

# 预制拼装钢-UHPC组合桥面板湿接缝抗弯性能研究

廖万成,赵华\*,安家禾

(湖南大学 土木工程学院风工程与桥梁工程湖南省重点实验室,湖南长沙 410082)

**摘要:**纵肋上置并形成PBL剪力连接件的钢-UHPC组合桥面板是一种新型桥面结构。该结构采用预制拼装施工,工厂预制钢-UHPC组合梁段,现场进行施工组装,相邻钢梁通过焊接形成一体,而相邻UHPC桥面板则通过现浇UHPC湿接缝连成一体,湿接缝是其薄弱部位。针对该新型结构其湿接缝相关研究较少的问题,该文以某实际工程为背景,完成钢-UHPC组合桥面板湿接缝足尺模型抗弯性能试验。建立Abaqus有限元模型,并采用试验结果校核有限元模型。在此基础上,进行了湿接缝截面模拟方式、钢面板厚度、UHPC层厚度和燕尾榫角度的有限元模型参数分析。对比美国土木工程师协会(ASCE)、《美国房屋建筑规范》(ACI)以及中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)关于构件的刚度计算公式,发现中国规范计算值更接近试验值。基于普通钢筋混凝土梁的抗弯刚度计算公式,结合试验数据进行了参数修正,并用有限元模型结果进行了校核。结果表明:钢-UHPC组合桥面板湿接缝有着优异的延性和刚度;采用摩擦行为模拟湿接缝界面计算成本小且计算效果良好;增加钢板厚度或UHPC层厚度均能有效提高构件刚度和承载力;燕尾榫角度对构件的刚度和承载能力影响很小;参数修正后的抗弯刚度计算公式能较好地计算钢-UHPC组合桥面板构件跨中位移。

**关键词:**钢-UHPC组合桥面板;湿接缝;有限元模型;足尺试验;抗弯性能

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

## Study on Flexural Behavior of Wet Joints of Prefabricated Steel-UHPC Composite Bridge Deck

LIAO Wancheng, ZHAO Hua\*, AN Jiahe

(Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Prefabricated steel-UHPC composite bridge deck is a new deck structure system that places the longitudinal rib at the upper layer and forms PBL shear connectors. This structure can be prefabricated in the factory and assembled on-site. The adjacent steel beams are integrated by welding, and the cast in-situ UHPC wet joints connect the adjacent UHPC bridge decks. However, these wet joints represent the structure's vulnerable segments but with little research. To this end, a full-scale model test has been conducted to study the flexural behavior of the wet joints in a steel-UHPC composite bridge deck in a practical project. The Abaqus finite element model was established and verified based on the test results. With experimental validation, the parameters analysis of the finite element model, including the wet-joint simulation method, steel panel thickness, UHPC thickness, and inclination angle of the dovetail tenon, were analyzed. In comparing the stiffness calculation equation within the American Society of Civil Engineers (ASCE), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI), and the Chinese Code GB 50010—2010, it is discerned that the calculated values in the Chinese code are closer to the test values. Based on the flexural stiffness calculation equation for ordinary reinforced concrete beams, the corresponding parameters are modified according to the test data, and the theoretical results are verified with the finite element results. The results show that the wet

收稿日期:2022-10-24(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978256)

作者简介:廖万成,男,硕士研究生.E-mail:1286196164@qq.com

\*通信作者:赵华,男,博士,教授.E-mail:zhaohua@hnu.edu.cn

joints of the steel-UHPC composite bridge deck have excellent ductility and stiffness. Using friction behavior to simulate a wet joint interface has low calculation costs and well-agreed results. Increasing the thickness of the steel panel or UHPC can effectively enhance the stiffness and bearing capacity of the structure. In contrast, the impact of the inclination angle of the dovetail tenon on the structure's stiffness and bearing capacity is minimal. After parameter modification, the modified calculation equation of flexural stiffness can more accurately predict the mid-span deflection compared with the results by ordinary concrete specification.

**Keywords:** steel-UHPC composite bridge deck; wet joint; finite element model; full-scale tests; flexural behavior

## 0 引言

正交异性钢桥面(Orthotropic Steel Deck, OSD)因其轻质高强、易于制造和架设等特点被广泛应用于大跨桥梁中,但是OSD存在钢桥面易疲劳开裂、桥面铺装易损坏<sup>[1-3]</sup>两大问题,影响桥梁的使用寿命。OSD桥面体系焊缝构造复杂、数量多、局部刚度不足是产生这两大问题的根本原因之一。理论和实践<sup>[4-7]</sup>表明:在OSD上铺设薄层超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)并通过可靠连接使两者协同工作进而组成钢-UHPC新型组合桥面结构是行之有效的解决办法。此外,取消钢顶板纵向加劲肋并上置形成PBL剪力件,以减少焊缝数量并形成新型钢-UHPC组合桥面板也是高效的解决方法。钢-UHPC新型组合桥多采用节段预制拼装施工,组合桥面板通过湿接缝连接,湿接缝的力学性能影响结构的力学性能。湿接缝部位发生病害,轻则湿接缝开裂,进而导致钢筋、钢桥面的锈蚀,影响结构运营状态与使用寿命,重则影响预制构件传力。

国内外学者对湿接缝的力学性能进行了相关研究。在湿接缝界面处理方式上,李文超<sup>[8]</sup>设计了一种钢丝网贴合模板的燕尾榫湿接缝界面处理方法,试验结果表明该方法合理可行,能有效提高燕尾榫湿接缝界面初裂应力;陈德宝等<sup>[9]</sup>对湿接缝界面的处理方式进行研究,试验结果表明高压水枪凿毛的施工效果良好。在接缝结构形式上,邵旭东等<sup>[10]</sup>研究了加密钢筋、异形钢板和焊接钢筋网3种湿接头的抗裂性能,研究结果显示不同湿接头其抗裂性能差异较大;Pan等<sup>[11]</sup>研究了平口、斜面、锯齿、矩形和加强钢板5种湿接头形式,试验表明不同湿接头的受力性能相近,但抗裂性能有差异,锯齿、矩形和加强钢板湿接头其抗裂性能更为优异;Zhao等<sup>[12]</sup>研究了钢-RPC桥面板燕尾榫形湿接缝在负弯矩下的受力性能,发现燕尾榫的倾角对结构刚度无显著影响。在湿接缝钢筋构造形

式上,苏庆田等<sup>[13]</sup>对弧形钢筋、直钢筋和U形钢筋连接的湿接缝足尺模型进行了轴拉试验,结果表明3种湿接缝模型的破坏模式相同,弧形钢筋连接的湿接缝模型其抗拉能力略高于另外两种钢筋连接方式。

虽然已开展了许多关于钢-UHPC桥面板湿接缝的相关研究,但是相关学者关于湿接缝研究的试件设计多基于UHPC面板或钢-UHPC面板。这类钢-UHPC面板试件的设计则多基于正交异性钢桥面,即试件钢面板多采用带纵向U肋或工字肋的钢板,UHPC面板厚度多集中于45~60 mm,二者采用栓钉连接。而本文研究的纵肋上置并形成PBL剪力连接件的钢-UHPC组合桥面板是一种新型钢-UHPC桥面板结构,采用平钢板+超厚UHPC层(15 cm厚),与上述钢-UHPC桥面板湿接缝有较大差异,上述研究成果能否适用于该新型结构有待进一步研究。因此,本文对这种新型钢-UHPC桥面板湿接缝进行抗弯性能研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

以某大桥为依托工程,试件设计以实桥钢-UHPC组合桥面板湿接缝为原型,按照1:1等比例制作试件模型,试件尺寸及构造细节如图1所示。试件全长5 400 mm,宽900 mm,由钢板、预制UHPC板和后浇UHPC板三部分组成,钢板和UHPC板通过PBL剪力件连成整体、协同工作。钢板厚度8 mm,材料强度等级Q355;UHPC板厚度150 mm,上下两层均布置HRB400钢筋,布置情况如图1(c)所示。其中上层纵向钢筋直径20 mm,横向钢筋直径16 mm,下层纵向钢筋、横向钢筋直径均为16 mm。湿接缝企口形式采用外宽内窄的燕尾榫。湿接缝处的纵向钢筋采用焊接搭接,搭接长度分别为390 mm和540 mm,纵向钢筋和横向钢筋采用绑扎连接。PBL剪力件厚10 mm、高90 mm,开孔直径50 mm。

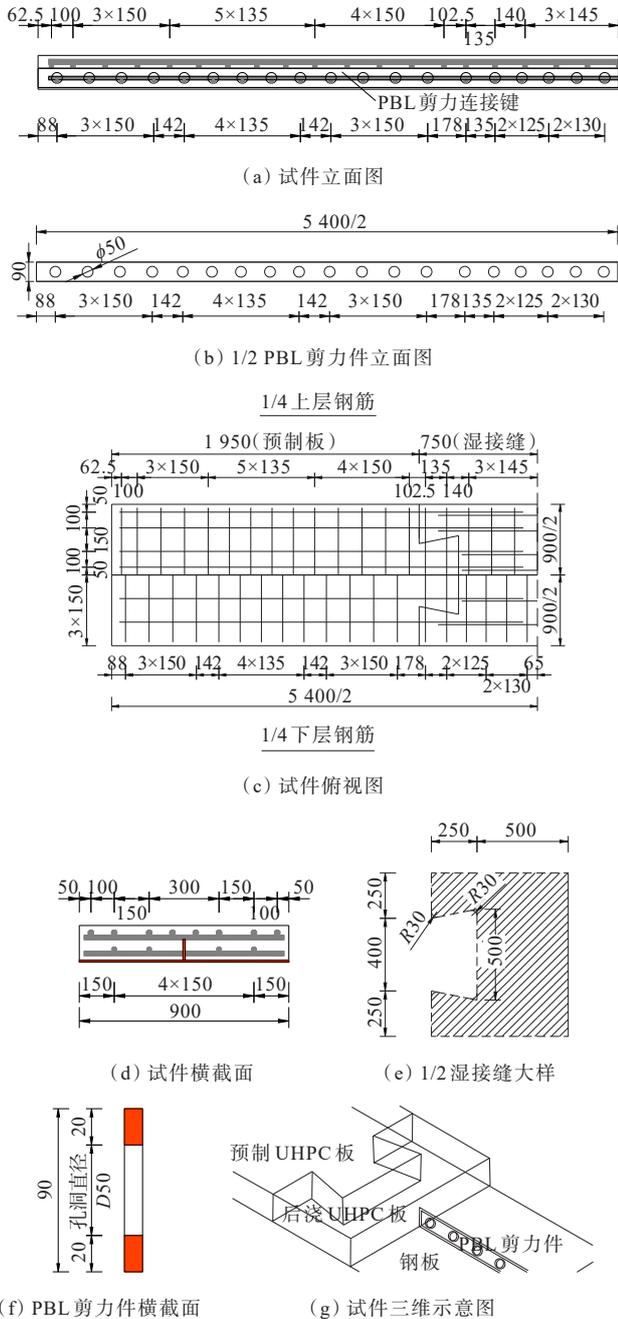


图1 试件尺寸及构造(单位:mm)

Figure 1 Configuration of the specimen (unit: mm)

试件 UHPC 板分两次浇筑成型。第一次浇筑预制 UHPC 面板,标准养护 48 h 后,对试件进行拆模,进行 90 °C 以上蒸气养护 48 h。预制 UHPC 面板蒸养结束后,对湿接缝界面做湿润处理,浇筑湿接缝部位,后浇 UHPC 养护方式与预制 UHPC 养护方式一致。

### 1.2 加载测试

试件采用四点加载,加载系统示意如图 2 所示。在加载点下方、支座上方和跨中各布置 1 个千分表、共计 5 个千分表,加载点下方千分表用来核对是否偏

载,支座上方千分表用来消除支座处沉降的影响,以求得真正的跨中位移。此外,在接缝界面布置导杆引伸仪来测量接缝开裂后的应变变化。应变测点布置如图 3 所示。在加载过程中,用东华采集系统采集了钢板外侧、UHPC 板侧面和顶面以及内部钢筋测点的相关应变变化。

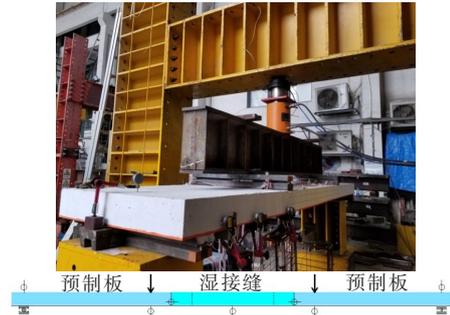


图2 加载示意图

Figure 2 Loading setup

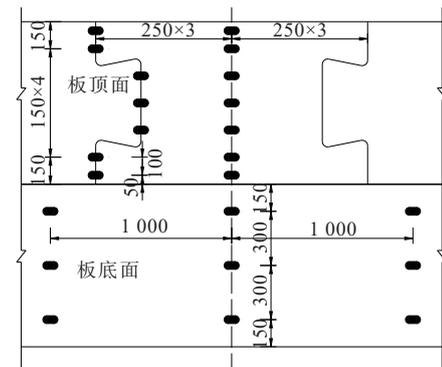


图3 应变测点布置(单位:mm)

Figure 3 Layout of strain sensor positions(unit: mm)

试验采用力-位移混合加载。先以预估开裂荷载的 40% 进行预加载,检查测量、采集仪器是否工作正常。正式加载以 5 kN 一级的加载方式逐级加载至预估开裂荷载,随后以 10 kN 一级的加载方式逐级加载至裂缝宽度达 0.2 mm;随后位移控制加载至试件破坏。

### 1.3 UHPC 材料配比及性能

试件所用 UHPC 材料由佛山市交通科技有限公司提供。预制 UHPC 和湿接缝 UHPC 采用了相同的材料,其质量密度均为 2 467.6 kg/m<sup>3</sup>,质量配比如表 1 所示。

考虑到两次 UHPC 其浇筑时间不一样,每次浇筑 UHPC 之前均按照《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)制作 UHPC 材料性能试件,分别用于测量抗压强度、抗拉强度和弹性模量,两次浇筑的

UHPC其材料性能如表2所示。

表1 材料配合比

Table 1 UHPC mixture proportion

| 活性粉末/% | 水/% | 外加剂/% | 钢纤维/% |
|--------|-----|-------|-------|
| 84.5   | 6.6 | 1.6   | 7.3   |

表2 材料性能

Table 2 Material performance

| 活性粉末 | 抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/MPa |
|------|----------|----------|----------|
| 预制板  | 154.0    | 7.3      | 45 800   |
| 湿接缝  | 158.4    | 7.6      | 46 100   |

注:表中UHPC抗压强度、弹性模量分别为两组材性试验结果的平均值;抗拉强度由抗折试验结果的平均值根据法国UHPC规范计算得出。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 荷载-跨中底部位移曲线

图4给出了钢-UHPC组合板试件的荷载-跨中底部位移曲线。图中荷载曲线并不能划分出典型的三阶段受力状态,表现为两阶段受力:线性段和屈服段。

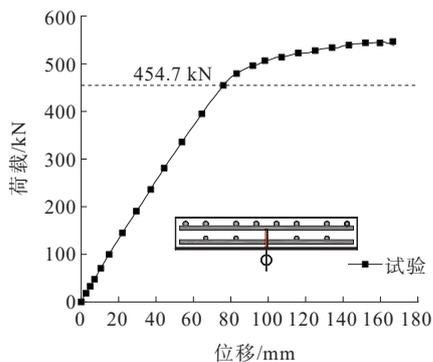


图4 荷载-跨中底部位移曲线

Figure 4 Load-displacement curve at bottom of midspan

线性段:该阶段荷载与位移呈线性关系。当荷载达到22.1 kN时,构件UHPC表面已经出现了肉眼可见裂缝。尽管UHPC板开裂后,部分受拉UHPC已经进入塑性阶段,试件刚度开始退化,但燕尾榫的机械咬合力、钢板良好的力学性能使试件裂后刚度变化不明显。

屈服段:当荷载达到454.7 kN时,裂缝宽度达0.501 mm,荷载-位移曲线出现明显拐点。该阶段荷载与位移呈非线性关系,钢板屈服,受拉区裂缝周围UHPC进入塑性阶段。裂缝不断发展、截面中性轴逐渐上移,试件抗弯刚度减小,位移快速增加,而荷载变

化不大。钢板屈服后,位移不断增大、荷载趋于水平,UHPC受压区顶部起皮剥落、受拉区形成主裂缝,曲线有较长的平直段,说明该接缝有良好的延性。

### 2.2 荷载-引伸仪曲线及裂缝情况

接缝截面处设置的引伸仪读数可以反映出新老混凝土界面的裂缝宽度变化趋势,引伸仪布置如图2所示,图5为试件荷载-界面裂缝宽度曲线以及界面裂缝的最后形态。表3为湿接缝界面裂缝特征宽度对应的名义拉应力。Rafiee<sup>[14]</sup>指出UHPC其最大裂缝宽度不超过0.05 mm时,对结构的正常使用极限状态没有影响,因此以构件出现0.05 mm宽度裂缝为试件的名义开裂应力。可见,UHPC接缝处的开裂应力大于普通混凝土抗拉强度。

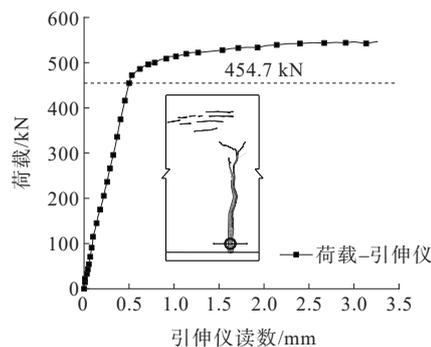


图5 荷载-接缝截面引伸仪读数图

Figure 5 Load-deflection curve of wet joint section

表3 接缝界面UHPC名义拉应力-裂缝宽度

Table 3 UHPC nominal tensile stress and crack width of wet joint section

| 裂缝宽度/mm | 名义应力/MPa | 裂缝宽度/mm | 名义应力/MPa |
|---------|----------|---------|----------|
| 0.05    | 5.8      | 0.15    | 19.5     |
| 0.10    | 14.1     | 0.20    | 23.4     |

从图5可以看出:荷载-引伸仪曲线变化趋势与试件受力相同,亦可分为两阶段(线性段和屈服段)。加载前期,试件工作性能良好,没有肉眼可见裂缝。随着荷载增加,裂缝首先出现在预制板与湿接缝界面相交处侧面下缘(靠近钢板处)。当荷载为22.1 kN时,湿接缝跨中位置处其侧面出现第一条竖向裂缝,随后湿接缝处UHPC板侧面出现多条竖向裂缝。当荷载达到47.7 kN时,湿接缝界面处裂缝宽度为0.05 mm。当荷载达到159.5 kN时,预制UHPC板其侧面出现第一条竖向裂缝。随后裂缝不断发展,当荷载达到513.8 kN,界面接缝处的裂缝发展成主裂缝,同时

湿接缝在距离 UHPC 板顶部 3 cm 左右的范围内出现长约 5 cm 的横向裂缝。当荷载达到 546.7 kN, 千斤顶伸长量接近量程, 此时试件钢板受拉屈服, 试件顶部起皮剥落、新老 UHPC 界面处形成受拉主裂缝, 荷载-位移曲线已有较长平直段, 认为试件破坏, 停止加载。

### 2.3 荷载-应变曲线

试件同一横截面上布置一定数量的应变片, 取钢板跨中底部应变片数据平均值绘制钢板的荷载-应变曲线, 见图 6; 绘制 UHPC 跨中顶部的荷载-应变曲线, 见图 7。两者都表现出明显的两阶段特性(线性段和屈服段), 与相应荷载-位移曲线类似。

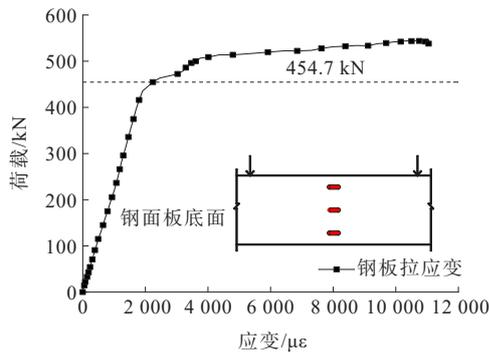


图 6 钢板跨中底部荷载-应变图

Figure 6 Load-strain curve of steel panel at bottom of midspan

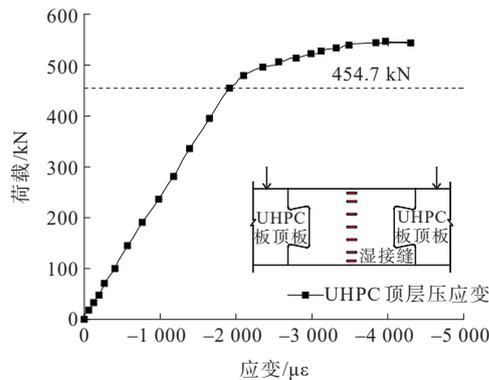


图 7 UHPC 跨中顶部荷载-应变图

Figure 7 Load-strain curve of UHPC at top of midspan

由图 6、7 可以看出: 试件出现可见裂缝后(22.1 kN), 钢板和 UHPC 板并没有发生应变突增现象, 应变以某一速率稳定增长直至钢板屈服, 这也表明试件开裂对构件的力学性能影响不大。当荷载达到 454.7 kN 时, 钢板屈服, 荷载-应变曲线斜率陡降, 这表明钢板屈服与否对应变影响较大。究其原因可能是: 钢板位于钢-UHPC 组合板下缘, 构件受弯时, 尽管 UHPC 层已经开裂, 但是钢板良好的力学性能弥补了 UHPC 开裂带来的钢-UHPC 组合板其整体刚度

损失, 使得组合截面中性轴变化缓慢, 应变缓慢增长。

## 3 有限元分析

### 3.1 模型建立

为进一步了解钢-UHPC 桥面板湿接缝的力学性能, 优化结构设计, 通过 Abaqus 建立试件有限元模型, 如图 8 所示。钢板、UHPC、垫块均采用 C3D8R 实体单元, 钢筋采用 T3D2 桁架单元。有限元模型所采用的接触和约束如下: 钢板与 UHPC 采用摩擦行为, 考虑到钢板与 UHPC 间的自然黏结力很小, 切向行为采用无摩擦, 法向行为采用硬接触模拟。钢筋、PBL 嵌入 UHPC。模型采用位移加载, 位移加载点与相应的加载块耦合。湿接缝界面模拟在有限元分析中至关重要, 为探究准确、高效的湿接缝界面模拟方法, 本文分别采用绑定约束、摩擦行为和内聚力行为 3 种方式来模拟湿接缝界面, 并将计算结果和试验结果进行对比分析。摩擦行为通过切向行为和法向行为来定义, 切向行为采用罚函数模拟<sup>[15]</sup>, 摩擦系数取 0.4; 法向行为采用硬接触。内聚力行为包含损伤起始准则和损伤演化规律两个基本因素<sup>[12]</sup>, 损伤起始准则如式(1)所示,  $\sigma$ 、 $\tau_s$ 、 $\tau_t$  分别为黏聚面上的正应力、第一切向应力和第二切向应力。当正应力和切应力的平方和为 1 时, 损伤开始, 损伤演化规律取断裂能为 3 N/mm。

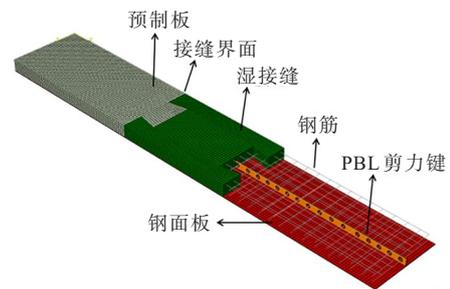


图 8 试件有限元模型

Figure 8 Finite element model

$$f = \left( \frac{\sigma}{2.2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_s}{4.4} \right)^2 + \left( \frac{\tau_t}{4.4} \right)^2 \quad (1)$$

模型中, 对于材料本构模型的选取, UHPC 受压本构模型采用郭晓宇等<sup>[16]</sup>基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(简称《混规》)修正后的本构曲线方程, 见式(2); 受拉本构模型采用张哲等模型<sup>[17]</sup>, 见式(3); 钢材和钢筋采用理想弹塑性模型, 见式(4):

$$\sigma = \begin{cases} f_c A \xi / [1 + (A - 1) \xi^{A-1}] & 0 < \epsilon \leq \epsilon_{c0} \\ f_c \xi / [B(\xi - 1)^2 + \xi] & \epsilon_{c0} < \epsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f_c$ 为UHPC的单轴抗压强度; $\xi = \epsilon/\epsilon_0$ 为应变比, $\epsilon_{c0}$ 为峰值应变, $\epsilon_0 = (6.726 4f_c + 2 460.9) \times 10^{-6}$ ;A为曲线上升段参数,取 $A = (6.726 4f_c + 2 460.9)/(17.2f_c + 836.4)$ ,B为曲线下降段参数,取 $B = 2$ 。

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} \frac{f_{ct}}{\epsilon_{ca}} \epsilon & 0 < \epsilon \leq \epsilon_{ca} \\ f_{ct} & \epsilon_{ca} < \epsilon \leq \epsilon_{pc} \end{cases} \quad (3)$$

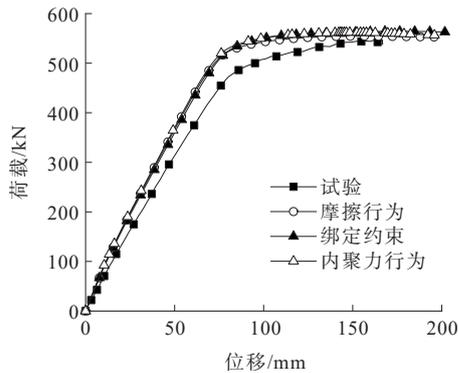
式中: $f_{ct}$ 为应变硬化阶段平均应力; $\epsilon_{ca}$ 为线弹性阶段峰值应变,取 $220 \mu\epsilon$ ; $\epsilon_{pc}$ 为极限应变,取 $2 200 \mu\epsilon$ 。

$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s & 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_y & \epsilon_s > \epsilon_y \end{cases} \quad (4)$$

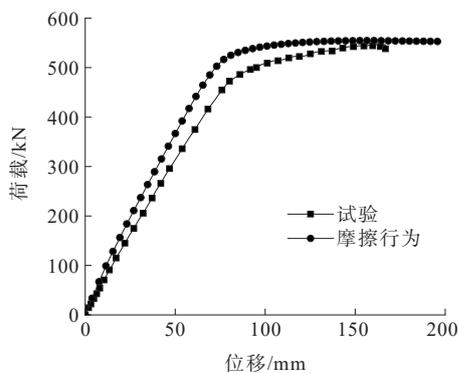
式中: $E_s$ 为钢板或钢筋的弹性模量(分别取206 GPa、200 GPa); $\epsilon_s$ 为钢板或钢筋应变; $f_y$ 为钢板或钢筋的屈服强度(分别取403 MPa、430 MPa)。

### 3.2 模型验证

有限元模型跨中荷载-位移曲线如图9所示。



(a) 湿接缝界面模拟与试验比较



(b) 推荐界面模拟方式与试验比较

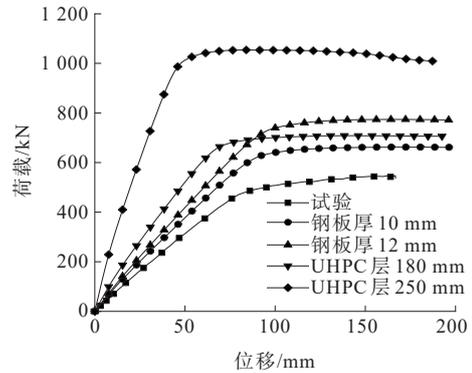
图9 有限元模型跨中荷载-位移曲线  
Figure 9 Midspan load-displacement curves of the finite element model

从图9(a)中的跨中荷载-位移曲线中可以发现:绑定约束、摩擦行为和内聚力行为3种湿接缝界面模拟方式的线性段刚度相近,极限荷载的高低依次为绑定约束、内聚力行为和摩擦行为,其极限荷载分别为试验值的1.01、1.03和1.03倍。与试验值相比,3种模拟方式所得到的线性刚度略高于试验结果,可能是有限元模型较试验更为理想化。

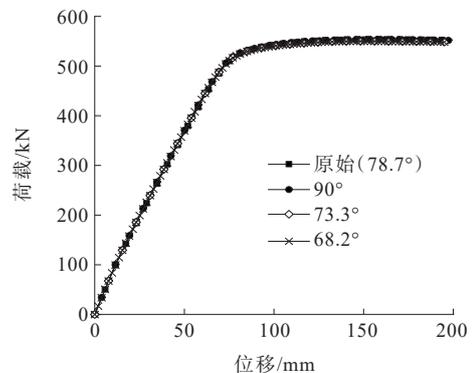
3种模拟方式的极限荷载误差均在5%以内,荷载-位移曲线较为吻合。因此,3种湿接缝界面模拟方式的有限元分析均是可靠的,考虑到计算时长以及试件的变形,后续有限元湿接缝界面采用摩擦行为模拟。

### 3.3 参数分析

为进一步探究钢-UHPC组合板湿接缝的受力性能以及优化湿接缝的构造形式,为后面的刚度分析提供数据支持,对湿接缝的钢板厚度、UHPC层高度和燕尾榫角度3个参数进行分析,有限元结果如图10所示。



(a) 钢板厚度、UHPC层厚度



(b) 燕尾榫角度

图10 有限元参数分析荷载-位移曲线  
Figure 10 Load-displacement curves of parameters in finite element model

结果表明:在正弯矩作用下,改变燕尾榫角度(68.2°~90°)对试件的刚度和承载力提高不大,钢板厚度和UHPC层厚度对钢-UHPC组合板的刚度和承载力有重要影响。UHPC层采用180 mm、250 mm(原UHPC层的1.2倍、1.39倍)时,其极限承载力分别增大30.3%、94%;钢板增厚至10 mm、12 mm(原钢板的1.25倍、1.5倍)时,相应极限承载力分别增大22%、42.5%。虽然增厚UHPC其极限强度和前期刚度均大于增厚钢板,但考虑受力性能和经济适用性,更推荐增厚钢板,采用UHPC板(150 mm)+钢板(10 mm)是最佳的。

#### 4 刚度分析

纵肋上置钢-UHPC组合板取消了顶板纵向U肋,其刚度计算与正交异性桥面板不同。美国土木工程师协会(ASCE)<sup>[18]</sup>推荐采用等效惯性矩法计算压型钢板-混凝土板的挠度值,等效惯性矩取未开裂截面惯性矩 $I_0$ 与开裂截面惯性矩 $I_{cr}$ 之和的一半。《美国钢筋混凝土房屋建筑规范》<sup>[19]</sup>也采用有效惯性矩法计算挠度值,等效惯性矩取值为 $I_e = I_0(M_{cr}/M)^3 + I_{cr}[1 - (M_{cr}/M)^3]$ 。而《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[20]</sup>的抗弯刚度计算公式综合考虑配筋率等因素,其计算式为 $B_s = E_s A_s h_0^2 / (1.15\varphi + 0.2 + 6\alpha_E \rho)$ 。计算构件变形的荷载一般为 $(0.5 \sim 0.7)M_u$ <sup>[21]</sup>( $M_u$ 为423.7 kN/m),表4给出了3种计算方式所计算的 $0.5M_u$ 、 $0.6M_u$ 、 $0.7M_u$ 共3种不同荷载下的位移值,并与试验值相比较。

表4 跨中位移计算结果与试验结果对比

Table 4 Comparison of midspan displacement calculation results with test results

| 荷载       | $f_{uc}/\text{mm}$ | ASCE               |                 | ACI                |                 | 《混规》               |                 |
|----------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|          |                    | $f_{uc}/\text{mm}$ | $f_{uc}/f_{uc}$ | $f_{uc}/\text{mm}$ | $f_{uc}/f_{uc}$ | $f_{uc}/\text{mm}$ | $f_{uc}/f_{uc}$ |
| $0.5M_u$ | 41.88              | 36.23              | 0.87            | 40.37              | 0.96            | 46.35              | 1.11            |
| $0.6M_u$ | 51.23              | 43.31              | 0.85            | 48.27              | 0.94            | 56.41              | 1.10            |
| $0.7M_u$ | 58.24              | 48.31              | 0.83            | 53.84              | 0.92            | 63.52              | 1.09            |

注: $f_{uc}$ 为位移试验值; $f_{uc}$ 为位移计算值。

从表4可以看出:ASCE方法和ACI方法计算得到的挠度值都较试验值偏小,究其原因,ASCE方法是基于普通压型钢板-混凝土组合板提出的,而纵肋上置钢-UHPC组合板的含钢量远大于普通压型钢板,使开裂后的刚度变化不明显。此外,UHPC开裂

后钢纤维发挥的桥接性能降低了开裂对构件的影响,而这一优势是普通混凝土所不具备的。因此,为更适应本文试件特点,对规范的某些参数取值进行修正是有意义的。

ACI方法计算值与试验值误差5%左右,与试验值拟合较好,但该公式与中国常用刚度计算公式表达形式不同,且开裂弯矩的计算具有一定难度,不利于实际工程应用。而《混规》在试验和理论分析的基础上,综合考虑了配筋率、弹性模量等因素,给出了半理论半经验的刚度计算公式,计算值比试验结果偏大10%左右,因为规范计算公式针对钢筋混凝土结构,与本文新型结构不同,但具有很高的参考价值。本文参考钢筋混凝土结构的受弯刚度计算方法,将钢板看成超出保护层厚度的钢筋,同时考虑钢板对UHPC的约束作用与钢筋对普通混凝土的约束作用的差异,根据试件的自身特点对式(5)中的一些参数进行相应的修正。

$$B_s = \frac{M}{\phi} = \frac{E_s A_s h_0^2}{\frac{\varphi}{\gamma_s} + \frac{\alpha_E \rho}{\zeta}}, \varphi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s}, \quad (5)$$

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$$

式中: $\varphi$ 为裂缝间钢板应变不均匀系数; $\zeta$ 为混凝土受压边缘平均应变综合系数; $\alpha_E$ 为钢筋与混凝土弹性模量比; $\rho$ 、 $\rho_{te}$ 分别为截面配筋率、有效受拉配筋率; $\sigma_s$ 为按照标准荷载组合下计算的钢板应力。《混规》是基于采用HPB235、HRB335级钢筋的混凝土受弯梁得到的试验结果,取 $\gamma_s = 0.87$ 、 $\alpha_E \rho / \zeta = 0.2 + 6\alpha_E \rho$ (对于矩形截面)。

按《混规》取值计算得到的混凝土受压边缘应变随 $M/M_u$ 的变化曲线如图11所示,该变化曲线对于给定结构的材料参数 $\alpha_E$ 、 $\rho$ 是确定的。若取 $\zeta$ 为常数且取合适的数值,则图中的计算曲线和试验曲线将有较好的拟合度。通过不断调整参数 $\zeta$ ,使得试验曲线和计算曲线不断逼近,最终取 $\alpha_E / \zeta = 0.2 + 4.5\alpha_E \rho$ 。

试件和有限元模拟 $(0.5 \sim 0.7)M_u$ 所对应的跨中位移 $\delta_1$ 、本文基于《混规》修正后的拟合参数所计算的跨中位移 $\delta_2$ 及《混规》计算得到的跨中位移 $\delta_3$ 如表5所示。表5中,除了列出了本文试验所对应的情况(钢板8 mm厚,UHPC板150 mm厚),还计算了其他几种参数情况(UHPC板厚度不变的情况下,钢板厚

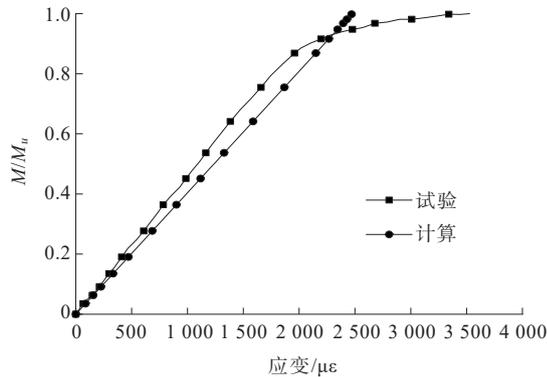


图 11 UHPC 跨中顶部应变变化图

Figure 11 The strain variety of UHPC at top of midspan

度分别采用 10 mm 和 12 mm 以及钢板厚度不变的情况下, UHPC 面板厚度分别采用 180 mm 和 250 mm)。从表 5 可以看出:在钢板屈服前,修正参数后的抗弯刚度计算公式,与试验结果拟合良好,故所修正参数对该结构具有一定适用性。

## 5 结论

本文以预制拼装钢-UHPC 组合桥面板湿接缝抗弯性能试验为基础,校核有限元模型的正确性并进行相应参数分析,得出以下结论:

(1) 钢-UHPC 组合桥面板湿接缝构件具有良好的延性。试件破坏征兆明显, UHPC 板顶部有起皮现

表 5 跨中位移计算结果比较

Table 5 Comparison of calculation results of midspan displacement

| 项目            | 0.5M <sub>u</sub> |                |                                |                |                                | 0.6M <sub>u</sub> |                |                                |                |                                | 0.7M <sub>u</sub> |                |                                |                |                                |
|---------------|-------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
|               | δ <sub>1</sub>    | 本文方法           |                                | 《混规》计算         |                                | δ <sub>1</sub>    | 本文方法           |                                | 《混规》计算         |                                | δ <sub>1</sub>    | 本文方法           |                                | 《混规》计算         |                                |
|               |                   | δ <sub>2</sub> | δ <sub>2</sub> /δ <sub>1</sub> | δ <sub>3</sub> | δ <sub>3</sub> /δ <sub>1</sub> |                   | δ <sub>2</sub> | δ <sub>2</sub> /δ <sub>1</sub> | δ <sub>3</sub> | δ <sub>3</sub> /δ <sub>1</sub> |                   | δ <sub>2</sub> | δ <sub>2</sub> /δ <sub>1</sub> | δ <sub>3</sub> | δ <sub>3</sub> /δ <sub>1</sub> |
| 试验            | 41.88             | 39.96          | 0.95                           | 46.35          | 1.11                           | 51.23             | 48.77          | 0.95                           | 56.41          | 1.10                           | 58.24             | 54.99          | 0.94                           | 63.52          | 1.09                           |
| 钢板厚 10 mm     | 44.27             | 43.04          | 0.97                           | 50.60          | 1.14                           | 51.95             | 50.49          | 0.97                           | 59.24          | 1.14                           | 63.45             | 61.54          | 0.97                           | 72.05          | 1.14                           |
| 钢板厚 12 mm     | 46.15             | 45.33          | 0.98                           | 53.86          | 1.17                           | 55.73             | 54.66          | 0.98                           | 64.81          | 1.16                           | 65.30             | 63.88          | 0.98                           | 75.64          | 1.16                           |
| UHPC 层 180 mm | 32.73             | 32.34          | 0.99                           | 37.13          | 1.13                           | 40.39             | 39.97          | 0.99                           | 45.73          | 1.13                           | 48.04             | 47.47          | 0.99                           | 54.20          | 1.13                           |
| UHPC 层 250 mm | 21.14             | 21.02          | 0.99                           | 23.73          | 1.12                           | 26.87             | 26.82          | 1.00                           | 30.12          | 1.12                           | 30.69             | 30.60          | 1.00                           | 34.29          | 1.12                           |

注:跨中位移 δ<sub>1</sub>、δ<sub>2</sub>、δ<sub>3</sub> 的单位均为 mm。

象,破坏时钢板底部屈服、接缝界面处形成主裂缝;以钢板屈服为标志,试件破坏经过线性段和屈服段。

(2) 有限元计算结果表明:正弯矩作用下,分别采用绑定约束、摩擦行为和内聚力行为模拟湿接缝界面的有限元模型,三者的抗弯刚度和极限承载力几乎相同;而摩擦行为计算时长较短且能模拟接缝界面的张开,故推荐采用摩擦行为模拟湿接缝界面。

(3) 有限元参数分析结果表明:正弯矩作用下,燕尾榫角度对试件的抗弯刚度和极限承载力影响不大;增加钢板厚度或 UHPC 层厚度都能有效提高试件刚度,具体如何选择,应综合考虑经济性和受力性能。

(4) 基于《混规》的短期刚度计算公式,结合试验数据修正参数取值,其计算结果与试验、有限元结果拟合较好,所提出的修正公式有一定的工程意义。

## 参考文献:

### References:

[1] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研

究进展[J].中国公路学报,2017,30(3):14-30,39.

ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39.

[2] KARALAR M, DICLELI M. Effect of thermal induced flexural strain cycles on the low cycle fatigue performance of integral bridge steel H-piles[J]. Engineering Structures, 2016, 124: 388-404.

[3] 李智,钱振东.典型钢桥面铺装结构的病害分类分析[J].交通运输工程与信息学报,2006,4(2):110-115.

LI Zhi, QIAN Zhendong. Disease analysis and classification of the representative pavements on steel deck [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(2): 110-115.

[4] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25(2): 40-45.

SHAO Xudong, CAO Junhui, YI Dutaotao, et al. Research on basic performance of composite bridge deck system with orthotropic steel deck and thin RPC layer[J]. China Journal

- of Highway and Transport,2012,25(2):40-45
- [5] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5):417-428.
- [6] 陈斌. 正交异性钢-UHPC轻型组合桥面结构湿接头抗弯性能研究与试验[D]. 长沙:湖南大学, 2018.  
CHEN Bin. Research and experiment on flexural behavior of wet joints of orthotropic steel-UHPC lightweight composite deck structure[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [7] 罗军. 钢-UHPC轻型组合桥面结构力学性能及裂缝宽度计算理论研究[D]. 长沙:湖南大学, 2019.  
LUO Jun. Theoretical study on mechanical properties and crack width calculation of steel-UHPC light composite bridge deck structure[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [8] 李文超. 钢混组合结构装配式UHPC桥面板接缝构造与力学性能研究[D]. 南京:东南大学, 2018.  
LI Wenchao. Research on joint construction and mechanical behavior of assembly bridge panel of steel-concrete composite structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [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] 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 light-weighted composite deck system composed of steel and RPC layer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 210-217.
- [11] 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.
- [12] ZHAO C H, WANG K K, ZHOU Q F, et al. Full-scale test and simulation on flexural behavior of dovetail-shaped reactive powder - concrete wet joint in a composite deck system[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(8): 04018051.
- [13] 苏庆田, 胡一鸣, 田乐, 等. 用于组合梁桥面板湿接缝的弧形钢筋连接构造[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9):86-92.  
SU Qingtian, HU Yiming, TIAN Le, et al. Curved bar connection configuration used for wet joints of deck of composite girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9):86-92.
- [14] RAFIEE A. Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete [M]. Kassel: Kassel University Press, 2012.
- [15] 袁嘉梁. 全透空式UHPC刚架拱桥及其湿接缝试验研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2019.  
YUAN Jialiang. Experimental study on fully permeable UHPC rigid frame arch bridge and its wet joint[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [16] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):369-376.  
GUO Xiaoyu, KANG Jingfu, ZHU Jinsong. Constitutive relationship of ultrahigh performance concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(2):369-376.
- [17] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(8):50-58.  
ZHANG Zhe, SHAO Xudong, LI Wenguang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58.
- [18] American Society of Civil Engineers. Standard for the structural design of composite slabs: ANSI/ASCE 3-91[S]. New York: ASCE, 1992.
- [19] American Concrete Institute(ACI). Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI 318-14 and ACI 318R-14. Farmington Hills, Mich., USA; 2014.
- [20] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [21] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.