DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0517
文章编号:1671-8844(2026)09-1469-09

UHPC浇筑湿接缝构造设计及抗裂性能研究

杨文杰[1,2],王晓明[1,2],李国强[3],贺耀北[1,4],赵建领[5],邹杰[6],吴润涵[1,2],李晨曦[1,2]

(1. 旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室(长安大学),陕西 西安 710064;
2. 长安大学公路学院,陕西 西安 710064; 3. 天津轨道交通运营集团有限公司,天津 300392;
4. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南 长沙 410219; 5. 中国铁路设计集团有限公司,天津 300142;
6. 成都市温江区公园城市发展事业中心,四川 成都 611130)

摘要: 针对钢-UHPC(ultra high performance concrete)轻型组合桥面应用于大跨径或超宽幅桥梁时通常需分段浇筑而浇筑湿接缝往往成为开裂高风险区的问题,基于内聚力模型及固结无滑移模型,建立了钢-UHPC轻型组合桥面的UHPC浇筑湿接缝数值模拟方法,通过试验数据验证了该方法的精确性;提出了5种湿接缝设计构造:加密钢筋接缝、斜向接缝、锯齿接缝、矩形接缝和异形钢板接缝,并开展了弹塑性全过程分析。极限承载力分析表明:加密钢筋接缝与斜向接缝承载力较为接近;锯齿接缝和矩形接缝承载力介于加密钢筋接缝与整体浇筑试件之间;异形钢板接缝承载力较整体浇筑试件有所提高。抗裂性能分析表明:加密钢筋接缝和斜向接缝抗裂性较弱,受力性能较差;锯齿接缝和矩形接缝抗裂性较强;异形钢板接缝抗裂性相对最优。研究成果可为此类钢-UHPC轻型组合桥面接缝的设计提供有益借鉴。

关键词: 钢-UHPC轻型组合桥面;湿接缝;数值模拟方法;构造设计;抗裂性
中图分类号: U 443.31　**文献标志码:** A

Research on the design of structure and crack resistance performance of UHPC pouring wet joints

YANG Wenjie[1,2], WANG Xiaoming[1,2], LI Guoqiang[3], HE Yaobei[1,4], ZHAO Jianling[5], ZOU Jie[6], WU Runhan[1,2], LI Chenxi[1,2]

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Bridge Detection Reinforcement Technology, Chang′an University, Xi′an 710064, China; 2. School of Highway, Chang′an University, Xi′an 710064, China;
3. Tianjin Rail Transit Operation Group Co., Ltd., Tianjin 300392, China;
4. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410219, China;
5. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China;
6. Chengdu Wenjiang District Park City Development Center, Chengdu 611130, China)

Abstract: When the steel-UHPC (ultra high performance concrete) lightweight composite bridge deck is applied

收稿日期: 2023-11-25
作者简介: 杨文杰(1999-),男,硕士,主要从事桥梁设计理论与可靠度优化研究,E-mail: ywj_99@126.com。
通信作者: 贺耀北(1983-),男,研究员,博士研究生,主要从事大跨度桥梁设计理论与应用研究,E-mail: heyaobei@qq.com。
基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:52678179);旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室(长安大学)开放基金资助项目(编号:300102211511);湖南省交通科技项目(编号:202245;202510);长沙市望城科技计划项目(编号:KJ231020);西藏自治区科技计划项目(编号:XZ202601ZY0251);湖南省科技创新计划项目(编号:2026AQ2005;2024JK2051)。

本文引用格式: 杨文杰,王晓明,李国强,等.UHPC浇筑湿接缝构造设计及抗裂性能研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1469-1477.

Citation: YANG Wenjie, WANG Xiaoming, LI Guoqiang, et al. Research on the design of structure and crack resistance performance of UHPC pouring wet joints[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9):1469-1477.

to large-span or super-wide bridges, it usually needs to be poured in sections, and the wet joints during pouring often become high-risk areas for cracking. To address this issue, a numerical simulation method for the wet joint pouring of the steel-UHPC lightweight composite bridge deck is proposed based on the cohesion model and the consolidation no-slip model. The accuracy of the simulation method is verified by experimental data. Five types of wet joint designs are proposed: rebar-densified joints, oblique joints, serrated joints, rectangular joints, and irregular-shaped steel plate joints. A full-process elastic-plastic analysis is conducted. The ultimate bearing capacity analysis shows that the load-carrying capacities of the rebar-densified joints and the oblique joints are relatively close, while the bearing capacities of the serrated joints and the rectangular joints are between those of the rebar-densified joints and the overall specimens. The irregular-shaped steel plate joints have a higher load-carrying capacity compared to the overall specimens. The crack resistance analysis indicates that the rebar-densified joints and the diagonal joints have weaker crack resistance and poorer mechanical properties, while the serrated and the rectangular joints have stronger crack resistance. The irregular-shaped steel plate joints have the best crack resistance. The research results can provide valuable references for the design of such steel-UHPC lightweight composite bridge deck joints.

Key words: steel-UHPC lightweight composite bridge deck; wet joints; numerical simulation method; design of structure; crack resistance

钢-UHPC(ultra high performance concrete)轻型组合桥面结构是一种在钢桥面上焊接栓钉,以连接配筋UHPC与钢桥面板,再铺设桥面铺装层的新型结构[1]。近些年,国内外学者对钢-UHPC组合桥面结构的力学性能和工程应用进行了研究并已取得丰富的成果。研究表明:钢-UHPC轻型组合桥在解决钢桥面疲劳开裂和钢桥面沥青铺装层易损等问题时能发挥巨大作用,应用效果显著[2-5]。基于良好的力学性能和实用性,钢-UHPC组合桥面结构已在大跨径和超宽幅桥梁中得到了广泛应用[6-7],但其桥面板往往难以实现一次整体浇筑,浇筑湿接缝的抗裂强度远小于整体浇筑UHPC层的开裂强度,且湿接缝开裂后易导致钢筋锈蚀,严重影响结构的使用性能[8]。因此,研究人员有必要对UHPC湿接缝的抗裂性能进行系统研究。

目前,如何改善UHPC桥面板湿接缝抗裂性能已成为国内外学者关注的热点。陈德宝等[9]提出了环氧树脂处理、高压水枪凿除细骨料和高压水枪凿除粗骨料3种湿接缝界面处理方式,通过试验发现:相比于环氧树脂处理,高压水枪凿毛界面的湿接缝抗裂性能更好,其中高压水枪凿除细骨料试件的开裂荷载更高。GAO等[10]通过试验表明,当钢筋埋置长度小于10倍钢筋直径时,增加埋置长度可以提高UHPC湿接缝的抗裂性能。邵旭东等[11]分别对加密钢筋、异形钢板和焊接钢筋网3种构造形式的UHPC湿接缝进行了试验,结果表明:相比于加密钢筋湿接缝,异形钢板湿接缝和焊接钢筋网湿接缝具有更好的抗裂性能。QIU等[12]通过试验验证了T形UHPC湿接缝具有较高的抗裂性能,并对湿接缝界面粗糙度进行处理,可以提高湿接缝的开裂荷载。现有研究大多围绕UHPC湿接缝的构造设计和试验验证展开,以改善湿接缝的抗裂性能;然而,开展UHPC试验的时间成本较高[13],且往往局限于特定结构,普适性可能不足。因此,寻求经济便捷且具备普适性的方法对UHPC湿接缝设计构造的抗裂性能进行研究,亟待进一步开展。

目前,有关UHPC湿接缝的数值模拟研究已取得较丰富的成果。FENG等[14]采用ABAQUS有限元软件模拟了矩形和倒梯形键UHPC湿接缝。结果表明:湿接缝梁的抗弯承载力和抗弯韧性随着键合接头数量的增加而增大。ZHANG等[15]通过ANSYS有限元软件对预应力UHPC装配连接梁的抗弯性能开展了研究,并将其与完整梁进行了对比。殷雨时等[16]提出了以UHPC为湿接缝填充材料的“干”字形湿接缝结构,利用数值模型分析了湿接缝界面构造、配筋率和结合面粗糙度对节段梁湿接缝界面力学性能的影响规律。然而,大多研究侧重于湿接缝的抗弯及抗剪性能,对湿接缝设计构造的抗裂性能未给予充分重视;此外,现有数值模拟方法在同时考虑UHPC浇筑接缝接触与钢-UHPC接触模拟方面尚鲜有系统研究。

综上,本文基于内聚力模型及固结无滑移模型建立了钢-UHPC组合桥面的UHPC浇筑湿接缝数值模拟方法。

1　UHPC 湿接缝数值模拟方法及试验验证

1.1　数值模拟方法

1.1.1　材料本构

1）混凝土

本文中 C50 混凝土和 UHPC 的本构均采用混凝土损伤塑性（concrete damaged plasticity，CDP）模型，该模型可以模拟拉压强度相差 10 倍及以上的材料[17]。C50 混凝土的本构模型参考文献[18]中的规范，其单轴应力-应变曲线如图 1(a)所示。UHPC 单轴应力-应变曲线如图 1(b)所示。图中：σ 为应力；ε 为应变；$f_{c,r}$ 为 C50 混凝土单轴受压强度代表值（峰值应力）；$f_{t,r}$ 为 C50 混凝土单轴受拉强度代表值（受拉峰值应力）；$\varepsilon_{c,r}$ 为受压达到峰值应力 $f_{c,r}$ 时对应的峰值压应变；ε_{cu} 为混凝土受压极限应变；$\varepsilon_{t,r}$ 为受拉达到峰值应力 $f_{t,r}$ 时对应的峰值拉应变。

UHPC 的受压本构关系参考单波[19]根据试验确定的公式，具体如下：

$$\frac{\sigma}{f_c}=\begin{cases}ax+(6-5a)x^5+(4a-5)x^6, & 0\leqslant x<1\\ \dfrac{x}{2.41(x-1)^2+x}, & x\geqslant 1\end{cases} \tag{1}$$

式中：a 为 UHPC 受压应力-应变曲线初始切线模量与峰值割线模量的比值，$a=E_c/E_s=1.08$；E_c 为 UHPC 的弹性模量，取 42.80 GPa；E_s 为 UHPC 受压应力-应变曲线峰值割线模量，$E_s=f_c/\varepsilon_0=39.30$ GPa；f_c 为 UHPC 的单轴抗压强度，取 158.40 MPa；$x=\varepsilon/\varepsilon_0$，$\varepsilon_0$ 为峰值点对应的应变，$\varepsilon_0=4\ 000$。

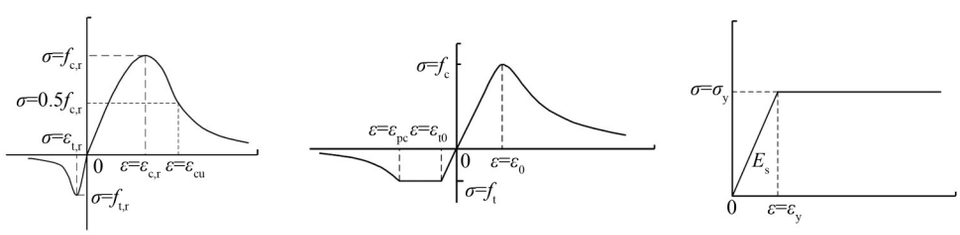
UHPC 的受拉本构关系参考文献[20]提出的公式，具体如下：

$$\sigma=\begin{cases}E_t\varepsilon, & 0\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_{t0}\\ f_t, & \varepsilon_{t0}\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_{pc}\\ \dfrac{f_t}{\left[1+(\varepsilon-0.002)\times 400\right]^{0.95}}, & \varepsilon>\varepsilon_{pc}\end{cases} \tag{2}$$

式中：f_t 为 UHPC 抗拉强度设计值，取 7.20 MPa；E_t 为 UHPC 受拉初始弹性模量；ε_{t0} 为 UHPC 受拉线弹性极限应变，取 200 με；ε_{pc} 为 UHPC 应力软化起始点等效应变，取 2 000 με。

2）钢筋

钢筋本构采用理想弹塑性模型，应力-应变曲线见图 1(c)，图中 ε_y 为屈服应变。屈服强度 σ_y 取 440 MPa，弹性模量取 206 GPa，泊松比取 0.30。



(a) C50应力-应变曲线　　(b) UHPC应力-应变曲线　　(c) 钢筋应力-应变曲线

图 1　C50、UHPC 和钢筋应力-应变曲线图

Fig.1　Stress-strain curves of C50, UHPC and rebars

1.1.2　基于内聚力模型的UHPC浇筑接缝接触模拟方法

内聚力模型、Tie 绑定约束模型和硬接触摩擦模型为 3 种常用的浇筑接缝接触模型。为选择最符合实际试验的模型，本文以文献[21]中的 JF-2-UHPC-U 形钢筋接缝试件为参考，分别采用以上 3 种模型建立相应的湿接缝接触界面数值模型并进行对比分析。试验及数值计算得到的开裂荷载、极限荷载如表 1 所示，荷载-跨中挠度曲线见图 2。从开裂荷载来看，内聚力模型、Tie 绑定约束模型和硬接触摩擦模型与实际试验的相对误差分别为 3.3%、5.0% 和 6.6%，均较小。从极限荷载来看，内聚力模型和 Tie 绑定约束模型与实际试验的相对误差分别为 3.8% 和 3.3%，均较小；而硬接触摩擦模型的相对误差为 26.1%，相对较大。综上，针对 UHPC 接缝进行数值分析时，内聚力模型和 Tie 绑定约束模型具有较高的精度，建立的有限元模型较为可靠；当混凝土板接触面经凿毛处理、混凝土骨料外露且表面粗糙时，采用内聚力模型更为合理[21]。本文需要掌握接缝的破坏过程及情况，故选择内聚力模型作为 UHPC 浇筑接缝接触模拟方法。

1.1.3　基于固结无滑移模型的钢-UHPC接触模拟方法

固结无滑移模型、无限滑移模型和有限滑移模型为 3 种常用的钢与 UHPC 接触模型。为选择最优的模型来模拟钢与 UHPC 接触，文献[22]分别采用上述 3 种模型建立数值模型，进而对比分析出最符合实际试验结果的模型。试验及数值计算得到的

表 1 试验及数值模拟荷载对比

Table 1 Comparison of loads between tests and numerical simulations

项目	开裂阶段		极限阶段	
	荷载/kN	相对误差/%	荷载/kN	相对误差/%
实际试验	60	0.0	360	0.0
内聚力模型	62	3.3	346	3.8
Tie绑定约束模型	63	5.0	348	3.3
硬接触摩擦模型	56	6.6	266	26.1

跨中UHPC顶面、纵肋底部和钢面板底部的应力见图3。图中荷载-应力曲线均接近于直线,说明结构仍处于弹性状态。其中无限滑移模型、有限滑移模型与试验值相差较大,不适用于钢-UHPC轻型组合桥面的数值模拟;固结无滑移模型与试验值差距很小,且试验过程中钢面板与UHPC之间无明显滑移。因此,对此类钢-UHPC轻型组合桥面进行数值模拟时,宜采用固结无滑移模型。

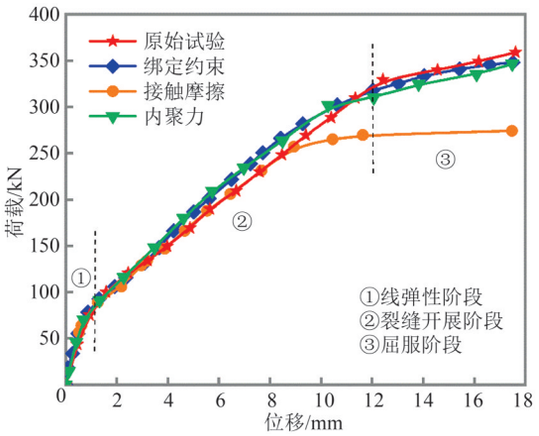


图 2 试验及数值模拟跨中荷载-位移曲线

Fig.2 The mid-span load-displacement curves of the test and numerical simulations

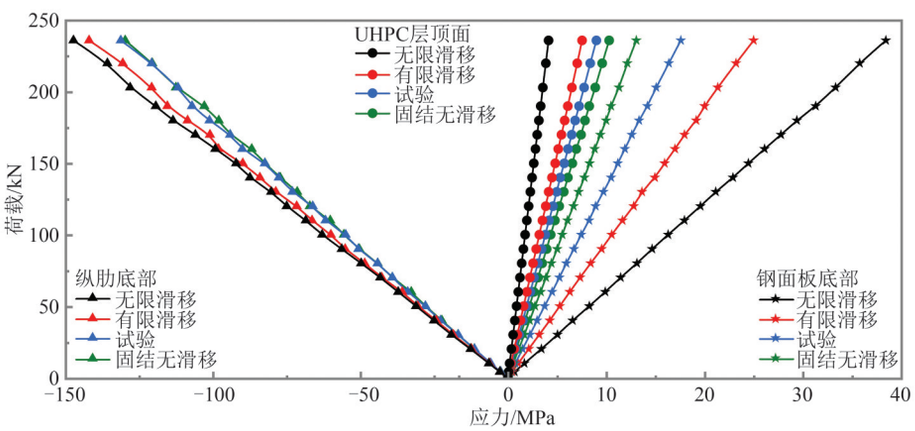


图 3 试验及数值模拟跨中荷载-应力曲线

Fig.3 The mid-span load-stress curves of the test and numerical simulations

1.1.4 数值模型的建立

基于内聚力模型和固结无滑移模型,本文采用ABAQUS有限元软件建立钢-UHPC轻型组合桥面的三维数值模型,如图4所示。UHPC、钢梁、栓钉均采用C3D8R单元模拟,钢筋采用T3D2单元模拟。本文采用4点弯曲加载方式,将位移荷载施加到构件上方的钢垫块上。

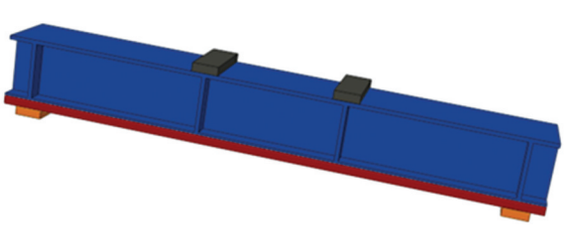


图 4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

模拟结果精度的提升往往伴随计算成本的增加,网格尺寸对二者均有较大影响。为平衡计算精度与计算时间成本,针对本模型所关注的UHPC层应力问题,进一步细分其网格尺寸,当2种不同尺寸网格所得到的结果差异在5%以内时,便认为这一大小的网格满足精度要求[21]。针对试件跨中UHPC层,分别设置25、20、15 mm 3种不同大小的正方形网格,在相同荷载作用下对比跨中UHPC顶层的应力,计算结果如表2所示。网格尺寸为25 mm时,跨中UHPC顶层的应力为5.57 MPa;网格尺寸为20 mm时,跨中UHPC顶层的应力为5.85 MPa,与25 mm的网格结果相差5.11%;网格尺寸为15 mm时,跨中UHPC顶层的应力为5.99 MPa,与20 mm的网格结果相差2.43%。这表明网格尺寸为15 mm时,其计算应力与上一级网格的应力差异首次在

5.00% 以内，可认为达到精度要求。因此，最终采用 15 mm 网格对 UHPC 进行网格划分。

表 2　不同尺寸网格计算结果

Table 2　Calculation results with grids of different sizes

网格尺寸/mm	跨中 UHPC 顶层应力/MPa	与上一级网格结果差异/%
25	5.57	—
20	5.85	5.11
15	5.99	2.43

1.2　试验数据验证

本文采用位移加载方式进行弹塑性全过程分析，提取塑性损伤分布、荷载-跨中位移曲线、内聚面损伤分布等计算结果与试验结果进行对比，其中塑性损伤分布用于确定裂缝的产生和发展，内聚面损伤分布用于确定接缝界面的损伤状况。一般认为拉伸损伤因子（concrete tension damage）d_t 达到 0.9 时，混凝土即发生开裂；内聚面 CSDMG（cohesive element scalar damage variable）/CSQUADSCRT（cohesive surface quadratic traction damage initiation criterion）因子达到 0.9 时，接缝界面开始开裂。

1.2.1　试验概况

PAN 等[23]进行了钢-UHPC 组合桥面湿接缝的相关试验，本文选择其中活性粉末混凝土（reactive powder concrete，RPC）梁试件 RPC-B-1 与 RPC-B-2 试件进行对比分析。试件长度为 3 100 mm，宽度为 450 mm，高度为 400 mm，湿接缝设置在试件中部。钢梁高度为 350 mm，腹板厚度为 12 mm。为保证试件的受拉区破坏模式，将钢梁受压翼缘厚度设置为 22 mm。试件纯弯段为 800 mm，两侧剪跨段各为 1 000 mm。栓钉直径为 13 mm，高度为 35 mm。钢筋网采用 HRB400 ∅10 mm 钢筋，布置间距 40 mm 的纵向钢筋。带接缝的受弯试件 RPC-B-2 中部配有 ∅12 mm 加密钢筋，以提高接缝的受力性能。试件详细尺寸及加载方式见图 5。

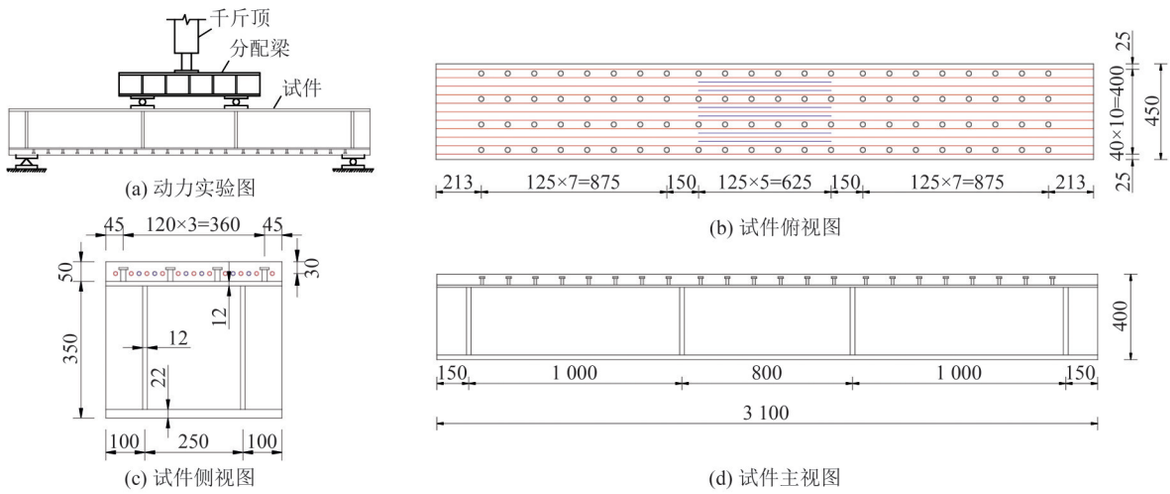


图 5　试件尺寸及加载方法（单位：mm）

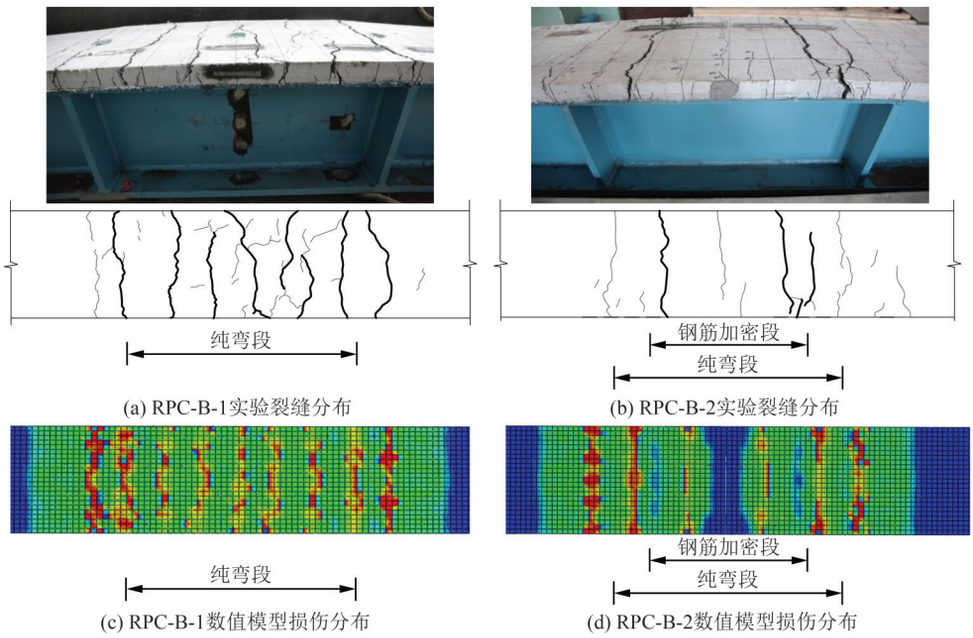
Fig.5　Sizes of the specimens and loading method (unit: mm)

1.2.2　破坏形态对比

如图 6 所示，试验加载过程中，RPC 出现裂缝并快速发展，试件刚度不断降低。随着位移增大，钢梁屈服，试件刚度降至较低水平；随后 RPC 出现多点集中开裂，达到试件极限承载力后，持续加载，承载力略微下降。裂缝主要分布在试件的纯弯段，除较宽的集中裂缝外，RPC 表面还有许多细微的小裂纹。由于钢纤维的拉接作用增强了材料性能，这些细微裂纹未与集中开裂处同时迅速发展。数值模型在加载过程中，依靠混凝土的最大主塑性应变或拉伸损伤系数来查看裂缝的形成及发展过程，与试验加载产生的裂缝分布对比可知，数值模型的破坏模式及裂缝分布与实际试验基本一致。因此可认为数值模型能很好地模拟该试验。

1.2.3　荷载-跨中位移曲线对比

如图 7 所示，RPC-B-1 和 RPC-B-2 的荷载分别在 2 200 kN 与 1 800 kN 之前，荷载-位移曲线近似直线。试件延性很好，屈服后继续加载竖向挠度会迅速增大，承载力仍处于上升阶段。试件最大承载力分别为 2 887 kN 和 2 584 kN；达到极限承载力后，持续加载，承载力略微下降。鉴于数值模型在模拟 UHPC 材料特性、构件刚度及边界条件等方面存在一定误差，数值模型与试验的荷载-跨中位移曲线存在较小偏差，但两曲线的开裂点、屈服点等特征点



(a) RPC-B-1实验裂缝分布 (b) RPC-B-2实验裂缝分布

(c) RPC-B-1数值模型损伤分布 (d) RPC-B-2数值模型损伤分布

图 6 RPC 试验裂缝及有限元模型损伤分布

Fig.6 Distribution of cracks in the RPC test and damage in the finite element model

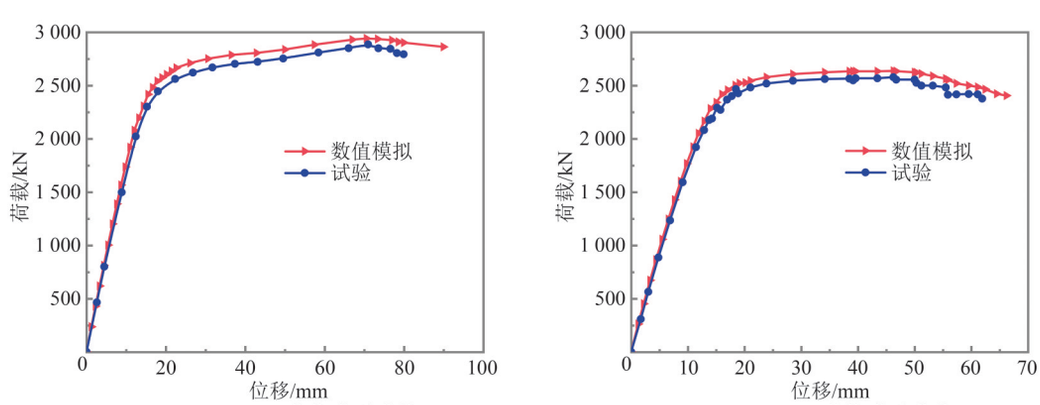
及曲线发展趋势基本吻合,表明数值模型可以很好地模拟此构件弯曲受力过程。

2 湿接缝构造设计及参数分析

2.1 湿接缝构造设计

湿接缝的过渡构造除传统接缝外,还可以有如下 5 种构造形式:加密钢筋接缝、斜向接缝、锯齿接缝、矩形接缝、异形钢板接缝。加密钢筋接缝通过增大接缝截面处配置钢筋的数量来提高接缝截面配筋率,增强接缝受力性能,UHPC 开裂后钢筋继续受力,从而使接缝的抗裂能力和受力性能更佳;斜向接缝通过侧面斜向过渡可以减小接缝界面拉应力;锯齿接缝依靠平面锯齿形过渡减小接缝界面拉应力;矩形接缝采用平面矩形过渡,通过受剪界面保证荷载传递;异形钢板接缝在接缝处设置异形钢板,依靠 Z 型企口的刚性锁定作用,使接缝两侧的 UHPC 连接更紧密,使异形钢板与 UHPC 组成一个整体,共同承受荷载,从而限制湿接缝处裂缝的发展。

对不同形式接缝进行建模的过程中,材料本构参照 1.1.1 节设置,接触模型参照 1.1.2 节与 1.1.3 节选取,各单元的选择及网格尺寸的划分参照 1.1.4 节,结构整体尺寸及加载方式与 1.2.1 节所述试件保持一致,数值模型如图 8 所示。为对比分析加密钢筋对接缝的增强作用,本文分别分析了不配置加密钢筋,以及配置∅6、∅8、∅10、∅12 mm 的加密钢筋的情况,不同接缝模型参数如表 3 所示。其他形式的接缝构造均配置∅12 mm 的加密钢筋。



(a) RPC-B-1荷载-位移曲线 (b) RPC-B-2荷载-位移曲线

图 7 RPC-B 荷载-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curve of RPC-B

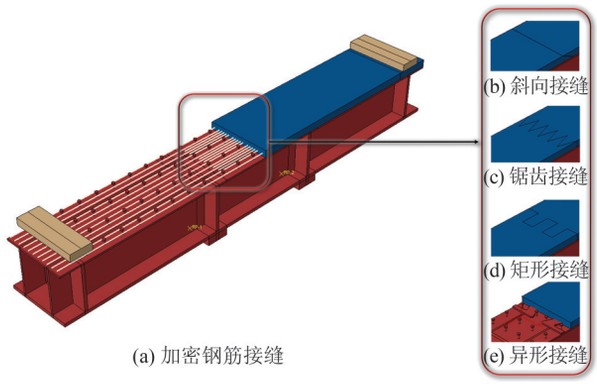


图 8　不同形式接缝模型图

Fig.8　Model diagrams of different forms of joints

表 3　加密钢筋接缝详细参数

Table 3　Detailed parameters of rebar-densified joints

钢筋加密情况	湿接缝截面配筋率/%
不加密	3.84
∅6 mm 加密	4.34
∅8 mm 加密	4.73
∅10 mm 加密	5.24
∅12 mm 加密	5.85

2.2　湿接缝构造性能参数分析

2.2.1　极限承载力分析

各方案的极限荷载见表 4，荷载-位移曲线如图 9 所示。各试件的初始刚度基本相同，带接缝试件的承载能力小于整体浇筑试件。整体浇筑试件承载力为 2 942 kN，∅12 mm 加密钢筋接缝试件承载力为 2 637 kN，相对整体浇筑试件承载力降低 10.36%；斜向接缝试件与∅12 mm 加密钢筋接缝试件相比，承载能力基本相同，为 2 634 kN，承载力降低 0.10%；矩形接缝试件和锯齿接缝试件的承载力相对∅12 mm 加密钢筋接缝试件的承载力均有所提高，相对传统接缝（∅12 mm 加密钢筋接缝）试件承载力分别提高了 3.75% 和 2.46%；异形钢板接缝试件由于设置了异形钢板，刚度有所增加，UHPC 开裂后，异形钢板仍能很好地参与工作，使整个试件的承载能力有所增强。

由表 4 可知，各形式接缝的极限承载能力相差不大，分析原因是结构的极限承载能力主要取决于钢梁，带接缝的混凝土板对结构极限承载力的贡献相对较小，因此上述不同形式接缝对结构极限承载力虽有不同程度的提升，但大多提升幅度较小。其中，加密钢筋接缝和异形钢板接缝通过在接缝处加强构造来提高湿接缝受力性能，而斜向接缝、锯齿接缝和矩形接缝则是通过改变接缝界面过渡形式来提高其受力性能。

表 4　数值模拟分析结果

Table 4　Analysis results of numerical simulation

构件	极限荷载/kN	开裂荷载/kN	初裂名义应力/MPa
整体浇筑试件	2 942	921	27.23
无加密钢筋试件	2 484	242	7.15
∅6 mm 加密钢筋试件	2 522	263	7.78
∅8 mm 加密钢筋试件	2 552	281	8.31
∅10 mm 加密钢筋试件	2 591	317	9.37
∅12 mm 加密钢筋试件	2 637	334	9.88
斜向接缝试件	2 634	512	15.14
锯齿接缝试件	2 702	642	18.98
矩形接缝试件	2 736	683	20.19
异形钢板接缝试件	2 906	738	21.78

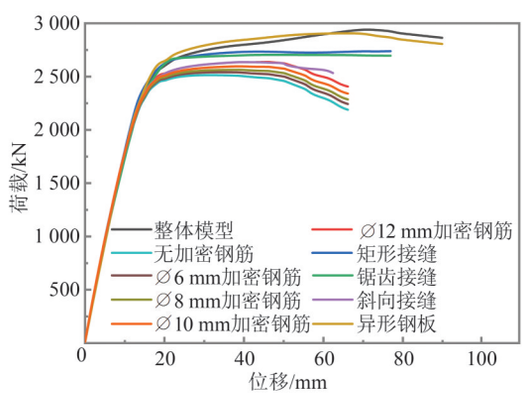


图 9　荷载-跨中位移曲线

Fig.9　Load-displacement curve at mid-span

综上，由于接缝的存在，UHPC 层受拉贡献减小，相对于整体浇筑试件会提前退出工作，因此，带接缝试件承载能力一般小于整体浇筑试件。除斜向接缝试件外，其他试件的承载能力相对传统接缝试件（加密钢筋接缝）均有一定的提升，其中异形钢板接缝的承载能力提高显著，相比其他接缝形式具有明显的优势。

2.2.2　抗裂性能分析

由表 4 可知，各构件开裂荷载及初裂名义应力、带接缝试件的开裂荷载和初裂名义应力与整体浇筑试件相比，均有不同程度的降低，尤其是无加密钢筋的传统接缝，其初裂名义应力远小于整体浇筑试件，降幅达 73.72%。

对比分析不配置加密钢筋和配置不同直径加密钢筋的名义开裂应力可知，虽然从局部来看提高接缝处的配筋率对于接缝的抗裂是有利的，但配置∅12 mm 加密钢筋的初裂名义应力仅比不配置加密钢筋提高了 38.18%，且提高后的初裂名义应力为

9.88 MPa,也仅仅是整体浇筑构件初裂名义应力27.23 MPa的36.28%,远达不到要求。

斜向接缝试件、锯齿接缝试件和矩形接缝试件得益于良好的构造特点,开裂荷载较∅12 mm加密钢筋的传统接缝试件均有显著提高,提升幅度分别为53.30%、92.22%和104.50%。斜向接缝试件、锯齿接缝试件和矩形接缝试件的UHPC初裂名义应力分别为15.14、18.98、20.19 MPa。本文对该现象进行分析,斜向接缝和锯齿接缝利用了弹性力学中Mohr圆的概念,这样比较大的正应力转换到接触界面时就会变得很小,以此提高接缝抗裂性。基于该理论,锯齿接缝得益于接触界面较斜向接缝更有优势,因此其抗裂性能的提升更加显著。

异形钢板接缝试件在设置钢板后,接缝附近试件刚度有所提高,开裂荷载和UHPC初裂名义应力随之增大,其初裂名义应力达21.78 MPa,较整体浇筑试件仅低20.01%。本文对该现象进行分析,异形钢板接缝通过加强接缝两侧UHPC的连接,从而延缓开裂,达到提高接缝抗裂性的目的。相对于∅12 mm加密钢筋接缝,异形钢板接缝提供的刚度更大,抗裂性能提升效果更为显著。同时,相较于上述通过改变接缝界面过渡形式的其他接缝,异形钢板接缝的提升效果更优。

综上可知,结构的抗裂性能与混凝土板湿接缝的性能密切相关。对接缝进行一定且合理的构造处理,均可显著提高开裂荷载和初裂名义应力,尤其是异形钢板接缝提升效果显著。

3 结论

基于内聚力模型及固结无滑移模型,本文建立了钢-UHPC轻型组合桥面的UHPC浇筑湿接缝数值模拟方法,并通过试验数据验证了其精确性。在此基础上,对提出的5种UHPC湿接缝构造设计方案进行弹塑性全过程分析,得出如下结论:

1)本文数值模拟方法模拟的UHPC损伤情况与试验裂缝分布情况基本一致,荷载-跨中位移曲线的开裂点、屈服点等特征点及曲线发展趋势与试验也基本吻合。这表明数值模型中的材料本构、接触模型及边界条件等均设置合理,与实际试验情况相符。因此认为基于内聚力模型及固结无滑移模型的UHPC浇筑湿接缝数值模拟方法具备一定的可靠性,可用于对UHPC浇筑湿接缝进行弹塑性全过程分析。

2)在对湿接缝设计构造的极限承载力分析中,无加密钢筋的传统接缝试件承载力较整体浇筑试件降低13.96%;斜向接缝试件与∅12 mm加密钢筋接缝试件的承载力较为接近;锯齿接缝试件和矩形接缝试件的承载力介于∅12 mm加密钢筋接缝试件与整体浇筑试件之间;异形钢板接缝试件由于钢板的刚性锁定作用,其承载力相对整体浇筑试件有所提高。

3)在对湿接缝设计构造的抗裂性能分析中,本文所设计接缝的抗裂性能均优于无加密钢筋的传统接缝试件,且相对∅12 mm加密钢筋接缝试件的提高比率均较大。其中加密钢筋接缝和斜向接缝的抗裂性能相对较弱,不利于接缝试件受力,不建议在实际工程中运用;锯齿接缝和矩形接缝的抗裂性能相对较强,对接缝受力有一定的改善;异形钢板接缝的初裂名义应力为∅12 mm加密钢筋接缝的2倍多,抗裂性能优越。

异形钢板接缝依靠异形钢板Z型企口的刚性锁定作用使接缝两侧的UHPC连接更为紧密,异形钢板与UHPC组成一个整体,共同承受荷载,从而延缓湿接缝处裂缝的产生,其极限承载力和抗裂性均得到显著提升,相对于其他接缝表现最优。因此,建议在实际工程中应用。

参考文献:

[1] 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, 2015.
SHAO Xudong, HU Jianhua. The Steel-UHPC Lightweight Composite Bridge Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[2] ZOU Y, ZHENG K D, ZHOU Z X, et al. Experimental study on flexural behavior of hollow steel-UHPC composite bridge deck[J]. Engineering Structures, 2023, 274: 115087.

[3] BENEDETTY C A, DOS SANTOS V B, KRAHL P A, et al. Flexural and shear behavior of steel-UHPC composite beams: a review[J]. Engineering Structures, 2023, 293: 116649.

[4] 史占崇, 苏庆田, 陈亮. 钢-UHPC组合桥面板中焊接栓钉的疲劳性能及设计布置方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6): 107-122.
SHI Zhanchong, SU Qingtian, CHEN Liang. Fatigue behavior and design layout method of welded stud connectors in steel-UHPC composite bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6): 107-122.

[5] 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 Qinghua, CHENG Zhenyu, DENG Penghao, 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.

[6] XIAO J L, GUO L X, NIE J G, et al. Flexural behavior of wet joints in steel-UHPC composite deck slabs under hogging moment[J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113636.

[7] 《中国公路学报》编辑部 . 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97.

[8] JIA J F, REN Z D, BAI Y L, et al. Tensile behavior of UHPC wet joints for precast bridge deck panels[J]. Engineering Structures, 2023, 282: 115826.

[9] 陈德宝，曾明根，苏庆田，等 . 钢-UHPC 组合桥面板湿接缝界面处理方式[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 154-162.
CHEN Debao, ZENG Minggen, SU Qingtian, et al. Interfacial treatment measures of wet joints in composite bridge deck composed of steel and UHPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 154-162.

[10] GAO X L, WANG J Y. Experimental and numerical study on the tensile behaviours of wet joints in steel-UHPC composite decks using a novel tensile test setup [J]. Materials and Structures, 2021, 54(2): 93.

[11] 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(3): 210-217.
SHAO Xudong, CHEN Bin, ZHOU Xuhong. Experiment on bending behavior of wet joints in lightweight composite deck system composed of steel and RPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 210-217.

[12] QIU M H, SHAO X D, YAN B F, et al. Flexural behavior of UHPC joints for precast UHPC deck slabs [J]. Engineering Structures, 2022, 251: 113422.

[13] 邵旭东，樊伟，黄政宇 . 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1-13.
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 1-13.

[14] FENG Z, LI C X, KE L, et al. Experimental and numerical investigations on flexural performance of ultra-high-performance concrete (UHPC) beams with wet joints[J]. Structures, 2022, 45: 199-213.

[15] ZHANG Y, QIN Y Y, ZHU Y P, et al. Numerical and analytical studies of flexural behaviour of prestressed UHPC joints[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(2): 215-231.

[16] 殷雨时，杨纪，苏庆田，等 . 装配式节段梁 UHPC 湿接缝界面力学性能数值模拟分析[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(1): 77-85.
YIN Yushi, YANG Ji, SU Qingtian, et al. Numerical simulation analysis of prefabricated segmental beam UHPC wet joint interfacial mechanical performance[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(1): 77-85.

[17] 张劲，王庆扬，胡守营，等 . ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
ZHANG Jin, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Verification of parameters of the concrete damaged plasticity model in ABAQUS[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 127-130.

[18] 国家质检总局 . GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 50010-2010 Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[19] 单波 . 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙：湖南大学, 2002.
SHAN Bo. Experimental research on the basic mechanical properties of reactive powder concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2002.

[20] 李立峰，范昕，石雄伟，等 . 预应力 UHPC 梁弯曲性能分析与合理设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 38-46.
LI Lifeng, FAN Xin, SHI Xiongwei, et al. Analysis of flexural performance and rational design of prestressed UHPC beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 38-46.

[21] 张永涛，田飞 . 预制桥面板 UHPC-U 形钢筋湿接缝受力性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 48-52.
ZHANG Yongtao, TIAN Fei. Experimental study on mechanical behavior of UHPC wet joints with U-shaped reinforcement in precast deck slabs[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 48-52.

[22] 裴必达 . 钢-UHPC 轻型组合结构构造细节疲劳评估与优化研究[D]. 长沙：湖南大学, 2019.
PEI Bida. Research on fatigue assessment and optimization of structural details in steel-UHPC lightweight composite structures[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

[23] PAN W H, FAN J S, NIE J G, et al. Experimental study on tensile behavior of wet joints in a prefabricated composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin reactive-powder concrete layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10): 04016064.

（编辑：高映月）