

DOI:10.11918/202107071

含湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板收缩效应

徐晨¹, 卢毅¹, 马彪², 王巍², 王浩²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 正交异性钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面板中 UHPC 早期收缩较大, 在组合桥面板界面约束下会产生较高次内力, 存在开裂的风险, 进而引发结构的安全和耐久性问题。为此, 基于实际工程背景, 对含湿接缝的组合桥面板收缩效应开展 90 d 的自然环境下常温养护静置监测研究, 考察组合桥面板 UHPC 收缩及其引发的次内力发展及分布规律, 探究龄期差对湿接缝区域收缩效应发展的影响特点; 建立板壳实体有限元模型, 通过多模型线性叠加的方法来模拟组合桥面板湿接缝浇筑前后的收缩效应。试验和有限元分析结果表明: 在炎热潮湿的养护环境下, UHPC 收缩发展经历了早期膨胀、初凝硬化后快速收缩、缓慢收缩以及稳定 4 个阶段; UHPC 在浇筑后约 6 h 初凝硬化, 以此刻应变为参照测得前 72 h 收缩量约为 700×10^{-6} , 在此期间测得钢板翼缘最大压应变约为 78×10^{-6} ; UHPC 收缩在靠近桥面板边缘区域更大, 靠近板中心区域更小; 湿接缝处在初凝硬化后测得的收缩量比周边区域更小, 湿接缝与周边连接完好, 收缩引发的 UHPC 拉应力在湿接缝附近有增加的趋势。研究结果可为含湿接缝组合桥面收缩研究积累监测数据和分析基础。

关键词: 桥梁工程; 钢-UHPC 组合桥面; 应变监测; 收缩效应; 湿接缝; 常温养护

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)09-0017-10

Shrinkage effect of steel-UHPC composite bridge deck with wet joint

XU Chen¹, LU Yi¹, MA Biao², WANG Wei², WANG Hao²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: For the orthotropic steel-ultra high performance concrete (UHPC) composite bridge deck, the early shrinkage of UHPC is relatively large. Under the constraint of the interface of the composite deck, high-order internal forces can be generated, and there is a risk of cracking, thus endangering the safety and durability of the structure. On the basis of the actual engineering background, the shrinkage effect of the composite bridge deck with wet joints was monitored for 90 d under normal temperature curing in natural environment. The development and distribution of UHPC shrinkage of composite bridge deck and the induced secondary internal force were investigated, and the influence of age difference on the development of the shrinkage effect of wet joint area was explored. The finite element model of plate and shell was established, and the shrinkage effect before and after the wet joint pouring of composite bridge deck was simulated by linear superposition of multiple models. Test and finite element analysis results showed that under hot and humid curing environment, the shrinkage development of UHPC experienced four stages: early expansion, rapid shrinkage after initial setting and hardening, slow shrinkage, and stability. The initial setting and hardening of UHPC occurred about 6 h after pouring. Taking the strain at this moment as the reference, the measured shrinkage of UHPC for the first 72 h was about 700×10^{-6} , and the maximum compressive strain of the steel deck flange measured during this period was about 78×10^{-6} . UHPC shrinkage was larger in the area near the edge of the bridge deck and smaller in the area near the center of the deck. The shrinkage measured at the wet joint after initial setting and hardening was smaller than that in the surrounding area. The wet joint was well connected with the surrounding area, and the UHPC tensile stress caused by shrinkage tended to increase near the wet joint. The research results can accumulate monitoring data and foundation for the study of shrinkage of composite bridge deck with wet joints.

Keywords: bridge engineering; steel-UHPC composite bridge deck; strain monitoring; shrinkage effect; wet joint; normal temperature curing

正交异性钢桥面板与超高性能混凝土 (ultra

high performance concrete, 简称 UHPC) 组合可显著提升前者的抗疲劳性能^[1-4]。UHPC 立方体抗压强度一般可达 150 MPa, 单轴抗拉强度可达 8 MPa 甚至更高^[5], 其弹性模量一般在 40 GPa 以上, 并且由于内部掺入了钢纤维, 材料还具有良好的拉伸韧性。

收稿日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51978501)

作者简介: 徐晨(1982—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 徐晨, xuchenprc@tongji.edu.cn

UHPC 材料水胶比低且含有大量磨细活性掺合料,在浇筑初期多伴有显著收缩,一般可达 $500 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ [6]。钢-UHPC 组合桥面板由于界面焊钉约束所导致的收缩次内力显著增加了 UHPC 开裂的风险 [7],由此带来的结构安全及耐久性问题不容忽视。

高温蒸养、材料改性等是改善 UHPC 早期收缩发展速度或减少收缩量的有效手段,在 UHPC 板内密集配筋也是抑制 UHPC 收缩开裂的有效措施。文献 [8] 通过试验研究了 UHPC-RC (reinforced concrete, 钢筋混凝土) 组合结构在常温养护 (5 ~ 35 °C) 和高温蒸汽养护 (100 °C) 下的收缩情况,发现常温和蒸汽养护下界面约束分别抑制了 57% 和 80% 收缩发展。文献 [9] 研究了不同养护制度对 UHPC 收缩量的影响,发现热养护可以明显减小 UHPC 的干燥收缩。另一方面,文献 [10] 研究了 3 种膨胀剂掺量 (0、3%、6%) 下常温养护型 UHPC 的圆环约束收缩性能,表明通过添加膨胀剂可对常温养护型 UHPC 进行收缩补偿。然而通过材料改性来抑制收缩也可能带来材料收缩与膨胀交替出现,受常温养护环境因素的影响较为明显 [11]。此外,在组合桥面板 UHPC 浇筑施工中一般需设置湿接缝来保障施工质量和减少 UHPC 板的尺寸。文献 [12] 对不同配筋率 UHPC 湿接缝梁进行了静力抗弯试验,建议在湿接缝处布置短钢筋以增加该位置的抗裂性能。文献 [13] 针对现浇桥面湿接缝高强补偿收缩混凝土开展了预制桥面板混凝土的收缩试验,使用高强收缩补偿混凝土后,湿接缝处未出现破坏性的裂缝。

湿接缝是钢-UHPC 组合板的关键部位与受力薄弱环节,湿接缝及周边 UHPC 的龄期差可引起额外的收缩应力,导致组合板更容易在接缝位置发生受力或疲劳破坏,影响构件的受力性能和耐久性。除构造特点及施工方法外,环境温、湿度,早期弹性模量等也是影响组合桥面板收缩次内力的重要参数。目前已有的恒温材料收缩研究成果还难以支撑对常温养护条件下带湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板收缩效应的模拟和评估。这成为实际工程中该类构件合理设计的难点,影响结构的安全和经济性。解决这一问题的可行途径是结合构件监测试验和数值模拟来反映工程实际和揭示收缩分布规律。

上海叶新公路新柳港大桥为双塔中央双索面钢箱梁斜拉桥 [14],塔高 60 m。桥梁全长 1 385 m。钢箱主梁宽 38.5 m,采用了钢-现浇 UHPC 组合桥面板的构件形式,UHPC 板厚 60 mm。本文结合背景

工程钢-UHPC 组合桥面板夏季高温高湿施工实际情况,首先设计制作含湿接缝钢-UHPC 组合桥面板足尺节段试件进行自然条件下收缩效应监测,考察钢-UHPC 组合桥面板整体与湿接缝处材料在 90 d 内的早期与全过程收缩及构件次内力的发展与分布特点;在此基础上,结合力学分析和精细化有限元收缩效应计算,讨论了组合桥面板收缩次内力形成与分布的基本规律。研究结果可为深入理解钢-UHPC 组合桥面板收缩效应积累重要的监测数据和分析基础。

1 钢-UHPC 组合桥面板收缩效应监测试验设计

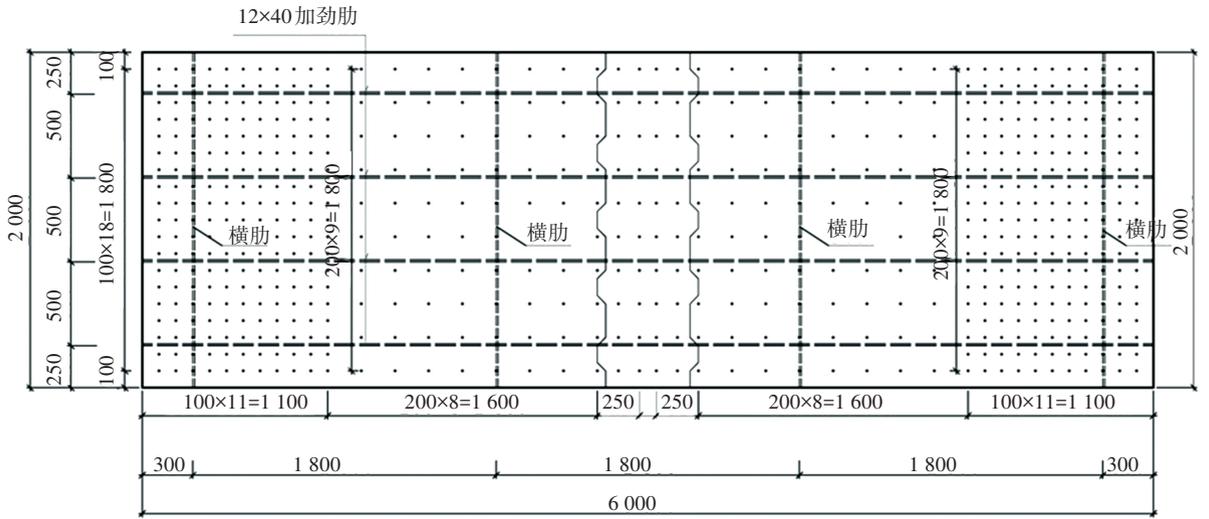
1.1 桥面板试件设计与制作

为考察钢-UHPC 组合桥面板收缩效应,首先进行了足尺节段组合桥面板收缩效应监测试验研究。图 1 为足尺节段钢-UHPC 组合桥面板试件尺寸,板件厚度、纵、横肋间距等均与背景工程中构件尺寸相同。图 1(a) 为构件平面布置图,试件长 6 000 mm,宽 2 000 mm,盖板采用板肋加劲,共 4 个横肋,间距 1 800 mm;试件采用焊钉作为连接件,焊钉钉身直径 13 mm,钉高 40 mm。图 1(b) 为钢-UHPC 组合桥面板试件断面布置图,为考虑 UHPC 实际浇筑效果,设置了与原桥一样 2% 的顶面横坡;试件中,钢筋等级均为 HRB400,钢筋直径为 16 mm,布置间距为 100 mm,纵桥向钢筋底部保护层和横桥向钢筋顶部保护层厚度分别为 16、12 mm。图 1(c) 为试件湿接缝处的配筋图,设置与纵筋相同直径与间距的接缝补强钢筋,纵筋搭接长度为 450 mm。

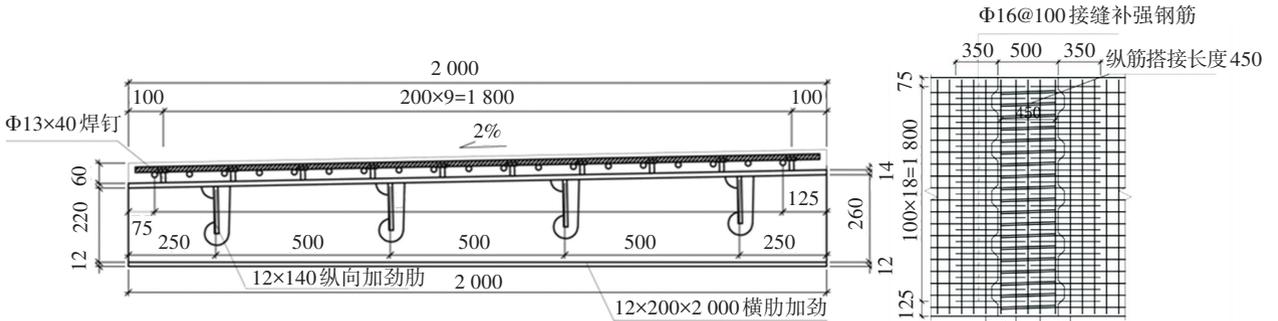
UHPC 浇筑时环境温度为 37 °C,湿度约 60%,天气晴。首先浇筑非接缝区域,8 h 后对 UHPC 进行第 1 次浇水养护。湿接缝浇筑的时间间隔参照工程实际设计为 24 ~ 48 h,试验中对先浇 UHPC 应变持续监测,观测到浇筑完成约 24 h UHPC 早期收缩基本完成后,于初浇浇筑完成 28 h 浇筑湿接缝区域,并在表面覆盖土工布和塑料薄膜,静置于室外常温养护。两次浇筑采用的 UHPC 拌合料完全相同,按照统一配比现场搅拌浇筑,施工人员与设备相同,且两次浇筑时的温湿度等环境条件类似。

1.2 桥面板收缩监测方案与测点布置

图 2 为组合桥面板试件静置布置图及相关边界条件。试件水平放置于水泥地面,保持顶面横坡为 2%。在试件底部加设垫木以减少自重引起的徐变效应的影响。



(a) 钢桥面板平面布置图



(b) 桥面板试件横截面图

(c) 后浇湿接缝区域钢筋平面布置

图1 组合桥面板试件设计 (mm)

Fig.1 Design of composite bridge deck test piece (mm)

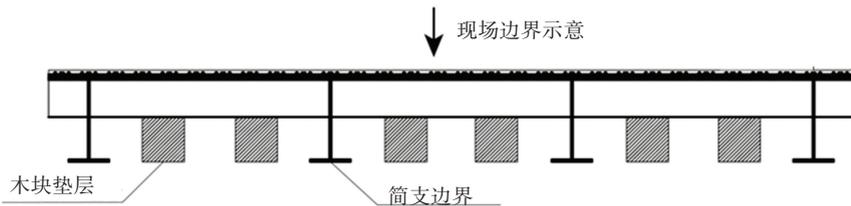


图2 收缩监测中的桥面板试件

Fig.2 Bridge deck test piece for shrinkage monitoring

试验中分别对 UHPC 非接缝和湿接缝区域内部、钢盖板下表面等部位的纵桥向应变进行了监测。其中钢板表面应变测量采用表贴式振弦应变计, UHPC 内部则采用光纤光栅应变计,同时布置一个光纤温度计测量 UHPC 内部温度。测点布置如图 3

所示,其中编号 U 表示 UHPC 光纤光栅应变计测点,且两对应变测点(U1 和 U2,U4 和 U5)在同一纵向位置上沿厚度方向布置,如图 3(b)所示。U3 测点与 U2、U5 测点处于竖向同一高度。编号 T 表示钢盖板下缘表贴式振弦应变计测点。

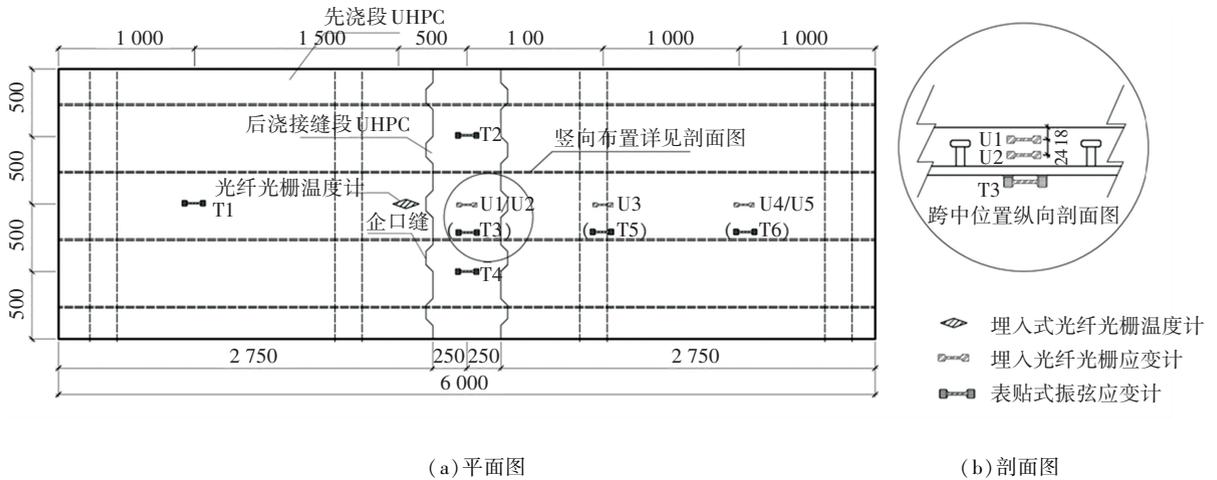


图 3 桥面板试件应变计布置 (mm)

Fig.3 Strain gauges arrangement of bridge deck test piece (mm)

本文结合背景工程中钢-UHPC 组合桥面板施工和养护实际情况,对组合桥面板试件进行了自然条件下常温静置收缩监测,共计 90 d,同时对环境温湿度变化进行监测。收缩监测以 UHPC 首次浇筑完成时刻记为时间零点。监测全程中环境最高温度为 37.8 ℃,最低温度为 11.5 ℃,最高湿度为 100.0%,最低湿度为 23.0%。

1.3 UHPC 材性试验结果

试验所用 UHPC 材料由粉体材料和外掺定制

表 1 UHPC 粉体材料组分

Tab.1 Composition of UHPC powder material

UHPC 组分	水泥	硅灰	填料	石英砂	水	减水剂	钢纤维	膨胀剂
配比	722.7	216.8	216.8	998.3	179.0	13.1	157.0	35.8

表 2 UHPC 材性试验结果

Tab.2 Material test results of UHPC

养护龄期/d	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	抗折强度/MPa
7	90.3	97.6	57 000	—
28	111.8	104.2	46 100	41.3

2 钢-UHPC 组合桥面板收缩效应监测试验结果与分析

本节主要对监测所得的钢-UHPC 组合桥面板环境温湿度发展历程、监测早期 (72 h) 及全过程 UHPC 收缩发展及钢盖板应变发展进行了总结和讨论。由于监测早期 UHPC 收缩发展较为迅速,是影响结构受力的关键,所以本节对其进行了专门的考察和分析。

2.1 组合桥面板 UHPC 温度和环境湿度监测结果

UHPC 内部及表面的温度发展历程如图 4 所

示。内部温度由图 3 中 UHPC 内部光纤温度计测量,表面温度由粘贴在 UHPC 表面的振弦式温度计测量。横轴时间零点为首次浇筑 UHPC 完成时刻。表面温度监测比内部温度监测晚 8 h。由于数据存储故障,第 37 天至第 52 天的 UHPC 内部温度监测数据缺失。根据温度监测结果,UHPC 浇筑初期表面日均温度达 40 ℃,之后呈降低的趋势。UHPC 板内部温度整体低于表面温度。浇筑完成后,72 h 内 UHPC 内部温度在 20~44 ℃ 之间变化,30 d 内日平均温度在 15~40 ℃ 之间变化,30~90 d 内温度日均值下降明显,在 10~25 ℃ 之间变化。内部早晚温差较大,最大温差约为 20 ℃。环境湿度发展历程如图 5 所示,横轴时间零点与图 4 一致。根据湿度监测结果,浇筑完成后 72 h 内环境湿度约在 40%~100% 之间变化,30 d 内日平均湿度在 50%~100% 之间变化;浇筑完成后 30~90 d 内湿度日均值有所降低,大约在 50%~80% 之间变化。

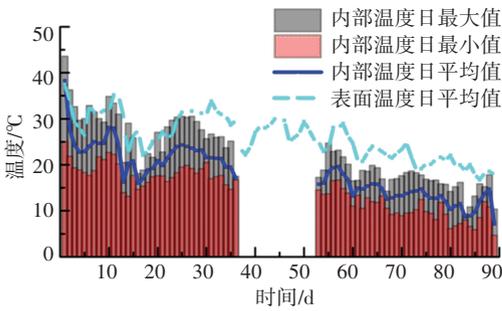


图4 UHPC板内部和表面温度监测

Fig.4 Internal and surface temperature monitoring of UHPC

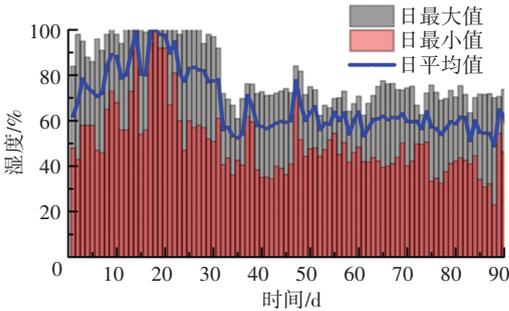
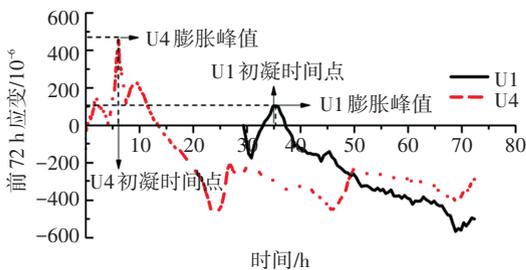


图5 环境湿度监测

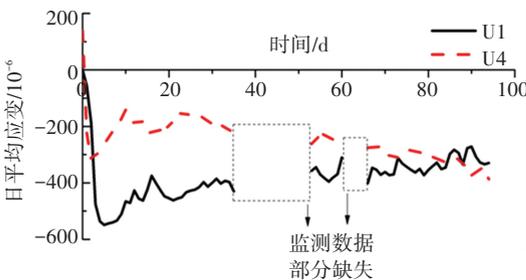
Fig.5 Environmental humidity monitoring

2.2 组合桥面板 UHPC 早期与全过程收缩发展与分布

桥面板湿接缝区域 U1 及非接缝区域 U4 测点的收缩发展历程如图 6 所示。横轴以 UHPC 非接缝区域浇筑完成时作为时间零点;竖轴分别以非接缝区及接缝区 UHPC 浇筑完成时作为应变零点,正应变表示 UHPC 体积膨胀,负应变表示 UHPC 体积收缩。



(a) 前 72 h 应变变化



(b) 日平均应变变化

图6 U1 和 U4 测点应变发展历程

Fig.6 Strain development of U1 and U4 measurement points

图 6(a) 为早期 72 h 内 UHPC 应变发展历程。U4 测点在 0~6 h 内呈现膨胀趋势,在第 6 小时应变达最大值约为 465×10^{-6} ,UHPC 内部水化反应热和膨胀剂是导致膨胀的主要原因。此时 UHPC 开始初凝硬化,同时迅速收缩,浇筑后第 24 小时到达收缩谷值。此后,UHPC 应变发展趋于稳定,变化幅度小于 200×10^{-6} 。可见 UHPC 在炎热潮湿环境条件下的早期收缩在 24 h 内基本完成。U1 测点以湿接缝浇筑完成时(第 28 小时)作为应变零点,UHPC 早期膨胀、收缩量与非接缝区域相比均更小,这与周边约束及局部配筋加强有关。图 6(b) 为 UHPC 收缩在 90 d 内的日均发展历程。非接缝区域在监测后期收缩缓慢增长,60 d 后收缩量增长约为总收缩量的 30%,发展较为稳定;接缝区域受到周边区域收缩作用的影响,60 d 后的应变增长了 50×10^{-6} 。收缩监测全程未见明显裂缝,接缝状态完好。

图 7 为 U2,U3 及 U5 测点位置第 3 天、第 20 天和第 80 天时的 UHPC 日均收缩分布图,竖轴以初凝点附近膨胀峰值作为收缩计算零点。可见后浇接缝处收缩明显小于边缘区域。从约束条件看,处于板中心的接缝区域一方面受焊钉的整体约束作用较强,另一方面受密配筋的约束更强;加之受到周边先浇 UHPC 的边界约束,因此收缩更小。此外,接缝处 UHPC 与环境接触表面积更小,水分蒸发引起的干燥收缩更小,也会减小 UHPC 的收缩量。

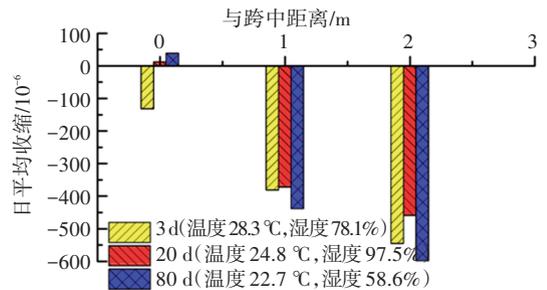


图7 UHPC 内部纵桥向测点收缩比较

Fig.7 Comparison of shrinkage at measurement points along longitudinal direction inside UHPC

图 8 为根据 U4 及 U5 测点在第 3 天、第 20 天和第 80 天时的监测数据结果所得的 UHPC 沿板厚方向的日均收缩分布图。可见靠近钢顶板处 UHPC 收缩偏小,收缩呈梯度分布。钢板阻碍水分蒸发以及焊钉的约束作用差异是造成这一现象的主要原因。

统计 UHPC 各测点应变监测结果列于表 3,其中收缩量以初凝点附近膨胀峰值为零点计算。非接缝区域初凝点附近膨胀峰值明显高于接缝区域,原因是接缝区域浇筑后受到周边区域和钢筋焊钉等的

约束作用更强。UHPC 监测过程中最大收缩发生在非接缝边缘区域的 U4 测点处,约为 920×10^{-6} ,5 个测点的收缩中位数为 700×10^{-6} 。

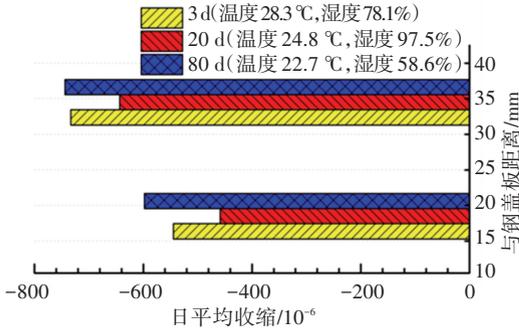


图 8 UHPC 内部沿厚度方向测点收缩比较

Fig.8 Comparison of shrinkage at measurement points along thickness direction inside UHPC

表 3 UHPC 测点应变结果统计

Tab.3 UHPC strain at different measurement points

测点	初凝点附近膨胀峰值应变/ 10^{-6}	90 d 最小应变/ 10^{-6}	90 d 最大收缩量/ 10^{-6}
U1	100	-600	-700
U2	100	-100	-200
U3	400	-200	-600
U4	465	-455	-920
U5	525	-225	-750

注:收缩量计算以初凝点附近膨胀峰值为参照(收缩量=应变值-初凝点附近膨胀峰值)。

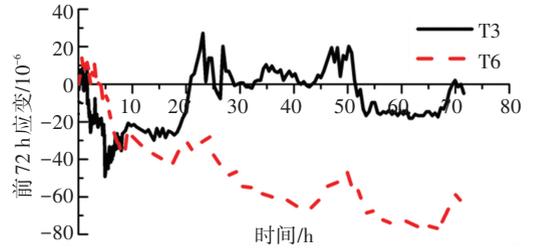
2.3 组合桥面板钢盖板底面早期与全过程应变发展

图 9 所示为接缝区 T3 及非接缝区 T6 钢板测点应变发展历程。横轴以非接缝区 UHPC 浇筑完成作为时间零点,与图 6 中 UHPC 收缩发展历程时间零点保持一致。

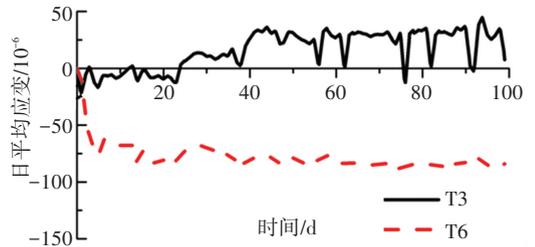
图 9(a)为早期 72 h 内钢板应变的发展历程。在 6 h 以前 T6 测点处钢板应变值很小,随后迅速增长,说明非接缝区 UHPC 已经初凝硬化,收缩在钢板上产生次内力。需要说明的是,接缝区 UHPC 虽然在第 28 小时才完成浇筑,但非接缝区 UHPC 收缩与桥面板纵向通长钢筋的共同作用会在接缝区域截面上引起正弯矩次内力。这是 T3 测点处钢板在 28 h 前出现压应变的主要原因。在湿接缝区 UHPC 浇筑完毕后,T3 测点处钢板应变趋于稳定,而处于边缘位置的 T6 测点钢板压应变持续增加,说明非接缝区 UHPC 收缩次内力持续增大。

图 9(b)为 T3 及 T6 测点处 90 d 内钢板日均应变发展历程。靠近试件边缘的 T6 测点处钢板持续受压,压应变后期增长速率逐渐减缓,最大日均压应

变约为 100×10^{-6} 。由于湿接缝区域钢筋的密集布置对该区域 UHPC 的收缩产生了约束,导致该区域内钢板的压应力较周边更小;在此基础上,周边非接缝区 UHPC 的收缩逐步增加使接缝区 T3 测点处钢板产生了拉应变。



(a) 前 72 h 应变变化



(b) 日平均应变变化

图 9 钢盖板下缘 T3 和 T6 测点应变发展历程

Fig.9 Strain development of T3 and T6 measurement points on lower edge of steel deck

图 10 为根据 T1, T3, T5, T6 测点第 3 天、第 20 天和第 80 天的监测数据结果所得钢盖板底面纵向日均应变分布。竖轴以非接缝区 UHPC 浇筑完成时的钢板应变作为应变零点。可以发现:非接缝区域钢板压应变显著高于接缝区域。对于非接缝区域,靠近边缘的测点压应变小于靠近中心区域的测点。结合图 7 中 UHPC 应变分布结果与分析,可知原因是靠近中心区域 UHPC 受焊钉约束作用较强,收缩较小,因此引起的钢板次内力更大。

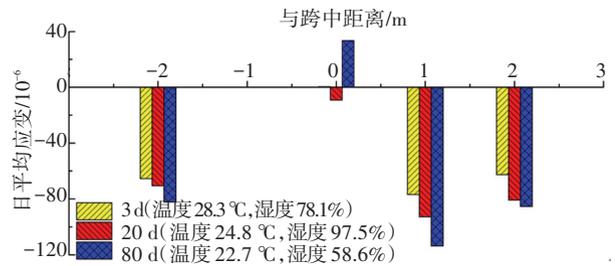


图 10 钢盖板纵桥向测点应变比较

Fig.10 Comparison of strain at different measurement points of steel deck in longitudinal direction

2.4 钢-UHPC 组合桥面板足尺节段收缩发展模式总结

根据收缩监测和分析结果,常温养护条件下组合桥面板中 UHPC 板的收缩发展过程可大致分为 4

个阶段,如图 11 所示,图中 I 是早期反应膨胀阶段,II 是自收缩为主的快速收缩阶段,III 是终凝硬化完成后的缓慢收缩阶段,IV 是受环境因素影响为主的稳定阶段。

第 I 阶段(0~10 h)是 UHPC 在浇筑完成后短时间内受水化反应的体积增大和放热的影响,发生了一定程度的膨胀,最大膨胀量约为 400×10^{-6} ~ 500×10^{-6} ;第 II 阶段(10~36 h)UHPC 从最大膨胀值处快速收缩,以自收缩为主,这一阶段内部的收缩量

达到最终收缩量的 70%以上,应变减小值约为 500×10^{-6} ;第 III 阶段(1.5~60 d)UHPC 内部自收缩速度减缓,受环境因素影响产生的应变值所占比重逐渐增加;UHPC 表面收缩速度快于内部,这一阶段的收缩量也高于内部,约为 100×10^{-6} ~ 200×10^{-6} ;第 IV 阶段(60~90 d)UHPC 收缩趋于稳定,自收缩基本完成,主要受环境因素变化的影响,应变值在某一小范围波动。整个过程中自收缩发展逐渐减缓,受环境因素影响的应变所占比重不断增加。

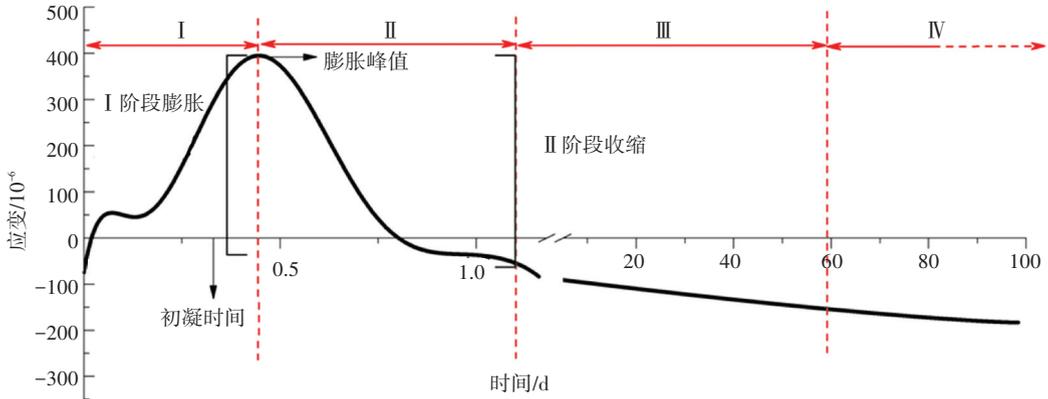


图 11 组合桥面板中 UHPC 收缩发展模式示意

Fig.11 UHPC shrinkage development stages in composite bridge deck

在收缩分布模式上,本试验中 UHPC 板的收缩分布有如下规律性:1)纵桥向收缩体现出靠近边缘区域的收缩量高于后浇湿接缝区域的特点。这一方面是因为桥面板试件体积较大,不同区域位置受到焊钉等的约束作用会有明显差异。文献[15]对使用装配式混凝土板的钢-混凝土组合桥面板的长期收缩效应进行试验研究,监测结果同样符合这一规律。另一方面是湿接缝区域配筋更密,且浇筑初期受到周围已初凝 UHPC 的约束,因此收缩量较小。2)UHPC 厚度方向上,靠近钢盖板处的收缩值更小。原因在于越靠近钢盖板处 UHPC 受到钢板和焊钉的约束作用越大,水分挥发也更少,因此收缩应变值较靠近 UHPC 上表面处更小。

3 带湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板收缩效应有限元分析

UHPC 收缩主要包含自收缩与干燥收缩^[16]。而自然条件下温度变化既会对自收缩产生影响,也会引起一定的干燥收缩,此外 UHPC 材料的膨胀系数也不稳定,这些变化规律需要通过大量的材料及构件试验才能得到精确的模型。目前相关研究还不充分。本文在常温监测结果的基础上建立了有限元模型来进一步分析含湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板收缩效应特征。分析中,温度变化对收缩发展的

影响部分不作考虑。UHPC 的早期力学本构及收缩特性均参考已有文献成果进行设置,分析结果可作为对收缩监测结果的定性补充,为将来的定量分析提出可行的有限元分析方法。

3.1 有限元模型及湿接缝模拟分析方法

通过 ABAQUS 建立含湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板试件模型。UHPC 板、钢结构分别采用 C3D8R 实体单元和 S4R 板单元模拟,钢筋采用 T3D2 桁架单元模拟,焊钉连接件采用 connector 单元模拟并考虑了刚度非线性。钢筋单元与 UHPC 体单元之间建立了 embedded(嵌入)约束,UHPC 板与钢盖板表面设置了“面-面”接触,根据《GB 50017—2017 钢结构设计标准》第 12.7.4 条,钢与混凝土之间摩擦系数可取 0.4。由于 UHPC 不含粗骨料,表面粗糙度更小,这里取界面摩擦系数为 0.3。法向设为“硬接触”。其他边界条件与监测试验一致。

收缩监测试验早期,钢-UHPC 组合桥面板中的 UHPC 分为两次浇筑,首先是非湿接缝区浇筑,然后是湿接缝区浇筑,两次浇筑相差 28 h。在基于显式动态分析法的有限元模拟分析中分别对上述两种状态进行建模,即不含湿接缝区域 UHPC 的组合桥面板模型 M1 和含湿接缝区域 UHPC 的组合桥面板模型 M2。M2 模型中湿接缝与周边区域接触面设置为绑定接触。由于实际试验中未观察到 UHPC 裂缝,因

此未考虑 UHPC 的材料塑性阶段,模拟分析中对两个模型的应变结果进行线性叠加来分析带湿接缝的钢-UHPC 组合板收缩效应发展规律,计算方法为

$$R(72\text{ h}) = R(M1) + R(M2) \quad (1)$$

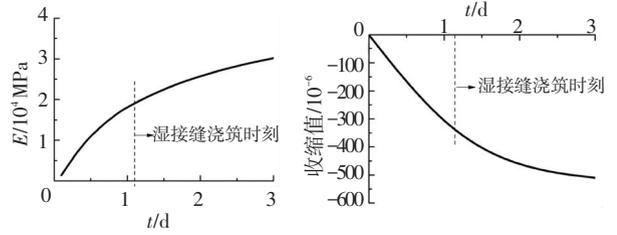
其中: $R(M1)$ 和 $R(M2)$ 分别为 $M1$ 和 $M2$ 模型收缩计算下的响应, $R(72\text{ h})$ 为初浇筑后 72 h 收缩计算的结构响应。

3.2 材料力学本构与 UHPC 收缩模型

模型中 UHPC 材料的强度等参考表 2 设定。UHPC 的线膨胀系数近似取 $11.76 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[16], 采用线弹性模型。UHPC 早期弹性模量持续变化, 模拟中参照欧洲 FIB 模式规范设定弹性模量变化曲线, 如图 12(a) 所示, 图中 t 为 UHPC 龄期。钢的弹性模量取 2.06×10^5 MPa, 线膨胀系数取 1.2×10^{-5} , 采用理想弹塑性模型, 屈服应力为 345 MPa。由于引起 UHPC 早期开裂的主要是初凝后的收缩, 因此本文针对初凝点附近最高膨胀值后的收缩进行模拟。

根据文献[17-19]对 UHPC 收缩发展的研究成果, 结合监测结果, 假定本试验中 UHPC 材料在 0~3 d 内的收缩发展曲线如图 12(b) 所示。UHPC 浇筑后初期收缩发展较快, 约 48 h 后收缩速率逐渐减缓。由于试验环境日温差和日湿度差均较大, 收缩

监测中的最值也较大, 因此模拟中的应变发展参照收缩日均值发展进行设置。通过降温模拟组合桥面板中 UHPC 的收缩, 降温曲线(温度-时间关系)根据收缩发展曲线进行设定。



(a) UHPC 弹性模量发展曲线 (b) UHPC 收缩发展曲线

图 12 计算中假定的 UHPC 收缩发展与弹性模量发展曲线
Fig. 12 UHPC shrinkage development and elastic modulus development curves assumed in calculation

3.3 钢-UHPC 组合桥面板收缩效应计算结果

3.3.1 组合板中 UHPC 收缩发展与分布

第 1 次 UHPC 浇筑后 28 h 内(湿接缝即将浇筑前)组合桥面板收缩效应为 $M1$ 模型计算结果, 第 1 次 UHPC 浇筑后 28~72 h(湿接缝浇筑完成后)组合桥面板收缩效应为 $M2$ 模型计算结果。0~3 d UHPC 收缩效应为两个模型计算结果的叠加。湿接缝浇筑前后 UHPC 组合桥面板纵向中轴线上的 UHPC 应变分布如图 13 所示, 应力分布如图 14 所示。

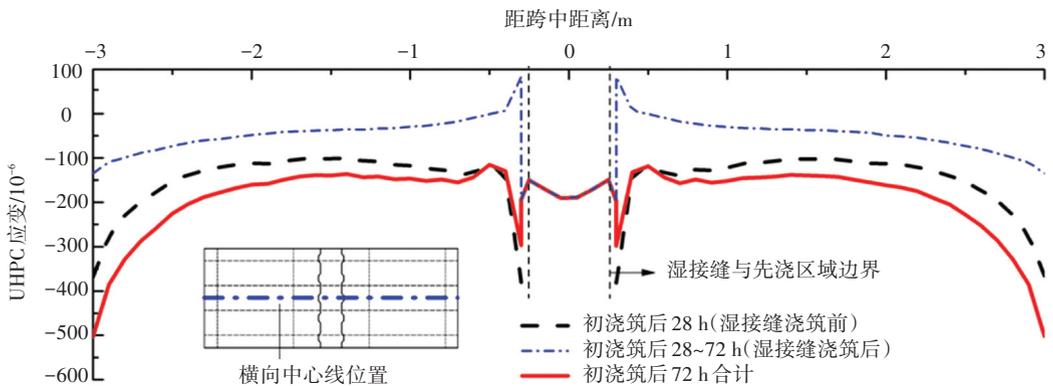


图 13 湿接缝浇筑前后 UHPC 横向中心线应变分布

Fig.13 Strain distribution of transverse centerline of UHPC before and after pouring of wet joint

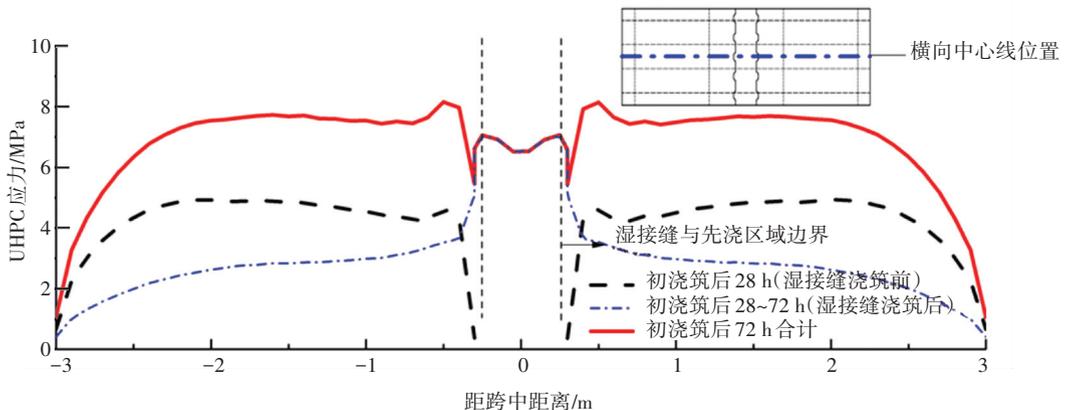


图 14 湿接缝浇筑前后 UHPC 横向中心线应力分布

Fig.14 Stress distribution of transverse centerline of UHPC before and after pouring of wet joint

根据计算结果,在湿接缝浇筑前(0~28 h),非接缝区域分别各自收缩,区域中心部分收缩量较小;由于焊钉布置不均匀,单个区域内收缩分布不完全对称。湿接缝浇筑后(28~72 h),非接缝区域中靠近湿接缝的部分收缩量较小,且在接缝周边产生了一定的拉应变。叠加后发现,3 d 时后浇区域靠近湿接缝处的收缩值小于后浇中心区域,原因是接缝处 UHPC 受到了周边非接缝区域的约束作用。从应力来看,与接缝相邻的区域的拉应力值明显高于周边区域,这说明收缩影响下接缝附近是组合板受力的薄弱部位。

3.3.2 组合板中钢盖板应变发展与分布

湿接缝浇筑前后钢盖板横向中心线应力分布如图 15 所示。湿接缝浇筑前,先浇部分各自中心区域钢板压应力最大。结合中心区域 UHPC 收缩更小的现象,分析原因是中心区域 UHPC 受钢板约束作用更大,因此引起的钢板压应力更大。由于非接缝

区域收缩引起的正弯矩次内力作用,在接缝浇筑前湿接缝区域钢板就受到压应力。湿接缝浇筑后,接缝处钢板则由于 UHPC 收缩而受压。

初浇筑 3 d 后,湿接缝区域钢板上压应力达到 22 MPa,仍然明显小于周边区域钢板。这说明湿接缝区域内部由于受到密配钢筋和先浇 UHPC 的约束作用,引起的钢板次内力相比周边区域会更小。

将计算结果与试验结果定性比较,可以发现计算所得收缩效应的分布规律与试验结果基本一致,这主要体现在:1) UHPC 收缩值在组合板边缘区域较高,靠近中心区域较低;2) 接缝浇筑前,接缝区域钢板受非接缝区域收缩影响产生压应力;3) 收缩次内力引起的接缝区域钢板压应变比先浇部分中心区域更小。计算所得接缝区域钢板受压应力高于监测结果,主要原因可能包括计算模型中未能考虑 UHPC 中膨胀剂的作用,接缝区域 UHPC 早期的膨胀抵消了一部分钢板的压应力。

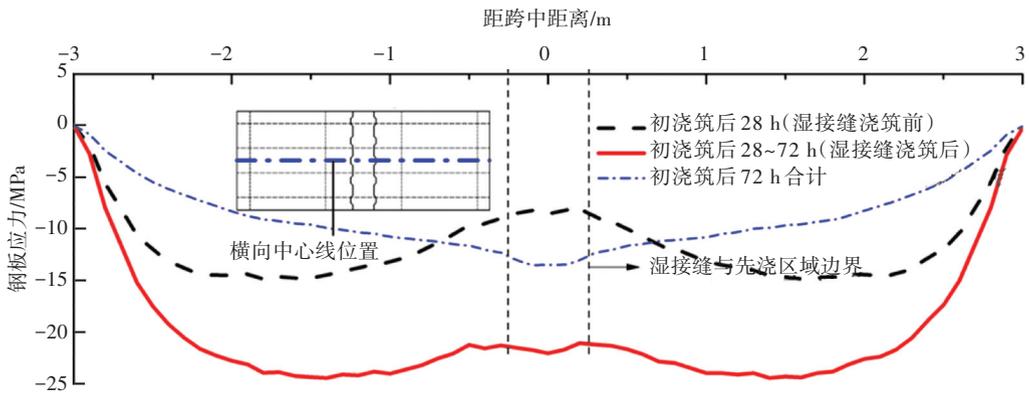


图 15 湿接缝浇筑前后钢盖板横向中心线应力分布

Fig.15 Stress distribution of transverse centerline of steel deck before and after pouring of wet joint

4 结论

本文结合某桥钢-UHPC 组合桥面板夏季施工及养护实际情况,通过对自然环境常温养护下的钢-UHPC 组合桥面板足尺模型的静置收缩效应监测,考察了夏季高温养护环境下组合桥面板中收缩效应发展特点;同时采用有限元分析探讨了 UHPC 组合桥面板收缩次内力的分布特点。得出以下结论:

1) 在最高温度 37.8 °C,最大温差 20 °C 左右,湿度 80% 左右的环境条件下,UHPC 初凝时间约为 6 h,早期收缩在 24 h 左右基本完成。60 d 后收缩量约占监测全程收缩量的 30%,各测点全程收缩量中位数为 700×10^{-6} ;后浇湿接缝区域的收缩量小于边缘区域;越靠近 UHPC 表面处的收缩越显著。浇筑龄期差为 28 h 的情况下,湿接缝与周边 UHPC 区域的结合较好,未观察到收缩裂缝。

2) 根据监测和分析结果,钢-UHPC 组合桥面板的收缩发展大体可以分为 4 个阶段,包括早期膨胀(0~10 h)、初凝硬化后显著收缩(10~36 h)、缓慢收缩(36~60 d)以及稳定阶段(60 d 以后)。

3) 根据试验和有限元模型计算结果,对于湿接缝浇筑前的两块 UHPC 板,UHPC 收缩在 UHPC 板的边缘较大,靠近 UHPC 板中心位置更小;收缩次内力引起的钢板压应变在板边缘较小,板中心位置较大。对于湿接缝浇筑后的整块组合板,接缝处 UHPC 收缩与钢板压应变均小于周边区域。湿接缝处密集配筋对该区域 UHPC 收缩的约束以及周边 UHPC 收缩发展的影响是主要原因。

4) 通过有限元模拟分析可知,组合桥面板收缩效应及龄期差在湿接缝交界处造成了较为明显的应力变化,在湿接缝边界附近 UHPC 拉应力有增加的趋势;接缝区域钢板在接缝浇筑前已受到压应力作

用,接缝浇筑后钢板在湿接缝交界对应位置也存在着应力转折点。可见收缩影响下湿接缝边界附近是组合板受力的薄弱部位。

参考文献

- [1] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J].材料导报,2017,31(23):41
SHAO Xudong, QIU Minghong, YAN Banfu, et al. A review on the research and application of ultra-high performance concrete in bridge engineering around the world[J]. Materials Guide, 2017, 31(23): 41. DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2017.023.004
- [2] SHAO Xudong, WANG Wenqian, GU Jiekai, et al. Experiment on assembled composite bridge deck system composed of fiber concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(6): 61. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.06.012
- [3] CHEN Shiming, HUANG Yang, GU Ping, et al. Experimental study on fatigue performance of UHPC-orthotropic steel composite deck [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 142: 1. DOI:10.1016/j.tws.2019.05.001
- [4] ZHAO Qiu, DU Yang, PENG Yunfan, et al. Shear performance of short channel connectors in a steel-UHPC composite deck [J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(1): 300. DOI:10.1007/s13296-019-00289-1
- [5] HABEL K, VIVIANI M, DENARIÉ E, et al. Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC)[J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36: 1363. DOI:10.1016/j.cemconres.2006.03.009
- [6] 陈宝春,李聪,黄伟,等.超高性能混凝土收缩综述[J].交通运输工程学报,2018,18(1):16
CHEN Baochun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 16
- [7] 李逸翔.膨胀剂对约束条件下 UHPC 早期抗裂性能影响的试验研究[J].结构工程师,2020,36(1):137
LI Yixiang. Experimental study on the effect of expansion agent on early crack resistance ability of UHPC under restraint[J]. Structural Engineers, 2020, 36(1): 137. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2020.01.019
- [8] ZHU Yanping, ZHANG Yang, HUSAM H, et al. Experimental study and theoretical prediction on shrinkage-induced restrained stresses in UHPC-RC composites under normal curing and steam curing[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 110:1. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103602
- [9] 崔存森. 养护制度对超高性能混凝土收缩徐变及其基本力学性能的影响[D].北京:北京交通大学,2018
CUI Cunsen. Influence of curing regime on shrinkage, creep and basic mechanical properties of ultra-high performance concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018
- [10] 王俊颜,边晨,肖汝诚,等.常温养护型超高性能混凝土的圆环约束收缩性能[J].材料导报,2017,31(23):52
WANG Junyan, BIAN Chen, XIAO Rucheng, et al. Restrained shrinkage behavior of ultra high performance concrete without thermal curing [J]. Materials Reviews, 2017, 31(23): 52. DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2017.023.006
- [11] 张渤雨. 后结合钢-UHPC 组合桥面板收缩效应及静力性能试验研究[D].上海:同济大学,2020
ZHANG Boyu. Experimental study on shrinkage effect and static behavior of post-combined steel-UHPC composite deck [D]. Shanghai: Tongji University, 2020
- [12] 钟扬,吴锋,戴磊.超高性能混凝土湿接缝梁抗弯性能试验[J].水运工程,2020(7):41
ZHONG Yang, WU Feng, DAI Lei. Experiment of bending performance of beam with ultra-high performance concrete wet-joint [J]. Port & Waterway Engineering, 2020(7): 41. DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20200706.002
- [13] 王瑜. 高强补偿收缩砼在桥面现浇湿接缝中的试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2008
WANG Yu. High-intensity shrinkage compensation cast-in-place concrete in the bridge deck joints wetlands pilot study [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008
- [14] 李扬,马磊,王浩.上海临港大桥新建主桥设计[J].世界桥梁,2019,47(3):1
LI Yang, MA Biao, WANG Hao. Design of newly-built main bridge of Maogang Bridge in Shanghai[J]. World Bridges, 2019, 47(3): 1
- [15] HUANG Dunwen, WEI Jun, LIU Xiaochun, et al. Experimental study on long-term performance of steel-concrete composite bridge with an assembled concrete deck[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214:606. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.167
- [16] 胡功球. 不同养护条件下超高性能混凝土(UHPC)的收缩性能研究[D].长沙:湖南大学,2015
HU Gongqiu. Research on the shrinkage performance of ultra high performance concrete under different curing condition [D]. Changsha: Hunan University, 2015
- [17] ZHANG Xiuzhen, LIU Zhichao, WANG Fazhou. Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226:462. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.177
- [18] SOLIMANA M, NEHDI M L. Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age [J]. Materials and Structures, 2011, 44(5): 885. DOI:10.1617/s11527-010-9670-0
- [19] HUANG Hao, YE Guang. Examining the “time-zero” of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 97: 110. DOI:10.1016/j.cemconres.2017.03.010

(编辑 魏希柱)