

引文格式:李立峰,彭浩,邹德强,等.钢-UHPC组合梁负弯矩区抗裂性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(3):15-25.

LI Lifeng, PENG Hao, ZOU Deqiang, et al. Experimental study on crack resistance of steel-UHPC composite beams in negative moment zone[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(3): 15-25.

DOI:10.19815/j.jace.2023.10088

钢-UHPC组合梁负弯矩区抗裂性能试验研究

李立峰¹,彭浩¹,邹德强²,黄心仪¹,李凌霄²

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 中国建筑第五工程局有限公司,湖南 长沙 410004)

摘要:为解决钢-混凝土组合连续梁负弯矩区桥面板的开裂问题,提出了采用超高性能混凝土(UHPC)代替负弯矩区桥面板的部分普通混凝土(NC),利用UHPC超高的力学性能解决负弯矩区桥面板的开裂问题,对其抗裂性能进行研究;设计并完成了3片钢-UHPC组合梁负弯矩区抗裂试验,获得开裂荷载、跨中位移、裂缝宽度和应变等试验数据。结合国内外裂缝宽度计算公式,提出了简明的适用于钢-UHPC组合梁的桥面板裂缝宽度计算公式,并根据已有钢-UHPC组合梁文献的裂缝宽度试验数据,验证了提出的桥面板裂缝宽度计算公式的可靠性和适用性。结果表明:UHPC能提高组合梁负弯矩区的开裂荷载,具有抑制桥面板裂缝发展的能力,能明显提高桥面板负弯矩区的抗裂性能,有效解决负弯矩区桥面板的开裂问题;根据试验结果计算的名义应力均大于工程实际设计值,负弯矩区采用UHPC代替NC的结构具有优异的抗裂性能;建议组合梁负弯矩区UHPC纵向铺设长度宜为 $0.2L\sim 0.25L$ (L 为计算跨径),铺设厚度宜为 $60\sim 70$ mm。

关键词:钢-UHPC组合梁;负弯矩区;抗裂性能;裂缝宽度

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)03-0015-11

Experimental study on crack resistance of steel-UHPC composite beams in negative moment zone

LI Lifeng¹, PENG Hao¹, ZOU Deqiang², HUANG Xinyi¹, LI Lingxiao²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the cracking problem of bridge deck slab in the negative bending moment zone of steel-concrete continuous girders, it was proposed to use ultra-high performance concrete (UHPC) to replace part of normal concrete (NC) of bridge deck slab in the negative bending moment zone. The ultra-high mechanical property of UHPC was used to solve the cracking problem of bridge deck slab in the negative bending moment zone, and its crack resistance was studied. Three steel-UHPC composite beams were designed and tested for crack resistance in the negative bending moment zone, obtaining experimental data on crack load, mid-span displacement, crack width, and strain. A simple formula for calculating the crack width of bridge deck slab suitable for steel-UHPC composite beams was proposed based on domestic and foreign crack width calculation formulas. The reliability and applicability of the proposed formula

for calculating the crack width of bridge deck slab were verified based on crack width test data from existing literature on steel-UHPC composite beams. The results show that UHPC can increase the cracking load in the negative bending moment zone of composite beams, and has the ability to suppress the development of cracks in bridge decks, which can significantly improve the crack resistance of bridge deck slab in the negative bending moment zone and effectively solve the cracking problem of bridge deck slab in the negative bending moment zone. The nominal stresses calculated based on the experimental results are all greater than the actual design values of the project, indicating that the structure using UHPC instead of NC in the negative bending moment zone has excellent crack resistance performance. It is recommended that the longitudinal laying length of UHPC in the negative bending moment zone of composite beams should be $0.2L-0.25L$ (L is the calculated span) and the laying thickness should be 60-70 mm.

Key words: steel-UHPC composite beam; negative moment zone; crack resistance; crack width

Author resume: LI Lifeng(1971-), male, PhD, professor, E-mail: lilifeng@hnu.edu.cn.

0 引言

钢-混凝土组合梁发展前期依靠其自重轻、施工快捷、力学性能优异和稳定耐久等优点,得到了广泛的应用。随着应用在不同的场景,钢-混凝土组合梁的不足之处也逐渐显露,其中负弯矩区桥面板易开裂、钢梁局部易失稳等问题影响着组合梁的正常使用及其耐久性,所以如何提高负弯矩区桥面板的抗裂性能成为钢-混凝土组合梁设计的关键。现行的负弯矩区桥面板处理方法主要包括高配筋、支点强迫位移、预应力和桥面滞后结合等方法。如临猗黄河大桥采用了支点强迫位移、预应力法;上海长江大桥采用了桥面滞后结合、支点强迫位移法;武汉二七长江大桥采用了中支点桥面滞后结合、支点升降法;长沙湘江大桥采用了张拉预应力钢束、高配筋率、支点强迫位移、桥面板滞后结合等处理方法。

目前对钢-混凝土组合梁的研究不断更新迭代,如樊健生等^[1-4]研究了预应力对组合梁负弯矩区混凝土抗裂性能的影响;聂建国等^[5]采用抗拔不抗剪连接件代替传统焊钉剪力连接件;戴吕源等^[6]研究了剪力连接件形式、加劲肋形式及钢筋直径等因素对负弯矩区混凝土抗裂性能的影响;万世成等^[7]研究了预应力碳纤维加固负弯矩区对其受力性能的影响,以上研究思路均是从构造措施、结构设计来解决负弯矩区桥面板的开裂问题。目前的新研究思路是应用新型材料,如樊健生等^[8]研究了钢-ECC组合梁负弯矩区的抗裂性能;刘新华等^[9]研究了钢-UHPC组合梁的不同接口形式;朱劲松等^[10-11]研究了剪力连接件对钢-UHPC组合梁抗弯性能的影响;邵旭东等^[12-13]研究了湿接缝对钢-UHPC组合梁负弯矩区

的抗弯性能的影响。目前涉及裂缝宽度计算公式的研究较少且计算公式均较复杂。

超高性能混凝土(UHPC)是一种新型土木材料,采用最大密度理论获得超高的抗压、抗拉、耐久性能^[14],其中钢纤维的加入提高了基体的抗拉能力,可有效限制内部裂缝的发展。传统的负弯矩区处理方法使得结构受力复杂、施工繁琐、经济性能差,为解决钢-混凝土组合连续梁负弯矩区桥面板的开裂问题,本文提出了采用UHPC代替负弯矩区桥面板的部分普通混凝土(NC),利用UHPC超高的力学性能解决负弯矩区桥面板开裂问题;研究UHPC在钢-混凝土组合梁中的应用对组合梁桥面板抗裂性能的影响,设计并完成了3片钢-UHPC组合梁,获得开裂荷载、跨中位移和应变等试验数据;通过分析建议了合理的负弯矩区UHPC纵向铺设长度和铺设厚度,以期解决钢-混凝土组合梁负弯矩区的开裂问题。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文共设计3片钢-UHPC组合梁,全长6.3 m,编号为SU-1、SU-2和SU-3。组合梁纵向布置及截面布置分别如图1、2所示。钢梁为焊接工字钢,材质为Q355,上翼缘宽200 mm、厚8 mm,腹板高593 mm、厚8 mm,下翼缘宽300 mm、厚14 mm;钢梁加劲肋厚8 mm。钢梁与桥面板之间通过栓钉剪力件连接,完全剪力连接,栓钉采用ML15AL,直径16 mm、长110 mm。桥面板厚135 mm、宽1050 mm,支点处桥面板为预制NC,跨中桥面板为预制NC+现浇UHPC,其中UHPC层厚60 mm,UHPC

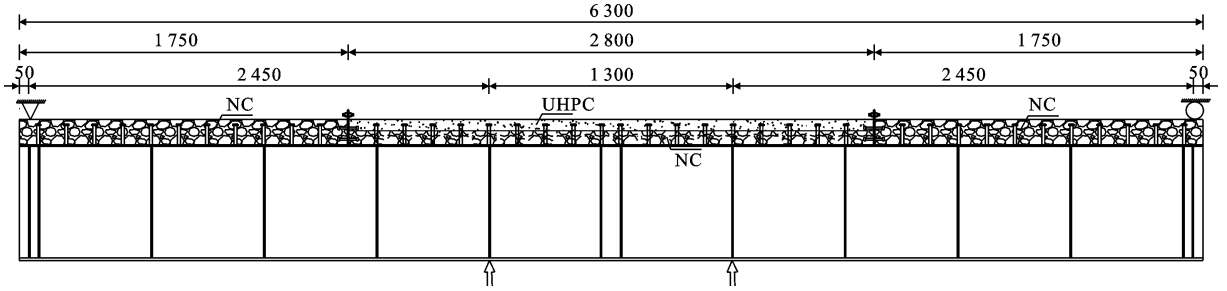


图 1 试验梁纵向布置及加载示意图(单位:mm)

Fig. 1 Longitudinal arrangement and loading diagram of test beam (unit: mm)

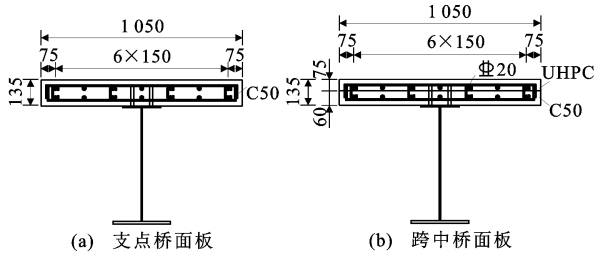


图 2 试验梁截面布置(单位:mm)

Fig. 2 Arrangement of test beam section (unit: mm)

与 NC 交界面处的连接通过剪力连接件及界面凿毛处理实现。截面布置上下两层纵向钢筋,间距 150 mm;横向钢筋直径 8 mm,间距 100 mm,横向钢筋布置于纵向钢筋之上,钢筋净保护层厚度为 25 mm。除钢筋直径变化之外,其他参数均相同,试验梁参数如表 1 所示。

表 1 试验梁参数

Table 1 Test beam parameters

试验梁编号	钢筋直径/mm	保护层厚度/mm	配筋率/%	接缝厚度/mm
SU-1	12	25	1.12	60
SU-2	16	25	1.99	60
SU-3	20	25	3.10	60

1.2 试验梁制作

试验梁制作流程如图 3 所示。钢主梁由钢板焊接而成,在钢主梁上焊接剪力连接件,搭设钢模板及绑扎钢筋。预制 NC 部分为 C50 混凝土,按配合比充分搅拌后进行浇筑。预制 NC 自然养护到预期时间之后,对 UHPC 与 NC 的界面进行凿毛处理。

UHPC 浇筑时,界面达到饱水状态且表面无水。搅拌均匀后的 UHPC 质地黏稠且具有良好的流动性和自密实性,因此浇筑时不需要振捣。UHPC 在室温下进行自然养护并及时补充水分。养护好之后组合梁实际的 UHPC 层和 NC 层厚度达到预期的效果。

1.3 材料性能

UHPC 主要由水泥、硅灰、石英砂、石英粉、高

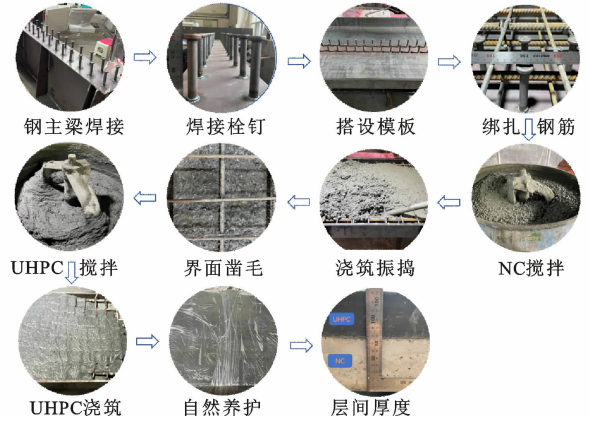


图 3 试验梁制作流程

Fig. 3 Test beam fabrication process

效减水剂以及一定体积掺量的钢纤维组成,钢纤维体积掺量为 2.5%,配合比如表 2 所示。试验梁制作完备后自然养护,同期制备相同条件养护的材料试块,采用标准方法^[15]进行材料性能试验,材料的力学性能测试结果如表 3、4 所示。

表 2 UHPC 配合比

Table 2 UHPC mixing ratio

组分	水	水泥	钢纤维	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂
用量/(kg·m ⁻³)	194	782	200	172	673	149	21

表 3 混凝土材料性能

Table 3 Concrete material properties

材料	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
UHPC	139.75	49.2	137.46	32.30
NC	51.14	46.9	51.01	4.30

表 4 钢材材料性能

Table 4 Steel material properties

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	钢板厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
12	452	637	8	371	524
16	431	628	14	379	529
20	428	618			

1.4 加载方案

本文试验着重于研究钢-UHPC组合梁负弯矩区抗裂性能,故加载方式应是在组合梁跨中产生负弯矩,使跨中桥面板受拉。试验时加载方式如图4所示。试验时将模型倒置,由上而下进行加载,采用反向四点加载。



图4 试验梁加载方式

Fig. 4 Loading method of test beam

1.5 试验方案

主要测试内容包括试验荷载、应变数据、位移量及裂缝宽度等。其中试验荷载值由压力传感器测量;应变数据由静态应变测试系统采集;组合梁竖向位移由位移计测量;裂缝宽度采用裂缝综合测试仪测量。应变测点布置如图5~7所示。

2 试验结果

2.1 试验过程

根据上述加载、测试方案依次对试验梁进行试验,3片试验梁的试验过程及现象均相似,限于篇幅,这里只对SU-3试验梁做详细描述。加载初期,试验梁处于弹性阶段,位移和应变均随着荷载增加呈线性增长。加载至199.4 kN时,跨中的UHPC表面开始出现裂缝T1,随后出现的T2号裂缝与T1号裂缝具有相同的开裂趋势。T3号裂缝出现在另一个加载点对应的区域,稍后在T3号裂缝附近陆续出现T4、T5号裂缝。当荷载达到330.2 kN时,间隔第一次出现裂缝加载点20 cm的位置陆续出现几条裂缝,随着持续加载,裂缝之间连通形成一条裂缝。从410.5 kN加载至530.8 kN期间,陆续出现多条裂缝,裂缝宽度也在持续发展。当加载至551.8 kN时,UHPC层顶面的裂缝开始延伸至侧面,同时侧面出现较多裂缝,起初裂缝都未延伸至NC层,但随着荷载增加,侧板裂缝延伸至NC层。继续加载至699.9 kN时,UHPC表面的横向裂缝也基本上连通延伸至整个截面。继续加载至740.6 kN,裂缝明显变密集,更多具有相同开裂趋

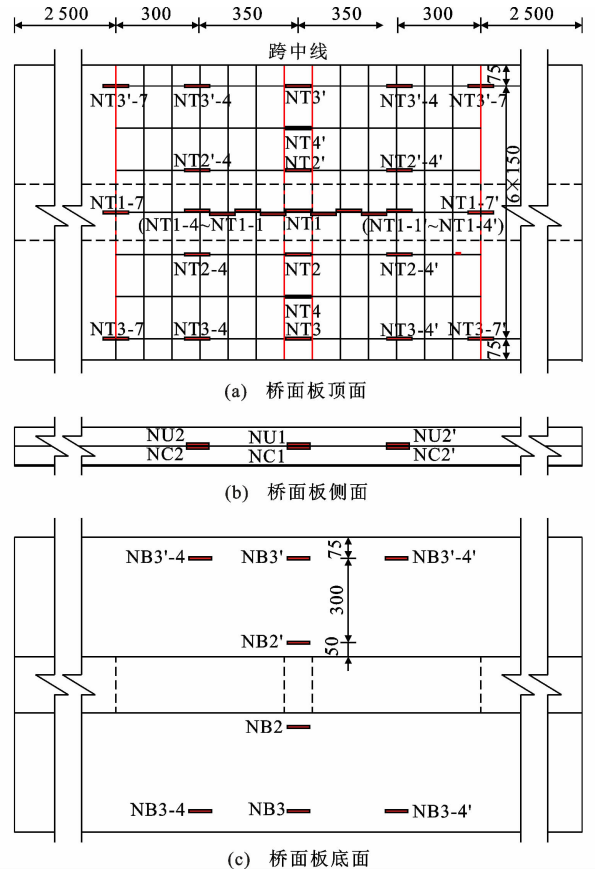


图5 桥面板应变测点布置(单位:mm)

Fig. 5 Layout of bridge deck slab strain measurement

points (unit: mm)

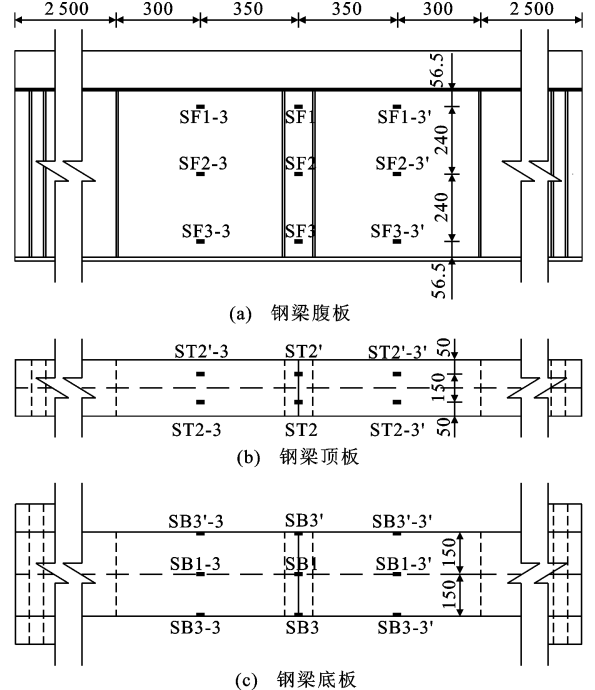


图6 钢梁应变测点布置(单位:mm)

Fig. 6 Layout of strain measurement points of steel beams (unit: mm)

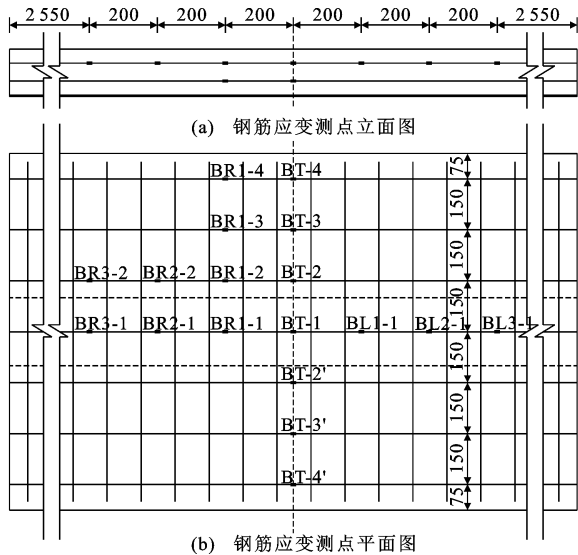


图 7 钢筋应变测点布置(单位:mm)

Fig. 7 Layout of reinforcement strain measurement points (unit: mm)

势的裂缝连通成为一条裂缝。持续加载至 817 kN 时,裂缝宽度持续增大,荷载随即下降。

2.2 荷载-位移曲线

根据试验结果,3 片试验梁的荷载-位移曲线如图 8 所示。Rafiee^[16]通过研究发现,当 UHPC 结构表面的最大裂缝宽度小于 0.05 mm 时,产生的裂缝对 UHPC 结构的耐久性影响不大;UHPC 接缝处出现裂缝时,UHPC 裂缝宽度一般在 0.05 mm 左右^[17]。因此将开始出现裂缝时的荷载定义为初裂荷载;将 UHPC 裂缝宽度为 0.05 mm 时的荷载定义为开裂荷载;极限荷载为试验梁加载时的最大荷载,极限荷载对应位移即为极限荷载时试验梁跨中的竖向位移。试验梁的初裂荷载、开裂荷载、极限荷载如表 5 所示。

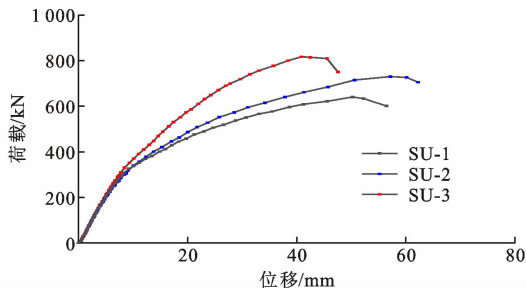


图 8 试验梁荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of test beam

2.3 应变分析

试验梁的应变主要包括桥面板应变、钢筋应变及钢梁应变等。主要的应变曲线如图 9~11 所示。

表 5 试验梁主要测试结果

Table 5 Main test results of test beam

试验梁编号	初裂荷载/kN	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	极限荷载对应位移/mm
SU-1	103	248	641	50.23
SU-2	142	393	730	57.19
SU-3	199	511	817	40.90

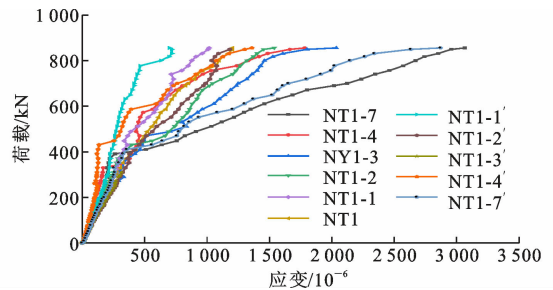


图 9 UHPC 顶面应变

Fig. 9 UHPC top surface strain

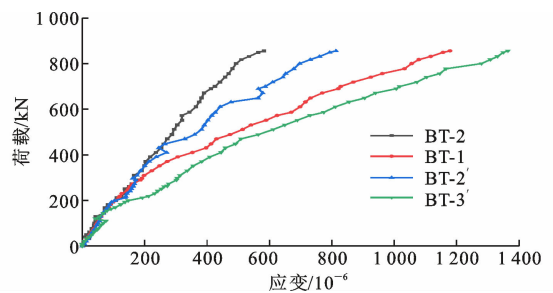


图 10 钢筋应变

Fig. 10 Reinforcement strain

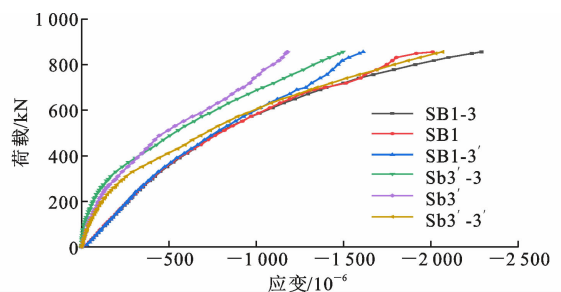


图 11 钢梁应变

Fig. 11 Steel beam strain

2.3.1 桥面板应变

试验梁的荷载-桥面板 UHPC 应变在荷载较小时与荷载呈线性关系,随着裂缝的出现与发展,应变的增长斜率发生变化。UHPC 的拉应变最大值为 $3\ 064.9 \times 10^{-6}$,当加载至 199.4 kN 时,出现裂缝附近的应变片捕捉到的开裂应变为 177.4×10^{-6} 。靠近钢梁部分的 UHPC 顶面应变总体上大于翼缘边缘部分的应变。加载前期桥面板 NC 底板受压,压

应变随着荷载的增大而减小,NC 底板应变从压应变转变为拉应变,应是中性轴上移导致。

2.3.2 钢筋应变

试验梁钢筋分为上、下两层钢筋,上层钢筋分布于 UHPC 层中,试验梁钢筋应变与桥面板 UHPC 表面的应变分布相似,随着荷载增加,应变逐渐增大。钢筋最大拉应变达到 $1\ 365 \times 10^{-6}$,靠近桥面板翼缘的钢筋应变总体上大于内侧钢筋。

2.3.3 钢梁应变

钢主梁顶、底板(钢梁顶板应变为拉应变,底板应变为压应变)荷载-应变曲线几乎呈线性关系,最大的拉应变达到 $1\ 030 \times 10^{-6}$ 。钢梁底板最大应变截面与腹板最大应变截面相同,在同一截面内,钢梁底板和腹板压应变均达到 $2\ 500 \times 10^{-6}$,腹板最大应变略大于底板最大应变,有可能是因为腹板应变最大测点靠近腹板,存在应力集中。

2.4 桥面板裂缝特征

UHPC 表面的裂缝特征与普通混凝土表面的裂缝特征不同,UHPC 表面的裂缝更倾向于密集而细小,且裂缝间距不大;普通混凝土表面的裂缝宽度较大且裂缝间距也较大。加载点附近 UHPC 表面裂缝趋势明显:靠近钢梁腹板裂缝间距小,往混凝土侧板边缘方向裂缝的间距逐渐增大;远离加载点则为均匀分布。UHPC 荷载-典型裂缝宽度曲线和顶面的裂缝分布分别如图 12、13 所示。

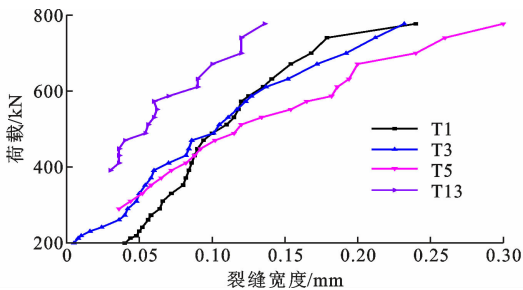


图 12 荷载-典型裂缝宽度曲线

Fig. 12 Load-typical crack width curves

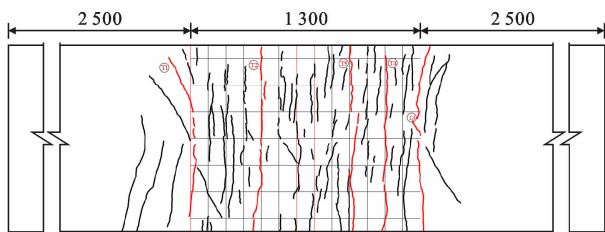


图 13 桥面板裂缝分布(单位:mm)

Fig. 13 Distribution of cracks in bridge deck slabs (unit:mm)

3 UHPC 抗裂性能分析

3.1 UHPC 名义应力分析

负弯矩区桥面板在进行抗裂性能设计时,桥面板主要遵循以下 3 个原则:严禁出现拉应力;严禁出现裂缝;限制裂缝宽度^[9]。如果要严禁桥面板出现裂缝,则需控制 UHPC 层在负弯矩作用下的最大拉应力要小于 UHPC 的名义应力。本文采用组合梁的截面换算法计算钢-UHPC 连续组合梁的名义应力,首先由试验得到的临界开裂荷载 F_{cr} 计算得到开裂弯矩 M_{cr} ,再由开裂弯矩 M_{cr} 通过截面换算法得到 UHPC 顶面的名义应力 σ_{cr} 。UHPC 表面的名义应力计算式如式(1)所示,计算结果如表 6 所示。

$$\sigma_{cr} = \frac{M_{cr}}{I_0} y \quad (1)$$

式中: I_0 为换算截面惯性矩; y 为 UHPC 表面到中心轴的距离。

表 6 试验梁名义应力

Table 6 Critical nominal stress of test beams

试验梁编号	开裂荷载 F_{cr}/kN	名义应力 σ_{cr}/MPa
SU-1	248	5.4
SU-2	393	8.6
SU-3	511	11.2

注:名义应力为桥面板顶面 UHPC 的名义应力。

钢-UHPC 组合梁在负弯矩作用下计算得到的名义应力高于普通混凝土抗拉设计强度,说明 UHPC 能提高负弯矩区的开裂荷载,具有抑制混凝土裂缝发展的能力,可以有效解决钢-混组合梁负弯矩区的开裂问题。

3.2 UHPC 裂缝宽度计算公式

目前主要有 5 种裂缝宽度计算理论与方法:黏结-滑移理论、无滑移理论、黏结-滑移理论与无滑移理论相结合的综合分析理论、数理统计法以及近年来随着计算软件的更新迭代、计算能力提升而兴起的有限元分析方法。裂缝宽度计算理论主要的特点及参数如表 7 所示。

目前国内外主要的裂缝宽度计算公式计算模式均与中国的混凝土结构设计规范或法国超高性能纤维增强混凝土规范相似。

3.2.1 混凝土结构设计规范

中国规范^[18]采用的是以力学模型为基础、试验数据加以修正的半理论半经验公式,用平均裂缝宽度乘以扩大系数得到最大裂缝宽度。该计算公式考虑了钢筋应力、保护层厚度等因素的影响,同时考虑长期效应的影响,最大裂缝宽度 w_{max} 计算公式为

表7 裂缝宽度计算理论

Table 7 Theory of crack width calculation

计算理论	裂缝宽度表达式	特点
黏结-滑移理论	$w_m = l_{cr}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$	裂缝宽度与裂缝间距及其范围内应变差成正比
无滑移理论	$w_m = kc \frac{\sigma_{ss}}{E_s}$	裂缝宽度与净保护层厚度和平均应变成正比
综合理论	$l_{cr} = k_1 c + k_2 \frac{d_s}{\rho_{eff}}$ $w_m = l_{cr}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$	裂缝间距同时考虑保护层厚度和黏结滑移的影响
数理统计方法		选取若干主导因素建立裂缝宽度统计公式
有限元分析方法		有限元软件能直观地模拟其变形、内力分布及应变特征

注: w_m 为平均裂缝宽度; l_{cr} 为平均裂缝间距; ϵ_{sm} 为钢筋平均应变; ϵ_{cm} 为混凝土平均应变; c 为保护层厚度; k 为扩大系数; σ_{ss} 为钢筋的应力; E_s 为钢筋的弹性模量; d_s 为钢筋直径; ρ_{eff} 为截面有效配筋率; k_1 、 k_2 为特定参数。

$$w_{max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_s}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (2)$$

$$\Psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (3)$$

式中: σ_s 为钢筋的应力; c_s 为保护层厚度; d_{eq} 为钢筋直径; α_{cr} 为构件受力特征系数; Ψ 为裂缝间受拉区纵向钢筋应变不均匀系数; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值; ρ_{te} 为配筋率。

3.2.2 法国超高性能纤维增强混凝土规范

法国规范^[15]考虑了受拉纵筋应力、受拉钢筋黏结性能、保护层厚度、UHPC 抗拉强度的影响,最大裂缝宽度 w_s 计算公式为

$$w_s = s_{r,max,f} (\epsilon_{sm,f} - \epsilon_{cm,f}) \quad (4)$$

式中: $s_{r,max,f}$ 为最大裂缝间距; $\epsilon_{sm,f}$ 为钢筋平均应变; $\epsilon_{cm,f}$ 为 UHPC 平均应变。

相邻裂缝之间, UHPC 与钢筋的应变差值为

$$\epsilon_{sm,f} - \epsilon_{cm,f} = \frac{\delta_s}{E_s} - \frac{f_{ctfm}}{K_{global} E_{cm}} - \frac{k_t (f_{ctfm,el} - f_{ctfm}/K) (1/\rho_{eff} + E_s/E_{cm})}{E_s} \quad (5)$$

式中: E_{cm} 为 UHPC 弹性模量; f_{ctfm} 为 UHPC 开裂后极限抗拉强度; $f_{ctfm,el}$ 为 UHPC 弹性极限抗拉强度; K 为纤维取向系数; K_{global} 为钢纤维取向系数,取 $K_{global} = 1.25$; k_t 为荷载特征系数,取 $k_t = 0.6$ 。

最大裂缝间距 $s_{r,max,f}$ 计算公式为

$$s_{r,max,f} = 2.55(l_0 + l_t) \quad (6)$$

$$l_0 = 1.33c/\delta \quad (7)$$

$$l_t = 2 \left[0.3k_2 \left(1 - \frac{f_{ctfm}}{K_{global} f_{ctfm,el}} \right) \frac{1}{\delta \eta} \right] \frac{\phi}{\rho_{eff}} \geq \frac{L_f}{2} \quad (8)$$

$$\delta = 1 + 0.4 \frac{f_{ctfm}}{K_{global} f_{ctfm,el}} \leq 1.5 \quad (9)$$

式中: l_0 为保护层厚度影响系数; l_t 为应力传递长度; δ 为黏结增强系数; k_2 为裂缝处应变分布的系数; ϕ 为钢筋直径; η 为黏结系数; L_f 为钢纤维长度。

计算受拉钢筋处最大裂缝宽度时需要根据受拉钢筋位置进行换算,换算公式为

$$w_t = w_s (h - x_0 - x) / (d - x_0 - x) \quad (10)$$

式中: w_t 为截面换算后得到的最大裂缝宽度; w_s 为受拉钢筋重心 UHPC 表面的最大裂缝宽度; h 为截面高度; d 为有效截面高度; x_0 为受压区高度; x 为 UHPC 受拉未开裂高度。

3.2.3 推导公式与规范计算值对比

分别采用混凝土结构设计规范、法国 UHPC 规范计算 UHPC 表面的最大裂缝宽度,计算结果与试验观测值对比如图 14 所示。由图 14 可知:当荷载较小时,混凝土结构设计规范、法国 UHPC 规范计算的结果均小于试验值,但与试验值都比较接近,趋势也相同;随着荷载的增加,中国规范的计算值超过了试验值且差值逐渐增大;法国规范推荐公式与试验值的趋势更为接近且差值更小。

虽然法国规范计算结果与试验结果较为接近,但其计算复杂繁琐,欲简化裂缝宽度计算公式并使其适用于钢-UHPC 组合梁。结合抗裂性能试验,基于综合分析理论,简化的裂缝间距、不均匀系数计算公式采用《混凝土结构设计规范》相同的形式,对裂缝间距、不均匀系数等公式进行参数修正,不均匀系数计算公式考虑钢纤维的影响,公式中加入钢纤维取向系数 K_{global} ,使公式计算值更精确。推导的最大裂缝宽度 w_{max} 计算公式为

$$w_{max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_{ss}}{E_s} (1.7c + 0.06 \frac{d}{\rho_{te}}) \quad (11)$$

$$\Psi = 1 - \frac{0.2f_{tk}/K_{global}}{\rho_{te} \sigma_{ss}} \quad (12)$$

采用上述推导的裂缝宽度公式计算所得结果与规范计算值和试验值对比可知,推导的裂缝宽度公式更符合试验结果。荷载较小时,计算结果较其他规范更贴近于试验值;荷载逐渐增大时,推导公式计算值与试验值差值更小,采用此公式计算裂缝宽度是经济合理的,且推导公式计算结果略大于试验值,说明具有一定的安全储备。推导公式计算所得结果与规范计算值和试验值对比如图 14 所示。

3.2.4 文献数据验证

通过上述公式计算试验梁 UHPC 表面裂缝宽度,并与试验实测值及文献[9]、[13]、[19]中构件裂

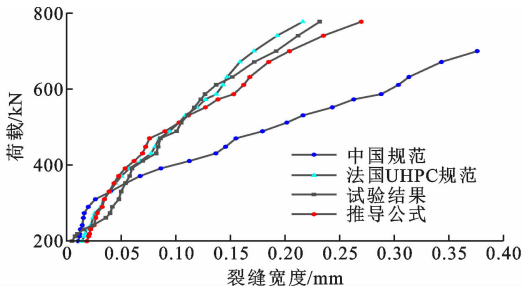


图 14 推导公式计算结果对比

Fig. 14 Comparison of calculation results of derivation formulas

表 8 裂缝宽度计算结果

Table 8 Crack width calculation results

试件编号	开裂荷载/ kN	裂缝宽度 实测值 w_1 /mm	裂缝宽度计算值/mm			w_2/w_1	w_3/w_1	w_4/w_1	
			中国规范(w_2)	法国规范(w_3)	推导公式(w_4)				
SU-1	248.0	0.05	0.118	0.065	0.060	2.36	1.30	1.20	
SU-2	393.0	0.05	0.102	0.061	0.057	2.04	1.22	1.14	
SU-3	511.0	0.05	0.100	0.052	0.055	2.00	1.04	1.10	
文献[9]	SCB-1	9.0	0.05	0.099	0.039	0.046	1.99	0.78	0.91
	SCB-2	16.6	0.05	0.116	0.044	0.054	2.31	0.89	1.09
	SCB-3	32.1	0.05	0.156	0.057	0.076	3.13	1.15	1.51
文献[13]	SCCG	300.0	0.05	0.089	0.043	0.043	1.79	0.87	0.85
	SUCG	849.0	0.05	0.105	0.049	0.051	2.10	0.98	1.01
文献[19]	S200-45-25-4	19.0	0.05	0.105	0.046	0.049	2.09	0.92	0.99
	S150-60-15-6	51.2	0.05	0.111	0.064	0.056	2.22	1.28	1.11
	S150-60-25-6	35.6	0.05	0.101	0.044	0.048	2.03	0.88	0.96

此,从经济性出发,在保证钢-混凝土组合梁负弯矩区抗裂性能的前提下,如何确定其纵向铺设长度和厚度成为关键。

4.1 UHPC 纵向铺设长度

以 3×30 m 钢-混凝土组合连续梁为例,采用软件 MIDAS Civil 建立杆系模型,重点针对组合梁负弯矩区进行受力分析。连续组合梁中支点附近关键截面如图 15 所示,汇总关键截面的弯矩及名义应力如表 9 所示。根据内力结果,按照混凝土结构设计规范中的裂缝宽度计算公式来计算桥面板的裂缝宽度大于限值的区域,拟铺设 UHPC。

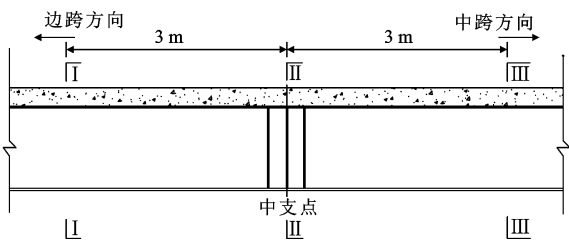


图 15 关键截面示意图

Fig. 15 Schematic diagram of key sections

缝宽度计算值进行对比,结果汇总于表 8。可以看出中国规范的计算结果偏大,总体上是实测值的 2 倍左右;法国规范和本文推导公式的计算结果与实测值之比非常接近 1,但后者计算更为方便。

4 负弯矩区 UHPC 铺设方案

UHPC 能有效解决钢-混凝土组合梁负弯矩区的开裂问题,但是目前 UHPC 材料造价较高、施工费用较大。如果钢-UHPC 组合梁负弯矩区桥面板全部采用 UHPC 材料,成本偏高,影响经济性。因

表 9 关键截面设计值计算结果

Table 9 Calculation results of design values of key sections

截面	正常使用极限状态		承载能力极限状态	
	名义应力/ MPa	截面弯矩/ (kN·m)	名义应力/ MPa	截面弯矩/ (kN·m)
I	4.8	3 464.6	7.3	5 029.6
II	7.0	5 781.5	10.8	8 485.5
III	5.5	3 981.5	8.4	5 821.3

注:名义应力为桥面板顶面 UHPC 的名义应力。

由计算结果可知,在负弯矩区 $6 \sim 7.5$ m 范围内桥面板裂缝宽度大于限值 0.15 mm,所以 UHPC 的建议纵向铺设长度为 $6 \sim 7.5$ m,即 $0.2L \sim 0.25L$ (L 为跨径);铺设时以中支点为对称铺设。两跨连续组合梁负弯矩区桥面板裂缝宽度、限值及实桥的纵向铺设长度示意图如图 16 所示。

4.2 UHPC 铺设厚度

诸多研究发现,UHPC 层的不同厚度对组合梁负弯矩区裂缝控制能力有影响,较厚的 UHPC 层对组合梁负弯矩区的裂缝控制较为有利,提高了组合梁的刚度,减少了负弯矩区的转动,从而有利于控制

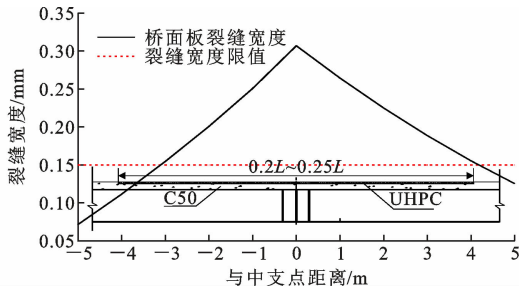


图 16 UHPC 纵向铺设长度示意图

Fig. 16 Schematic diagram of UHPC longitudinal laying lengths

负弯矩区混凝土裂缝宽度,但随着 UHPC 厚度的增加,提高效果趋缓;其次,焊接剪力连接件时,栓钉剪力连接件的圆柱头应延伸至 UHPC 层中,这样剪力连接件可以将钢梁、NC 层和 UHPC 层三者紧密连接,发挥可靠的组合作用;最后,UHPC 层中的纵筋保护层厚度不能太小,这样 UHPC 层能完全包裹上层纵筋,钢筋才能和 UHPC 层形成整体,从而协同受力;综合考虑钢筋保护层厚度、UHPC 层与 NC 的连接要求和剪力连接件键帽的埋置厚度等,建议

表 10 各试验梁名义应力对比

Table 10 Comparison of nominal stresses in each test beam

名义应力	SU-1		SU-2		SU-3	
	正常使用 极限状态	承载能力 极限状态	正常使用 极限状态	承载能力 极限状态	正常使用 极限状态	承载能力 极限状态
试验值 σ_1 /MPa	5.4	14.1	8.6	16.0	11.2	17.9
设计值 σ_2 /MPa	7.0	10.8	7.0	10.8	7.0	10.8
σ_1/σ_2	0.77	1.31	1.23	1.48	1.60	1.72

表 11 SU-3 试验梁各截面名义应力对比

Table 11 Comparison of nominal stresses in each section of SU-3 test beam

名义应力	截面 I		截面 II		截面 III	
	正常使用 极限状态	承载能力 极限状态	正常使用 极限状态	承载能力 极限状态	正常使用 极限状态	承载能力 极限状态
试验值 σ_1 /MPa	11.2	17.9	11.2	17.9	11.2	17.9
设计值 σ_2 /MPa	4.8	7.3	7.0	10.8	5.5	8.4
σ_1/σ_2	2.3	2.5	1.6	1.7	2.0	2.2

综上所述,工程实际负弯矩区采用此铺设方案时,其抗裂性能以及抗弯承载力均满足工程要求。

5 结语

(1)提出了钢-混凝土组合梁负弯矩区 UHPC 铺设方案:铺设长度宜为 $0.2L \sim 0.25L$,铺设厚度宜为 $60 \sim 70$ mm。这样钢-UHPC 组合梁负弯矩作用下的名义应力均大于设计值,抗裂性能良好,可有效解决钢-混凝土连续组合梁负弯矩区的开裂问题。

(2)推导了适用于组合梁的裂缝宽度计算公式。

UHPC 铺设厚度宜为 $60 \sim 70$ mm,能满足裂缝控制要求且经济合理。

4.3 方案验算

各试验梁试验名义应力值与工程设计值对比如表 10 所示。表 10 中工程实际的正常使用极限状态、承载能力极限状态分别对应试验的开裂荷载状态、极限荷载状态。其中 SU-2、SU-3 试验梁满足正常使用极限状态和承载能力极限状态,且具有一定的安全储备。SU-1 梁正常使用极限状态试验值略低于设计值,原因在于正常使用极限状态对应的裂缝宽度为 0.05 mm,而不是工程限值 0.15 mm;SU-1 梁配筋率小于工程实际,若按配筋率接近、大于工程实际的 SU-2、SU-3 试验梁配筋,结构能满足使用要求。

以 SU-3 试验梁为例,关键截面试验名义应力值与工程设计值对比如表 11 所示。表 11 中关键截面试验值均大于设计值,其中最危险截面(截面 II)的抗裂安全系数达到 1.6 ,其余两个截面(截面 I、截面 III)的抗裂安全系数达到 2.0 及以上。

对比公式计算结果与试验值、国内外规范计算值及文献计算值可知,推导公式计算值更符合试验结果,采用此公式计算裂缝宽度经济合理且具有一定的安全储备。

(3)由于客观条件的限制,目前仅对 3 根钢-UHPC 组合梁进行了抗裂性能研究及初步探索,考虑到裂缝宽度计算公式变化参数及影响因素较多,组合梁负弯矩区桥面板的裂缝宽度计算公式尚需进一步的研究探索。

参考文献:

References:

- [1] 樊健生, 聂建国, 张彦玲. 钢-混凝土组合梁抗裂性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 1-7.
FAN Jiansheng, NIE Jianguo, ZHANG Yanling. Experimental study of crack resistance of steel-concrete composite beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 1-7.
- [2] 陈世鸣, 孙森泉, 张志彬. 体外预应力钢-混凝土组合梁负弯矩区的承载力研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 14-20, 88.
CHEN Shiming, SUN Senquan, ZHANG Zhibin. Load carrying capacity of steel-concrete composite beams with external tendons under negative bending[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 14-20, 88.
- [3] 余志武, 郭风琪. 部分预应力钢-混凝土连续组合梁负弯矩区裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 55-59.
YU Zhiwu, GUO Fengqi. Experimental study of crack width in negative bending region of partially prestressed continuous steel concrete composite beams[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(4): 55-59.
- [4] 周安, 戴航, 刘其伟. 体内预应力钢纤维混凝土-钢组合梁负弯矩区抗裂及裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 82-90.
ZHOU An, DAI Hang, LIU Qiwei. Experimental study of crack-resistance and crack width in negative bending zone of interior prestressed SFRC-steel composite beams[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 82-90.
- [5] 聂建国, 陶慕轩, 聂鑫, 等. 抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 7-14, 58.
NIE Jianguo, TAO Muxuan, NIE Xin, et al. New technique and application of uplift-restricted and slip-permitted connection[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 7-14, 58.
- [6] 戴昌源, 苏庆田. 钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 806-813.
DAI Changyuan, SU Qingtian. Crack width calculation of steel-concrete composite bridge deck in negative moment region[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(6): 806-813.
- [7] 万世成, 黄侨, 关健, 等. 预应力碳纤维板加固钢-混凝土组合连续梁负弯矩区试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1114-1123.
WAN Shicheng, HUANG Qiao, GUAN Jian, et al. Strengthening of continuous steel-concrete composite beams in negative moment region using prestressed carbon fiber-reinforced polymer plates[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1114-1123.
- [8] 樊健生, 刘入瑞, 张君, 等. 采用混杂纤维ECC的叠合板组合梁负弯矩受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 57-67.
FAN Jiansheng, LIU Rurui, ZHANG Jun, et al. Experimental research on mechanical behavior of composite beams with precast slabs and hybrid fiber ECC under negative moment[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(4): 57-67.
- [9] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 110-121.
LIU Xinhua, ZHOU Cong, ZHANG Jianren, et al. Experiment on negative bending behavior of steel-UHPC composite beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 110-121.
- [10] 朱劲松, 王修策, 丁婧楠. 钢-UHPC华夫板组合梁负弯矩区抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 234-245.
ZHU Jinsong, WANG Xiuce, DING Jingnan. Experimental study on the flexural behavior of steel-UHPC composite beams with waffle slab in negative moment regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 234-245.
- [11] 马冰. 钢-UHPC组合梁负弯矩区受力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
MA Bing. Research on mechanical performance of steel-UHPC composite beams in negative bending moment area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [12] 邵旭东, 孔小璇, 邱明红, 等. 先简支后连续混凝土梁负弯矩区UHPC“T形”湿接缝试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 1-13.
SHAO Xudong, KONG Xiaoxuan, QIU Minghong, et al. Experimental study on UHPC “T-shaped” wet joints in the negative moment zone of continuous concrete beams after simple support[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(3): 1-13.
- [13] 王皓磊, 孙韬, 刘晓阳, 等. 钢-UHPC连续组合梁抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 218-233.
WANG Haolei, SUN Tao, LIU Xiaoyang, et al. Ex-

- perimental investigation on flexural capacity of steel-UHPC continuous composite girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 218-233.
- [14] MATTE V, MORANVILLE M. Durability of reactive powder composites; influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): 1-9.
- [15] AFGC, SETRA. Ultra high performance fibre reinforced concretes recommendations[M]. Paris: AFGC & SETRA Working Group, 2013.
- [16] RAFIEE A. Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete[M]. Kassel: Kassel University, 2012.
- [17] 陈德宝,曾明根,苏庆田,等. 钢-UHPC组合桥面板湿接缝界面处理方式[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 154-162.
- CHEN Debao, ZENG Minggen, SU Qingtian, et al. Interfacial treatment measures of wet joints in composite bridge deck composed of steel and UHPC layer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 154-162.
- [18] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [19] 邵旭东,罗 军,曹君辉,等. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 61-75.
- SHAO Xudong, LUO Jun, CAO Junhui, et al. Experimental study and crack width calculation of steel-UHPC lightweight composite deck structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 61-75.