

超高性能混凝土(UHPC)加固桥面板界面约束机理研究

赵晨¹, 辛灏辉², 张由由³

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 东南大学, 江苏 南京 211189; 3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049]

摘要: 采用超高性能混凝土(UHPC)加固普通混凝土桥面板, 结合面处存在较大的约束收缩作用。为研究约束机制, 提出UHPC收缩时变公式, 建立了UHPC-混凝土组合桥面板约束收缩有限元模型。数值模拟与试验数据具有较高的吻合度, 验证了有限元分析的准确性。进一步通过有限元分析, 研究了组合桥面板中应力应变的分布规律, 以及不同因素对结合面约束作用的影响。结果表明: UHPC板中沿厚度方向越靠近交界面, 普通混凝土的约束效应越强, 收缩应变越小, 约束应力越大; 混凝土强度、尺寸效应、配筋率、UHPC板厚通过改变结构相对刚度, 对交界面的相互约束产生影响。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 混凝土桥面板加固; 约束作用; 有限元模型

中图分类号: U441+.5; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0006-06

Research on Interface Constraint Mechanism of Bridge Deck Reinforced with Ultra-High Performance Concrete (UHPC)

ZHAO Chen¹, XIN Haohui², ZHANG Youyou³

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Xian University, Xian 710049, China]

Abstract: The ultra-high performance concrete (UHPC) is used to reinforce the ordinary concrete bridge decks. There is a relatively large restrictive contraction effect at the joint surface. To study the contraction mechanism, the time-varying formula for UHPC shrinkage is proposed, and the finite element model of constrained shrinkage of UHPC-concrete composite bridge decks is established. The numerical simulation has a high degree of agreement with the experimental data, verifying the accuracy of the finite element analysis. The further finite element analysis is conducted to study the stress-strain distribution rule in the composite bridge decks and the influence of different factors on the restraint effect of the joint surface. The results show that in the UHPC decks, the closer to the interface along the thickness direction, the stronger the restraint effect of ordinary concrete, the smaller the shrinkage strain, and the greater the restraint stress. The concrete strength, size effect, reinforcement ratio and UHPC deck thickness affect the mutual constraints at the interface by changing the relative stiffness of the structure.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); reinforcement of concrete bridge decks; restraint effect; finite element model

0 引言

混凝土桥面板长期承受车辆荷载等作用, 并受到温度、湿度、除冰剂等不良环境因素影响, 易导致桥面板破损^[1-2]。桥面铺装层的破坏会进一步导致

水分侵入, 加速桥面混凝土及钢筋的锈蚀破坏, 影响整体结构的承载能力^[3]。

因此, 国内外学者研究了各种加固混凝土桥面板的方案。郑愚等^[4]研究了表面嵌入式纤维复合筋加固钢筋混凝土桥面板的工作性能, 分析了不同材料和方式的加固效果。胡孔国等^[5]进行了碳纤维布加固混凝土梁的试验, 为碳纤维布加固混凝土桥面板工程提供了数据基础。Cope等^[6]通过对不同场景的研究表明, 不锈钢作为桥面加固材料, 虽然初始成本较高, 但能有效延长整体寿命和降低后期维修费

收稿日期: 2025-11-30

作者简介: 赵晨(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 张由由(1991-), 女, 博士, 副教授, 从事桥梁教学与研究工作。电子邮箱: zhang_0522yy@163.com

用,具有良好的整体经济效益。

同时,随着超高性能混凝土(UHPC)材料性能^[7-8]和施工工艺^[9-10]的进展,国内外学者正在广泛研究运用UHPC加固混凝土桥面板的方案。张由由^[11-12]提出掺入SRA和EA添加剂可显著降低UHPC的约束收缩。Habel^[13]对UHPC-混凝土组合梁受弯性能和时变行为进行了试验,发现UHPC能够显著延缓混凝土受弯时裂缝出现和延展的时间,大幅度提高结构的承载力。Zhang Y^[14]对受损桥面采用UHPC高温蒸汽养护加固试验,与普通混凝土桥面板相比,组合结构开裂荷载和极限承载力分别提高约2.5倍和2倍。

瑞典于2004年首次采用UHPC修复并拓宽了一座小跨径公路桥^[15]。北美于2016年运用UHPC加固桥梁,延缓结构老化,降低维修成本^[16]。国内京沪高速临沂段红花埠互通立交桥运用UHPC对已受损普通混凝土桥面进行加固^[17]。沪嘉高速蕰藻浜大桥采用UHPC对桥面板进行加固,将承载能力大幅提高^[18]。

UHPC与普通混凝土组合结构结合面特性受到多方面因素影响,特别是对已建成桥面板采用UHPC板加固,两种材料相互之间的约束作用急需阐明。为此,针对UHPC-普通混凝土组合结构建立有限元模型,通过数值分析与试验数据的比较,研究UHPC与普通混凝土间的约束机理。

1 试验参考数据

Zhu Y^[19]设计了UHPC-混凝土组合构件和UHPC单独的构件。为模拟实际结构加固,组合构件中普通混凝土先养护90 d,再在顶面浇筑UHPC板,进而开展了UHPC自由收缩和UHPC-混凝土组合结构UHPC层限制收缩试验,试件制作及浇筑如图1、图2所示。



图1 试件制作^[19]

组合构件中的普通混凝土块尺寸为600 mm×300 mm×280 mm,组合构件中的UHPC板和UHPC单



图2 试件浇筑^[19]

独构件尺寸均为600 mm×300 mm×50 mm。普通混凝土强度为C55,弹性模量为35.2 GPa,线膨胀系数为 $1.0\times10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;UHPC弹性模量为41.6 GPa,线膨胀系数为 $1.176\times10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;钢筋为HPB400,直径为10 mm,弹性模量为200 GPa,线膨胀系数为 $1.2\times10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

2 数值分析

2.1 有限元模型

如图3所示,采用通用有限元软件ABAQUS建立有限元模型。每种模型的UHPC平面尺寸与普通混凝土相同,基准模型与Zhu Y的试验试件尺寸相同。通过基准模型与试验数据的比较,验证有限元模型的可靠性,进而研究混凝土强度、UHPC板厚、组合构件尺寸、配筋率对组合结构中两种材料相互约束的影响。

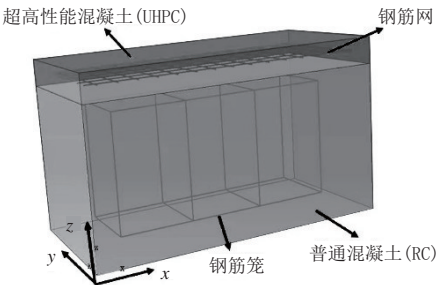


图3 几何模型

有限元模型分组如表1所示。其中,薄、厚UHPC-混凝土模型研究UHPC板厚对约束作用的影响,小、大尺寸模型研究不同混凝土尺寸对约束作用的影响,C30RC、C80RC模型研究混凝土强度对约束作用的影响,多、少、无筋模型研究配筋率对约束作用的影响。

模型UHPC与混凝土间的接触用tie连接模拟,钢筋与混凝土间采用嵌入式(embeded region)连接。结合试验约束条件,有限元模型对普通混凝土的底部进行了固结(encastre)。

2.2 UHPC弹性模量计算公式

普通混凝土收缩可以采用ACI902R-92模型分

表1 有限元模型分组

模型	普通混凝土尺寸/mm	UHPC层厚度/mm	UHPC层内钢筋网/mm	$E_{i28}/E_i(RC)$
基准模型	600×300×280	50	HPB400,15×38&7×38	41 600/35 200=1.18
薄 UHPC-混凝土模型	600×300×280	25	HPB400,15×38&7×38	41 600/35 200=1.18
厚 UHPC-混凝土模型	600×300×280	100	HPB400,15×38&7×38	41 600/35 200=1.18
小尺寸模型	300×150×140	25	HPB400,15×19&7×19	41 600/35 200=1.18
大尺寸模型	1 200×600×560	100	HPB400,15×76&7×76	41 600/35 200=1.18
C30RC 模型	600×300×280	50	HPB400,15×38&7×38	41 600/30 000=1.39
C80RC 模型	600×300×280	50	HPB400,15×38&7×38	41 600/38 000=1.09
多筋模型	600×300×280	50	HPB400,30×19&14×19	41 600/35 200=1.18
少筋模型	600×300×280	50	HPB400,7×76&3×76	41 600/35 200=1.18
无筋模型	600×300×280	50	无钢筋	41 600/35 200=1.18

析^[20],UHPC 与普通混凝土在很多性能上相似,因此参考该模型的基本形式,并结合试验数据^[19]拟合得到 UHPC 的收缩曲线公式(1),拟合曲线和试验自由收缩曲线对比如图 4 所示, $R^2=0.92$,拟合程度较高。

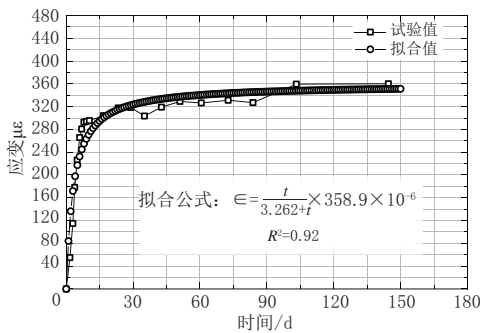


图4 UHPC 自由收缩拟合值和试验值对比

有限元模型通过温度荷载模拟混凝土收缩变形。通过联立式(1)至式(3)可得 UHPC 弹性模量随温度变化方程式(4),用于有限元分析。

式(1)至式(4)中: ϵ 为收缩应变值; t 为初始固化后的时间; α 为 UHPC 线膨胀系数,取值 $1.176 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$; ΔT 为温度变化绝对值, $^\circ\text{C}$; T_0 为初始温度值, $^\circ\text{C}$; T_i 为 t 时刻温度值, $^\circ\text{C}$; $E_i(t)$ 为 t 时刻弹性模量,MPa; E_{i28} 为 28 d 时的弹性模量,MPa; λ_i 为回归系数,取 0.096; t_0 为初始时间,取 0; k_i 为回归系数,取 1.598。

$$\epsilon = \frac{t}{3.262 + t} \times 358.9 \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$\alpha \times \Delta T \quad (2)$$

$$E_i(t) = E_{i28} \times \exp\left(-\lambda_i \times \left(\ln(1 + (t - t_0))\right)^{-k_i}\right) \quad (3)$$

$$E_i(t) = E_{i28} \times \exp\left(-\lambda_i \times \left(\ln\left(1 + \left(\frac{13\,767.806}{T + 4220.664} - 3.262 - t_0\right)\right)^{-k_i}\right)\right) \quad (4)$$

3 基准模型数值分析

3.1 试验数据验证

图 5 给出了基准模型计算结果与试验数据的对比。从中可以看出:两者应变随时间变化的曲线基本一致,验证了有限元模型的可靠性。

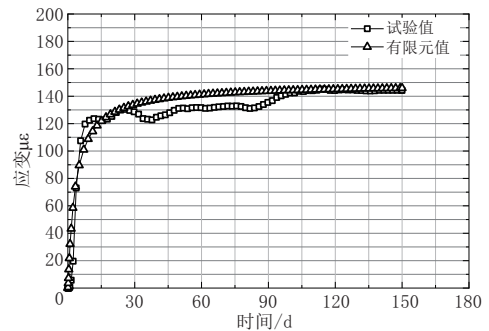


图5 计算结果与试验数据应变对比

3.2 UHPC 板不同高度的应力应变时变分析

图 6、图 7 给出了基准模型中,UHPC 板内距离交界面 0、25、50 mm 高度的 3 个单元应力、应变随时间变化的曲线。从中可以看出:UHPC 板底部受到普通混凝土的约束,收缩被抑制,距离交界面越近,应变减小,应力增大。

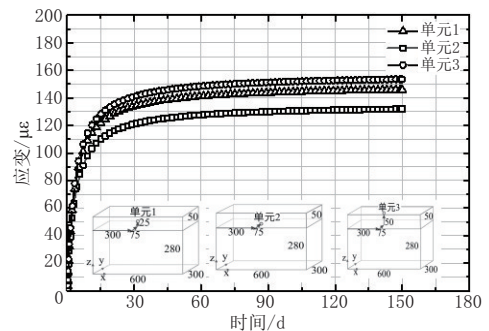


图6 UHPC 内不同高度处应变时变分析

3.3 交界面不同位置处应力应变分析

图 9、图 10 给出了基准模型中,沿短边方向,UHPC 板内 Path1 线上不同点的应力、应变分布。图 8

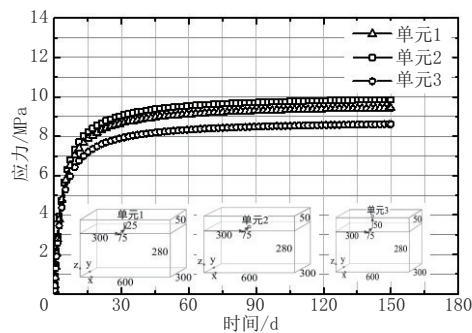


图7 UHPC内不同高度处应力时变分析

为 Path1 线位示意图。可以看出: x 、 y 方向上各点的应变变化趋势相似, 距边缘 50 mm 内各点应变减小幅度增大, 超过 50 mm 时应变基本不变; y 方向应变值高于 x 方向。这是因为 UHPC 板 x 方向尺寸更长, 收缩变形较大, 边缘与中央处的约束作用相差较大。

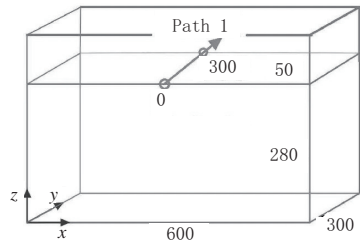


图8 基准模型 Path1 线位示意图

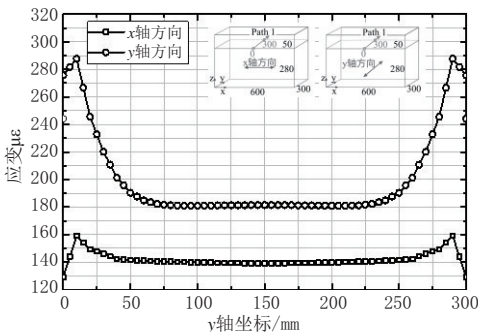


图9 Path1 线上各点 x 、 y 方向应变分布

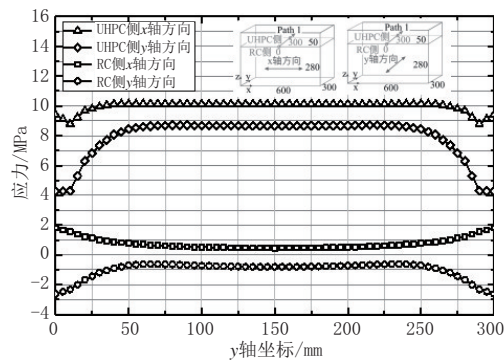


图10 Path1 线上各点 x 、 y 方向应力分布

UHPC 板收缩受到普通混凝土约束, x 、 y 方向均为拉应力。 x 方向应力高于 y 轴方向, 这是因为 UHPC 板 x 方向尺寸更长, 普通混凝土在该方向上约束较大。而普通混凝土 x 、 y 方向应力趋势相反。 x

方向应力随与边缘距离的增加而降低, 整体为拉应力; y 方向应力在距边缘 50 mm 范围内有较大增加, 但极大值为压应力。这是因为 y 方向普通混凝土受到 UHPC 板较大的压缩作用, 而 x 方向为长边, 下部普通混凝土对交界面处普通混凝土约束作用较大, 产生的拉应力大于 UHPC 板的压缩作用, 整体呈现拉应力。

图 12、图 13 进一步给出了基准模型中, 沿长边方向, 交界面 Path2 线上不同点处 UHPC 和普通混凝土的应力、应变分布。图 11 为 Path2 线位示意图。从中可以看出: 交界面上 UHPC 和普通混凝土的应变是相同的, 这是因为 UHPC 板和普通混凝土在交界面处是协调变形的。应变总体呈现两边大、中间小的趋势, 并在长边中点处达到极小值。这是因为边缘处普通混凝土对 UHPC 的约束不显著。

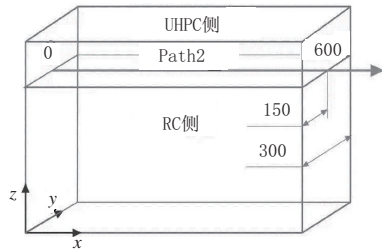


图11 基准模型 Path2 线位示意图

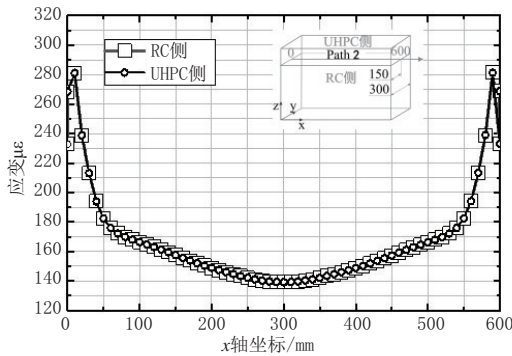


图12 Path2 线上各点位处 x 方向应变分布

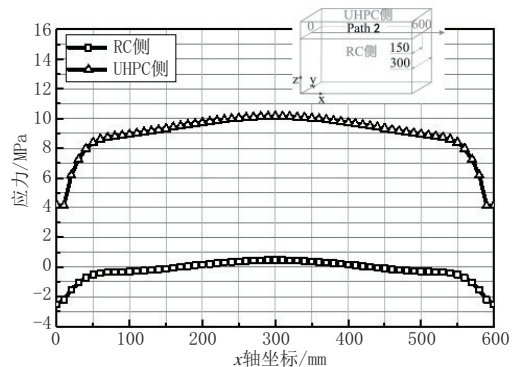


图13 Path2 线上各点位处 x 方向应力分布

交界面上 UHPC 板为拉应力, 普通混凝土总体为压应力。这是因为 UHPC 板受到普通混凝土的约束

产生拉应力,而普通混凝土受到 UHPC 板压缩产生压应力。虽然交界面两侧应力方向相反,但是应力变化趋势相似,总体呈现中间大、两侧小的特点。这是因为边缘处 UHPC 与普通混凝土的相互约束较小,中间位置相互约束较大。

4 变参数模型数值分析

4.1 普通混凝土等级对应力应变的影响

图 14、图 15 为普通混凝土分别为 C30、C55、C80 时,对交界面上应力、应变分布的影响。从中可以看出:应变值随混凝土等级的提高而增大。这是因为普通混凝土刚度随等级的提高而增加,对 UHPC 板的约束作用也相应增大。不同等级普通混凝土对应的 x 方向应变、应力变化趋势一致,呈现中间大、两边小的特点。不同强度普通混凝土时,两侧应力、应变基本相同,距离边缘超过 50 mm 时,才产生明显区别。

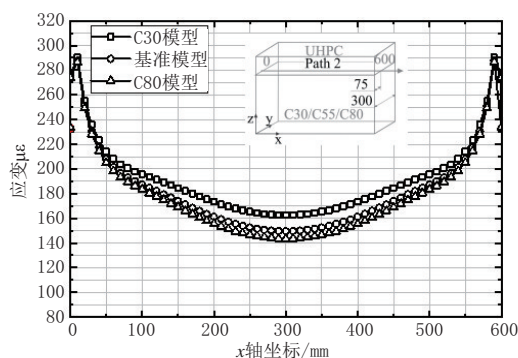


图 14 普通混凝土强度对交界面应变分布的影响

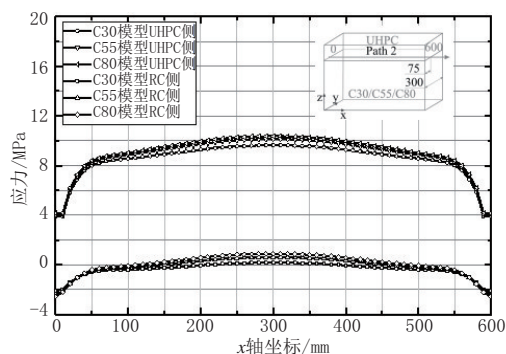


图 15 普通混凝土强度对交界面应力分布的影响

4.2 UHPC 板厚对应力应变的影响

图 16、图 17 为 UHPC 板厚分别为 25、50、100 mm 时,对交界面上应力、应变分布的影响。从中可以看出:交界面上薄 UHPC 层的应变随距边缘距离的增加而增加,在长边中间达到极大值。厚 UHPC 层的应变在距边缘 100 mm 时达到极大值的 99.4%,并基本保持不变。这说明随着 UHPC 板厚的增加,普通

混凝土对 UHPC 板的约束作用越明显。交界面上应力变化趋势与应变基本相似。UHPC 板的应力峰值随着板厚增加而降低,普通混凝土的应力峰值绝对值增大。这是因为 UHPC 刚度随着 UHPC 板厚增加而增加, UHPC 受到的约束降低,而普通混凝土受到的约束变大,压应力增加,中央部分不再出现拉应力。

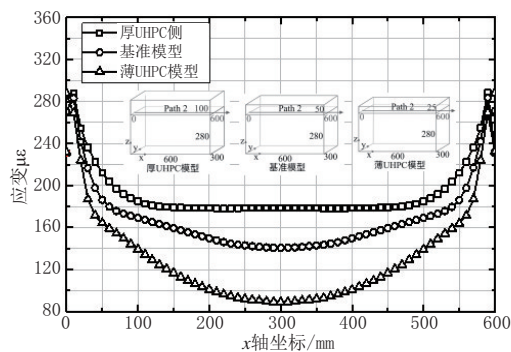


图 16 UHPC 板厚对交界面应变分布的影响

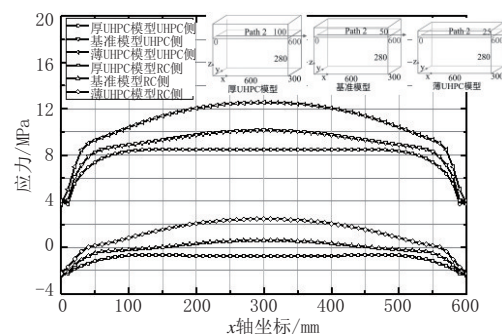


图 17 UHPC 板厚对交界面应力分布的影响

因此,在实际工程中应正确选择 UHPC 板的合适厚度,避免因 UHPC 板厚较小而在其内部产生较大拉应力,也避免因 UHPC 板厚较大对原结构产生较大的附加荷载。

4.3 混凝土尺寸对应力应变的影响

图 18、图 19 为不同混凝土尺寸对交界面上应力、应变分布的影响。从中可以看出:3 种普通混凝土尺寸的应力、应变曲线变化趋势相似。在交界面处,大尺寸模型与基准模型的应力、应变极大值较为接近,小尺寸模型的应变整体较小,应力整体较大。这主要是因为应力、应变受到 UHPC 板厚与交界面面积比值的影响。基准模型中,该比值为 2.78×10^{-4} mm;小、大尺寸模型中,该比值分别是 5.67×10^{-4} mm 和 1.39×10^{-4} mm,大尺寸模型相对基准模型该比值的变化绝对值较小,其应力、应变的变化值也较小。

4.4 配筋率对应力应变的影响

图 20、图 21 为不同配筋率对交界面上应力、应变分布的影响。从中可以看出:交界面应变随配筋率的增加而减小,这是因为高配筋率抑制了 UHPC

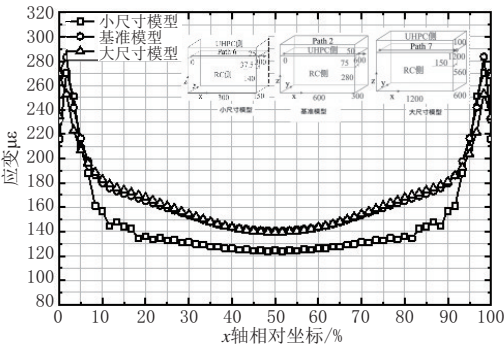


图 18 普通混凝土尺寸对界面应变分布的影响

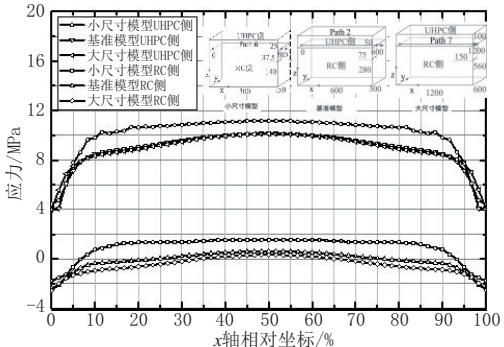


图 19 普通混凝土尺寸对界面应力分布的影响

的收缩。同时,高配筋率使得钢筋与混凝土之间的相互作用越大,应力也越高。

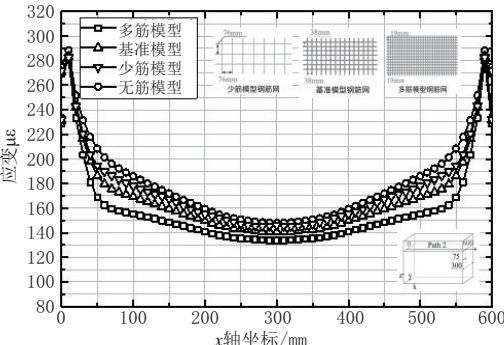


图 20 配筋率对界面应变分布的影响

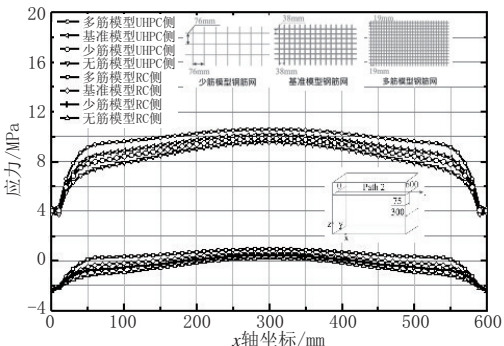


图 21 配筋率对界面应力分布的影响

5 结 语

(1)通过基准模型结果与试验数据的对比,验证了有限元分析的准确性。

(2)UHPC 板受到普通混凝土的约束而产生拉应力,对普通混凝土相应产生压应力。在交界平面上,约束作用随距边缘距离的增加而加大。沿 UHPC 板厚度方向,约束作用随着距界面距离的增加而减弱。

(3)约束作用随混凝土强度的增加而增加,随 UHPC 板厚的增加而减弱。因此,在实际工程中应正确选择 UHPC 加固板的合适厚度,避免因 UHPC 板厚度较小而在其内部产生较大拉应力,也避免因 UHPC 板厚度较大而对原结构产生较大的附加荷载。

(4)界面应力、应变受到 UHPC 板厚与交界面面积比值的影响。高配筋率抑制了 UHPC 的收缩,交界面应变随配筋率的增加而减小。

参考文献:

[1] Kang S, Wu YC, David DS, et al. Rapid damage assessment of concrete bridge deck leveraging an automated double-sided bounce system[J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104244.

[2] 王智勇. 钢筋混凝土 T 梁桥加固设计方案[J]. 交通世界, 2021(28): 87-88.

[3] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 1-10.

[4] 郑愚, 夏立鹏, 杨健彬, 等. 嵌入式复材筋加固混凝土桥面板工作性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(1): 16-24.

[5] 胡孔国, 岳清瑞, 叶列平, 等. 碳纤维布加固混凝土桥面板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2000(7): 44-48.

[6] Cope A, Bai Q, Samdariya A, et al. Assessing the efficacy of stainless steel for bridge deck reinforcement under uncertainty using Monte Carlo simulation[J]. Automation in Construction, 2013, 9(7): 634-647.

[7] Rossi P, Ulm FJ, Chauvel D. Documents scientifiques et techniques AFGC: Bétons fibrés à ultra-hautes performances -Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes[J]. Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, 23(12): 46-47, 49-52.

[8] 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应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33-43.

[9] 蒋欣, 汤大洋, 胡所亭, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2021, 61(12): 1-7.

[10] 陈珍玉. 钢桥面超高强韧性砷(UHPC)的制备、施工及质量控制[J]. 福建建设科技, 2020(2): 75-77.

[11] Zhang Youyou, Duan Lan, Xin Haohui, et al. Shrinkage behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) in cold winter conditions with shrinkage reducing agent (SRA) and expansive agent (EA) [J]. Construction and Building Materials, 2024, 436: 136645.

[12] Feng Hucheng, Zhang Youyou, Zhao Jiarui, et al. Restrained Shrinkage in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)-Normal Strength Concrete Interface[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113293.

[13] Habel K, Denarié E, Brühwiler E. Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(1): 93-101.

[14] Zhang Y, Zhu Y, Yeseta M, et al. Flexural behaviors and capacity