

组合梁负弯矩区 UHPC 接缝有限元分析研究

胡伟业^{1,2} 周捷¹ 李磊¹

(1. 浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030; 2. 湖南大学土木工程学院 长沙 410082)

[摘要] 针对连续组合梁桥负弯矩区桥面板易开裂的问题, 提出了新型钢-混组合梁负弯矩区 UHPC (Ultra-High Performance Concrete) 接缝方案。使用 Abaqus 有限元软件对试验梁的加载过程进行模拟, 并验证了有限元建模方法的正确性, 分析了 UHPC 层内配筋率、UHPC 龄期及钢梁下翼缘钢板厚度对结构抗弯性能的影响。研究表明, 新型钢-混组合梁负弯矩区 UHPC 接缝结构具有技术先进性, 配筋率的增大可提高组合梁 UHPC 接缝结构的抗弯能力, UHPC 龄期的变化主要影响抗裂性能, 而钢梁下翼缘厚度的改变对抗弯承载力的提高作用较为明显; 为充分发挥钢筋的受拉作用, 提高结构的极限承载力, 须采取一定措施防止钢梁提前屈曲。

[关键词] 组合梁; 超高性能混凝土; 负弯矩区接缝; 抗弯性能; 有限元分析

0 引言

组合梁桥能充分利用钢材与混凝土各自材料特性^[1], 利于装配化建造, 近年来逐渐受到关注, 并得到推广应用。但由于普通混凝土 (Normal Concrete, NC) 抗拉强度低, 墩顶负弯矩区 NC 桥面板在收缩徐变、汽车等荷载作用下开裂风险高^[2], 成为连续组合梁桥中最薄弱的部位, 是限制组合梁桥推广运用的关键技术难题。

采用高性能材料是解决该难题的有效途径。超高性能混凝土 (Ultra High Performance Concrete, UHPC), 是一种基于最大密实度理论配制的新型混凝土^[3], 具有优异的力学性能和耐久性能, 在桥梁工程中应用前景广阔^[4]。若将 UHPC 材料应用于负弯矩区横向湿接缝, 可以充分发挥材料优异的性能, 减小现场作业量、提高结构耐久性、减轻后期管养难度^[5]。目前, 国内外学者对于 UHPC 材料应用于现浇湿接缝中的研究多集中在预制桥面板及混凝土梁^[6-9], 对钢-NC 组合梁 UHPC 现浇湿接缝的研究鲜见报道, 负弯矩区 UHPC 湿接缝在组合连续梁桥实际工程中亦未有应用。

本文组合梁负弯矩区 UHPC 湿接缝抗弯性能进行研究。采用 Abaqus 进行有限元分析, 通过与试验梁进行对比, 验证建模方法的适用性, 并进一步分析不同参数对 UHPC 接缝结构抗弯性能的影响规律。

1 试验概况

1.1 方案设计

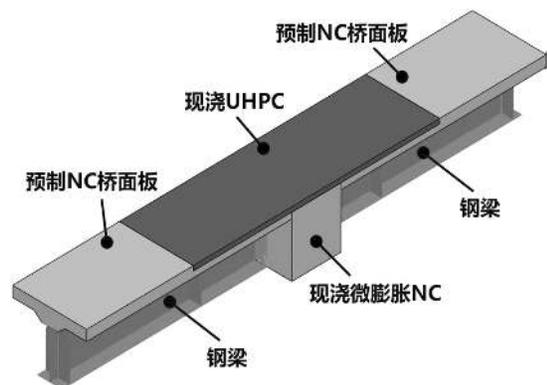


图1 试验模型三维图

本文设计的钢-混组合梁 UHPC 接缝试验模型三维图如图 1 所示, 模型全长 5.6m, 计算跨径 5.4m, 横向宽度 0.9m, 现浇接缝上部 UHPC 层纵向长度 3m, 厚度为 5.5cm。UHPC 掺入体

收稿日期: 2020-12-19

作者简介: 胡伟业 (1995-), 男, 助理工程师, 从事桥梁工程设计与研究。

积掺量为 2.5% 的直线型钢纤维，直径 0.12mm、长度 8mm，并掺入早强剂与膨胀剂以提高早期强度、减小收缩，层内配筋率为 5.6%。下部现浇微膨胀 C50 混凝土层纵向长度为 0.6m，高度为 71.5cm。预制桥面板为 C50 混凝土，厚 12.5cm，在工字钢梁处增厚至 20cm；下部钢梁采用 Q345 钢材，预制部分梁高 78.2cm，接缝部分加高至 78.8cm。预制部分桥面板布置双层

纵筋，上层布置 18 根 $\Phi 16$ 钢筋，下层布置 14 根 $\Phi 14$ 钢筋，4 根 $\Phi 16$ 钢筋。接缝上部 UHPC 层布置 18 根 $\Phi 14$ 钢筋；下部微膨胀 NC 层布置 14 根 $\Phi 14$ 钢筋，4 根 $\Phi 16$ 钢筋。纵筋等级均为 HRB400，横向间距为 5cm。现浇微膨胀 NC 内钢梁下翼缘栓钉采用 19mm \times 120mm，试验梁其余栓钉均采用 13mm \times 100mm。试验模型构造见图 2。

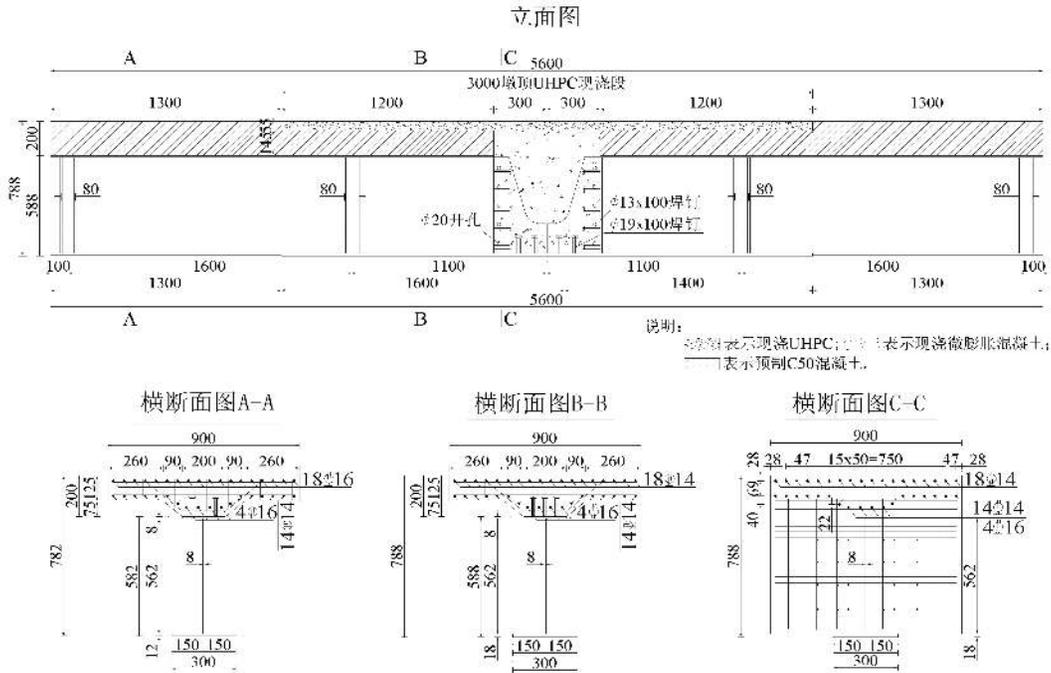


图 2 试验模型构造图 (单位: mm)

预制部分桥面板浇筑完成并自然养护 28 天后对界面进行凿毛处理，再依次浇筑接缝下层微膨胀 NC 及上层 UHPC，接缝自然养护 2 个月后进行模型试验。

1.2 技术先进性

从国内外研究来看，组合梁负弯矩区 UHPC 湿接缝技术较新颖，材料指标较好，可解决组合梁负弯矩区混凝土开裂问题。UHPC 理论研究基本成熟，国外应用较多，国内基本具备工程可行性。

以文献 [10] 介绍的 G5513 长益高速扩容工程望城大道 4 \times 30m 组合梁桥为例，对 UHPC 湿接缝方案与常规的纤维微膨胀 NC 湿接缝方案 (简称“常规方案”) 进行对比分析。) 安全

性：UHPC 湿接缝方案由于 UHPC 耐久性较好，裂缝宽度 0.05mm 时无渗漏风险^[2]，基本无后期维护成本；常规方案由于微膨胀纤维 NC 耐久性较差，后期需维护。) 施工性：UHPC 层内钢筋仅需绑扎，接缝焊接量较少，单个墩顶焊接量总计 148m，且 UHPC 早期强度高，可实现快速化施工；常规方案纵向钢筋均需单面焊接，单个墩顶焊接量总计 233m，现场施工复杂，施工速度较慢。

综上，UHPC 湿接缝方案与常规方案，耐久性好，同时现场焊接量减少 36.5%，可实现快速化施工。

1.3 加载方案

试验梁采用 MTS 进行四点负弯矩加载，预

加载完成后，采用力控模式以 25kN 为一级进行正式加载，开裂后采用位移控制加载。试件纯弯段长度定为 2.2m，试验梁和分配梁的支承方式均为简支，现场照片如图 3 所示。

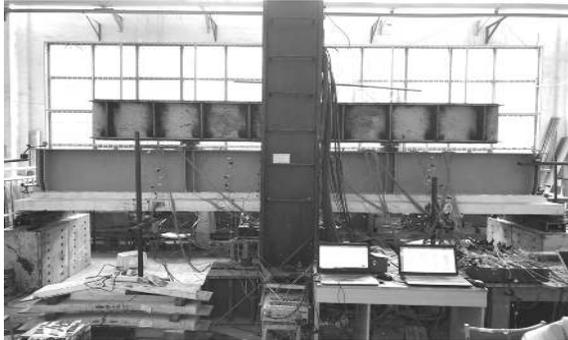


图 3 现场加载照片

1.4 材料力学性能

浇筑试件时按规范^[11, 12]浇筑一批试块用于材性试验。需要说明的是，为了解接缝 UHPC 材料自然养护下力学性能变化规律，UHPC 各项材性试验按 3 天、7 天、14 天、28 天分别准备 4 组试块；加载前对 NC 试块进行材性试验。混凝土的实测材料性能如表 1 所示。钢筋拉伸试验测得纵向受拉主筋屈服强度为 462MPa，极限抗拉强度 583MPa，弹性模量 198.6GPa。

表 1 混凝土基本力学性能

类别	立方体抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/GPa
NC	53.7	6.6	34.8
微膨胀 NC	52.9	6.5	34.6
UHPC	3 天	89.7	26.7 (7.8)
	7 天	100.6	28.9 (8.7)
	14 天	121.9	31.7 (9.1)
	28 天	152.5	34.0 (9.7)

注：UHPC 抗折强度括号内表示根据文献 [13] 二次倒推得到的的抗拉强度。

2 有限元模型验证

为了对模型试验加载全过程进行模拟，建立了 Abaqus 有限元模型，并将有限元模拟结果与试验现象及实测值对比，以验证建模方法的正确性。

2.1 材料参数设置

UHPC 分别采用文献 [13] 和 [14] 推荐的拉压本构关系；NC 采用混凝土结构设计规范^[15]规定的拉压本构关系；普通钢筋和钢结构的本构关系采用理想弹塑性模型。各材料的本构关系见图 4，其中 UHPC 材料参数取 28 天材性试验结果。图中 f_{ct} 表示 UHPC 抗拉强度，试验梁取 9.7MPa； ϵ_{t0} 为弹性阶段峰值应变； E_c 为 UHPC 的弹性模量，试验梁取 46.4GPa； ϵ_{tu} 为极限应变，取 7000 $\mu\epsilon$ ； f_c 为 UHPC 抗压强度值，试验梁取 152.5MPa； ϵ_0 为峰值点应变值，取 3500 $\mu\epsilon$ ； f'_c 为 NC 抗压强度值， f_t 为 NC 抗拉强度值，根据规范^[15]， f'_c 取 32.4MPa， f_t 取 2.64MPa；根据材性试验结果，钢筋弹性模量 E_s 取 198.6GPa，屈服强度 f_y 取 462MPa；钢结构弹性模量及屈服强度取值参考文献 [16]， E_s 取 206GPa， f_y 取 374.2MPa。

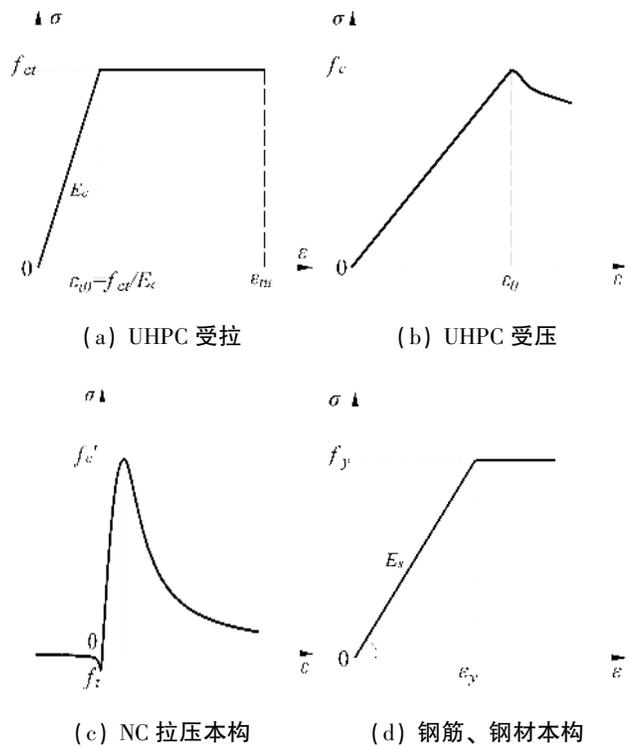


图 4 各材料本构关系曲线

混凝土是一种异质性材料，受力时表现出非线性。Abaqus 中，通常采用混凝土塑性损伤 (Concrete Damaged Plasticity, 简称 CDP) 来模拟混凝土的本构关系，UHPC 与 NC 的参数选取

如表 2 所示。

表 2 损伤塑性模型塑性破坏准则参数

种类	膨胀角	偏心率	强度比	K_c	粘性系数
UHPC	15°	0.1	1.16	2/3	0
NC	30°	0.1	1.16	2/3	0.001

2.2 建立有限元模型

UHPC、NC 及栓钉采用八节点缩减积分实体单元 (C3D8R) 模拟; 钢结构采用四节点壳单元 (S4R) 模拟; 钢筋采用三维两节点线性杆单元 (T3D2) 模拟。钢筋与栓钉嵌入 (Embedded) 混凝土中, 由于试验测得混凝土与钢梁间无明显滑移, 故钢梁上翼缘与预制混凝土板之间可采用绑定 (Tie) 约束, Abaqus 模型中钢支座采用只定义弹性段的钢垫块模拟。采用线约束来模拟试件的简支边界条件, 通过与加载垫块耦合 (Coupling) 的参考点对试验梁进行位移加载。组合梁负弯矩区 UHPC 接缝试验梁的有限元模型如图 5 所示。

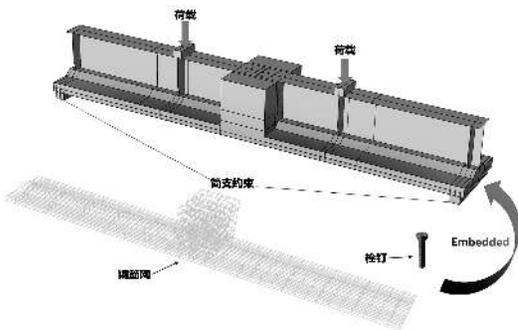


图 5 试验梁有限元模型

2.3 结果对比

(1) 荷载-位移曲线

图 6 给出了试件的试验实测和 Abaqus 计算得到的荷载-跨中挠度曲线。

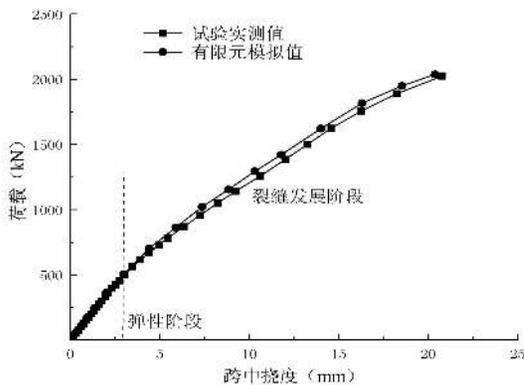


图 6 试验梁荷载-位移曲线

(2) 破坏模式

试验梁有限元模型极限状态的 PEEQ (等效塑性应变) 云图如图 7 所示。钢材是否屈服可采用 PEEQ 进行判断。由图 7 可知, 极限状态下, 非接缝区的钢梁下翼缘及腹板屈服, 且产生一定的变形, 与图 8 所示的试验梁破坏时非接缝区的钢梁下翼缘发生明显屈曲, 腹板向一侧鼓曲的现象相同。

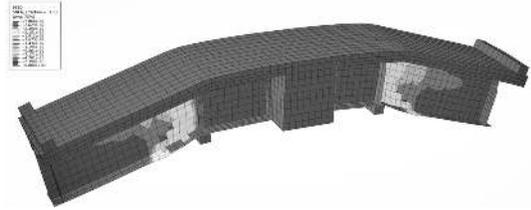


图 7 极限状态下等效塑性应变云图



图 8 试验梁破坏

上述对比分析表明本文的 Abaqus 有限元建模方法可以较好地模拟试验梁的加载过程, 可用于参数分析。

3 参数分析

本节以试验梁为参照, 利用 Abaqus 有限元软件, 进一步研究 UHPC 层内钢筋直径 (配筋率)、UHPC 龄期和下部翼缘钢板厚度对组合梁 UHPC 接缝结构抗弯性能的影响规律。

3.1 钢筋直径 (配筋率)

为分析 UHPC 层内不同钢筋直径 (配筋率) 对组合梁 UHPC 接缝结构抗弯性能的影响, 分别建立了纵向受拉钢筋直径为 10mm、18mm 和 22mm 的 3 个组合梁 UHPC 接缝结构 Abaqus 有限元模型, 各模型除钢筋直径外, 其余构造细节均同试验梁, 不同配筋率模型对应的荷载-跨

中挠度曲线如图9所示。

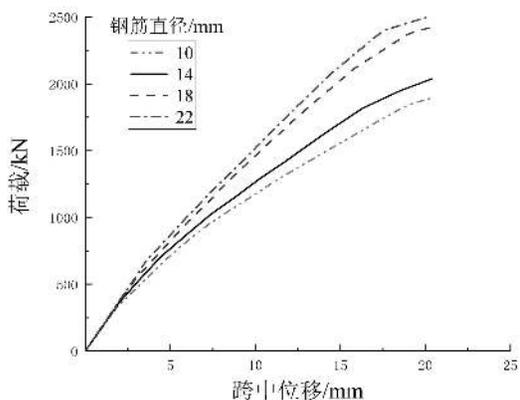


图9 不同钢筋直径的组合梁UHPC接缝结构荷载-位移曲线

由图9可知：UHPC层内配筋率的增大可以显著提高组合梁UHPC接缝结构的抗裂性能与抗弯承载能力，钢筋直径为22mm的模型与钢筋直径为10mm的模型相比，开裂荷载由319.8kN增大到668.4kN，提高了109%，极限荷载由1889.9kN增大到2505.4kN，增长了33%。由开裂后的曲线斜率对比可以发现，配筋率越高，结构的裂后刚度越大。

3.2 UHPC龄期

接缝UHPC早期强度高，由表1可知，UHPC保湿养护3天即可达到C80，且抗拉强度达到28天的80%，若将其应用于实际工程中，可提高装配化施工效率，节约成本。为了解UHPC龄期对结构抗弯性能的影响，对UHPC龄期分别为3天、7天、14天、28天的模型进行对比分析，不同UHPC龄期模型对应的荷载-跨中挠度曲线如图10所示。

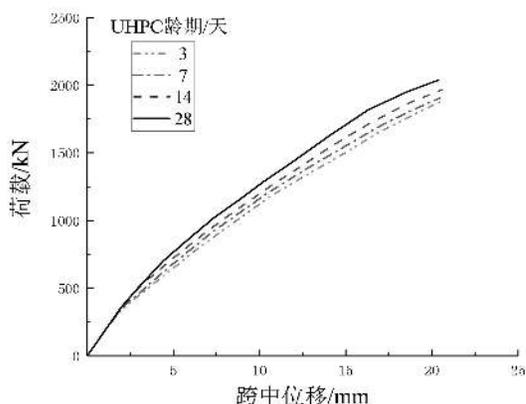


图10 不同UHPC龄期的组合梁UHPC接缝结构荷载-位移曲线

由图10可知：组合梁UHPC接缝结构的抗裂性能随UHPC龄期的增长而提高，UHPC龄期从3天增加到28天时，开裂荷载由318.2kN增大到466.4kN，提高了47%，这是由于UHPC抗拉强度的提高可有效延迟截面开裂；而极限荷载变化不大，仅提高7%，说明组合梁UHPC接缝结构的极限荷载不由UHPC强度控制。

3.3 下翼缘钢板厚度

不同下翼缘钢板厚度模型对应的荷载-跨中挠度曲线如图11所示，下翼缘钢板厚度讨论8mm、12mm、18mm、24mm四种情况，其他参数设定为钢筋直径为14mm，UHPC龄期为28天。

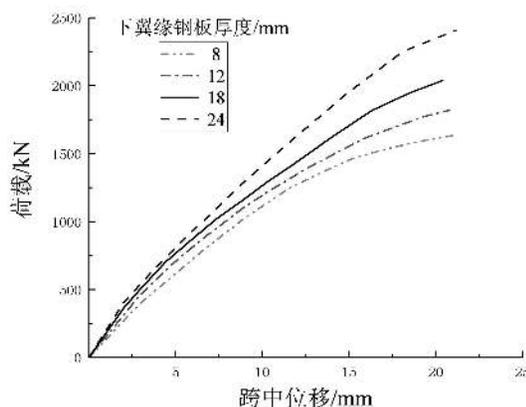


图11 不同下翼缘钢板厚度的组合梁UHPC接缝结构荷载-位移曲线

由图11可知：钢梁下翼缘厚度的增加提高了组合梁UHPC接缝结构的刚度和抗弯极限承载力。相同条件下，当钢梁下翼缘厚度从8mm增至24mm，对应的极限荷载由1638.7kN增大到2406.8kN，提高了47%，而开裂荷载基本不变。

3.4 设计建议

综上，UHPC层内钢筋直径（配筋率）、UHPC龄期及钢梁下翼缘厚度的增长均可提高组合梁UHPC接缝结构的受弯性能，实际工程中各项具体参数可结合经济性与施工要求综合确定。

此外，提取试验梁Abaqus模型UHPC-NC交界面截面（距中心线1.5m处）及刚度突变截面（距中心线0.3m处）最外层纵向钢筋应变，

如图 12 所示。可以看出, 极限状态下, 钢筋拉应变未达到 $2000\mu\epsilon$, 未屈服, 而此时试件钢梁下翼缘屈曲破坏。表明组合梁桥负弯矩区设计与施工时, 为充分发挥钢筋的受拉作用, 提高结构的极限承载力, 须采取如增强横向联系、减小加劲板间距或增大加劲板尺寸、避免钢梁出现初始缺陷等措施, 防止钢梁提前屈曲。

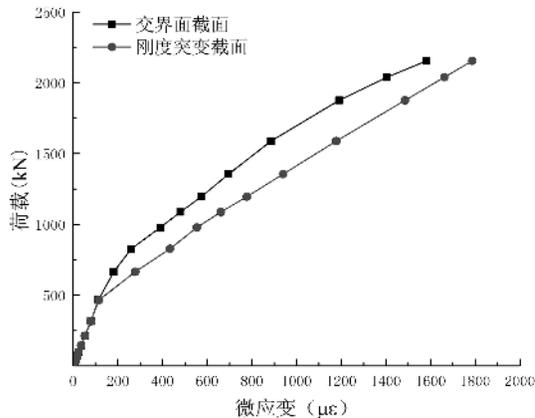


图 12 试验梁有限元模型荷载-最外层钢筋应变曲线

4 结论

本文提出了组合梁负弯矩区 UHPC 接缝方案, 并对其抗弯性能进行研究。通过建立 Abaqus 有限元模型与试验梁进行对比, 验证建模方法适用性之后, 展开有限元参数分析, 对影响 UHPC 接缝抗弯性能的不同因素进行研究, 得出以下结论:

(1) 本文提出的组合梁负弯矩区 UHPC 接缝结构具有技术先进性。

(2) 本文的 Abaqus 有限元建模方法可以较好地模拟试验梁的加载过程。UHPC 层内配筋率的增大可以显著提高组合梁 UHPC 接缝结构的抗裂性能与抗弯承载能力。钢梁下翼缘厚度的增加对于组合梁 UHPC 接缝结构的极限荷载提高较为明显, 但对开裂荷载影响有限。

(3) 接缝 UHPC 材料早期强度高, 可提高装配化施工效率, 节约成本, 随着 UHPC 龄期的增长, 组合梁 UHPC 接缝结构的抗裂性能不

断提高。

(4) 为充分发挥钢筋的受拉作用, 提高组合梁 UHPC 接缝结构的极限承载力, 设计与施工中须采取一定措施防止钢梁提前屈曲。

参考文献

- [1] 汪迎红. 钢混组合梁负弯矩区混凝土面板的应变收缩分析 [J]. 公路工程, 2015, 40 (04): 229-232.
- [2] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [3] RICHARD P, CHEYREZ M. Composition of Reactive Power Concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7): 1501-1511.
- [4] 黄政宇, 吴峥. 钢纤维对超高性能混凝土裂后性能的影响 [J]. 公路工程, 2018, 43 (02): 84-90.
- [5] 赵明, 何湘峰, 邱明红, 等. 全预制钢-UHPC 轻型组合梁在中小跨径桥梁中的设计与应用研究 [J]. 公路工程, 2019, 44 (05): 63-66.
- [6] 邵旭东, 陈斌, 周绪红. 钢-RPC 轻型组合桥面结构湿接头弯曲试验 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (03): 210-217.
- [7] 张阳, 陈贝. 预制 NC 板现浇 UHPC 接缝的抗弯性能有限元分析研究 [J]. 公路工程, 2018, 43 (06): 1-5+51.
- [8] Graybeal B. Ultra-High-Performance Concrete Connections for Precast Concrete Bridge Decks [J]. PCI Journal, 2014, 59 (4): 48-62.
- [9] Tazarv M., Bohn L., Wehbe N.. Rehabilitation of Longitudinal Joints in Double-Tee Girder Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24 (6): 04019044.
- [10] 郭一枝, 贺耀北, 焉学永, 等. 连续钢板组合梁力学性能研究 [J]. 世界桥梁, 2019, 47 (04): 58-63.
- [11] GB/T 31387-2015, 活性粉末混凝土 [S].
- [12] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- [13] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究 [D]. 湖南大学, 2016.
- [14] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究 [D]. 湖南大学, 2002.
- [15] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范 [S].
- [16] 黄政. UHPC 梁模型试验研究与优化设计 [D]. 湖南大学, 2018.