

新型波形钢-UHPC组合桥面板抗弯性能研究

刘力^{1,2}, 王康宁^{1,2}, 高立强^{1,2}, 程震宇^{3*}, 张清华⁴

(1. 桥梁智能与绿色建筑全国重点实验室, 武汉 430034; 2. 中铁大桥局集团有限公司, 武汉 430050;
3. 西华大学建筑与土木工程学院, 成都 610039; 4. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 文中提出了一种新型波形钢-超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 组合桥面板结构体系, 围绕该类桥面板的抗弯性能开展深入研究, 为进一步探究其疲劳性能奠定基础。首先, 针对该组合桥面板结构设计制作了3个试件, 并对其进行了3组正弯矩作用下的足尺模型试验, 探究不同剪跨长度下结构的破坏模式、承载能力、钢-UHPC层间滑移等关键力学指标的发展规律。在此基础上, 建立了考虑UHPC材料非线性和钢-UHPC层间接触非线性的有限元模型, 用于确定新型组合桥面板结构关键设计参数及其对结构性能的影响规律。最后, 基于塑性理论建立了适用于新型组合桥面板极限承载能力预测的理论模型。结果表明: 正弯矩作用下新型组合桥面板的破坏形式均为弯曲破坏, 结构的承载能力和变形能力均随着剪跨长度的减小而增大; 所建立的有限元模型能准确模拟结构的受力特性, 可用于研究不同参数对结构受力特性的影响规律, 其中剪跨长度、波形钢高度和组合销数量是影响结构受力特性的关键设计参数; 所建立的新型组合桥面板承载能力理论模型可准确预测其极限承载能力, 相关研究成果可为该组合桥面板的工程应用提供参考。

关键词: 波形钢-UHPC组合桥面板; 足尺模型试验; 抗弯性能; 有限元模型; 参数分析; 理论模型; 剪跨长度

中图分类号: U443.31, U441.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0034-13

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240731003

Research on Flexural Performance of Undulating Steel-UHPC Composite Bridge Decks

LIU Li^{1,2}, WANG Kangning^{1,2}, GAO Liqiang^{1,2}, CHENG Zhenyu^{3*}, ZHANG Qinghua⁴

(1. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

*Corresponding author: swjtu_czy@126.com

Abstract: A novel undulating steel-UHPC composite bridge deck system was proposed, and its flexural performance was comprehensively investigated to provide a foundation for future studies on fatigue behavior. Full-scale model tests were conducted under three sets of positive bending moments to examine failure modes, load-bearing capacities, and the evolution of key mechanical parameters, such as interlayer slip between steel and UHPC, under varying shear span lengths. Based on the experimental results, a finite element model incorporating the nonlinear properties of UHPC and the interlayer contact behavior between steel and UHPC was developed. This model was applied to analyze the influence of critical design parameters on the performance of the composite deck system. Furthermore, a

收稿日期: 2024-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(52408217), 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BH SKL19-06-KF)

作者简介:

刘力(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事桥梁监测与加固方面的研究。E-mail: 2221314129@qq.com。

通信作者:

程震宇(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事钢与钢-混凝土组合结构桥梁疲劳性能方面的研究。E-mail: swjtu_czy@126.com。

theoretical model grounded in plasticity theory was established to predict the ultimate load-bearing capacity of the system. The findings revealed that the failure mode of the composite deck system under positive bending moments is bending failure. Both the load-bearing and deformation capacities increase as the shear span length decreases. The finite element model accurately captured the structural behavior and proved effective in investigating the effects of design parameters. Key factors influencing structural performance include shear span length, undulating steel height, and the number of shear connectors. The theoretical model provided reliable predictions of ultimate load-bearing capacity, offering a solid basis for the design and application of the novel composite bridge deck system in engineering practice.

Keywords: undulating steel-UHPC composite bridge deck; full-scale model test; flexural performance; finite element model; parameter analysis; theoretical model; shear span length

正交异性钢桥面板具有轻质、高强、便于施工等突出优点,被广泛应用于现代各类桥梁工程建设中。然而,钢桥面板因局部刚度不足且过渡不平顺,其连接焊缝易在往复轮载作用下承受较大的应力幅值,进而产生疲劳开裂^[1-3]。此外,在钢桥面板上铺设以各类沥青混凝土为代表的柔性铺装层易发生开裂、分层等病害,会对桥面结构的服役质量造成极大影响,显著增大了后期的运维成本^[4-6]。上述两类工程难题已成为限制现代钢桥可持续发展的关键制约因素。相关研究表明^[7-14]:钢-混凝土组合桥面板结构体系有望综合解决上述两类工程难题,具备广阔的工程应用前景。典型的钢-混凝土组合桥面板由钢桥面板、混凝土结构层和剪力连接件三类关键构件组成^[7-14]:钢桥面板主要包括带各类型开口肋或闭口肋的钢桥面板^[7-9]、平钢板^[10]、波形钢^[11]等;混凝土结构层材料主要包括钢筋混凝土^[12]、工程水泥基复合材料^[13]、超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)^[7]等;剪力连接件通常包括栓钉连接件^[7, 13]、穿孔钢板连接件(简称PBL)^[14]、组合销^[15]、环氧树脂^[16]等。通过上述三类关键构件的合理搭配,可研发多种适用于不同场景的新型钢-混凝土组合桥面板结构体系。总而言之,提升桥面板局部刚度、减少连接焊缝数量是解决钢桥面板疲劳开裂与柔性铺装层过早损坏两类工程难题的主要途径。

从提升局部刚度和减少焊缝数量角度出发,学者们提出了一种由波形钢、组合销和UHPC结构层所构成的新型波形钢-UHPC组合桥面板结构体系(简称“新型组合桥面板”)。该新型组合桥面板将顶板-U肋结构替换为波形钢,不仅能提升横向刚度变化的连续性、减少焊缝数量,该波形钢在施工期间还可作为永久模板使用。UHPC材料具有优异的抗拉、压性能和耐久性,通过改良材料配合比,还可实现其在自然条件下的养护;将其引入作为UHPC结构层应用,可进一步增强该新型组合桥面板的适用性。组合销由PBL连接件演化而来,其开放性的开口设计在保障优异的力学性能同时还兼顾了施工时钢筋穿插的便利性。基于优化设计发展而来的改进螺旋

线(简称MCL)组合销,具备优异的力学性能与疲劳性能,是当前应用最广泛的组合销类型之一。因此,将MCL组合销焊接在波形钢上,并嵌入UHPC结构层中,以提升和保障波形钢和UHPC结构层间的组合效应。

通常情况下,探明新型钢-混凝土组合桥面板结构体系的静力性能,是进一步研究其疲劳性能和耐久性的基础和前提。在各类钢-混凝土组合桥面板弯曲行为的研究领域,邵旭东等^[17]提出了型钢开口肋-UHPC轻型组合桥面板结构体系,并通过开展模型试验研究、有限元模拟及理论分析对其横向受力性能进行研究。裴必达等^[18]提出了由薄平钢板、普通钢筋混凝土、UHPC结构层和PBL连接件组合而成的钢-NC-UHPC组合桥面板结构体系,并对其抗负弯性能进行了试验与理论研究。李传习等^[19]对通过PBL连接件连接UHPC结构层与平钢板的组合桥面板结构体系,开展了纵向抗负弯性能的试验与理论研究。KIM等^[14]提出了由压型钢板、PBL连接件和普通混凝土构成的钢-混凝土组合桥面板结构体系,通过对8个试件开展试验研究,探明了该结构体系的抗正弯性能及其破坏模式。KONG等^[20]通过2个足尺模型试件对波形钢-普通混凝土组合桥面板的弯曲性能开展研究,并验证了平截面假定在分析结构承载能力时的适用性。综上所述,模型试验与有限元分析是研究新型钢-混凝土组合桥面板结构体系抗弯性能的主要手段。

本文以提出的新型组合桥面板为研究对象,深入研究其在桥梁第二体系中的抗正弯性能,为进一步探究其疲劳性能奠定基础。通过模型试验探究该新型组合桥面板的破坏模式、承载能力、变形能力等性能。在此基础上,还建立了有限元模型,用于研究关键设计参数对结构整体力学性能的影响规律。最后,建立了用于预测新型组合桥面板极限承载能力的理论模型,上述研究成果可为该新型组合桥面板的推广应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

本研究提出的新型组合桥面板结构体系,如图1a)所

示,该桥面板结构四边分别支承于横隔板与纵腹板之上,因横向长度远大于纵向长度,故属于单向板;在轮载作用下,荷载主要沿纵桥向传递,如图1b)所示。因此,有必要对新型组合桥面板结构体系的纵向抗正弯性能进行探究。为此,基于桥梁在第二体系中正弯矩区的受力特点,

开展了足尺模型试验,并设计了3个名义上完全相同的试件,其在桥面板中的位置如图1b)所示,编号依次为MT-1、MT-2、MT-3,试件的主要尺寸如图2所示。MCL组合销包含钢销和UHPC销两个部分,主要尺寸以及纵断面布置情况如图3所示。

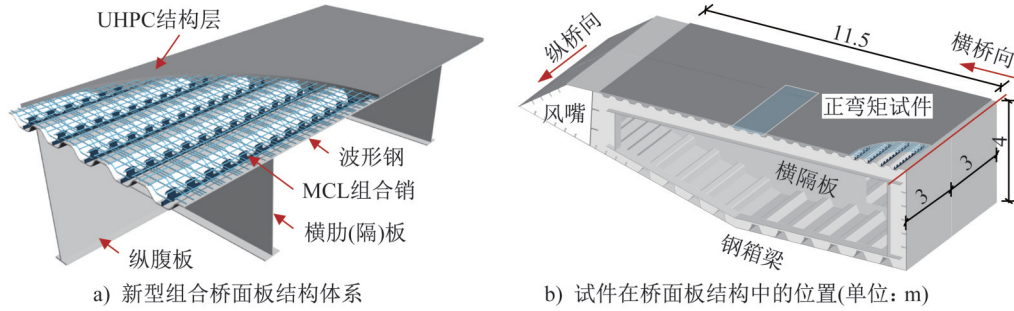


图1 新型组合桥面板和试件在桥面板中的位置

Fig. 1 Novel composite bridge decks and position of specimens in bridge decks

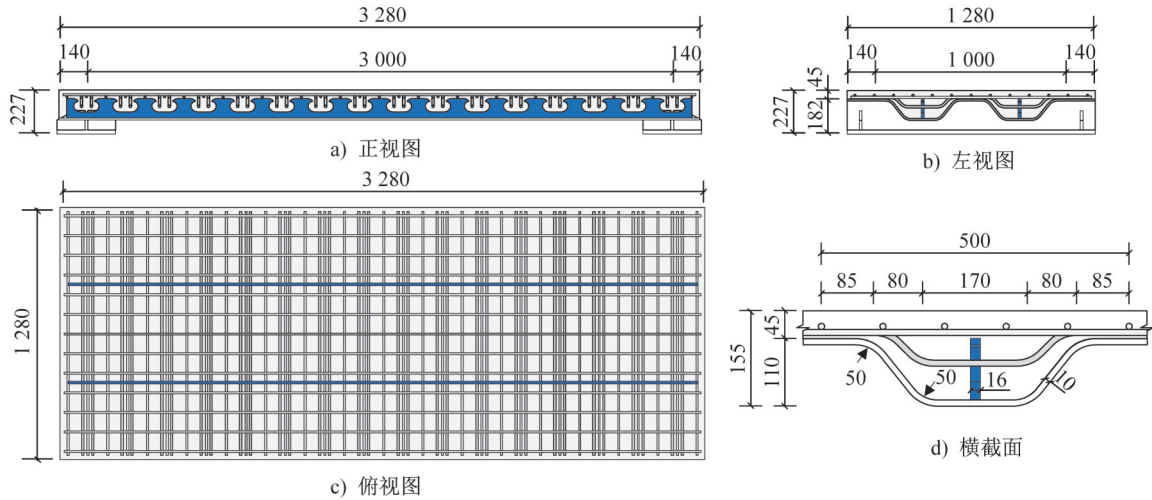


图2 试件的主要尺寸(单位: mm)

Fig. 2 Main dimensions of specimens (unit: mm)

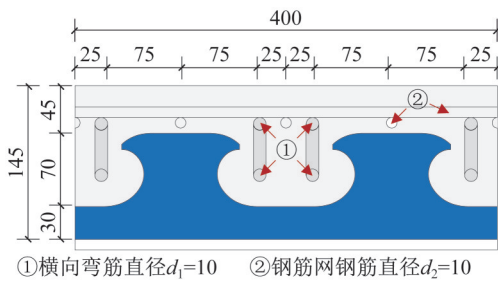


图3 组合销的主要尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Main dimensions of composite dowels (unit: mm)

试件制备过程如下:(1)采用弯折机将平钢板弯折成为波形钢;(2)钢销由平钢板经激光切割加工成型,采用连续焊接方式固定于波形钢上;(3)绑扎钢筋和架设模板;(4)浇筑UHPC材料,与此同时制作相关材料试验试件;(5)待UHPC材料浇筑完成1d后拆模,随后置于潮湿

自然环境中进行7d湿养,随后继续开展21d常规养护。

本试验所用免蒸养UHPC材料,其每立方米主要组分如下:水泥875kg、石英砂900kg、硅灰250kg、膨胀剂与减水剂复合料25kg、钢纤维200kg、水190kg,其中膨胀剂用于减小UHPC材料养护期间产生的收缩应变。UHPC材料的基本力学性能如表1所示,波形钢、钢销和钢筋的标号及其基本力学性能如表2所示。

表1 UHPC材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of UHPC materials MPa

抗压强度	抗拉强度	抗折强度	弹性模量
112.5	7.3	20.1	42 000

1.2 加载方案

足尺模型试验采用单点加载或双点对称加载的加载

表2 材料性能

Table 2 Material properties MPa

类型	牌号	屈服强度	极限抗拉强度	弹性模量
波形钢	Q345qD	410	510	206 000
钢销	Q345qD	410	510	206 000
钢筋	HRB400	545	610	206 000

方案,所施加荷载经分配梁传递至试件横梁上;试验采用简支约束边界条件,具体在试件两端底缘分别设置一个滑动铰支座和一个固定铰支座。试件MT-1、MT-2、MT-3的弯剪段 L_s 分别为 $L/2$ (1 500 mm)、 $L/4$ (750 mm)、 $L/6$ (500 mm),如图4所示,其中 L_s 为试件的弯剪段, L_b 为纯弯段, L 为计算跨径。试验加载采用额定加载能力500 t的MTS进行加载,加载过程分为两个阶段:(1)加载至80%极限承载力之前,采用力控制加载模式,速率为 $20\text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$;(2)加载至80%极限承载力之后转为位移控制加载模式,速率为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

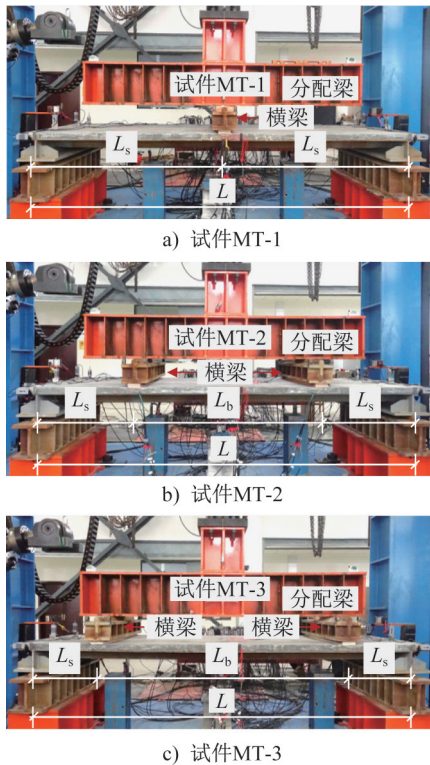


图4 试件布置

Fig. 4 Arrangement of specimens

1.3 测点布置

足尺模型试验中主要测量的内容包括:跨中挠度、钢-UHPC端部滑移、钢筋纵向应变分布、跨中截面应变分布等力学指标随荷载增大的变化规律。如图5所示,各测点布置方案如下:采用位移计D-1测量跨中挠度,

在两端布设位移计S-11、S-12、S-21、S-22用来测量钢-UHPC层间滑移;纵向钢筋上按行列(1-5, A-J)布设应变片以测量应变分布;跨中截面则布设应变片测量应变,其中顶板(T1~T5)、底板(B1~B9)及UHPC侧面(F1~F3)均设有测点。

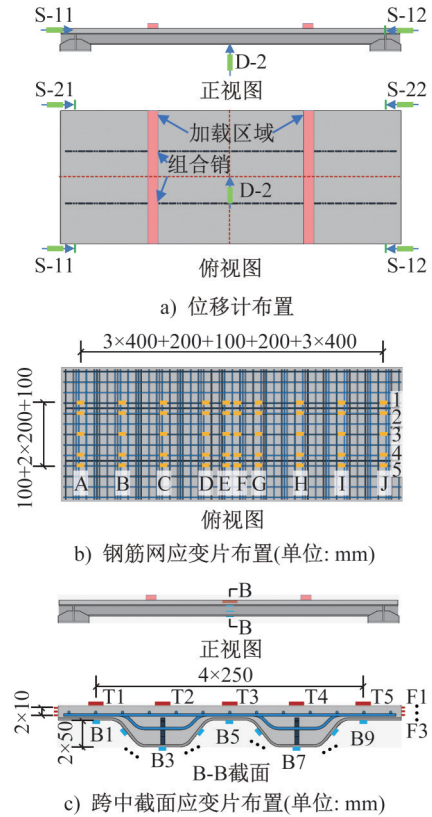


图5 试件的测点布置

Fig. 5 Arrangement of measurement points of specimens

2 试验结果

2.1 破坏模式

通过观察上述试验现象可知:各试件破坏模式主要表现为弯曲破坏,UHPC结构层外侧下缘出现了大量竖裂缝,靠近加载位置处的UHPC上翼缘被压溃,波形钢产生明显的塑性变形,如图6所示。

为进一步观察UHPC结构层中裂缝的分布情况,沿A-A截面将UHPC结构层切开并观察记录,如图7所示。结果表明:(1)试件MT-1中UHPC结构层的裂缝主要为弯曲竖裂缝,试件MT-2和试件MT-3中UHPC结构层裂缝包含纯弯段内的弯曲竖裂缝和弯剪段的弯剪斜裂缝;(2)纯弯段内,在弯曲竖裂缝最长、即UHPC受压区面积最小处,UHPC被压溃。

2.2 荷载-挠度曲线

将试验中测得各试件的荷载和挠度进行均值处理,

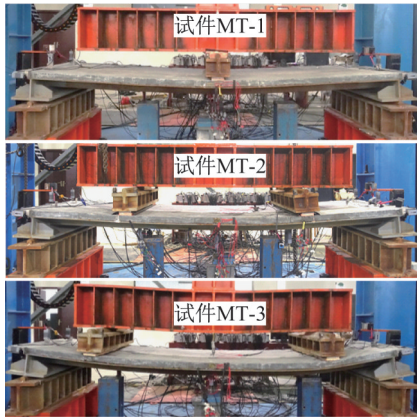


图6 试件破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimens

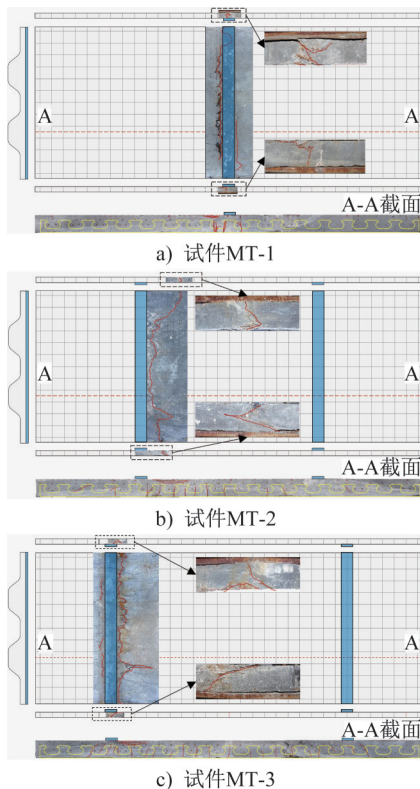


图7 UHPC结构层裂缝分布

Fig. 7 Crack distribution of UHPC structural layer

绘制如图8所示试件的荷载-挠度曲线。由图可知:试件的承载能力和挠度均随剪跨段的减小而增大,各试件在受弯全过程主要表现出4个发展阶段:(1)弹性阶段,试

件的各项力学指标均随荷载增大呈线性发展规律;(2)裂缝发展阶段,纯弯段内UHPC结构层外侧底缘产生裂缝,且该裂缝随着荷载增大向上扩展,但荷载-挠度曲线仍表现出线性发展规律;(3)非线性发展阶段,此阶段纯弯段内UHPC的竖裂缝继续向上扩展,同时弯剪段内产生斜裂缝,试件各项力学指标均表现出非线性的发展规律;(4)破坏阶段,随着荷载不断增大,纯弯段内UHPC结构层的受压区进一步减小,当荷载到达峰值时UHPC结构层出现压溃破坏,此时试件承载力急剧衰减,随后趋于稳定。

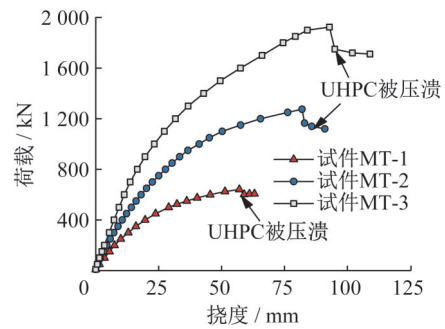


图8 试件荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves of specimens

2.3 荷载-端部滑移曲线

将试验测得各试件的荷载和端部滑移量进行均值处理,绘制如图9所示试件的荷载-端部滑移曲线。结果表明:(1)新型组合桥面板进入承载阶段后,钢-UHPC界面层间出现滑移,且滑移量随荷载增大而增大;(2)荷载-端部滑移曲线发展可划分为弹性阶段、屈服阶段和强化阶段三个部分;(3)极限端部滑移量随纯弯段长度的减小而增大。

各试件的主要试验结果如表3所示,其中 P_y 、 M_y 、 δ_y 与 S_y 和 P_u 、 M_u 、 δ_u 与 S_u 分别为波形钢底缘进入屈服阶段时和新型组合桥面板达到承载能力极限状态时的荷载、弯矩、挠度和对应的端部滑移量; C_d 为挠度延性系数,是衡量构件或结构延性的常用量化指标,可定义为承载能力极限状态时的挠度 δ_u 与屈服状态时的挠度 δ_y 之比,3个试件的 C_d 计算结果分别为3.36、3.07、3.12,均大于3,表明该新型组合结构具有良好的延性。

表3 各试件主要试验结果
Table 3 Main test results of specimens

试件编号	P_y /kN	M_y /(kN·m)	δ_y /mm	S_y /mm	P_u /kN	M_u /(kN·m)	δ_u /mm	S_u /mm
MT-1	364.0	273.0	17.0	0.078	641.5	481.1	57.1	0.415
MT-2	780.8	292.8	26.7	0.335	1367.7	478.7	82.0	1.511
MT-3	1156.8	289.2	29.8	0.491	1924.7	481.0	92.9	2.561

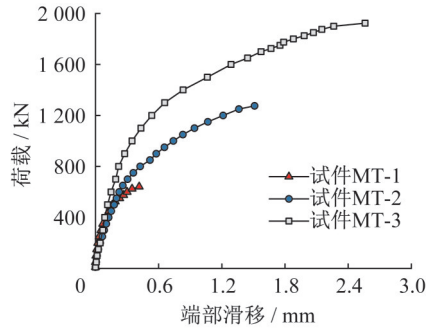


图9 试件荷载-端部滑移曲线

Fig. 9 Load-end slip curves of specimens

2.4 荷载-钢筋应变纵向分布曲线

各试件沿同一纵向截面布置有5列钢筋应变片,用于测量钢筋纵向应变,将5列应变数据进行均值处理,不同荷载等级下的钢筋纵向应变分布如图10所示。结果表明:(1)弯剪段截面内纵向应变从两端向内侧逐渐增大,而纯弯段截面内纵向应变分布相对均匀;(2)随着荷载不断增大,各位置处的钢筋纵向应变也逐渐增大;当UHPC结构层发生压溃破坏时,对应区域内的钢筋纵向应变出现显著突变。

2.5 荷载-跨中截面应变分布

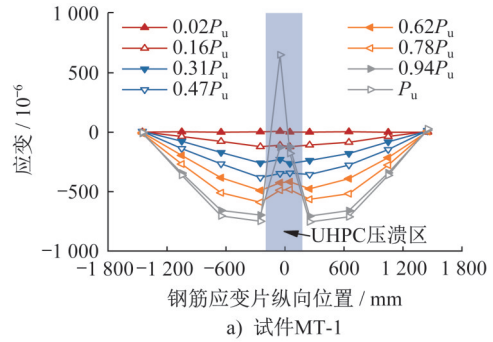
将跨中截面同一高度位置处的应变进行均值处理,并按不同截面高度,分别绘制波峰截面和波谷截面处的应力分布曲线,得到不同荷载作用下跨中截面应变分布规律,如图11所示。其中试件MT-1的加载位置与UHPC结构层顶面预设存在空间干涉,导致该测点的相关试验数据缺失。结果表明:(1)加载初期,跨中截面应变分布符合平截面假定;(2)当荷载增大时,跨中截面应变分布逐渐偏离线性发展规律,但整体上仍符合平截面假定。

3 有限元分析

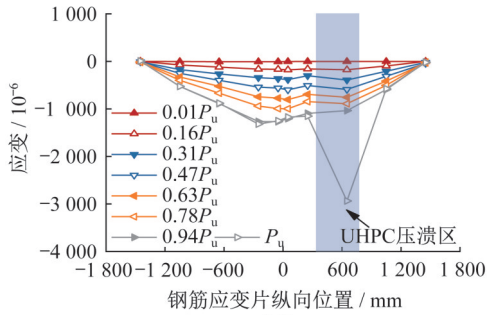
3.1 有限元模型的建立

鉴于足尺模型试验存在成本高昂、耗工量大、周期漫长等局限性,难以系统探究不同参数组合下结构的力学响应规律。因此,基于有限元分析方法,采用先验证模型正确性,后开展参数化分析的研究思路,可显著提升研究效率。

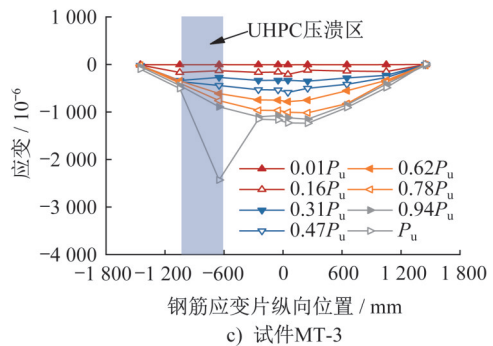
鉴于试验的加载工况、边界条件与试件构造均具有对称性,仅采用ABAQUS有限元分析软件建立1/2有限元模型,如图12所示。在该有限元模型中,UHPC结构层和波形钢采用八节点实体单元(C3D8R)模拟,组合销采用连接单元(CONN3D2)模拟,钢筋均采用两节点桁架单元(T3D2)模拟。有限元模型中设置参考点RP-1与RP-2,其中RP-1与实际加载区域建立耦合关联传递荷



a) 试件MT-1



b) 试件MT-2



c) 试件MT-3

图10 试件钢筋纵向应变分布

Fig. 10 Reinforcement longitudinal strain distribution of specimens

载,RP-2对应钢结构底面施加全约束;荷载通过参考点RP-1施加至结构。有限元模型在1/2切面处采用对称约束,远离对称切面的纵向另一端底部设置活动铰支座,并将该支座约束与参考点RP-2建立关联。UHPC结构层中的钢筋设置Embedded约束,钢-UHPC层间接触行为为设置面-面接触,法向设置硬接触,切向选择库伦摩擦模型,摩擦系数设为0.4。

UHPC材料的本构模型采用杨剑等^[22]和张哲等^[23]提出的受压和受拉本构模型,如图13所示,采用塑性损伤模型模拟UHPC的损伤特性,塑性损伤模型相关参数取值参考文献[24]、[25]中数据。波形钢与钢筋的应力-应变关系采用双折线本构模型,其屈服行为遵循von Mises屈服准则,塑性阶段采用关联性塑性流动法则。组合销纵向和横向的剪力-位移关系采用文献[15]试验结果的拟合函数值,见式(1):

$$P(s) = \frac{s + m}{n_0 + n_1(s + m) + n_2(s + m)^2} \quad (1)$$

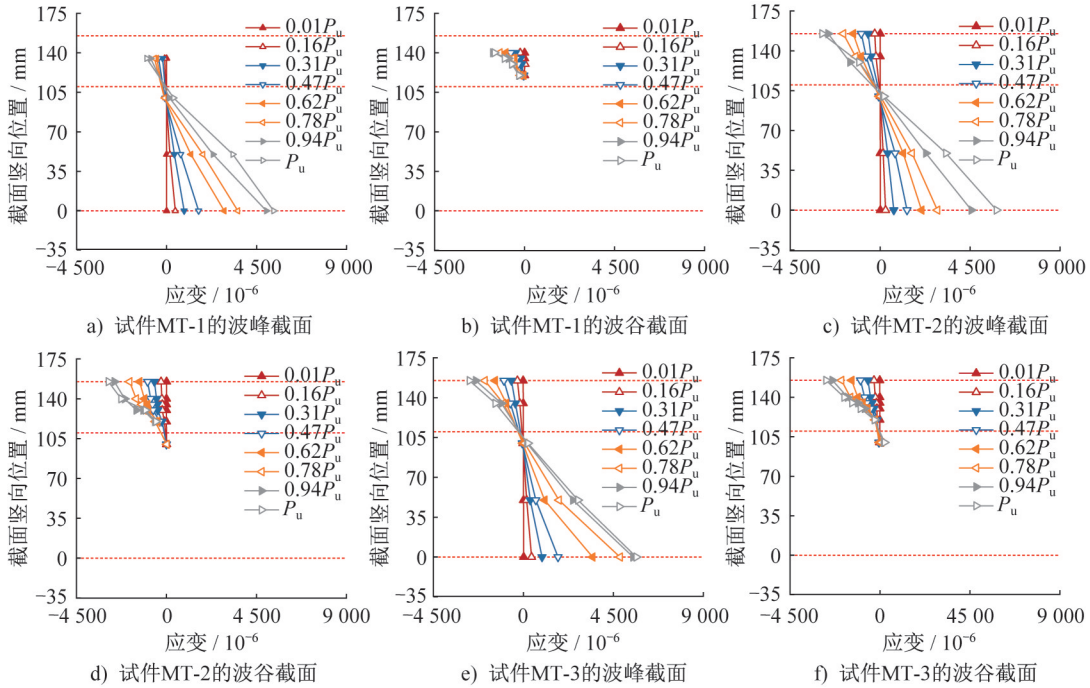


图 11 试件跨中截面应变分布

Fig. 11 Midspan cross-section strain distribution of specimens

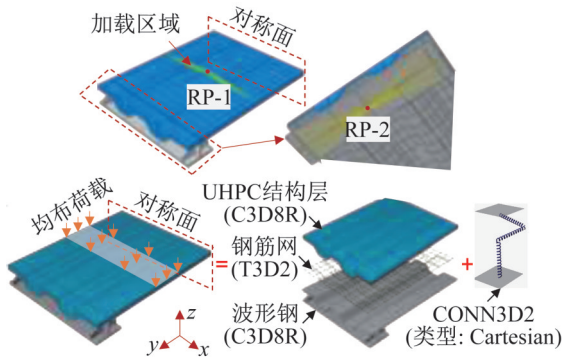


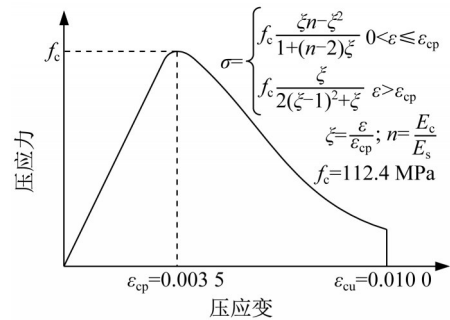
图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

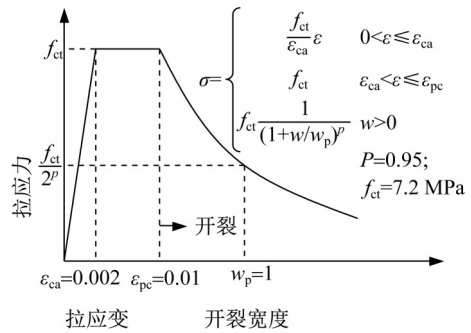
式中： $P(s)$ 和 s 分别代表单个MCL组合销的抗剪承载力和钢-UHPc层间滑移； a 、 b_0 、 b_1 、 b_2 均为拟合函数中的系数，取值如表4所示。

3.2 有限元分析结果与验证

图14为试件MT-2达到极限状态时的有限元分析结果。其中图14a)为波形钢的Mises应力云图，由图可知：波形钢下部区域大部分位置的应力值超过钢材屈服强度，表明该区域波形钢已进入塑性阶段，其塑性变形能力得到充分发挥。图14b)为UHPc结构层沿A-A截面处的塑性应变分布情况，由图可知：该塑性应变首先出现在纯弯跨上，随后传播至剪切跨上，且最大塑性应变出现在了UHPc板的底部。在图14b)中，灰色区域表示UHPc结构层中的裂缝位置，与试验结果基本一致。



a) UHPc受压本构



b) UHPc受拉本构

图 13 UHPc材料的本构模型

Fig. 13 Constitutive model of UHPc materials

将有限元分析得到的荷载-挠度曲线与荷载-端部滑移曲线与试验结果进行对比，如图15所示。结果表明：(1)有限元分析得到的荷载-挠度曲线与荷载-端部滑移曲线与试验结果吻合较好，验证了所建立有限元模型的正确性，可将其进一步用于参数化分析；(2)当试件达到

表4 荷载-滑移曲线函数回归参数

Table 4 Regression parameters of load-slip curves

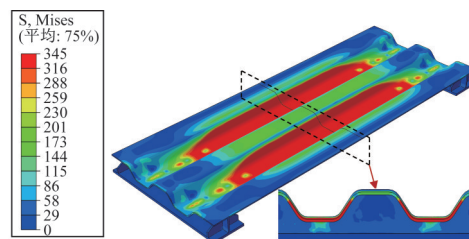
试验类别	参数 ($\times 10^{-5}$)				R^2
	a	b_0	b_1	b_2	
纵向推出试验	-2 730	108	133	1	0.99 385
横向推出试验	9	41	74	5	0.99 851

承载能力极限状态后,有限元分析值与试验值出现偏差,主要是因为有限元分析中UHPC受压损伤后仍可参与计算,与实际压溃后难以继续承载不符。

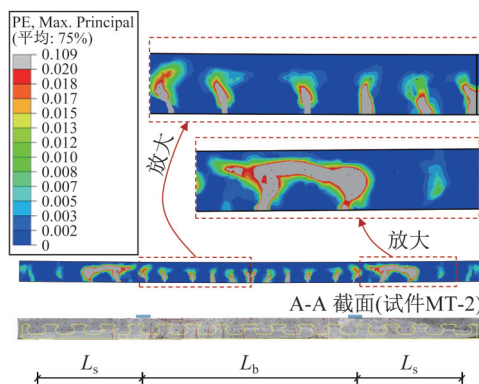
3.3 参数化分析

3.3.1 剪跨长度

剪跨长度是影响钢-混凝土组合板力学性能的关键因素。为深入分析不同剪跨长度对新型组合桥面板受力性能的影响规律,建立了剪跨长度 L_s 分别为 $L/2$ (1 500 mm)、 $L/3$ (1 000 mm)、 $L/4$ (750 mm)、 $L/5$ (600 mm)、 $L/6$ (500 mm)的有限元模型(图12),分别命名为FEL-1.50、FEL-1.00、FEL-0.75、FEL-0.60、FEL-0.50。通过有限元计算得到不同剪跨长度下的结构力学响应数据,相应不同剪跨长度对应的荷载-挠度曲线与荷载-端部滑移曲线如图16所示。结果表明:(1)随着剪跨长度的减小,模型的极限承载能力和跨中挠度均逐渐增大;(2)随着剪跨长度的减小,钢-UHPC端部滑移逐渐增大,但整



a) 波形钢Mises应力云图(单位: MPa)



b) UHPC结构层A-A截面处的塑性应变分布

图14 有限元分析结果

Fig. 14 Results of finite element analysis

体数值仍较小,表明组合销能为钢-UHPC界面提供充足的抗滑移连接能力;(3)相较于模型FEL-1.50,模型FEL-0.50的承载能力提高了192.4%,跨中挠度增大了87.7%,端部滑移量增长了249.6%。

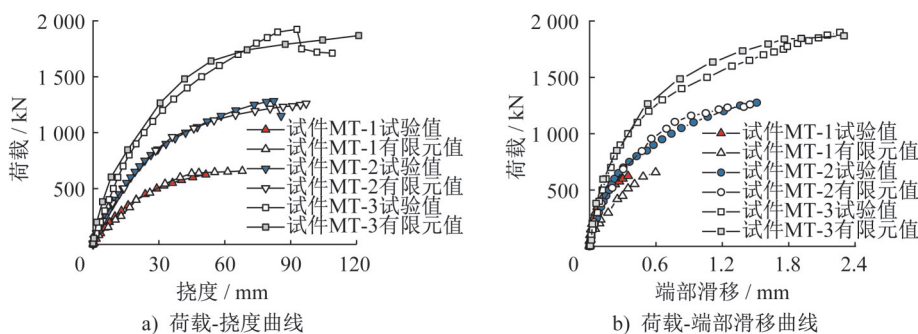


图15 试验结果与有限元分析结果对比

Fig. 15 Comparison between test results and finite element analysis results

3.3.2 UHPC结构层厚度

根据足尺模型试验的试件几何尺寸与加载方式,设定不同UHPC结构层上翼缘厚度 h_c 值(图17),系统研究该参数对新型组合桥面板承载性能的影响。建立了 h_c 分别为45~60 mm的有限元模型,分别命名为FEC-45、FEC-50、FEC-55、FEC-60,计算得到各模型的荷载-挠度曲线与荷载-端部滑移曲线如图18所示。结果表明:(1)增大UHPC结构层上翼缘厚度可小幅度提升新型组合桥面板的承载能力与变形能力;(2)弹性阶段,

钢-UHPC端部滑移量较小,当进入非线性阶段后,增大UHPC结构层上翼缘厚度会导致波形钢与UHPC结构层的刚度差异增大,二者刚度整体表现出增大的趋势,但增幅较小;(3)相较于模型FEC-45,模型FEC-60的承载能力提高了8.4%,跨中挠度增大了10.2%,端部滑移量增长较小。

3.3.3 波形钢高度

为探明不同波形钢高度对新型组合桥面板的影响,

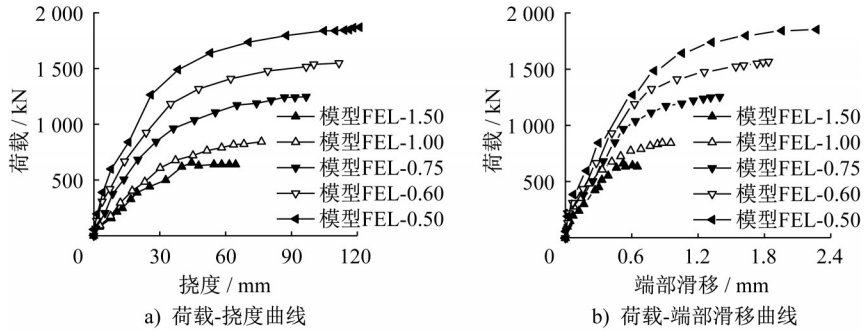


图 16 各模型不同剪跨长度的计算结果

Fig. 16 Calculation results of models with different shear span lengths

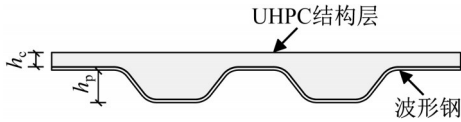


图 17 横截面中参数的位置

Fig. 17 Location of parameters in cross-section

参照足尺模型试验中试件的几何尺寸与加载方式,建立波形钢高度 h_p 分别为80~140 mm的有限元模型(图17),分别命名为FEP-80、FEP-100、FEP-120、FEP-140。通过参数化有限元计算,获取不同波形钢高度参数 h_p 对应

的结构力学响应数据,相关计算结果如图19所示。结果表明:(1)随着波形钢高度的增加,截面刚度呈增大趋势,从而大幅提高了模型的承载能力和极限状态下的变形能力;(2)增加波形钢高度可以显著提升新型组合桥面板的抗滑移性能;(3)较大的波形钢高度意味着更大的UHPC体积,从而扩大了波形钢与UHPC结构层的接触面积,显著提高了钢-UHPC界面摩擦力和纵向抗剪刚度;(4)相较于模型FEP-80,模型FEP-140的承载能力提高了26.2%,跨中挠度增大了20.2%,端部滑移减小了14.1%。

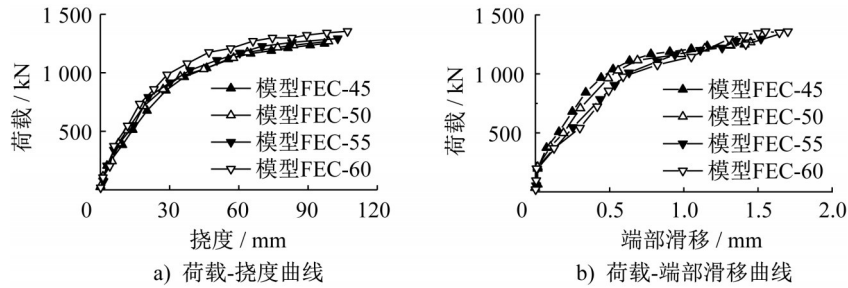


图 18 各模型不同UHPC结构层厚度计算结果

Fig. 18 Calculation results of models with different UHPC structural layer thicknesses

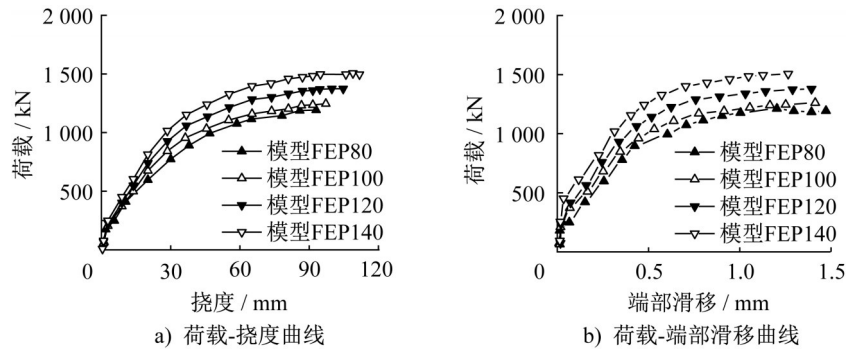


图 19 各模型不同波形钢高度计算结果

Fig. 19 Calculation results of models with different undulating steel heights

3.3.4 组合销数量

为研究组合销间距对钢-UHPC界面连接性能的影响,基于足尺模型试验的试件几何尺寸与加载方式,仅将

组合销间距 d_s 设置为0、100 mm、200 mm、300 mm(图20),分为组合销连续布置和不连续布置两类情况,相应的有限元模型分别命名为FES-0、FES-100、FES-200、

FES-300,如图21所示。结果表明:(1)当组合销间距为300 mm时,模型对应的结构局部出现显著扭转变形,导致有限元计算中断,但仍然可看出组合销对结构力学响应的变化规律;(2)组合销不连续布置的新型组合桥面板其结构刚度呈下降趋势,对应挠度有所增大,且承载能力显著降低;(3)组合销不连续布置的新型组合桥面板,在加载过程中钢-UHPC界面会快速产生层间滑移,导致结构纵向剪切刚度大幅减弱,其破坏模式易从弯曲破坏转变为纵向剪切破坏,因此确保钢-UHPC界面充足的抗

滑移与抗剪切连接能力,是充分发挥新型组合桥面板力学特性优势的核心前提;(4)相较于模型FES-0,模型FEL-200的承载能力降低了19.3%,跨中挠度降低了16.3%,端部滑移量增长了121.2%。

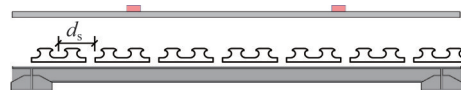


图20 单个组合销的间距参数

Fig. 20 Spacing parameters for composite dowels

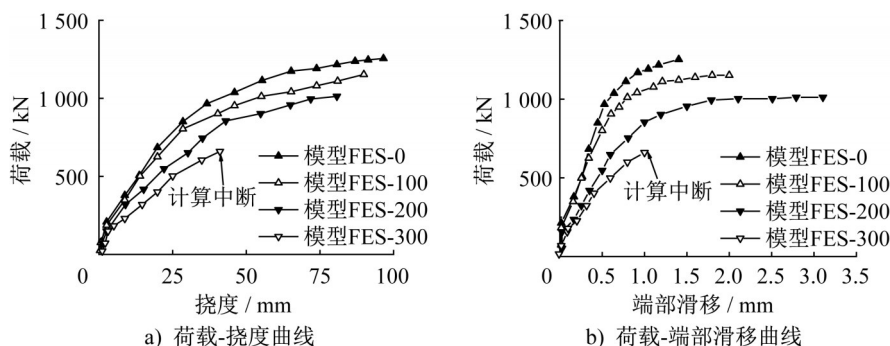


图21 各模型不同组合销数量计算结果

Fig. 21 Calculation results of models with different quantity of composite dowels

4 极限承载能力理论模型

4.1 基本假定

根据试验与有限元分析结果可知,在本文所讨论的参数范围内,组合销连续布置的新型组合桥面板均呈现竖向弯曲破坏模式:此时UHPC结构层顶部被压溃,波形钢底部受拉屈服,因此可采用塑性理论建立该新型组合桥面板的极限承载能力简化理论模型。为便于新型组合桥面板极限承载能力理论模型的建立,作出以下基本假定:

(1) 忽略波形钢与UHPC结构层间的滑移,服从平截面假定;

(2) 纯弯段内波形钢完全屈服,UHPC被压溃;

(3) 忽略UHPC的抗拉强度、钢筋的影响;

(4) 忽略截面倒角对极限承载能力的影响。

4.2 理论模型

结合承载能力极限状态下中性轴的位置分布特征,图22呈现了两种典型工况:(1)工况I,中性轴位于UHPC结构层内部;(2)工况II,中性轴位于波形钢截面内部。

图22a)为工况I下新型组合桥面板的截面应力与轴力分布特征。受压区UHPC的轴力 $N_{c,c}$ 和受拉区波形钢的轴力 $N_{s,t}$ 为:

$$N_{c,c} = A_{c,c} f_c = b x f_c \quad (2)$$

$$N_{s,t} = A_{s,t} f_{s,y} = \left[2 \sqrt{b_2^2 + (h_2 - d_2)^2} + b_1 + b_3 + b_4 \right] d_2 f_{s,y} + h_3 d_1 f_{s,y} \quad (3)$$

式中: $A_{c,c}$ 和 $A_{s,t}$ 分别为受压区UHPC面积和受拉区波形钢的面积; f_c 和 $f_{s,y}$ 分别为UHPC的抗压强度和波形钢的屈服强度; b 为新型组合桥面板总宽度,等于 b_1 、 $2b_2$ 、 b_3 、 b_4 之和; h 为新型组合桥面总高度,等于 h_1 与 h_2 之和; h_3 为钢销底座高度; d_1 、 d_2 分别为钢销和波形钢的厚度;UHPC受压区高度设为 x 。

轴力 $N_{c,c}$ 和 $N_{s,t}$ 满足式(4)的平衡条件,则可得 x 。

$$N_{c,c} - N_{s,t} = 0 \quad (4)$$

弯矩 $M_{c,c}$ 和 $M_{s,t}$ 计算如下:

$$M_{c,c} = y_{c,c} N_{c,c} = \frac{1}{2} x N_{c,c} \quad (5)$$

$$M_{s,t} = y_{s,t} N_{s,t} = (h_1 - x + d_{s,t}) N_{s,t} \quad (6)$$

式中: $M_{c,c}$ 和 $M_{s,t}$ 分别为受压区UHPC和受拉区波形钢弯矩; $d_{s,t}$ 为波形钢中性轴到其顶部的距离。

总弯矩 M_u 为:

$$M_u = 2(M_{c,c} + M_{s,t}) \quad (7)$$

图22b)为工况II下新型组合桥面板的应力与轴力分布。受压区UHPC的轴力 $N_{c,c}$ 、受压区波形钢的轴力 $N_{s,c}$ 和受拉区波形钢的轴力 $N_{s,t}$ 分别为:

$$N_{c,c} = A_{c,c} f_c = \left(b_1 + 2b_2 - \frac{x - h_1}{h_2 - d_2} b_2 \right) (x - h_1) f_c + b h_1 f_c \quad (8)$$

$$N_{s,c} = A_{s,c} f_{s,y} = \left[2 \frac{x - h_1 - d_2}{h_2 - d_2} \sqrt{b_2^2 + (h_2 - d_2)^2} + \frac{b_2}{h_2 - d_2} d_2 + b_3 + b_4 \right] d_2 f_{s,y} \quad (9)$$

$$N_{s,t} = A_{s,t} f_{s,y} = \left[2 \frac{h - x}{h_2 - d_2} \sqrt{b_2^2 + (h_2 - d_2)^2} - \frac{b_2}{h_2 - d_2} d_2 + b_1 \right] d_2 f_{s,y} + h_3 d_1 f_{s,y} \quad (10)$$

轴力 $N_{c,c}$ 、 $N_{s,c}$ 和 $N_{s,t}$ 满足式(11)的平衡条件,则可得 x 。

$$N_{c,c} + N_{s,c} - N_{s,t} = 0 \quad (11)$$

弯矩 $M_{c,c}$ 、 $M_{s,c}$ 和 $M_{s,t}$ 计算如下:

$$M_{c,c} = y_{c,c} N_{c,c} = d_{c,c} N_{c,c} \quad (12)$$

$$M_{s,c} = y_{s,c} N_{s,c} = (x - h_1 - d_{s,c}) N_{s,c} \quad (13)$$

$$M_{s,t} = y_{s,t} N_{s,t} = d_{s,t} N_{s,t} \quad (14)$$

式中: $d_{c,c}$ 、 $d_{s,c}$ 和 $d_{s,t}$ 分别为受压区 UHPC 中性轴到截面中性轴的距离、受压区波形钢中性轴到截面中性轴的距离和受拉区波形钢中性轴到截面中性轴的距离。

总弯矩 M_u 为:

$$M_u = 2(M_{c,c} + M_{s,c} + M_{s,t}) \quad (15)$$

4.3 模型验证

表5列出了各参数下新型组合桥面板极限承载能力弯矩的有限元计算值与理论值的对比结果,结果表明:(1)组合销连续布置时,在所讨论的参数范围内,二者的最大误差为5.9%;(2)组合销不连续布置时,理论模型的预测精度降低,且组合销间距越大,误差越大;(3)理论公式的适用前提为保证钢-UHPC界面具备充足的抗滑移与抗剪切连接能力,即确保结构发生设计预期的竖向弯曲破坏,在此前提下,所建立的理论模型可用于新型组合桥面板极限承载能力计算。

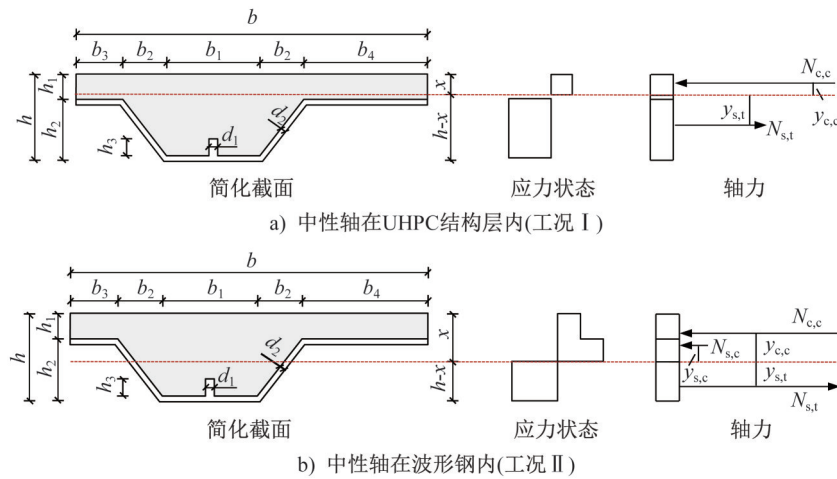


图22 极限承载能力理论模型

Fig. 22 Theoretical model of ultimate bearing capacity

5 结论

本文基于足尺模型试验和有限元分析,系统探究新型组合桥面板的抗弯承载能力及关键设计参数对其抗弯性能的影响规律,并建立了新型组合桥面板极限承载能力预测理论模型,得到结论如下:

(1) 新型组合桥面板的破坏模式主要表现为弯曲破坏模式,受弯全过程可分为弹性阶段、裂缝发展阶段、非线性发展阶段和破坏阶段;该组合桥面板的承载能力与变形能力均随着剪跨长度减小而显著增大;跨中截面在加载全过程中基本满足平截面假定。

(2) 所建立的有限元模型能准确模拟新型组合桥面板的受弯全过程;参数化分析结果表明剪跨长度、波形钢

高度和组合销数量是影响新型组合桥面板承载能力、变形能力及界面滑移等力学指标的关键设计参数,其中,剪跨长度由1500 mm降至500 mm时,模型的承载能力提高了192.4%,跨中挠度增大了87.7%,端部滑移量增长了249.6%;波形钢高度由80 mm增至140 mm时,模型的承载能力提高了26.2%,跨中挠度增大了20.2%,端部滑移减小了14.1%。充足的钢-混凝土连接强度是保证新型组合桥面板力学性能充分发挥的前提。

(3) 在所讨论的参数范围内,新型组合桥面板均发生了竖向弯曲破坏;依据塑性理论建立了新型组合桥面板承载能力预测理论模型;该理论模型的极限承载能力与有限元计算值的最大相对误差为5.9%,具备较高的预

表5 理论值与有限元计算值对比

Table 5 Comparison between theoretical results and finite element calculation results

模型编号	L_s /mm	h_c /mm	h_p /mm	d_s /mm	$P_{u,num}$ /kN	$M_{u,num}$ /(kN·m)	$M_{u,cal}$ /(kN·m)	$(M_{u,num} - M_{u,cal})/M_{u,num}/\%$
FEL-1.50	1 00	45	100	0	635	476.3	464.3	2.5
FEL-1.00	1 000	45	100	0	893	446.5	464.3	-4.0
FEL-0.75	750	45	100	0	1 247	467.6	464.3	0.7
FEL-0.60	600	45	100	0	1 548	464.4	464.3	0
FEL-0.50	500	45	100	0	1 871	457.7	464.3	-1.4
FEC-45	750	45	100	0	1 247	467.6	464.3	0.7
FEC-50	750	50	100	0	1 300	487.5	496.5	-1.8
FEC-55	750	55	100	0	1 350	506.3	528.6	-4.4
FEC-60	750	60	100	0	1 435	538.1	560.8	-4.2
FEP-80	750	45	80	0	1 120	420.0	395.1	5.9
FEP-100	750	45	100	0	1 247	467.6	465.1	0.5
FEP-120	750	45	120	0	1 410	528.8	544.5	-3.0
FEP-140	750	45	140	0	1 580	592.5	632.5	-6.8
FES-0	750	45	100	0	1 247	467.6	464.3	0.7
FES-100	750	45	100	100	1 153	432.4	464.3	-7.4
FES-120	750	45	100	200	1 012	379.5	464.3	-22.3
FES-140	750	45	100	300	659	247.1	464.3	-87.9

测精度,可用于新型组合桥面板的极限承载能力预测,为工程应用提供参考。

(4) 结合实际工程中的车辆荷载信息、横隔板间距及UHPC材料属性,系统开展新型组合桥面板的疲劳性能试验与理论研究,揭示该桥面板在疲劳荷载作用下的长期性能与损伤演化规律,为其耐久性设计和工程应用提供理论依据和试验支撑,将是下一步研究重点。

参考文献:

- [1] 《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.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001.
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.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001.(in Chinese)
- [2] 张清华,李俊,崔闯,等.钢桥面板疲劳开裂加固处治关键问题研究进展[J].中国公路学报,2024,37(5):246-266.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.05.016.
ZHANG Qinghua, LI Jun, CUI Chuang, et al. Reinforcement and treatment of fatigue cracking in orthotropic steel bridge decks: A review[J].China Journal of Highway and Transport,2024,37(5):246-266. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.05.016. (in Chinese)

- [3] 袁周致远,吉伯海,杜彦良,等.变幅荷载下钢桥疲劳裂纹扩展规律及长度预测方法研究[J].土木工程学报,2023,56(10):43-51.DOI:10.15951/j.tmgcxb.22050485.
YUANZHOU Zhiyuan, JI Bohai, DU Yanliang, et al. Investigation on fatigue crack propagation law and its length prediction method for steel bridge under variable amplitude load[J].China Civil Engineering Journal,2023,56(10):43-51.DOI:10.15951/j.tmgcxb.22050485.(in Chinese)
- [4] 徐靖涵,郑木莲.桥面铺装有限元模拟与应用研究进展[J/OL].工程力学,2024;1-25.(2024-01-25)[2024-07-31].
https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240122.1622.004.html.
XU Jinghan, ZHENG Mulian. Research progress of finite element simulation and application of deck pavement[J/OL].Engineering Mechanics,2024;1-25.(2024-01-25)[2024-07-31].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240122.1622.004.html.(in Chinese)
- [5] 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.DOI:1671-1637(2014)01-0001-10.
HUANG Xiaoming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2014,14(1):1-10. DOI:1671-1637(2014)01-0001-10.(in Chinese)
- [6] WEI C, ZHANG Q H, YANG Z X, et al. Flexural cracking

- behavior of reinforced UHPC overlay in composite bridge deck with orthotropic steel deck under static and fatigue loads[J]. *Engineering Structures*, 2022, 265: 114537. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114537.
- [7] LIU Y M, BAO Y, DENG L, et al. Numerical study on the effects of stud degradation and stud arrangement on the fatigue performance of steel-UHPC composite decks[J]. *Engineering Structures*, 2023, 292: 116549. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116549.
- [8] ZHANG S H, SHAO X D, CAO J H, et al. Fatigue performance of a lightweight composite bridge deck with open ribs[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(7): 04016039. DOI: 10.1061/(ASCE)be.1943-5592.0000905.
- [9] SHAO X D, QU W T, CAO J H, et al. Static and fatigue properties of the steel-UHPC lightweight composite bridge deck with large U ribs[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 148: 491-507. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.05.011.
- [10] 李传习, 贺龙飞, 谭珂, 等. 平钢板-UHPC组合桥面板疲劳性能与疲劳损伤机理[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(9): 39-53. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.22040417.
- LI Chuanxi, HE Longfei, TAN Ke, et al. Fatigue performance and fatigue damage mechanism of steel plate-UHPC composite bridge deck[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(9): 39-53. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.22040417. (in Chinese)
- [11] 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. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2022.03.004.
- 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. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2022.03.004. (in Chinese)
- [12] 叶华文, 蒋成川, 何建希, 等. 混凝土铺装层开裂对正交异性钢桥面板疲劳性能劣化作用研究[J]. *土木工程学报*, 2024, 57(9): 46-55, 97. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23050364.
- YE Huawen, JIANG Chengchuan, HE Jianxi, et al. Effect of concrete overlay cracking on fatigue deterioration of orthotropic steel bridge deck[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(9): 46-55, 97. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23050364. (in Chinese)
- [13] LIU Y M, BAO Y, DENG L, et al. Experimental and finite element investigations on shear behaviors of stud connectors embedded in Engineered Cementitious Composite (ECC)[J]. *Engineering Structures*, 2023, 277: 115438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115438.
- [14] KIM H Y, JEONG Y J. Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(2): 534-546. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.10.014.
- [15] 程震宇, 张清华, 邓鹏昊, 等. UHPC中MCL形组合销的抗剪性能[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(8): 205-217. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.08.017.
- CHENG Zhenyu, ZHANG Qinghua, DENG Penghao, et al. Study on shear behavior of MCL-shaped composite dowels in UHPC [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(8): 205-217. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.08.017. (in Chinese)
- [16] HE Q S, ZHANG H L, LI J, et al. Performance evaluation of polyurethane/epoxy resin modified asphalt as adhesive layer material for steel-UHPC composite bridge deck pavements[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123364.
- [17] 邵旭东, 杨川琪, 孙璇, 等. 型钢开口肋-UHPC轻型组合桥面横向受力性能研究[J]. *土木工程学报*, 2025, 58(10): 128-143. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24020129.
- SHAO Xudong, YANG Chuanqi, SUN Xuan, et al. Research on transverse behavior of section steel-UHPC lightweight composite deck with open rib [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2025, 58(10): 128-143. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24020129. (in Chinese)
- [18] 裴必达, 朱星畅, 李传习, 等. 钢-NC-UHPC组合桥面板抗负弯性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2025, 58(5): 41-53. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23100823.
- PEI Bida, ZHU Xingchang, LI Chuanxi, et al. Experimental study on negative bending resistance of steel-NC-UHPC composite bridge deck[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2025, 58(5): 41-53. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23100823. (in Chinese)
- [19] 李传习, 肖和育, 贺龙飞, 等. 平钢板-UHPC组合桥面板纵向抗负弯性能试验研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(3): 91-105. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0303.
- LI Chuanxi, XIAO Heyu, HE Longfei, et al. Experimental study on longitudinal negative bending performance of flat steel plate-UHPC composite bridge deck [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(3): 91-105. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0303. (in Chinese)
- [20] KONG F L, HUANG P M, HAN B, et al. Experimental study on behavior of corrugated steel-concrete composite bridge decks with MCL shape composite dowels [J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111399. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111399.
- [21] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1989, 22(3): 155-166. DOI: 10.5459/bnzsee.22.3.155-166.
- [22] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. *混凝土*, 2008(7): 11-15. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.07.004.
- YANG Jian, FANG Zhi. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete [J]. *Concrete*, 2008(7): 11-15. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.07.004. (in Chinese)