

基于UHPC湿接缝的C40与C50桥面板 拼宽受弯性能研究

侯康义¹, 王浩宇², 冯晓晓¹, 杨欢¹, 强玉波¹, 米分平¹

(1. 石家庄市政工程有限公司, 河北 石家庄 050011; 2. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要: 为研究连接新旧桥面板的超高性能混凝土(UHPC)湿接缝的受力性能,通过1块现浇整体板和2块UHPC拼宽桥面板的抗弯试验,分析了拼宽构造及横向受拉钢筋直径等对桥面板抗弯性能的影响,得到了极限荷载、荷载-位移曲线、钢筋应变曲线、接缝截面混凝土应变曲线。结果表明:现浇整体板的极限荷载为733.6 kN, UHPC拼宽桥面板在钢筋直径相同的情况下极限荷载为现浇整体板的92.7%;UHPC拼宽桥面板受拉钢筋直径由6 mm增加至8 mm,极限荷载由578.9 kN增加至680.3 kN,提升17.5%。UHPC拼宽桥面板表现出良好的抗弯性能,增大横向受拉钢筋直径可提高桥梁拼宽结构的抗弯性能。

关键词: 拼宽桥面板; 抗弯性能; 抗弯试验; 超高性能混凝土; 极限荷载

中图分类号: U445.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0025-06

Research on Bending Performance of C40 and C50 Bridge Deck Widening Based on UHPC Wet Joints

HOU Kangyi¹, WANG Haoyu², FENG Xiaoxiao¹, YANG Huan¹, QIANG Yubo¹, MI Fenping¹

(1. Shijiazhuang Municipal Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: To study the mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) wet joints connecting new and existing bridge decks, the bending tests are conducted on one cast-in-place monolithic slab and two UHPC widened bridge deck slabs to analyze the effects of the widening construction and the diameter of transverse tensile reinforcement on the flexural behavior of the bridge deck slabs. The parameters such as ultimate load, load-displacement curves, reinforcement strain curves and concrete strain curves at the joint section are obtained. The results show that the ultimate load of the cast-in-place monolithic slab is 733.6 kN. Under the same reinforcement diameter, the ultimate load of the UHPC widened bridge deck slab reaches 92.7% of that of the cast-in-place monolithic slab. When the diameter of the tensile reinforcement in the UHPC widened deck slab is increased from 6 mm to 8 mm, the ultimate load increases from 578.9 kN to 680.3 kN, representing an improvement of 17.5%. The UHPC widened bridge deck slabs exhibit good flexural performance, and increasing the diameter of the transverse tensile reinforcement can enhance the flexural performance of bridge widening structures.

Keywords: widened bridge deck slab; flexural performance; flexural test; ultra-high performance concrete; ultimate load

0 引言

随着城市的发展和交通需求的提升,既有桥梁在通行能力和服务性能方面逐渐难以承受日益繁重

的交通压力^[1-3]。桥梁拼宽作为一种有效提升既有桥梁通行能力的技术手段,通过在原桥侧部增设新桥,并采用合理的拼宽构造实现新旧结构的协同工作,成为当前桥梁结构加固与升级的重要手段^[4-5]。由于桥梁拼宽具备成本较低、施工周期较短及对既有交通影响较小等优点,已广泛应用于城市道路、高速公路及铁路桥梁的改扩建工程中^[6]。

国内外学者已经针对普通混凝土(NC)与超高性能混凝土湿接缝的构造形式及受力性能开展了一些研究。方志等^[7]以有无接缝设置及接缝内纵向钢筋连接方式为试验参数,对5块UHPC预制板试件的抗

收稿日期: 2026-03-24

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(236Z5408G); 河北省高等学校科学技术研究项目产学研专项(CXY2024045)

作者简介: 侯康义(1991—),男,本科,工程师,从事市政工程施工道路排水桥梁工作。

通信作者: 王浩宇(2000—),男,在读硕士,研究方向为土木工程。电子邮箱: 1449947342@qq.com。

弯性能进行试验研究,结果表明,不同钢筋连接方式对抗弯性能影响不大。Shah等^[8]对预制桥面板中UHPC湿接缝的受弯性能进行了试验研究。结果表明,UHPC接缝与普通混凝土界面黏结强度较高,裂缝主要出现在接缝附近的普通混凝土区域。袁龙泉等^[9]以钢筋直径和锚固长度为参数,研究UHPC-NC试件的界面黏结性能及裂缝宽度变化规律。结果表明,增大钢筋直径和锚固长度并采用带肋钢筋,可显著提升界面抗裂性能并抑制裂缝发展。张轶等^[10]通过对UHPC-NC组合湿接缝板进行四点弯曲试验,发现增加UHPC层配筋率能显著提升极限荷载。Jiang等^[11]对13块UHPC-NC接缝板进行了试验研究,发现UHPC接缝比完整板极限荷载下降9%~22%,并提出接缝宽度应不小于200 mm、接缝钢筋锚固长度为160 mm的建议。Feng等^[12]通过有限元分析发现,接头形状显著影响UHPC湿接缝梁的受弯性能,其中倒梯形键槽接缝表现最佳,小尺寸接缝梁性能优于大尺寸梁。岳秀鹏等^[13]通过简支板与连续板试验发现,带钢板增强的燕尾榫湿接缝抗裂性能最佳,极限荷载与延性接近或优于整浇板,并提出了抗弯承载力计算方法。Lu等^[14]在UHPC桥面板接缝中应用嵌入式钢丝网(SWM)发现,SWM处理可显著提升UHPC接缝区域的开裂荷载和抗弯强度。张阳等^[15]通过对UHPC-NC组合板的菱形企口与倒T形接缝受弯试验研究发现,接缝抗裂性能主要受界面控制,构造差异对承载力影响较小,并提出了开裂荷载计算公式,建议工程采用施工便捷的菱形企口接缝。张哲等^[16]通过抗弯试验研究表明,采用UHPC湿接缝并配合钢筋直线搭接(搭接长度 $\geq 10d$)可显著提高开裂荷载和极限荷载,简化施工工艺,且理论计算结果与试验吻合较好。Li等^[17]提出两种免模板湿接缝形式(半圆形和局部加厚半圆形)并与矩形接缝对比,四点弯曲试验表明,半圆形接缝抗裂性优于矩形接缝,而局部加厚半圆形接缝在极限荷载方面接近矩形接缝。Graybeal^[18]研究了现场浇筑UHPC在桥梁结构中的连接性能。结果表明,在循环和静态荷载作用下,预制桥面板与T形梁的横纵向连接均具有优异的结构性能,同时施工简便且长期耐久性显著。

综上所述,现关于UHPC湿接缝的界面黏结与受弯性能已有较多研究,但针对既有C40桥面板与新建C50桥面板通过UHPC湿接缝拼宽这一实际工程的对比试验与影响因素分析仍较少。本文通过1块

现浇整体板和2块UHPC拼宽桥面板的抗弯性能试验,研究了拼宽构造及钢筋直径对桥面板受弯性能的影响,试验结果以期同类结构提供理论依据和实践指导。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本次试验以UHPC拼宽构造和横向受拉钢筋直径为设计参数,共设计3个试件,包括1个现浇整体板和2个UHPC拼宽桥面板。以QM-1、QM-2和QM-3分别代表试验中三个试件,试件尺寸均为长2 000 mm,宽1 100 mm,厚150 mm,采用HRB400钢筋,纵横向双层布置,纵向间距170 mm,横向间距150 mm,钢筋保护层厚度为30 mm。

QM-1试件为现浇整体板,如图1(a)所示,采用C50混凝土,纵横向钢筋直径为8 mm。QM-2试件为UHPC拼宽桥面板,如图1(b)所示,两侧分别采用C40和C50混凝土,通过UHPC连接,接缝宽度为300 mm,界面做粗糙处理(粗糙界面平均灌沙深度为4.44 mm)并涂抹混凝土界面剂,钢筋布置与QM-1相同,两侧钢筋连接方式采用双面搭接焊,焊接长度为100 mm。如图1(c)所示,QM-3试件横向受拉钢筋直径改为6 mm,其他参数与QM-2试件相同。试件设计参数如表1所示。

UHPC拼宽桥面板以QM-2试件为例说明制作过程。试件制作过程如图2所示。首先完成试件钢模具制作;然后绑扎钢筋并粘贴钢筋应变片,再将钢筋与粗糙度挡板放置模具中,浇筑两侧C40、C50混凝土,标准养护72 h后拆模;自然养护28 d后,焊接UHPC区域内连接钢筋,界面处涂抹混凝土界面剂,浇筑UHPC湿接缝,标准养护72 h后拆模并自然养护28 d。QM-1试件为现浇整体板,将绑扎好的钢筋放入钢模具,浇筑C50混凝土并自然养护28 d。

1.2 材料性能

本次试验中C40和C50混凝土采用普通硅酸盐水泥混凝土,根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[19]要求配制,普通混凝土配合比如表2所示。UHPC由水泥、高效掺和料(硅灰等活性粉末)、砂、钢纤维、减水剂和水组成,钢纤维采用直径0.2 mm的锚钩型钢纤维,长度为14 mm。UHPC配合比如表3所示。

参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[20]和《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—

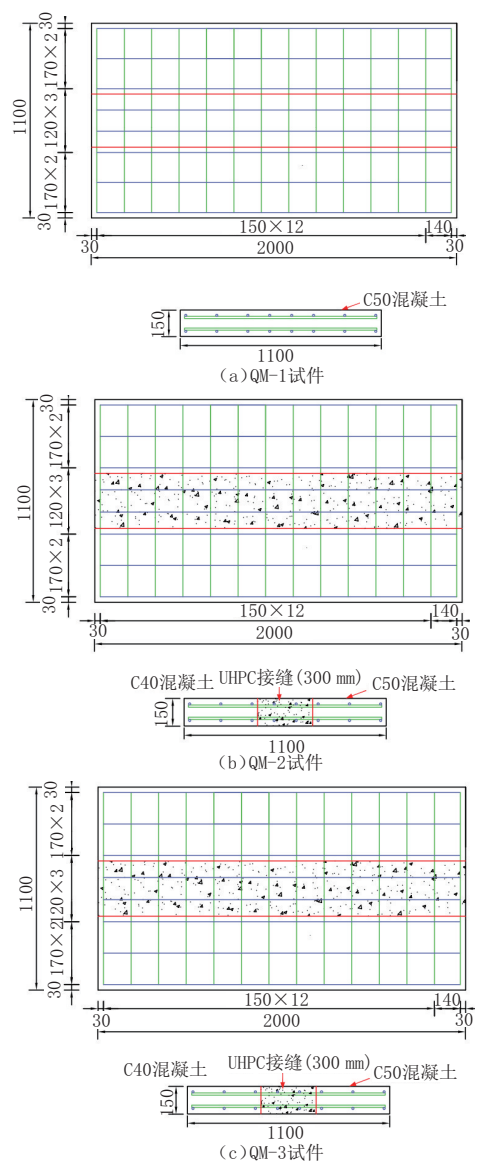


图 1 试件尺寸及构造(单位:mm)

表 1 试件设计参数

编号	接缝构造	尺寸/mm	界面连接	横向受拉钢筋/受压钢筋/mm	纵向钢筋/mm
QM-1	无	2 000×1 100×150	整体浇筑	8/8	8
QM-2	有	2 000×1 100×150	粗糙	8/8	8
QM-3	有	2 000×1 100×150	粗糙	6/8	8

2015)^[21]制作 C40、C50、UHPC 标准试块,进行材性试验。混凝土材料性能如表 4 所示,钢筋材料性能如表 5 所示。

1.3 加载方案

试验加载装置如图 3 所示,试验采用两个 50 t 液压伺服千斤顶和分配梁、加载梁进行四点弯曲加载,在板顶布置两根长 2 000 mm、宽 100 mm 的加载梁,荷载经过分配梁传递到加载梁上。试验加载分为三

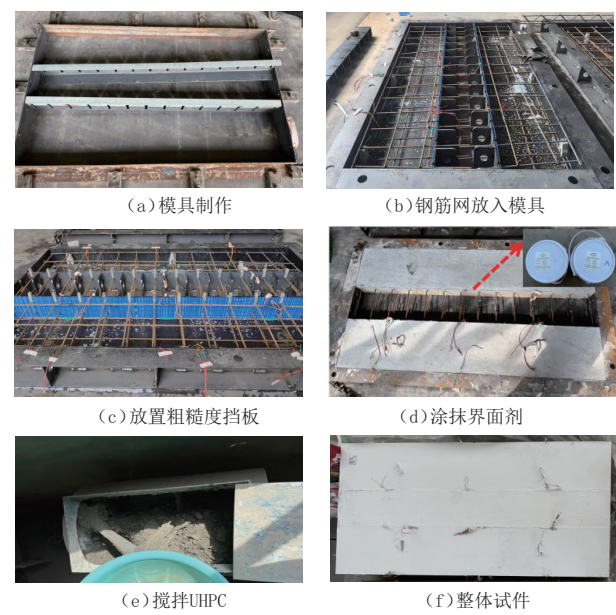


图 2 试件制作过程

表 2 普通混凝土配合比 单位:kg/m³

组别	水泥	水	粉煤灰	减水剂	石子	河砂
C40	360	170	80	7	1 050	780
C50	420	160	80	8	1 050	750

表 3 UHPC 配合比 单位:kg/m³

组别	水泥	钢纤维	水	砂	硅灰	减水剂
UHPC	843.8	157	197.4	1 039.0	253.1	21.1

表 4 混凝土材料性能

混凝土类别	抗压强度 f_{cu} /MPa	劈裂抗拉强度 f_{ts} /MPa	弹性模量 E_s /GPa
C40	42.2	3.4	32.5
C50	51.3	3.7	38.0
UHPC	123.0	13.2	44.2

表 5 钢筋材料性能

钢筋直径 d /mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /GPa
6	424.7	468.5	206.0
8	443.5	506.1	206.0

个阶段:(1)预加载阶段,以 5 kN 为一级施加荷载,加载至开裂荷载的 20% 后卸载,消除构件之间的孔隙。(2)力加载阶段,按 10 kN 一级加载,加载至荷载位移曲线出现平缓段或单级跨中挠度增长超过 1.5 mm。(3)位移加载阶段,以每级 1.5 mm 的位移增量逐级加载,直至试件失效破坏。试件出现以下 3 种现象时停止试验:挠度达到跨度的 1/50、受压区混凝土压碎、荷载下降至峰值荷载的 85%。

试验加载与测点布置如图 4 所示。试验测试内容包括:(1)荷载值测定。通过在千斤顶与分配梁之间布置压力传感器获取荷载数据。(2)位移测量。位移计布置如图 4(a)所示,位移计在跨中与板长 1/3 处

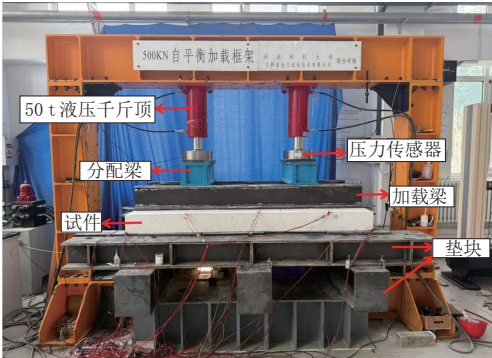


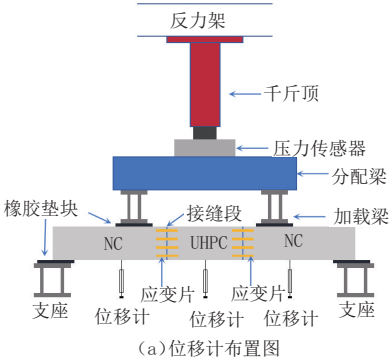
图3 加载装置

双排布置,分别位于跨中、跨径 1/3 处共 6 个位移计,测量试件关键位置的竖向位移。(3)钢筋应变测试。如图 4(b)所示,在试件跨中位置 H、Z 处布置钢筋应变片,以测试钢筋应变情况。(4)混凝土应变测试。试件侧面垂直于接缝等距布置应变片,以测试接缝截面混凝土应变情况。

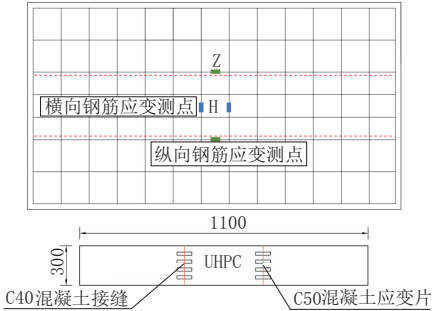
2 试验结果分析

2.1 破坏过程及荷载特征

根据试验结果,3 块试件破坏过程均可分为开裂



(a)位移计布置图



(b)应变测点布置图

图4 试验加载与测点布置(单位:mm)

前的弹性阶段、裂缝稳定发展阶段和破坏阶段。主要试验结果如表 6 所示。试件裂缝分布如图 5 所示。

表 6 试验主要结果

试验构件	开裂荷载 P_{cr} /kN	开裂挠度 Δ_{per} /mm	初裂位置	极限荷载 P_{cu} /kN	极限荷载对应位移 Δ_{pcu} /mm	极限位移 Δ_u /mm
QM-1	188.2	2.2	距支座 30 cm 处	733.2	17.3	27.6
QM-2	123.5	1.7	界面	680.3	17.2	25.6
QM-3	106.3	1.4	界面	578.9	15.2	22.9

QM-1 试件在开裂前阶段处于弹性受力状态,未见可见裂缝。当荷载达到 188.2 kN 时,在距两侧支座中心内缘约 30 cm 处,板底首次同时出现两条细微裂缝,标志着试件进入初裂状态。随着荷载增加至 281.4 kN 时,两侧支座内缘约 15 cm 处同时出现新裂缝,同时已有裂缝沿纵向延伸。随着荷载继续增加至 302.0 kN,在跨中附近出现两条新裂缝。荷载继续增加至 440.1 kN 时,已有裂缝沿横向扩展细小裂缝,同时裂缝宽度继续增加,并伴随着微小响声。荷载达到极限荷载 733.2 kN 时,试件挠跨中挠度增加至 17.23 mm,荷载不再增加,跨中挠度迅速增加,试件破坏。

QM-2 和 QM-3 试件破坏过程及特征相似,试件在开裂前阶段试件处于弹性受力状态,未见可见裂缝。随着荷载分别达到 123.5、106.3 kN 时,初始裂缝均出现在两侧混凝土底部接缝处,两侧普通混凝土区域以及 UHPC 区域未发现裂缝。随着荷载分别增加至 250.6、242.1 kN 时,在 C40 混凝土一侧距底部支座中心约 15 cm 处出现裂缝。荷载分别加载至

285.5、275.8 kN 时,在 C50 混凝土一侧距底部支座中心约 15 cm 处出现裂缝。荷载继续增加至 356.2、342.1 kN 时,UHPC 区域开始出现纵向微小裂缝,同时普通混凝土部分裂缝沿纵向延伸、横向扩展,并伴随着轻微响声。荷载分别达到 680.3、578.9 kN 时,试件发出“砰”的一声巨响,跨中位移急剧增大,试件破坏。在整个加载过程中,未观察到界面处裂缝迅速贯通或界面滑移,表明 UHPC-NC 接缝在破坏前始终保持力的有效传递,界面未先于整体结构破坏。

2.2 荷载-位移曲线

荷载-位移曲线如图 6 所示,3 个试件的变形规律均表现出三阶段特性。(1)弹性阶段,试件加载过程中,处于完好状态未发现裂缝,且钢筋未出现屈服,荷载-位移曲线呈线性增长。(2)弹塑性阶段,随着试验荷载进一步增加,试件开始出现裂缝,裂缝宽度随荷载增大而增大,并沿纵向延伸,UHPC-NC 湿接缝处未出现明显滑移,界面保持稳定。这一阶段是裂缝出现的主要阶段,荷载-位移曲线的斜率逐渐减小,曲线开始出现非线性变化。(3)破坏阶段,随着

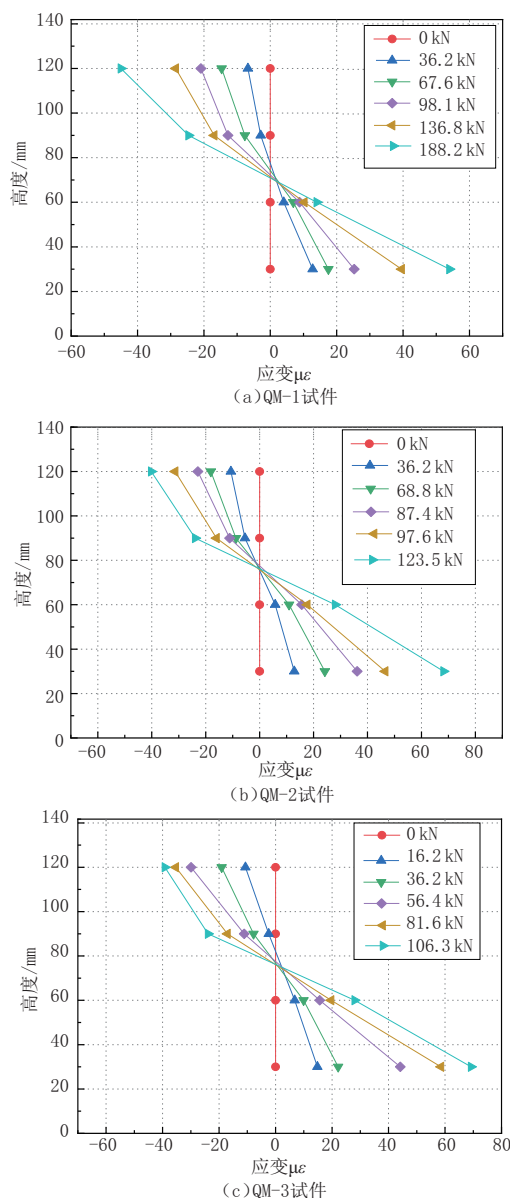


图8 接缝截面混凝土应变分布

3 结论

本文针对旧桥C40桥面板与新建C50预制桥面板之间通过UHPC湿接缝拼宽连接的应用需求,开展了整体现浇板与UHPC拼宽桥面板的四点弯性能试验,分析拼宽构造及受拉横向钢筋直径对桥面板受弯性能的影响,得到以下主要结论:

(1)QM-1和QM-2桥面板在加载过程中表现出良好的承载能力。在配筋相同条件下,QM-2试件的极限荷载为680.3 kN,达到QM-1试件极限荷载733.6 kN的92.7%。这表明采用合理地界面处理与配筋构造,UHPC接缝能有效地传递应力,保证拼宽结构与整体结构具有相近的抗弯性能。

(2)将UHPC拼宽桥面板中钢筋直径由6 mm增至8 mm后,其极限荷载由578.9 kN提升至680.3 kN,

增幅达17.5%。这表明在保证界面黏结的前提下,增加横向受拉钢筋直径可以提高拼宽板抗弯性能。

(3)在达到极限荷载时,QM-2和QM-3的跨中位移分别为17.2 mm和15.2 mm,与整体板QM-1(17.3 mm)接近。这表明在合理的配筋和界面处理下,UHPC拼宽桥面板能够提供与整体现浇板相近的变形能力和延性。

本文针对旧桥C40与新桥C50拼宽工程中桥面板受弯性能进行研究,采用UHPC湿接缝配合合理配筋和界面粗糙度处理,可接近整桥承载性能,还因UHPC具备优异的早期强度和耐久性,为拼宽段的长期使用提供了可靠保障。后续研究可系统分析接缝在剪切及轴向拉力作用下的承载机理与破坏模式,从而更准确地预测UHPC拼宽接缝在工程中的力学表现,为接缝设计与施工工艺优化提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
- [2] 彭旺虎, 李院军, 刘嘉欣. 基于静力模型修正的装配式T梁桥荷载横向分布计算[J]. 公路交通科技, 2021, 38(4): 45-54.
- [3] 邓文豪, 林文朴, 李华生, 等. UHPC用作高速公路桥梁预制构件拼接连接的研究与应用[J]. 公路, 2023, 68(9): 174-179.
- [4] 杨忠胜. 既有拼宽T梁桥连接方式优化研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(4): 106-111.
- [5] Nguyen D. Optimization of box girder bridge widening techniques: Reinforced Rib vs. Strut solutions, Applications in Engineering Science, Volume 22, 2025, 100228.
- [6] 赵秋, 杨耀峰, 黄金局, 等. 预制UHPC桥面板纤维连续湿接缝设计方法[J]. 工程力学, 2024: 1-15.
- [7] 方志, 王任超, 洪金圣, 等. 超高性能混凝土预制板现浇湿接缝抗弯性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2268-2279.
- [8] Shah Y, Hu Zhijian J, Yin B S, et al. Flexural performance analysis of UHPC wet joint of prefabricated bridge deck[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(11): 11253-11266.
- [9] 袁龙泉, 胡泽育, 丁溢骏, 等. 钢筋参数对UHPC-NSC界面黏结性能影响研究[J]. 混凝土, 2025(2): 58-63.
- [10] 张铁, 张阳, 刘颖峰, 等. 带湿接缝的预制UHPC-NC组合板试验与分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(8): 63-69.
- [11] Jiang Haibo, Hu Zebin, Feng Jiahui, et al. Flexural behavior of UHPC-filled longitudinal connections with non-contacting lapped reinforcements for narrow joint width[J]. Structures, 2022, 39: 620-636.
- [12] Feng Zheng, Li Chuanxi, Lu Ke, et al. Experimental and numerical investigations on flexural performance of ultra-high-performance concrete (UHPC) beams with wet joints[J]. Structures, 2022, 45: 199-213.
- [13] 岳秀鹏, 肖靖林, 甄倩倩, 等. 超高性能混凝土桥面板湿接缝受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 94-107.
- [14] Lu Kaiwei, Du Linpu, Zhang Fan, et al. Flexural Behavior of Ultra-

(下转第47页)