

DOI:10.11918/202211021

装配式槽钢组合梁中开孔钢板连接件力学性能

周凌宇^{1,2}, 范进凯^{1,2}, 方蛟鹏^{1,2}, 李分规³, 戴超虎³,
曾波³, 徐增武³, 刘晓春^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 长沙 410075;
3. 中建五局第三建设有限公司, 长沙 410004)

摘要: 为研究新型装配式双拼槽钢-混凝土组合梁中开孔钢板剪力连接件(PSP 剪力连接件)的力学性能, 设计7组标准试件并开展推出试验, 对比分析不同参数 PSP 剪力连接件的受剪承载力和破坏模式。利用 ABAQUS 非线性有限元模型对 PSP 剪力连接件的破坏模式和受力机制进行数值模拟, 并与试验结果对比验证计算结果的可靠性。在此基础上, 进一步分析开孔钢板厚度、开孔直径、混凝土强度、穿孔钢筋及连接件间距对 PSP 剪力连接件力学性能的影响。结果表明: 除 10 mm 厚度的 PSP 剪力连接件外, 所有 4 mm 与 6 mm 厚度的 PSP 剪力连接件均发生明显弯曲变形, 试件破坏时连接件周围混凝土均出现斜向裂缝; 开孔直径和穿孔钢筋对受剪承载力和抗剪刚度影响较小, 而增加开孔钢板厚度、混凝土强度能提高剪力连接件受剪承载力和抗剪刚度; 对于双排 PSP 剪力连接件, 增大连接件间距能够显著提高单排 PSP 剪力连接件平均承载力, 当间距为 250 mm 时, 单排平均承载力达到单个 PSP 剪力连接件的 91.2%。根据试验及有限元荷载滑移曲线提出装配式双拼槽钢-混凝土组合梁中单个 PSP 连接件荷载滑移曲线计算公式, 为装配式双拼槽钢混凝土组合梁的设计提供参考。

关键词: 装配式组合梁; 开孔钢板剪力连接件; 受剪承载力; 推出试验; 有限元; 荷载-滑移曲线

中图分类号: TU398.9; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)02-0058-10

Mechanical properties of perforated steel plate connectors in prefabricated channel steel-concrete composite beams

ZHOU Lingyu^{1,2}, FAN Jinkai^{1,2}, FANG Jiaopeng^{1,2}, LI Fengui³, DAI Chaohu³,
ZENG Bo³, XU Zengwu³, LIU Xiaochun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Research Center of High-speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China;
3. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Fifth Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

Abstract: To study the mechanical properties of perforated steel plate (PSP) shear connectors in prefabricated double-channel steel-concrete composite beams, seven groups of standard specimens were designed and push-out tests were conducted to compare and analyze the shear capacity and failure modes of PSP shear connectors with different parameters. The ABAQUS nonlinear finite element model was developed to numerically simulate the failure mode and force mechanism of PSP shear connectors, and the reliability of the finite element results was verified by comparing with the experimental results. On this basis, further analysis is conducted on the effects of the thickness of the perforated steel plate, the diameter of the hole, the strength of the concrete, the perforated reinforcement and the spacing between the connectors on the mechanical properties of PSP shear connectors. The results showed that, except for the 10 mm thick PSP shear connectors, all PSP shear connectors with the thicknesses of 4 mm and 6 mm underwent obvious bending deformation, and oblique cracks appeared in the concrete around the connectors when all specimens were failed. The diameter of the hole and the perforated reinforcement had little effect on the shear capacity and shear stiffness, while increasing the thickness of the perforated steel plate and concrete strength could improve the shear capacity and shear stiffness of PSP shear connectors. For double-row PSP shear connectors, increasing the spacing between the connectors could significantly improve the average bearing capacity of single-row PSP shear connectors, and when the spacing was 250 mm, the average shear capacity of single-row PSP shear connectors reached 91.2% of that of a single PSP connector. Finally, an equation for the calculation of the load-

收稿日期: 2022-11-07; 录用日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-04-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230412.0936.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51978662); 中建五局科研项目(cseec5b-2021-05)

作者简介: 周凌宇(1973—), 男, 博士研究生; 刘晓春(1980—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘晓春, xchliu@csu.edu.cn

slip curve of a single PSP shear connector in prefabricated double-channel steel-concrete composite beams was proposed based on the experiment and finite element load-slip curve providing a reference for the design of prefabricated double-channel steel-concrete composite beams.

Keywords: prefabricated composite beam; perforated steel plate shear connector; shear capacity; push-out tests; finite element; load-slip curves

装配式组合梁作为一种新型复合材料结构,因其生产效率高、可持续性能好、低碳环保等特点广泛应用于工业与民用建筑中^[1-4]。本课题组首次提出了一种新型装配式双拼槽钢-混凝土组合梁,该组合梁是通过高强螺栓将两个预制楼板背靠背连接起来叠合而成,如图1所示。与现有的装配式组合梁相比,该组合梁实现了全装配施工,无需额外的现场浇筑和焊接,加快了施工速度;此外,混凝土板位于槽钢翼缘下方,有效降低了梁高,增大了建筑使用空间,具有广泛应用前景和巨大商业价值。钢-混组合梁通常是依靠剪力连接件来传递混凝土与钢梁之间的界面剪力,保证两者协同工作。国内外常用的剪

力连接件主要包括栓钉、螺栓剪力连接件等^[5-7],但对于新型装配式双拼槽钢-混凝土组合梁,常规的剪力连接件无法满足其构造要求。为保证组合梁中混凝土板与槽钢梁之间的组合作用,增强组合梁的整体工作性能,提出一种适用于该组合梁的新型开孔钢板剪力连接件(PSP剪力连接件)。该剪力连接件是在组合梁的上翼缘和纵向加劲肋之间焊接特定的开孔钢板形成(见图1(b)),其不仅能够有效防止混凝土板的纵向滑移和横向分离,增强组合梁整体工作性能,还能作为槽钢梁加劲肋,防止腹板和翼缘的屈曲和失稳。

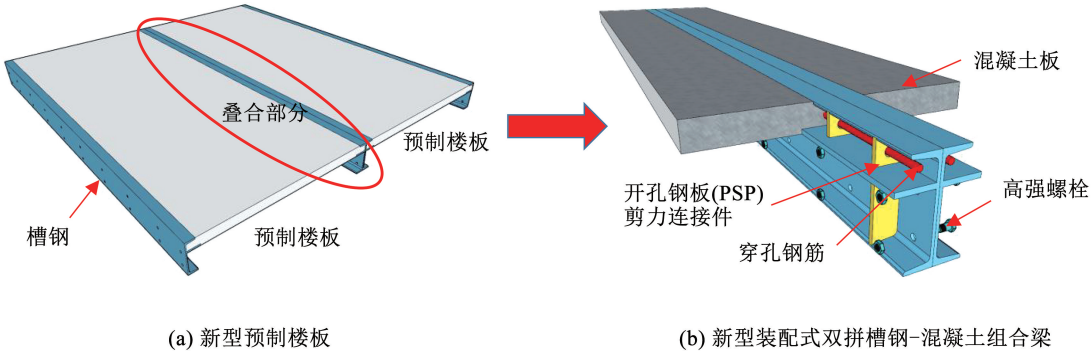


图1 新型预制楼板及双拼槽钢-混凝土组合梁

Fig.1 New type of prefabricated floor slab and double-channel steel-concrete composite beam

目前,对各类开孔钢板剪力连接件抗剪性能的研究已较为系统。Oguejiofor等^[8]研究了开孔钢板孔洞数量、孔洞间距、混凝土强度以及横向钢筋对受剪承载力的影响,并提出了受剪承载力计算方法。Vianna等^[9]开展了16组PBL剪力连接件推出试验,讨论了混凝土板厚度、混凝土强度、穿孔钢筋等参数对PBL剪力连接件受剪承载力和刚度的影响并给出了计算建议。Ahn等^[10]通过推出试验发现双排PBL连接件的平均受剪承载力约为单排受剪承载力的80%。Kim等^[11]提出了一种新的Y型PBL剪力连接件并对其开展了推出试验。Vianna等^[12]对18组T型开孔钢板剪力连接件开展了试验研究,结果表明,T型开孔钢板剪力连接件具有较高的受剪承载力。肖林等^[13-15]通过静载试验发现PBL连接件受剪承载力及破坏模式取决于开孔钢板厚度,并给出了考虑钢板厚度等参数的承载力计算公式。胡建华等^[16]通过开展推出试验发现PBL连接件具有延性破坏特征。卫星等^[17]对PBL剪力连接件疲劳性能开展了系统的试验研究,并给出了采

用残余滑移量评估疲劳损伤发展的设计建议。张清华等^[18-19]通过试验、数值和理论方法研究了PBL剪力连接件群的传力机制,并提出了荷载-滑移变形协调模型和极限承载力计算方法。汪维安等^[20]通过静载试验研究了多排PBL连接件荷载-滑移分布特征,并给出了PBL剪力连接件群承载力计算方法。

综上,虽然对开孔钢板剪力连接件(PBL剪力连接件)已开展了大量研究并取得了丰富的研究成果,但主要都是围绕垂直于穿孔钢筋方向受剪的PBL剪力连接件,对于受剪方向平行于穿孔钢筋的开孔钢板剪力连接件的研究较少。本文提出的PSP剪力连接件属于该类开孔钢板剪力连接件,目前对PSP剪力连接件的研究尚属空白。为此,在新型装配式双拼槽钢-混凝土组合梁基础上,设计了7组试件并开展推出试验,探讨了不同参数PSP剪力连接件的受剪承载力及破坏模式。采用有限元方法开展了参数分析,进一步研究了开孔钢板厚度、开孔直径、混凝土强度、连接件间距和穿孔钢筋对PSP剪力连接件力学性能的影响。根据试验及有限元荷

每级位移增量为 0.4 mm,直至试件破坏。为保证试件加载过程中受力均匀,在每个试件顶部安装了水平钢板,底部铺设了少量砂垫层。试件相对滑移通过位移计测量获得,加载值则采用顶部压力传感器配合液压机受力读数获得。

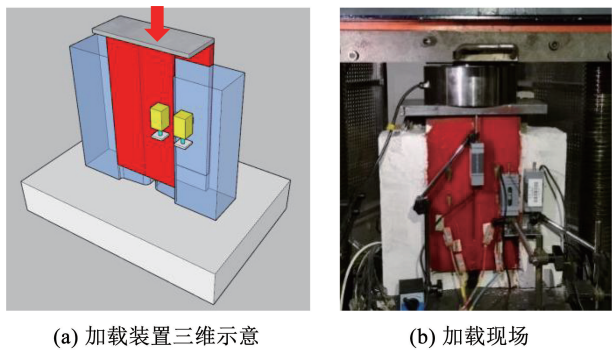


图 3 试验加载装置
Fig. 3 Test set up

1.3 破坏形态

7 个试件在加载初期并没有发生明显变化。随着加载的进行,钢梁与混凝土之间开始产生明显的滑移,钢混交界面处混凝土部分剥落。随着荷载继续增大,试件底部混凝土首先出现竖向裂纹。继续加载,PSP 剪力连接件处混凝土开始出现斜裂缝并逐渐向混凝土底部及侧面延伸,如图 4 所示。随着荷载进一步增大,混凝土板两侧产生横向和竖向裂缝,正面斜裂缝继续发展。最终侧面裂缝和正面斜裂缝贯通,底部混凝土保护层大量剥落,试件展示出混凝土压碎破坏形式。

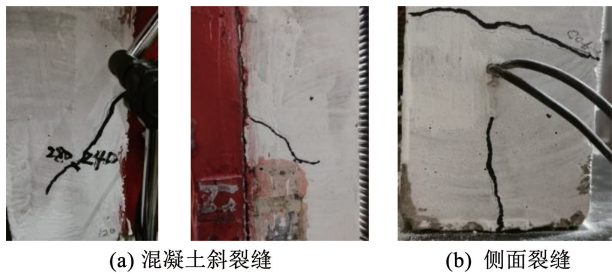


图 4 混凝土裂缝
Fig. 4 Concrete cracks

7 个试件拆除混凝土后的 PSP 剪力连接件变形情况如图 5 所示。可以看出,试件 SP1-4-50-C40、SP1-4-30-C50、SP1-4-30-C40、SP2-4-30-C40-150 以及 SP2-6-30-C40-150 的 PSP 剪力连接件都发生了较为明显的弯曲变形,其中,试件 SP1-4-30-C50 中还观察到 PSP 剪力连接件的剪切破坏。而试件 SP1-10-30-C40 的 PSP 剪力连接件没有观察到明显变形。对于具有双排 PSP 剪力连接件的 SP2-4-30-C40-150 和 SP2-6-30-C40-150 试件,底部 PSP 剪力连接件比顶部 PSP 剪力连接件变形更明显,这是由于 PSP 剪

力连接件间距较小导致上下剪力连接件受力不均匀,底部 PSP 剪力连接件承担更高的剪力。

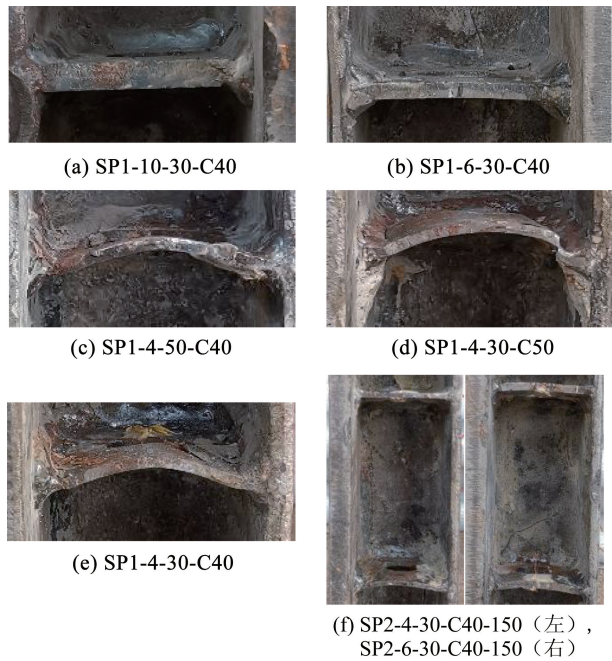


图 5 拆除混凝土后剪力连接件变形
Fig. 5 Deformation of connectors after removing concrete

1.4 荷载-滑移曲线及力学性能

所有试件的荷载-滑移曲线如图 6 所示。可以看出,PSP 剪力连接件荷载-滑移曲线主要分为弹性阶段、弹塑性阶段、平台阶段、破坏阶段。加载初期,试件处于弹性阶段,此时荷载-滑移曲线呈线性增长,直至 A 点,此时相对滑移约为 0.3 mm,对应荷载约为峰值荷载的 40%。随着荷载持续增大,混凝土板表面产生斜裂缝,曲线进入弹塑性阶段,此时曲线呈非线性增长,斜率逐渐减小,直至达到峰值荷载 B 点。随后,曲线进入平台阶段,在这一阶段,混凝土裂缝继续发展并相互贯通,裂缝宽度增大,部分混凝土逐渐退出工作。该阶段中曲线接近水平发展,荷载保持在峰值荷载的 95% 以上。最后,曲线进入破坏阶段,并迅速下降。在此期间,大量混凝土分离,混凝土压碎。

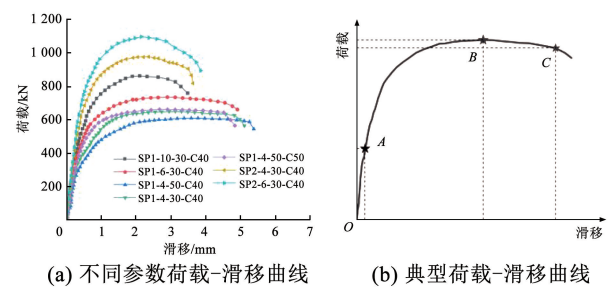


图 6 荷载-滑移曲线
Fig. 6 Load-slip curve

所有试件的试验结果如表 3 所示。可以看出,试件 SP1-10-30-C40 受剪承载力较 SP1-6-30-C40 和 SP1-4-30-C40 提高了 17.2% 和 32.5%,抗剪刚度提高 5.6% 和 32.6%,由此说明,增大开孔钢板厚度可以提高 PSP 剪力连接件受剪承载力和抗剪刚度。对比试件 SP1-4-30-C50 与试件 SP1-4-30-C40,前者抗剪刚度较后者提高了 9.2%,而受剪承载力差异较小,这可能是由于开孔钢板厚度较小导致 PSP 剪力连接件受剪承载力主要由开孔钢板控制。对比具

有相同参数的双剪力连接件试件与单剪力连接件试件,发现试件 SP2-4-30-C40-150 的极限承载力较试件 SP1-4-30-C40 提高了 50.2%,试件 SP2-6-30-C40-150 的极限承载力较试件 SP1-6-30-C40 提高了 49.1%。然而,均没有实现两倍的提高,双剪力连接件试件中单个 PSP 剪力连接件平均受剪承载力均小于单个 PSP 剪力连接件的受剪承载力,这是由于较小的间距导致 PSP 剪力连接件受力不充分,其抗剪能力不能完全发挥。

表 3 推出试验结果
Tab. 3 The results of push-out tests

试件编号	P_u/kN	P_e/kN	P_{Rk}/kN	Δ_u/mm	Δ_e/mm	Δ_{Rk}/mm	$K_s/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$
SP1-10-30-C40	864	432	778	2.09	0.30	3.38	1 440
SP1-6-30-C40	737	368	663	2.89	0.27	4.89	1 363
SP1-4-50-C40	612	306	551	3.76	0.35	5.35	874
SP1-4-30-C40	652	326	587	3.12	0.30	5.02	1 086
SP1-4-30-C50	664	332	598	2.66	0.28	4.71	1 186
SP2-6-30-C40-150	1 099	549	989	2.14	0.28	3.48	1 961
SP2-4-30-C40-150	979	489	881	2.35	0.28	3.55	1 746

注: P_u 为 PSP 剪力连接件的受剪承载力, P_e 为初始刚度特征荷载(取极限荷载的 50%), P_{Rk} 为延性特征荷载(取极限荷载的 90%), Δ_u 和 Δ_{Rk} 分别为荷载 P_u 和 P_{Rk} 对应的极限滑移和特征滑移, K_s 为抗剪刚度。

2 有限元分析

2.1 有限元模型

为进一步分析开孔钢板厚度、开孔直径、混凝土强度、剪力连接件间距对 PSP 剪力连接件力学性能的影响,利用有限元软件 ABAQUS 对装配式双拼槽钢组合梁中 PSP 剪力连接件进行了非线性参数分析。有限元模型由 6 部分组成,包括混凝土板、钢梁、PSP 剪力连接件、加载板、底板和钢筋网,如图 7 所示。

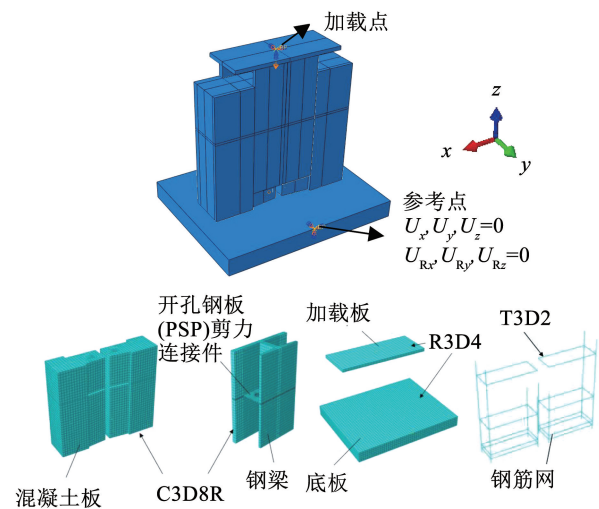


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

2.2 单元类型、边界条件及网格划分

有限元模型中钢梁、PSP 剪力连接件、混凝土板采用三维八节点单元 (C3D8R),加载板和底板采用离散刚性单元 (R3D4),内部钢筋网采用三维双节点桁架单元 (T3D2)。此外,内部钢筋网采用“Embedded Region”嵌入到混凝土中发挥作用。部件之间的接触采用接触单元进行模拟,其中,钢梁与混凝土板、PSP 剪力连接件与混凝土板、混凝土板与加载板及底板之间的接触采用硬接触模拟法向接触行为,采用库伦摩擦接触模拟切向接触行为。混凝土板与钢梁和 PSP 剪力连接件的摩擦因数取 0.4。由于底板与混凝土板之间存在砂垫层,底板与混凝土板之间的摩擦因数取 0.3。为同时保证计算结果准确可靠,对 PSP 连接件进行了局部精密网格划分。PSP 连接件沿厚度方向采用 4~8 层单元,局部网格尺寸为 5 mm,其余部件采用 10 mm 的网格尺寸。

2.3 材料性能

2.3.1 混凝土

混凝土拉压本构模型参考文献[21-22],应力-应变曲线如图 8 所示。当混凝土受压,应力-应变曲线分为上升和下降段。其中,上升段由式(1)、(2)控制,下降段为一条直线,在达到 85% 最大抗压强度时终止,此时应变为 $14\varepsilon_{cp}$ 。当混凝土受拉,应力-

应变曲线由式(3)、(4)控制。

$$\sigma_c = \left[\frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \right] f_c \tag{1}$$

$$k = \frac{E_c \varepsilon_{cp}}{f_c}, \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cp}} \tag{2}$$

$$\sigma_t = (1.2x - 0.2x^6) f_t \tag{3}$$

$$x = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tp}} \tag{4}$$

式中： σ_c 和 ε_c 分别为曲线上升段的压应力及对应的压应变； f_c 和 ε_{cp} 分别为最大压应力和最大压应变； E_c 为混凝土弹性模量； σ_t 和 ε_t 分别为拉应力及对应拉应变； f_t 和 ε_{tp} 为极限拉应力和极限拉应变。

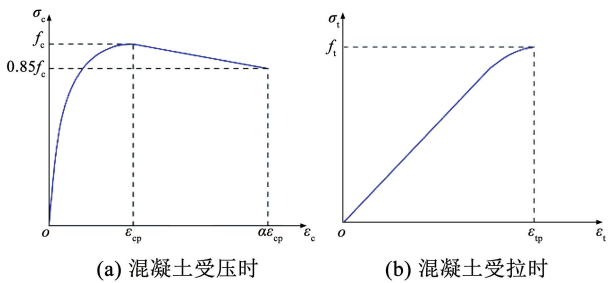


图8 混凝土应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of concrete

2.3.2 钢材

PSP 剪力连接件采用三线性等效强化模型进行模拟,其余钢材采用双线性理想模型进行模拟,应力-应变曲线如图 9 所示。模型中所有钢材均遵循 Mises 屈服准则,PSP 剪力连接件极限应变取 0.2,钢筋泊松比取 0.3,其他材料参数见表 2。

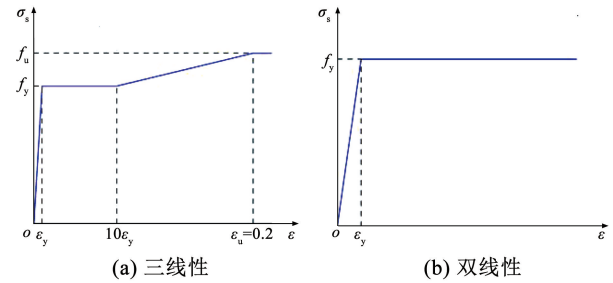


图9 钢材应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of steel

2.4 模型验证

图 10 以 SP1-4-50-C40、SP1-6-30-C40、SP1-10-30-C40 为例,给出了推出试验与有限元分析中荷载-滑移曲线对比,可以看出,有限元模拟得到的荷载-滑移曲线与推出试验实测曲线吻合良好。以试件 SP1-6-30-C40 为例,对比了有限元分析和推出试验中 PSP 剪力连接件破坏形态,如图 11 所示。

图 11(a)和(b)为有限元模拟得到的混凝土开裂状态与试验结果对比。图 11(c)为有限元模拟得到的开孔钢板剪力连接件塑性变形与试验结果对比。结果表明,有限元分析得到的破坏模式与实验结果基本一致。因此,本文建立的有限元模型能够较好地反映推出试件中 PSP 剪力连接件的剪切行为和最终破坏形态。

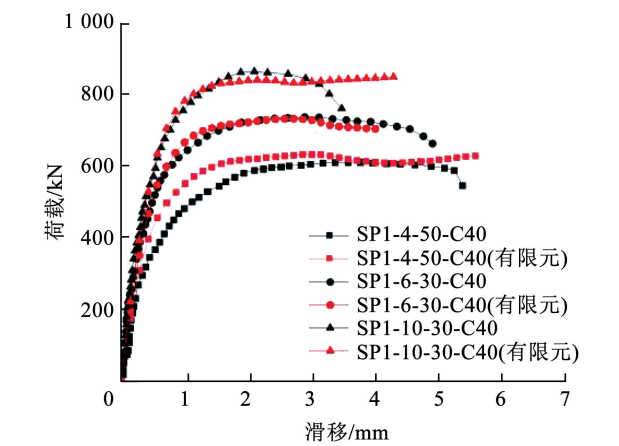


图10 有限元分析荷载-滑移曲线与试验结果对比

Fig. 10 Comparison of the load-slip curves calculated by the FEM and the test result

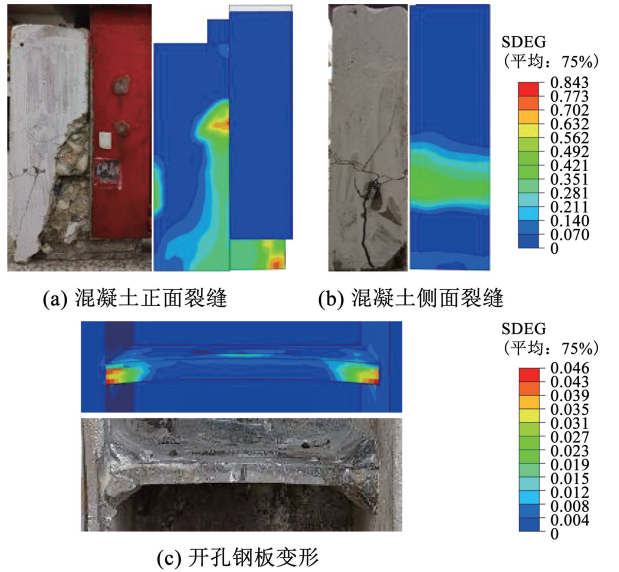


图11 有限元计算结果与试验破坏形态对比

Fig. 11 Comparison of the results calculated by the FEM and the experimental failure modes

3 有限元分析

利用验证后的有限元模型,通过改变开孔钢板厚度、开孔直径、混凝土强度、连接件间距、穿孔钢筋,分析 PSP 剪力连接件不同参数变化对其荷载-滑移曲线及受剪承载力的影响。

3.1 开孔钢板厚度的影响

图 12 给出了不同厚度的 PSP 剪力连接件荷载-滑移曲线。可以看出,随着开孔钢板厚度的增加,PSP 剪力连接件抗剪刚度和受剪承载力均得到提高,当开孔钢板厚度从 8 mm 增加到 10、14、20 mm 时,PSP 剪力连接件受剪承载力分别提高了 5.8%、12.6%、14.9%。受剪承载力随开孔钢板厚度呈现非线性增加,随着厚度的增大,受剪承载力增加速度逐渐减小。这是由于开孔钢板厚度的提高使得 PSP 剪力连接件更不容易产生变形,受剪承载力和抗剪刚度得到提高。然而,当开孔钢板厚度增加到一定程度时,大厚度的开孔钢板使得混凝土提前被压碎,混凝土强度对受剪承载力的影响变得更为敏感,受剪承载力增加速度减小。因此,适当增加开孔钢板厚度可以有效地提高 PSP 剪力连接件的受剪承载力。

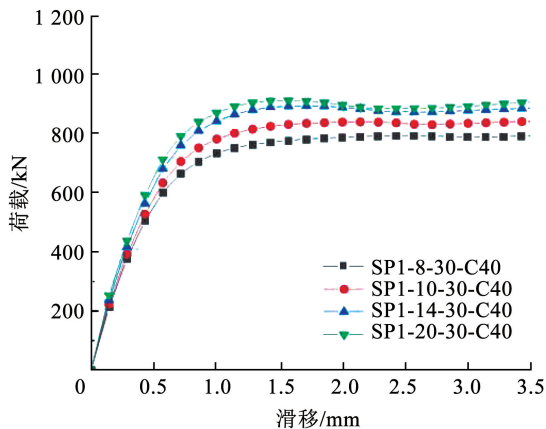


图 12 不同开孔钢板厚度的影响

Fig. 12 Effect of different thicknesses of perforated steel plate

3.2 开孔直径的影响

图 13 给出了钢板厚度为 10 mm 时不同开孔直径的 PSP 剪力连接件荷载-滑移曲线。可以看出,随着开孔直径的增大,荷载-滑移曲线变化不明显,当开孔直径从 10 mm 增加到 50 mm 时,开孔钢板受剪承载力仅减小了 4.0%,而抗剪刚度没有明显变化。这可能是由于厚度较大的 PSP 剪力连接件的受剪承载力主要由焊缝周围混凝土提供。在整个加载过程中,钢板未发生明显弯曲或剪切变形,而底部混凝土被压溃。因此,对于大厚度 PSP 剪力连接件,开孔直径对受剪承载力和抗剪刚度的影响较小。

3.3 混凝土强度的影响

图 14 给出了不同混凝土强度下 PSP 剪力连接件的荷载-滑移曲线。可以看出,随着混凝土强度的提高,PSP 剪力连接件的受剪承载力和抗剪刚度都得到了提高。当混凝土强度从 50 MPa 增加到 60、

70、80 MPa 时,PSP 剪力连接件的受剪承载力分别提高了 9%、18%、28%。受剪承载力随混凝土强度的提高近似呈线性增长,提高混凝土强度能有效增大 PSP 剪力连接件受剪承载力。因此,混凝土强度对 PSP 剪力连接件的力学性能有显著影响。

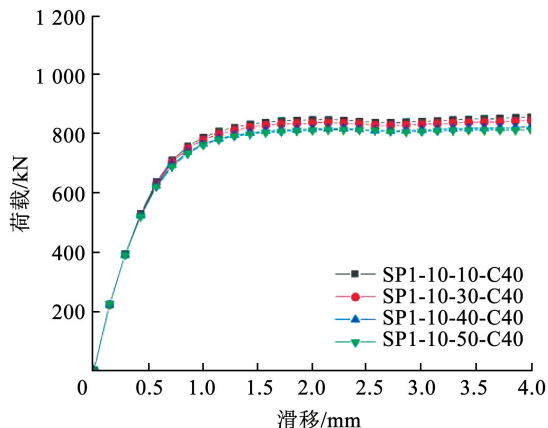


图 13 不同开孔直径的影响

Fig. 13 Effect of different opening diameters

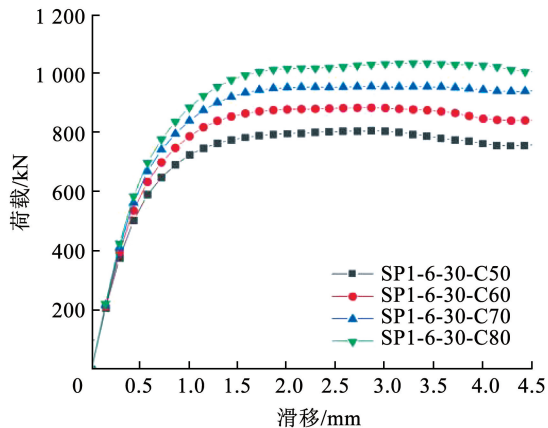


图 14 不同混凝土强度的影响

Fig. 14 Effect of different strength of concrete

3.4 连接件间距的影响

图 15 给出了不同连接件间距下 PSP 剪力连接件的荷载-滑移曲线。可以看出,连接件间距对 PSP 剪力连接件的受剪承载力有显著影响。当连接件间距较小时,由于相邻剪力连接件间混凝土应力重叠,顶部与底部 PSP 剪力连接件受力并不均匀,底部剪力连接件会比顶部连接件分担到更高的剪力,随着连接件间距的增大,应力重叠减小,相邻两个 PSP 剪力连接件分担的剪力趋于相等。间距为 100、150、200、250 mm 的单排平均承载力分别达到了单个 PSP 剪力连接件的 66.2%、75.6%、87.7%、91.2%,均小于单个 PSP 剪力连接件受剪承载力。因此,在实际工程中 PSP 剪力连接件的间距取值建议大于 250 mm。

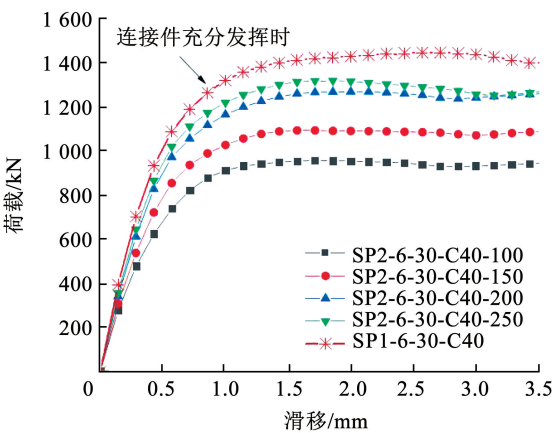


图 15 不同连接件间距的影响

Fig. 15 Effect of different connector spacing

3.5 穿孔钢筋的影响

穿孔钢筋是各种形式开孔钢板连接件中至关重要的研究参数,以试件 SP2-6-30-C40-O (无穿孔钢筋)和试件 SP2-6-30-C40-I (含直径为 16 mm 的穿孔钢筋)研究穿孔钢筋对 PSP 剪力连接件抗剪能力的影响。从图 16 可以看出,穿孔钢筋对 PSP 剪力连接件的受剪承载力和抗剪刚度影响较小。相比试件 SP2-6-30-C40-O,试件 SP2-6-30-C40-I 的受剪承载力仅提高了 2.2%。此外,在开孔钢板中设置穿孔钢筋可以在很大程度上提高 PSP 剪力连接件的面外抗剪能力和抗拉能力。因此,有必要在 PSP 剪力连接件孔中设置穿孔钢筋,以保证装配式双拼槽钢-混凝土组合梁中混凝土板和钢梁之间的共同工作性能。

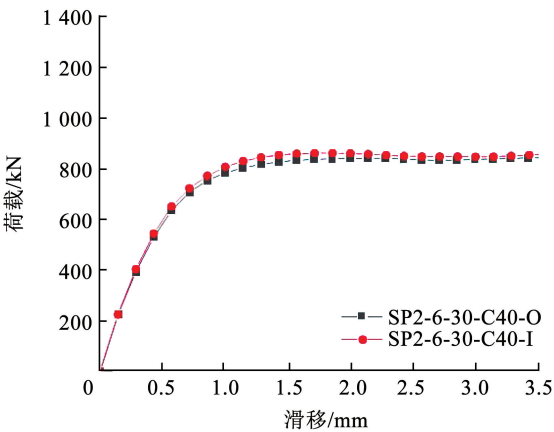


图 16 穿孔钢筋的影响

Fig. 16 Effect of perforated reinforcement

4 PSP 连接件荷载-滑移行为研究

剪力连接件的荷载-滑移行为是评价钢-混凝土组合梁界面特性的重要指标。对于大多数钢-混凝土组合梁,在弹性阶段,剪力连接件对组合梁力学性

能的影响不显著。而在塑性阶段,组合梁内部剪力连接件、混凝土和钢梁三者之间应力开始重新分布,需要通过荷载-滑移关系考虑剪力连接件变形和钢-混凝土相互作用。而目前对 PSP 剪力连接件荷载-滑移关系的研究基本属于空白。常见的荷载-滑移曲线公式主要是针对栓钉和螺栓等剪力连接件,表 4 总结了不同学者提出的荷载-滑移曲线经验公式。

表 4 荷载-滑移曲线经验公式

Tab. 4 Practical formulas of load-slip curve	
文献	经验公式
[23]	$\frac{P}{P_u} = 0.97 \sqrt{1 - e^{-1.34s}} + 0.0045s$
[24]	$\frac{P}{P_u} = \frac{s}{0.5 + 0.97s}$
[25]	$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.5s})^{1/3}$
[26]	$\frac{P}{P_u} = \frac{2.24(s - 0.058)}{1 + 1.98(s - 0.058)}$
[27]	$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.71s})^{0.4}$

注: P 为荷载值; P_u 为极限荷载值; s 为滑移值。

将试验及有限元荷载-滑移曲线与表 4 所建议公式进行对比,结果如图 17 所示。可以看出,公式与试验及有限元结果拟合精度较差,现存经验公式不适用本文提出的 PSP 剪力连接件。因此,有必要研究和建立 PSP 剪力连接件的荷载-滑移曲线关系式。

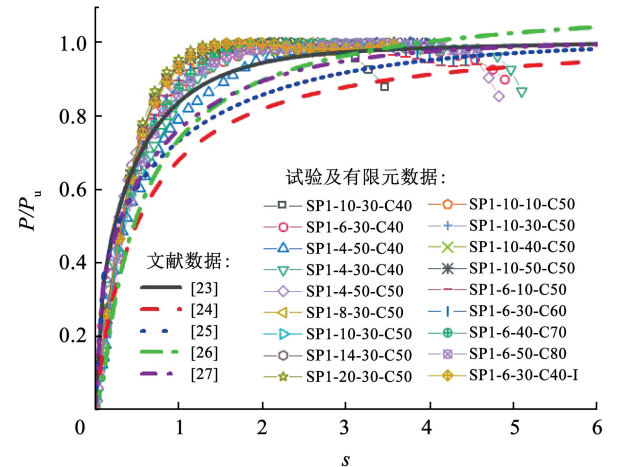


图 17 试验及有限元结果与荷载-滑移预测公式对比

Fig. 17 Comparison between the experimental and finite element results and the prediction equations of load-slip curve

根据试验数据和有限元计算结果,参考文献[25,27]中的荷载-滑移关系公式形式,拟合得到PSP连接件荷载-滑移关系计算公式(5)。试验数据和有限元计算结果与本文提出公式的对比如图18所示,该公式适用于不考虑群连接件效应的单个PSP剪力连接件。可以看出,公式预测结果与试验及有限元获得的荷载-滑移曲线吻合良好。

$$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-2.49s})^{1.13} \quad (5)$$

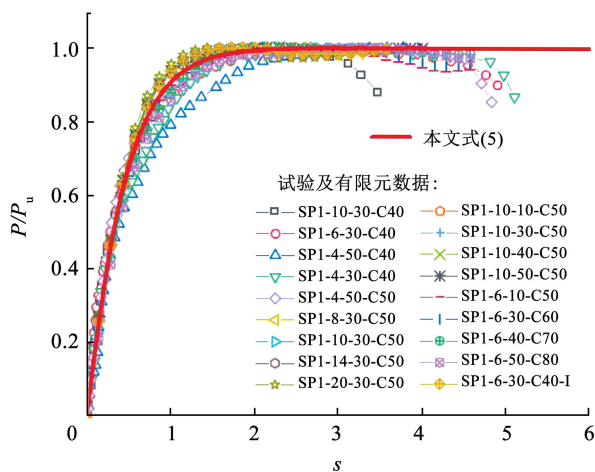


图 18 试验及有限元结果与本文公式对比

Fig. 18 Comparison between the experimental and finite element results and the proposed equation

5 结 论

1) 试验结果表明,除 10 mm 厚度 PSP 剪力连接件外,所有 4 mm 与 6 mm 厚度的 PSP 剪力连接件均发生了明显弯曲变形,其中,试件 SP1-4-30-C50 中 PSP 剪力连接件还观察到了剪切破坏。对于双排连接件试件,底部 PSP 剪力连接件变形比顶部连接件更明显。所有试件破坏时剪力连接件周围混凝土均出现了斜向裂缝。

2) 增加开孔钢板厚度可以提高 PSP 剪力连接件受剪承载力。但随着厚度的增大,受剪承载力增加速度逐渐减小。

3) 提高混凝土强度可以显著提高 PSP 剪力连接件受剪承载力和抗剪刚度,而开孔直径和穿孔钢筋对受剪承载力和抗剪刚度影响较小。

4) 增大连接件间距能够显著提高单排 PSP 剪力连接件平均受剪承载力,当间距为 100、150、200、250 mm 时,单排平均承载力分别达到单个 PSP 剪力连接件的 66.2%、75.6%、87.7%、91.2%。因此,实际工程中 PSP 剪力连接件的间距取值建议大于 250 mm。

5) 提出了装配式双拼槽钢-混凝土组合梁中单

个 PSP 剪力连接件荷载-滑移曲线计算公式,为装配式双拼槽钢混组梁的设计提供参考。

参考文献

- [1] SUWAED A S H, KARAVASILIS T L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 171: 106. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106152
- [2] 刘界鹏,周保旭,余洁,等. 装配整体式钢-混凝土组合梁栓钉抗剪连接件受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 337
LIU Jiepeng, ZHOU Baoxu, YU Jie, et al. Experimental study on mechanical behavior of shear studs in assembled monolithic steel-concrete composite beam[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Sup. 1): 337. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.S1.047
- [3] 古金本,王俊颜,陆伟. 新型可拆卸式钢-UHPC 组合板的抗弯性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1): 84
GU Jinben, WANG Junyan, LU Wei. Flexural behavior of a novel demountable steel-UHPC composite slab[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1): 84. DOI: 10.11918/202208008
- [4] 赵鹤,王皓,支旭东,等. 装配式板柱钢结构体系建筑产业化技术与示范[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(10): 32
ZHAO He, WANG Hao, ZHI Xudong, et al. Architectural industrialization technology and demonstration of prefabricated slab-column steel structural systems[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(10): 32. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.010.004
- [5] 汪炳,黄侨,刘小玲. 疲劳荷载作用下栓钉连接件的抗剪承载力退化规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 76
WANG Bing, HUANG Qiao, LIU Xiaoling. Shear capacity degradation law of stud connectors under fatigue loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 76. DOI: 10.11918/j.issn.0367-623
- [6] MOLKENS T, DOBRI Ć J, ROSSI B. Shear resistance of headed shear studs welded on welded plates in composite floors[J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109412
- [7] ATAEE A, ZEYNALIAN M. A study on structural performance of deconstructable bolted shear connectors in composite beams[J]. Structures, 2021, 29: 519. DOI:10.1016/j.istruc.2020.11.065
- [8] OGUJEIOFOR E C, HOSAIN M U. A parametric study of perfbond rib shear connectors[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(4): 614. DOI: 10.1139/194-063
- [9] VIANNA J D C, ANDRADE S A L D, VELLASCO P C G D S, et al. Experimental study of perfbond shear connectors in composite construction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 81(81): 62. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.11.002
- [10] AHN J H, LEE C G, WON J H, et al. Shear resistance of the perfbond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1295. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.04.008
- [11] KIM S, PARK S, HEO W, et al. Shear resistance characteristic and ductility of Y-type perfbond rib shear connector[J]. Steel and Composite Structures, 2015, 18(2): 497. DOI: 10.12989/scs.

2015.18.2.497

[12] VIANNA J D C, COSTA-NEVES L F, VELLASCO P C G D, et al. Structural behaviour of T-perfobond shear connectors in composite girders: an experimental approach [J]. Engineering Structures, 2008, 30 (9): 2381. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.01.015

[13] 肖林, 强士中, 李小珍, 等. 考虑开孔钢板厚度的 PBL 剪力键力学性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 282

XIAO Lin, QIANG Shizhong, LI Xiaozhen, et al. Research on mechanical performance of PBL shear connectors considering the perforated plate's thick [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (8): 282. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.06.0343

[14] 肖林, 卫星, 强士中. 两类 PBL 剪力键推出试验的对比研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 70

XIAO Lin, WEI Xing, QIANG Shizhong. Comparative study on two kinds of push-out tests of PBL shear connectors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (11): 70. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2013.11.025

[15] 肖林, 叶华文, 卫星, 等. 斜拉桥桥塔钢-混结合段的力学行为和传力机制研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 88

XIAO Lin, YE Huawen, WEI Xing, et al. Study on mechanical behavior and load transfer mechanism of steel-concrete composite joint of cable-stayed bridge pylon [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 88. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.03.003

[16] 胡建华, 叶梅新, 黄琼. PBL 剪力连接件承载力试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 65

HU Jianhua, YE Meixin, HUANG Qiong. Experiment on bearing capacity of PBL shear connectors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 65. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2006.06.013

[17] 卫星, 肖林, 邵柯夫, 等. 钢-混组合结构 PBL 剪力键疲劳寿命试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 96

WEI Xing, XIAO Lin, SHAO Kefu, et al. Fatigue performance of perfobond shear connectors in steel-concrete composite structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 96. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.06.014

[18] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机制研究(I): 理论模型[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4): 71

ZHANG Qinghua, LI Qiao, BU Yizhi. Load transmission mechanism of PBL shear connector group (I): theoretical model [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 71. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.04.006

[19] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机制研究 II: 极限承载力[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 101

ZHANG Qinghua, LI Qiao, BU Yizhi. Load transmission mechanism of PBL shear connector groups II: load capacity [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 101. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.05.019

[20] 汪维安, 李乔, 赵灿晖, 等. 混合结构 PBL 剪力键群承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 109

WANG Weian, LI Qiao, ZHAO Canhui, et al. Experimental study on bearing capacity of PBL shear connector group in hybrid structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (6): 109. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.06.016

[21] CEB-FIP. Model code 2010, international federation for structural concrete[R]. Switzerland: [s. n.], 2010

[22] CABP. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban and Rural Construction in People's Republic of China, 2015

[23] MOLENSTRA N, JOHNSON R P. Partial shear connection in composite beams for buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1991, 91: 679. DOI: 10.1680/iicep.1991.17485

[24] XUE W C, DING M, WANG H, et al. Static behavior and theoretical model of stud shear connectors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6): 623. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:6(623)

[25] SU Qingtian, YANG Guotao, BRADFORD M A. Static behaviour of multi-row stud shear connectors in high-strength concrete [J]. Steel and Composite Structures, 2014, 17: 967

[26] AN Li, CEDERWALL K. Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 36(1): 15. DOI: 10.1016/0143-974X(94)00036-H

[27] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete [J]. AISC Engineering Journal, 1971, 8(2): 55

(编辑 刘 彤)