

混凝土桥梁结构裂缝成因及处理方案

沈大亚

(江苏宏亚高空工程有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要:针对混凝土桥梁普遍存在的裂缝问题,结合某区域中135座公路桥梁的工程实例,对混凝土桥梁结构裂缝的成因进行分析,依据发育深度将其划分为深层、浅层及表面裂缝。并探讨表面喷浆、压力注胶与碳纤维加固三种裂缝处理方案的施工工艺要点与处治效果。结果表明,表面喷浆法通过构建高强度水泥砂浆覆盖层,可有效封闭裂缝并抑制钢筋锈蚀;压力注胶法采用环氧树脂材料,能够恢复试件抗弯承载能力,荷载恢复比值接近1.0;碳纤维加固法通过高强复合材料与混凝土协同受力,降低结构应变并提升桥梁结构整体刚度与承载能力。

关键词:混凝土桥梁;结构裂缝;裂缝成因;表面喷浆;压力注胶;碳纤维加固

中图分类号:U445.57 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-6344(2025)11-0211-04

DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2025.11.076

0 引言

大量工程实践表明,混凝土桥梁结构的裂缝产生难以完全规避,但其导致的结构性危害可通过有效措施进行控制。因此,如何采取科学的处理方案将裂缝宽度、深度及分布控制在无害范围内,已成为当前桥梁工程领域亟待解决的重要课题^[1]。本文结合桥梁工程实例,基于《公路桥涵养护规范》(JTG 5120-2021)的相关规定,对不同混凝土桥梁结构裂缝成因进行分析,并探讨表面喷浆、压力注胶与碳纤维加固等处理方案的工艺要点及处治效果,以实现桥梁结构裂缝的精准防控。

1 工程概况

某区域共有135座公路混凝土桥梁,由于技术状况良莠不齐,导致混凝土桥梁结构出现不同程度的裂缝。依据《公路桥涵养护规范》(JTG 5120-2021)的技术状况评定标准,可将桥梁损坏情况划分为以下五个等级:

一类:结构部件完好,功能无缺陷;

二类:结构部件存在局部缺陷,功能基本正常,需进行小修或保养;

三类:结构部件出现大范围损坏,使用功能受到影响,但结构处于安全状态,需进行大修;

四类:结构部件严重损坏,使用功能受损,处于危险状态;

五类:结构部件功能丧失。

从裂缝特征来看,一类桥梁病害以混凝土干缩裂缝为主,偶见少量超限裂缝,其典型特征为深度<0.5cm、长度<50cm;二类桥梁则以超限的结构裂缝为主,裂缝深度与长度均有所增加;三类桥梁的结构裂缝问题更为严

重,裂缝深度与长度均超限,并伴有一定的混凝土脱落及钢筋锈蚀^[2]。该区域桥梁的技术状况统计如表1所示。

表1 桥梁技术状况统计

技术状况等级	一类/座	二类/座	三类/座	四类/座	五类/座	合计
汽-15级	9	52	9	0	0	70
<汽-15级	1	9	5	0	0	15
公路-I级	24	1	0	0	0	25
公路-II级	12	11	2	0	0	25
合计	46	73	16	0	0	135

2 混凝土桥梁结构裂缝成因与分类

2.1 裂缝成因

混凝土桥梁结构裂缝的成因复杂,通常是多种因素共同作用、相互关联的结果。对该区域内桥梁的裂缝成因进行归纳与整理,如表2所示。

表2 混凝土桥梁结构裂缝成因

成因类型	主要内容
施工因素	混凝土保护层厚度不足;运输过程离析;振捣不密实
钢筋锈蚀	钢筋锈蚀所产生的膨胀应力
变形因素	地基冻胀;不均匀沉降;地基土质差异
自身因素	骨料品种不佳;外加剂使用不当;水灰比控制不严
温度因素	日照温差;火灾高温;年温度变化;水泥水化热
荷载因素	风荷载;地震作用;车辆撞击;车辆自重及疲劳荷载

2.2 裂缝分类

基于案例工程中混凝土桥梁结构裂缝的发育深度及其对结构的影响程度,将裂缝划分为深层裂缝、浅层裂缝与表面裂缝三种基本类型,具体分类标准与形态如表3所示。

作者简介:沈大亚(1986-),男,汉族,江苏盐城,本科,工程师,研究方向:结构工程、风电塔筒工程、烟塔等高耸构筑物工程、智能建造与信息化、桥梁与隧道工程、工业建筑去工业化工程。

表3 混凝土桥梁结构裂缝分类标准与形态

裂缝类型	分类标准	裂缝形态
深层裂缝	深度达到或超过结构断面尺寸的1/2	发育裂缝
浅层裂缝	深度已贯穿整个钢筋保护层	动态裂缝
表面裂缝	裂缝仅在表层形成	静态裂缝

3 混凝土桥梁结构裂缝处理方案

3.1 表面喷浆法

3.1.1 施工工艺

敲击需要喷浆的混凝土结构表层,并将裂缝凿毛,使其成V型槽,以此增强混凝土表面与水泥砂浆的粘结力。此外,对结构表面进行清水冲洗,去除杂质,完成后润湿等待后续作业。

喷射作业可采用挂网喷浆或素喷浆等工艺。喷射层厚度需进行严格控制:侧喷宜为3~4cm,仰喷宜为2~3cm,俯喷宜为5~6cm,且单层喷射厚度不应超过骨料最大粒径的1.5倍^[3]。

如果喷射层较厚,应采取分层喷射方法,待第一层完全凝固后,再开展第二层的喷射,通常来说,若气温条件较好(如5℃以上),则每层喷射时间间隔可控制在2~3h。同时,在喷射初凝后,可以通过铁皮、靠尺对喷射层表面予以刮平,并喷涂5mm左右的装饰层。

采用表面喷浆法处理桥梁墩台裂缝的示意图如图1所示。

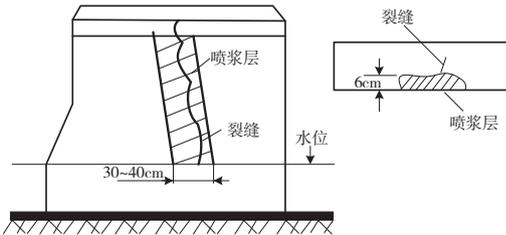


图1 桥梁墩台裂缝表面喷浆法处理示意图

3.1.2 处理效果评价

表面喷浆法通过构建高强度水泥砂浆覆盖层,能有效封闭混凝土表面裂缝,防止水分及有害介质侵入,从而抑制钢筋锈蚀与混凝土劣化。该方法形成的喷浆层可与原结构协同受力,从而恢复混凝土桥梁结构的整体性。

3.2 压力注胶修补法

3.2.1 施工工艺

(1)材料选取

压力注胶修补法主要是通过将胶结材料注入裂缝中,将混凝土与胶结材料形成整体,从而起到裂缝修补作用。目前工程中常用的胶结材料主要包括萧邦环氧树脂、柔性环氧树脂及水性环氧树脂等类型。其中,萧邦环氧树脂因其优异的综合性能可作为优先选用材料,其关键性能参数如表4所示。

表4 萧邦环氧树脂材料关键性能参数

性能参数	BL-GROUT100	BL-GROUT
低温柔性	-20℃无裂纹	0℃无裂纹
耐温变形(10次循环)	无变化	无变化
拉伸强度/MPa	3.64	3.20
伸长率/%	83.9	75.8
粘结强度/MPa	3.6	2.5

注:“BL-GROUT100”与“BL-GROUT”是萧邦环氧树脂的具体型号。

(2)工艺参数

注胶工艺参数需根据裂缝特征与注胶方法进行针对性设计,其主要控制参数如表5所示。

表5 压力注胶工艺控制参数

参数	参考取值		备注
	机控压力注胶法	注射压力注胶法	
适用范围/mm	缝深 h :200~1500 缝宽 w :0.15~0.2	缝深 h :≤200 缝宽 w :0.15~0.2	缝宽越大,可处 理缝深越大
注胶压力/MPa	0.2~0.5	0.1~0.2	/
初黏度 (MPa·s)	$0.5 \leq w \leq 1.5$	≤800~1200	初黏度与 环境温度 有关
	$0.2 \leq w \leq 0.5$	≤300~500	
	$0.05 \leq w \leq 0.2$	≤100~200	
分布 间距/mm	$w > 2.0$	≤1000	缝深较大 时,适当 缩小分布 间距
	$1.0 \leq w \leq 2.0$	≤500	
/mm	$0.5 \leq w \leq 1.0$	≤500	/
	$0.3 \leq w \leq 0.5$	≤400	
	$w \leq 0.3$	≤300	

(3)施工要点

①施工时需采用高压气枪、角磨机或钢丝刷对裂缝表面进行清理。对于污损严重的旧混凝土构件,应使用硬毛刷蘸取洗涤剂刷洗,并对粘合面进行2~3mm的打磨处理;若表面存在严重不平整,可采用环氧砂浆找平。对于一般构件,可直接打磨1~2mm表层,并用高压气枪清洁。为增强粘结效果,可对打磨面进行凿毛处理,经清水冲洗后,再用蘸有丙酮的脱脂棉擦拭表面。

②根据裂缝尺寸布设注胶嘴。注射压力注胶法的嘴间距宜为300~500mm,机控压力注胶法则为100~300mm。封缝胶涂抹厚度宜为1mm,宽度为20~30mm,施工中应避免产生气泡与孔洞。待封缝胶固化后,需进行气压试漏检查,确保密闭效果,对渗漏点应及时补封。

③注胶材料经检验合格后即可开始注胶。通过注胶嘴将萧邦环氧树脂压入裂缝,注胶压力宜控制在0.3MPa,待压力稳定后持续灌注2~5min。注胶过程中宜采用小锤轻击检查密实度,按从一端至另一端的顺序进行,并避免胶液外溢。确认无气泡排出后,方可封闭注胶管,通常采用封缝胶抹平注胶口进行封堵^[4-5]。注胶时应避免摇晃胶罐,以防气泡混入,并需实时关注胶罐余量,确保胶液连续注入。

④注胶完成后,需待结构胶初凝(约4h)后,用间距约3cm的小锤敲击检查。若发现空鼓声,应用粉笔标

记,以便后续进行补注处理。

3.2.2 处理效果评价

为验证压力注胶修补法对混凝土桥梁结构裂缝的处理效果,制备两组预制混凝土试件,每组5个。第一组试件混凝土强度等级为C20,尺寸为500mm×200mm×200mm;第二组试件混凝土强度等级为C30,尺寸为1000mm×400mm×400mm。采用万能试验机对两组试件进行抗弯拉伸试验,直至试件破坏,记录其断裂时的极限荷载 N_1 。随后,向试件裂缝中灌注环氧树脂进行修复,养护2d后,再次进行破坏试验,并记录对应的极限荷载 N_2 ,试验结果如表6所示。

表6 注胶修补法处理效果

分组	编号	N_1/kN	N_2/kN	N_2/N_1	强度等级
第一组	1	23.1	22.7	0.98	C20
	2	24.7	23.6	0.95	C20
	3	22.5	23.0	1.02	C20
	4	23.6	23.2	0.98	C20
	5	22.8	22.4	0.98	C20
第二组	1	35.8	35.1	0.98	C30
	2	36.3	35.0	0.96	C30
	3	34.1	34.6	1.01	C30
	4	35.4	35.0	0.99	C30
	5	36.0	35.7	0.99	C30

由表6可知,经压力注胶修补后,试件的荷载恢复比值 N_2/N_1 集中于0.95~1.02区间,平均值接近1.0。表明修补后试件的抗弯承载能力与初始破坏前相当,裂缝处的力学性能得到有效恢复。试验结果验证了环氧树脂压力注胶法对于修复混凝土桥梁结构裂缝具有良好的效果。

3.3 碳纤维加固法

3.3.1 施工工艺

(1)材料选取

碳纤维布是以环氧树脂为基体、连续碳纤维为增强材料制成的复合片材,具有抗拉强度高、耐疲劳、耐腐蚀、耐久性好及自重轻等特点。通过将其粘贴于桥梁构件表面,可与混凝土协同受力,从而达到加固修补的目的。目前市场上常用的碳纤维材料及其特性如表7所示。

表7 常用碳纤维材料特性

类型	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	密度 /(g/cm ³)	面密度 /(g/cm ²)	厚度 /mm
FTS-C7-70	2000	5.00×10 ⁵	2.17	300	0.143
FTS-C6-30	2500	5.00×10 ⁵	2.10	300	0.143
FTS-C5-30	3000	3.80×10 ⁵	1.82	300	0.165
FTS-C1-30	3550	2.35×10 ⁵	1.80	300	0.167
FTS-C1-20	3550	2.35×10 ⁵	1.80	200	0.111

(2)施工工艺流程

碳纤维加固法的施工工艺流程见图2所示。

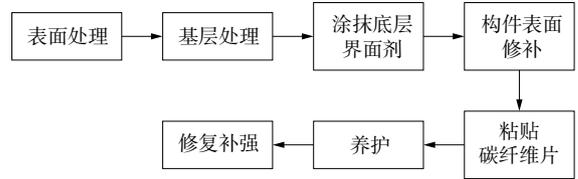


图2 碳纤维加固法的施工工艺流程

(3)施工要点:

具体施工要点为:①采用强度等级高于原桥面板的砂浆进行修复,并对表面进行处理;②表面处理完成后,在混凝土桥梁结构表面均匀涂覆TP型环氧树脂,使其与基体融合为统一的受力整体。涂刷完毕后,应及时修补构件表面的缺损部位,并使用TE型环氧腻子填充孔洞及边缘转角处;腻子刮涂完成后,应采用砂纸研磨残留的粗糙痕迹及颗粒物,以保证基面平整;③用裁剪好的碳纤维板与混凝土构件相结合,在表面层上涂覆一层胶粘剂,从而实现桥面铺装层的整体粘接;④碳纤维布加固施工完成后,应在自然环境下养护约10d;养护期满后,可进行表面涂装,以进一步提升结构的加固效果与耐久性^[6]。

3.3.2 处理效果评价

为验证碳纤维加固法对混凝土桥梁结构裂缝的处理效果,在测试截面布置了应变传感器(如图3所示)。试验采用逐级加载方式,每级荷载持荷15min,待传感器读数稳定后记录数据,静置10min后再进行下一级加载。每个工况重复测试两次,取算术平均值作为实测结果,并与理论计算值进行对比分析,进而评估结构的安全性。

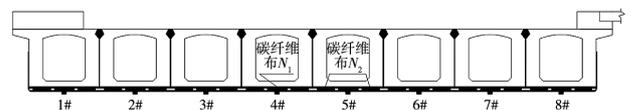


图3 应变传感器布置图

为定量分析处理效果,重点对比桥梁结构在碳纤维加固前后的静载应变。试验数据依据以下公式进行计算:为便于分析,主要进行加固前后静载应变对比,试验数据按如下公式处理:

$$\text{总应变计算: } N_t = N_L - N_i \quad (1)$$

$$\text{弹性应变计算: } N_e = N_L - N_u \quad (2)$$

$$\text{残余应变计算: } N_p = N_t - N_e = N_u - N_i \quad (3)$$

式中: N_i 为初始应变值; N_L 为加载稳定后的应变值; N_u 为卸载稳定后的应变值。

得到桥梁结构各截面应变试验结果如表8所示。根据表8中各截面的应变数据可知,经碳纤维布加固后,实测应变值显著降低,且各截面的应变校验系数均<1.0。由此表明碳纤维加固法能够在一定程度上抑制混凝土

(下转第216页)

的施工记录(包括浆液制备量、输送量、区块土体体积),计算实际固化剂掺量,误差需控制在设计掺量 $8\% \pm 0.5\%$ 以内;对关键区块可采用钻芯取样,通过室内试验分析固化剂含量,验证掺量准确性。

(4)固化层承载力检测:采用动力触探法初判,结合荷载板试验进行最终验证,单个固化区域(或每300m便道)设置不少于1个测试点,固化完成两周后承载力需 $\geq 100\text{kPa}$,四周后承载力需 $\geq 130\text{kPa}$,以满足施工便道及后期检修通道的承载要求。

4 施工常见问题与应对措施

4.1 固化厚度不均

若固化厚度不均、厚度过大或厚度较浅,需对固定在搅拌臂上的标志线进行调整,确保施工固化厚度与设计深度基本一致。严格管理施工人员操作流程,向下搅拌时,需到标志线位置方可停止施工。

4.2 硬壳层阻碍

当搅拌头因遭遇坚硬土层或既有硬壳层无法正常下沉时,可采用挖掘机对阻碍区域进行辅助翻松。可对已完成回填的区域进行翻松后重新固化,或对原位硬壳层实施分层翻松与分层固化,以消除硬壳层阻碍,确保搅拌施工的连续性。

4.3 搅拌均匀度不足

就地固化后的施工效果受挖掘机搅拌均匀程度、施工人员技术熟练度等影响^[4]。为提升搅拌均匀度,须严

格控制相邻施工区块的搭接宽度,确保其 $\geq 5\text{cm}$,避免出现未搅拌的薄弱带,进而提高搅拌均匀度。

5 结束语

综上所述,在该高速铁路桥梁项目施工便道填筑工程中,深厚淤泥层引发的侧向滑移问题对施工进度、成本及生态环境造成严重影响。传统换填技术因深厚淤泥地质条件存在诸多局限性,难以满足工程需求。而就地固化技术通过掺入专用固化剂,将流塑状淤泥转化为高强度固化土体,有效解决了软土淤泥地基处理难题。后续应用中,建议结合不同区域软土物理力学特性,进一步优化固化剂配比与施工参数。

参考文献

- [1]胡军,王宝德,隋杰明,等.国家会展中心(天津)工程废弃泥浆固化分离处理技术[J].施工技术,2020,49(22):111-113.
- [2]黄擎洲,梁建锋,李富有,等.深厚泥浆池水泥搅拌桩与就地固化复合地基施工技术研究[J].市政技术,2020,38(4):251-253+257.
- [3]欧孝夺,秦金喜,罗炳雄,等.桂西铝土尾矿泥浆自重排水固结联合生石灰固化处理参数选取分析[J].水利水电技术,2020,51(9):74-83.
- [4]王胜.废泥浆固化技术在深基坑工程施工中的应用[J].科学技术创新,2018(33):100-101.

【责任编辑:曾玉兰】

(上接第213页)

桥梁结构的变形,进而提升其整体刚度和承载性能。

表8 各截面应变试验结果

截面	理论值 / $\mu\epsilon$	加固前实测值 / $\mu\epsilon$	加固后实测值 / $\mu\epsilon$	加固后应变 校验系数
1#	41.8	36.5	335	0.917
2#	82.2	70.7	65.4	0.924
3#	60.8	48.7	43.4	0.890
4#	98.4	73.0	74.0	0.891
5#	98.1	80.5	74.3	0.922
6#	60.5	54.6	50.0	0.915
7#	81.9	68.8	60.7	0.881
8#	41.5	36.0	32.9	0.913

4 结束语

综上所述,本文通过对实际混凝土桥梁结构的分析,得到混凝土桥梁裂缝的产生是多种因素共同作用、相互关联的结果,并针对性地提出表面喷浆、压力注胶及碳纤维加固三种处理方案。实践表明:表面喷浆法适用于封闭表面裂缝,有效阻止有害介质侵入;压力注胶

法能将开裂的混凝土重新粘结为整体,使构件的力学性能得到基本恢复;碳纤维加固法则通过高强复合材料的协同工作,提升结构整体承载能力,尤其适用于结构性裂缝的补强。

参考文献

- [1]谭强.混凝土桥梁结构裂缝分析及处理方法研究[J].工程建设与设计,2024(21):233-235.
- [2]杜敏.混凝土桥梁结构裂缝分析及处理方法研究[J].黑龙江交通科技,2021,44(10):108-109.
- [3]陶宁燕.现浇混凝土桥梁结构裂缝成因及施工处治技术[J].交通世界,2021(8):110-111.
- [4]刘恒源,吕国军,李亚君,等.混凝土桥梁结构裂缝修补技术研究[J].西部交通科技,2017(1):42-44+78.
- [5]康建仁,骆宏兵.桥梁混凝土结构裂缝产生的原因分析[J].四川水泥,2015(4):194.
- [6]陈海华.碳纤维复合材料在城市桥梁裂缝加固中的应用与效果评估[J].科学技术创新,2025(3):149-152.

【责任编辑:曾玉兰】