

DOI: 10.7672/sgjs2026080120

桥梁防撞墙破损分析与UHPC修补技术

张宇豪¹, 张 晗², 尹思源³, 张旻昊¹, 王一帆¹, 王羽佳¹, 王丽君³

(1. 北京市政路桥锐诚科技有限公司, 北京 100176;

2. 北京建筑大学工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心, 北京 100044;

3. 华辉瑞工程质量检测(北京)有限责任公司, 北京 101102)

[摘要] 通过调研京藏高速公路北京段内10座老旧桥梁防撞墙破损状况可知,其防撞墙表面混凝土已严重碳化、剥落,造成大面积钢筋锈蚀外露,桥梁部件缺损状况评定已达2级(最高),对桥梁的使用寿命及安全性造成不良影响。分析该地段桥梁防撞墙破损机理,开展UHPC用于防撞墙修补工程的试验模拟,评价UHPC在非标准养护环境中工作性能,并结合实际工程取样,分析影响UHPC-NC力学性能的因素。通过对比分析所采用的UHPC与多种修补砂浆,提出相应的施工方法和施工要求,以提升防撞墙修补质量。

[关键词] 桥梁;防撞墙;超高性能混凝土;修补

[中图分类号] U445.7⁺1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0120-06

Damage Analysis and UHPC Repair Technology of Bridge Anti-collision Walls

ZHANG Yuhao¹, ZHANG Han², YIN Siyuan³, ZHANG Minhao¹, WANG Yifan¹,
WANG Yujia¹, WANG Lijun³

(1. Beijing Municipal Road & Bridge Ruicheng Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2. Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Huahuirui Engineering Quality

Inspection (Beijing) Co., Ltd., Beijing 101102, China)

Abstract: Through the investigation of the damage of the anti-collision walls of 10 old bridges along Beijing section of Beijing-Lhasa Expressway, it is found that the surface concrete of these anti-collision walls has undergone severe carbonation and spalling. This has led to extensive corrosion and exposure of reinforcing steel, with the component deficiency condition rated as grade 2 (the most severe). Such deterioration adversely impacts the service life and structural safety of the bridges. This paper analyzes the damage mechanisms of the anti-collision walls in this section and subsequently conducts experimental simulations on the application of ultra-high performance concrete (UHPC) for their repair. Emphasis is placed on evaluating the workability of UHPC under non-standard curing conditions. Additionally, mechanical influencing factors of the UHPC-NC interface are analyzed using samples from actual engineering practice. Finally, a comparative analysis is performed between UHPC and various repair mortars in the design phase. A refined treatment plan is proposed, along with corresponding construction methods and requirements, to enhance the repair quality of anti-collision walls.

Keywords: bridges; anti-collision walls; ultra-high performance concrete (UHPC); repairing

0 引言

桥梁防撞墙作为桥梁结构中最重要的附属设施之一,在桥梁服役期间会经历多次翻修。桥梁防撞墙主要破坏模式可分为2种:①由于外界环境、桥梁扰动、器械破坏等原因,导致混凝土剥落,造成防撞墙结构失效;②由于混凝土与钢筋黏结作用失

[作者简介] 张宇豪,工程师,E-mail:1318831158@qq.com

[通信作者] 张 晗,硕士研究生,E-mail:zhanghandawang@outlook.com

[收稿日期] 2025-08-19

效^[1],导致空气与水进入防撞墙结构内部,造成钢筋锈蚀、膨胀,从内部推挤混凝土至开裂,防撞墙结构失效。对于混凝土修补,新老混凝土结合^[2]一直是国内外研究的焦点,而超高性能混凝土(UHPC)由于其优异的力学与耐久性能在结构修复加固等领域更是成为近年来的研究热点。王艳等^[3]基于斜剪试验对不同加固厚度的UHPC-NC界面黏结强度作出比较,得到UHPC-NC黏结面强度相比于普通混凝土更高的结论,且更大的UHPC加固厚度对界面黏结强度影响更显著。这项研究不但提升UHPC加固的可行性,更为施工中对UHPC厚度的控制提供了依据。刘玉静等^[4]通过测量UHPC试件的自由收缩变形和UHPC-NC黏结试件的约束收缩变形,确定UHPC中的钢纤维会降低黏结面开裂,适合作为桥梁防撞墙的修补材料。对于钢筋锈蚀对后续工程的影响,在对锈蚀的钢筋进行打磨后重新覆盖混凝土,新老混凝土存在界面区效应^[5-7]而不会使氯盐等破坏轻易发生。

综上所述,本文以京藏高速公路10座桥梁的防撞墙修补工程为例,深入剖析其破损机理,系统研究桥梁防撞墙加固修补中采用的UHPC修补技术。通过将该技术与多种长期应用的桥梁防撞墙加固修补方法进行对比分析,最终确定最优的防撞墙加固方案。

1 工程概况

1.1 工程简介

本次研究范围涵盖京藏高速公路北京市内四环至六环的所有桥梁,具体范围如图1所示。主要涉及的桥梁包括健德门桥、北沙滩桥、清河桥、清河大桥、小营桥、西三旗桥、辛庄桥、沙河南桥、沙河大桥及沙河北桥共计10座桥梁。防撞墙总长度12366m。目前桥梁防撞墙状况如图2所示,因长期受雨雪侵蚀,出现大面积混凝土脱落、露筋现象,影响行车安全和道路整体形象。

1.2 施工方案

常见处理措施为凿除松散混凝土并对钢筋进行除锈处理、采用聚合物砂浆进行修补。这种方法工艺成熟、方法简单且性价比高,但会由于砂浆厚度不均匀、养护条件差、桥梁扰动等原因造成开裂,如图3所示,无法达到良好的修补效果。挂网喷涂方式也曾应用到北京三环路^[8]上的防撞墙修补,仅2年时间部分防撞墙便再次出现锈点和开裂。

采用UHPC修补防撞墙是目前较少的使用方式,其加固如图4所示。工艺要求凿除破损混凝土厚度30mm以上,对钢筋进行除锈、阻锈,在防撞墙



图1 工程位置

Fig. 1 Engineering location



图2 防撞墙破损情况

Fig. 2 Damage condition of anti-collision walls



图3 砂浆修补出现裂纹

Fig. 3 Cracking in mortar repairs

原有混凝土面上涂刷界面剂后,立模注入UHPC,待UHPC成型后拆模即可完成修补。由于UHPC具有超高强度、韧性和耐久性,且有自愈合能力,在抵抗重载交通导致桥梁扰动方面更为突出。UHPC还具有免振捣等显著优势,更加契合全季节道路施工需求。

2 防撞墙破损机理分析

2.1 扰动与水浸破坏

在桥梁施工中,相邻防撞墙间的缝隙为假缝,而重载重造成的桥梁扰动久而久之便会使缝隙处混凝土开裂。裂缝不断延展,混凝土表层的裂缝是水能进入内部的主要原因,也是最常见的桥梁病害。常年的气温变化与冻融循环使得残留在混凝土上的水滴冻结融化又冻结,产生的张力不断变

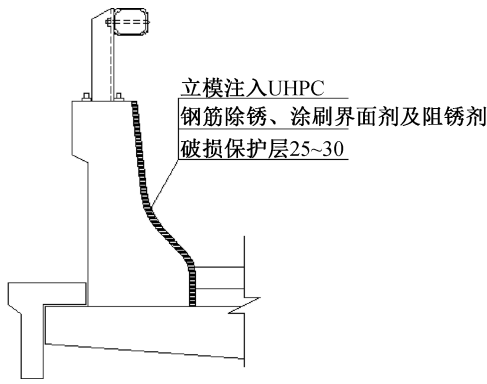


图 4 UHPC 加固

Fig. 4 UHPC strengthening

化,自然的力量将混凝土表层撑开。

钢筋发生锈蚀属于化学反应过程,当暴露于大气中的混凝土裂缝达到 0.3mm 时,水汽侵入混凝土表层与钢筋接触发生锈蚀,进一步发生反应造成破坏。钢筋锈蚀后,自身截面积变小,产生的铁锈使得体积膨胀,导致保护层之下的混凝土进一步开裂,大气中的杂质混合流入混凝土内部,混凝土最终被完全破坏。

2.2 氯盐破坏

氯盐对钢筋混凝土的破坏是一个复杂的物理化学过程^[9-10],主要通过氯离子侵蚀引发钢筋锈蚀,进而导致混凝土结构性能退化。氯离子的侵入路径包括扩散、毛细吸附和渗透作用,其传输行为符合 Fick 第二定律,受混凝土密实度、保护层厚度及环境湿度影响显著。当氯离子浓度超过临界值(通常为水泥质量的 0.4%~0.6%)时,钢筋表面钝化膜发生局部破坏,引发电化学腐蚀。

腐蚀过程以钢筋为阳极发生氧化反应($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$),阴极区则通过水和氧气发生还原反应($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$)维持电荷平衡。锈蚀产物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的体积膨胀达原金属的 3~6 倍,导致混凝土内部产生拉应力。当应力超过混凝土抗拉强度时,沿钢筋方向出现顺筋裂缝,进一步加速氯离子和水分侵入,形成恶性循环。长期侵蚀将导致钢筋有效截面积减小、力学性能退化,混凝土与钢筋的黏结强度下降,最终引发结构承载力丧失。环境因素(如冻融循环、碳化作用)与氯盐侵蚀具有协同效应,显著缩短结构服役寿命。研究表明,氯离子扩散系数与混凝土龄期呈负指数关系,而环境温度升

高 10℃ 可使扩散速率增加 2~4 倍。

3 UHPC 试验结果

3.1 UHPC 配合比

为解决施工现场无法进行 UHPC 蒸养导致 UHPC 收缩过大,从而与旧混凝土剥离问题,试验中添加了高活性氧化镁微膨胀剂(MEA),以补偿 UHPC 早期收缩引起的开裂和剥离。本次试验所用水泥为 P·O52.5 水泥,比表面积为 $359\text{m}^2/\text{kg}$;硅灰和粉煤灰平均粒径分别为 0.1~0.3, 10~30 μm ;细骨料石英砂的粒径分别为 0.125~0.18, 0.18~0.425, 0.425~0.85mm;减水剂选用羧酸高性能减水剂,减水率>30%;MEA 及消泡剂由日本某特种材料公司生产,其中 MEA 在 20℃ 和 40℃ 水中的膨胀率分别为 0.034%, 0.086%,具体配合比如表 1 所示。

3.2 UHPC 试件特殊环境测试

为确定本次采用 UHPC 的力学性能和耐久性,除混凝土标准试验外增设 1 组试验。该组试验条件为在受氯盐侵蚀环境下非养护状态 7, 14, 28d 抗压强度测试。该试验为后续道路测试前提,以验证 UHPC 性能可否满足真实施工需要。经抗压试验后,试件 28d 抗压破坏形态如图 5 所示。



图 5 UHPC 抗压破坏形态

Fig. 5 Compressive failure mode of UHPC

通过特殊环境试件测试可观察到结构表层破损情况,如图 6 所示。UHPC 表层内部未出现明显结晶析出,氯盐不会因 UHPC 无养护而在其体内结晶。经测试,UHPC 于氯盐和标准养护环境下强度对比如图 7 所示。在氯盐侵蚀且非养护状态下其 7, 14, 28d 强度分别为 124.3, 129.4, 131.7MPa, 标准养护状态下 3 组 UHPC 平均强度分别为 125.5, 129.7, 131.9MPa。标准养护与特殊环境下,UHPC 强度变化并未出现明显差别。根据破坏状况对比,两者也未出现差异。

表 1 UHPC 配合比

Table 1 Mix proportion of UHPC									
混凝土强度等级	水泥	硅灰	粉煤灰	石英砂	钢纤维	减水剂	MEA	水	消泡剂
C120	810.4	81.0	158.6	808.6	140.0	6.2	40.1	182.5	0.06

(kg·m⁻³)



图6 UHPC局部侵蚀情况

Fig. 6 Localized erosion condition of UHPC

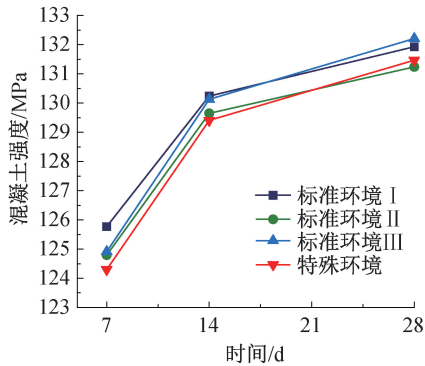


图7 UHPC强度对比

Fig. 7 Strength comparison of UHPC

综上所述,UHPC在受氯盐侵蚀、非养护状态的特殊环境下,工作表现与标准养护环境相似。其对氯盐侵蚀的抵抗能力突出,适合作为道路材料在防撞墙修补中使用。

3.3 UHPC-NC 试件测试

本节对防撞墙修补进行封闭道路试验,采用设计强度等级为C25(此防撞墙自生产至破坏已>30d)的普通钢筋混凝土防撞墙进行人工凿除破坏,以模拟现场环境中的混凝土破坏情况。首先对防撞墙进行破坏厚度 $\geq 30\text{mm}$ 的人工破坏,以增加新旧混凝土的机械咬合力。人工破坏直至防撞墙保护层完全脱落,钢筋裸露。随后,在普通混凝土表面涂刷高性能界面剂,以提升新旧混凝土间黏合效果。最后对已破坏的防撞墙进行修补,在防撞墙前指定位置支模并固定,采用UHPC浇筑,等待7d后拆模;并于7,14,28d时分别对防撞墙无钢筋区域进行钻芯取样,并将取样样品加工成试件进行抗压强度测试,如图8所示。由于干燥后UHPC成色与NC较接近,故采用黑色漆笔对NC面进行涂色以作区分。

由于结合面仅可观察到试件表面位置处,且每个试件间存在微小厚度差异,故本结果仅用于预测混凝土的破坏特性。本次抗压试验以UHPC和NC厚度比为界定条件分为3组,3组UHPC:NC分别

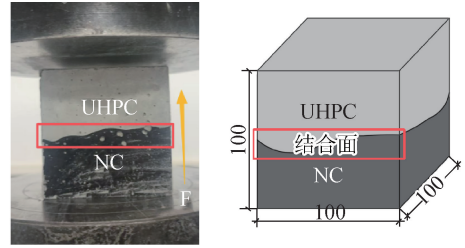


图8 取芯抗压试验

Fig. 8 Coring compression test

为3:7,4:6,5:5。如图9所示,不同厚度比的UHPC-NC试件对抗压强度影响较大,但UHPC龄期对抗压强度影响较小。随着UHPC厚度增大,试件整体抗压强度增大,但整体强度仍低于C25混凝土设计值。

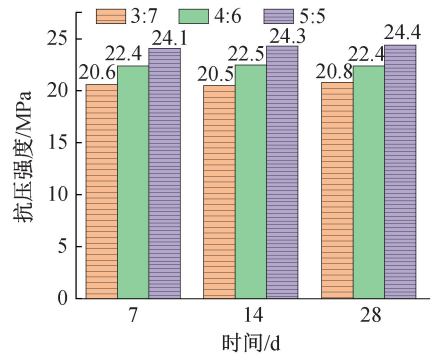


图9 UHPC厚度与养护龄期影响

Fig. 9 Influence of UHPC thickness and curing age

经抗压试验,混凝土试件破坏位置位于结合面以下NC侧,破坏裂纹由NC侧延伸至结合面。当峰值压力>70%时,NC混凝土侧表面裂缝由外及内向结合面处发展;当峰值压力达到80%时,结合面处NC出现贯穿裂纹,但裂纹暂未发展至UHPC侧;当峰值压力继续增加,NC侧混凝土结构完全破坏。与斜剪破坏试验^[3]不同,抗压试验中NC侧混凝土裂缝并未贯穿至UHPC侧,也并未出现结合面破坏。如此来看,即便普通混凝土侧受到破坏,UHPC也可由于其良好的工作状态继续工作。出现上述不同可能因为抗压试验产生裂缝的性质与斜剪不同,笔者将在后续试验中完善,以确定UHPC-NC结合情况。

3.4 UHPC工程试验段

解决UHPC非蒸养条件下的收缩剥离问题是一项系统性工程。单一措施往往难以保障安全,需采用“降低材料收缩+增强界面黏结+提供机械锚固”的综合技术路线应对其收缩问题。针对京藏高速公路10座桥梁的防撞墙开展UHPC修补试验,试验段总长200m,修补效果如图10所示。施工正值

仲夏,气温较高。采用高性能 MEA 降低短期收缩,经 7d 拆模后观察发现,防撞墙迎车面的 UHPC 表面无明显裂纹;顶端因桥梁行车扰动产生细微褶皱,但未出现裂缝。



图 10 UHPC 修复效果

Fig. 10 Repair effect of UHPC

经过 30d 后,对修补后防撞墙采用混凝土回弹仪进行测定,因超出回弹仪有效测定范围,故推断本次试验段强度 $\geq 100\text{MPa}$ 。试验段车流量较大,位于桥头的试验段扰动频繁,位于桥跨中央的试验段扰动最大,对该段进行细致检查,未出现毛细裂缝。由于高速公路安全因素,无法对该试验段进行取芯检测,故通过外观检测暂时认定 UHPC 加固效果合格。

4 防撞墙修补方案对比

4.1 UHPC 方案

UHPC 凭借其良好的力学性能和抗腐蚀能力使其作为修补材料在加固领域独树一帜,逐渐成为加固领域的主流。在防撞墙加固工程中,在迎车面加固使用 UHPC,能最大限度保护防撞墙结构不受到扰动破坏产生裂纹,更好地解决第 2 节所述问题。同时,由于 UHPC-NC 良好的界面特性,即使内部混凝土部分受到破坏,UHPC 仍能有效工作。但也由于高昂造价使 UHPC 大多只用在局部加固和修补。本方案与下文 2 种方案的适用性对比和价格对比如表 2,3 所示。

表 2 3 种方案适用情况及性能对比

Table 2 Comparison of applicability and performance of three solutions

控制项目	施工方案		
	UHPC	高性能修补砂浆	钢丝绳挂网
施工工艺	复杂	相对复杂	简单
适用范围	病害严重	病害严重	病害严重
施工周期	较长	较长	较短
材料抗压性能	优秀	良好	良好
材料抗裂性能	优秀	良好	良好
耐久性	优秀	一般	良好
预计使用年限/年	>8	3~5	>5

1) 优点:加固效果显著,结构的刚度显著提升;修补效果极佳且拥有自愈合能力,养护要求低;防

表 3 10km 防撞墙修复价格对比

Table 3 Cost comparison of anti-collision walls

控制项目	repairing 10km			万元
	UHPC	高性能修补砂浆	钢丝绳挂网	
破损 3cm(仅材料)	296.1	148.6	199.2	
破损 3cm(含人机)	401.2	257.3	343.8	
破损 5cm(仅材料)	503.6	238.4	312.1	
破损 5cm(含人机)	619.2	409.6	511.1	
破损 10cm(仅材料)	1 047.0	462.1	558.9	
破损 10cm(含人机)	1 178.4	683.9	828.6	

护运营周期长且后期养护成本低;在内部混凝土失效的状态下仍能持续工作。

2) 缺点:施工周期长;工艺复杂,需支模;工程造价高。

4.2 高性能修补砂浆

高性能修补砂浆作为一种双组分高强聚合物砂浆,与普通聚合物砂浆相比拥有更好的黏结性能、耐水性能及耐氯离子、抗裂性能和抗冻性能。其良好的和易性更适用于短时间加固工程的人工涂抹和机械喷涂。高性能修补砂浆的抗折强度、抗拉强度、抗冲击性能均比普通混凝土高,然而弹性模量却比普通混凝土低,收缩产生裂缝更小,对未来的养护要求也会随之降低。

采用双组分高强聚合物砂浆人工涂抹进行防撞墙表面修补。首先凿除顶部及迎车面破损、松散混凝土,裸露钢筋除锈。除锈完成后再次对工作面进行复查和清理,之后进行双组分高强聚合物砂浆配制、界面剂涂刷,待界面剂表干后涂抹双组分高强聚合物砂浆,找平、压光,覆膜滴灌养护。

1) 优点:工程造价较低;材料强度提升快,易养护。

2) 缺点:器械使用率低、人工消耗量大,受工人手艺影响大,施工过程中易受到外界振动影响。

4.3 钢丝绳挂网施工方案

钢丝绳网片-聚合物砂浆外加固的效果好,应用聚合物砂浆其抗压强度高,固化迅速,黏结性能好,有很好的保水性和抗裂性、高耐碱性、耐紫外线。聚合物砂浆黏合强度优秀且渗透性良好,钢丝绳网片通过聚合物砂浆附着,与原本的混凝土形成一体,共同承受荷载。

1) 优点:对大面积损坏的修补效果好,防护运营周期长,施工工艺简单。

2) 缺点:施工周期长,耗工量较大;钢丝网材料易再次发生锈蚀,长期使用表面会产生网状裂纹;增大结构自重,影响承载力。

5 结语

1)UHPC 在恶劣环境下具备稳定可靠的性能,尤其满足长期承受重载交通、雨雪冻融频繁的北方高速公路防撞墙修补需求。其在非养护氯盐侵蚀环境中的工作性能与标准养护环境下无显著差异。

2)UHPC-NC 界面性能有效保障了结构安全性。对于破损深度更严重的防撞墙,其具有更优的保护效果;随着 UHPC 厚度增加,整体抗压强度也随之提升。

3)UHPC 在防撞墙修补工程中是一种高投入、高回报的解决方案。虽较传统修补方案价格更高,但其更长的使用寿命可为后续养护环节节省大量费用。

参考文献:

- [1] 李留洋,李方元,陈宇航. 钢筋锈蚀率对预应力混凝土构件性能影响的试验研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(23):143-149.
- LI L Y, LI F Y, CHEN Y H. Experimental study on impact of reinforcement corrosion rate on performance of prestressed concrete components [J]. Construction technology, 2023, 52(23):143-149.
- [2] 刘数华. 新老混凝土的修补方法及粘结机理研究[J]. 施工技术,2006,35(8):32-34.
- LIU S H. Discussion on repair and bond mechanism of young on old concrete[J]. Construction technology,2006,35(8):32-34.
- [3] 王艳,常天风,杨子凡,等. 超高性能混凝土-普通混凝土界面粘结性能研究[J]. 材料导报,2025,39(7):83-88.
- WANG Y, CHANG T F, YANG Z F, et al. Study on shear bond performance of UHPC-NC interface [J]. Materials reports, 2025, 39(7):83-88.
- [4] 刘玉静,夏浩,刘国梁,等. 桥梁结构修补中 UHPC-NC 黏结界面的收缩性能[J]. 铁道建筑,2024,64(9):140-146.
- LIU Y J, XIA H, LIU G L, et al. Shrinkage performance of UHPC-

NC bonding interface in bridge structure repair [J]. Railway engineering,2024,64(9):140-146.

- [5] 李富民,武晓辉,陈志祥. 新老混凝土界面区氯离子传输特征与模型[J]. 东南大学学报(自然科学版),2023,53(3):425-435.
- LI F M, WU X H, CHEN Z X. Transport characteristics and models of chloride ions in the interfacial zone of new-old concrete[J]. Journal of Southeast University (natural science edition),2023,53(3):425-435.
- [6] 张菊辉,衣存浩,王诗昆,等. 新老混凝土的钢筋加速锈蚀[J]. 硅酸盐学报,2022,50(8):2096-2103.
- ZHANG J H, YI C H, WANG S K, et al. Accelerated corrosion of steel bars in new and old concrete structures [J]. Journal of the Chinese ceramic society,2022,50(8):2096-2103.
- [7] 程红强,刘国龙,高丹盈. 钢纤维混凝土与老混凝土粘结剪切性能试验研究[J]. 水力发电学报,2013,32(4):177-181,192.
- CHENG H Q, LIU G L, GAO D Y. Experimental study on bonding shear performance of new steel fiber reinforced concrete to old concrete [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2013, 32(4):177-181,192.
- [8] 李建涛,李冰. 桥梁防撞墩水铣及挂网喷锚快速修复工艺在南三环大修工程中的应用[J]. 混凝土世界,2020(2):84-87.
- LI J T, LI B. Application of water milling and net jet anchor rapid repair technology for bridge anti-collision pier in the south third ring road overhaul project [J]. China concrete,2020(2):84-87.
- [9] 苗强. 冻融-锈蚀效应下钢筋混凝土耐久性劣化规律与机理研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
- MIAO Q. Research on the deterioration patterns and mechanisms of reinforced concrete durability under freezing-thawing and corrosion action [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [10] 侯颢. 苏州桥防撞墩破损分析及修补工艺[J]. 市政技术,2016,34(6):74-76,83.
- HOU H. Damage analysis and repair technology of Suzhou Bridge crash barrier [J]. Municipal engineering technology, 2016, 34(6):74-76,83.
- 53(24):56-60,90.
- LIU N B, ZHOU Q W, DING Z X. Analysis of mechanical properties of less steel pipe support for side span construction of asymmetrical separated cable-stayed bridge [J]. Construction technology,2024,53(24):56-60,90.
- [7] 张茂军,都浩,安南,等. 基于 BIM 模型的贝雷架结构参数转化方法研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2023,15(4):38-42.
- ZHANG M J, DU H, AN N, et al. Study on transformation method of structural parameters of bailey frame based on BIM model [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture,2023,15(4):38-42.
- [8] 秦宏磊. 基于 BIM+ 的独塔双索面特大斜拉桥施工技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(5):62-65.
- QIN H L. Construction technology of unique tower and double cable plan super cable-stayed bridge based on BIM + [J]. Construction technology,2024,53(5):62-65.

(上接第 114 页)

- [3] 汪莹,陈旺,尹航,等. 高空大跨度混凝土连廊贝雷梁支撑体系施工技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(14):88-92.
- WANG Y, CHEN W, YIN H, et al. Construction technology of bailey beam support system for high-altitude large-span concrete corridors [J]. Construction technology,2024,53(14):88-92.
- [4] 戴世伟,危志豪. 贝雷梁设计中的相关问题探讨[J]. 公路,2024,69(2):39-44.
- DAI S W, WEI Z H. Discussions on relevant problems in the design of bailey beam [J]. Highway,2024,69(2):39-44.
- [5] 杨凯旋,黄风达,徐洲. 超大拱形横梁施工关键技术研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(6):74-80.
- YANG K X, HUANG F D, XU Z. Key construction technology of super-large arched cross beam [J]. Construction technology, 2025, 54(6):74-80.
- [6] 刘宁波,周清志,丁子贤. 不对称分离式斜拉桥边跨施工少钢管支架力学性能分析[J]. 施工技术(中英文),2024,