

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.04.013

采用 PF-UHPC 制备钢混组合梁桥面板 施工关键技术

杨元海¹, 王 斌^{*2}, 黄卿维³

(1. 中交路桥建设有限公司, 北京 100027; 2. 中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528403;
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350100)

摘要: 为探明不同技术指标对钢混组合梁 UHPC 桥面板性能的影响, 完善超高性能混凝土预混料 (PF-UHPC) 的制备技术工艺, 制造出性能稳定、满足施工要求的钢混组合梁 UHPC 桥面板, 通过试验对比分析了不同工艺技术指标对 PF-UHPC 工作性能及力学性能的影响。确定最佳工艺技术指标, 形成一套关于 PF-UHPC 预制和现浇钢混组合梁桥面板施工的关键技术。结果表明: PF-UHPC 基准配合比的强度、工作性能均满足要求, 且增加减水剂掺量 0.3% 能显著改善材料工作性能而不影响力学性能; 采用大搅拌机搅拌时长为 8 min 时, 混合料各项性能最佳; 材料凝结时间受室内外环境因素影响大; 钢纤维的投料先后对材料工作性能和力学性能影响较小, 但后加钢纤维的混合料其钢纤维均匀性偏差较大; 试件抗折强度受钢纤维取向影响, 而钢纤维取向主要取决于布料方向, 布料方向与 UHPC 流动方向的角度越大, 试验板的抗折强度越低; 振捣频率对 UHPC 抗折强度影响较大, 对抗压强度和钢纤维含量偏差影响较小, 80 Hz 振捣频率最有利; UHPC 湿养护后水化热温度基本在 40~50 °C, 内部初始温度随板厚增加升高, 蒸养过程中 UHPC 板中心升温较外部慢, 内外温差较大; 蒸养棚内恒温温度宜控制在 90 °C 以上, 且应当适当延长自然降温时间, 25 cm 厚板底部在 70 °C 以上恒温 30 h, 其强度满足设计要求。

关键词: 桥梁工程; 施工技术; 控制变量法; UHPC 桥面板; 工作性能及力学性能

中图分类号: U445

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 04-0120-12

Key Construction Technology for Steel-concrete Composite Beam Bridge Decking Prepared with PF-UHPC

YANG Yuan-hai¹, WANG Bin^{*2}, HUANG Qing-wei³

(1. China Communications Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing 100027, China;
2. China Communications Road and Bridge South China Engineering Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong, 528403, China;
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350100, China)

Abstract: In order to investigate the influence of different technical indicators on the performance of UHPC bridge decking in steel-concrete composite beams, to improve the preparation technology of premix for UHPC (PF-UHPC), and to produce steel-concrete composite beams with stable performance and meeting construction requirements, the influences of different technical indicators on the working performance and mechanical properties of PF-UHPC are compared and analyzed through experiments. The optimal technical indicators are determined, and a set of key technologies is developed for the construction of prefabricated and cast-in-place steel-concrete composite beam bridge decking with PF-UHPC. The result shows that the strength and working performance of the PF-UHPC base mix proportion meet the requirements, and increasing 0.3% dosage of water reducer can significantly improve the material's working performance

收稿日期: 2024-01-18

作者简介: 杨元海 (1965 -), 男, 北京人, 高级工程师. (502715419@qq.com)

* 通讯作者: 王斌 (1985-), 男, 广东中山人, 高级工程师. (15798793@qq.com)

without affecting its mechanical properties. When using a large mixer with a mixing time of 8 min, the best performance of the mixture is achieved. The setting time of materials is greatly influenced by indoor and outdoor environmental factors. The feeding sequence of steel fibers has a relatively small influence on the working performance and mechanical properties of the material, but the mixture with added steel fibers has a significant deviation in the uniformity of steel fibers. The flexural strength of the specimen is influenced by the orientation of steel fibers, which mainly depends on the direction of fabric. The greater the angle between the fabric direction and the flow direction of UHPC, the lower the flexural strength of the test decking. The vibration frequency has a significant influence on the flexural strength of UHPC, but has a smaller influence on the deviation of compressive strength and steel fiber content, and the 80 Hz vibration frequency is the most favorable. The hydration heat temperature of UHPC after wet curing is basically between 40 °C and 50 °C, and the initial internal temperature increases with the increase of plate thickness. During the steam curing process, the temperature rise in the center of the UHPC plate is slower than that of the outside, and the temperature difference between the inside and outside is larger. The constant temperature inside the steam curing shed should be controlled above 90 °C, and the natural cooling time should be appropriately extended. The bottom of a 25 cm thick decking should be kept at a constant temperature above 70 °C for 30 h, and its strength should meet the design requirements.

Key words: bridge engineering; construction technology; control variable method; UHPC bridge decking; working performance and mechanical property

0 引言

传统钢-混凝土组合梁可以充分发挥钢和混凝土两种材料的优势,具有承载力高、造型简洁、施工快捷等优点,得到了广泛应用。然而,由于普通混凝土材料强度低、自重大和耐久性差等缺点,已不能完全满足当前不断增长的桥梁结构功能要求^[1-3]。为此,已有学者提出采用超高性能混凝土(简称 UHPC)替代普通混凝土,形成更大跨、更轻盈、更耐久的新型钢-UHPC 组合梁结构,并得到了成功应用^[4-6]。

UHPC 作为一种新型的水泥基复合材料,自身材料组份复杂,材料等级要求高,制备工艺严苛,其配合比尚无系统的设计方法,大多数是根据前人的经验。经优化后得到较佳的力学性能,最终确定配合比,使得 UHPC 的等级与种类层出不穷,材料的性能不稳定和施工质量难以控制,不利于 UHPC 在实际工程中更为广泛的应用^[7-8]。为此,已有研究联合水泥基材料企业对 UHPC 的配合比和基础特性进行研究,形成了市场化应用的超高性能混凝土预混料(Premix for Ultra High Performance Concrete, PF-UHPC),保证了基础材料性能的稳定,简化了 UHPC 配制的难度。然而在实际工程中 UHPC 制备工艺同样会对 UHPC 混凝土性能产生重要的影响,例如 Ferdosian 等^[9]、王启睿等^[10]、李凯等^[11]、李

传习等^[12]研究得出采用不同的搅拌工艺时, UHPC 的性能会有显著的差异。苟鸿翔等^[13]认为当原材料混合不充分时,同样会显著影响新拌 UHPC 及其硬化体的性能。Abbas 等^[14]认为,制备高质量 UHPC 还取决于采用的搅拌机类型和搅拌工艺。王康康等^[15]通过测试不同振捣工艺对试件裂缝发展及抗裂性能的影响,得出不同直径高频振捣棒的振捣作用范围及相邻振捣棒间距,且粗骨料 UHPC 的振捣不宜采用平板振捣器。蔺鑫磊等^[16]研究并完善了无粗骨料 UHPC+高温蒸养的预制 UHPC 桥面板施工工艺。

为制备性能稳定的 UHPC,精细化完善投料、浇注、养护等一系列施工工艺,更好应用于新型钢-UHPC 组合梁桥面板等结构,本研究通过对比分析不同工艺对 PF-UHPC 工作性能及力学性能的影响,形成 PF-UHPC 预制和现浇钢混组合梁桥面板施工关键技术,可为后续类似工程提供参考。

1 工程概况

某特大桥主桥为双塔双索面混合梁斜拉桥,全长为 1 070 m,跨径布置为(69+176+580+176+69) m,如图 1 所示。其中,次边跨及中跨主梁采用钢-UHPC 组合梁结构,包括箱型钢主梁和 UHPC 组合桥面板, UHPC 组合桥面板由 8 mm 厚钢底板+UHPC 桥面板组成, UHPC 桥面板除钢箱梁腹板和横

表 1 PF-UHPC 基准配合比 (单位: kg/m³)
Tab. 1 PF-UHPC reference mix proportion (unit: kg/m³)

预混料	水	外加剂 1	外加剂 2	钢纤维
2 300	155	35	2. 5	180

表 2 PF-UHPC 施工技术指标
Tab. 2 Construction technical indicators of PF-UHPC

性能类别	项目	预制及现浇桥面板 UHPC
工作性能	坍落扩展度/mm	550~700
	扩展度 4 h 损失/mm	100
力学性能	抗压强度标准值/MPa	≥150
	弹性模量/GPa	≥40
	抗折强度/MPa	≥22
	轴心抗拉强度/MPa	≥8
其他性能指标	钢纤维掺量/%	≥2
	重度/(kg·m ⁻³)	2 400~2 600

3 PF-UHPC 搅拌工艺试验

3. 1 不利掺量调整搅拌试验

为充分考虑工厂及现场浇注 PF-UHPC 的搅拌及应用状况, 采用 UHPC 专用高速搅拌设备 (1 m³ 机

型) 分别进行 PF-UHPC 基准配合比 (U-S-JZ)、外加剂 (U-S-SP)、水 (U-S-W) 和外加剂与水 (U-S-SP & W) 的不利掺量调整的搅拌试验组。检测 UHPC 的坍落度、扩展度、钢纤维均匀性、含气量、不同时长坍落度损失、凝结时间等, 并制作试件进行 UHPC 强度、弹性模量等检测, 从而确定最佳搅拌程序、时间等搅拌工艺参数, 指导实际工程施工。

PF-UHPC 的搅拌试验采用吨包装袋进行投料, 单盘搅拌量为 0.66 m³。搅拌机频率为 50 Hz, 搅拌程序为: 干拌 30 s—加水与 3.2% 和 3.5% 减水剂 30 s—继续搅拌至 6 min, 拌和物完全流化—调整外加剂至 3.5% 和 3.8%—继续搅拌至相应时间, 取料进行试验。

由表 3 和表 4 不同参数的 UHPC 工作及物理特性和强度可知, UHPC 初凝时间大于 20 h, 终凝时间大于 23 h, UHPC 工作性能和经时工作性能损失基本满足施工要求。UHPC 的抗压强度、抗折强度等均大于设计强度的 1.15 倍。通过增加外加剂和水的不利掺量试验结果可知, 调整外加剂掺量对材料工作性能改善显著, 调整水的掺量对工作性能改善不明显。两者的变化对 UHPC 强度基本无影响。

表 3 UHPC 材料的工作及物理特性
Tab. 3 Working and physical properties of UHPC materials

配合比		搅拌时长/ min	含气量/%	重度/ (kg·m ⁻³)	拌和物钢 纤维 含量/%	初始 扩展度/ mm	经时扩展度/mm			初凝时间	终凝时间
							2 h	3 h	4 h		
U-S-JZ (水 155 kg, 外 加剂 3.5%)	U-S-JZ-1	6 (3.2%外加剂)	—	—	—	595(不合格)	—	—	—	—	—
	U-S-JZ-2	10 (3.5%外加剂)	2.7	2 415	2.263	705	680	700	700	21 h 25 min	22 h 25 min
	U-S-JZ-3	15 (3.5%外加剂)	2.5	2 460	2.279	750	755	740	735	21 h 25 min	22 h 25 min
U-S-SP (水 155 kg, 外 加剂 3.8%)	U-S-SP-1	6 (3.5%外加剂)	—	—	—	720	—	—	—	—	—
	U-S-SP-2	10 (3.8%外加剂)	2.7	2 443	2.307	780 (施工 临界值)	775	775	770	21 h 40 min	23 h 5 min
	U-S-SP-3	15 (3.8%外加剂)	2.5	2 450	2.310	835	—	760	775	21 h 40 min	23 h 5 min
U-S-W (水 160 kg, 外 加剂 3.5%)	U-S-W-1	6 (3.2%外加剂)	—	—	—	685	—	—	—	—	—
	U-S-W-2	10 (3.5%外加剂)	2.7	2 433	2.101	710	695	680	680	26 h 45 min	28 h 5 min
	U-S-W-3	15 (3.5%外加剂)	2.6	2 454	2.157	740	—	—	715	26 h 45 min	28 h 5 min
U-S-SP&W (水 160 kg, 外加剂 3.8%)	U-S-SP&W-1	6 (3.5%外加剂)	—	—	—	725	—	—	—	—	—
	U-S-SP&W-2	10 (3.8%外加剂)	2.7	2 462	2.147	790	780	765	760	27 h 5 min	28 h 50 min
	U-S-SP&W-3	15 (3.8%外加剂)	2.5	2 451	2.158	841	812	794	785	27 h 5 min	28 h 50 min

3. 2 PF-UHPC 室内外搅拌工艺试验

室内采用小搅拌机, 标准环境 (22 ℃, 湿度 50%以上) 进行搅拌成型, 采用蒸汽养护。室外采用大型搅拌机, 环境温度为 15~20 ℃, 风力 3 级。

比较室内外搅拌工艺对 UHPC 基本性能的影响 (见表 5) 可以看出, 在现有室外温度 (15~20 ℃, 风力 3 级) 的情况下, 采用大搅拌机验证基准配合比 (水 155 kg, 外加剂 3.5%) 的工作性能, 其加水和

表 4 UHPC 强度
Tab. 4 Strength of UHPC

编号		抗折强度/	抗拉强度/	弹性模量/
		MPa	MPa	GPa
U-S-JZ(水 155 kg, 外加剂 3.5%)	U-S-JZ-1	31.32	14.63	—
	U-S-JZ-2	32.25	9.93	—
	U-S-JZ-3	30.80	14.02	44.49
U-S-SP(水 155 kg, 外加剂 3.8%)	U-S-SP-1	26.96	12.11	—
	U-S-SP-2	28.42	13.83	—
	U-S-SP-3	34.71	13.72	43.85
U-S-W(水 160 kg, 外加剂 3.5%)	U-S-W-1	30.20	11.18	—
	U-S-W-2	31.06	11.39	—
	U-S-W-3	31.43	11.47	45.65
U-S-SP&W(水 160 kg, 外加剂 3.8%)	U-S-SP&W-1	25.83	10.46	—
	U-S-SP&W-2	27.42	11.37	—
	U-S-SP&W-3	35.21	12.02	45.11

表 5 室内外搅拌不同配比 UHPC 的基本性能参数

Tab. 5 Basic performance parameters of UHPC with different mix proportions indoors and outdoor

配合比	场所	扩展度	重度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含气量/%	钢纤维 含量/%	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	初终凝 时间/h
U-S-JZ(水 155 kg, 外 加剂 3.5%)	室内	755	2 462	2.5	2.280	176.27	30.81	11.17	22
	室外	705	2 475	2.9	2.327	155.60	31.92	12.97	>30
U-S-SP(水 155 kg, 外 加剂 3.8%)	室内	836	2 448	2.4	2.292	170.47	34.71	12.11	23
	室外	800	2 443	2.7	2.307	158.60	26.94	13.72	>30
U-S-W(水 160 kg, 外加 剂 3.5%)	室内	740	2 444	3.0	2.101	171.00	32.10	11.47	28
	室外	780	2 454	2.6	2.157	167.22	31.06	12.61	>30
U-S-SP&W(水 160 kg, 外加剂 3.8%)	室内	840	2 430	2.7	2.295	170.21	35.21	11.72	29
	室外	812	2 435	3.0	2.258	168.24	32.32	12.02	>30

3.3.1 含钢纤维预混料搅拌

(1) 工作性能及坍落度损失如表 6 和表 7 所示。室内试验搅拌, 工作性能和经时坍损基本满足施工性能要求, 外观观察有少量钢纤维集聚情况。

表 6 PF-UHPC 室内试验工作性能 (单位: mm)
Tab. 6 PF-UHPC performance on indoor test (unit: mm)

序号	盘数	搅拌时间/min	坍落度	扩展度
1	PF-UHPC-1	8	280	715
2	PF-UHPC-2	8	270	675

(2) 重度及钢纤维均匀性。搅拌 8 min, 采用 5 L 标准容量筒取料称重分别为 12.605, 12.661, 12.667 kg, 试验结果如表 8 所示。拌和物重度为 2 528 kg/m^3 , 钢纤维含量体积率为 2.65%, 偏差为 6%, 稍超规范要求 $\pm 5\%$ 。

减水剂后搅拌 6 min, 拌和物处于流化状态, 坍落度满足施工要求, 其重度、含气量及钢纤维含量满足要求, 其初终凝时间大于施工要求时间 (环境因素影响大)。在基准配合比的基础上增减外加剂及水的含量, 对工作性能影响较大, 其力学性能无明显变化。采用大搅拌机对比搅拌时长分别为 6, 10, 12 min 的 UHPC 材料力学性能和工作性能, 发现三者差别不大, 为保险起见, 建议 UHPC 的搅拌时长按 8 min 每盘控制。

3.3 投料顺序工艺参数试验

为探明钢纤维投料顺序对 PF-UHPC 搅拌工艺的影响, 采用 UHPC 专用高速搅拌设备 (1 m^3 机型) 分别进行含钢纤维 PF-UHPC 和不含钢纤维 PM-UHPC (钢纤维后加) 搅拌试验组。检测 UHPC 的坍落度、扩展度、钢纤维均匀性、不同时长坍落度损失, 并制作试件进行 UHPC 强度检测, 从而确定 UHPC 材料投料顺序工艺参数, 指导实际工程施工。

表 7 PF-UHPC 室内试验坍损 (单位: mm)

Tab. 7 PF-UHPC collapse on indoor test (unit: mm)

序号	拌和物停止时间	坍落度	扩展度	损失量
1	0 h (出机)	280	695	—
2	1 h 后	280	675	20
3	2 h 后	280	665	30
4	3 h 后	280	675	20

表 8 PF-UHPC 室内试验钢纤维含量

Tab. 8 PF-UHPC steel fiber content on indoor test

序号	质量/kg	容量/ m^3	重度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	重度平均值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢纤维 含量/kg
1	12.605		2 521		1.041
2	12.661	0.005	2 532	2 528	—
3	12.667		2 533		—

(3) 抗压强度和抗折强度如表 9 所示, 抗压强度和抗折强度较高, 抗折强度有一点离散性。

表 9 PF-UHPC 室内试验强度 (单位: MPa)

Tab. 9 PF-UHPC strength on indoor test (unit: MPa)					
序号	盘数	抗压强度	平均抗压强度	抗折强度	平均抗折强度
1	PF-UHPC-1	183.1	177.3	40.3	33.17
2		171.5		30.4	
3		177.3		28.8	
4	PF-UHPC-2	165.1	172.2	27.9	32.13
5		179.3		35.8	
6		172.2		32.7	

3.3.2 不含钢纤维预混料搅拌

(1) 工作性能及坍落度损失

如表 10 和表 11 所示, 试验室内搅拌, 工作性能和经时坍损基本满足施工性能要求, 搅拌时间较先预混需增加约 3 min 时间。

表 10 PM-UHPC 室内试验工作性能

Tab. 10 PM-UHPC working performance on indoor test				
序号	盘数	搅拌时间/ min	坍落度/ mm	扩展度/ mm
1	PM-UHPC-1	8	280	710
2	PM-UHPC-2	8	275	690

表 11 PM-UHPC 室内试验坍损 (单位: mm)

Tab. 11 PM-UHPC collapse on indoor test (unit: mm)				
序号	拌和物停止时间	坍落度	扩展度	损失量
1	0 h (出机)	280	675	—
2	1 h 后		645	30
3	2 h 后		655	20
4	3 h 后		660	15

(2) 重度及钢纤维均匀性

搅拌 8 min, 采用标准 5 L 容量筒取料, 质量分别为 12.684, 12.755, 12.705, 12.790 kg, 试验结果见表 12 和表 13。拌和物重度为 2 547 kg/m³, 钢纤维含量体积率为 2.84%, 偏差为 13.6%, 远超规范要求±5%。抗压强度和抗折强度较高, 抗折强度有一定离散型。

表 12 PM-UHPC 室内试验钢纤维含量

Tab. 12 PM-UHPC steel fiber content on indoor test					
序号	质量/ kg	容量/ m ³	重度/ (kg·m ⁻³)	重度平均值/ (kg·m ⁻³)	钢纤维 含量/kg
1	12.684	0.005	2 537	2 547	1.117
2	12.755		2 551		—
3	12.705		2 541		—

表 13 PM-UHPC 室内试验强度 (单位: MPa)

Tab. 13 PM-UHPC strength on indoor test (unit: MPa)					
序号	盘数	抗压强度	平均抗压强度	抗折强度	平均抗折强度
1	PM-UHPC-1	159.4	162.9	30.4	31.27
2		162.0		32.8	
3		167.2		30.6	
4	PM-UHPC-2	164.5	166.5	28.1	32.63
5		168.5		31.5	
6		166.5		38.3	

3.3.3 UHPC 搅拌工艺投料顺序对比试验结论

钢纤维预混的 UHPC 混合料和后加钢纤维的 UHPC 混合料二者工作性能基本满足要求, 材料强度变化影响不大, 后加钢纤维的混合料钢纤维均匀性偏差较大。

4 PF-UHPC 浇注振捣工艺试验

在 PF-UHPC 浇注振捣施工过程中, 不同的布料方向、自流半径、钢筋和 PBL 件阻碍及振捣频率会影响其基体内部钢纤维的分布, 从而改变 UHPC 桥面板的结构受力。为此, 开展多种浇注参数变化下的 UHPC 桥面板足尺试验, 依据试验结果寻求最优的浇注方式, 确保 UHPC 组合桥面板浇注质量。

4.1 PF-UHPC 布料方向试验

4.1.1 UHPC 试验板设计

设计 UHPC 平板尺寸为 4.0 m×1.1 m×0.25 m, 浇注方向从一端向另一端自流平, 过程中不振捣, 通过卸料推挤 UHPC 往前流动。

4.1.2 UHPC 试验板制作与养护

采用立轴行星式搅拌机进行 UHPC 搅拌, 分两盘进行搅拌, 每盘搅拌后采用布料车进行存料, 然后一次浇注成型。UHPC 浇注时, 从试验板端头进行定点卸料, 由 UHPC 的自流平, 中间不进行任何振捣。浇注完成后进行 2 d 保湿养护和 48 h 高温蒸汽养护。此外, 取同批次拌和的 UHPC 从一端向另一端自流平制作 6 个 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体, 与试验板同条件养护。

4.1.3 UHPC 试验板切割

养护完成后, 按图 4 编号对预制板进行切割, 切割出 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试件, 沿竖向切割 9 个, 横向切割 9 个, 45°方向切割 8 个, 试件均取自试验板底部。

4.1.4 试验结果

不同布料方向影响下不同角度和距离的 UHPC

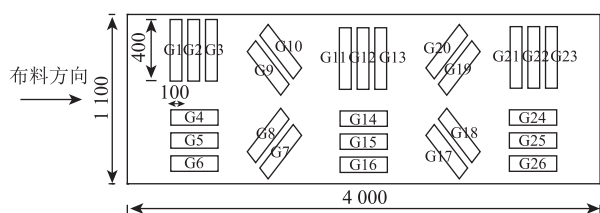


图4 试验板基本尺寸与试样切割编号 (单位: mm)

Fig. 4 Basic dimensions of test plate and sample cutting number (unit: mm)

抗折强度比较见图5。从图中可以看出,当试件与UHPC流动方向平行时,距布料位置0.5、2.0、3.0 m的试件的抗折强度均高于标准试件的抗折强度。距布料位置2.0 m和3.0 m位置,垂直布料方向试件均比水平布料方向试件的抗折强度低30 MPa左右。布料方向成45°斜角试件与布料方向成0°试件比较,抗折强度下降约11 MPa。这表明试件抗折强度主要受钢纤维取向影响,而布料方向对钢纤维取向影响较大,布料方向与UHPC流动方向的角度越大,试验板的抗折强度越低。与UHPC流动方向平行时钢纤维取向较多垂直于抗折试验受力面,标准试件钢纤维取向呈中心放射性故抗折强度次之,而几乎无钢纤维取向沿垂直布料方向。

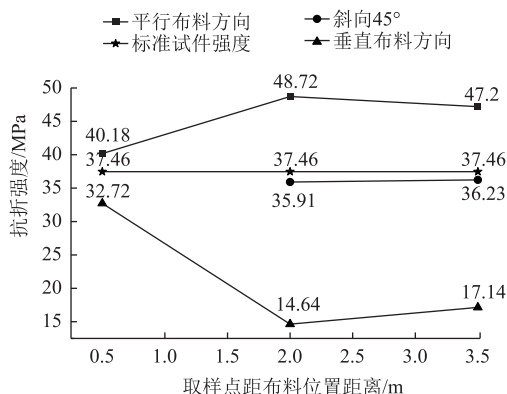


图5 与布料方向成0°, 45°, 90°不同位置试件抗折强度
Fig. 5 Flexural strength of specimens at different positions with fabric orientation at 0°, 45° and 90°

4.2 PF-UHPC布料受钢筋网与PBL件影响试验

4.2.1 UHPC试验板设计

共设置两块试验板, UHPC平板尺寸为3 m×1 m×0.15 m, 设置坡度为2%。按照施工设计图布设PBL件及钢筋网片。

4.2.2 UHPC试验板制作与养护

采用立轴行星式搅拌机进行UHPC搅拌, 分两盘进行搅拌, 每盘搅拌后测量其工作性能, 工作性能分别为扩展度635 mm及640 mm, 采用料斗布料。

从试验板端头进行定点卸料, 由UHPC自流平, 中间不进行任何振捣。待自流平无法到位后采用人工进行推挤, 达到整体布料, 再采用高频振捣100 Hz整平, 浇注完成后进行2 d保湿养护和48 h高温蒸汽养护。

(1) 顺直PBL件流动半径

UHPC扩展度635, 浇注时PBL件及钢筋网对UHPC阻力较小, UHPC沿PBL件自流, 流动速度较快。5 min左右停止自流, 浇注点至浇注尾部间距为2.8 m, 其中无钢筋网区尾部至浇注尾部间距为1.3 m。

(2) 垂直PBL件流动半径

UHPC扩展度640, 浇注时PBL件及钢筋网对UHPC阻力较大, UHPC流动速度缓慢, 先从PBL孔洞流过, 待UHPC浇注高度大于PBL后再翻过PBL件继续自流。4 min左右停止自流, 从浇注点至浇注尾部间距为2 m, 其中从无钢筋网区尾部至浇注尾部间距为0.5 m。此外, 取同批次拌和的UHPC从一端向另一端自流平制作6个100 mm×100 mm×400 mm棱柱体, 与试验板同条件养护。

4.2.3 UHPC试验板切割

养护完成后(见图6), 对预制板进行切割, 切割出100 mm×100 mm×400 mm棱柱体试件, 每块板沿竖向切割6个, 横向切割6个。

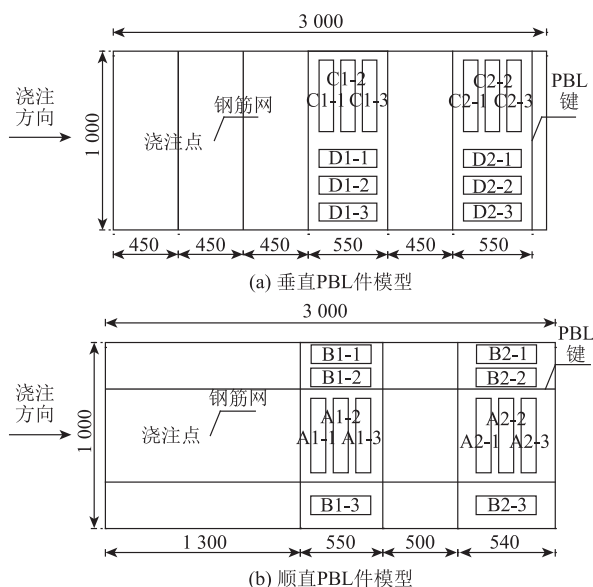


图6 垂直与顺直PBL件布料模型编号与切割
(单位: mm)

Fig. 6 Numbering and cutting of vertical and straight PBL fabric models (unit: mm)

4.2.4 试验结果

受PBL件及钢筋布料影响下不同位置试件

UHPC 抗折强度比较见图 7, 由图可知, 当采用顺 PBL 件 2% 纵坡布料时, 扩展度 650 其流动距离为 2.8 m, 距下料点 1.2 m 及 2.4 m 处取样, 顺布料方向的抗折强度与同条件试件强度相似。垂直布料方向抗折强度远低于同条件试件强度, 约为同条件试件强度的 45%。当采用垂直 PBL 件 2% 纵坡布料时,

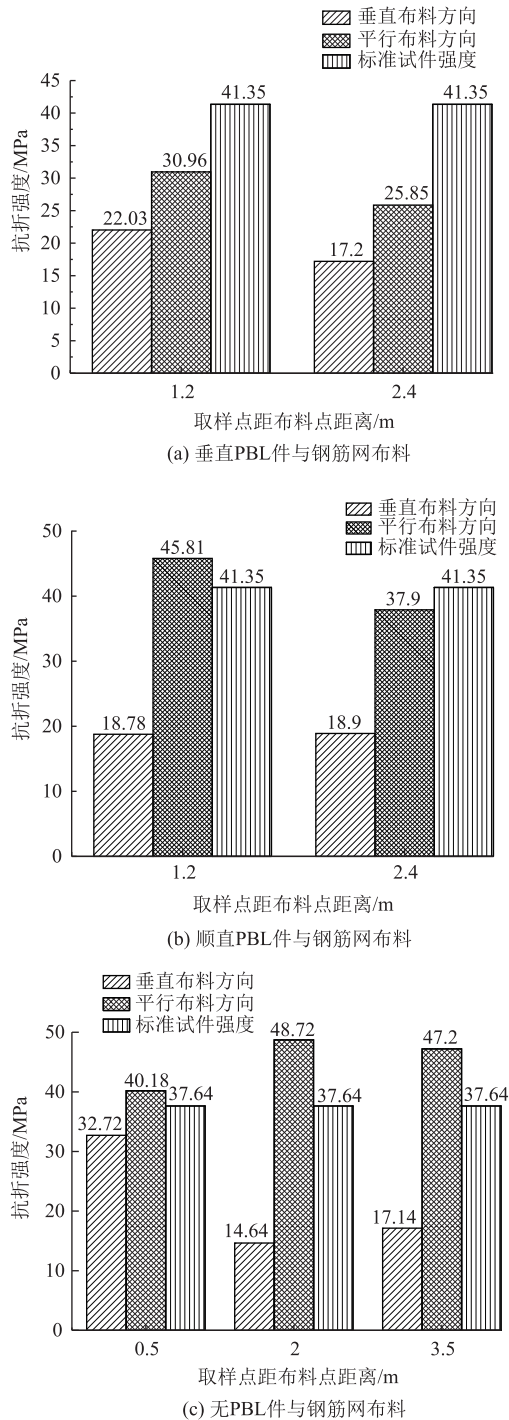


图7 受 PBL 件及钢筋布料影响下不同位置试件抗折强度
Fig.7 Bending strength of specimens at different positions under influence of PBL components and steel fabric

扩展度 650 其流动距离为 2 m, 距下料点 1.2 m 及 2.4 m 处取样, 顺布料方向的抗折强度约为同条件试件强 75%。垂直布料方向抗折强度远低于同条件试件强度, 约为同条件试件强度的 54%。这表明 UHPC 拌和物采用自流平形式对钢纤维分布影响较大, 顺 UHPC 流动方向的抗折强度均大于垂直方向抗折强度。结合第 1 次无 PBL 件及钢筋布料方式检测结果, 得出顺布料方向抗折强度均优于垂直方向抗折强度, 垂直方向抗折强度均为 20 MPa 左右, 但距布料点 0.5 m 内的顺直垂直方向抗折强度均大于 30 MPa。

4.3 PF-UHPC 布料受振捣频率影响试验

4.3.1 UHPC 试验板设计

针对实桥 UHPC 组合桥面板厚度为 15~25 cm, 设计制作 4 块 1.0 m×1.0 m×0.25 m 试验板。

4.3.2 UHPC 试验板制作与养护

浇注制作工艺与 4.1 节相同, 4 块试验板浇注后采用高频平板振捣整平机进行振捣, 振捣频率分别采用 60, 80, 100, 120 Hz, 每个地方振捣停留 10 s。然后, 在同一位置试验板底部分别取样进行拌和物钢纤维含量及含气量检测, 取完料后对试验板进行补料。浇注完成后进行 2 d 保湿养护和 48 h 高温蒸汽养护。同时对同一盘 UHPC 拌和物钢纤维含量和含气量进行检测, 并制作同条件抗压抗折试件。

表 14 拌和物基本性能

Tab. 14 Basic properties of mixtures

扩展度/mm	坍落度/mm	钢纤维含量/%	含气量/%
725	280	2.14	2.9

4.3.3 UHPC 试验板切割

按图 8 的编号在每块试验板底部切割出 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试件和 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件。

4.3.4 试验结果

不同振捣频率对试件抗折与抗压强度的影响结果如图 9 所示。从图中可知, 80 Hz 振捣比同条件养护试件的抗折强度略有提高, 60, 100, 120 Hz 比同条件养护试件抗折强度低 37%, 23%, 37.7%, 这表明不同振捣频率对 25 cm 厚板的抗折强度影响较大, 且 80 Hz 振捣频率最有利。振捣频率为 60, 80, 100, 120 Hz 的试件比同条件养护试件抗压强度低 15.8%, 6%, 5.7%, 14.7%, 这表明不同振捣频率对 25 cm 厚板的抗压强度影响不大, 且 80 Hz 和 100 Hz 振捣频率下影响最小。同条件试件的抗折强度为 33.38 MPa, 抗压强度为 165.8 MPa。

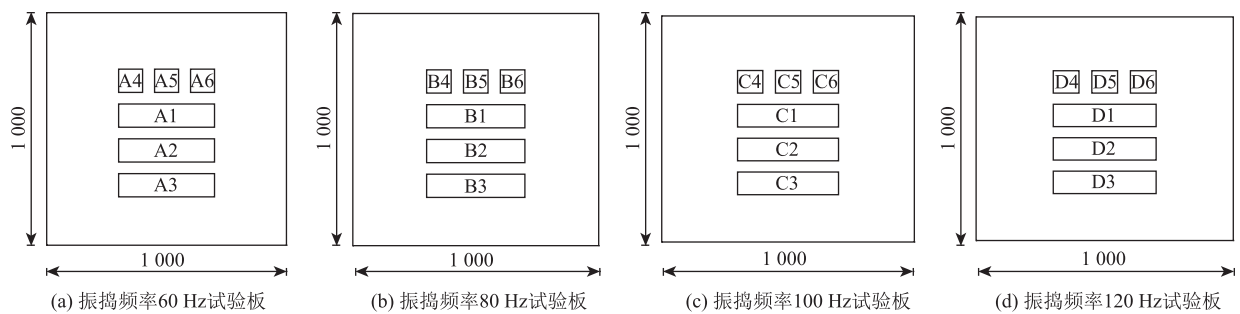


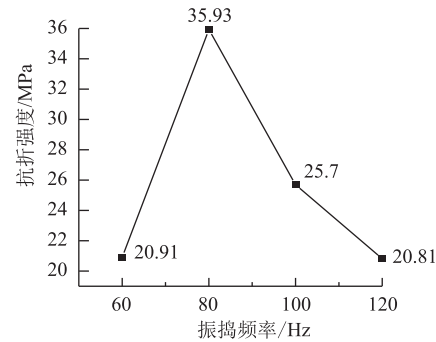
图 8 不同振捣频率试验板编号 (单位: mm)

Fig. 8 Number of test plates with different vibration frequencies (unit: mm)

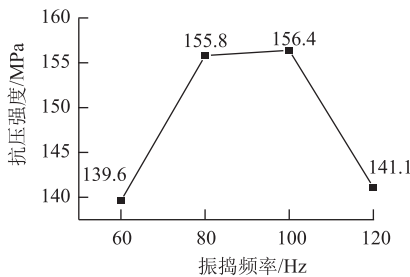
由表 15 的振捣后拌和物钢纤维含量可以看出, 60, 80, 100, 120 Hz 振捣频率后的拌和物钢纤维含量与设计含量 (2.3%) 的偏差分别为 8.7%, 3.9%, 4.7%, 7.8%, 这表明 80 Hz 和 100 Hz 振捣频率对钢纤维含量偏差影响较小。

表 15 振捣后拌和物钢纤维含量

Tab. 15 Steel fiber content of mixture after vibration				
振捣频率/Hz	60	80	100	120
钢纤维含量/%	2.50	2.39	2.41	2.48



(a) 不同振捣频率对抗折强度影响



(b) 不同振捣频率对抗压强度影响

图 9 不同振捣频率对试件抗折强度和抗压强度的影响

Fig. 9 Effect of different vibration frequencies on flexural and compressive strength of specimens

4.4 PF-UHPC 养护工艺试验

通过在不同板厚层内预埋高温温度传感器, 并对预制板进行顶面覆盖蒸养。通过观测蒸养升温、恒温及降温过程中各层温度梯度变化, 确定最适合

的升、降温速率。

4.4.1 UHPC 试验板设计与制作

(1) 制作素 UHPC 试验板 1[#], 2[#], 3[#], 尺寸均为 1.0 m×1.0 m×0.25 m。分别在试验板内预埋 6 个耐高温的温度传感器。传感器布置位置: 沿平面方向分别距板边缘 0.5 m 和 0.25 m, 沿厚度方向分别距顶面 1, 12.5, 24 cm。

(2) 制作素 UHPC 试验板 4[#], 5[#], 6[#], 尺寸均为 1.0 m×1.0 m×0.5 m。分别在试验板内预埋 8 个耐高温的温度传感器。传感器布置位置: 沿平面方向分别距板边缘 0.5 m 和 0.25 m, 沿厚度方向分别距顶面 1, 26, 37.5, 49 cm。

4.4.2 试验板养护

UHPC 浇注完成后, 对试验板进行自然养护 2 d, 然后进行高温蒸汽养护。

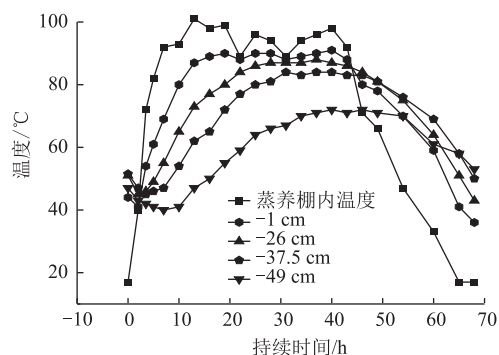
表 16 蒸养棚内温度过程记录

Tab. 16 Temperature process record inside steam curing shed

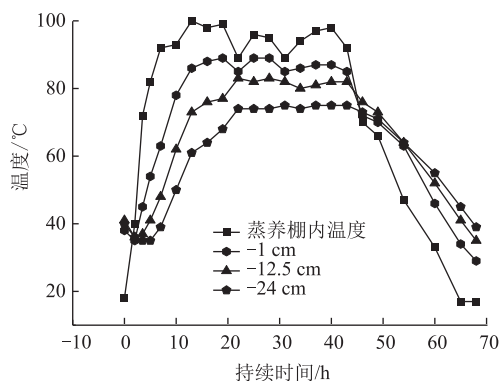
升温阶段		恒温阶段			降温阶段	
持续 时间/h	升温 速率/ (℃·h ⁻¹)	70℃ 持续 时间/h	80~90℃ 持续 时间/h	90℃恒温 持续 时间/h	持续 时间/h	降温 速率/ (℃·h ⁻¹)
5	13	3	5	38	24	2.3

(3) 试验结果

两种板厚的蒸养全过程的平均温度和时间曲线 (见图 10)。由图可知, 在升温阶段, UHPC 板中心温度升温较慢, UHPC 内外温差较大, 应降低蒸养棚内升温速率, 建议不超过 10℃/h。在恒温阶段, 试验板中心温度均低于 90℃, 且 80℃ 以上占蒸养棚内温度的比例为 65%~73%。试验板底面温度均低于 80℃, 且 70℃ 以上占蒸养棚内温度的比例为 59%~72%, 这表明随厚度增加, 试验板内恒温时间显著下降, 且温度显著降低, 建议蒸养棚内恒温温度宜控制在 90℃ 以上, 且适当延长蒸养棚内恒温时间。50 cm 厚试验板 26 cm 处和 37.5 mm 处的恒温差



(a) 50 cm厚板的蒸养全过程温度-时间曲线



(b) 25 cm厚板的蒸养全过程温度-时间曲线

图 10 50 cm 和 25 cm 厚板的蒸养全过程温度和时间曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of entire steam curing process for 50 cm and 25 cm thick plates

距不大,而试验板底面温度均低于 80 °C。这表明与地面接触导致试验板内温度显著散失,应加强 UHPC 板底部保温。在降温阶段,试验板内各区域降温比较均衡,且蒸养棚内自然降温时间较长。建议采取通风等措施适当提高蒸养棚内降温速率,宜控制在 10 °C/h。

开展同条件下 UHPC 强度试验,在 25 cm 厚 UHPC 板切割标准试件(试件取自底部),其抗折强度为 29.7~30.7 MPa,抗压强度为 152.7~165.8 MPa。这表明 UHPC 板经过 70 °C 以上恒温 30 h 养护后,其强度满足设计要求。关于养护温度及恒温时间的相关研究中指出超高性能混凝土达到较高的抗折强度及强度发展率需 85 °C 蒸养 48 h 以上。在实际施工中蒸养时间可结合工程实际需求合理调整,从而降低施工成本,实现节能降耗^[17-18]。本试验中 25 cm 厚 UHPC 板经过 70 °C 以上恒温 30 h 养护后,其强度满足设计要求,且本试验研究重点为高温蒸养的升降温速率,故对该养护温度及恒温时间不再重复进行试验研究。

5 结论

(1) 考虑实际工厂及现场浇注 PF-UHPC 的搅拌及应用状况,采用 UHPC 专用高速搅拌设备(1 m³ 机型)分别进行 PF-UHPC 基准配合比(U-S-JZ)验证及外加剂(U-S-SP)和水(U-S-W)的不利掺量调整的搅拌试验。基准配合比 UHPC 的抗压强度、抗折强度等均大于设计强度的 1.15 倍,抗拉强度满足要求。工作性能和经时工作性能损失满足要求,初凝时间大于 20 h,终凝时间大于 23 h,基本满足施工要求。增加外加剂掺量(+0.3%)对材料工作性能改善显著,调整水(+5 kg/m³)的掺量,对工作性能改善不明显,且两者的变化对 UHPC 强度基本无影响。

(2) 室内标准环境(22 °C,湿度 50%以上)与室外温度(15~20 °C,风力 3 级)的情况下,采用大搅拌机对基准配合比(水 155 kg,外加剂 3.5%)的工作性能验证。其加水和减水剂后搅拌 6 min,拌和物处于流化状态,坍落度满足施工要求,其重度、含气量及钢纤维含量满足要求,其初终凝时间大于施工要求时间(环境因素影响大)。在基准配合比的基础上增减外加剂及水的含量,对工作性能影响较大,其力学性能无明显变化,建议 UHPC 的搅拌时长按 8 min 每盘控制。

(3) 通过浇注振捣受布料方向影响试验可得出:当试件与 UHPC 流动方向平行时,UHPC 拌和物的自流平半径在 4 m 以内,对钢纤维分布几乎没有影响。垂直布料方向试件均比平行布料方向试件的抗折强度低 30 MPa 左右,且几乎无钢纤维取向沿垂直布料方向。与布料方向成 45°斜角试件和与布料方向成 0°试件比较,抗折强度下降约 11 MPa 以上。这表明与 UHPC 流动方向的角度越大,试验板的抗折强度越低。

(4) 当采用顺 PBL 件 2%纵坡布料时,UHPC 抗折强度与同条件试件强度相似。垂直布料方向抗折强度远低于同条件试件强度,约为同条件试件强度的 45%。当采用垂直 PBL 件 2%纵坡布料时,顺布料方向的抗折强度约为同条件试件强度 75%,垂直布料方向抗折强度远低于同条件试件强度,约为同条件试件强度的 54%。这表明 UHPC 拌和物采用自流平形式对钢纤维分布影响较大,顺 UHPC 流动方向的抗折强度均大于垂直方向抗折强度。因此施工时采用布料振捣一体机,垂直 PBL 件整断面布料振捣,需控制设备出料速度,利用 PBL 件及钢筋控制

UHPC 流动速度及流动距离。

(5) 80 Hz 振捣比同条件养护试件的强度略有提高, 60, 100, 120 Hz 比同条件养护试件强度低 37%, 23%, 37.7%, 这表明不同振捣频率对 25cm 厚板的抗折强度影响较大, 且 80 Hz 振捣频率最有利。60, 80, 100, 120 Hz 比同条件养护试件强度低 15.8%, 6%, 5.7%, 14.7%, 这表明不同振捣频率对 25 cm 厚板的抗压强度影响不大, 且 80 Hz 和 100 Hz 振捣频率下影响最小。60, 80, 100, 120 Hz 振捣频率后的拌和物钢纤维含量与设计含量的偏差分别为 8.7%, 3.9%, 4.7%, 7.8%, 这表明 80 Hz 和 100 Hz 振捣频率对钢纤维含量偏差较小。

(6) 蒸养过程中 UHPC 板中心温度升温较慢, UHPC 内、外温差较大, 应降低蒸养棚内升温速率, 建议不超过 10 °C/h。在恒温阶段, 随 UHPC 板厚度的增加, 试验板内恒温时间显著下降, 且温度显著降低, 建议蒸养棚内温度恒温温度宜控制在 90 °C 以上, 且适当延长蒸养棚内恒温时间。50 cm 后试验板 26 cm 处和 37.5 mm 处的恒温差距不大, 而试验板底面温度均低于 80 °C。这表明与地面接触导致试验板内温度显著散失, 应加强 UHPC 板底部保温。在降温阶段, 试验板内各区域降温比较均衡, 且蒸养棚内自然降温时间较长, 建议采取通风等措施适当提高蒸养棚内降温速率, 宜控制在 10 °C/h。同材料同条件蒸养的标准试件试验板切割后的强度 (试件取自底部) 偏差甚小, 这表明 UHPC 板经过 70 °C 以上恒温 30 h 养护后, 其强度满足设计要求。

参考文献:

References:

- [1] 黎维梁. 超高性能混凝土材料在桥梁工程中的应用 [J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52 (1): 147-149.
LI Wei-liang. Application of Super Performance Concrete Materials in Bridge Engineering [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52 (1): 147-149.
- [2] 胡美韵, 孔祥武, 朱勇锋, 等. 钢-UHPC 轻型组合连续梁桥设计与施工 [J]. 公路工程, 2023, 48 (2): 15-23, 47.
HU Mei-yun, KONG Xiang-wu, ZHU Yong-feng, et al. Design and Construction of Steel-UHPC Lightweight Continuous Composite Beam Bridge [J]. Highway Engineering, 2023, 48 (2): 15-23, 47.
- [3] 覃宗华, 李自强, 陈平, 等. 跨海大桥施工栈桥 UHPC 桥面板承载性能试验研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2019, 43 (1): 52-55.
QIN Zong-hua, LI Zi-qiang, CHEN Ping, et al. Experimental Study on Bearing Capacity of UHPC Bridge Panel of Construction Trestle of Sea-crossing Bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43 (1): 52-55.
- [4] BASSAM A T, MAHMOUD H A, SHAKER M A Q, et al. Influence of Microsilica and Polypropylene Fibers on the Fresh and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Geopolymer Concrete (UHP-GPC) [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17 (14): e01367.
- [5] 甘小平, 袁星, 邓开来, 等. 钢-UHPC 组合梁纵向抗剪性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (8): 102-110.
GAN Xiao-ping, YUAN Xing, DENG Kai-lai, et al. Experimental Study on Longitudinal Shear Performance of Steel-UHPC Composite Bridge Girder [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (8): 102-110.
- [6] 张清华, 程震宇, 邓鹏昊, 等. 新型钢-UHPC 组合桥面板抗弯承载力模型试验与理论分析方法 [J]. 土木工程学报, 2022, 55 (3): 47-64.
ZHANG Qing-hua, CHENG Zhen-yu, DENG Peng-hao, et al. Experimental Study and Theoretical Method on Flexural Capacity of Innovative Steel-UHPC Composite Bridge Decks [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55 (3): 47-64.
- [7] 杨玉柱, 黄维蓉, 耿嘉庆, 等. 基于半经验的 UHPC 配合比设计方法 [J]. 材料导报, 2021, 35 (增 2): 188-193.
YANG Yu-zhu, HUANG Wei-rong, GENG Jia-qing, et al. UHPC Mix Design Method Based on Semi-quantitative [J]. Materials Reports, 2021, 35 (S2): 188-193.
- [8] 卢喆, 冯振刚, 姚冬冬, 等. 超高性能混凝土工作性与强度影响因素分析 [J]. 材料导报, 2020, 34 (增 1): 203-208.
LU Zhe, FENG Zhen-gang, YAO Dong-dong, et al. Analysis of Influencing Factors on Workability and Strength of Ultra-high Performance Concrete [J]. Materials Reports, 2020, 34 (S1): 203-208.
- [9] FERDOSIAN I, CAMOES A. Effective Low-energy Mixing Procedure to Develop High-fluidity Cementitious Pastes [J]. Matria (Rio de Janeiro), 2016, 21 (1): 11-17.
- [10] 王启睿, 贺永胜, 谢晓庚, 等. 搅拌工艺对超高性能混凝土工作性和力学性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (8): 16-21.
WANG Qi-rui, HE Yong-sheng, XIE Xiao-geng, et al.

- Influence of Mixing Technology on the Workability and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2022 (8): 16-21.
- [11] 李凯, 张飞龙, 魏丙华, 等. 不同搅拌工艺下 UHPC 配合比设计及性能分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (12): 122-124, 130.
- LI Kai, ZHANG Fei-long, WEI Bing-hua, et al. Mix Design and Performance Analysis of Ultra-high Performance Concrete under Different Mixing Modes [J]. Construction Technology, 2022, 51 (12): 122-124, 130.
- [12] 李传习, 聂洁, 冯峥, 等. 振动搅拌对超高性能混凝土施工及力学性能影响 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (8): 2586-2594.
- LI Chuan-xi, NIE Jie, FENG Zheng, et al. Effect of Vibratory Mixing on the Construction and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38 (8): 2586-2594.
- [13] 苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用 [J]. 硅酸盐学报, 2020, 48 (11): 1756-1764.
- GOU Hong-xiang, ZHU Hong-bo, ZHOU Hai-yun, et al. Reinforcement of Directionally Distributed Steel Fibers on Ultrahigh Performance Concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48 (11): 1756-1764.
- [14] ABBAS S, NEHDI M L, SALEEM M A. Ultra-high Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10 (3): 271-295.
- [15] 王康康, 赵灿晖, 邓开来. 预制粗骨料 UHPC 桥面板振捣工艺试验研究 [J]. 世界桥梁, 2018, 46 (6): 51-55.
- WANG Kang-kang, ZHAO Can-hui, DENG Kai-lai. Experimental Study of Vibration Technique for Precast UHPC Bridge Deck with Coarse Aggregates [J]. World Bridges, 2018, 46 (6): 51-55.
- [16] 蔺鑫磊, 兰胜强, 岳秀鹏, 等. 无粗骨料 UHPC 预制桥面板高温蒸养施工技术 [J]. 公路, 2022, 67 (7): 202-208.
- LIN Xin-lei, LAN Sheng-qiang, YUE Xiu-peng, et al. High Temperature Steam Curing Construction Technology for UHPC Precast Bridge Decks Without Coarse Aggregate [J]. Highway, 2022, 67 (7): 202-208.
- [17] 高原, 石红磊, 高全青, 等. 不同养护制度对超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 混凝土, 2021 (6): 108-111.
- GAO Yuan, SHI Hong-lei, GAO Quan-qing, et al. Influence of Different Curing Regimes on the Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete [J]. Concrete, 2021 (6): 108-111.
- [18] 杨腾宇. 高温蒸汽养护时间对超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 工程技术研究, 2022, 7 (121): 85-87.
- YANG Teng-yu. Influence of High Temperature Steam Curing Time on Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete [J]. Engineering Technology Research, 2022, 7 (121): 85-87.