

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.020

焊钉连接件时变抗剪性能的试验研究

李运生¹, 侯忠明², 赵志杨¹, 张彦玲¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:对于无支架施工的长跨连续组合梁, 在施工期间进行分阶段浇筑混凝土时, 需考虑不同混凝土龄期的组合梁结合面上连接件的早期组合作用。为此, 进行了混凝土不同龄期下焊钉连接件的推出试验, 分析了焊钉连接件极限抗剪强度、极限滑移、设计抗剪强度和剪切刚度随时间的变化规律, 并给出了相应的时变计算公式。研究发现, 混凝土龄期小于 3 d 时推出试件主要为混凝土板劈裂破坏; 在不同混凝土龄期时推出试件的剪力-滑移规律基本相同, 但抗剪强度和刚度均随混凝土龄期的增长而增大, 且早期增长较快, 后期较慢, 说明组合梁结合面的早期组合效应不能忽略。

关键词:焊钉; 连接件; 推出试验; 时变效应; 组合梁

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)06-0131-06

Experimental Analysis of Time-dependent Shear Behavior on Stud Connectors

Li Yunsheng¹, Hou Zhongmin², Zhao Zhiyang¹, Zhang Yanling¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: With regard to the long span continuous composite beams, the early composite shear stud strength at the joint surface between the steel girder and concrete slab at different concrete ages should be considered while the concrete slabs are casted by phases in construction stage. In this study, the push-out test of stud shear connectors were conducted at different concrete ages. Meanwhile, the change law of the ultimate shear strength, ultimate slip deformation, design shear strength, and shear stiffness of the stud shear connectors with concrete ages were analyzed, and the corresponding time-dependent calculation equations were presented. The results include that the main failure modes of stud shear connectors are the concrete slab splitting failure before 3-days concrete age. The load-slip laws of stud shear connectors at different concrete ages are basically the same, however, the shear strength and stiffness all increase with the concrete ages prolonging, and the increase degree is faster at early ages, but slower at later ages, which indicates that the early composite shear stud strength at the joint surface of composite beams should not be neglected.

Key words: studs; connectors; push-out test; time-dependent effect; composite beams

钢-混凝土组合梁依靠剪力连接件将钢梁与混凝土板结合在一起共同工作, 其整体受力性能受连接件的影响很大。剪力连接件形式很多, 其中圆柱头焊钉由于其力学性能不具有方向性, 且焊接方便, 在组合结构中得到广泛使用。

剪力连接件的抗剪承载力可以通过推出试验来确定。Viest 等人开始使用推出试验对焊钉连接件受力性能进行研究的方法始于 20 世纪 50 年代, 到目前为止, 对一般钢-混凝土组合梁、压型钢板组合梁中焊钉连接件的抗剪承载力^[1-4]、焊钉连接件在组

收稿日期: 2013-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51108281); 河北省高等学校科学技术研究青年基金(2010277)

作者简介: 李运生(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事组合结构、桥梁结构理论及应用研究, (E-mail)liysh70@163.com。

合梁中的间距和布置^[5]、在轴力和剪力共同作用下焊钉连接件的承载力^[6-7]、密集型焊钉群的受力状态^[8-9]、以及焊钉连接件的疲劳性能^[10-11]等都已发表了相关的研究成果,在这些研究的基础上各国规范都给出了相应的焊钉承载力计算公式。但是,上述文献都是在混凝土达到标准养护强度之后,对埋置于其内的焊钉连接件进行研究,而对于无支架浇筑的多跨、长跨、连续组合梁,在施工期间,混凝土板需分阶段、按一定顺序进行浇筑,各阶段之间的间隔浇筑时间根据现场情况从几小时到几天不等,在下一阶段浇筑完成时,上一阶段混凝土的龄期虽未达到标准养护强度,但钢梁与混凝土板结合面上的剪力连接件能够提供一定程度的早期抗剪强度,这对组合梁的内力重分布和整体受力性能会产生一定影响,因此需对焊钉连接件的时变抗剪性能进行研究。关于焊钉连接件时变抗剪性能的研究成果很少。Topkaya^[12]设计了自锚式推出试验装置,将推出试件按混凝土龄期分为 8 组,通过推出试验给出了不同混凝土龄期时连接件的抗剪强度及刚度计算公式,但该试验只包含了焊钉直径为 19 mm、混凝土等级为 S 级^[13]的情况,且试验中试件水平放置,焊钉只焊于钢梁单侧,所给的公式中需要不同龄期混凝土的强度参数,因此需进行不同焊钉直径及混凝土配比下的连接件推出试验,采用不同的试验方法对 Topkaya 试验结果进行验证和补充,并给出更实用的计算公式。笔者在该研究的基础上,采用常规的立式推出试验装置,焊钉直径采用 16 mm,混凝土强度等级采用 C30,将推出试件按混凝土龄期分组,通过推出试验对焊钉连接件的时变抗剪性能进行研究,给出抗剪强度及刚度随时间变化的规律。

1 推出试验设计及加载方案

1.1 试件设计

进行了焊钉连接件的推出试验。试验中按 6 h、12 h、24 h、3 d、7 d、14 d 和 28 d 的混凝土龄期将推出试件分为 7 组,每组 3 个试件,共 21 个试件。如图 1 所示,每个试件两侧的 C30 混凝土板尺寸为 500 mm×460 mm×150 mm,板内钢筋为 $\phi 10$ mm 的 HPB235 钢筋;钢梁采用高 510 mm 的 250×250HW Q235 型钢;焊钉直径 16 mm,高 100 mm,每侧 2 个,共 4 个。

1.2 加载方案

试件在试验室现场浇筑,浇筑前在 HW 型钢的翼缘外侧涂油,浇筑时两侧混凝土板同时浇筑,人工浇水自然养护。对于加载龄期为 6、12、24 h 的试

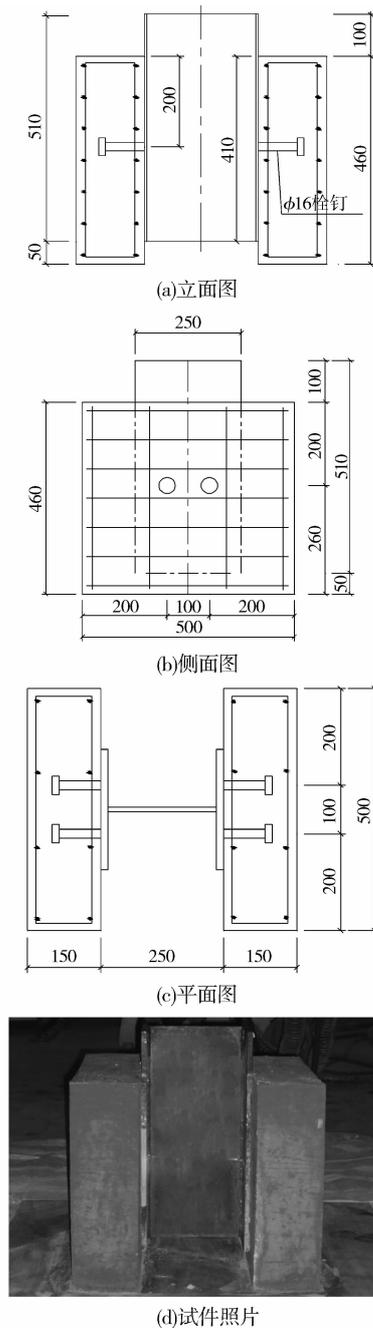


图 1 推出试件尺寸(单位:mm)

件,由于混凝土龄期短、强度低,移动过程中易产生早期损伤,故直接在试验加载位置下方进行浇筑和养护,加载前不再移动。加载时试件置于平整的钢板之上,为了防止加载过程中混凝土板下部向外侧滑移,在混凝土板与钢板接触处的外侧用角铁以及钢杆加以固定,并以 HW 型钢的腹板为对称面,在两侧翼缘焊钉位置分别固定小块角钢,将试验机加载头中心与试件中心严格对中,并在试件顶端与加载头之间垫胶片,使受力均匀,然后设置百分表对钢与混凝土之间的相对滑移进行测试。如图 2 所示。

加载设备使用 1 000 kN 三维多点协调电液伺



图2 推出试验加载装置

服动态加载机。分级加载,每次加载 3 kN,当剪力-滑移曲线开始出现开始进入平滑段时,每次加载 1 kN,直到推出试件破坏。每个推出试件试验过程不超过 30 min,以保证对混凝土龄期的要求。

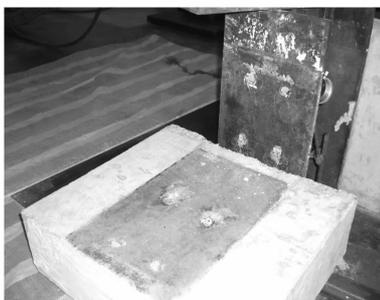
2 试验结果及分析

2.1 破坏现象及剪力-滑移曲线

试验中的每个推出试件都以最终的破坏作为一次试验的结束。与常规的推出试验相同,最终的破坏模式也是主要分为 2 种,即混凝土板的劈裂破坏和焊钉的剪切破坏。推出试件的破坏形式见图 3 所示,其中一组试件的主要试验结果见表 1,表中 Q_u 为单个焊钉所能承受的最大剪力, s_u 为对应的最大滑移值,相应的剪力-滑移曲线如图 4 所示。



(a)混凝土劈裂破坏



(b)焊钉的剪切破坏

图3 推出试件破坏形式

由表 1 和图 4 可以看出:

1)随着混凝土龄期的增加,推出试件所能承受的最大剪力增大,最大滑移值则呈下降趋势;

表1 推出试验主要结果

试件	龄期	Q_u /kN	s_u /mm	破坏形态
1	6 h	10.50	5.876	两侧混凝土板均出现劈裂破坏
2	12 h	20.78	4.927	两侧混凝土板均出现劈裂破坏
3	24 h	41.23	6.895	两侧混凝土板均出现劈裂破坏
4	3 d	54.34	4.225	单侧两个焊钉剪断
5	7 d	59.45	3.549	两侧焊钉均剪断
6	14 d	62.33	3.120	单侧两个焊钉剪断,混凝土板破坏
7	28 d	71.34	3.607	两侧均剪断一个焊钉

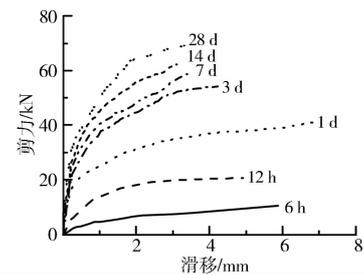


图4 推出试件的剪力-滑移曲线

2)由于混凝土龄期较小时强度较低,故在龄期小于 3 d 时推出试件均表现为混凝土板劈裂破坏,而在 3 d 以后,试验主要表现为焊钉剪切破坏,在一般的焊钉连接件中,若混凝土强度等级较低,3 d 以后也可能表现为混凝土破坏;

3)混凝土在不同龄期时所表现的剪力-滑移规律基本相同,在龄期很小时就呈现出一定的抗剪刚度,在混凝土龄期小于 3 d 时剪力-滑移曲线间隔较大,大于 3 d 后间隔较小,说明焊钉连接件的抗剪强度和刚度在早期增长较快,后期较慢,组合梁结合面的早期组合效应不能忽略。

2.2 焊钉连接件抗剪性能的时变规律

在组合梁的设计和计算中,连接件的极限抗剪强度和极限滑移值、设计抗剪强度和设计容许滑移值、抗剪刚度是连接件抗剪性能的重要指标,分别加以讨论。

2.2.1 焊钉连接件的极限抗剪强度和极限滑移值

一般将连接件推出试验得到的剪力-滑移曲线中的最大剪力作为极限抗剪强度 Q_u ,将最大剪力所对应的滑移量作为极限滑移值 s_u 。由试验数据得到的焊钉连接件极限抗剪强度 Q_u 和极限滑移值 s_u 随混凝土龄期的变化如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可以看出,混凝土龄期为 6 h 时,焊钉连接件的极限强度达到 28 d 龄期的 15%,12 h 时达到 35%,24 h 达到 57%,3 d 达到 75%,7 d 达到 83%,14 d 达到 87%,直到混凝土龄期达到 28 d 时达到最

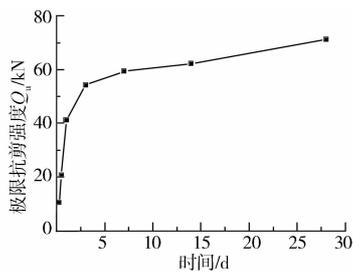


图 5 焊钉连接件极限抗剪强度随混凝土龄期的变化

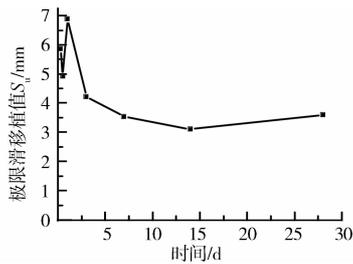


图 6 极限滑移值随混凝土龄期的变化

大值。这说明随着时间的推移,焊钉连接件的抗剪强度是持续增加的,并呈现出早期增长快,后期增长慢的现象。因此在混凝土浇筑的早期,焊钉连接件提供的早期组合作用不能忽略,但也不能直接取用 28 d 龄期后成熟混凝土的极限抗剪强度,而应按时间增长规律进行计算。

由图 6 可以看出,焊钉连接件的极限滑移值随混凝土龄期的变化规律不是很明显,但基本呈现出早期较大,后期较小的趋势。这是由于早期混凝土强度较低,使得破坏时滑移较大,而龄期超过 3 d 后,连接件主要表现为焊钉的剪切破坏,其极限滑移值变化不大。

2.2.2 焊钉连接件的设计抗剪强度 实际运营中的组合梁结构,即使达到极限状态,其结合面滑移也达不到剪力连接件的极限滑移值,因此在设计中需确定一个合理的设计抗剪强度。文献[12]首先将焊钉直径的 1/25 定义为设计容许滑移值 s_d ,然后将焊钉剪力-滑移曲线中对应于设计容许滑移值的剪切力作为设计抗剪强度 Q_d ;文献[13]则直接将设计抗剪强度 Q_d 取为极限抗剪强度 Q_u 的 80%。针对笔者的试验数据,按这 2 种方法得到的焊钉连接件设计抗剪强度 Q_d 随混凝土龄期的变化见图 7 所示。

由图 7 可以看出,焊钉连接件设计抗剪强度随混凝土龄期的变化规律和极限抗剪强度相同。但按照不同的定义方法所得到的结果差别较大。按照文献[12]中 Topkaya 定义的焊钉设计抗剪强度值 Q_d 要比文献[13]中 Wang 定义的结果小得多。按照文

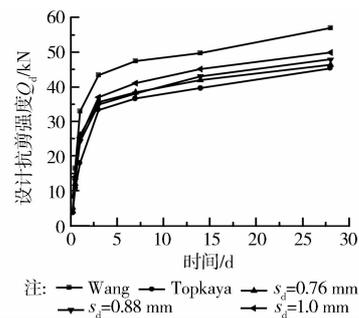


图 7 焊钉连接件设计抗剪强度随混凝土龄期的变化

献[12]的定义方法,连接件的设计容许滑移值 s_d 为焊钉直径的 1/25,试验焊钉直径为 16 mm,故 $s_d = 0.64$ mm。对于工程中常用的 19、22 和 25 mm 直径焊钉, s_d 分别为 0.76、0.88 和 1.00 mm,将这些 s_d 值所对应的剪切力也绘于图 7 中。可以看出,当 s_d 取值在 0.64~1.0 mm 时,所对应的设计抗剪强度差别不大,由于连接件抗剪强度除受焊钉直径影响之外,还受混凝土强度等其它因素影响,故为简便起见,定义 0.8 mm 为设计容许滑移值,将其在推出试件的剪力-滑移曲线上对应的剪切力定义为设计抗剪强度 Q_d 。

2.2.3 焊钉连接件的剪切刚度 在组合梁的设计和计算中,焊钉抗剪刚度都是重要的指标,但其取值方法目前尚无统一的定义。文献[12]中 Topkaya 定义焊钉的抗剪刚度 k_s 为设计抗剪强度处的割线刚度 Q_d/s_d ;文献[13]中 Wang 将焊钉抗剪刚度 k_s 保守地估计为 0.8 mm 滑移值位置对应的割线刚度;文献[14]中刘玉擎则将滑移曲线上通过最大抗剪承载力 1/3 大小处的割线倾斜度设为抗剪刚度 k_s 。图 8 对上述 3 种不同定义下焊钉抗剪刚度值随混凝土龄期的变化进行了比较。

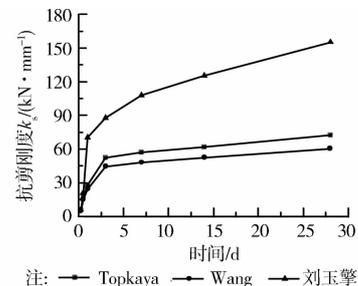


图 8 焊钉连接件抗剪刚度随混凝土龄期的变化

由图 8 可以看出,虽然均以割线刚度来定义焊钉连接件的剪切刚度,但由于对应的荷载不同,3 个文献中所给出的结果有较大差异,割线顶点荷载最小的文献[14]给出的抗剪刚度最大,荷载最大的文献[13]抗剪刚度最小,但三者所表现的抗剪刚度随

龄期的变化规律相同,均明显表现出初期增长快,后期增长慢的趋势,在混凝土龄期达到3 d前,剪切刚度即可达到28 d龄期时的60%~70%以上,说明焊钉在混凝土浇筑早期已在组合梁结合面上提供了较大的抗剪刚度。为了与本文在2.2.2节中定义的设计容许滑移值统一,取用文献[13]中Wang定义的0.8 mm滑移值位置对应的割线刚度作为焊钉连接件的抗剪刚度。

2.3 焊钉连接件抗剪强度及刚度的时变计算公式

2.3.1 焊钉连接件的极限抗剪强度 以28 d龄期的3个焊钉连接件极限抗剪强度的平均值为标准,得到试验数据和文献[12]中Topkaya试验数据的极限抗剪强度无量纲数据,并采用最小二乘法对试验数据进行拟合,得到的拟合曲线如图9所示,该拟合曲线的相关系数 $R^2 = 0.92$ 。焊钉连接件极限抗剪强度的时变计算公式见式(1)。

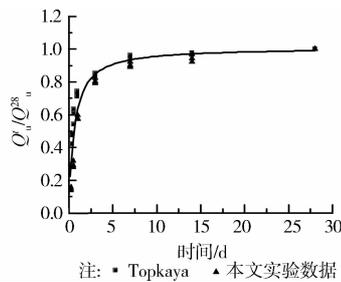


图9 焊钉连接件极限抗剪强度拟合曲线

$$Q_u = 1.01Q_u^{28} e^{-\frac{0.56}{t+0.21}} \quad (1)$$

式中: Q_u 为混凝土任意龄期时焊钉连接件的极限抗剪强度; Q_u^{28} 为混凝土28 d龄期时焊钉连接件的极限抗剪强度; t 为混凝土龄期,按天计算。

当有推出试验的实测资料时, Q_u^{28} 可采用28 d龄期推出试件极限抗剪强度的平均值,但在进行一般的组合梁计算时,往往没有实测资料,此时可根据《钢结构设计规范》^[15]条文说明中的第11.3.1条式(76)计算其理论值。

2.3.2 焊钉连接件的设计抗剪强度 根据笔者对焊钉连接件设计抗剪强度的定义方法,以28 d龄期的设计抗剪强度 Q_d^{28} 平均值为依据,采用最小二乘法对试验数据和文献[12]中Topkaya的试验数据的无量纲参数进行拟合,得到的拟合曲线如图10所示,该拟合曲线的相关系数 $R^2 = 0.92$ 。焊钉连接件设计抗剪强度的时变计算公式见式(2)。

$$Q_d = 1.026Q_d^{28} e^{-\frac{0.95}{t+0.41}} \quad (2)$$

式中: Q_d 为混凝土任意龄期时焊钉连接件的设计抗剪强度; Q_d^{28} 为混凝土28 d龄期时焊钉连接件的设

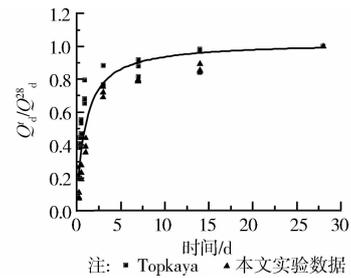


图10 焊钉连接件设计抗剪强度拟合曲线

计抗剪强度,无实测资料时,可按《钢结构设计规范》^[15]第11.3.1条中式(11.3.1-1)计算其理论值。

2.3.3 焊钉连接件的剪切刚度 根据笔者对焊钉连接件抗剪刚度的定义方法,以28 d龄期的推出试验结果为依据,采用最小二乘法对试验数据和文献[12]中Topkaya的试验数据进行拟合,得到的拟合曲线如图11所示,该拟合曲线的相关系数 $R^2 = 0.91$ 。焊钉连接件抗剪刚度的时变计算公式见式(3)。

$$k_s' = 1.03k_s^{28} e^{-\frac{1.03}{t+0.47}} \quad (3)$$

式中: k_s' 为混凝土任意龄期时的焊钉连接件抗剪刚度; k_s^{28} 为混凝土28 d龄期时的焊钉连接件抗剪刚度, $k_s^{28} = \frac{Q_d^{28}}{0.8}$ 。

3 结论

1)随着混凝土龄期的增加,推出试件所能承受的最大剪力增大,最大滑移值下降;龄期小于3 d时推出试件主要为混凝土板劈裂破坏。

2)定义0.8 mm为焊钉连接件的容许滑移值,其在剪力-滑移曲线上对应的荷载为设计抗剪强度 Q_d , $Q_d/0.8$ 为焊钉连接件的剪切刚度。

3)焊钉连接件在不同龄期时所表现的剪力-滑移规律基本相同,但抗剪强度和刚度在早期增长较快,后期较慢,说明组合梁结合面的早期组合效应不能忽略。

4)根据笔者提出的连接件抗剪强度及刚度时变公式,可直接通过规范中给定的28 d龄期的成熟混凝土与焊钉的剪力连接件抗剪强度计算公式,或28 d龄期的焊钉连接件试验结果,对混凝土任意龄期时焊钉连接件的抗剪强度和刚度进行计算。

参考文献:

- [1] Pallarés L, Hajjar J F. Headed steel stud anchors in composite structures, Part I: Shear [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(2):198-212.
- [2] Smith A L, Couchman G H. Strength and ductility of

- headed stud shear connectors in profiled steel sheeting [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(6): 748-754.
- [3] 聂建国, 谭英, 王洪全. 钢-高强混凝土组合梁焊钉剪力连接件的设计计算[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1999, 39(12): 94-97
- Nie J G, Tan Y, Wang H Q. Strength of stud shear connectors in composite steel HC beams [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1999, 39(12): 94-97
- [4] Shen M H, Chung K F. An investigation into shear resistances of headed shear studs in solid concrete slabs with local aggregates in Hong Kong [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 1098-1105.
- [4] Qureshi J, Lam D, Ye J. Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4): 706-719.
- [6] Mirza O, Uy B. Effects of the combination of axial and shear loading on the behavior of headed stud steel anchors [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(1): 93-105.
- [7] Pallarés L, Hajjar J F. Headed steel stud anchors in composite structures, part 2: tension and interaction [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(2): 213-228.
- [8] Xu C, Sugiura K, Wu C, et al. Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 72: 84-96.
- [9] 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: 1-7.
- [10] Gsttesco N, Giuriani E. Experiment study on stud shear connectors subjected to cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1996, 38(1): 1-21.
- [11] 宗周红, 车惠民. 剪力连接件静载和疲劳试验研究[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 1999, 27(6): 61-66.
- Zong Z H, Che H M. Experimental study of shear connector under static and fatigue loading [J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Sciences Edition*, 1999, 27(6): 61-66.
- [12] Topkaya C, Yura J A, Williamson E B. Composite shear stud strength at early concrete ages [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(6): 952-960.
- [13] Wang Y C. Deflection of steel-concrete composite beams with partial shear interaction [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(10): 1159-1165.
- [14] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 24-28.
- [15] GB 500017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

(编辑 胡英奎)