

DOI:10.11918/202206110

采用装配式栓钉的钢-UHPC组合板的抗弯性能

郭君渊¹, 王俊颜¹, 杲晓龙^{1,2}, 边晨^{1,3}

(1. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804; 2. 河南工业大学 土木建筑学院, 郑州 450001;
3. 浙江数智交院科技股份有限公司, 杭州 310030)

摘要: 为提高钢-UHPC组合结构的延性, 本文提出一种采用装配式栓钉连接的钢-UHPC组合板。设计并完成了不同抗剪连接程度的组合板的抗弯性能试验, 分析了组合板试件破坏形态、极限承载力、刚度、裂缝发展规律和板端滑移, 并与采用焊接栓钉的钢-UHPC组合板进行了对比分析, 讨论了组合板试件的可拆卸性, 最后对其极限抗弯承载力和抗弯刚度进行了理论分析并推导了计算公式。结果表明: 装配式栓钉连接的钢-UHPC组合板破坏模式为纵向水平剪切黏结破坏; 降低栓钉间距能提高组合板的协同变形能力, 从而提高组合板结构的极限承载力、弹塑性阶段的刚度和裂缝控制能力; 与采用焊接栓钉连接的钢-UHPC组合板对比, 其在发生较大变形的情况下钢板和UHPC板仍然可较容易地拆卸分离; 推导了装配式栓钉连接的钢-UHPC组合板的极限承载力计算方法和抗弯刚度计算公式, 提出了抗弯刚度计算时应应对UHPC板高度进行折减, 折减系数(β_v)在正常使用阶段建议为0.85, 理论计算结果与试验结果吻合良好。本文研究成果可为采用装配式栓钉的钢-UHPC组合板的设计和应用提供理论依据。

关键词: 钢-UHPC组合结构; 超高性能混凝土; 装配式栓钉; 受弯性能; 受弯承载力; 抗弯刚度

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)01-0063-10

Flexural behavior of steel-UHPC composite slabs with demountable shear connectors

GUO Junyuan¹, WANG Junyan¹, GAO Xiaolong^{1,2}, BIAN Chen^{1,3}

(1. Key Lab of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
3. Zhejiang Institute of Communications Co. Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: To improve the ductility of steel-ultra-high performance concrete (UHPC) composite structures, we proposed a type of demountable steel-UHPC composite slab based on demountable shear connectors. The flexural tests for demountable steel-UHPC composite slabs with different shear connection degrees were designed and completed. The failure mode, ultimate capacity, stiffness, cracking behavior, and relative slip of demountable steel-UHPC composite slabs were analyzed and compared with those of steel-UHPC composite slabs with welded shear connectors. The demountability of demountable steel-UHPC composite slabs was discussed. The ultimate flexural capacity and flexural stiffness of demountable steel-UHPC composite slabs were theoretically analyzed, and related calculation formulas were deduced. Results showed that the failure mode of demountable steel-UHPC composite slabs was longitudinal horizontal shear bonding failure. Reducing the stud spacing could enhance the cooperative deformation capacity of demountable steel-UHPC composite slabs, resulting in the improvement of their ultimate flexural capacity, stiffness at the elastic-plastic stage, and crack control ability. Different from the steel-UHPC composite slabs with welded shear connectors, the steel slab and UHPC slab of the demountable steel-UHPC composite slabs could be easily disassembled even in the condition of large deformation. The formulas for the ultimate flexural capacity and flexural stiffness of demountable steel-UHPC composite slabs were derived. It was proposed that the height of UHPC slab should be reduced when calculating the flexural stiffness, and the reduction coefficient (β_v) was suggested to be 0.85 in serviceability state. The theoretical calculation results were in good agreement with the test results. The research results can provide theoretical basis for the design and application of steel-UHPC composite slabs with demountable shear connectors.

Keywords: steel-UHPC composite structure; ultra-high performance concrete; demountable shear connectors; flexural behavior; flexural capacity; flexural stiffness

收稿日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-10-10; 网络首发日期: 2022-10-18

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221017.1418.002.html>

基金项目: 宁波市重大科技专项资助(2020Z034); 中国博士后科学基金(2020M671215); 国家自然科学基金青年项目(52108239)

作者简介: 郭君渊(1990—), 男, 博士后; 王俊颜(1982—), 男, 特聘研究员, 博士生导师

通信作者: 王俊颜, 14529@tongji.edu.cn

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 凭借优异的力学和耐久性能,在桥梁工程中得到了广泛应用^[1-3]。钢-UHPC 轻型组合桥面结构是 UHPC 目前在桥梁工程中应用最广泛的结构形式之一,已应用于涵盖梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等各类基本桥型^[4]。UHPC 的应用可同时解决钢桥面结构疲劳破坏及传统铺装易开裂的难题,还兼具轻量化和高耐久的特点^[4]。

钢与 UHPC 两种材料之所以能够组合在一起,发挥各自的长处,其关键在于抗剪件的连接作用。目前最常用的是焊接栓钉连接件^[5]。文献[6-8]研究了 UHPC 板中焊接栓钉的抗剪性能以及钢-UHPC 组合板的抗弯性能。然而,现有钢-UHPC 推出实验结果表明^[9],采用焊接栓钉的钢-UHPC 组合结构较普通钢-混凝土组合结构的延性差,且不能满足 Eurocode 4 中对钢与混凝土在推出试验中相对位移要大于 6 mm 的延性设计要求。

为提高钢-UHPC 组合结构的延性,作者采用装配式栓钉对钢-UHPC 组合构件进行连接,见图 1。其中装配式栓钉文献[10]在 2015 年提出的,由普通栓钉加工而成。文献[11]对采用装配式栓钉连接的钢-混凝土组合结构的抗剪和抗弯性能进行了试验研究,但目前国内外对采用装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合构件的相关研究很少,且尚未有对其抗弯性能的研究。2017 年,文献[12]通过推出试验研究了装配式栓钉在钢-UHPC 中的抗剪性能,试验结果表明采用装配式栓钉抗剪连接件的钢-UHPC 组合构件的延性要优于采用焊接栓钉的组合构件。

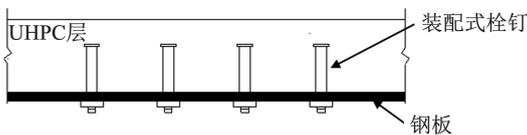


图 1 装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合构件

Fig. 1 Demountable steel-UHPC composite structures

此外,采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合结构还具有以下优点:1) 高静、动态延性^[12],与焊接抗剪连接件不同,装配式栓钉、孔壁以及 UHPC 均可变形,且通过适当设计栓钉孔的尺寸和形状,可以进一步提高组合构件的变形能力;2) 高疲劳寿命,装配式栓钉可消除传统焊接栓钉的焊接残余应力,在疲劳荷载下具有更高的疲劳寿命;3) 环境友好^[11],组合结构易于拆卸更换,便于后期的使用和维护,且拆卸后未损坏构件可循环使用,符合绿色和可持续发展的理念。

本文通过四点弯曲试验,对具有不同抗剪连接

程度的采用装配式栓钉钢-UHPC 组合板的抗弯性能进行了试验研究,并与采用焊接栓钉的组合板进行了对比分析,并讨论了组合板的可拆卸性,建立了采用装配式的钢-UHPC 组合板抗弯承载力和刚度的理论计算公式,为该组合板的设计和应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合板试件的具体构造及尺寸见图 2。组合板长 1 600 mm,宽 700 mm。UHPC 保护层厚度参考 SIA 2052 瑞士 UHPC 规范^[13]中对配筋 UHPC 结构的规定,设置为 15 mm。组合板的总厚度为 60 mm。

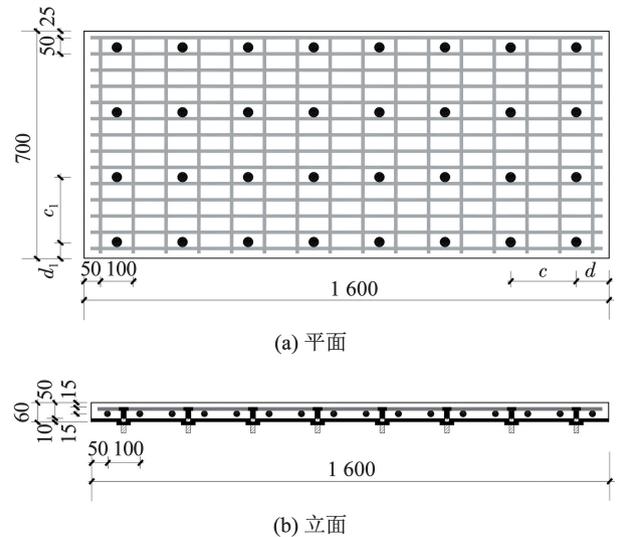


图 2 采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合板几何尺寸及构造 (mm)

Fig. 2 Dimensions and configurations of demountable steel-UHPC composite slabs (mm)

UHPC 板和钢板之间通过装配式栓钉连接。见图 3,装配式栓钉由传统圆柱头栓钉加工而成,根据文献[12]中推出试验的结果,当栓钉长径比 > 1.5 时,破坏模式为栓钉剪断,因此栓钉正面露出的长度和直径的比值要 > 1.5 ,剩余部分为背面露出长度,即阴影车制螺纹部分。本文装配式栓钉的原始栓杆直径为 16 mm,车完螺纹后螺径为 14 mm,埋入 UHPC 层中的高度为 35 mm,钢板上的孔径比装配式栓钉螺纹直径大 1 mm。

本文主要研究不同抗剪连接程度下采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合板的抗弯性能,因此试验参数为栓钉间距,分别设置为 150、200 和 250 mm。组合板的配筋率为 3.1%。试件编号及详细构造尺寸见图 2 和表 1。试验同时设计了一块栓钉间距为 250 mm 的采用焊接栓钉的组合板进行对比。

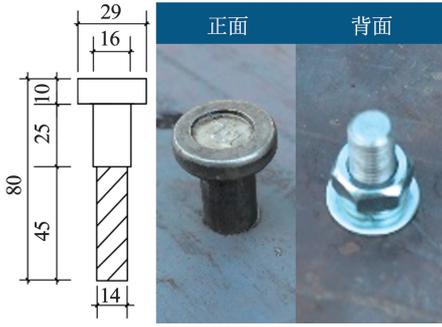


图 3 装配式栓钉尺寸设计 (mm)

Fig. 3 Size design of demountable studs (mm)

表 1 试件编号及构造参数

Tab. 1 Test specimens and parameters mm

试件编号	c	d	c_1	d_1
US-D-150-3.1%	150	125	150	50
US-D-200-3.1%	200	100	200	50
US-D-250-3.1%	250	175	250	100
US-W-250-3.1%	250	175	250	100

注: c 和 c_1 分别是栓钉纵向和横向的间距, d 和 d_1 分别是栓钉纵向和横向距离板边缘的距离。

图 4 为采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合板的制作细节。将装配式栓钉通过螺帽固定在钢板上后, 根据试验设计方案布置钢筋, 制作模具。然后将搅拌好的 UHPC 倒入模具中, 组合板浇筑完成后进行抹面, 常温养护 28 d 后拆模。



(a) 浇筑



(b) 养护

图 4 钢-UHPC 组合板制作细节

Fig. 4 Fabrication details of steel-UHPC composite slabs

1.2 材料性能

1.2.1 装配式栓钉、钢板和钢筋

按厂家出厂检测报告, 装配式栓钉的极限抗拉

强度为 428 MPa。钢板采用 Q345B 级, 10 mm 厚的钢材。钢板留样进行材性试验, 其屈服强度和抗拉强度的平均值分别为 375 MPa 和 421 MPa。

组合板中的横向和纵向钢筋均采用直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋。钢筋留样进行材性试验, 试验得其屈服强度、极限强度和弹性模量的平均值分别为 417 MPa, 552 MPa 和 198 GPa。

1.2.2 应变强化 UHPC 的轴拉力学性能

本文采用应变强化 UHPC, 基体配合比见表 2, 纤维采用长度 16 mm, 直径 200 μm 的平直形钢纤维, 体积掺量 2.5%。按规范 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》^[14] 和文献[2]中对材料 28 d 抗压和轴拉测试的要求, 在浇筑组合板的同时成型、养护并测试了 6 个 100 mm 立方体抗压试件和 3 根轴拉试件 (50 mm \times 100 mm)。应变强化 UHPC 的 28 d 抗压强度平均值为 146 MPa。图 5 为应变强化 UHPC 的轴拉应力-应变曲线, 其极限抗拉强度平均值为 11.5 MPa, 强化极限应变平均值为 0.455%。按照规范 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》^[15] 采用非接触式混凝土收缩变形测定仪测定应变强化 UHPC 从搅拌后到 28 d 的自收缩变形, 终凝到 28 d 的收缩值为 0.066% 应变。

表 2 UHPC 基体配合比

Tab. 2 Mix proportion of UHPC matrix

水泥	硅灰	磨细填料	石英砂	水	高效减水剂
1	0.3	0.3	1.34	0.2	0.013

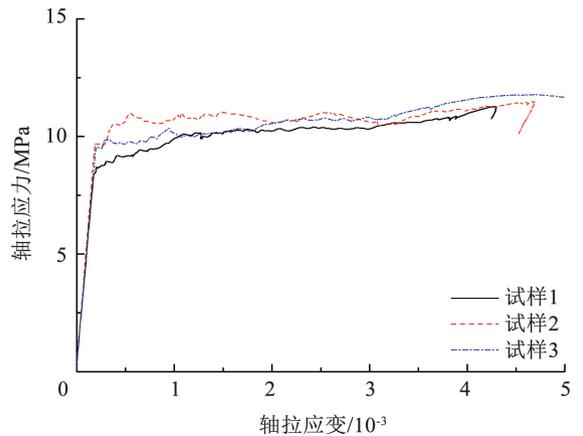


图 5 应变强化 UHPC 轴拉应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of strain-hardening UHPC

1.3 试验装置及加载方案

为消除不同扭矩对钢-UHPC 组合板工作性能的影响, 防止预应力损失, 在各组合板加载前用数显扭矩扳手将各装配式栓钉拧紧至统一的扭矩。扭矩同文献[12]中抗剪试验时所设置的扭矩计算, 即按

栓钉可承受最大扭矩的 20% 计算,最大扭矩按式(1)计算,以便于推导组合板的抗弯承载力计算公式时可直接采用文献[12]中装配式栓钉的抗剪承载力计算公式。

$$T_{\max} = \tau_{\max} \times W_t \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 是栓钉材料能承受的最大切应力, W_t 是栓钉扭转截面系数。计算得装配式栓钉预设扭矩为 23.14 N·m。

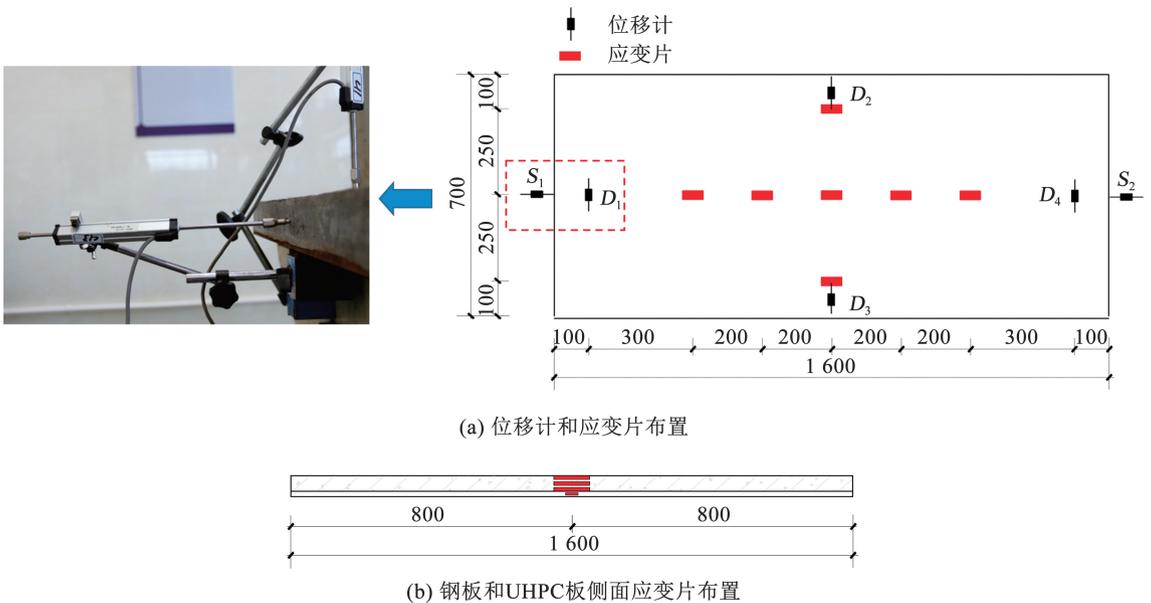
加载试验设备为 FORMTEST 的 LFV-SP600 型四柱压力试验机,加载装置见图 6。组合板采用两点对称的集中加载方式,支座一端为固定铰支座,另一端为滚动铰支座。组合板试件整体跨度为 1 400 mm,纯弯段长度为 400 mm,两边剪跨段长度为 500 mm。组合板在达到屈服前按力控制,加载速率为 5 kN/min,每级荷载增量为 10 kN。在达到屈服之后按位移控制,加载速率 5 mm/min,每级位移增量为 5 mm,直至试件破坏。



图 6 加载装置

Fig. 6 Test setup

试验中主要量测了组合板试件的跨中、加载点、剪跨段和支座处的竖向位移,钢板与 UHPC 板之间的相对滑移,位移计的详细布置见图 7(a)。钢板和 UHPC 板上应变测点位置见图 7。试验中同时对 UHPC 板侧面的裂缝进行观察,使用精度为 0.01 mm 的裂缝测宽仪观测 UHPC 板裂缝的开展情况,并量测出当前荷载等级下的最大缝宽,同时用记号笔对裂缝的分布情况进行标记。



(a) 位移计和应变片布置

(b) 钢板和UHPC板侧面应变片布置

图 7 测点布置 (mm)

Fig. 7 Arrangement of measuring points (mm)

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

图 8 是 3 块采用装配式栓钉连接的钢 - UHPC 组合板试件的破坏形态。3 块组合板试件均为纵向水平剪切黏结破坏,剪跨段内装配式栓钉剪断造成钢板与 UHPC 板脱开,导致两者无法共同工作,破坏时板端相对滑移值可达 5 ~ 10 mm,数值较大。这是因为 3 块组合板的抗剪连接程度均为部分抗剪连接。即使是栓钉间距为 250 mm 的组合板,也未观察到钢板的局部屈曲变形,说明 10 mm 的厚度即可保证钢板的稳定性。

图 8 中加载后装配式栓钉与 UHPC 板连接处的典型照片可见,剪跨段最外侧剪断的装配式栓钉断面呈现光滑的剪切破坏面,剪跨段未发生剪断的栓钉根部也出现了明显的纵向滑移,纯弯段的装配式栓钉根部未出现滑移现象。

2.2 荷载 - 挠度曲线

图 9 为荷载作用下组合板试件的荷载 - 挠度曲线。曲线可分为弹性段、弹塑性段和下降段。在弹性段内,组合板试件未出现裂缝,该阶段结束的标志为 UHPC 板与钢板脱黏,反映在荷载 - 挠度曲线上为荷载突然下降。弹塑性段,组合板刚度下降,UHPC 板侧面的裂缝首先出现在加载点附近,为剪

跨段内的斜裂缝;随着荷载增大,纯弯段也开始出现竖向裂缝,并由 UHPC 板和钢板的界面处向上延伸;在接近荷载峰值点附近,剪跨段的一条斜裂缝斜向往加载点延伸贯穿 UHPC 板厚方向;此阶段内 UHPC 板和钢板之间产生较大相对滑移,UHPC 处于塑性状态,钢板仍在弹性阶段。当荷载达到极限荷载,最外侧的部分装配式栓钉被剪断并发出脆响,组合板承载力迅速下降,荷载-挠度曲线进入下降段,破坏时钢板未达到屈服强度。

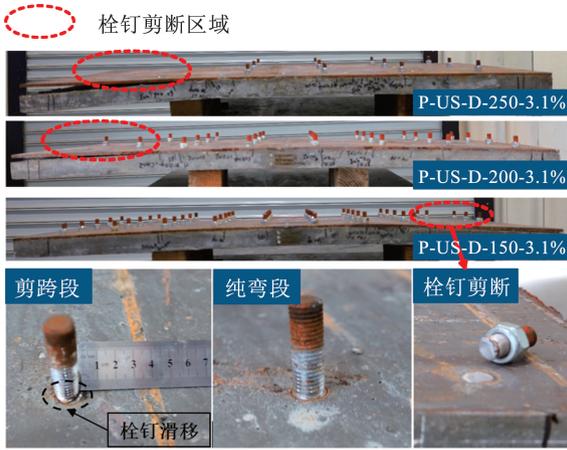


图 8 装配栓钉连接的钢-UHPC 组合板的破坏形态

Fig. 8 Failure modes of demountable steel-UHPC composite slabs

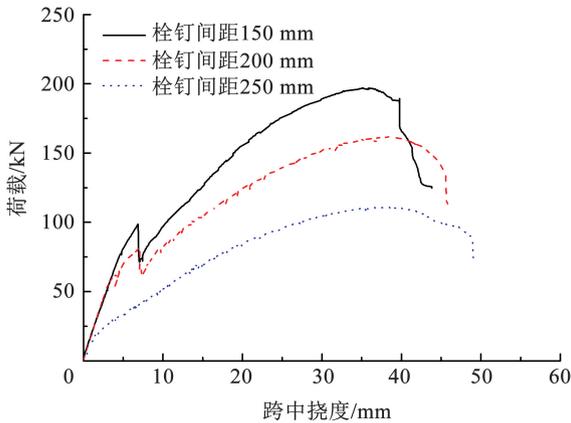


图 9 荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves

见图 9,栓钉间距为 250、200 和 150 mm 的组合板试件的极限承载力分别为 110.9、161.7 和 197.14 kN,降低栓钉间距能有效提高钢板和 UHPC 板的协同工作能力,从而提高结构的极限承载力。对比不同栓钉间距的组合板试件的刚度可知,栓钉间距为 250、200 和 150 mm 的组合板试件在弹性段的刚度分别为 17.53、17.40 和 16.24 GPa,栓钉间距的变化对结构弹性段的刚度基本没有影响,这主要是因为弹性段内,钢板和 UHPC 层之间的黏结力以及栓钉的静摩擦力平衡了钢板和 UHPC 层之间的剪力,保证了栓钉未出现滑移。栓钉间距为 250、200 和

150 mm 的组合板在弹塑性阶段的刚度分别为 2.8、3.29 和 4.67 GPa,降低栓钉间距能有效提高结构弹塑性段的刚度。上述数据说明降低栓钉间距能提高组合板结构的极限承载力以及弹塑性阶段的刚度,这有助于提高结构的极限承载力并控制其在正常使用阶段的变形。

2.3 荷载-最大裂缝宽度曲线

由于组合板的抗剪连接程度为部分抗剪连接,因此钢板和组合板中各有一个塑性中和轴,导致 UHPC 板的受拉层出现裂缝。图 10 为 UHPC 板侧面最大裂缝宽度曲线。见图 10,对比不同栓钉间距的组合板试件裂缝宽度的发展规律可知,降低栓钉间距可以有效提高 UHPC 板开始出现裂缝时对应的荷载,还能控制 UHPC 板裂缝宽度的增长速率,尤其是在弹塑性阶段的前期。这是因为提高组合板结构的抗剪连接程度,可以提高 UHPC 板和钢板的协同工作能力,当两者协调变形时,钢板可以作为 UHPC 板的保护层有效抑制 UHPC 板裂缝的萌芽以及裂缝宽度的增长。因此提高组合板的抗剪连接程度可有效提升结构在正常使用阶段的耐久性能。

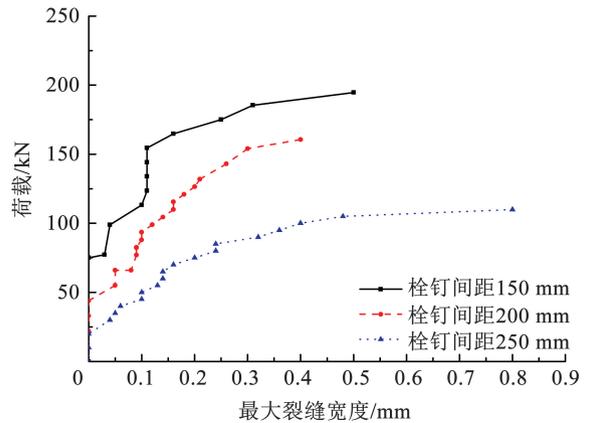


图 10 荷载-最大裂缝宽度曲线

Fig. 10 Load-maximum crack width curves

2.4 荷载-板端滑移曲线

图 11 为荷载作用下组合板试件的荷载-板端滑移曲线。组合板板端滑移的发展过程如下:1) 当栓钉的摩擦力和钢板与 UHPC 板之间的黏结力之和大于界面剪力时,组合板未发生相对滑移,此阶段的终点,即组合板开始滑移时对应的荷载随着栓钉间距的降低而提高,这是因为更多的栓钉提供了更多的静摩擦力;2) 当界面剪力大于栓钉的摩擦力和钢板与 UHPC 板之间的黏结力之和时,由于钢板上的开孔的孔径大于装配式栓钉栓杆的直径,装配式栓钉开始滑动,板端滑移开始增长;3) 当钢板与 UHPC 板之间的黏结力消失时,曲线中观察到板端滑移瞬时的波动,且在栓钉间距越小的组合板中越

剧烈,随后装配式栓钉开始快速滑动,在此阶段,栓钉与钢板的孔壁接触,界面剪力仅由栓杆承受; 4)当钢板和 UHPC 板界面的剪力超过栓钉的抗剪承载力时,有一端最外侧的栓钉剪断,一端滑移值突然增大,另一端的滑移值基本保持不变。对比不同栓钉间距的组合板试件的板端滑移值的发展规律可发现,随着栓钉间距的降低,钢板与 UHPC 板协同变形的能力提升。

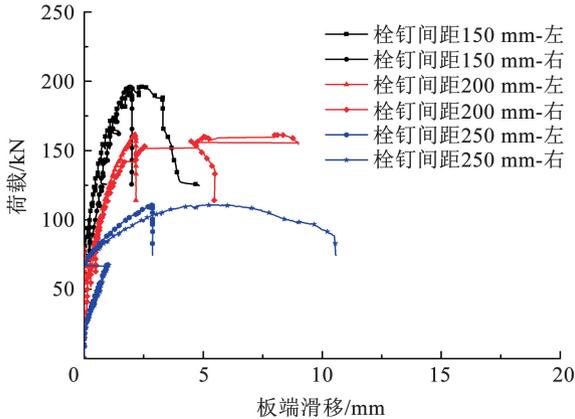


图 11 荷载-板端滑移曲线

Fig. 11 Load-relative slip curves

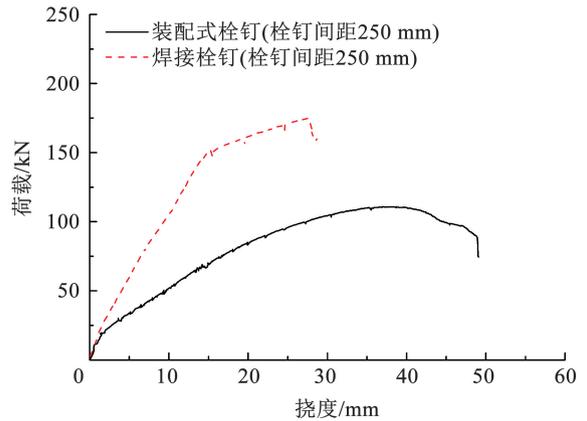
2.5 与采用焊接栓钉的钢-UHPC 组合板对比

采用焊接栓钉的钢-UHPC 组合板的破坏模式与采用装配式栓钉的组合板相同,均为剪跨段的栓钉剪断。图 12 对比了两种组合板的试验结果。见图 12(a),在装配式栓钉滑移之前,装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的刚度与采用焊接栓钉的基本相同。在装配式栓钉开始滑移后,采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合板的刚度远小于采用焊接栓钉的。与采用焊接栓钉的组合板相比,采用装配式栓钉的组合板的极限承载力降低了 36%,这主要是因为栓钉车制螺纹后,栓杆的有效直径变小,降低了采用装配式栓钉的组合板的抗剪连接程度,导致钢板和 UHPC 板之间的组合作用减弱。

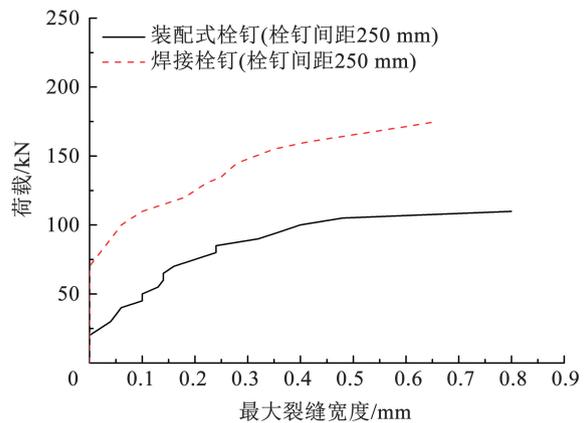
采用装配式栓钉的组合板在极限荷载时的挠度为 38.69 mm,是采用焊接栓钉的组合板的 1.4 倍。上述数据表明采用装配式栓钉的组合板可以比焊接栓钉实现更高的变形能力。这是因为装配式栓钉和钢板孔壁之间的间隙允栓钉发生较大滑动。总体而言,采用装配式栓钉的钢-UHPC 组合板的抗弯承载力和刚度低于采用焊接栓钉的组合板,但变形能力更好。

见图 12(b),UHPC 开裂后,采用装配式栓钉的组合板的最大裂缝宽度比采用焊接栓钉的发展快。当最大裂缝宽度达到 0.05 mm 时,采用装配式栓钉组合板的荷载比采用焊接栓钉的组合板低 63%。这是因为装配式栓钉车完螺纹后有效直径的减小导

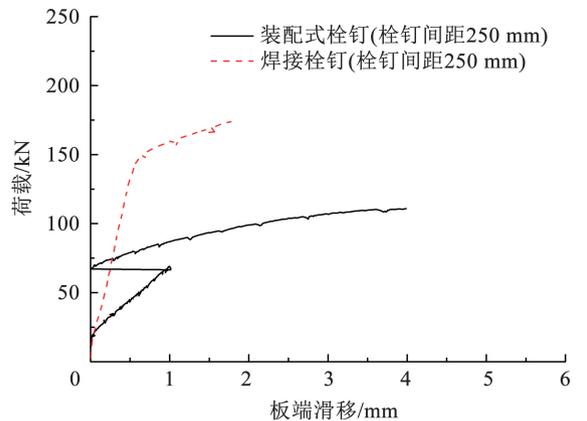
致了组合板的抗剪连接程度的降低,钢板对 UHPC 板变形的约束和保护作用降低,UHPC 组合板和钢板各自受弯,UHPC 板的变形增大。



(a) 荷载-挠度曲线



(b) 荷载-最大裂缝宽度曲线



(c) 荷载-板端滑移曲线

图 12 装配式栓钉与焊接栓钉的钢-UHPC 组合板对比

Fig. 12 Comparison of test results of steel-UHPC composite slabs with demountable shear connectors and welded shear connectors

见图 12(c),与采用焊接栓钉的组合板相比,采用装配式栓钉的组合板在初始阶段表现出几乎相同的相对滑移,这是因为钢板和 UHPC 板的界面剪切力由栓钉的摩擦力和钢板与 UHPC 板之间的黏结力

来共同抵抗。当装配式栓钉滑移后,组合板的板端滑移发展速度远快于采用焊接栓钉的组合板试件。当钢板和 UHPC 板之间的黏结力消失时,组合板的板端滑移有剧烈的波动,这是因为设计时装配式栓钉和钢板孔壁有间隙。采用装配式栓钉的组合板和采用焊接栓钉的组合板在极限载荷下的未剪断一端的板端滑移分别为 2.8 和 1.9 mm。这主要是因为钢板的孔径比装配式栓钉的直径大 1 mm,因此理论上装配式栓钉在接触孔壁之前可能会发生 1 mm 的滑动。

2.6 可拆卸性讨论

图 13 评估了装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的拆卸性。加载后选取 US-D-200-3.1% 试件进行拆卸,尽管组合板在加载中产生了较大的变形,但将所有装配式栓钉的螺帽松开后,钢板和 UHPC 板仍可较容易分离,这也说明在钢板开孔孔径仅比栓钉螺纹直径大 1 mm 的条件下即可保证组合板的可拆卸性。这为钢-UHPC 组合板的日常维护提供了新方法:如在钢板需要更换或 UHPC 板需要维护时,可将组合板拆卸后更换钢板或对 UHPC 板进行高温蒸养以恢复其力学性能和耐久性能^[16];采用装配式栓钉可在组合板构件设计寿命结束后,对钢板或 UHPC 板的力学性能进行检测评估,在满足力学性能规定的前提下可对其进行重复使用,从而提高材料的剩余价值,减少与材料生产相关的碳排放。

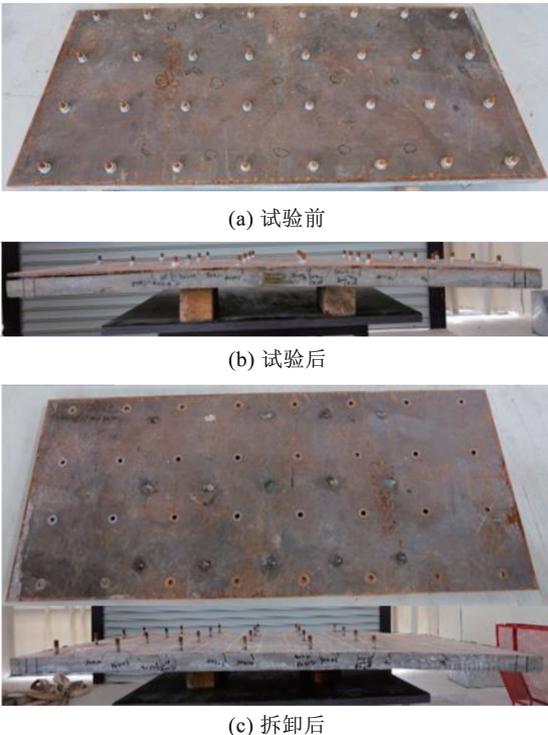


图 13 装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板破坏后拆卸

Fig. 13 Disassembly of a demountable steel-UHPC composite slab after failure

3 抗弯承载力和刚度的理论分析

3.1 极限抗弯承载力的计算公式

装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板试件的抗剪连接程度为部分抗剪连接。图 14 为 US-D-150-3.1% 试件跨中截面应变分布图。钢板和 UHPC 板之间存在相对滑移,因此钢板和组合板中各有一个塑性中和轴。本文考虑组合板的界面滑移,采用塑性理论^[17]来分析其极限承载力的计算方法,采用如下基本假定^[18]:钢板的受拉区和受压区均达到屈服强度;位于 UHPC 板中和轴以上的 UHPC 受压区达到 UHPC 的抗压强度。基于上述假定,装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板在达到承载力极限状态时的应变及应力分布模型见图 15。

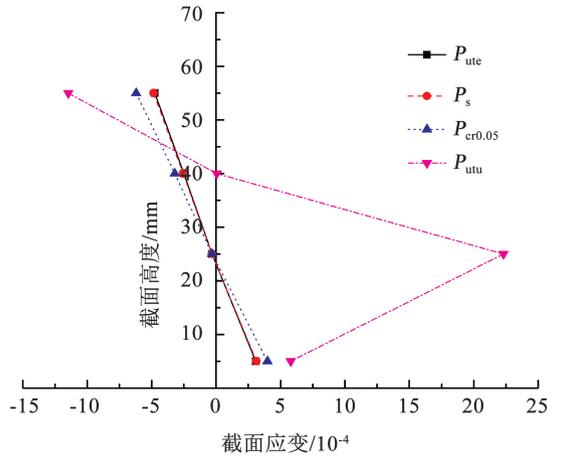


图 14 US-D-150-3.1% 试件跨中截面应变分布

Fig. 14 Midspan strain profiles of specimen US-D-150-3.1%

见图 15,根据 UHPC 板的轴力平衡方程,UHPC 板的受压区高度(x_e)可按下式计算:

$$x_e = \frac{nN_v^c + f_y A_s f_{Utd} b h_u}{f_{Ucd} b + f_{Utd} b} \quad (2)$$

根据钢板的轴力平衡方程,钢板的受压区高度(x_a)可按下式计算:

$$x_a = \frac{nN_v^c + f_p b h_p}{2f_p b} \quad (3)$$

式中: f_y 为钢筋的屈服强度设计值; f_p 为钢板的屈服强度设计值; n 为剪跨段装配式栓钉的个数; N_v^c 为装配式栓钉极限抗剪承载力,按文献^[12]中推导的计算公式确定; f_{Ucd} 、 f_{Utd} 分别为 UHPC 材料的抗压和抗拉强度设计值,按 SIA 2052 瑞士 UHPC 规范^[13]中提出的计算方法确定(式(4)、(5))。

$$f_{Ucd} = \frac{\eta_t \times f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (4)$$

$$f_{Utd} = \frac{\eta_t \times \eta_{hU} \times \eta_k \times f_{Utk}}{\gamma_U} \quad (5)$$

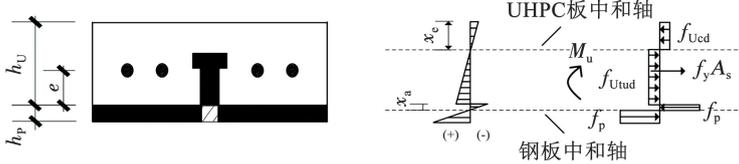


图 15 装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板承载力极限状态

Fig. 15 Demountable steel-UHPC composite slabs in ultimate capacity state

式中： f_{utek} 为 UHPC 的抗压强度特征值，本文中取 UHPC 抗压强度的平均值； η_l 为荷载作用系数，持续性荷载时系数取 1； γ_u 为 UHPC 结构抵抗力系数，配筋 UHPC 结构取 1.3； f_{uuk} 为 UHPC 的抗拉强度特征值，本文中取 UHPC 抗拉强度的平均值； η_k 为纤维方向系数，取 1； η_{hU} 考虑了纤维分布方向上构件厚度的影响，当构件厚度 ≤ 50 mm 时，系数取 1。装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板试件的极限受弯承载力计算公式为

$$M_{u,p} = f_y A_s (h_u - e - \frac{1}{2} x_e) + f_{Uud} b (h_u - x_e) \frac{1}{2} h_u - f_p x_a b [h_u + \frac{1}{2} (x_a - x_e)] + f_p b (h_p - x_a) \times [\frac{1}{2} h_p + h_u + \frac{1}{2} (x_a - x_e)] \quad (6)$$

分别求得 UHPC 板和钢板的受压区高度后代入式(6)，即可求得装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板试件极限受弯承载力。表 3 对比了组合板挠度的计算值($M_{u,p}$)与试验值($M_{u,t}$)，试验值与计算值的比值在 0.94 ~ 1.09，两者吻合较好。

表 3 组合板试件极限受弯承载力计算值与试验值比较

Tab.3 Comparison between calculated and test values of ultimate flexural capacity of composite slabs

试件编号	$M_{u,t}/(kN \cdot m)$	$M_{u,p}/(kN \cdot m)$	$\frac{M_{u,t}}{M_{u,p}}$
US-D-150-3.1%	49.29	44.96	1.09
US-D-200-3.1%	40.43	40.04	1.01
US-D-250-3.1%	27.73	29.52	0.94

注： $M_{u,t} = 0.25P_{ult}$

3.2 抗弯刚度的计算公式

GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[19] 和 Eurocode 4^[20] 中钢-混凝土组合结构的抗弯刚度按截面换算法计算。见图 16，将 UHPC 层的截面转换为钢板的截面，则装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的有效截面的惯性矩(I_{eq})可通过式(7)计算。

$$I_{eq} = \frac{bh_p^3}{12} + bh_p \left(y_0 - \frac{h_p}{2} \right)^2 + \frac{b_{eq} (\beta_U h_U)^3}{12} + b_{eq} \beta_U h_U \left(\frac{\beta_U h_U}{2} + h_p - y_0 \right)^2 + A_s (e + h_p - y_0)^2 \quad (7)$$

式中： b 是组合板的宽度， α_E 是钢板与 UHPC 材料的弹性模量比 ($\alpha_E = E_p/E_U$)。现有规范计算组合结构的刚度时考虑了混凝土构件整个高度的贡献。由上述试验可知，装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板在受荷时存在两个中性轴，钢板和 UHPC 板各自受弯，此时有部分 UHPC 已处于开裂阶段，因此在计算组合板的抗弯刚度时，应对 UHPC 板的高度进行折减，因此本文提出 UHPC 板高度的折减系数(β_U)。 y_0 是组合板中性轴到钢板底部的距离，可按式(8)计算：

$$y_0 = \frac{bh_p^2/2 + b_{eq} \beta_U h_U (\beta_U h_U + h_p)/2 + A_s (e + h_p)}{b_{eq} \beta_U h_U + bh_p + A_s} \quad (8)$$

则组合板的刚度可按式(9)计算：

$$B = \frac{E_s I_{eq}}{1 + \zeta} \quad (9)$$

式中 ζ 是考虑 UHPC 板和钢板界面滑移的抗弯刚度折减系数，参考文献[21-22]计算。

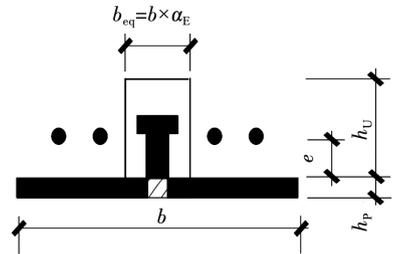


图 16 截面转换法

Fig. 16 Conversion of cross-sections

为确定正常使用极限状态下 UHPC 板高度的折减系数(β_U)，将考虑不同折减系数的弯曲刚度计算的跨中挠度(D)与试验结果进行比较，挠度的计算公式：

$$D = \frac{M}{24B} (3l^2 - 4a^2) \quad (10)$$

式中 M 为组合板正常使用阶段的弯矩， a 是支座到加载点之间的距离。

图 17 比较了 0.5 M_u 、0.6 M_u 和 0.7 M_u 时组合板挠度的试验值($D_{Mu,t}$)和计算值($D_{Mu,p}$)。见图 17，在 0.5 M_u ， β_U 取 0.9 时计算挠度和试验挠度相差最小；在 0.6 M_u 和 0.7 M_u ， β_U 取 0.85 时计算挠度最准确。为安全预测装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的抗弯刚度，建议将 UHPC 板高度的折减系数(β_U)取为 0.85。此时试验值和计算值之间的平均偏差值和对应的标准差分别为 11.6% 和 9.4%。

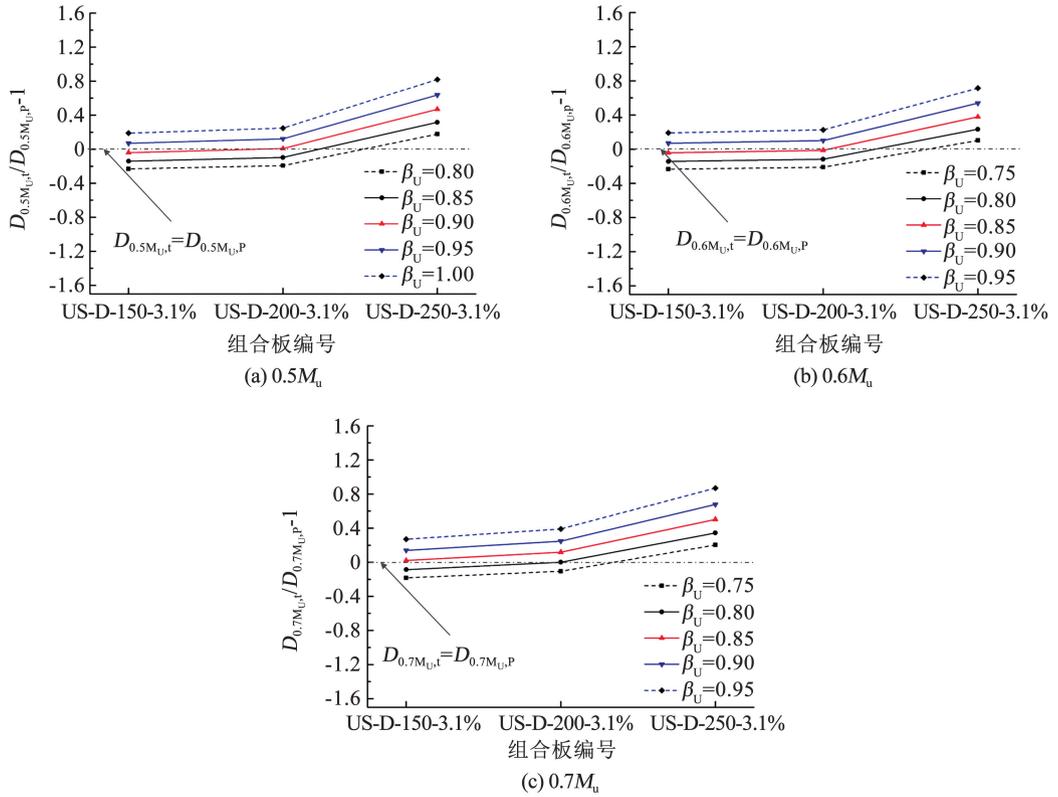


图 17 对比挠度的试验值和计算值

Fig. 17 Comparison of test and calculated values of deflection

4 结 论

试验研究了不同抗剪连接程度的装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的抗弯性能。分析了组合板试件的破坏形态、极限承载力、刚度、裂缝发展规律和板端滑移,并与采用焊接栓钉连接的钢-UHPC 组合板进行了对比分析,讨论了组合板试件的可拆卸性,最后对其极限抗弯承载力和抗弯刚度进行了理论分析并推导了计算公式,得到以下结论:

1) 装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板荷载-挠度曲线可分为弹性段、弹塑性段和下降段,破坏模式为纵向水平剪切黏结破坏。

2) 降低栓钉间距能提高装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的协同变形能力,从而提高组合板结构的极限承载力、弹塑性阶段的刚度和裂缝控制能力。

3) 装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板在发生较大变形的情况下,钢板和 UHPC 板仍然可较容易地拆卸分离,因此在满足力学性能规定的前提下可对钢板或 UHPC 板进行重复利用,同时也为钢-UHPC 组合板的日常维护提供了新思路。

4) 采用塑性理论并考虑滑移效应推导了装配式栓钉连接的钢-UHPC 组合板的极限承载力计算方法。同时推导了其抗弯刚度计算公式,提出了

UHPC 板高度的折减系数(β_U),建议取值为 0.85,理论计算结果与试验结果吻合良好,可供设计参考。

参考文献

[1] 陈宝春, 杨简, 吴香国, 等. UHPC 力学性能的多指标分级[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 23
CHEN Baochun, YANG Jian, WU Xiangguo, et al. Multi-indicators classification of UHPC mechanical properties [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 23. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.08.002

[2] WANG Junyan, GUO Junyuan. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 88: 17. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.01.007

[3] KRUSZEWSKI D, WILLE K, ZAGHI A E. Design considerations for headed shear studs embedded in ultra-high performance concrete as part of a novel bridge repair method[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 149: 180. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.07.015

[4] 邵旭东, 罗军, 曹君辉, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 61
SHAO Xudong, LUO Jun, CAO Junhui, et al. Experimental study and crack width calculation of steel-UHPC lightweight composite deck structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 61. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.03.007

[5] TONG Lewei, CHEN Luhua, WEN Ming, et al. Static behavior of stud shear connectors in high-strength-steel-UHPC composite beams [J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110827. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110827

[6] 王皓磊, 孙韬, 刘晓阳, 等. 钢-UHPC 连续组合梁抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 218

- WANG Haolei, SUN Tao, LIU Xiaoyang, et al. Experimental investigation on flexural capacity of steel-UHPC continuous composite girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 218. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.08.018
- [7] GAO Xiaolong, WANG Junyan, YAN Jiabao. Experimental studies of headed stud shear connectors in UHPC steel composite slabs[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2020, 74(5): 657. DOI: 10.12989/sem.2020.74.5.657
- [8] ZHANG Yang, CAI Shukun, ZHU Yanping, et al. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110134. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110134
- [9] KIM J S, KWARK J, JOH C, et al. Headed stud shear connector for thin ultra high-performance concrete bridge deck [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 108: 23. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.02.001
- [10] DAI X H, LAM D, SAVERI E. Effect of concrete strength and stud collar size to shear capacity of demountable shear connectors[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(11): 1. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001267
- [11] LAM D, DAI X H, ASHOUR A, et al. Recent research on composite beams with demountable shear connectors [J]. Steel Construction, 2017, 10(2):125. DOI: 10.1002/stco.201710016
- [12] WANG Junyan, GUO Junyuan, JIA Liangjiu, et al. Push-out tests of demountable headed stud shear connectors in steel-UHPC composite structures[J]. Composite Structures, 2017, 170: 69. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.004
- [13] Recommendation; ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites(UHPFRC): construction material, dimensioning and application; SIA 2052[S]. Lausanne: EPFL, 2016
- [14] 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
- Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015
- [15] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
- Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009
- [16] GUO Junyuan, WANG Junyan, WU Kai. Effects of self-healing on tensile behavior and air permeability of high strain hardening UHPC [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 342. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.193
- [17] 薛建阳. 钢与混凝土组合结构[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 51
- XUE Jianyang. Steel-concrete composite structures[M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2007: 51
- [18] 王挺, 聂建国, 李炳益, 等. 钢-压型钢板混凝土组合梁极限抗弯承载力的研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 61
- WANG Ting, NIE Jianguo, LI Bingyi, et al. Experimental study on moment redistribution of continuous composite steel-concrete beams with profiled sheeting [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 61. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2001.02.011
- [19] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017
- Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017
- [20] European Committee for Standardization. Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures; EN 1994-2:2005 [S]. Brussels: CEN, 2005
- [21] 徐荣桥, 陈德权. 组合梁挠度计算的改进折减刚度法[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 285
- XU Rongqiao, CHEN Dequan. Modified reduced stiffness method for calculating the deflection of composite beams [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 285. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.08.0557
- [22] GIRHAMMAR U A. A simplified analysis method for composite beams with interlayer slip [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2009, 51(7): 515. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.05.003

(编辑 赵丽莹)