

DOI:10.11918/202208008

新型可拆卸式钢-UHPC组合板的抗弯性能

古金本^{1,2}, 王俊颜¹, 陆伟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. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 为探究钢-薄层超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)轻型组合桥面体系在局部轮载下的抗弯性能,设计并开展了4块基于高强螺栓连接的可拆卸式钢-UHPC组合板的四点弯曲试验,研究了钢板类型、抗剪连接件间距对可拆卸式钢-UHPC组合板的破坏模式、荷载-挠度曲线、界面相对滑移、裂缝宽度、截面应变分布等影响规律,研究结果表明:在正弯矩荷载作用下,采用Q355钢板的组合板的破坏模式为高强螺栓被剪断,而采用负泊松比(negative Poisson's ratio, NPR)钢板的组合板的破坏模式为部分高强螺栓被剪断、部分预埋带垫加长螺母被拔出、UHPC板由于失稳大面积压溃等;在相同的高强螺栓间距下,采用NPR钢板的组合板的板端相对滑移较小,说明NPR钢板有效延缓并限制了钢板与UHPC板的相对滑移,从而提升两者的协同变形能力,继而提高组合板的抗弯刚度及承载力等;由截面应变分析可知,由于NPR钢板的负泊松比效应、高刚度、高屈服强度,整个加载过程NPR钢板与底部UHPC层的拉应变保持着应变协调性,随着荷载的增大截面塑性中和轴的上移幅度可忽略不计。因此,在采用NPR钢板提升钢-UHPC组合板抗弯性能的前提下,应使UHPC厚度与NPR钢板的性能进行匹配,充分发挥两者的材料性能,避免失稳破坏先于UHPC材料强度破坏。

关键词: 钢-UHPC组合板;抗弯性能;负泊松比钢板;相对滑移;协同效应

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)01-0084-09

Flexural behavior of a novel demountable steel-UHPC composite slab

GU Jinben^{1,2}, WANG Junyan¹, LU Wei³

(1. Key Lab of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to investigate the flexural behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) lightweight composite decks under local wheel load, four demountable steel-UHPC composite slabs connected by high-strength bolts were designed and four-point bending test was conducted. The influence of steel plate type and spacing of shear connector on the flexural characteristics of demountable steel-UHPC composite slabs was analyzed, including failure mode, load-deflection curve, interface relative slip, crack width, and sectional strain distribution. Results showed that under positive bending moment, the failure mode of composite slabs adopting Q355 steel plate was that the high-strength bolt was cut off. While the failure mode of composite slabs using steel plate with negative Poisson's ratio (NPR) was as follows: part of high-strength bolts was cut off, part of pre-embedded elongated nuts with cushion was pulled out, and UHPC collapsed due to instantaneous instability. Besides, under the same spacing of high-strength bolts, the relative slip of plate end of composite slabs employing NPR steel plate was relatively small, indicating that NPR steel plate can effectively delay and restrain the relative slip between steel plate and UHPC plate, thus improving the synergistic deformation capacity, flexural stiffness, and flexural bearing capacity for composite slabs. According to the sectional strain distribution analysis, due to the negative Poisson's ratio effect, high stiffness, and high yield strength of NPR steel plate, the tensile strain between NPR steel plate and the bottom UHPC layer maintained strain compatibility during the whole loading process, and the upward displacement for sectional plastic neutral axis could be ignored with increasing load. Therefore, under the premise that NPR steel plate is employed to improve the flexural performance of steel-UHPC composite slab system, the thickness of UHPC should be reasonably matched with the performance of NPR steel plate, so as to give full play to their material properties, and avoid the buckling failure prior to the material strength failure of UHPC.

Keywords: steel-UHPC composite slab; flexural behavior; steel plate with negative Poisson's ratio; relative slip; synergistic effect

收稿日期: 2022-08-02; 录用日期: 2022-09-02; 网络首发日期: 2022-09-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220908.1447.004.html>

基金项目: 宁波市重大科技专项资助(2020Z034)

作者简介: 古金本(1994—),男,博士研究生;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) 作为具备超高强度、超高韧性、优异耐久性以及良好施工性能的新型水泥基复合材料^[1], 近年来被广泛应用于桥梁、工业及建筑等多个领域。将 UHPC 薄层与钢构件通过抗剪连接件形成钢 - UHPC 轻型组合结构协同受力, 可充分发挥材料的组合效应, 有效减轻结构自重, 提高构件刚度等^[2-3], 同时解决了正交异性钢桥面铺装层破损及钢结构疲劳开裂两类难题^[4-5]。

对于钢 - UHPC 轻型组合结构, 尽管 UHPC 存在优异的力学性能, 但其负弯矩区段的 UHPC 层仍存在易开裂风险, 且目前现有的桥梁加固, 均因为钢构件受到较大的腐蚀破坏继而影响钢 - UHPC 组合结构的整体性能。为延长钢 - UHPC 组合构件的使用寿命, 需考虑 UHPC 板和钢构件的可更换及循环利用等问题。同时保通便桥、抢险救灾桥、景观桥等应用场景均要求构件的快速装配及可拆卸。目前, 对钢 - 混组合结构中可拆卸式抗剪连接件的研究主要集中在国外的若干报道^[6-8]。Kwon 等^[9-11]提出了 3 种应用于钢 - 混组合构件的螺栓连接件构造, 研究结果表明: 3 种新型螺栓连接件表现出类似的剪切性能, 其抗剪强度约为其抗拉强度的 50%。此外, 将该种螺栓连接件应用在组合梁的零弯矩区段附近, 可减少组合构件的滑移需求, 提升构件的延性。Dai 等^[12]将焊接栓钉连接件改造成装配式栓钉, 应用于钢 - 普通混凝土组合构件, 研究结果表明装配式栓钉抗剪连接件在试验后拆卸方便, 并具备与焊接栓钉抗剪连接件近似的抗剪力性能。Wang 等^[13]开展了应用于钢 - 薄层 UHPC 组合构件的装配式栓钉的推出试验, 提出了考虑栓钉长径比、栓钉直径等参数的抗剪承载力计算方法及设计建议。杨飞等^[14]提出了一种由长螺栓、短螺栓及螺栓连接套筒组成的新型螺栓抗剪连接件, 研究结果表明: 新型螺栓连接件的抗剪承载力约为其抗拉强度

的 80%; 随着高强螺栓直径的增大, 钢 - 混界面的峰值相对滑移越大。

UHPC 的应用为钢 - 混组合构件的轻量化和装配组装机化提供了新的契机和挑战。为探究钢 - 薄层 UHPC 轻型组合桥面体系在局部轮载下的抗弯性能, 阐明新型可拆卸式钢 - UHPC 组合板的协同工作效应及抗弯破坏机理, 本文开展了 4 块可拆卸式钢 - UHPC 组合板的抗弯性能试验, 研究了高强螺栓连接件的连接件间距 (150、200 mm)、钢板类型 (Q355、NPR 钢板) 对可拆卸式钢 - UHPC 组合板在正弯矩荷载作用下的破坏模式、荷载 - 挠度曲线、极限承载力、界面滑移、裂缝开展分布等抗弯性能的影响规律, 为钢 - UHPC 组合构件的装配式及可拆卸式应用提供研究基础。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验设计并制作 4 块新型可拆卸式钢 - UHPC 组合板试件, 各试件尺寸一致, 试件长度为 1 600 mm, 加载跨度为 1 400 mm, 宽度 700 mm, 板厚 62 mm, 其中钢板厚度为 12 mm, UHPC 层厚度为 50 mm。UHPC 层中布置纵横向钢筋网, 钢筋保护层厚度为 15 mm。抗剪连接件采用文献^[15]提出的新型高强螺栓连接件, 由预埋带垫加长套筒和高强螺栓组成, 其具体构造形式见图 1。根据 UHPC 层的构造要求, 各试件选用的高强螺栓连接件的规格均为 M16 mm × 40 mm (螺栓直径 × 高度), 对应的预埋带垫套筒尺寸为 16 mm × 30 mm (套筒内径 × 高度)。试验设计参数为抗剪连接件间距及钢板类型, 抗剪连接件间距包括 150、200 mm, 且纵横向抗剪连接件间距保持一致。钢板类型包括 Q355 普通钢板和负泊松比高性能钢板 (简称 NPR 钢板)。组合板试件的制作过程见图 2, 试件细部尺寸及设计参数见表 1。

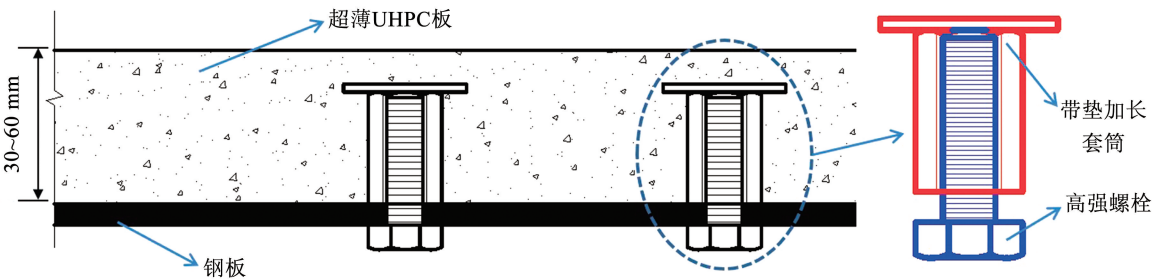


图 1 新型螺栓连接构造形式^[15]

Fig. 1 Configuration of novel bolt connector^[15]

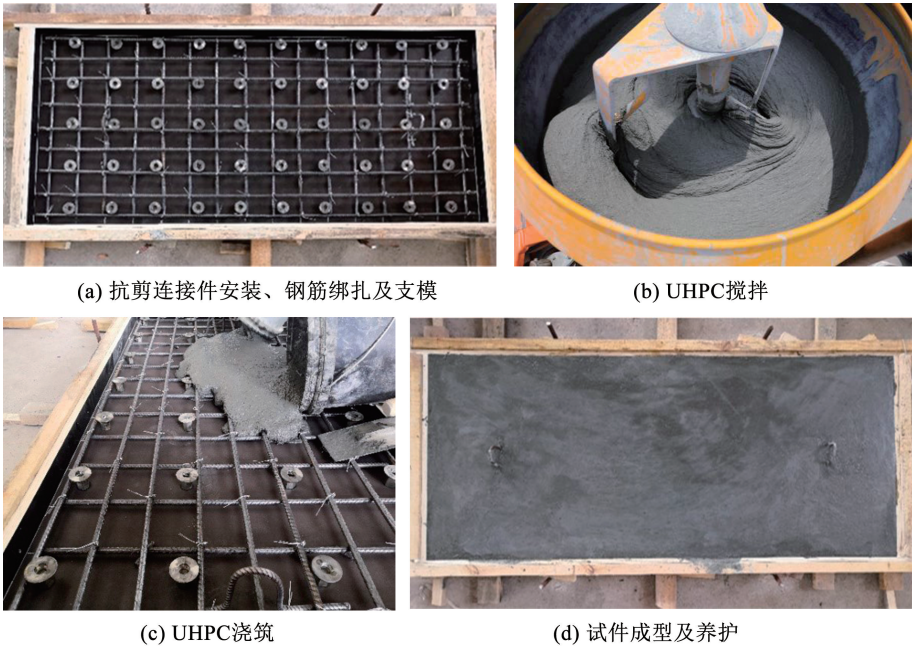


图 2 组合板试件制作过程

Fig. 2 Construction process of composite slab specimens

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	钢板种类	连接件间距/mm	试件尺寸/mm	UHPC 板厚/mm	钢板厚度/mm	钢筋网配置
Q355 - 150	Q355 钢板	150	1 600 × 700 × 62	50	12	纵横向均为 Φ10@ 100
Q355 - 200	Q355 钢板	200				
NPR - 150	NPR 钢板	150				
NPR - 200	NPR 钢板	200				

1.2 材料性能

本文采用的 UHPC 为常温养护型高应变强化 UHPC,由 UHPC 预混料、钢纤维和水组成。UHPC 的预混料配合比包括水泥、硅灰、磨细填料、细集料、高效减水剂,其中,细集料采用粒径为 0.1~0.3 mm 的石英砂,磨细填料采用粒径为 38 μm,密度为 2.65 g·cm⁻³的磨细石英粉。钢纤维采用平直型镀铜微细钢纤维,纤维掺量为 2%(体积分数),钢纤维的特征参数见表 2。试件浇筑过程中留取 100 mm 立方体 UHPC 轴压试块及狗骨头型 UHPC 轴拉试样,同批次同条件常温养护下 UHPC 的实测立方体抗压强度平均值为 132.5 MPa,直接拉伸试验得到的 UHPC 轴拉应力-应变曲线见图 3,可以看出 UHPC 表现出明显的拉伸应变强化特性,抗拉强度平均值约 11.8 MPa,极限拉伸应变平均值约 4×10⁻³。

抗剪连接件中高强螺栓的强度等级为 8.8 级,而预埋带垫加长套筒的强度等级为 3.8 级。UHPC 板中纵横向钢筋网均采用直径为 10 mm,间距为 100 mm 的 HRB 400 级钢筋。抽取同批次的 3 根长度为 500 mm 的钢筋对其进行拉伸性能测试,实测

钢筋的弹性模量、屈服强度、极限强度平均值分别为 214 GPa、425 MPa、603 MPa。

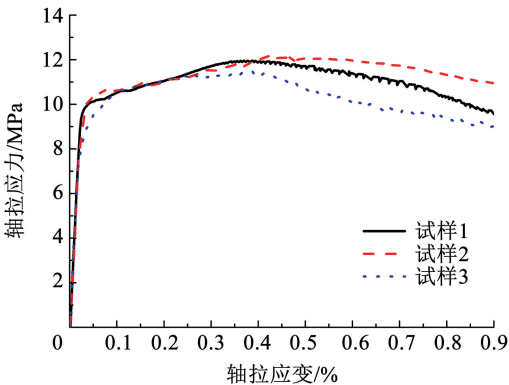


图 3 高应变强化 UHPC 轴拉应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of high strain hardening UHPC

表 2 钢纤维特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of steel fiber

纤维形状	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	长度/ mm	直径/ μm	长径比	密度/ (kg·m ⁻³)
平直形	2 500	200	16	200	80	7 850

组合板试件包含两种类型钢板,一种是强度等级为 Q355 的普通钢板,一种是 NPR 钢板,钢板厚度均为 12 mm。根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[16] 的规定对钢板力学性能进行测试,实测 Q355 钢板的屈服强度、极限强度及弹性模量平均值分别为 366 MPa、475 MPa 和 205 GPa。NPR 钢板是指通过在钢水冶炼过程中,加入某种微量合金元素,并设计合适的温度压力配置序列,在钢水中制造了大量纳米级和微米级的微孔隙,使钢水中形成一定比例的微观 NPR 晶体(2~5 nm),最终实现多尺度多重共格界面设计,生成屈服强度、抗拉强度、伸长率均较高的高性能钢。其负泊松比效应具体体现为能够在塑性应变下产生显著的体积膨胀同时具备异常高的均匀伸长率,在塑性阶段的泊松比小于 0.5(普通钢筋在塑性阶段泊松比保持 0.5 不变),最低可达 0.44。同样依据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[16] 实测 NPR 钢板的屈服强度、抗拉

强度、断后伸长率及弹性模量平均值分别为 688 MPa、1 082 MPa、32% 和 221 GPa。

1.3 加载方案

采用传统的四点弯加载方式对两端简支的组合板试件进行加载,加载装置见图 4,其中分配梁的加载面积为 0.7 m×0.1 m。组合板屈服前,采用力控制加载,加载速率为 10 kN/min,荷载增量步为 20 kN,试件屈服后,转换为位移加载控制,加载速率为 6 mm/min,直至试件发生破坏或丧失承载力。组合板中底部布置 9 个位移计,用来测量组合板不同位置的竖向变形,4 个位移计布置在试件两端,用来测量钢板和 UHPC 板之间的相对滑移,另外 2 个位移计布置在支座位置用来监测支座处的竖向挠度,在钢板和 UHPC 外表面以及跨中试件侧面布置多个应变片用来测量不同位置处钢板和 UHPC 的应变,包括顶面、底面及侧面,测点布设示意图 4(b)。此外,试验过程中通过裂缝观测仪对每级载荷对应的 UHPC 板的裂缝宽度进行测量,并对裂缝的开展及分布进行标记。

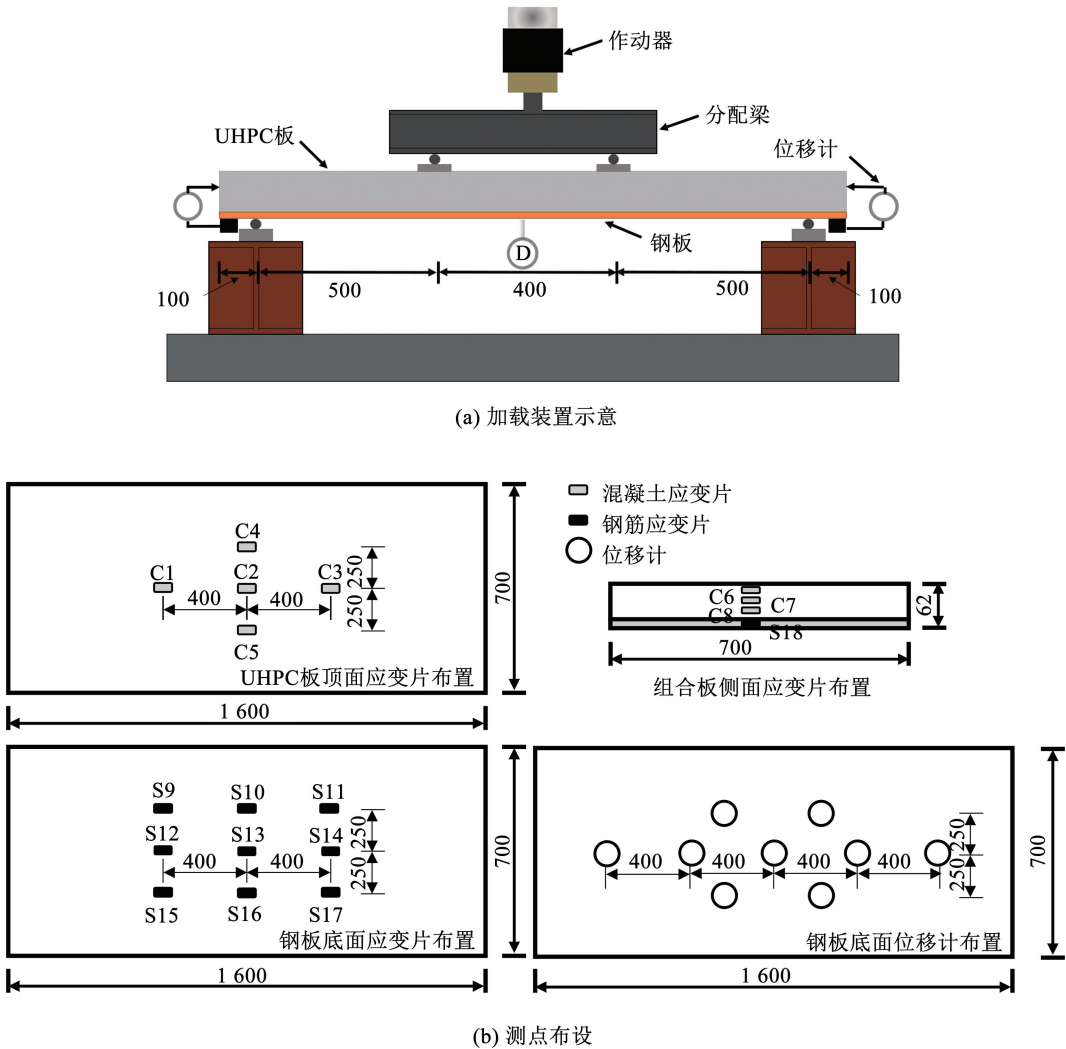


图 4 加载装置及测点布设示意 (mm)

Fig. 4 Schematic diagram of test setup and measurements (mm)

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试件 Q355-200 的最终破坏模式及细部构造破坏见图 5,其破坏模式为最外侧两排螺栓连接件全部被剪断,且整个 UHPC 板仅少量微裂纹,未发现较大的裂缝及 UHPC 压溃。而试件 Q355-150 的破坏形态为最外侧两排螺栓部分被剪断,且 UHPC 板损伤程度较试件 Q355-200 更为严重,即 UHPC 板的裂缝扩展高度和裂缝开展宽度较试件 Q355-200 更大,见图 6。总而言之,正弯矩荷载作用下,采用 Q355 钢板的组合板试件最终破坏模式均呈现出因为剪跨段内最外侧的螺栓被剪断而造成钢板与 UHPC 板之

间的瞬间剥离,协同作用减弱或丧失,且 UHPC 板底部出现多条弯曲裂缝,同时说明 150、200 mm 的螺栓连接件间距均为部分抗剪连接,不能使 UHPC 的抗压强度充分发挥。

与采用 Q355 钢板的组合板的破坏模式不同,试件 NPR-150 呈现出较大范围的 UHPC 压溃,而螺栓连接件却未被剪断,且预埋带垫套筒周围 UHPC 展现出不同程度的 UHPC 拉拔破坏,说明 UHPC 的压溃不是因为充分发挥抗剪连接件的抗剪性能,两者之间充分协同变形而达到 UHPC 的压应变,其破坏模式见图 7。而试件 NPR-200 出现了高强螺栓部分被剪断,预埋带垫加长套筒部分拔出或即将拔出,同时伴随着套筒周围的 UHPC 拉拔破坏,其破坏模式见图 8。

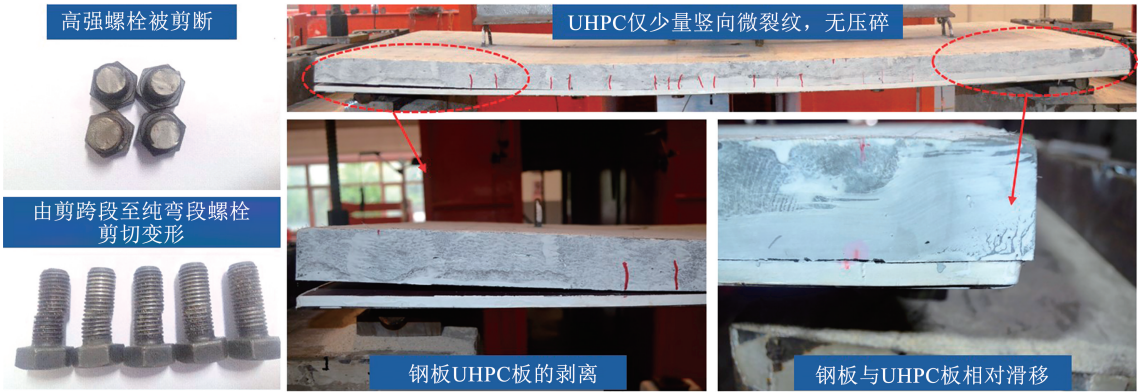


图 5 试件 Q355-200 破坏模式及细部构造破坏

Fig. 5 Failure mode and detailed constructional failure for specimen Q355-200

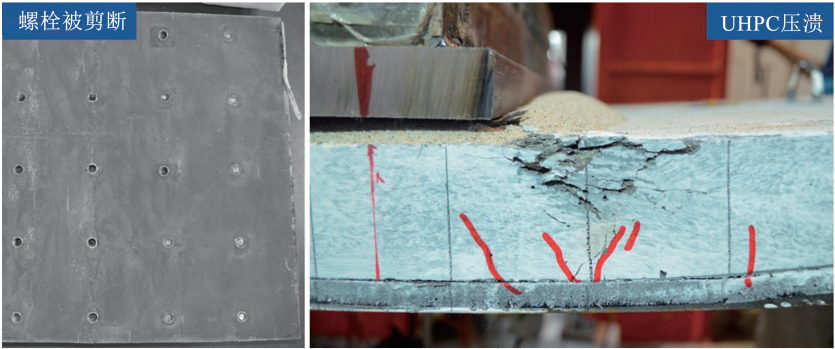


图 6 试件 Q355-150 破坏模式

Fig. 6 Failure mode of specimen Q355-150

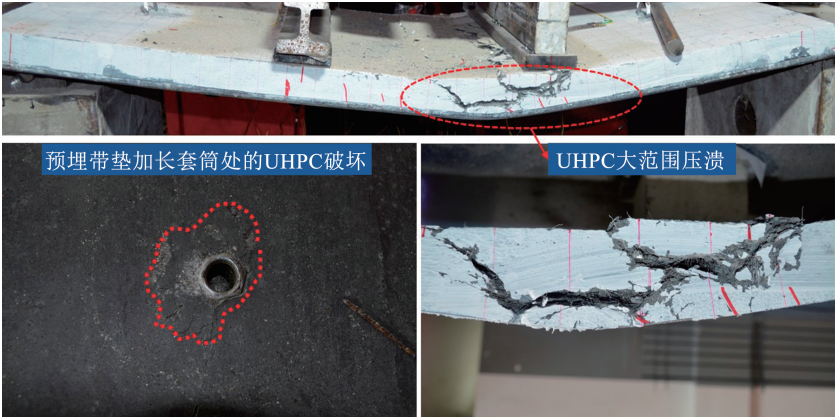


图 7 试件 NPR-150 破坏模式

Fig. 7 Failure mode of specimen NPR-150

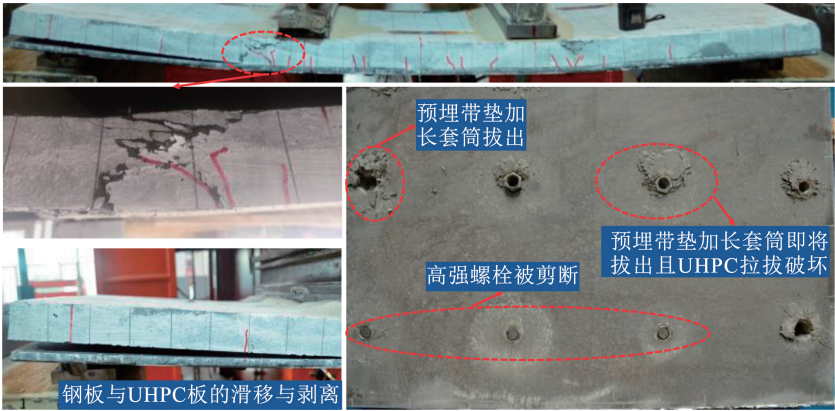


图 8 试件 NPR-200 破坏模式

Fig. 8 Failure mode of specimen NPR-200

2.2 荷载 - 挠度曲线

各试件的荷载 - 挠度曲线见图 9, 图中挠度为跨中最大挠度实测值。可以看出, 无论是采用 Q355 钢板还是 NPR 钢板的组合板试件, 其荷载 - 挠度曲线均可分为弹性段、螺栓杆滑移段、弹塑性段以及下降段。在正弯矩荷载作用下, 同传统焊接栓钉一样, 无论是采用 Q355 钢板还是 NPR 钢板, 降低高强螺栓连接件间距, 有效提高了钢板和 UHPC 板的协同工作能力, 继而提高组合板的抗弯承载力。此外, 高强螺栓的间距对组合板弹性段的刚度无明显影响, 而当螺栓杆滑移阶段结束后, 弹塑性段的组合板刚度随着高强螺栓间距的减小而增大。同时, 高强螺栓的间距在提高抗弯承载力的同时稍微降低了组合板的极限变形能力。

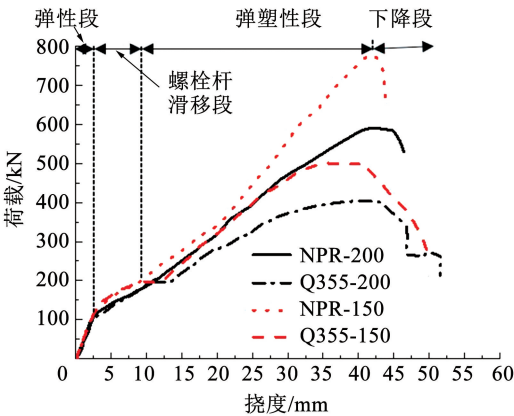


图 9 各试件荷载 - 挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves of each specimen

然而, 在相同的高强螺栓间距的前提下, 采用 NPR 钢板的组合板试件展示了更高的抗弯承载力和变形能力。在高强螺栓间距为 150、200 mm 的前提下, 采用 NPR 钢板的组合板试件较采用 Q355 钢板的组合板试件的抗弯承载力分别提高 54.9%、

46.0%, 而峰值荷载对应的变形则相对提高较少。此外, 这与钢结构规范规定的螺栓连接的抗剪承载力与钢板的等级无关的结论是相违背的^[17], 这可能是因为: 采用两种钢板的组合板试件的破坏模式不同。NPR 钢板的负泊松比效应、超高的抗拉强度及均匀伸长率等特性尽可能地将组合截面塑性中和轴靠近 NPR 钢板, 使高强螺栓的抗剪能力充分发挥, 而处于受压区较薄的 UHPC 薄板在较大荷载下瞬间失稳, 造成 UHPC 板大面积压溃, 继而造成钢板屈曲, 预埋带垫加长套筒从 UHPC 板中拔出, 组合板承载力丧失等; 试验条件下两端支座的条件不能满足完全简支, 随着荷载的逐渐增大, 支座的转动能力耗尽, 组合板的大变形则造成 UHPC 板中产生轴向压力, 而轴向压力的存在会导致组合板抗弯刚度的减小, 继而导致组合板试件的平面外失稳; NPR 钢板延缓了钢板与 UHPC 板的相对变形, 影响了构件截面应力的均匀分布效果, 同时, 在较大的竖向挠度下, 高强螺栓将处于拉弯剪复合应力状态, 最终造成高强螺栓的剪断和拔出破坏以及 UHPC 的失稳大面积积压溃破坏。

2.3 荷载 - 相对滑移曲线

各试件的荷载 - 相对滑移曲线见图 10, 此处相对滑移为两端钢板与 UHPC 板相对滑移的较大值。可以看出, 在正弯矩荷载作用下, 各试件板端滑移发展规律类似。当螺栓连接件间距减小时, 产生相对滑移的荷载则相对提高, 这是由于更多的高强螺栓提供了更多的钢板与 UHPC 板之间的摩擦力, 该阶段与钢板类型无关。在相同的高强螺栓间距下, 采用 NPR 钢板的组合板试件的板端相对滑移较小, 说明 NPR 钢板有效延缓并限制了钢板与 UHPC 板之间的相对滑移, 从而提高两者的协同变形能力, 继而提高组合板试件的抗弯刚度及抗弯承载力等, 这是

因为 NPR 钢板的高屈服及抗拉强度以及负泊松比效应尽可能地将截面塑性中和轴靠近钢板,继而充分发挥钢板与 UHPC 板的材料性能优势,这也再次验证了 NPR 钢板对组合板协同组合效应的贡献。另外,在采用相同钢板类型的前提下,高强螺栓间距的减小可有效减小钢板与 UHPC 板之间的相对滑移,改善了组合板的协同变形能力。此外,对于采用 Q355 钢板的组合板试件来说,其极限相对滑移接近于 Eurocode 4 规定的抗剪连接件的延性相对滑移要求(6 mm)^[18]。

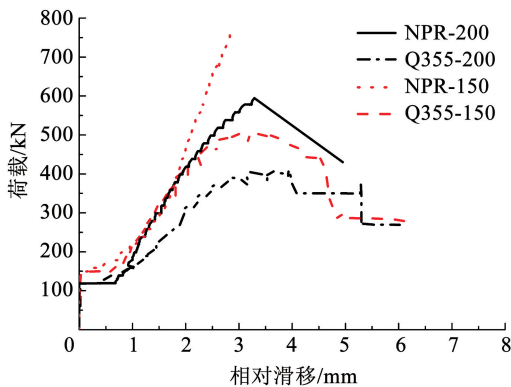


图 10 各试件荷载–相对滑移曲线

Fig. 10 Load–relative slip curves of each specimen

2.4 荷载–最大裂缝宽度曲线

各试件的荷载–最大裂缝宽度曲线见图 11,此处的最大裂缝宽度指的是从 UHPC 板侧面测量的底层纵向钢筋处的裂缝宽度。如图所示,达到开裂荷载后,组合板试件的裂缝宽度迅速发展。无论是采用哪种类型钢板,在相同荷载水平下,随着高强螺栓连接件间距的减小,UHPC 板和钢板之间的协同变形能力随之增强,有效抑制 UHPC 板裂缝的萌芽以及裂缝宽度的增长。而对于 NPR 钢板来说,其进一步增强了 UHPC 板与钢板之间的变形协调性,延缓了组合板试件的裂缝产生及发展,从而为组合板的裂缝宽度能力和耐久性提供进一步保证。此外,本研究中裂缝宽度达到 0.05 mm 时的开裂荷载远大于传统焊接栓钉等研究中的开裂荷载^[2,4],这可能是因为:高强螺栓连接件的高抗剪性能以及初始的预紧力赋予了钢板与 UHPC 板之间更好的协同工作效应,在高协调变形的约束下,UHPC 板与钢板变形甚微;NPR 钢板的优异力学性能延缓并限制了 UHPC 板的开裂,使得中和轴始终集中在钢板内部或者钢板与 UHPC 板的交界面,继而提高组合板的开裂荷载;高应变强化 UHPC 优异的裂缝宽度控制能力抑制了 UHPC 板裂缝的开展。

2.5 截面应变分析

图 12 展示了各试件截面不同位置处的应变分析,包括线弹性段结束对应的荷载、开裂荷载、0.7 倍及 0.9 倍的极限荷载、极限荷载等特征应变。其中,负值代表压应变,正值代表拉应变。如图所示,在线弹性阶段,组合板试件整个截面应变呈直线分布,截面满足平截面假定。当达到开裂荷载时,对于采用 Q355 的钢板,此时钢板与 UHPC 板发生较大的界面相对滑移,两者协同效应减弱,UHPC 板底部应变快速发展,塑性中和轴上移,且随着荷载的增大中和轴不断上移。而底部钢板的拉应变则相对于 UHPC 板的应变发展相对滞后。对于采用 NPR 钢板的组合板试件,当达到开裂荷载后,尽管 NPR 钢板的拉应变同样因为钢板与 UHPC 板的界面相对滑移而存在滞后,但由于 NPR 钢板的高刚度、高屈服强度以及高强螺栓连接的高抗剪效应,NPR 钢板与底部 UHPC 层的拉应变仍相对保持着应变协调性,见图 12(c)、(d),说明 NPR 钢板始终保持与 UHPC 板的协同变形,抑制组合截面塑性中和轴的上移。另外,在开裂荷载后,尽管塑性中和轴同样上移,但上移幅度可忽略,同样说明 NPR 钢板在 UHPC 板开裂后有效地控制着 UHPC 裂缝的竖向扩展,尽可能地发挥 NPR 钢板的抗拉性能。而对于较大的高强螺栓间距时,无论采用哪种类型钢板,组合板的中和轴随着不同等级荷载的增大上移的速度较快,这是因为在较大的高强螺栓间距下,钢板与 UHPC 板的协同效应退化更快,继而影响组合板的整体变形。因此,在采用 NPR 钢板提升可拆卸式钢–UHPC 组合板抗弯性能的前提下,应使 UHPC 厚度与 NPR 钢板的性能进行匹配,充分发挥两者的材料性能,避免 UHPC 板的失稳破坏先于 UHPC 材料强度破坏。

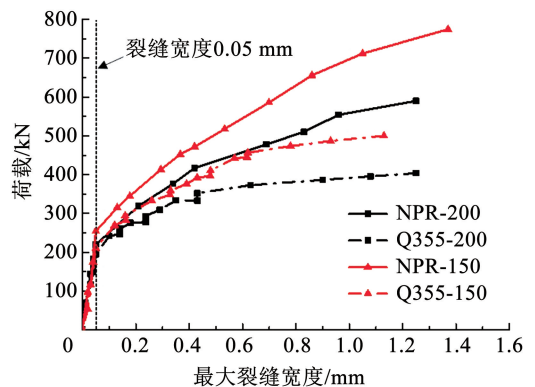


图 11 各试件荷载–最大裂缝宽度曲线

Fig. 11 Load–maximum crack width curves of each specimen

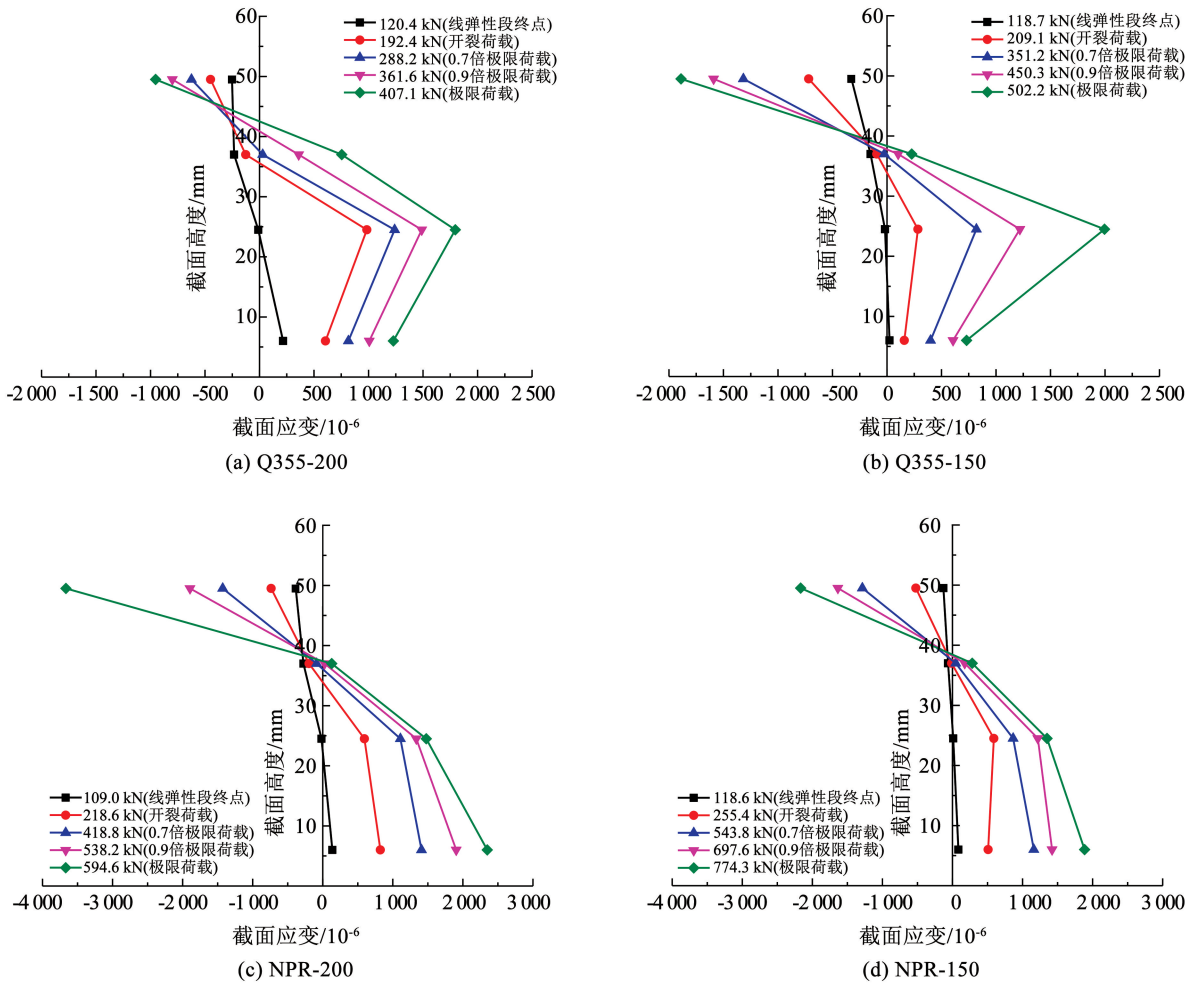


图 12 各试件不同阶段跨中截面应变分布

Fig. 12 Strain distribution in mid-span section of each specimen at different stages

3 结 论

1)在正弯矩荷载作用下,采用 Q355 钢板的组合板试件的破坏模式为高强螺栓被剪断,而采用 NPR 钢板的组合板试件的破坏模式为部分高强螺栓被剪断、部分预埋带垫加长螺母被拔出、UHPC 板由于失稳大面积压溃。

2)NPR 钢板导致组合板试件不同的破坏模式是因为:NPR 钢板尽可能地将塑性中和轴靠近 NPR 钢板,使高强螺栓的抗剪能力充足,而较薄的 UHPC 薄板在较大的受压荷载下瞬间失稳;组合板的大变形会造成 UHPC 板中产生轴向压力,而轴向压力的存在会导致组合板抗弯刚度的减小;NPR 钢板延缓了钢板与 UHPC 板之间的相对滑移,影响了整体构件截面应力的均匀分布效果。

3)无论是采用 Q355 钢板还是 NPR 钢板,降低高强螺栓连接件的间距,有效提高了组合板的抗弯承载力。此外,高强螺栓的间距对组合板线弹性阶段的刚度无明显影响,而点开裂阶段的组合板刚度

随着高强螺栓间距的减小而增大。

4)在相同的高强螺栓间距下,采用 NPR 钢板的组合板试件的板端相对滑移较小,说明 NPR 钢板有效延缓并限制了钢板与 UHPC 板之间的相对滑移,从而提高两者的协同变形能力,继而提高组合板试件的抗弯刚度及抗弯承载力等。

5)由截面应变分析可知,在正弯矩荷载作用下,整个加载过程中 NPR 钢板与底部 UHPC 层的拉应变一直保持着应变协调性,随着荷载的增大塑性中和轴的上移幅度可忽略不计,说明 NPR 钢板有效抑制了 UHPC 层裂缝的扩展。

参考文献

[1]王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 165
WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, et al. Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 165. DOI: 10.11918/j. issn.036706234. 201705148

[2]邵旭东,张松涛,张良,等. 钢 - 超薄 UHPC 层轻型组合桥面性

- 能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 22
- SHAO Xudong, ZHANG Songtao, ZHANG Liang, et al. Performance of light-type composite bridge deck system with steel and ultra-thin UHPC layer[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(1): 22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2016.01.05
- [3] 刘扬, 曾丹, 曹磊, 等. 钢-UHPC 组合结构桥梁研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3104
- LIU Yang, ZENG Dan, CAO Lei, et al. Advances of steel-UHPC composite bridge[J]. Materials Reports, 2021, 35(3): 3104. DOI: 10.11896/cldb.19090024
- [4] 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): 18
- 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): 18. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2022.03.004
- [5] 樊健生, 白浩浩, 韩亮, 等. 钢-超高性能混凝土组合板冲切性能试验研究和承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 10
- FAN Jiansheng, BAI Haohao, HAN Liang, et al. Experimental research on punching shear behavior and calculation of bearing capacity of steel-UHPC composite slabs[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 10. DOI: 10.14006/j.jzjxb.2019.0231
- [6] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 8
- SHAO Xudong, QIU Minghong, YAN Banfu, et al. Research of high performance fabricated bridge structures based on UHPC[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(2): 8. DOI:10.15986/j.1006-7930.2019.02.002
- [7] 赵秋, 陈平, 陈宝春, 等. 装配式钢-UHPC 组合桥面板试设计及性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 6
- ZHAO Qiu, CHEN Ping, CHEN Baochun, et al. Study of trial design and performance of assembled steel and UHPC composite bridge deck[J]. Bridge Construction, 2018, 48(1): 6
- [8] 《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): 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): 97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001
- [9] KWON G, ENGELHARDT M, KLINGNE R. Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4): 532. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.09.012
- [10] KWON G, ENGELHARDT M, KLINGNE R. A case study of bridge strengthening through the use of post-installed shear connectors[C]//Structures Congress 2010. Orlando: ASCE, 2010: 666
- [11] KWON G, ENGELHARDT M, KLINGNE R. Experimental behavior of bridge beams retrofitted with post-installed shear connectors[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4): 536. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000184
- [12] DAI X, 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): 04015025-1. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001267
- [13] 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
- [14] 杨飞, 刘玉擎, 姜智博, 等. 新型钢混螺栓连接件抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 50
- YANG Fei, LIU Yuqing, JIANG Zhibo, et al. Experiment on shear performance of novel steel-concrete bolted connector[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 50. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.12.004
- [15] 古金本, 王俊颜, 严彪, 等. 钢-超薄 UHPC 组合构件新型界面连接的抗剪性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(4): 1
- GU Jinben, WANG Junyan, YAN Biao, et al. Shear resistant performance of novel interfacial connection in steel-UHPC lightweight composite structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(4): 1. DOI: 10.11918/202111081
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法; GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature; GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017
- [18] European Committee for Standardization. Eurocode 4—Design of composite steel and concrete structures; EN 1994-2:2005[S]. Brussels: CEN, 2005

(编辑 赵丽莹)