

焊钉连接件抗剪承载力试验研究

王倩, 刘玉擎

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为建立组合桥梁使用的大尺度焊钉连接件抗剪承载力设计计算方法, 通过 26 组 71 个焊钉连接件模型推出试验比较分析了混凝土抗压强度及焊钉的抗拉强度、直径、长度等对焊钉连接件抗剪承载力的影响; 基于国内外 255 个模型推出试验结果提出了双折线型焊钉连接件抗剪承载力计算式。研究表明, 焊钉连接件抗剪承载力在混凝土强度较高时仍取决于焊钉杆部与混凝土的组合作用; 提出的设计计算式在常用的混凝土强度等级 C35~C60 范围内能够更合理地偏于安全的计算焊钉连接件抗剪承载力; 可适用于使用混凝土强度等级 C15~C80、焊钉长径比大于 4 且直径 9~30 mm、长度 50~400 mm 的组合桥梁结构焊钉连接件的设计。

关键词: 组合桥梁; 焊钉连接件; 抗剪承载力; 计算方法; 模型试验

中图分类号: U441

文献标志码: A

Experimental Study of Shear Capacity of Stud Connector

WANG Qian, LIU Yuying

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

Abstract: A great number of model tests were carried out to build up a method for calculating the shear capacity of large-diameter stud connector used in high strength concrete for bridge structures. A comparative study was made of 26 groups consisting of 71 stud connector models to explore the influence of different parameters such as the concrete compressive strength, the stud diameter, the stud tensile strength and the stud length on the shear capacity of stud connectors. Formulas to calculate the shear capacity of stud connector were proposed based on the worldwide 255 test results. The results show that the shear capacity of stud connector in high strength concrete is still based on the composite behavior of the stud and the concrete. Besides, the proposed formulas are more reasonable and safe in predicting the shear capacity of stud connector in a commonly-used

concrete which ranges from C35 to C60. These formulas are suitable for the analysis of stud connector with the diameters of 9 mm to 30 mm and the lengths of 50 mm to 400 mm as well as the ratio of stud length and diameter over 4, used in concrete with cubic compressive strength from 15.0 MPa to 80.0 MPa.

Key words: composite bridge; stud connector; shear capacity; calculation method; model test

圆柱头焊钉抗剪性能不具有方向性, 施工质量易于保证, 是钢与混凝土结合最常用的连接件形式。Ollgaard 等^[1]在 1971 年进行 16 组 48 个焊钉连接件模型推出试验, 以焊钉直径 16~19 mm、混凝土抗压强度 18.0~35.0 MPa 为变化参数提出了与焊钉杆部面积及混凝土抗压强度、弹性模量的平方根成正比的焊钉连接件抗剪承载力计算式, 并认为焊钉连接件抗剪承载力不随混凝土强度的增加而无限提高, 给定了一个与焊钉连接件的直径和抗拉强度有关的上限值。其后, 美国规范 AASHTO^[2]、欧洲规范 Eurocode 4^[3]、加拿大规范 CAN/CSA-S16-01^[4]及我国规范 GB 50017—2003^[5]均在 Ollgaard 计算式的基础上考虑抗力分项系数等给出焊钉连接件抗剪承载力设计计算式。

近年来组合结构不仅局限于应用在组合梁桥上, 在混合梁、混合塔、索塔锚固区等组合桥梁结构中也得到广泛应用, 目前混凝土强度等级大幅度提高, 焊钉直径、长度相对建筑结构使用的尺度增大, 在此情况下按照现有规范焊钉连接件抗剪承载力设计值基本上由焊钉的直径和抗拉强度控制, 没能反映焊钉与混凝土组合作用对焊钉连接件抗剪承载力的影响。

本文通过 26 组 71 个焊钉连接件模型推出试验比较分析了混凝土抗压强度、焊钉的抗拉强度、直

收稿日期: 2012-08-17

第一作者: 王倩(1985—), 女, 博士生, 主要研究方向为组合结构桥梁。E-mail: zl_bridge@163.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

径、长度等对焊钉连接件抗剪承载力的影响,并结合国内外焊钉连接件模型试验结果,提出了适用范围较大的焊钉连接件抗剪承载力设计计算式。

1 焊钉连接件抗剪性能试验

1.1 模型试件

如表 1 所示,试验共包含 26 组 71 个焊钉连接

件模型试件,分别考虑混凝土抗压强度及焊钉抗拉强度、直径、长度等。表中 d_s 为焊钉直径, h_s 为焊钉长度, f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值, E_c 为混凝土弹性模量, f_{su} 为焊钉材料抗拉强度, V_u 为单根焊钉连接件抗剪承载力, \bar{V}_u 为每组试件焊钉连接件抗剪承载力平均值。表格中“—”表示此处试件无测试结果, 原因为组中无试件 3 或试件 3 在加载中测试仪器失效。

表 1 焊钉连接件试件分组及试验结果

Tab.1 Grouping and results of test specimens of stud connector

试件 分组	d_s / mm	h_s / mm	f_{ck} / MPa	E_c / GPa	f_{su} / MPa	单侧焊 钉/个	V_u /kN			\bar{V}_u /kN
							试件 1	试件 2	试件 3	
SS-1	22	100	41.1	36.4	519.0	2	186.7	197.3	191.1	191.7
SS-2	22	200	41.1	36.4	519.0	2	197.0	190.6	205.9	197.8
SS-3	22	300	41.1	36.4	519.0	2	176.8	189.0	225.8	197.2
SS-4	22	400	41.1	36.4	519.0	2	175.6	214.3	200.1	196.7
SS-5	22	200	45.0	37.1	465.0	2	233.9	239.0	—	236.4
SS-6	22	200	45.0	37.1	675.0	2	266.2	265.6	286.3	272.7
SS-7	25	200	45.0	37.1	485.0	2	255.0	266.8	285.1	269.0
SS-8	30	200	45.0	37.1	430.0	2	314.5	327.6	348.1	330.1
SS-9	22	200	33.5	34.6	515.0	2	180.8	187.5	202.2	190.1
SS-10	22	200	33.5	34.6	515.0	4	170.8	181.3	199.1	183.7
SS-11	22	200	33.5	34.6	515.0	6	183.5	155.6	166.1	168.4
SS-12	22	200	33.5	34.6	515.0	9	189.7	172.9	183.7	182.1
SS-13	25	200	37.0	35.5	515.0	2	240.4	219.3	241.4	233.7
SS-14	25	200	37.0	35.5	515.0	4	226.8	234.1	212.2	224.4
SS-15	25	200	37.0	35.5	515.0	6	201.9	221.2	213.2	212.1
SS-16	25	200	37.0	35.5	515.0	9	223.4	229.7	222.8	225.3
SS-17	22	100	36.0	35.3	445.0	2	153.5	173.6	198.2	175.1
SS-18	19	100	36.0	35.3	445.0	2	124.7	125.8	134.8	128.4
SS-19	19	100	36.0	35.3	445.0	2	128.0	145.9	—	136.9
SS-20	19	100	36.0	35.3	445.0	2	129.1	103.1	123.0	118.4
SS-21	22	200	36.6	35.4	475.0	2	205.3	208.8	—	207.0
SS-22	22	200	36.6	35.4	475.0	6	189.5	183.0	—	186.3
SS-23	22	200	36.6	35.4	475.0	6	197.4	181.2	—	189.3
SS-24	22	200	36.6	35.4	475.0	6	194.7	197.9	—	196.3
SS-25	22	200	36.6	35.4	475.0	6	189.4	185.4	—	187.4
SS-26	19	100	28.7	33.5	450.0	2	104.2	103.6	113.8	107.2

模型试件构造示意如图 1 所示,钢结构部分由 2 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粘阻力。其中, d_s 为 19, 22, 25 和 30 mm, h_s 为 100, 200, 300 和 400 mm 等大尺度多种规格,试验分组包括 f_{su} 达到 675.0 MPa, f_{ck} 达到 45.0 MPa 的模型试件。

1.2 加载及测试

加载及位移计布置如图 2 所示,采用千斤顶对试件两侧对称施加推力,试件混凝土底部布置沙垫

层以确保结构两侧施力和受力的均匀。并在试件的前后两侧焊钉等高处共布置 4 个位移计测试钢板与混凝土块之间的相对滑移值。

1.3 试验结果

表 1、图 3 分别给出了模型试验单根焊钉的抗剪承载力测试结果及试件破坏形态。图 3 中两侧为混凝土破坏表面,中间为钢板破坏表面。所有推出试件的破坏形态均为焊钉连接件根部剪断,焊钉附近混凝土有局部压溃,但未出现明显的混凝土开裂现象。焊钉根部出现明显的塑性变形,剪切破坏面位于焊钉根部焊脚上方,剪切断面光滑。

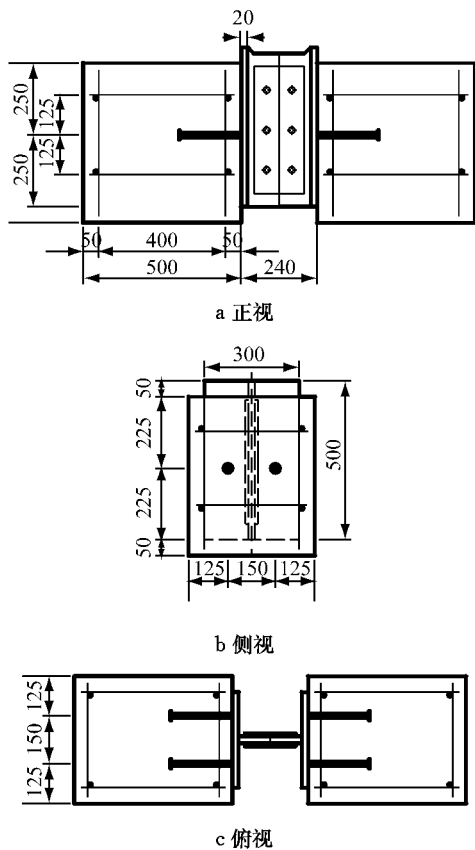


图 1 模型试件细节 (单位:mm)

Fig.1 Details of push-out specimen (unit: mm)

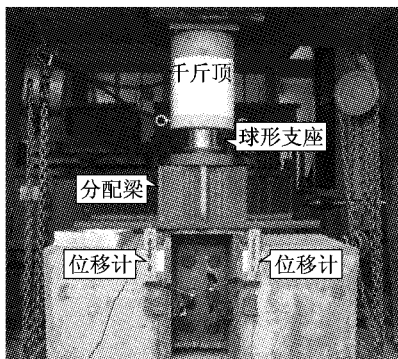


图 2 试验加载示意

Fig.2 Test setup

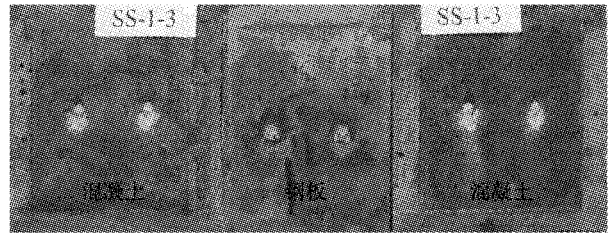


图 3 试件破坏形态

Fig.3 Failure modes

2 抗剪承载力影响因素分析

(1) 混凝土抗压强度。图 4a 为 f_{ck} 分别为 45.0, 33.5 和 36.6 MPa 时模型试件的剪力-相对滑移曲线。当 f_{ck} 从 33.5 MPa 增加为 36.6 MPa 时, \bar{V}_u 增大 8.9%; f_{ck} 从 36.6 MPa 增为 45.0 MPa 时, \bar{V}_u 增大 14.2%。表明 \bar{V}_u 随着 f_{ck} 的提高而增大, 但当混凝土强度等级较高时, 增加幅度明显减小。

(2) 焊钉抗拉强度。图 4b 为 f_{su} 分别为 465.0 和 675.0 MPa 时模型试件的剪力-相对滑移曲线。 f_{su} 增加约 45.0% 时, \bar{V}_u 增大约 15.0%。表明 \bar{V}_u 并不随着 f_{su} 成比例提高。

(3) 焊钉直径。图 4c 为 d_s 分别为 22, 25, 30 mm 时模型试件的剪力-相对滑移曲线。 d_s 从 22 mm 增加至 25 mm 时, 杆部面积 A_s 增加约 29.0%, \bar{V}_u 增约 14.0%; d_s 从 25 mm 增大至 30 mm 时, A_s 增幅约 44.0%, \bar{V}_u 增大约 23.0%。表明 \bar{V}_u 随着 A_s 增加而增大。

(4) 焊钉长度。图 5 为 h_s 分别为 100, 200, 300 和 400 mm 时 V_u 与 h_s 的变化关系。 h_s 从 100 mm 增加至 400 mm 时, \bar{V}_u 变化不超过 3%, 表明焊钉在 h_s/d_s 大于 4 时, h_s 对 \bar{V}_u 影响较小, 这是因为焊钉主要是通过根部与混凝土接触并传递剪力作用。

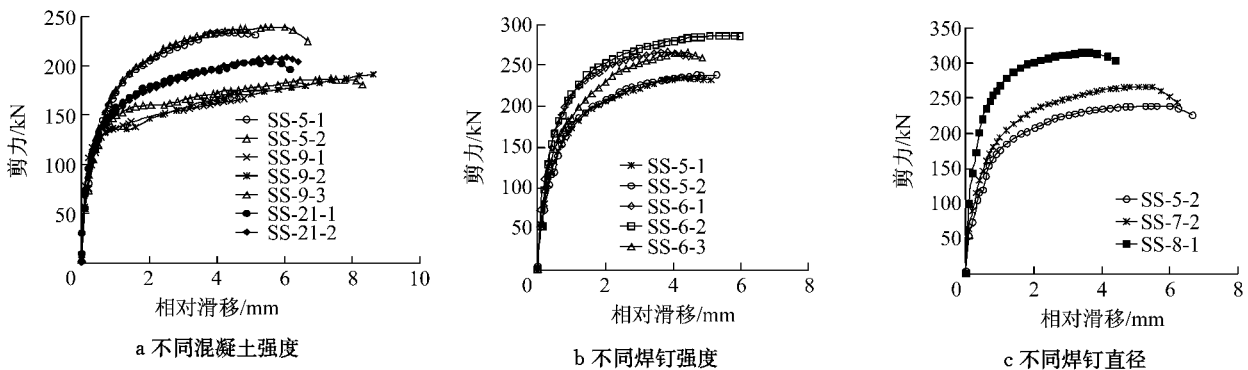


图 4 剪力-相对滑移曲线

Fig.4 Curves of shearing force and slip of specimens

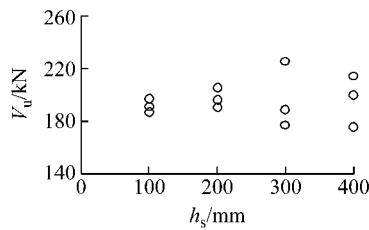


图 5 焊钉长度对承载力的影响

Fig. 7 Effect of stud length on the shear capacity of stud connector

3 抗剪承载力计算方法

Ollgaard 等^[1]通过模型试验提出的焊钉连接件在 $h_s/d_s \geq 4$ 时 V_u 计算式.

$$V_u = 0.5A_s \sqrt{E_c f_c} \leq A_s f_{su} \quad (1)$$

式中, f_c 为混凝土抗压强度, MPa.

图 6 为 V_u/A_s 与 $\sqrt{E_c f_c}$ 变化曲线, 并给出文献 [1] 和本文的试验数据. 文献 [1] 中 f_c 为 18.0~35.0 MPa, d_s 为 16~19 mm, 但现在桥梁结构混凝土等级已大幅度提高, 从而造成 V_u 计算基本上由 $A_s f_{su}$ 控制. 从笔者试验结果来看, V_u 仍随混凝土强度增加而增大, 即使在混凝土强度较高时仍取决于焊钉杆部与混凝土的组合作用.

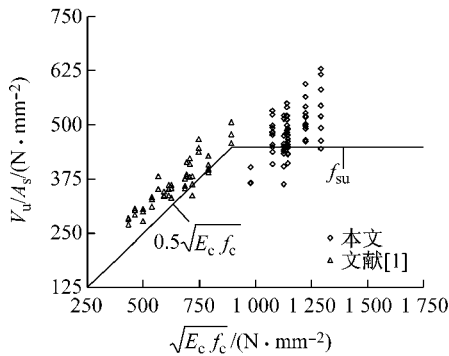


图 6 文献 [1] 计算式结果与本文试验结果比较

Fig. 6 Comparison of experimental data with the calculated results of the formula in Ref. [1]

因此采用双折线模型拟合焊钉连接件抗剪承载力计算式, 考虑焊钉杆部与混凝土的组合作用. 通过对表 1 及国内外共 255 个焊钉连接件推出试验数据^[1,6-14]进行回归分析得到抗剪承载力计算式.

$$\begin{cases} V_u = 0.50A_s \sqrt{E_c f_{ck}} \\ \sqrt{E_c f_{ck}} \leq 700.0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} V_u = 0.20A_s \sqrt{E_c f_{ck}} + 210.0A_s \\ \sqrt{E_c f_{ck}} > 700.0 \end{cases} \quad (3)$$

图 7 为依据式(2)和式(3)的计算结果与试验结果的比较, 其相关系数为 $R=0.88$. 试验数据包括 d_s 为 9~30 mm、 h_s 为 50~400 mm 及混凝土强度等级 C15~C80 的情形.

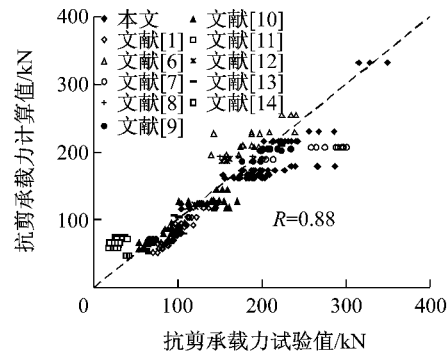


图 7 计算值与试验值的比较

Fig. 7 Comparison of the experiment results and the calculated results

进一步参照欧洲规范焊钉连接件抗剪承载力分项系数取 1.25, 将混凝土抗压强度取设计值 f_{cd} , 焊钉连接件抗剪承载力设计值 V_d 建议为

$$\begin{cases} V_d = 0.40A_s \sqrt{E_c f_{cd}} \\ \sqrt{E_c f_{cd}} \leq 700.0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} V_d = 0.16A_s \sqrt{E_c f_{cd}} + 168.0A_s \\ \sqrt{E_c f_{cd}} > 700.0 \end{cases} \quad (5)$$

依据式(4)和式(5)计算模型试件焊钉连接件抗剪承载力设计值与试验结果比值的平均值约为 0.60.

图 8 比较了焊钉连接件抗剪承载力设计计算式与各规范设计计算式, 横坐标将混凝土强度统一换算成设计值, 图中 I 区、II 区、III 区分别近似对应混凝土强度等级为 C35 以下、C35~C60 及 C60~C80 的焊钉抗剪承载力设计值. 可知所提出的设计式在混凝土强度等级低于 C35 时, 与规范 Eorucode 4 保持一致, 在 C35~C60 范围内低于规范 Eorucode 4, 在 C60~C80 时略高于规范 Eorucode 4. 特别是在常用的混凝土强度等级 C35~C60 范围内, 相对于规范 Eorucode 4 能够更合理地偏于安全的计算焊钉连接件抗剪承载力, 如 C50 混凝土中 $\phi 22$ 的焊钉连接件承载力设计值为 117.3 kN, 约为规范 Eorucode 4 设计值(121.6 kN)的 96.5%.

4 结语

(1) 通过 26 组 71 个焊钉连接件模型推出试验对影响因素进行比较分析可知, 混凝土强度及焊钉

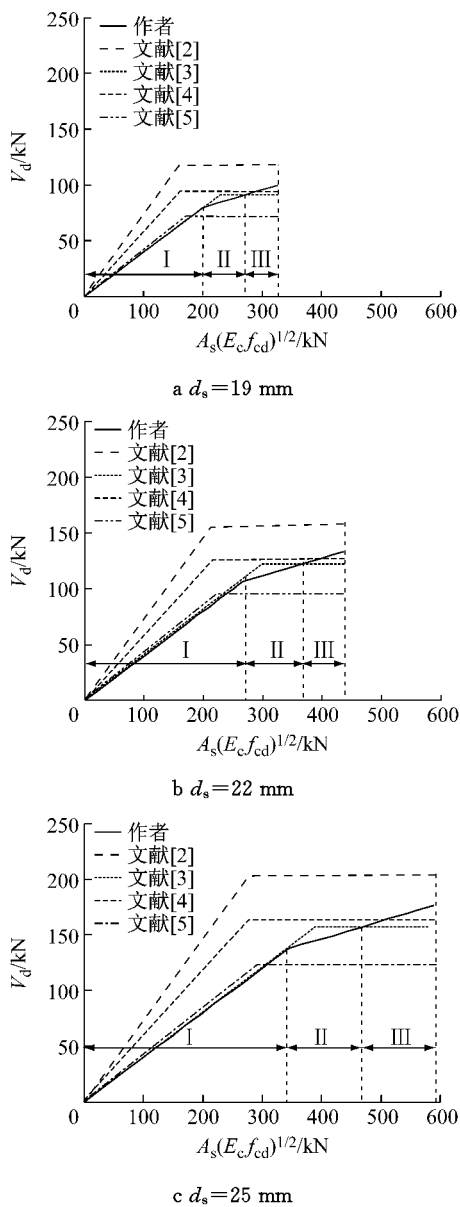


图 8 设计计算式比较

Fig. 8 Comparison of design equations

面积是焊钉连接件抗剪承载力的主要影响因素,而焊钉抗拉强度和长度等对抗剪承载力影响较小。

(2) 焊钉连接件抗剪承载力在混凝土强度较高时仍随混凝土强度增加而增大,并仍取决于焊钉杆部与混凝土的组合作用。

(3) 基于国内外共计 255 个焊钉连接件推出试验结果提出了焊钉连接件抗剪承载力的计算式,该式上段直线与焊钉抗拉强度无关,而随着焊钉杆部面积和混凝土强度的变化而变化。

(4) 考虑分项系数给出焊钉连接件抗剪承载力设计式,该式与欧洲规范相比较,在混凝土强度等级低于 C35 时保持一致,在常用的 C35~C60 范围内能够更合理偏于安全的计算焊钉连接件抗剪承载

力,可适用于使用混凝土强度等级 C15~C80、焊钉长径比大于 4 且直径 9~30 mm、长度 50~400 mm 的组合桥梁结构焊钉连接件的设计。

参考文献:

[1] 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.

[2] AASHTO LRFD. Bridge design specifications [S]. 4th ed. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.

[3] BS EN 1994-2 Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures, part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

[4] CAN/CSA-S16-01 A national standard of Canada, limit states design of steel structures [S]. [S. l.]: Canadian Standards Association, 2001.

[5] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

Ministry of Construction of P R China, State General Administration of P R China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.

[6] Shim C S, Lee P G, Yoon T Y. Static behavior of large stud shear connectors[J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1853.

[7] Yabe Junichi, Fujita Masahiro, Nishikawa Toshiaki, et al. Shear tests of $\Phi 25\text{mm}$ stud for composite girder[J]. Journal of Constructional Steel, 1998, 6: 245.

[8] 陈忠延,史家钧,李炳生,等. 大直径栓钉承载力的试验研究[J]. 土木工程学报, 1993, 26(2): 67.

CHEN Zhongyan, SHI Jiajun, LI Bingsheng, et al. Experimental research on the load-bearing capacity of large diameter shear connector [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(2): 67.

[9] 周孟波. 芜湖长江大桥大跨度低塔斜拉桥板桁组合结构建造技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

ZHOU Mengbo. Construction technology of composite plate truss structures for the large span low-pylon cable-stayed Wuhu Yangtze River Bridge[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.

[10] Goble G G. Shear strength of thin flange composite specimens [J]. AISC Engineering Journal, 1968, 5(2): 62.

[11] Kim B, Wright H D, Cairns R. The behaviour of through-deck welded shear connectors: an experimental and numerical study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(12): 1359.

[12] 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.

[13] Viest I M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel T-beams [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1956, 52(4): 875.

[14] Davies C. Small-scale push-out tests on welded stud shear connectors[J]. Concrete, 1967, 1(3): 311.