

# 焊钉连接件峰值滑移及剪力-滑移本构关系

蔺钊飞, 刘玉擎

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为了得到组合结构桥梁常用的焊钉连接件剪力-滑移本构关系, 进行了 35 个焊钉连接件抗剪性能模型试验. 比较分析了焊钉直径、高度、极限抗拉强度和混凝土抗压强度对焊钉峰值滑移的影响, 提出了焊钉峰值滑移计算式及考虑其影响的剪力-滑移本构关系式. 研究结果表明, 峰值滑移随焊钉直径、高度和极限抗拉强度的增加而增大, 随混凝土抗压强度的增加而减小; 提出的峰值滑移计算式与 *fédération internationale du béton(fib)* 所建议公式相比, 考虑因素更全面, 与试验结果吻合更好. 包含峰值滑移的剪力-滑移本构关系式, 能够反映焊钉直径、高度、强度和混凝土抗压强度的影响, 可用于考虑焊钉非线性作用的组合结构桥梁计算分析.

**关键词:** 组合结构桥梁; 焊钉连接件; 模型试验; 峰值滑移; 本构关系

中图分类号: U441

文献标志码: A

## Peak Slip and Load-Slip Relationship of Headed Stud Connectors

LIN Zhao-fei, LIU Yu-qing

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to derive the load-slip constitutive expression of headed stud connectors used widely in composite bridges, thirty-five push-out specimens were prepared and tested. Based on the tests results, the influences of stud diameter, stud height, stud ultimate tensile strength and compressive strength of concrete on the peak slip were investigated, and the expression for calculating the peak slip and the load-slip constitutive expression with a consideration of the effect of peak slip were proposed. The results indicate that the peak slip increases with the increasing of stud diameter, but stud height and ultimate tensile strength decreases with the increasing of compressive strength of concrete. The proposed expression of peak slip considers more influence factors and fits better with the test results in

comparison with the expression specified by the CEB-FIP. The load-slip constitutive expression by taking into consideration the effect of peak slip is able to reflect the influence of stud diameter, stud height, stud ultimate tensile strength and compressive strength and be employed to conduct the non-linear numerical and analytical study of composite bridges.

**Key words:** composite bridge; headed stud connector; model test; peak slip; constitutive relationship

焊钉连接件具有抗剪性能不依赖方向、延性好、施工质量易于保证等优点, 在钢-混凝土组合结构桥梁中得到了较多应用<sup>[1]</sup>. 焊钉连接件主要传递结合面的剪力, 其在剪力作用下的变形, 对结构的刚度和受力将产生较大的影响. 此外, 焊钉连接件的非线性变形将造成结合面焊钉剪力重分布, 进而造成结构内力的重分布. 因此, 在采用弹簧模拟焊钉进行组合结构桥梁非线性分析时, 需要给出结合面焊钉的剪力-滑移本构关系式.

在国内外学者提出的剪力-滑移本构关系式中, Buttry<sup>[2]</sup> 的分数形式和 Ollgaard<sup>[3]</sup> 的指数形式得到较多应用. 然而, 对于桥梁结构, 他们提出的剪力-滑移本构关系式所依据的推出试验的焊钉直径、高度和强度较小, 混凝土强度较低. 之后, An<sup>[4]</sup>, Lorenc<sup>[5]</sup> 和 Xue<sup>[6]</sup> 等, 依据试验数据进行剪力-滑移本构关系式拟合, 基本在保持分数或指数形式不变情况下, 对系数进行调整, 但所依据的数据和考虑的影响因素较少. 此外, 这两种形式的剪力-滑移本构关系式表明, 在相同施力比下, 不同参数的推出试验对应的滑移量是相同的, 忽略了不同参数对滑移量的影响; 当施力比等于 1, 即剪力达到最大值时, 对应滑移量趋于无穷大, 不存在与试验结果相符的峰值点.

本研究进行了 35 个焊钉连接件抗剪性能推出

收稿日期: 2013-06-12

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(2013 318 822 370)

第一作者: 蔺钊飞(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为组合结构桥梁. E-mail: linzhaoifei2012@gmail.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

模型试验,分析了焊钉直径  $d_s$ 、高度  $h_s$ 、极限抗拉强度  $f_{su}$  和混凝土轴心抗压强度  $f_{ck}$  等对焊钉连接件峰值滑移的影响;并基于国内外共 48 个试验结果,提出了考虑主要影响因素的峰值滑移计算式和物理意义更明确、适用范围更广的焊钉连接件剪力-滑移本构关系式。

## 1 焊钉连接件抗剪模型试验

表 1 为焊钉连接件模型试件分组。模型试件构造如图 1 所示,每个钢翼缘焊接两个焊钉,钢结构部分由两块焊接 T 形钢板通过连接板和高强螺栓拼接而成,钢结构翼缘板上焊接焊钉连接件,在与混凝土接触的钢翼缘板上涂抹润滑油以减小钢与混凝土间的摩擦和黏阻力,将焊钉正立浇筑混凝土。混凝土轴心抗压强度  $f_{ck}$  为 32.7~44.7 MPa,焊钉直径  $d_s$  为 19,22 和 25 mm,高度  $h_s$  为 100,200,300 和 400 mm,强度  $f_{su}$  为 445.0~675.0 MPa。其中,混凝土轴心抗压强度由测得的立方体抗压强度依据《公路钢

表 1 焊钉连接件试件分组

Tab.1 Grouping of test specimens of stud connectors

试件 分组	试件 个数	$d_s/\text{mm}$	$h_s/\text{mm}$	$f_{su}/\text{MPa}$	$f_{ck}/\text{MPa}$
SS-1	3	22	100	519.0	40.6
SS-2	3	22	200	519.0	40.6
SS-3	3	22	300	519.0	40.6
SS-4	3	22	400	519.0	40.6
SS-5	3	22	200	465.0	44.7
SS-6	3	22	200	675.0	44.7
SS-7	3	25	200	485.0	44.7
SS-8	3	22	100	445.0	35.2
SS-9	3	19	100	445.0	35.2
SS-10	2	22	200	475.0	35.9
SS-11	3	22	200	515.0	32.7
SS-12	3	25	200	515.0	36.3

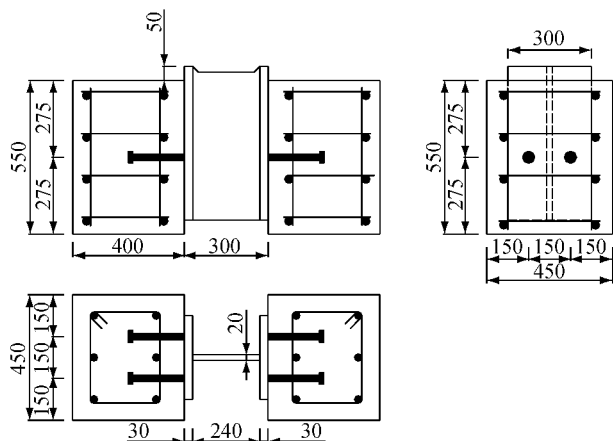


图 1 模型试件(单位:mm)

Fig.1 Details of test specimens (unit:mm)

筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[7]</sup> 转换得到。

采用千斤顶对试件两侧对称施加推压力,在钢梁顶面设置厚钢板并在混凝土块底部布置沙垫层以确保结构两侧施力和受力的均匀。在试件的前后两侧焊钉等高处,布置 4 个位移计测试相对滑移,最终相对滑移值取其平均值。

## 2 试验结果及峰值滑移影响因素分析

表 2 所示为焊钉连接件抗剪承载力和峰值滑移试验结果,所有模型试件破坏形态均为焊钉连接件根部的剪断。在影响因素分析中,  $s_{p,min}$ ,  $s_{p,mid}$  和  $s_{p,max}$  分别为每组 3 个试件峰值滑移的最小值、中间值和最大值。

表 2 试验结果

Tab.2 Test results

试件 分组	试件 1		试件 2		试件 3	
	$V_u/\text{kN}$	$s_p/\text{mm}$	$V_u/\text{kN}$	$s_p/\text{mm}$	$V_u/\text{kN}$	$s_p/\text{mm}$
SS-1	186.7	4.40	196.9	6.55	192.9	3.36
SS-2	196.6	7.50	190.2	8.52	205.6	6.91
SS-3	176.3	6.67	188.8	8.20	225.8	8.70
SS-4	175.7	6.70	213.8	9.10	199.3	8.40
SS-5	152.6	3.85	233.9	3.68	238.8	4.45
SS-6	266.2	3.53	286.5	5.68	265.3	5.41
SS-7	253.7	7.01	266.8	6.70	285.2	5.26
SS-8	153.5	4.66	173.6	4.68	197.6	5.40
SS-9	124.8	2.03	125.8	1.82	134.8	3.10
SS-10	204.8	5.70	208.8	5.42		
SS-11	180.7	8.20	200.1	10.66	187.5	7.60
SS-12	240.4	6.22	241.1	6.50	219.3	7.60

注:  $V_u$  为单个焊钉的抗剪承载力。

图 2 所示为试件 SS-1~SS-4 在焊钉直径、强度和混凝土抗压强度相同,焊钉高度为 100~400 mm 时对峰值滑移的影响。当焊钉高度位于 100~200 mm 时,峰值滑移随着焊钉高度增加而增大,当焊钉高度位于 200~400 mm 时,峰值滑移变化较小。相对于高度 100 mm,高度为 200,300 和 400 mm 时,峰

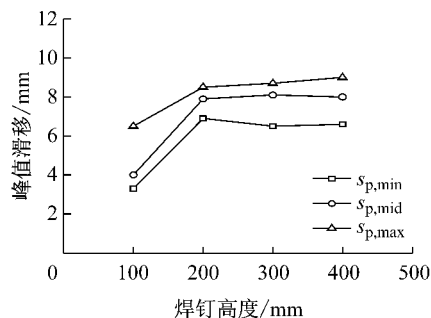


图 2 焊钉高度的影响

Fig.2 Effect of stud heights on peak slip

值滑移分别增大 69%, 69% 和 70%。

图 3 所示为试件 SS-5 和 SS-7 及 SS-8 和 SS-9 在焊钉高度、强度和混凝土强度基本不变, 焊钉直径变化对峰值滑移的影响。结果表明, 峰值滑移随着焊钉直径的增加而增大。相对于直径 19 mm(SS-9), 直径为 22 mm(SS-8) 时, 峰值滑移平均增大 115%; 相对于直径 22 mm(SS-5), 直径为 25 mm(SS-7) 时, 峰值滑移平均增大 66%。

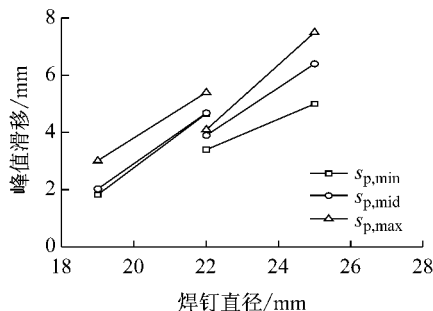


图 3 焊钉直径的影响

Fig.3 Effect of stud diameters on peak slip

图 4 所示为试件 SS-5 和 SS-6 在焊钉高度、直径和混凝土强度基本不变, 焊钉强度变化对峰值滑移的影响。结果表明, 峰值滑移随着焊钉极限抗拉强度的增加而增大。相对于强度 465 MPa, 强度为 675 MPa 时, 峰值滑移平均增大 26%。

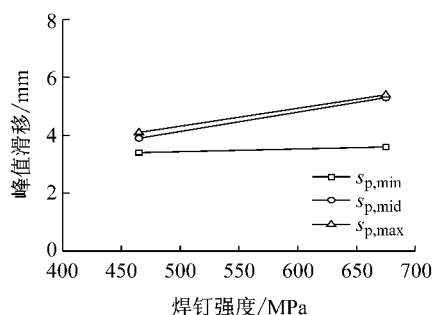


图 4 焊钉极限抗拉强度的影响

Fig.4 Effect of ultimate tensile strengthes of stud on peak slip

图 5 所示为试件 SS-2, SS-11, SS-5 和 SS-10 在焊钉直径、高度和极限强度基本不变, 混凝土抗压强度分别为 32.7~40.6 MPa 和 35.9~44.7 MPa 时对峰值滑移的影响。结果表明, 峰值滑移随着混凝土强度的增加而减小, 且随着强度的增加, 变化率逐渐减小。相对于抗压强度 32.7 MPa(SS-11), 抗压强度为 40.6 MPa(SS-2) 时, 峰值滑移平均减少约 9%; 相对于抗压强度 35.9 MPa(SS-10), 抗压强度为 44.7 MPa(SS-5) 时, 峰值滑移平均减少约 6%。

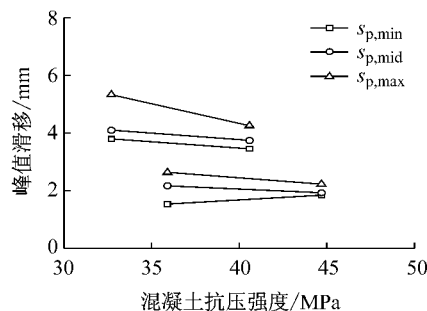


图 5 混凝土抗压强度的影响

Fig.5 Effect of compressive strengthes of concrete on peak slip

### 3 焊钉连接件峰值滑移计算方法

国内外关于峰值滑移的研究较少, 试验结果离散度较大, 有效数据十分缺乏。fib<sup>[8]</sup> 建议峰值滑移计算式为

$$s_p = (0.389 - 0.0023f_c)d_s \quad (1)$$

式中:  $s_p$  为峰值滑移, mm;  $f_c$  为圆柱体抗压强度, MPa,  $d_s$  为焊钉直径, mm。

分析试验结果可知, 焊钉直径、高度和极限抗拉强度以及混凝土抗压强度是影响焊钉连接件峰值滑移的主要因素。基于国内外学者共计 48 个试验数据<sup>[4,6,9-10]</sup>, 以峰值滑移的主要影响因素为自变量, 拟合得到焊钉连接件峰值滑移计算式为

$$s_p = 0.0036d_s h_s^{1/2} (f_{su}/f_{ck})^{2/3} \quad (2)$$

其中, 拟合所用的统计数据均为试件剪切方向布置一排焊钉的结果。焊钉直径为 13~25 mm, 焊钉高度与直径比值为 4~9, 当比值大于 9 时, 取焊钉高度为 9 倍焊钉直径计算, 焊钉极限强度为 436~675 MPa。混凝土轴心抗压强度为 21.1~44.7 MPa。按照现行标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》<sup>[11]</sup> 要求, 焊钉材料极限强度应大于 400 MPa, 当缺乏焊钉极限强度数据时, 可取 400 MPa 计算。

图 6 和图 7 分别为式(1)和式(2)的计算值与试验值的比较。其中式(1)计算值与试验值比值的均值为 1.14, 方差为 0.19; 式(2)计算值与试验值比值的均值为 1.00, 方差为 0.10; 式(2)计算值与试验数据具有更高的吻合度。

### 4 焊钉连接件剪力-滑移本构关系

#### 4.1 剪力-滑移本构关系式的提出

在以往的焊钉连接件剪力-滑移本构关系中,

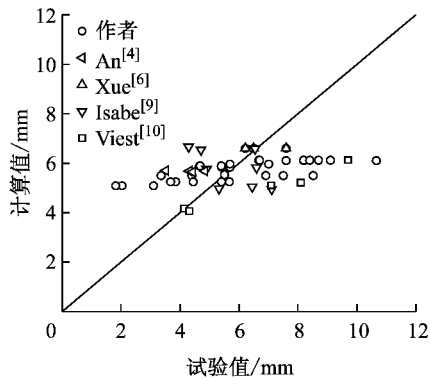


图6 峰值滑移式(1)计算值和试验值比较  
Fig.6 Comparison of peak slip predicted by Expression (1) and test results

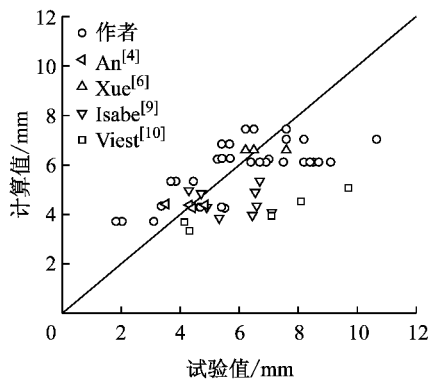


图7 峰值滑移式(2)计算值和试验值比较  
Fig.7 Comparison of peak slip predicted by Expression (2) and test results

Buttry<sup>[2]</sup>的分数形式和 Ollgaard<sup>[3]</sup>的指数形式具有较高的认可度,分别如式(3),(4)所示,其中,已将原式中的单位换算为毫米。

$$V/V_u = 3.15s/(1 + 3.15s) \quad (3)$$

$$V/V_u = (1 - e^{-0.71s})^{0.4} \quad (4)$$

式中:  $V$  为所施加剪力, kN;  $s$  为相对滑移值, mm。

式(3)和式(4)将施力比  $V/V_u$  看做滑移量  $s$  的函数,使得量纲不统一,且忽略了不同参数对滑移量的影响,不能充分反映实际剪力-滑移曲线的特征。

fib<sup>[8]</sup>建议了含一个待定参数  $\gamma$  的幂函数形式的量纲一的剪力-滑移本构关系式。

$$V/V_u = (s/s_p)^\gamma \quad (5)$$

基于本文试验数据,得到最佳拟合的  $\gamma$  值为 0.24。如图 8 所示,式(5)计算结果与试验结果吻合度相对较低。

为此,分别采用极限剪力  $V_u$  和峰值滑移  $s_p$  将剪力和滑移量纲一化,使得不同参数下的试验结果具有可比性。选用幂函数形式,采用最小二乘拟合得到量纲一化的剪力-滑移本构关系式为

$$V/V_u = 1.5(s/s_p)^{1/3} - 0.5(s/s_p) \quad (6)$$

如图 8 所示,相比式(5),式(6)计算结果与试验数据具有更高的吻合度。在得到量纲一化的剪力-滑移本构关系式后,结合峰值滑移计算式(2)和文献[1]提出的抗剪承载能力  $V_u$  计算式,即可得到焊钉连接件的剪力-滑移本构关系。

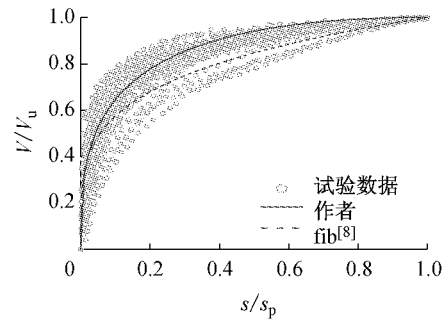


图8 剪力-滑移本构关系式比较  
Fig.8 Comparison of different expressions of load-slip relationship

本文提出的剪力-滑移本构关系式,物理意义更为明确:①在加载初始点的切线模量无穷大,与试验结果相符合,这是由于结合面存在一定的黏结力和摩擦力<sup>[3]</sup>;②存在与试验结果相一致的峰值点,即峰值滑移对应最大剪力;③考虑了焊钉直径、高度、强度和混凝土抗压强度对滑移的影响。

#### 4.2 剪力-滑移本构关系式的比较分析

分别选取试件 SS-9 ( $d_s = 19$  mm,  $f_{ck} = 35.2$  MPa), SS-1 ( $d_s = 22$  mm,  $f_{ck} = 40.6$  MPa) 和 SS-7 ( $d_s = 25$  mm,  $f_{ck} = 44.7$  MPa) 3 条试验曲线比较在不同焊钉直径和混凝土抗压强度下,剪力-滑移本构关系式与试验曲线的吻合度。如图 9~11 所示,相对于式(3)和式(4),在不同焊钉直径和混凝土抗压强度下,式(6)始终与试验曲线具有较高的吻合度。

分析表明,由于式(3)和式(4)均不存在与试验曲线相对应的峰值点,而是通过滑移的增加,使得剪力不断逼近极限剪力,这就使得当试验峰值滑移较小时,两式均不能很好地与试验曲线吻合。式(3)和式(4)只有当试验峰值滑移分别为 6.0 mm 和 3.0 mm 时,极限剪力才能达到试验值的 95%;当试验峰值滑移分别为 32.0 mm 和 5.3 mm 时,极限剪力才能达到试验值的 99%。因此,式(3)几乎总是低估剪力值,而式(4)只有试验峰值滑移在一定范围内时才能与试验具有较高的吻合度。本文提出的剪力-滑移本构关系式(6)在不同参数情况下,只要峰值滑移  $s_p$  计算误差不大,始终保持与试验结果具有较高的吻合度。

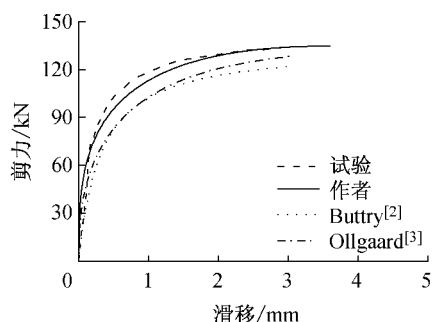


图 9 直径 19 mm 焊钉本构关系比较

Fig. 9 Comparison of different expressions of load-slip relationship with 19 mm studs

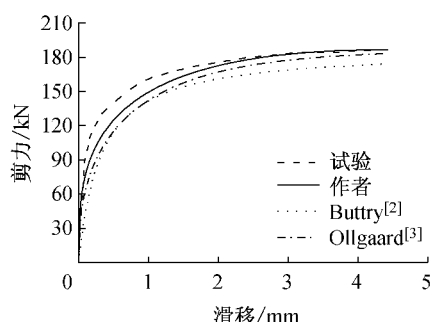


图 10 直径 22 mm 焊钉本构关系比较

Fig. 10 Comparison of different expressions of load-slip relationship with 22 mm studs

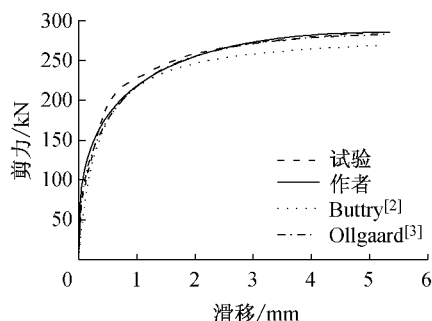


图 11 直径 25 mm 焊钉本构关系比较

Fig. 11 Comparison of different expressions of load-slip relationship with 25 mm studs

## 5 结论

(1) 通过焊钉连接件抗剪性能模型推出试验可知,焊钉连接件峰值滑移随焊钉直径和极限强度的增加而增大,随混凝土抗压强度的增加而减小。当焊钉高度与直径比值小于 9 时,峰值滑移随高度增加而增大,当比值大于 9 时,则变化较小。

(2) 基于国内外共 48 个峰值滑移试验数据,考虑焊钉直径、高度、极限强度和混凝土抗压强度的影响,提出焊钉连接件峰值滑移计算式,与 fib 建议公

式相比较,考虑影响因素全面,与试验结果具有更高的吻合度。

(3) 提出了包含峰值滑移的焊钉连接件剪力-滑移本构关系式,该式能够反映焊钉直径、高度、强度和混凝土抗压强度等因素的影响。

(4) 所提出的焊钉连接件剪力-滑移本构关系式,量纲统一,可用于考虑焊钉非线性作用的组合结构桥梁计算分析。

## 参考文献:

- [1] 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 connectors [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(5): 659.
- [2] Buttry K E. Behavior of stud shear connectors in lightweight and normal-weight concrete [R]. Kansas: Missouri State Highway Department and University of Missouri-Columbia, 1965.
- [3] 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.
- [4] An L, Cederwall K. Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 36(1):15.
- [5] Lorenc W, Kubica E. Behavior of composite beams prestressed with external tendons; experimental study [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006, 62(12): 1353.
- [6] 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] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京:人民交通出版社, 2004.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [8] Fédération Internationale du Béton. First complete draft—volume 1 [S]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [9] Valente B I, Cruz J S P. Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10): 1953.
- [10] Viest I M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel t-beams[J]. ACI Journal, 1956, 52(4):1633.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 10433—2002 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉 [S]. 北京:中国标准出版社, 2003.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 10433—2002 Cheese head studs for arc stud welding [S]. Beijing: China Standards Press, 2003.