

焊钉-橡胶组合连接件抗剪性能试验

徐骁青¹, 刘玉擎¹, 任万敏²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 为了在确保钢与混凝土连接件抗剪承载力不变的情况下达到降低抗剪刚度的目的, 提出了焊钉杆部外套橡胶的组合连接件构造. 以橡胶套设置与否以及橡胶套的高度、厚度为参数进行了 18 个模型试件在单调和反复加载作用下的抗剪推出试验, 结果表明, 外套橡胶的组合连接件相比于普通焊钉连接件其抗剪承载力基本保持不变, 抗剪刚度显著减小; 在反复加载作用下两者具有相同的变形恢复性能; 组合连接件的橡胶套高度宜小于焊钉高度的 3/4、厚度在到达焊钉直径的 1/8 时已经能够起到显著减小抗剪刚度的效果.

关键词: 组合桥梁; 组合连接件; 抗剪性能; 模型试验; 橡胶

中图分类号: U441

文献标志码: A

Experiments on Shear Capacity of Stud-rubber Composite Shear Connector

XU Xiaqing¹, LIU Yuqing¹, REN Wanmin²

(1. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: A new kind of shear connector compositing the ordinary stud and the rubber sleeve was proposed to decrease the shear stiffness of the shear connector without changing its shear strength. Eighteen push-out tests were conducted to investigate the effects of the height and thickness of the rubber sleeve on the behavior of the composite shear connector. The test results show that the stiffness of the composite shear connector is significantly lower than the ordinary stud, while the shear strength change is negligible. Under repeated loading, the composite shear connector shows better deflection recovery in comparison with the ordinary stud. Moreover, it is indicated that the rubber sleeve's height should be less than 3/4 of the height of the stud, while the stiffness of the shear connector can be reduced significantly when the rubber sleeve's thickness is more than 1/8 of the

diameter of the stud.

Key words: composite bridge; composite shear connector; shear capacity; model test; rubber

焊钉连接件的抗剪性能不具有方向性, 施工质量易于保证, 是组合结构桥梁钢与混凝土结合面最常用的连接件形式^[1]. 通常利用焊钉的抗剪强度和刚度来确保钢与混凝土间的完全结合, 充分发挥 2 种材料的组合作用, 为此, 既往的研究主要集中在如何提高焊钉的抗剪承载力和刚度方面^[2-6].

另外, 铁路钢桥面板与混凝土道砟板的结合、公路钢桥钢梁与混凝土桥面板的结合通常不考虑混凝土桥面板与钢梁的共同作用, 两者间的焊钉仅仅起到固定作用, 布置得比较稀疏^[7-9]. 但是, 焊钉具有较大的刚度, 造成焊钉受到的剪力较大, 如何降低局部位置焊钉的剪力值成为设计的难点之一.

本文提出焊钉杆部外套橡胶的组合连接件构造, 其目的是确保钢与混凝土连接件抗剪承载力不变的情况下降低抗剪刚度. 为此, 以橡胶套设置与否以及橡胶套的高度、厚度为变化参数, 通过 18 个模型试件的推出试验, 探讨组合连接件的抗剪性能及其影响因素.

1 焊钉-橡胶组合连接件的提出

关于焊钉连接件的既往研究表明, 焊钉抗剪承载力主要由焊钉受剪截面面积大小决定, 抗剪刚度主要受包裹焊钉根部材料的弹性模量大小影响^[10]. 为此, 如图 1 所示, 提出了焊钉杆部外套橡胶的组合连接件构造, 通过将橡胶套剪开后用铁丝固定在焊钉根部得到焊钉-橡胶组合连接件.

收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2013 318 822 370)

第一作者: 徐骁青(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为组合结构桥梁. E-mail: xq.xu@foxmail.com

通讯作者: 刘玉擎(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为组合结构桥梁. E-mail: yql@tongji.edu.cn

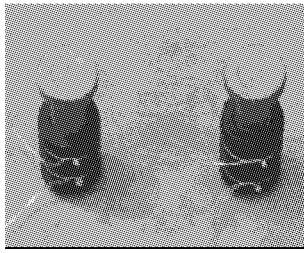


图1 焊钉-橡胶组合连接件

Fig.1 Stud-rubber composite shear connector

橡胶套采用邵氏 A 硬度为 45 的 NR45°天然橡胶,具有弹性模量小、变形能力大、耐久性好等特点,主要参数见表 1.

表1 橡胶材性

Tab.1 Material properties of rubber

邵氏 A 硬度	拉伸强度/ MPa	拉伸率/ %	压缩永久变形/ %	脆性温度/ ℃
45	≥18	≥450	≤30	-40

2 组合连接件模型试验方法

2.1 模型试件分组

模型试件的焊钉高度 $h_s = 100\text{mm}$,焊钉直径

$d_s = 19\text{mm}$ 18个模型试件分组如表 2,每组试件的前 2 个采用单调加载方式,第 3 个采用反复加载方式.

表2 模型试件分组

Tab.2 Grouping of test specimens

试件分组	h_r/mm	t_r/mm	加载方式		
			试件 1	试件 2	试件 3
S1	0	0	单调	单调	反复
SR1	25	5.0	单调	单调	反复
SR2	50	2.5	单调	单调	反复
SR3	50	5.0	单调	单调	反复
SR4	50	7.5	单调	单调	反复
SR5	75	5.0	单调	单调	反复

图 2 为模型试件构造及尺寸,钢结构由 2 块 T 型钢构件通过连接板和高强螺栓拼接而成,焊钉焊接在钢结构翼缘板上.试验用混凝土的 28 d 立方体轴心抗压强度为 44.0 MPa,并正立浇筑制作.

2.2 加载及测试方法

加载及位移计布置如图 3,加载机通过钢构件翼缘板对试件左右两侧施加压力.单调加载采用位移控制;反复加载采用力控制,荷载每次反复后增加 8 kN.在试件的混凝土块底部布置沙垫层以确保试件左右两侧均匀受压.在试件的前后左右焊钉等高处

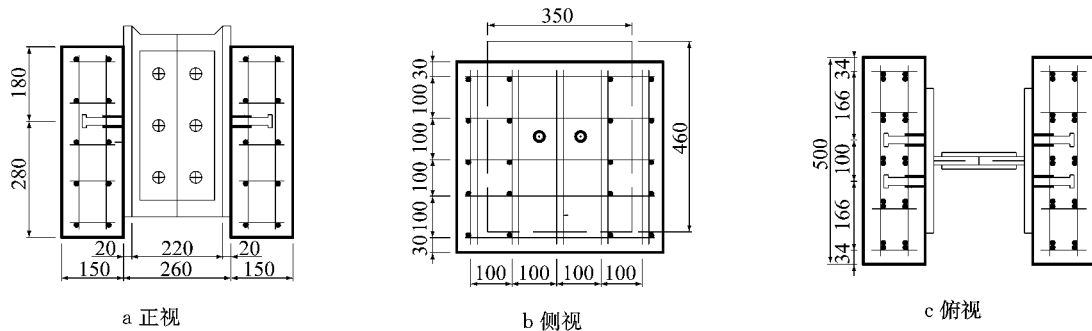


图2 模型试件尺寸(单位:mm)

Fig.2 Details of push-out specimens (unit: mm)

布置 4 个位移计连续采集钢构件与混凝土块间的相对滑移值.同时记录加载机施加的压力,观察试件混凝土块表面有无裂缝及连接件的破坏情况.

3 组合连接件模型试验结果

3.1 模型试验结果

表 3 给出了单个连接件抗剪承载力 V_u 、抗剪承载力对应的相对滑移 s_p 以及抗剪刚度 k_s .其中抗剪刚度为相对滑移 0.2 mm 对应的割线刚度.总体上

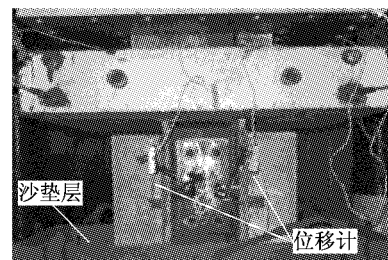


图3 加载及测试装置

Fig.3 Load and test devices

可看出,组合连接件与普通焊钉连接件相比,抗剪承载力基本保持不变,而抗剪刚度可大幅度下降.

表 3 试验结果

Tab.3 Results of test specimens

试件	V_u/kN	s_p/mm	$k_s/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	试件	V_u/kN	s_p/mm	$k_s/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
S1-1	103.6	9.5	120.8	SR3-1	102.8	12.1	47.1
S1-2	113.8	13.6	119.4	SR3-2	104.0	12.4	48.7
S1-3	104.2	11.0	153.0	SR3-3	107.7	15.5	28.2
SR1-1	82.7	11.4	68.4	SR4-1	97.5	14.8	33.5
SR1-2	102.0	13.8	73.6	SR4-2	103.7	15.4	37.0
SR1-3	103.2	14.6	41.0	SR4-3	94.4	13.5	24.6
SR2-1	99.5	13.9	32.4	SR5-1	103.6	15.2	34.1
SR2-2	99.8	13.4	37.5	SR5-2	86.2	12.0	26.5
SR2-3	106.8	14.5	35.6	SR5-3	94.0	16.4	37.8

3.2 组合连接件破坏模式

图 4 所示为模型试件破坏后沿焊钉纵向切割得到的切面图. 焊钉根部下方的混凝土和橡胶发生受压破坏,其余混凝土未发现明显的裂缝;焊钉根部发生剪切断裂破坏,焊钉杆发生弯向剪力方向的变形.

焊钉-橡胶组合连接件弯曲变形均大于焊钉连接件. 对于焊钉连接件,弯曲变形发生在靠近钢板的焊钉杆长度 1/4 范围内,弯曲变形的长度为 20 mm

左右. 对于 $h_r \leq 50 \text{ mm}$ 的试件 SR1 — SR4 组合连接件,焊钉杆弯曲变形发生在橡胶套包裹的部分,橡胶套高度越大,变形的长度越大. 焊钉未被橡胶套包裹的部分与混凝土紧密贴合. 对于 $h_r = 75 \text{ mm}$ 的试件 SR5 组合连接件,焊钉杆的弯曲变形范围小于橡胶套高度,同时,焊钉头部与混凝土发生了脱离. 这说明,橡胶套高度不宜过大,否则会影响焊钉头部与混凝土的握裹效果.

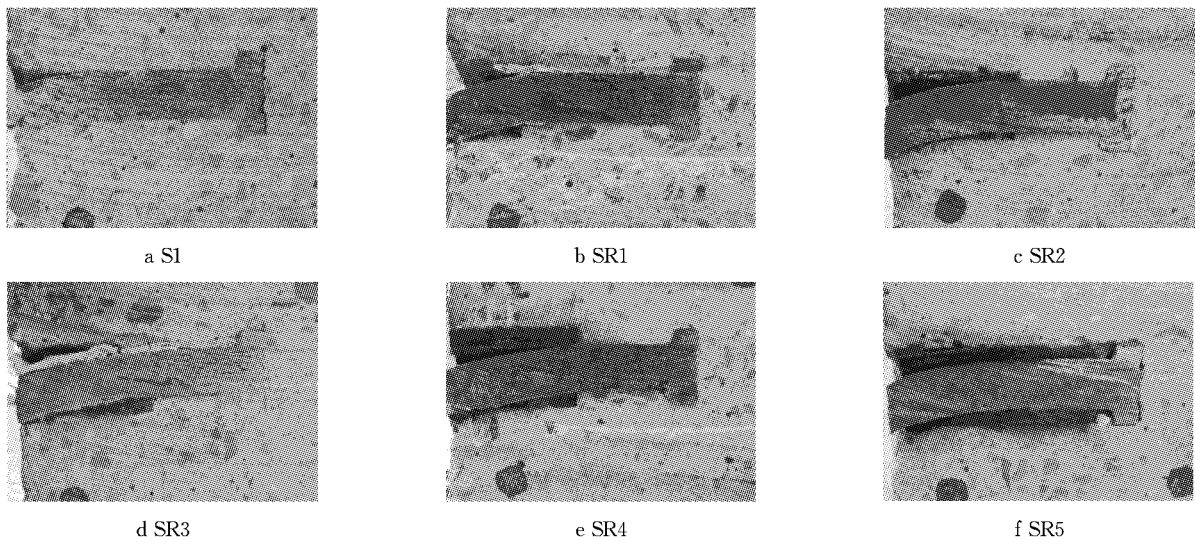


图 4 破坏模式

Fig.4 Failure modes

3.3 剪力-相对滑移曲线

图 5 为模型试件的剪力-相对滑移曲线,其中纵轴为单个连接件作用的剪力,横轴为 4 个位移计相对滑移的平均值. 通过焊钉外包一定高度的橡胶,连接件抗剪刚度得到降低,在反复荷载作用下,具有与普通焊钉连接件相同的变形恢复性能.

可知,组合连接件中 $h_r = 50 \text{ mm}$, $t_r = 5.0 \text{ mm}$ 的试件 SR3 抗剪承载力平均值最大,为焊钉连接件的 97.8%; $h_r = 75 \text{ mm}$, $t_r = 5.0 \text{ mm}$ 的试件 SR5 最小,为焊钉连接件平均值的 88.2%. SR5 试件橡胶套高度较大,焊钉头部与混凝土的握裹效果差是其承载力较低的原因. 为此,建议橡胶套高度不宜大于焊钉高度的 3/4.

由此可知,与焊钉连接件相比,组合连接件抗剪承载力基本保持不变,且不受橡胶套高度、厚度影响. 这是因为焊钉被橡胶套包裹后,受剪截面面积未被削减.

4 橡胶套对抗剪性能的影响

4.1 抗剪承载力

比较组合连接件与焊钉连接件的抗剪承载力值

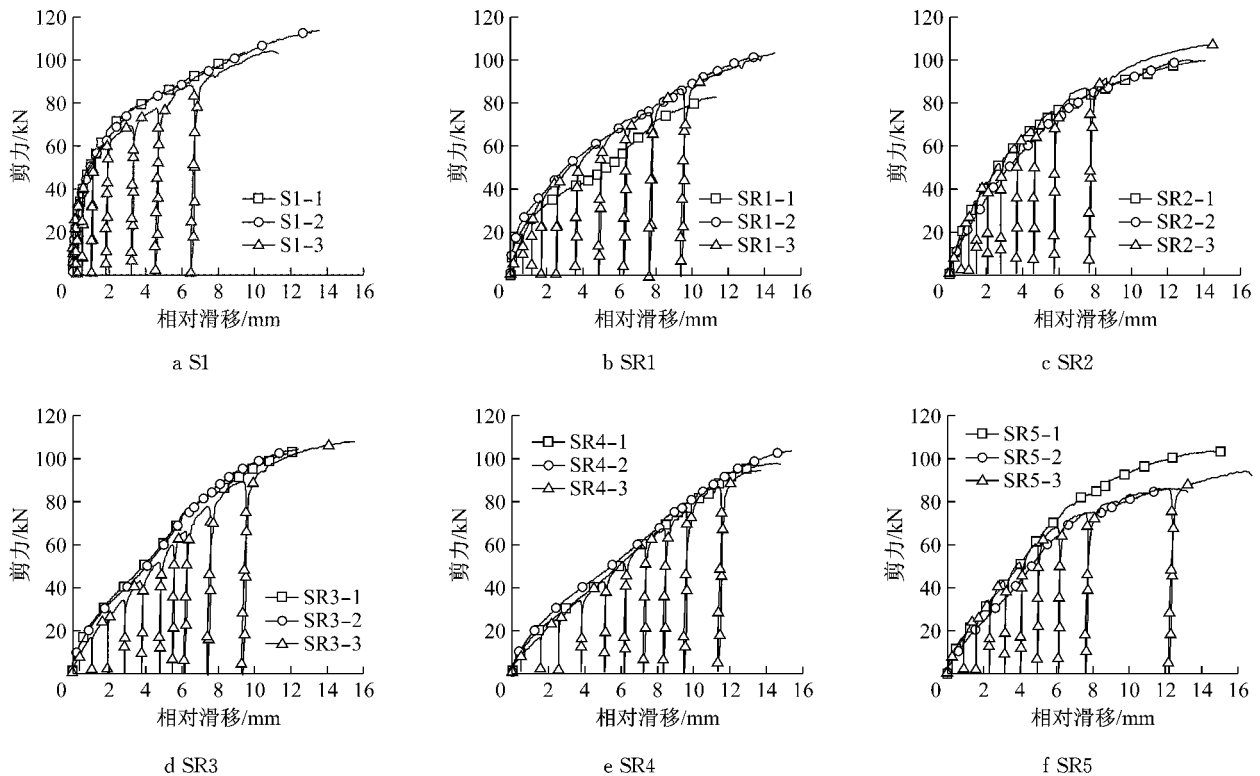


图5 剪力-相对滑移曲线

Fig.5 Load-slip curves

4.2 抗剪刚度

比较橡胶套厚度不同的4组试件 S1, SR2, SR3 和 SR4 的抗剪刚度值可知,组合连接件的抗剪刚度值是焊钉连接件刚度值的 21.7%~30.0%,且不随橡胶套厚度增加而发生明显改变.这说明橡胶套高度一定时,橡胶厚度达到 2.5 mm 已经能够起到显著降低抗剪刚度的效果.

比较橡胶套高度不同的组合连接件 SR1, SR3 和 SR5 的抗剪刚度平均值相对焊钉连接件的降幅比例可知,橡胶套高度从 25 mm 增加至 50 mm 时,抗剪刚度降低 25.3%;从 50 mm 增大至 75 mm 时,抗剪刚度的降低幅度减小为 10.9%.表明组合连接件抗剪刚度随着橡胶套高度增加而降低,且降低幅度逐渐减小.为有效降低焊钉组合连接件的抗剪刚度,橡胶套不宜过长,一方面因为高度小于等于 50 mm 时,抗剪刚度降低幅度较大;另一方面,需要保证焊钉头部有足够的握裹长度.

4.3 变形性能

图6比较了 t_r 为 2.5, 5.0 和 7.5 mm 的组合连接件和焊钉连接件在单调加载下的典型剪力-相对滑移曲线.在加载初期,剪力与相对滑移值大致呈线性关系,说明此时混凝土、橡胶和焊钉处于弹性工作阶段.随着剪力增加,当相对滑移值大于 0.2 mm

后,剪力-相对滑移曲线进入非线性阶段.在相同剪力情况下,橡胶套的厚度越大,对应的曲线斜率越小.由于橡胶是超弹性材料,几乎不会限制焊钉的变形,焊钉下方的混凝土起到支承焊钉的主要作用,承担了主要压力.因此,混凝土逐渐进入塑性是曲线非线性的主要原因.随着剪力值继续增加,更多的混凝土进入塑性,曲线的非线性特性越来越明显.组合连接件的相对滑移值大于连接件的橡胶套厚度后,剪力-相对滑移曲线的斜率趋于一致.说明橡胶套发生受压破坏后,组合连接件的抗剪刚度与橡胶套厚度无关.连接件发生破坏时,组合连接件的相对滑移值均大于焊钉连接件,具有更大的滑移能力.

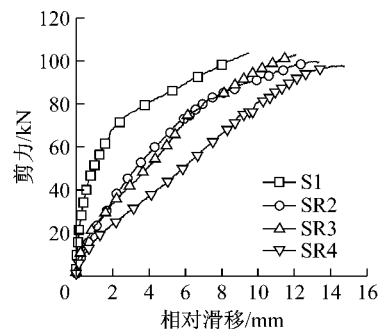


图6 橡胶套厚度对变形性能影响

Fig.6 Load-slip curves of the shear connectors with different rubber sleeve thicknesses

图 7 比较了 h_r 为 25, 50 和 75 mm 的组合连接件和焊钉连接件在单调加载下的典型剪力-相对滑移曲线. 在剪力值较小时, 连接件的橡胶套高度越高, 曲线斜率越小. 由于焊钉杆弯曲变形长度受橡胶套高度影响较大, 说明橡胶套是通过影响焊钉杆发生变形的长度而影响焊钉的初期刚度. 相对滑移值大于连接件的橡胶套高度后, $h_r \leq 50$ mm 的试件 SR1, SR3 组合连接件的曲线斜率趋于一致. $h_r = 75$ mm 的试件 SR5 组合连接件在相对滑移值达到 8 mm 后曲线斜率出现了较大的减小, 这是由焊钉头部与混凝土发生了脱离引起的.

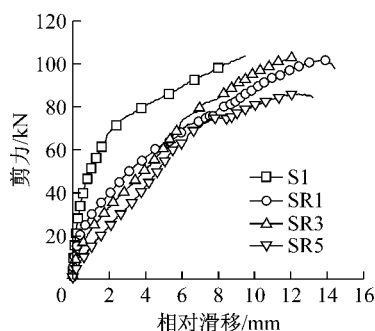


图 7 橡胶套高度对变形性能影响

Fig. 7 Load-slip curves of the shear connectors with different rubber sleeve heights

4.4 变形恢复性

图 8 为反复加载试件的弹性相对滑移与剪力的关系, 其中, 弹性相对滑移是荷载卸载时相对滑移中可恢复的部分. 可知, 在相同的剪力作用下, 组合连接件较焊钉连接件具有更大的弹性相对滑移, 发生的塑性变形较小. 这说明, 焊钉根部的包裹材料由橡胶代替了脆性的混凝土材料后, 组合连接件仍然具有较好的变形恢复性.

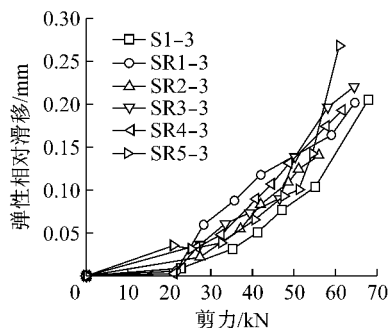


图 8 弹性相对滑移与剪力的关系

Fig. 8 Relationship between elastic slip and load

5 结论

提出了一种焊钉杆部外套橡胶的组合连接件构

造, 通过焊钉直径为 19mm、高度为 100mm 的组合连接件 6 组 18 个模型试件在单调与反复荷载作用下的抗剪推出试验得到以下结论:

(1) 组合连接件的破坏形式仍为焊钉根部的剪切断裂破坏, 与普通焊钉连接件相比抗剪承载力基本保持不变, 且不受橡胶套尺寸影响.

(2) 组合连接件与普通焊钉连接件相比抗剪刚度显著降低, 橡胶套高度越大, 焊钉杆发生弯曲变形的高度越大, 组合连接件的抗剪刚度越小.

(3) 组合连接件相比普通焊钉连接件, 焊钉根部的包裹材料由橡胶代替脆性的混凝土材料后, 仍然具有较好的变形恢复性能.

(4) 为有效降低焊钉组合连接件的抗剪刚度, 橡胶套不宜过高, 宜小于焊钉高度的 3/4; 橡胶套高度一定, 厚度达到焊钉直径的 1/8 时, 已经能够显著减小连接件的抗剪刚度.

参考文献:

- [1] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
LIU Yuqing. Steel-concrete hybrid bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 王倩, 刘玉擎. 焊钉连接件抗剪承载力试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 659.
WANG Qian, LIU Yuqing. Experimental study of shear capacity of stud connector[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(5): 659.
- [3] Xue D Y, Liu Y Q, Yu Z, et al. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74: 1.
- [4] Pallares L, Hajjar J F. Headed steel stud anchors in composite structures, part I: shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(2): 198.
- [5] Hanswille G, Porsch M, Ustundag C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading, part I: experimental study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(4): 475.
- [6] Hanswille G, Porsch M. Fatigue resistance of headed shear studs[J]. Stahlbau, 2009, 78(3): 148.
- [7] 武藤和好, 平城弘一, 松井繁之, 等. 鋼桁橋床版の乾燥収縮応力に対するずれ止め剛性の効果[J]. 構造工学論文集, 2002, 48(A): 1279.
- [8] Machacek J, Cudejko M. Longitudinal shear in composite steel and concrete trusses[J]. Engineering Structures, 2009, 31(6): 1313.
- [9] HOU W Q, YE M X. Design methods of headed studs for composite decks of through steel bridges in high-speed railway [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3): 946.
- [10] 平城弘一, 松井繁之, 武藤和好. 柔な合成作用に適するスタッドの開発[J]. 構造工学論文集, 1998, 44(A): 1485.