷淋，喷淋区域内烟气瞬间降落，烟气分层稳定性受到破坏，烟气向四周蔓延，能见度快速下降，影响人员疏散逃生。因此启动泡沫水喷淋（或其它）灭火措施时，火源的准确定位显得尤为重要，若准确定位存在困难，喷淋区域较大时，灭火措施的开启应适当滞后，滞后时间应视人员完全撤离火灾现场的估算时间或由控制中心通过 CCTV 监视人员撤离情况进行确定。控制中心在收到火灾报警信息后，还应通过广播系统、交通监控系统、电力监控系统和环境及设备监控系统等进行下一步程序操作，避免二次灾害的发生。隧道内火灾消防联动控制模式示意图 1。

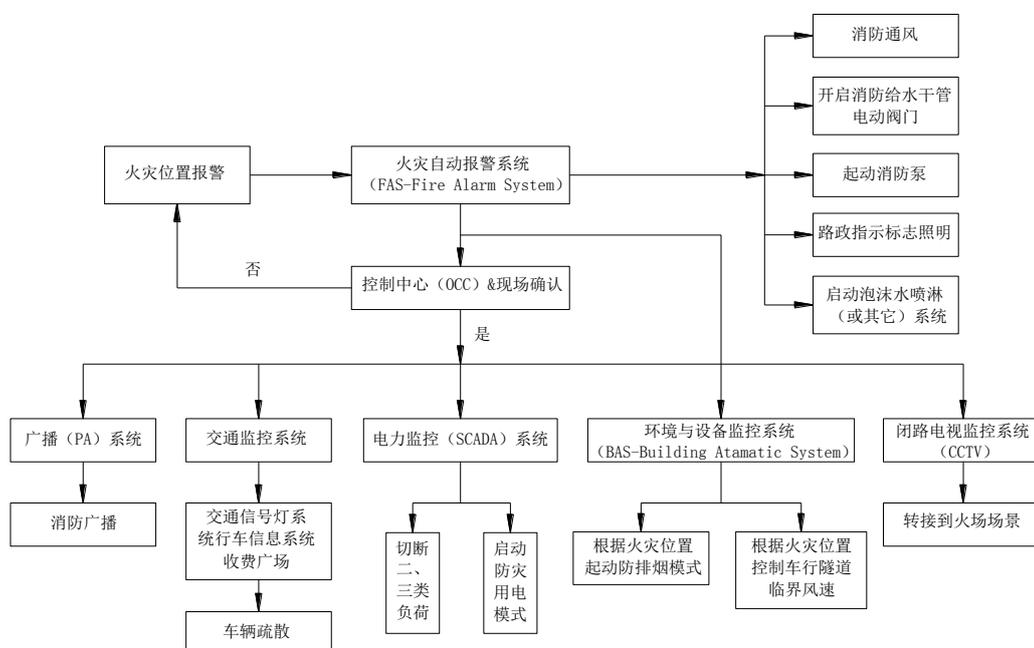


图 1 隧道内火灾消防联动控制模式示意图

6 运营管理系统集成

水下道路隧道运营管理系统集成示意图 2。

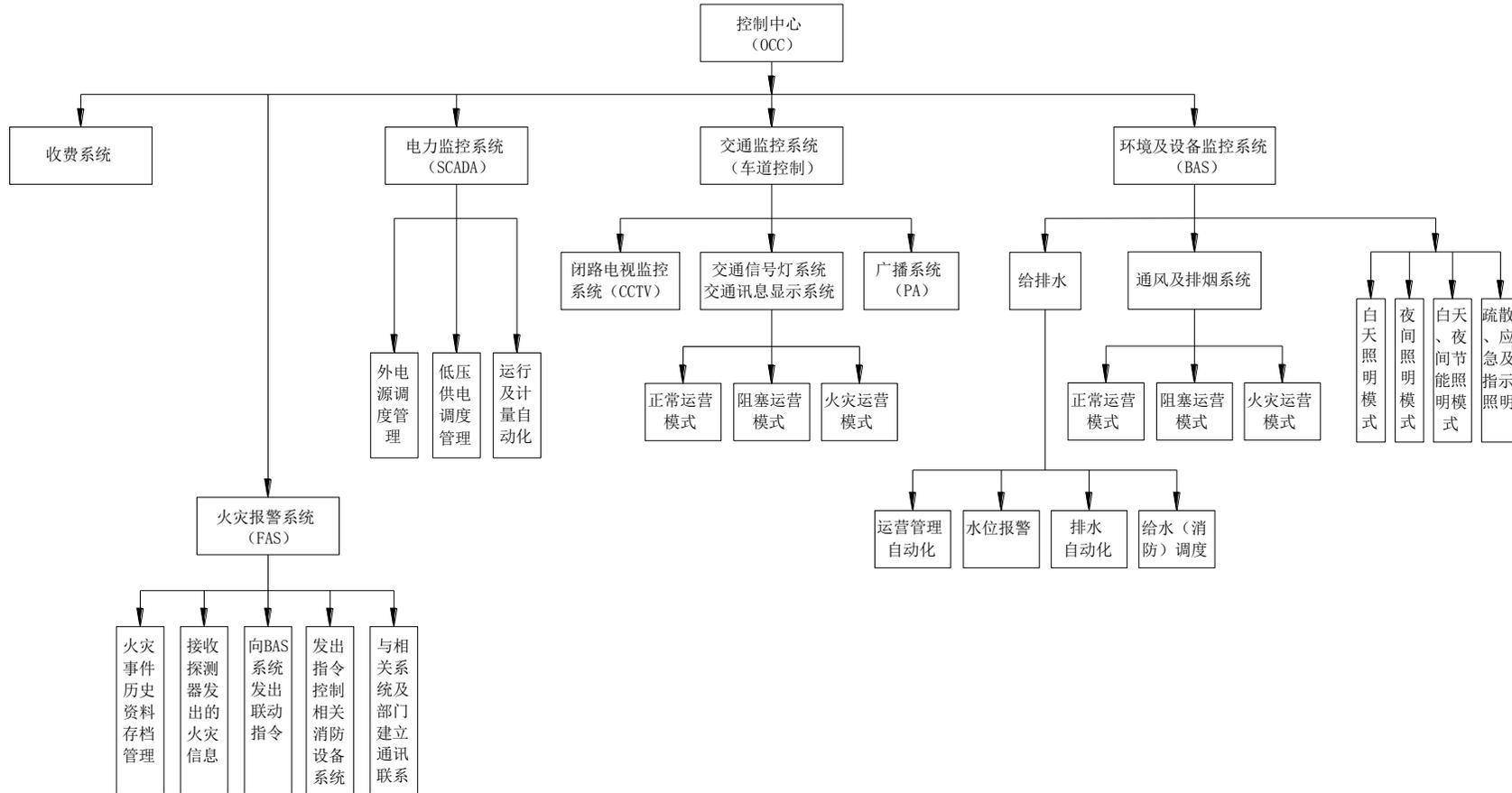


图 2 水下道路隧道运营管理系统集成示意图

6.1 传统的系统集成

传统的隧道运营管理系统集成控制见图 3，可以看出：

- (1) 各子系统的操作员只能通过该子系统的显示器操作该子系统；
- (2) 不同子系统的人机界面之间缺乏联系，信息不能共享，不利于联动控制；
- (3) 各子系统显示器会出现许多不必要的重复，令操作过于繁复。

这是传统系统集成控制存在的问题。

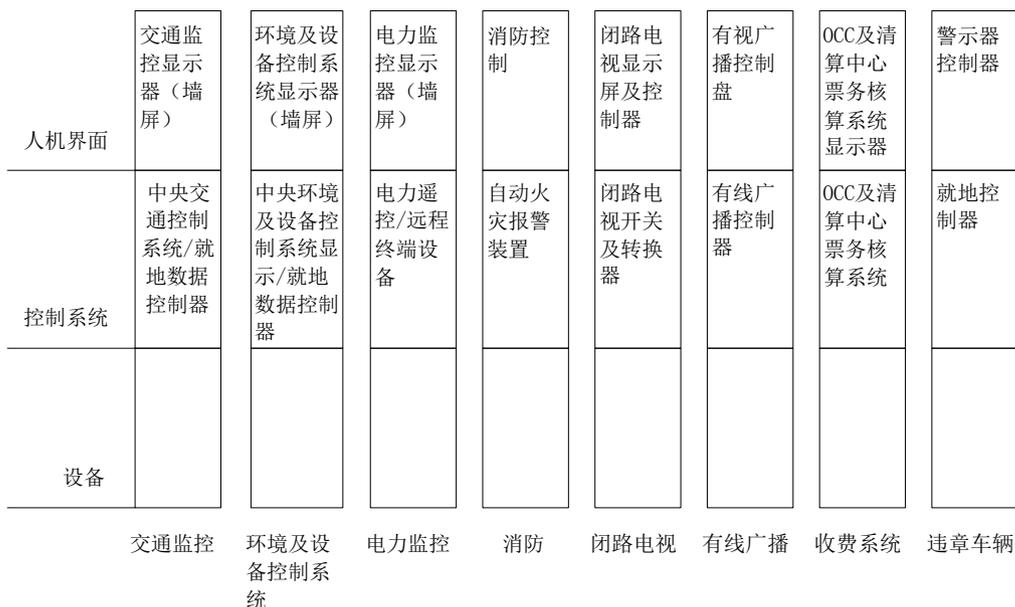


图 3 传统系统集成控制示意图

6.2 高度集成的综合监控系统——ISCS

ISCS（Integrated Supervisory Control System）系统的设计概念是紧紧抓住控制系统人机界面、数据处理与就地操作系统界面的三个关键因素。

它的设计原则为：

- (1) 避免系统过于繁复。
- (2) 避免操作员显示器出现不必要的重复。
- (3) 在合适的层次上采用新技术。
- (4) 操作员必须能够以单一人机界面控制任何类型的设备。
- (5) ISCS 系统与各个就地操作控制系统之间的界面必须统一，效率高而且可靠。
- (6) 在任何情况下，与界面联系的任何故障不能对就地操作造成任何影响。
- (7) ISCS 系统的使用者，基本上通过控制室的人机界面或操作员的计算机工作站与仪表和设备相互联系。

它集成各子系统的原则为：

(1) 收费系统属于道路运营业主内部经营信息，一般不宜集成进 ISCS 系统，两者可作顶层进行信息交换。

(2) 火灾报警系统（FAS）应根据当地的消防要求，确定集成进 ISCS 系统方案，主要有两种形式：①火灾报警系统（FAS）采用互联的接入 ISCS 系统，这种方式 ISCS 系统仅能实现区域火灾报警显示功能；②ISCS 深度集成火灾报警系统（FAS）的方式，这种方式 ISCS 可完全实现火灾报警系统（FAS）的监视和控制功能。

(3) 根据隧道交通组织复杂程度，可深度或未深度集成交通监控系统。

目前，ISCS 系统在轨道交通隧道开始得到研究、应用与发展（可参考文献[4]），对于水下道路隧道，ISCS 系统与各子系统的联络关系可参见图 4，基本原理参见图 5。

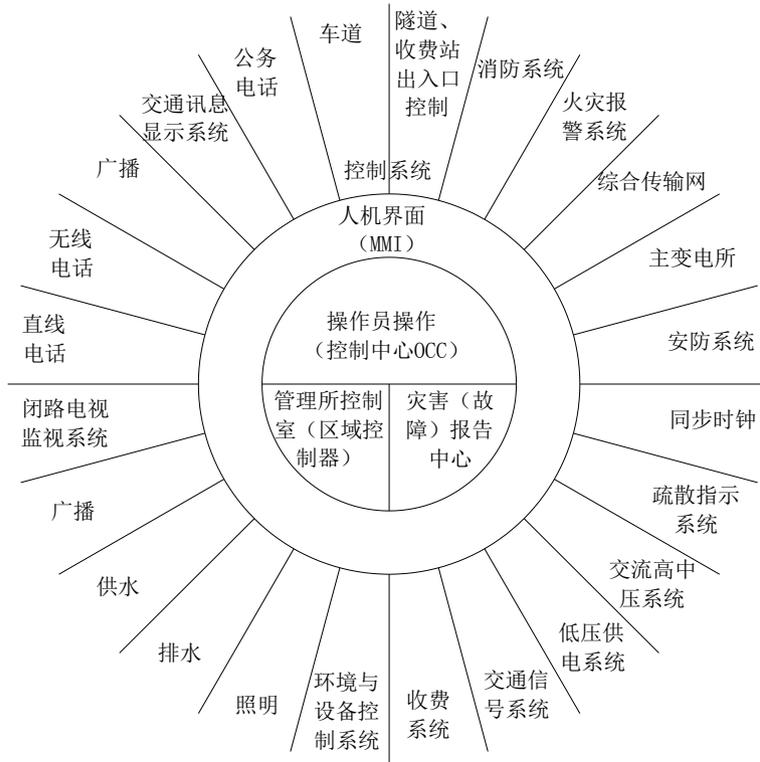


图 4 ISCS 系统与各子系统的联络示意图

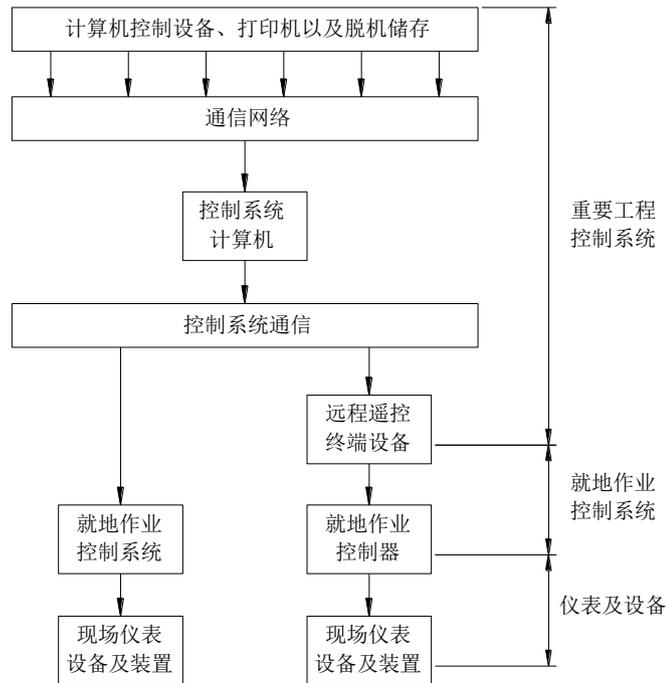


图 5 ISCS 系统的基本原理示意图

未深度集成交通监控系统及 FAS 系统的方案，见图 6 所示，深度集成交通监控系统及 FAS 系统的方案，见图 7 所示。可以看出，深度集成方案更注重防灾救灾与交通监控体系的联动性和实时性，以自动化提高工作效率和调度管理水平。

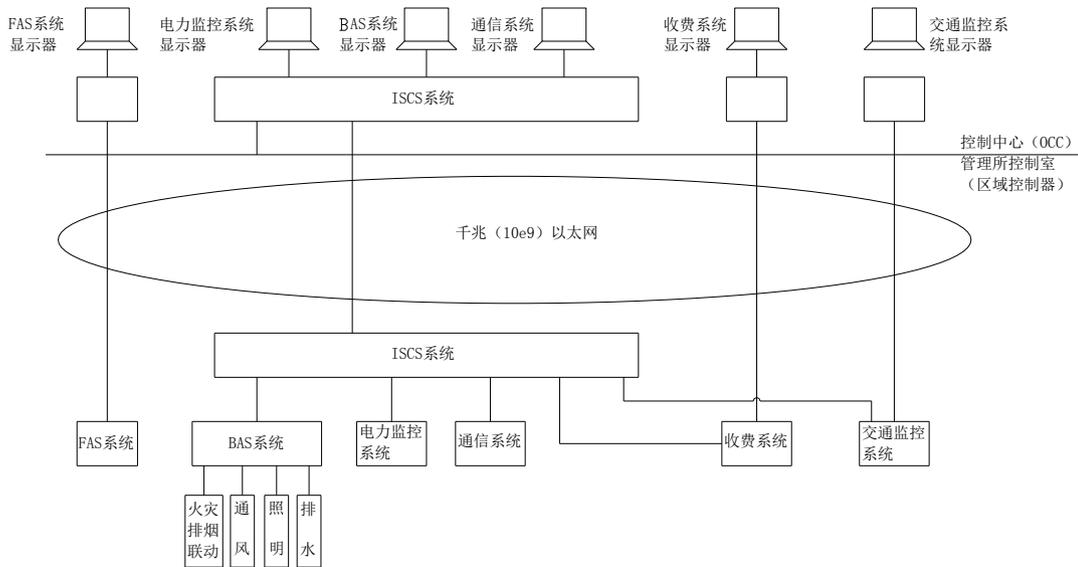


图 6 ICS 系统未深度集成交通监控系统、FAS 系统方案示意图

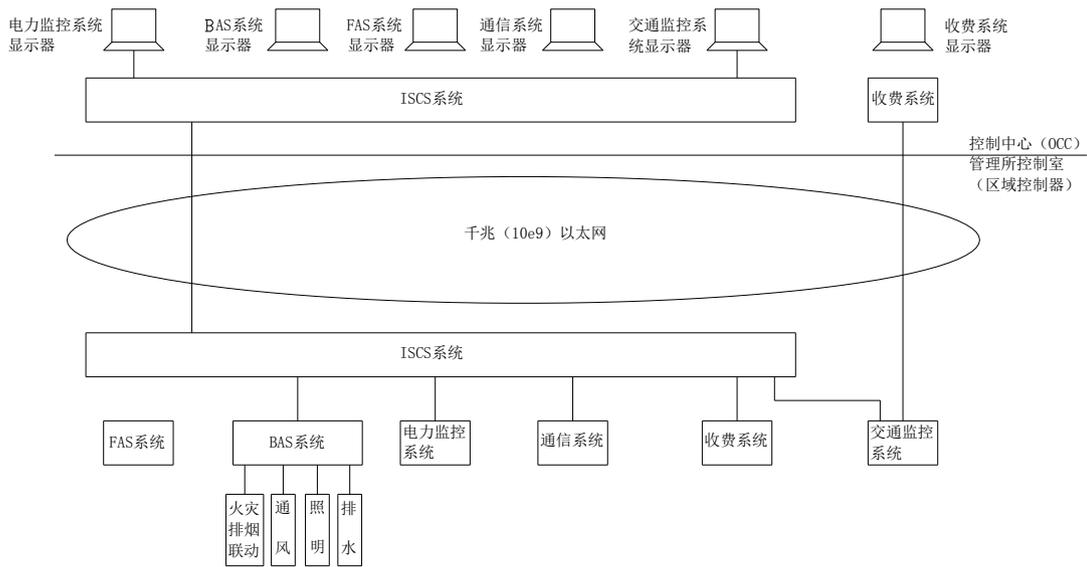


图 7 ICS 系统深度集成交通监控系统、FAS 系统方案示意图

6.3 采用 ICS 系统的控制中心

控制中心的主要功能有：交通监控、车道开/闭调度、电力调度、环境控制、事故灾害处理指挥和票务管理等。一般环境下各集成子系统的数据直接传输至控制中心，亦可与 ICS 系统管理所或区域控制级工作站联系。控制中心可通过操作员的权力分配，使控制中心主任、交通监控、环境控制、事故灾害处理、电力调度、票务管理等操作员在其显示器中查阅各子系统运行状况的资料，有利于运营、抢险救灾等的指挥及事故处理，各监控职能权力分配见表 1。

表 1 各监控职能权力分配

系统	监控室主任		交通监控操作员		环境控制操作员		事故灾害处理操作员		电力调度操作员	
	控制	监视	控制	监视	控制	监视	控制	监视	控制	监视
环境控制		√			√	√				
电力调度		√							√	√
交通监控		√	√	√						
事故灾害处理		√					√	√		

ICS 系统还配置了一中央数据管理系统，各集成的子系统的数据可储存在这一系统中，详

见图 8。在控制中心只需很短的时间（约 1min）就可以从中央数据管理系统中取得集成的各子系统中取得相关工作状况的实时数据，分析的数据亦能实时地传递给有关管理人员，以便迅速决策；关键设备的回应时间可控制在 2s 之内，次关键设备回应时间为 4s，这样可大大减轻管理人员的劳动强度。

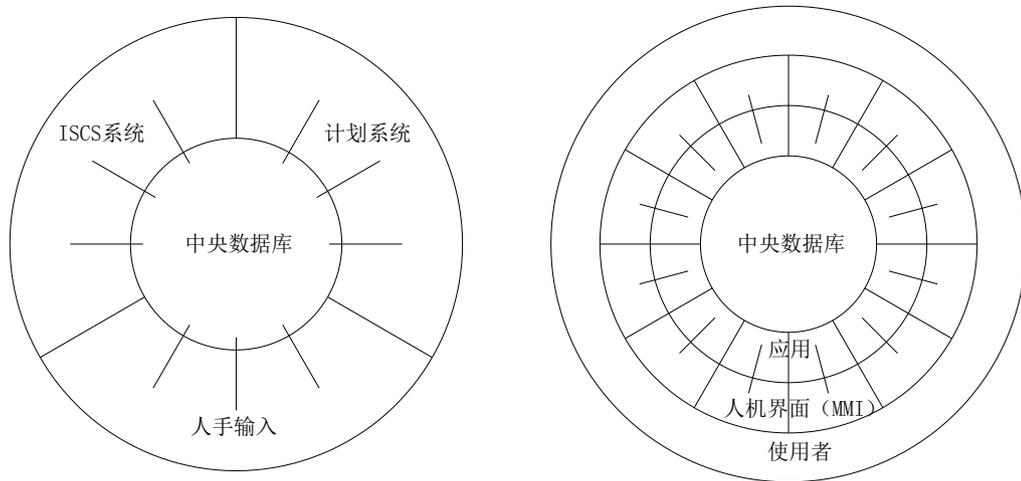


图 8 ISCS 的中央数据管理系统示意图

7 结束语

水下道路隧道的交通工程，是一多系统的复杂系统工程，实现各系统的联动控制是确保水下道路隧道安全、高效及节能运营的关键。因此应采用先进的系统集成理论及工具将各子系统有机地集成为综合功能先进的系统，提高水下道路隧道营运管理水平及效率，增强应对事故、灾害突发事件处理能力，充分发挥系统设备能力，优化人力资源配置，降低运营成本。ISCS 在该领域应有着进一步研究和推广应用的价值。

参考文献(References)

- [1] 方银钢, 朱合华, 闫治国. 上海长江隧道火灾安全疏散研究[J]. 现代隧道技术, 2008 (S1)
- [2] 陈韶章, 陈越. 沉管隧道设计与施工[M]. 科学出版社, 2002
- [3] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 港珠澳大桥沉管隧道火灾试验总结报告(送审稿)[R]. 重庆, 2014
- [4] 姜臻祺. 适合轨道交通综合监控系统(ISCS)运营组织体系相关问题的探讨[J]. 地下工程与隧道, 2009 (04)

巴朗山隧道利用自然风节能通风技术研究

周仁强¹ 李海清² 王明年³ 李玉文¹

(1 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川.成都 610041

2 四川省交通运输厅高速公路管理局四川.成都 610041

3 西南交通大学土木工程学院地下工程系 610031)

摘要: 巴朗山隧道为单洞双向交通, 是国内最长的单洞公路隧道。隧道设置有通长的平导, 在平导与主洞间设置有 9 条车行横通道。本文以省道 303 线巴郎山隧道为依托, 利用巴郎山隧道长期气象观测资料建立自然风计算的边界条件, 计算确定巴郎山隧道洞内自然风大小及方向, 取 95% 保证率, 自然风大小为 3m/s, 自然风方向由映秀吹向小金约占 34.5%, 由小金吹向映秀约占 65.5%。通过对全射流纵向通风利用自然风节能通风与平导压入分风节能通风方案进行研究, 确定了巴朗山隧道利用平导压入分风节能通风方案。节能控制模式有按时段控制和实施控制, 按时段控制(白天与晚上)该节能通风方案可实现全年平均节能 9.5%。

关键词: 高海拔, 隧道通风, 单洞对向行车隧道; 自然风节能通风。

图书分类号:

文献标识码:

文章编号:

Study on Using Natural Wind and Energy Saving Ventilation Technology on Balang Mountain Tunnel

Zhou Ren-qiang¹ Li Hai-qing² Wang Ming-nian³ Li Yu-wen¹

(1. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design And Research Institute

Chengdu, Sichuan 614202, China 2. Sichuan Provincial Transport Department Highway Administration, Chengdu, Sichuan

614202, China 3. Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 614202, China)

Abstract: Two-way traffic Balang Mountain Tunnel is the longest one-tube highway tunnel in China. A parallel-guide-pit is constructed beside the tunnel, and there are nine passages between the tunnel and parallel-guide-pit. The study based on the S303 Balang Mountain Tunnel. The annual probability velocity of balang mountain tunnel natural wind is 3m/s, and the proportion of wind direction from Yingxiu to Xiaojin is 34.5% while the proportion wind direction from Xiaojin to Yingxiu is 65.5%. Calculation of boundary condition is proposed by meteorological data of Balang Mountain tunnel that was monitored for a long term. Based on studying between the longitudinal jet ventilation which uses natural and saving energy and applying parallel-guide-pit forced section longitudinal ventilation which uses natural and saving energy, the later is better. The energy saving mode has tow ways. One is real-time control, the other is time block control. Using natural wind and energy saving ventilation, it would achieve annual average 9.5% energy saving by time block control(day-night).

Key Words: high altitude; tunnel ventilation; two-way tunnel in one tube; using natural wind and energy saving ventilation

1 概述

隧道自然风是指由于隧道洞口两端气压、洞内外温度、洞口大气自然风速等自然条件的不同导致隧道内外空气密度不同, 从而在隧道内外产生一定压力差, 形成一定的风流, 其大小和方向具有随时间而变化的特点。自然风引起的隧道风速是指在自然风作用下产生的洞内风速, 是洞口两端气压差、洞内外温度差、洞口大气自然风速等共同作用的结果。

目前国内外隧道通风设计, 自然风风速 v_n 凭经验确定, 按对通风最不利情况来考虑, 我国《公路隧道通风照明设计规范》^[1] (JTJ026.1-1999) 推荐采用 $v_n=2\sim 3\text{m/s}$, 在通风计算中一般作为阻力考虑。现实中自然风的大小和方向随着时间呈有规律的变化, 并且随着风向的不同, 在通风系统中所产生的作用也不同, 有时表现为阻力, 有时表现为动力。若在表现动力的时段, 对自然风加以利用

作者简介: 周仁强 (1979-), 男, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要从事隧道等地下工程设计及科研工作。
E-mail:swzrq@163.com

进行节能通风，将起到显著的节能效果，如现已建成投入运营的国道 318 线二郎山隧道，仅利用自然风即可满足通风要求，大大节约了通风能耗。通过以上研究和实例说明充分利用自然风进行节能通风是非常有价值的。

2 巴朗山隧道通风方案

2.1 隧道概况

省道 303 线巴朗山隧道工程，地处四川盆地西部边缘，位于阿坝藏族羌族自治州南部小金县以东的小金、汶川、宝兴三县交界处。

巴朗山隧道为单洞双向交通。计算行车时速为 40km/h，隧道衬砌内轮廓净宽 9.8m，隧道拱顶高 7.05m。隧道内空断面积为 57.94m²，隧道内空水利直径 7.82m。为了通风及防灾救援要求，设置与主洞平行的平导，在平导与主洞之间设置车行横通道和人行横通道，平导内轮廓净宽 5.32m，高 6.38m，平导内空断面积为 29.28 m²，平导内空水利直径为 5.69m。

2.2 隧道通风参数

表1 巴朗山隧道参数表

Table1 Parameter of Banglang Mountain tunnel

隧道名称	里程桩号	长度 (m)	纵坡 1/长度	隧道高程 (m)
巴郎山隧道	主洞 K99+180~K107+134	795	1.44%/570, 0.63%/3600, -0.5%/3150, -1.28%/620, -2.95%/14	3876
	平导 PK99+180~PK107+135	795	1.44%/580, 0.63%/3610, -0.5%/3140, -0.5%/620, -2.141%/5	

表2 交通量预测结果 (pcu/d)

Table2 Traffic flow forecast (pcu/d)

年份	2015	2020	2029	2034
交通量	1913	2983	4701	5814

通过通风方案研究，巴朗山隧道通风方案采用平导 3 条横通道半横向式通风，通风方案见下图：

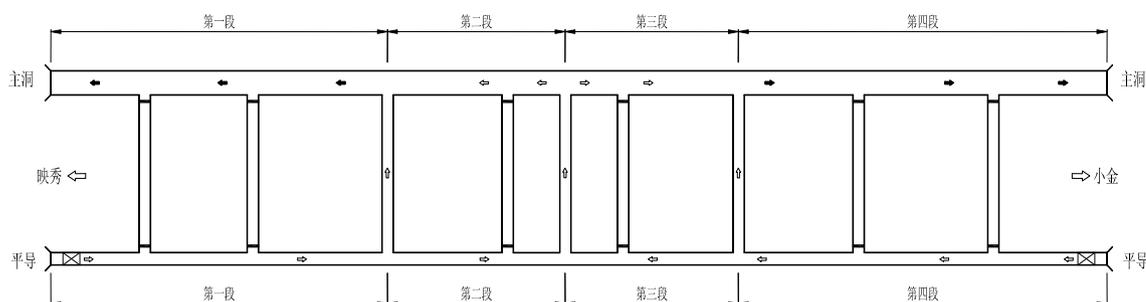


表3 图 1 巴朗山隧道通风方案示意图

Fig. 1 Banglang Mountain tunnel ventilation diagrammatic sketch

2.3 隧道需风量

经过计算本隧道需风量及洞内风速计算结果见 0:

表 3 巴朗山隧道需风量 (m³/s)Table3 Required amount of fresh air for Banglang Mountain tunnel (m³/s)

设计年限	全隧道				
	CO	烟雾	异味	需风量	设计风速
2015	183.29	148.97	402.22	402.22	6.94
2020	265.01	215.38	402.22	402.22	6.94
2029	364.52	296.26	402.22	402.22	6.94
2034	418.01	339.73	402.22	418.01	7.21

3.巴朗山隧道利用自然风节能通风研究

3.1 巴郎山隧道自然风分布规律

在巴朗山垭口和隧道的进口（汶川卧龙镇塘房道班）、出口（小金日隆镇松林口道班）各建立了一个人工和自动观测站^[2]。观测站从 2009 年 10 月开始筹建，2009 年 12 月 1 日正式进行气象观测，进行了为期一年的实地气象观测和实地调查。通过对气象观测数据进行分析整理，作为边界条件，进行隧道全年自然风计算，取 95%保证率，本隧道自然风为 3m/s，自然风方向由映秀吹向小金约占 34.5%，由小金吹向映秀约占 65.5%。自然风计算结果如下（以 2009 年 2 月份为例，其余月份类似）。

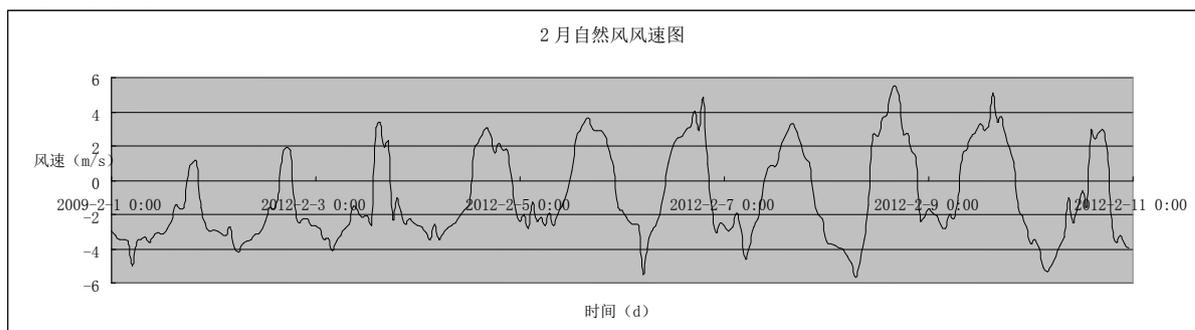


图 2 隧道 2009 年 2 月自然风风速分布图

Fig. 2 The tunnel natural wind velocity distribution in 2009 February

从图中可以看出隧道内自然风大小及方向随着时间的变化而变化，且巴朗山隧道为双向交通，通风方向可根据自然风与交通风的大小灵活改变，与《通风规范》规定自然风为阻力，差异较大，因此应根据自然风与设计风速的关系制定自然风利用控制策略，以达到节能目的。

3.2 利用原则及控制策略

(1) 利用原则

- ① 机械通风的风向及通风方式应综合考虑自然风主风向与交通风方向；
- ② 当自然风风速大于设计风速，且足够克服交通风和隧道沿程损失时，完全利用自然风；
- ③ 当自然风风速小于设计风速，且不能完全克服交通风和隧道沿程损失，开启部分风机，部分利用自然风；

(2) 控制策略

利用自然风节能通风的控制方式主要有分时段控制和实时控制。

① 分时段控制即根据计算得到的自然风的规律，将全年划分成不同的控制时段，每个控制时段按该时段内的最不利的工况进行控制。

② 实时控制是根据隧道内实时自然风风速情况，对通风设备实时控制。

3.3 巴郎山隧道利用自然风节能通风

(1) 节能通风方案研究

由于本隧道全射流纵向通风风速较大，为 6.94~7.21m/s，而根据计算得到的保证率为 95%的自然风大小为 3m/s，远小于全射流纵向通风风速，因此全射流纵向通风利用自然风节能通风方案不成立。

鉴于主洞与平导间设置有 9 条横通道，结合本隧道运营通风方案并经过论证研究，增设节能风道与车行横通道之间相互立体交叉，施工复杂，造价较高，综合考虑，本隧道推荐采用如下节能通风方案：当自然风完全满足全线通风需求时，不开隧道内风机，完全利用自然风进行通风；当自然风仅能满足部分段落通风需求时，在后续段落开启横通道为主洞不断补充新鲜风进行节能通风，其中开启横通道个数与位置随着自然风的大小和方向进行调整，风流组织需要通过平导及横通道的射流风机来完成。以自然风从映秀吹向小金为例，节能通风方案示意图见图 3。

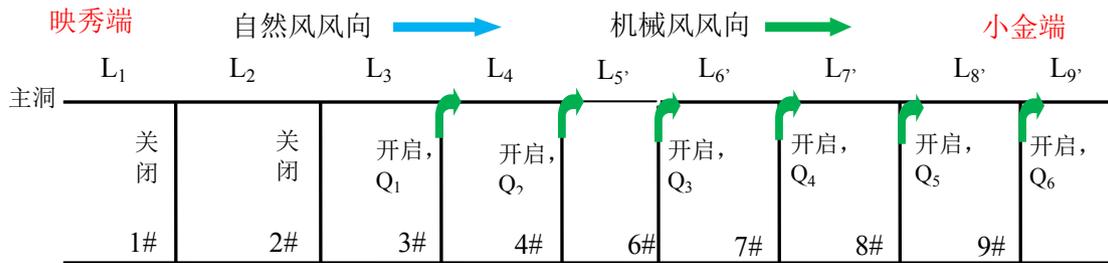


图 3 利用自然风节能通风示意图

Fig. 3 Using natural wind and energy saving ventilation diagrammatic sketch

(2) 各区段需风量计算

不同设计年份下，决定各区段需风量的因素由消除异味变为稀释 CO，计算得到不同设计年份各通风区段的需风量，见下表。

表4 不同设计年份各通风区段需风量 (m³/s)

通风区段 设计年份	L ₁ 段	L ₂ 段	L ₃ 段	L ₄ 段	L ₅ 段	L ₆ 段	L ₇ 段	L ₈ 段	L ₉ 段
2034 年前	42.14	42.61	43.08	45.42	39.33	40.27	42.14	41.21	40.93
2034 年后	49.96	50.51	51.07	53.84	46.63	47.74	49.96	48.85	48.51

(3) 节能分析

为了分析节能通风效果，本文以 2020 年相关参数，并取自然风大小为 3m/s，由映秀吹向小金为例，全隧道共需要开启 6 条车行横通道对主洞进行分段供风，横通道开启后主洞与平导间形成一个通风网络，运用通风网络计算，各横通道风量分配及风机功率，该模式下隧道节能约 23.4%，各横通道分风结果见下图：

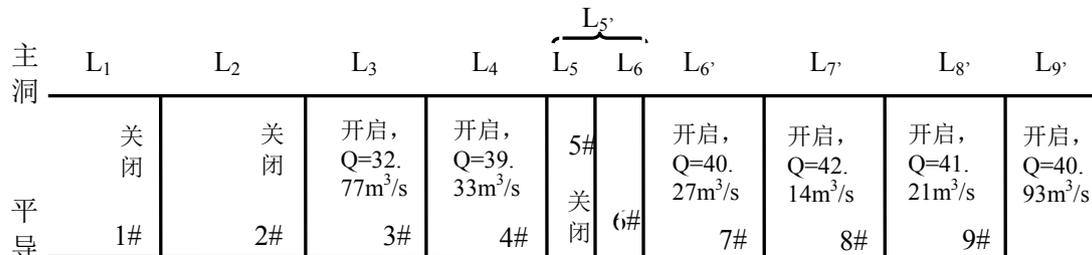


图 4 2020 年自然风映秀→小金节能通风方案

Fig. 4 Energy saving ventilation with natural wind blowing from Yingxiu to Xiaojin in 2020

将各个月份计算的自然风大小及方向代入到通风系统中，运用网络通风计算逐月计算，每月

分成白天和黑夜进行风机控制，并对全年节能效果进行统计分析，巴朗山隧道全年平均节能约 9.5%。各月份节能通风功率及节能效果见下图：

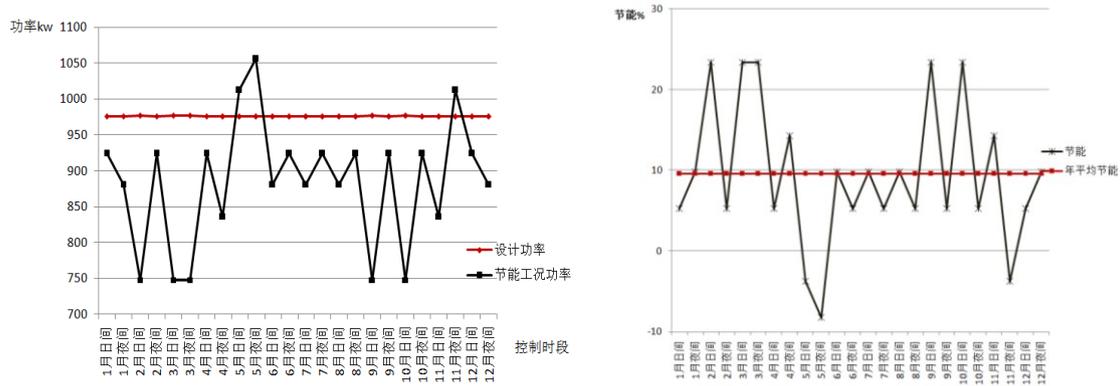


图 5 2020 年各月份利用自然风节能通风风机功率及效果

Fig. 5 The fan power and effect of energy saving with using natural wind and energy saving ventilation in each month of 2020

4.结论及建议

(1) 巴朗山隧道自然风 95%的保证率风速大小为 3m/s，自然风方向由映秀吹向小金约占 34.5%，由小金吹向映秀约占 65.5%。

(2) 本隧道利用自然风进行节能通风按白天和夜晚时段进行控制，年平均节能约 9.5%，若将控制时段进一步细分可得到更好的节能效果，但需加强隧道通风控制。

(3) 建议隧道通车后对自然风再进行现场实测，然后根据实测资料来对通风系统做进一步的校核，及时修正节能控制策略。

参考文献(References)

- [1] 公路隧道通风照明设计规范 (JTJ 026.1-1999) [S]. 北京: 人民交通出版社. 2000
- [2] 《省道 303 线巴朗山隧道气象观测分析报告》. 阿坝州气象局. 2011
- [3] 《巴郎山隧道两阶段施工图设计文件》. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 2011

秦岭特长输水隧洞长期气象监测研究

郭春^{1,2}, 孙志涛^{1,2}, 王明年^{1,2}

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 全长 81.58km 的秦岭特长输水隧洞工程位于秦岭这一中国气候的分界线上, 其 TBM 施工段独头掘进方案最长可达 22.93km, 施工通风的难度可想而知。明确隧洞施工通风需风量的相应标准以及隧洞洞口风压在全年的数值分布情况进而针对性的指导施工通风非常必要, 于是在秦岭隧洞 3 号洞、6 号洞洞口建立了 2 个自动气象站, 对秦岭隧洞的 TBM 施工段两个洞口的气象情况进行长期自动监测。记录影响隧洞施工通风的多种气象因素的实时数据, 通过对采集的数据进行分析得到各气象因素的规律, 为下一阶段 22.93km 独头施工通风动态控制提供数据支持。

关键词: 引汉济渭工程; 秦岭特长输水隧洞; 超长距离独头施工通风; 气象数据分析

中图分类号: U453.5

文献标识码: A

文章编号:

A long-term monitoring research on the meteorology of Qinling extra-long water conveyance tunnel

Guo Chun^{1,2}, Sun Zhitao^{1,2}, Wang Mingnian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region of the Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China; 2. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Qinling tunnel whose length is 81.58km is located in Qinling Mountains the climate boundary of China. And the TBM blind heading distance can be as long as 22.39km which will easily make people realize the difficulty of the ventilation. Ascertain the air demand for the construction ventilation and Masting of the the wind pressure law in a year is quite necessary which will provide an important reference during the later tunnel constructing. We have built two auto-monitoring stations monitoring the weather situation during a whole year nearby the no.2 hole and the no.6 hole to get a long-term climatic factors monitoring datas at the TBM area and we record these datas, which will provide the data support for the ventilation dynamic control of blind heading about 22.93km by a further accurate analysis on the discipline of them.

Keywords: Yin Han Ji Wei project; Qinling water conveyance tunnel; super-long distance blind construction ventilation; analysis of meteorological data

1. 引言

陕西省引汉济渭工程是 2005 年国务院批准的跨流域调水工程, 陕西省针对关中地区严重缺水的情况, 规划的省内南水北调三条跨流域调水工程之一, 也是其中调水规模最大的一项骨干工程。

秦岭隧洞全长 81.58km, 设计流量 70m³/s, 年平均输水量 15.05 亿 m³, 采用钻爆法+2 台 TBM 法进行施工, 规划工期 6.5 年。项目设置 10 座斜井作为施工辅助通道, 各工区施工通风均采用长管路压入式通风。岭脊 TBM 掘进机施工段长达 39.40km, TBM 进洞的 3、

6 号斜井长度分别超过 3.532km 和 2.390km, 该段最长通风距离达 22.93km。国内外超过 20km 的 TBM 独头掘进隧道十分罕见, 如此超长距离独头施工通风面临巨大困难, 因此采用动态施工通风控制方式, 分级调控分量分配。

秦岭岭脊以南地区, 为暖温带山地气候区, 降水充沛, 气候湿润, 冬冷夏凉; 秦岭岭脊以北地区, 为南方湿润型与北方大陆型的过渡型气候, 冬季寒冷, 夏季凉爽, 气温四季变化较大。由于隧洞洞口处的气象条件会对施工通风的进风空气质量产生直接的影响, 为了准确分析动态施工

作者简介: 郭春 (1979-), 男, 博士, 副教授。主要从事隧道及地下工程防灾减灾研究。E-mail: gouchun@swjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51108384); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682014CX062); 四川省教育厅资助科研项目

通风系统中的自然风压变化规律，正确确定施工通风供风量，保障秦岭隧洞超长距离独头施工通风的顺利进行，需要采集隧洞 3 号、6 号洞洞口空气的温度、相对湿度、风速和大气压强等控制性气象因素的长期数据，并研究其数值分布规律。

2 洞口气象因素对施工通风的影响

秦岭隧洞施工通风需要控制的环境因素有以下几种：氧气含量，主要影响因素考虑人员的氧气消耗及内燃机需氧量；温度，对于 TBM 段主要考虑机具的散热影响；有害气体含量，主要来自内燃机尾气排放以及可能存在围岩内的瓦斯等有害气体；粉尘含量等。

控制以上各环境因素的含量在规范所规定的合适范围，需要经过相应的计算和现场实测最终确定供风量，然后通过风机引入洞口的新鲜风进行调节。而洞口的环境因素好坏同样会直接影响引入风的风量等，对于较差的洞口环境可能就要考虑采取增加风量等对应措施，比如，对于高海拔地区的隧道施工通风就要考虑增加供氧气设施加入到通风系统中。总之，洞口的气象条件与隧洞施工通风是密切相关的。

3 自动气象观测技术要求

(1) 自动气象观测系统传感器精度要求

自动气象站中，最能决定自动气象站性能的是气象因素传感器^[2]，其精度要求如表 1。

表1 传感器精度要求

Table 1 Requirements of the sensor precision

要素	单位	测量范围	分辨力	准确度
气温	℃	-50~+50	0.1	±0.2
相对湿度	%	0~100	1	±3%
风速	m/s	0~60	0.1	±(0.3+0.03V)
风向	度	0~360	2.5	±5
气压	pa	0~1060000	0.1	±0.3

(2) 自动气象观测系统要求

自动气象观测系统应该能够通过风传感器、温度传感器、湿度传感器和气压传感器实时监测风速、风向、温度、相对湿度、大气压强等气象因素的具体数据，且能够在气象数据采集仪上进行显示、存储、传递给中心计算机以进行数据更加系统的存储及后期分析。应能够以 1 组/分钟的频率对气象数据进行全天候采集，并通过无线网络或有线网络与中心气象计算机连接并实现实时数据传递。气象数据采集仪要具有一定的数据存储容量，能够满足足够长时间的采集数据不会丢失。自动气象观测站系统及其他配套设施应该具有一定的稳定性，能够安全稳定的在各种恶劣天气状况、以及一定电磁干扰的条件下工作。

4 秦岭隧洞气象观测方案设计

为了很好地对秦岭隧洞 3 号洞、6 号洞洞口的气象条件进行准确的长期观测，该项目组在隧洞的两个洞口进行实地勘测后在洞口附近选取了两处能够代表洞口基本气象状况且比较适合进行观测工作的位置规划并最终建立了两个自动气象站。在对气象站的建造位置的确定应该参照气象方面《地面气象观测规范》进行，具体做到了：远离河流、大树；视野开阔、场地整洁大小合适；建造物对于原气象环境影响小。

结合秦岭隧洞工程特点，在隧洞 3 号洞及 6 号洞洞口建立的 2 个长期气象监测站均采用自动气象观测站。根据自动观测站方案技术要求选择秦岭隧洞的自动气象观测站的相关设备，自动气象观测站的气象数据采集仪型号采用 PH 气象数据采集仪；传感器包括：WC-1 型风传感器，温度传感器，湿度传感器以及气压传感器；配备有中心气象计算机终端；气象数据采集仪与中心气象计算机之间采用 GPRS 无线方式连接。

秦岭隧洞监测内容包括瞬时风速、瞬时风向、二分风速、二分风向、十分风速、十分风向、极大风速、极大风向、最大风速、最大风向、一小时雨量、空气温度、最高气温、最低气温、相对湿度、最小湿度、本站气压、最高气压、最低气压等重要气候参数。

对于传至中心计算机的数据，进行统一表格统计后存储以待后期分析。关于数据，应该每隔一段时间进行一次整理、分析。秦岭隧洞的自动气象监测站的基本布局、工作程序及连接网络如图 1 所示

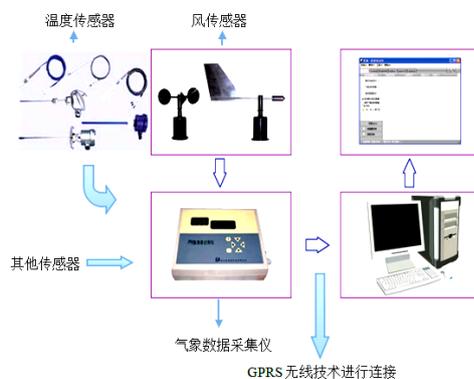
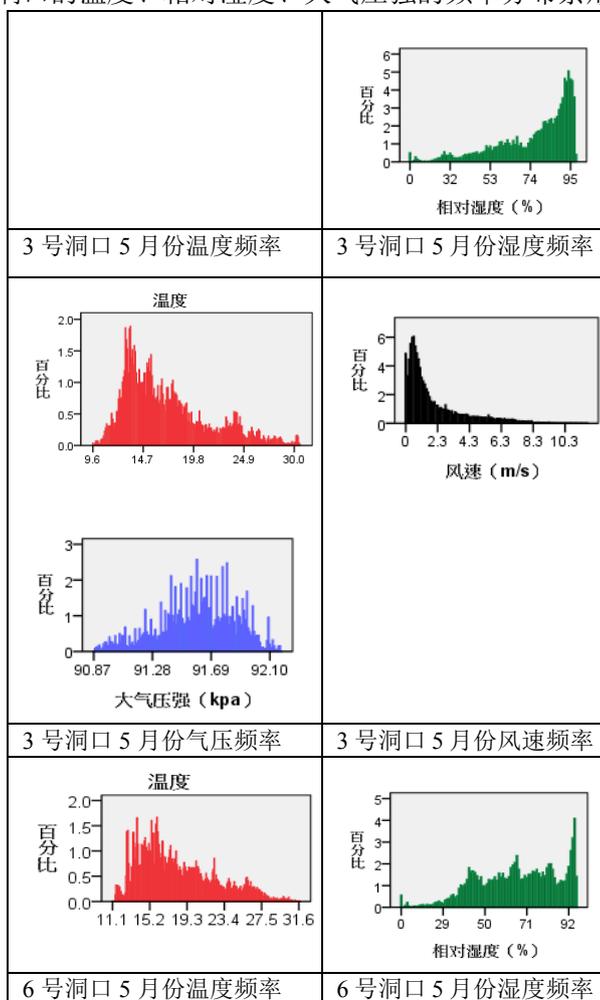


图 1 采用 GPRS 无线通讯方式的自动气象站
Fig.1 automatic weather stations connected by GPRS

5 秦岭隧洞气象监测数据处理及分析

自 2010 年 4 月 30 日建立自动气象站起至 2013 年 9 月 9 日止，已经对秦岭隧洞气象条件进行监测 1228 天，产生及记录气象资料数据频率为 1 组/min，得到了大量现场气象数据，其中 3 号洞口气象站观测时间为 2010 年 4 月 30 日—2012 年 4 月 19 日，六号站观测时间为 2010 年 4 月 30 日—2013 年 9 月 9 日。经过数据统计处理，得到 3 号洞、6 号洞口在全年内各项观测指标的频率分布情况。根据秦岭隧洞所跨越地区的气候特点处理重点分析 2010 年 5 月 11 日—2011 年 10 月 30 日的具体气象数据以期望得出其影响隧洞施工通风的控制性因素。以下首先以 5 月份为例给出了 3 号洞、6 号洞口的温度、相对湿度、大气压强的频率分布条形图，具体见图 2 所示。



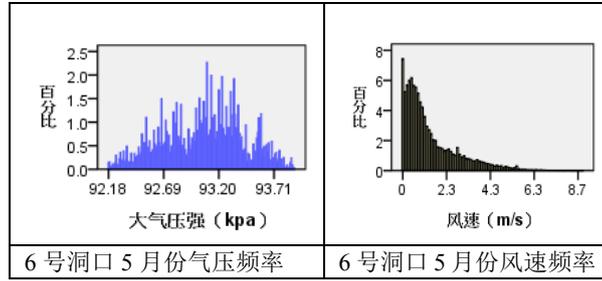


图2 以5月为例3、6号洞口各参数频率分布(°C)

Fig.2 Frequency distribution of four Climatic factors nearby the no.3 hole and no.6 hole taking May as an example(°C)

然后,统计3号洞、6号洞气象站所取得的长期气象数据,可得到气象站逐月平均温度、湿度、大气压力、风速直方图如图3、4、5、6所示。

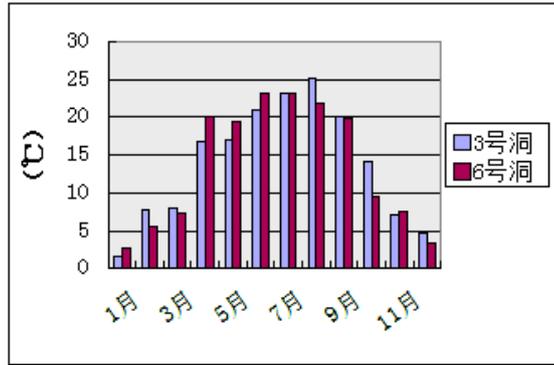


图3 月平均气温直方图(°C)

Fig.3 Histogram of average month temperature (°C)

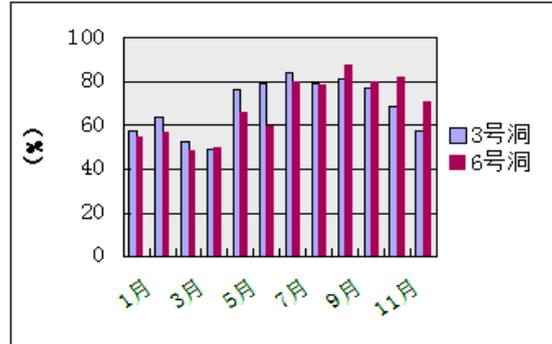


图4 月平均相对湿度直方图(%)

Fig.4 Histogram of average month relative humidity (%)

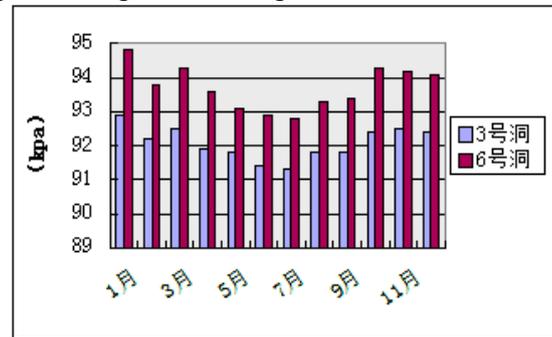


图5 月平均大气压强直方图(kPa)

Fig.5 Histogram of average month air pressure (kPa)

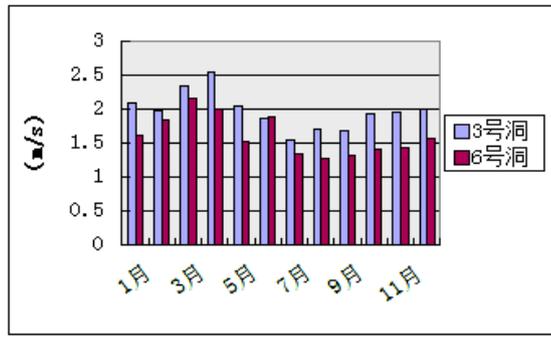


图6 月平均风速直方图 (m/s)

Fig.6 Histogram of average month wind speed (m/s)

6 结论及建议

分析气象监测数据可以为秦岭隧洞施工通风风量相应标准确定等研究提供数据支持。这种在秦岭这一中国气候分界线上针对具体工程实践对于气象的长期观测研究，能够很好地指导秦岭隧洞的施工通风，且其对于气象跨度较大的地区工程施工的具有较大的参考价值。

对于数据的处理，可以得到气象资料所记录的空气温度、相对湿度、大气压强、风速的基本情况如下：

(1) 温度。3号洞口的观测数据处理结果显示，年平均气温在 13.9℃左右；其中温度较高的月份为 4月~9月，其月平均温度范围为 16.8℃~25.2℃，平均温度 20.6℃。6号洞的观测数据处理结果显示，年平均气温在 13.7℃左右；其中温度较高的月份为 4月~9月，其月平均温度范围为 19.5℃~21.3℃，平均温度 20.6℃。相比来说，6号洞洞口温度分布较稳定。

(2) 相对湿度。3号洞口的观测数据处理结果显示，年平均相对湿度在 68.9%左右；其中相对湿度较高的月份为 5月~10月，其月平均相对湿度范围为 76.3%~84%，平均相对湿度 79.5%。6号洞口的观测数据处理结果显示，年平均相对湿度在 67.8%左右；其中相对湿度较高的月份为 7月~12月，其月平均相对湿度范围为 70.5%~87.4%，平均相对湿度 79.6%。相较而言，3号洞相对湿度较大月份比 6号洞提前。

(3) 大气压强。3号洞口、6号洞口的大气压强均小于标准大气压，3号洞的观测数据处理结果显示，年平均大气压强在 92.1kpa 左右；其中大气压强较高的月份为 10月~3月，其月平均大气压强范围为 92.2kpa~92.9kpa，平均大气压强 92.5kpa。6号洞口的观测数据处理结果显示，年平均大气压强在 93.7kpa 左右；其中大气压强较高的月份为 10月~1月，其月平均大气压强范围为 94.1%~94.8%，平均相对湿度 94.4%。相较而言，6号洞大气压强较大一些。

(4) 风速。3号洞的观测数据处理结果显示，年平均风速在 1.97m/s 左右；其中风速较大的月份为 12月~5月，其月平均风速范围为 1.99m/s~2.54m/s，平均风速 2.16m/s。6号洞风速的观测数据处理结果显示，年平均风速在 1.62m/s 左右；其中风速较高的月份为 2月~4月，其月平均风速范围为 1.83m/s~2.16m/s，平均风速 2m/s。总之，风速的变化范围不大。

(5) 需要进一步对气象数据进行监测，分析其规律及对施工通风的影响，并应用于下一阶段 22.93km 独头施工通风的动态控制中。

参考文献(References)

- [1] 郭春,王明年等.大相岭泥巴山隧长期气象研究[J].西南公路.2009(04):23~26. (Guo Chun, Wang Mingnian. Long-term meteorological research of Daxiangling tunnel[J]. Xi Nan Gong Lu. 2009(04):23~26.)
- [2] 高太长,刘西川等.自动气象站及气象传感器发展现状及前景分析[J].仪器仪表学报.2008(08):127~133. (Current prospective development of the automatic weather station and meteorological sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2008(08):127~133.)
- [3] 金文良,谢永利等.秦岭终南山特长公路隧道洞口气象观测与分析[J].现代隧道技术.2007(04):41~45. (Meteorological observation at the portal of Qinling super-long highway tunnel Modern[J]. Tunnelling Technology. 2007(04):41~45.)
- [4] 张朝明,李荣民等.数据通信技术在自动气象设备中的应用[J].科技创新与应用.2013(24):58. (Zhang Chaoming, Li Rongmin. Data communication technology in automatic meteorological devices[J]. Technological Innovation and Application. 2013(24):58.(in Chinese))
- [5] 吴利红,康丽莉,陈海燕.地面气象站环境变化气温序列均一性影响[J].气象科技.2007(01):152~156. (Wu Hongli, Kang Lili, Cheng Haiyan. Effect of Meteorological Observation Environment Variability on Homogeneity of Temperature Series in Zhejiang Province[J]. Meteorological Science and Technology. 2007(01):152~156.)

- [6] 朱霞,张静.地面自动气象站使用中应注意的几个问题[J].现代农业科技.2006:131~134. (Zhuxia, Zhangjing, Ground AWS use should pay attention to several issues[J]. Modern Agricultural Sciences and Technolog[J]. 2006:131~134.(in Chinese))
- [7] 王晓默,薛峰,章磊.自动气象站与人工观测的数据对比分析[J].气象科技.2007(4):602~606. (Wang Xiaofeng, Xuefeng, Zhanglei. Contrastive. Analysis of observation data between automatic weather station and conventional station[J].Meteorological Science and Technology. 2007(4):602~606.)

特长隧道自然风超静压差计算方法研究

郭春^{1,2}, 孙志涛^{1,2}, 王明年^{1,2}

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 以特长隧道自然风压为研究对象, 首先对自然风压的形成机理、计算方法进行研究, 分析了自然风压的利用现状。重点研究了大气压力形成自然风压的机理, 提出隧道超静压差的概念, 对传统的超静压差的计算方法提出了质疑, 建立了适用于特长隧道合理的超静压差计算模型。得到了基于大气压水平气压差的超静压差对于单斜(竖)井以及多数井的计算方法, 该计算方法适于编程计算。最终将理论的计算方法和数值模拟相结合, 在方斗山右线隧道得到较好的吻合验证。

关键词: 特长隧道; 自然风压; 大气压力; 超静压差; 计算模型

中图分类号: U453.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2010)02-1000-03

Researches on the Calculation Method for the Over Static Pressure Difference Causing the Natural Wind in Extra-long Tunnel

Guo Chun^{1,2}, Sun Zhitao^{1,2}, Wang Mingnian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region of the Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China; 2. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Take natural wind pressure in extra-long tunnel for the study, conduct research on the formation mechanism and the calculation method of natural wind firstly, analyze the utilization of natural wind pressure. The theory of atmospheric pressure to form a natural wind pressure is focused to come up with the concept of over static pressure difference. The traditional calculation method is questioned and calculation model of over static pressure difference was established for long tunnel. Then the calculation method for over static pressure based on the horizontal atmospheric pressure suitable for tunnel with single (inclined) draft or multiple (inclined) drafts is deduced which is convenient for programming calculation. Finally, the data from the calculation method and numerical calculation meets accurately.

Keywords: Extra-long tunnel; Natural wind pressure; Atmospheric pressure; Over static pressure difference; Calculation model

1 引言

据不完全统计,截至2011年底,公路隧道已达8522道,总计625万延米。截至2009年底,我国建成的铁路隧道总长度已经超过7000公里,在建铁路隧道总长约4600公里。到2020年前,规划建设5000座隧道,长度超过9000公里^[1]。随着公路、铁路线路标准的提高、隧道数量的增加,特长隧道也越来越多,通过对国内26条线路、100余座隧道的情况调研可知,截止2012年4月,拟建和在建的长度大于10公里的特长隧道共50余座,其中超过15公里的20座,超过20公里的8座。在建的巴陕高速米仓山隧道达到13.8公里,为世界第三长公路隧道。在建的西格铁路关角隧道(长32.645公里)突破30km,大瑞铁路高黎贡山隧道更达到34.538公里。特长隧道的建设已经迎来了一个空前的繁荣,然而特长隧道的后期运营中依然面临着通风照明等巨大能耗问题,无论是城市隧道还是山岭公路隧道,都涉及到环保问题^[2]。节能减排已然成为特长隧道修建时应当重点考虑的内容,以防止出现

作者简介: 郭春(1979-),男,博士,副教授。主要从事隧道及地下工程防灾减灾研究。E-mail: gouchun@swjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51108384);中央高校基本科研业务费专项资金(2682014CX062);四川省教育厅资助科研项目

照明、监控的投入^[3]。

而今，在气候分割带上修建的特长隧道越来越多，隧道进出洞口的自然风压形成的自然风流已成为隧道通风中不可忽视的宝贵资源，合理的利用自然风压将为特长隧道运营中的节流减排工作做出巨大的贡献。因此，关于隧道自然风压的相关研究就显得尤为重要。

2 自然风压的利用现状及计算方法

实践表明，隧道自然风流受隧道内外自然条件的影响，大小及方向比较不稳定。因此自然风压对隧道内机械通风系统的通风作用，有时表现为积极的一面，有时却表现为消极的一面^[4]。

特长隧道内自然风压的主要影响因素有隧道长度、隧道坡度情况、斜竖井位置及高度、围岩的初始温度、隧道外大气温度及大气压力等。

《公路隧道通风照明设计规范》应用等效风速来考虑自然风压的作用，且一律将自然风压考虑为运营通风中的通风阻力，如公式 1^[5]所示。

$$\Delta p_m = (\xi_e + 1 + \lambda_r \cdot \frac{L}{D_r}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \quad (1)$$

式中：

ΔP_m ——隧道自然风阻力 (N/m²)；

ξ_e ——隧道入口损失系数；

λ_r ——隧道壁面摩阻损失系数；

v_n ——自然风作用引起的洞内风速 (m/s)，规范推荐取 2m/s~3m/s。

3 自然风压的形成因素和机理

隧道内的空气之所以能在隧道中运动而形成风流，是由于风流的起末点间存在着能量差。这种能量差若是由通风机提供的，则称为机械通风；若是由隧道自然条件产生的，则称为自然通风。自然通风不依靠机械通风设备，不耗费额外能源，节能效果最为显著^[6]。

关于隧道自然风压的成因依然存在着不同的理论和见解，其中比较主流的观点是认为隧道内形成自然风压的因素有三种。隧道内外的温度差（热位差）、隧道两端洞口的水平气压差（大气气压梯度）和隧道外大气自然风的作用^[7]。

将地表大气视为断面无限大、风阻为零的假想风路，则通风系统可视为一个闭合的回路。只要两侧有高差，并且隧道所处环境中的空气密度不等时则该回路就会产生自然风压。表达式如公式 2 所示

$$P = \int_{H_0}^{H_1} \rho_1 g dH - \int_{H_2}^{H_3} \rho_2 g dH \quad (2)$$

可知，自然风压是关于空气密度和隧道两侧高差的函数，而空气密度受多种因素影响，因此其与高度 H 成复杂的函数关系。

根据气体状态方程和道尔顿分压定律，我们可以知道空气的密度计算公式为：

$$\rho = 0.003484 \frac{P}{T} \left(1 - \frac{0.378 \Phi P_{sat}}{P} \right) \quad (3)$$

其中 P_{sat} 为饱和水蒸气压力（不同温度下空气的饱和水蒸气压力可通过查表得到）。

由上式可知，隧道内外气体的密度与大气压力 P、温度 T 和相对湿度 ϕ 均存在关系。

由于常规气象观测不能直接测量得到空气密度，只能测得空气的湿度、温度、压强、风速风向，因此，为了能够将对隧道进行常规气象观测得到的物理量用来计算自然风压，必须分析测量物理量的各自影响程度。

另外，对于自然风压成因中的热位差-自然风压和大气自然风的风动压在遇到山坡后动压头转变成的静压-自然风压已经可以通过测试比较简便的大气物理参数带入相关的公式进行计算。因此，以下内容主要进行大气压-自然风压的相关阐述。

4 大气压力对自然风压的影响

4.1 超静压差的概念

大气压力是指单位面积上直至大气上界整个空气柱的重量，是气象学中极其重要的一个物理量，它的分布和变化与大气运动及天气状况有密切关系。

在实际大气中，由于空气的垂直加速度一般小于 0.1cm/s²，比重力加速度 g 至少小 4 个数量级，所以除去垂直运动剧烈的积云环流区外，都适用大气静力学方程。大气静力学方程反映在重力作用下，大气处于流体静力平衡时气压随高度的变化规律，其主要形式是：

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

由于常规气象观测不能直接测量得到空气密度，只能测得空气的湿度、温度、压强，故需利用湿空气状态方程，以得到静力学方程的应用形式：

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_d T_v} dz \quad (4)$$

将其由 $z_1(p = p_1)$ 积分到高度 $z_2(p = p_2)$ ，就得到 $p_2 = p_1 \exp\left[-\frac{1}{R_d} \int_{z_1}^{z_2} \frac{g}{T_v} dz\right]$ ，严格地说，使用此式时，不但需要考虑虚温随高度的变化，而且重力加速度也是随高度变化的，这就难以求出积分的数值，但因随高度变化比较缓慢，为了使计算简化，常将它作为常数处理。

若将积分上限延伸到大气上界 $z \rightarrow \infty (p \rightarrow 0)$ ，则可得到 $p = \int_z^{\infty} \rho g dz$ ，它表示任一高度 z 的气压即为该高度以上单位截面空气柱的重量。

由此可知，大气压力主要是由空气密度计算得来的，而密度又由温度、压力同时影响，因此，测量出的大气压力值实际上已经包含了温度的影响，所以其实际作用为使隧道两洞口端形成气流压差，可将其称为超静压差。

4.2 特长隧道适用“超静压差”计算方法的建立

4.2.1 传统“超静压差”计算方法

由于地表在吸热、传热和散热等方面的差异，引起了空气密度和气压的空间分布不均。气压分布的不均匀程度用气压梯度 (G_N) 表示。气压梯度是一个向量，它的方向是垂直于等压面，由高压指向低压，它的大小等于两等压面间的气压差 ΔP 除以其间的垂直距离 ΔN ，即 $G_N = -\frac{\Delta P}{\Delta N}$ 。

单位质量空气所受的力称为气压梯度力，通常用 G 表示，即 $G = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta N}$ ，气压梯度力可分为垂直分量和水平分量两部分，但由于垂直分量几乎和重力相平衡，实际上是水平气压差控制着空气的水平运动。

传统观点认为，隧道两洞口存在超静压差的原因，首先是隧道上空的大气存在水平气压梯度，数值很小，一般约为 1~3 毫巴/111 公里^[8]（相当于 0.882~2.744 Pa/km），且等压线不一定与隧道垂直，因而两洞口间的水平气压差很小。其次是由水平气压梯度产生的大气自然风，绕流过高山时在山前形成正压在山后形成负压，两侧压差是超静压差的主要部分。国外有人提出山前正压为 $+0.9 \frac{\rho v^2}{2}$ ，山后负压为 $-0.3 \frac{\rho v^2}{2}$ 。据此，隧道两洞口的超静压差 $\Delta P = 1.2 \frac{\rho v^2}{2}$ 。

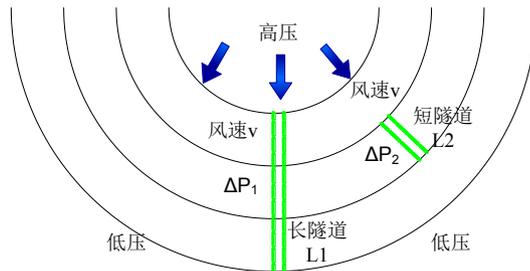


图 1 大气水平气压梯度示意图

Fig.1 schematic diagram of the horizontal pressure gradient

这认识对于一般的隧道可能是合理的，但对于穿越气候分隔带的特长山岭隧道是存在问题的。如图 1 所示，假设有长、短两平行隧道，进出口均处在大气等压面上，相邻等压面距离相等，即气压梯度均匀，此时两隧道的外界自然风风速大小一样，根据 $\Delta P = 1.2 \frac{\rho v^2}{2}$ ，有 $\Delta P_1 = \Delta P_2$ 。但是很显然，长隧道进出口的水平气压差应为短隧道的三倍即 $\Delta P_1 = 3 \times \Delta P_2$ 。

根据现场测试及调研资料，泥巴山隧道及秦岭终南山隧道等特长隧道的进出口外界自然风风速很小的情况下，两洞口的超静压差却可高达几百帕，这是传统认识解释不通的。实际上对于局部地区，由于处于气候分隔带，温度及地表差异较大，导致水平气压差较大。因此可将隧道两洞口处的水平气压差 ΔP 认为是隧道两洞口的超静压差，由大气气流的静压部分决定；大气水平压力梯度产生的地表自然风对隧道内自然风压的影响可认为由大气气流的动压部分决定^[9]。

4.2.2 基于水平气压差的特长隧道“超静压差”计算方法

(1) “超静压差”理论计算方法

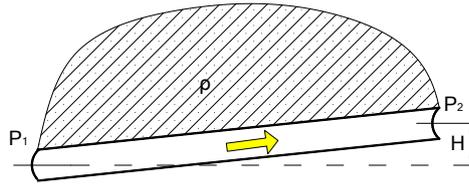


图2 超静压差示意图

Fig.2 schematic diagram of the over static pressure difference

假设隧道两洞口的高差为H，在H不太大的情况下认为大气密度为常量。在静止的大气中，低洞口的大气压力 P_1 与高洞口的大气压力 P_2 的压差称为静压差。

$$P_1 - P_2 = \rho gH \quad (5)$$

当隧道内有由隧道外自然风引起的风流时，必定是：

$$P_1 - P_2 \neq \rho gH \quad (6)$$

将隧道两洞口的气流压差称为超静压差，用 ΔP 表示：

$$\Delta P = P_1 - P_2 - \rho gH \quad (7)$$

此时超静压差是选取高洞口2处的大气压力 P_2 为基准点的，即 ΔP 为低洞口1处的大气压力 P_1 相对于高洞口2处的大气压力 P_2 的超静压差。当隧道内风流有低洞口流向高洞口时， $\Delta P > 0$ ；反之，则 $\Delta P < 0$ 。

(2) “超静压差”适用于无斜（竖）井特长隧道的实用计算方法

在超静压差计算公式（7）中，两洞口处的大气压力 P_1 、 P_2 为绝对静压，可由大气压测量仪器测得；隧道外空气的平均密度取 $\rho_0 = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ ，其中 ρ_1 、 ρ_2 可按式（3）进行计算。在各洞口超静压差已知的情况下，可通过理论公式或数值方法进行计算，得到超静压差作用下的自然风量（速）。

因此，对于无斜（竖）井特长隧道来说，其超静压差为：

$$\Delta P_{\text{超}} = P_{\text{进}} - P_{\text{出}} - \rho_{\text{内}} gH \quad (8)$$

(3) “超静压差”适用于有斜（竖）井特长隧道的实用计算方法

对于特长隧道，由于斜（竖）井的存在，斜（竖）井与隧道洞口之间也存在着超静压差。此时隧道中的自然风流向、大小较为复杂，无法按无斜（竖）井情况进行计算。以下将以一单竖井隧道为例，具体说明在超静压差单独作用下，隧道各区段及竖井内的自然风风量（速）计算方法。

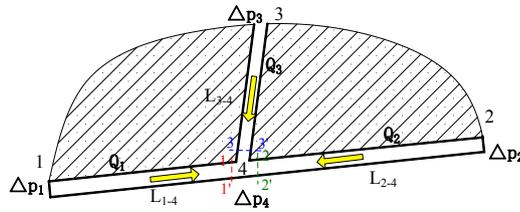


图3 单竖井隧道超静压差示意图

Fig.2 schematic diagram of the over static pressure difference in tunnel with single shaft

现取超静压差的计算基准点为竖井口3处，低洞口1处、高洞口2处、斜井口3处相对于该基准点的超静压差分别为 ΔP_1 、 ΔP_2 、 ΔP_3 ，其中 $\Delta P_3 = 0$ 。在超静压差的作用下，隧道及竖井内空气开始流动，最终形成稳定流，此时隧道内各处的超静压差也将达到一个稳定值。假设竖井底4处的超静压差为 ΔP_4 ，当风流达到稳定时其全压力为 $\Delta P_4'$ （经计算表明： $\Delta P_4' \neq \Delta P_4$ ）。在不考虑汇流及分流压力损失的情况下，1-1'、2-2'及3-3'断面处的全压力均等于 $\Delta P_4'$ ，从而得到两端洞口及竖井口与竖井底的全压力差值（下面简称压差）。当风流 Q_m 流入节点4时，规定风流 Q_m 为正，反之为负。根据风流流动的阻力定律有：

$$\begin{aligned} \Delta P_1 - \Delta P_4' &= (R_1 + R_1') \cdot Q_1 \cdot |Q_1| \\ \Delta P_2 - \Delta P_4' &= (R_2 + R_2') \cdot Q_2 \cdot |Q_2| \\ \Delta P_3 - \Delta P_4' &= (R_3 + R_3') \cdot Q_3 \cdot |Q_3| \end{aligned} \quad (9)$$

式中：

R_m ——风道 m 的摩擦风阻, 它是由沿程阻力系数 λ_m 和风道长度 L_m 、断面积 S_m 和断面周长 P_m 等参数决定的, 有 $R_m = \frac{\lambda_m \rho}{8} \cdot \frac{L_m P_m}{S_m^3}$;

R'_m ——风道 m 的入口局部风阻, 由入口的局部损失系数 ξ_e 和断面积 S_m 等参数决定。当风道 m 为风流进口时, $R'_m = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\xi_e}{S_m^2}$; 当为风流出口时, $R'_m = 0$ 。

在通风网路中, 对于节点 i , 当空气密度变化很小时, 流入节点 i 的风量等于流出节点 i 的风量, 即任意节点 i 的风量代数和为零。对于图 3, 节点 4 有

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0 \quad (10)$$

由式 (9) 及式 (10) 可联立组成一个方程组, 即四个方程求解四个未知数。理论上通过求解该方程组便可求出各段的风量 Q_m , 其中 Q_m 的正负情况反映了风流的方向。但由于该方程组是一个非线性方程组, 且风流 Q_m 的正负待定以及 R'_m 的取值与风流的方向有关, 更增加了该方程组的求解难度。因此可采用试算的方法来求解各段的风量, 现把这个计算方法叙述如下:

节点 4 作为一个中间节点, 风流有进必有出。当风流从节点 m 流入节点 4 时, 由于沿程压力损失, 必有 $\Delta P_4' < \Delta P_m$; 当风流从节点 4 流出到节点 m 时, 必有 $\Delta P_4' > \Delta P_m$ 。因此可以得知 $\Delta P_4'$ 的真实值应介于 ΔP_1 、 ΔP_2 及 ΔP_3 这三个值的最大值与最小值之间, 即有 $\text{Min}(\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3) < \Delta P_4' < \text{Max}(\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3)$ 。令 $\Delta P_4' = \text{Min}(\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3)$, 代入式 (9) 分别对 Q_1 , Q_2 , Q_3 进行计算, 并以一定的步长 (例如 $\Delta p_4^{(n+1)} = \Delta p_4^{(n)} + 0.01$) 递进, 直到 $\Delta P_4' = \text{Max}(\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3)$ 时停止。当时 (q 为求解的控制精度, 为一较小值, 如 0.1), 认为此时得到的 Q_1 , Q_2 , Q_3 便为方程组的解。

由于试算涉及到一个循环的过程, 手算不可能胜任, 因此需编写程序进行求解。对于有多个竖井的隧道, 其原理一样, 但需要多重循环, 循环的重数即为竖井的个数。

5 结论

根据分析计算结果, 可得出以下结论:

(1) 自然风压的影响因素应由三部分构成, 即: 洞外环境因素-隧道洞口间的大气水平压梯度所产生超静压差; 洞口环境因素-外界自然风吹至洞口时产生风墙式压差; 洞内环境因素-隧道内外气温差引起的热位差。

(2) 隧道两洞口的超静压差 ΔP 可认为是隧道两洞口处的水平气压差, 由大气气流的静压部分决定, 可通过测量仪器测得的大气压力处理后, 按公式 $\Delta P_{\text{超}} = P_{\text{进}} - P_{\text{出}} - \rho_{\text{气}} g H$ 得到。对于有斜竖井的隧道, 可以某一洞口作为超静压差的基准点, 然后编程计算出其它洞口相对于该洞口的超静压差。

(3) 超静压差作用下的自然风量 (速) 可通过理论公式或数值方法进行计算得到。理论计算可采用编程试算的方法, 数值方法可采用 FLUENT 数值计算软件。通过上述两种计算方法对带送排风斜井的方斗山右线隧道各进行了 9 种工况的计算, 计算结果表明风量的数值解与理论解较为吻合, 其中风量差值 ΔQ 小于 $15 \text{ m}^3/\text{s}$, 差值比例大部分小于 15%。

参考文献(References)

- [1] 铁道部档案志史中心. 中国铁道年鉴 2011[M].北京: 中国铁道出版社. 2012. (Documentation and history centre of railway ministry. China railway yearbook 2011[M]. Beijing: China Railway Publishing house. 2012.)
- [2] 韩直.公路隧道通风设计的理念与方法[J].地下空间与工程学报, 2005, 1(3):464-466. (Han Zhi. Concept and method of ventilation design for highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2005, 1(3):464-466.)
- [3] 王梦恕. 中国是世界上隧道和地下工程最多、最复杂、今后发展最快的国家[J]. 铁道标准设计. 2003(1): 1- 4. (Wang Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China [J]. Tunnel Construction 2010; 30(4):351-364.)
- [4] 尤鸿波.特长隧道自然风影响因素及计算方法研究[D].成都:西南交通大学, 2010.(You Hongbo. Study on the effect factors and calculation method of natural wind in extra-long tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)
- [5] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风照明设计规范 (JTJ 026.1-1999) [S], 北京: 人民交通出版社, 2000 (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese))

- [6] 杨超, 王志伟. 公路隧道通风技术现状及发展趋势[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4):819-824. (Yang Chao, Wang Zhiwei. Current status and development trend of ventilation technology for highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4):819-824.)
- [7] 郑道访. 公路长隧道通风方式研究[M]. 1. 北京: 科学技术文献出版社, 2000. (Zeng Daofang. Study on ventilation of long highway tunnel [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2000.)
- [8] 周淑贞. 气象学与气候学[M]. 1. 人民教育出版社, 1979. (Zhou Shuzhen. Meteorology and Climatology. [M]. People's Education Press, 1979.)
- [9] 时亚昕. 自然风计算方法及节能通风技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004. (Shi Yaxin Study on calculation method of natural wind and energy saving ventilation technology on tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)

光源可替换标准化 LED 隧道灯在公路隧道照明中的示范应用

——上海市大连路隧道照明 LED 节能改造项目综述

施永泉 张 良 吴海滨

(上海隧道工程股份有限公司)

摘要: 文章介绍了上海市《隧道 LED 照明应用技术指导意见》和《隧道 LED 照明应用技术规范》的编制背景和主要内容, 阐述了上海大连路隧道照明 LED 节能改造项目的实施方案、能耗分析及照明效果, 对光源可替换标准化 LED 隧道灯、驱动电源标准化、Zigbee 无线通讯控制技术、LCP—SH 标准控制协议等关键技术和创新点进行了探讨。

关键词: 隧道; 照明节能改造; 光源可替换标准化 LED 隧道灯; 智能控制系统

Interchangeable and standardized LED tunnel lamp and its application in road tunnel lighting -----Energy-saving LED lighting project of Shanghai Dalian Tunnel

Shi Yongquan, Zhang Liang, WuHaibin

(Shanghai Tunnel Engineering Company)

Abstract: The background and main content of shanghai 《LED tunnel lighting application guide》 and 《LED tunnel lighting application standard》 were introduced in this article. Based on the implementation plan, energy consumption analyze and lighting performance of shanghai Dalian tunnel LED lighting project, the article discussed the key technology and innovation on interchangeable and standardized LED tunnel lamp, standardized LED driver, Zigbee wireless communication and control technology and LCP—SH control protocol .

1 引 言

在公路隧道运营管理中, 24 小时开启的照明系统已成为不可忽视的“能耗大户”, 隧道照明的节能问题已经得到政府部门以及建设管理、科研设计、运营养护等相关单位的高度重视。如何在确保隧道安全运营的基础上逐步降低隧道照明的能耗, 已成为当前建设交通系统“节能减排”工作的一项重要内容。本文将介绍上海市《隧道 LED 照明应用技术指导意见》和《隧道 LED 照明应用技术规范》的编制背景和主要内容, 以及光源可替换标准化 LED 隧道灯、Zigbee 无线调光控制技术、LCP—SH 标准控制协议首次在上海大连路隧道照明系统 LED 节能改造项目中应用的情况, 以期为推动公路隧道照明节能发展提供有益参考。

2 上海隧道 LED 照明应用的现状与存在问题

2.1 上海隧道 LED 照明的应用现状

近几年来, 随着 LED 固态照明(SSL)技术的迅猛发展, 凭借其在节能和寿命方面的巨大潜力和优势, LED 隧道照明技术在交通行业引起了一场研究和应用热潮, 得到越来越广泛的应用, 成为一种不可逆转的趋势。

2009 年 10 月 31 号正式通车的上海长江隧道是全球首条大规模采用 LED 照明灯具的超大特长隧道, 总计安装量达 5874 套。2009 年 11 月通车的上海人民路隧道北线采用了 LED 照明, 南线仍然采用了荧光灯照明。2011 年 10 月通车的上海迎宾三路隧道, 采用了顶部中央布灯连续光带的 LED 照明。



图 1 上海长江隧道照明



图 2 上海人民路隧道北线照明



图 3 上海迎宾三路隧道照明

2.2 隧道 LED 照明存在的问题

LED 在隧道照明应用中还处在发展阶段，依然存在很多问题，如：产品标准的滞后、缺失和混乱，导致了不同厂家生产的 LED 隧道灯形式多样，灯具外形尺寸、光通量、配光设计、功率均有差异，无法实现兼容互换；非标准的驱动电源和厂家自行设计的调光控制系统不仅给隧道照明的维护带来很大的不便，更影响了隧道业主和养护单位使用 LED 照明的积极性。

3 上海市在推广隧道 LED 照明应用所做的工作

上海市城乡建设和交通委员会在 2011 年 3 月成立了由市政工程管理处、公路管理处、上海隧道设计院、复旦大学、上海黄浦江越江设施投资公司、上海长江桥隧建设发展有限公司、上海隧道工程股份有限公司等单位组成的“上海市隧道 LED 照明技术应用指导意见”编制工作小组，通过对国内外 LED 照明技术进行广泛的调研，组织相关厂家试制了标准化 LED 隧道灯，在施工中的长江路隧道浦东矩形段进行了现场试挂及测试后，于 2012 年 4 月完成了《上海市隧道 LED 照明应用技术指导意见》的正式发布。《指导意见》在 LED 隧道灯产品标准化和整体互换性以及电源（控制）装置产品模块化和互换性方面实现了从无到有的突破，做到了不同厂家的隧道 LED 产品整灯以及驱动电源（控制）可以互换。

随后工作小组又对隧道 LED 照明的光源模块化以及控制系统的标准化作了深入的研究，取得了重大成果，于 2013 年 1 月 24 日完成了《指导意见》修订稿的专家评审。修改后的《指导意见》在外形尺寸、安装方式、控制接口、电气接口和光度接口以及产品及工程验收等方面对 LED 隧道灯及其应用提出了具体的指导性意见。按照修改后的《指导意见》研制的隧道 LED 照明灯，在成功实现 LED 隧道整灯及部件标准化的基础上，又进一步实现了光源可替换式以及光源模块化的突破；同时，开发了适合隧道 LED 照明的、公开的智能控制通信协议：LCP—SH 协议（Lighting Control Protocol—Shanghai）。这些成果，填补了国际国内在不同厂家间 LED 隧道灯互换性标准化方面的空白，达到了国际领先水平。

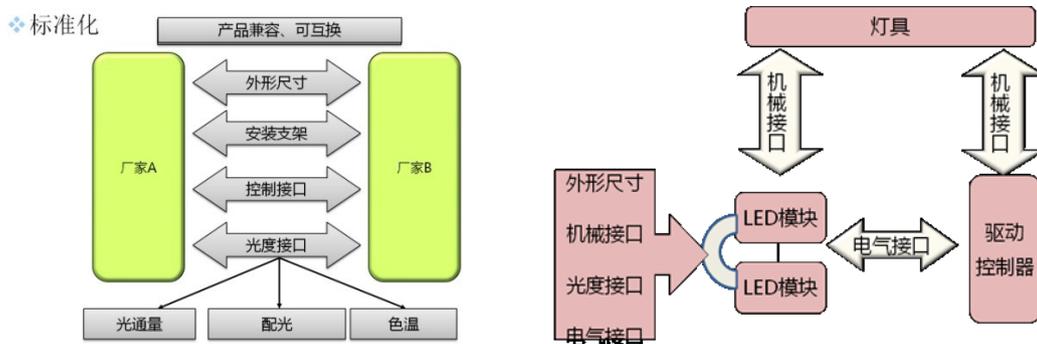


图4 光源模块化以及控制系统的标准化

4 大连路隧道照明 LED 节能改造项目综述

4.1 大连路隧道照明 LED 节能改造项目介绍

上海大连路隧道是连接上海浦西北外滩和浦东陆家嘴金融贸易区的一条重要越江通道，大连路隧道浦西出入口位于大连路霍山路，浦东出入口位于东方路乳山路口，整条线路与地铁4号线毗邻而行。隧道外径11.22米，设计为双向四车道，东线全长2565.88米，西线全长2548.40米，采用盾构法施工，车速为60公里/小时。隧道于2001年5月25日开始建设，2003年9月29日建成通车。

上海大连路隧道照明LED节能改造工程是上海市城乡建设和交通委员会为进一步贯彻落实交通运输部《公路水路交通运输节能减排“十二五”规划》以及《上海市交通运输节能减排“十二五”规划》中“推进绿色照明系统工程”的要求而推动的第一个隧道LED照明改造示范应用项目。

4.2 照明改造的能效分析与照明效果

4.2.1 照明改造的实施情况

大连路隧道基本照明系统原有灯具1592套（其中东线隧道778套、西线隧道814套），每个灯具内为2根36W的T8荧光灯管，在隧道两侧以4.5米的间距对称布置，灯具防护等级为IP65。换装后的光源可替换LED隧道灯仍然为1592盏（采用不重新排设线路的原位替换方式），每盏灯具功率为35W，灯具防护等级为IP65，并能实现无线调光控制和自动巡检功能。改造工程分二期实施，其中东线隧道于2013年1月完成，西线隧道于2013年7月完成。



图5 庞大且笨重的原荧光灯灯具



图6 轻便且易于安装的LED灯具

4.2.2 用电量与节能效果分析

改造后LED照明系统的理论功率仅为原荧光灯灯具的48.6%，如根据实际照明情况对灯具进行调光运行（第一年调光至70%，第二年调光至80%，第三年调光至85%，第四年调光至90%，第四年调光至95—100%），则节电空间更大。改造后基本照明系统5年电费支出约为改造前的40%左右。

表 1 大连路隧道照明系统改造前后功率对比表

基本照明系统	现有荧光灯照明系统	LED 模块化照明系统
规格	2×36W	35W
单灯功率	72W	35W
数量/套	1592	1592
总用电负荷/kW	114.624	55.72
每天所耗用电量/度	2750.976	1337.28
每年所耗用电量/度	1,004,106.24	488,107.2
一年电费支出比较	1	48.6%

4.2.3 改造后照明效果

大连路隧道浦东至浦西段完成 LED 照明应用改造后，课题组对其照明效果进行了综合评估测试，结果如下：



图 7 大连路隧道 LED 照明改造后效果图

从现场效果来看，照明质量非常好，均匀度非常高，无斑马效应，LED 经常出现的眩光效应也控制得非常好。2012 年 11 月 06 日进行了一次照度和调光测试，结果如下：

表 2 右车道地面照度分布测试结果（100%亮度）

灯				灯
85	83.8	83	85.3	87
92.8	92	92	92.8	93.5
95.3	95.3	95	96	96.2
95.6	95	95	95	96
95	94.6	94.3	94.5	95.6
道路中线				
平均照度：92.6 lux			照度均匀度：0.896	

表 3 右车道墙面照度分布测试结果（100%亮度）

43.5	42	38.8	36.2	42	42.7
40.3	39.3	37.5	37.8	38.7	39.3
36.8	35.7	35.4	34.9	39.3	35.9
平均照度：38.7 lux			照度均匀度：0.902		

同时也测试了西线隧道（浦西至浦东段）仍采用荧光灯的隧道段的照明效果：

表 4 荧光灯右车道地面的照度分布测试结果（单位：lux）

51.5	51	51.8	54.3	52	57.3	56.3	54.8
68	66	66.8	66.6	62.5	70	71.8	69.8
57.4	54.6	57.3	55.5	59.7	58.8	59.4	58.2
平均照度：59.6 lux				照度均匀度：0.856			

表 5 荧光灯右车道墙面的照度分布测试结果（单位：lux）

43	42	39.3	39.6	40.1
40.5	41	38.7	38.4	39
34.5	37.2	38.8	36.5	37.5
平均照度：39 lux			照度均匀度：0.885	

经实地测试，发现 LED 照明不仅比荧光灯照明实现了更高的均匀度，而且用 **50%的能耗将照度提高了 55%!!!**

为了验证大连路隧道内的无线调光性能，调光至 65%的亮度时也进行了照度测试，照度分布如下表所示：

表 6 右车道地面照度分布表（65%亮度）

灯				灯
57.4	57.6	58	59.2	59
62.9	62.9	62.5	63.2	63.8
65.2	64.9	64.4	65.2	65.5
64.8	64.6	64.3	64.6	65.2
64.4	64.2	62.2	63.8	64.6
马路中线				
平均照度：62.97 lux			照度均匀度：0.911	

从表 1 可知，100%的亮度时的平均照度为 92.6 lux，调光至 65%时的平均照度为 62.97 lux，实际的调光比例为： $(62.97/92.6) * 100\% = 68\%$ ，与理论符合较好。

2013 年 1 月 21 日又用另一家单位的一台照度计对地面照度进行了复测，测试结果如下：

表 7 右车道地面照度分布表（100%亮度）

灯							灯
90.4	83.7	83.4	85.8	82.6	84.4	86.5	85.4
87.6	97.2	97.2	96.8	94.8	94.9	92.3	98
99.9	98.5	98.1	97.7	95	94.4	97.3	97.9
98.5	97.5	96.8	95	95.6	96.3	96.4	97
马路中线							
平均照度：93.5 lux				照度均匀度：0.88			

与此前测试结果非常吻合，照度结果相差 1%。另外，还使用了成像亮度计进行了亮度测试，结果如下：

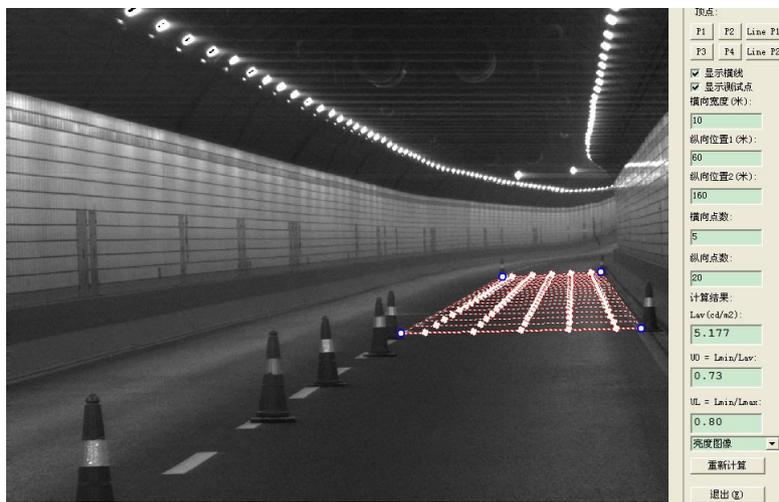


图 8 成像亮度计亮度测试分布图

表 8 成像亮度计亮度测试分析结果

调光等级	100%	90%	80%	70%
亮度/cd/m2	5.07	4.61	4.14	3.69
总均匀度	0.73	0.73	0.73	0.72
平均纵向均匀度	0.80	0.80	0.80	0.80
车道中线纵向均匀度	0.94	0.92	0.92	0.92

由上表分析可得，LED 改造后的大连路隧道在灯 70%~100%光输出的情况下，路面平均亮度值均符合规范要求的 2.5cd/m2，且路面亮度总均匀度为 0.72~0.73，路面亮度平均纵向均匀度为 0.8，车道中线纵向均匀度均达到 0.92 以上，符合《指导意见》中照明指标的相关要求，整体光环境比较好。

4.3 照明改造中的技术创新点

4.3.1 首次在隧道照明中实现了 LED 隧道灯的标准化和不同厂家的互换

本次改造中三个灯具厂家实现了产品在：安装支架、电源接口、调光控制指令集、光源模块、电源规格、灯具外形尺寸等方面的标准化，更换和互换十分便利，降低隧道长期运营维护中的灯具维护、维修和更换的成本。



图 9 三个厂家的灯具混装，光度接口标准化、安装支架标准化、驱动电源与控制协议的标准化

4.3.2 首次在隧道照明中应用了光源可替换标准化的 LED 隧道灯

本次改造实现了光源（不含散热部件）与灯具的分离，实现与传统照明灯具类似的更换光源方式，确保了灯具（不含光源）的使用寿命达到 25 年以上。当部分光源芯片损坏或达到使用寿命

命后，仅需更换相关的光源模组，实现了与传统照明相似的维护方式，降低了成本。

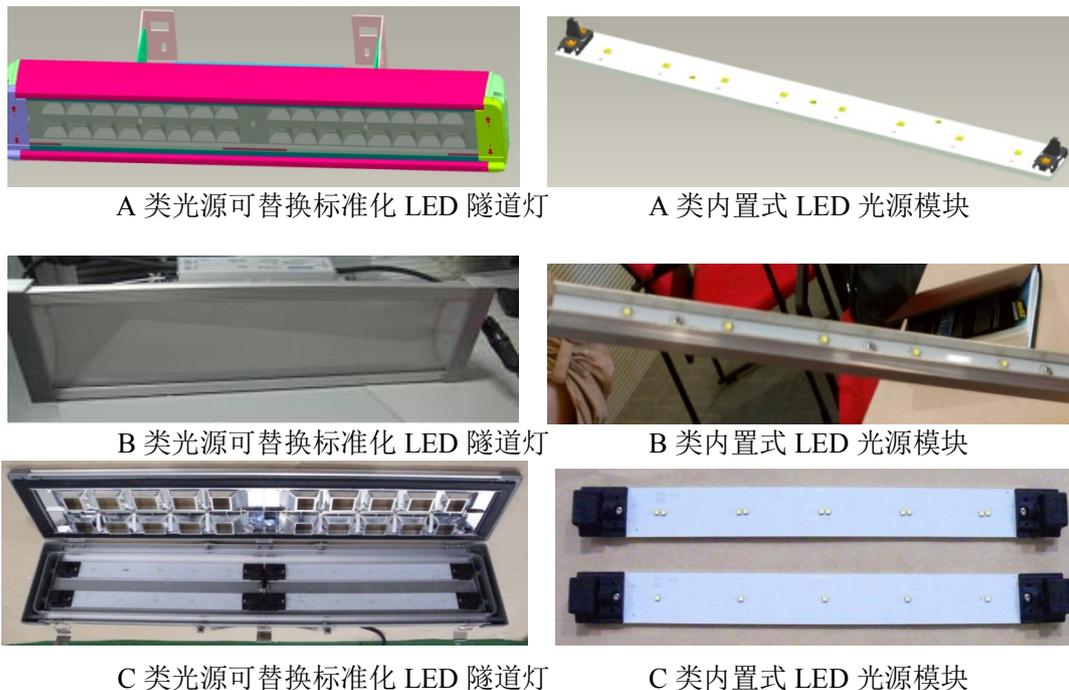


图 10 光源可替换标准化 LED 隧道灯

4.3.3 首次在隧道照明中采用标准化驱动电源

本次改造采用了满足《上海市隧道 LED 照明应用技术指导意见》要求的外形尺寸及安装方式的智能控制驱动电源，首次在隧道照明中应用了实现了单灯控制器与 LED 驱动电源的集成，降低了成本，并实现单灯巡检功能。驱动电源，通用的标准快插接头给安装与更换带来很大的便利。



图 11 智能控制驱动电源

4.3.4 首次在隧道照明的控制系统中采用了 Zigbee 无线通讯控制技术

为了实现智能调光功能，并减少对原控制系统中的控制箱及二次控制线缆等设备进行改造，本项目在隧道照明中首次采用了物联网技术中的 Zigbee 无线通讯控制技术，避免了重新安装控制线带来的不便，有效地降低了安装成本，缩短了施工周期，成功地解决了“不铺设控制线而实现智能控制”的难题，为老隧道照明改造实现智能控制功能积累了经验。

为确保 Zigbee 无线通讯不影响隧道现有机电设备的运行，我们在现场进行了干扰测试，证明其对隧道的现有消防火灾报警、通讯、交通监控系统等没有受到干扰。



图 12 现场测试 Zigbee 无线信号对设备的干扰

4.3.5 首次在隧道照明的控制系统中采用了 LCP—SH 通用控制协议

本次改造中照明控制系统首次采用了《上海市隧道 LED 照明应用技术指导意见》中规定的 LCP—SH 通用控制协议，可根据运营要求对隧道基本照明所有 LED 灯具 10 级以上调光控制。调光控制系统能够以自动、遥控或手动的方式执行命令，支持时控和集中远程控制两种工作模式，且在每种工作模式下均可对每个 LED 隧道灯的亮度实现单播、组播和广播三种控制方式，并具有自动巡检功能，巡检实时状态信息包含：各个 LED 隧道灯或群组灯的亮度等级，LED 隧道灯和电源的故障信息等。每盏灯具均有唯一地址，可实现精细化调光，进一步挖掘节能潜能。开放的通用控制协议 LCP—SH 协议也为今后的控制软件升级提供了便利。

4.3.6 首次实施了不封闭交通条件下的照明改造

由于本隧道为 24 小时运营通车隧道，本次改造不封闭交通，工期短、难度大、安全隐患多。所有改造施工作业均在凌晨 12:00—5:00 隧道交通低流量时临时封闭一根车道施工，不影响隧道夜间通行，白天恢复正常通车。

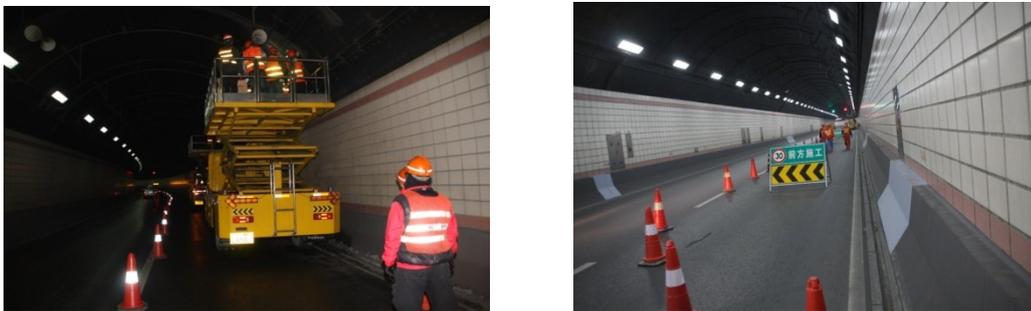


图 13 不封闭交通条件下的照明改造

4.4 照明改造中的节能、环保、安全措施

4.4.1 采用功率远远小于传统荧光灯的 LED 灯具，降低了能耗。

4.4.2 通过智能控制的方式，有效实现了夜间车流量低谷时适当降低隧道照明亮度（在规范允许范围），不仅实现节能、延长灯具寿命，还避免了夜间照明亮度过高照成的过往司机视觉的不适。

4.4.3 通过智能控制的方式在 LED 灯具安装初期亮度超过设计时，通过降低功率调光的方式降低亮度，有效避免传统荧光灯具在使用初期过度照明造成的电能浪费。在隧道运营期 LED 逐渐光衰阶段按照规范要求逐步调光亮度，实现最优的照明效果。

4.4.4 使用无汞的 LED 光源，更加环保。

4.4.5 使用光源模块化灯具，光衰超过设计要求后（5 万小时）只需要更换光源模块，灯具本体铝型材，玻璃面罩等材料均可继续使用，以最小的资源损耗来考虑照明系统的更新和维修。

4.4.6 使用无线调光技术节省了管材，线材，车辆台班，人工等资源。

4.4.7 控制系统中使用“心跳检测”技术，随时监控灯具工作状况，如果灯具因为意外“脱网”，或者整个控制系统失效，现场灯具会自动满功率输出，以保证隧道现场照明。

5 结束语

在上海市《隧道 LED 照明应用技术指导意见》基础上升级完善的《LED 隧道照明应用技术规范》已通过了上海市建设交通科技委员会的技术审查与上海市城乡建设和管理委员会的审核，于 2014 年 5 月 9 日被批准为上海市工程建设规范，统一编号为 DG/TJ08-2041-2014，自 2014 年 8 月 1 日起实施。

上海大连路隧道照明 LED 节能改造工程无论在现场照明效果还是节能效率上都取得了良好的示范效应，该项目的成功实施，不仅成功地验证了《LED 隧道照明应用技术规范》中的各项技术指标，而且为上海市在隧道照明中推广应用 LED 技术、推动节能减排工作发挥了重要作用。大连路隧道照明 LED 节能改造完成后，上海市新建和改造的隧道照明将全部采用标准化的光源可替换 LED 隧道灯以及 LCP—SH 控制协议的智能控制系统。这也标志着上海隧道 LED 照明已经走出原有的“厂家定制的非标准个性化产品时代”，全面进入了成熟的“标准化的光源可替换和智能控制时代”。

参考文献(References)

- (1) 姜允肃,刘千伟等.长江隧道 LED 照明工程[J].中国照明电器 2009 年第 1 期.
- (2) 沈蓉.LED 调光控制在人民路隧道照明中的应用[J].中国市政工程 2010 年 S1 期.
- (3) JTJ26.1-1999, 公路隧道通风照明设计规范.
- (4) 上海市隧道 LED 照明技术应用指导意见.
- (5) 上海市建设规范道路隧道设计规范 DG/TJ08-2033-2008.

隧道入口段复合照明节能试验研究

吴桂林¹, 肖尧^{2*} (通讯作者), 梁波³, 潘国兵³, 何世永², 赵宾¹

(1. 云南省公路开发投资有限公司, 昆明, 650200; 2. 重庆交通大学, 土木建筑学院, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学, 山区桥梁与隧道工程国家重点实验培育基地, 重庆 400074)

摘要: 在隧道照明领域, 充分利用自然光对隧道照明的增效作用, 降低人工照明的能耗, 是实现隧道入口段照明节能的有效途径之一。本文结合云南保腾高速公路鹿山隧道内自然光、以及自然光与 LED 灯复合照明下隧道不同深度路面照度的实测数据, 通过与规范规定值的对比分析研究, 得到了隧道入口段各区段自然光、LED 灯复合照明下隧道照度分布规律, 对节能效果进行了评价。为今后进一步合理利用自然光、人工光源进行隧道复合照明节能研究提供参考。

关键词: 复合照明; 隧道入口段; 隧道节能照明; 路面照度

Experimental Study on Energy Saving of Composite Lighting in Tunnel Entrance Section

Wu Guilin¹, Xiao Yao² (corresponding author), Liang Bo³, Pan Guobing³, He Shiyong²

(1. Yunnan Highway Development & Investment Co., Ltd.; 2. Chongqing Jiaotong University, School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing, 400074; 3. Chongqing Jiaotong University, State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing, 400074)

Abstract: In the tunnel lighting field, make full use of the synergism of natural light effect on tunnel lighting, reduce energy consumption of artificial lighting is one of the effective ways to realize tunnel lighting energy saving in entrance section. This paper base on different depths road illumination measured in Lushan tunnel which under the condition of natural light, natural light and LED lamps composite lighting, contrast measured data with the standard values, get the distribution law of tunnel illumination of composite lighting, evaluate its energy saving effect, at last provide the reference for tunnel lighting energy-saving in reasonable use natural light and artificial light composite lighting.

Keywords: composite lighting; tunnel entrance section; tunnel energy saving; road illumination

1 引言

隧道洞内外亮度的巨大差异, 使得司乘人员进入隧道将出现“黑洞”现象, 影响行车安全。为了减弱该现象对行车安全的影响程度, 隧道入口段不得不加大布灯密度或增大灯具功率, 提高隧道入口段亮度, 从而缩小洞内外亮度的差异。增大人工照明, 一方面避免了“黑洞”现象, 保证了行车安全, 另一方面却给隧道运营造成了极大的经济负担, 阻碍了隧道建设的可持续发展。

太阳是一种取之不尽、用之不竭的绿色能源, 通过一定的技术方法实现隧道入口段的复合照明, 使自然光替代隧道内部分人工照明光源, 从而降低隧道入口段的照明能耗, 实现隧道运营的节能减排。本文依托云南保腾高速公路鹿山隧道, 通过对隧道路面照度的测量, 并将测量结果与规范规定值进行对比, 以期得出自然光与人工光源复合照明下的节能效果, 为日后合理利用自然光、人工光源进行隧道复合照明节能研究提供参考

2 试验概况

2.1 试验时间和地点

本次试验时间为 2013 年 1 月 20 日 9:53~10:45。试验地点为云南保腾高速公路鹿山隧道腾冲至保山方向进洞口区域。该隧道位于北纬 24.9°, 东经 98.6°, 全长 221m, 路面宽 8.75m, 高 7.05m, 左右检修道各 1.075m, 设计时速 80Km/h。隧道地属热带季风气候, 平均气温 14.8℃, 冬季干燥, 日照时间长, 夏季多雨潮湿。

作者简介: 吴桂林 (1957-), 男, 云南人, 高级工程师, 主要从事公路工程的建设管理工作, E-mail: guilinwucd@126.com。

通讯作者: 肖尧 (1990-), 男, 重庆梁平人, 在读硕士, 主要从事隧道照明节能研究, E-mail: 894531591@qq.com。

基金项目: 云南省交通厅科技项目 (云交科 2010 (B) 16-B); 教育部博士点专项基金项目 (2011552211003); 交通运输部应用基础研究项目 (2013319814030); 交通运输部应用基础研究项目 (2014319814260); 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地开放

表 1 标准天空模型

类型	天空亮度分布	类型	天空亮度分布
Type-1	CIE 标准全云（近似值），朝向天顶亮度发生急剧渐变，但各方位相同	Type-2	全云天空的亮度发生急剧的渐变，朝向太阳的一侧稍亮
Type-3	全云天空的亮度发生急剧的渐变，但各方位相同	Type-4	全云天空的亮度发生急剧的渐变，朝向太阳的一侧稍亮
Type-5	均匀天空	Type-6	部分存在云的天空，朝向天顶无渐变
Type-7	部分存在云的天空，太阳的周边较亮	Type-8	部分存在天空，朝向渐变，但有明显的光环
Type-9	部分存在云的天空，看不见太阳	Type-10	部分存在云的天空，太阳的周边亮
Type-11	白色晴空天空，有明显的光环	Type-12	CIE 标准晴空天空，清澈大气
Type-13	CIE 标准晴空天空，浑浊大气	Type-14	无云浑浊天空，大范围光环
Type-15	白色浑浊晴空天空大范围光环		

2.3 试验方法

试验采用双车道三点测试法，即隧道断面上左右车道中心各一个测点和道路中心一个测点，共计 3 个测点。按照该测试法用 TES-1336A 数字式照度计每隔 1m 间距测量一个断面，测量示意图见图 1。

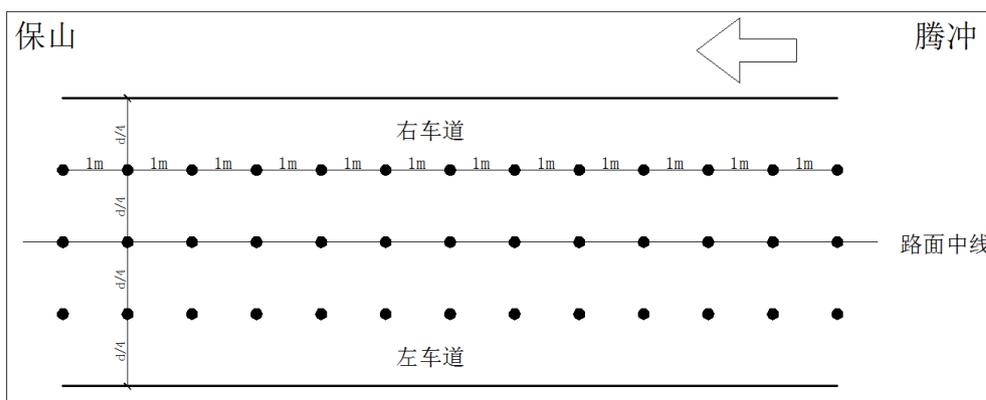


图 1 隧道路面照度测量布点示意图

2.4 试验区段

依据《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1-1999) “ $D_{th}=1.154D_s-(h-1.5)/\tan 10^\circ$ ” (D_{th} : 入口段长度; D_s : 照明停车视距; h : 洞口内净空高度) 计算可得鹿山隧道入口段长度为 71 米，因此本次试验测试区段为隧道洞口处至隧道洞身 71 米之间区段。

2.5 试验工况

本次试验工况如表 2 所示。

表 2 试验工况表

工况	光源
工况一	自然光
工况二	自然光+LED 灯复合照明

3 试验数据整理

采用上述试验方法可得自然光照明以及自然光与 LED 灯复合照明下试验区段各测试点照度值，见图 2、图 3。

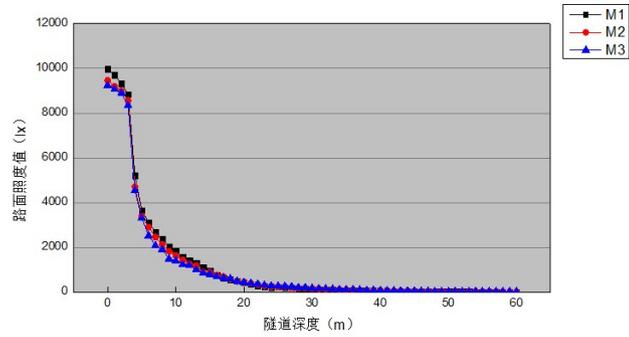
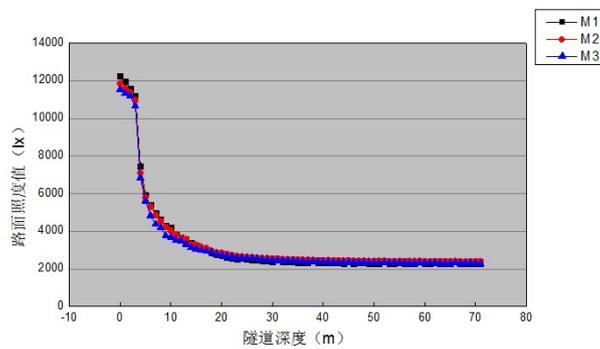


图 2 自然光照明下隧道路面各测试点照度值
M1—隧道左车道中线照度值；M2—隧道中线照度值；
M3—隧道右车道中线照度值

图 3 自然光与 LED 灯复合照明下隧道路面各测试点照度值



M1—隧道左车道中线照度值；M2—隧道中线照度值；
M3—隧道右车道中线照度值

通过对数据的整理，利用有关照明理论公式计算分别可得自然光照明下、自然光与 LED 灯复合照明下隧道入口段路面平均照度、路面照度总体均匀度和路面照度纵向均匀度，见表 3。

表 3 隧道照明质量指标

光源	平均照度	总体均匀度	纵向均匀度
自然光	1002.0lx	0.004	0.0007
自然光+LED	3274.2lx	0.690	0.2000

4 节能分析

依据《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1-1999)有关规范标准，结合鹿山隧道实际情况，隧道入口段亮度折减系数 k 取值 0.025，洞外亮度 L_{20} (S) 取值为 3000cd/m^2 ，故鹿山隧道入口段所需满足规范亮度 $L_{th}=k \times L_{20}$ (S) $=0.025 \times 3000=75\text{cd/m}^2$ ，换算成照度为 1125lx。将所求得的规范值分别与自然光照明、自然光与 LED 灯复合照明照射下隧道路面照度值相对比，对比结果如图 4、图 5 所示。

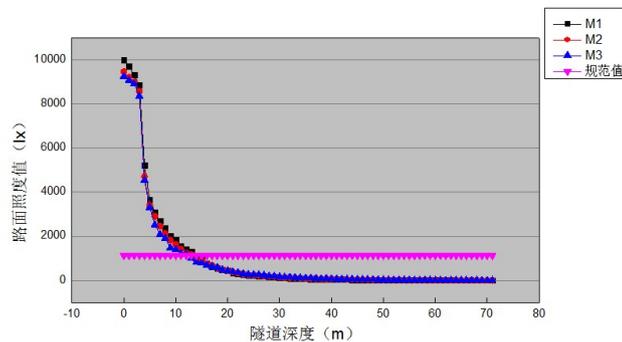


图 4 自然光照射下隧道路面照度值与规范照度值对比图

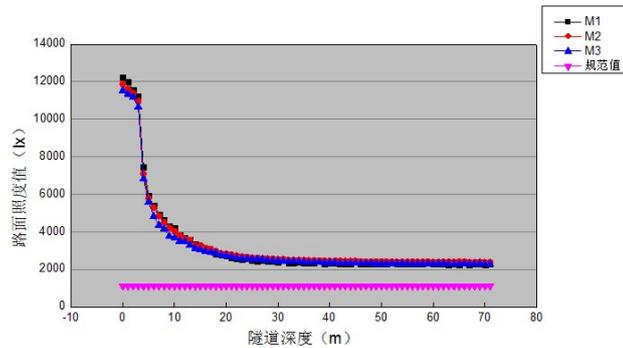


图5 复合照明照射下隧道路面照度值与规范照度值对比图

由图4、图5可以看出：

1. 隧道深度 $<15\text{m}$ 时，自然光和复合照明照射下隧道路面照度值都大于经由规范求得路面照度值。由此可见，阳光明媚天气下，该试验隧道进洞口至隧道深度 15m 区段在白天无需LED灯照明。白天关闭该区段多余照明，有利于在不损害隧道照明质量的前提下实现隧道照明的节能减排。

2. 当 $15\text{m}\leq$ 隧道深度 $<38\text{m}$ 时，单纯依靠自然光照明已无法满足经由规范求得路面照度 1125lx ，但自然光与LED灯复合照明下隧道路面照度又远大于经由规范求得路面照度 1125lx 。由此可见，该区段有较大的节能空间。以隧道深度 18m 路面中线处为例，自然光照射下该点照度值为 576lx ，满足规范要求值 51.2% ，剩下 48.8% （ 549lx ）需由人工照明提供。然而试验隧道该点LED提供照度为 2390lx ，超过该点所需人工照明 335% ，造成过度照明，增大了隧道照明耗能。

3. 隧道深度 $\geq 38\text{m}$ 时，自然光强度随着隧道深度的增加而逐渐减弱，对隧道路面照度增效作用随之减弱，尤其是当隧道深度 $>61\text{m}$ 时，自然光照射下隧道路面照度不足 10lx ，由此可见该区段采用自然光与LED灯复合照明意义不大。

5 结论与展望

5.1 结论

通过对鹿山隧道入口段复合照明的试验研究，得出如下结论：

1. 阳光明媚天气下，隧道洞口至隧道洞内 15m 区段白天无需人工照明即可满足隧道照明规范要求值；

2. 在 $15\text{m}\leq$ 隧道深度 $<38\text{m}$ 区段，应充分利用自然光辅助人工照明，避免过度照明带来的能源损耗；

3. 隧道入口段深度 $\geq 38\text{m}$ 区段，自然光对隧道路面照度影响微弱，采用自然光与LED灯复合照明意义不大。

5.2 展望

自然光由洞外直接照射进洞内一定距离，再经隧道内壁的多次反射增大对隧道内部照明的影响范围，充分利用自然光对隧道照明的增效作用能够实现隧道的节能减排。但自然光的每一次反射都不可避免造成自然光光强的衰减，该衰减不利于隧道路面照度总均匀度和纵向均匀度（文中表3也已表明）。由此可见，直接利用洞外进入的自然光再加人工照明实现的复合照明不够妥善。目前有关科研人员致力于光导管的研究，通过介质将自然光引入隧道洞内，再经漫射器均匀的照射隧道内部。该技术既利用了自然光这一免费绿色能源，又避免了对隧道路面照度均匀度的不利影响。因此，光导管在隧道入口段复合照明节能方面有着良好的应用前景。

参考文献 (References)

[1] 李靖, 宋燕铭, 刘雄. 隧道出入口延伸照明段落节能方法研究[J]. 公路工程, 2012 (02) :57-59

[2] B.Liang, G.B.Pan, Y.H.Pi. Energy-Saving experimental study on reflective material auxiliary tunnel lighting based on visual effect. Advanced

Material Research, 2012: 1193-1196

- [3] 季佳俊. 三车道大断面公路隧道照明节能参数优化研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2012
- [4] CIE S 011/E-2003, Spatial Distribution of Daylight. CIE Standard General Sky [S]. Vienna: CIE Publication, 2003
- [5] JTJ026.1-1999, 公路隧道通风照明设计规范[S] . 北京: 人民交通出版社, 1999
- [6] 梁波, 潘国兵, 皮宇航, 崔璐璐. 反光材料辅助隧道节能照明的视觉功效试验研究[A]. 中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会[C]. 成都: 中铁西南科学研究院有限公司, 2012(10): 243-245
- [7] JTG D70-2004, 公路隧道设计规范[S] . 北京: 人民交通出版社, 2004

运营隧道感温火灾自动报警系统状态参数在线评估

杜新民¹, 吴海滨², 张良³, 施永泉³, 王文青⁴, 闫治国⁵

(1. 森首光电科技有限公司, 上海 200231; 2. 上海大连路隧道建设发展有限公司, 上海 200082; 3. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200082; 4. 公安部沈阳消防研究所, 辽宁 沈阳 110034; 5. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为了进一步提高上海重要交通隧道的安全运营水平, 确保隧道专用的线型光纤火灾自动报警系统始终保持在正常的工作状态, 本文结合光纤光栅测温技术的特点, 利用实际运行时所采集的温度大数据, 实时在线评估自动报警系统的灵敏度, 稳定性, 火灾报警阈值等特性。从技术上保证了关键隧道设施始终处于火灾报警系统的保护之下。

关键词: 光纤光栅; 火灾报警; 隧道运营;

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号:

1673-0836(2010)02-1000-03

On-line Evaluation of FBG based Fire Alarm System in Operating Tunnel

Du Xinmin¹, Wu Haibin², Zhang Liang³, Shi Yongquan³, Wang Wenqing⁴, Yan Zhiguo⁵

(1. Sensorlead Inc., Shanghai 200237, China; 2. Construction and Development of Dalianlu Tunnel, Shanghai, 200082, China; 3. Tunnel Engineering Inc., Shanghai 200082, China; 4. Shenyang Fire Research Institute, Liaoning Shenyang 110034 China; 5. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to continually improve fire safety of urban traffic tunnel, a new method in evaluating the fire alarm system's sensitivity, stability and fire alarm threshold is investigated based on temperature data collected by quasi-distributed FBG (fibre Bragg grating) fire detectors in an operating tunnel. The results from Dalian tunnel, Shanghai, would be a useful for all similar road tunnels.

Keywords: FBG; fire alarm; operating road tunnel

1 引言

上海是国内最早开发建设水下交通隧道的城市, 部分越江隧道的服役期已经进入第二个十年。与上海城市建设同步, 隧道设施也跨越了高速建设阶段, 重心逐步转向科学运营和维护管理, 因此隧道的安全运营水平越来越为各级政府、以及设计、建设和管理单位所重视。火灾安全是其中的重中之重。

纵观多年运营管理实践发现: 虽然上海越江隧道已普遍部署了火灾自动报警系统 [1-3], 但在系统的稳定性, 火灾报警灵敏度, 误报率等方面仍存在不尽人意之处。特别是隧道运营方普遍不具备对运行中的火灾自动报警系统的整体可靠性进行在线评估的技术手段, 无法确保该系统始终处于正常的工作状态。这一困难导致某些火灾自动报警系统不能全天候工作, 往往会平时误报高企, 当火灾突发时却难以及时响应, 因此需要一种能够对系统的运行状态进行在线评估的可靠方法, 使得隧道运营单位或消防设施评估单位能及时发现问题, 修正参数, 维修保养, 甚至大修更换。

欧美各国的隧道交通发展较早, 就运营隧道中装备的自动火灾报警系统的误报率, 灵

作者简介: 杜新民, 男, 博士, 主要从事光电子传感系统等领域的科研工作。E-mail: 13122282612@163.com

基金项目: 公安部 2012 年应用创新项目

卞

失火的条件下60 秒钟内启动报警。为了检验报警系统的响应质量,不同的标准采用了不同的实验火灾功率,如德国RABT [4] 规定5 MW 试验火功率,而奥地利的RVS9.282 标准[5]已经开始使用更能够严格的1.5 MW试验火功率来检验线型感温火灾报警系统的各种性能。针对虚警误报特性瑞士标准严格规定自动火灾系统的误报率应该< 1/年·2 公里隧道[6]。除了常规点火验证性实验外,尚未见到在线评估方法的报告。

本文以上海大连路越江隧道为对象,统计分析准分布式光纤光栅火灾自动报警系统在实际运行中所采集的温度大数据,提出了针对部分重要性能的在线评估方法。该方法能弥补隧道火灾自动报警系统运营中存在的重大隐患,为重要隧道的火灾安全提供完整的,而不是碎片化的,解决方案。

2 上海大连路隧道工况简介

大连路隧道于 2003 年 9 月正式通车,总长约 2.5 公里。隧道为双孔双向四车道盾构式,车道宽 3.75 米,高 4.5 米。设计车速为 60 公里/小时。

火灾自动报警系统采用准分布式光纤光栅感温火灾探测器。系统主要包括传感器链路、传输光缆和光纤光栅解调仪三大部分,如图1所示。一组,约20只具有不同反射中心波长的光纤光栅首尾相连,串接成一条火灾探测器链路,集成多条链路形成准分布式光纤光栅火灾报警系统。

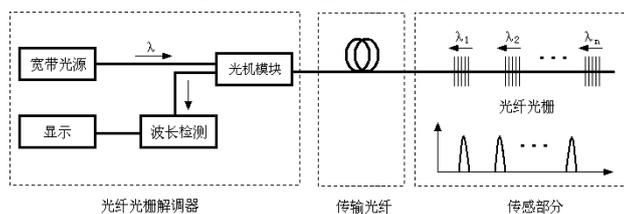


图1.准分布式光纤光栅火灾报警系统的结构框图。

Fig. 1 Scheme of quasi-distributed FBG fire alarm system.

大连路隧道的探测链路布设于行车道和电缆通道顶部。光纤光栅探测器间隔 10m, 200 米为一条探测链路,使用 1 个光学通道,监测覆盖区域平时的温度和火灾现场信息。探头链路布置见图 2。链路由多心主干光缆直接接入置于工作井内的光纤光栅解调仪。

隧道共有 140 个消防分区。全隧道所有探头以 1 Hz 的采样速度并行测温。

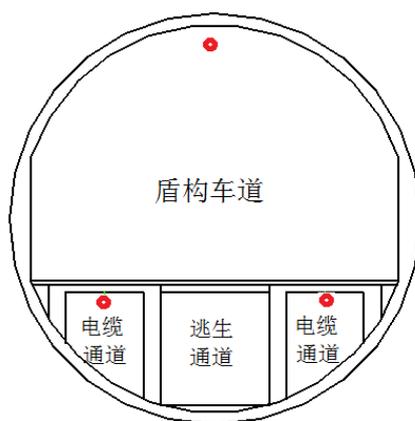


图 2. 火灾报警探头链路（红色圆点）隧道截面布置图。

Fig.2 Arrangement of fire alarm detectors in the tunnel.

3 报警系统稳定性和灵敏度评估

稳定性常常是指测量仪器的计量特性随时间不变化的能力。为了确保隧道发生火灾时系统都能迅速报警并即刻进入火灾工作模式。线型火灾自动报警系统必须每时每刻处于紧张的测温状态,不允许出现丝毫停滞或跳变。大连路隧道内共安装有 642 个分立的光纤光栅温度探头,每一个探头均以 1 Hz 的采样速度同步测温。每一个测量值与实际温度之间存在测量误差,测量误差

随时间的变化关系是系统稳定性的定量表达。显然，温度测量值的不稳定有可能触发火灾报警，称为仪器噪声误报警。减小仪器噪声会有利于消除这类误报，同时提高测温的灵敏度和可靠性。

实际采集并记录了 2014 年 2 月 11 日 9 时 48 分前后大连路隧道的全程各点温度。分别选择处于隧道入口，中部和出口处各 1 只探头。取任意 60 秒数据流，统计标准差和最大偏差（即 60 秒内温度最大值和最小值之差），用于评估系统噪声，结果见表 I。噪声评估选在温度较稳定时段进行，在正常运行条件下，短时间（60 秒）内隧道温度测量值的波动主要归因于仪器噪声，而温度的真实波动可以忽略不计，所以可作为感温火灾报警系统稳定性参数。以大连路隧道为例，噪声标准差小于 0.15 °C；最大温度偏差不大于 0.6°C。

表 I. 分别选取处于隧道入口，中部和出口处各 1 只探头，随机取 60 秒数据统计标准差和最大偏差值 ($T_{\max}-T_{\min}$)。

Table 1. SD and $T_{\max}-T_{\min}$ of temperature data during any 60 seconds collected by detectors at entrance, middle and exit of the tunnel, respectively.

60 秒	入口	中部	出口
标准差 (°C)	0.14	0.11	0.08
MAX-MIN (°C)	0.6	0.5	0.4

实时温度监测发现：隧道自身的温度随时间可能产生波动。例如，当车辆进入隧道时必然携带外界环境的温度，所以行进的车辆会引发隧道内稳定温度场的微扰动，在正常运行条件下这种温场扰动可被看成温度自然波动，其波动周期远大于系统噪声的周期。随着车辆深入隧道内部，运行车辆的温度逐步接近隧道内的固有温度，所以，实际观察发现，隧道出口处所测量的温度自然波动较小（图 3）。

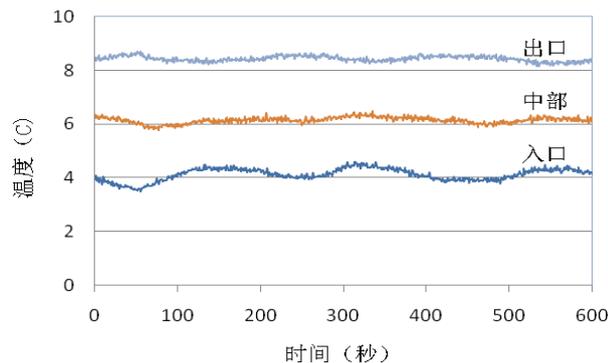


图 3. 在正常运营隧道的入口，出口和中部感温探头的测量温度 - 时间曲线。

Fig. 3 Temperature vs. time of detectors at tunnel's entrance, middle and exit, respectively.

任意选取 2014 年 2 月 11 日 9 时 48 分前后大连路隧道入口，中部和出口处探头较长时间段（600 秒）的温度数据，统计标准差和最大温度偏差发现，入口处标准差 0.23 °C。温度偏差为 1.1°C（表 II）。

表 II. 分别选取处于隧道入口，中部和出口处的 1 只探头，随机选 600 秒数据流统计标准差和最大偏差。

Table 2. SD and Max-Min of temperature data during any 600 seconds collected by detectors at entrance, middle and exit of the tunnel, respectively.

600 秒	入口	中部	出口
标准差 (°C)	0.23	0.11	0.10
MAX-MIN (°C)	1.1	0.7	0.5

当由于某种原因，隧道内的温度波动较为剧烈时的也可能触发差温报警，称为隧道温度波动误报警。除了车辆通行导致的隧道温度波动之外，通风条件变化，天气变化，季节变化等等也

会导致隧道内的温度波动。长期不断地积累隧道的温度分布数据，掌握隧道温度波动的统计规律如波动的幅值和周期等，可用于评估火灾自动报警系统的长期稳定性。

4 火灾报警阈值区间的科学选取

感温型火灾探测器借助连续不断地采集隧道全线各个点的温度而后交由软件判别火灾。如果仅以是否达到某一预设温度值作为火灾发生与否的判据，称为定温火灾报警模式。大量试验表明，一般在隧道火灾发生的早期，环境温度，即使是火灾正上方顶部的温度也很难在短时间内达到并触发高温阈值，所以为了在火灾规模较小或在早期阴燃状态下及时触发火灾报警，一般采用温升梯度是否达到某一预设值作为火灾发生与否的判据，称为差温报警模式。与定温报警相比较，差温报警模式更加灵敏，更加可靠，并且不必随季节气温的变化不断修改报警阈值。大连路隧道装备的火灾自动报警系统采用差温报警为主的差/定温复合报警模式。

火灾自动报警系统的灵敏度，报警响应时间以及误报率等关键技术指标都与状态判别所采用的阈值有关。降低火灾报警阈值无疑会提高报警灵敏度，缩短报警响应时间，但同时造成系统抗干扰能力恶化，严重时会导致虚警误报率高企，危害隧道的安全运营。反之，提高报警阈值自然会减少误报，但对真实火灾的响应能力可能被弱化甚至完全丧失，尤其在火灾发生早期规模尚未充分发展时，会造成延迟报警，贻误救灾时机。如何针对运营隧道合理地选择报警阈值成为困扰隧道养护运营单位的棘手问题。

火灾报警阈值的选取至少与以下因素有关：

- 系统的噪声水平：仪器测量噪声，灵敏度，跳变，光源稳定性等
- 隧道自然环境条件：气候，季节，风力，风向等；
- 隧道运营参数，车流量，车辆种类，通风等；
- 火灾报警探头的工作状态：探头封装结构，设备老化程度，甚至积灰厚度等因素。

从以上分析可知，改变系统的报警阈值将影响多个目标的达成。采用多目标优化分析可以优化火灾报警阈值，然而实际隧道工况如此复杂，很难通过解析法得到最优解。我们针对大连路隧道开发了确定阈值的一般方法。首先针对给定隧道给定时段的实测特征量进行统计分析，给出火灾报警阈值的可选择区间[7]。

当隧道正常运营时，探头所测量的温升梯度是随机变化的特征量，服从一个数学期望为 μ ，标准方差为 σ 的正态分布。概率论的观点认为：从正态分布的母体中抽取一个个体测定其特性量，该个体的测定值大于 7σ 或小于 -7σ 的可能性只有 10^{-9} 。如果探头测温采样速度为 1Hz，出现大于 7σ 的概率应小于 1 次/年。这是自动火灾报警系统所能接受的最大误报率。所以可以将 7σ 对应的温升梯度值定义为差温报警阈值区间的下限。当探测器测定的温升梯度高于阈值下限时可以判断为正常运行隧道中发生的不可能事件，即火灾。

众所周知，每一个探头所处的隧道自然环境不同，各有其特定的 σ 值。计算大连路隧道全线所有探头的 σ ，将所有的 σ ， 3σ 和 7σ vs 探头的位置（里程）作图，得到大连路隧道的火灾报警阈值下限分布曲线（图 4 中的 7σ 曲线）。入口部分 σ 值较高。实际设定的火灾报警阈值应该在 7σ 曲线以上。

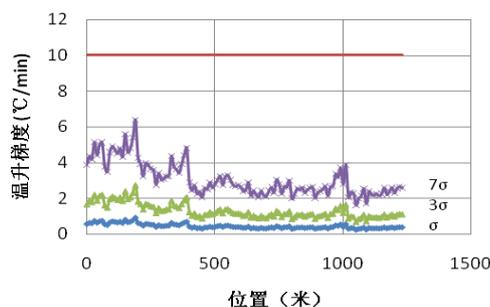


图4，大连路隧道的阈值选取区间，下限为隧道全线 7σ 分布曲线，数据引自 2014 年 2 月 11 日 9 到 10 点隧道全线所有探头的温度。上限为验证性点火实验确定的最大温升梯度。

Fig. 4 Threshold should be choose between upper and lower limit value. The lower limit: 7σ for each detector, and upper limit: maximum temperature gradient measured from a fire experiment in the tunnel.

增加阈值有利于防止虚警误报，但并非越高越好，过高会造成系统迟钝，甚至漏报警。建议阈值取值上限定义为：在规定隧道，规定火灾规模，规定时间内隧道顶部可能达到的最大温升梯度。为了得到上限值必须实地展开验证性火灾实验。大连路隧道试验确定在 1 MW 火灾工况下，60 秒之内，隧道顶部达到的最大温升梯度值为 $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，所以该值定义为大连路隧道的火灾报警阈值上限。阈值选取区间是隧道的特征参量。

选取区间确定后，最终选定阈值还应综合考虑以下三大因素：1) 该隧道发生火灾的经济、政治和社会危害性；2) 隧道运营环境的稳定性；3) 该隧道对火灾虚警误报的容忍度。例如：对那些火灾危害影响较大，损失较大，而营运环境较为稳定的重要隧道，报警阈值应该选在区间较接近下限的位置，同时必须对误报警有较大的宽容度。依据大连路的具体情况统一选择 $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 为实际使用的火灾报警阈值。

值得注意的是，隧道各个区域的阈值下限不同，故隧道全线统一报警阈值似不甚合理，尤其是隧道较长，工况较为复杂时更加如此。准分布式光纤光栅技术允许给每个火灾探头覆盖的小区域设置特定的火灾报警阈值，这样可以使得准分布式光纤光栅自动报警系统更趋科学合理。

5 温度响应评估与移动火灾判别

大连路隧道为市内公共交通隧道，一般不允许大型载重车辆通行，所以隧道内温度自然波动应比上海长江隧道及外环隧道小。在正常运行情况下火灾报警探头测得的温升梯度一般不大于 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。但实际运行发现如果将火灾报警阈值设定在 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，系统偶尔会发生误报警。例如在系统试运行期间，2014 年 2 月 21 日 0 点左右，发现过一系列探头温升梯度达到或超过 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的情况。同一链路上的探头依次记录下温度异常升高（图 5）。

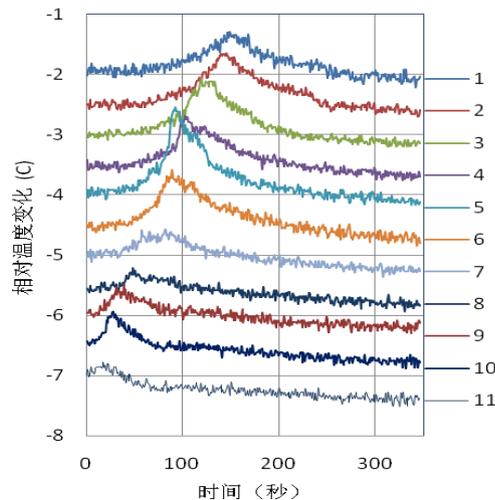


图 5. 2014 年 2 月 21 日 0 点左右大连路隧道西线一系列探头探测到的温度变化。一连串探头依次为 1 到 11 号。当晚视频记录发现一辆隧道侧墙清洗车沿隧道工作，缓慢移动。纵坐标显示实测的相对温度变化。

Fig. 5 Temperature relative variation collected by a serials detectors, #1 to #11, in the tunnel at midnight, 2014/02/21. Video camera found that a huge tunnel cleaning vehicle slowly passed through the tunnel at the moment.

图中探头编号沿着隧道出口方向由小到大排列。调阅当晚视频记录证实当时有一辆隧道侧墙清洗车沿隧道工作，缓慢移动。当其移近某探头下方时会引起该探头的温度升高，车辆离开后温度逐渐下降。隧道内所有探头都对隧道侧墙清洗车引起的温升都有所响应，其中一部分触发报警。

假设探头温升梯度出现最大值的时间即侧墙清洗车经过该探头正下方的时间，做报警时间-对应的报警探头里程关系图（见图 6）。实际报警点可以拟合成为一条直线，直线的斜率表征隧道侧墙清洗车工作时移动的速度，约为 5.4 km/hr 。由图可见，隧道中某些探头的温升梯度并未达到

火灾报警阈值，所以并未报警。

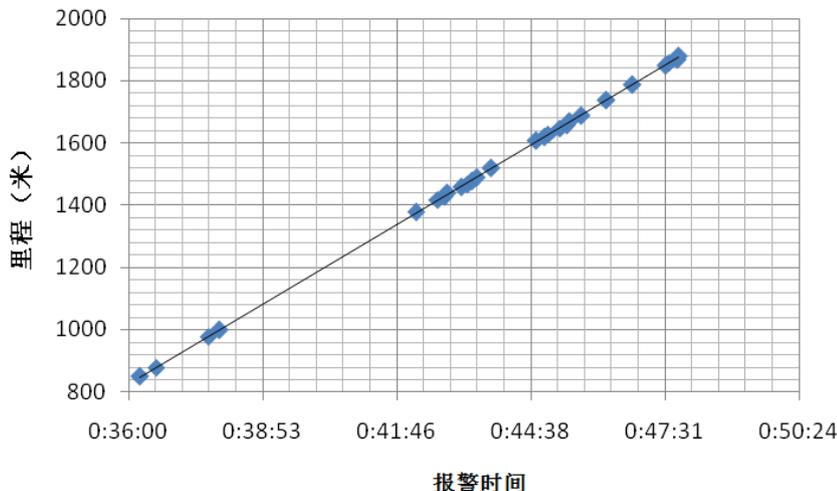


图 6. 试运行期间隧道侧墙清洗车工作所引发的一系列连续报警。报警时间 -报警探头对应的里程关系。

Fig. 6 Diagram of alarm time – position of corresponding alarm detector when a tunnel cleaning vehicle working in the tunnel with a moving speed, 5.4 km/hr.

在隧道正常运行期间，内部温度场也有可能可能会出现较大的异常波动，这种非火灾的温度波动大部分是人工所为，可能导致误报警。长期收集隧道的温度数据并对大数据进行合理性分析，可得到特定隧道温升梯度的最大值以及最大值出现的频次等统计数据。统计结果可用于火灾报警系统灵敏度评估，并为确定火灾报警系统阈值提供可靠的科学依据。运营方应对照隧道监控录像对所有的误报警进行研判。针对同一原因导致频繁发生的误报应在软件中引入智能判别程序，予以剔除，使得系统更加坚强。

上述监测结果暗示：准分布式光纤光栅火灾自动报警系统有能力通过合理的逻辑分析实现车载移动火灾判别。

6 结论

利用准分布式光纤光栅火灾自动报警系统采集的温度大数据对运营中的上海大连路越江隧道温场进行考察并给出自动报警系统工作状态的评估方法。系统测温的稳定性和灵敏度要求噪声统计标准差控制在 0.15°C 以内，最大偏差不大于 0.6°C 。温度数据分析可以科学合理的确定火灾报警阈值区间，以保证在误报率小于 1 次/年的情况下，对 1MW 火灾在 60 秒内正确报警。分析日常隧道非火灾引发的较大温度波动可作为系统灵敏度评估的手段。隧道温度监测数据的分析应用为运营管理者合理评估感温型火灾自动报警系统的可靠性以及在线运行状态做出了有益的尝试。

参考文献(References)

- [1] Kurioka H, Oka Y, Satoh H, Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels, Fire Safety Journal, 2003, 38 (4): 319
- [2] 彭伟, 霍然, 胡隆华, 隧道火灾的全尺寸试验研究, 火灾科学, 2006, 15 (4): 212;
- [3] 闫治国, 杨其新. 秦岭特长公路隧道火灾温度场分布试验研究, 地下空间, 2003, 23(2): 285—289;
- [4] Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln (RABT), Ausgabe 2006, FGSV-Verlag;
- [5] RVS 9.282 – Projektierungsrichtlinien, Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen –Tunnelausrüstung, Ausgabe 07/2002, FSV Wien;
- [6] Richtlinie Branddetektion in Strassentunneln ASTRA 13004, Ausgabe 2007 V 2.10;
- [7] 王文青, 杜新民. 隧道专用线型光纤感温火灾报警系统报警阈值的优化; 待发表

单洞单向交通特长公路隧道救援通道方案比选

陈树汪, 李志厚

(云南省交通规划设计研究院, 昆明, 650011)

摘要: 本文依托国家高速公路网 G85 渝昆高速公路昭通至会泽段改扩建工程大口子隧道、邱家垭口隧道, 在对现有隧道火灾事故疏散救援通道方案调研的基础上, 本着“人员逃生为主, 车辆避难为辅”的思路, 通过对各方案的技术、经济比选后, 推荐单洞单向交通特长公路隧道采用“独立避难所与紧急停车带 (U 形调头场) 相结合”的逃生救援通道方案。

关键词: 单洞单向交通, 特长公路隧道, 救援通道, 方案比选, 避难所

1 引言

国家高速公路网 G85 渝昆高速公路昭通至会泽段改扩建工程大口子隧道、邱家垭口隧道为两座采用单洞双车道单向行驶布设的特长公路隧道。其中, 大口子隧道全长 3200 m, 隧道所在路段纵坡为-2.500%、-3.900%, 隧道最大埋深约为 212m; 邱家垭口隧道全长 3185m, 隧道所在路段纵坡为-2.400%, 隧道最大埋深约为 209m。由于新建隧道均为单洞, 且与现有高速公路相距较远, 发生紧急事故时逃生困难, 救援不易。为解决特长隧道在紧急事故时的逃生问题, 需设置救援通道。

目前国内外关于特长公路隧道逃生救援通道的研究多是针对单洞对向交通隧道和双洞单向交通隧道展开^{[1][2][3]}, 对于单洞单向行车的特长公路隧道救援通道设置方案的研究未见有公开的成果报道, 尚未有成熟理论和工程经验可以借鉴^{[4][5]}。

本文将在对现有隧道火灾事故疏散救援通道方案调研的基础上, 针对渝昆高速公路昭通至会泽段改扩建工程的单洞单向交通特长公路隧道的特点, 以“人员逃生为主, 车辆避难为辅”的设计思路, 通过对各种救援通道方案进行技术、经济比选, 为大口子隧道、邱家垭口隧道推荐一个“技术可靠、经济合理”的逃生救援通道方案。

2 救援通道设置方案调研

隧道运营灾害主要包括隧道火灾、运行车辆的可燃或有毒有害体 (液体) 泄漏导致的洞内空气污染、以及雷电等不可预见因素导致的隧道大范围停电等。各类隧道运营灾害中, 隧道火灾出现频率相对最高、造成的损害和影响最大、救援最为困难。目前, 隧道火灾事故疏散救援通道可以分为专用通道、共用通道两大类。前者有平行导洞、竖 (斜) 井、独立避难所; 后者有相邻隧道、紧急停车带 (U形回车道) 等。

2.1 平行导洞方案

平行导洞方案主要是在与正洞相距20~30m左右的地方, 开挖一面积约25m²的平行导洞, 并用间距约750m的车 (人) 行横洞连接起来。一旦发生火灾, 采取火灾定向排烟, 火灾点前方前行车辆可安全出洞, 火灾点前方逆行车辆则进入平导逃生。而火灾点后方前行车辆则进入平导, 火灾后方逆地车辆可就地进入平导, 或直接出洞。该方案要求指挥控制比较灵敏, 否则易造成混乱。其最大优点是人员、车辆逃生方式安全可靠, 缺点是造价较高。

隧道采用平导作为避难通道, 可兼顾施工, 作为超前导洞探明地质情况, 同时可增加新的工作面。另一方面可将营运通风方案与平导结合考虑, 形成平导半横向通风。目前, 国内已建成的

陈树汪, 1978年生, 男, 广西宾阳县人, 主要从事隧道及地下工程设计与研究工作, 分别于2003年、2009年在重庆交通大学及瑞士洛桑联邦理工大学获工学硕士学位、工程硕士学位。

电话: 0871-63148075

E-mail: chenshuwang@126.com

单洞对向交通特长隧道多采用平导作为避难救援通道，如川藏公路二郎山隧道（长4176m，单洞双向交通）。瑞士St.Gotthard公路隧道（长16942m，单洞双向交通）也是采用平导作为避难通道。



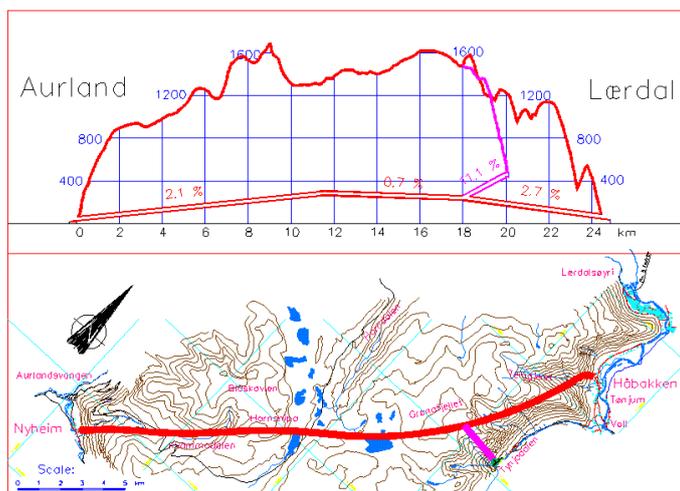
图 2.1 瑞士 St.Gotthard 隧道逃生救援平行导洞与避难所^[6]



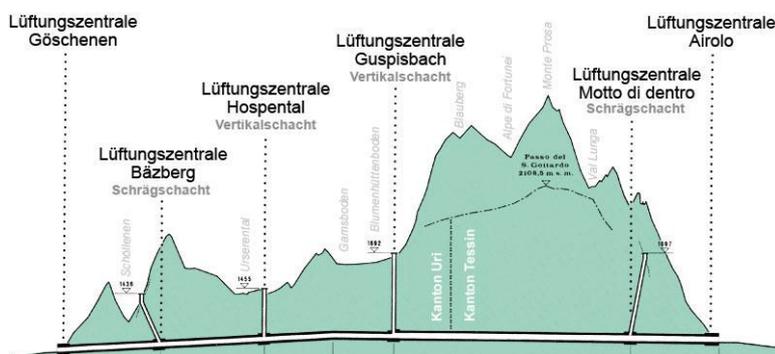
图 2.2 川藏公路二郎山隧道逃生救援平行导洞^[7]

2.2 竖（斜）井/横洞方案

竖（斜）井/横洞方案即在隧道中部打设若干竖（斜）井/横洞作为中间救援区的逃生救援通道。这样就将隧道划分为若干个防灾救援分区。该方案要求指挥控制比较灵敏，否则易造成混乱。其最大优点是人员逃生方式安全可靠，缺点是不能解决车辆的紧急避难问题，且集中送（排）轴流风机养护成本高。当隧道一侧的山体较薄时，竖（斜）井/横洞长度较短，与平导方案相比，该方案更经济。挪威的Laerdal隧道（长24510m，单洞双向交通，设计日平均交通量为1000辆，设计最大交通密度为400辆/小时）在北半部设置一个2.1km长向下坡度为11%的斜井用作通风井和逃生通道；瑞士St.Gotthard公路隧道设置了2座斜井和2座竖井作为通风井和救援通道。



1.1 图 2.3 挪威 Laerdal 隧道斜井布置方案[8]



1.2 图 2.4 瑞士 St.Gotthard 隧道竖（斜）井布置方案[6]

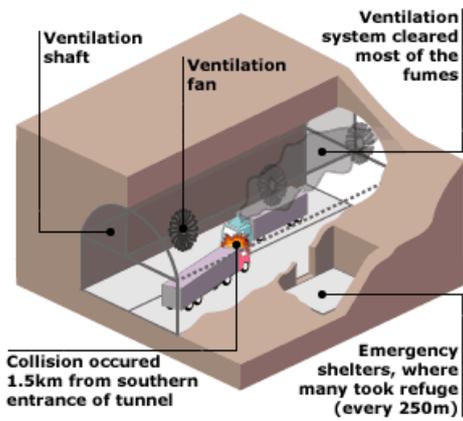
2.3 独立避难所方案

这是在奥地利托恩（Tauern）隧道（长6.4km，单洞双向交通）火灾中有人员安全避难的方案，在欧洲一些对向行车隧道中多被采用，如著名的瑞士St.Gotthard公路隧道、连接法国和意大利的Frejus公路隧道（长12.87km，单洞双向交通）、勃朗峰（Mont Blanc）隧道（长11.611km，单洞双向交通）等。

根据勃朗峰隧道1999年3月24日火灾事故的总结经验：避难洞室间距应控制在300m，面积应不小于30m²，洞室内应有充足的供氧或新鲜空气设备以保证人可以在洞内呆2天^[9]。根据托恩隧道1999年5月29日火灾事故总结的经验：按500~600m左右间距设置避难室，避难室面积约2.2×2.3m²，可供5-7人避难，并按一定间距设置新鲜空气供应站，每站保证能在火灾时为106人提供新鲜空气，新鲜空气供应量为2.75m³/min^[6]。该方案优点是造价低，可以解决火灾时人员逃生避难，缺点是无法为向火灾点方向行进的车辆提供避难通道。值得指出的是，新近建成通车的法国巴黎A86东线隧道工程（10.46km，双层隧道，单向三车道交通，仅限轻型汽车通行）也采用了独立避难所方案--每约200m设置一可容纳50人的避难所^[10]。

为确保人员的安全疏散，独立避难所应设置独立的机械正压送风系统。独立避难所机械加压送风系统不仅要确保房间内保持一定的正压值，以防止高温烟气侵入，而且必须通过不断的通风换气，为避难人员提供呼吸所需的新鲜空气。通常，独立避难所内的加压送风量应按地面面积每

平方米不小于 $30\text{m}^3/\text{h}$ 计算，新鲜空气供气时间不应小于火灾延续时间。



a) St.Gothard 隧道避难所^[6]



b) Mont Blanc 隧道避难所^[9]

图 2.5 代表性的隧道避难所

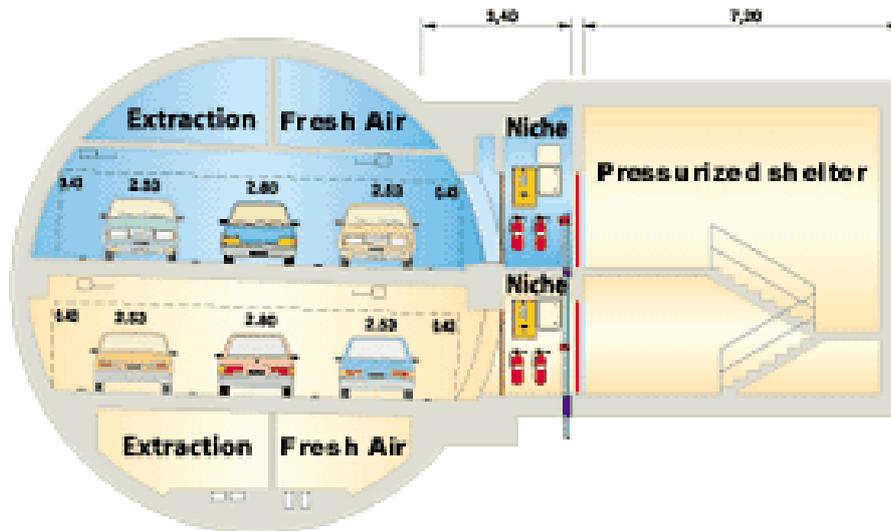


图 2.6 巴黎 A86 东线隧道避难所^[10]

2.4 相邻隧道方案

相邻隧道方案，即在火灾工况时，切断非火灾隧道的交通，通过两洞间的横通道，将非火灾隧道作为逃生救援通道。该方案仅适用于双洞单向行驶的隧道，是目前一级公路、高速公路长及特长隧道最常用的逃生救援通道方案。



图 2.7 相邻隧道方案的逃生救援通道[11]

2.5 紧急停车带（U 形调头场）方案

该方案即沿隧道两侧对称设置长 40~60m，间距 750m 左右的紧急停车带或 U 型调头场。当发生火灾时火灾前方前行车车辆可安全出洞，逆行车辆则通过紧急停车带或 U 形回车场调车逆行。对火灾点后前行车车辆也需紧急停车带或 U 形回车场回车，逆行车辆可安全出洞，火灾时应封洞，车辆只准出不准进。该方案不能解决人员的紧急避难问题，特别是火灾下游受伤人员的逃生、避难。Mont Blanc 隧道在 1999 年火灾事故后增设了 U 形调头场。目前世界上最长的公路隧道-挪威的 Laerdal 隧道，也设置了 U 形调头场（兼做消除行车单调、改善视觉疲劳之用）。云南省已建成通车的仙人洞隧道（单洞双向交通，长 2365m）、小勐养~磨憨公路南贡山隧道（单洞双向交通，长 2965m）采用了紧急停车带方案，在建的独龙江公路高黎贡山隧道（单洞双向交通，长 6680m）采用了紧急停车带+U 形调头场方案。

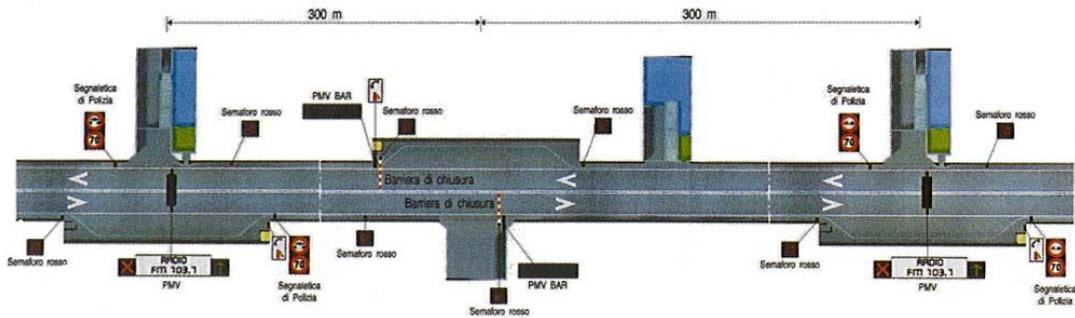


图 2.8 Mont Blanc 隧道紧急停车带、U 形调头场以及避难所平面布置示意图[9]

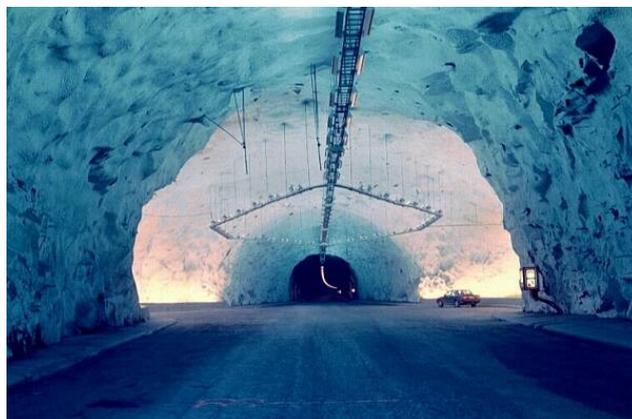


图 2.9 挪威的 Laerdal 隧道 U 形调头场[12]

3 方案比选

综上所述，对单洞单向交通特长公路隧道而言，本文从通道建设造价、火灾时的气（烟）流组织复杂性、人员逃生的可靠性、救援难度、车辆避难可行性、养护成本以及施工难度等方面对以上各种逃生救援通道方案进行了比选，相应结果见表 3-1。

就大口子隧道、邱家垭口隧道而言，由于受隧址区地形条件限制，不适宜布设竖（斜）井/横洞方案。而采用相邻隧道方案，则需要新增一幅隧道，将极大的增加投资、并造成现在已经通行的半幅高速公路作废。本着以“人员逃生为主，车辆避难为辅”的思路，根据“技术可靠、经济合理”的原则，大口子隧道、邱家垭口隧道推荐采用“独立避难所与紧急停车带（U形调头场）相结合”的逃生救援通道方案，并将平导方案作为同深度比选方案。与“独立避难所与紧急停车带（U形调头场）”方案相比，平导方案优势在于能够通过平导快速地进入隧道的任意区段开展救援工作，从而彻底地解决了推荐方案存在的火灾下游救援困难、时间长的问题。鉴于两个方案均能安全可靠地解决了人员逃生的问题，而火灾下游救援的对象主要是针对车辆而言，仅涉及财产损失，不涉及人员伤亡，因此“独立避难所与紧急停车带（U形调头场）”方案与平导方案的比选就取决于两个方案的经济性了。平行导洞需要提供救援车辆行车以及通风照明设施安装所需的空間，其典型的内轮廓断面如图 3.1a 所示，其相应的净空面积约为 27m²；根据勃朗峰隧道火灾事故经验，每 250m~300m 设置一可容纳 20 人的避难所，其用于人员避难的面积应不小于 30m²，总建筑面积约 120 m²（长约 15m，宽约 8m），如图 3.1b 所示，通常避难所内轮廓净宽 7.45m、高 4m，相应的净空面积约为 25m²。为此，从净空面积来看，平行导洞与避难所的延米工程量基本相当，即延米造价基本相当。从工程量来看，平行导洞平行于隧道设置，通常其长度与隧道一样；而避难所按每 250m~300m 设置一处布置，每公里隧道内设置 3~4 处，总长仅 4X15m=60m。即采用避难所方案，每公里隧道可节省 940m 的平行导洞工程量，按 3 万/延米考虑，每公里可节省 2820 万元。由于采用平行导洞方案考虑车辆转弯、调头需要，同样需要设置紧急停车带，“独立避难所与紧急停车带（U形调头场）”方案与平导方案在紧急停车带工程建设规模上是相当的。此外，在通风、照明等运营设施建设造价上，前者也是低于后者的。为此，就经济性而言，“独立避难所与紧急停车带（U形调头场）”方案远优于平导方案。

1.3 表 3-1 单洞单向交通特长公路隧道救援通道方案比较表

救援通道方案	平导方案	竖（斜）井/横洞方案	独立避难所方案	相邻隧道方案	紧急停车带（U形调头场）方案
建设造价	较高	较高	较低	最高	最低
气（烟）流组织	复杂	较复杂	简单	简单	简单
人员逃生	安全可靠	安全可靠	安全可靠	安全可靠	火灾下游受伤人员的逃生不能解决
救援难度	简单、快速	简单、快速	火灾下游救援困难，时间长	简单、快速	火灾下游救援困难，时间长
车辆避难	可以解决	不能解决/部分解决	不能解决	可以解决	可以解决
养护成本	高	高	较低	最高	低
施工难度	一般	大	小	小	一般
项目适用性*	适用	地形不允许	适用	投资不允许	适用
方案比选*	同深度比选		推荐采用		推荐采用

*指针对云南昭会高速公路项目。

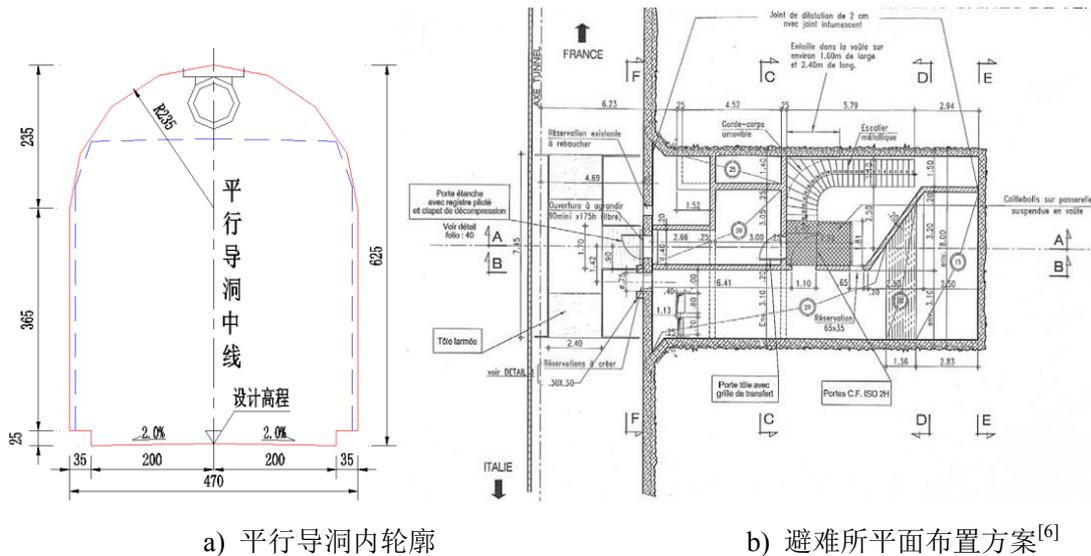


图 3.1 平行导洞内轮廓与避难所平面布置方案 (单位 :cm)

4 结束语

本文依托国家高速公路网 G85 渝昆高速公路昭通至会泽段改扩建工程大口子隧道、邱家垭口隧道，在对现有隧道火灾事故疏散救援通道方案调研的基础上，本着“人员逃生为主，车辆避难为辅”的思路，通过对各方案的技术、经济比选后，推荐单洞单向交通特长公路隧道应采用“独立避难所与紧急停车带（U 形调头场）相结合”的逃生救援通道方案。该方案的不足之处在于不能彻底地解决火灾下游故障车辆救援困难、时间长的问题，从而提高了增加火灾事故财产损失的风险。但是，总体而言，推荐方案的经济性仍远优于平导方案。

事故风险的控制贵在事前控制，而非事后施救。为此，设计中应针对单洞单向交通特长隧道和隧道内火灾烟流的特点，重点通过安全教育（如在沿线服务区、停车区建立隧道设施介绍室/点、设定隧道路段广播频率向社会公众普及隧道防灾救援知识）、运输管理（如对车辆进行危险品检测，对危险品运输车辆进行管制）等措施将隧道事故发生率、发生规模尽可能降至最低。

参考文献(References)

[1] 付修华，长大双洞公路隧道火灾及防灾救援安全体系研究[D]，西南交通大学，2003

[2] 赵秋林，秦岭终南山特长公路隧道防灾救援设计，公路，2007 年 04 期

[3] 王亚琼，单洞对向交通公路隧道火灾安全对策研究[D]，长安大学，2009

[4] 陈建忠，公路隧道防灾救援对策研究，公路交通技术，2012 年第 6 期

[5] 付修华；杨其新；刘化冰，对特长公路隧道火灾防灾救援安全策略的思考，公路交通科技，2004 年 03 期

[6] Fabio CORSANELO, LIFE SAFETY EUROPEAN REGION-CFS Technical Review, CERN, March 2012

[7] <http://baike.baidu.com>

[8] www.lotsberg.net

[9] Sctauroute - Spea, Rehabilitation and modernization of the Mont Blanc Tunnel, February 2002

[10] 簡賢文，白朗峰隧道火災後歐盟之新作法，中央警察大學，2006 年 11 月

[11] <http://zt-hzrb.hangzhou.com.cn/system/2013/03/12/012363098.shtml>

[12] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Laerdalstunnel_cave.jpg

单洞铁路隧道火灾列车紧急出口 停车模式研究

李琦, 王明年, 于丽, 罗欣宇, 李博

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了火灾列车在隧道紧急出口或避难所能够快速选择停车模式, 最大程度保障人员疏散安全, 本文通过对人员疏散安全性因素的分析, 考虑到隧道内自然风大小及风向、主洞坡度、火源点位置、列车人员分布密度以及疏散过程中需穿越火源点的人数等原因, 对所有停车工况进行比选分析。研究结论: 特长单洞隧道内火灾列车在紧急出口和避难所的停车模式为三种。①列车前半部着火, 则列车尾部停在紧急出口或避难所入口附近; ②列车后半部着火, 则列车头部停在紧急出口或避难所入口附近。③列车中部附近着火, 则根据列车行驶坡度而定。即列车上坡行驶, 则尾部停在紧急出口或避难所入口附近; 列车下坡行驶, 则头部停在紧急出口或避难所入口附近。

关键词: 隧道火灾; 紧急出口; 避难所; 人员疏散; 停车模式

中图分类号:

文献标识码:

文章编号:

Study on halt pattern of burning train in emergency exit of Single-hole railway tunnel

Li Qi, Wang Mingnian, Yu Li, Luo Xinyu, Li Bo

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Chengdu 610031)

Abstract: The fire train can quickly select reasonable parking model in the tunnel exit or refuge place, which can be in the maximum extent to ensure the safety of evacuation. This paper analyses the factor of the evacuation safety, considers the factors of the size and the direction of natural wind in tunnel, the main hole slope, fire point, train personnel distribution density, the number of person who must pass through the fire point in the process of the evacuation. The research conclusion: the burning train of extra-long Single-hole railway tunnel in the emergency exit and evacuation parking mode as three types: ①if the first half train on fire, the train tail parked near the entrance of the emergency exits or evacuation; ②if the train half after fire that the train, the head of the train halts in the emergency exit or evacuation near the entrance; ③if the train near the central on fire, it depends the train slope. When the train drives uphill, the tail halts near the entrance of the emergency exits or evacuation. When the train drives downhill, the head of train halts emergency exit or evacuation near the entrance.

Keywords: tunnel fire; emergency exit; refuge; evacuation; halt pattern

作者简介: 李琦(1988-), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程通风防灾救援研究工作。E-mail: 602347502@qq.com

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2013T001); 国家自然科学基金(51308472); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU10101B10096020, SWJTU11BR013)

1 引言

随着我国铁路交通运输网的快速发展,长大铁路隧道及隧道群数量不断增大。而客运列车最大一个特点为所载人员数量巨大,一旦在隧道中发生火灾,则人员的紧急疏散必需做到争分夺秒,以做到最大程度上的降低人员的伤亡率。

长大单洞铁路隧道及隧道群中防灾救援疏散设施多数以紧急出口和避难所的形式出现。由于单洞铁路隧道紧急出口和避难所只有一处出口的结构特点,列车发生火灾后,在此处停车进行紧急疏散时,人员全部进入安全区域所需的时间较长。因此,明确不同工况下发生火灾后在紧急出口和避难所的停车模式,快速做出最合理、最有利的停车选择,对减少人员疏散必需时间和人员伤亡数量具有重要意义。

2 火灾列车停车模式的主要影响因素及停车原则

单洞铁路隧道紧急出口和避难所停车模式的选择主要与隧道中自然风的大小及风向、主隧道的坡度、火源点位置、列车人员分布密度和疏散过程中需要穿越火源点的人员数量等因素有关。

(1) 自然风大小及风向。铁路隧道中在一些特殊地质气候环境下存在有自然风,其大小及风向很大程度上控制了火灾烟雾扩散的方向及速度。火灾烟雾扩散的规律为向自然风下游方向扩散速度大于向上游方向扩散速度,即下游更快受到火灾烟雾的污染,烟雾的浓度及温度发展规律亦如此^[1-2]。因此,应尽量将列车停在紧急出口和避难所入口的下游方向。本文主要考虑自然风风向与列车同向和反向两种情况。

(2) 隧道的坡度。隧道的坡度对火灾烟雾的发展也具有一定影响,在没有自然风或风速很小的情况下,由于烟筒效应,火灾烟雾向上坡方向扩散的速度大于向下坡方向扩散的速度,其浓度与温度发展规律亦如此^[3-6]。因此,应尽量将列车停在紧急出口和避难所入口的上坡方向。本文主要考虑隧道坡度为上坡和下坡两种情况。

(3) 火源点的位置。列车火源点的位置是选择为列车停车模式考虑的一个重点,距离火源点越近,烟雾的温度越高,火源位置拱顶处烟气一般可达到 150°C ^[7-8]。因此,应尽量将火源点远离紧急出口和避难所入口停车。本文主要考虑火源点位置在车头位置、距车头 1/4 位置、中部位置、距车尾 1/4 位置和车尾位置五种情况。

(4) 列车人员分布密度。由于客运列车车辆编组不同,列车中人员分布的密度前后不均,按照满载情况考虑,硬座车厢的人数大概是卧铺车厢人数的 2 倍,在超载的情况下可能达到 3 倍。疏散过程中,人员所走的平均距离越短,则疏散所用的必需时间越少。因此,尽量将列车密度大的一端停在紧急出口和避难所入口附近,以减少平均疏散距离。本文主要考虑列车头部密度大尾部密度小和头部密度小尾部密度大两种情况。

(5) 穿越火源点人数。由于单洞隧道中紧急出口和避难所入口仅有一处,因而,发生列车火灾后,必然有部分人员不要穿越火源点进入安全区域。而隧道空间狭长,火源点附近烟雾温度高,很容易对人员造成伤害。因此,必须选择尽可能少的人员疏散过程中穿越火源点,这也是停车模式选择所考虑的第一位主要因素。

3 考虑多因素的停车模式

考虑到停车位置的可操作性,选择列车头部或尾部停在紧急出口和避难所入口附近两种停车位置。当自然风对烟雾扩散的影响与主洞坡度对烟雾扩散的影响作用相反时,则需要选择起主要影响作用的因素为参考对象。因此,分为自然风为主要影响作用下的停车模式和主洞坡度为主要影响作用下的停车模式两大类。

自然风风向与列车行驶方向同向时,其对烟雾的影响作用与列车上坡行驶时,坡度对烟雾的影响作用一致。同理,自然风风向与列车行驶方向反向时,其对烟雾的影响作用与列车下坡行驶时,坡度对烟雾的影响作用一致。因此,自然风为主要影响作用下的停车模式和主洞坡度

为主要影响作用下的停车模式可以归结为一类，停车模式的工况共 40 种，由列车人员分布密度可以得到疏散过程中穿越火源点人数的比例。具体如表 1 所示。

表1 停车模式（比选前）

Table 1 Halt pattern (former)

工况	风向或坡度		火源点位置					列车人员分布密度		紧急出口处列车部位		穿越火源点人数比例					
	同向或上坡	反向或下坡	头部	头1/4	中部	尾1/4	尾部	头大尾小	头小尾大	头部	尾部	0	1/5	1/3	2/3	4/5	1
1	○		○					○		▲							●
2	○		○					○			▲		●				
3	○		○						○	▲							●
4	○		○						○		▲		●				
5	○			○				○		▲					●		
6	○			○				○			▲			●			
7	○			○					○	▲						●	
8	○			○					○		▲		●				
9	○				○			○		▲				●			
10	○				○			○			▲				●		
11	○				○				○	▲					●		
12	○				○				○		▲			●			
13	○					○		○		▲			●				
14	○					○		○			▲					●	
15	○					○			○	▲				●			
16	○					○			○		▲				●		
17	○						○	○		▲		●					
18	○							○	○		▲						●
19	○							○		▲		●					
20	○						○		○		▲						●
21		○	○					○		▲							●
22		○	○					○			▲		●				
23		○	○						○	▲							●
24		○	○						○		▲		●				
25		○		○				○		▲					●		
26		○		○				○			▲			●			
27		○		○					○	▲						●	
28		○		○					○		▲		●				
29		○			○			○		▲				●			
30		○			○			○			▲				●		
31		○			○				○	▲					●		
32		○			○				○		▲		●				
33		○				○		○		▲			●				

工况	风向或坡度		火源点位置					列车人员分布密度		紧急出口处列车部位		穿越火源点人数比例					
	同向或上坡	反向或下坡	头部	头1/4	中部	尾1/4	尾部	头大尾小	头小尾大	头部	尾部	0	1/5	1/3	2/3	4/5	1
34	○					○		○			▲						●
35	○					○		○		▲							●
36	○					○		○			▲						●
37	○						○	○		▲		●					
38	○						○	○			▲						●
39	○						○	○		▲		●					
40	○						○	○			▲						●

注：○为工况必选因素；▲为停在紧急出口或避难所入口附近的列车部位，车头和车尾两个部位可选；●为疏散过程中穿越火源点的人员数量。

4 考虑穿越火源点人数因素下停车模式优选

依据人员疏散过程中，穿越火源点人数越少越好的原则，选择在主洞坡度（自然风风向）、火源点位置和列车人员分布密度情况三个因素相同条件下，疏散过程中穿越火源点人数少的停车模式。因此，表1中工况1-4比选后选择工况2的停车模式，工况5和6比选后选择工况6，工况7和8比选后选择工况8，工况9和10比选后选择工况9，工况11和12比选后选择工况12，工况13和14比选后选择工况13，工况15和16比选后选择工况15，工况17-20比选后选择工况17，工况21-24比选后选择工况22，工况25和26比选后选择工况26，工况27和28比选后选择工况28，工况29和30比选后选择工况29，工况31和32比选后选择工况32，工况33和34比选后选择工况33，工况35和36比选后选择工况36，工况37-40比选后选择工况37。最后比选后的较优工况为工况2、6、8、9、12、13、15、17、22、26、28、29、32、33、35和37共16种。同时，考虑较少数量人员穿越火源点的停车原则后优选出的停车模式结果同时也满足火源点位置尽量远离紧急出口或避难所入口的原则。

5 考虑主洞坡度(自然风)因素下停车模式优选

根据停车位置尽量停在自然风下游方向或紧急出口和避难所入口的上坡方向的原则，选择在主洞坡度（自然风风向）、火源点位置和穿越火源点人数三个因素相同条件下，更有利于人员疏散的停车模式。在上述工况上进一步进行比选，工况9和12比选后选择工况12，工况29和32比选后选择工况29。因此，进一步优选后的工况为工况2、6、8、12、13、15、17、22、26、28、29、33、35和37共14种。

6 考虑多因素下最优停车模式

经过上述停车模式优选，在不考虑具体穿越火源点人员数量比例的情况下，最终得到紧急出口和避难所的最优停车模式。将工况6和8比选后选择工况6，工况13和15比选后选择工况13，工况26和28比选后选择工况26，工况33和35比选后选择工况33。因此，进一步优选后的工况分别为工况2、6、12、13、17、22、26、29、33、和37，共10种停车模式。

对于一般特长铁路隧道中自然风几乎不存在，而且方向不确定，因此，停车模式主要考虑主隧道的坡度对火灾烟流影响。但对于特殊地质和气候等条件下的特长铁路隧道应考虑自然风的影响。一般特长铁路隧道停车模式可最终归纳为3种，具体如表2所示。

表2 停车模式

Table 2 Halt pattern

停车模式	火源点位置			紧急出口处列车部位	
	前半部	中部附近	后半部	头部	尾部
1	○				▲
2		↗ ↘		▲	▲
3			○	▲	

注：↗表示火灾列车上坡行驶；↘表示火灾列车下坡行驶。

三种停车模式对应的人员紧急疏散路线示意图如 0~0 所示。

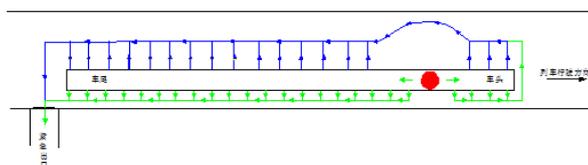
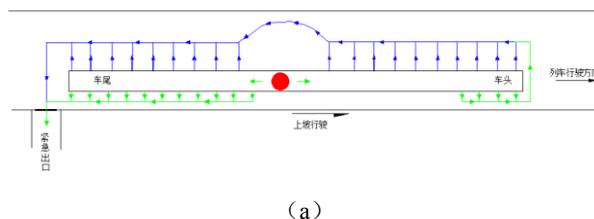
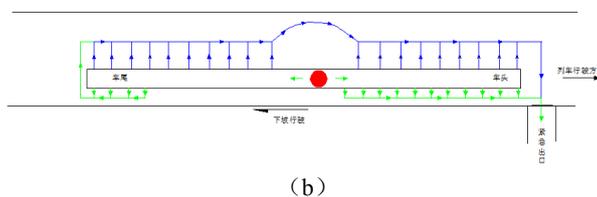


图 1 停车模式 1

Fig. 1 The first parking model



(a)



(b)

图 2 停车模式 2

Fig. 2 The second parking model

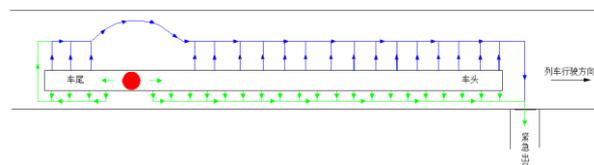


图 3 停车模式 3

Fig. 3 The third parking model

7 结论

通过对火灾列车在长大隧道及隧道群紧急出口和避难所停车模式影响因素的研究，得到如下结论：

- (1) 影响火灾列车在紧急出口和避难所入口处停车模式的主要因素为主洞坡度和火源点位置。
- (2) 通过对火灾列车在隧道紧急出口和避难所车紧急停车模式的研究，最终得到三种停

车模式。

(3) 当列车前半部着火, 则列车尾部停在紧急出口或避难所入口附近。

(4) 当列车后半部着火, 则列车头部停在紧急出口或避难所入口附近。

(5) 当列车中部附近着火, 则根据列车行驶坡度而定。当列车上坡行驶, 则尾部停在紧急出口或避难所入口附近; 当列车下坡行驶, 则头部停在紧急出口或避难所入口附近。

参考文献(References)

- [1] 闫治国,杨其新. 秦岭特长公路隧道火灾温度场分布试验研究[J].地下空间,2003,23(6):191-195. (Yan Zhiguo, Yang Qixin. Experimental Study on Temperature Field Distribution of the Fire in Qinling King-size Highway Tunnel[J].UNDER GROUND SPACE, 2003,23(6):191-195. (in Chinese))
- [2] 杨其新,王明年,邹金杰.隧道火灾烟流性态的模型试验分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(3):569-571.(Yang Qixin, Wang Mingnian, Zou Jinjie. Analysis On Character of Smoke in Tunnel under Fire Model Test, [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008,4(3):569-571. (in Chinese))
- [3] 赵红莉,徐志胜,李洪,等. 坡度对隧道火灾烟气分布的影响[J].中南大学学报,2013,44(10):4257-4263.(Zhao Hongli, Xu Zhisheng, Li Hong, Jiang Xuepeng, Li Dong. Impact of slope on smoke temperature distribution in tunnel fires[J].Journal of Central University(Science and Technology,2008,4(3):569-571. (in Chinese))
- [4] 徐琳,张旭. 坡度隧道的火灾烟卤效应的升压力分析[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(4):686-690.(Xu Lin, Zhang Xu. Analysis on Effective Pressure Difference due to the Stack Effect for Sloping Tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(4):686-690.(in Chinese))
- [5] 李炎锋,付成云,李俊梅,等. 城市交通隧道坡度对火灾烟气扩散影响研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(5):10-15. (Li Yanfeng, Fu Chengyun, Li Junmei, Du Xiuli. Study on the slope effect on smoke propagation in urban traffic tunnel [J]. Journal of Safety Science and Technology,2011,7(5):10-15. (in Chinese))
- [6] 范维澄等.火灾学简明教程[M].合肥:中国科学技术大学出版社, 1995. (Fan Weicheng. Short course on fire science[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995. (in Chinese)).
- [7] 胡隆华.隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D].中国科学技术大学,2006. (Hu Longhua. Studies on thermal physics of smoke movement in tunnel fires [D]. University of Science and Technology of China, 2006. (in Chinese))
- [8] Hitoshi Kurioka, Yasushi Oka, Hiroomi Satoh and Ssmai Sugawa. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels, Fire Safety Journal[J] 2003(38)319-340.

长大铁路隧道及隧道群防灾安全分级的研究

于丽, 王明年, 李琦, 谢文强, 姜志毅

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 随着线路标准提高, 我国的铁路隧道中出现了越来越多的长大隧道及隧道群。由于隧道建设规模的增大, 必然导致灾害发生的频率以及灾害引起的损失的增加。而一味的增加隧道防灾设施、设备虽然能在一定程度上起到灾害防治和减轻的作用, 但也引起了投资上的大量增加。因此, 应对铁路隧道可能发生的灾害进行分类, 在此基础上对灾害引起的损失进行评价, 从而结合隧道自身特点提出隧道安全的分级标准, 依此标准建立长大铁路隧道及隧道群防灾设施、设备标准, 以期为铁路隧道, 特别是长大铁路隧道及隧道群的防灾设计提供依据。

关键词: 长大铁路隧道; 隧道群; 安全分级; 防灾设计

中图分类号: U25

文献标识码: A

Study on safety rank of long railway tunnels and railway tunnel groups

Yu Li, Wang Mingnian, Xie Wenqiang, Jiang Zhiyi, Fan Yu

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the improvement of railway standard, more and more long railway tunnels and tunnel groups spring up. Because of length addition and distance reduction of two tunnels, more and more disasters may appear and the results may aggravate to some extent. Thus, some measures should be taken to prevent such disasters as collision, fire, derailment, and so on from happening or to reduce risk to an acceptable level. However, in consideration of construction budgets, tunnel management must then find answers to the questions: which tunnel must be equipped with these devices or facilities first and which safety measures are to be implemented for the greatest benefit. In this paper risks which are faced with long railway tunnels and tunnel groups will be sorted based on a number of risk examples, then safety rank would be given according to tunnel features and risk degree, finally standard for facilities and devices would be set up for railway tunnels. Also, from this study some more useful advice could be given for construction of railway tunnels and tunnel groups.

Keywords: long railway tunnel; tunnel group; safety rank; risk design

1 引言

随着线路标准提高, 越来越多的长大隧道及隧道群不断涌现。截止 2012 年 4 月, 拟建和在建的长度大于 10km 的特长隧道共 40 余座, 其中 20 座超过 15 公里, 8 座超过 20 公里。在建的西格铁路关角隧道 (32.645 公里) 突破 30 公里, 大瑞铁路高黎贡山隧道更达到 34.538 公里。高隧线比的隧道群也不短增加, 如: 川藏线雅安至康定段隧线比为 74.1%, 渝利线为 75.6%, 贵广高铁三都~同乐段, 全长 168.72km, 隧线比高达 87.8%, 更有超过 10 余条线路或区段的隧线比超过 50%。到 2020 年, 我国建成铁路隧道总长度预计将达到 20000km, 其中长度超过 10km 的特长铁路隧道总数量将超过 200 座。世界上超过 10km 的特长铁路隧道也比比皆是, 如, 在建的位于瑞士中部的 Gotthard Base 隧道, 全长 57km; 日本的青函海底隧道, 长度为 53.85km; 上越新干线上的大清水隧道, 长度为 22.228km; 山阳新干线上的新关门海底隧道, 长 18.7km; 西班牙的 Guadarrama 隧道, 长度为 28.377km; 意大利亚平宁隧道, 长度为 18.5km; 韩国的 Yong Dong 隧道, 长度为 16.3km 等等。

作者简介: 于丽 (1978-), 女, 辽宁大连人, 博士, 副教授, 从事隧道及地下工程研究; E-mail: yuli_1026@163.com

国家自然科学基金 (51308472); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2013T001)

我国铁路长大隧道的长度不断增加，建设环境较以前也发生了一定的变化。由于隧道的特殊性，其发生灾害的可能性比一般的线路要大，而且一旦灾害发生，救援行动很难展开。而随着隧道长度的增加，灾害发生的频率明显增加，则随着铁路隧道及隧道群的规模逐渐增大，灾害发生频率及灾害造成的伤亡和损失可能进一步增加^[1-3]。

为防止灾害发生或将灾害损失降至最低，需要增加一定的隧道防灾设施、设备等，但目前并无铁路隧道的防灾设施设置的相关标准或规范，所以一味增加设备和设施的投入必然加大项目的建设投资和运营费用^[4]。为此，需开展长大铁路隧道及隧道群安全分级的研究，并在分级确定的基础上明确设施配置原则，以期为铁路隧道，特别是长大铁路隧道及隧道群的防灾设计提供依据。

2 铁路隧道灾害及特征

为了将长大铁路隧道及隧道群的灾害降至最低，有必要对铁路隧道灾害进行分析，以期获得某些共性特征。

2.1 铁路隧道灾害及分类

铁路上经常发生的灾害有两大类，一类是自然灾害，如暴雨、雪崩、泥石流、地震等；另一类是人为造成的灾害，如铁路和道路交叉口相撞、铁轨上有障碍物、列车改变路线引起的碰撞等。但在铁路隧道中经常发生的灾害有列车脱轨、碰撞和火灾等，表 1 统计了 1947 年以来世界范围内铁路隧道发生的灾害情况^[5-7]。

表 1 铁路隧道灾害汇总

隧道灾害	发生次数	发生概率
火灾	18	58%
脱轨	6	20%
碰撞	7	22%

通过表 1 可以看出，在铁路隧道中，发生灾害频率最高的是火灾，其中发生在我国的铁路隧道火灾统计见表 2 所示。

经统计，铁路隧道火灾在其他国家的发生频率也较高。如：1972 年 11 月在日本北陆隧道内由于餐车起火引起的火灾；1984 年，英国 Summit 隧道由于列车油罐脱轨引发的隧道火灾；1996 年 11 月英法海峡隧道内发生的火灾等。

2.2 铁路隧道火灾特征

尽管以上铁路隧道火灾发生在不同的时期、不同的国家，但由于都发生在铁路隧道内，因此具有很多共性特征，主要体现在引起铁路隧道火灾的原因、铁路隧道火灾特征以及铁路隧道火灾造成的损失三个方面。

序号	时间	隧道名称	列车类型	起火直接原因	中断行车时间	伤亡人数
1	1976.3	丰沙线 46 号隧道	货车	隧底清筛作业违章，线路水平超限；脱轨后摩擦起火	54h34min	无
2	1978.10	宝成线 140 号隧道	货车	超速制动过猛，油罐破裂起火燃爆	382h15min	38/75
3	1987.8	陇海线十里山 2 号隧道	货车	线路/鱼尾板与钢轨断裂；脱轨后撞击起火	201h56min	/2
4	1990.7	襄渝线梨子园	货车	人孔盖未盖紧；有油气团；接触网悬挂点绝缘子表面放电	550h54min	14/4
5	1991.7	京广复线大瑶山隧道	客车	旅客吸烟起火		20/12
6	1992.9	青藏线 18 号隧道	货车	人孔盖未盖紧，线路变形；原油洒出；脱轨后撞击起火	82h19min	无
7	1993.6	西延线蔺家川隧道	货车	油气外溢；减速制动摩擦起火	579h18min	10/8
8	2008.5	宝成线 109 号隧道	货车	线路被堵，列车撞击脱轨后起火	283h20min	2/0
9	2009.7	乌鞘岭铁路隧道	客车	机车着火	数小时	无

(1) 铁路隧道火灾原因

引起铁路隧道火灾的原因很多，但归纳起来主要有人的不安全行为和物的不安全状态。

其中，人的不安全行为体现在三个方面，分别是：①司机违章操作和工务人员的严重失职；②列车乘客未能遵守安全乘车规定；③消防人员缺乏救护训练导致的救护不力。此外，机车司机的技术素质、身体与心理健康状况也是引发铁路隧道事故的原因之一。

而物的不安全状态包括隧道环境和列车两个方面。

隧道环境主要是指隧道狭长的筒状空间这一显著的结构特征以及隧道内的线形特征，特别是长大铁路隧道，发生灾害的频率更大，危害性更大。也有资料表明[9]：发生火灾事故的铁路隧道受线路走向和自然环境条件的影响，大多数长隧道坡度呈人字坡或线路平面呈 S 形。如青藏线岳家村 18 号隧道平面呈连续 S 形，藁家川隧道平面呈 S 形。

列车方面，应区分机车（包括蒸汽机车、内燃机车和电力机车）、旅客列车和货物列车。在以上 3 类问题中，旅客列车多因电气故障、采暖设备状态不良、旅客违章携带危险品以及旅客吸烟不慎等引起火灾。而旅客列车火灾由于车体、车内装饰、家具、卧具以及旅客携带行李物品难燃性较差、车内空间狭小、人员高度密集等原因不易被发现，造成的危害性最大。

(2) 铁路隧道火灾特征

铁路隧道火灾除了具有火灾的一般特点以外，还由于上述原因具有其自身特征，主要有：

①当列车在运行中发生火灾时，火势常因气流速度而迅速蔓延，加之燃烧释放出的热量不易散发，起火后热量迅速积累导致隧道内温度骤升（图 1 EUREKA 项目中得到的温度随时间变化 [10]），导致火势迅猛发展；②隧道长度大，通道少，烟气难以排出导致人员疏散困难；③受隧道线形特征影响大，表现为：当隧道纵向的坡度较大时，一旦起火，很容易形成烟囱效应，导致温度、烟气和有害气体迅速传播，从而加剧灾害范围。



图 1 EUREKA 火灾的温度-时间曲线

Fig1 EUREKA fire time-temperature curve

(3) 铁路隧道火灾造成的损失

火灾中常常造成重大人员伤亡和财产损失。根据表 2 的统计结果可以看出，在铁路隧道火灾中，损失表现为人员伤亡、中断交通、隧道内各种固定设施甚至结构的破坏，使铁路运输在较长时间内中断，造成直接和间接的经济损失，甚至造成极其不良的社会影响，降低使用者对隧道安全性的信任。

3 铁路隧道防灾安全等级划分

从以上铁路隧道灾害分类及火灾事故分析可以看出，在铁路隧道灾害中，火灾发生频率最高且危害性巨大。因此，应从软硬两个方面着手，加强铁路隧道，特别是长大铁路隧道和隧道群的火灾预防。即，一方面加强隧道的火灾安全管理，提高使用者和管理者的火灾安全意识；另一方面则通过建立完善的通风、报警、消防和通讯等硬件系统，提高铁路隧道抵御灾害的能力或者将隧道火灾的危害降至最低。长大铁路隧道火灾消防措施和设施的设计要建立在隧道火灾特性深刻掌握的基础上，做的既保证安全又不造成经济上的浪费。因此应在灾害分类的基础上建立铁路隧道火灾预防设施的分级设置标准。

3.1 影响铁路隧道防灾安全等级的因素

目前我国现行铁路隧道设计相关规范和标准主要对隧道施工及运营中的结构安全进行了分级,但铁路隧道的火灾安全分级和以上安全分级存在显著不同。为此,要建立长大铁路隧道及隧道群的防灾安全等级,应根据隧道自身的重要性和灾害对隧道的危害程度,将其按一定的安全标准进行划分的等级制度。不同安全等级的铁路隧道,其设施和防灾救灾对策也不同。

基于以上铁路隧道火灾原因、特征及造成的损失进行分析,将影响铁路隧道防灾安全等级的因素进行归纳,主要包括^[11]:①基础因素,主要指隧道技术标准(隧道所在线路、隧道长度、坡度、平面线形、相邻隧道间距等);②列车因素,主要指列车的牵引形式及运输性质;③危害因素,主要指铁路隧道灾害的种类、频率及危害程度;④社会因素,主要指司乘人员的安全意识与心理素质、社会治安与恐怖活动等;⑤其他因素,如隧道的战略价值、军事打击的可能性等。除以上五个因素外,还必须考虑到安全等级与安全成本间的关系。因此,在进行公路隧道安全等级划分时,应妥善处理以下4种关系,①安全等级和隧道规模的关系。一般地,规模越大、长度越长的隧道,隧道灾害、特别是火灾对其危害性越大,因此对安全度的要求越高。②安全等级和隧道内火车通过的频率的关系。隧道内交通量越大,运输货物种类越多,发生火灾几率就越大,其安全等级也就越高。③安全等级和社会经济的关系。隧道在社会、军事、经济建设中发挥的作用越大,发生灾害后带来的经济损失也越大,因此,其要求的安全等级也越高。④安全等级与设施的关系。隧道安全等级越高,用于安全设施的费用也就越大。

3.2 铁路隧道安全等级的划分

为了实现铁路隧道安全等级的划分,应在充分分析铁路隧道的灾害分类、发生频率及损失的基础上,建立基于事故树分析的安全场景。按目前的研究,通常将其分为三类,分别是:①有轻微机械损伤的安全事故;②有严重机械损伤的安全事故和③隧道火灾(无脱轨和碰撞)。在此基础上,对隧道的灾害频率和灾害损伤程度进行评估,建立发生灾害频率等级和损伤等级评定表,分别见表3和表4所示^[12-13]。

表3 灾害发生频率等级

灾害等级	死亡人数	受伤人数	中断交通时间(h)
I	0	0	< 0.5
II	1-2	1-5	0.5-2
III	3-5	6-10	2-10
IV	6-10	11-20	10-24
V	> 10	> 20	> 24

表4 灾害损伤等级分类

频率等级	每年发生的灾害数
A	< 0.01
B	0.01-0.1
C	0.1-1
D	1-10
E	> 10

根据表3和表4中获得的灾害等级,根据灾害风险评估准则,建立铁路隧道的灾害分级方法,即F-N准则,如图2所示^[14],即分为三个区域,分别是不可接受区域,ALARP区域以及可接受区域。

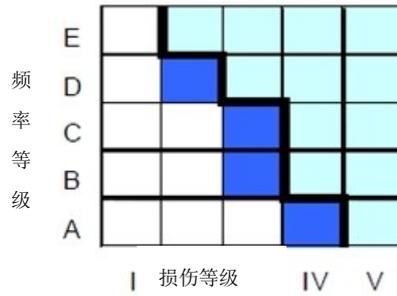


图 2 F-N 准则

Fig2 F-N diagram

由于铁路隧道的灾害问题，特别是长大铁路隧道的火灾为危害最大、发生频率最高的事故，无法完全杜绝，只能是推迟和尽可能降低损失。为此，可借鉴日本在公路隧道防火设施分级标准的经验，即根据隧道的长度、结构形式、灾害发生频率等级及灾害损失等级，将铁路隧道进行灾害分级，给出该隧道的安全等级划分区域，然后划分为若干个防火设施技术等级^[15]。

因此，建议铁路隧道应按此方法进行防灾安全等级的划分，并给出各等级下的设施配置标准。有关设置标准的内容需要进行既有隧道的调研获得，因此应在以后研究中开展本项内容。

4 结论

通过对铁路隧道灾害分类、原因、特征及灾害损伤分析，获得了以下结论：

(1) 从铁路隧道防灾及经济适用性的角度出发,建立合适的铁路隧道安全分级标准是必要的。

(2) 在进行铁路隧道防灾安全等级划分时可考虑的指标有隧道长度、隧道结构形式、道床形式、平面线形、列车类型、列车通过频率、通风方式等。

(3) 应在对铁路隧道灾害进行大量调研的基础上选定对隧道安全具有明显影响的指标，并据此将隧道分类、定级。

(4) 针对以上分类、定级，给出每一安全等级铁路隧道具体的预防、报警、消防等措施和设施用以指导设计。

参考文献(References)

- [1] Christof Neumann, Rudolf Bopp, Gerhard Harer, etc. Incident management in a very long railway tunnel[C]. Third International Symposium on Tunnel Safety and Security, Stockholm, Sweden, March 12 – 14, 2008
- [2] TSI-SRT, Safety in Railway Tunnels, Draft 07/2006
- [3] 于丽. 终南山特长公路隧道火灾模式下通风设计和控制技术研究[D]. 西南交通大学, 2009(YU LI. Researches on ventilation design control technology of Zhongnanshan super-long highway tunnel in fire[D]. Southwest Jiaotong University, 2009 (in Chinese))
- [4] 吴竞宇. 铁路隧道的火灾特性及防范措施初探[J]. 隧道/地下工程, 2006(7):75-77(Wu Jingyu. Fire characteristics and anti-measures of railway tunnel[J]. Tunnel/underground engineering, 2006(7):75-77(in Chinese))
- [5] 李光晓. 运营铁路隧道安全性评价[D]. 中南大学, 2009 (Li Guangxiao. Evaluation and Management on Safety of Operational Railway Tunnel[D]. CENTRAL SOUTH UNIVERSITY, 2009(in Chinese))
- [6] 杨艳青, 贺少辉. 铁路运营隧道安全性评定研究[C]. 2008(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集, 765-768(Yang Yanqing, He Shaohui. Research on Safety Evaluation of Operating Railway Tunnels[C]. Proceedings of 2008 (Shenyang) International Colloquium on safety science and technology, 765-768(in Chinese))
- [7] 徐玉香. 铁路隧道火灾爆炸事故原因及行车安全[J]. 中国铁道科学, 1997 (6) :22-35 (Xu Yuxiang. The Cause of Fire and Explosion Accidents in Railway Tunnel and Traffic Safety[J]. China Railway Science, 1997 (6) :22-35(in Chinese))
- [8] 占曙光, 黄海龙. 我国铁路长大隧道防火设计的分析[J]. 铁道运营技术, 2012(1):4-8(Zhan Shuguang, Huang Hailong. Analysis on anti-fire design of long railway tunnel in China[J]. Railway operation technology, 2012(1):4-8(in Chinese))
- [9] 陈宜吉. 隧道列车火灾案例及预防[M]. 中国铁道出版社, 1998(Chen Yiji. Fire case and prevention of railway tunnel[M]. China Railway

Press,1998(in Chinese))

[10]EUREKA

[11] 寇鼎涛.铁路隧道火灾特性及火灾原因分析[J].隧道建设, 2005 (1) :72-75; 88 (Kou Dingtao.Fire characteristics and prevention measures of railway tunnels[J]. Tunnel Construction, , 2005 (1) :72-75; 88(in Chinese))

[12] Marco Cigolini, RFI SpA. Evaluation of Railway Tunnels Safety for Operation Involving Trains Carrying Dangerous Goods-Fire Hazard and Risk Assessment Implemented with Probabilistic Methods[C]. Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, 2010

[13]廖曙江, 罗启才.火灾场景的确定原则和方法[J].消防科学与技术, 2004 (5): 249-251 (Liao Shujiang, Luo Qicai. The verification principle and method of fire scenario[J].Fire Science and Technology, 2004 (5): 249-251(in Chinese))

[14] Brannigan V M. Fire safty science provide the critical inputes for Performance based fire safty analyses[A]. Fire Safty Science proceedings EC]. sixth International Symposium. International Association for Fire Safty Science(IAFSS), 1999.

[15]邓念兵.公路隧道防火救灾对策研究[D].长安大学, 2003 (Deng Nianbing. Study on fire and rescue measures of highway tunnels[D]. Chang'an University,2003(in Chinese))

长大铁路隧道及隧道群救援设施的规划探讨

李琦, 于丽, 王明年, 罗欣宇

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 超过 20km 的长大铁路隧道及隧道群数量的不断增加, 其防灾救援问题日益引起人们的关注。为获得长大铁路隧道及隧道群救援设施的规划方案, 在对国内外长大铁路隧道及隧道群进行大量调研的基础上, 按列车长度和火灾烟雾影响范围将铁路隧道群分为毗邻隧道、连续隧道和单体隧道三类, 通过数值模拟的方法给出了不同类型长大铁路隧道及隧道群救援设施(紧急出口、避难所、救援站)的布置形式和排烟模式。即, 毗邻隧道的单洞和双洞救援设施主要考虑隧道内的紧急疏散通道、排烟设施的设置、站台的加宽和洞口段的扩大, 对于双洞隧道, 在洞口外要设置挡烟墙; 连续隧道的救援设施主要考虑站台的加宽、洞内外紧急疏散通道和洞口处待避场地的设置; 单体隧道的救援设施为设置横通道并采用洞内排烟模式。

关键词: 火灾; 救援设施; 铁路隧道群; 救援站

中图分类号: TU96

文献标识码: A

文章编号:

Discussion on rescue facilities planning in long railway tunnels and tunnel groups

Li Qi, Yu Li, Wang Mingnian, Luo Xinyu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Chengdu 610031)

Abstract: With the increase in number of long railway tunnels more than 20km long and tunnel groups, people are increasingly concerned about the issue of disaster prevention and rescue. In order to program the types of rescue facilities in long railway tunnel and tunnel group, based on a large number of research on railway tunnels and tunnel groups at home and abroad, the railway tunnel group is divided into adjacent tunnel, continuous tunnel and single tunnel, which is based on the length of the train and fire smoke scope. And plan the layout and smoke extraction pattern of rescue facilities (emergency exit, refuge, rescue station) in different types of long railway tunnel and tunnel groups. Research conclusion: rescue facilities of adjacent tunnel were considered to emergency evacuation passage-ways and smoke facilities in the tunnel, platform widened and the expansion of the hole section, and double-hole tunnel should set up the smoke wall outside the entrance; Continuous tunnel rescue facilities were considered platform widened, the settings of inside and outside the emergency evacuation passage-way and the shelter in tunnel portals; Single-tunnel rescue facilities were considered settings of transverse passage-way and smoke extraction pattern inside.

Keywords: fire; rescue facilities; railway tunnel groups; rescue station

作者简介: 李琦(1988), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程通风防灾救援研究工作。

E-mail: 602347502@qq.com

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2013T001); 国家自然科学基金(51308472); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU10101B10096020, SWJTU11BR013)

1. 引言

随着铁路交通运输行业的快速发展,长大铁路隧道及隧道群数量不断增大。目前超过 20km 的长大铁路隧道有瑞士圣地亚哥隧道 (57km)、瑞士勒岐山隧道 (34km)、奥地利 Korlam 隧道 (32.8km)、西班牙瓜达拉马隧道 (28.2km)、乌鞘岭隧道 (20.1km)、太行山隧道 (27.8km)、关角隧道 (32.6km)、高黎贡山隧道 (34.5km)、香山特长隧道 (23.9km)、青天寺隧道 (23km) 和大瑶山隧道群 (24.7km) 等^[1-6]。随着隧道长度的不断增加,长大铁路隧道及隧道群的防灾救援疏散问题日益突出。

铁路隧道防灾一般以火灾为主要预防对象,据资料统计,各国铁路隧道发生火灾已超过 30 起,我国发生的重大铁路隧道火灾有 6 起,死亡人数 89 人,伤 67 人,直接经济损失 1300 万^[7-8]。长大铁路隧道一旦发生火灾,将不同程度的引起人员伤亡,造成一定的经济损失。因此,可结合隧道情况设置不同的救援设施以期将损失降至最低。

铁路隧道的救援疏散设施主要包含紧急出口、避难所和救援站三种形式,但目前未见对不同类别铁路隧道开展救援疏散设施规划的相关规范和标准。因此,需要对三种救援疏散设施在铁路隧道及隧道群中的布置规划进行探讨。

2. 铁路隧道群定义

参考公路隧道群划分的方法,将铁路隧道群分为毗邻隧道和连续隧道两种,间距大于连续隧道的则称为单体隧道。

但由于铁路隧道群和公路隧道群的性质不同,划分的标准也不尽相同。为此,本文以铁路隧道群防灾疏散设施形式为研究重点,对铁路隧道群进行进一步的划分。

(1) 毗邻铁路隧道。定义两相邻隧道洞口间距小于列车长度的铁路隧道群为毗邻铁路隧道,如图 1 所示。由于两相邻隧道洞口间距小于列车长度,因此当事故发生时,事故列车车身一部分停在洞外,一部分停在洞内。若在此区域设置救援站,形式会比较复杂。因此,对洞外列车需要通过扩大隧道洞口结构来解决,洞内则需设置紧急疏散通道和排烟通道。若为双洞隧道,洞口还要设置挡烟墙。



图 1 毗邻铁路隧道示意图

Fig. 1 Schematic adjacent railway tunnel

(2) 连续铁路隧道。定义两相邻隧道洞口间距大于列车长度但小于刚好对隧道洞口附近等待的人员不产生危害的长度的铁路隧道群为连续铁路隧道,如图 2 所示。在此区域发生事故时,事故列车车身均位于洞外,若在此区域设置救援站,将不再考虑洞内的结构变化和排烟设施,但要考虑洞外站台的宽度和人员等待救援的场地面积。若为双洞隧道,洞口则要考虑设置挡烟墙。



图 2 连续铁路隧道示意图

Fig. 2 Schematic continuous railway tunnel

① 火灾烟雾的影响范围 L_2 的确定

将火灾烟雾的影响范围定位 L_2 ,假设火源点位于列车最后一节车厢,烟雾由车窗扩散到车外,火灾烟雾扩散如图 3 所示。



图 3 火灾烟雾扩散图
Fig. 3 Schematic fire smoke spread

距离火灾车厢不同距离处人眼高度的温度随时间变化如图 4 所示。

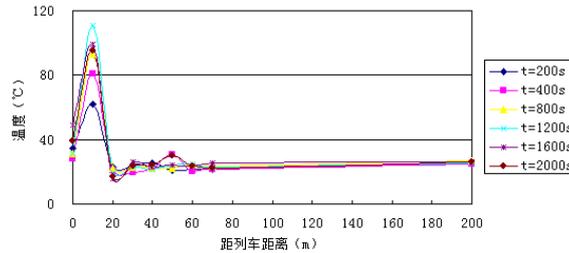


图 4 温度变化曲线图
Fig. 4 Temperature curve

图 5 为可视度随时间变化的曲线。

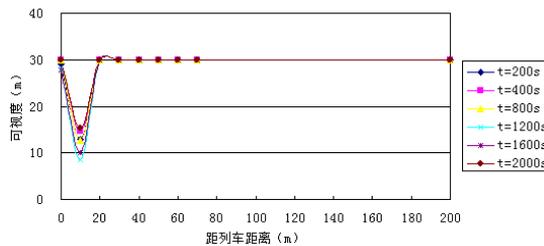


图 5 可视度变化曲线图
Fig. 5 Visibility graph

根据图 4 和图 5 可知，温度和可视度影响范围大约为 30m。因此，确定火灾烟雾的影响范围 L_2 的长度为 30m。

②人员待避站台长度 L_3 的确定

根据规范，救援站站台宽度不小于 $2.3m^{[9]}$ ，按每人 $0.5m^2$ 计算，火车满载时大约 1500 人，则人员待避站台长度 $L_3=1500/4 \times 0.5/2.3=82$ (m)

③隔烟墙尺寸确定

由于设置隔烟墙目的是防止火灾列车的烟雾进入无事故隧道，因此，其高度与隧道洞口高度相等即可，长度与 L_2 相等。

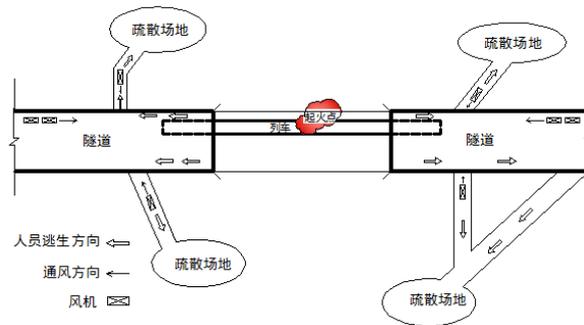
(3) 单体隧道。定义两相邻隧道洞口间距大于连续铁路隧道群的间距为单体隧道。单体铁路隧道若设置救援站，应设置在洞内，距隧道进出口距离大致相等。事故发生时，事故列车全部位于隧道内，火灾烟气严重影响隧道内的人员疏散，因此，需设置排烟通道以保障隧道内人员的安全，人员则需设置的多条疏散通道快速离开火灾隧道进入安全区域。

3.毗邻铁路隧道救援设施的设置形式

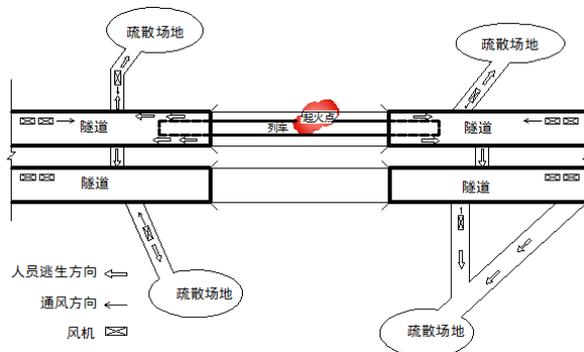
毗邻铁路隧道救援站若设置在两相邻隧道之间，则救援站一部分位于洞外，一部分位于洞内。两隧道均需设置救援站，每侧洞内救援站的长度与洞外救援站的长度之和应大于列车长度。救援站站台、隧道洞口救援站段相应加宽，洞内救援站需设置紧急疏散通道和排烟通道。

毗邻隧道有两种主要形式：一种为隧道-桥梁-隧道，一种为隧道-路基-隧道。考虑到两种形式在地形地质条件上的差异，在设置紧急疏散通道和排烟模式时应区别对待。

对隧道-桥梁-隧道形式，若直接在桥面设置下山的疏散路径有时没有条件，因此应在两隧道内近洞口处设置紧急疏散通道。紧急通道的形式通常为平导、横洞和斜井，距离洞口较近的通道以及主洞近洞口段均需布置射流风机。单洞和双洞铁路隧道的疏散通道的布置形式、疏散路径和通风模式分别如图 6 (a) 和 (b) 所示。



(a) 单洞铁路隧道
(a) Single hole railway tunnel

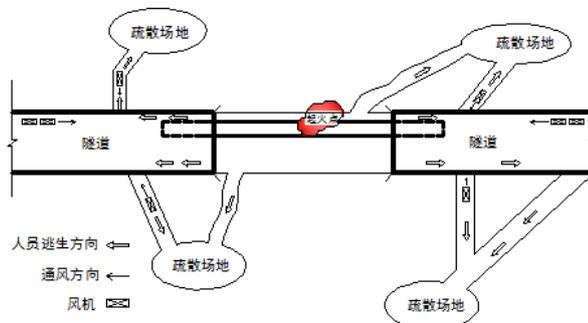


(b) 双洞铁路隧道
(b) Double-hole railway tunnel

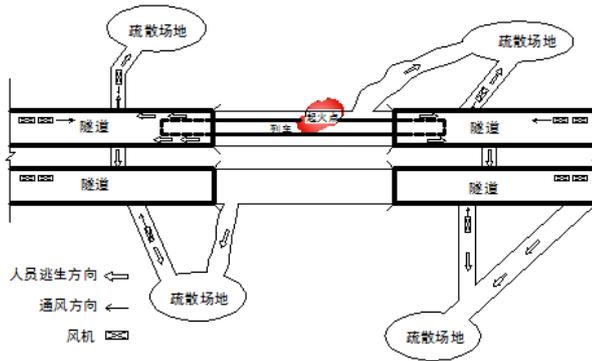
图 6 桥梁连接形式的毗邻铁路隧道布局规划示意图、

Fig. 6 Schematic of layout planning in bridge connecting adjacent railway tunnel

对隧道-路基-隧道形式，由于直接在路基上设置下山的疏散路径比较容易，则一般在路基两侧设置疏散通道，通向山下安全区域。若无条件设置足够的洞外疏散通道，则可以在两隧道内近洞口处设置紧急疏散通道作为补充。紧急通道的形式有平导、横洞和斜井，距离洞口较近的通道及主洞近洞口段均需布置射流风机。单洞和双洞铁路隧道的疏散通道布置形式、疏散路径和通风模式分别如图 7 (a) 和 (b) 所示。



(a) 单洞铁路隧道、
(a) Single hole railway tunnel



(b) 双洞铁路隧道

(b) Double-hole railway tunnel

图 7 路基连接形式的毗邻铁路隧道布局规划示意图

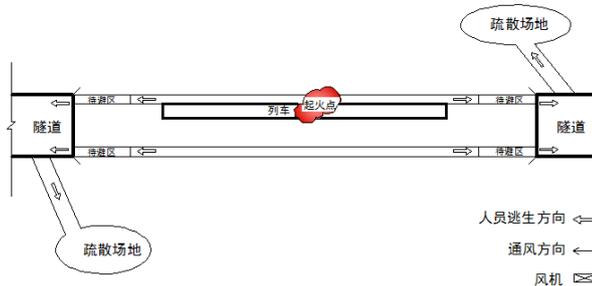
Fig. 7 Schematic of layout planning in subgrade connecting adjacent railway tunnel

3 连续铁路隧道救援设施的设置形式

连续铁路隧道救援站若设置在两相邻隧道之间，则救援站全部设在洞外。救援站站台需加宽。

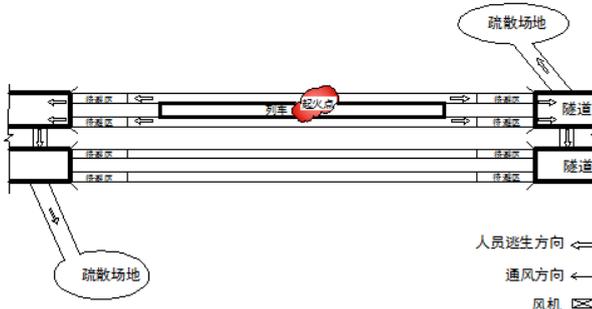
连续隧道有两种主要形式：一种为隧道-桥梁-隧道，一种为隧道-路基-隧道。紧急疏散通道的设置应考虑两种形式的地形地质条件而有所区别。

对隧道-桥梁-隧道形式，由于直接在桥面设置下山的疏散路径有时没有条件，则一般在两隧道内近洞口处设置紧急疏散通道或加宽洞口附近站台宽度，供疏散人员等待救援。紧急通道的形式有平导、横洞和斜井。单洞和双洞铁路隧道的疏散通道的布置形式、疏散路径和通风模式分别如图 6 (a) 和 (b) 所示。



(a) 单洞铁路隧道

(a) Single hole railway tunnel



(b) 双洞铁路隧道

(b) Double-hole railway tunnel

图 8 桥梁连接形式的连续铁路隧道布局规划示意图

Fig. 8 Schematic of layout planning in bridge connecting continues railway tunnel

对隧道-路基-隧道形式，由于直接在路基上设置下山的疏散路径比较容易，则一般在路基两侧设置疏散通道，通向山下安全区域。若没有条件设置足够的洞外疏散通道，则可以在两隧道内近洞口处设置紧急疏散通道作为补充。紧急通道的形式有平导、横洞和斜井，距离洞口较近的通道内需布置射流风机，主洞近洞口段应设置射流风机。单洞和双洞铁路隧道的疏散通道布置形式、

疏散路径和通风模式分别如图 7 (a) 和 (b) 所示。

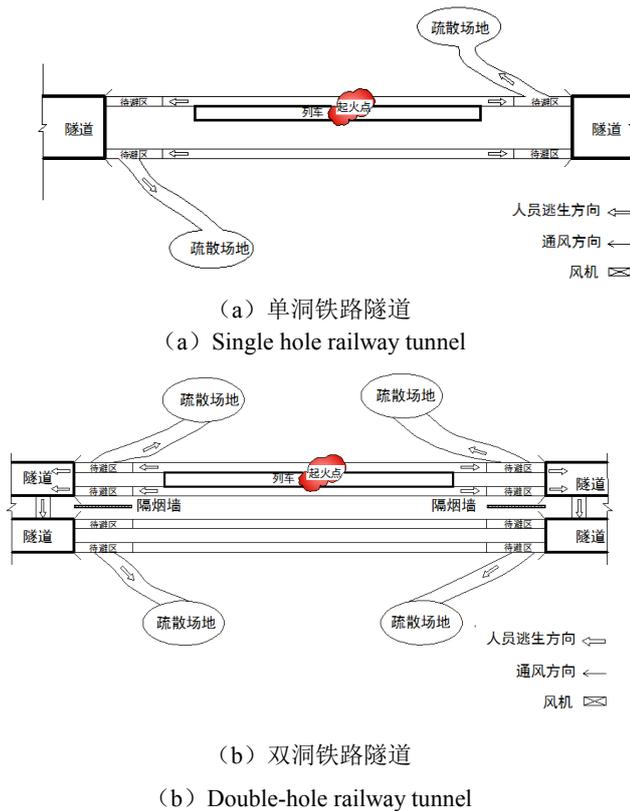


图 9 路基连接形式的连续铁路隧道布局规划示意图

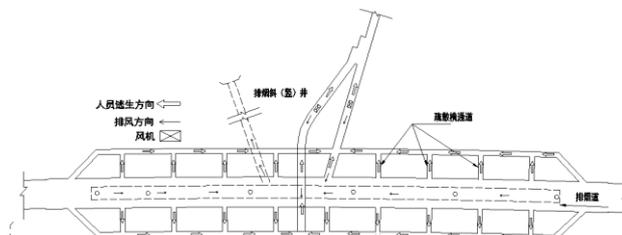
Fig. 9 Schematic of layout planning in subgrade connecting continues railway tunnel

4 单体铁路隧道救援站的设置形式

根据《铁路隧道防灾救援疏散工程设计规范》^[9]，单体铁路隧道的紧急出口和避难所设置原则和形式为：

- (1) 对于双洞隧道，采用联络横通道将两隧道相连，作为紧急出口，间距不大于 500m。
- (2) 当 $3\text{km} < S \leq 5\text{km}$ 时， S 为隧道段长度，单洞隧道洞身段可设置一处紧急出口，若此段没有设置紧急出口的条件，则可以不设。
- (3) 当 $5\text{km} < S \leq 10\text{km}$ 时，单洞隧道洞身段应设置一处紧急出口或避难所。
- (4) 当 $S > 10\text{km}$ 时，单洞隧道洞身段设置至少一处紧急出口或避难所，必要时增设，并且间距不大于 5km，布置尽量均匀。
- (5) 紧急出口的形式主要有斜井式（长度小于 500m，坡度小于 12%）、竖井式（垂直高度小于 30m，楼梯总宽度大于 1.8m）和横洞式（长度小于 1000m）。
- (6) 不满足紧急出口设置条件的则可设置为避难所。

单体铁路隧道的救援站一般设置在隧道内。无论是单洞或双洞铁路隧道，救援站的布置均以加密横通道为主要形式。横通道内布置射流风机，救援站设有排烟通道。单洞隧道的救援站布置形式和排烟模式（拱顶排烟道）如图 10 所示。



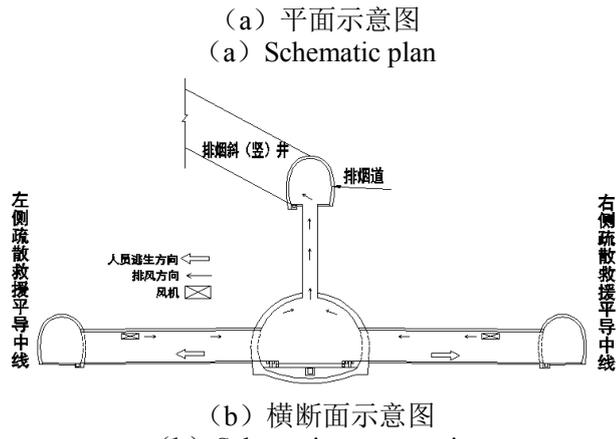


图 10 单洞隧道的救援站布置形式和排烟模式示意图

Fig. 10 Schematic of rescue station layout and smoke extraction pattern in single-hole tunnel
双洞隧道的救援站布置形式和排烟模式（斜、竖井排烟）如图 11 所示。

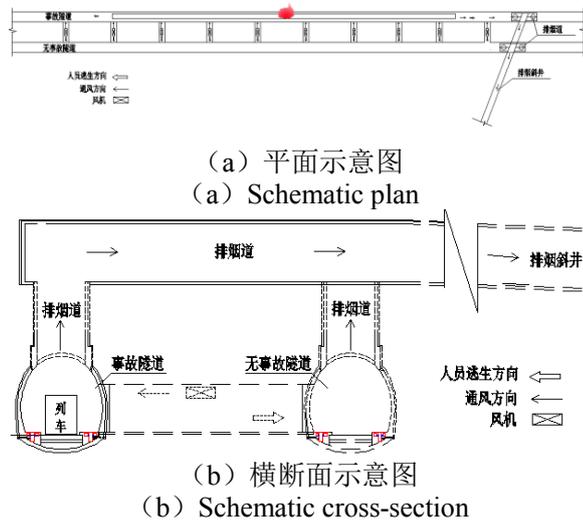


图 11 双洞隧道的救援站布置形式和排烟模式示意图

Fig. 11 Schematic of rescue station and smoke extraction pattern in double-holes tunnel

5 结论

通过对长大铁路隧道及隧道群救援设施规划的研究，得到的主要结论有：

(1) 通过对国内外长大铁路隧道及隧道群的调研，按列车长度和火灾烟雾影响范围将铁路隧道群分为毗邻隧道、连续隧道和单体隧道三类。

(2) 毗邻铁路隧道为两相邻隧道洞口间距小于列车长度的铁路隧道群。其救援站部分设置在洞外，部分设置在洞内，洞内设有紧急疏散通道和排烟设施。

(4) 连续铁路隧道为两相邻隧道洞口间距大于列车长度并小于刚好对隧道洞口附近等待的人员不产生危害的长度的铁路隧道群。其救援站设置在洞外，可在洞外设置疏散通道。

(5) 单体隧道为两相邻隧道洞口间距大于连续铁路隧道群间距的铁路隧道群。单体隧道救援站设置在洞内，多数以横通道加密的形式出现，救援站设置排烟通道。

参考文献(References)

- [1] 郭春,王明年,赵海东. 铁路特长隧道火灾应急救援问题研究[J].中国安全科学学报,2007,17(9):153-158. (Guo Chun, Wang Mingnian, Zhao Haidong. Research on the Emergency Rescue of Fire in Super-long Railway Tunnel [J].China Safety Science Journal, 2007,17(9):153-158. (in Chinese))
- [2] 孙富海. 石太客运专线长大隧道防灾救援设计研究[J].铁道工程学报,2009,(10):79-83. (Sun Haifu. Research on the Design of Disaster

- Prevention and Relief in Large Tunnel of Taiyuan-Shijiazhuang Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009,(10):79-83. (in Chinese))
- [3] 谢勇涛,丁祥. 香山特长隧道运营通风及防灾救援方案设计研究[J].地下工程,2010,(4):81-84. (XieYongtao,DingXiang. Journal of railway engineering society, 2009,(10):79-83. (in Chinese))
- [4] 曹正卯. 关角隧道运营通风防灾技术研究[D]. 西南交通大学,2011.(Cao Zhengmou. Study on the Technology of Operation Ventilation and Disaster Prevention of Guanjiao Railway Tunnel [D]. Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [5] 罗章波. 包兰铁路青天寺隧道运营通风及防灾救援设计[J].地下空间与工程学报,2011,7(1):185-193. (Luo Zhangbo. Design on Operation Ventilation and Disaster Prevention and Relief of the Blue Sky Temple Tunnel at Baotou-Lanzhou Railway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(1):185-193. (in Chinese))
- [6] 颜志伟. 武广客运专线大瑶山隧道群防灾救援疏散设计研究[J]. 铁道工程学报, 2011(8) :7-12. (Yang Zhiwei. Study on Desion of Disaster Prevention And Rescue Evacuation System for Dayaoshan Tunnel Group of Wuhan-Guangzhou Passenger Dedicated Line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(8) :7-12. (in Chinese)).
- [7] 杨英霞,陈超,屈璐,等.关于地铁列车火灾人员疏散问题的几点讨论[J].中国安全科学学报, 2006, 16(9): 45~50(Yang Ying-xia,Chen Chao, QU Lu, etc. Discussion on Some Problems of Evacuation fromMetroTrain Fir [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 45~50. (in Chinese))
- [8] 陈宜吉,张容康.隧道列车火灾案例及预防[M].北京:中国铁道出版社,1998. 1(Chen Yiji, Zhang Rongkang. Train Fire Cases and Prevention in Tunnel [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [9] 铁路隧道防灾救援疏散工程设计规范(TB10020-2012)[S].北京:中国铁道出版社,2012(Code for Design on Evacuation Engineering for Disaster Prevention and Rescue of Railway Tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese))

铁路隧道事故调查标准化方法的研究

颜冠峰, 王明年, 范宇, 李睿峰, 陈英军

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 随着我国经济的发展和交通设施建设的逐步完善, 我国铁路隧道数量逐渐增多。但是, 事故发生的可能性和危害程度也逐渐增加。而目前对于铁路隧道的事故调查通常以调查人员本身的工作经验为依据, 具有一定的主观性, 这可能导致调查过程效率低下或调查结果出现偏差。因此, 建立铁路隧道事故调查方法的标准化是十分必要的。因此, 基于目前常用的调查方法, 依据铁路隧道事故的分类和调查目的, 制定了一套具有针对性的标准化的铁路隧道事故流程, 并结合工程实例进行了验证, 可供相关人员参考。

关键词: 隧道事故; 隧道事故分类; 调查目的; 标准化

中图分类号: U25

文献标识码: A

Study on standardizing method of railway tunnel accident investigation

Yan Guanfeng, Wang Mingnian, Fan Yu, Li Ruifeng, Chen Yingjun

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With improvement of the economy of our country and the traffic equipment construction, the number of railway tunnel in our country is larger and larger. However, the possibility of accident and the level of damage are increasing. At the present, the railway tunnel accident investigators do their job based on their work experience, which varies from person to person and will lead to low efficiency and deviation. So standardizing method of railway tunnel accident investigation is necessary. So, based on present regular investigation methods, according to classification of tunnel accidents and purpose of investigations, this paper brings out a standardizing railway tunnel accident investigation procedure with direction, which is proved by a construction example and provides reference for the related engineers.

Keywords: tunnel accidents; classification of tunnel accident; purpose of investigation; standardization

1 引言

随着我国经济的发展和交通设施建设的逐步完善, 我国铁路隧道数目也每年逐渐增多。

但是, 隧道提供给大家便利的同时, 也出现了很多事故。例如 2009 年 7 月 26 日 8 时 15 分, 由西安开往乌鲁木齐的 1043 次旅客列车, 运行至中国最长的铁路隧道兰新线乌鞘岭隧道左线时, 机车突然着火。发生火灾后, 铁路部门决定将发生火灾的机车与列车分离, 并先将机车紧急开到随到外面, 武威消防支队接到电话后, 就到现场救援, 由于措施及时有效, 并无人员伤亡。

对于造成严重后果的铁路隧道事故的调查, 目前在国内外没有形成统一的体系, 仅仅是依靠调查人员的以往的经验^[1], 因此具有很大程度的个性化, 不同的调查人员会得出不同的结果。这会衍生出一些问题, 在调查阶段因为没有一套现成的调查方案, 调查员可能因没有依据, 导致调查时工作效率低下, 甚至因没有完整的成套的系统化的调查方法, 而出现漏掉需要调查的方面以及缺少某些调查项目的问题。不仅在调查过程中可能出现的问题, 甚至在使用调查报告时, 也会出现问题, 使得对事故的理解出现一定的偏差等。

因而, 建立一套标准化的铁路隧道事故调查方法是十分必要的。

2 事故调查方法现状

目前对于事故调查还没有成型的系统性的方法^[2], 因而目前大家对于事故调查还是依据各自的工作经验, 具有很强的个体差异性。

2.1 事故分类及调查理论

对于事故本身, 依据其原因及现象的差异有着不同的分类^[3], 并且针对不同的分类有着各自的调查理论和程序。列举如下:

(1) 单一事件事故和“诱因”理论。

该理论假设事故是由单一的诱因诱发的，因而调查者需要对原因进行细致的调查，其调查的任务就是找出诱因并且将其克服。因此，此类事故具有重复性，并且在未来可以预防的。该种事故在各种文献中应用广泛。

(2) 连环事件事故和“多米诺”理论

该理论假设“危险条件”一旦出现，可以导致一系列的事故。因而，调查员需要找出“危险条件”，并将其解除。但是目前“危险条件”判断的标准并不明确，也没有统一的标准，而且结论通常反映和描述事件，而非分析其“病因”。

(3) 决定性变量事故和“找因”理论

寻找决定性变量的理想状态及目标，被认为是搜集数据。在此情况下，数据比较将较准确地估计出事故中某特定因素的变化将对结果造成的影响。假设事故中的特定因素是已知的，并且可以根据事故调查统计分析“正常”情况相区分。

(4) 分支事件链事故和“逻辑树”理论

该理论假设事故是可预见的，并且可由知识渊博的系统分析师们研究推断出事故可能的路径。并依据推断出的路径，找出事件链，然后进行排序

(5) 多线性事件事故和过程理论

该理论假设事故是连续事件的瞬时片段，并且事故是一个变化的过程。事故的原因是干扰者的行动，且行动在时间和空间上又先后顺序。可以列出“时间坐标”来显示时间关系，以及“逻辑树”显示各个时间的逻辑关系。

2.2 事故调查程序

目前对于隧道的调查基本分为 7 种程序，每种调查程序简要描述如下：

(1) 单人调查

一名调查员完成调查的所有的项目从数据收集，解释和分析，到报告调查结果。报告基本是常是简短的口头或叙事报告，或已完成事故报告。

(2) 组织内部的专案小组处理程序

事故发生时，调查组正在组织内形成，由没有接受调查培训的正规员工负责。通常团队搜索一连串的事件，不安全的行为或情况。因为团队人员的自身利益，通常以肤浅内部报告的方式提供调查成果。

(3) 组织内长期的团队调查程序

由预先指定的团队进行全方位的调查，包含很多检测。团队通常包括一个或者多个有着调查经验并且受到的培训十分全面的调查人员。所提供的最终报告通常会叙述事故的原因，团队成员往往能在报告完成前完成改进提高。

(4) 多组织长期的团队过程

一个组织构建一支团队，使用来自其他组织或团体的成员来进行一系列的事故调查。查者对于他们的工作往往训练有素，经常由团队中经验丰富的成员协助。其最终提供的报告，通常是综合性的，并含有大量的表格和数据。

(5) 司法或者立案调查

该调查多以执法、问责为目的。

3 标准化铁路隧道事故调查方法

通过以上分析可以看出，对于事故分类及调查程序是很多的。但每种事故具有不同的特点，调查时不可一概而论；而调查的方法也有不同的特征，对不同的事故或者是调查的目的应采用合理的对应关系。

根据实际中事故调查的基本步骤，借鉴历史经验，最终得出具有系统化、高效性、针对性的标准化的隧道事故调查方法。

3.1 事故调查的基本步骤

一般来说，事故调查的一般性的程序为：事故发生-报警，救援，搜集基本信息-成立调查小组-到达现场调查-研究得出报告^[4]。

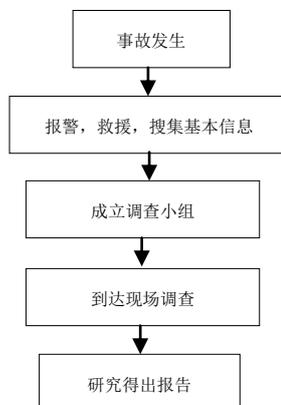


图 1 事故调查的一般性的程序

Figure1 General procedure of accident investigation

3.2 基本流程建立的标准化及依据

上述说的是一般步骤，但是对于每个不同的事故，其具体的每一步可以有不同的内容，而每一步的具有针对性的选择而应该依据上一步所取得的成果。这样一来，既可以做到程序的标准化，可以使每一步具有针对性，使步骤合理及高效。

(1) 报警，救援，搜集基本信息所需完成工作

成立调查小组所需要的信息大体为：调查的目的。因而此步骤在完成所需完成的基本工作后，就是提供一个原始资料，大体确定调查目的。

结合实际经验，将调查小组的类别大致分为三类，并将每种适用的场合列表如下：

表 1 调查小组分类

Tab1 Classification of investigation team	
调查小组类	适用场合
单人短期组	较小事故，非科学研究
小队短期组	较大事故，非科学研究
小队长期组	较大事故，科学研究
司法部门队	鉴定事故，问责

参考历史经验，暂将事故调查的目的分为三类：简单调查、科学研究、法律问责。将其罗列如下：

表 2 调查目的分类

Tab2 Classification of investigation purpose	
调查目的	适用场合
简单调查	事故了解较深，事故较小
科学研究	希望对事故有科学、系统的认
法律问责	追究责任人法律责任

提出一个两者的对应关系，是成立的研究调查小组更具有针对性。列表如下：

表3 调查小组与事故调查目的的对应关系

Tab3 Correspondence between investigation team , accident type and investigation purpose

调查小组	调查目的
单人短期	简单调查
小队短期	简单调查
小队长期	科学研究
司法部门	法律问责

由上述可知，在报警，救援，搜集基本信息阶段^[7]，我们就可以确定调查小组的类型。

(2) 成立调查小组所需完成工作

到达现场调查所需要的信息为隧道基本信息，以及对于事故的记录。对于事故的记录需要对事故原因有着一定的了解^[5,6]。在成立调查小组后，依据前一阶段提供的信息，依据调查小组的经验，做对事故原因的初步的判断。

结合历史经验，将事故原因分为三类：单因事故，多因事故，连环事故。将其列表如下：

表4 事故原因分类

Tab4 Classification of accident cause

事故原因	特征
单因事故	一个原因引起单个事故
多因事故	多个原因引起单个事故
连环事故	存在多起事故

据上述推知，到现场调查时，可依据调查小组对于事故原因的初步判断，确定前往现场的主要工作。

(3) 到达现场调查所需完成工作

研究得出报告应当提供下列成果：事故原因分析，给出处理建议，记录在数据库中供未来参考。在现场的调查中，应该分两部分调查，即隧道基本信息，以及对于事故的记录，并确定事故原因，并展开深入调查。

在调查中，需要填写一张标准化的表格，表格将在后文给出样例。

(4) 研究得出报告所需完成工作

这是调查的最后一个阶段，在此阶段，主要需要完成的事情就是在前几个阶段的资料汇总，并且完成事故原因分析，给出处理建议，将事故资料记录在数据库中供未来参考^[8,9]。

4 工程实例说明

根据以上流程和方法，结合 1996 年 11 月 18 日的英吉利隧道事故来阐述该方法的使用。

1996 年 11 月 18 日，事故发生在法国英国的英吉利海峡隧道隧道。事故的过程大致为：火车上的一辆卡车着火，火车在不知情的情况下走行了一段距离。待发现停车时火势已经很大，烟雾蔓延，影响到了其他列车正常行驶，最后人员通过横向辅助通道逃生，未造成人员伤亡，但是结构受到破坏严重。

按照标准化的隧道事故调查方法的基本步骤，来进行示例。首先，灾害发生了；第二步，报警，救援，搜集基本信息，在此阶段，先努力救援，然后依据其隧道的重要性、事故等级等特征

判定调查的目的为简单调查，因而确定调查小组为小队短期组；第三步，成立调查小组，依据第二步资料初步确定事故原因类型单因事故，单个车辆着火，导致多辆车受灾；第四步，到达现场调查，依据以上的步骤所得的信息，隧道基本信息，并对事故进行记录，填写事故记录表格，因其是单因事故，只需要记录原因及引发的一系列后果；最后一个阶段，研究得出报告，并完成事故原因分析，给出处理建议，将事故资料记录在数据库中供未来参考。示例如下：

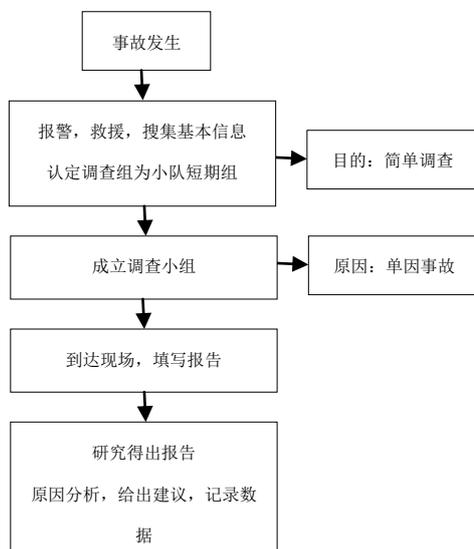


图 2 事故调查示例

Fig2 Example of accident investigation

在现场调查时，会填写一份报告，也以此事故为例，做一个示例。如下：

表 5 填写的报告示例

Tab5 Example of report written

法国-1996-11-18	
事故发生的时间，地点	1996/11/18， 法国/英国
隧道简况	
隧道名称	Channel tunnel
隧道长度	51 公里
运营者	
隧道类型	铁路
危险品运输	有限制的
事故简况	
事故类型	火灾
受灾车辆	运输系统
事故类型	单因事故
后果	人员伤亡：轻微中毒 建筑损伤：隧道纵向超过 100m 损坏。

对灾害的具体描述:

火车进入隧道前,火车上的一列卡车起火。卡车位于与机车相邻的车厢内。火车继续按照正常速度(120km/h)行驶了10分钟,然后在相邻的服务隧道出口处停下。由于火情严重,当火车停下后,电线被快速烧毁。当时火情非常严重(最大100兆瓦),迅速蔓延到了相邻的车厢。由于其他火车在隧道内行驶,火车内的浓烟扩散非常快,使得营救更加困难。员工车厢上的人和卡车司机设法通过附近连接到横向服务隧道的门逃生。

在最终的成果中,将填写一份报告,也以此事故为例,做一个示例。如下:

表6 填写最终报告示例

最终报告	
原因分析	火车上的一辆卡车起火,导致隧道的通风不良,多辆火车受灾
建议	进行科学化的研究火灾的防治措施,并且限制危险车辆进入隧道 采取措施避免再次发生
记录数据	将有关记录保留,供以后参考 >10

通过以上示例可以得出,该方法具有高效,标准化,针对性等特征,可以供工程技术人员参考。

5 结论

通过分析目前的隧道事故调查方法状况,以及结合现有的工程经验,得出以下结论:

(1) 提出标准化的铁路隧道事故调查方法和流程有利于提高效率、避免误解,是十分必要的。

(2) 依照一般的铁路隧道事故调查步骤,每一步依照下一步所需内容确定需要完成的内容,可使每步工作更加具有针对性,且对于隧道事故调查方法的标准化。

(3) 通过示例证明,该方法具有高效,标准化,针对性等特征,可以供工程技术人员参考。

参考文献(References)

- [1] Christof Neumann, Rudolf Bopp, Gerhard Harer, etc. Incident management in a very long railway tunnel[C]. Third International Symposium on Tunnel Safety and Security, Stockholm, Sweden, March 12 - 14, 2008
- [2] 黄廷胜. 系统化事故调查方法研究[D]. 华东理工大学, 2013.(HUANG TINGSHENG. Industrial Accident Systemic Investigation Techniques[D]. East China University of Science and Technology, 2009.(in Chinese)).
- [3] Christian D'Alessio (SESM), Francesca Matarese (SESM), Ilaria Neri (SESM). Tunnel accident data and review of accident investigation methodologies
- [4] 邓念兵. 公路隧道防火救灾对策研究[D]. 长安大学, 2003 (Deng Nianbing. Study on fire and rescue measures of highway tunnels[D]. Chang'an University, 2003(in Chinese))

- [5] Marco Cigolini, RFI SpA. Evaluation of Railway Tunnels Safety for Operation Involving Trains Carrying Dangerous Goods-Fire Hazard and Risk Assessment Implemented with Probabilistic Methods[C]. Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, 2010
- [6]李光晓.运营铁路隧道安全性评价[D].中南大学, 2009 (Li Guangxiao. Evaluation and Management on Safety of Operational Railway Tunnel[D]. CENTRAL SOUTH UNIVERSITY,2009(in Chinese))
- [7]吴德兴, 李伟平, 郑国平.浙江省高速公路隧道事故的调查分析及对策研究[J]. 公路, 2011(8):312-316(Wu Dexing, Li Weiping, Zheng Guoping[J]. HIGHWAY, 2011 (8):312-316
- [8]滕彩霞. 公路隧道事故灾害与紧急救援策略研究[D]. 长安大学, 2011 (Teng Caixia, Study on Highway Accidents and Emergency Rescue Strategy[D]. Changan University, 2011 (in chinese))
- [9]钱超. 公路隧道突发事件交通控制与紧急救援预案研究[D]. 长安大学, 2009 (Qian Chao, Study on the Traffic Control and Emergency Rescue pre-plan for Highway Emergency[D], Changan University, 2009 (in chinese))

高海拔单洞+服务隧道横通道间距设置研究

严涛^{1,2}, 王明年¹, 张子晗¹, 刘祥¹,

(1.西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室土木工程学院, 四川成都 610031;

2.西南交通大学峨眉校区土木系, 四川峨眉 614202)

摘要: 针对海拔超过 3500m 高海拔单洞+服务隧道结构形式, 建立火灾模型及人员疏散模型, 得到高海拔人员逃生可用时间及必需时间。对两个时间进行对比分析, 在高海拔地区最不利火灾工况下, 为保证人员疏散安全, 铁路隧道横通道间距应 250m 设置一道。

中图分类号: 文献标识码: 文章编号:

Research on Transverse Gallery Intervals in the Single and Service Tunnel Construction Form with High Altitude

YAN Tao^{1,2}, WANG Mingnian¹, ZHANG Zihan¹, LIUXiang¹

(1. *Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

(2. *Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, Sichuan, China)*

Abstract: For the single and service tunnel construction form with the altitude exceeding 3500 m, we can get personnel available and necessary time to escape in the high altitude by setting up Fire model and occupant evacuation model. Analyzing the two time, we can infer that in order to ensure the safety of evacuation in the most unfavorable fire conditions at high altitude area, the interval of railway tunnel's transverse gallery should be 250 m.

1.引言

随着关角隧道、羊八井隧道、昆仑山隧道等一批海拔超过 4000m 铁路隧道^[1]的不断建成运营, 以及川藏铁路的不断规划建设, 且川藏铁路需经过的川西高原海拔大多也在 3500m 以上, 研究高海拔隧道内发生火灾时的防灾救援问题显得刻不容缓。且在这些高海拔地区由于展线困难或地质条件较差结构形式可采取单洞+服务隧道的结构形式, 而这种结构横通道间距设置对于人员逃生就显得尤为重要。

对于高海拔公路隧道横通道间距, 王明年、严涛^[2]通过对海拔 3850m 的巴朗山隧道火灾发展规律及人员逃生能力进行了系统研究, 最终得到安全横通道间距为 200m; 而对于高海拔铁路隧道横通道间距, 张念^[3]通过研究建议关角隧道采用 420m 一道进行设置。

对于海拔超过 3500m 单洞+服务隧道的结构形式设置横通道, 可按照双线隧道处理, 重点对两个时间即“人员逃生必须时间和人员逃生可用时间”展开研究, 从防灾救援角度确定高海拔单线铁路隧道横通道合理间距。

2.计算参数设定

以海拔高度 3800m 的某单线铁路隧道+服务隧道为例, 建立铁路隧道模型, 隧道坡度取 1.2%, 火车长度取 400m, 选取最不利工况即火车着火位置正对横通道, 人员需分别向两侧横通道逃生, 计算火源的蔓延规律以及人员的逃生能力。

3.人员逃生可用时间 ASET

3.1 火灾安全疏散可用时间判定标准

模拟火灾的发展过程，对影响人员安全疏散的几个关键参数烟层高度、辐射热、对流热进行界定，确定出逃生人员可承受极限环境条件，从而得到确定的 ASET 判定条件。

另外，还有诸如毒气、能见度等对人员安全疏散可用时间产生影响。根据依托工程海拔高低压低氧的气候特点，会引起人员身体不适，从而机体功能下降，在火灾情况下，人员对辐射热、对流热及有害气体等外界灾害的抵抗能力也相应降低，火灾中如果同时满足以下两个条件，可认为能够保证人员安全地进行疏散^[4]：

- (1) 人眼特征高度 $Z=1.7\text{m}$ 处，烟气温度不超过 80°C ；
- (2) 人眼特征高度 $Z=1.7\text{m}$ 处，且可视度不小于 10m 。

3.2 建立模型

运用 FDS 计算软件，建立双线铁路隧道及火车模型，着火位置正对横通道，火灾烟雾向两侧扩散。采用火灾热释放率定义火灾规模，火灾规模为 20MW ^[5]。

火灾增长曲线

由标准火灾发展曲线近似得到的，热释放速率随时间的变化规律^[6-7]如下：

$$Q = \begin{cases} \alpha t^2 & (t \leq t_0) \\ Q_{\max} & (t > t_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中： Q ——火源热释放速率，MW；

α ——火灾发展速率， KW/s^2 ；

t ——火灾发展时间，s；

t_0 ——临界时间，s。

但在依托工程隧址区，高海拔低压低氧的环境对火灾的发展有很大的影响，火灾的热释放速率正比于当地大气压强，由于一个地区不同季节、不同天气情况等条件下的大气压强不同，取平均大气压 61.3KPa ^[8]计算。即可得隧址火灾热释放速率相当于标准火灾发展曲线得到的热释放速率的 61%。

1、火灾位置

从疏散路线上来看，当火源点恰好位于一人行横通道处，且火区堵塞该人行横通时，人员疏散路线的长度最长，对疏散最不利。火灾模拟场景中选取 2#横通道作为火源点位置。

在网格划分时， 20MW 火灾规模火区的网格尺寸为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ ，其他区域适当放大，模型建立如下图所示。

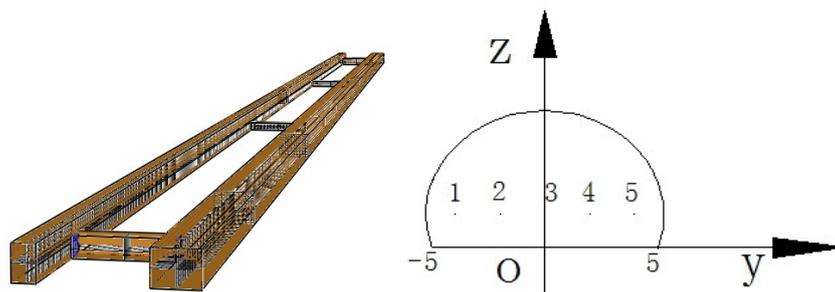


图 1 模型网格划分图 2 主洞横断面上测点布置图

Figure 1 the mesh of model Figure 2 layout of measuring points in the cross-section of main tunnel

2、探测点分布

火源点上下游主洞横断面上温度的分布情况，主洞横断面测点布置见图 2 所示。纵向沿着火点上下游分别布置测点，上游测点 1 距着火点最远 290m ，下游测点 16 距着火点最远 310m ，如图 3 所示。

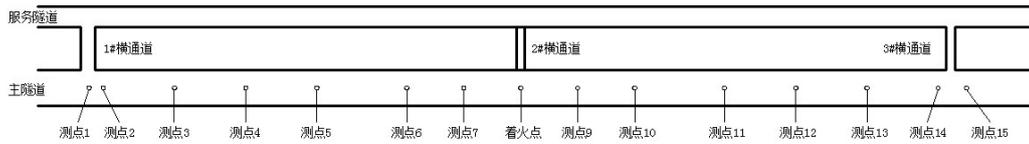
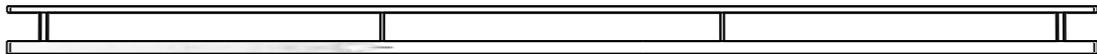


图 3 纵向测点布置图

Figure 3 layout of longitudinal measuring points

3.3 计算结果分析

1、烟气扩散过程如图 4 所示。



(a) $t=200s$ 时主洞及服务隧道内烟雾分布图

(a) the smoke distribution of main and service tunnel when $t=200s$



(b) $t=400s$ 时主洞及服务隧道内烟雾分布图

(b) the smoke distribution of main and service tunnel when $t=400s$



(c) $t=600s$ 时主洞及服务隧道内烟雾分布图

(c) the smoke distribution of main and service tunnel when $t=600s$



(d) $t=800s$ 时主洞及服务隧道内烟雾分布图

(d) the smoke distribution of main and service tunnel when $t=800s$



(e) $t=1000s$ 时主洞及服务隧道内烟雾分布图

(e) the smoke distribution of main and service tunnel when $t=1000s$

图 4 烟雾分布随时间变化图

Figure 4 Smoke distribution variation over time

图 4 是火灾规模为 20MW 时，烟雾-时间分布图。随着火灾发展，烟雾大量产生并向两侧扩散，随着时间的增长，烟雾的蔓延长度增长至一定值后达到稳定，但烟雾浓度在不断的增大；相邻隧道内，在 $t=1000s$ 时有少量烟雾从开启的 1#横通道、3#横通道进入平导内，但烟雾浓度很低，对人员疏散几乎没有影响。

2、可见度分布规律

隧道拱顶可见度最低，然后高温烟气沿火源点拱顶壁左右两侧蔓延，过程中与空气进行热交

换。前 500s 烟气的分层结构较好，烟气维持在隧道上部。

火灾进一步的发展，烟气开始逐渐充满整个隧道。图 5 中黑色断线代表隧道内能见度为 10m 的分界线，可以看出， $t=600s$ 时分界线处于隧道断面比较高的位置； $t=700s$ 时，黑色断线在向火源点两侧发展的同时，向隧道底部发展。



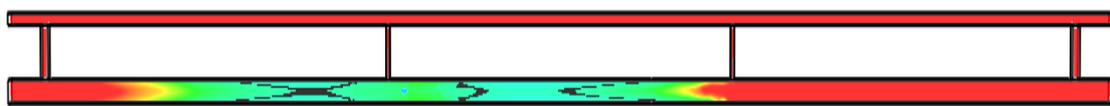
(a) $t=400s$ 时 $z=1.7m/s$ 切片能见度云图

(a) the section visibility nephogram when $t=400s, z=1.7m/s$



(b) $t=600s$ 时 $z=1.7m/s$ 切片能见度云图

(b) the section visibility nephogram when $t=600s, z=1.7m/s$



(c) $t=700s$ 时 $z=1.7m/s$ 切片能见度云图

(c) the section visibility nephogram when $t=700s, z=1.7m/s$



(d) $t=800s$ 时 $z=1.7m/s$ 切片能见度云图

(d) the section visibility nephogram when $t=800s, z=1.7m/s$



(e) $t=1000s$ 时 $z=1.7m/s$ 切片能见度云图

(e) the section visibility nephogram when $t=1000s, z=1.7m/s$



(f) 不同能见度所对应的色度条

(f) the color bands corresponding to different visibility

图 5 人眼特征高度处隧道及服务隧道能见度-时间云图

Figure 5 The visibility-time nephogram of main and service tunnel at the human eye's characteristics height

从上图可得：

在 1000s 之前，横通道及服务隧道人眼特征高度处均未受到烟气的侵害，1200s 图中有很小区域受到污染，表明从能见度角度看，该通风方案可以保证假定安全区域的安全。

观察实时计算结果， $t=660s$ 时，开始在火源点上游（100m，150m）范围内出现危险区域，横向上从隧道边墙向中间发展，纵向上迅速蔓延， $t=700s$ 时，已扩展至上游（80m，200m）、下游（50m，120m）。

在人眼特征高度处，沿隧道中轴线布置了一系列测点提取相关数据，得到各测点能见度随时间变化图。

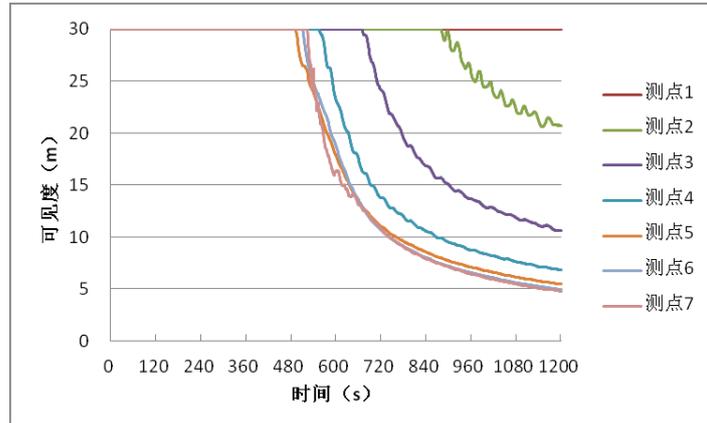


图 6 火源下游测点能见度-时间曲线图

Figure 6 The visibility-time curve of measuring point in downstream of fire source

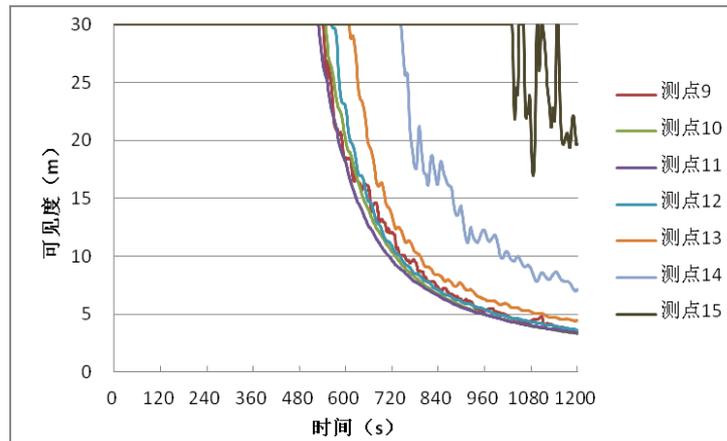


图 7 火源上游测点能见度-时间曲线图

Figure 7 The visibility-time curve of measuring point in upstream of fire source

取 $z=1.7m$ ，观察能见度-时间曲线图得到各测点进入危险状态时间见表 1 所示。

表 1 火源点上下游各测点能见度进入危险状态时间

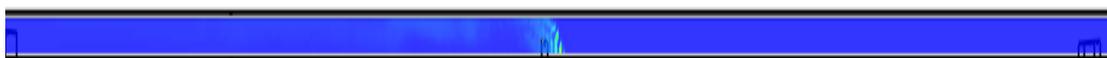
Table 1 the time into dangerous state of every measuring point's visibility on both upstream and downstream side of fire source

	距火点距离(m)	进入危险状态时间 (s)		距火点距离 (m)	进入危险状态时间 (s)
下游	310 (测点 1)	无	上游	40 (测点 9)	748
	300 (测点 2)	无		80 (测点 10)	727

	250 (测点 3)	无		150 (测点 11)	718
	200 (测点 4)	876		200 (测点 12)	734
	150 (测点 5)	728		250 (测点 13)	788
	80 (测点 6)	723		300 (测点 14)	997
	40 (测点 7)	724		320 (测点 15)	无

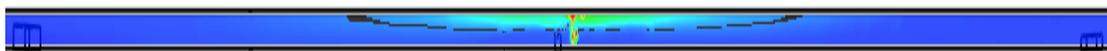
3、纵向温度分布

(1) 纵向各点的实时温度对人员的疏散安全影响重大, 现以 Y=0 切片温度-时间分布图为例, 分析纵向温度对人员疏散的影响。



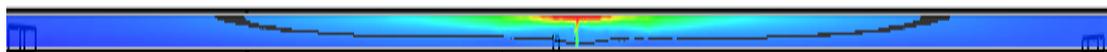
(a) t=200s 时主洞 y=0 切片纵向温度分布图

(a) Section of longitudinal temperature distribution when t=200s (y=0 in the main tunnel)



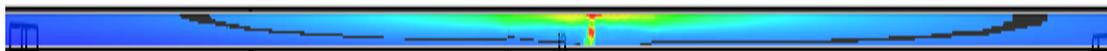
(b) t=400s 时主洞 y=0 切片纵向温度分布图

(b) Section of longitudinal temperature distribution when t=400s (y=0 in the main tunnel)



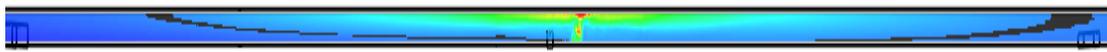
(c) t=600s 时主洞 y=0 切片纵向温度分布图

(c) Section of longitudinal temperature distribution when t=600s (y=0 in the main tunnel)



(d) t=800s 时主洞 y=0 切片纵向温度分布图

(d) Section of longitudinal temperature distribution when t=800s (y=0 in the main tunnel)



(e) t=1000s 时主洞 y=0 切片纵向温度分布图

(e) Section of longitudinal temperature distribution when t=1000s (y=0 in the main tunnel)



(f) 不同温度所对应的色度条

(f) Color bands corresponding to different temperature

图 8 主洞 y=0 切片温度-时间

Figure 8 sectional temperature-time variation of the main tunnel (y=0)

前 200s 火灾产生的热量很少, 高温范围很小, 随着火灾发展, 产生大量热量。图中黑色断线为 80°C 危险温度的分界线。前 600s 该线尚处在隧道一定高度位置, 之后高温几乎遍布整个隧

道断面。

(2) 热量的快速聚集对人员疏散十分不利，在人眼特征高度处 ($Z=1.7\text{m}$)，隧道中轴线上着火点上下游各测点温度随时间的变化情况如图 9 和图 10 所示。

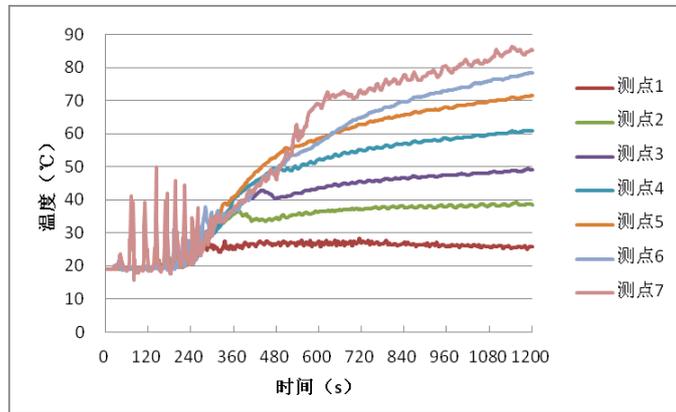


图 9 火源下游测点温度-时间曲线

Figure 9 the temperature-time curve of measuring points on the downstream side of fire source

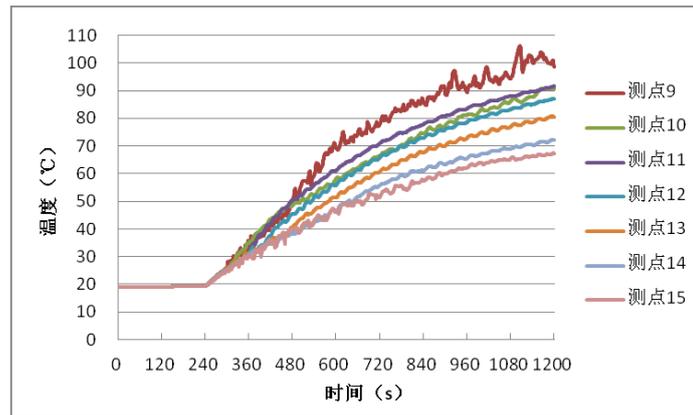


图 10 火源上游测点温度-时间曲线

Figure 10 the temperature-time curve of measuring points on the upstream side of fire source

取 $z=1.7\text{m}$ ，观察温度-时间曲线图可得到各测点温度进入危险状态时间如表 2 所示。

表 2 火源点上下游各测点温度进入危险状态时间

Table 2 the time into dangerous state of every measuring point's visibility on both upstream and downstream side of fire source

	距火点距离 (m)	进入危险状态时间 (s)		距火点距离 (m)	进入危险状态时间 (s)
下游	310 (测点 1)	无	上游	40 (测点 9)	661
	300 (测点 2)	无		80 (测点 10)	847
	250 (测点 3)	无		150 (测点 11)	793
	200 (测点 4)	无		200 (测点 12)	877
	150 (测点 5)	无		250 (测点 13)	1020
	80 (测点 6)	1035		300 (测点 14)	无

	40 (测点 7)	763		320 (测点 15)	无
--	-----------	-----	--	-------------	---

综上可得到 20MW 火灾规模下,沿隧道纵向各点进入危险状态的时间由人眼特征高度处可见度及温度决定。

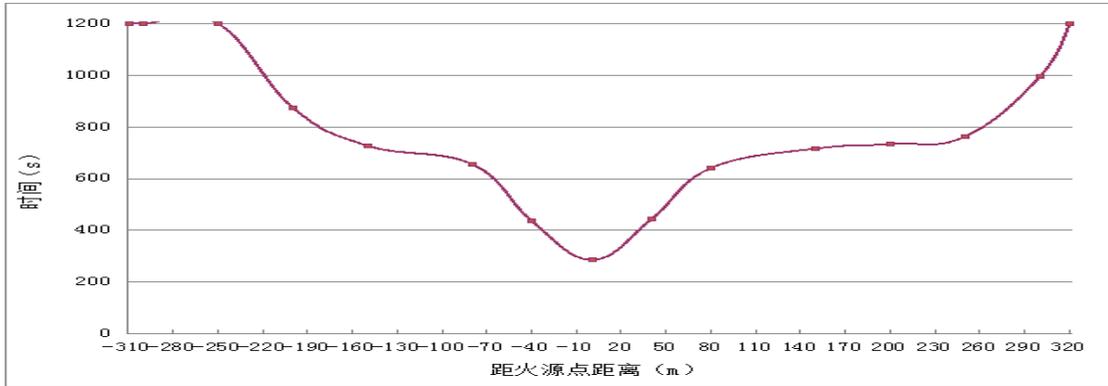


图 11 各测点进入危险状态时间

Figure 11 the time into dangerous state of every measuring point

4 人员逃生必须时间

4.1 建立模型

火灾发生后,利用 EVAC 软件对被困人员进行疏散过程模拟时,应重点考察人员在高海拔地区逃生能力的改变,这直接影响到人员的逃生速度。

1、疏散速度

定义疏散人员在逃生中的速度,人员在隧道内疏散,仅考虑人的平地行走速度。借鉴 EVAC 软件中默认的欧洲不同人群的行走速度,根据高海拔下人体机能的研究结论,人体的运动能力在海拔 3800m 隧道高度处约下降 75%~80%,模拟中将默认速度按照 75%进行相应折减。不同类别人群中的速度分布采用均匀分布模式,不同人群疏散速度见下表。

表 3 模拟计算中不同人员类型的疏散速度取值

Table 3 the value of different people's evacuation velocity in the simulation calculation

人员类型	成年男性	成年女性	儿童	老人
烟雾状态				
高海拔隧道无烟状态	0.75	0.64	0.5	0.4
高海拔隧道有烟状态 (K=0.4)	0.49	0.41	0.32	0.3

2、人员心理属性

主要包括人员反应时间和忍耐时间。人员反应时间主要是指疏散人员在发现灾害或听到火灾报警广播后,作出相应疏散动作这段时间,反应时间对人员前期迅速逃离灾害现场起着关键作用。在隧道内该时间可取为 120s,考虑到高海拔低压低氧对人体的神经系统有一定影响,使得人员嗜睡、神志淡漠、反应迟钝,不同海拔处对人员脑部功能的影响见表 4 所示。因此,反应时间要比平原地区情况下有一定的增加,在模拟过程中假设人员平均反应速度为 130s。人员的忍耐时间,指的是人们在疏散过程中遇到排队的情况时,人员等待的最大时间,与海拔关系不明显。

表 4 不同海拔处对人员脑部功能的影响表

Table 4 the impact of human cerebral function at different altitude height

高度 (m)	视力灵敏度	注意力	短期记忆体力	数学计算力	判断力

2500	83%	100%	97%	100%	100%
3500	67%	83%	91%	95%	98%
4200	56%	70%	83%	92%	95%
5000	48%	57%	76%	86%	90%

注：百分比表示该海拔处与平原处相比。

建立人员逃生模型如图 12 所示，红色代表着火点，人员向两侧横通道逃生。



图 12 人员疏散模型

Figure 12 human evacuation model

4.2 计算结果分析

下面给出各疏散出口的人员疏散情况。

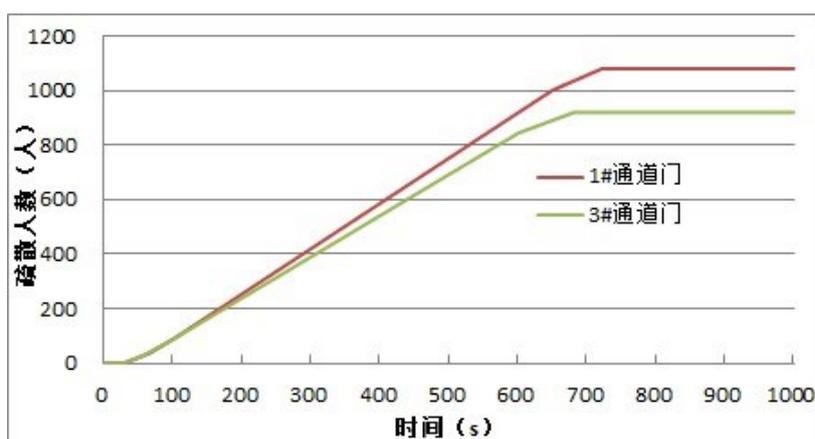


图 13 各疏散出口的人员疏散情况

Figure 13 human evacuation situation in everyexit

火灾右侧被困人员全部疏散用时 630s，左侧被困人员全部疏散完毕用时 720s。

5. 人员逃生必须时间与可用时间对比分析

现将此 20mw 火灾规模下，疏散场景模拟所得必需时间与火灾模拟所得可用时间进行比较，如下图所示。

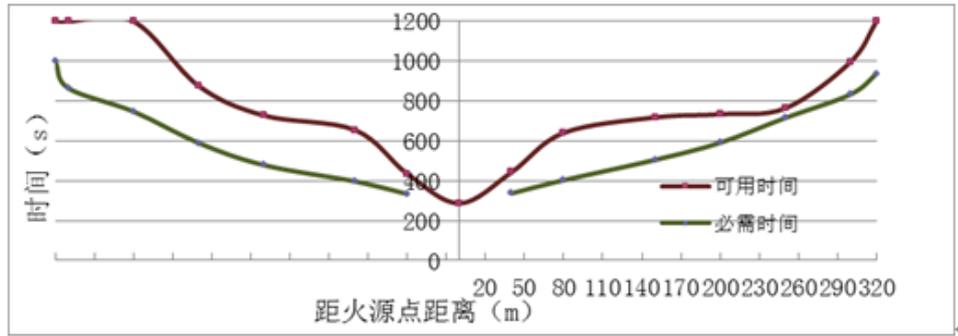


图 14 隧道纵向各点可用时间与必需时间对比图

Figure 14 the contrast between the available time and necessary time of every longitudinal measuring point

从上图可知，整个疏散过程中没有出现可用时间小于必需时间的情况，但在右侧距离火源 250m 点处，两时间相差很小，为人员逃生危险点。因此，建议将高海拔隧道横通道间距设为 250m。

5 结论

(1) 建立海拔 3800m 单洞铁路隧道+服务隧道计算模型，考虑隧道着火位置正对横通道的最不利工况，计算得到烟雾扩散规律，得到各测点进入危险状态时间，即人员逃生可用时间 ASET。

(2) 利用人员疏散软件，并考虑高海拔对人体运动机能的影响，得到各类人员安全疏散必需时间 RSET。

(3) 对比人员逃生必须时间与可用时间，在高海拔地区，发生最不利火灾工况下，为保证人员疏散安全，横通道间距应 250m 设置一道。

参考文献(References)

- [1] 纪慧琢.高海拔特长铁路隧道火灾烟气流动特性的数值模拟分析[D]. 北京交通大学硕士学位论文.2010.(JI Huizhuo. The Simulation and Analysis of Fire Smoke of Extra Long Tunnel in High Altitude Region [D]. Master paper of Beijing Jiaotong University,2010.)
- [2] 王明年,严涛. 巴朗山单洞对向行车超特长隧道通风与防灾救援技术研究报告[R].西南交通大学, 2013.(WANG Mingnian, YAN Tao. Research Report of Ventilation and Fire Protection and Rescue Technology of Single-Tunnel-Opposite-Driving Balang Mountain Tunnel[R]. Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [3] 张念.高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性与安全疏散研究 [D]. 北京交通大学博士学位论文.2012.(ZHANG Nian. Research on Combustion Characteristics and Safety Evacuation of High-altitude Super-Long Railway Tunnel [D]. Doctor paper of Beijing Jiaotong University,2012.)
- [4] 王明年,严涛,陈汉波. 巴朗山单洞对向行车超特长隧道运营安全技术研究分报告[R].西南交通大学, 2013.(WANG Mingnian, YAN Tao, CHEN Hanbo. Research Report of operational security technology of Single-Tunnel-Opposite-Driving Balang Mountain Tunnel [R]. Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [5] 李洪.特长铁路隧道火灾烟气蔓延特性及危害性研究[D]. 中南大学硕士学位论文.2010.(LI Hong. Study on of the spread characteristics and harmfulness of Extra-long railway tunnel fire smoke [D]. Master paper of central south University,2010.)
- [6] 丁良平.高速铁路长大隧道列车火灾安全疏散研究[D].同济大学硕士学位论文.2008.(DING Liangping.Study on Evacuation of Train fires in High-speed Railway Long Tunnel [D]. Master paper of tongji University,2008.)
- [7] 李颖臻.含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D]. 西南交通大学博士学位论文.2010.(Li Yingzhen.Study of Fire Characteristics and Smoke Control in Super Long Tunnels with Rescue Stations [D]. Doctor paper of Southwest Jiaotong University,2010.)
- [8] 王明年,严涛. 高海拔公路隧道通风海拔高度系数及风机效率研究分报告[R].西南交通大学, 2013.(WANG Mingnian, YAN Tao.

Research Report of altitude coefficient and Fan efficiency of altitude coefficient and fan efficiency of high altitude tunnel ventilation [R]. Southwest Jiaotong University, 2013.)

盾构隧道管片热力耦合理论模型研究

朱合华^{1,2,3} 沈奕^{1,2,3} 沈安迪³

(1.土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2.岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3.同济大学, 地下建筑与工程系,上海 200092)

摘要: 以往的理论模型不能解决盾构管片在火灾下的热力耦合问题中的材料非线性和几何非线性的问题。本文以变形后管片曲梁的切向位移和轴向位移作为基本未知量, 基于平截面假定, 对梁截面进行分层之后(以三层为例), 结合连续性条件和外力平衡条件建立基本方程, 归纳推导出具有 12 个参数的求解矩阵, 分析了弹性约束下平面曲梁在火灾升温下的非线性问题。该方法可以考虑管片在单面受火情况下, 温度沿纵向均匀分布, 沿横向非均匀分布的真实情况。另外, 为增加该方法的适用性, 本文引入欧洲规范 Eurocode 2 的相关内容加以整合利用, 对该模型的应用进行了进一步的分析。

关键词: 隧道管片; 火灾; 热力耦合; 理论模型

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A (黑小五加粗) **文章编号:** (此编号投稿时空)

Theoretical Study on TBM Tunnel Segments by a Thermo-mechanical Model

Zhu He-hua^{1,2,3} Shen Yi^{1,2,3} Shen An-di³

(1.State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China ;2.Key laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University Shanghai 200092; 3.Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai)

Abstract: The previous theoretical models cannot solve the thermo-mechanical problem of the TBM (Tunnel Boring Machine) tunnel segment in fire. That is mainly attributed to the nonlinearity of both material and geometry. A method is presented to analysis the nonlinear problem of plane curved beam with elastic constraints under elevated temperature induced by fire. This method employs the tangential displacement and axial displacement of the deformed segment as basic variables. Based on plane cross-section assumption, the beam section is layered (e.g. three layers). Combined with continuity conditions and external force equilibrium conditions, governing equations are formulated and solver matrix containing 12 parameters is derived. The method can describe the real situation that the segment is heated on one side, namely, the even temperature field distributes longitudinally while the uneven temperature field distributes laterally. In addition, in order to enhance the feasibility of this method, Eurocode 2 is imported and utilized as demand. The application of this model is further analysed.

Keywords : Tunnel segment; fire; thermo-mechanical coupling; theoretical model

作者简介: 沈奕 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事地下空间防火方面研究。E-mail: shenyige@gmail.com

1.引言

盾构隧道内发生火灾时,衬砌结构的损伤不仅严重降低了衬砌结构的安全性,大大降低衬砌结构的承载能力和使用的安全性,甚至会由于衬砌混凝土的力学性能劣化、爆裂引起的衬砌截面厚度减少^[1]。前人针对隧道衬砌结构在火灾下的力学表现进行了一定的试验研究和数值分析工作^[2-5],较为全面地描述了衬砌结构的热力耦合行为,但仍未有可用的定量的理论计算方法能用于火灾高温下的隧道衬砌结构。且火灾试验的成本昂贵,周期漫长;数值分析除了需要投入高性能计算机之外,全过程分析也需要大量的时间。所以,提出一个高效准确的理论计算方法对隧道结构火灾的研究及工程应用非常关键。管片作为盾构隧道的基本组成单元,是首要的研究对象。

火灾高温对钢筋及混凝土的力学性能均有显著影响,对构件截面进行分层可有效解决该问题。同时,隧道管片因单面受火,材料分层效应更加明显。韩海涛等^[6]基于一阶剪切梁理论,得到含分层复合材料结构在全域范围内更精确的一般性结论,导出了含分层复合材料梁粘合段和分层段的位移解答。王奇志等^[7]对称正交铺层复合材料层合梁在横向载荷作用下的分层问题,为进一步研究层合板的三维分层问题奠定基础。针对火灾下的框架混凝土结构,可以纤维梁单元和混凝土分层壳单元的火灾破坏数值模型,通过在截面层次上来考虑构件截面的不均匀温度场分布及其材料非线性和几何非线性^[8,9]。但隧道管片适用于曲梁模型,与上述文献中所述的直梁模型有较大区别。

对曲梁的力学模型研究方面,白静^[10]根据工程梁理论,对对称正交铺层复合材料层合曲梁在横向载荷作用下的分层问题进行了分析。李世荣和周凤玺^[11]基于 Euler-Bernoulli 梁的几何非线性理论,建立了弹性曲梁在任意分布机械载荷和热载荷共同作用下的几何非线性静平衡控制方程。Heidarpour^[12,13]等人先后用非线性弹性及非弹性方法对钢曲梁在火灾下的力学模型进行了研究,并使用有限元数值方法进行了验证。Heidarpour 等^[14]还尝试使用弹性非线性方法对中间层用销钉固定的钢—混凝土复合构件在火灾下的力学行为进行描述。这些分析方法对火灾升温条件下约束构件会产生热应变和热应力的描述比较全面,但对构件的几何非线性和材料非线性的受力特征并不能很准确地描述。

本文以变形后管片曲梁的切向位移和轴向位移作为基本未知量,基于平截面假定,对梁截面进行分层之后,结合连续性条件和外力平衡条件建立基本方程,求解反力。该方法可以考虑管片在单面受火情况下,温度沿纵向均匀分布,沿横向非均匀分布的真实情况。为增加该方法的适用性,本文引入欧洲规范 Eurocode 2^[15]的相关内容加以整合利用,对该模型的使用进行了进一步的分析。

1 理论模型

1.1 截面分析

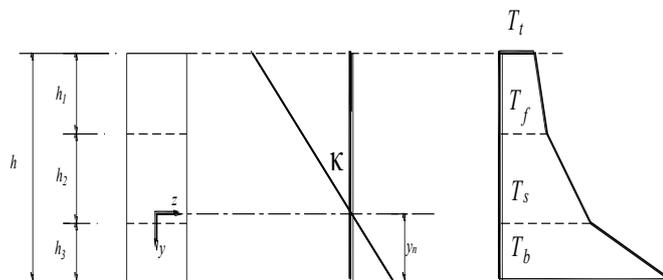


图 1 截面分析

Fig.1 Section analysis

以截面分为三个区域的分析为例。当截面为典型压弯状态时,如图 1 所示,为求出任意一点总应变 ϵ_r , 根据平截面假定:

$$\varepsilon_t = (y - y_n)\kappa \quad (1)$$

式中, κ ——截面曲率; y_n ——截面受压区高度。

任意一点热应变:

$$\varepsilon_{\theta\alpha} = \lambda_\alpha T_\alpha(y) \quad (\alpha = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中, λ_α ——该层热传导率; $T_\alpha(y)$ ——该层温度分布函数。

固定时刻, 管片截面的温度函数是确定的。采用分层计算的手段, 可以解决因温度函数过于复杂而不易积分计算的问题。可先考虑三段温度区间各区间为线性分布的情况(图 1):

$$T_\alpha(y) = T_t + y\nabla_\alpha + \nabla_\alpha \quad (\alpha = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$$\nabla_1 = \frac{T_f - T_t}{h_1}, \nabla_2 = \frac{T_s - T_f}{h_2}, \nabla_3 = \frac{T_b - T_s}{h_3} \quad (4)$$

$$\nabla_\alpha = \sum_1^\alpha h_{\alpha-1} \nabla_{\alpha-1} \quad (5)$$

弹性应变 ε_e 应为总应变 ε_t 减去热应变 ε_θ :

$$\varepsilon_e = \varepsilon_t - \varepsilon_\theta = -\varepsilon_c - y_n\kappa + y(\kappa - \lambda_\alpha \nabla_\alpha) \quad (6)$$

将后半部分应变设为温度耦合应变 ε_c :

$$\varepsilon_c = \lambda_\alpha (T_t + \nabla_\alpha) \quad (7)$$

截面轴力为 N_α :

$$N_\alpha = -(\varepsilon_c + y_n\kappa) \overline{EA}_\alpha + (\kappa - \lambda_\alpha \nabla_\alpha) \overline{EB}_\alpha \quad (\alpha = 1, 2, 3) \quad (8)$$

其中,

$$\overline{EA}_\alpha = \int_{A_\alpha} E_\alpha(y) dA_\alpha, \overline{EB}_\alpha = \int_{A_\alpha} y E_\alpha(y) dA_\alpha$$

$$y_n = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_\alpha} \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_\alpha - \frac{N_{\text{int}} + N_{\text{II}}}{\kappa} \right)$$

$$N_{\text{int}} = \sum_{\alpha=1}^3 N_\alpha$$

$$N_{\text{II}} = \sum_{\alpha=1}^3 (\lambda_\alpha \nabla_\alpha \overline{EB}_\alpha + \varepsilon_c \overline{EA}_\alpha)$$

式中, E_α ——该层弹性模量; N_{II} ——截面耦合轴力。

而截面上的正应力 σ_α 可以表示为:

$$\sigma_\alpha = E_T(y)\varepsilon_\varepsilon \quad (9)$$

式中, $E_T(y)$ ——截面弹性模量沿温度分布的函数。

进而可以得到:

$$N_\alpha = \int_{A_\alpha} \sigma_\alpha dA_\alpha = -(\varepsilon_c + y_n \kappa) \overline{EA}_\alpha + (\kappa - \lambda_\alpha \nabla_\alpha) \overline{EB}_\alpha \quad (10)$$

$(\alpha=1,2,3)$

同理可以推得截面弯矩为:

$$M_\alpha = \int_A \sigma_\alpha y dA_\alpha = -(\varepsilon_c + y_n \kappa) \overline{EB}_\alpha + (\kappa - \lambda_\alpha \nabla_\alpha) \overline{EI}_\alpha \quad (11)$$

$(\alpha=1,2,3)$

其中,

$$\overline{EI}_\alpha = \int_{A_\alpha} y^2 E_\alpha(y) dA_\alpha$$

$$y_n = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_\alpha} \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EI}_\alpha - \frac{M_{\text{int}} + M_{\text{II}}}{\kappa} \right)$$

$$M_{\text{int}} = \sum_{\alpha=1}^3 M_\alpha$$

$$M_{\text{II}} = \sum_{\alpha=1}^3 (\lambda_\alpha \nabla_\alpha \overline{EI}_\alpha + \varepsilon_c \overline{EB}_\alpha)$$

由(1)、(10)、(11)各式, 可以推出:

$$\kappa = \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_\alpha}{\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_\alpha \right) \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EI}_\alpha \right) - \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_\alpha \right)^2} \left[M_{\text{int}} + M_{\text{II}} - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_\alpha} (N_{\text{int}} + N_{\text{II}}) \right] \quad (12)$$

1.2 构件分析

如图 2 所示, 可推出构件的任意截面弯矩:

$$M_{\text{int}} = M_0 - H_0 y^* + V_0 z^*, z^* \leq \frac{L}{2} - l \quad (13)$$

$$M_{\text{int}} = M_0 - H_0 y^* + V_0 z^* - F \left(z^* + l - \frac{L}{2} \right),$$

$$\frac{L}{2} - l < z^* \leq \frac{L}{2} + l \quad (14)$$

$$M_{\text{int}} = M_0 - H_0 y^* + V_0 z^* - 2Fl, z^* > \frac{L}{2} + l \quad (15)$$

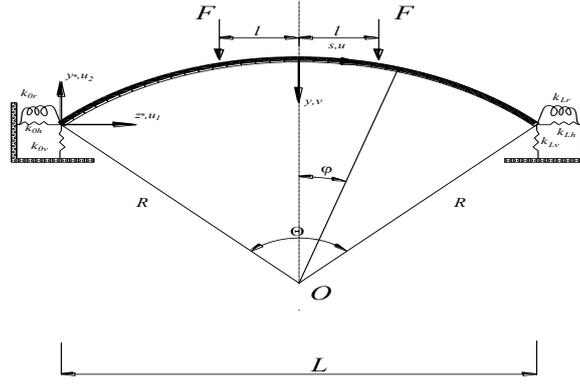


图2 构件分析

Fig.2 Member analysis

其中：

$$y^* = R \left[\cos \varphi - \cos \left(\frac{\Theta}{2} \right) \right]$$

$$z^* = R \left[\sin \left(\frac{\Theta}{2} \right) + \sin \varphi \right]$$

任意截面轴力

$$N_{\text{int}} = H_0 \cos \varphi + V_0 \sin \varphi, z^* \leq \frac{L}{2} - l \quad (16)$$

$$N_{\text{int}} = H_0 \cos \varphi + V_0 \sin \varphi - F \sin \varphi,$$

$$\frac{L}{2} - l < z^* \leq \frac{L}{2} + l \quad (17)$$

$$N_{\text{int}} = H_0 \cos \varphi + V_0 \sin \varphi - 2F \sin \varphi,$$

$$z^* > \frac{L}{2} + l \quad (18)$$

任意截面剪力

$$V_{\text{int}} = H_0 \sin \varphi - V_0 \cos \varphi, z^* \leq \frac{L}{2} - l \quad (19)$$

$$V_{\text{int}} = H_0 \sin \varphi - V_0 \cos \varphi + F \cos \varphi,$$

$$\frac{L}{2} - l < z^* \leq \frac{L}{2} + l \quad (20)$$

$$V_{\text{int}} = H_0 \sin \varphi - V_0 \cos \varphi + 2F \cos \varphi,$$

$$z^* > \frac{L}{2} + l \quad (21)$$

为方便下文中边界条件的推导，设

$$\varphi = -\Phi, z^* = \frac{L}{2} - l$$

$$\varphi = \Phi, z^* = \frac{L}{2} + l$$

1. 径向位移 v

求曲梁某一点的径向位移，需要先求得该点的转角，经过积分即可得到相应位移。当 $z^* \leq \frac{L}{2} - l$ 时，截面曲率为：

$$\kappa = \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}}{\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}\right)\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EI}_{\alpha}\right) - \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}\right)^2} \begin{bmatrix} M_0 + M_{\text{II}} - H_0 \left(y^* + \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \cos \varphi \right) \\ + V_0 \left(z^* - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \sin \varphi \right) - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} N_{\text{II}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

再根据

$$\kappa = \frac{d\theta}{ds} \quad (23)$$

$$\theta = \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}}{\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}\right)\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EI}_{\alpha}\right) - \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}\right)^2} \begin{bmatrix} M_0 s + M_{\text{II}} s - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} N_{\text{II}} s \\ - H_0 \left[\left(R + \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \right) R \sin \varphi - R s \cos \left(\frac{\Theta}{2} \right) \right] \\ + V_0 R \left[s \sin \left(\frac{\Theta}{2} \right) + \left(\frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} - R \right) \cos \varphi \right] \end{bmatrix} + C_{11} \quad (24)$$

(25)

$$v = \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}}{\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}\right)\left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EI}_{\alpha}\right) - \left(\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}\right)^2} \begin{bmatrix} \frac{M_0 s^2}{2} + \frac{M_{\text{II}} s^2}{2} - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \frac{N_{\text{II}} s^2}{2} \\ + H_0 R \left[\left(R + \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \right) R \cos \varphi \right. \\ \left. + \frac{s^2}{2} \cos \left(\frac{\Theta}{2} \right) \right] \\ + V_0 R \left[\frac{s^2}{2} \sin \left(\frac{\Theta}{2} \right) + R \left(\frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} - R \right) \sin \varphi \right] \end{bmatrix} + C_{11} s + C_{12}$$

同理，当 $\frac{L}{2} - l < z^* \leq \frac{L}{2} + l$ 时，可以推导出相应的转角 θ 和径向位移 v ，得到 C_{21} 和 C_{22} 两个待定参数；当 $z^* > \frac{L}{2} + l$ 时，推导出相应的转角 θ 和径向位移 v ，得到 C_{31} 和 C_{32} 两个待定参数。

2. 切向位移 u

根据 Bradford 的有关理论^[16], 令式(26)中 $y = 0$, 并令其与(1)式相等:

$$\varepsilon_t = \frac{du}{ds} + \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 - \frac{v}{R} - y \left(\frac{d^2v}{ds^2} \right) \quad (26)$$

可以得到切向位移:

$$u(s) = \int \left[-y_n \kappa - \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 + \frac{v}{R} \right] ds + C_{e3} \quad (27)$$

$e = 1, 2, 3$

当 $z^* \leq \frac{L}{2} - l$ 时:

$$u(s) = \frac{H_0 R \sin \varphi - V_0 R \cos \varphi + N_{\Pi} s}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \theta + \int \frac{v}{R} ds - \int \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 ds + C_{13} \quad (28)$$

其中,

$$\int \frac{v}{R} ds = \frac{\lambda \left(\frac{As^3}{6} - BR \sin \varphi - CR \cos \varphi \right) + \frac{1}{2} C_{11} s^2 + C_{12} s}{R}$$

$$\int \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 ds = \frac{1}{2} \int \theta^2$$

$$= \lambda^2 \left[\begin{aligned} & \frac{1}{6} A^2 s^3 + \left(\frac{1}{4} B^2 - ABR \cos \varphi + \frac{1}{4} C^2 + ACR \sin \varphi \right) s \\ & + ACR^2 \cos \varphi - \frac{1}{4} BCR^2 \cos 2\varphi - \frac{1}{8} (B^2 - C^2) R \sin 2\varphi + ABR^2 \sin \varphi \end{aligned} \right]$$

$$+ \lambda C_{11} \left(\frac{As^2}{2} + C \sin \varphi - B \cos \varphi \right) + \frac{C_{12} s}{2}$$

同理, 当 $\frac{L}{2} - l < z^* \leq \frac{L}{2} + l$ 时, 有:

$$u(s) = \frac{H_0 R \sin \varphi - V_0 R \cos \varphi + FR \cos \varphi + N_{\Pi} s}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \theta + \int \frac{v}{R} ds - \int \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 ds + C_{23} \quad (29)$$

当 $z^* > \frac{L}{2} + l$ 时, 有:

$$u(s) = \frac{H_0 R \sin \varphi - V_0 R \cos \varphi + 2FR \cos \varphi + N_{\Pi} s}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} - \frac{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EB}_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^3 \overline{EA}_{\alpha}} \theta + \int \frac{v}{R} ds - \int \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 ds + C_{33} \quad (30)$$

3. 边界条件

(1) 连续性条件:

$$\begin{cases} \theta \Big|_{z^*=(\frac{L-l}{2})^-} = \theta \Big|_{z^*=(\frac{L-l}{2})^+} \\ v \Big|_{z^*=(\frac{L-l}{2})^-} = v \Big|_{z^*=(\frac{L-l}{2})^+} \\ u \Big|_{z^*=(\frac{L-l}{2})^-} = u \Big|_{z^*=(\frac{L-l}{2})^+} \end{cases} \quad \varphi = -\Phi, z^* = \frac{L}{2} - l \quad (31)$$

$$\begin{cases} \theta \Big|_{z^*=(\frac{L+l}{2})^-} = \theta \Big|_{z^*=(\frac{L+l}{2})^+} \\ v \Big|_{z^*=(\frac{L+l}{2})^-} = v \Big|_{z^*=(\frac{L+l}{2})^+} \\ u \Big|_{z^*=(\frac{L+l}{2})^-} = u \Big|_{z^*=(\frac{L+l}{2})^+} \end{cases} \quad \varphi = \Phi, z^* = \frac{L}{2} + l \quad (32)$$

(2) 支座边界条件:

$$\begin{cases} H_0 = -k_{0h} (u \cos \varphi + v \sin \varphi) \Big|_{s=-R\Theta/2} \\ V_0 = -k_{0v} (u \cos \varphi - v \sin \varphi) \Big|_{s=-R\Theta/2} \\ H_L = k_{Lh} (u \cos \varphi - v \sin \varphi) \Big|_{s=R\Theta/2} \\ V_L = k_{Lv} (u \sin \varphi + v \cos \varphi) \Big|_{s=R\Theta/2} \\ M_0 = k_{0r} \theta \Big|_{s=-R\Theta/2} \\ M_L = k_{Lr} \theta \Big|_{s=R\Theta/2} \end{cases} \quad (33)$$

(3) 力平衡条件:

$$\begin{cases} H_0 = H_L \\ V_0 + V_L = 2F \\ M_0 = M_L + V_L L - FL \end{cases} \quad (34)$$

2 求解方法

300~600℃也呈现出线性变化,斜率为24Pa/℃;600~1100℃弹性模量则基本保持不变;

在确定如上两点之后,前述模型即可以结合Eurocode2使用。

3 结 论

以往的研究方法未能将分层方法有效用于分析盾构管片在火灾下的热力耦合问题,不能完全反应这类构件在隧道火灾下的材料非线性和几何非线性。本文以变形后管片曲梁的切向位移和轴向位移作为基本未知量,基于平截面假定,对梁截面进行分层之后(以三层为例),结合连续性条件和外力平衡条件建立基本方程,归纳推导出具有12个参数的求解矩阵,分析了弹性约束下平面曲梁在火灾升温下的非线性问题。该方法可以考虑管片在单面受火情况下,温度沿纵向均匀分布,沿横向非均匀分布的真实情况。为增加该方法的适用性,本文方法可以和相关火灾试验数据或者采用有限元程序(ABAQUS)来进行验证,笔者也做了一定的工作,但由于本文篇幅所限,在此未能展开分析对比。

本文引入欧洲规范Eurocode 2的相关内容加以整合利用,对该模型的使用进行了进一步的分析。该方法考虑了温度对材料强度和弹性模量的影响,并在结构分析时涉及了几何非线性。

另外,由于本分析方法对支座弹簧的处理通用化,可以方便地与火灾下盾构隧道接头刚度理论进行结合,从而得到盾构隧道整环的解析解或半解析解。

参考文献(References)

- [1] Both C, Haack A, Lacroix D. Upgrading The Fire Safety of Existing Tunnels In Europe: A 13M EUR European Research Project[A]. Proceedings of ITA World Tunnel Congress 2003[C]. Amsterdam 2003:239-244.
- [2] Yan Z, Zhu H, Ju J W. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures[J]. Construction and Building Materials. 2013, 38(0): 610-618.
- [3] Yan Z, Zhu H, Woody Ju J, et al. Full-scale fire tests of RC metro shield TBM tunnel linings[J]. Construction and Building Materials. 2012, 36(0): 484-494.
- [4] Choi S, Lee J, Chang S. A holistic numerical approach to simulating the thermal and mechanical behaviour of a tunnel lining subject to fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2013, 35(0): 122-134.
- [5] Lilliu G, Meda A. Nonlinear Phased Analysis of Reinforced Concrete Tunnels Under Fire Exposure[J]. Journal of Structural Fire Engineering. 2013, 4(3): 131-142.
- [6] 韩海涛,张铮,卢子兴. 含分层复合材料层合梁弯曲问题的一般解法[J]. 应用数学和力学,2010,07:843-852. (HAN Hai-tao, ZHANG Zheng, Lu Zi-xing. Analytical Method on Bending of Composite Laminated Beams With Delaminations [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 07:843-852. (in Chinese)).
- [7] 王奇志,孟庆春,张行. 复合材料层合梁分层问题解析解法[J]. 北京航空航天大学学报,1998,03:71-74 (WANG Qi-zhi, MENG Qing-chun, ZHANG Xing. Analytical Method of Solution on Delamination in Symmetrical. Orthogonal Composite Laminated Beams [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 1998,03:71-74. (in Chinese))
- [8] 陈适才,陆新征,任爱珠,江见鲸. 火灾下混凝土结构破坏模拟的纤维梁单元模型[J]. 计算力学学报,2009,01:72-79. (CHEN Shi-cai, LU Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Fiber beam element model for the collapse simulation of concrete structures under fire [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 01:72-79. (in Chinese))
- [9] 陈适才,任爱珠. 火灾下基于纤维梁和分层壳模型的结构破坏机制分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2011,02:260-270. (CHEN Shi-cai, REN Ai-zhu. Collapse Mechanism Analysis of Structures under Fire Based on the Fiber Beam and Layered Shell Models [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 02:260-270.)
- [10] 白静,孟庆春,张行. 复合材料层合曲梁分层问题的解析解法[J]. 复合材料学报,2003,05:142-146. (BAI Jing, MENG Qing-chun, ZHANG Xing. Analytical method of solution on delamination in symmetrical orthogonal composite laminated curved beams [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 05:142-146. (in Chinese))
- [11] 李世荣,周凤玺. 弹性曲梁在机械和热载荷共同作用下的几何非线性模型及其数值解[J]. 计算力学报

报,2008,01:25-28. (LI Shi-rong, ZHOU Feng-xi. Geometrically nonlinear model and numerical simulation of elastic curved beams subjected to mechanical and thermal loads [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 01:25-28. (in Chinese))

[12] Heidarpour A, Azim Abdullah A, Bradford M A. Non-linear thermoelastic analysis of steel arch members subjected to fire [J]. Fire Safety Journal. 2010, 45(3): 183-192.

[13] Heidarpour A, Abdullah A A, Bradford M A. Non-linear inelastic analysis of steel arches at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2010, 66(4): 512-519.

[14] Heidarpour A, Pham T H, Bradford M A. Nonlinear thermoelastic analysis of composite steel-concrete arches including partial interaction and elevated temperature loading [J]. Engineering Structures. 2010, 32(10): 3248-3257.

[15] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 2: Design of concrete structures, EN 1992-1-2(2004).

[16] Bradford M.A., In-plane nonlinear behavior of circular pinned arches with elastic restraints under thermal loading, International Journal of Structural Stability and Dynamics 6(2006)163-177.

高温后盾构隧道管片-钢板界面粘结性能试验研究

杨成^{1,2,3} 闫治国^{1,2,3} 朱合华^{1,2,3} 朱立琦³

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 用钢环加固隧道结构是一种常用的加固方法, 为了掌握高温后钢环加固盾构隧道后界面的粘结性能, 利用有限元分析软件 Abaqus 模拟分析试件在烤箱中恒温加热过程, 确定了恒温加热时间为 150min; 50℃~200℃ 高温处理后混凝土立方体试件-钢板界面双面剪切试验结果表明: 高温后混凝土-钢板界面破坏形式分为 A,B 两种类型, 混凝土-钢板界面的剪切强度和剪切刚度随着温度的增加呈现先增强后降低的规律; 混凝土-钢板界面粘结性能的最佳工作温度。 T_p 在 50℃ 左右, 完全失效温度 T_f 介于 150℃~200℃ 之间。在较低温度(15℃,50℃, 100℃), 较高温度(150℃) 条件下, 影响混凝土-钢板界面粘结性能的主要因素分别是混凝土的剪切强度和混凝土-粘结剂界面剪切强度, 钢板-粘结剂界面的粘结性能。

关键词: 高温 盾构隧道 钢板 界面 粘结性能;

Experimental study on the shear properties of interface between segment of shield tunnel and the steel plate after exposure to high temperature

Cheng Yang^{1,2,3}, Zhiguo Yan^{1,2,3}, Hehua Zhu^{1,2,3}

(1 State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China

2 Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China

3 Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

Abstract: Applying the steel rings to reinforce the segments of shield tunnel is a widely used reinforcement method. An oven is used to heat the specimen. 150min is calculated as the heating time by using the finite element analysis software Abaqus to simulate the heating process. This paper focuses on the shear properties of the interface between C50 concrete cube and the steel plate after exposure to high temperature (50℃~200℃). The experiment results indicate: the failure forms of the interface include form A and form B; the shear strength and shear stiffness of the interface increase first and then decrease with the increasing of the temperature. The optimum temperature T_p of the interface is about 50℃ and the failure temperature T_f is between 150℃ and 200℃; The remarkable factor affecting the shear properties of the interface is the shear strength of the concrete and the bond property between the binder and the concrete, the bond property between the binder and the steel plate respectively after exposure to relatively low temperature(15℃,50℃, 100℃), relatively high temperature(150℃).

Keywords: high temperature shield tunnel the steel plate interface shear properties

1 引言

随着运营时间的增长和周边环境的变化, 盾构隧道衬砌会出现各种病害, 包括裂缝、混凝土剥落、渗漏水等, 这些问题都将影响盾构隧道的正常使用, 采用合理的加固手段对盾构隧道进行修复和加固, 才能保证这些隧道的安全性和耐久性。目前, 针对盾构隧道加固方法主要包括粘贴纤维复

作者简介: 杨成(1988-), 男, 湖南衡阳人, 硕士生, 主要从事岩土工程、隧道、地下工程等领域的研究工作。

E-mail: yc765103563@126.com

合材料和钢环加固法。采用钢环加固法能有效地排除隧道结构的安全隐患。为了研究钢环加固后盾构隧道结构的抗火性能，开展了火灾高温后盾构隧道管片-钢板界面粘结性能试验研究。

国内外学者对加固后结构的抗火性能研究对象主要针对混凝土梁、板、柱，主要包括贴纤维复合材料¹⁻⁶和粘贴钢板，但是关于隧道结构加固后的抗火性能研究较少。目前，关于不同温度下混凝土-加固体界面粘结性能的研究大多以面内剪切试验为主要的研究形式，主要包括高温下混凝土-钢板⁷⁻⁸和混凝土-纤维复合材⁹⁻¹⁰界面粘结性能研究，得出了加固界面粘结强度随温度变化的规律或趋势以及加固界面在不同温度下的破坏形式。在实际工程中，采用 denepox40 作为粘结剂，填充管片与钢环之间的间隙。用 C50 混凝土立方体试件粘贴钢板模拟盾构隧道管片钢环加固。在不同温度处理后进行混凝土-钢板界面双面剪切试验，研究火灾高温后盾构隧道管片-钢板界面加固体粘结性能的变化规律，不仅对钢板加固盾构隧道管片后盾构隧道结构防火性能的研究意义重大，而且将为钢板加固法在实际隧道工程中的应用具有重要的指导意义。

2 试验概况

2.1 试验材料

采用 C50 混凝土立方体试块模拟盾构隧道管片，混凝土立方体试块的制作严格按照混凝土试块制作及养护管理规定执行。粘结剂采用刚性环氧树脂（denepox40），分 A、B 胶两种，使用时按照 3:1 的比例混合，混凝土试块经过打磨后，通过该粘结剂与钢板粘结成整体。试验材料的相关参数见表 1。

表 1 试验材料参数表
Table 1 Parameters of experiment material

材料	材料参数		
	长度 (mm)	宽度 (mm)	厚度 (mm)
混凝土试块	100	100	100
钢板	130	100	20
粘结剂	粘结面积为 100mm×100mm，厚度为 3mm		

2.2 试件恒温加热有限元分析

为了研究高温后盾构隧道管片-钢板界面粘结性能，必须对试件进行高温加热处理。待粘结剂完全固化后，将试件整体置于烤箱内，分别在 50℃、100℃、150℃、200℃ 的温度条件下恒温加热一段时间，然后使其降温自然冷却。烤箱加热是一个热量传递的过程，为了保证钢板与混凝土界面的粘结剂达到设定的温度，需要确定恒温加热时间。加热时间的确定可以根据烤箱加热环境，利用有限元软件 Abaqus 对加热过程进行热传导模拟，最终确定恒温加热时间。

(1)有限元模型的确定

根据试件的实际尺寸，建立了 3D 有限元模型，因为只考虑模型的热传导过程中温度场的分布，各种材料的均采用 Heat Transfer 单元，如图 1。

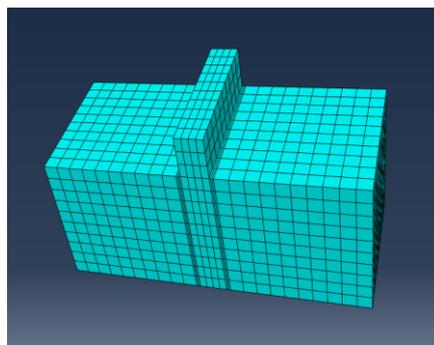


图 1 3D 有限元模型

Fig.1 The 3D finite element model

(2)材料参数和计算工况

热量的传递有三种方式，分别是热传导、辐射和对流。热传导参数在材料中定义，通过查阅有关文献，混凝土和钢板的热力学参数（导热系数和比热容）会随温度变化而变化，具体情况如图 2，图 3。粘结剂 denepox40 的导热系数取 $1.0J/m \cdot s \cdot K$ ，比热容取 $1.2kJ/kg \cdot K$ 。定义辐射条件时，综合辐射系数取 0.5，定义对流条件时，对流换热系数取 $25W/m^2 \cdot K$ 。分析过程采用热传导瞬态分析，分别模拟在 $50^{\circ}C$ ， $100^{\circ}C$ ， $150^{\circ}C$ ， $200^{\circ}C$ 条件下恒温加热 150min 的全过程。

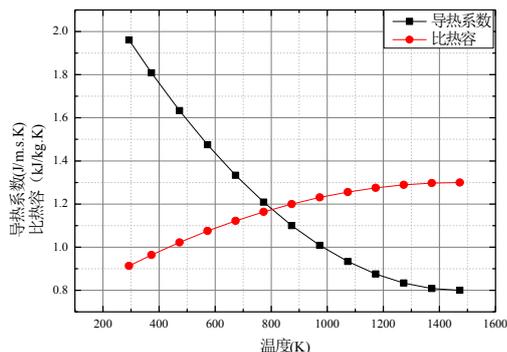


图 2 混凝土热力学参数随温度变化图

Fig.2 The variation of the thermodynamic parameters of concrete with temperature

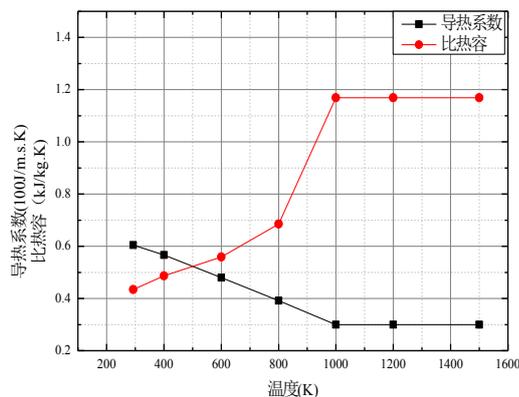


图 3 钢板热力学参数随温度变化图

Fig.3 The variation of the thermodynamic parameters of steel plate with temperature

(3)计算结果及分析

由于篇幅限制，只给出了计算工况为 $50^{\circ}C$ 的试件整体温度场分布图（如图 4）、粘结剂温度场分布图（如图 5），图中温度的单位为 K。

为了得到粘结剂内部温度，在有限元模型中，沿着粘结剂中线（Y 轴方向），依次选取 1-11 共 11 个节点，得到各节点温度随时间变化数据。各工况条件下，各节点温度变化规律基本一致。图 6 为 $50^{\circ}C$ 节点 1 的温度变化规律，由图可知，节点温度随着加热时间增长而升高，变化速率逐渐降低，最终达到了 $322.535K(49.535^{\circ}C)$ ，几乎与加热温度（ $50^{\circ}C$ ）一致。

图 7 为各温度条件下节点的最终温度。由图可得，各温度条件下，各节点的最终温度几乎相同，节点的最高温度(最低温度)分别为 $322.557K(322.535K)$ 、 $371.661K(371.587K)$ 、 $420.565K(420.434K)$ 、 $469.312K(469.089K)$ ；与恒温条件相比，温差分别约为 $0.5K$ 、 $1.4K$ 、 $2.5K$ 、 $4K$ ，

由此可以认为，加热 150min 后，粘结剂温度已经和烤箱内恒温条件一致。

综合以上结果，在 50℃, 100℃, 150℃, 200℃ 恒温加热 150min，粘结剂温度几乎能与恒温条件一致，所以，最终确定恒温加热时间为 150min。

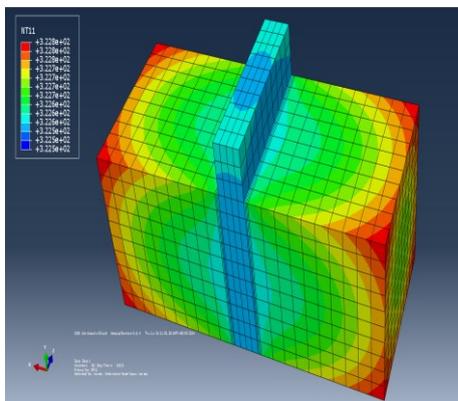


图 4 试件整体温度场分布图

Fig.4 The temperature field distribution of the specimen

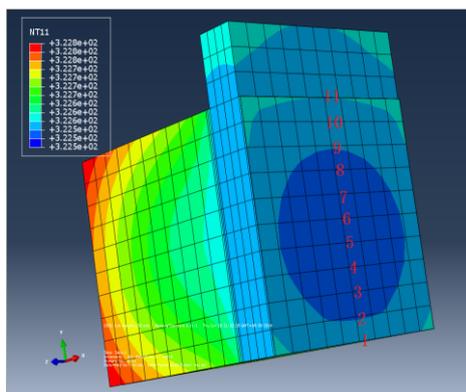


图 5 粘结剂温度场分布图

Fig.5 The temperature field distribution of the blinder

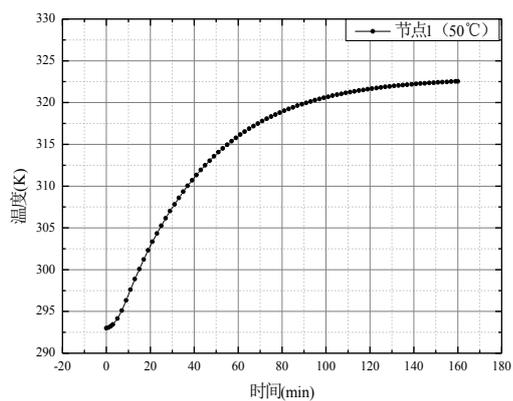


图 6 节点 1 温度随时间变化图 (50℃)

Fig.6 The variation of the temperature of node 1 (50℃)

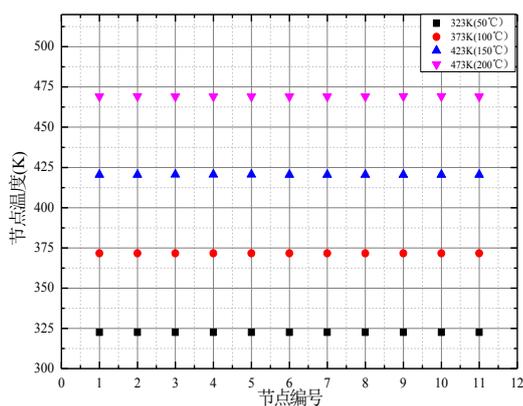


图 7 各温度条件下节点的最终温度

Fig.7 The ultimate temperature of nodes under different temperatures

2.3 试验设备及加载方式

待粘结剂完全固化后,将试件整体置于烤箱内,分别在 50°C,100°C,150°C,200°C 的温度条件下恒温加热 150min,然后使其降温自然冷却。加载前,在钢板两侧分别粘贴一个大刚度的角铁,用来量测位移。试验采用的加载设备是伺服万能试验机。在加载台上放置两块钢垫块,将混凝土试件的底面架设在垫块上方;在两侧角铁处各安装一个位移计测量位移,进行双面剪切试验,如图 8。

为了得到不同荷载条件混凝土-钢板界面的剪切位移,试验采用分级加载,每级荷载为 3kN,加载速率为 3kN/min,每级荷载恒载 1min,具体的加载方式见图 9。



图 8 双面剪切试验加载装置

Fig.8 Loading equipment in two-sided shearing bonding strength experiment

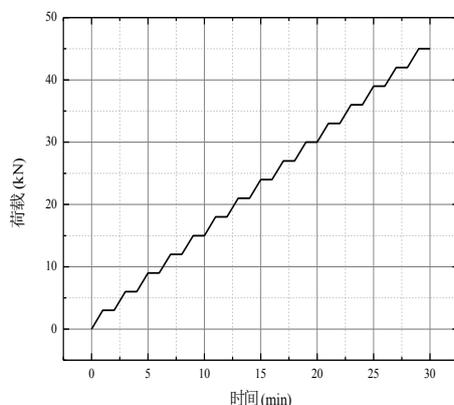


图 9 分级加载示意图

Fig.9 Load mode of the experiment

3. 试验结果及分析

3.1 试验现象

在恒温加热过程中，当温度超过100℃时，粘结剂开始挥发，烤箱排气孔有刺激性气味排出，粘结剂表面颜色变深，这表明在此温度条件下，粘结剂发生了某种不可逆的化学变化。温度超过200℃时，混凝土和钢板完全脱开，粘结剂呈现暗红色，这表明其粘结性能完全失效，见图 10；



图 10 200℃高温处理后的试件
Fig.10 Test specimen after exposure to 200℃

经伺服万能试验机加载后，试件的破坏形式也不尽相同，总的来说可以分为 2 种类型。A 型破坏为混凝土试件表层混凝土随着粘结剂发生剥离破坏；B 型破坏为沿着钢板-粘结剂界面破坏；A 型破坏主要发生在较低温度(15℃ 和 50℃ 100℃)条件下，如图 11；B 型破坏主要发生在较高温(150℃)条件下，如图 12；两种破坏类型均属于脆性破坏，破坏前没有征兆。对于 A 型破坏，随着温度的升高，混凝土随粘结剂发生剥离的面积呈现递减的规律。如图 11，原因可能是温度的升高使得钢板-粘结剂界面的抗剪强度逐渐降低。

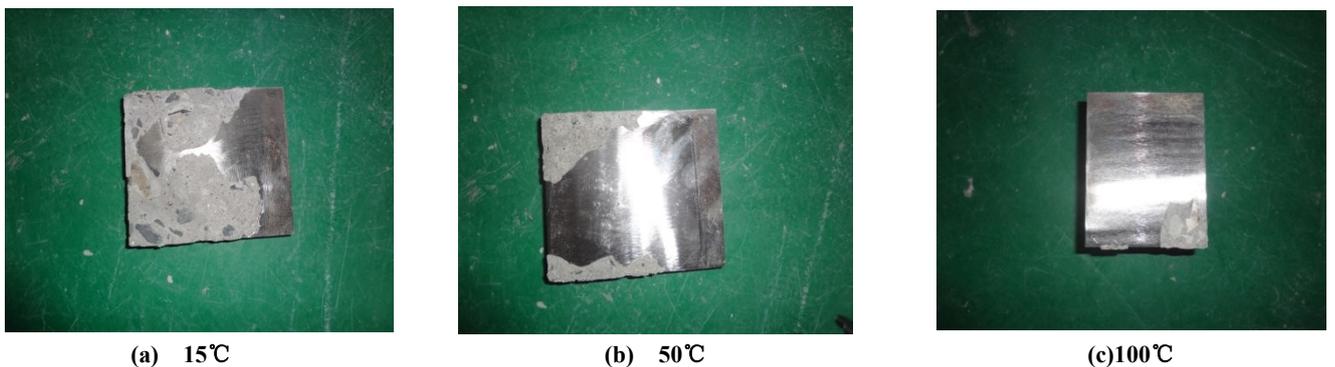


图 11 各温度条件下的 A 型破坏
Fig.11 failure form A after exposure to different temperature



图 12 B 型破坏
Fig.12 Failure form B

3.2 试验结果

(1) 荷载-位移变化规律

如图 13 所示, 各温度条件下, 混凝土-钢板界面的位移随着荷载的增加而增大; 但是最大位移都比较小, 不超过 0.3mm; 在加载过程中, 在较低荷载条件下, 位移随着荷载的增加变化速率快, 几乎呈现线性增长; 在较高荷载条件下, 位移随着荷载增加呈现阶梯性增加, 增长速率比较低荷载条件下低; 混凝土-钢板剪切面的剪切强度随着温度的升高呈现先增加后降低的趋势, 50℃ 时最高, 150℃ 最低;

随着温度条件的升高, 荷载-位移曲线的斜率随之呈现先增加后降低的趋势, 这说明混凝土-钢板界面的剪切刚度几乎随着温度的增加呈现先增加后降低的规律, 50℃ 条件下界面的剪切刚度最大, 150℃ 条件界面的剪切刚度最小。

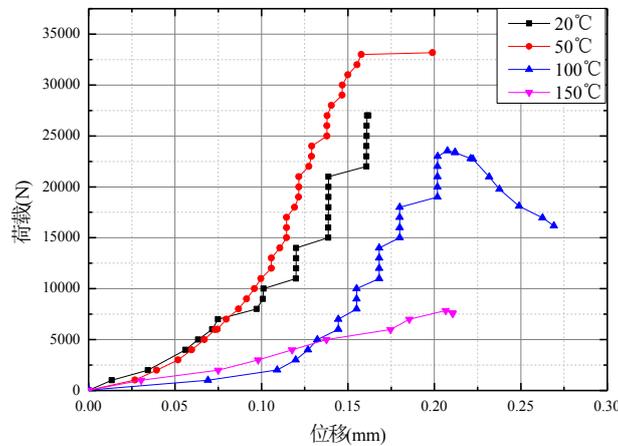


图 13 荷载—位移变化图
Fig.13 The variation of the displacement with the load

(2) 温度-破坏荷载变化规律

如图 14, 混凝土-钢板界面的破坏荷载随着温度呈现先增加后减小的规律; 在温度为 50℃ 条件下, 破坏荷载最大, 达到了 33.2kN; 在温度为 150℃ 条件下, 破坏荷载最小, 为 7.9kN; 其他温度条件下, 破坏荷载介于 20kN 和 30kN 之间; 当温度超过 50℃ 时, 破坏荷载急剧减小。由此可见, 温度的变化能显著影响混凝土-钢板界面粘性性能, 混凝土-钢板界面粘结性能存在最佳工作温度 T_p 。和完全失效温度 T_f , T_p 约 50℃ 左右, 而 T_f 介于 150℃~200℃ 之间。当温度条件 $T \leq T_p$ 时, 混凝土-钢板界面的粘结性能随着温度升高而增强; 当温度条件 $T_p < T < T_f$ 时, 混凝土-钢板界面的粘结性能随着温度升高而降低; 当温度条件 $T \geq T_f$ 时, 混凝土-钢板界面的粘结性能完全失效;

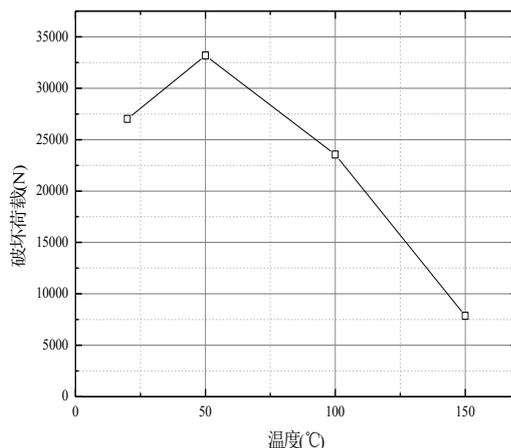


图 14 温度-破坏荷载变化图

Fig.14 The variation of the failure load with temperature

(3) 温度-最大位移变化规律

如图 15, 各温度条件下, 混凝土-钢板界面的最大位移随着温度升高呈现先增加后降低的变化规律, 100°C 位移最大, 达到 0.27mm, 20°C 时位移最小, 为 0.162mm; 原因是跟其他温度条件相比, 100°C 条件下混凝土-钢板界面的破坏荷载不低但是剪切刚度最小, 而常温条件下混凝土-钢板界面的破坏荷载较高且剪切刚度较大。

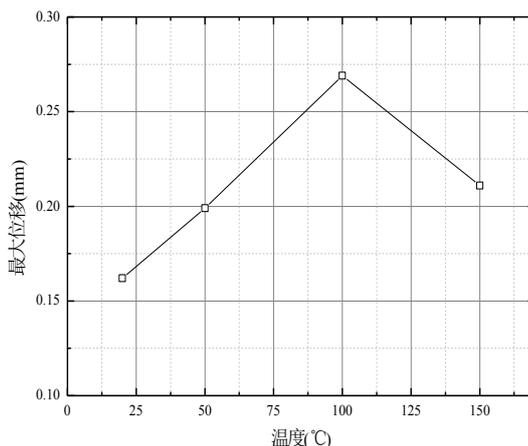


图 15 温度-最大位移变化图

Fig.15 The variation of the maximum displacement with temperature

3.3 混凝土-钢板界面粘结性能影响因素分析

综合上述混凝土-钢板界面的破坏形式、荷载-位移变化规律等, 影响混凝土-钢板界面粘结性能的因素主要包括混凝土试块的剪切强度 τ_c , 混凝土-粘结剂界面的剪切强度 τ_{c-b} , 粘结剂自身的剪切强度 τ_b , 钢板-粘结剂界面的剪切强度 τ_{s-b} 。 $\tau_c, \tau_{c-b}, \tau_b, \tau_{s-b}$ 的大小都随着温度变化。显然, 当 $T \geq T_f$ 时, 混凝土-复合腔体界面粘结性能失效。

在较低温度(20°C, 50°C, 100°C)条件下, 主要发生 A 型破坏, 混凝土试件表层混凝土随着粘结剂发生剥离破坏, 表明该条件下, $\tau_c, \tau_{c-b}, \tau_b, \tau_{s-b}$ 中 τ_c, τ_{c-b} 两个较小, 混凝土-钢板界面的粘结强度取决于 τ_c, τ_{c-b} 的大小, 混凝土的剪切强度、混凝土-粘结剂界面的剪切强度是影响混凝土-钢板界面粘结性能的主要因素。

在较高温度(150°C)下, 主要发生 B 型破坏, 表明该条件下, $\tau_c, \tau_{c-b}, \tau_b, \tau_{s-b}$ 中 τ_{s-b} 最小, 混凝土-钢板界面的粘结强度取决于 τ_{s-b} 的大小, 钢板-粘结剂界面的粘结性能是影响混凝土-钢板界面粘结性能的主要因素。

4 结论

基于高温后盾构隧道管片-钢板界面粘结性能试验研究,得到了如下结论:

(1)高温后混凝土-钢板界面破坏形式分为 A、B 两种类型。A 型破坏主要发生在较低温度(20℃, 50℃, 100℃)条件下,混凝土的剪切强度、混凝土-粘结剂界面的剪切强度是影响混凝土-钢板界面粘结性能的主要因素; B 型破坏主要发生在较高温度(150℃)下,钢板-粘结剂界面的粘结性能是影响混凝土-钢板界面粘结性能的主要因素;对于 A 型破坏,随着温度的升高,混凝土随粘结剂发生剥离的面积呈现递减的规律

(2)温度的变化能显著影响混凝土-钢板界面粘性性能;混凝土-钢板界面的剪切强度和刚度随着温度的升高呈现先增加后降低的规律。混凝土-钢板界面粘结性能存在最佳工作温度 T_p 和完全失效温度 T_f , T_p 约 50℃ 左右,而 T_f 介于 150℃~200℃ 之间。当温度条件 $T \leq T_p$ 时,混凝土-钢板界面的粘结性能随着温度升高而增强;当温度条件 $T_p < T < T_f$ 时,混凝土-钢板界面的粘结性能随着温度升高而降低;当温度条件 $T \geq T_f$ 时,混凝土-钢板界面的粘结性能完全失效;

(3)为了得到盾构隧道管片-钢板的高温力学性能,在本文的基础上,可以进一步开展 1:1 的盾构隧道管片进行试验研究,得到火灾高温下,火灾高温后盾构隧道管片-钢板高温力学性能,从理论,试验,数值多方面进行研究,为钢板加固盾构隧道的实践提供更加丰富的理论依据。

参考文献(References)

- [1] Burke P J, Bisby L A, Green M F. Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 190-199.
- [2] Naser M Z, Hawileh R A, Rasheed H A. Performance of RC T-Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates under Elevated Temperatures[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2014, 5(1): 1-24..
- [3] Bisby L A, Green M F, Kodur V K R. Fire behavior of reinforced concrete columns confined with fiber-reinforced polymers [A]. Proceedings, Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction [C]. Cambridge, UK, 2004:465~472
- [4] Blontrock H, Taerwe L, Vandeveld P. Fire tests on concrete beams strengthened with fibre composite laminates[C]//Proceedings of the International PhD Symposium in Civil Engineering, Vienna (Austria), 5-7 October 2000/ed. Konrad Bergmeister.-Volume 2, 151-161. 2000.
- [5] Blontrock H, Taerwe L, Vandeveld P. Fire testing of concrete slabs strengthened with fibre composite laminates[C]//Proceedings of the 5th conference on fibre reinforced plastics for reinforced concrete structures (FRPRCS-5), Cambridge (United Kingdom), 16-18 July 2001, ed. C. Burgoyne, p. 547-556. 2001.
- [6] Williams B, Bisby L, Kodur V, et al. Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8): 1151-1160.
- [7] 陈建稳,董亚楠,司维,等. 高温对混凝土粘钢界面剪切性能的影响[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2009, 8(4): 12-15.
- [8] 袁广林,陈建稳,贾玉琴,等. 受火后混凝土黏钢界面的剪切性能研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 307-312.
- [9] 胡克旭,何桂生. 碳纤维加固钢筋混凝土梁防火方法试验研究 [J]. 同济大学学报,2006, 34 (11): 1451-1456.
- [10] 方恩权. 碳纤维布与混凝土界面粘结性能试验研究[J]. 硕士学位论文, 郑州: 郑州大学, 2005.

轨道交通隧道病害对结构承载的影响

周帅¹, 朱合华¹, 闫治国¹, 董泽宇¹, 陈庆¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 软土盾构隧道健康诊断研究作为隧道工程中新兴的研究方向, 是分析和评估病害对隧道健康状态的影响程度并采取合理有效的养护和维修措施的前提和基础。建立合理的隧道健康安全评价方法, 对于正确评价结构安全状态、评判隧道的健康状况以及为隧道维修加固措施提供依据都有重要意义。本文对常见隧道病害进行了总结, 重点研究衬砌剥落、混凝土材料劣化、附加荷载等三类病害对结构受压承载能力及结构安全性能的影响。

关键词: 软土盾构隧道; 病害; 数值模拟; 压应力

中图分类号:

文献标识码:

文章编号:

The Influence of Urban Rail Transit Tunnel Disease on Bearing Capacity

Zhou Shuai¹, Zhu Hehua¹, Yan Zhiguo¹, Dong Zeyu¹, Chen Qing¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract: The health evaluation of shield tunnel in soft soil is a new study. It is the precondition and basis of tunnel maintaining, repairing and reinforcement. The rational method for health evaluation is of great importance to estimate the status of the tunnel and to repair it. The influence of the tunnel disease, especially lining spalling, deterioration of concrete and additional load, on bearing capacity of the structure is investigated.

Keywords: shield tunnel in soft soil; disease; numerical simulation; compressive stress

1 引言

与地上结构不同, 由于地下结构受到岩土体和地下水等复杂地下环境的作用, 使其保持良好的健康服役状态非常困难。而且, 地下结构是不可拆除或不可逆结构, 像地铁区间隧道、大型越江公路隧道, 其设计使用寿命期限为 100 年以上, 投入运营后车辆运行密度极高、使用条件苛刻, 结构自身在多因素长期作用下性能不断劣化, 一旦损坏不易或不可更换, 并将诱发出地下工程灾害, 造成严重的人员伤亡与财产损失。因此研究隧道病害对结构承载能力的影响具有重要意义。

Yuan 等^[1]从外观、密封性、完整性、坚固性、稳定性五个方面评价了隧道的服役性能。Yin 等^[2]利用剪切裂缝模型分析了隧道衬砌的开裂与破坏特性。Lee 等^[3]以刚度折减和剪切裂缝为基础建立了两种反分析模型, 然后根据变形数据和衬砌混凝土恒载估计病害的位置和程度。张耀军^[4]通过对世界上地铁运营事故的统计, 分析并总结了引起城市地下工程安全性问题病害的原因, 据此给出了一类安全性评估指标。刘海京^[5]根据公路隧道病害研究现状, 基于隧道健康诊断和计算模型的隧道病害分类方法和量化参数, 利用荷载结构法与地层结构法建立衬砌裂缝、材料劣化、厚度不足、背后空洞四类病害的简化力学模型。张明海等^[6]对常见盾构衬砌结构裂缝、渗漏水、劣化、剥落四种病害提出了数值计算模型。但以上病害模型均是二维的数值模型, 无法反映三维空间的实际情况。周帅等^[7]对常见盾构隧道剥落、劣化、附加荷载三种病害采用三维 ANSYS 进行了数值计算, 但仅限于对隧道结构拉应力进行分析, 并未对压应力进行分析。

作者简介: 周帅(1988-), 男, 四川重庆人, 在读博士生, 主要从事隧道病害以及修复方面的研究。E-mail: china_zhoushuai@163.com

2 常见软土地铁隧道病害

软土盾构隧道发生病害，如同人生病，只有“对症下药”才能祛病强身。与医学的研究方法类似，盾构隧道病害的研究也包括“望闻问切”、“对症下药”等不同的阶段、方法和程序，只有遵循科学合理的隧道病害研究方法和原则，找到隧道病害的“病根”，评估“病情”，方可“对症下药”，达到最后“药到病除”和“祛病强身”的效果。除了“对症下药”，还应当视病情下药，即所谓“重症下猛药”，表1是人与隧道的系统类比。隧道病害多种多样，不同病害的表现特征、危害程度、严重程度都不尽相同，如何准确判定不同类型、特征、严重程度的病害对隧道健康状况的影响程度是隧道健康诊断的要旨所在。

表1 人与隧道的系统类比
Table 1 The disease of man and tunnel

类比项目	人体	隧道
构造机能	主体架构：例如骨骼、肌肉	结构系统：例如钢筋、混凝土
生命周期	产前优生-生-老-病-死	企划-设计-施工-运营维护-病害-废弃
老化	从婴儿出生便开始老化	从新建完成便开始劣化
决定健康状况的主要因素	(1) 环境因素 (2) 健康行为 (3) 遗传状况 (4) 医疗服务	(1) 所处环境 (2) 管理成效 (3) 建成品质 (4) 病害处理
疾病诊断方法	望-闻-问-切	目视，物理性测试，化学性测试
医疗认证人员	医生、中医师、药剂师、护士等	土木技师、电机技师等
健康检查	定期健康检查模式	隧道检查机制
疾病记录	病例表	隧道数字化
生病种类	烫伤、刀伤、老化等	剥落、裂缝、管片劣化等

衬砌结构承载能力是隧道安全运行的前提和基础，故有必要从力学机理入手深入分析不同类型的隧道病害力学特征，在此基础上利用定量的方法建立隧道病害计算模型以及带病害结构安全性评价方法，为采取合理的隧道病害养护和治理措施提供依据，具有重要的研究意义。

3 带病害衬砌计算模型及有限元分析

本文以上海地铁1号线为工程实例，着重研究剥落病害、劣化病害以及附加荷载对结构承载的影响，并采用 ANSYS 进行计算分析，病害模型详见前期研究^[7]。由于隧道是一个封闭的受压结构，受拉应力并不会造成结构的整体破坏，只会产生局部裂纹。故这里重点研究由于压应力超过混凝土抗压强度引起的隧道破坏。

3.1 衬砌结构模型

3.1.1 定义单元类型与材料参数

衬砌管片：为了研究其三维受力性态，选用SOLID45单元。SOLID45单元为3D固体结构单元，由八个节点组成。管片的弹性模量取 $E_c=3.45 \times 10^{10} \text{N} / \text{m}^2$ ，泊松比取0.2，密度为 $2500 \text{kg} / \text{m}^3$ 。

螺栓：连接衬砌管片的环向螺栓，考虑在三维情况下其拉伸、压缩作用，故选用LINK8单元。螺栓的材料为钢材，其弹性模量 $E=2.06 \times 10^{11} \text{N} / \text{m}^2$ ，泊松比取0.3，密度为 $7850 \text{kg} / \text{m}^3$ 。

管片接触面：由于接缝两侧的接触体皆为钢筋混凝土管片，二者刚度近似，本接触问题属于柔体-柔体的面-面接触问题。因为两接触体刚度接近，所以取其中的一个面为“目标面”，另一个面为“接触面”。分别用 TARGE 170 单元来模拟 3D 的“目标面”，用 CONTA173 单元来模拟 3D 的“接触面”。接触单元的材料取与管片一致。混凝土间摩擦系数取 0.3。

3.1.2 建立几何模型及网格划分

由于地铁一号线采用通缝拼装，故对一环衬砌进行分析。采用线弹性模型，一环管片的结构图如图 1 所示，有限元模型如图 2 所示。

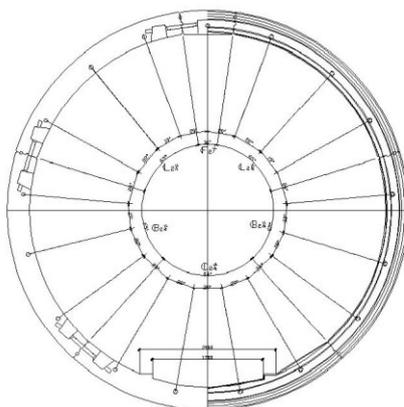


图 1 管片结构图
Fig.1 Lining structure graphing

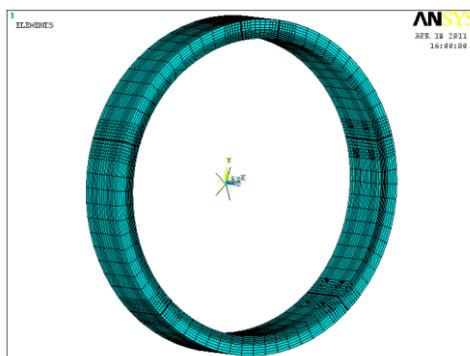


图 2 有限元模型图
Fig.2 Finite element model

3.1.3 荷载施加

采用水土分算法计算结构荷载，侧压力系数取0.7，地面超载值取20kPa，埋深10米，地下水位1米，地层情况如表2。采用荷载结构法施加等效节点荷载于衬砌上。图3是计算所得荷载示意图。由于所计算三角形抗力小于3kPa，故忽略其影响。

表2 地层数据表

Table 2 Stratum situation

地层	重度(kN/m ³)	厚度(m)
淤泥质粉质粘土	17.6	2.51
淤泥质粘土	16.6	9.79
砂质粉土夹砂质粘土	18	6.81

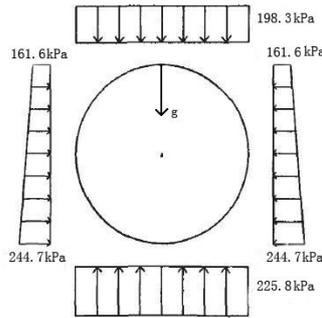


图3 荷载示意图
Fig.3 Load diagram

3.2 隧道剥落病害模型与结构安全分析

三维衬砌剥落参数可以利用剥落位置、剥落深度、剥落面积三个参数表征^[7]。由于病害实测数据可知拱底块几乎不发生剥落病害，故本文不考虑。由于对称性，本文假设剥落发生在衬砌右侧，在一块管片中发生在边部和中部。衬砌设计厚度为0.35m，假设隧道衬砌存在剥落区域的实际剥落深度为0.2m、0.25m、0.3m三个病害程度级别；病害区域面积可取为0.1m²、0.5 m²、1.0 m²三个特征面积等级，由于封顶块面积不到1.0 m²，故本文不考虑封顶块剥落1.0m²的情况。综合不同特征参数的排列组合，本文共计算了42个存在剥落病害的计算工况。当衬砌最大压应力超过23.1 MPa视为破坏。剥落在ANSYS中用单元杀死进行模拟。图4是邻接块边部发生剥落面积为0.1m²，剥落深度为0.2m的示意图，封顶块与标准块所用方法类似。

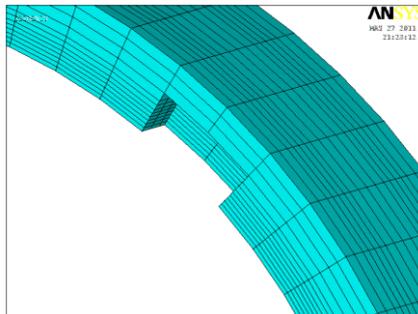


图4 剥落示意图
Fig.4 Spalling

图5是邻接块存在三个特征病害面积时结构最大压应力图。计算结果表明，边部剥落面积为1m²和0.5 m²时结构的最大压应力随剥落深度显著增加，而边部剥落面积为0.1 m²时，最大压应力所受影响较小。中部剥落面积为1m²以内时结构的最大压应力所受影响较小。在同一剥落深度的情况下，衬砌会随着剥落面积的增大以及位置靠边而使最大压应力增大。由于衬砌抗压强度为23.1MPa，因此在所考虑各种剥落情况下衬砌都不会压碎。

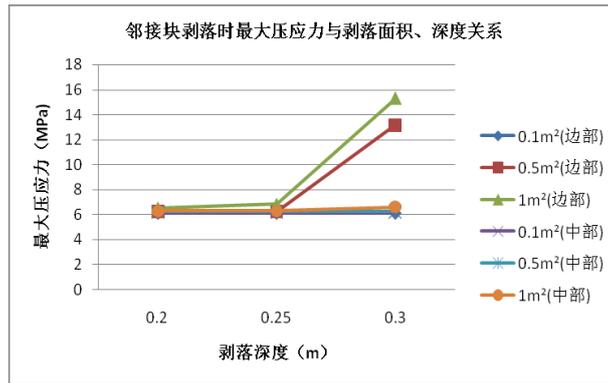


图5 邻接块剥落病害对最大压应力的影响

Fig.5 The influence of spalling in contiguous block on maximum compressive stress

图6是标准块存在三个特征病害面积时结构最大压应力图。计算结果表明，边部剥落面积为 1m^2 和 0.5m^2 时结构的最大压应力随剥落深度显著增加，规律与邻接块的情况相似。剥落面积为 0.1m^2 时，最大压应力所受影响较小。中部剥落面积为 1m^2 以内时结构的最大压应力所受影响较小。在同一剥落深度的情况下，衬砌会随着剥落面积的增大以及位置靠边而使最大压应力增大。由于衬砌抗压强度 23.1MPa ，因此无论在何种剥落情况下衬砌都不会压碎。

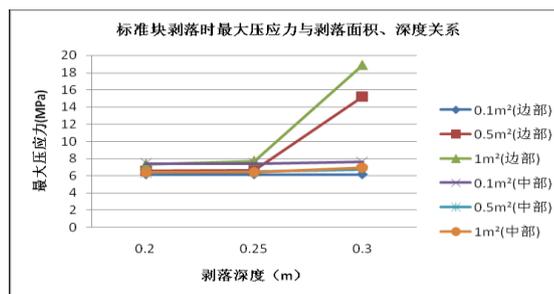


图6 标准块剥落病害对衬砌结构最大压应力的影响

Fig.6 The influence of spalling in standard block on maximum compressive stress

图7是封顶块存在 0.1m^2 与 0.5m^2 衬砌剥落的情况下结构最大压应力图。同样，本文只考虑边部剥落，不考虑中间剥落。计算结果表明，边部剥落面积为 0.1m^2 和 0.5m^2 时结构的最大压应力随剥落深度增加而增加，规律与邻接块的情况相似。剥落面积增大会使最大压应力增大。由于衬砌抗压强度为 23.1MPa ，因此在所考虑剥落情况下衬砌都不会发生受压破坏。

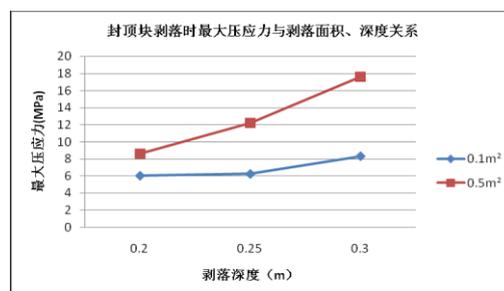


图7 封顶块剥落病害对衬砌最大压应力的影响

Fig.7 The influence of spalling in top block on maximum compressive stress

3.3 隧道劣化病害模型与结构安全分析

上海是沿海城市，水质情况比较复杂，地下水中的 Cl^- （氯离子）和 SO_4^{2-} （硫酸根离子）含量在靠近长江口附近区域有明显增加；沿海或者长江口沿线的盾构隧道的混凝土结构存在 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等化学侵蚀的可能性。本文中劣化主要考虑隧道外壁由于地下水腐蚀产生的劣化。由于隧道长期处于地下水环境中，四周的劣化程度近似一致，故劣化采用外壁有相同劣化深度的情况。

三维衬砌劣化参数可以利用劣化厚度、劣化程度两个参数表征^[7]。隧道设计厚度为0.35m，假设隧道衬砌存在劣化的病害厚度为0.1m、0.2m、0.35m三个级别。劣化以弹性模量、抗拉强度和抗压强度的折减进行模拟。这里将混凝土劣化简化为标号的降低，分劣化程度为C45，C40，C35，C30四个劣化程度。综合不同特征参数的排列组合，本文共计算了12个存在衬砌劣化病害的计算工况。图8是衬砌劣化的示意图。

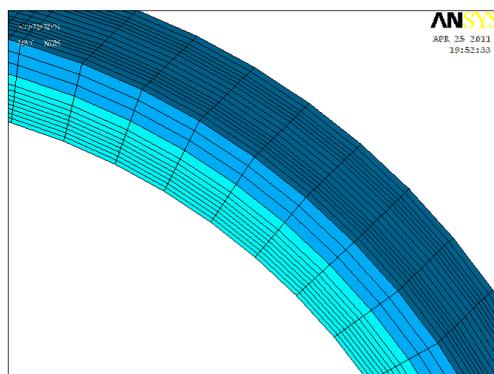


图8 衬砌劣化的示意图

Fig.8 Degradation

定义最小压应力安全系数 $= (f_c/\sigma_3)_{\min}$ 。由于每种劣化情况的抗压强度都不一样，这里用抗压强度与最大压应力的比值作为判定标准，比用最大压应力更加直观。图9是衬砌存在4个劣化程度以及3个劣化深度时结构最小压应力安全系数图。计算结果表明，随着劣化程度变大结构的最小压应力安全系数减小。随着劣化深度变大结构最小压应力安全系数也减小。在所考虑的劣化情况下衬砌不会出现压碎的情况。

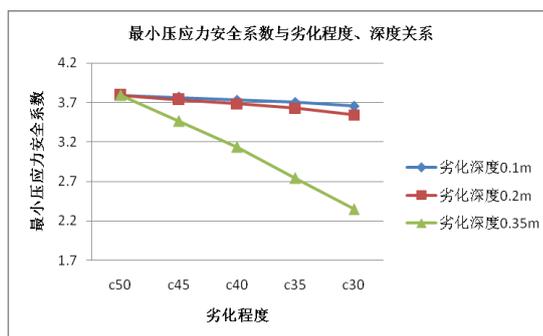


图9 劣化病害对最大压应力的影响

Fig.9 The influences of degradation on maximum compressive stress

3.4 隧道附加荷载与结构安全分析

在既有的隧道上方修建高层建筑，高层建筑的施工将对地铁隧道产生附加荷载。《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》中明确规定：由于建筑物垂直荷载（包括基础地下室）及降水、注浆等施工因素而引起的地铁隧道外壁附加荷载 $\leq 20\text{kPa}$ 。故本文考虑了

20kPa,30 kPa,40 kPa,50 kPa,60 kPa 等多种附加荷载情况，由于附加荷载在 60 kPa 时隧道已发生破坏，故研究上限定为 60 kPa。在方向上取为上下方向和左右方向，考虑各种组合，共有 10 种情况。衬砌以最大压应力超过 23.1MPa 视为破坏。图 10 是在左右方向上有 20 kPa 附加荷载的情况，其它大小病害的情况类似。

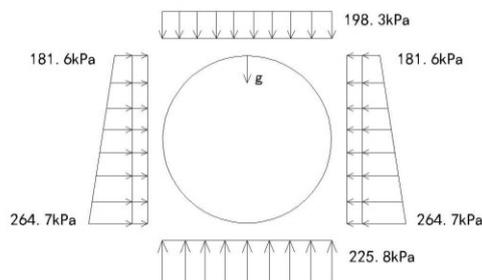


图10 附加荷载示意图
Fig.10 Additional load

图11是衬砌存在两个附加荷载方向以及五个附加荷载大小时衬砌最大压应力图。计算结果表明，随着附加荷载变大衬砌最大压应力变大。在相同附加荷载的情况下，上下方向的附加荷载对结构的影响更大，原因是上下方向的荷载比左右两侧的荷载大，由于附加荷载的存在使受力不均更加严重，故最大压应力更大。在上下附加荷载的情况下，最大压应力的位置发生在邻接块手孔处，或者邻接块螺栓处。在左右附加荷载的情况下，最大压应力出现的位置在邻接块手孔处。由图可知，在附加荷载小于50KPa的情况下，衬砌不会发生压碎的情况。

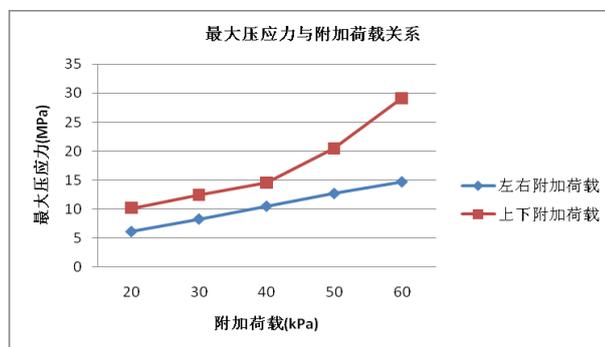


图11附加荷载对最大压应力的影响

Fig.11 The influences of additional load on maximum compressive stress

4 结论

本文总结了盾构隧道病害的分类与特征，建立了以荷载结构法为基础的隧道病害三维计算模型，利用 ANSYS 平台编制了 APDL 计算程序，在此基础上对病害的参数进行了系统的分析，得出了剥落病害、附加荷载和材料劣化病害参数对结构承压承载能力的影响规律。

参考文献(References)

- [1] Yuan Y, Bai Y & Liu JH. Assessment service state of tunnel structure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012,27(1):72-85.
- [2] Yin J, Wu Z, Asakura T & Ota H. Cracking and failure behavior of concrete tunnel lining predicted by smeared crack model [J]. Structure Engineering, 2001, 18(1):1-11.
- [3] Lee JS, Choi IY, Lee HU & Lee HH. Damage identification of a tunnel liner based on deformation data [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(1):73-80.

- [4] 张耀军. 地铁运营安全评价系统研究[J]. 北方交通, 2010 (50): 155-157.
- [5] 刘海京. 公路隧道健康诊断计算模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [6] 张明海, 张乃娟. 盾构隧道常见病害及其影响分析[J]. 城市道桥与防洪, 2009, 9(9): 182-187.
- [7] 周帅, 朱合华, 闫治国, 陈庆. 城市轨道交通隧道结构病害数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 录用。

高速公路隧道结构检测车的关键技术研究

朱爱玺, 刘学增

(上海同岩土木工程科技有限公司, 上海 20092)

摘要: 基于图像分析方法, 研究了隧道结构快速检测车的数据采集与数据分析关键技术。采用激光扫描测距与可见光照相的方法, 实现隧道结构变形与表面病害的快速采集, 研究裂缝图像特征, 基于 CTA 测度算法, 得到隧道结构裂缝的高效识别方法。根据渗漏水图像的四个特征, 采用改进 LTA 算法, 实现隧道结构渗漏水的快速识别定位。

关键词: 隧道结构; 检测车; 图像识别; 裂缝; 渗漏水

中图分类号: **文献标志码:**

The design and implementation of a highway tunnel test vehicle

Zhu Aixi, Liu Xuezeng

(Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., 20092, Shanghai, China)

Abstract: Based on image analysis method, Several key techniques of data collection and data analysis of a quick test vehicle for tunnel structure is given. With laser scanning range and visible light photography, realize the deformation of tunnel structure and surface disease rapid acquisition. the crack image characteristics, based on CTA measure algorithm, get the effective identification method tunnel structure cracks. According to the characteristics of the leakage water four of the image with the improved algorithm of LTA, realizing fast identification of leakage water.

Keywords: tunnel structure; test vehicle; image identification; crack; leakage water

1 引言

2014年, 中国高速公路已突破10万公里, 总里程位居世界第一, 从上世纪九十年代开始, 中国进入了公路建设快速发展的时期。当前我国已从大规模修筑高速公路转移到高速公路的使用、管理阶段, 随着高速公路运营里程的激增, 高速公路的结构养护工作将日益繁重, 养护施工出现了新的特点, 快速养护成为高速公路路面养护施工发展的必然趋势。为了确保高速公路的畅通, 更好地为经济建设服务, 要求尽量缩短养护作业时间, 一般情况下不得封闭交通。因此, 快速养护成为高速公路养护发展的必然趋势, 传统的养护检查手段方法已经不能满足高速公路的运营现状, 必须不断采用先进的养护机械和施方法, 缩短养护施工作业占用车道的的时间, 减少交通阻塞, 最大限度地实施快速养护。

预防性养护理念日益被得到重视, 预防性养护、快速养护已经成为保障隧道结构安全和增加隧道服役年限的重要手段。随着信息处理技术和传感器技术的进步, 针对隧道结构各种病害损伤情况的评价, 有条件开发使用各种检测仪器。采用激光、超声波等非接触传感技术和计算机技术, 使操作更加便捷和高效。国内外针对路面缺陷检测的公路智能检测车就已经得到很好的应用。

公路智能检测车是利用安装在检测车辆上的高速、高精度图像采集与处理设备, 在测量车以正常速度行驶的同时, 进行路面图像采集与存储。在获得路面全部图像后, 利用图像处理与分析软件, 对获得的全部图像进行处理与分析, 从中提取出路面破损、平整等方面的精确测量数据。系统对裂缝的正确识别率达到90%以上, 同时检测路面平整度和车辙检测^[1]。

作者简介: 朱爱玺(1970—), 男, 博士研究生, 光学工程专业, 高级工程师, 主要从事太赫兹成像与工程数字化相关研究。

然而，对于隧道结构的病害检测，对比路面检测来说，更有一系列的技术难点，国内一直没有推出合适的快速检测装备。大部分采取人工检查的方式，不仅效率低，精度差，也严重影响公路正常通行。

2009年 Nguyen 等人提出一种基于条件纹理异向性 (CTA)^[2]度量准则的路面裂纹检测算法，该种算法的能够有效的检测出路路面裂纹，并通过后向神经网络能够有效的对裂纹、连接线缝及桥接缝进行有效的分类及识别^[3]。

2008年 Nguyen 等人基于公路裂缝的连续性及裂缝灰度级较低的特性提出了一种快速高效的裂缝检测方法，该方法能够检测到水平、竖直、网状等形状的裂纹^[4]。

2009年 Oliveira 等人提出一种基于图像动态阈值选择及非重叠的裂缝分块图像熵的裂缝检测分类方法，该方法能够在一定程度上对水平裂缝路面，竖直裂缝路面，杂乱裂缝路面及完好路面进行正确分类，表明了非重叠分块图像熵可以作为公路裂缝图像的裂缝特征来进行使用^[5]。

2012年刘学增等人以隧道衬砌渗漏水面积为检测目标,提出一种出包括去噪、锐化、分割、修正的一整套数字图像处理算法^[6]。

2011年黄宏伟等人针对渗漏水红外图像特征，利用 MATLAB 编写的程序能够提取热图像中的渗水面积等信息，为隧道渗漏水车载动态检测软件系统开发奠定基础^[7]。

2 数据采集

公路隧道病害是当前国内外隧道运营管理中的一个世界性难题，目前，我国约有20% ~30%的公路隧道病害处于亚健康状态^[8]。隧道结构常见病害主要表现为衬砌裂缝、断面变形、错台错缝、渗漏水、蜂窝麻面、剥落剥离等。

对于裂缝、水害等表观病害，可从肉眼观测识别，对于变形类病害，需要通过专门测量来获取。因此，可以借用检测装备，通过采集现场照片的方式获取裂缝、水害等表观病害，采用激光测距的方式获取断面变形，可以在公路上连续、非接触、高速地实时采集公路隧道结构信息，并利用计算机实时处理或后处理获取各项采集指标信息。

现场照片的采集方式有多种选择，如红外线照相和可见光照相，红外线现场照相法可以测定衬砌和围岩间水在不同温度下的流动、衬砌背后地质条件的改变以及衬砌缺陷、空洞，由于该方法依赖于温度梯度测量，因此需要在温差较大时进行，由于精度相对较低，只能进行粗定位，无法精细测量。因此可以采用可见光照相进行数据采集。而采用可见光照相，又可在线阵相机和面阵相机之间进行选择。考虑到隧道断面为圆弧形结构，而车辆无法确保在隧道中线行进，因此尽管线阵相机的高分辨率和高扫描频率，但难以适应公路隧道弧形断面的图像采集。采用面阵相机，又有工业相机和单反相机、摄像机的选择。在相同分辨率下，工业相机稳定性较单反相机更高，而且采用电子快门，而不采用寿命较短的机械快门，更适用于长期连续拍摄。而现阶段采用摄像机则难以达到高的分辨率。设计时按照直径 10m 的隧道考虑，如要覆盖断面全部进行拍照，相机布置示意图如下：

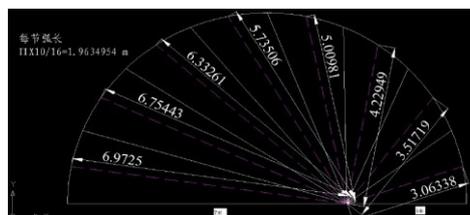


图 1 隧道照相分区示意图

Fig.1 Tunnel photographic zoning map

每个相机覆盖2m，8个相机既可以覆盖隧道检测区域。每个相机覆盖的圆弧长度为1.97m，如选择500万分辨率的工业相机，设置相机AOI为2560*1920，则1970/2560=0.77mm，即所拍照的图

像上可以分辨出宽度大于0.77mm以上的裂缝。

考虑到快速移动拍照，只能采用定焦镜头，根据镜头焦距选择公式：

$$f = \text{感光尺寸} \times \text{工作距离} / \text{视野范围} = 4.22 \times L / 1.97,$$

8个镜头从左到右焦距（单位：mm）分别为：

表 1 镜头焦距表

Table 1 The lens focal length table

1	2	3	4	5	6	7	8
15	14.5	13.6	12.3	10.7	9.1	7.5	6.5

隧道断面变形采用激光扫描测距，建立在无合作目标激光测距技术和精密数字测角技术之上，利用极坐标测量、计算机和图像处理技术，迅速得到隧道断面图，并与设计轮廓进行对比，从而可以快速判断隧道衬砌变形。

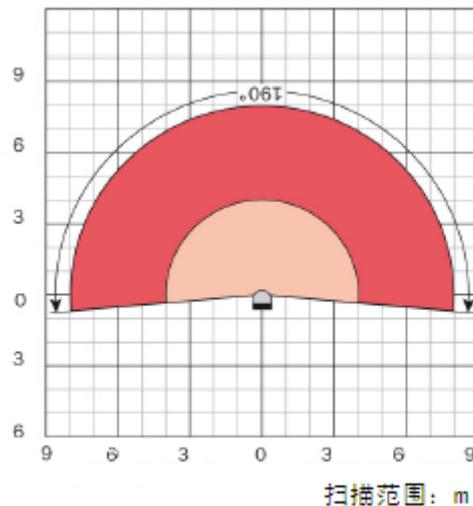


图 2 隧道轮廓扫描图

Fig.2 The tunnel contour scanning figure

3 数据分析

数据采集后，须对采集的图像数据以及点云数据进行处理。对于图像，主要为裂缝和渗漏水图像识别。

3.1 裂缝图像识别

由于混凝土材料的不均匀性，正常表面的纹理也不均匀。因此，所采集的裂缝图像背景颜色本身有较大的变化。由于裂缝严重程度不同，其长度、宽度、深度也不同。如果裂缝中有与背景颜色相近甚至更亮的比较大的颗粒，也会导致裂缝图像颜色的变化，但总的来说，裂缝图像比正常混凝土表面的暗。代表裂缝的像素数量远远小于代表背景的像素数量。正常表面的灰度值与裂缝的灰度值有部分重叠。对于由 CCD 摄像机拍摄的含有裂缝的灰度图像常常包括非均匀光照和成像系统所形成缓慢变化部分，即图像由中间亮至周围暗的变化，是一个频率低幅值高的信号^[2]。裂缝在形状上常常呈现狭长形，即裂缝的长与宽之比具有不平衡性。基于裂缝的狭长形几何特征，可以获取延裂缝方向的灰度剖面特征及延裂缝长度方向上的裂缝宽度变化特征^[3]。

由此，我们可以确认图像中裂纹的特征如下：

- 1、 裂缝图像比周围背景区域颜色暗；
- 2、 裂缝图像像素个数占少数；
- 3、 裂缝边缘与正常表面灰度值有重叠；
- 4、 裂缝呈现频率低幅值高的特征；
- 5、 裂缝几何因子结构特征：狭长形。

文献 2 提出的 CTA 测度主要融合了以下三方面的裂缝特征：(1)裂缝处灰度级较周围要低；(2)裂缝往往具有细长连续的特点；(3)裂缝在每一处均具有一个主方向，该方向常常是变化的。

本文采用一种基于裂缝分布处灰度级较低，并且裂缝在某个方向上呈现出连续性等特征进行裂缝检测，具有简单、高效的特点，检测流程如下：

- (1) 对于待检测的图像 (Inspected image) 为提高图片的对比度，采取相应的图像预处理操作，例如直方图均衡化，二值化等，其中图像二值化操作采取双阈值的方法进行二值化；
- (2) 对二值图像采用形态学操作，获取连续的裂缝二值。首先采用形态学闭操作将裂缝像素连接起来，使之连续，再采用开操作，消除孤立的像素；
- (3) 通过对 (2) 中获得的图像向 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向投影，从而完成对裂缝的最终定位与识别。

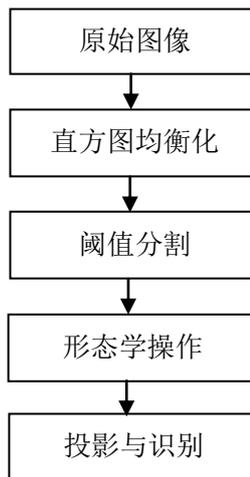


图 3 裂缝图像检测识别流程图

Fig.3 Crack image detection identification flowchart

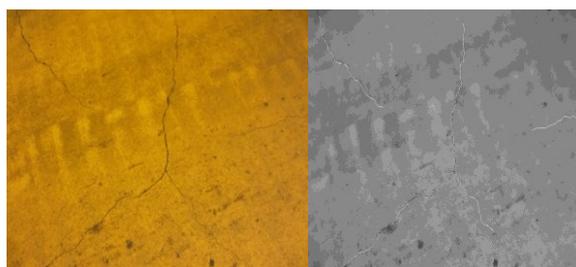


原始图像

成果图像

图 4 裂缝图像识别效果 1

Fig.4 Crack image recognition effect 1



原始图像

成果图像

图 5 裂缝图像识别效果 2

Fig.5 Crack image recognition effect 2

3.2 渗漏水图像识别

隧道渗水特征主要包括了以下几个方面：

- (1) 渗水区域由于渗水的扩散作用，往往呈现块状；
- (2) 渗水区域相对于非渗水区域来讲，往往亮度较暗；
- (3) 渗水区域在渗透过程中，由于受重力影响，常常是呈现由上至下扩散的特征；
- (4) 渗水区域由于在渗透过程中，受重力方向性影响，使得渗水区域中的像素值分布亦具有较未渗水的衬砌面较强的方向性。

因此，考虑渗水污染的衬砌面区域与未受渗水污染的衬砌面区域特征相异性，利用渗水区域性质 1—渗水区域具有呈现块状的特点，并根据特征 4 可知，渗水区域的像素相对于未污染的区域，体现着较明显方向性；对于未污染区域的任何一个像素而言，考虑其所在位置的 m 个方向上的信息，对于区域内的像素而言，若该区域内的像素有着较强的一致性，故在各个方向上均具有较相近的性能（此处所说的相近性能是指：该像素的方向性在该 m 个方向上均具有相近的概率值；）制定如下渗水图像检测方案：

- (1) 计算待分割图像的梯度图像，并将原图像与梯度图像叠加，形成细节增强图像；
- (2) 对图像中的对于某个像素点 1，考虑以该像素点为中心的，以 $2 \times d + 1$ 为边长的正方形区域，分别考虑 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ 方向上包含在正方形以内的像素点的特征应该和该正方形所在区域所有像素的特征的平均特征属性进行比较，依据未受渗水污染的区域像素具有不明显的方向性，而受渗水污染的区域像素具有更明显的方向性，则能够实现非渗水区域与渗水区域的分割；
 1. 在区域检测时，我们修改了 LTA 值的形成准则，改写为：
当前像素 1 具有较强方向性时，则 值所相应的方向即为当前像素的方向，且该值较小，同时方差较大，则该像素的 LTA 值较小；若当前像素 1 不具有较强的方向性，则 值较大，与此同时方差较小，此时 LTA 值具有较大值；
 2. 依据正方形包围的局部信息，动态地调整平均特征属性，以致完成对区域分割，并且不存在对图像全局特征属性的依赖；
- (3) 对图像中每一个像素计算 LTA 值，形成 LTA 矩阵；LTA 矩阵进行双阈值划分处理，得到关于渗水区域与未渗水区域的分割图像；
- (4) 对 LTA 阈值处理后的图像进行形态学处理；

原图像



图 5 渗漏水原始图像

Fig.5 The original image of leakage water

梯度图像

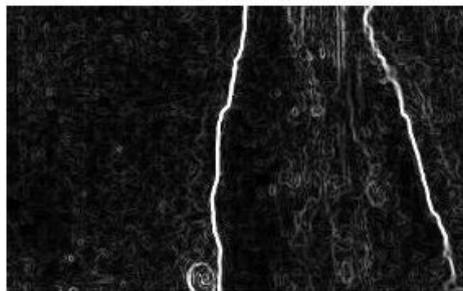


图 6 渗漏水梯度图像

Fig.6 The gradient image of leakage water

原图像叠加梯度图像后的结果图

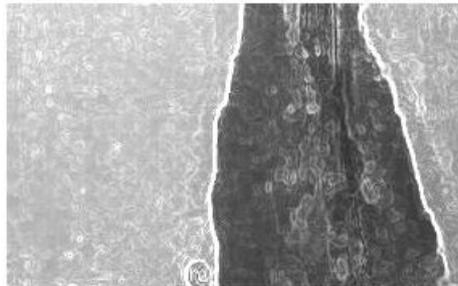


图 7 渗漏水原图像叠加梯度图像

Fig.7 The original image superposition gradient image

LTA双阈值后的结果图



图 8 LTA 双阈值结果图像

Fig.8 LTA double threshold image results

形态学操作后的图像

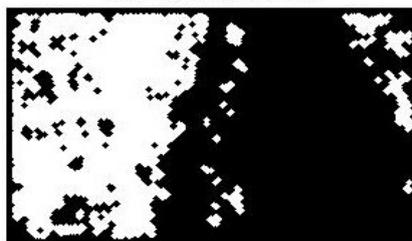


图 9 形态学操作后的图像

Fig.9 The image after morphological operation

4 结论

本文基于图像分析方法，给出了隧道结构快速检测车的数据采集方法与隧道结构表观病害的图像识别算法，得出以下结论：

(1) 数字图像处理技术为隧道结构的快速自动化检测提供了一种新的方法。

(2) 隧道裂缝的图像检测能够实现 95%以上的裂缝自动检测，但由于背景干扰，也存在误检区域，后续需要进一步解决检测出的裂缝不连续问题以及图像中干扰的去除。

(3) 渗水检测算法执行效率较高，检测区域较好，有效解决了隧道衬砌渗水区域的自动检测问题。但对于该算法中，需要通过先验知识预先估计出渗水区域的灰度图像的灰度值所处的范围，这是一个限制条件。对于实际工程应用来讲，完全可以通过预先控制补偿光照强度来保证渗水区域的灰度图像的灰度值处于某个指定的范围。

(4) 隧道结构快速检测车的研发成功，为国内高速公路的隧道养护提供了快速、高效、标准化、智能化的检测设备，填补了我国国内高速公路隧道结构快速检测的空白，标志着我国高速公路隧道养护水平已跻身国际先进行列。

参考文献(References)

- [1] 何靛俊.基于图像处理的沥青路面裂缝检测系统研究[D].西安：长安大学,2008,3-4. (HE Liangjun. Study on the asphalt pavement crack detection system based on image processing [D]. Changan University,2008,3-4(in Chinese))
- [2] F. Roli. Measure of texture anisotropy detection on textured surface for crack. Electronics Letters, 1996,32, 1274-1275.
- [3] Tien Sy NGUYEN, Manuel AVILA, BEGOT Stephane. AUTOMATIC DETECTION AND CLASSIFICATION OF DEFECT ON ROAD PAVEMENT USING ANISOTROPY MEASURE. European Signal Processing Conference, Glasgow : United Kingdom (2009).
- [4] N. T. Sy, M. Avila, S. Begot and J. C. Bardet. Detection of Defects in Road Surface by a Vision System. Electrotechnical Conference, The 14th IEEE Mediterranean, AJACCIO : France (2008).
- [5] Henrique Oliveira, Paulo Lobato Correia. AUTOMATIC ROAD CRACK SEGMENTATION USING ENTROPY AND IMAGE DYNAMIC THRESHOLDING. 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009).
- [6] 刘学增 桑运龙 苏云帆. 基于数字图像处理的隧道渗漏水病害检测技术[J]. 岩石力学与工程学报,2012,A02:3779-3786. (LIU Xuezeng,SANG Yunlong,SU Yunfan. Analysis and monitoring on shield tunneling under existing adjacent tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,A02: 3379-3786(in Chinese))
- [7] 豆海涛,黄宏伟,薛亚东. 隧道渗漏水红外辐射特征模型试验及图像处理[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30:3386-3391.(DOU Haitao,HUANG Hongwei,XUE Yadong. Model Test on Infrared Radiation Feature of Tunnel Seepage and Image Processing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30:3386-3391.(in Chinese))
- [8] 罗泽文. 公路隧道结构健康诊断与病害处治研究[J]. 湖南交通科技,2009, 35(4):126-128. (LUO Zewen. Research on highway tunnel structural health diagnosis and disease treatment [J]. Hunan Communication Science and Technology,2009,35(4):126-128.(in Chinese))

基于 GIS 的矿山边坡数字化 安全管理系统研究

刘林贵¹, 李晓军¹, 李耀基², 刘高扬¹

(1.同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2.云南磷化集团有限公司, 昆明, 云南 650600)

摘要: 露天矿边坡的地质勘察、加固设计、矿山开采、监控量测等信息的集中、高效管理对于确保采矿安全、提高生产效率具有十分重要的作用。利用 GIS (Geographic Information System, 地理信息系统) 技术在空间数据存储、管理、表现、分析等方面具有其独特的优势, 本文探讨了基于 GIS 的矿山边坡数字化安全管理系统的整体设计思路 and 关键技术, 包括矿山边坡的地表、地层、钻孔、加固设计、测点分布等空间信息的可视化管理及监测数据分析管理, 以充分发挥各种边坡数据的价值, 并为矿山边坡安全管理、滑坡灾害防治等提供良好的可视化环境与决策支持。

关键词: 矿山边坡, GIS, 数据管理, 地层建模, 系统开发

Research on the GIS-Based Mine Slope Digitized Security Management System

Liu Lingui¹, Li Xiaojun¹, Li Yaoji², Liu Gaoyang¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092; 2. Yunnan Phosphate Chemical Group Co.Ltd., Kunming, Yunnan 650600)

Abstract: The effective management of the geological exploration, reinforcing design, mining and monitoring data plays an important role for ensuring the mining security and improving the mining management efficiency. Taking advantages of GIS in storing, managing, displaying and analyzing spatial data, the whole idea and key technology of GIS-Based mine slope digitized security management system is discussed in this paper, including the visualized management of spatial information such as mine slope surface, stratum, boreholes, reinforcing design, monitoring point distribution etc. and analysis of monitoring data, in order to bring out the full value of the mine slope data and offer good visualized environment and decision-making support for mine slope security management and landslide hazard prevention.

Key Words: Mine slope, GIS, Data management, Strata modeling, System development

1 引言

在露天矿山开采过程中, 露天矿边坡的稳定性直接制约着矿山安全生产的持续进行, 是影响矿山经济效益的关键因素, 也是采矿及岩土工程都十分关心的问题。由于矿山边坡地质条件的隐蔽性与复杂多变性、矿山边坡失稳模式及加固方案的多样性, 进行矿山边坡安全管理要涉及到勘察、开采、加固设计、监测等大量多源、异构的边坡信息。利用地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 技术, 将这些信息集成在一起, 构建矿山边坡数字化安全管理系统, 实现矿山边坡多源信息的综合管理、分析与可视化, 对矿山边坡的稳定性给出专业的分析预测与评价, 对于确保矿山安全生产, 提高矿山管理水平具有重要的意义。

GIS 是 20 世纪 60 年代开始发展起来的地理学研究新技术, 是一种基于地图的管理信息系统, 它可将表格格式的属性信息和地图形式的图形信息结合起来, 在计算机内组织成一个既反映数量特征又反映拓扑特征的地理信息数据库^[1]。GIS 强大的空间分析和空间数据库功能决定

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAB08B01)

作者简介: 刘林贵 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。Email: liulinguitju@gmail.com

了 GIS 非常适合于解决滑坡研究领域中的许多问题^[2]。近年来, GIS 技术广泛应用于矿山、公路边坡的三维建模^[3]、监测数据集成管理^[4-5]、边坡稳定性评价^[6-8]及边坡支护方案优化设计^[9-10], 为边坡安全管理提供可视化环境与决策支持, 具有良好的实际应用价值。本文以某磷矿露天高边坡为例, 探讨了利用 GIS 技术构建矿山边坡数字化安全管理系统的整体框架及关键技术, 并以地理信息系统软件 ArcGIS 为平台实现了边坡安全管理系统的构建。研究表明, 利用 GIS 进行矿山边坡安全管理, 可以充分发挥矿山数据的价值, 提高矿山边坡管理水平, 对于确保矿山安全生产、防治矿山滑坡灾害具有重要的实用价值, 可以为类似工程提供参考。

2 系统整体设计

矿山边坡数字化安全管理系统的主要目的是整合管理各类矿山边坡信息, 建立矿山边坡地表、地层、钻孔、支护结构(锚杆、地梁)等的三维模型, 实现各类矿山边坡信息的可视化, 为矿山边坡勘察、设计、开采、监测提供信息展示、查询与分析的平台, 服务于矿山生产的全过程, 最终为矿山边坡安全管理提供数据基础与决策支持。

矿山边坡数字化安全管理系统应能够全面地展示各种边坡信息, 为边坡参数设计、边坡加固处理、边坡稳定性分析与评价提供充足的数据, 从而提高边坡管理效率和滑坡灾害预测能力。系统应涵盖的边坡信息为: 地质勘察信息, 如边坡地形地貌、边坡水文地质和工程地质情况、钻孔信息、边坡岩体结构面信息、边坡岩土体的各种力学参数等; 加固设计信息, 如边坡加固方案、边坡防排水设计、工程费用等; 矿山开采信息, 如矿石储量、采剥计划、开采进度等; 监控量测信息, 如边坡监测内容、监测仪器、监测频率及预警标准等。

矿山边坡数字化安全管理系统功能可分为基础数据管理、三维可视化、专业分析与应用三部分, 如图 1 所示。

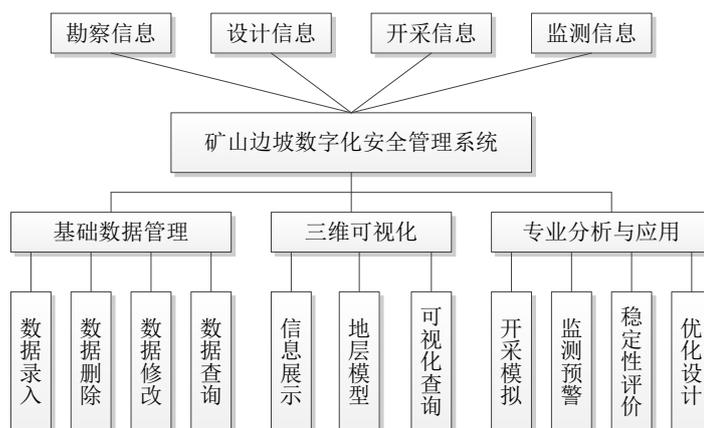


图 1 系统整体功能

Fig.1 Function of the system

基础数据管理模块实现对各种矿山边坡数据的录入、删除、修改与查询功能, 为整个系统提供数据基础; 三维可视化模块提供矿山地表、地层模型、钻孔数据、加固设计等信息的可视化展示并可以通过图形来查询属性信息, 是可视化管理的图形基础; 专业分析与应用模块将矿山数据与可视化模型应用到边坡安全管理中, 解决边坡管理的实际问题, 例如进行矿山开采模拟、边坡监测数据的管理与分析、边坡稳定性的动态预测分析与评价、边坡加固方案的比选及优化等等。

3 关键技术

3.1 数据集成管理

矿山边坡数据具有海量、异质、异构、多维、动态的特点, 其中既包含图形化的空间数据, 又包含非空间的属性数据, 有些数据还具有时态性。对这些数据的集成管理是基于 GIS 构建矿

山边坡数字化安全管理系统的基礎。选择合适的空间数据模型是有效利用 GIS 实现矿山边坡数据集成管理的关键。GIS 空间数据模型根据发展历程可分为 CAD 数据模型、拓扑关系数据模型和面向对象的数据模型^[11-12]。面向对象的数据模型是以单独的空间对象作为数据组织和存储的基本单位，每个空间对象都有各自的属性和行为，该模型对地理空间要素的表达比以往的模型更接近于人们对现实事物的认知和表达方式，容易被用户理解和接受，已成为当今流行 GIS 软件所采用的最新数据模型。ArcGIS 的 Geodatabase 就是一种面向对象的空间数据模型。Geodatabase 利用 RDBMS 管理简单要素集、海量数据集及多用户并发操作的 GIS 数据集，具有将空间数据和属性数据集中存储，简化了数据的管理和维护，提高了系统集成化水平，使得数据输入和编辑更加准确，支持智能化的行为、规则和关系等优点^[13]。利用 Geodatabase 存储空间数据和属性数据，并通过 Join 建立联系，可以在 ArcGIS 的三维平台 ArcScene 中进行边坡信息展示与查询，如图 2 所示。

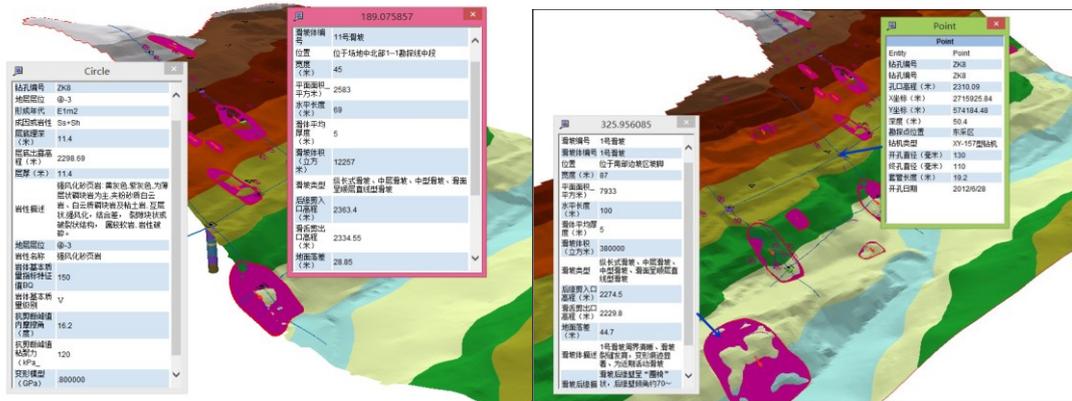


图 2 边坡信息展示与查询

Fig.2 Slope information display and query



图 3 地层建模流程

Fig.3 Workflow of stratum modeling

3.2 三维地质建模

矿山边坡三维地质模型对于边坡安全管理工作有直观的辅助作用，也是其他矿山信息可视化的依托。通过三维模型，可以对矿山边坡形态及地质构造有一个直观的认识，分析滑坡灾害可能发生的区域、范围及规模，为边坡安全管理提供可视化环境；还可以在边坡三维地质模型上查询特定位置的地质勘查资料及岩土计算参数，为边坡加固设计及优化提供数据支持。在 ArcScene 中采用基于 TIN（不规则三角网）的面拉伸扩充的方法来构建边坡三维地层模型^[14]。

这种方法的主要思路是由地质剖面数据得到钻孔地层数据（含虚拟钻孔），然后对钻孔数据进行 Kriging 插值，得到地层厚度栅格，对地层厚度栅格进行适当地裁剪、计算与转换得到地层底面和顶面的 TIN 模型，拉伸地层顶底面就可以得到该地层的三维模型。某一地层的建模流程如图 3 所示。

将研究范围内钻孔揭露的每个地层都按上述流程建立起来，合并在一起即可得到矿山边坡的三维地层模型，可以借助 ArcScene 的 3D Intersection 工具对地层模型进行剖切分析，如图 4 所示。

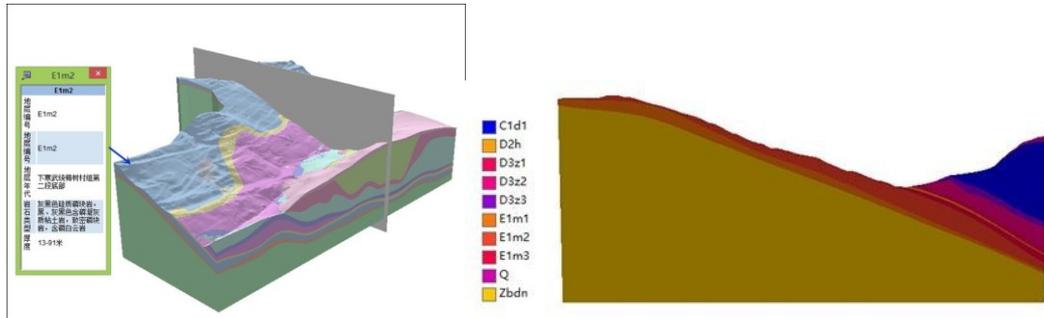


图 4 地层模型及剖切

Fig.4 Strata model and sectioning

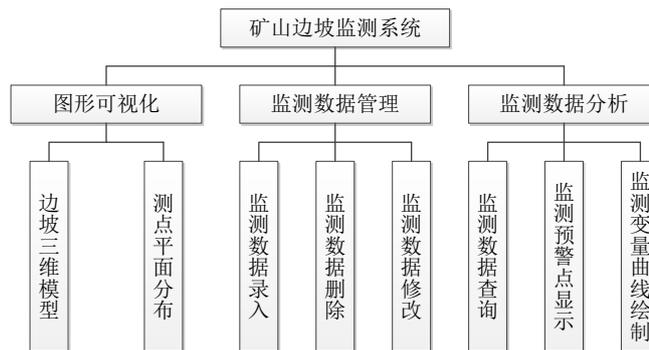


图 5 监测系统功能结构图

Fig.5 Function structure of monitoring system

3.3 专业应用开发

在集成管理边坡信息及三维可视化模型的基础上，进行专业应用开发，可以解决矿山边坡管理工作中面临的实际问题，充分发挥边坡数据的价值。GIS 常用开发模式主要有独立开发、单纯二次开发、集成二次开发三种^[15]。其中集成二次开发模式既可以充分利用 GIS 软件对空间数据的管理、分析功能，又可以利用可视化开发语言的高效、方便等编程优点，已成为 GIS 开发的主流方向。在开发实例方面，许冲、侯恩科^[8]等以 ArcGIS 为二次开发平台，建立了具有边坡数据管理、边坡稳定性评价、边坡三维地形建立与分析等功能的公路边坡稳定性评价系统。陶丽娜^[9]等针对山区高等级公路边坡稳定性评价和支护设计问题，在组件式 GIS 上进行了边坡支护方案优化设计系统（SSODS）的设计与开发。本文基于 ArcGIS Engine 组件与 C#.NET，开发了矿山边坡可视化监测系统，实现了测点信息可视化、监测数据管理、监测数据查询分析、预警点显示、监测变量曲线绘制等功能。系统功能结构及界面如图 5、图 6 所示。

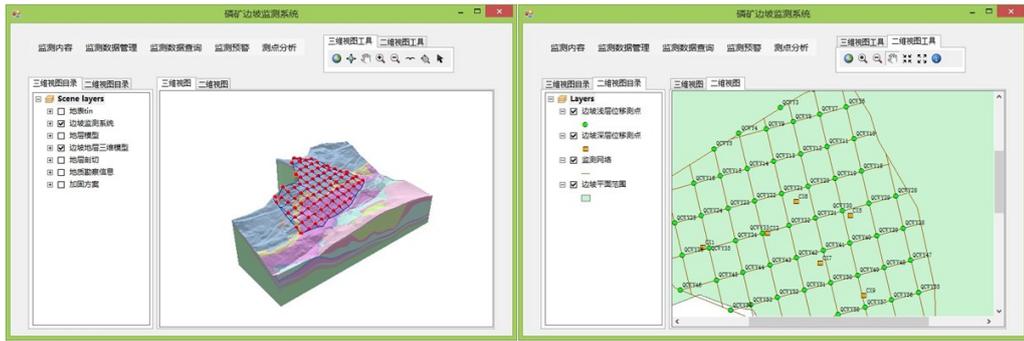


图 6 可视化监测系统界面

Fig.6 Interface of visualized monitoring system

4 结 语

基于 GIS 构建矿山边坡数字化安全管理系统, 将各种矿山信息整合在一起, 实现矿山信息的集成管理、可视化查询与分析, 并进行专业应用开发, 可以充分发挥矿山数据的价值, 为矿山边坡安全管理提供良好的可视化环境与决策支持, 对矿山边坡灾害防治具有重要的实用价值。

参考文献(References)

- [1]张永兴.边坡工程学[M]. 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2]戴福初, 李军. 地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 91-96.
- [3]赵晓东, 李利岗, 彭林军. GIS 和 GOCAD 支持下的矿山 3D 地质建模[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(2): 34-38.
- [4]艾建文, 吴立新, 殷作如, 等. 基于 WebMGIS 的矿山安全实时监测集成系统及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 41-44.
- [5]张慧君, 黄铭, 白崇宇, 等. 基于 Visual Studio 平台构建矿山边坡安全监测系统[J]. 工程与建设, 2013 (3): 293-296.
- [6]唐亦川, 许冲, 侯恩科, 等. 基于 GIS 的公路边坡稳定性评价系统[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 56-58.
- [7]谢谟文, 蔡美峰. 基于 GIS 边坡稳定三维极限平衡方法的开发及应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 117-122.
- [8]许冲, 侯恩科, 吴孝敏, 等. 基于 ArcGIS 的公路边坡稳定性评价系统设计与开发[J]. 微计算机应用, 2009, 30(10): 53-57.
- [9]陶丽娜, 唐胜传, 陈谦应. 基于组件式 GIS 技术的边坡支护方案优化设计系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2824-2829.
- [10]唐胜传, 陶丽娜, 陈谦应, 等. 基于 GIS 的公路边坡支护设计系统[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 258-262.
- [11]肖乐斌, 钟耳顺, 刘纪远, 等. GIS 概念数据模型的研究[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2001, 26(5): 387-392.
- [12]Zeiler M 著, 蔡勒, 晓祥, 等译. 为我们的世界建模: ESRI 地理数据库设计指南[M]. 人民邮电出版社, 2004.
- [13]吴静, 何必, 李海涛. ArcGIS 9.3 Desktop 地理信息系统应用教程[M]. 清华大学出版社, 2011.
- [14]张凯选, 武文波, 白云峰, 等. 基于 ArcGIS 的地质三维可视化[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(3): 345-347.
- [15]张丰, 杜震洪, 刘仁义编著. GIS 程序设计教程——基于 ArcGIS Engine 的 C#开发实例[M]. 浙江大学出版社, 2012.
- [16]王明华, 白云. 三维地质建模研究现状与发展趋势[J]. 土工基础, 2006, 20(4): 68-70.
- [17]李晓军, 朱合华, 解福奇. 地下工程的概念及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1975-1980.

基于 BIM 的预制装配式住宅虚拟施工模拟

徐可豪, 胡珉, 周丽

(上海大学 悉尼工商学院, 上海市嘉定区城中路 20 号, 201800, 18601794944 sysxkh@gmail.com)

摘要: 虚拟施工是对实际施工过程的虚拟再现。PC 建筑的施工过程极其复杂, 其施工流程对时间和空间都有严格要求, 为保障 PC 建筑各道施工工序的协调统一必须制定严密的施工方案。为此, 本文将虚拟施工技术应用于 PC 建筑的建造过程中, 通过建立 PC 建筑的 BIM 模型, 实现在虚拟环境下施工全过程模拟, 并在此基础上, 按照 PC 建筑的建设规范, 实现施工操作过程的精细化再现, 以达到对施工人员进行培训的目的, 从而提高施工效率, 保障施工过程的安全。

关键词: BIM, 预制装配式住宅, 虚拟施工, 3Dvia Studio

1 引言

经过多年的发展, 建筑信息化由最初的 CAD 等制图软件这样相对独立的单机工具, 经由信息平台, 如 HR 平台加上专业软件, 这样逐渐联网的发展, 终于来到了由 BIM 载体的信息化的整合和融合的物联网时代^[1]。而在虚拟施工方面, 从目前国内的研究现状看, 其科研和实践工作很少, 而且通常仅仅局限于仿真技术, 很少涉及虚拟现实技术及先进开发软件。相关工程实践尚不多, 主要是水利水电方面的施工仿真^[7]。实际研究案例有上海正大商业广场钢结构施工, 近期也有基于武汉国际博览会展馆项目的大型钢结构虚拟施工的研究^[8]。

虚拟仿真技术在建筑领域应用很广, 但大多都属于对建筑结构、场景、环境等的漫游, 在建筑施工领域的应用并不多见。本项目基于上海市大型保障性居住社区浦江镇鲁汇基地四期 A 块、五期经济适用房项目, 采用基于 BIM 的虚拟施工, 对预制装配式建筑的施工进行模拟, 并且通过 BIM 实现虚拟施工的全过程模拟与交互模拟。其中吊装外墙是 PC 建筑建筑流程的重要一环, 本文将以为例, 分别从虚拟场景建造、预制件吊装流程、施工人员的操作步骤及交互动作、施工安全提示模拟等角度进行介绍, 虚拟展示该施工流程的全过程。

2 相关技术

2.1 预制装配式建筑

预制装配式混凝土建筑 (Prefabricated Concrete Building, 简称 PC) 很大程度上改善了传统建筑所存在的问题。装配式住宅这一概念是于 1968 年由日本提出, 经历了多个发展阶段, 至今已有四十多年的历史^[5]。其主要理念是将住宅建筑划分成不同的构件, 利用预制混凝土技术, 将这些构件的生产制造在工厂内完成, 之后再运抵工程施工地点, 进行现场装配建造, 是一项突破性的节能型建筑施工方式。

这种结合先进技术的设施, 科学合理分配使用资源的生产模式, 在欧洲及其他发达国家深受追捧, 其预制构件的生产也达到了规模化、工业化的程度。在发达国家和地区, 装配式住宅的建筑方法已经占据了住宅施工的主导地位, 在日本和新加坡, 住宅建筑中预制构件所占的比例已经达到 85%, 在瑞典更是高达 95%^[6]

2.2 虚拟施工

现代的建筑施工过程是一项十分复杂的活动, 尤其是近些年来随着计算机应用技术的迅速发展, 促使各种异型曲面的建筑设计如同雨后春笋般涌现, 增加人们视觉美感的同时, 却给建筑项目施工方带来了挑战, 应用传统的建筑施工技术已经无法满足当代建筑的迫切需求。因此伴随着 VR 及计算机仿真等技术的推广应用, 在建筑业中提出了虚拟施工 (Virtual Construction, VC) 这一全新概念^[2]。

它采用虚拟现实和结构仿真等技术, 一般有图形工作站的支持, 在高性能图形工作站组中对施工项目中的人物、财产、物资、信息流动过程进行系统的仿真预见, 以发现施工中可能出现的问题, 以便在实际设计或施工进行之前就采取预防措施, 从而达到项目的可控性, 并降低成本、缩短工期、减少风

险,增强在施工过程中的决策、优化与控制能力^[3]。

虚拟施工技术是运用系统工程于施工的一种现代化施工管理方法,它包括信息采集、信息分析处理、信息反馈以及控制与决策(调整设计与施工方案及采取相应措施)^[4]。

3 虚拟施工的设计与实现

3.1 基本思想和流程

虚拟场景,也就是虚拟施工中的施工场景,由施工人员、施工构件和建筑物组成。场景中各种操作对象模型的建立是通过多种建模工具完成的,如施工人员模型的建立是通过3D MAX创建其基本骨骼并且加入施工动作的动画完成的;而包含具体数据信息的施工场地、PC建筑及具体构件的BIM模型是在CATIA软件中实现的。创建完成后的模型通过3Dvia Composer转换为3Dvia可读格式的文件后并导入虚拟交互平台,并在虚拟交互平台中建立模型间空间与位置的层级关系。这样就完成了虚拟场景的创建。虚拟施工中场景搭建的流程如图1所示。

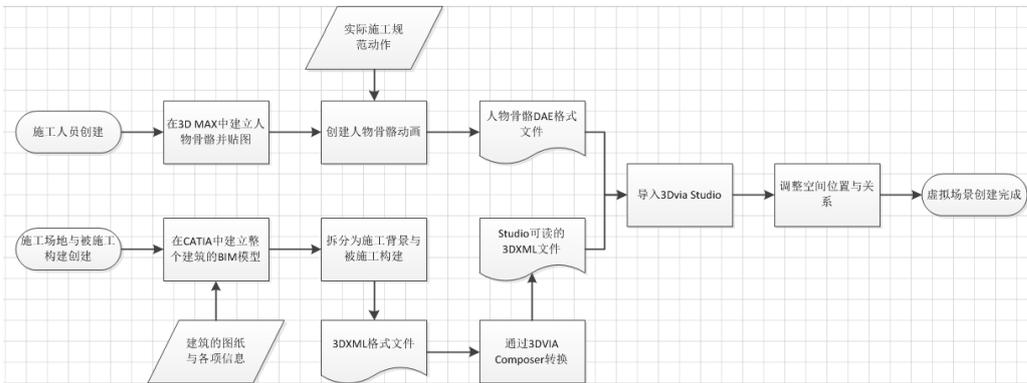


图 1 虚拟场景创建流程图

3.2 施工人员模型创建

施工人员模型主要由人物骨骼模型和人物骨骼动画组成,由于PC建筑的施工过程复杂,施工人员需要完成大量的动作,因此施工人员模型的创建采用3D MAX创建人物骨骼的同时附加动作动画已达到仿真施工操作的效果。

具体实现时,采用的人物骨骼是3DMAX中的成品骨骼,骨骼动画的实现可分为常见动作和自定义动作两类分别实施。常见动作,如例如站立、走路、跑步等动作,可以采用已经编辑好的bip骨骼动画,导入到人物骨骼后可以直接生成动画。如编辑自定义动作,则可以切换为自动关键点模式或者自己设置关键点。将时间指针拖到相应帧数上后,对骨骼关节进行编辑。

完成一套动作中的分布动作后,把所有的动作的bip导入后通过混合功能拖动时间序列和混合设置,最后完成一套动作的编辑。

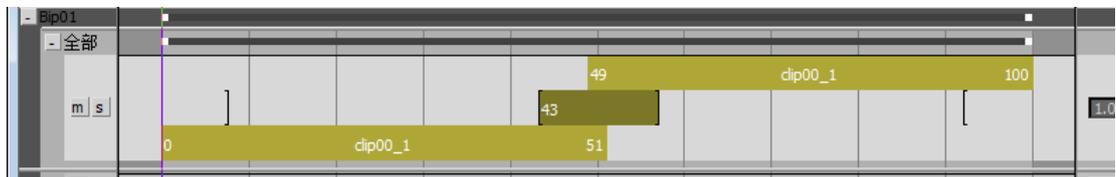


图 2 混合动作

3.3 建筑模型及构件模型的创建

施工场景模型包括为采用结合建筑参数数据方式建立的BIM模型。模型建立软件为CATIA,这种模型兼容性较好,在导入3Dvia后不仅树状结构保留、模型名保留而且在3Dvia中设置物理碰撞时比较容易。建好的BIM模型如图3所示。



图 3 BIM 模型

施工场景中，已装配好的建筑模型部分结构较为简单，可在 CATIA 中根据建筑的设计图纸通过拉伸、阵列和开洞等指令就可以完成模型的建立。而构件部分由于要展示装配操作细节，则需要更加精细的建模。如对构件中的一些辅助固定零件，在建模的时候也需要进行一些较为复杂的形状的建立。

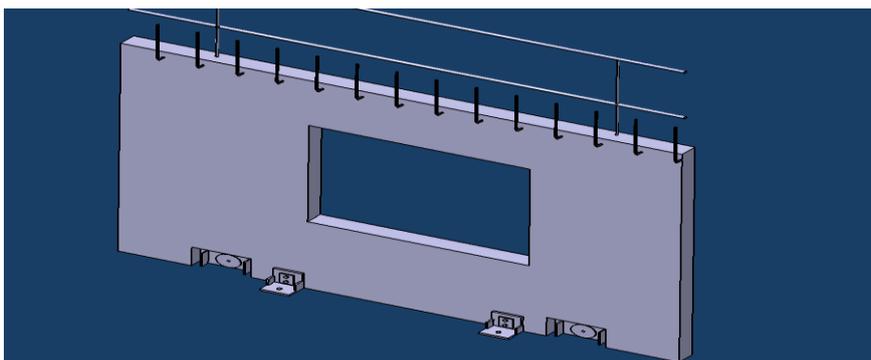


图 4 被施工构件

在 CATIA 中建立好模型后，以 3DXML 格式导出并将导出文件加载到 3Dvia 中进行后续的虚拟交互设计。

4 虚拟施工行为定义

4.1 基本思想

以往的虚拟施工大多都通过建筑的部分逐渐显示的方式来进行初级的施工模拟，而本项目的虚拟施工不仅加入了工人，而且完全的再现了施工的全过程，与真实施工基本一致。那么为了达到这个效果，这里在进行虚拟施工的时候就要能对人物进行操作，而物体要么能通过物理碰撞由人物带动、要么直接进行操作使其一起移动。由于采用了播放动画的方式使人物进行动作，在 3Dvia 中这样的人物移动并不会使得他的碰撞模型一起移动，所以这里只能采用操作物体一起移动的方式。对于物体和人物的操作，3Dvia 有大量封装好的的图形化模块（Building Block, BB）进行可视化编程，也可以通过直接建立 VSL 函数来创建自定义函数内容的 BB 用于编程。通过 BB 就可以完成虚拟施工行为的创建。

4.2 行为的创建

在创建的过程中，动作逻辑顺序、移动和显示消失等功能只需要单一或者程序自带的 BB 就可以简单实现，但有些比较复杂的模拟就需要一些技巧和组合，以下是几个比较重要的方法。

4.2.1 物体的定量旋转

在已有的 BB 中，有 Rotate 这一 BB 用于对模型进行旋转处理，但是此 BB 根据技术文档和实际操作显示它只有旋转的总角度，也就是说，使用这一 BB 只能使物体瞬间转动指定角度，无法达到平滑旋转的效果。而施工模拟需要的就是如同真实一般的效果。所以需要配合 Counter 这一 BB 来完成。Counter 有两进两出，上方是用于连接流程，下方用于连接需要循环的内容，BB 里的参数则是循环次数。通过循环小角度的旋转就可以达到平滑旋转的效果，速度也可以通过循环次数和旋转角度来控制。

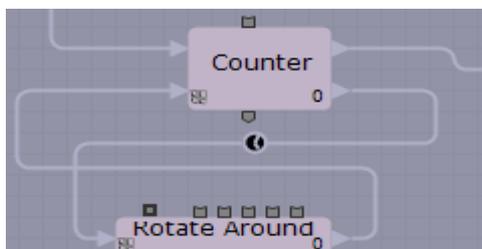


图 5 定量旋转

4.2.2 人物动画的播放

由于直接对人物骨骼模型进行操作过于复杂，如之前所述，此次实例采用了播放与人物骨骼模型相符的动画来达到模拟的目的。而想要进行动画的播放，可以通过编写一个比较简单的 VSL Function 来完成。先建立一个 vkSkeletonAnimationPtr，也就是骨骼动画的指针，再通过人物骨骼类下 FindAnimation 函数，通过名字来找到之前附带在骨骼中的动画，并付给之前建立的动画指针。最后通过人物骨骼类下的 EnqueueAnimation 来播放此动画。

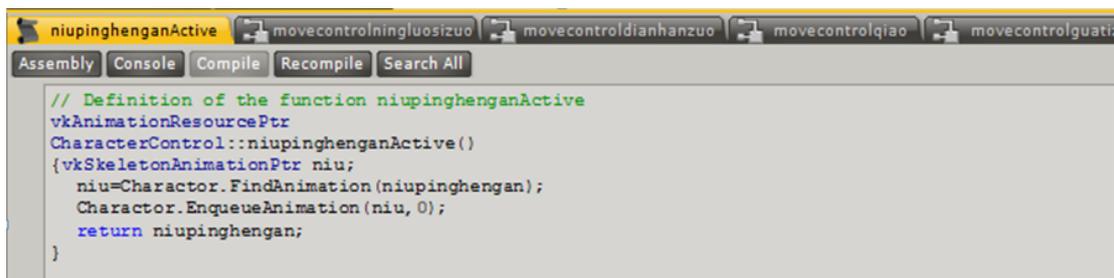


图 6 动画播放

4.3 行为的控制

在行为创建好以后，需要通过一些方法控制其开始与停止，这就需要通过键盘和一些逻辑判断来进行控制。

4.3.1 键盘信息的接收

虚拟施工的行为不仅是要进行动画的播放，更要通过用户操作的方式来达到如同真实施工一般的感觉，这就需要通过键盘接收信息来控制行为。

通过键盘操作虚拟施工过程需要通过 BB 来接收。由于施工过程是一个持续的过程，比较重要的是施工中某些动作持续的时间长短是否符合要求，所以在设计接收按键信息时候，采用了 Is Key Toggled 这个 BB。因为这个 BB 可以改变接收的事件的类型，也就是说可以一个接收键盘按下事件用于启动这个施工的流程，另一个接收键盘松开这个按键的事件用于停止这个施工流程。需要注意的是，这个 BB 相对于其他 BB 不同的是，由于其高度定制的原因，需要 vkIODeviceManager::Keyboard 作为一个接口接受键盘信息再传递给 BB。

确定了通过按键出发和停止行为并已将直接的时间作为判断动作是否正确的依据之后，就需要解决如何强制停止 BB 和如何判断时间的问题。

4.3.2 自带 BB 的强制停止与启动

骨骼动画的播放可以通过执行一个站立动画或者空的动画来达到停止的目的，但是对物体进行操作的 BB，例如处于 Counter 循环中的 Rotate 是无法停止的。为了解决这个问题，达到动作的开始和停止能够自如控制，需要将一串连续的动作整个打包放入一个新的 task 中，通过 StartTask 和 StopTask 操作整个 task 的开始与停止来达到操作里面所有的 BB 的目的，也就是说以 task 封装动作来达到自由开始和停止的目的。

这样封装的动作不仅能够满足强制停止的目的，还使得流程界面更加的简洁，对于以后的修改与再开发提供了很大的便利。

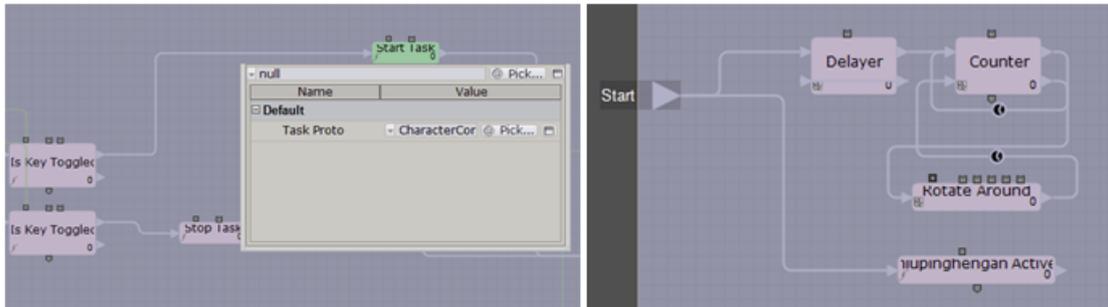


图 7 通过 task 封装 BB

4.3.3 时间判断

既然选定时间作为行为逻辑判断的标准，那么就需要通过应用相应的 BB 计算、接受并判断时间。

对于时间，3Dvia 自带的 BB 中有 Timer 可以用于接收计算并输出时间。Timer 左侧 Current 用于接受开始计时的流程，即在按键按下以后将流程连接至此来触发计时器计时。Timer 左侧的 Split 用于接收结束计时的流程，即在按键松开后将流程连接至此来停止计时器停止。下方的 ElapsedTime 用于输出计时结果。需要注意的是，在 Current 被输入消息后，Timer 会向后通过 Out 继续传输，而非等 Split 接收流程才继续向后进行，所以需要 Sequencer 对信息进行过滤，去除掉第一次的信息。

在输出计时结果以后，可以通过自定义的 BB 来处理结果。通过新建 VSL 函数，设定返回值为一个 Bool 值就可以得到右侧输出为两个的 BB，在设定接受数值用于设定标准判断的时间，就可以完成计时大于某值进行一种处理和小于某值进行另一种处理的数据逻辑处理。

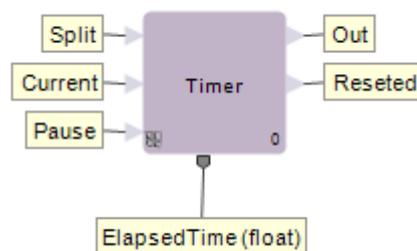


图 8 Timer

5 装配过程的实现

5.1 基本思想和流程

整个吊装外墙的过程可以拆分成掉外墙、固定外墙、连接固定杆、调整角度、下方固定、拆吊钩这么几个连续的动作。而这些动作有可以由人物骨骼动作、物体模型的旋转和位移、逻辑判断这些操作来完成。所以本质上来说，整个虚拟施工的实现，就是由 BB 来接受键盘操作用于判断动作时机，通过自定义的 VSL Function 来激发骨骼动作，通过 Counter 和 Rotate 等 BB 来旋转位移物体模型、通过键盘按键来判断是否停止动作并结合实际施工要求判断是否正确完成动作来进行逻辑判断以及下一步的运行。将这些 BB 进行正确流程的连接并将各项参数调到符合实际就完成了吊装外墙这一施工过程的模拟了。



图 9 装配过程流程

5.2 用户交互

吊装外墙的动作是按照一定的顺序进行的，如果不能按照顺序进行，那么不仅无法做出动作而且会弹出文字信息用于提示错误所在。而当动作时间不足的时候，不仅之前动作产生的变化会还原而且会弹出文字提示时间未达到标准时间。

6 结论与展望

本项目最终突破了现有的虚拟施工的局限，实现了施工过程的完全还原模拟，并且加入了施工人员。而且在此基础上实现了虚拟施工过程与用户交互，不再是以动画的形式表现过程，而是能根据操作不同，做出不同的反应，就如同真实施工一般。

不过由于工作量的原因，本项目只对吊装外墙进行了虚拟施工的模拟，在未来，希望能够对整个预制装配式建筑的施工过程进行模拟，并且不再借助人物骨骼动画进行模拟，而是直接操作骨骼进行施工模拟。

参考文献(References)

- [1] 金睿. 施工阶段 BIM 价值实践. 第三届工程建设计算机应用创新论坛, 2011.11 上海
- [2] 张利, 石毅, 张希黔. 虚拟施工技术应用实践和研究开发展望[J]. 工业建筑, 2003(33):49-51.
- [3] 张青国. TBM 虚拟施工系统开发与关键技术研究[D]. 东北大学, 2011
- [4] 石毅. 虚拟仿真技术在建筑施工中的应用与研究[D]. 重庆建筑大学, 2001
- [5] Eastman, C.M. "Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction". Boca Raton. FL: CRC Press. 1999.
- [6] Timo Hartmann, Martin Fischer. "Applications of BIM and Hurdles for Widespread Adoption of BIM". AISC-ACCL eConstruction Roundtable Event Report. CIFE Working Paper. 2007.
- [7] 侯筱婷, 李昌华, 来炳恒. 虚拟施工关键技术研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30 (7)
- [8] 刘松. 大型钢结构虚拟吊装施工建模仿真研究与应用[D]. 华中科技大学 2012

国内外城市公共交通运营管理模式对比分析

何莎

(北京交通大学, 交通运输学院, 北京市海淀区上园村 3 号 15652965309 12120866@bjtu.edu.cn 100044)

摘要: 本文通过对国内外城市公共交通运营管理模式比较研究, 系统地总结了国内外典型城市在公共交通运营模式、票价与补贴机制、运营管理信息化三个方面的特点, 并借鉴国外典型城市在公共交通运营管理方面的实践经验就发展中国城市公共交通提出具体设想和政策建议。

关键词: 城市公共交通; 运营管理; 对比分析; 建议

Comparative Analysis of Urban Public Transportation Operation Management Mode

He sha

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the comparative analysis of urban public transportation operation management mode on domestic and overseas, this paper systematically summarizes the characteristics of the public transportation operation mode, the ticket price and compensation mechanism, and the operation management informationization in typical cities at home and abroad, then put forward specific ideas and policy suggestions in terms of the development of urban public transportation in China by using practical experience of public transportation operation management on domestic and overseas for reference.

Key word: Urban Public Transportation; Operation Management; Comparative analysis; Suggestion

1 引言

自 20 世纪开始, 世界经济迅猛发展, 加速了中国城镇化和机动化进程。据统计, 到 2020 年中国城镇化水平将达 56%-58%^[1], 而在 2002-2011 年这 10 年间, 中国机动车保有量快速增长, 由 969 万辆增长到 7326 万辆 (见图 1)。在城镇化和机动化的双重压力下, 国内越来越多的城市出现交通供需不平衡、交通拥挤、道路事故频发等一系列问题, 对人们的基本出行和生活环境造成了极大影响。

这一切深刻的表明要刻不容缓的大力发展低碳、高效、大容量的城市公共交通系统, 提倡绿色出行^[2]。从图 2 中可以看出, 中国城市公共交通运输能力稳步提升, 公共交通的客运总量和车辆装备数正逐步增长^[3]。然而目前面临的问题是城市交通设施与城市交通需求严重失衡, 公交企业普遍亏损, 交通运营管理手段落后, 所以需要借助政府的力量对公共交通的发展模式进行宏观调控。然而, 单纯地依靠政府力量很难保持公共交通的可持续发展, 因此, 本文从世界范围出发, 通过对比分析国内外城市公共交通运营管理模式, 为探索一条适合我国发展的城市公共交通发展道路提供实质性的建议与启示。

作者简介: 何莎 (1990—), 女, 湖南长沙人, 在读研究生; 研究方向: 交通运输规划与管理;
Email: 12120866@bjtu.edu.cn Tel: 15652965309

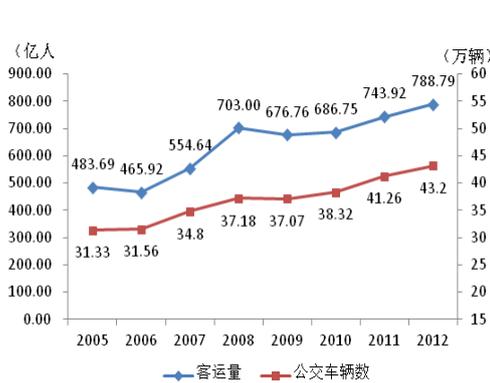


图1 2002-2011年全国私人汽车发展情况

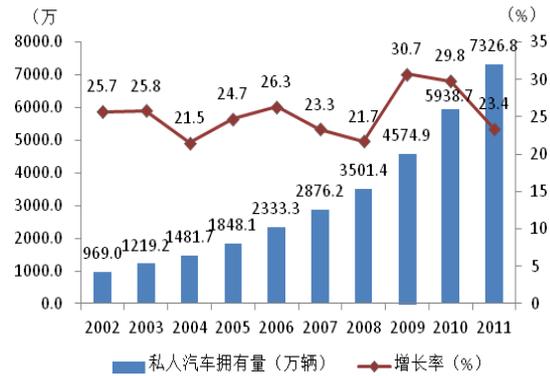


图2 2005-2012年城市公共交通发展情况

况

2 国内外公共交通运营管理模式分析

2.1 公共交通运营模式对比研究

城市公共交通的规划设计、基础设施的投资建设均由政府负责，而具体的运营一般由企业负责组织实施。

大巴黎地区是整个巴黎国际都市圈的核心，由巴黎市、上塞纳省等在内的八个省组成。大巴黎地区公共交通经营模式采取所有权和经营权分开的模式，所有权归交通管理委员会管理，经营权由运营企业负责，交通管理委员会通过签署合同对运营企业进行监督和补贴。大巴黎地区有非常庞大的公共交通网络，其建设、运营和维护依靠各级政府和各个企事业单位的财政支持。巴黎市区有轨电车 T3 线的建设资金分别由国家、大巴黎地区、巴黎市政府和巴黎独立运输公司分别出资，共计 2.15 亿欧元。

芬兰的赫尔辛基地区^[4]的公交运营模式从 1986 年的运营商争取特许经营权到 1996 年完成了地区内所有公交服务的招投标，其在公交运营模式方面的转变有效地促进了各运营商之间的适度竞争，保护了运营商在获得线路经营权后在一定的区域或线路上获取相对垄断，同时政府又通过服务合同迫使运营商改善服务管理，使得当地公共交通服务满意度得到了极大提升，公交运营成本和票价显著下降，公交服务的覆盖面更广泛，同时保障了员工自身利益。

伦敦公共交通的经营模式主要采取 PPP(Public Private Partnership)模式，即所有权的多元化和经营运作的市场化。政府为了保障公共服务质量，通过竞争性招标、签订合同来引进诚信可靠的私人企业。伦敦的轨道交通私有化改革参照公交运营模式，实行招标投标制度，其具体经营模式如图 3 所示。

中国公交运营模式主要采取政府经营和补贴的方式，近年来各个城市尝试着不同程度的改革，如市场化经营与政府补贴、监督相结合，或进行竞争性招标等。北京常规公交的运营主体是北京公交集团，但其在 1999 年到 2006 年间曾尝试过市场化改革，并在出现公交公益性与市场化矛盾的时候敢于重新回归中国公交传统运营模式。这种由一家国有企业为主体的运营模式有利于公交资源运用效率最大化，但缺乏有效的市场竞争促进服务的改善。

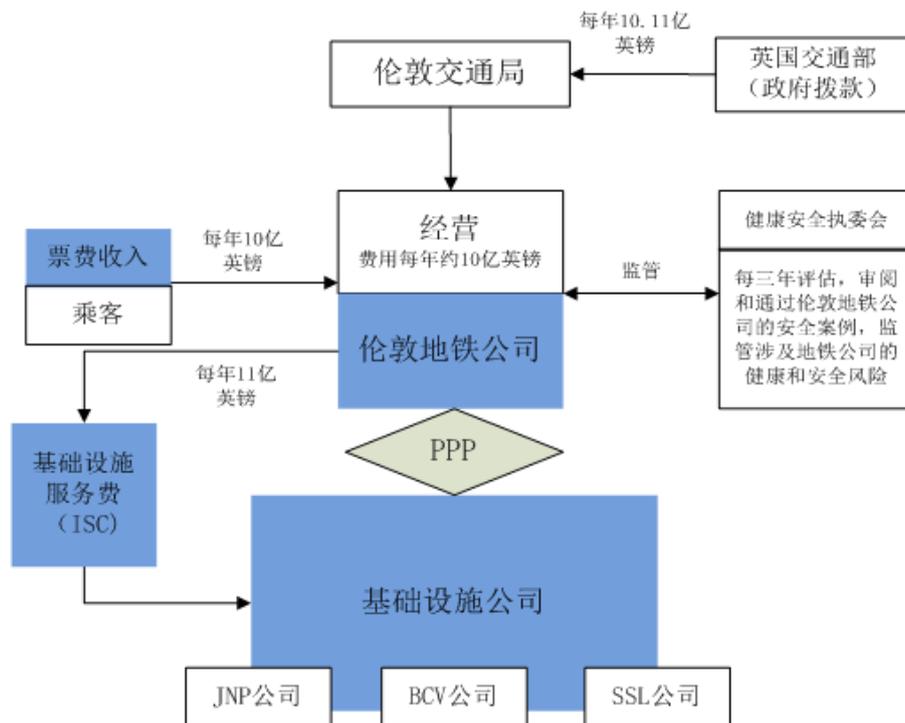


图3 伦敦地铁经营模式

2.2 公共交通票价与补贴机制对比研究

国外发达城市有着成熟的票价定价模式，公交票价总体水平较低，其补贴政策也比较完善。

德国汉堡公共交通网络包括3条地铁、6条城市铁道线、209条公共汽车线路和7条轮渡线^[5]。整个汉堡地区实行统一票价体系。汉堡票务方式种类繁多，包括职业卡、学生卡、即时票等经济实惠的车票，可适应市民的不同需求。在财政补贴方面主要实行减免税收政策，同时提高小汽车停车费和汽油税，增加自驾成本。

韩国首尔票价机制采取公交统费制，按照出行距离进行收费^[6]。首尔政府在公交系统方面给予大量补贴，使得公交票价低廉，约占普通韩国人收入的0.05%。

英国运输部的投资资金主要用于现代公交、有轨电车、轻轨系统和自行车道的建设，同时扩大贫困地区公共交通补贴，对老年人和残疾人实行半价制度。

法国政府的财政补贴主要用于公共交通基础设施的建设，其中有轨电车资助比例达35%，补贴资金达1500万法郎/公里，地铁方面的资助比例达20%，补贴资金达3500万法郎/公里^[7]。

国内公共交通票价与补贴政策总在不断发展。深圳票价包括单一票价和里程票价，从价格方面来看，深圳公交平均票价占居民收入比例偏高，并且特区外的大巴价格比特区内高23%，而特区外居民收入远低于特区内居民平均收入。故此票价制定存在不合理性。深圳政府对城市内的特区大巴、城镇大巴等车辆均有不同的补贴政策，主要体现在税收减免、专项资助^[8]。

2.3 公共交通运营管理信息化对比研究

公共交通信息化是将现代通信、电子、计算机等高科技集成应用于城市公共管理。

意大利拥有自动化的巴士汽车站管理系统，该系统可以合理安排车辆的维护与检查，通过系统发出的准确指令有效率的移动车辆，避免汽车因等待造成的时间浪费；意大利的自动车辆监测系统收集车辆位置与状态信息，为司机与乘客提供公交车辆信息，提高了公交车的服务质量与运行效率；固定线路上的公交车即时服务通过终端通知乘客相关班车时间表以及下个班次的到站时

间或延误时间；而可变线路上的公交车即时预约服务是将各个乘客不同目的地信息和转向点指示收集起来进行线路合理安排，从而可确定乘客数量和空余的位置数目。

德国科隆市^[9]为了改善城市中心区域在交通高峰期停车位紧张的局面，于 1986 年引入停车引导系统，结果寻找停车位的车辆减少了 30%；PASSO 交通信息服务系统通过定制化方式向司机提供周边交通信息，其信息包括基本信息和特别信息两种，便于司机选择合理路线出行；Verkehr & Service Online 是基于 Internet 交通信息系统，主要为自驾者或选择公共交通工具的出行者提供高效的出行计划服务；除此之外，静态路线引导系统（TravelPilot）能帮助司机迅速运动到目的地。

在国内，智能公共交通系统在北京市、上海市、杭州市、青岛市等多个城市中均有了广泛应用。在公交智能调度系统方面，北京于 1999 年投入运行装有先进车载卫星定位系统和无线通信装置的车辆达 300 多辆，实现了车辆的实时跟踪、信息发布、车辆智能化调度等；近年来中国致力于发展通用化的公交 IC 卡系统，促进居民采用公交出行；公交信息服务系统随互联网的发展而快速蔓延，以北京、杭州为代表的大中型城市基本都建立了公交服务网站，提供完善的公交信息服务查询；另外，电子站牌能提供动态公交信息，其应用规模正逐步扩大；国内各城市的车载信息系统也已经进入实用化应用阶段。

3 国内外公共交通运营管理特点比较分析

国外在城市公共交通方面的发展较早，相比我国而言，其运营管理方面的经验也非常丰富。现将我国与国外发达城市的公共交通运营管理模式的特点总结如下：

表 1 国内外公共交通运营管理特点对比分析

	国外	国内
运营模式	引入竞争性招标的市场管理模式，各线路之间既有竞争又有合作，建立了完善的公交运营体制	未能真正形成市场机制，主要采取政府经营和补贴，最大化公交资源利用率，但在改善服务方面缺乏竞争性
票价与补贴机制	低票价政策，对运营差额和基础设施建设进行财政补贴，票制种类繁多	低票价政策，但公交票价占居民收入偏高，财政补贴较大，票制单一
运营管理信息化	公共交通系统信息化程度高，信息技术覆盖面广	起步晚，发展迅速，在智能公共系统方面有待改进和全面推广

总体来说，我国城市公共交通虽然起步晚，但目前正处于快速发展阶段，与国外相比，我国在公共交通运营管理模式方面仍存在许多需要改进和学习的地方。

4 建议与启示

4.1 建立完善的市场经营机制

从国外发达国家的城市公共交通运营模式的成效来看，我国目前应该建立适合我国国情发展需要的公共交通运营模式，实行管运分离的公共交通经营制度，统一协调公交企业进入公交运营市场，合理分配政府与企业职能，企业负责公交资源的整合利用与营运，政府主要规划公交线网和进行财政补贴，实现多方参与、规模经营、竞争有序的运营格局。

4.2 完善票制结构和补贴机制

参考国外票价票制的成熟经验，公共交通票价制定的原则是将公众福利放在首位，因为公益

性是城市公共交通的特点以及与其他交通方式的根本区别所在,所以公交企业在兼顾企业最大利益时要坚守公共交通公益性的固有地位。我国应借鉴国外发达城市实行的周卡、月卡甚至季卡等优惠票制,根据乘客的出行需求不同,设置不同种类的车票,改善目前国内票务种类单一的问题。另外,在公共交通运营管理中,政府应制定完善的补贴制度,促进人们选择公共交通方式出行,保证公共交通的可持续发展。

4.3 全面建设公共交通运营管理信息化系统

信息化系统能有效提高公共交通运营管理的效率,借鉴国外智能交通系统的应用与发展,全面推广与建设城市公共交通综合信息平台,实现城市公共交通安全应急保障、城市公共交通综合智能调度、公共交通运营车辆监控、公交 IC 卡收费结算、乘客出行信息服务等多项功能,不断优化公共交通系统运营管理。

参考文献(References)

- [1] 中国城市科学研究会. 中国城市规划行业发展报告 2007-2008[M]. 中国建筑工业出版社, 2008
- [2] 《国务院关于城市优先发展公共交通的指导意见》(国发[2012]64号). 中国政府网, 2013
- [3] 《中华人民共和国年鉴 2005》. 中华人民共和国年鉴社, 2005
- [4] 吴晓枫. 广州公交运营模式优化探讨[D]. 西南交通大学, 2009
- [5] 张凌翔. 汉堡公共交通票价体系[J]. 城市公用事业, 2002, 16(1): 11-13
- [6] 李林波, 陈川, 施澄. 国内外城市公共交通发展之比较研究[J]. 上海工程技术大学学报, 2006, 20(3): 260-264
- [7] 张光远. 国外支持公共交通优先发展的政策评价[J]. 价格理论与实践, 2006(8): 14-16
- [8] 关蕾. 城市公交票价定价模式研究[D]. 重庆市: 西南交通大学, 2007
- [9] 倪秉书. 欧洲智能交通系统成功案例(四)——德国[J]. 中国交通信息产业, 2004(9): 123-126

自然团粒土喷植技术于崩塌地生态复育 稳坡成效与机理探讨

张达德¹, 聂豫珍², 王正皓³

(1. 中原大學土木工程學系, 台灣; 2. 豫欣工程有限公司, 台灣; 3. 中原大學土木工程學系, 台灣)

摘要: 此团粒技术经过近十年来的发展, 已有相当不错得成果展现。团粒土喷植施工技术是以培育方式、制造成人工再表土基材, 再经由机械化施工方式将人工自然表土喷覆至植生处。藉由木本植物种子经过萌芽、生根、成株、林化四阶段, 克服目前尚无有效地解决之崩塌地之复育方法(木本植物种植生法), 取代了仍以喷植草绿化植生治标方式治理。故本技术可有效率防止坍方继续扩大, 并可快速成长保护土壤流失, 又可量化坡面处理方法, 是以较柔顺方式设计处理已破坏之大地, 亦可称之为柔性土木工程。并让植物群于森林化阶段中能够开始承担涵养大地及调节水土保持之本能, 将可以迅速地恢复已被破坏区域内自然生态系秩序。

关键词: 崩塌地、植生工法、泥炭土、保水剂、团粒剂、木本植物

1 引言

近年来环境保护意识抬头, 水土保持工作成为因应时代进步的趋势。此外, 于不同环境类型、崩塌规模、恶地地形或强风影响严重的区域, 需依当地环境特性选取适宜植生工法、工程构造物与植物种, 配合适宜基础工程、山腹工及植生导入作业, 将人工再生表土基材混合草木本种子喷覆至植生处, 进行崩塌地复育, 达先期稳定、后期加劲之效果。以此藉由人为导入植生覆盖于裸露坡面, 以减少降雨或风蚀所造成之表土冲蚀作用, 并藉由植物根系的锚碇与土壤补强的效益达到坡面稳定, 最终形成森林化之植物演替。

2 复育案例成效介绍

近十年来本技术于崩塌地成效良好, 不论是在裸露地、公路边坡、岩盘绿化甚至是水库集水区坍方植生, 皆能够使贫瘠地、开挖地、裸露地短时间内让土壤结构呈现稳定状态, 本技术能提供良好成长环境, 让植物群大规模进行大自然地表修复、绿化, 继而形成动植物的生态链, 让已被破坏地表能尽速回复原状, 适用范围如表 1。复育案例如下所述。

表 1 自然团粒土喷植适用范围

适用范围	
山坡地开挖中工地	岩盘绿化植生
裸露地植生	自由式格梁与格梁框内植生
公路路肩(上下边坡稳定植生)	人工整坡坡面稳定及绿化植生
河岸高水位坡堤保护	水库集水区坍方植生

2.1 台湾曾文溪水库复育案例(泥岩地区)^[1]

水库集水区内发生的山崩现象, 往往会影响水库本身的寿命, 而曾文水库又因受地形、地质、土壤、气候、人文与土地利用等因素影响, 极易发生崩塌。图 1(b)为喷植后复育 2 年半的情形, 且与图 1(c)集水区外围比较, 已与周遭环境融合、稳定, 将图 1(a)原有的崩坍状况完全改善。

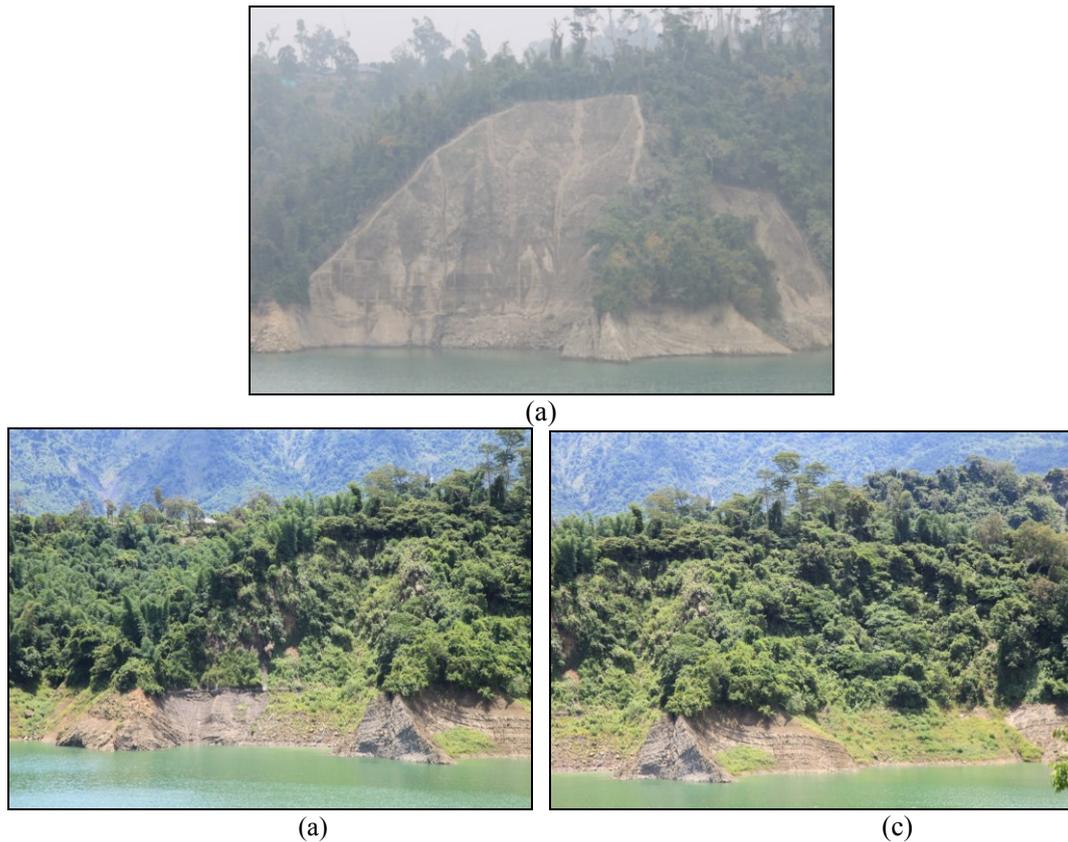


图1 集水区崩坍复育

2.2 台湾公路边坡于台风过后修复工程^[2]

使用喷植技术绿化、稳定坡面且有效的排除地表径流，使原有崩塌地与周边环境结合。图2(a)、(b)为客土施作前后状况，客土施作完成后使植生种子于坡面附着，前期藉由草本的迅速生长减少雨水对于坡面的冲刷；后期经由木本种子的生长，其根系对于土层具有锚碇作用，将其客土层与崩坍面结合，图3是经过1-2年的抚育使植生坡面恢复林态进而稳定坡面。



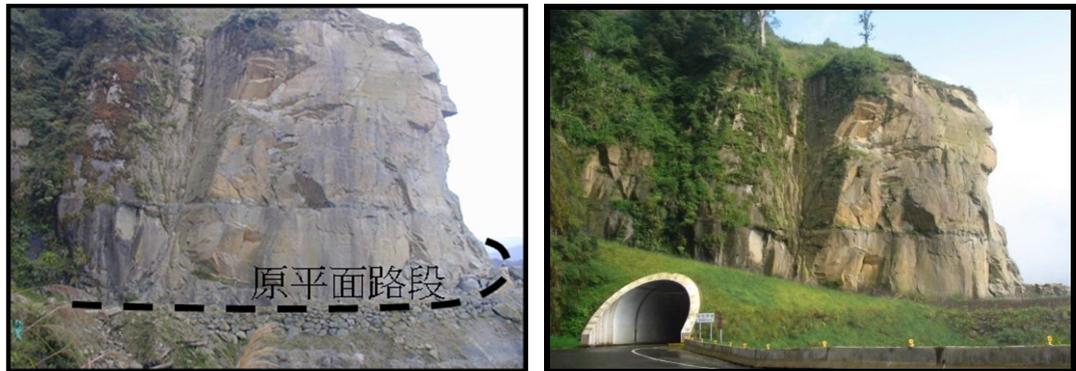
图2 施作客土植生前后比较



(a) (b)
图3 喷植抚育6个月与2年半生长情形

2.3 台湾安定隧道口上植生绿化^[3]

隧道开挖后的植生绿化更为重要，于岩盘峭壁上做植生，使隧道口上的坡面稳定不易产生落石或坡面崩塌状况的发生。图4(a)虚线部分原为平面路段，因桃芝风灾后造成路面损毁，之后的重建以隧道方式避开崩坍区，并于隧道口上进行植生工程如图4(b)，防止雨水冲刷。



(a) (b)
图4 隧道口上植生绿化工程

2.4 台湾滨海公路边坡植生^[4]

施工喷植工程时需作好基础工(图5(a))使有效排除径流水，图5(b)为喷植客土层后的面貌。因此工程施工于滨海公路旁，因而海上的盐分会经由风力带到坡面，盐分是影响植生好坏的最大因素，直升期间的植生管理经由施加植物性荷尔蒙、补植木本植物于坡趾，经过6个月(图6(a))、一年半(图6(b))、两年半(图6(c))的抚育期使恢复林态稳定坡面。



(a) (b)
图5 挂网喷植施作

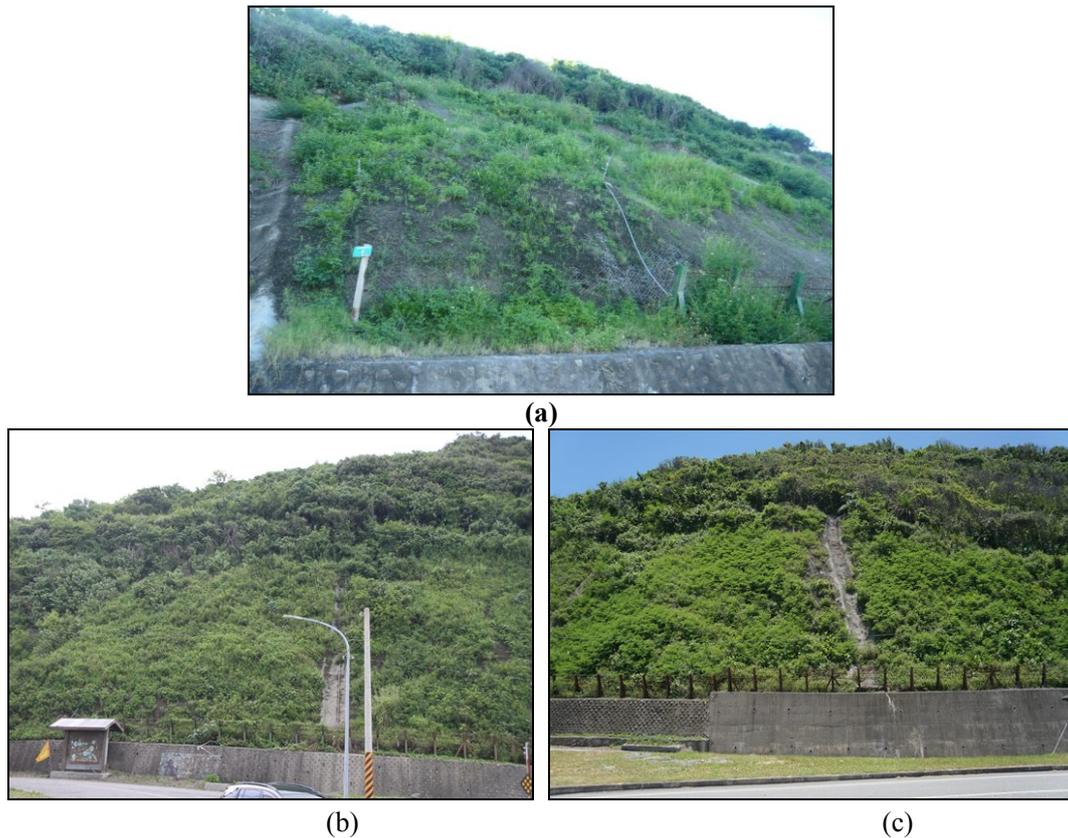


图 6 抚育成效

3 施工技术与管理^[5]

自然团粒土喷植技术是使用高压水力式喷植机施作于坡角 75 度以下之崩塌地或裸露地，喷覆 3~15cm 表土覆盖植生处(图 7)。由于机具设备效能加强使本施工方法之工作距离已扩大至垂直高度约 80m 水平距离约 200m 施工范围内(表 2)，已远超过目前水力式喷植机只能施作平面、缓坡的薄层植草喷植，也逐渐取代目前仍然在使用中的气压式喷凝土机大量使用黏着剂及轻质木屑施作 5cm 厚层喷植植草绿化治标方法。于喷管中能以液体状态输送(流度试验)，至喷头与团粒液(坍度试验)及纤维线混合，下述两试验更可测出生育基盘的安定性及耐久性，直接影响植物的生长及基盘稳固。

(1) 流度试验：将客土材、肥料、养生材、安定剂及水依规定比率在拌合槽内拌合调合成泥状，在未混合团粒剂前，把泥状基材充填于锥形筒内（锥形圆筒的上直径为 10cm、下直径为 20cm、高 30cm），充填至满筒为止，其后将锥形筒向上拉起，以测其流动值，其值必须在 100 ± 10 cm 以，材料质量方为合格。

(2) 坍度试验：从拌合槽内取出泥状基材 10 公升，放入搅拌容器内。从团粒剂浸泡槽内取出稀释成 0.2% 之团粒剂水溶液 1 公升，加入搅拌容器内泥状基材中。让泥状基材中水份经团粒化作用后将多余的水份于规定时间内脱水排出。将静置后的基材装填入锥形筒内后，将筒顶刮平，再静置五分钟后将试验筒向上提起，并测试坍塌值。设定之坍塌值在二公分以下，材料质量方为合格。

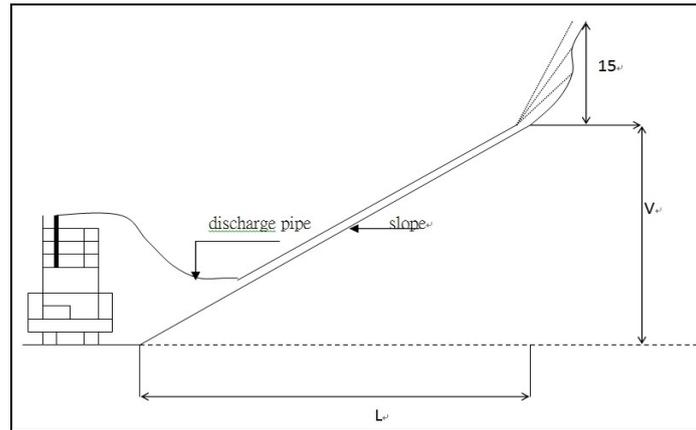


图 7 喷植范围示意图

表 2 喷植距离

项目	Level (L)	Vertical (V)	Max 喷头后工作距离
1	0	100	直接重最低点喷头喷出
2	30	80	从延长输送管喷头喷出 15
3	70	40	从延长输送管喷头喷出 15
4	100	0	0

3.1 基材供料系统

细筛选培养客土、纸浆纤维、肥料、泥炭土、土壤安定剂、保水剂、设计种子及清水，经拌合后形成泥状基材。

(1) 客土材料为细筛选土壤，土壤内须含有机物质及与大自然肥沃地表土近似的土壤，主成份为天然的木质有机堆肥、粗砂、细砂及黏土混合培养而成的培养客土。

(2) 纸浆纤维具吸水性、膨胀性与土壤拌合成泥状基材经团粒化后可瞬间与土壤粒子结合聚集成土壤大小团粒，其为团粒喷植主体结构材料之一，主成份为植物性纸浆纤维(吸水率 10 倍)。

(3) 泥炭土于劣质土壤中具有改良作用，泥炭中腐植酸会产生微气体与客土结合后将慢慢形成许多微通道于土壤中，可提供生育基盘输送氧气、水分及养分的流通渠道，将能使植物于萌芽初期健康的成长。

(4) 保水剂改善土壤结构，保水剂施入土壤中，随着吸水膨胀和失水收缩的规律性变化，可使周围土壤由紧实变为疏松，孔隙增大，从而在一定程度上改善土壤的通透状况能缓慢释出储存水分及养分让成长中的根系得到充分滋润。

3.2 团粒剂供给系统

以高分子团粒剂依设计配比用量与清水置于拌合机槽内，轻度拌合而形成黏稠状溶液。

(1) 属线状有机质高分子，能促进植生基材之团粒化作用，与低浓度泥状之绿化基材混合在喷涂时瞬间团粒化，经团粒作用后，使泥状基材之土壤瞬间产生活化作用后，形成最理想的植生表土。喷植于陡峭的坡面上的护盖植生基盘结构体于大雨时亦具备防止径流形成前之瞬间排水功能，不易受径流冲蚀作用之影响而造成喷植覆盖基盘流失丧失植生功能。

3.3 补强材料供给系统

连续纤维线于施工时，依设计数量(4~12 线)加于喷枪头同一时间喷出。让基材覆盖物能完整藉由大量连续纤维线捆绑作用形成一个结构完整覆盖体(再生表土)，如图 2。

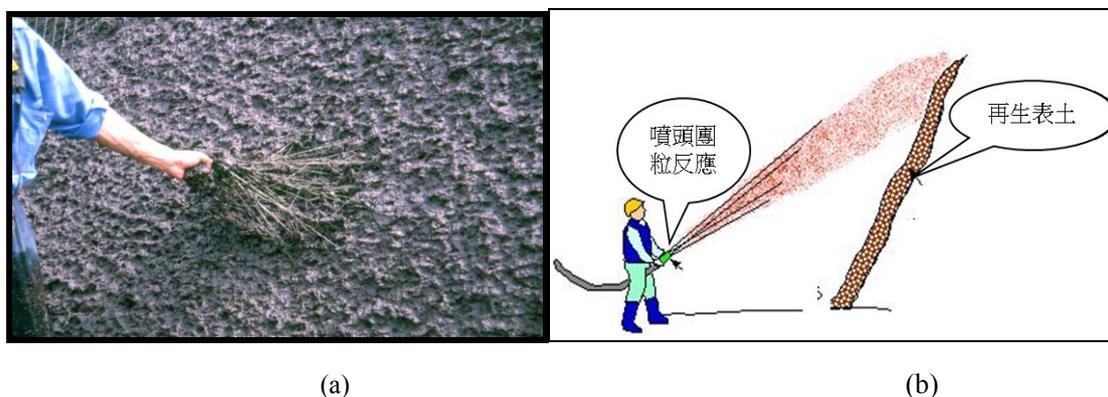


图 2 连续纤维线捆绑作用

4 团粒土喷植技术特性

本技术崩塌地处理，以自然生态理念为设计主轴依原地形起伏，设置导水沟槽并扩展自植生区外设置截水沟槽，以便截取崩塌区外径流及漫流水。将瞬间形成大量降雨水安全地导入沟槽内排放至安全区域或道路排水系统。设计木本种子植生快速复育崩塌面，使用本技术的水力式喷植机将泥状基材与灌、乔木树种子均匀拌合完成后，以水力高压机及连接输送管将泥状基材输入喷头后与团粒剂、连续纤维线利用高速的冲击三者瞬间拌合后产生团粒反应土壤喷射至预定植生处(裸露面)。表 3 为传统干式水力喷植机与本工法所使用的高压水力式喷植机差异性。

4.1 天然表土相似性—培养团粒结构再生表土

依大自然经年累月长时间堆积而形成之自然优质的团粒结构表土(具有细黏土颗粒、生物排泄物之微量养分、植物落叶之多量腐化纤维及表土结构体大小孔隙亦是植物界自然演替中种子萌芽时所需要之团粒结构表土)，在透过人工方式培养再生表土(亦称覆盖体)后使用机械动能将其喷覆至预定植生处。团粒土喷植施工的再生表土，保水特性将为初期萌芽时提供完整的萌芽成长条件。

4.2 覆盖结构体之强化性—连续纤维线

由于大量混入连续纤维线将使整体结构更加牢固，连续纤维线将会因喷射出时冲击力量，大量的混入凹凸不平地表孔隙或裂缝，形成附着力紧抓地表于覆盖结构体中交错缠绕基材成一体。再配合区域性截水处理设计，覆盖结构体因雨水冲刷而产生滑动、植生区块被冲蚀及流失的可能性几乎为零。

4.3 再生表土之耐久性—具透水性、保水性、涵养性

由于设计种子萌芽期及喷植时间季节不同，因工程施工中较无法掌握，故再生表土覆盖结构体之耐久性(基本上覆盖结构体可达保持一年以上之稳定要求)亦为植生工程中设计考虑时相当重要之因素之一。

表 3 传统喷植草与自然团粒土喷植技术的比较

项目	传统喷植草	自然团粒土喷植
使用机具	干式喷浆机	高压水力式喷植机

使用设备	发电机、铲装机及空压机等及供水车等，较为复杂。	吊卡车、喷植机及供水车等，较为简单。
主要基材	木质纤维(或废弃型菇肥)	培养客土与纸浆纤维
附着方式	主要为粘着剂与木质纤维之结合。	为培养客土与纸浆纤维混合团粒剂形成团粒土附着。
植生方式	草本植物	草木本植物皆可
施工方式	需操作人员靠近于喷植处喷植。	操作人员仅需于作业范围内喷植即可，无须靠近喷植处。有效覆盖范围度高，陡坡均适用
短期效益	短期绿化效果佳	1. 短期绿化相差不大。 2. 生根加筋固坡效果显著需一年以上。
长期效益	1. 因大量使用草本种子，草本植物生长快速，以致周遭原生植物不易生长，复育效果不佳。 2. 仅具防冲刷功能无根系加筋固坡功能。 崩坍地与土石堆积裸露区，效果低。	1. 因再生表土附着，营造良好之植物生长环境，使原生植物容易生长，长期与原生态结构融合，林化效果较佳。 2. 根系加筋固坡效果显著。

5 植生稳坡效益

在坡面上，草本植物与木本植物根系型态有显著的不同。草本植物根系因不具木质化穿透土层能力，根系以重力方向或在地表面松软土层上生长为主，对于防止降雨所造成的侵蚀可提供密集的地表覆盖，因此较木本植物更具效果。植物在边坡稳定所扮演的角色，Greenway (1987)^[6]曾提出植物的流体力学对土体稳定度可能产生有利或不利的影(图 3)。

5.1 植物对于边坡土体稳定度的影响

- (1) 树叶截流降雨，造成吸收与蒸发损失，以致降低入渗→有利
- (2) 根与茎增加地表糙度及土壤入渗率，导致入渗量增加→不利
- (3) 根吸收土壤湿度并藉由发散将水散入大气，而降低孔隙水压→有利
- (4) 土壤水份的降低可明显增加土壤龟裂，而增加入渗量→不利
- (5) 根系可加劲土壤以增加其抗剪强度→有利

(6) 树根可固定土层，并可藉由土拱作用提供上坡土壤覆盖→有利

(7) 树增加边坡负重，增加正向与下坡向之分力→不利/有利

(8) 风可藉由植物将力传至边坡→不利

(9) 根系可束缚表面土壤颗粒并增加表面粗糙，而降低易侵蚀性→有利

5.2 植生覆盖度

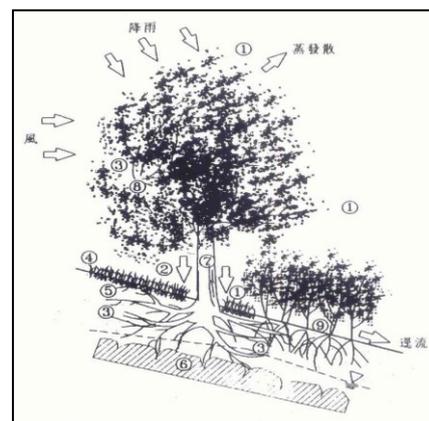


图 3 植生稳定示意图

根据 Coppin and Richard^[7]在 1990 年提出植物体的冠层覆盖率与土壤表面冲蚀的关系(图 4)可得知覆盖率愈趋近百分百时, 其冲蚀率会随着覆盖率的增加而减少, 则植生另一项重要指标即为植物覆盖土表速度。

本技术经由室内试验, 使用与现地相同的基材配比, 得知在四个月左右即可达到覆盖率 95%, 可迅速提供防护表土冲刷, 且藉由基材与种子量配比的不同使植生速度、效果有所差异。相思树木种生长较为缓慢, 但为台湾最常见物种, 相思树的根系非常发达, 又能抗风、抗旱、适应贫瘠地, 是绿化荒山、保护水土的良好树种, 且具深根, 适于酸性土壤生长。由室内试验得知约四个月内木本植株高度可达 5 公分、根系生长深度可达 15 公分左右。

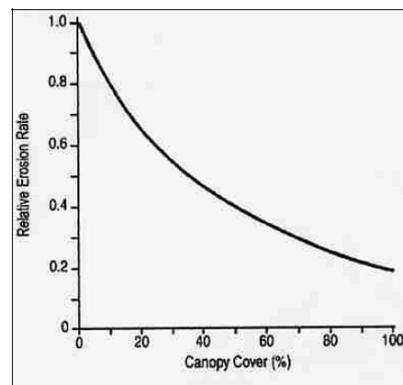


图 4 覆盖率与土壤冲蚀率间的关系

另外于现地施作的木本植生状况, 如小松荻 7 个月生长(高度约为 60-70 公分)、山盐青 6 个月生长(高度约为 150 公分)、羊蹄甲 12 个月生长(高度约为 150 公分)、相思树 10 个月生长(高度约为 30 公分)... 等, 如图 5。



(a) 小松荻

(b) 羊蹄甲

(c) 山盐青

(d) 相思树

图五 木本植物于现地植生状况

6 沙尘暴贫瘠土的复育治理构想

藉由本技术以木本种子为主、草本植物为辅, 于贫瘠地复育, 利用木本植物建立防风林减低风速及安定飞砂为有效的方法, 因防风林之应用植物常具有特殊之根系型, 始能适应砂地与强风的环境, 植物根系固结与加劲作用, 除可增加土壤凝聚力及摩擦力, 亦可消耗土中水分、降低间隙水压。而耕地防风为避免与主作物竞争水分与养分, 且根系深长而横向扩展狭长者理想的根系型。

施作喷植时, 草、木种应为分别喷植, 草、木本采每间隔喷植草种、每间隔喷植木种、形成交叉喷植使用为有效防护表层强化、更具固土防冲刷的功能。

7 结语

(1) 为确保表层客土能有效达成水土保持之功能、设计之截水(流)沟横(纵)向排水均需配合原有坡面水流路径施工, 施作之尺寸需依照现场地形之变化。考虑崩塌坡面实际凹凸不平,

喷植生基材及喷草种客土以平钩达设计厚度即可，不需全部盖满菱形网。

(2)覆盖率为判断植生好坏的一项指标，亦有保护边坡的功效。可知径流大小主要受植生覆盖状况影响，植生覆盖率高、产生径流率低；相对的植株覆盖率高，其根系发展较快、蒸散少、土壤通气较为良好，抑制返盐，利于种子萌发和根系吸收。

(3)植株高度为植生长状况指标，植株高度反映着土质状况，在植生初期生长高度与覆盖率绝对是影响地表冲刷的关键指标，植株高度代表着大气与土壤间缓冲界面厚度，使雨水冲刷不会直接对表土造成冲击。

(4)草木种混播的主要目的在于，草本植物根系的抗拔强度较木本植物弱，若只单纯喷植草种其属须根系、根系深度甚浅，根系较不易深入底层且盘结力量差，土壤含水量过高时易引起浅层崩塌。而木本根系，在土中水分呈饱和状态下仍有相当高的抗拔力，此与根系的刚性、粗大、深根的特性有关。

(5)未来对于沙尘暴地区使用本研究植生技术，混入先驱木本植物(如相思树)可有效固结风沙，不再以单一草种植生，利用木本植物固结与加劲作用使更为有效复育环境、恢复林态。

参考文献(References)

- [1] “曾文水库环湖道路上边坡植生及修护工程”，经济部水利署南区水资源局。
- [2] “台9线 428k+750~+897 间 100 年 2 月 25 日豪雨灾害边坡整治工程”，公路总局第三区养护工程处台东工务段。
- [3] “安定弯隧道工程”，台湾世曦工程顾问股份有限公司。
- [4] “南回公路-100 年度省道预约经常性灾害抢修工程”，公路总局第三区养护工程处台东工务段。
- [5] 聂豫珍，“自然团粒土喷植工法施工与简介”，豫欣工程。
- [6] Greenway, D. R. “Vegetation and slope stability, In: Slope stability”, edited by M. F. Auderson and K. S. Richards. New York Wiley, 1987.
- [7] Coppin, N.J. and I.G. Richards (Edi). “Use of Vegetation in Civil Engineering. London, Boston, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington”, 1990.

山岭隧道限量排放设计标准

陈树汪

(云南省交通规划设计研究院, 昆明, 650011)

摘要: 隧道涌水量主要取决于地下水位、岩体与衬砌的透水性。本文根据理论计算和工程技术实践水平, 对深埋山岭隧道的限量排放设计标准进行了分析, 并提出确定软岩区隧道和硬岩区隧道限量排放设计标准的方法。分析认为: 1) 软岩隧道的限量排放可以采用建议的纯理论模型确定其标准。对于硬岩区隧道, 由于其渗透性通常各向异性明显, 应采用 Heuer 经验系数修正法对理论模型进行修正后来确定其限量排放的标准; 2) 通常情况下, 软岩区限量排放的标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $2\sim 4\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$; 硬岩区限量排放的标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $0.4\sim 0.6\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。

关键词: 限量排放, 山岭隧道, 设计标准, 软岩, 硬岩

Design Criterion of the allowable Discharge for mountain Tunnels

Chen Shuwang

(Broadvision Engineering Consultants, Kunming, 650011, China)

Abstract: Water inflow into a tunnel is mainly determined by water level, rock mass and lining permeability. In the paper, the design criteria of the allowable discharge for deep mountain tunnels are analyzed in terms of the theoretical model and current engineering practice level. Then, a method for determining design criteria of the allowable discharge into tunnels of soft rock-mass zones and hard rock-mass zones is proposed. It is concluded in this paper: 1) it is reasonable to determine the allowable discharge into a soft rock tunnel in terms of the proposed theoretical model. For a hard rock tunnel, to take into account the irregular and anisotropic permeability, the Heuer's empirical factor should be used to modify the theoretical model. 2) Generally speaking, the allowable discharge into a soft rock tunnel should be not more than $2\sim 4\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ after consolidation grouting and should be not more than $0.4\sim 0.6\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ for a hard rock tunnel.

Key words: allowable discharge; mountain tunnel; design criterion; soft rock; hard rock

1. 引言

长而深的山岭隧道设置于地下水位以下时, 出于环境保护或地下水资源保护的需要, 通常需要采取“以堵为主, 限量排放”的防排水设计原则^[1]。但是, 对于如何确定限量排放的设计标准, 公路、铁路设计规范中均没有明确, 目前工程界仍没有统一的理论分析依据或可靠的实践经验。

隧道涌水量主要受地下水位、岩体渗透性以及衬砌渗透性影响。受注浆技术限制, 目前还不能做到对围岩的完全堵水, 总是还有渗漏水^[2]。本文将首先介绍深埋隧道涌水量的理论计算模型。然后, 根据已有的工程实践经验, 通过算例分别讨论软岩区隧道和硬岩区隧道的限量排放设计标准。

陈树汪, 1978年生, 男, 广西宾阳县人, 主要从事隧道及地下工程设计与研究工作, 分别于2003年、2009年在重庆交通学院及瑞士洛桑联邦理工大学获工学硕士学位、工程硕士学位。

电话: 0871-63148075; 通讯地址: 云南省昆明市拓东路石家巷9号

E-mail: chenshuwang@126.com

2 隧道涌水量计算模型

2.1 模型假定

假定围岩为各向同性均匀连续介质，考虑圆形隧道的轴对称问题。如图2.1所示，模型中将隧道分为以下三个不同渗流区域^[3]：

- 混凝土衬砌；
- 由于开挖（如爆破）扰动形成的松动岩体区或经注浆改善的固结岩体区；
- 渗流远场区。

图中， H 为隧道中心至地下水位的深度， r_i 为衬砌内径， r_g 为注浆岩体区或岩体松动区外径， R 为受渗流影响的岩体区外径； p_a 为作用在混凝土衬砌外侧的水压力， p_g 为作用在注浆岩体区或岩体松动区外侧的水压力。

混凝土衬砌的渗透性受无裂缝的混凝土的渗透性控制，如果有裂缝的话，则主要于裂缝的渗透性。无裂缝的混凝土的渗透系数通常小于 10^{-8}m/s 。混凝土衬砌的裂缝主要可分为：由于收缩和施工缝形成的环向裂缝；由于外部压力产生的纵向裂缝。

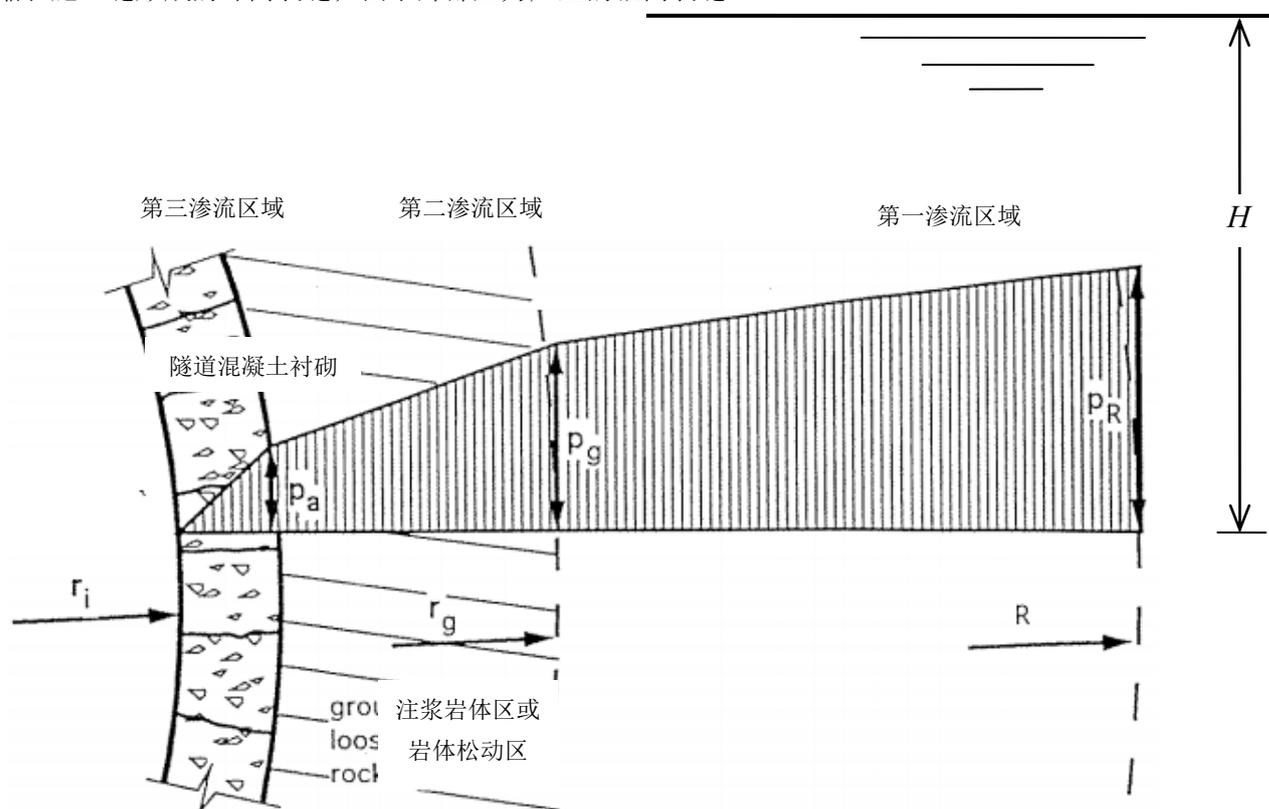


图 2.1 隧道涌水量计算区域划分^[3]

Figure 2.1 Zones for the calculation seepage inflow into the tunnel (modified after Schleiss)

采用固结注浆可以有效地降低隧道周边围岩的渗透性。但是，就目前的工程技术水平而言，采用普通水泥注浆技术加固后岩体的渗透系数不会低于 10^{-7}m/s （约1吕容），采用特种水泥（如超细水泥）注浆技术加固后岩体的渗透系数不会低于 $(2-5) \times 10^{-8} \text{m/s}$ 。隧道开挖期间，由于爆破和塑性变形，将会在隧道周边形成一个松动区。与未扰动的岩体相比，该区内岩体的渗透系数会有相当程度的增加。

2.2 不同区域渗流量计算

根据通过每个区域的渗流量必须相等的连续条件，可以求得隧道的排放量。下面，将介绍以上不同区域中渗流量的计算。

假定隧道轴线平行与地下水表面，则隧道第一区域的单位长度渗流量可由下式计算^{[4][5]}：

$$q_r = \frac{2\pi \cdot k_r \cdot (H - p_g) / (\rho_w \cdot g)}{\ln\left[\frac{H}{r_g} \cdot (1 + \sqrt{1 - r_g^2 / H^2})\right]} = C_1 (H - p_g) / (\rho_w \cdot g) \quad (2-1)$$

式中： k_r 为岩体（未扰动/加固）渗透系数； ρ_w 为水密度； g 为重力加速度。

同样，假定混凝土衬砌隧道的外围为轴对称的注浆区或松动岩体区，则隧道第二区域的单位长度渗流量可由下式计算：

$$q_g = \frac{2\pi \cdot k_g \cdot (p_g - p_a) / (\rho_w \cdot g)}{\ln[r_g / r_a]} = C_3 (p_g - p_a) / (\rho_w \cdot g) \quad (2-2)$$

式中： k_g 为注浆岩体区或岩体松动区渗透系数； r_a 为衬砌外径。

如前所述，通过混凝土衬砌的渗流量可以分为两部分计算：即通过混凝土本身的渗流量和通过裂缝（环向裂缝与纵向裂缝）的渗流量。

同理，通过混凝土（未开裂）本身的渗流量由下式计算：

$$q_{c1} = \frac{2\pi \cdot k_c \cdot p_a / (\rho_w \cdot g)}{\ln[r_a / r_i]} = C_{41} \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (2-3)$$

式中： k_c 为未开裂混凝土的渗透系数。

通过衬砌环向裂缝和纵向裂缝的渗流量则可分别由以下两个公式计算^[3]：

$$\text{环向裂缝渗流量 } q_{c2} = \frac{2\pi \cdot r_i \cdot (2a_1)^3 \cdot g \cdot p_a / (\rho_w \cdot g)}{12\nu_w \cdot (r_a - r_i) \cdot d} = C_{42} \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (2-4)$$

$$\text{纵向裂缝渗流量 } q_{c3} = \frac{n \cdot (2a_2)^3 \cdot g \cdot p_a / (\rho_w \cdot g)}{12\nu_w \cdot (r_a - r_i)} = C_{43} \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (2-5)$$

式中： $(2a_1)$ 为环向裂缝平均宽度； $(2a_2)$ 为纵向裂缝平均宽度； ν_w 水的运动粘度； d 环向裂缝平均间距； n 纵向裂缝数量。

3.1 算例

以下算例中，将对一位于地下水位以下的两车道公路隧道（如图 3.2）进行分析，水深未知，结合地形条件，预测水深约 100-200m，相关几何、物理参数如下。

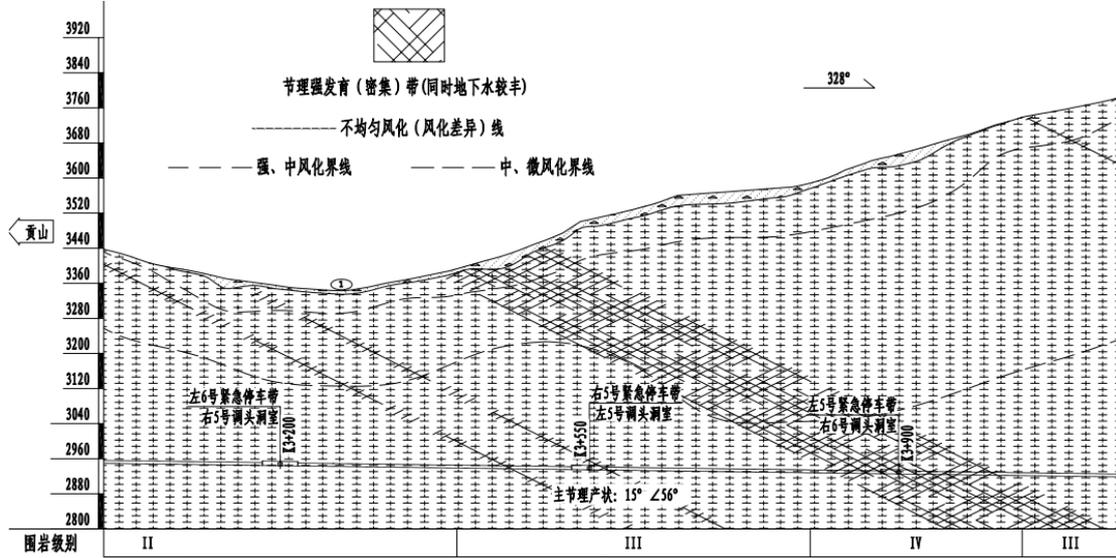


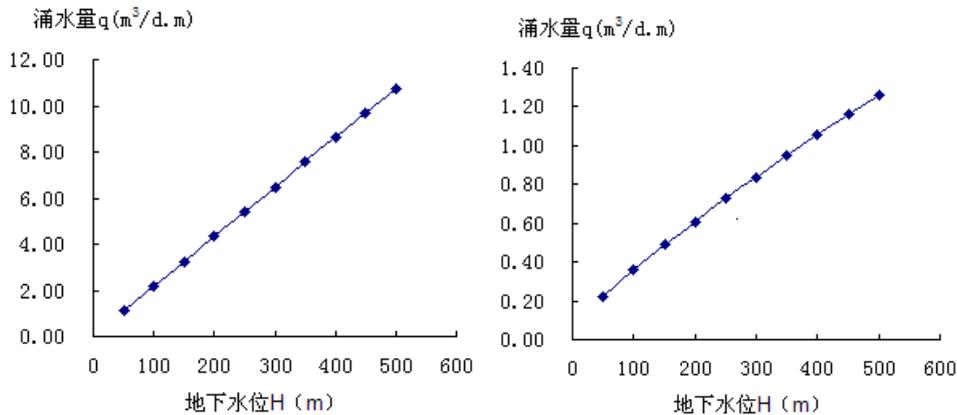
图 3.2 某公路隧道局部纵断面

Figure 3.2 The partial longitudinal profile in a highway tunnel

几何参数: $r_i = 4.5m$; $r_a = 4.7m$; $r_g = 6.2m$ (软岩松动区), $r_g = 5.5m$ (软岩松动区); $r_g = 9.7m$ (软岩固结注浆区), $r_g = 7.7m$ (硬岩固结注浆区)。

岩体参数: 节理发育带 (IV 级围岩) $k_r = 5 \times 10^{-6} m/s$, 一般硬岩段 (II、III 级围岩) $k_r = 10^{-7} m/s$; 岩体松动区 $k_g = 10k_r$, 但最小值取 $k_g = 10^{-5} m/s$; 注浆岩体区 $k_g = 10^{-7} m/s$ (良好的水泥注浆), 注浆岩体区 $k_g = 3 \times 10^{-8} m/s$ (良好的特种水泥注浆); Heuer 经验系数 $\beta_h = 1/4$ (硬岩)。

混凝土衬砌参数: 按有裂缝的钢筋 (钢纤维) 喷射混凝土考虑, $k_c = 10^{-8} m/s$ (裂缝间未开裂的混凝土); $2a_1 = 0.1mm$ (收缩引起的环向裂缝), $d = 3.0m$; $2a_2 = 0mm$, $n = 0$ (无纵向裂缝)。



a) 软岩区隧道

b) 硬岩区隧道

图 3.3 隧道涌水量与地下水位

Figure 3.3 water inflow into the tunnel and underground water level
a) the soft rock-mass zone tunnel b) the hard rock-mass zone tunnel

3.3 排放标准确定

根据以上参数进行计算分析,可知隧道涌水量随地下水位线性变化,如图 3.3 所示。就该隧道而言,对应水深 $H = 100 \sim 200\text{m}$,软岩区隧道涌水量 $q = 2 \sim 4\text{m}^3 / (d \cdot \text{m})$,硬岩区隧道涌水量 $q = 0.4 \sim 0.6\text{m}^3 / (d \cdot \text{m})$ 。因此,隧道的限量排放标准可按以上涌水量预测结果确定,即软岩区限量排放的标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $2 \sim 4\text{m}^3 / (d \cdot \text{m})$;硬岩区限量排放的标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $0.4 \sim 0.6\text{m}^3 / (d \cdot \text{m})$ 。设计中,考虑该隧道大部分为硬岩隧道,且水深大多在 200m 以下,取限量排放标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $3\text{m}^3 / \text{d} \cdot \text{m}$ 。

4 结束语

本文根据隧道涌水量的计算模型,根据目前的工程技术和工程经验,提出了确定限量排放标准的方法和流程。根据文中计算模型和算例分析表明:

- 隧道涌水量随地下水位线性变化,即地下水位是限量排放标准的最关键因素之一。
- 软岩隧道的限量排放可以采用纯理论计算结果确定其标准。对于硬岩区隧道,由于其渗透性通常各向异性明显,根据工程实践和现场实验,应采用经验系数修正法对理论模型进行修正后来确定其限量排放的标准。
- 通常情况下,软岩区限量排放的标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $2 \sim 4\text{m}^3 / (d \cdot \text{m})$;硬岩区限量排放的标准为注浆后每延米洞壁渗流量不大于 $0.4 \sim 0.6\text{m}^3 / (d \cdot \text{m})$ 。
- 本为隧道工程规划设计人员进行隧道限量排放标准分析及评估提供了一种简便而实用的计算方法。但是,应该注意到计算模型是在“岩体-衬砌”轴对称、流量连续以及岩体渗透系数为各向同性的假定条件下建立的。因此,模型仅限用于本文讨论的各种适用条件。需要注意的是,岩体基础参数的准确性对合理确定隧道限量排放标准有重要影响。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国交通部,公路隧道设计规范(JTG D70—2004)。人民交通出版社,2004年10月
- [2] 关宝树,隧道工程设计要点集,人民交通出版社,2003年12月
- [3] Schleiss A., Design of concrete linings of pressure tunnels and shafts for external water pressure, Tunneling Asia'97,20-24 January 1997, New Delhi, India
- [4] Schleiss A.: Design of previous pressure tunnels. Water Power & Dam Construction, May 1986
- [5] Schleiss A.: Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels. Proc. of the Int. Congress on "Tunnels and Water", Madrid, June 1988
- [6] J.H. Raymer, Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: Estimating the high-end of the permeability distribution. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, Society for mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2001
- [7] Dimitrios Kolymbas, Tunnelling and tunnel mechanics—a rational approach to tunnelling, Springer Berlin Heidelberg, 2005

基于模糊综合评判的隧道施工环境质量评价

孟景辉, 邱成虎, 陈寿根, 赵玉报

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要: 随着我国隧道建设数量的增多和规模的扩大, 隧道施工中的环境质量问题的日益明显。本文结合在建隧道工程的施工, 深入调查和分析隧道施工环境的影响因素, 在此基础上建立了隧道施工环境质量评价指标体系, 采用层次分析法确定了各级影响因素的权重, 分析影响隧道施工环境质量的主要因素和次要因素, 并运用模糊数学的方法, 建立模糊评判模型, 对隧道施工环境质量评价指标体系中的单因素和整体进行评价, 最终根据评语集合采用加权平均的方法确定了隧道施工环境质量的综合得分。实践证明, 该方法具有一定的理论意义和实用价值, 为改善隧道施工环境质量提供了科学的依据。

关键词: 隧道施工; 环境质量; 指标体系; 模糊综合评判

中图分类号: U455, X822 文献标识码: A 文章编号:

Environment Quality Assessment of Construction for Tunnel Based on the Fuzzy Comprehensive Assessment

MENG Jinghui, QIU Chenghu, CHEN Shougen, ZHAO Yubao

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the growing number and increasing scale of tunnel construction in our country, the environmental quality problems in the tunnel construction has become increasingly apparent. In this paper, an assessment index system of tunnel construction environmental quality is established by combining with the tunnel engineering in construction and investigating and analysis the influence factors of the tunnel construction environment in depth. The Analytic Hierarchy Process are applied to determine the weights of each stage factors, at the same time, the major factors and secondary factors which affect the tunnel construction environmental quality is acquired by analyzing the weights. Then the fuzzy mathematics method is adopted to establish the fuzzy judgment model to evaluate single factor and overall factors in the assessment index system of tunnel construction environmental quality. Finally the weighted average method is used to determine the comprehensive score of the tunnel construction environmental quality according to the evaluation set. Practice has proved that this method has certain theoretical significance and practical value, which provides scientific basis for improving the quality of the tunnel construction environment.

Key words: Tunnel construction; Environmental quality; Index system; Fuzzy comprehensive assessment

1 引言

随着我国国民经济的飞速发展、社会的不断进步, 交通建设事业的发展也蒸蒸日上, 考虑到高程、线形、车辆行驶速度和耗费燃料、自然环境保护等问题, 隧道的修建不仅愈建愈多, 而且愈修愈长, 隧道工程已成为交通建设的重要组成部分。在山岭隧道的施工中, 新奥法作为主要的施工理念, 不断深入人心, 工法日趋成熟。但与此同时也带来了一系列施工环境质量的问题, 如: 隧道噪声、隧道粉尘、隧道内的有害气体、隧道内的温湿度和光照度、隧道文明施工等, 这些问题直接影响到现场管理和施工人员的生理健康和心理健康^{[1]-[4]}, 关系到隧道施工人员的工作效率, 因此, 隧道施工环境质量评价成为亟需解决的问题, 隧道施工环境质量的改善也刻不容缓。

作者简介: 孟景辉 (1989-), 男, 四川巴中人, 西南交通大学硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程领域的科研工作,
E-mail: 1325119104@qq.com, 联系电话: 13056460692。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (SWJTU11ZT33); 教育部创新团队发展计划资助 (IRT0955)

目前,国内外有关隧道施工环境质量评价的文献鲜少,国内学者对其中的部分问题做了研究,肖上平等调查并评价了已建隧道的环境噪声^[5],谭信荣等测试了长大隧道施工的空气质量^[6],崔晗晶等探讨了隧道照明工程质量评价指标^[7],杨蓉等人通过对大气成分和微气候的分析,对地下工程内的环境质量进行整体评价^[8],李永生等人研究了隧道施工环境舒适性^[9],沈振武研究了山区长大隧道工程对周边环境的影响^[10],李启彬指出了公路隧道环境影响评价中存在的问题,并提出了对策^[11]。

隧道施工环境质量评价作为一个多层次、多指标的复杂问题,主要常用方法有:故障树法^[12]、影响图法^[13]、专家调查法^[14]、主观评价法^[15]、主成分分析法^[16]等定性与半定量的评价方法。这些方法通过一定模式使评价过程规范化,然而对评价指标的量化和评价指标权重分配在很大程度上存在人为主观性、片面性和误差性。为减少主观随意性、思维不定性以及认识模糊性,本文结合鹧鸪山隧道施工的实际,建立隧道施工环境质量评价体系,拟采用层次分析法来确定各个评价指标的权重,运用模糊综合评判的方法评价隧道施工环境质量,将不精确的表达进行数字化处理,以更好的避免主观因素对权重值的影响,使评价结果适用和可靠。

2 工程概况

汶川至马尔康高速公路是四川省高速公路网规划的 16 条成都引入线中“成都~德格~西藏”线和“成都~阿坝~青海”线的重要路段,是四川内地通往西藏、青海等地区的重要交通大动脉。汶马高速起点顺接在建的都江堰至汶川高速公路,止于四川省阿坝藏族、羌族自治州州府马尔康。

鹧鸪山隧道段项目为全线控制性工程,为先期开工段落。项目路线起于理县山脚坝,沿来苏河上行,穿鹧鸪山隧道进入王家寨,路线长约 11.5km,隧道净宽 10.25m,净高 5.0m。

鹧鸪山隧址区地处川西高原东北部的邛崃山脉北端。属高山、高原过渡的侵蚀深切高山峡谷地貌。隧址区地面标高 3050m~4623.8m,全区地势陡峻,群山巍峨。据钻探揭露及地面调查,隧址区分布的地层有:隧址区出露的地层主要为第四系全新统(Q₄),第四系上更新统冰水堆积层(Q_{3^{gl}}),三叠系上统新都桥组(T_{3x})、三叠系上统侏倭组(T_{3zh})及三叠系中统杂谷脑组(T_{2z})。隧址区地下水类型主要有第四系松散层孔隙水、基岩孔隙裂隙水二类。

隧道采用新奥法的施工理念,以钻爆法为主要的开挖方法,采用无轨运输的出渣方式,左线采用湿喷技术喷射初期支护混凝土,右线采用干喷技术喷射初期支护混凝土。

3 评价指标体系的构建

针对鹧鸪山隧道施工的实际情况,根据全面性、科学性、合理性和可操作性等原则,从隧道的施工环境角度出发,分析隧道施工环境质量的影响因素及各影响因素之间的关系,建立隧道施工环境质量评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 隧道施工环境质量评价指标体系

Tab.1 an assessment index system of tunnel construction environmental quality

一级指标	二级指标
噪声 U ₁	打钻凿岩、围岩爆破、超前支护钻孔、机械车辆运行、焊接、测量射枪、通风设备、混凝土泵
温湿度 U ₂	温度、湿度
风速与气压 U ₃	风速、气压
光照度 U ₄	开挖照明、初期支护照明、二次衬砌照明、路面照明、应急照明、电焊弧光
粉尘 U ₅	爆破粉尘、挖掘机开挖粉尘、出渣粉尘、机械车辆扬尘、电焊焊尘、喷射混凝土粉尘
有害气体 U ₆	爆破炮烟、机械车辆尾气、电焊、铺设防水板、测量喷漆、隧道内吸烟
内部作业环境单 调 U ₇	半封闭、呈管状、作业空间狭小
文明施工管理 U ₈	管线布置、材料堆放、机械停放、废弃材料处理、污水处理、洞内人员行为与素质

4 基于模糊层次分析法的隧道施工环境质量评价

4.1 层次分析法

层次分析法(Analytic Hierarchy Process)^[17]是 20 世纪 70 年代初美国著名运筹学家、匹兹堡大学教授 T.L.Saaty 提出的一种定性分析与定量分析相结合的系统分析方法。其基本原理是：把复杂的问题层次化，分解为各个组成因素，将这些因素按支配关系分组形成有序的递阶层次结构，并在同一层次各因素之间进行比较、判断和计算，得到方案相对于总目标的相对重要性排序，从而为方案的选择提供决策依据。层次分析法的主要步骤分为：

(1) 建立层次结构模型。首先分析评价指标各因素之间的关系，按性质和隶属关系分层次排列，最高层为目标层，其次为中间层，最底层为影响因素的具体指标层。

用 (2) 构造判断矩阵。根据层次结构模型，对同层次各元素关于上层次中某要素的重要性进行两两比较，采用 1~9 标度法构造出同层元素的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ (标度的含义如表 2 所示)。

表 2 相对比较标度
Tab.2 Relatively compared scale

标度 (a_{ij})	定义
1	表示 A_i 和 A_j 相比, A_i 和 A_j 同等重
3	表示 A_i 和 A_j 相比, A_i 比 A_j 稍微重
5	表示 A_i 和 A_j 相比, A_i 比 A_j 明显重
7	表示 A_i 和 A_j 相比, A_i 比 A_j 强烈重
9	表示 A_i 和 A_j 相比, A_i 比 A_j 极端重
2,4,6,8	取上述比较相邻的两个程度之间的

(3) 计算权重。由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重，最大特征值 λ_{\max} 与特征向量 W 之间的关系为 $AW = \lambda_{\max} W$ 。

式中， W 为相应 n 个因素的权重， $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n [(AW)_i / nw_i]$ 。

相对权重 $w_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i$ ，几何平均值 $\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$ 。

(4) 一致性检验。为使构建的判断矩阵具有满意的一致性，需对判断矩阵进行一致性检验。

一致性指标 $C.I.$ 计算公式： $C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ (n 为判断矩阵的阶数)。

平均随机一致性指标 $R.I.$ ：通过查表 3 得出。

表 3 平均随机一致性指标 $R.I.$
Tab.3 Mean random consistency index $R.I.$

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R.I.$ 值	0	0	0.5	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

最后通过 $C.R. = C.I. / R.I.$ 计算随机一致性比率 $C.R.$ ，当随机一致性比率 $C.R. < 0.1$ 时，则认为矩阵中的各参数具有满意的一致性。

4.2 模糊综合评判

模糊综合评判法是应用模糊变换原则和最大隶属度原则，对其做出综合评价，确定被评价目标的最终归属。

本文应用模糊数学^[18]的方法，建立模糊评价模型，对隧道施工环境评价指标进行多层次的模糊综合评判，从影响指标出发，先对指标层各因素进行一级模糊综合评判，再对目标层进行二级模糊综合评判。

4.2.1 确定因素集和评语集

根据隧道施工的实际环境质量情况，建立相应的因素集和评语集：

因素集 $U=\{U_1,U_2,\dots,U_n\}$

评语集 $V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}=\{100,80,60,40,20\}$ ，100 为影响非常大，80 为影响很大，60 为有影响，40 为影响很小，20 为影响非常小。

4.2.2 确定评价指标模糊关系矩阵

通过对现场施工人员和管理人员调查打分和统计的方法建立模糊关系矩阵 R ：

$$R = (r_{ij})_{m \times n}$$

其中， r_{ij} 表示因素集 U 中第 i 个因素 U_i 对应于评语集 V 第 j 个等级 V_j 的相对隶属度。

4.2.3 确定模糊评判模型

通过各指标的权重与模糊关系矩阵建立模糊评判模型，隧道施工环境质量的模糊综合评判结果集 $B = W \times R$ ，其中 W 为指标权重组成的向量， R 为模糊关系矩阵。

4.2.4 评判结果处理

对评语集合采用加权平均得到的值作为评判的结果。即：
$$P = \sum_{j=1}^n b_j v_j$$

4.3 评价结果分析

4.3.1 权重分析

通过调查隧道该隧道的管理人员和施工人员，构造出原始判断矩阵。根据层次分析法的理论和计算思路计算出各层中影响因素的权重，如表 4 所示。

表 4 计算结果汇总表
Tab.4 The summary table of calculation results

目标层	准则层	权重	指标层	权重	对总目标的权
			打钻凿岩	0.2931	0.0649
			围岩爆破	0.1637	0.0362
	噪声	0.2213	超前支护钻孔	0.2931	0.0649
			机械车辆运行	0.0953	0.0211
			焊接	0.0198	0.0044
			测量射枪	0.0292	0.0064
			通风设备	0.0630	0.0139
			混凝土泵	0.0428	0.0095
			温湿度	0.0260	温度
	湿度	0.75			0.0195
	风速与气压	0.0260	风速	0.75	0.0195
			气压	0.25	0.0065
	光照度	0.1093	开挖照明	0.0932	0.0102
			初期支护照明	0.2227	0.0244
			二次衬砌照明	0.1686	0.0184

隧道施工 环境质量			路面照明	0.4401	0.0481	
			应急照明	0.0476	0.0052	
			电焊弧光	0.0278	0.0030	
			爆破粉尘	0.1757	0.0562	
			挖掘机开挖粉尘	0.0787	0.0252	
			出渣粉尘	0.0787	0.0252	
		粉尘	0.3197	机械车辆扬尘	0.3959	0.1265
				电焊焊尘	0.0370	0.0118
				喷射混凝土粉尘	0.2340	0.0748
				爆破炮烟	0.2853	0.0516
				机械车辆尾气	0.4491	0.0813
		有害气体	0.1809	电焊	0.1194	0.0216
				铺设防水板	0.0588	0.0106
				测量喷漆	0.0588	0.0106
				隧道内吸烟	0.0286	0.0052
		内部作业环境单	0.0398	半封闭	0.6370	0.0253
				呈管状	0.1047	0.0042
				作业空间狭小	0.2583	0.0103
				电线安装	0.0925	0.0071
				材料堆放	0.4241	0.0326
	文明施工管理	0.0770	机械停放	0.0515	0.0040	
			废弃材料处理	0.1505	0.0116	
			污水处理	0.2495	0.0192	
			洞内人员行为与素质	0.0319	0.0025	

根据以上分析过程及表4汇总结果，可以得出：

(1) 在准则层上，影响隧道施工环境质量的因素排序依次为粉尘、噪声、有害气体、光照度、文明施工管理、隧道内部作业环境单调、温湿度、风速与气压，对总目标的权重依次为0.3197、0.2213、0.1809、0.1093、0.0070、0.0398、0.0260、0.0260。因此工程粉尘、噪声、有害气体和光照度是影响隧道施工环境质量的主要方面，而其他为次要方面。

(2) 在指标层上，通过分析对指标因素对总目标的权重，施工对隧道环境质量的主要影响因素有机械车辆扬尘、机械车辆尾气、喷射混凝土粉尘、打钻凿岩、超前支护钻孔、爆破炮烟、路面照明，对总目标的权重依次为：0.1265、0.0813、0.0748、0.0649、0.0649、0.0516、0.0481。其次为围岩爆破噪声、材料堆放、隧道作业空间半封闭、挖掘机开挖粉尘、出渣粉尘、初期支护照明、电焊产生有害气体、机械车辆运行噪声、风速、湿度、污水处理、二次衬砌照明、通风设备噪声、电焊焊尘、废弃材料处理，对总目标的权重依次为：0.0362、0.0326、0.0253、0.0252、0.0252、0.0244、0.0216、0.0211、0.0195、0.0195、0.0192、0.0184、0.0139、0.0118、0.0116。而其他指标的权值较小，可归为次要因素。

4.3.2 隶属度矩阵

根据确定隶属度的方法，建立准则层单因素隶属度矩阵，如下：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & 0.85 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_6 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \end{pmatrix},$$

$$R_7 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R_8 = \begin{pmatrix} 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

4.3.3 一级模糊综合评判

由一级模糊综合评判的隶属度矩阵及其相应的指标权重，可得 U_i 的模糊综合评判集 $B_i = W_i \times R_i$ 。其中 B_i 为一级模糊综合评判结果向量， R_i 为准则层单因素隶属矩阵。计算得出一级模糊综合评判结果向量分别为：

$$B_1 = (0.0893 \quad 0.7459 \quad 0.1157 \quad 0.0491 \quad 0),$$

$$B_2 = (0 \quad 0.2750 \quad 0.7000 \quad 0.0250 \quad 0),$$

$$B_3 = (0 \quad 0.5500 \quad 0.3250 \quad 0.1250 \quad 0),$$

$$B_4 = (0.7092 \quad 0.1924 \quad 0.0742 \quad 0.0242 \quad 0),$$

$$B_5 = (0.4162 \quad 0.4362 \quad 0.1402 \quad 0.0074 \quad 0),$$

$$B_6 = (0.4973 \quad 0.3691 \quad 0.0675 \quad 0.0642 \quad 0.0029),$$

$$B_7 = (0.0895 \quad 0.6113 \quad 0.2363 \quad 0.0628 \quad 0),$$

$$B_8 = (0.2072 \quad 0.6558 \quad 0.1370 \quad 0 \quad 0)$$

4.3.4 二级模糊综合评判

建立二级模糊综合评判的隶属度矩阵 $R = (B_1^T, B_2^T, B_3^T, B_4^T, B_5^T, B_6^T, B_7^T, B_8^T)^T$ ，由二级模糊评判的隶属度矩阵及其相应的指标权重，可得U的模糊综合评判集 $B = W \times R$ ，其中B为二级模糊综合评判结果向量，R为准则层隶属矩阵。计算得出一级模糊综合评判结果向量为：

$$B = (0.3399 \quad 0.4884 \quad 0.1373 \quad 0.0339 \quad 0.0005)$$

4.3.5 隧道施工环境质量综合得分

对评语集合采用加权平均的方法计算出评判结果，该隧道施工环境质量综合得分为：

$$P = 100 \times 0.3399 + 80 \times 0.4884 + 60 \times 0.1373 + 40 \times 0.0339 + 20 \times 0.0005 = 82.6633$$

说明该隧道施工对隧道环境质量影响很大，应采取针对性的措施改善隧道的施工环境。

5 结论

本文首先建立了隧道施工环境质量评价指标体系，利用层次分析法计算了各个影响因素的权重，运用模糊综合评判的方法对指标体系中的单因素和整体做出评价，分析得出如下结论：

(1) 隧道施工环境质量评价指标体系中的各个影响因素对其环境质量都有直接的影响，影响隧道施工环境主要因素有粉尘、噪声、有害气体和光照度，次要因素包括文明施工管理、隧道内部作业环境单调、温湿度、风速与气压。

(2) 根据评价结果，必须采取有效的措施改善隧道施工环境，按照标准化施工的原则，规范各个施工工序的操作，提高管理人员的管理水平和施工人员的业务水平，加强施工通风，及时清洁隧道环境，严格文明施工管理。

(3) 本文建立的隧道施工环境评价指标体系能够全面地反映影响隧道施工环境质量的影响因素，采用模糊层次分析法进行隧道施工环境质量评价，将不精确的定性表达进行量化的数字化处理，能够实现定量与定性的完美结合，使评价结果更准确、可靠，为改善隧道施工环境质量提供了可行、适用的理论依据，其理论、方法、思路和结论可供同类工程借鉴。

参考文献(References)

- [1]高 菲,张季平.噪声对健康的影响[J].生物学教学,2007,32(2):10-11
- [2]段淑民,刘新华,李赞红.粉尘对作业工人健康的危害调查分析[J].职业与健康,2003,19(7):23-24
- [3]张永良,郑世英,智强,郑铁钢.地下半密闭环境对作业人员健康影响的调查[J].环境与职业医学,2007,24(1):113-115
- [4]龙载辉,程子权,王世俊.低浓度一氧化碳对健康的影响[J].工业卫生与职业病,1993,19(2):122-125
- [5]肖上平,李义连.隧道环境噪声调查与评价—以地质大学隧道为例[J].安全与环境工程.2006,13(2):44-47
- [6]谭信荣,陈寿根,马 辉.空气质量测试在长大隧道施工中的应用[J].全与环境学报,2012,12(6):103-107
- [7]崔晗晶,李 丹.隧道照明工程质量评价指标的探讨[J].交通标准化,2009(1):39-41
- [8]杨蓉,刘建华,李松梅,王煊军.地下工程环境因子检测及评价[J].航天医学与医学工程,2005,18(4):235~239

- [9]李永生,杨立新,苟红松.隧道施工环境舒适性研究[J].隧道建设,2012,32(6):806-810
- [10]沈振武.山区长大隧道工程的环境问题研究[J].华东交通大学学报,2003,20(5):35-37
- [11]李启彬.公路隧道环境影响评价中存在的问题与对策建议[J].现代隧道技术,2010,47(1):7-10
- [12]郑俊杰,林池峰,赵冬安,丁烈云.基于模糊故障树的盾构隧道施工成本风险评估[J].岩土工程学报,2011,33(4):501-508
- [13]方学进.基于模糊影响图的隧道施工安全风险评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2009
- [14]邓焰林,张扬,刑明党.建筑工程投标报价风险综合分析及思考[J].国外建材科技,2004,25(2):152-153
- [15]殷学林,黄崇珍.主观评分法在中海油JU2000-1项目风险评估中的应用[J].信息技术,2005,12(30):79-84
- [16]王纯,姚翠珍.主成分投影法在证券市场上市公司统计分析中的应用[J].数学的实践与认识,2002,32(1):46-49
- [17]王连芬,许树伯.层次分析法引论[M].北京:中国人民大学出版社,1990
- [18]宁晓秋.模糊数学原理与方法(第二版)[M].徐州:中国矿业大学出版社,2004

复杂地层盾构刀具磨损试验研究现状及发展

胡群芳, 李敏

(同济大学上海防灾救灾研究所, 上海, 200094)

摘要: 我国城市轨道交通正处于大规模建设时期, 盾构法以其安全、可靠等优点已成为首选隧道施工方法, 盾构刀具的磨损性问题对保障盾构设备施工安全十分重要。目前, 我国还没有建立标准的刀具磨损性试验方法, 国外关于岩体和土体磨损性研究的试验方法较多, 本文针对岩石地层和磨损试验方法, 并对比分析其适用性和优缺点, 通过研究推荐了适用我国地层的刀具磨损试验设计方案。

关键词: 复杂地层; 盾构隧道; 刀具磨损; 试验方法

Abstract: The Shield driving method has become the preferred construction method for the reason of safety and reliability during the period of large-scale construction of Urban Railway Transport in China. The issue of shield tunnel cutter abrasion has great significance on ensuring the safety of shield equipment construction. So far, there was no standard wear experiment of cutter in China by far and there exist more experimental methods abroad. In view of the rock strata and soft strata, the mainly existing cutter abrasion experimental methods are introduced respectively and based on the analysis of their applicability, advantages and disadvantages, the suitable cutter abrasion test program for China's formation is recommended in this paper.

Keywords: complex formation; shield tunnel; cutter abrasion; test method

0 引言

进入 21 世纪, 我国城市轨道交通建设达到前所未有的规模。截至 2012 年 1 月我国大陆地区已有 33 个城市正在规划、建设或开通了城市轨道交通, 至 2020 年, 大陆将有 38 个城市运营地铁。盾构以其安全、可靠和高效等优点在隧道工程施工中得到广泛使用, 诸如跨流域调水工程、跨江跨海通道、打通东西大动脉的高速公路网、进藏公路铁路、大型水电工程等^[1]。同时, 盾构法施工也面临一些问题, 复杂地层中刀具磨损便是其中一个。如在富含砂卵石地层的北京、广州、成都、深圳、沈阳等城市, 刀具磨损现象十分严重。

由于刀具磨损容易导致盾构设备损坏、更换损坏部件, 并引起严重的工期延迟, 造成项目投资成本增加。如南京纬三路越江隧道工程就曾出现严重事故: 盾构段长 4134.8 m, 构穿越的各地层中砂石的石英含量普遍较高(约 60%), 砾砂和圆砾

地层石英含量高达 70%以上, 刀盘刀具磨损严重^[2]。因此, 开展盾构刀具磨损试验研究对确保盾构施工安全十分必要, 并为盾构刀具设计和盾构选型提供依据。

1 刀具磨损现象及原因分析

国内外盾构法施工中都曾出现过刀具磨损事故, 国内城市如北京、广州、成都等, 施工时出现不同种类刀具磨损、同种刀具不同程度磨损, 如切削刀具全部被磨掉、齿刀的合金块碰掉严重、刮刀被磨平或崩断、滚刀超磨或偏磨等等事故^[3]; 国外有新加坡 Kranji 隧道^[4]、德国威悉河隧道^[5]、波尔图地铁^[6]和洛杉矶 ECIS 工程也都出现过严重的刀具磨损事故。

对刀具磨损有影响的因素主要有: 盾构掘进参数、地层土体类型、刀盘刀具失效和施工技术。

1.1 掘进参数

文^[7] 根据最新盾构刀具磨损检测装置的监测数值，建立了刀具磨损系数与单一掘进参数的关系，如下表：

表 1 刀具磨损系数与单一掘进参数的关系

	千斤顶推力	刀盘转速	掘进速度增大	刀盘扭矩增大	掘进距离
磨损系数	正比	反比	先增大后减小	先增大后减小	正比

1.2 地层土体类型

盾构隧道常需穿越不同类型地层。硬岩地层由于岩石饱和单轴抗压强度大、可掘进性低，因而刀具磨损严重；黏性土地层并不直接造成刀具磨损，但当黏粒含量高时，易造成刀盘中心结泥饼，从而导致刀具发生偏磨，最后失效；砂卵石地层的含水量、内摩擦角、颗粒级配、颗粒尺寸、形状、磨圆度等都会对刀具磨损造成影响。

1.2.1 硬岩地层

硬岩地层中，影响滚刀磨损的主要地质因素有：岩石强度、硬度、研磨性、断裂带及地层的节理、裂隙发育程度、造岩矿物种类、开挖断面的地质均匀程度等^[8]。滚刀磨损速度随岩石强度、硬度的增大而增大；岩石节理、裂隙越发育，滚刀磨损越小；开挖断面越不均匀越易导致滚刀越不均匀磨损。

1.2.2 软土地层

哈沃德大学的 Mohsen Mosleh 及宾夕法尼亚州立大学的 EhsanA.Gharahbagh 和 JamalRostami 通过室内试验研究了土体开挖过程中相对硬度和湿度对刀具磨损的影响^[9]：在进行刀具的设计和选择时，开挖刀具硬度变化范围不宜太大；土样的含水量增加到 10%之前，刀具磨损量随含水量增加减小，当含水量介于 10%和饱和含水量之间时，刀具磨损量随含水量增加而增加。以往的研究局限于研究土样矿物成分及莫氏硬度对刀具磨损的影响，忽略了土样含水量、级配、骨料形状以及材质特性。

1.3 刀盘刀具失效

刀盘结构设计不合理、刀具配置不合理、检查、边缘刀具超磨、刀盘开口率设置不合理、刀具承受过大冲击荷载、滚刀承受过大侧向力、滚刀装配质量差^[10]等，都会导致刀具磨损。此外刀具的材质、硬度、布置形式和安装位置及切入深度也会影响其耐磨性。

1.4 施工技术

掘进参数选择不合理、检查或更换刀具不及时、长时间、较长时间掘进、密封耐高温高压能力降低等施工因素都会对刀具磨损产生影响^[10]。

2 刀具磨损计算公式

2006 年, 文^[11]给出盾构刀盘外圈切削刀具寿命计算公式: $\delta=K\pi DNL/10V$, 其中 δ -磨损量 (mm), K-磨耗系数(mm/km), D-盾构刀盘外径(m), N-刀盘的转动速度(r/min), L-掘进距离(m), V-掘进速度(cm/min)。

2009 年袁大军、胡显鹏等根据北京地铁某标段 3 个盾构区间的土层现场试验结果, 得到砂卵石地层刀具磨损系数和掘进距离计算公式^[12]: $k=\delta/L$, $L=\pi Dl/a$, 其中 δ 为刀具磨损量 (mm), 用游标卡尺测量, k 为刀具磨损系数 (mm/km), L 为刀具切削轨迹的长度 (km); D 为切削轨迹半径 (m); l 为盾构掘进距离 (m); a 为盾构刀盘每转掘进长度 (cm)。当 δ 取最大允许磨损量时, l 即为不换刀最长掘进距离。

2 国内外刀具磨损试验介绍

我国盾构法施工主要从国外引进, 起步较晚, 经验相对缺乏。国外对盾构刀具磨损性研究早于国内, 针对不同土体类型设计了适用于岩样和土样的试验装置, 具体介绍如下:

2.1 硬岩地层的刀具磨损试验

目前, 广泛应用于测试和评估岩石磨损性的试验有三种, 分别是 Cerchar 磨损试验、NTNU 磨损试验、LCPC 试验及 SJ 钻进试验。

2.1.1 Cerchar 磨损试验

1973 年, 法国的 Cerchar 研究所提出了一种测试硬岩磨损性的试验方法, 即 Cerchar 磨损试验。该试验装置由 Cerchar 试验仪和针尖磨损测量装置两部分组成。实验步骤如下: 试样固定在试样夹中后, 把试验针 (锥角 90°, Rockwell 硬度 54~56 或者 43) 放置在试样 (表面平整的岩样) 上, 随后在试验针上加上 7kg 的重量, 1 分钟内使试验针移动 10mm 并测量试验针端部的磨损 (2 次取平均值), 对同一个岩石样本进行 5 次测量, 取平均值 D_m 计算 Cerchar 摩擦性指数为 $10 \cdot D_m$ 。

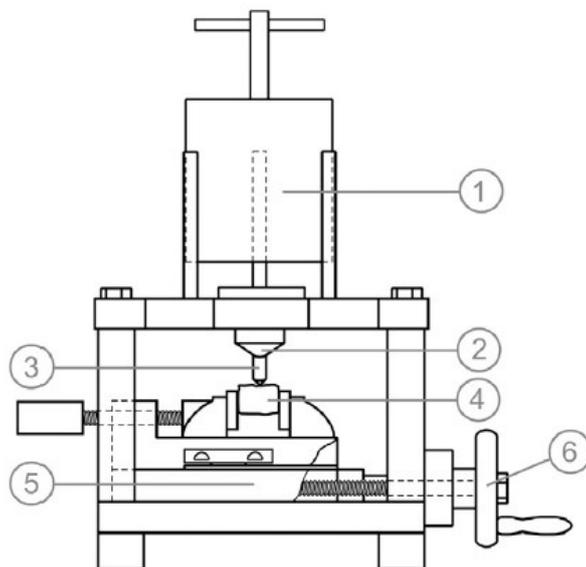


图 1 原始的 CAI 测试装置

表 2 Cerchar 摩擦性分级

摩擦性分级	Cerchar 研究所 (钢针硬度 54~56)	NTNU (钢针硬度 43)	科罗拉多矿业学院 (钢针硬度 56)
无摩擦性	<0.3	0.3~0.5	<1.0
低摩擦性	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0
中等摩擦性	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~4.0

具摩擦性	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~5.0
较高摩擦性	2.0~4.0	2.0~4.0	4.0~5.0
极高摩擦性	4.0~6.0	4.0~6.0	4.0~5.0
石英	6.0~7.0	6.0~7.0	5.0~6.0

Cerchar 岩石磨擦试验先后在法国和英国煤矿业广泛使用，随后也被用于测试隧道中硬岩的磨损性，后来在交通和道路研究实验室首次制造出这种设备并进行改进，最后分析了测试过程中出现问题^[13]。1981年 West 建议该方法应用于测岩石对刀具的磨蚀性指标，并用其测试结果 CAI 来建立刀具损耗的预测模型，如著名的 CSM 模型^[14]。后来的研究表明，对 Cerchar 摩擦试验测试结果有影响因素是：岩石强度、具有磨损性的矿物含量^[15]、测试用钢针材质^[16]、测试条件和试样的地质特性^[17]等。

2.1.2 NTNU 磨损试验

根据测试用料不同，可测量两种磨损值，即 Abrasion Value 和 Abrasion Value Cutter Steel。测试前先将岩样碾碎成粉末 ($d < 1\text{mm}$) 放在旋转的钢盘上，测试对象为碳化钨材料的刀具试块，试块上加有 10kg 的重物。将 AV 值定义为：钢盘旋转 5 分钟即 100 圈后，试块损失的质量；AVS 值定义为：测试对象换成取自滚刀刀圈上的材料，钢盘旋转 1 分钟即 20 转时材料的磨损量。AV 值测试装置和 AVS 测试装置除测试对象不同外，其他装置完全相同。试验装置如图 3 所示。

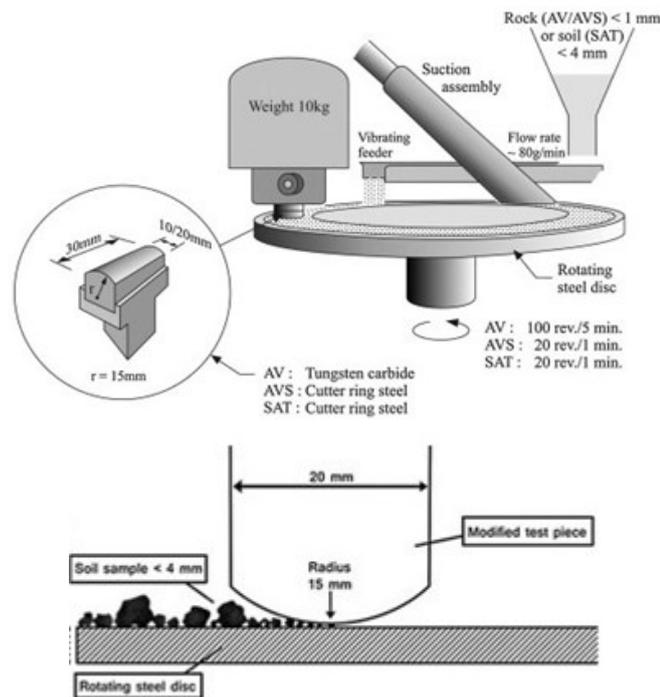


图 2 AVS 磨损测试装置

2.1.3 LCPC 试验^[18]

法国规范介绍了 LCPC 磨损试验程序和装置^[19]。该装置只适用于测试 4.0-6.3mm 间的粉碎岩石颗粒或自然土样。岩样或土样的质量 500g，钢质推进器（相对较软的合金钢，Rockwell B 硬度 60-75）尺寸 25mm*50mm*5mm，转速 4500rpm。将 LCPC 磨损系数定义为钢制推进器质量损失值与岩/土样质量之比。该方法通过对比试验前后土样的筛分曲线，还可以测试土样的脆性特征。

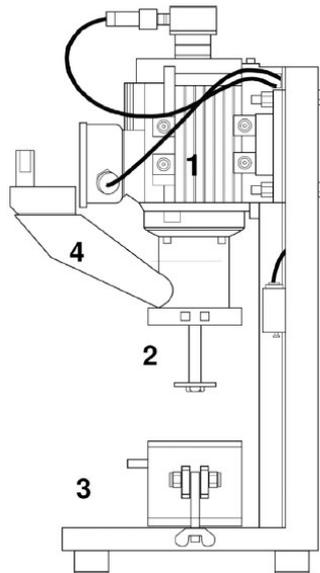


图3 LCPC 测试装置 (1-驱动, 2-推进器, 3-含磨料的广口瓶, 4-漏斗管)

文^[20]表明, LCPC 磨损系数与等石英含量(EQC)关系不明确。文^[21]分析了粒径不在 4.0-6.3mm 范围的颗粒对磨损性的影响, 结果表明颗粒尺寸越大, 则其磨损性越高, 原因不得而知。该研究还发现, LCPC 值和 CAI 值之间有一定关系, 但不能预测刀具寿命, 因为实验室进行的土体磨损试验未考虑“土体质量磨损性”、盾构掘进参数及表面支撑效应。

2.1.4 SJ 钻进试验

自上世纪 60 年代开始, SJ 试验 (Sievers' J-miniature drill test) 在 NTNU/SINEF 成为广泛使用的用于测试岩样可钻性的试验, 该装置在测试岩样表面硬度方面被公认为具有较高可信度。2007 年, 文^[22]对装置的测试部分进行改进, 测试了 212 个不同种类岩样并根据测试结果定义了 SJIP 值, 可直接用于预测刀具寿命。文章还分析了不同类型岩石及其特性, 如矿物成分、纹理、骨料形状、骨料间粘结力及骨料尺寸) 都对开挖刀具的磨损有影响。

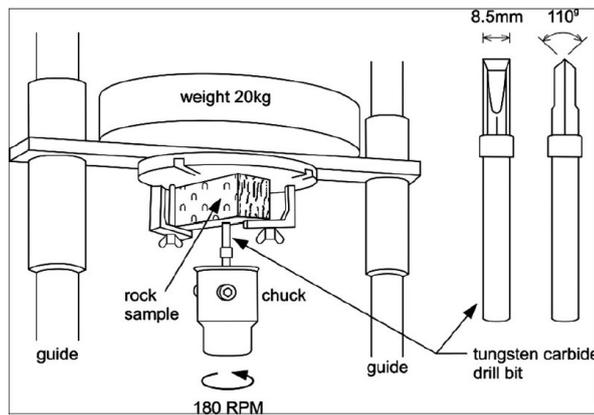


图4 SJ 钻进测试装置

2.2 松软地层的刀具磨损试验

此处松软地层是相对硬岩地层而言的, 诸如粘土、砂土和卵砾石地层都归属松软地层。用于测试松软地层刀具磨损的装置主要有: SAT 试验、改进后的土体磨损测试装置及 Ball Mill Test 装置。

2.2.1 SAT 试验

挪威科技大学的 SAT (Soil Abrasion Test) 试验是 NTNU 磨损试验的继承和发展, 与 LCPC 试验测定对象不同的是, SAT 试验用于测试粘土、粉砂和砂的磨损值。该试验装置主要由以下部分组成: 旋转的钢圆盘、来自 TBM 刀具的钢针 (直径 20mm, 针尖处曲率圆半径 15mm)、粒径小于 4mm 的干燥土样 (在 30°的通风箱内放置 2-3 天)、振动给料机及吸土装置。

将 SAT 定义为: 一段试验时间后, 钢针质量损失的平均值 (mg)。2-4 组质量损失测试值的方差不得大于 5mg^[18]。根据试验样本的数量, 将土体磨损性分级: 当样本相对较多时 (如大于 1500 个测试值), 可将 AVS 值分 7 个等级; 当样本相对较少时 (介于 200~300 个测试值), 可将 AVS 值分 3 个等级。试验装置见图 3。

SAT 值与土样的石英含量和 VHNR 有很大相关性, 此外还受摩擦参数, 诸如颗粒矿物成分、颗粒尺寸的影响^[15]。

2.2.2 改进后的土体磨损试验

2012 年, 宾夕法尼亚州立大学的 Jamal Rostami, Ehsan Alavi Gharahbagh, Angelica M. Palomino 和哈沃德大学的 Mohsen Mosleh 共同设计出一种在不改变土样级配的情况下, 测试含大粒径卵砾石原状土样对盾构开挖刀具的磨损性^[23]。该装置由驱动装置、试验腔体、推进器及土样等组成。驱动装置即变速器, 用以控制和调节推进器旋转速度; 圆柱状腔筒直径 35cm, 高度 45cm, 腔体大小还可以试验土体的粒径来改变; 推进器由 3 个半径为 15cm 的套有钢膜的刀片组成, 试验过程中, 其被放置在距离腔筒底部 15cm 的地方; 土样的允许粒径范围较大, 从黏粒到大粒径卵砾石。试验结束后, 通过测量钢膜的质量损失值来衡量土体磨损性。

对测试结果的分析表明: 此测试系统试验过程中不会改变土体的组成和特性。

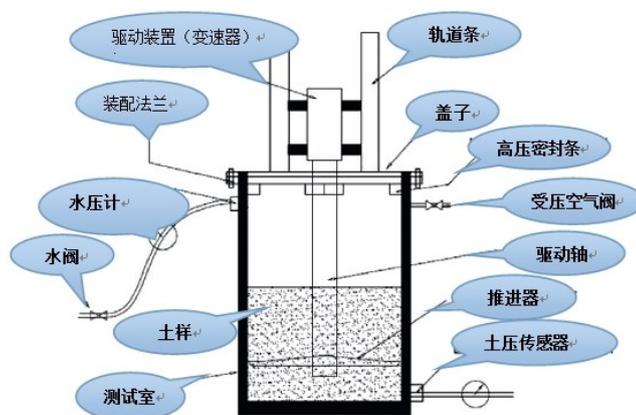


图 5 改进后的土体磨损测试装置

2.2.3 Ball Mill Test^[18]

2013 年, 挪威科技大学土木和交通工程学院率先设计出一种测试类似原状土磨损性的装置, 试验时, 土体含水量、水压和密度可以改变和调整, 从而更好地实现对盾构刀盘实际开挖环境的模拟。该装置是首个可以评估土体改良剂对磨损的降低作用的装置, 它由一个 rotating drum 组成, 里面填充土样 (粒径小于 16mm) 和钢珠 (直径和长度均为 16mm)。对一个颗粒级配确定的特定土样, 可以测试土体改良剂种类和含水量变化对刀具磨损的影响。

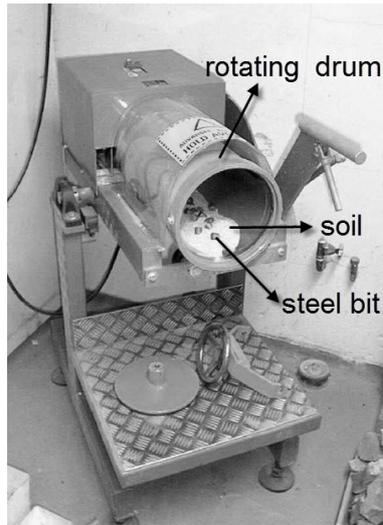


图 6 Ball Mill 试验装置

3 各种测试试验对比分析

SAT 试验和 AV/AVS 磨损试验是在相同装置上进行，不同点在于：①测试对象不同，②土样粒径不同，前者粒径最大为 4mm，后者为 1mm，③NTNU 磨损试验测得的 AV 值和 AVS 值是衡量岩石磨损性的，而 SAT 值是测量干燥土样的磨损值；改进后的土体磨损测试装置虽然没有考虑土体改良剂的影响，但可以测试诸如石英砂、石灰岩砂和粘土等不同土体的磨损特性，亦能考虑加载、含水量对磨损的影响及钢片硬度对磨损的敏感性。SAT 磨损装置所描述的一系列导致磨损的特性是致使刀具磨损的主要因素，但未能直接满足土体材料对刀盘能力的需要，因为它只测量了钢材与松散土颗粒间的相互作用^[24]。Ball mill test 装置中，钢试样和土之间的接触力很小，这与实际不相符，因为土体开挖过程中，盾构的推力和扭矩是相对较高的^[18]。

各试验测试对象、测试参数及试验结果如下表：

表 3 各种测试试验对比

磨损试验	试验对象	测试参数	试验结果
Cerchar	岩样	岩石强度、具有磨损性的矿物含量	CAI
NTNU	粒径小于 1mm 的粉末状岩样	颗粒矿物成分、颗粒级配	AV/AVS
LCPC	粉碎的岩石颗粒或土样	骨料尺寸、级配	ABR
SJ 钻进	岩样	矿物成分、纹理、骨料形状、骨料间粘结力及骨料尺寸	
SAT	土体	颗粒矿物成分、VHNR	SAT
改进后	含大粒径卵石的原状土样	不同土体、荷载、含水量、土体质量、钢膜硬度	
Ball Mill	类似原状土样	含水量、土体改良剂种类、水压、土样密度	

目前还没有被认可的预估模型用以估算（预测）土体中盾构隧道的刀具磨损^[25]。

4 适合我国地层的刀具磨损试验

我国城市轨道交通线路多在复杂土层中穿越，因此，测试土层磨损性试验推荐使用 SAT 磨损装置；对岩石地层，推荐采用被广泛认可的 Cerchar 摩擦试验装置。

从两方面对 SAT 试验进行改进：

1. SAT 试验中，试块承受的荷载为 10kg 的横载，而在实际开挖过程中，受地层条件、施工参数等的影响，刀具的受力是变量，因此改进后的试验装置要考虑荷载变化对刀具磨损系数的影响。

2. 试验中试块的相对移动轨迹是半径固定的圆，即切削轨迹是固定的，而实际开挖中，刀盘面上不同位置的刀具，切削轨迹不同，因此改进后的装置可以研究切削长度对刀具磨损的影响。

5 结语

1. 列举了刀具磨损现象并分析导致刀具磨损的原因。
2. 对比分析国内外刀具磨损试验，并分析其测试参数、适用性和优缺点。
3. 推荐了适用于我国地层的刀具磨损试验，对 SAT 磨损装置进行改进后用于测试土层磨损性以及测试岩石地层的 Cerchar 摩擦试验装置。

参考文献(References)

[1]张士龙, 南京纬三路过江通道工程技术难点分析[J].隧道建设, 2013,33 (2) 47-150.
 [2]王振飞, 张成平, 张顶立, 等. 富水砂卵石地层大直径盾构刀具的磨损与适应性[J]. 北京交通大学学报: 自然科学版, 2013, 37(3): 62-67.
 [3]王旭, 李晓, 廖秋林, 岩石可掘进性研究的试验方法述评[J].地下空间与工程学报, 2009, 5 (1): 67-73.
 [4]NILSEN B, DAHL F, HOLZHAUSER J, et al. Abrasivity of soils in TBM tunneling[J].Tunnels&Tunnelling International, 2006, 3: 36—38.

- [5]NABENDERERDE S, HOEK E, MARINOS P, et al. Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses—The case of “Metro do Porto” and the measures adopted[C]//Geotechnical Risks in Rock Tunnels. London: Taylor&Francis. 2006.
- [6]ZHAO J, GONG Q M, EISENSTEN Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2007, 22: 388--400
- [7]张明富, 袁大军, 黄清飞, 等. 砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 397-402.
- [8]张耕获, 乐贵平, 苏艺, 盾构刀具的磨损及检测措施[J]. 市政技术, 2008, 26 (5) :417-419,469.
- [9]Mohsen Mosleh, EhsanA.Gharahbagh, JamalRostami, Effects of relative hardness and moisture on tool wear in soil excavation operations[J]. Wear,2013,302:1555–1559.
- [10]闫茹. 基于地层变异的盾构刀具磨损风险分析及其预测模型研究 [D][J]. 上海: 同济大学, 2009.
- [11]管会生, 高波, 盾构切削刀具寿命的计算[J]. 工程机械, 2006, 37(1): 25-28
- [12]袁大军, 胡显鹏, 李兴高, 等. 砂卵石地层盾构刀具磨损测试分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009 (5): 48-51.
- [13]G.West.Rock abrasiveness testing for tunnelling[J]. Int. J. rock. Mech. Min. Sci. 26(2), 1989: 151-156.
- [14]王旭, 李晓, 廖秋林. 岩石可掘进性研究的试验方法述评[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009.
- [15]S. L. AL—Ameen, M. D. Waller. The influence of rock strength and abrasiveness mineral content on the Cerchar Abrasiveness Index[J]. Engineering Geology, 36, 1994: 293—301.
- [16]Michalakopoulos T N, Anagnostou V G, Bassanou M E, et al. The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(2): 321-327.
- [17]R. Plinninger, H. Kasling, K. Thuro, G. Spaun. Testing conditions and geological properties influencing the CERCHAR abrasiveness index(CAI value [J]. Int. J. rock. Mech. Min. Sci. 40, 2003: 259--263.
- [18]Jakobsen P D, Lohne J. Challenges of methods and approaches for estimating soil abrasivity in soft ground TBM tunnelling[J]. Wear, 2013, 308(1): 166-173.
- [19]P.D. Jakobsen, A. Bruland, F. Dahl, Review and assessment of the NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT(TM)) for determination of abrasiveness of soil and soft ground., Tunnels and Underground Space Technology, 2013.
- [20]M.Köhler,U.Maidl,L.Martak,Abrasivenessandtoolwearinshieldtunnellinginsoil,GeomechanikundTunnelbau4(February)(2011)36–53.
- [21]K.Thuro,J.Singer,H.Käsling,M.Bauer,Determining abrasivity with the LCPC Test,in:Proceeding softhe 1st Canada—U.S.RockMechanics Symposium,2007.
- [22]Dahl F, Grøv E, Breivik T. Development of a new direct test method for estimating cutter life, based on the Sievers’ J miniature drill test[J]. Tunnelling and underground space technology, 2007, 22(1): 106-116.
- [23]Rostami J, Gharahbagh E A, Palomino A M, et al. Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 245-256.
- [24]Gwildis U G, Sass I, Rostami J, et al. Soil abrasion effects on TBM tunneling[C]//World Tunnelling Congress, Vancouver, Canada. 2010.
- [25]Abrasive-ness and tool wear in shield tunnelling in soil.

深埋硬岩特长隧道合理爆破循环进尺研究

李自强, 王明年, 于丽, 徐湑源

(西南交通大学土木学院, 成都 610031)

摘要: 快速掘进能够有效加快施工进度, 但随之产生的围岩稳定性和安全性成为建设中必须面临的主要难题。因此, 如何实现深埋硬岩隧道的安全、快速施工成为长大公路隧道建设中的首要问题, 而选择合理的爆破循环进尺则成为实现这一关键技术问题的关键所在。为获得快速掘进合理的爆破参数, 采用数值计算的方法, 以虹梯关特长公路隧道为工程依托, 对不同循环进尺下围岩产生的松动圈、塑性区厚度以及位移变化规律进行了对比分析, 得到了不同级别硬岩条件下合理循环进尺的建议值, 该结论可为类似工程提供依据。

关键词: 深埋; 硬岩; 爆破开挖; 循环进尺

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号:

Study on Reasonable Blasting Cycle Footage of Deep Hard-rock and Over-length Tunnel

Li Ziqiang, Wang Mingnian, Yu Li, Xu Tianyuan

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the development of tunnel construction, the concealment and complexity of deep hard-rock tunnel is especially obvious. Rapid excavation can speed up construction progress effectively, while it would influence the stability of surrounding rock, so choosing appropriate blasting cycle footage holds guiding significance for similar engineering. Based on the project of Hongtiguang tunnel, through finite element analysis, loose circle, plastic areas thickness and displacement variation of surrounding rock under different cycle footages were contrasted and analyzed to get appropriate suggested values of tunnel cycle footage under different surrounding hard-rock grades. The results can provide basis for similar engineering.

Keywords: deep buried; hard rock, blasting excavation; cycle footage

1 引言

随着我国隧道建设逐渐向“长、大、深、群”方向发展^[1]，地下工程的隐蔽性和复杂性越发明显，其中深埋硬岩特长隧道的特点尤为突出。快速掘进技术能够有效的缩短工期，但掘进过程中爆破开挖对掌子面周围围岩的稳定性造成难以预计的影响，循环进尺过长会引起掌子面失稳从而引起坍塌掉块等危害^[2]。目前对深埋硬岩特长隧道的研究较为有限，在快速掘进过程中，研究合理爆破循环进尺满足工期要求同时保证围岩稳定性很有必要。

本文以虹梯关隧道为背景，研究不同爆破循环进尺作用下掌子面围岩的松动圈、塑性区厚度，分析各工况下围岩位移极值变化，结合对超挖出渣量及工期的影响给出不同围岩等级条件下深埋隧道的建议进尺，为今后类似工程提出指导和建议。

2 理论基础

实测结果表明，爆破开挖影响地下洞室稳定性是一个普遍现象^[3]。正确掌握爆破循环进尺对围岩稳定性的影响，其灵敏度如何，对设计和施工都有很大的帮助；此外，尽管隧道开挖后其工程建设环境和空间大小难以改变，但结合现有的设计与施工技术还是有很大优化的余地，所以了解围岩稳定性的变化在隧道快速掘进施工中也有着很大的现实意义。

2.1 爆破荷载模拟方式

爆破荷载在实际工程中实测性较难，因此国内学者研究认为可将爆破荷载模型简化为三角荷载的方式（见图 1），并在实际工程中得到了验证^[4]。

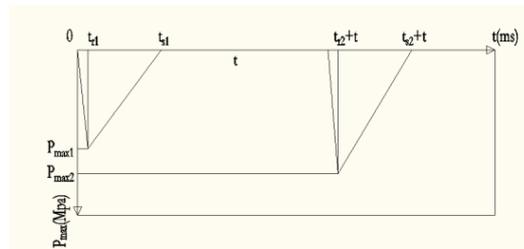


图 1 三角荷载示意图

Fig. 1 Triangle load diagram

$$\begin{cases} t_r = 12\sqrt{r^{2-\mu}} Q^{0.05} / K \\ t_s = 84\sqrt[3]{r^{2-\mu}} Q^{0.2} / K \end{cases} \quad (1)$$

式中： t_r —上升段时间（单位：s）； t_s —总作用时间（单位：s）； K —岩体的体积压缩模量（单位： 10^5pa ）； μ —岩体的泊松比； Q —炮眼装药量（单位：kg）； r —对比距离。

对现有众多爆破荷载峰值公式进行统计分析，得到的爆破荷载的应力峰值 P_{\max} 的求解公式为：

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad (2)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (3)$$

式中： Z —比例距离； R —炮眼至荷载作用面的距离（单位：m）； K —岩体的体积压缩模量（单位： 10^5pa ）； μ —岩体的泊松比； Q —炮炸药量（单位：kg），齐发爆破时取总装药量，分段起爆时取最大段装药量。

2.2 松动圈理论

地下洞室开挖后，周边围岩由三维应力状态变为二维应力状态，当应力重分布后应力值超过围岩强度时则形成破碎带，表明该区域围岩已屈服，从而形成松动圈，通常将松动圈分为以下几类^[5]：

(1) 小松动圈：松动圈厚度 0~40cm，为 I 类小松动圈，此时围岩整体性较好，采用喷射

混凝土即可完成支护；

(2) 中松动圈：松动圈厚度 40~150cm，分 II、III 两类围岩出现一定程度的破碎带，需要采用短锚杆喷射混凝土或锚喷联合支护保持围岩稳定。

(3) 大松动圈：松动圈厚度 150cm 以上，分 IV、V、VI 三类，此时采用一般锚喷支护难以满足围岩稳定性的要求，需要采用锚喷网支护。

本文主要采用 FLAC3D 摩尔库伦准则进行模拟计算，围岩应力大于其自身强度即为松动圈，因此可以根据围岩主拉应力来判断松动圈的厚度，对应的离掌子面距离值即为松动圈厚度。

3 模型建立

3.1 工程概况

虹梯关隧道全长 13.1km，为目前国内在建特长隧道之一，为左右线分离式隧道。两洞最小间距 25 米。隧道最大埋深 589 米，断面净宽 10.25 米，限高 5 米，设计衬砌如图 2 所示，围岩条件如表 1 所示。

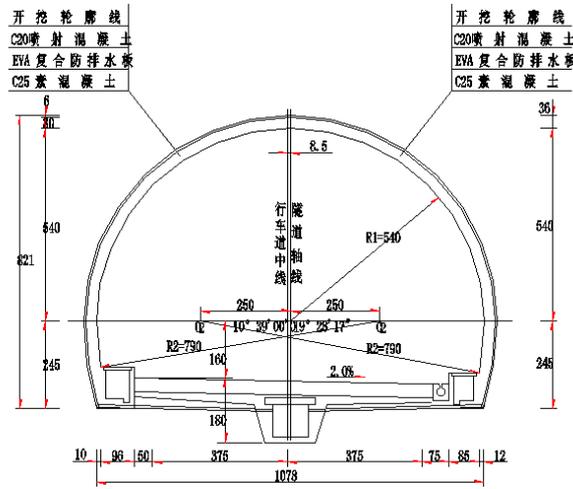


图 2 II、III 级围岩设计衬砌断面图

Fig. 2 Designing lining sectional drawing when surrounding rock grade are II and III

表 1 围岩等级统计表

Table 1 Statistical table of surrounding rock grades

围岩等级	左右线	长度 (m)	埋深(m)	
			max	min
II	右	3480	589.8	232.7
	左	3440	589.8	232.7
III	右	4890	589.8	232.7
	左	4485	589.8	232.7
IV	右	2608	517.5	84.7
	左	2735	517.5	84.7
V	右	2060	235.9	
	左	2162	235.9	

根据表 1 统计结果可知，在虹梯关隧道中 II、III 级围岩分布最广，最具代表性，因此选取该等级围岩进行模拟分析。

3.2 有限元参数

1. 围岩参数

本次计算采用的围岩物理力学参数见表 2 所示。

表 2 围岩物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of surrounding rock

围岩等级	E (Gpa)	μ	$\gamma(KN/m^3)$	C (Mpa)	$\varphi(^{\circ})$
II 级围岩	26	0.22	26	1.8	55
III 级围岩	13	0.28	24	1.1	45

2. 循环进尺

根据《公路隧道设计规范》、《公路隧道施工技术规范》、《矿山井巷工程施工及验收规范》可知：对于 I、II 级别的硬质围岩，一般循环进尺选择在 3~5m 内。III 级围岩以下建议不超过 3m，结合虹梯关隧道工程实际情况选择 2.5m, 3m, 3.5m, 4m, 5m 四种爆破循环进尺进行模拟。

3. 爆破荷载

根据 2.1 节爆破荷载作用时间和峰值的确定，爆破荷载具体参数如表 3 所示。

表 3 爆破冲击荷载参数

Table 3 Parameters of blasting impact load

循环进尺	炮眼深度	爆破冲击荷载峰值 (pa)	上升段时间 t_r 错误!未找到引用源。(ms)		总作用时间 错误!未找到引用源。(ms)	
			计算值	取值	计算值	取值
2.5m	2.8m	-546918.734	9.23	9	96.88	100
3m	3.5m	-644167.804	9.67	10	97.92	100
3.5m	3.7m	-743354.128	9.92	10	100.06	100
4m	4.4m	-846882.314	11.43	11	102.44	102
5m	5.6m	-1073613.007	12.01	12	103.55	104

3.3 有限元模型的建立

隧道模型尺寸为 X*Y*Z=90m*20m*80m，隧道外边墙分别距模型左、右边界大于 3 倍隧道内径即取 39m，隧道拱顶距离地表距离根据施工段不同而有所差异，隧道拱顶距离模型上边界为大于 3 倍隧道净空高度约为 34m，隧道最大埋深达到 589.8m，最小埋深为 232.7，取 II、III 级围岩共同埋深 460m 通过等效重力场实现对埋深的模拟。隧道底板距模型下底板边界为大于 3 倍隧道净空高度约为 38m。

根据全断面爆破开挖后开挖断面及周围围岩应力分布规律，在拱顶处、拱腰处、拱脚处分别每隔一段距离设定质点监测点对爆破开挖过程中围岩的动力响应进行监测，具体监测点布置图见图 3。

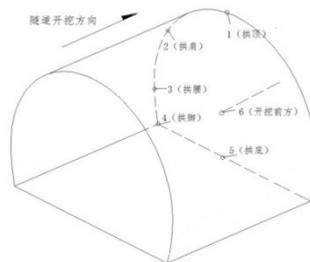


图 3 隧道断面监测点示意图

Fig. 3 Measuring points of tunnel section

4 计算结果分析

利用有限元软件分析 II、III 级围岩隧道各监测点在爆破作用下的主应力、位移变化规律，及塑性区范围。对围岩在不同围岩级别不同循环进尺下的松动圈和塑性区分别进行研究分析。得出深埋硬岩隧道在爆破荷载作用下的动力响应。

4.1 III 级围岩计算结果

1. 松动圈大小分析

当循环进尺为 2.5m 时，II 级围岩下拱顶首先出现松动圈，范围约为 11cm，表明在该循环进尺下，围岩所受的影响较小，整体性保证完好。随着开挖循环进尺的增加，拱底出现松动圈，且厚度迅速扩大，其他检测线也均出现不同厚度的松动圈。

通常采用开挖断面周边的最大松动圈厚度 R 作为松动圈大小的判定指标，根据 2.2 节对不同爆破循环进尺下松动圈进行评价。五种循环进尺下 II 级围岩的最大松动圈厚度如图 4 所示。

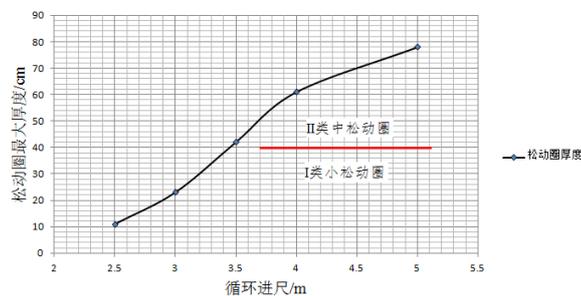


图 4 循环进尺与 II 级围岩松动圈厚度关系图

Fig. 4 Relation curve between cycle footage and loose circle thickness when surrounding rock grade is II

由图 4 可知，当循环进尺小于 3.5m 时 II 级围岩出现 I 类小松动圈，此时围岩整体性较好，采取喷射混凝土即可完成支护。当进尺大于 3.5m 时，松动圈向 II 类中松动圈发展，需要采取短锚杆喷射混凝土支护。

塑性区计算结果表明，随着循环进尺的增加 II 级围岩周边塑性区范围也不断扩大；各循环进尺下拱底处围岩塑性区范围最大，随着循环进尺的增加拱底处围岩塑性区发育最为迅速使整体塑性区形状向圆形发展表明该位置围岩所受进尺影响最为明显。

统计五种循环进尺下 II 级围岩的塑性区最大深度如表 4 所示。

表 4 II 级围岩各种循环进尺塑性区深度

Table 4 Plastic areas depth under different cycle footage when surrounding rock grade is II

循环进尺/m	2.5	3	3.5	4	5
塑性区厚度/m	1.02	1.56	1.92	2.31	3.05

由表 5 可知，随着开挖进尺的增加，围岩塑性区范围不断扩大，当进尺为 2.5m 时，围岩塑性区最大厚度为 1.02m；当进尺为 5m 时，塑性区范围最大厚度增加到了 3.05m。

2. 围岩变形分析

统计五种循环进尺下 II 级围岩的最大变形量如表 5 所示。

表 5 II 级围岩各种循环进尺围岩最大位移量

Table 5 Maximum displacement under different cycle footage when surrounding rock grade is II

循环进尺/m	2.5	3	3.5	4	5	
竖向最大位移/mm	拱顶	1.796	1.994	2.201	2.385	2.691

拱底	3.184	3.617	3.832	4.292	4.862
水平最大位移/mm	0.542	0.575	0.601	0.628	0.680

由表 5 可知，随着循环进尺的增加，围岩竖向和水平位移量均不断增加。竖向位移方面：增长幅度较大，拱顶沉降由 1.796mm 增长到 2.691mm；拱底隆起由 3.184mm 增长到 4.862mm，其中拱底隆起值增长速度最快，表明随着开挖循环进尺的增加，隧道拱底变形受到的影响最大，更易破坏；水平位移方面：变化相对平缓，受到循环进尺的影响较小。

根据上述五种循环进尺下围岩的松动圈大小、最大位移量、塑性区范围综合分析得出结论：当循环进尺不大于 3.5m 时，虹梯关隧道 II 级围岩整体性较好，支护手段较为简单，对快速掘进十分有利；当进尺超过 3.5m 时，围岩处于中松动圈范围，此时需要采取相应的支护措施并结合经济性和施工进度考虑是否选择该循环进尺。

4.2 III 级围岩计算结果

1. 松动圈大小分析

当循环进尺为 2.5m 时，III 级围岩下拱顶和拱底均出现松动圈，最大范围出现在拱顶，约为 17cm，表明在该循环进尺下，III 级围岩整体性较好，受到开挖的影响也较小。随着开挖循环进尺的增加，各检测线均出现松动圈，且厚度不断扩大。将 III 级围岩下各循环进尺的最大松动圈厚度变化如图 5 所示。

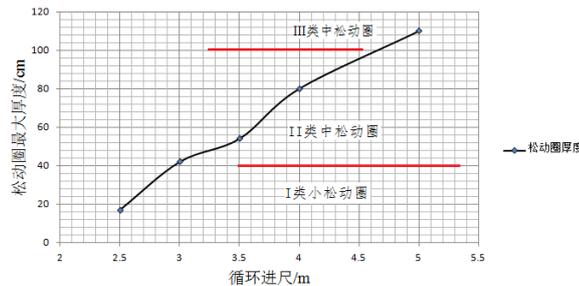


图 5 循环进尺与 III 级围岩松动圈厚度关系图

Fig. 5 Relation curve between cycle footage and loose circle thickness when surrounding rock grade is III

由图 5 可知，当循环进尺小于 3.0m 时 III 级围岩松动圈基本为小松动圈，此时围岩整体性较好，采取喷射混凝土即可完成支护。当进尺大于 3.0m 时，松动圈向 II 类中松动圈发展，需要采取短锚杆喷射混凝土支护；当循环进尺接近 5m 及以后，围岩出现 III 类中松动圈，需要采取一般锚喷支护。

塑性区计算结果表明，随着循环进尺的增加 III 级围岩周边塑性区范围也不断扩大，各循环进尺下拱底处围岩塑性区范围最大，随着循环进尺的增加拱底处围岩塑性区发育最为迅速表明该位置围岩所受进尺影响最为明显。统计五种循环进尺下 III 级围岩的塑性区最大深度如表 6 所示。

表 6 III 级围岩各种循环进尺塑性区深度

Table 6 Plastic areas depth under different cycle footage when surrounding rock grade is III

循环进尺/m	2.5	3	3.5	4	5
塑性区厚度/m	1.33	1.66	2.23	2.84	3.41

由表 8 可知，随着开挖进尺的增加，围岩塑性区范围不断扩大，在循环进尺 3m~4m 时塑性区增长较为明显；循环进尺 2.5m~3m 和 4m~5m 时，塑性区增长较为平缓；当进尺超过 5m 时，塑性区最大深度达到 3.41m。

2. 围岩变形分析

统计五种循环进尺下 III 级围岩的最大变形量如表 7 所示。

表 7III 级围岩各种循环进尺围岩最大位移量

Table 7 Maximum displacement under different cycle footage when surrounding rock grade is III

循环进尺/m		2.5	3	3.5	4	5
竖向最大位移 /mm	拱顶	3.232	3.605	3.955	4.250	4.414
	拱底	6.302	6.801	7.490	8.208	8.430
水平最大位移/mm		1.060	1.122	1.168	1.199	1.023

由表 7 可知，随着循环进尺的增加，围岩竖向和水平位移量均不断增加。竖向位移方面：增长幅度较大，拱顶沉降由 3.232mm 增长到 4.414mm；拱底隆起由 6.302mm 增长到 8.430mm，其中拱底隆起值增长速度最快，表明随着开挖循环进尺的增加，隧道拱底变形受到的影响最大，更易破坏；水平位移方面：变化相对平缓，受到循环进尺的影响较小。

根据上述五种循环进尺下围岩的松动圈大小、最大位移量、塑性区范围综合分析得出结论：当循环进尺不大于 3m 时，虹梯关隧道 III 级围岩整体性较好，支护手段较为简单，但是循环进尺有限，施工进度得不到保障；当进尺超过 3m 时，围岩处于中松动圈范围，此时若采取相应的支护措施循环进尺可以达到 4m 及以上。

5 结论

通过以上不同爆破循环进尺对硬岩条件下隧道的影响进行了分析，得到的主要结论有：

1.随着循环进尺的增加，围岩松动圈不断扩大，拱底松动圈厚度发育相较其他位置发育更快，在实际工程中应加强对拱底处围岩的支护。III 级围岩松动圈厚度始终大于 II 级围岩。

2.围岩塑性区厚度随循环进尺增加而增加，整体塑性区形状向圆形发展，其中拱底塑性区厚度受循环进尺影响最大且 III 级围岩塑性区厚度始终大于 II 级围岩。

3.和 II 级围岩相比，爆破循环进尺的增加对 III 级围岩坑道变形影响更大，各向位移值均大于 II 级围岩。竖向位移增长速度较快，其中隧道拱底隆起值受到循环进尺的影响最大，施工中应加强对拱底的监测；而水平位移增长相对缓慢。

4.考虑到围岩稳定性、钻眼精度要求、出渣量等因素影响，建议 II 级围岩不宜超过 4m 进尺。III 级围岩在循环进尺 3m 以内整体性较好。

参考文献(References)

- [1] 孙有为.地下洞室的几何性质对松动圈的影响[M]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2006. (Sun Youwei. Influence of geometry on the broken zone of underground cavity[M]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2006. (in Chinese))
- [2] 肖建清.爆破循环对围岩松动圈的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2248-2255. (Xiao Jianqing. Influence of blasting round on excavation damaged zone of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2248-2255. (in Chinese))
- [3] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等.巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21-32. (Dong Fangting, Song Hongwei, GUO Zhihong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21-32. (in Chinese))
- [4] Toper A Z, Kabongo G G, Stewart R D. The mechanism optimization and effects of preconditioning[J]. In Fragnlast-6, Johannesburg, south African Institute of Mining and Metallurgy, 1999: 1~13.
- [5] 肖明. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. 岩土力学. 2010, 31(8): 2613-2619. (Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting[J]. Rock and Soil Mechanics. 2010, 31(8): 2613-2619. (in Chinese))

Chinese))

- [6] 彭高殿. 爆破对隧道围岩及初期支护结构稳定性的影响研究[M]. 广西:广西大学, 2012. (PengGaodian.A study of the influence upon the stability of tunnel surroundingrocks and primary support structure played by explosion[M]. Guangxi:Guangxi University, 2012. (in Chinese))
- [7] 鲁岩. 围岩破碎圈的理论分析与实践[M]. 辽宁工程技术大学学报. 2007, 26(2): 219-221. (Lu Yan. Theoretical analysis and practice of fragmentation circle in surrounding rock[M]. Journal of Liaoning Technical University. 2007, 26(2):219-221. (in Chinese))

钢管约束再生混凝土柱力学性能综述

唐昀超, 冯文贤*, 蔡杨, 宝鼎晶
(广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要: 如何有效地减少废弃混凝土对环境造成的污染已成为人类共同面对的难题。节约资源, 废弃混凝土的再生循环利用成为研究热点, 人们已在建筑、桥梁和地下空间工程的应用方面展开了初步探索。首先, 简述了钢管约束再生混凝土柱的材料特性和工作性能; 然后, 从钢管 RAC 柱的长细比、截面类型, 材料的取代率和骨料类型、轴心受压和偏心受压等方面讨论了其轴压力学性能, 阐述了国内外学者对钢管约束再生混凝土柱力学性能最新研究成果; 成果表明, 在工程应用中的钢管约束再生混凝土柱是经济可行的, 并可减少对环境的污染; 最后, 提出了钢管约束再生混凝土柱需要进一步研究的问题, 对钢管约束再生混凝土柱的安全和经济应用提供了有益建议。

中图分类号:

文献标识码:

文章编号:

Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube Column: An Overview

Abstract: How to effectively decrease the environmental pollution induced by aggregate concrete waste has been a challenge facing human beings. Resource conservation and re-utilization of concrete waste has been research hotspot, and preliminary exploration has started among structure, bridge and underground space engineering application. First of all, material property and co-working performance of recycled aggregate concrete filled steel tube column(RACSTC) was introduced; then its axial mechanical behavior was discussed based on its slenderness ratio, cross-section type, replacement rate, aggregate type and eccentricity ratio. Moreover, the latest research results on mechanical behavior were elaborated. The results indicated that RACSTC's application in rural and urban areas was feasible in technology and economy, and also conducive to lessening pollution on farmland and environment. Finally, further research problems of recycled aggregate concrete of steel tube were put forward, constructive suggestions were proposed about safe and economic utilization of RACSTC.

Keywords: Steel tube column; Recycled aggregate concrete; Mechanical behavior; Long column; Stub column

作者简介: 唐昀超(1983-), 男, 湖南衡阳人, 研究生, 研究方向: 桥梁与隧道, 钢管再生混凝土。E-mail: ryan.twain@gmail.com

通信作者: 冯文贤(1962-), 女, 湖南常德人, 教授, 研究方向: 桥梁与隧道, 钢管约束再生混凝土。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278129);广东省自然科学基金资助项目(S2012010009615)

1 引言

如何有效地减少废弃混凝土对环境造成的污染已成为人类共同面对的难题。为了节约资源,废弃混凝土的再生循环利用在建筑、桥梁和空间工程的应用将势在必行。据统计,目前我国每年城市产出的建筑垃圾约为 60 亿吨,其中废弃混凝土约为 24 亿吨,已占建筑垃圾的 30%~40%^[1-2],大量未经处理的建筑垃圾严重污染环境。近年自然灾害频发,大量房屋倒塌产生的砖石、混凝土等材料如能就地再利用,将之粉碎冲洗再按粒径大小分级并按比例混合后作为粗骨料的替代物与水泥、水、外加剂等配制而成的再生混凝土,然后填充于钢管中,形成新型复合结构,既能解决废弃建筑垃圾的堆放问题,又能创造可观的经济效益,及减少对环境污染,实现绿色循环可持续发展。因再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)较之于普通混凝土有着孔隙率高吸水率大,其抗折比、折压比略大,强度较低,耐久性较差等不同,目前较多应用于公路路基,填充墙,砂浆面层、公园广场等。

国内外学者已对钢管约束 RAC 柱(简称钢管 RAC 柱)的性能展开大量实验和基础理论研究,国外对钢管约束 RAC 结构的研究始于 1997 年^[2-8],国内研究起步较晚,但也逐步应用到实际工程中。国内外研究主要集中在钢管 RAC 柱的静力学性能,轴压研究成果较多。对冲击与疲劳荷载以及爆炸作用下的试验和基础理论研究较少,钢管 RAC 柱是主要承重构件,其安全设计与可靠性研究也很重要,因此,钢管再生混凝土柱在空间结构和地下空间等领域的应用还较少。另外,对钢管 RAC 柱的抗火抗冻性能的探讨仍属起步阶段,系统理论有待进一步地研究。本文阐述了国内外学者对钢管约束再生混凝土柱力学性能,耐久性的最新研究成果,对其安全、应用和进一步研究提供了有益建议和参考。

2 钢管约束再生混凝土柱简介

钢管 RAC 柱利用 RAC 和钢管两种材料在受力中的相互作用,即钢管对 RAC 的约束作用使 RAC 处于复杂应力状态之下,使 RAC 的强度得以提高,塑性和韧性大为改善。钢管 RAC 柱的基本原理为:

(1) 利用钢管对核心 RAC 的约束作用,使混凝土处于三轴应力状态,以提高核心 RAC 的抗压强度、塑性变形等力学性能。

(2) 核心 RAC 的存在,提高了钢管的抗屈曲性能,增强了钢管几何稳定性,保证了钢材性能得以充分发挥,提高了结构的承载力。

钢管 RAC 柱承载力高,塑性、韧性好,耐火性能和抗震性能较好,不用模版施工简便,环保经济。

3 钢管再生混凝土柱的力学性能

3.1 抗压强度

Vivian W.Y.Tam、肖建庄、陈宗平、吴波、杨有福、王玉银、王清远等对钢管约束 RAC 柱的轴心受压、偏心受压以 RAC 取代率、截面形状、钢管材料为参数做了实验和理论分析^[9-16],研究者通过用优质钢管材料,改变柱的几何形状(如:短和长轴、圆和方钢等)、材料的取代率,增加新的成分等来探索柱的轴压力学性能。

3.1.1 轴向受压

钢管 RAC 柱在受压中,主要有轴向和偏心受压。轴向受压有短柱和长柱的试验、理论和有限元分析。

用优质钢材来约束 RAC,形成优质组件。Tam et.al^[9]对不锈钢管 RAC 柱的试验和有限元分析,认为钢管 RAC 柱结合了不锈钢和 RAC 的优点,其性能几乎和传统钢管混凝土柱一样好,另外,不锈钢还可以提高钢管混凝土柱的耐久性和韧性。

研究者对钢管 RAC 圆型短柱受压进行了试验,再与普通钢管混凝土柱比较,探索力学机制。肖建庄^[17]研究了轴压破坏形式,对 15 个钢管 RAC 圆柱作了轴压试验,钢管 RAC 柱受压后的变形

主要发生在试件中部,为鼓曲破坏,RAC发生斜剪破坏,钢管RAC柱与钢管普通混凝土柱受力机制类似,钢管套箍提高了RAC强度和变形性能。支正东^[18]用圆钢管RAC柱与钢管普通混凝土短柱进行轴压试验,认为长径比是影响钢管RAC短柱承载力和破坏形式的主要因素。

通过改变取代率来讨论力学性能。文献^[17-19]认为RAC取代率对轴压短柱的破坏形式影响小,取代率对轴压极限荷载有一定影响,它是随着取代率的增加而减小,对钢管RAC柱承载力影响大于钢管普通混凝土柱,但钢管RAC短柱的力学性能、破坏机理与特征和钢管混凝土柱相比差异较小。当RAC取代率超过50%时,文献^[19]认为目前规范使用的三种理论计算公式即套箍理论、统一理论和叠加理论三种计算结果偏于不安全,考虑收缩率对钢管稳定承载力和混凝土套箍作用的影响,提出了修正计算公式。研究表明^[17-19],取代率影响承载力降低的原因在于核心RAC的强度略低、弹性模量偏小和刚度偏低、收缩量大,导致混凝土的套箍作用减弱使钢管无法受到足够支撑,因承担更大荷载而较快达到屈服,从而降低了钢管RAC短柱轴压承载力。

为了补偿RAC的收缩性,相军^[20]、王振波^[21]研究了不同含量的膨胀剂制成钢管RAC短柱的轴压力学性能,认为膨胀剂能降低RAC收缩率,虽强度略降低,但提高了它对钢管支撑作用,因而提高了短柱的承载力。

通过改变构件几何参数来探索RACSTC的受力特点。文献^[11, 22-23]分别用圆钢和方钢进行了对比试验。陈宗平^[11]对33根钢管RAC柱进行了轴压试验,圆钢RAC柱为腰鼓状斜剪压破坏,方钢管RAC柱为斜压破坏,与钢管普通混凝土柱比较,钢管再生混凝土柱峰值应力和峰值应变有显著提高,且圆钢管较方钢管构件提高更大。陈宗平^[22]对11个方钢管RAC短柱进行轴压试验,其破坏机理和形态与普通方钢管混凝土短柱相似,呈斜压破坏。在对方钢管RAC短柱的计算方法上,采用统一强度理论、叠加计算理论的计算结果均偏安全。考虑到经济效益,文献^[22]建议用钟善桐^[23]的统一强度理论的计算式设计方钢管RAC短柱。

研究者探索了其它再生骨料的力学性能。陈梦成^[24]对钢管再生矿渣混凝土柱短柱进行轴压试验,圆钢试件呈腰鼓状或剪切型破坏。方钢试件表面有局部凸曲破坏,沿四个方向凸曲基本一致。钢管矿渣混凝土柱承载力不低于钢管再生普通混凝土柱。

为讨论长细比的影响,张向冈,陈宗平探索了长柱的力学性能^[25],对钢管RAC长柱进行轴压静力单调加载实验,结果表明长柱破坏形态为强度破坏和失稳破坏,全过程包括弹性阶段、屈服阶段、破坏阶段。再生混凝土取代率对长柱承载力仅有较小影响;长细比越大,长柱承载力越小,长细比对圆形钢管构件承载力影响较大,对方形钢管构件承载力影响较小。

3.1.2 偏心受压

偏心受压主要是对短柱和长柱的试验和理论分析。张卫东^[16]对钢管RAC短柱作了实验,认为RAC取代率是偏压承载力的影响因素。陈宗平^[26]用15个试件进行了偏心受压试验,而认为RAC取代率对偏压柱力学性能影响较小,偏心距和长细比对偏压柱力学性能影响较大,偏心距越大,极限承载力越小,延性变差;承载力随长细比增大而呈非线性降低;钢管RAC偏压柱的受力破坏过程经历了弹性、弹塑性和塑性阶段,为弯曲型破坏,达到峰值荷载后的下降段较为平缓,延性较好。钢管RAC柱承载力与钢管混凝土柱的偏压破坏形态相似,构件呈由跨中侧向变形控制的鼓曲破坏^[16,26]。

张向冈,陈宗平^[27]对20个钢管约束RAC长柱进行偏压静力单调加载试验。钢管约束RAC偏压长柱受力过程均经历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段,破坏形态主要为弹塑性失稳破坏。偏心距是影响极限承载力的主要因素。

Tang Yunchao^[21]等用有限元方法对轴心受压和偏心受压进行了仿真,仿真与试验结果对比表明,轴心受压承载力大于偏心承载力,仿真与试验结果较吻合,偏心轴向承载力与偏心距相关,偏心距小承载力大。仿真与试验结果有小的误差,但是在有效范围内。精确建模与仿真为轴向受力

提供了一种新的手段,通过仿真验证了计算方法和模型的有效性。

3.2 抗弯强度

杨有福^[28-30]对钢管RAC柱进行了抗弯试验、理论和有限元研究,结果表明钢管RAC柱抗弯性能仅略低于钢管普通混凝土柱,其破坏过程和破坏机理与钢管普通混凝土柱基本相同,钢管RAC柱也具有较高的延性和能量耗散性能,再生骨料取代率增大,柱受弯承载力有降低的趋势,因此在地震地区不超过50%RAC取代率的钢管RAC柱的应用是经济可行的。

3.3 抗剪强度

吴波^[31]对薄壁钢管RAC柱进行抗剪性能试验,给出了薄壁钢管RAC柱的受剪承载力计算式,试验表明,随着RAC取代率增加,试件的极限抗剪承载力逐渐下降。相比块体型钢管再生混合柱,节段型钢管再生混合柱具有高的极限抗剪承载力。

3.4 抗震性

抗震性研究为钢管再生混凝土柱在地下空间应用提供理论和试验支持,都是空间安全和可靠性的重要领域。黄一杰,肖建庄^[32]研究了钢管RAC柱的破坏形态和滞回特性,分析其承载力、刚度退化、延性、耗能能力、破坏形态等抗震性,认为钢管RAC柱具有良好的抗震性能。刘锋^[33]以再生粗骨料替代率为参数,研究和试验了圆钢管再生骨料混凝土柱拟静力特性,获得钢管RAC柱在水平地震荷载作用下的破坏形式、延性系数、滞回与耗能性能及其刚度退化规律,研究了钢管RAC抗震性能。试验表明再生骨料的使用使得滞回性能有所削弱,但削弱程度表现有所不同。

4、钢管再生混凝土柱的应用展望

RAC除了在公路路基,填充墙,砂浆面层、公园广场等应用外,钢管RAC是工程结构应用中的一种重要结构^[34]。构件间的优势互补,有广阔发展前景。

国外研究了薄壁钢管混凝土、高强材料的钢管混凝土在工程中应用^[35-36]。中空夹层钢管混凝土具有很好的延性和耗能能力,相同条件下,抗震性能从高到低分别是圆钢管、方钢管^[35]。随着深入研究,RAC加到新型高性能的材料、薄壁和中空夹层钢管混凝土柱结构中,组成新型钢管RAC柱,将满足工程需求^[34]。

钢管混凝土柱在地下空间的应用具有承受冲击波荷载和节材,减轻构件自重的优势,90年代用于大型人防工程^[37]。而因钢管RAC柱在抗震^[31]、抗压和抗弯等方面与钢管混凝土柱具有相近的特点,通过对其构件材料和参数的优化与改进、新型再生精细混凝土的特性与应用^[38]、动态冲击等性能的深入研究、精确建模与仿真方法应用,钢管RAC柱在地下空间的部份组合应用值得探索。

钢管RAC柱具有节能减排和减少环境污染,实现绿色低碳可持续发展的优势,在工程结构应用中具有良好的社会、经济效益和市场应用前景。

5 结论

本文阐述了钢管RAC柱的力学性能的研究进展。从钢管RAC柱的长细比、截面类型,材料的取代率和骨料类型、轴心受压和偏心受压等方面讨论了其轴压力学性能。然后,总结了不同参数的钢管RAC柱在受压后的特点,对于短柱,钢管RAC柱受压后的变形主要发生在试件中部的鼓曲破坏,其破坏形式与普通钢管混凝土柱相似;取代率对构件的极限轴压荷载有一定的影响;对于长柱,长细比对圆钢管构件承载力影响较大,对方钢管构件承载力影响较小。有着较低力学性能的RAC在与钢管组成复合结构后,发挥了钢管和RAC各自的优点,静力性能和抗震能力都较优秀,其各项性能都十分接近钢管普通混凝土柱。最后对钢管RAC柱在工程应用与研究进行了展望。

参考文献(References)

- [1] 陈卫明,郑玉莹,颜培松.再生混凝土的研究进展.中国建材科技,2009,(4):89-93(Chen Wei-ming,Zheng Yu-ying,Yan Pei-song, study on recycled aggregate concrete, China Building Materials Science & Technology, 2009,(4):89-93. (in Chinese))
- [2] Yunchao Tang, Wenxian Feng, Ye Zhang, Eccentric and Nonuniform Axial Force Analysis Based on Steel Tube Components of Recycled

- Resource[J], Key Engineering Materials (1013-9826) ,2014.579 – 580: 228-233.
- [3] L.J. Li, Z.B. Huang, F. Liu, A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables, Computers and Structures(0045-7949),2009.87(7-8):435–443.
- [4] J.F. Dong, Q.Y. Wang, Z.W. Guan, Structural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP Engineering Structures, 2013.48: 532-542.
- [5] Valeria Corinaldesi, Viviana Letelier, Giacomo Moriconi, Behaviour of beam–column joints made of recycled-aggregate concrete under cyclic loading, Construction and Building Materials, 2011.25(4): 1877–1882
- [6] Paula Folino, Hernán Xargay, Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression Original Research Article, Construction and Building Materials, 2014 56(15):21-31.
- [7] A.V. Alves, T.F. Vieira, J. de Brito, J.R. Correia, Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates Original Research Article, Construction and Building Materials, 2014.64(14): 103-113.
- [8] S.B. Marinković, M. Malešev, I. Ignjatović, 11 - Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates, Eco-Efficient Construction and Building Materials, 2014: 239-266.
- [9] Vivian W. Y. Tam, Zhi-Bin Wang, Zhong Tao, Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns, Materials and Structures, January, 2014. 47(1)-2:293-310.
- [10] Jianzhuang Xiao, Wengui Li, Yuhui Fana, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China(1996-2011), Construction and Building Materials .2012.31 (6) 364–383.
- [11] Zongping Chen, Jinjun Xu, Jianyang Xue, Yisheng Su. Performance and calculations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression. International Journal of Steel Structures. 2014.14(1) :31-42.
- [12] Bo Wu, Xin-Yu Zhao, Jin-Suo Zhang, et al. Cyclic testing of thin-walled circular steel tubular columns filled with demolished concrete blocks and fresh concrete, Thin-Walled Structures, 2013.66:50-61.
- [13] Yang You-Fu. Behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns under long-term sustained loads. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(2): 189-206.
- [14] 王玉银,陈杰, 纵斌, 耿悦, 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究, 建筑结构学报, 2011.32(12):170-177.(WANG Yuyin, CHEN Jie, ZONG Bin, GENG Yue, Mechanical behavior of axially loaded recycled aggregate concrete filled steel tubular stubs and reinforced recycled aggregate concrete stubs, Journal of Building Structures, 2011.32(12):170-177. (in Chinese))
- [15] 邱慈长,王清远,石膏爽,欧阳雯欣,薄壁钢管再生混凝土轴压实验研究,实验力学,2011.26(1):88-94. (QIU Ci-chang, WANG Qing-yuan, SHI Xiao-shuang, OUYANG Wen-xin, Experimental Investigation on the Behavior of Recycle Concrete-Filled Thin-Walled Steel Tube under Axial Compression, JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS.2011.26(1):88-94. (in Chinese))
- [16] 张卫东,王振波,丁海军,钢管再生混凝土短柱偏压性能实验,大庆石油学院学报,2011.35(5):88-96. (ZHANG Wei-dong, WANG Zhen-bo, DING Hai-jun, Experimental study of the behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubes under eccentric compression 2011,35(5):88-91(in Chinese))
- [17] 肖建庄,杨洁,黄一杰等.钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J],建筑结构学报,2011.32(6):92-98. (XIAO Jianzhuang, YANG Jie, HUANG Yijie, WANG Zhengping, Experimental Study on Recycled Concrete Confined by Steel Tube under Axial Compression, Journal of Building Structures, 2011.32(6):92-98. (in Chinese))
- [18] 支正东,张大长,徐恩祥,陈恺.钢管再生混凝土短柱轴压性能试验研究.工业建筑 2012.42(12):91-95.(Zhi Zhengdong, Zhang Dachang, Xu Enxiang, Chen Kai, Experimental Study on The Behavior of Steel Tube Short Columns Filled with Recycled Concrete Under Axial Compression. Industrial Construction 2012.42(12):91-95 (in Chinese))
- [19] 张卫东.小径厚比钢管再生混凝土短柱轴压性能研究,建筑结构,2012. 42(12). (Zhang Weidong, Wang Zhenbo, Ding Haijun, Study on the behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubes with small diameter-thickness ratio under axial compression, 2012. 42(12). (in Chinese))
- [20] 相军,张卫东,华竹君,再生混凝土收缩补偿及其钢管混凝土轴压短柱试验研究,建筑钢结构进展,2013.15(6):52-57. (XIANG Jun,

- ZHANG Wei-dong, HUA Zhu-jun, An Experimental Study on Shrinkage Compensating of Recycled Aggregate Concrete and Axial Compression of Concrete Filled Steel Tubular Short Columns. *Progress in Steel Building Structures*. 2013.15(6):52-57.(in Chinese)).
- [21] 王振波, 刘飞, 华竹君, 孙青, 膨胀剂对钢管再生混凝土柱轴压性能影响的试验研究, *混凝土与水泥制品*, 2014.1: 44-46. (Experimental Study of Expansive Agent's Impact on the Axial Compression Performance of Recycled Concrete Filled Steel Tube . 2014.1: 44-46. Column(in Chinese))
- [22] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 苏益声, 方钢管再生混凝土短柱轴压承载性能试验研究. *工程力学* 2013.30(8):35-41. (KE Xiao-jun , CHEN Zong-ping , XUE Jian-yang , SU Yi-sheng, Experimental study of the bearing capacity of recycled aggregate concrete-filled square steel tube short columns under axial compression. *Engineering Mechanics*.2013.30(8):35-41(in Chinese))
- [23] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2006. (Zhong Shantong. Concrete filled steel tube unified theory-research and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.(in Chinese))
- [24] 陈梦成, 刘京剑, 黄宏, 钢管再生矿渣混凝土轴压短柱试验研究, *建筑结构学报*.2013.34(s1)280-287. (CHEN Mengcheng, LIU Jingjian, HUANG Hong, Experimental study on recycled slag aggregate concrete-filled steel tubular columns under axial compression. *Journal of Building Structures*. 2013.34(s1)280-287. (in Chinese))
- [25] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 苏益声, 范杰, 钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析, *建筑结构学报*.2012.33(9):12-20. (ZHANG Xianggang , CHEN Zongping, XUE Jianyang, SU Yisheng, FAN Jie, Experimental study and mechanical behavior analysis of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns under axial compression, *Journal of Building Structures*, 2012.33(9):12-20.(in Chinese))
- [26] 陈宗平 李启良 张向冈 薛建阳 陈宝春, 钢管再生混凝土偏压柱受力性能及承载力计算[J], *土木工程学报*, 2012 .10.45-10:72-80. (Chen Zongping, Li Qiliang, Zhang Xianggang, Xue Jianyang, Chen Baochun, Mechanical behavior and bearing capacity calculation of recycled aggregate concrete-filled circular steel tube columns under eccentric loading. *CHINA CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, 2012 .10.45-10:72-80.(in Chinese))
- [27] 张向冈, 陈宗平, 王讲美, 薛建阳, 郑述芳, 李启良, 苏益声, 钢管再生混凝土长柱偏压性能研究, *工程力学*, 2013.3.30-3.331-340. (ZHANG Xiang-gang, CHEN Zong-ping, WANG Jiang-mei, XUE Jian-yang , ZHEHN Shu-fang, LI Qi-liang , SU Yi-sheng, Study on eccentric compression behaviors of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns. *Engineering Mechanics*, 2013.3.30-3.331-340.(in Chinese))
- [28] 杨有福, 马国梁, 不锈钢管再生混凝土弯曲性能, *大连理工大学学报*, 2013 53. (4): 572-579. (Flexural performance of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube, *Journal of Dalian University of Technology* 2013 53. (4): 572-579. (in Chinese))
- [29] You-Fu Yang, Guo-Liang Ma, Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams, *Thin-Walled Structures*, 2013. 66(5): 62-75.
- [30] Yang You-Fu, Han Lin-Hai, Zhu Lin-Tao. Experimental performance of recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular columns subjected to cyclic flexural loadings. *Advances in Structural Engineering*, 2009, 12(2): 183-194.
- [31] 吴波, 许拈, 刘琼祥, 刘伟. 薄壁钢管再生混合柱的抗剪性能试验[J]. *土木工程学报*, 2010, (09):12-21. (Wu Bo, Xu Zhe, Liu Qiongxiang, Liu Wei. Test of the shear behavior of the wall steel tubular columns filled with demolished concrete segments/lumps. *China Civil Engineering Journal*, 2010, (09):12-21.(in Chinese))
- [32] 黄一杰, 肖建庄. 钢管再生混凝土柱抗震性能与损伤评价, *同济大学学报*.2013.41(3):330-335. (HUANG Yijie, XIAO Jianzhang. Seismic Behavior and Damage Assessment of Recycled Aggregate Concrete filled Steel Tube Columns, *Journal of Tongji University(Natural Science)* 2013.41(3):330-335. (in Chinese)).
- [33] 刘锋, 余银银, 李丽娟. 钢管再生骨料混凝土柱抗震性能研究, *土木工程学报*.2013.46(s2):178-184.
- [34] 石膏爽, 王清远, 从灾后重建探讨再生混凝土的研究现状及其应用发展, *四川大学学报(工程科学版)* 2009, 41 (31): 301-310. (SHI Xiao-shuang, WANG Qing-yuan, A Research Review and Application Outlook of RAC from Post-earthquake Reconstruction *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)* 2009, 41 (31): 301-310. (in Chinese))
- [35] Li, W., Han, L.H. and Zhao, X.L. Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns, *Thin-Walled Structures*, 2012.57: 37-48.

- [36] Al-Zubaidy, H., Zhao, X.L and Al-Mahaidi, R. Experimental Evaluation of the Dynamic Bond Strength between CFRP Sheets and Steel under Direct Tensile Loads, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013.40(1): 89-102.
- [37] 沈志敏, 钢管混凝土柱在人防工程中的应用, *地下空间*, 1993.13 (2): 100-107. (Shen Zhi-min, Application of concrete filled steel tube column in the field of civil air defense ventilation engineering 1993.13 (2): 100-107. (in Chinese))
- [38] Sun-Woo Kim, Hyun-Do Yun ,Evaluation of the bond behavior of steel reinforcing bars in recycled fine aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites* 2014.46: 8–18.

衬砌错台裂损隧道预应力加固与安全性分析

张靖炜

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 二次衬结构作为 III 类及以下围岩中隧道主要承载结构和最后的防水措施, 其结构安全性有着重要作用。首先从实际工程出发说明了衬砌错台裂损的潜在重大危险性, 设计了预应力加固治理方案, 初步拟定预应力参数值。按普氏地压理论计算隧道围岩松动压力, 应用有限元软件对结构内力进行数值计算, 基于结果计算控制点处安全系数, 校核结构强度。最后通过对比加固前后结构安全系数证明预应力设计方案是可行的。

关键词: 隧道衬砌; 错台裂损; 预应力加固; 数值模拟; 安全性

中文分类号: U47

文献标示码: A

文章编号:

Pre-stressed Reinforcement and Safety Analysis of Tunnel Lining with Dislocation and Cracks

Zhang JingWei

(Civil Engineering School, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Safety of secondary lining is of utmost importance to tunnel engineering quality as the main bearing structure and the last water-prevent line for rock types I, II, III. This paper firstly illustrates the potential risk of dislocation crack damage of lining taking the practical engineering as the example. Then the plan of pre-stressed reinforcement is designed and parameters are determined. The rock stress on secondary lining of a tunnel is obtained, according to P's theory. The key point safety coefficient is calculated by internal stress obtained by using finite element software to check structure strength. Finally, the scheme is proved to be feasible.

Key words: Tunnel lining; dislocation crack; pre-stressed reinforcement; numerical simulation; safety

0 引言

随着运营时间的增长, 既有线隧道会出现不同类型不同程度的病害特征。其中衬砌裂损就是主要的病害隐患, 由此导致的隧道渗漏水, 裂隙大面积发育促使的衬砌塌落掉块等时有发生。这将直接影响隧道的使用性能, 甚至危机到行车安全, 减少隧道使用寿命。对衬砌错台裂损的整治更应该引起足够的重视, 因为这一病害的发生往往是一系列其他病害及围岩应力重分布、不良地质等因素诱发的。自上世纪60年代以来, 国内外很多专家学者做了这方面的研究工作, 取得了很多成果。其中, 如钱志雄等^[3]根据某具体隧道的检测、量测结果, 建立有限元模型, 计算分析了其结构安全性并推荐了相应的加固方案。王勇^[4]利用工程断裂判据, 分析了带裂缝衬砌截面的安全性。刘庭金等^[1]分别建立了衬砌背后空洞的有限元计算模型, 探讨了衬砌背后空洞存在对衬砌结构承载能力的影响规律。刘永华^[5]利用荷载-结构模型和实际隧道统计参数, 详细探讨了衬砌拱顶存在空洞, 衬砌厚度不足, 裂缝时的结构可靠性。本文主要围绕实际工程案例, 针对衬砌错台裂损预应力加固整治过程中相关方案和参数取值做了研究和探讨。

1 工程概况

本隧道为客货共线, 旅客列车设计行车速度 160km/h 双线隧道。隧道大部位于IV级围岩中, 部分及洞口段位于V级围岩中。围岩性质为弱风化泥岩夹砂岩。

隧道洞身标K0+435~+444段左右两侧沿混凝土间歇缝似对称纵向开裂、右隐左显, 左拱顶裂缝(大坍落度混凝土间隙缝)纵向呈缓坡人字型, 缝宽(实为上下错台)自尖顶15mm, 向前后渐次演变为13、10、8、6mm, 该缝呈水平状态, 深度大于20mm, 并在该缝两端可见不同期水泥浆溢出痕迹; 自+438.5左大跨下0.5m向小里程方向与横断面呈约30度夹角发育一条宽约1~

2mm的裂缝，延伸至右拱腰环向施工缝处，该缝与左拱顶裂缝近十字交叉，使该环衬砌几乎块状破坏，随时可能发生悬臂断裂或脱落或崩塌。

2 预应力加固措施

隧道左拱顶纵向裂缝产生错台的主要原因有：K0+435~+444段左、右拱顶有在新建时形成的纵向间歇缝，左拱顶背后脱空致上方岩体脱落和泥岩微膨胀后造成附加荷载作用于衬砌结构。方案见图1。

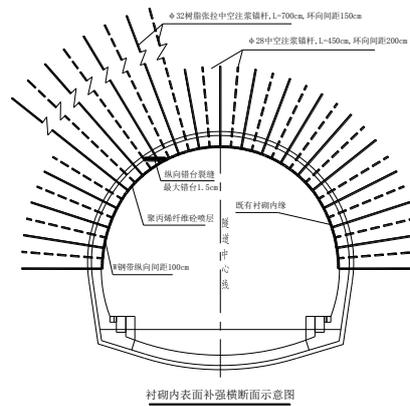


图 1 整治设计方案

Fig. 1 Design of governance

(1) 左拱顶纵向裂缝上下侧各布置2排 $\phi 32$ 树脂张拉中空注浆锚杆，纵、环向间距1.5m；施加200kN的预应力作用于错台裂损段，起到加强锚固作用。

(2) 大跨以上拱墙设置纵向间距1m的W钢带，除左拱顶纵向裂缝上下2.5m范围内W钢带用间距0.5m的钎钉或短锚固定外，其余W钢带用长4.5m、间距1.5~2.0m、 $\phi 28$ 自进式中空注浆锚杆固定；

(3) W钢带加固区铺设 $\phi 6$ 、10cm \times 10cm钢筋网；

(4) 分层喷射8cm聚丙烯纤维混凝土。

3 合理参数的确定

3.1 计算模式选取

本文采用惯用的荷载—结构模式计算，地层与衬砌作用考虑无拉的全周地层弹簧模拟。初支和二衬之间的力的传递按组合梁考虑。计算中采用只受压或拉压弹簧连接方式。结构计算按破损阶段法进行。

3.2 物理力学参数

病害段围岩类别有IV级、V级，围岩及结构物理力学参数见表1

表 1 围岩及结构物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of surrounding rock and structure

结构形式	E(GPa)	γ (KN/m ³)	Φ (°)	K(MPa)
		ν		

结构形式	E(G Pa)	γ (KN/m ³)	ν	Φ (°)	K(M Pa)
强风					
化泥岩夹砂岩	2.0	0.40	22	46	300
弱风					
化泥岩夹砂岩	6.0	0.33	23	55	400
C25混凝土	29.5	0.20	23		/
土					/

3.3 计算模型选取

(1) 埋深及围岩松动压力计算

本段隧道最小埋深为36.95m，为深埋隧道，隧道开挖宽度为12.98m。根据《铁路隧道设计规范》及普氏理论，计算围岩松动压力：

$$q_1 = \gamma b = \frac{\gamma a_1}{f} \quad (1)$$

$$e_1 = \gamma b \lg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (2)$$

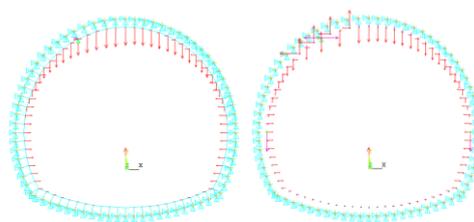
$$e_2 = \gamma(b+h) \lg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (3)$$

式中：b 自然平衡拱最大高度； a_1 ：自然拱最大跨度。按 $a_1 = a + h \lg(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$ 计算； f ：坚固（普氏）

系数； γ ：围岩重度； φ ：内摩擦角；

(2) 计算模型

对二衬结构采用梁单元，弹性地基采用弹簧单元模拟，左拱顶错台裂缝处铰结。衬砌裂损加固前后计算模型见图 2。



(a)加固前模型

(b)加固后模型

图 2 结构计算模型

Fig. 2 The calculating model of structure

3.4 计算结果

(1) 衬砌裂损状态下结构内力见图 3~4。

图 3 裂损状态轴力图 (N)

Fig. 3 Axial force of crack (N)

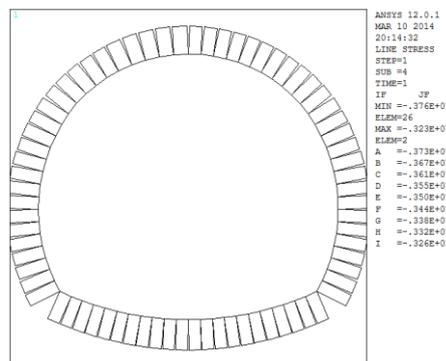
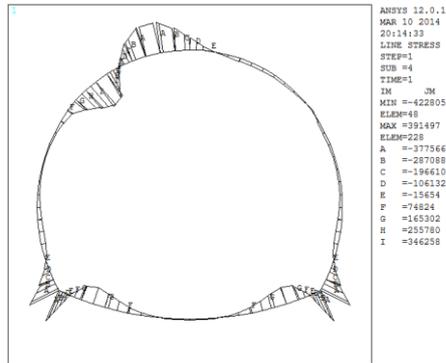


图 4 裂损状态弯矩图 (N.m)

Fig. 4 Bending moment of crack (N.m)

(2) 施作预应力 20t 的树脂张拉锚杆+大跨上 8cm 喷纤维混凝土等加固措施后, 结构内力见图 5~6。

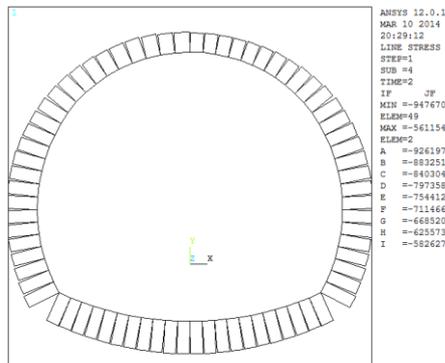


图 5 预应力加固后轴力图 (N)

Fig. 5 Axial force of pre-stressed reinforcement (N)

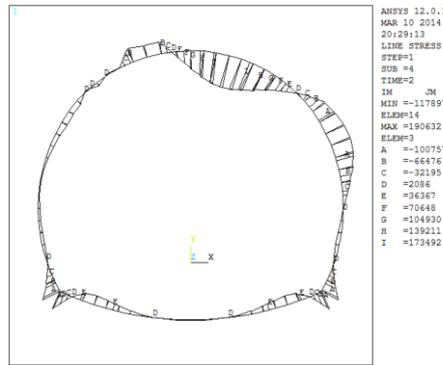


图 6 预应力加固后弯矩图 (N.m)

Fig. 6 Bending moment of pre-stressed reinforcement (N.m)

4 结构安全性评价

为分析加固前后对衬砌安全性的影响，根据上述内力结果计算衬砌结构的安全系数，对衬砌的安全性能进行评价。根据《公路隧道设计规范》(JTJ026-90)规定，混凝土偏心受压构件按破坏阶段进行强度验算。具体计算方法为根据材料的极限强度，计算出偏心受压构件的极限承载力 N 极限，与实际内力相比较，得出截面的抗压(或抗拉)强度安全系数，检查其是否满足文献的要求，即：

$$K = N_{\text{极限}} / N \geq K_{\text{规}} \quad (4)$$

当由抗压强度控制，即 $e = M / N \leq 0.2h$ 时：

$$N_{\text{极限}} = \varphi \alpha R_a b h \quad (5)$$

式中： φ 为构件纵向系数，隧道衬砌取 1； R_a 为混凝土极限抗压强度； α 为轴力的偏心影响系

数，按 $\alpha = 1 - 1.5 \cdot e / h$ 确定； b 为截面宽度，取为 1m； h 为截面厚度；

当由抗拉强度控制，即 $e = M / N \geq 0.2h$ 时：

$$N_{\text{极限}} = \varphi \frac{1.75 R_t b h}{\frac{6e}{h} - 1} \quad (6)$$

式中： R_t 为混凝土极限抗拉强度。

根据以上公式，计算了加固前后控制点安全系数，列于表 2~3 中，并绘制对照曲线图 3。

表 2 加固前控制点安全性检算表

Table 2 Security of control points before strengthening

位置	弯矩 (N·m)	轴力 (N)	e_0 (m) 偏心距	安全系数	备注
左拱顶	-445249	-3.38E+06	0.132	1.6	不满足
左拱腰	328814	-3.46E+06	0.095	2.1	
墙脚	-445249	-3.93E+06	0.113	1.6	不满足

仰拱	156800	-3.77E+06	0.042	2.5
----	--------	-----------	-------	-----

表 3 加固后控制点安全性检算表

Table 3 Security of control points after strengthening

位置	弯矩 (N·m)	轴力 (N)	e_0 (m) 偏心距	安全系数	备注
左拱顶	1.91E+05	-6.90E+05	0.276	2.0	
左拱腰	-2.32E+05	-1.62E+06	0.144	4.3	
墙脚	-2.13E+05	-1.83E+06	0.117	4.5	
仰拱	1.05E+05	-1.72E+06	0.061	6.1	

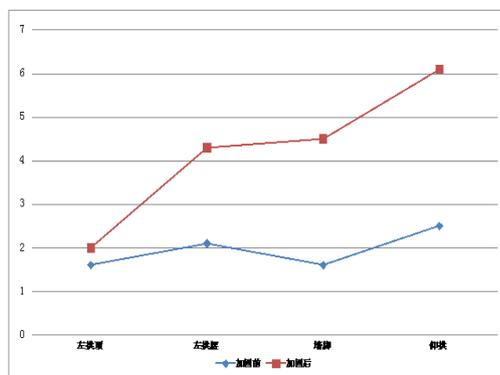


图 7 加固前后结构安全性比较

Fig. 7 Security of structure compared with before and after of strengthenin

5 结论

(1) 衬砌错台裂损病害的发生导致149节点区域处应力集中明显，且该处为病害点，衬砌本身强度已大大降低，左拱顶安全系数低于规范值2；同时导致隧道围岩压力重分布，其他控制节点处的应力也有不同程度集中，衬砌安全储备低，墙角处安全系数也低于规范值。随时可能发生悬臂断裂或崩塌，且不可预见，已严重危及行车安全。

(2) 采用预应力树脂张拉锚杆及大跨以上全环结构补强措施后，应力集中区移至衬砌结构较好的右拱顶，加之右侧也得到了补强，所以安全系数验算较补强前有明显提升，几处关键节点的安全系数均满足规范值。可见预应力加固方案具有可行性，20kn 预应力参数取值的合理性。

参考文献(References)

- [1] 刘庭金,朱合华,丁文其.某高速隧道二次衬砌安全性分析[J].岩石力学与工程学报,2004(2),75-78(LIU Tingjin, ZHU Hehua, DING Wenqi. Safety analysis of highway tunnel [J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering Vol23(2), 75-78.(in Chinese))
- [2] 聂智平,朱少华,赵白文,等关于某隧道群病害原因分析及结构安全性评估[J].华中科技大学学报:城市科学版,2003(9):42-45.(NIE Zhi-ping, ZHU Shaohua, ZHAO Wenguang, et al. Disease analysis and safety evaluation of a highway tunnel group [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition,2003(9):42-45.(in Chinese))
- [3] 钱志雄,杨勇翔,郑颖人.朝天门隧道大正段安全性评估研究[J].重庆建筑,2001(3):13-17.(QIAN Zhixiong, YANG Yongxiang, ZHENG

- Ying-ren. Study on safety evaluation of Dazheng section in Chaotianmen tunnel [J]. Chongqing Construction, 2001 (3):13-17.(in Chinese)
- [4] 王勇.隧道施工数值模拟及衬砌强度安全系数分析[J].岩土工程技术, 2004 (10) :258 — 262.(WANG Yong. Numerical simulation on tunnel construction and security analysis of the lining structure strength[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004(10):258 262.(in Chinese))
- [5] 刘永华.高速公路隧道安全性评价研究[D].成都:西南交通大学, 2004.(LIU Yong-hua. Study on safety estimation of express-way tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004).
- [6] 王春景, 雷明锋, 彭立敏.病害隧道结构安全性评价模型与方法[J].铁道科学与工程学报, 2011,8 (3) :53 — 58.(WANG Chuning, LEI Mingfeng, PENG Li-min. Safety evaluation model and method of tunnel disease structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(3) :53 — 58.(in Chinese))
- [7] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等.蕉溪岭公路隧道群病害治理工程设计[J].地下空间与工程学报, 2008 , 4(7):1 357 — 1 362.(LEI Mingfeng, PENG Li-min, SHI Cheng-hua, et al. Engineering design of disease treatment in Jiaoxiling road tunnel groups [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering ,2008 , 4 (7):1 357 — 1 362.(in Chinese))
- [8] 重庆交通科研设计院.JTJ D70-2004 公路隧道设计规范[S].北京人民交通出版社, 2004.
- [9] 铁路第二勘察设计院.TB 10003 -2005 铁路隧道设计规范[S].北京中国铁道出版社, 2005.
- [10] 四川西南交大土木工程设计有限公司.达成铁路苟家沟隧道 K0+435~+444 衬砌裂损段整治施工图设计[R].成都:四川西南交大土木工程设计有限公司, 2014.

地铁盾构隧道对既有铁路箱涵的安全影响分析

王凯 蒋玉龙 何一韬

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司 武汉 430056)

摘要: 针对武汉轨道交通 3 号线二七路站~兴业路站盾构区间下穿合武上行线动车所特大桥钢筋混凝土箱涵工程, 成功运用施工影响数值模拟预测、控制标准及保护方案制定、监测反馈等方法, 进行施工全过程安全影响分析。数值分析结果表明, 箱涵轨面最大沉降为 5.637mm, 两钢轨之间最大沉降差为 1.116mm; 箱涵底板的最大沉降为 11.759mm, 相邻腹板底最大沉降差为 4.792mm; 临近的 41#墩桩基最大水平位移为 2.962mm, 桩顶最大沉降为 2.628mm。盾构施工对铁路箱涵的轨面沉降和箱涵变形影响均在控制标准以内, 采取合理的施工措施后, 盾构施工对既有铁路的影响较小。

关键词: 盾构隧道 铁路 穿越工程

Safety Analysis on Metro Shield Tunnel Under-crossing Existing Railway Box Culvert

Wang Kai Jiang Yulong He Yitao

(CCCC Second Highway Consultant Co. Ltd, Wuhan, 430056)

Abstract: Aimed at shield tunnel engineering between Erqi Road Station and Xingye Road Station in Line 3 of Wuhan Metro, which under crossing the box culvert in Grand Bridge of EMU Depots for the uplink of Hefei-Wuhan Railway, safety analysis for whole construction process is carried out with several methods, including simulation and prediction of construction effect, made of control criterion and protection scheme, monitor and feedback. Numerical analysis results show that the maximum deposition of track is 5.637 mm, and the maximum difference between two tracks is 1.116 mm. The maximum deposition of bottom plate of box culvert is 11.759 mm, and the maximum difference between two webs is 4.792mm. The maximum horizontal displacement of piles of neighboring No.41 Pier is 2.962 mm, and their maximum deposition is 2.628 mm. The effect of shield tunnel construction on track deposition and box culvert displacement is within the control criterion and becomes smaller after adoption reasonable measures.

Key words: shield tunnelling; railway; crossing engineering

1 前言

随着城市轨道交通网络化的发展, 新建区间隧道设计施工中会不断遇到穿越既有建(构)筑物的问题。当盾构区间隧道下穿既有建(构)筑物时, 会引起既有建(构)筑物的附加应力和附加变形等环境风险^[1]。尤其是下穿铁路箱涵这种对轨面沉降和构筑物附加变形要求非常严格的既有构筑物的情况, 施工产生的环境风险将影响环境安全及工程本身的安全, 并可能造成严重的经济损失和社会影响。因此, 对盾构区间隧道下穿铁路箱涵施工产生的安全风险进行全面评估是非常必要的。

目前, 国内工程技术人员和相关学者对地铁区间隧道下穿铁路箱涵施工引起的安全风险进行了一些有意义的研究工作。陈学峰等^[2]采用荷载结构模型及连续介质力学模型分别对京山线 K9+006 北京市南中轴路 4 孔框架铁路顶桥受下穿规划北京地铁 8 号线区间隧道施工影响所产生的沉降及内力变化进行计算分析, 并据此提出下穿框架式地道桥的地铁区间的设计及施工的有关技术要求。徐彰杰^[3]针对北京地铁 15 号线顺义~石门区间穿越京承铁路既有箱涵的现场条件, 通过数值计算, 分析了土舱压力、注浆压力、注浆效果对盾尾和开挖面土体塑性区分布、演化过程、地表沉降的影响, 分析了盾构法穿越施工对既有铁路箱涵变形和应力应变的影响, 并结合现场监测结果与数值计算结果的对比分析, 对主要掘进参数进行了讨论, 提出了减小施工扰动的措施。

晏成^[4]结合天津地铁3号线华苑站~王顶堤站盾构区间下穿国铁陈塘庄支线框架桥工程,采用连续介质模型,模拟盾构2次穿越框架桥基础的地层变形、结构位移,考虑地层变形、结构位移引起的附加作用,采用荷载结构模型检算既有框架桥结构受力状态,对新建地铁盾构隧道施工对既有框架桥的影响进行分析预测,评估工程安全性,对施工中采用的工程措施及对策提出建议。尽管对地铁区间隧道下穿铁路箱涵施工引起的安全风险研究取得了一些有应用价值的成果,但目前的研究一般基于二维数值分析的结果,而二维模型无法实现施工过程的详细模拟,因此,对地铁区间隧道下穿铁路箱涵施工的安全风险开展三维数值模拟研究很有必要。

本文针对武汉轨道交通3号线二七路站~兴业路站盾构区间下穿合武上行线动车所特大桥钢筋混凝土箱涵结构施工,根据设计及地质资料,建立三维数值模型进行不同工况下盾构施工对合武上行线动车所特大桥钢筋混凝土箱涵的影响分析,根据数值分析结果提出建议的二兴区间穿越合武上行线轨道控制标准,并提出相应的施工安全保护和控制措施。

2 工程概况

合武上行线位于沪汉蓉快速铁路中段,为国家I级双线铁路,设计时速250km/h。合武上行线动车所特大桥第38~41联为钢筋混凝土箱涵结构,箱涵底板埋深在地面以下1.5~2.5m,箱涵高度为7.2m~8m,第41~44联为3×8m钢筋混凝土连续刚构,基础为直径1m的单排钻孔桩。二兴区间左右线隧道均从合武上行线动车所特大桥第38~41联钢筋混凝土箱涵下方穿过,与箱涵结构底部最小净距12.0m,区间右线与第38#墩桩基最小平面距离为40.19m,左线与第41#墩桩基最小平面距离为14.02m。合武上行线动车所特大桥与二兴盾构区间相对位置关系见图1。

在二兴区间盾构隧道下穿段,合武上行线动车所特大桥地基为软土地基,国铁原设计已采用旋喷桩加固,桩间距1.1m×1.0m(纵向间距1.1m,横向间距1.0m),正方形布置,自框架基础两端边缘向中心布桩,基础内共布桩6排,基础外两侧布桩各2排,横向共布设10排桩,如图2所示。旋喷桩成桩直径为0.50m,桩长17m~17.6m,桩底标高6.9m。

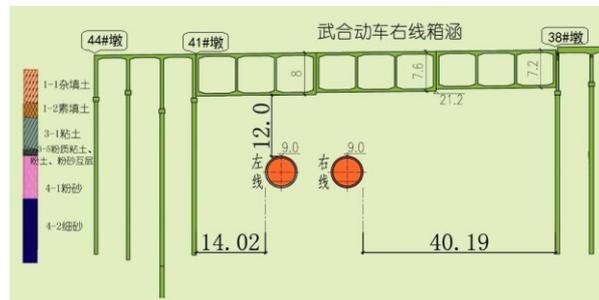


图1 区间盾构隧道与合武上行线相对位置关系

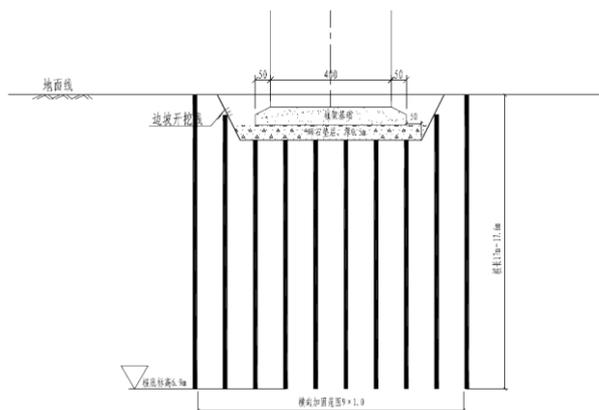


图2 合武上行线路基横向加固图

3 数值分析

3.1 计算模型

取二兴区间与合武上行线动车所特大桥相交处地铁线路里程右 CK23+789 截面为计算模型的 xy 平面, 选取合武上行线动车所特大桥第 38 号墩至第 44 号墩桥跨结构建立计算模型。为了进行三维动态施工情况的模拟以及考虑隧道开挖的端部效应, 模型取纵向 60m 进行模拟计算, 隧道结构和关心部位附近采用小尺寸单元进行加密。整个计算范围为 120 m×60m×80 m, 整个模型网格划分如图 3 所示, 模型内部结构如图 4 所示, 计算模型共包括 528442 个节点, 505308 个单元。计算模型中, 地层采用实体单元模拟, 力学模型为 Mohr-Coulomb 塑性模型; 管片采用 shell 单元模拟, 力学模型为各向同性弹性体模型; 合武上行线动车所特大桥钢筋混凝土箱涵及钢筋混凝土刚构、承台、钻孔桩均采用实体单元模拟, 力学模型为各向同性弹性体模型。计算模型四周边界采用滚轴约束, 下表面采用固定约束, 上表面采用自由约束。

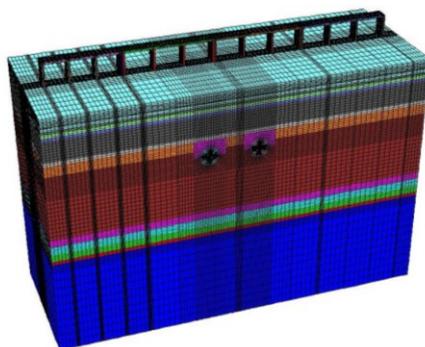


图 3 二兴区间下穿合武上行线动车所特大桥计算模型图

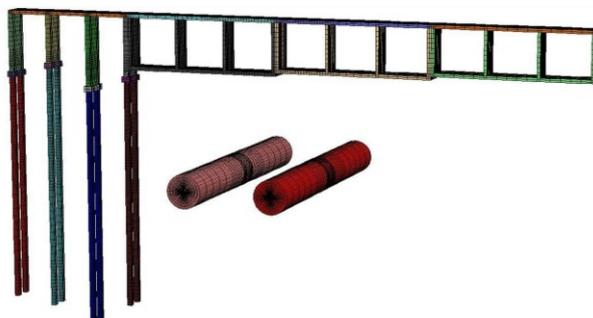


图 4 模型内部区间与动车所特大桥的位置关系图

3.2 计算参数

根据二兴区间岩土工程详细勘察报告中各土层的岩土物理力学参数的建议值表, 对计算模型中各土层的计算参数取值见表 1。

列车竖向静活载采用 ZK 活载^[5], 动力系数参照《高速铁路设计规范(试行)》(TB10621-2009)^[6]取值。

表 1 围岩计算参数

项目 地层	厚度 (m)	容重 γ (kN/m)	弹性模量 E(Mpa)	粘聚力 c (kpa)	内摩擦角 ϕ (°)	泊松比 μ
1-1 杂填土	4.5	1870	10	10	16	0.30
1-2 素填土	1.6	1870	12.5	13	6	0.30
1-3 淤泥	1.0	1740	9	10	5.5	0.37
3-1 粘土	6.7	1860	30	23	10	0.33
3-5 粉质粘土、粉土、粉砂互层	1.3	1930	37.5	10	16	0.30
4-1 粉砂	3.3	1920	65	0	30	0.29

4-2 粉细砂	21.3	1910	77.5	0	32	0.29
4-2b 含砾中粗砂	3.6	2000	135	0	35	0.29
4-2 粉细砂	2.7	1910	77.5	0	32	0.29
5 圆砾、卵石、漂石	2.3	2000	130	0	38	0.28
强风化泥岩	1.2	2410	180	0	50	0.25
中风化泥岩	31.7	2430	984	0	60	0.25

3.3 计算工况

计算共分以下 6 个工况进行施工状态模拟：1) 左线盾构开挖 20m，到达合武上行线前方；2) 左线盾构继续掘进 20m，穿过合武上行线；3) 左线盾构完全通过；4) 右线盾构开挖 20m，到达合武上行线前方；5) 右线盾构继续掘进 20m，穿过合武上行线；6) 右线盾构完全通过。

3.4 计算结果分析

3.4.1 箱涵变形分析

为具体分析二兴区间左、右线盾构隧道下穿对合武上行线动车所特大桥箱涵变形的影响，按不考虑地基加固作用和考虑地基加固作用两种情况进行箱涵的位移分析。图 5~图 7 和图 8~图 10 分别显示了不考虑地基加固作用和考虑地基加固作用下二兴区间、右线盾构隧道先后通过合武上行线动车所特大桥时 38~41 联箱涵底板底面 x 方向沉降过程曲线。从图中可以看出：

(1) 无论是否考虑地基加固作用，随着左右线盾构隧道的先后开挖，38~41 联箱涵底板底面 x 方向沉降逐步增大，其中 38~39 联箱涵底板沉降最小，左线轴线正上方 40~41 联箱涵底板沉降最大。

(2) 不考虑旋喷桩地基加固作用时，40 号轴线处底板沉降值为 9.789mm，相邻第一块腹板对应底板处沉降值为 15.190mm，相邻第二块腹板对应底板处沉降值为 8.098mm，41 号轴线处底板沉降值为 2.917mm。

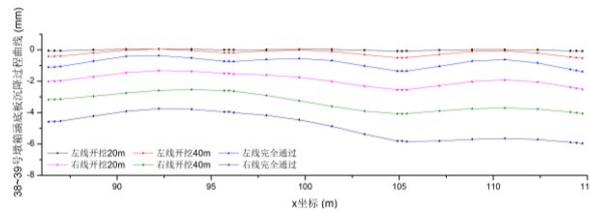


图 5 不考虑地基加固时 38~39 联箱涵底板 x 方向沉降曲线

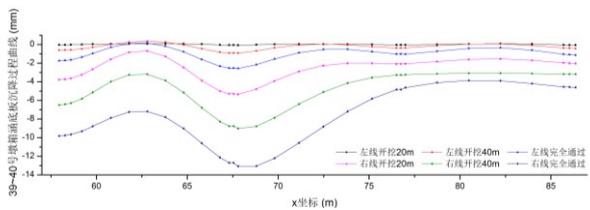


图 6 不考虑地基加固时 39~40 联箱涵底板 x 方向沉降曲线

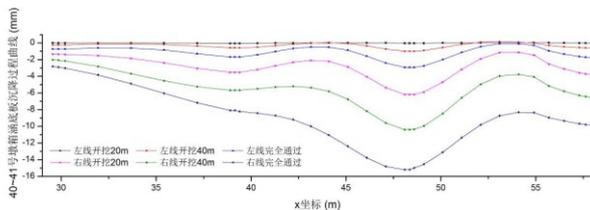


图 7 不考虑地基加固时 40~41 联箱涵底板 x 方向沉降曲线

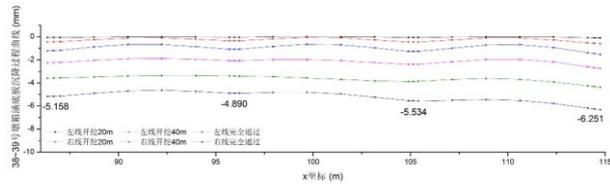


图 8 考虑地基加固时 38~39 联箱涵底板 x 方向沉降曲线

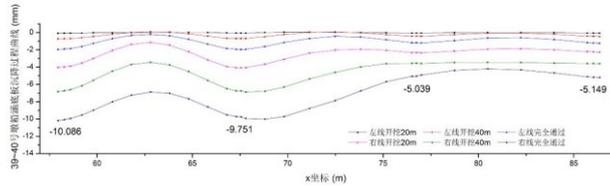


图 9 考虑地基加固时 39~40 联箱涵底板 x 方向沉降曲线

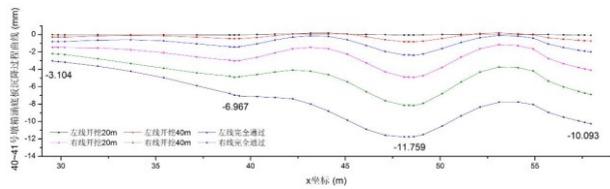


图 10 考虑地基加固时 40~41 联箱涵底板 x 方向沉降曲线

(3) 考虑旋喷桩地基加固作用时，40 号轴线处底板沉降值为 10.093mm，相邻第一块腹板对应底板处沉降值为 11.759mm，相邻第二块腹板对应底板处沉降值为 6.967mm，41 号轴线处底板沉降值为 3.104mm。

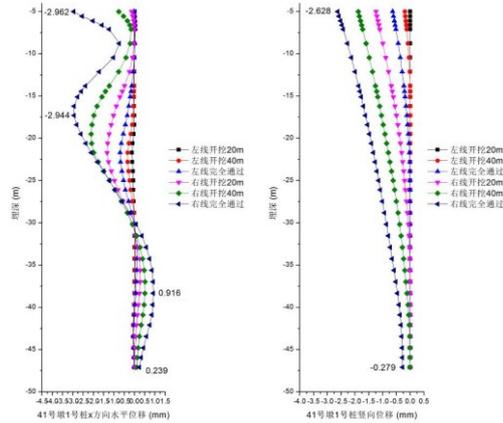
(4) 旋喷桩地基加固提高了地基土强度和变形能力，使得箱涵底板的最大沉降量由 15.190mm 减少到 11.759mm，并有效改善了箱涵底板的不均匀沉降，使箱涵相邻腹板底最大沉降差由 7.092mm 减小到 4.792mm。

将不考虑地基加固作用和考虑地基加固作用两种情况时箱涵底板的沉降作为附加变形，对 38~41 联箱涵进行内力检算，结果表明：不考虑基础加固作用时，箱涵底板局部钢筋应力超限，腹板局部钢筋应力及结构裂缝超限；考虑基础加固作用时，顶板、底板、腹板混凝土及钢筋应力及结构裂缝均满足规范要求。

3.4.2 桩基位移分析

合武上行线动车所特大桥第 41~44 联 3×8m 钢筋混凝土连续刚构桥中，41#墩距离二兴盾构区间线路最近，现只列出 41#墩桩基位移的计算结果。图 11a)显示了二兴区间左、右线盾构隧道先后通过合武上行线动车所特大桥时 41#墩桩基 x 方向水平位移过程曲线。图中显示，随着左右线盾构隧道的先后开挖，41#墩桩基 x 方向水平位移的绝对值不断增大；桩身最大水平位移出现在桩顶和隧道埋深深度处；右线完全通过时桩身 x 方向水平位移出现最大负值-2.962mm。

图 11b)显示了二兴区间左、右线盾构隧道先后通过合武上行线动车所特大桥时 41#墩桩基沉降过程曲线。图中可以看出，随着左右线盾构隧道的先后开挖，各墩桩基的沉降不断增大；桩身的最大沉降出现在桩顶；右线完全通过时，41#墩桩顶最大沉降 2.628mm。



a) x 方向水平位移 b) 竖向位移

图 11 第 41#墩桩基位移过程曲线

表 2 列出了二兴区间左、右线盾构隧道先后通过合武上行线动车所特大桥时 41#~44#墩桩基最大位移值。根据计算结果分析,各墩台的最大水平位移、沉降和相邻墩台的沉降差均未超过规范^[5]要求的限值。

表 2 各墩台桩基最大位移汇总表

墩台编号	水平位移 (mm)	竖向位移 (mm)
41#墩	-2.962	2.628
42#墩	-0.794	3.005
43#墩	-0.504	3.650
44#墩	-0.379	2.481

3.4.3 轨面位移分析

将合武上行线轨道的钢轨按盾构区间下穿的前后顺序分别编号为钢轨 1 和钢轨 2。图 12 显示了二兴区间左、右线盾构隧道先后通过合武上行线动车所特大桥时桥面板钢轨 1 沿线位置的竖向位移过程曲线。图中可以看出,由于桥跨结构的不对称,钢轨沿线位置的竖向沉降也呈现一定的不对称性;钢轨 1 沿线位置的竖向位移随着左右线盾构隧道的先后开挖不断增大,当右线隧道完全通过时钢轨 1 沿线位置的竖向沉降量最大,达到 5.637mm,满足轨面沉降值不得超过 10mm 的要求。钢轨 2 沿线位置竖向位移过程曲线变化规律与钢轨 1 相似,各工况中桥面板钢轨 1 和钢轨 2 沿线位置的竖向位移差较小,绝对值最大值仅为 1.16mm,轨道的水平倾斜率满足规范要求。

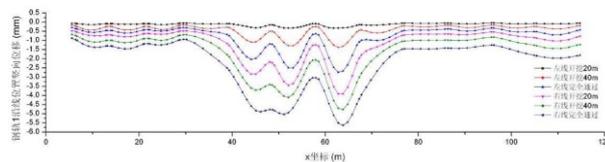


图 12 桥面板钢轨 1 沿线位置竖向位移过程曲线

4 保护控制标准的确定

二七路站~兴业路站盾构区间下穿合武上行线,一旦地铁隧道施工引起铁路轨道过大沉降、铁路箱涵过大变形,将影响列车正常运行,造成运营事故。为保护合武上行线的运营安全,结合国内已成功穿越国铁的地铁工程经验,根据下穿施工过程的三维数值模拟的分析结果,并参考铁道部颁发的 2006 年 10 月 1 日起施行的修改合并后的《铁路线路修理规则》^[7],建议二兴区间穿越合武上行线轨道控制标准为:轨面沉降值不得超过 10mm;相邻两股钢轨水平高差不得超过 5mm;相邻两股钢轨三角坑不得超过 4mm;前后高低(纵向水平)5mm;铁路的结构沉降不大于 20mm。

5 施工安全保护和控制措施

考虑到区间下穿地段合武上行线为三幅独立箱涵，每幅均为三跨整体框架结构，基础沉降对上部结构受力影响较小，因此考虑采取如下保护和控制措施：

(1) 施工前在道床下预埋注浆袖阀管，施工时根据监测情况注浆加固道床下砂层，控制结构本身沉降。

(2) 施工期间做好出现险情时的补救预防准备。若在掘进施工过程中发现轨面沉降量达到 5mm 时，采取调整轨道扣件的办法（调整量在 10mm 范围）及时调整轨道高程，以满足铁路线路的标准。

(3) 盾构掘进通过铁路前，充分了解铁路行车计划及间隔，做好合理的工程筹划，并调整列车运行速度，在盾构机通过轨道区期间，合武线列车在该路段减速至 45km/h 以下。

(4) 盾构下穿既有铁路地段采用加强型衬砌管片，确保后期运营期间地铁隧道的行车安全。

(5) 确定合理的盾构掘进参数，通过快速的完成管片拼装的方式来减少盾构停机的时间，并严格控制盾构推进姿态。

(6) 采用同步注浆及二次注浆技术，确保同步及二次注浆的注浆量及注浆压力，提高结构的抗渗性、改善结构受力情况，防止较大沉降的发生，确保管片围岩间隙及时充填密实。

(7) 加强监控量测，建立“数据收集—信息处理—工程评价反馈”系统，做好出现险情时的补救预防准备。

(8) 盾构隧道施工完成后至少 3 个月内，仍应保持监测。确定地层变形收敛完成后，方可解除监测，否则应持续监测并采取加固措施。

(9) 盾构隧道施工完成后，应对铁路箱涵再行检测，对比施工前后检测指标，必要时进行系统加固，以确保既有铁路箱涵运营安全。

6 结语

(1) 针对地铁区间盾构隧道下穿即有铁路箱涵工程进行相应施工安全影响分析，成功运用施工影响数值模拟预测、控制标准及保护方案制定、监测反馈在内的施工全过程分析方法。

(2) 根据施工影响数值分析结果，区间盾构隧道穿越合武上行线动车所特大桥时，在设计动荷载下轨面最大沉降为 5.637mm，两钢轨之间最大沉降差为 1.116mm。箱涵底板的最大沉降为 11.759mm，相邻腹板底最大沉降差为 4.792mm。区间盾构隧道施工对临近的 41#墩桩基影响微小，受盾构隧道挤出土体影响，最大水平位移为 2.962mm。

(3) 由于隧道埋深较大，盾构施工对铁路箱涵的轨面沉降和箱涵变形影响均在控制标准以内，采取合理的施工措施后，盾构施工对既有铁路的影响较小。

附：截止投稿之日，二兴区间下穿合武上行线动车所特大桥箱涵的相关专题研究已通过专家评审，预计区间下穿施工将于 2015 年初进行。

参考文献(References)

- [1] Working Group No.2 International Tunnelling Association. Guidelines for the Tunnelling Risk Management[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(3): 217-237.
- [2] 陈学峰, 曲强, 蒋小锐, 等. 铁路框架地道桥受下穿隧道施工影响的研究[J]. 铁道标准设计, 2004(8): 36-37.
- [3] 徐彰杰. 北京地铁 15 号线盾构法施工对既有铁路箱涵的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [4] 晏成. 盾构隧道下穿既有铁路框架桥工程安全性分析[J]. 铁道标准设计, 2011(7): 84-87.
- [5] TB 10002.1-2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [6] TB 10621—2009 高速铁路设计规范（试行）[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [7] 铁运〔2006〕146 号 铁路线路修理规则[S].

微型桩-锚组合抗滑结构变形和受力特性数值分析

胡田飞¹,梁龙龙²,朱本珍²,郑静²

(1. 河北中核岩土工程有限责任公司, 河北 石家庄 050021; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对微型桩加固滑坡时易发生侧向变形的缺陷, 本文基于综合利用排桩刚架结构与拉锚式挡土结构两种结构形式优点的研发思路, 提出了一种微型桩—锚组合抗滑新结构。以二广高速公路某边坡工程为对象, 利用有限差分软件分析了新结构的变形与受力特性, 并与普通刚架式微型桩结构进行了比较。研究表明: (1) 微型桩-锚新结构加固后坡体的位移场及桩顶水平位移较普通的刚架式结构明显减小, 新结构的加固效果和抗滑能力更优; (2) 作为外拉系统的斜向预应力锚索有效增强了新结构体系的侧向刚度, 结构侧向变形曲线相对平缓, 降低了滑面处桩体出现应力集中而破坏的可能性; (3) 桩身弯矩、剪力分布更加均匀, 充分发挥了结构的整体受荷能力, 且峰值有所降低; (4) 除抗弯和抗剪作用外, 微型桩还起到作为细长构件的轴向作用, 尤其是顺坡桩侧摩阻力作用明显; (5) 随着边坡的变形, 锚索拉力值逐渐增大, 利用稳定地层的自承能力分担部分滑坡荷载; (6) 由于锚索预应力的主动施加, 微型桩对桩后土体起到预加固作用, 系梁附近桩侧土压力明显增大。研究结果可为该新结构的设计提供一定的理论依据。

关键词: 微型桩; 预应力锚索; 组合结构; 变形特性; 受力特性

中图分类号: U455.7+1

文献标志码: A

Numerical Analysis of Deformational and Mechanical Characteristics of the New Micropile-Anchor Composite Anti-sliding Structure

HU Tian-fei¹; LIANG Long-long²; ZHU Ben-zhen²; ZHENG Jing²

(1. Hebei Nuclear Industry of China Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2.

Northwest Research Institute Co., Ltd. of C.R.E.C., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Aiming at the defects of micropiles that the piles are prone to deform laterally when reinforcing slope, based on the research ideas of comprehensive utilization of frame structure of piles and anchored retaining structure, this paper put forward a new composite anti-sliding structure combined with micropiles and anchor. Selecting a slope located in Erenhot-Guangzhou Highway as the engineering object, the paper used the finite difference software to analyse characteristics of deformation and stress of the new structure, comparing with the ordinary framed micropile structure. The researches suggested that: (1) Compared with the ordinary framed structure, the displacement field of slope reinforced by the new structure and horizontal displacement of pile top reduced obviously, the reinforcement effect and the anti-sliding ability of new structure were better; (2) As the external pull system, inclined prestressed anchor enhanced the lateral stiffness of the structure system effectively, lateral deformations were steady relatively, reducing possibility of the destruction of piles near the sliding surface because of stress concentration; (3) The distribution of bending moment and shear force were more uniform, and peak values decreased, making full use of the overall load bearing capacity of the structure; (4) In addition to shear-resist and bend-resist ability, micropiles also played the axial role as a slender member, especially the friction effect of consequent pile; (5) With the deformation of slope, the tension of cable increased gradually, sharing part of landslide load and developing self bearing capacity of stable layer; (6) Because of the active reinforcement of prestressed anchorage, micropiles had the effect of pre-reinforcement on soil located in the rear of the micropiles. The results can be theoretical references for design of the new structure.

Keywords: micropile; prestressed anchor; composite structure; deformational characteristics; mechanical characteristic

作者简介: 胡田飞(1988-), 男, 河北石家庄人, 工学硕士, 主要从事斜坡地质灾害研究。E-mail: hutianfei0508@163.com

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项资金(2009EG123201); 铁道部科技研究开发计划课题(2010G018-C-3)

1 引言

基于环保施工和应急抢险的需要,近年来支挡结构逐步向机械化、轻型化、快速化方向发展。其中微型桩由于具有非开挖机械成孔、对地层适用性强、桩位布置灵活、对滑体扰动小、安全快速等优点,在边坡加固和滑坡处理中得到了越来越多的应用^[1-2]。边坡工程界研发推广了多种微型桩结构型式及其组合体系^[3-6]。边坡工程中的支挡类结构以承受水平荷载为主,由于截面小、抗弯刚度有限,微型桩在滑坡推力作用下易挠曲变形。因此实际工程中微型桩及其组合刚架式结构发生弯剪破坏的情形居多^[7-8]。本文针对提高微型桩结构抗弯能力这一关键问题,基于综合排桩刚架结构与拉锚式挡土结构两种结构形式优点的研发思路,提出了一种微型桩—锚组合抗滑新结构。该结构利用若干根垂直或倾斜布置的微型桩、桩顶联系梁、斜向锚索与周围岩土体共同构成了一个复合挡锚结构体系。与普通微型桩结构相比,改被动受力为主动受力,在一定程度上提高了结构的抗滑承载力。

鉴于该结构的特殊性,目前室内和现场试验研究尚处于起步阶段,深入研究还存在一定困难。为初步研究微型桩-锚组合结构的变形和受力特性,本文结合某边坡工程实例,建立三维数值计算模型,利用有限差分软件FLAC3D分析了一种具体型式的新结构的桩体变形、受力及锚索拉力等各项指标的变化规律,并与普通微型桩结构进行了对比分析,得出了一些有意义的结论。

2 微型桩—锚组合抗滑新结构

该新结构设计形式为将预应力锚索反力结构设置于微型桩组合刚架结构的系梁顶部,即将支挡和锚固两种结构结合形成一个协调作用体系。该新结构布置形式灵活多变,根据微型桩布置方式可分为平面和空间两种形式,其中一种平面结构形式如图1所示。微型桩刚架结构和预应力锚索的端部刚性连接,除各自的作用原理外,还具有协调作用的效果。对于倾斜布置的微型桩刚架结构,嵌入滑面以下稳定地层足够深度的微型桩与联系梁形成空间框架结构,与桩周地质体形成复合骨架以支挡后部土体。反坡桩与滑面近似垂直布置,主要利用抗剪能力平衡滑体下滑力;顺坡桩与滑体的位移方向基本一致,主要利用微型桩与滑面以上土体的侧摩阻力平衡滑体下滑力,同时能够限制桩头位移,增强结构整体抗弯能力。对于斜向预应力锚索,联系梁起锚固工程中锚墩的反力作用,通过建立后张预应力场主动调整与天然力场的叠加范围和叠加程度,充分调用工程地质体自身潜在的稳定性。该新结构的创新之处在于通过联系梁将预应力锚索和微型桩两种抗滑结构结合成相互作用的复合结构,一方面,预应力锚索增大了刚架式挡土结构体系的侧向刚度,有效限制了整个结构的侧向变形;另一方面,挡土结构所承受的部分荷载,通过预应力锚索分散到锚固体周围稳定土层中,充分发挥了结构的整体受荷能力和地层的自承能力。

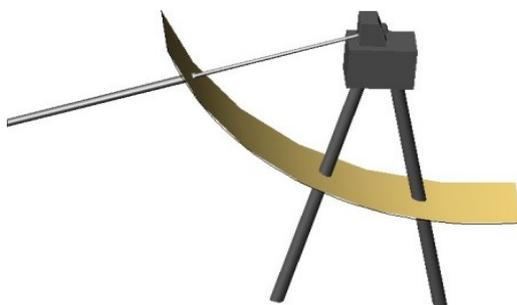


图1 微型桩—锚组合抗滑新结构示意图

Fig.1 Diagram of the new micropile-anchor composite anti-sliding structure

3 数值模拟方法

3.1 边坡模型

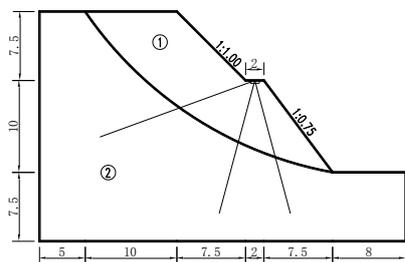


图2 滑坡模型及微型桩—锚结构加固示意图

Fig.2 Diagram of the landslide model and micropile-anchor structure reinforcement

本文选择二广高速 K64+285~K64+600 一处全~强风化花岗闪长岩边坡为工程对象，经稳定性计算搜索最危险滑动面，概化后主断面尺寸如图2所示。模型高25m、长40m，刷方后第一级边坡高10m、第二级高7.5m。滑体长度约27m，深度约5~10m。微型桩—锚组合结构加固措施中，反坡桩和顺坡桩与竖向呈15°夹角，桩长15m，桩径230mm。锚索与水平方向呈20°夹角，自由段和锚固段各长9m，孔径130mm，预应力为300kN。

3.2 FLAC3D 计算模型

3.2.1 网格模型

工程实践中，独立微型桩群或刚架式组合结构的桩间距一般取1~2m^[1]。由于结构在垂直滑动方向上具有对称型，故按准三维问题进行计算，模型宽度取一个桩间距（2.0m），微型桩—锚结构设置在主控剖面，即1.0m处剖面上。利用AutoCAD(.dxf)-Midas/GTS-FLAC3D耦合建模技术建立映射网格模型，断面划分形式如图3所示。模型底部为固定边界，四周均为滚支边界约束。

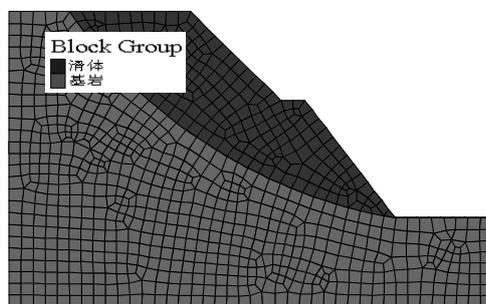


图3 计算模型网格划分

Fig.3 Mesh layout of calculation model

3.2.2 材料参数

土质和类土质滑坡多发生剪切滑移破坏，据此可认为坡体破坏总体上符合莫尔—库仑强度准则。考虑土体的非线性本构关系及变形对应力的影响，坡体计算采用Mohr-Coulomb弹塑性模型，滑裂面模拟采用Interface单元。Interface单元是一种无厚度的接触面单元，其计算采用Mohr-Coulomb本构方程。基于工程经验取值和反演计算，材料参数和滑裂面参数见表1、表2。

表1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

名称	地层岩性	线性参数		非线性参数		
		E/MPa	ν	γ (kN·m ⁻³)	c/kPa	ϕ (°)
滑体	全风化花岗闪长岩	20	0.35	19	23	23
基岩	强风化花岗闪长岩	300	0.25	21	47	37

表 2 滑裂面参数

Table 2 Parameters of sliding surface

编号	kn/Pa	ks/Pa	$c/k\text{Pa}$	$\phi/(\text{°})$
降雨状态	1e7	1e7	18	22

1.4 3.2.3 结构参数

微型桩和预应力锚索分别采用 Pile 单元和 Cable 单元模拟，材料参数分别见表 3、表 4。两个 Pile 单元的桩顶节点 link 的六个自由度均设置为 rigid，即固定约束。Pile 单元和 Cable 单元端部建立 node—node 连接后，3 个位移自由度设置为 rigid，3 个转动自由度设置为 free，即铰支约束。

表 3 微型桩参数

Table3 Parameters of micropile

E/GPa	ν	d/m	ks/Pa	$c_s/(\text{Pa}\cdot\text{m})$	$\phi_s(\text{°})$	kn/Pa	$c_n/(\text{Pa}\cdot\text{m})$	$\phi_n(\text{°})$
25	0.2	0.23	1.3e11	1e10	2	1.3e9	1e4	5

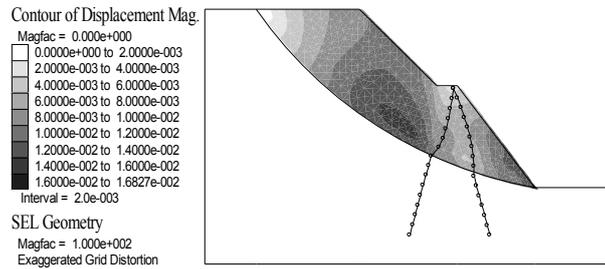
表 4 锚索参数

Table 4 Parameters of anchor

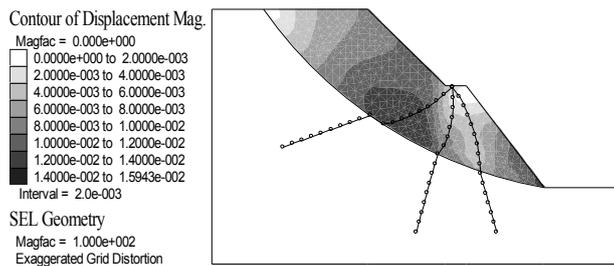
A/m^2	C/m	E/GPa	F_t/N	k_g/Pa	$c_g(\text{N}/\text{m})$	$\phi_g(\text{°})$
2e^{-3}	0.408	200	1e20	2e10	1.5e5	25

4 结果分析

4.1 变形分析



(a) 微型桩结构



(b) 微型桩—锚结构

图 4 结构-坡体的合位移云图 (单位: m,结构放大系数:100)

Fig.4 Nephogram of resultant displacements of structure and slope (Unit:m, amplification factor of structure:100)

由图 4 可知，由于两种支挡结构的材料抗力，滑体的整体滑移得到有效控制。微型桩-锚组合结构加固后坡体的位移场较传统的刚架式微型桩结构明显减小，微型桩结构加固下的坡体最大位移为 16.83mm，而微型桩—锚组合结构的则为 15.94mm。同时，由于锚索预应力的作用，锚索周围地质体出现固结压缩位移，可增大滑面法向压力，提高坡面附近土体的抗剪能力。新结构的加

固效果和抗滑能力更优。

由于微型桩结构顶部自由，微型桩结构的侧向变形量较大，尤其平台部位合位移达到了 4~6mm。作为外拉系统的斜向预应力锚索有效增强了新结构体系的侧向刚度，结构侧向变形值相对平缓，降低了滑面处桩体出现应力集中而破坏的可能性。尤其桩顶部位水平位移明显减小，仅为 0~2mm，增强了结构的抗倾覆能力和抗弯承载力。

4.2 内力分析

由于微型桩长径比大（一般大于 30），属柔性结构。因此，考虑到其区别于大截面挖孔抗滑桩以抗剪、抗弯为主的支挡作用，其力学分析内容还包括作为细长构件的轴向受力特征。

4.2.1 轴力

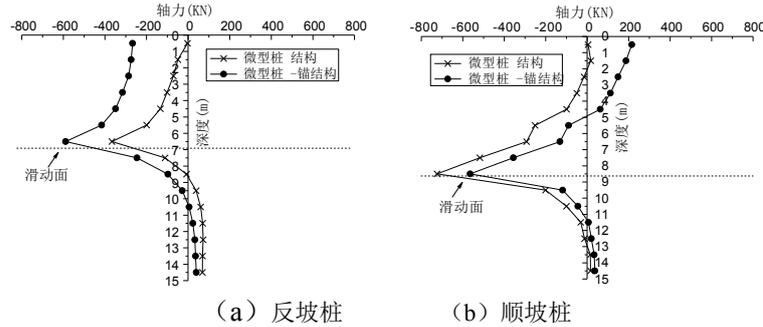


图 5 桩体轴力分布曲线图

Fig.3 Axial force diagram of micropiles

由图 5（轴力拉为正、压为负）可以看出，滑坡推力作用下，微型桩组合结构中反坡桩和顺坡桩均为受压状态，且主要分布在滑面上下。而微型桩-锚组合结构由于斜向锚索拉力的作用，微型桩上部也出现较大的轴力分布，进而充分发挥了结构的整体受荷能力。同时，相比微型桩组合结构，微型桩—锚结构的反坡桩轴力有所增大，顺坡桩轴力有所减小，两桩荷载分担比更为合理。由图 5（b）可以发现，新结构的顺坡桩滑面以上轴力分布出现了正负两个峰值，桩头附近出现了一定范围的拉力分布，此时桩侧摩擦力与滑动方向相反，是主动防护效果的一种表现。

4.2.2 剪力

由图 6（剪力方向与滑坡滑动方向相同为负，反之为正）可以看出，桩体滑面上部附近剪力方向与滑坡滑动方向相同，下部附近则相反，最大剪力出现于滑面处。对于普通微型桩结构，桩顶、桩底部位的剪力基本为零，剪力主要集中在滑面附近。微型桩—锚组合结构滑面处桩体剪力峰值相比微型桩结构有所减少，同时在桩顶部位出现了一定范围的正剪力分布。桩身剪力在不同深度出现正负的交替现象，不但可以减小单桩内力，也优化了桩身受力形式。

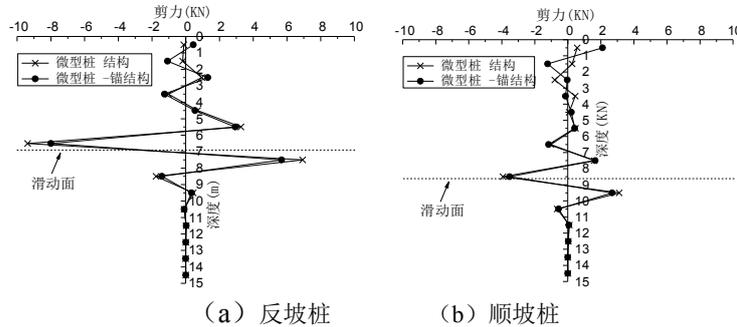


图 6 桩体剪力分布曲线图

Fig.3 Shearing force diagram of micropiles

4.2.3 弯矩

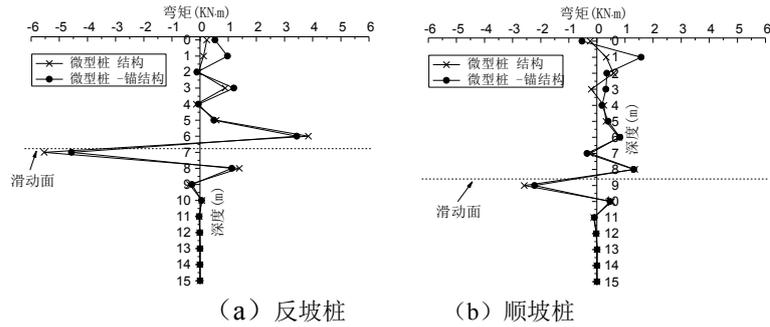


图 7 桩体弯矩分布曲线图

Fig.11 Bending moment diagram of micropiles

由图 7（桩体靠山侧受拉弯矩为负，反之为正）可以看出，与大截面抗滑桩受力特性不同，微型桩滑面以上弯矩为正，滑面以下弯矩为负，最大值位于滑面附近，与图 4 所示的变形特性相符。由于预应力锚索的横向约束作用，微型桩上部弯矩有所增大，滑面处弯矩峰值有所减小。对比图 5、图 6 可以发现，弯矩达到最大值时，所对应的剪力值最小。

$$dM_x / dx = \tau_x \quad (1)$$

由公式（1）可知，剪应力和弯矩存在一阶导数关系，当 $\tau_x = 0$ 时，对应的弯矩达到最大值。这也从理论上证明了本次数值模拟结论的正确性。

由于微型桩长径比大、抗弯刚度低，属于柔性结构，无横向变形约束的普通微型桩桩结构在滑坡推力作用下易发生较大角度的侧向倾斜，导致荷载集中在滑动面附近，桩顶、桩底附近轴力、剪力及弯矩一般比较小。普通微型桩结构的内力分布呈“中间大、两头小”的特点，易在滑面处应力集中导致破坏。微型桩-锚组合结构中，由于预应力锚索的限制作用，微型桩上部在桩侧土压力作用下也发生了较大的挠曲变形，因此滑面以上微型桩范围内内力分布相对均匀，在滑面和桩顶附近出现了两个峰值，充分发挥了结构的整体受荷能力。同时，滑面附近的内力峰值有所减小，相比普通微型桩结构，微型桩—锚结构的抗弯承载力有所提高。

4.2.4 锚索拉力

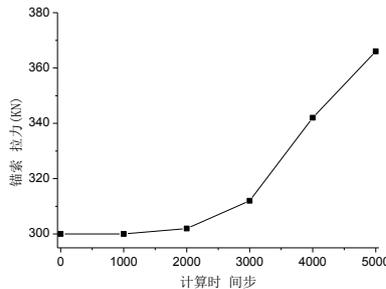


图 8 锚索拉力变化曲线图

Fig.8 Tension diagram of prestressed anchor

在边坡下滑过程中，锚索拉力逐渐增大，如图 8 所示。预应力锚索锚固铰接在桩顶联系梁，主要对刚架结构起横向位移约束作用。预应力锚索通过桩锚协调变形承担部分滑坡荷载，并通过锚固段轴力引起的锚索拉伸变形和锚索—灌浆体粘结强度传递到处于稳定区域的锚固体上，由锚固体通过灌浆体—岩土体粘结强度将荷载分散到周围地层中，从而充分发挥地层的自承能力。

4.3 外力分析

4.3.1 桩侧土压力

由图 9（桩侧合力方向与滑坡滑动方向相同时为正，反之为负）可以看出，反坡桩的土压力要大于顺坡桩的土压力，说明桩后荷载的传递存在一定的折减系数。相比普通刚架式微型桩结构，微型桩-锚组合结构中滑面处桩侧土压力峰值减小，滑面以上桩侧土压力分布则有所增大，优化了

滑坡推力的分布形式。

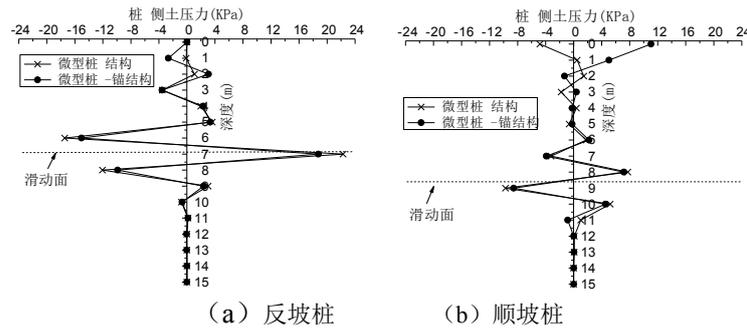


图 9 桩侧土压力分布曲线图

Fig.3 Earth pressure diagram of micropiles

4.3.2 桩侧摩阻力

由图 10（桩周土层相对于桩侧向上位移时为正，反之为负）可以看出，顺坡桩、反坡桩的滑面以下桩侧摩阻力全部为负值，均呈拔出的位移趋势；由于桩体侧向挠曲变形，见图 4 所示，其滑面上部侧摩阻力基本为正值。反坡桩和顺坡桩均利用滑面上部土体的摩阻力平衡滑体下滑力，顺坡桩侧摩阻力相比反坡桩大，说明顺坡桩侧摩阻力的抗滑作用更强。相比普通微型桩结构，由于预应力锚索的铰接作用，新结构中反坡桩滑面处侧摩阻力峰值有所增大；顺坡桩滑面处侧摩阻力峰值则有所减小，顶部有所增大，摩阻力分布相对均匀。

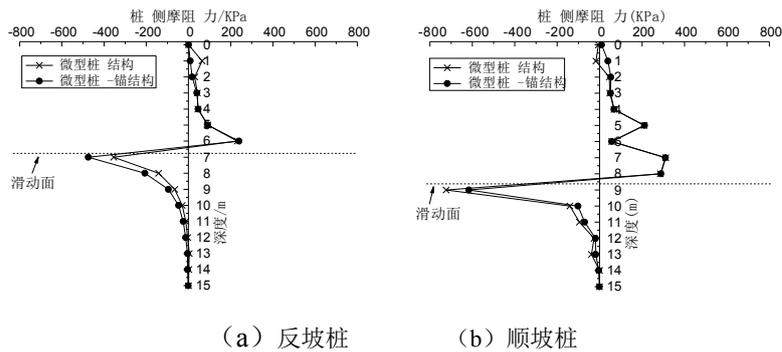


图 10 桩侧摩阻力分布曲线图

Fig.3 Frictional resistance diagram of micropiles

在地基加固工程中，桩中性点指桩的下沉量与地基沉降量相等的点，即正侧摩阻力和负侧摩阻力的转换点，与桩身最大轴力点一致。对比图 5、图 10，当微型桩结构用于滑坡防治时也存在类似的中性点，即滑面位置。因此，微型桩灌注施工时应采取高压注浆、二次注浆、劈裂注浆等措施实现桩侧摩阻力的强化效应。

5 结论

本文针对微型桩作为边坡抗滑结构的各种优缺点，在传统刚架式微型桩结构的基础上引入预应力锚索作为外拉系统，利用若干根垂直或倾斜布置的微型桩、桩顶联系梁、斜向锚索与周围岩土体共同构成了一个复合挡锚结构体系。通过数值模拟对新结构的变形及受力特性进行了研究，取得的主要结论如下：

(1) 新结构通过锚索对桩顶联系梁的横向约束作用，形成了类似上端铰支、下端弹性固结的梁式支挡结构，增强了结构的侧向刚度。滑坡推力作用下，相比普通刚架式微型桩结构，新结构的侧向变形曲线平缓、整体稳定性强。

(2) 新结构通过联系梁主动施加锚索预应力，使微型桩对桩后土体起到预加固作用。当滑面以上受荷段桩身受到的水平荷载较大时，锚索还可通过桩锚协调变形分担一部分滑坡荷载，充

分利用锚固段地层的自承能力。

(3) 在侧向滑坡推力作用下, 细长的桩体挠曲变形较大, 当桩轴倾斜度较大时会起到抵抗轴向拉或压力的侧摩阻力作用, 此时微型桩就作为一种轴向+侧向综合受荷桩来支挡边坡滑动。

(4) 相比普通刚架式微型桩结构, 新结构滑面处的桩侧土压力集中现象得到减缓, 顺坡桩和反坡桩的滑坡荷载分担比更为合理。桩体内力分布相对均匀, 内力峰值显著减小, 由此降低了桩体在滑面处弯剪破坏的可能性, 充分发挥了结构的整体受荷能力。新结构的支挡效果更优、抗滑承载力更高。

参考文献(References)

- [1] 朱本珍,孙书伟,郑静. 微型桩群加固堆积层滑坡原位试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2011,30(增 1): 2858-2864. (Zhu B Z,Sun S W,Zheng J. In-situ testing study of accumulative formation landslide reinforced by micropile group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(sup. 1): 2858-2864.)
- [2] Shu-Wei Sun, Ben-Zhen Zhu, Jia-Chen Wang. Design method for stabilization of earth slopes with micropiles. Soils and Foundations, 53(4): 487-497.
- [3] 王桢,杨秀梅.一种快速安全环保的非开挖式抗滑桩施工方法[P].中国专利:CN102140800A,2011-08-03.(Wang Zhen,Yang Xiumei.A construction method of nonexcavational anti-sliding piles for fast speed,Safety and environmental protection[P]. China Patent:CN102140800A,2011-08-03. (in Chinese))
- [4] 刘斌,顾兴宏,高成建,等.一种微型桩结合复合土钉墙结构[P]. 中国专利: CN202577316U,2012-12-05.(Liu Bin, Gu Xinghong, Gao Chengjian,et al. A composite retaining structure combined micropiles with Soil-nailing wall[P]. China Patent: CN202577316U,2012-12-05. (in Chinese))
- [5] 丁光文,曾长贤,徐正东,等.微型桩抗滑结构[P].中国专利: CN203270588U,2013-11-06.(Ding Guangwen,Zeng Changxian, Xu Zhengdong, et al. Anti-sliding structure of Micropiles[P].China Patent: CN203270588U,2013-11-06. (in Chinese))
- [6] 刘坡拉,詹学启,赵新益,等.一种微型桩与挡墙组合式受限路堤防护结构[P].中国专利: CN203452091U,2014-02-26.(Liu Pola, Zhan Xueqi, Zhao Xinyi,et al. A Protective structure combined micropiles and retaining wall for Limited embankment [P]. China Patent: CN203452091U,2014-02-26. (in Chinese))
- [7] 闫金凯,殷跃平等. 滑坡微型桩群桩加固工程模型试验研究[J].土木工程学报,2011,44(4): 120-128. (Yan J K,Yin Y P.Model test study of landslide reinforcement wite micropile groups[J].China Civil Engineering Journal, 2011,44(4): 120-128.)
- [8] 辛建平,郑颖人,唐晓松,等.微型桩破坏机理的数值模拟[J].地下空间与工程学报,2013,9(6): 1326-1332. (Xin Jianping, Zheng Yingren, Tang Xiaosong, et al.Numerical Simulation of Failure Mechanism of Micro-piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(6): 1326-1332.)