

公路隧道衬砌开裂损伤机理 与加固补强方法



刘学增 桑运龙 师 刚 朱文轩 著

公路隧道衬砌开裂损伤机理 与加固补强方法

刘学增 桑运龙 师 刚 朱文轩 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

针对公路隧道衬砌开裂的问题,本书运用理论解析、模型试验以及数值模拟等手段,围绕公路隧道衬砌裂缝成因及快速识别、带病害结构承载力分析、结构健康度评价、不同加固设计计算方法等关键问题,开展了大量的基础研究及现场试验工作,形成了基于监测检测的公路隧道健康度评价及加固设计计算方法。内容涉及作者团队大量创新性的研究与研发工作,可为公路隧道设计、施工及后期运维管养,提供有效的技术指导。

本书可用作隧道工程有关专业学生和年轻工程师的专业参考书和相关课程的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道衬砌开裂损伤机理与加固补强方法/刘学增等著. --上海:同济大学出版社,2018.5

ISBN 978-7-5608-7743-3

I. ①公… II. ①刘… III. ①公路隧道—隧道衬砌—开裂—损伤(力学)—研究 ②公路隧道—隧道衬砌—加固—研究 IV. ①U455.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 025542 号

公路隧道衬砌开裂损伤机理与加固补强方法

刘学增 桑运龙 师刚 朱文轩 著

责任编辑 高晓辉 助理编辑 宋立 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排 版 南京新翰博图文制作有限公司

印 刷 上海同济印刷厂有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 15.5

字 数 387 000

版 次 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7743-3

定 价 68.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

截至2017年底,我国公路隧道共计16 229处、1 528.51万m,规模已居世界第一。目前隧道大规模新建时期基本结束,已经进入了新建和维修并重的时期,隧道维修加固成为行业新焦点。隧道病害调查表明,由于工程地质条件和设计施工、运营管理等多种因素的影响,衬砌开裂已成为公路隧道的主要病害之一,不仅降低了隧道结构承载力,还容易诱发渗漏水,对隧道的正常运营安全构成威胁。对隧道进行适时的保养维修,可以有效延缓隧道病害发展,保障或延长隧道服役寿命,但因隧道修建在复杂的岩土体介质中,属于半隐蔽工程,衬砌开裂成因、损伤机理、承载力评价以及加固维修极为复杂。因此,系统研究公路隧道衬砌开裂损伤机理及加固补强方法具有重要的应用价值。

目前,在公路隧道衬砌裂缝获取、评价及维修处治等方面国内还没有建立成熟的技术体系。隧道衬砌开裂多采用人工检测,效率低下;带裂缝衬砌的损伤程度、健康度以及剩余承载力的内在联系尚缺乏定量的判断;加固补强多采用工程经验类比,加固机理、加固时机以及加固参数缺乏深入研究。基于这一现状,作者开展了大量的基础性研究工作,取得了一系列成果。结合成果转化、推广应用情况汇总形成本书。具体章节内容如下:

第1章为绪言,论述公路隧道衬砌开裂损伤机理和加固维修的国内外研究现状。第2章介绍不同形态的衬砌裂缝成因及快速判别方法。第3章、第4章基于足尺和缩尺模型试验,对比纵向裂缝不同分布位置、深度等参数对隧道结构承载力的影响,分析损伤过程以及健康度的演化。第5章、第6章主要介绍套拱加固、粘钢加固、碳纤维加固的模型试验成果,分析不同加固方式的效果,确定合理的加固时机。第7章介绍公路隧道衬砌加固补强设计计算方法。第8章简要介绍数字图像处理技术在裂缝快速识别中的应用。第9章介绍隧道衬砌开裂病害处治方法。第10章结合工程案例介绍裂缝调查、安全评估、加固方法等。

本书内容是对国家自然科学基金项目“松动荷载引起的公路隧道衬砌损伤演化特征及套拱加固的计算方法”(NO. 51478342)研究成果的系统总结,综合了周敏、叶康、张文正、包浩杉、古银城、桑运龙、高洁、王煦霖、游贵良、张昱辉、刘文艺等研究生大量的试验、理论分析与研究成果,在此深表感谢。

由于时间仓促,加之作者水平有限,本书谬误错漏在所难免,敬请广大读者批评指正。

刘学增

2018年4月

目 录

前 言

第 1 章 绪言	1
1.1 概况	1
1.2 国内外研究现状	3
第 2 章 基于形态特征的公路隧道衬砌裂缝成因快速判定	10
2.1 公路隧道衬砌裂缝分类	10
2.2 公路隧道衬砌裂缝成因分析	15
2.3 不同裂缝形态成因快速判别	18
第 3 章 纵向裂缝对结构承载力的影响分析与计算方法	26
3.1 纵向裂缝对隧道衬砌结构刚度影响	26
3.2 带裂缝的隧道结构承载力计算方法	45
3.3 不同条件下隧道承载力的影响因素研究	51
第 4 章 松动及偏压荷载下衬砌损伤演化与健康度分析	61
4.1 松动荷载下衬砌变形及损伤演化规律研究	62
4.2 偏压荷载下衬砌变形及损伤演化规律研究	82
第 5 章 公路隧道衬砌套拱加固承载力评价	89
5.1 基于二次受力的叠合式套拱加固分析	89
5.2 基于一次受力的套拱加固及裂缝影响分析	102
第 6 章 公路隧道衬砌内表面补强加固承载力评价	122
6.1 粘钢加固	122

6.2	碳纤维加固	139
6.3	粘钢加固和碳纤维加固试验对比分析	149
第7章	公路隧道衬砌加固补强设计计算	154
7.1	设计计算原则	154
7.2	荷载	154
7.3	计算模型	155
7.4	套拱加固承载力验算	158
7.5	粘贴钢板加固法	164
7.6	粘贴纤维复合材料加固法	167
第8章	裂缝快速调查技术	172
8.1	裂缝识别检测技术及精度分析	172
8.2	公路隧道检测车	181
第9章	隧道衬砌开裂病害整治方法	185
9.1	隧道衬砌裂缝病害整治原则	185
9.2	加固方法及其适应性	185
9.3	隧道裂缝处治、加固方法及其施工工艺	187
第10章	隧道衬砌裂缝监测及加固设计案例	193
10.1	五峰山1号隧道	193
10.2	陇首一隧道	203
10.3	武吉高速公路引水隧道	224
参考文献		234

第1章 绪 言

1.1 概况

随着我国交通基础设施建设的快速发展,公路隧道的规模也快速增加,据 2017 年交通运输行业发展统计公报统计,截至 2017 年底,全国公路隧道共计 16 229 处(约 1 528.51 万 m),其中,特长隧道 902 处(401.32 万 m),长隧道 3 841 处(659.93 万 m),规模和建设速度均居世界第一^[1]。隧道工程的发展大致可以分为三个时期:大规模新建时期、新建和维修改造并重时期、对隧道的现代化改造和维修加固为重点的时期。我国公路隧道正由大规模新建时期过渡为建设与维修并重的阶段,养护检查、状况评定、维修加固等的关注度逐渐提高。

大量隧道工程实例表明,由于地质、地形、气候条件和设计、施工、运营过程中各种因素的影响,隧道建成后在使用过程中出现了各种各样的病害,部分隧道甚至在运营初期就产生较严重的病害,如衬砌开裂、隧道渗漏水、衬砌背后空洞、衬砌侵蚀和隧道冻害^[2,3],从而造成结构物耐久性降低或使用寿命缩短^[4]。结合 2015 年某省部分运营高速公路隧道的病害调查工作,发现被检查的 389 座隧道均出现程度不一的病害,如图 1-1 所示,裂缝、渗漏水病害占比最高,对结构安全威胁较大^[5-7]。

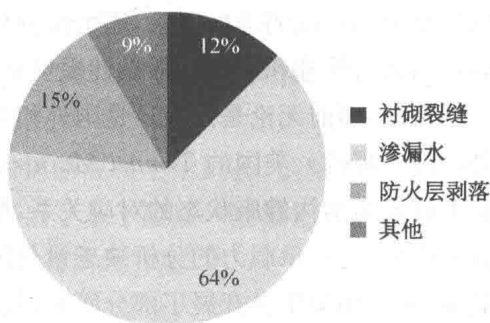


图 1-1 隧道病害类型统计图

衬砌开裂使得混凝土有效面积减小,导致界面承载力降低,甚至引起坍塌破坏^[8]。同时,裂缝常常成为地下水进入隧道的通道,诱发钢筋锈蚀,加剧衬砌裂损;在寒冷地区还会产生冻胀病害等。因此对公路隧道衬砌裂缝产生机理与修复技术进行研究十分重要^[9-12]。针对公路隧道衬砌裂缝检测、健康状态评定、加固技术现状总结如下。

1. 公路隧道衬砌裂缝检测

隧道运营乃至建设阶段,混凝土衬砌会因为各种原因产生裂缝,影响其使用、耐久性乃至安全。准确掌握裂缝的形态、长度、宽度等,在正确判断混凝土构件的状态,并提出科

学合理的处理方案中起着至关重要的作用。混凝土裂缝是事故处理、施工验收、陈旧建筑物安全性鉴定、维修和补强设计时的必须检测项目,其中裂缝宽度的检测应用最为广泛。裂缝宽度的检测方法有很多,随着测试技术的进步,对不同部位裂缝宽度的量测手段以及裂宽量测精度方面均有了较大的提高。

目前,关于混凝土表面裂缝的检测方法大致包括目测法、声发射(Acoustic Emission, AE)法及摄影量测法等多种检测技术。目测法是用刻度尺、放大镜等量测裂缝宽度,把目测结果绘成草图,这需要大量的人力和时间,且精度不高;目前经常使用的裂缝测宽仪等仪器则是通过放大图像,然后利用屏幕上的刻度尺目测读取宽度,主观性较大,对不能触及的裂缝测量过程繁琐,裂缝检测作业效率低下。声发射法可检测出裂缝的位置、大小、扩展情况、种类和深度,但只适于正在发生的动态裂缝。而摄影量测法主要用来调查混凝土表面产生的裂缝,利用数码相机、摄像机等进行裂缝图像快速采集,然后通过计算机对图像进行处理分析,提取出想要得到的裂缝特征数据,与目测法相比,裂缝检测作业速度和精度都得到了有效提高。随着计算机图像处理技术的不断发展,数字照相及图像处理技术开始逐渐深入到隧道病害调查作业中。

2. 公路隧道衬砌健康状态评定

外力变化、环境侵蚀、材料劣化、设计施工不当等是导致衬砌裂损的主要因素,其对隧道结构承载性能影响也不同。而不同成因、形态的裂缝将呈现不同的表现形式,可根据裂缝形态、裂缝延续性、裂缝所处位置等特征判断裂缝成因,最后得出裂缝对衬砌健康状态的影响,从而可以有针对性处治周边环境或是进行衬砌结构补强。判断裂缝状态,除了可以消除影响衬砌的消极因素,还可以分析衬砌结构当前的剩余承载力及损伤扩展情况,为后续的运营管理和结构补强设计提供必要的参数。

然而,当前无论是国内还是国外相关的行业标准(如国内新颁布的 2015 版《公路隧道养护技术规范》、美国的 *Tunnel Maintenance and Rehabilitation Manual*),虽然均给出了病害特征与结构健康状态的对应关系,但其评价标准多是基于经验总结,由定性或半定量分析得来,结构承载力的分析缺乏量化依据,未能建立病害结构承载力与健康状态的对应关系,虽有相关学者开展了部分研究,但是,目前尚缺乏一套简易、基于承载力分析的健康度评价方法。

3. 公路隧道衬砌加固

对已经出现中等到严重程度病害的隧道及时进行维修加固,对症下药,采取适当的对策和措施,不仅能保证隧道良好的运营条件和结构物的使用功能,还可以保障或延长隧道使用寿命。加固补强主要有套拱加固、内表面补强(粘钢加固、粘贴碳纤维加固)等多种方法。

针对带裂缝及渗漏水病害的隧道,国内工程界常选用套拱加固的方法,不仅能较大地提高衬砌结构承载能力,还能重新设置防排水系统,对渗漏水处治效果较好^[13],如重庆八一、向阳公路隧道及海南大茅隧道均采用了套拱加固方案。内表面补强适用于因开裂和部分材料劣化,衬砌块有可能掉落,但没有漏水、净空富余小的比较狭窄的场合;通常是在

衬砌刚开始开裂的局部粘贴碳纤维布或钢板来进行加固,比起套拱加固方法,具有施工便捷、轻便、能较好地适应弧形结构的需要、易于保持原有结构的完整性等优点,因此正在逐步地被运用到衬砌结构的补强加固中。

隧道结构不同于地上建筑,维修加固时很难卸荷,初始应力水平无法完全消除,存在二次受力的问题。目前基于二次受力模式考虑外部荷载下加固裂损衬砌的研究相对较少,补强结构损伤演化机理认识不清;对不同损伤程度的衬砌采取何种加固方法以及损伤到何种程度进行加固没有定量标准,计算方法尚不成熟,多是依据经验定性地选择加固时机、加固方法,经济性、安全性难以得到有效保证,并且不利于加固设计工作的开展。

总体来看,针对衬砌开裂的问题,国内还没有形成成熟的流程和体系,病害检测效率低,衬砌损伤程度和剩余承载力的判定缺乏力学依据,加固设计多是基于经验类比,因此,需要从理论上进一步完善。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 隧道承载力评估研究现状

隧道病害影响行车安全,造成安全事故,亟需科学、有效的分析与研究方法,来分析评估病害产生对衬砌结构安全和使用性造成的影响,为病害治理对策提供依据。目前隧道病害出现后,工程师只能结合隧道病害的表观特征和隧道所在地区的地质、气候、水文等信息,根据经验判断病害成因,并制定相应的加固方案和措施,这样,不可避免地会导致不合理的病害治理和措施,造成不必要的浪费或灾害。所以,对受损衬砌结构展开承载力评估十分重要^[14]。

黄慧明设计了15根试件的碳纤维正截面加固钢筋混凝土梁试验,试验结果表明,加载历史对碳纤维加固的效果没有明显的影响,并提出了基于胶层—混凝土界面黏结失效破坏,粘贴碳纤维加固后钢筋混凝土梁正截面承载力的简化算法^[15]。

刘庭金等根据二次衬砌压力实测值,应用荷载结构法对最大实测压力断面二次衬砌结构内力进行计算,根据规范对二次衬砌轴力和剪力设计值进行计算,对二次衬砌进行了结构强度校核^[16]。

江芳芳、杨林德在分析了碳纤维补强衬砌结构的承载机理基础上,对带裂缝工作的公路隧道衬砌结构提出了一种内力计算方法,特点为将裂损衬砌视为铰接拱形衬砌结构,补强后的衬砌视为无铰结构,并给出了计算内力的解析式^[17]。

胥民尧运用断裂力学理论分析了公路隧道拱顶纵向裂缝的断裂行为,得出了简单荷载情况下的应力强度因子计算公式,并用ANSYS软件得出了裂缝深度对应力强度因子的影响规律^[18]。

周敏取拱顶开裂管片为研究对象,开展了一系列室内足尺受弯试验,研究了混凝土和钢筋混凝土衬砌试件加载过程中,衬砌试件的受力变形及裂缝开展规律,建立了隧道衬砌

单一裂缝情况下的承载力评价模型,并通过数值计算分析裂缝位置、裂缝深度和隧道围岩抗力对衬砌承载力的影响^[19]。

王华牢对隧道主要裂缝进行安全评价,给出安全等级,同时应用刚度退化模型对隧道原结构进行承载力评价,给出加固前的隧道结构安全系数,采用基于刚度退化理论的混凝土刚度折减公式,对带裂缝的衬砌结构进行了安全系数验算,用以分析裂损衬砌的承载性与安全性^[20]。

张文正基于截面分析理论,得到不同裂缝深度下的刚度折减系数、裂缝深度与承载力的对应关系,进而推导受力裂缝下隧道衬砌承载力的评价方法,以及衬砌开裂荷载、不同荷载下的裂缝深度与安全系数^[21]。

古银城、高洁基于全周加载装置,开展1:10的相似模型试验,先后按照松动荷载、偏压荷载模式,分析了不同裂损状态下衬砌结构的变形规律、破坏过程、破坏模式及极限承载力^[22, 23]。

申士军以试验研究和理论分析相结合的研究手段,对损伤混凝土结构加固性能以及加固后的耐久性退化机理和规律进行了深入分析和探讨,结果表明,粘贴CFRP布(Carbon Fiber Reinforced Plastic,碳纤维增强复合材料)加固梁加载破坏形态基本相同,梁加固前的损伤状况的差异对试件加固后力学性能产生影响,并建立了锈蚀钢筋混凝土加固柱极限承载力理论计算模型^[24]。

刘新根、刘学增等基于荷载-结构法隧道计算理论,建立了公路隧道衬砌的裂缝、材料劣化、空洞、附加荷载等病害的力学评价模型,并研究开发了公路隧道衬砌病害力学模拟分析软件,以便量化评价衬砌病害对结构承载力的影响^[25]。

综上所述,已有学者运用不同手段,对受损隧道衬砌承载力以及加固结构承载力进行研究,取得一定研究成果,为后续加固工作提供了一定参考。

1.2.2 隧道衬砌裂缝检测技术研究现状

裂缝会影响衬砌结构的安全性、使用性和耐久性。准确掌握裂缝的形态、长度、宽度等特征,对正确判断衬砌结构状态并提出科学合理的处理方案至关重要。

裂缝宽度对衬砌刚度及耐久性有不容忽视的影响,所以,裂缝宽度应严格控制在允许的范围内,在进行结构调查、检测及试验等工作时,都要对结构的裂缝及其宽度进行检测。裂缝宽度的检测方法有很多。

在国外,West G A在伦敦召开的关于图像处理在自动监测中应用的学术讨论会中,有一篇文章首次将图像处理的技术应用到对岩石表面图像的分析中^[26]。Reid T R等对岩体照片的识别提出了一种新方法——首先,将照片转化成为灰度图像;然后,将像素颜色的深浅作为高度坐标,这样,就把照片变换成了一幅立体高程图,其中连续的沟渠就是岩体的裂隙部分^[27]。Maerz N H等在总结前人对岩体碎片图像识别研究的基础上将该技术应用到了岩石隧道开挖现场^[28]。Kemeny J等使用LiDAR(三维激光扫描仪)测量、高解析度数码相机以及数据处理的软件,对岩体进行识别分类以及可视化展示^[29]。

在国内,李红俊等介绍了数字图像处理的基本概念、基本原理,对其中一些算法进行了详细的说明,对不同算法进行了比较。同时,在应用现有图像处理方法的同时,对滤波做了一些新的尝试。最后,将像素细分算法应用于实际生产中,获得了较好的效果^[30]。上海交通大学韩彦芳等对基于数字图像处理的表面缺损检测技术研究现状、主要问题以及检测方法进行综述^[31]。东南大学王伟等根据裂缝图像,利用类判别法找到图像分割的最佳阈值,进而提取图像的裂缝信息,然后通过编制的图像处理程序分析出研究区域的裂缝宽度及其方差。同时,还通过实验对该方法的测量精度进行了验证^[32]。长安大学褚燕利着重探讨了基于数字图像处理公路路面中裂缝病害的智能识别方法及其主要特征的提取,研究现代计算机图像处理技术在路面自动检测中的应用^[33]。

目前,国内外已有大量学者对数字图像技术在裂缝识别量测中的应用进行研究,但具体针对隧道衬砌裂缝的识别量测,这些研究尚存在一些不足之处,主要表现为:

(1) 几乎所有的研究都直接跳过图像获取步骤直接进行图像处理,文献中所提出的算法也都是针对通过接触式扫描或近距离拍摄所采集的裂缝放大图像。对于不能触及的高位置裂缝,近距离或接触式采集过程均困难繁琐,缺乏对如何在各种环境条件下拍摄得到清晰可用裂缝图像方法的探讨。

(2) 由于裂缝出现部位的随机性及拍摄距离的随机性,使得传统的粘贴标尺标定方法及定距标定法失效,需寻找一种新标定方法来代替。

(3) 裂缝在远距离拍摄图像中的面积占有比例比在接触式采集的图片中的比例要小得多,余留大面积复杂多变的背景图像,再加上远距离拍摄的图像对噪声、光线敏感,严重影响图像成像质量,使得近照中宽大裂缝的边缘提取算法不再适用,需寻找一种合适的新算法。

(4) 目前,针对公路隧道裂缝检测,由于需要人工测量,导致交通中断,社会影响较大。

因此,研究一种能在隧道中便捷、定量、快速、准确地测量裂缝特征值并进行等级评价的裂缝图像检测系统已成为隧道工程结构无损检测领域的迫切需要之一。

1.2.3 隧道加固维修研究现状

1. 隧道套拱加固研究现状

套拱加固属于加大截面加固的一种形式,通过加大构件截面面积和配筋量从而达到提高构件承载力的目的。该方法施工工艺简单,适用面广,可广泛用于梁、板、柱、墙等混凝土构件的加固^[34-37]。

隧道套拱加固形式主要可以分为两种。其一为叠合式套拱^[38, 39],即新增套拱与原有结构之间不增设防水板,并将原结构凿毛、增设钢筋,尽量确保新增套拱与原有结构能够协调变形,如重庆八一隧道、向阳公路隧道^[40]、巴鹏公路铁路隧道、万县市大垭口公路隧道加固均采取了叠合式套拱。其二为分离式套拱^[41],套拱与原有结构之间增设防水板,并设置排水系统,套拱和原结构之间是可以相对滑移的,如海南大茅隧道^[42]。

与地上结构不同的是,隧道结构修建在地下岩土介质中,属于半隐蔽工程,隧道结构具有无法卸载、净空限制大、无法外加预应力、防水要求高等特点,其补强加固技术有其特殊性。此外,隧道套拱加固由于二衬无法卸载,加固结构实际上处于二次受力模式。对于受损严重的隧道,二次受力所造成的影响是不能忽略的。目前,隧道套拱加固方面的研究还比较少,尤其是考虑二次受力机制的隧道套拱加固。

日本学者箱石安彦、真下英人等进行了一系列隧道套拱加固试验,试验装置如图 1-2 所示,研究了拱顶荷载作用下衬砌结构加固前后的变形规律、内力分布、破坏荷载、破坏模式以及套拱参数对承载力的影响,并与数值模拟结果相验证。试验中,将二衬加载破坏并完全卸载,套拱施作前二衬不受荷,其受力模式可以看做是一次受力^[43-46]。

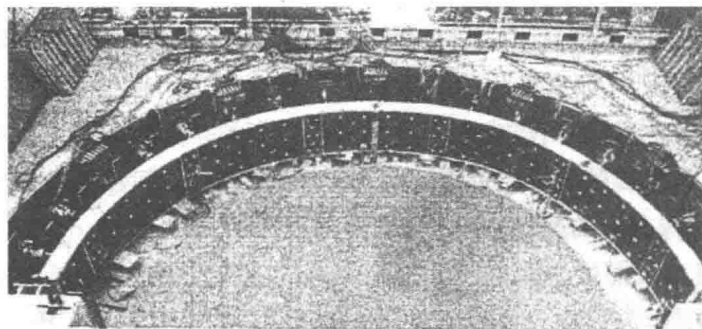


图 1-2 荷载试验装置

李敏以云南省元磨高速公路(元江-磨黑)小曼萨河隧道补强修复为研究背景,推导了隧道衬砌增大截面加固方法数学模型,该方法假定应变符合平截面假定,考虑加固材料强度利用率,计算了截面的极限承载力^[47]。

何川等通过 1:25 的室内模型试验,在选取不同围岩级别、不同地应力场及不同缺陷形式条件下,对衬砌结构进行加载试验至产生病害后,采取不同的组合补强措施,再加载至破坏,重点对不同条件下,补强后结构的最终破坏形式、承载力情况进行研究^[48-50]。

包浩杉按照一次受力模式,制作拱顶带裂缝衬砌管片的足尺加固试件,研究了套拱加固后衬砌的裂缝发展过程、刚度变化规律、破坏模式,并讨论了裂缝深度、套拱形式对补强衬砌承载力的影响,给出补强结构承载力的计算方法^[51]。

桑运龙按照一次受力模式,通过弹簧模拟地层抗力,开展松动荷载作用下拱顶带纵向裂缝的套拱加固试验研究,量化分析了不同形式套拱补强结构的变形特征、裂缝发展过程、短期刚度衰减规律,并提出了叠合式套拱补强结构破坏荷载是拱顶截面控制、分离式补强结构破坏荷载由原衬砌拱腰截面控制的结论,并依试验结果分析了原衬砌裂缝深度对补强效果的影响,得到补强结构极限承载力的计算公式^[52]。

王煦霖通过 1:10 室内模型试验,基于荷载结构法,考虑二次受力,对Ⅵ级围岩条件下隧道套拱加固进行了模型试验研究。在此基础上,推导了加固界面的弯矩曲率关系,探讨了松动荷载作用下套拱加固前后衬砌的受力变形机理,并进行了承载力分析^[53]。

刘学增等采用室内模型试验,研究了Ⅵ级围岩条件下以及松动荷载下不同损伤状态衬砌套拱加固构件变形特征、力学响应、加固效果及破坏模式^[54]。

张昱辉通过 1:10 室内模型试验,针对Ⅵ级围岩不同损伤状态的隧道二次衬砌进行套拱加固,并建立有限元计算模型,在验证实验结果的基础上,从应力角度分析了截面应力重分布及结构内力调整过程,揭示了结构开裂、损伤演化至破坏的力学机理^[55]。

实际工程中套拱补强结构属于二次受力结构,即当原衬砌已经承受一定荷载之后浇筑套拱结构,使套拱和原衬砌形成一个整体共同受力。目前,研究多是考虑一次受力结构,而套拱加固结构受力损伤规律与极限承载力还与原衬砌损伤程度、围岩等级和荷载形式密切相关,这些均是只考虑一次受力无法解决的,所以,开展考虑二次受力的套拱补强结构的损伤演化机理研究十分重要。

2. 隧道粘钢加固研究现状

关宝树在其《隧道工程维修管理要点集》中,简要阐述了粘钢加固和碳纤维加固等内表面补强方法的施工要点、应该注意的问题^[56]。

李敏等将粘钢加固方法用于对元江至磨黑高速公路中出现裂缝的隧道中隔墙、边墙和拱顶的加固上,经检测表明,粘钢加固的方案是切实可行的,且其加固效果明显^[57]。

张其顶等研究了用于地下洞库的建筑结构胶的种类,分析了地下洞库粘钢加固施工工艺流程,探讨了地下洞库粘钢加固的操作要点,总结了地下洞库粘钢加固的工程质量检查重点,对粘钢加固后的防火和防腐处理进行了论述^[58]。

Qin G、Cao S G 利用三维有限元模型,模拟了粘钢加固法用于高压输水隧洞的加固,分析了隧道衬砌混凝土粘钢加固的力学特性、胶黏剂的弹性模量和厚度比值对钢板从混凝土分担应力的影响。研究表明,当胶黏剂的弹性模量—厚度比(E/T)增加时,钢板所受的内部水压力减小,而混凝土所受的内部水压力则增加。使用弹性模量—厚度(E/T)小的胶黏剂能够提高钢板的利用率并改善混凝土衬砌的应力状态。建议在粘钢加固结构中,使用胶黏剂的弹性模量—厚度比(E/T)宜小于 10 N/mm^3 ^[59]。

柳献、毕湘利等以内张钢圈整环加固盾构隧道为对象,采用足尺试验方法对整环加固工法下单环隧道衬砌的极限承载性能进行研究,描述加固结构破坏的试验现象,获得加固结构的荷载位移曲线,并结合试验现象及数据,分析得到加固结构的关键性能点。试验结果表明,整环加固后盾构隧道的刚度与强度相对于加固之前有明显提高;加固后结构的破坏主要为钢板与混凝土衬砌的黏结面破坏。研究成果可为工程实践提供理论支撑和技术指导^[60-62]。

游贵良通过 1:10 室内模型试验,针对不同损伤状态的隧道二次衬砌进行粘钢和碳纤维加固,对比分析了粘钢加固和碳纤维加固隧道衬砌的变形规律、裂缝扩展规律、刚度衰减规律和极限承载力等^[63]。

郭彪对修建于Ⅵ级围岩($k=10.53 \text{ MPa}$)、出现损伤的衬砌结构,基于荷载结构法,开展室内 1:10 的粘钢加固模型试验,探究承受偏压荷载下的隧道经粘钢加固后的受力变形规律、破坏模式和极限承载力^[64]。

综上所述,粘钢加固在隧道衬砌加固中的运用多数参考《混凝土加固设计规范》和《公路桥梁加固设计规范》中等地面结构的加固设计规范。针对隧道这种大偏心受压结构做的研究相对较少。目前,国内的研究主要是通过检测的手段验证粘钢加固在隧道衬砌中运用的可行性,并未对加固之后的承载力及力学机理展开分析。在试验研究方面,由于模拟实际隧道加固是相当复杂的,加之模型试验的费用较大,国内缺乏相关试验研究。因此,有必要对隧道粘钢加固后的受荷力学机理开展进一步研究,为加固的设计施工提供依据。

3. 隧道碳纤维加固研究现状

艾德武等研究了碳纤维布的力学性能及特点,并对碳纤维加固方法与常规加固方法进行了对比,探讨了其在隧道工程中的应用,分析认为,碳纤维布是一种具有很多种优异性能的复合材料,对碳纤维布加固防护工程结构作了一些设想^[65]。

Mashimo H 首先进行了室内模型试验,得出了在各种荷载条件下通过纤维补强衬砌的破坏形式,然后通过有限元计算得出了纤维补强后衬砌结构的内力变化。结果显示,纤维补强对于各种荷载条件下的隧道衬砌均是有效的^[66]。

韩厦等介绍了新型复合材料在隧道衬砌加固工程中的应用,包括其在隧道衬砌维修加固工程中的应用范围和施工方法,并提出了一些经验性建议^[67]。

司化民、李朝彬探讨了碳纤维片材的优异性能,并针对其在隧道、桥梁、建筑物、涵洞及其他各种混凝土结构加固修复工程中的应用进行了分析^[68]。

Sahranavarda H, Aghanoorib R 对伊朗 Haji-Abad 隧道出现开裂等问题进行研究,认为连接波斯湾到亚洲中部段滑坡和山上的压力是导致隧道受损的主要原因,并通过在隧道裂缝处注射环氧树脂、在隧道衬砌内表面采用粘贴碳纤维板加固,修复、加固结束后对该隧道进行监测,表明隧道修补能达到一定的效果^[69]。

罗立娜对碳纤维加固衬砌混凝土偏心构件的剥离破坏、截面承载力、裂缝和变形进行了理论研究,初步形成了一套适用于碳纤维补强公路隧道衬砌结构的计算方法^[70]。

周大举基于可靠度理论研究了碳纤维加固公路隧道衬砌计算方法,并给出了碳纤维材料在加固公路隧道时的适用性^[71]。

郑刚针对上海市延安东路隧道联络通风部位由于长期荷载作用和沉降因素导致的隧道接缝变形、开裂漏水问题,探讨了碳纤维加固钢筋混凝土的新技术,总结了施工中应注意的问题^[72]。

林三强根据公路隧道不同破坏形式推导了可应用于实际工程中的碳纤维补强计算简化公式;并分析碳纤维补强剥离破坏区域应力状态,建立剥离破坏的判别条件^[73]。

杨成忠、黄明、刘新荣等针对某高速公路的隧道衬砌的开裂问题进行了有限元模拟,分析了形成裂缝的原因是在施工过程中衬砌受力不均匀,出现应力集中现象,提出了用碳纤维加固的方法对裂缝进行处置,为今后解决类似隧道衬砌开裂问题提供了参考意见^[74, 75]。

吴启勇、蔡叶澜、赖金星等通过对公路隧道衬砌裂缝现场调查、统计分析,得出了连拱

隧道衬砌裂缝的发展过程和形成原因、裂缝分布及发展规律。采用了碳纤维布进行局部修复和加固补强,通过对碳纤维加固后的隧道监测表明,衬砌裂缝得到了有效的控制,支护受力处于安全状态,围岩稳定,碳纤维布补强效果显著^[76-78]。

刘洋、夏阳等通过对碳纤维布加固电力隧道、软土盾构隧道施工工艺和组织管理措施的探讨,得出用碳纤维加固隧道结构具有高强、轻质、耐腐蚀、便于施工等技术优势的结论^[79, 80]。

基于上述背景,结合我国公路隧道工程养护技术的现状^[81],编者运用理论解析及模型试验等手段,围绕公路隧道衬砌裂缝快速识别、带病害结构承载力分析、结构健康度评价及加固设计计算方法等关键问题,开展了大量的基础研究及现场试验工作,形成了基于监测检测的公路隧道健康度评价及加固设计计算方法。本书将对这些成果作简要陈述,以供参考。

第 2 章 基于形态特征的公路隧道衬砌 裂缝成因快速判定

在隧道的建设运营过程中,外力变化、环境侵蚀、材料劣化、设计施工不当等是导致衬砌裂损的主要因素,不同成因、形态的裂缝,对隧道结构承载性能影响也不同。因此,有必要基于二衬的裂缝形态、裂缝延续性、裂缝所处位置等特征来判断裂缝成因,并分别绘制纵向裂缝、斜裂缝、环向裂缝及其他不规则裂缝成因的判别图,为隧道衬砌裂缝成因的快速判别及处治提供基础。

2.1 公路隧道衬砌裂缝分类

2.1.1 按裂缝走向分类

根据裂缝走向,隧道衬砌裂缝分为纵向裂缝、环向裂缝、斜向裂缝及其他不规则裂缝^[82]。环向裂缝一般对隧道衬砌正常承载影响不大,纵向裂缝与斜向裂缝则直接降低隧道衬砌的承载能力。

(1) 纵向裂缝。纵向裂缝平行于隧道轴线,如图 2-1 所示。从受力分析来看,拱顶混凝土衬砌一般是内缘受压形成内侧挤压、衬砌开裂、剥落掉块;拱腰部位主要是混凝土内缘受拉力张开;拱脚部位开裂则会引起衬砌错动;边墙裂缝常因混凝土衬砌内缘受拉而张开错位,使整个隧道失稳。

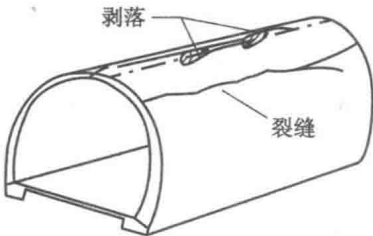


图 2-1 隧道纵向裂缝示意图

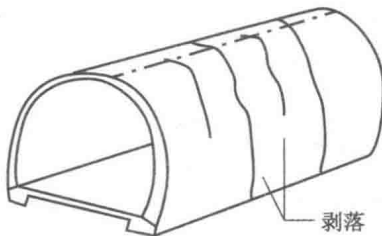


图 2-2 隧道环向裂缝示意图

(2) 环向裂缝。隧道衬砌环向裂缝如图 2-2 所示。环向裂缝主要由纵向不均匀荷载、围岩地质变化、沉降缝处理不当等所引起,多发生在洞口或不良地质地带与完整岩石

地层交接处。

(3) 斜向裂缝。隧道衬砌斜向裂缝一般和隧道纵轴呈 45° 左右夹角,如图 2-3 所示。斜向裂缝常因混凝土衬砌的环向应力和纵向受力组合而成的拉应力造成,其危害性仅次于纵向裂缝。

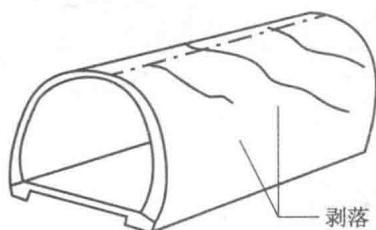


图 2-3 隧道斜向裂缝示意图

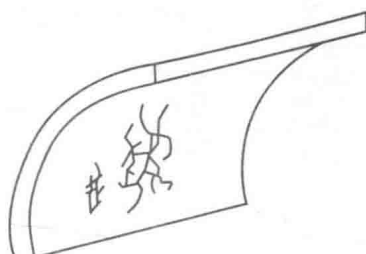


图 2-4 隧道不规则裂缝示意图

(4) 其他不规则裂缝。包括龟甲状裂缝、放射状裂缝、同心圆状裂缝、方格状裂缝、圆弧状裂缝等,如图 2-4 所示。

综合隧道衬砌纵向裂缝、环向裂缝和斜向裂缝的分析可知,环向裂缝一般对衬砌结构的受力影响较小;斜向裂缝虽然对隧道衬砌的安全威胁较大,但在隧道中一般出现的较少;纵向裂缝是影响隧道衬砌承载力的主要裂缝形式,而且裂缝检测也表明,纵向裂缝所占裂缝长度的比例十分大。我国《公路隧道养护技术规范》中规定,根据衬砌裂缝的长度和宽度判定衬砌裂缝状态时,主要是以纵向的裂缝或斜裂缝为对象,对于横向裂缝,在判定时将判定结果相应地降低 1 个等级即可。

赵东平在其博士论文中,通过大量裂缝统计,分析得出了隧道横断面上不同位置的裂缝分布情况^[83]。衬砌拱顶发生纵向或斜向裂缝的隧道占调查隧道总数的 79.31%;衬砌拱腰发生裂缝的隧道占 43.10%;调查的隧道中衬砌边墙发生开裂的隧道有 21 座,占总数的 36.21%,如图 2-5 所示。

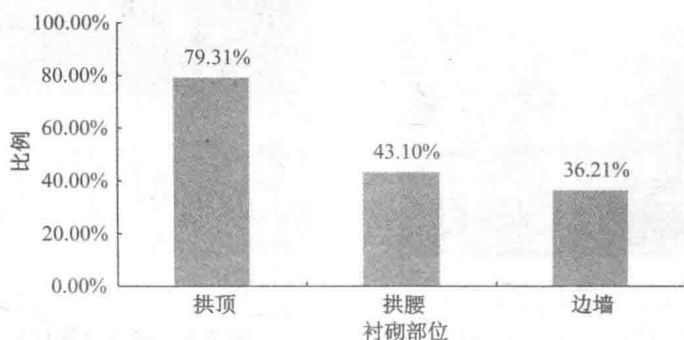


图 2-5 开裂位置统计图

图 2-6、图 2-7 为某省运营高速公路隧道定检结果,共 389 座隧道的衬砌损伤情况中,环向裂缝最多,占 50%;拱顶、边墙、拱腰处的裂缝数量类似。图 2-8、图 2-9 为隧道衬砌开裂情况。