

[文章编号] 1002-8528(2012) 11-0075-06

城市交通隧道火灾工况特性及烟控技术分析

李炎锋,李俊梅,刘闪闪(北京工业大学建筑工程学院,北京 100124)

[摘 要] 由于城市公路交通隧道能够疏散城市地面交通、减少道路用地,其建设数量和规模随着城市的发展日益增加。城市交通隧道最主要的灾害是火灾,本文在分析城市交通隧道相对于山区公路隧道在隧道结构、车流密度、火灾规律等方面特点的基础上,对其消防难点以及关键技术进行探讨,并指出了城市交通隧道火灾安全未来研究的方向。研究表明:国内城市交通隧道主要采用纵向通风模式,坡度、出入口、竖井设置对控制烟气的临界风速影响远大于非城市公路隧道。采用数值模拟技术结合局部现场试验是研究隧道火灾烟气扩散合理可行的手段,开展隧道火灾羽流复杂的时空行为基础研究以及发展场-网模拟技术将有益于城市交通隧道通风、防排烟设计和火灾安全水平的提高。

[关键词] 城市交通隧道;火灾;通风;烟气**[中图分类号]** U45;TU96⁺7;TU921**[文献标识码]** A

Analyses on Fire Scenarios Character and Smoke Control Technology in Urban Traffic Tunnels

LI Yan-feng, LI Jun-mei, LIU Shan-shan(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

[Abstract] With the development of city, the quantity and scale of urban traffic tunnel are increasing because urban traffic tunnel can cut down the city ground traffic and reduce the land use for road. Fire is the most important disaster of urban traffic tunnel. The specialties in tunnel structure, traffic flow density and fire character of urban traffic tunnel are analyzed by comparing with those for non-city road tunnel. The difficulties and key technology for fire safety engineering are discussed and future research directions for fire safety are pointed out. The following conclusions can be drawn that longitudinal ventilation mode is mainly adopted in current urban traffic tunnels in China. The influences of urban traffic tunnel slope, the positions of tunnel portal, entrance-exit and shaft on critical velocity for smoke control are more important than that for non-city traffic tunnel. Combing numerical simulation method with a local full-scale test is a reasonable and reliable technology for studying smoke propagation in urban traffic tunnel. The fundamental researches on complex time-space behavior of tunnel fire plume and development of hybrid field-network simulation method would be benefit for designing ventilation, smoke control system and enhancing the fire safety level of urban traffic tunnel.

[Keywords] urban traffic tunnels, fire, ventilation, smoke

1 引 言

随着城市建设规模的日益增加,城市公路交通隧道(以下称城市交通隧道)作为立体交通方式之一,不仅可以缓解城市交通压力,解决交通干线跨江越海受到的限制,而且可以缩短线路里程,降低对周围环境和人民生活、生活的影响^[1]。例如,在北京,国内首例超大规模中关村西区地下综合管廊及城市

交通隧道综合开发利用系统投入试运行,使中关村地区实现了立体交通;城市交通隧道日益成为城市道路的重要组成部分,其建设数量和规模在日益增大。

与非城市地区的交通隧道相比,城市交通隧道具有以下特征^[2,3]:(1)交通量大。常为山体隧道的5~10倍,且有明显的频率性,即上下班时交通量大;(2)埋深大。城市地下交通隧道,往往埋深较大,如日本东京计划建设的城市地下交通隧道,其预计深度为50~100m。埋深大意味着隧道会有较大的坡度。国际上通常要求隧道坡度不大于5%,特殊情况下,如在越江隧道和海底隧道最大坡度可以达到7%。对于城市地下交通隧道,若按50m深度

[收稿日期] 2012-06-10

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(50878012)城市与工程安全减灾教育部重点实验室重点项目(004000546612016)北京市科学技术研究院创新团队计划项目(IG201206N)

[作者简介] 李炎锋(1971-),男,博士,教授

[联系方式] liyanfeng@bjut.edu.cn

坡度 5% 计算,隧道就有一条长约 1000 m 的坡道;(3) 隧道结构有双管单层与单管双层两种形式。交通方向有单洞双向、双洞单向;(4) 在隧道出入口设置方面。山岭隧道通常只有单一的进、出口,对于城市地下交通隧道而言可根据设计要求建造多个出入口,以缩短车辆绕行时间。如北京某个地下交通隧道直径线方案中就提出了在隧道中部设置出入口的方案,隧道形式如图 1 所示。部分类型城市交通隧道(如城市地下快速路)与多个地下停车场及地面主干道相连,出入口多,空气(烟气)流动受此影响,使通风排烟效果难以控制。

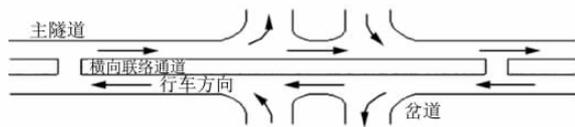


图 1 有中间出入口的城市地下快速路示意图

城市交通隧道由于能给人们生产、生活带来便利得到越来越多的应用。但是,作为主要灾害的火灾也频繁发生,而且由于隧道环境的封闭性和逃生救援的困难性,使得隧道一旦发生火灾,往往造成严重的人员伤亡和巨大的社会影响和经济损失^[4,5]。

火灾是城市交通隧道灾害中最具危害的一种灾害。在城市地下空间大规模开发的背景下,如何保证城市交通隧道的火灾安全至关重要,这也是目前管理、设计、施工、运营等部门面临的最重要的问题之一。本文将结合城市交通隧道的特点,从火灾诱因、通风防排烟设计和城市交通隧道火灾安全设计现状进行分析,总结消防设计关键技术存在的问题和不足,为进一步深化研究和发城市交通隧道通风排烟技术提供参考。

2 城市交通隧道火灾主要诱因

城市交通隧道(地下公路隧道)火灾事故的起因是由多种因素综合导致形成的^[6]。图 2 给出了交通隧道事故级别以及事故起因。

诱发火灾事故的火灾类型有车辆故障火灾、交通事故火灾和其他事故火灾。在公布的 2001 ~ 2010 年近 30 起城市交通隧道火灾事故分析基础上进行统计见图 3,可见车辆自身故障起火以及车辆交通事故是诱发隧道火灾的两个主导因素;分析总结城市交通隧道内引发火灾事故的原因主要集中在

以下几个方面^[7,8]:(1) 隧道内的设置、设备引起的火灾;(2) 维修养护时动用的明火引起的火灾;(3) 汽车自身故障引起的火灾;(4) 汽车交通事故引起的火灾;(5) 车上装载的易燃物引起的火灾。但是,此类火灾在城市交通隧道出现的概率很小。

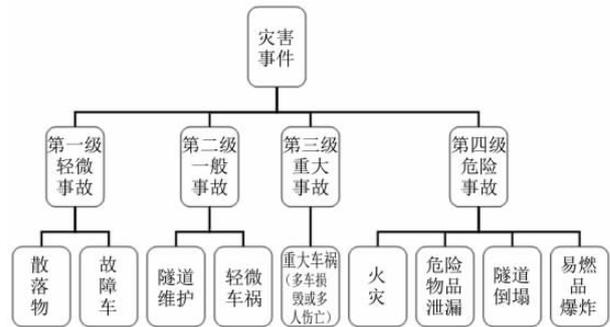


图 2 城市交通隧道事故因素汇总

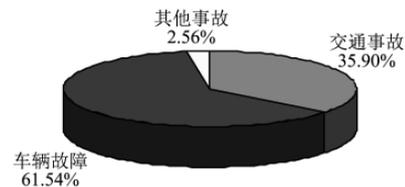


图 3 城市交通隧道火灾形成原因统计图

3 城市交通隧道火灾特征与消防难点

当交通隧道发生火灾时,其火灾共有的特点和危害如下^[9,10]:(1) 热量难以散出;(2) 成灾时间短,火灾容易快速蔓延;(3) 一旦发生火灾,产生的有害热烟气蔓延很快;(4) 相邻车辆会被引燃,易发生二次火灾;(5) 隧道结构不利于人员疏散。

城市交通隧道一般位于地下(山区城市的交通隧道除外),因此城市交通隧道火灾特点兼有地下建筑火灾和交通隧道火灾的特点^[11],主要包括:(1) 火灾发生的概率大,起火原因复杂多变,潜在火灾危险性更大。由于日益增长的车流量和更大的车载量而增大的火灾载荷。隧道越长、交通量越大,发生火灾的概率越大。这使得城市隧道发生火灾事故的概率较常规隧道明显提高,火灾安全形势更加的严峻;(2) 出入口和竖井设置受城市环境规划影响,设置状况影响通风和火灾羽流发展;(3) 坡度对火灾烟气扩散以及通风排烟的影响必须加以考虑。城市交通隧道出入口的坡度存在使隧道烟气难以形成对称的顶棚射流。车辆在这样的道路上行驶极易发生交

通事故,同时在发生火灾时容易使热烟气在上坡处聚集,造成火灾事故的扩大。如日本大坂公路隧道火灾,由于高温烟气在上坡处聚集,最终造成 189 辆汽车相继着火燃烧。因此,在城市地下交通隧道规划建设时,必须进行认真分析坡度对通风、排烟以及人员疏散的影响;(4) 由于城市交通隧道的横断面小,车流量大,发生火灾时,一旦下游车辆故障会使乘客徒步疏散,燃烧会产生大量有毒烟气,严重影响人员疏散。对于单洞双线交通隧道,火灾时需考虑两个方向车辆如何进行有效疏散,因此对通风排烟方案设计提出更高的要求。

4 城市交通隧道火灾安全设计的关键问题

4.1 当前城市交通隧道火灾安全设计中的相关问题

尽管我国已修建了数量众多的隧道工程,但却没有系统、完善的关于城市交通隧道火灾的规范和标准。虽然《公路隧道设计规范》(JPJ026-90)、《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ02601-1999)等分别对公路隧道的防火与疏散做了部分规定,但存在难以适应城市交通隧道地理位置特殊性、隧道内外环境特殊性要求。《建筑防火设计规范》(GB50016-2006)中只是规定了城市交通隧道的原则性设计要求,所以城市交通隧道的设计目前基本上套用现有隧道防火设计的规范,并没有针对其本体特点和火灾特点对烟气流动特殊性加以深入研究。

关于隧道火灾虽然已经做了大量的研究,但是大部分的研究都是针对单个工程实例进行的^[12-15],其结论适用性不强。此外,现有的关于隧道火灾的基本理论研究,不同的研究机构得到的结论不尽相同。针对城市交通隧道,国内并没有深入开展其与一般隧道火灾场景的共性和特殊性的比较研究,没有认真考虑其本体特点对火灾特性的影响,没有形成适用于城市交通隧道火灾的理论体系和提出相应的具有建设性的理论支撑。

4.2 城市交通隧道火灾通风排烟设计的主要参数

大量的隧道火灾事故表明,死亡大多是烟气窒息、中毒造成的,合理的通风防排烟系统能有效控制烟气扩散,使人员有足够的疏散时间。

4.2.1 城市交通隧道通风模式分析与比较

根据风流在隧道内的流动特性,机械通风分为

全横向通风、半横向通风及纵向通风方式。《建筑防火设计规范》(GB50016-2006)对城市交通隧道按照隧道孔数、封闭段长度及交通情况进行分类,规定“通行机动车的一、二、三类隧道应设置机械排烟系统,通行机动车的四类隧道可采取自然通风排烟”,通行机动车的四类隧道指通行非危险化学品等机动车的长度不大于 500m 的隧道。自然通风是利用存在于洞口间的自然压力差或汽车行驶时的活塞作用产生的交通风力,达到通风目的。

当隧道超过一定长度或交通量超过一定值后,仅仅依靠自然风和交通风无法满足隧道正行运营时的环境要求及发生火灾时的防排烟要求。表 1 列出了国内多座典型城市交通隧道的通风方式^[16]。可以看出,城市交通隧道为单向交通方式时,一般采用射流风机为辅助通风手段的纵向通风方式,如竖/斜井分段送排风+射流风机纵向通风、全射流风机纵向通风、竖斜井分段送排风+射流风机纵向通风+半横向排烟、射流风机+点式集中排烟。部分隧道采用半横向通风,该模式主要适用于双向交通隧道或者越江隧道。由于设备投资和运行费用高的原因,城市交通隧道基本上不采用全横向通风方式。

纵向式通风无须通风管道,从而也无须增大隧道断面,充分利用车辆活塞风作用,被称为是经济节能型的通风方式。在纵向通风模式下,采用火灾烟流控制方案的目的就是防止烟气回流,即应控制烟流向某一个方向(火源点下游)排放,这就引出了临界风速的概念,即使烟气不发生回流的最小风速。临界风速的影响因素众多,包括火源强度、燃料类型、隧道坡度、断面形状、送风温度等^[17-19]。

4.2.2 城市交通隧道计算临界风速时考虑的火源功率问题

考虑城市交通隧道火灾车辆类型、起火原因以及火灾概率,参考国外多项研究对于隧道火灾热释放率和烟气最高温度设定的参考值。其中包括 PIARC1987 年的研究报告^[20],挪威与芬兰所做的尤里卡火灾试验的结果,美国弗吉尼亚纪念隧道(Memorial Tunnel)火灾试验结果以及法国防火机构 CETU 的建议,综合考虑经济性和安全性因素,城市交通隧道火灾设计场景按客车火灾考虑,一辆小型客车火灾功率为 2.5MW,中型客车 5.0MW,大型客车 8~10MW。综合考虑,其设计火灾功率不超过 10MW^[6]。

表 1 国内城市交通隧道通风方式统计表

隧道形式	城市隧道名称	地区	长度 / m	通风方式	通车时间	交通方向	
环形隧道	苏州火车站地下车道	苏州	2170	竖井送排风 + 射流风机纵向通风	在建	单向 2 车道	
	CBD 地下隧道	北京	1455	多竖井送 / 排风 + 射流风机诱导型纵向通风	2011 年	单向	
	奥林匹克公园地下工程	北京	5500	分散竖井送排风 + 射流风机诱导型纵向通风	建成	单向	
	金融街地下交通工程	北京	2400	全横向机械送排风	2007 年	单向 + 双向	
水底隧道	独墅湖隧道	苏州	3460	南线: 射流风机诱导 + 集中排风; 北线: 射流风机诱导型纵向通风	2007 年	双向 6 车道	
	胶州湾海底隧道	青岛	7788	射流风机 + 竖井分段送排风 + 集中排风纵向式	2011 年	双向 6 车道	
	武汉长江隧道	武汉	3440	射流风机 + 2 端洞口集中排风(合流型) + 重点段半横向排烟通风	2008 年	双向 4 车道	
	翔安海底隧道	厦门	6065	竖井分段送排纵向式	2010 年	双向 6 车道	
	珠江隧道	广州	1238.5	射流风机诱导型纵向通风	2007 年	双向 4 车道	
	南京长江隧道	南京	3825	射流风机 + 重点半横向排烟	2010 年	双向 6 车道	
	玄武湖隧道	南京	2290	射流风机 + 2 端洞口集中排风纵向通风	2003 年	双向 6 车道	
	浏阳河隧道	长沙	1400	全射流纵向式	2009 年	双向 4 车道	
	营盘路南线隧道	长沙	2434	单竖井送排风 + 射流风机组合纵向式	2011 年	双向 4 车道	
	营盘路北线隧道	长沙	2709	全射流纵向式	2011 年	双向 4 车道	
	外环沉管隧道	上海	1370	射流风机 + 1 端洞口竖井集中排风纵向通风	2003 年	双向 8 车道	
	打浦路隧道复线	上海	3073	纵向式通风	2010 年	单向	
	军工路隧道	上海	2411	射流风机 + 2 段洞口集中排风纵向式	2003 年	双向 8 车道	
	复兴东路隧道	上海	2785	射流风机 + 竖井送排纵向式	2004 年	双向 6 车道	
	沪崇越江隧道	上海	8100	射流风机 + 半横向排烟	2009 年	双向 6 车道	
	西藏南路越江隧道西线	上海	2009	射流风机 + 1 端洞口集中排风纵向通风 + 重点半横向排烟	2010 年	双向 4 车道	
	九华山隧道	南京	2780	射流风机 + 洞口集中送排纵向式	2005 年	双向	
	穿山隧道	梧桐山下行隧道	深圳	2258	纵向式通风	1997 年	双向 4 车道
		开元寺隧道	济南	1501	全射流风机纵向通风	2005 年	双向 4 车道

隧道火灾场景中,火灾持续时间是指从起火到火势得到控制并开始降温所经历的时间。隧道火灾持续时间与很多因素有关,其中包括:①隧道长度;②参与燃烧车辆;③主动灭火措施及灭火工作的开展。在城市交通隧道火灾案例中,发生事故的隧道一般属于短到中等长度,而长大隧道的火灾案例相对较少。考虑到城市交通隧道的车辆间距限制以及配备良好的主动灭火设施(如武汉长江隧道安装了细水雾系统),可以快速有效扑灭火灾。如 2009 年 12 月 6 日在重庆南城隧道中车辆起火是在下午 2 点 28 分左右,到下午 3 点 09 分,消防队完成灭火并撤离。因此,一般城市交通隧道火灾持续时间可以按 0.1 ~ 1.0h 考虑。火灾瞬态模拟采用 Heskestad 提出的 t^2 火灾模拟^[21]:

$$Q(t) = \min\{Q_{\max}, \alpha t^2\} \quad (1)$$

式中 t 为时间, s; Q_{\max} 为最大火源功率, kW; α 为火灾等级常数。根据车辆的燃烧类型以及隧道火灾特点,可选用快速火进行模拟,即 α 为 0.0469。

4.2.3 城市交通隧道计算临界风速时考虑坡度及出入口影响

关于纵向通风方式坡度对临界风速的影响问

题,国外的 Danzier^[22]、Kennedy^[23] 和 Heselden^[22] 根据 Froude 数相似理论和实验数据,得出有坡度修正的 Kennedy 临界风速求解方程组; Oka 和 Atkinson^[25] 进行了 1:10 的缩比例模型试验,在实验结果分析中采用了无量纲化的热释放速率和无量化的临界风速进行分析,提出了临界风速的计算公式之后,Atkinson 和 Wu^[26] 又在这一模型隧道中进行边坡度的实验,得到了隧道内临界风速的坡度修正系数。国内北京工业大学的张娜^[27]、中国科技大学的陈海峰^[28] 利用数值模拟手段和浙江省交通规划设计研究院的吴德兴^[29] 等人根据模型试验方法,提出了临界风速的坡度影响修正公式,但这些修正公式并没有得到普遍的应用。

Kuang-Chung Tsai 等^[30] 研究火源离出入口距离对临界风速的影响,在不考虑出入口外部环境对临界风速的影响,火源距隧道出入口的距离越近,同样火灾工况下临界风速值越小。

4.2.4 城市交通隧道火灾工况车辆安全距离及多火源工况下烟气控制

车辆在隧道内由于碰撞或其他原因而引起火灾并释放出大量的热量,与其相撞的车辆和邻近车辆可能被引燃,从而加大火灾规模。高温烟气产生的

热辐射是引发相邻车辆火灾的主要原因之一。顾正洪^[31]、谢宝超^[32]、赵明星^[33]采用数值模拟手段分析 10MW 火灾,通风速度达到临界通风速度时,与火区上游相邻的车辆停车距离只要满足正常情况下的安全停车距离(5~10 m),就能保证不被引燃;为了不使火灾在车辆之间蔓延扩大,前后车辆之间的停靠距离至少要大于车辆引燃临界距离。

Kuang-Chung Tsai 等^[34]研究了隧道内发生引燃且出现多火源情况下的临界风速问题。通过实验研究和数值模拟手段研究隧道多火源火灾情况下的行为,结果表明:当两个相同火源功率相通时,考虑临界风速以火源功率叠加计算,但随着车辆之间的距离增加而减小,一旦两个火源完全分开,可以只通过分析一处火源而确定。上游大火下游小火情况下,临界风速随着车辆之间的距离增加而减小;当上游小火下游大火时,临界风速随着车辆之间的距离减小不明显。

5 关于城市交通隧道火灾研究的发展方向

隧道火灾的主要研究方法为数值模拟、试验研究和理论研究。根据 PIARC 统计,目前世界上关于火灾试验共分为三大类,即:在运营前或运营时的隧道中进行现场试验、比例模型试验。在运营前或运营时的隧道中改进试验得到的结果最理想、可信度最高^[34,35],但因其费用昂贵、火灾工况有限、可重复性差等原因,所以实验研究一般采用比例模型试验^[36,37];自 80 年代以来,随着计算机技术的快速发展,数值模拟研究方法具有费用低、可重复性强的优点得到广泛的应用,其在火灾过程的数值模拟方法中,主要有场模拟^[38]、区域模拟^[39,40]、场-网复合模拟^[41]。建立数学模型时,要合理的设置边界条件以及火源的特性,这些参数需要通过现场试验的数据来确定,因此开展数值模拟和局部现场试验相结合的研究是研究城市交通隧道的合理手段。

由于城市交通隧道结构的特殊性和复杂性,简单套用公路隧道设计规范并不合适,为了适应城市交通隧道发展要求,需要在以下方面开展研究工作。

(1) 基础理论的完善。如城市交通隧道出入口、坡度、通风对火灾羽流非线性系统动力轨道的拓扑和演化特性。由于通风系统与火羽流之间相互影响,在扼流效应、浮力效应、烟流摩擦以及能质传递过程等因素综合作用下构成了包括浮力、黏性力、惯

性力相互作用,扩散、质能传递和化学反应的非线性动力系统,产生复杂的时空混沌行为。以非确定性特征控制烟气蔓延的同时,还会影响到烟气层的稳定。

(2) 复杂结构城市交通隧道通风方式的适用性研究。随着人类技术的提高,城市交通隧道的结构形式将变的多样化,比如弯道、岔路口、弯道不同的结构形式对隧道火灾蔓延的规律有很大的影响,目前国内开展了坡度对隧道火灾烟气扩散研究,应进行其它局部阻力结构形式下的隧道火灾烟气扩散规律的研究。良好的通风系统可以保障隧道火灾时人员安全疏散,而不同的通风方式有各自的优缺点及适用条件,因此,应深入研究各类通风方式的适用性,保障复杂结构隧道通风排烟系统的有效性。

(3) 场-网复合模拟技术应用隧道火灾通风排烟设计研究。由于城市交通隧道距离因素,整条隧道模拟进行场模拟需要划分大量网格,数值模拟一般选取火源前后一段距离(一般为 300~500m)进行数值模拟。场-网复合模拟技术在火源附件采用场模拟分析烟气参数,而隧道其他部分进行一维的网络模拟,通过相接界面计算参数的迭代耦合,能够有效进行整条隧道通风排烟系统的研究,提高隧道通风排烟系统设计的效率和精度。

6 结 论

通过对城市交通隧道的结构特点、火灾特性以及通风排烟模式进行分析研究,得到主要结论如下:

(1) 与一般公路隧道相比,城市交通隧道由于受到隧道结构、位置、车流密度、出入口设置等因素影响,火源参数及烟气扩散规律有其特殊性。通风、防排烟设计不能简单套用现有的公路隧道设计规范进行防排烟设计,需要开展大量的相关基础研究工作;

(2) 城市交通隧道的通风系统普遍采用射流风机做为辅助通风手段的纵向通风方式。隧道坡度以及出入口设置对烟控的临界风速影响需要考虑;设计中计算临界风速时的火源可以设为 10MW 的 t^2 快速火,持续时间为 0.1~1.0h;

(3) 采用数值模拟技术结合局部现场试验是研究城市交通隧道火灾烟气扩散合理可行的手段,开展火灾非线性系统演化、火灾羽流复杂的时空行为研究以及发展场-网模拟技术将有益于设计。

[参考文献]

- [1] 朱合华,彭芳乐,闫治国.国内隧道火灾安全研究现状及启示[A].上海市地下空间综合管理学术论文集[C].上海,2006, pp35~139.
- [2] 康晓龙,王伟,赵耀华.城市地下交通隧道性能化防火设计探讨[J].建筑科学.2007,Vol.23, No.8, pp4~8.
- [3] 华高英,王伟,赵耀华,李磊.城市地下交通联系隧道防火设计探讨[J].建筑科学.2008, Vol.24, No.8, pp15~18.
- [4] 杨高尚,彭立敏,安永林.公路隧道火灾起因及预防研究[J].灾害学.2008, Vol.23, No.3, pp85~90.
- [5] Ricky Carvel. The history and future of fire tests [J]. Tunnels & Tunnelling International. 2002, Vol.11, pp34~35.
- [6] 付成云.城市交通隧道火灾人员疏散及风险评估[D].北京工业大学硕士学位论文,2010.
- [7] 朱秀莲.公路隧道火灾特性及其防治初探[J].国防交通工程与技术,2004, No.3, pp10~13.
- [8] 康晓龙,王伟,赵耀华.公路隧道火灾事故调研与对策分析[J].中国安全科学学报.2007, Vol.17, No.5, pp110~116.
- [9] R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt, D. D. Drysdale. Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels [J]. Fire Safety Journal. 2001, Vol. 36, pp 569~596.
- [10] Cheong Mun Kit. Assessment of vehicle fire development in road tunnels for smoke control ventilation design [D]. Ph. D dissertation of University of Canterbury. 2009.
- [11] Li Yanfeng, Zhao Mingxing, Fu Chengyun, Li Junmei, Fan Hongming. Effect of slope on smoke propagation in and urban traffic tunnel fire [C]. Progress in Safety Science and Technology. Vol. VIII, pp593~598. Proceedings of the 2010 International Symposium on Safety Science and Technology. Oct 26~29, 2010, Hangzhou, China.
- [12] 华高英.城市地下交通联系隧道性能化防火设计研究[D].北京工业大学硕士论文,2009.
- [13] 徐琳,张旭.超大断面水平隧道纵向通风临界风速 CFD 分析[J].地下空间与工程学报,2007, Vol.3, No.1, pp124~127.
- [14] 茅新丰.火灾工况下城市隧道自然通风模型实验[J].解放军理工大学学报(自然科学版).2008, Vol.9, No.4, pp357~362.
- [15] Ballesteros-Tajadura, Carlos Santolaria-Morros, Eduardo Blanco-Marigorta. Influence of the slope in the ventilation semi-transversal system of an urban tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, vol.21, pp 21~28.
- [16] 王文安,邓欣.我国城市交通隧道通风系统设计现状分析[C].2011年公路隧道安全设计及运营管理暨水下隧道建设技术国际会议论文集.厦门,2011.
- [17] Yingzhen Li, Bo Lei, Haukur Ingason. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires [J]. Fire Safety Journal 2010, Vol. 45, pp361~370.
- [18] Hitoshi Kuriokaa, Yasushi Okab, Hiroomi Satoha, Osami Sugawac. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels [J]. Fire Safety Journal 38 (2003) 319~340.
- [19] Y. Wu, M. Z. A. Bakar. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity [J]. Fire Safety Journal. 2000, Vol. 35, pp 363~390.
- [20] World Road Association. PIARC Committee on Road Tunnels Operation. Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels [R]. 2007.
- [21] Fire Safety Engineering—Selection of design fire scenarios and design fires [S]. ATS 5387. 2—2006. Australia. Nov 2006.
- [22] Danziger N H, Kennedy W D. Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels [A]. In: Proceedings of the 4th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels [C]. York, UK, 1982: 169~186.
- [23] Kennedy W D, Parsons B. Critical velocity: past, present and future [A]. In: One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels [C], London, 1996.
- [24] Heselden A J M. Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels [A]. In: Proceedings of the 2nd International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels [C]. Cambridge, UK, 1976.
- [25] Oka Y, Atkinson GT. Control of smoke flow in tunnel fires [J]. Fire Safety Journal. 1995, Vol. 25, pp305~322.
- [26] Atkinson GT, Wu Y. Smoke control in slopping tunnels [J]. Fire Safety Journal. 1996, Vol. 27, pp335~341.
- [27] 张娜,等.坡度隧道中烟气控制的 CFD 模拟研究[J].公路.2005, No.5, pp180~182.
- [28] 陈海峰,周德闯,王浩波,汪箭.隧道坡度对临界风速影响的数值研究[J].火灾科学.2009, Vol.18, No.8, pp148~153.
- [29] 吴德兴,李伟平,郑国平.公路隧道火灾排烟临界风速模型试验与数值解析研究[J].公路.2011, No.8, pp298~303.
- [30] Kuang-Chung Tsai, Yee-PingLee, Shin-KuLee. Critical ventilation velocity for tunnel fires occurring near tunnel exits [J]. Fire Safety Journal. Fire Safety Journal. 2011, Vol. 46, pp556~557.
- [31] 顾正洪,程远平,周世宁.交通隧道火灾时车辆临界安全距离的研究[J].中国矿业大学学报.2004, Vol.33, No.4, pp424~427.
- [32] 谢宝超,徐志胜.隧道纵向通风对火灾规模和火灾蔓延的影响[J].防灾减灾工程学报.2009, Vol.29, No.4, pp451~456.
- [33] 赵明星.城市交通隧道车辆间火灾蔓延特性及隧道火灾实验研究[D].北京工业大学硕士学位论文,2011.
- [34] Kuang-Chung Tsai a n, Hon-HsiangChen a, Shin-KuLee Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, Vol. 98, pp650~660.

(下转第 87 页)

矩形应力图形的混凝土受压区高度; b, h 分别为矩形截面的宽度和高度; f_{rw} 为钢丝绳网片抗拉强度设计值; A_{rw} 为钢丝绳网片受拉截面面积; a' 为纵向受压钢筋合力点至混凝土受压区边缘的距离; h_0 为构件加固前的截面有效高度; ψ_{rw} 为考虑受拉钢丝绳网片的实际拉应变可能达不到设计值而引入的强度利用系数; ε_{cu} 为混凝土极限压应变, 取 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$; $\varepsilon_{rw, \rho}$ 为考虑二次受力影响时, 钢丝绳网片的滞后应变。若不考虑二次受力影响, 取 $\varepsilon_{rw, \rho} = 0$ 。 $\varepsilon_{rw, \rho}$ 按下式计算:

$$\varepsilon_{rw, \rho} = \frac{\alpha_{rw} M_{0k}}{E_{s0} A_{s0} h_0}$$

其中, M_{0k} 为加固前受弯构件验算截面上原作用的弯矩标准值; E_{s0} 为原钢筋的弹性模量; α_{rw} 为综合考虑受弯构件裂缝截面内力臂变化、钢筋拉应变不均匀以及钢筋排列影响的计算系数。按《混凝土结构加固设计规范》相关表格取用。

通过采用钢丝绳网片-聚合物砂浆外加层加固法, 既满足了楼板承载能力极限状态的要求, 又满足了楼板正常使用极限状态的要求。

通过本工程, 总结出钢丝绳网片-聚合物砂浆外加层加固方法的主要优点如下:

(1) 钢丝绳强度高, 其标准强度约是普通钢材的 5 倍。因此, 较小的直径(一般在 2.5 ~ 4.5mm) 即可达到较粗普通钢筋的抗弯和抗剪承载能力;

(2) 聚合物砂浆是一种既具有高分子材料的粘接性, 又具有无机材料耐久性的新型混凝土修补材料, 其抗拉、抗压强度高, 固化迅速, 粘接性能好, 有

很好的保水性能和抗裂性、高耐碱性;

(3) 由于钢丝绳直径细, 聚合物砂浆性能好, 因此, 外加层厚度可以较薄(一般在 25 ~ 40mm), 加固后结构在刚度增加的同时, 自重增加很小;

(4) 具有主动加固的特性。通过对钢丝绳的张拉, 可以消除钢丝绳的滞后应变, 充分发挥钢丝绳的高强度, 显著提高结构构件的承载力。同时, 还能减小原结构构件的初始裂缝和挠度。这是粘钢加固法和粘贴碳纤维加固法等被动加固法无法实现的;

(5) 具有防火、耐高温、耐腐蚀的特点, 加固性能可靠、耐久。

4 结束语

本工程为一项综合加固改造项目, 在设计过程中, 我们秉承了《混凝土结构加固设计规范》的基本原则, 针对不同的结构构件, 不同的荷载变化情况, 具体问题具体分析, 恰当地运用了增大截面加固法、粘贴纤维复合材加固法等多种加固方法, 尤其是楼板加固采用了钢丝绳网片-聚合物砂浆外加层加固法, 充分保证了结构安全性和舒适性的要求, 实现了建筑师和酒店方的意图, 达到了各方满意的效果。

[参考文献]

- [1] GB50367—2006 混凝土结构加固设计规范[S].
- [2] GB50023—2009 建筑抗震鉴定标准[S].
- [3] JGJ116—2009 建筑抗震加固技术规程[S].
- [4] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 现有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [5] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [6] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [7] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [8] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [9] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [10] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [11] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [12] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [13] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [14] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [15] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [16] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [17] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [18] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [19] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [20] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [21] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [22] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [23] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [24] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [25] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [26] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [27] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [28] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [29] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [30] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [31] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [32] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [33] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [34] 程绍革, 史铁花, 戴国莹. 既有建筑抗震加固的基本规定[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 128 ~ 131.
- [35] 方正, 袁建平, 齐运才, 张雷. 武汉长江隧道通风排烟问题的数值模拟研究[J]. 暖通空调, 2009, Vol. 39, No. 1, pp24 ~ 26.
- [36] Yanfu Wang, JunchengJiang, Dezhi Zhu. Full-scale experiment research and theoretical study for fires in tunnels with roof openings[J]. Fire Safety Journal. 2009, Vol. 44, pp 339 ~ 348.
- [37] Haukur Ingason, YingZhen Li, Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation[J]. Fire safety Journal. 2010, Vol. 45, pp371 ~ 384.
- [38] L. H. Hu, R. Huo, W. Penga, W. K. Chow, R. X. Yang. On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2006, Vol. 2, pp 650 ~ 655.
- [39] Chen Xiaojun. Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2008, Vol. 23, pp 75 ~ 79.
- [40] Chow, W. K. Simulation of tunnel fires using a zone model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 1996, Vol. 11, No. 2, pp 221 ~ 236.
- [41] F. Colella, G. Rein R. Borchellini, R. Carvel, J. L. Torero, V. Verda. Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modeling approach [J]. Building and Environment. 2009, Vol. 44, pp2357 ~ 2367.

(上接第 80 页)