

# 焊钉布置对钢-超高性能混凝土组合桥面板收缩效应影响

徐晨<sup>1</sup>, 卢毅<sup>1</sup>, 何武超<sup>2</sup>, 马翥<sup>2</sup>

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

**摘要:** 为探究不同焊钉布置对钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面板收缩效应的影响规律,进行了常温养护条件下焊钉间距分别为 200 mm 和 300 mm 的足尺节段组合桥面板收缩监测试验,并利用有限元分析软件对试验模型进行了收缩模拟,在此基础上开展了不同焊钉间距下组合桥面板收缩效应的参数化分析。试验监测结果表明:试验中 UHPC 初凝时间约为 17 h。钢-UHPC 组合桥面板边缘区域 UHPC 收缩量较中心区域更大,前 72 h 最大收缩量约为  $450 \times 10^{-6}$ ;当焊钉间距从 200 mm 增加到 300 mm 后,UHPC 受整体约束减弱,其中钢板约束作用下降,最大压应变减小约 51.6%;钢筋约束作用增强,最大压应变值增加约 42.9%。有限元分析表明:UHPC 与钢板端部界面处应变差增加 20.9%,滑移最大处焊钉剪应力增加 64.7%。参数化分析可知:当焊钉间距从 100 mm 增加至 400 mm 时,跨中 UHPC 拉应力减小 3.7%;跨中钢板压应力减小 17.8%,钢筋压应力增加 86.3%。以上结果表明焊钉间距增加使钢与 UHPC 之间组合作用减弱的同时,引起了结构次内力的分布变化,UHPC 与钢结构的次内力减小,钢筋承担的约束作用增强,压应力增大。适当地增加焊钉间距可以减小收缩引起 UHPC 拉应力和钢结构次内力,但需要注意组合作用减弱对力学性能的影响。

**关键词:** 桥梁工程;钢-超高性能混凝土组合桥面板;焊钉间距;收缩监测;有限元模拟;参数分析

中图分类号: U433.33

文献标志码: A

## Influence of Welding Stud Arrangement on Shrinkage of Steel-Ultra-High Performance Concrete Composite Bridge Deck

XU Chen<sup>1</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, HE Wuchao<sup>2</sup>, MA Biao<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(51978501)

第一作者: 徐晨(1982—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为钢与组合结构桥梁。

E-mail: xuchenprc@tongji.edu.cn

**Abstract:** In order to explore the influence of different layouts of welding stud on the shrinkage of steel-ultra-high performance concrete (UHPC) composite bridge slabs, a full-scale segmental composite bridge slab shrinkage monitoring test with a welding stud spacing of 200 mm and 300 mm under normal temperature curing conditions was conducted. Finite element analysis software was used to simulate the shrinkage of the test model. based on which, the parametric analysis of the shrinkage of the composite bridge deck at different welding stud spacing was performed. The test monitoring results show that the initial setting time of UHPC in the test is about 17 hours. The UHPC shrinkage in the edge area of the steel-UHPC composite bridge deck is larger than that in the central area. The maximum shrinkage in the first 72 hours is about  $450 \times 10^{-6}$ . When the stud spacing increases from 200 mm to 300 mm, the UHPC is weakened by the overall restraint, the restraint effect of the steel plate decreases, and the maximum compressive strain is reduced by about 51.6%. The restraint effect of the reinforcing steel is strengthened, and the maximum compressive strain value increases by about 42.9%. The finite element analysis shows that the strain difference at the interface between UHPC and the end of the steel plate increases by 20.9%, and the shear stress of the welding stud at the maximum slippage increases by 64.7%. The parametric analysis shows that when the stud spacing increases from 100 mm to 400 mm, the UHPC tensile stress in the mid-span decreases by 3.7%. The compressive stress of the steel plate in the mid-span decreases by 17.8%, and the compressive stress of the steel bar increases by 86.3%. The above results show that the increase of the welding stud spacing weakens the combined effect between steel and UHPC, and at the same time causes the distribution of the secondary internal force of the structure. The secondary internal force between UHPC and the steel structure decreases, the restraining effect of the steel bars increases,



论文  
拓展  
介绍

and the compressive stress increases. Properly increasing the stud spacing can reduce the UHPC tensile stress and the secondary internal force of the steel structure caused by shrinkage, but it is necessary to pay attention to the weakening of the combined effect on the mechanical properties.

**Key words:** bridge engineering; steel-ultra-high performance concrete composite bridge deck; stud spacing; shrinkage monitoring; finite element simulation; parametric analysis

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型水泥基复合材料, 其立方体抗压强度可达 150 MPa, 单轴抗拉强度可达 8 MPa 甚至更高<sup>[1]</sup>。钢-UHPC 组合桥面板通过焊钉等连接件将 UHPC 板与正交异性钢桥面板相结合, 与传统正交异性钢桥面相比, 具有以下特点<sup>[2]</sup>: ①钢桥面与 UHPC 板组合可以显著提升桥面板刚度, 从而降低钢桥面铺装层病害的风险, 延长铺装层的使用寿命。②UHPC 板与钢桥面共同受力, 降低局部车轮荷载引起的钢桥面疲劳荷载幅值, 使桥面系整体和局部性能提升, 从而降低正交异性钢桥面疲劳开裂风险。③相比普通混凝土, UHPC 的强度和韧性均更高, 耐久性更好, 在荷载作用下能承受更高的应力与变形。④UHPC 层相比普通混凝土层的厚度更小, 有利于减小桥面系的自重; 同时 UHPC 中不含粗骨料, 结构致密性更好, 因此相比普通混凝土的耐久性更好。

虽然与普通混凝土相比, UHPC 在力学性能和耐久性能上进步显著, 但其仍然存在养护运营期间的收缩开裂问题。UHPC 水胶比低、粗集料占比小, 集料对基体收缩的限制作用明显降低, 因此其早期收缩较常规混凝土发展更快, 且收缩量更大<sup>[3]</sup>。UHPC 收缩由自收缩和干燥收缩组成, 且早期收缩以自收缩为主<sup>[4]</sup>。高温蒸养、材料改性等可以改善 UHPC 早期收缩发展的速度, 减小其收缩量。Soliman 等<sup>[5]</sup>在不同养护温度 (10 °C、20 °C、40 °C) 下监测了 UHPC 早期的收缩发展, 发现养护温度升高时 UHPC 早期收缩速度明显加快, 且抗压强度有所提高。邓宗才等<sup>[6]</sup>研究了膨胀剂、减缩剂对 UHPC 自收缩性能的影响, 结果表明 28 d 时最佳膨胀剂和减缩剂掺量下 UHPC 的减缩率分别达 93.6 % 和 43.0 %。在工程实际中, 高温蒸养增加了施工的难度; 通过添加膨胀剂来减少材料收缩、实现常温养护

正受到广泛关注。

在钢-UHPC 组合桥面板中, UHPC 收缩受到连接件、钢筋以及钢结构的共同约束, 引发结构内力和变形<sup>[7]</sup>。这有可能导致 UHPC 受拉开裂, 影响结构的受力性能和耐久性。焊钉连接件由于施工简单, 且受剪不需要考虑方向性而成为最常用的剪力连接结构之一<sup>[8]</sup>。目前已有学者对于焊钉对组合桥面中收缩效应的影响进行了研究。赵辛玮等<sup>[9]</sup>通过钢-UHPC 组合桥面板节段足尺收缩试验和有限元数值模拟, 研究了 UHPC 收缩对焊钉受力的影响, 发现 UHPC 收缩对桥面板的边侧焊钉受力较为不利。然而焊钉约束对桥面板收缩效应下的 UHPC 次内力、钢板及钢筋应力的影响较为复杂, 当焊钉布置变化时组合板由收缩产生的结构次内力分布特征尚未明确, 这是研究钢-UHPC 组合桥面板收缩特点及机理的重要基础。

本文以实际工程为背景, 结合钢-UHPC 组合桥面板夏季高温施工特点, 设计制作钢-UHPC 组合桥面板足尺节段模型进行自然环境常温养护条件下的收缩监测试验, 考察不同焊钉布置情况下组合桥面中 UHPC、钢结构和钢筋等构件的应变发展与分布特点, 探究各构件对 UHPC 约束作用的变化; 并在此基础上建立考虑变弹模及塑性损伤材料本构的有限元模型分析焊钉布置对 UHPC 组合桥面板收缩效应的影响规律, 探究焊钉约束变化对组合桥面板收缩次内力分布的影响。研究结果为实际工程中钢-UHPC 组合桥面板焊钉间距与数量的合理化设计积累了监测数据和分析基础。

## 1 收缩监测试验设计与过程

### 1.1 试件设计

根据实桥工程背景设计了焊钉间距与数量不同的两个钢-UHPC 组合桥面板足尺节段试件, 如图 1 所示。其中板件厚度、加劲肋构造、纵横肋间距等均参照背景工程中构件尺寸。试件编号分别为 H200 和 H300, 对应焊钉间距分别为 200 mm 和 300 mm。试件长 7 000 mm, 宽 1 960 mm, 高 488 mm; 加劲肋高 180 mm, 厚 11 mm, 间距 400 mm; 横肋间距 2 000 mm。UHPC 板与钢盖板厚度分别为 60 mm 与 12 mm, 两者接触表面未做特殊处理。UHPC 板内钢筋直径均为 16 mm, 间距 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 15 mm 和 13 mm。试件中焊钉直径为 13 mm, 高度为 40 mm。

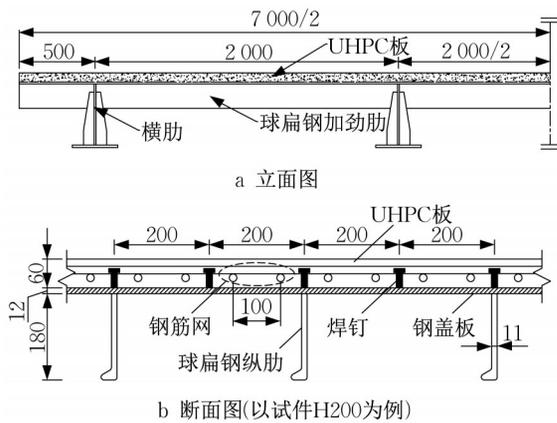


图1 试件构造示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of specimens (unit: mm)

## 1.2 材性试验

试验所用UHPC由粉体材料和外掺定制特种钢纤维组成。粉体材料组分包含水泥、硅灰、矿粉、粉煤灰、石英粉、降粘剂、石英砂、减水剂、流变稳定剂等。钢纤维的体积掺量为2.3%。材性试件养护条件与桥面板试件相同。根据规范<sup>[10]</sup>分别测量UHPC

养护7 d与28 d时的材料基本力学性能,材性试验结果如表1所列。图2所示为测得28 d龄期UHPC的平均拉伸应力-应变曲线,曲线峰值点对应UHPC极限抗拉强度与抗拉应变,列于表1,材料的拉伸硬化应变达 $3\ 010\times 10^{-6}$ 。根据规范<sup>[11]</sup>测得钢板与钢筋的材性试验结果如表2所列。

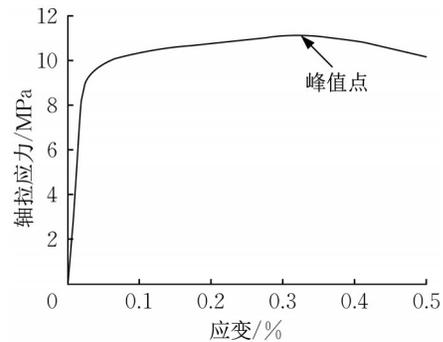


图2 28 d龄期UHPC轴拉应力-应变曲线

Fig. 2 Uniaxial tensile stress-strain curve of 28 d old UHPC

表1 UHPC材性试验结果

Tab. 1 Material property 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/GPa	抗折强度/MPa	初裂抗拉强度/MPa	初裂应变/ $10^{-6}$	极限抗拉强度/MPa	极限抗拉应变/ $10^{-6}$
7	100.8	94.1	57.0	21.2	8.3	174	9.7	2 650
28	127.4	109.0	47.9	25.3	8.5	190	11.0	3 200

表2 钢筋和钢板材性试验结果

Tab. 2 Material property test results of rebar and steel plates

构件	钢筋直径或钢板厚/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
钢筋	16	480	689	209
钢板	11	455	607	227
	12	411	547	214

## 1.3 测点布置与试验过程

UHPC收缩测试的应变计包括埋入UHPC内部的光纤应变计、光纤温度计、测量钢筋应变的振弦应变计以及粘贴在钢板表面的振弦应变计。H200与H300试件的应变计布置位置相同,如图3所示。图中,R1和R3钢筋计并非位于1-1和3-3截面,仅借1-1和3-3截面标注了钢筋应变计的横向和竖向位置。埋入式光纤应变计的布置高度与钢筋平齐,距钢板底板距离约为25 mm。对于光纤应变计的监测数据,已在试验室中进行了温度标定,并通过式(1)计算消除温度变化产生的应变影响。其中 $\epsilon_c$ 为去除温度应变后的应变值, $\epsilon_{c,t}$ 为包含温度应变的总应变值, $k$ 为

标定得到的温度系数(单位温度变化引起的UHPC应变变化), $\Delta T$ 为相对零时刻的温度变化量。

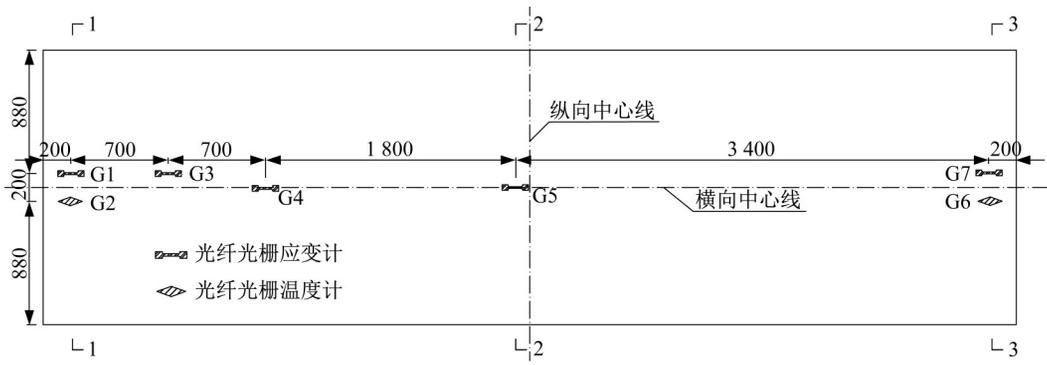
$$\epsilon_c = \epsilon_{c,t} - k \cdot \Delta T \quad (1)$$

试件支承情况如图4所示,在组合桥面板的下面沿纵横向垫置木块,减少徐变对收缩监测的影响。UHPC浇筑完成时刻的环境温度为23.1℃,湿度为64%。浇筑完成约1 h后对UHPC表面洒水并覆盖塑料薄膜进行养护,静置于室外环境中持续监测。

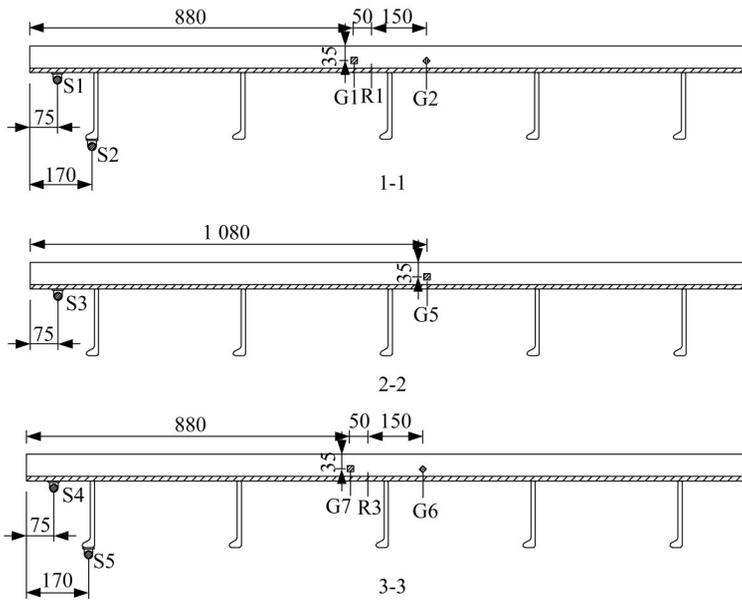
## 2 收缩监测结果与分析

### 2.1 温度与湿度监测结果

图5为环境温度和湿度的日监测结果。图6为H200试件UHPC内部G2测点的温度日监测结果。监测时间约为90 d。UHPC内部的日平均温度变化呈现先上升后下降的趋势,与环境温度的变化趋势相一致;但UHPC内部温度的日最大值更大。监测过程中环境温度变化范围约为17℃~42℃,UHPC内部温度变化范围约为17℃~55℃。



a UHPC埋入式光纤应变计布置



b 组合桥面板截面传感计布置

图3 试件应变计布置示意(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of layout of specimen strain gauges (unit: mm)

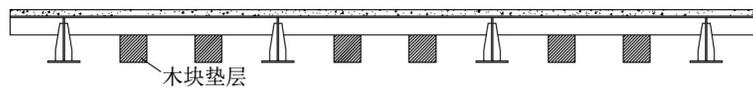


图4 组合桥面板边界布置示意(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of boundary layout of combined bridge deck (unit: mm)

### 2.2 UHPC收缩监测结果与分析

分别以H200和H300桥面板浇筑完成时刻作为各自的监测时间零点和应变零点。表3所列前72 h和90 d内主要监测结果。初凝时间判定在本文后续2.3节中进行说明。根据监测结果,组合桥面板UHPC在前72 h内最大收缩量达到 $450 \times 10^{-6}$ ,发生在H200试件的G3测点。收缩分布总体表现为中心区域(G5测点)收缩较小,靠近边缘区域收缩较大。这是由各区域受焊钉约束作用差异和与环境接触面积不同导致。

为了对比H200和H300试件UHPC收缩发展

过程,以G4测点为例,绘制UHPC前72 h应变发展如图7a所示。其中正值表示应变增加,负值表示应变减小(与应变零点相比较)。每天的监测结果由于受到环境温度和湿度变化的影响,存在一定的波动,因此计算UHPC应变的日均值和最小值并绘制发展过程如图7b所示。

根据监测结果,前72 h H200和H300试件的UHPC应变发展趋势较为一致,体现为以24 h为周期呈现相似的波动,这主要是受到日间温度变化的影响。H300试件UHPC早期膨胀量更大,且前72 h应变值整体高于H200试件。考察长期监测结果,浇

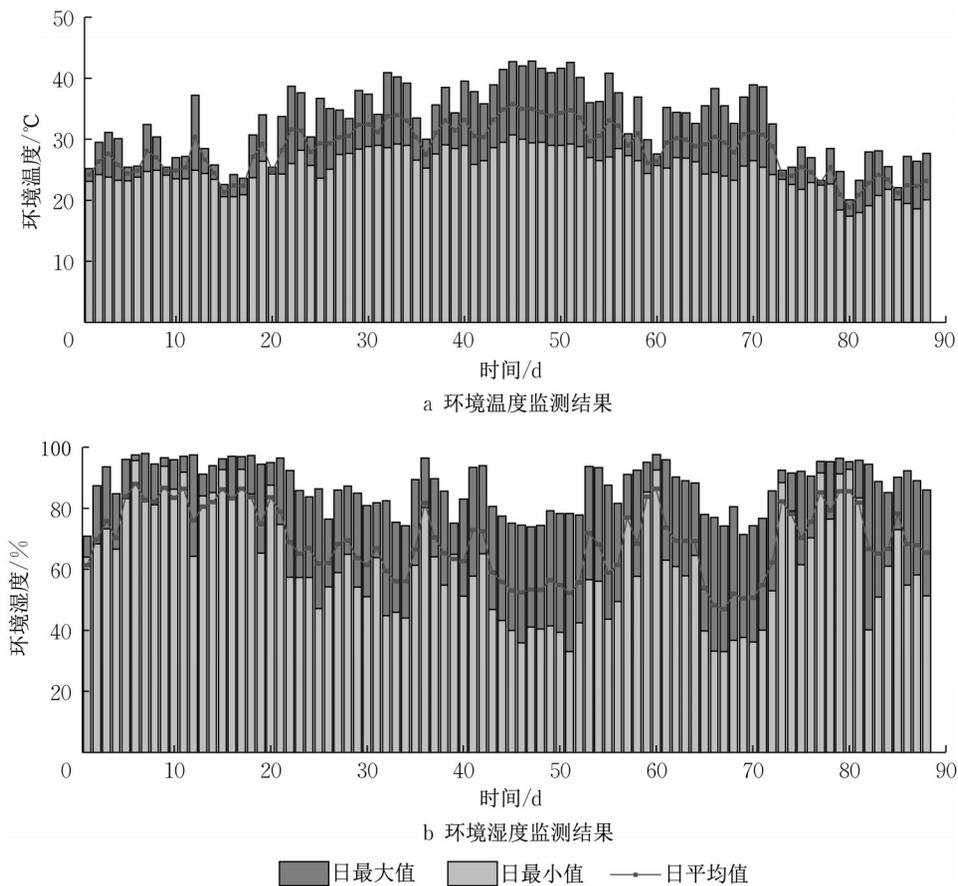


图5 环境温湿度变化结果

Fig. 5 Environmental temperature and humidity change results

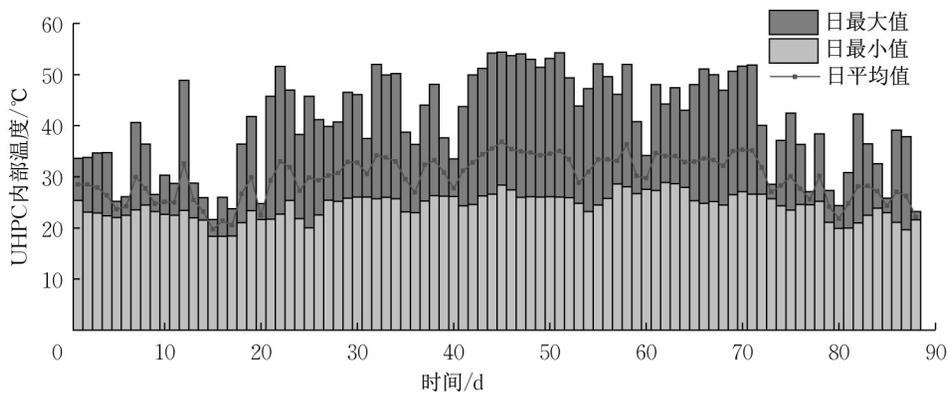


图6 UHPC内部温度变化(H200-G2测点)

Fig. 6 Internal temperature change of UHPC (H200-G2 measuring point)

筑完成后10 d内H300试件比H200试件的UHPC日均应变值更高,但之后H300试件UHPC日均收缩值超过H200试件。这说明焊钉间距增大后,UHPC早期膨胀值更高,后期的收缩值也更高,桥面结构对UHPC变形的约束程度下降。

对比图6a和图7,第12 d环境温度和UHPC内部温度均明显升高,对应的图8b中第12天UHPC压应变最值和均值均显著增加,说明环境因素对

UHPC收缩早期影响显著。实际上,监测所得的UHPC应变为总应变值。UHPC收缩产生自由应变,同时钢筋和钢桥面的约束作用会导致次内力应变。此外,UHPC的应变还会受环境温度影响:一方面,高温会加快UHPC内部水化反应;另外,温度变化又会导致UHPC发生温度变形。对组合桥面板中UHPC收缩进行机理分析时,需综合考虑这些因素的影响。

表3 H200与H300试件UHPC应变监测结果统计  
Tab. 3 Statistics of UHPC strain monitoring results of H200 and H300 specimens

		初凝时应变值 (ST1)	前72 h最小应变值 (ST72 h)	前72 h最大收缩量 (ST72 h-ST1)	90 d最小应变值 (ST90 d)	90 d最大收缩量 (ST90 d-ST1)
G1	H200	-175	-375	200	-400	225
	H300	-25	-175	150	-240	215
G3	H200	0	-450	450	-700	700
	H300	75	-150	225	-320	395
G4	H200	0	-275	275	-500	500
	H300	-110	-250	140	-400	290
G5	H200	-30	-60	30	-60	30
	H300	0	-50	50	-125	125
G7	H200	-80	-175	95	-400	320
	H300	75	-210	285	-450	525

10<sup>-6</sup>

注:最大收缩量=最小应变值-初凝时应变值。表中应变正负值分别表示应变相对浇筑完成时刻增加和减小。

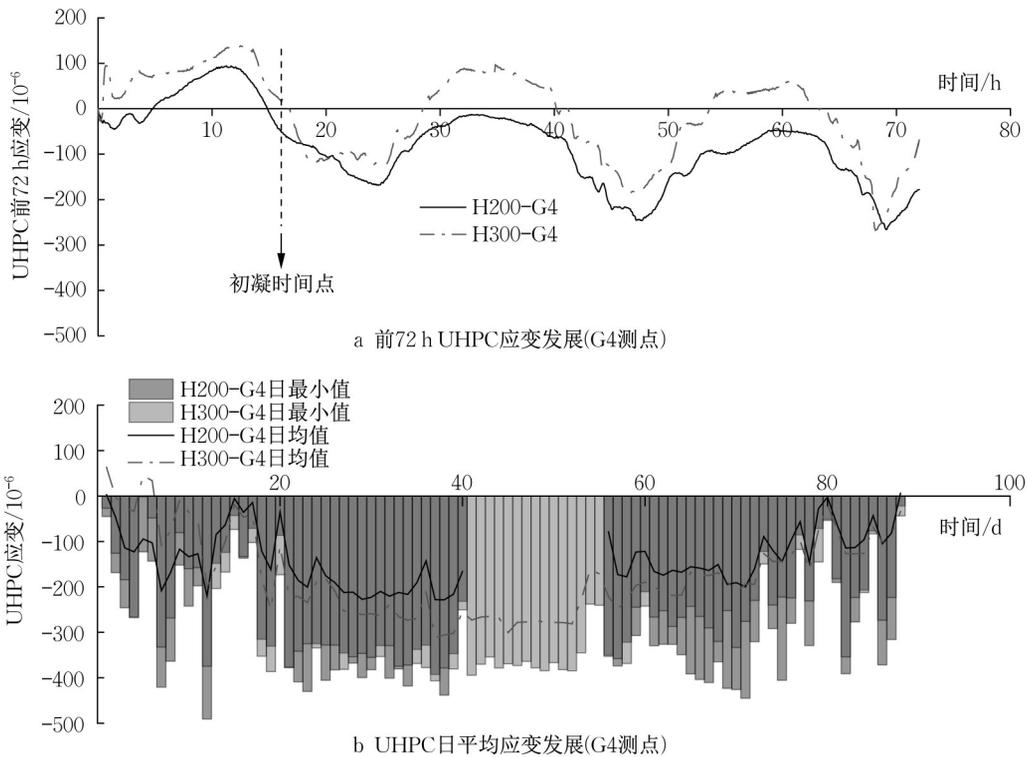


图7 UHPC应变监测结果

Fig. 7 Strain monitoring results of UHPC

2.3 钢筋应变监测结果与分析

分别以H200和H300桥面板浇筑完成时刻作为各自的时间零点和应变零点,计算钢筋测点各时刻的应变。绘制横向钢筋R2测点前72 h应变变化如图8a所示,并计算每天应变的均值和最小值如图8b所示,其中正值表示受拉,负值表示受压。

根据钢筋监测结果,浇筑完成初期钢筋应变值在0附近波动,约17 h开始钢筋逐渐受压。说明此时UHPC开始对钢筋产生次内力作用,可以推断UHPC的初凝时间在17 h左右。前72 h H300试件

的钢筋压应变增长比H200试件更快。从长期监测结果来看,监测后期H300试件的钢筋压应变值明显高于H200试件,最大压应变值约比H200试件高出42.9%。说明焊钉约束作用减弱导致钢筋承担了更多对UHPC收缩的约束,收缩引起的钢筋次内力增加。

2.4 钢结构应变监测结果与分析

分别以H200和H300桥面板浇筑完成时刻作为各自的时间零点和应变零点,绘制两试件3-3截面钢板S4测点和钢肋S5测点应变发展均值与最值对比

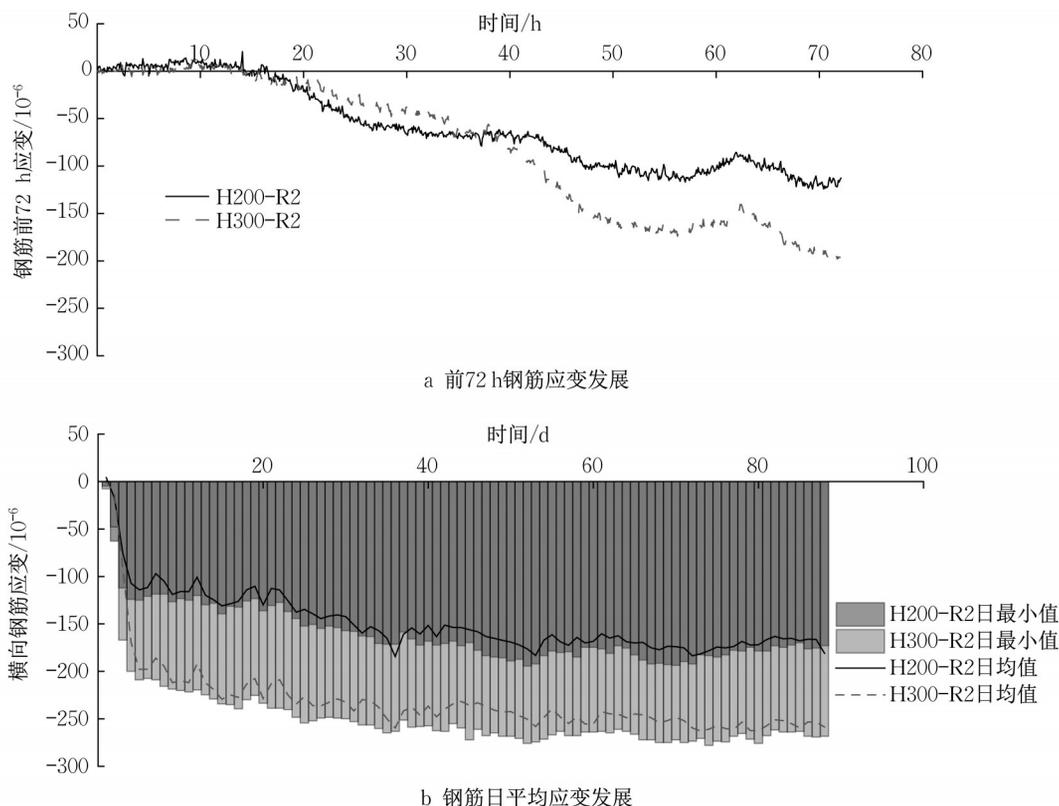


图8 钢筋应变监测结果

Fig. 8 Monitoring results of rebar strain

图分别如图9a和图9b所示,其中正值表示受拉,负值表示受压。

监测过程中钢板下表面主要受压,而钢筋下表面主要受拉,这表明约束条件下UHPC收缩对结构产生了正弯矩作用。同一时刻,H200试件钢板上的压应变值和钢筋上的拉应变值均明显高于H300试件。H300试件钢板最大压应变相比H200试件减小了51.6%,钢筋最大拉应变减小了75.9%。说明焊钉间距增加、数量减少导致钢桥面板对UHPC收缩的约束作用显著减弱,收缩引起的钢结构次内力减小。

### 3 基于收缩监测试验的有限元模拟

本文基于UHPC材料弹塑性损伤和早期弹性模量变化建立有限元模型,并采用二次开发子程序模拟收缩连续发展。本文数值模拟是对监测试验的重要补充,并不是对监测过程的精确模拟。实际上,常温养护组合板UHPC收缩受到环境温湿度变化、材料弹性模量及早期膨胀系数变化等诸多因素影响。数值分析是不考虑温湿度影响下对钢-UHPC组合桥面板的收缩效应进行定性模拟,为总结收缩效应

规律奠定基础。

#### 3.1 有限元模型与材料本构

通过ABAQUS软件建立试验中组合桥面板的有限元模型,其中UHPC板、钢筋、钢结构分别采用C3D8R单元、T3D2单元和S4R单元模拟,焊钉采用Connector单元模拟并考虑了刚度非线性。考虑UHPC与钢盖板之间的界面切向摩擦系数为0.3,法向为“硬接触”。有限元模型编号为HS200与HS300,分别对应试件H200与试件H300。边界条件与试验静置时保持一致。有限元模型示意如图10所示。

UHPC抗压和抗拉强度等参考表1中材性试验结果。材料属性中参考文献[12]考虑UHPC弹塑性损伤,以模拟UHPC可能的受拉开裂特征。

参照欧洲FIB模式规范与材性试验结果,浇筑完成初期UHPC弹性模量的变化按图11进行设置。由于试验中的组合桥面UHPC收缩受到了构件约束作用,且发展过程中受到了环境温湿度等的影响,因此模拟中难以直接拟合采用。因此本文结合试验监测结果,基于不受约束时UHPC收缩量与试验基本一致的前提,参考Zhang<sup>[3]</sup>、Soliman<sup>[5]</sup>、Huang<sup>[13]</sup>等学者的研究成果,对UHPC的收缩发展进行合理假

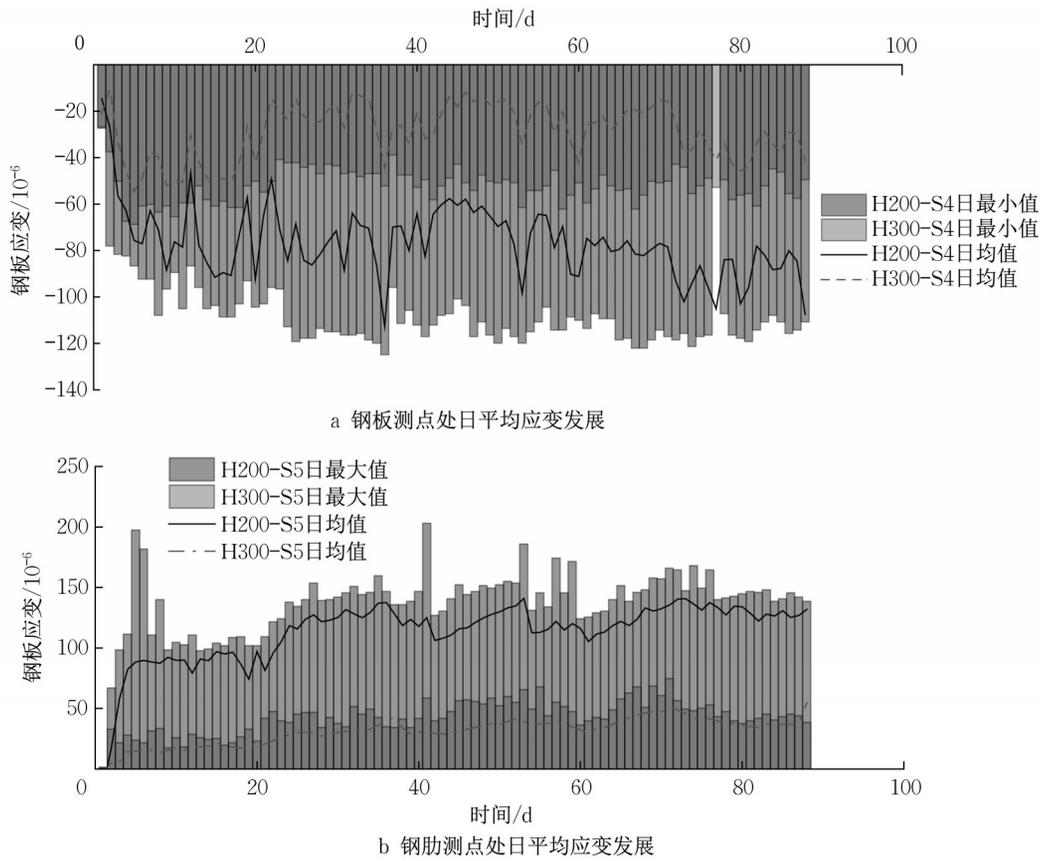


图9 钢结构应变监测结果

Fig. 9 Monitoring results of steel structure strain

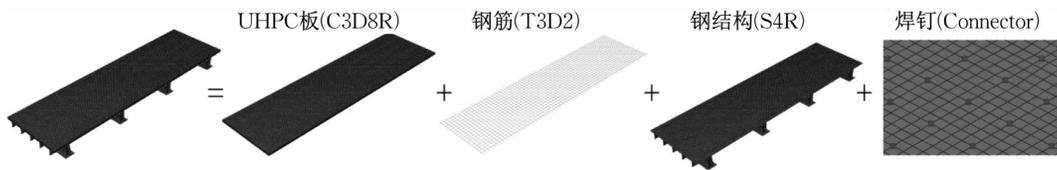


图10 有限元模型示意

Fig. 10 Schematic of finite element model

定。有限元分析模型中引入了如图12所示的UHPC收缩发展特征曲线。

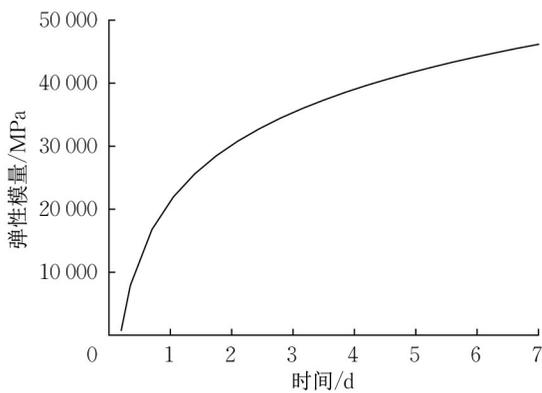


图11 UHPC弹性模量变化

Fig. 11 Elastic modulus change of UHPC

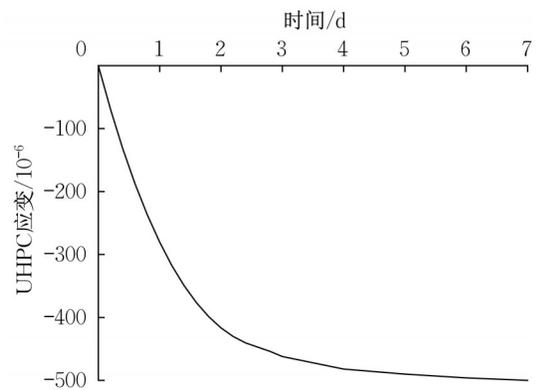


图12 UHPC收缩随时间发展

Fig. 12 Shrinkage development of UHPC over time

UHPC其他材性参数参照文献[14]设置。钢板、钢筋本构关系采用基于材性试验结果的双折线

弹塑性模型,泊松比与弹性模量分别设置为 0.3 与 210 GPa。焊钉剪切刚度采用基于焊钉推出试验结果<sup>[15]</sup>的非线性模型定义,其中弹性段剪切刚度约为 353 kN·mm<sup>-1</sup>。

### 3.2 有限元模拟结果验证

表 4 所列为计算和试验结果的对比。其中钢板根据材性试验中测得的弹性模量换算得到相应的应力值。根据表中结果,UHPC、钢筋与钢结构上测点计算值与试验值的误差均在 10% 以内。此外,结合图 13a 的 UHPC 应变计算分布与试验监测分布规律一致。可见,计算与试验结果能够较好吻合。

表 4 各类型测点有限元计算值与试验值比较

Tab. 4 Comparison of finite element calculation values and test values of various types of measuring points

测点类型与位置	数值类型	H200 试件	H300 试件
UHPC: G7(端部)	应变试验值/ $10^{-6}$	-292.12	-371.37
	应变计算值/ $10^{-6}$	-277.08	-340.30
	应变相差/%	-5.15	-8.37
钢筋: R1(端部纵向)	应力试验值/MPa	-58.80	-66.59
	应力计算值/MPa	-63.63	-71.02
	应力相差/%	8.21	6.65
钢板: S4(底面端部)	应力试验值/MPa	-13.44	-7.70
	应力计算值/MPa	-13.02	-7.29
	应力相差/%	-3.16	-5.41
钢筋: S5(底面端部)	应力试验值/MPa	18.21	3.19
	应力计算值/MPa	19.70	3.44
	应力相差/%	8.18	7.84

### 3.3 基于有限元模拟结果的试验分析

图 13 为 HS200 和 HS300 模型 UHPC 横向中心

线上应变分布对比,横轴为距跨中距离,正负表示跨中两边不同方向;纵轴为 UHPC 的应变,应变负值表示收缩。根据计算结果,焊钉间距由 200 mm 增加到 300 mm 后,跨中 UHPC 的收缩应变更大,而受到约束产生的拉应力更小;HS300 模型 UHPC 纵向收缩应变分布相比 HS200 有趋于平坦的趋势。

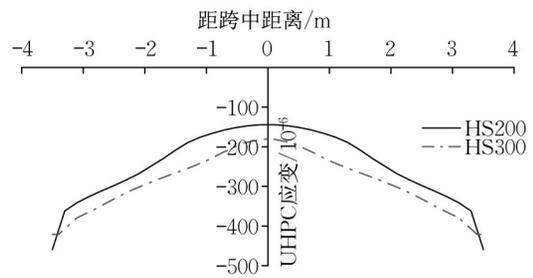


图 13 UHPC 应变计算结果

Fig. 13 Strain calculation results of UHPC

图 14a 和图 14b 为 HS200 和 HS300 模型边部钢板(S1 测点所在纵向线)应力与横向中心线上钢筋应力的分布对比图,横轴为距跨中距离,正负表示跨中两边不同方向;纵轴为钢板或钢筋应力,正负分别表示受拉和受压。焊钉间距由 200 mm 增加到 300 mm 后,钢板和钢筋应力的变化趋势与试验结果相符合。钢板受力减小说明焊钉间距增大使 UHPC 与钢结构之间的结合作用减弱。而焊钉间距增大后,纵向钢筋受力明显增加,跨中钢筋应力相比 H200 试件增加约 25%,说明焊钉约束减弱引起了收缩次内力的分布变化,钢筋分担了更多对 UHPC 收缩的约束。

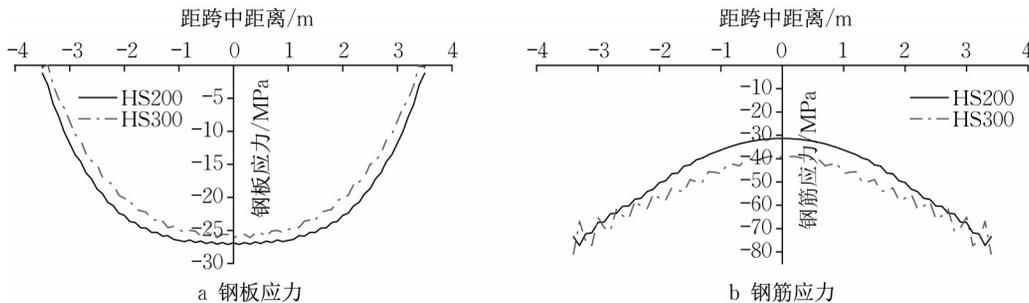


图 14 钢板和钢筋纵向应力计算结果对比

Fig. 14 Comparison of calculation results of steel deck stress

## 4 不同焊钉布置下收缩效应参数化分析

基于得到验证的有限元模型,展开焊钉间距参

数化分析。参考规范<sup>[16]</sup>,参数化分析中焊钉间距取值范围为 100~400 mm,按 100 mm 等间隔取值,焊钉横纵向间距相等。各模型以“HS+焊钉间距”编号。

#### 4.1 UHPC收缩计算结果

图15所示为参数化模型UHPC横向中心线上应变分布。与HS100模型相比,HS200,HS300,HS400模型中UHPC的跨中收缩应变分别增加了21.34%,56.53%和84.60%。可见:焊钉间距越大,UHPC受结构整体约束作用越小,收缩应变更大,收缩次内力更小。

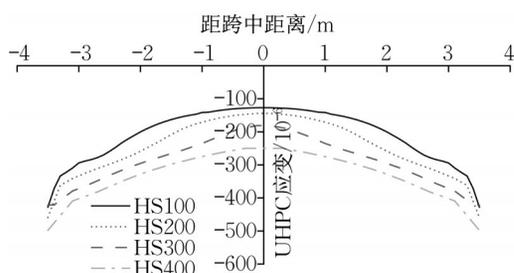


图15 UHPC横向中心线应变计算结果对比

Fig. 15 Comparison of transverse centerline strain calculation results of UHPC

#### 4.2 钢板收缩效应计算分布

钢盖板横向中心线上的纵向应力分布对比如图16所示。随着焊钉间距的增加,钢板压应力总体呈现逐渐减小的趋势。与HS100相比,HS400模型钢盖板跨中压应力减小了17.80%。说明焊钉间距增加会引起UHPC与钢之间结合作用显著降低,使钢板上所受收缩次内力减小。

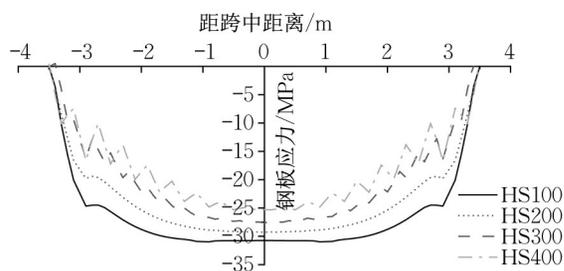


图16 钢板横向中心线应力计算结果对比

Fig. 16 Comparison of calculation results of transverse centerline stress of steel deck

#### 4.3 钢筋收缩效应计算分布

钢筋横向中心线上的纵向应力分布对比如图17所示。与HS100模型相比,HS200,HS300和HS400模型的跨中纵向钢筋压应力分别增加了17.46%,46.83%和86.33%。随着焊钉间距的增加,纵向钢筋压应力也明显增加,原因是焊钉间距增加后收缩次内力分布发生变化,钢筋承担了更多对UHPC收缩的约束。

不同焊钉布置的组合桥面板UHPC、钢筋和钢板在跨中的收缩效应计算对比统计结果列于表5。UHPC应力与钢板应力的变化率与焊钉间距近似为线性关系,而钢筋应力的变化率随焊钉间距变大则有加速增加的趋势。

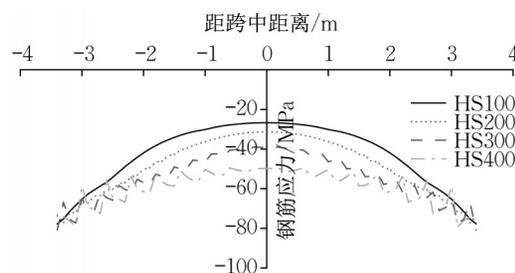


图17 钢筋横向中心线应力计算结果对比

Fig. 17 Comparison of calculation results of transverse centerline stress of steel bars

表5 不同焊钉间距下组合桥面板跨中收缩效应统计

Tab. 5 Statistics of mid-span shrinkage of composite bridge deck at different welding nail spacing

	UHPC应变/ $10^{-6}$	UHPC应力/ MPa	钢板应力/ MPa	纵向钢筋应力/ MPa
HS100	-127.00	9.46	-30.75	-26.72
HS200	-154.11	9.39	-29.28	-31.38
HS300	-198.80	9.21	-27.58	-39.23
HS400	-234.45	9.11	-25.28	-49.78

## 5 结论

基于实际工程背景,对焊钉间距不同的钢-UHPC组合桥面板足尺模型进行收缩效应的监测与分析,探究了夏季高温养护条件下组合桥面板收缩效应发展规律以及焊钉布置对收缩效应的影响。利用有限元软件对试验模型进行收缩模拟,并在此基础上进行了不同焊钉间距下的组合桥面板收缩效应参数化分析,总结如下:

(1)在环境温度为 $17^{\circ}\text{C}\sim 42^{\circ}\text{C}$ ,湿度为50%~90%的养护条件下,钢-UHPC组合桥面板中UHPC的初凝时间约为17h。前72h内组合桥面板UHPC最大收缩量约为 $450\times 10^{-6}$ 。收缩分布的总体规律是中心区域收缩量较小,靠近边缘区域收缩量较大。UHPC收缩引起钢板下表面受压,钢肋受拉;UHPC板内钢筋则受到压应力作用。

(2)当焊钉间距从200mm增加到300mm时,钢结构对UHPC收缩的约束作用减弱,UHPC的早期膨胀值更高,后期的收缩值也更高。钢结构约束和受力明显减小,其中钢板最大压应力减小了51.6%,钢肋最

大拉应力减小了 75.9%。钢筋最大压应变增加 42.9%，钢筋承担的收缩约束作用增强。

(3)通过数值模拟结果与监测结果的对比,两试件 UHPC、钢筋和钢板上主要测点的计算应变与试验值误差均在 10%以内,且反映的 UHPC 应变分布等规律与试验结果一致,说明本文的数值模拟方法对于组合板收缩模拟具有较好的可靠性。

(4)基于试验设计的有限元分析表明,焊钉间距增加会导致组合作用下降和焊钉受力增大。当焊钉间距从 200 mm 增加至 300 mm 时,焊钉自身所受最大剪应力增大 64.7%,端部截面 UHPC 与钢板界面处应变差增加了 20.9%。根据有限元参数化分析结果,焊钉间距增加会导致 UHPC 所受整体约束下降,并引起结构收缩次内力的分布变化:UHPC 和钢结构次内力会有所减小,钢筋承担约束作用增强,压应力显著增加。对于本文模型,当焊钉间距从 100 mm 增加到 400 mm 时,跨中 UHPC 收缩应变增加 84.6%,拉应力减小 3.7%;跨中钢板压应力减小 17.8%,钢筋压应力增加 86.3%。

#### 作者贡献声明:

徐晨:负责试验设计和有限元模拟等的体规划和思路把握,并提出指导性意见。参与写作和修改。

卢毅:负责本主要内容的写作,参与试验、有限元分析等。

何武超:参与论文的选题制定和论文修改等工作,负责文中试验、有限元模拟等与实际工程背景的对接。

马焱:依据工程背景对试验等提供设计支撑和指导意见。

#### 参考文献:

- [1] 王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 165. WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, *et al.* Research on UHPC's axial tensile performance and crack width control capability[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 165.
- [2] 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.
- [3] ZHANG Xiuzhen, LIU Zhichao, WANG Fazhou. Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226(30): 459.
- [4] XIE T, FANG C, ALI M M, *et al.* Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 91:156.
- [5] SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age[J]. Materials & Structures, 2011, 44(5):879.
- [6] 邓宗才,连怡红,赵连志. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土自收缩性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(1):61. DENG Zongcai, LIAN Yihong, ZHAO Lianzhi. The effect of expansion agent and shrinkage reducing agent on the autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(1): 61.
- [7] CHAUDHARY S, PENDHARKAR U, NAGPAL A K. Control of creep and shrinkage effects in steel concrete composite bridges with precast decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(5):336.
- [8] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社, 2005. LIU Yuqing. Combined structure bridge [M]. Beijing: People's Communications Press, 2005.
- [9] 赵辛玮,肖汝诚,孙斌,等. 常温养护型超高性能混凝土组合桥面板收缩性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3):100. ZHAO Xinwei, XIAO Rucheng, SUN Bin, *et al.* Research on shrinkage performance of ultra-high performance concrete composite bridge deck with natural curing [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3):100.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015 [S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2015.
- [11] 中国钢铁工业协会. 金属材料室温拉伸试验方法:GB/T 228—2010[S]. 北京:中国钢铁工业协会, 2010. China Iron and Steel Association. Room temperature tensile test method for metallic materials:GB/T 228—2010[S]. Beijing: China Iron and Steel Association, 2010.
- [12] 徐晨,肖涵,王巍. 超高性能混凝土组合桥面板集群化短焊钉抗疲劳特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(5):667. XU Chen, XIAO Han, WANG Wei. Anti-fatigue characteristics of short grouped-stud in ultra-high performance concrete composite bridge decks[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(5):667.
- [13] 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: 107.
- [14] KMIECIK P, KAMIŃSKI M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11(3): 623.
- [15] 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 performance of steel UHPC composite deck[D]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢混组合桥梁设计与施工规范: JTG/T D64-01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design and construction of highway steel-concrete composite bridge: JTG/T D64-01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.