

大直径焊钉连接件抗剪性能试验

蔺钊飞, 刘玉擎

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了解决部分情况下组合结构桥梁钢-混结合面焊钉布置过密的问题,通过直径 22 mm、25 mm 和 30 mm 焊钉的抗剪承载性能模型试验比较分析了直径 25 mm 和 30 mm 大直径焊钉相对于直径 22 mm 常规焊钉破坏模式、承载力、刚度和变形性能的差异,并对国内外桥梁规范中焊钉抗剪承载力设计式对于大直径焊钉的适用性进行了评估。研究结果表明,相对于直径 22 mm 焊钉,直径 25 mm 和 30 mm 焊钉的抗剪承载力平均增大 14% 和 42%,抗剪刚度平均增大 35% 和 106%。《公路钢结构桥梁设计规范(送审稿)》、规范 Eurocode 4 和规范 AASHTO LRFD 中的抗剪承载力设计式均可较为保守地计算大直径焊钉的抗剪承载力,其中 Eurocode 4 最为保守。试验值与设计值的比值随焊钉直径的增加而减小。

关键词: 组合结构桥梁; 焊钉连接件; 抗剪性能; 模型试验; 大直径

中图分类号: U441

文献标志码: A

Experimental Study on Shear Behavior of Large Stud Connectors

LIN Zhao-fei, LIU Yu-qing

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

Abstract: Stud connectors are over densely arranged in steel-concrete composite bridges in some cases. To address this issue, shear behavior of stud connectors with the diameters of 22mm, 25mm and 30mm were experimentally studied. Based on the test results, the failure model, shear strength, shear stiffness and slip capacity of large diameter studs (25mm and 30mm studs) were compared with those of normal diameter studs (22mm studs). In addition, the applicability of the design equations specified in existing codes to large diameter studs were evaluated. The results show that compared with 22mm studs, the average shear strength of 25mm and 30mm studs increase by about 14% and 42%, respectively, and the shear stiffness increase by about 35% and 106%, respectively. The design equations specified in Chinese Code

(draw), Eurocode 4 and AASHTO LRFD give conservative predictions for the large diameter studs, and Eurocode 4 gives the most conservative values. The ratio of the measured value to the calculated value decreases as the stud diameter increases.

Key words: composite bridge; headed stud connector; shear behavior; model test; large diameter

组合结构桥梁常在钢-混凝土结合面布置焊钉连接件来抵抗结合面的剪力和分离。既往研究和实桥应用主要集中于直径不大于 22 mm 的焊钉^[1-3], 因为其在大多数情况下均能满足设计的要求。然而, 随着组合结构桥梁跨径的增大, 在主梁剪力较大区段需要沿翼缘横向布置多列焊钉, 造成实际布置较为困难且焊接工作量大^[4-5]。当采用群钉连接件连接预制桥面板与钢翼缘时, 常规直径焊钉需密布, 导致群钉剪力分布不均匀, 承载力存在一定程度的折减^[6]。此外, 斜拉桥索塔锚固区钢-混结合面的焊钉需传递较大的索力, 而结合面相对较小, 且混凝土桥塔钢筋布置密集, 采用常规直径焊钉将导致布置困难; 鉴于此, 国内某斜拉桥在索塔锚固区采用直径 25 mm 焊钉以解决该问题^[7]。

大直径焊钉由于具有更大的截面面积, 使得其延性破坏下抗剪承载力有较大的提高, 故通过采用大直径焊钉可有效减少结合面所需焊钉个数和解决在剪力较大区域焊钉布置困难的问题。《公路钢结构桥梁设计规范(送审稿)》和规范 Eurocode 4^[8] 中规定焊钉最大直径不得超过 25 mm; 规范 AASHTO LRFD^[9] 未给出焊钉直径上限。Badie 等^[4] 通过推出试验和足尺梁式试验研究了直径 31.8 mm 焊钉的抗剪承载性能和抗疲劳性能, 结果表明, 相对于常规直径焊钉, 大直径焊钉具有更高的抗剪承载力和抗疲劳性能, 可有效减少组合梁结合面所需焊钉个数,

收稿日期: 2014-11-07

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

加快施工速度和减小桥面板拆除的困难,并将该大直径焊钉应用在一座三跨连续梁桥中. Shim 等^[5]采用推出试验研究了直径 25 mm、27 mm 和 30 mm 焊钉抗剪承载性能,结果表明,大直径焊钉具有更高的承载力.

本文进行了 3 组焊钉抗剪承载性能模型试验,比较分析了大直径焊钉与常规直径焊钉在破坏模式、承载力、刚度和变形性能方面的差异,并对国内外桥梁规范中抗剪承载力设计式对于大直径焊钉的适用性进行了评估.

1 模型试验

1.1 模型试件

制作和测试了 SN1、SN2 和 SN3 共 3 组焊钉连接件抗剪承载性能模型试件,其直径 d_s 分别为 22 mm、25 mm 和 30 mm. 所有试件焊钉高度 h_s 均为 200 mm.

除焊钉外所有模型试件构造均相同, SN1 试件构造如图 1 所示. 钢结构部分由 2 块焊接 T 形钢板

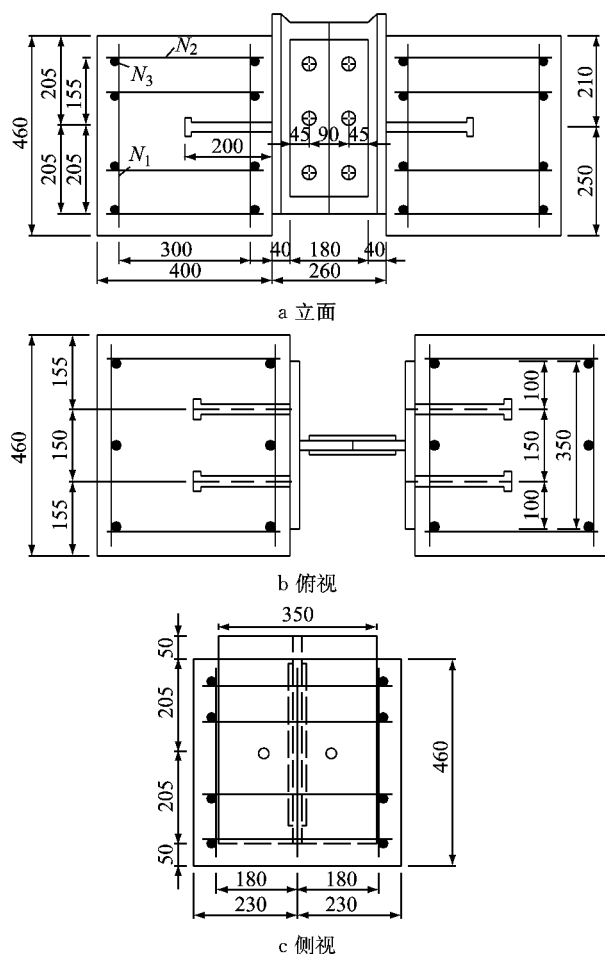


图 1 试件尺寸(单位: mm)

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

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黏结力和摩擦力,焊钉正立浇筑混凝土. 沿剪力作用方向布置 4 层钢筋网,钢筋 N1、N2 和 N3 直径分别为 20 mm、16 mm 和 20 mm.

1.2 材料特性

混凝土选用 C60 等级,在浇筑试件同时,制作边长为 150 mm 的标准混凝土立方体试块,以确定混凝土的抗压强度. 分别在养护 28 d 和进行模型试验当天(33 d)进行 3 个立方体试块的抗压强度(f_{cu})试验,试验结果见表 1.

表 1 混凝土抗压强度

Tab.1 Compressive strength of concrete		
试件	28 d 抗压强度/MPa	33 d 抗压强度/MPa
1	55.6	68.4
2	64.9	71.6
3	68.2	70.9
平均值	62.9	70.3

按照文献[10]选用直径为 22 mm 和 25 mm 的焊钉. 直径 30 mm 焊钉向厂家订做. 文献[10]规定焊钉材料屈服强度 f_{sy} 和抗拉强度 f_{su} 最小值分别为 320 MPa 和 400 MPa. 钢筋采用 HRB335 热轧钢筋,钢板材质采用 Q345C. 焊钉、钢筋和钢板的实测材料特性由供应商提供,见表 2.

表 2 钢材材料特性

Tab.2 Properties of steel materials		
构件	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
焊钉 SN1	370	465
焊钉 SN2	380	485
焊钉 SN3	375	430
钢筋	374	578
钢板	410	545

1.3 测试与加载

加载装置如图 2 所示,在钢梁顶面采用千斤顶对试件两侧对称施加推压力,使焊钉处于受剪状态. 试件混凝土底部布置沙垫层以确保结构两侧施力和

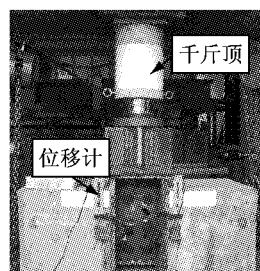


图 2 加载装置

Fig.2 Test setup

受力的均匀,并在试件的前后两侧与焊钉等高处共布置 4 个位移计,测试钢板与混凝土块之间的相对滑移值,取位移计平均值作为相对滑移的结果.加载前期采用力控制,加载速率为 $5 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$,加载至约 70% 的预估极限荷载时改为位移控制,加载速率为 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,直至荷载下降至最大荷载的 80% 或发生明显破坏.

2 试验结果及分析

2.1 破坏模式

所有模型试件均为焊钉杆根部剪断破坏,如图 3 所示.大直径焊钉与常规直径焊钉相同,亦为钢梁侧沿焊脚顶部的剪断,混凝土侧焊钉根部下局部混凝土压溃,混凝土表面未出现裂缝.

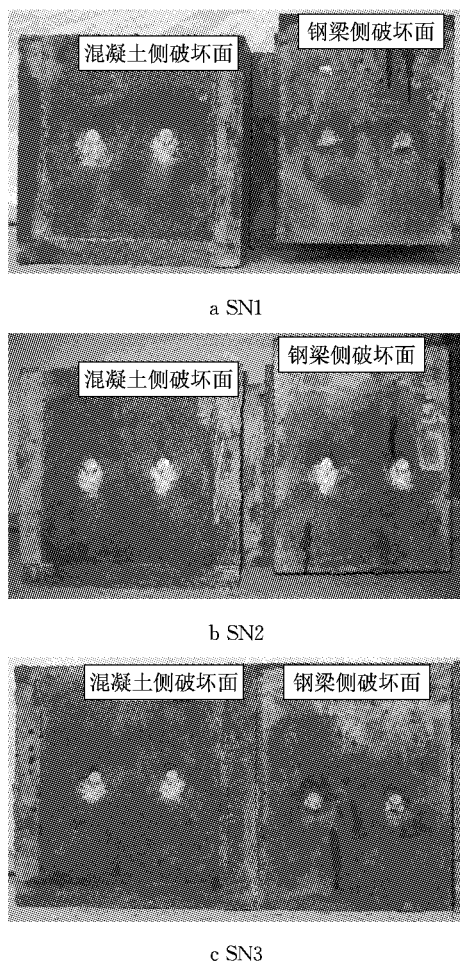


图 3 破坏形态

Fig.3 Failure modes

2.2 抗剪承载力

抗剪承载力试验结果如表 3 所示,其中 SN1 有 1 个试件由于位移计损坏未列出.由试验结果可知,随着焊钉直径的增加,抗剪承载力逐渐增大,相对于

直径 22 mm 焊钉,直径 25 mm 和 30 mm 焊钉的抗剪承载力平均增加约 14% 和 42%.

2.3 抗剪刚度

抗剪刚度试验结果如表 3 所示,抗剪刚度取剪力-滑移曲线上 50% 最大荷载处的割线模量.相对于直径 22 mm 焊钉,直径 25 mm 和 30 mm 焊钉的抗剪刚度随焊钉直径的增加而增大,平均增大约 35% 和 106%.可见,直径对于焊钉的抗剪刚度增大作用较为显著.

2.4 极限滑移

极限滑移试验结果见表 3.规范 Eurocode 4 以剪力-滑移曲线下降段中对应 90% 最大剪力的滑移作为极限滑移,表征焊钉的变形能力.相对于直径 22 mm 焊钉,直径 25 mm 焊钉的极限滑移平均增大约 11%,而直径 30 mm 焊钉则平均减少约 6%,延性略有降低.

3 抗剪承载力设计式比较分析

为了评估现有规范设计式对大直径焊钉的适用性,选取《公路钢结构桥梁设计规范(送审稿)》、规范 Eurocode 4^[8] 和规范 AASHTO LRFD^[9] 这 3 个规范进行比较分析.

《公路钢结构桥梁设计规范(送审稿)》中给出焊钉抗剪承载力设计值计算式为

$$V_{su} = 0.43A_s \sqrt{E_c f_{cd}} \leq 0.7A_s f_{su} \quad (1)$$

式中: V_{su} 为抗剪承载力设计值; A_s 为焊钉杆径截面面积,文献[10]中规定焊钉直径为 10~25 mm; E_c 为混凝土弹性模量; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值; f_{su} 为焊钉材料抗拉极限强度,按文献[10]取值,当 $f_{su} \geq 400 \text{ MPa}$ 时,宜取 400 MPa.

规范 Eurocode 4^[8] 中给出焊钉抗剪承载力设计值计算式为

$$P_{Rd} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{E_{cm} f_{ck}} / \gamma_v \leq 0.8\pi d^2 f_u / (4\gamma_v) \quad (2)$$

式中: P_{Rd} 为抗剪承载力设计值; α 为焊钉名义高度与杆径的比值,当大于 4 时取 1; d 为焊钉直径,取值范围 16~25 mm; E_{cm} 为混凝土弹性模量; f_{ck} 为混凝土圆柱体抗压强度; γ_v 为分项系数,取 1.25; f_u 为焊钉材料抗拉极限强度,不大于 500 MPa.

规范 AASHTO LRFD^[9] 给出焊钉抗剪承载力设计值计算式为

$$\phi_{sc} Q_n = \phi_{sc} 0.5A_{sc} \sqrt{E_c f'_c} \leq \phi_{sc} A_{sc} F_u \quad (3)$$

表 3 试验结果
Tab.3 Test results

试件	抗剪承载力/kN				抗剪刚度/(kN·mm ⁻¹)					<i>d</i>	<i>s_p</i> / mm	<i>s_u</i> / mm
	试验值	计算值			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	试验值	式(4) 计算值			
		式(1)	式(2)	式(3)								
SN1-1	233.9	106.4	97.3	129.2	2.20	2.40	1.81	324.1	114.6	2.8	3.68	5.62
SN1-2	238.8				2.24	2.45	1.85	288.6		2.5	4.45	6.67
SN2-1	253.7	137.4	125.6	166.8	1.85	2.02	1.52	348.9	130.3	2.7	6.03	8.09
SN2-2	266.8				1.94	2.12	1.60	312.9		2.4	4.75	6.41
SN2-3	285.2				2.08	2.27	1.71	581.6		4.5	4.82	5.97
SN3-1	352.4	197.8	180.9	240.2	1.78	1.95	1.47	522.5	155.3	3.4	4.19	5.46
SN3-2	331.8				1.68	1.83	1.38	751.3		4.8	2.85	7.06
SN3-3	320.2				1.62	1.77	1.33	625.3		4.0	3.52	4.91

注:*a, b, c* 分别为抗剪承载力试验值与式(1)、式(2)和式(3)计算值的比值;*d* 为抗剪刚度试验值与式(4)计算值的比值;*s_p* 为峰值滑移;*s_u* 为极限滑移。

式中: ϕ_{sc} 为抗力系数,取 0.85; Q_n 为抗剪承载力名义值; A_{sc} 为焊钉杆径截面面积; E_c 为混凝土弹性模量; f'_c 为规定混凝土抗压强度标准值; F_u 为焊钉材料抗拉极限强度,取 415 MPa。

采用式(1)至式(3)计算得到的抗剪承载力设计值与试验值的比较如表 3、图 4 所示。直径 22 mm 和 25 mm 焊钉设计承载力均严格按照各规范参数取值计算,焊钉材料强度取 400 MPa。在计算直径 30 mm 焊钉承载力设计值时,直径超出规范限值,但仍按规范计算。

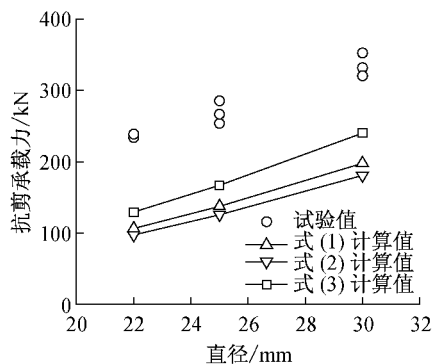


图 4 抗剪承载力试验值与设计值比较

Fig.4 Comparison of the measured shear strength and the predicted ones

结果表明,采用式(1)至式(3)均能较为安全地设计常规直径和大直径焊钉的抗剪承载力,其中,式(2)计算值最为保守,式(1)则介于式(2)和式(3)之间。然而,试验值与设计值的比值随着焊钉直径的增大而逐渐减小。对于直径 22 mm 焊钉,试验值与式(1)至式(3)计算值比值的平均值分别为 2.22、2.43 和 1.83;而对于直径 30 mm 焊钉,则分别降为 1.69、1.85 和 1.39。

4 抗剪刚度计算式比较分析

焊钉连接件的抗剪刚度代表了正常使用状态下焊钉的变形能力,影响着桥梁正常使用状态下的整体受力行为,是对桥梁结构正常使用状态下进行受力分析的一个重要参数。目前,抗剪刚度仍主要基于试验数据获得,应用较为不便。Oehlers 等^[11]基于试验结果给出了焊钉在一半抗剪承载力处滑移值的计算式,结合抗剪承载力计算式,即可得到抗剪刚度的显式表达式^[5]如下:

$$k_e = \frac{Q_{\max}}{(0.16 - 0.0017f'_c)d_s} \quad (4)$$

式中: k_e 为抗剪刚度; Q_{\max} 为焊钉抗剪承载力; f'_c 为混凝土平均抗压强度。

图 5 所示为抗剪刚度试验值与式(4)计算值的比较。 Q_{\max} 采用式(2)计算, γ_v 取 1.0。直径 22 mm、25 mm 和 30 mm 焊钉抗剪刚度试验值与计算值比值的平均值分别为 2.7、3.2 和 4.1。式(4)能够反映焊钉抗剪刚度随直径增加而增大的变化规律,但对于所有试件,式(4)刚度计算值均过于保守。计算值与试验值存在较大差别可能由 2 个原因引起:① 抗剪刚度试验值的离散度较大,本文样本数较少,可能没有反映总体情况;② 式(4)的提出主要是基于直径小于 22 mm 的焊钉试验结果,不能反映大直径焊钉的刚度变化特点。式(4)计算值偏于保守,在应用于实际结构计算变形时偏于安全。然而,在收缩、徐变和温度梯度作用下,钢-混组合结构将发生内力或应力重分布,刚度越大则相互约束作用越强,引起的内力或应力重分布程度越高,抗剪刚度取值保守是不利的。因此,有必要进一步研究,提出更为准确而便于应用的抗剪刚度显式表达式,以能够合理地反映结

构的实际受力特性.

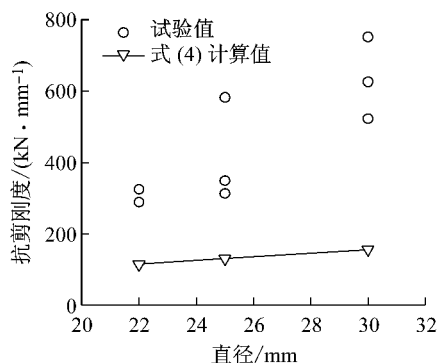


图 5 抗剪刚度试验值与计算值比较

Fig.5 Comparison of the measured shear stiffness and the predicted ones

5 剪力-滑移曲线计算式比较分析

焊钉连接件的剪力-滑移曲线对于结构在承载能力极限状态下的受力性能有较大影响,焊钉在极限状态下有足够的变形能力有利于焊钉内力重分布和地震荷载下能量的耗散,对结构极限状态下的受力十分有利,因此,对结构进行非线性分析时剪力-滑移本构关系必不可少。

以往的剪力-滑移本构关系中,Ollgaard 等^[12]的指数形式和 Buttry^[13]的分数形式具有较高的认可度,如式(5)和式(6)所示,式中已将原式中的单位换算为毫米。然而,其拟合曲线时所采用的数据中焊钉直径和强度相对较小,对于大直径焊钉是否适用需进行比较分析。

$$V/V_{\max} = (1 - e^{-0.71s})^{0.4} \quad (5)$$

$$V/V_{\max} = 3.15s/(1 + 3.15s) \quad (6)$$

式中: V 为所施加剪力, kN ; s 为相对滑移值, mm 。

图 6 为试验曲线与式(5)和式(6)计算值的比较。对于 22 mm 的常规直径焊钉,式(5)能够准确地反映焊钉实际的剪力-滑移行为,式(6)在初期近似线性段与试验曲线吻合较好,进入非线性段后,倾向于低估实际的剪力荷载,与试验曲线的吻合度不如式(5)。式(5)亦能较好地预测直径 25 mm 焊钉的剪力-滑移曲线;而直径 30 mm 焊钉在相同滑移值处的割线刚度比常规直径焊钉要大,式(5)不能反映此变化,低估了所施加的剪力荷载。式(6)低估了直径 25 mm 和 30 mm 焊钉非线性上升段的剪力。综上,对于直径 22 mm 和 25 mm 焊钉,式(5)均能较好地预测其实际的剪力-滑移行为,建议进行组合结构非线性分析时采用式(5)模拟焊钉的剪力-滑移行为。对于

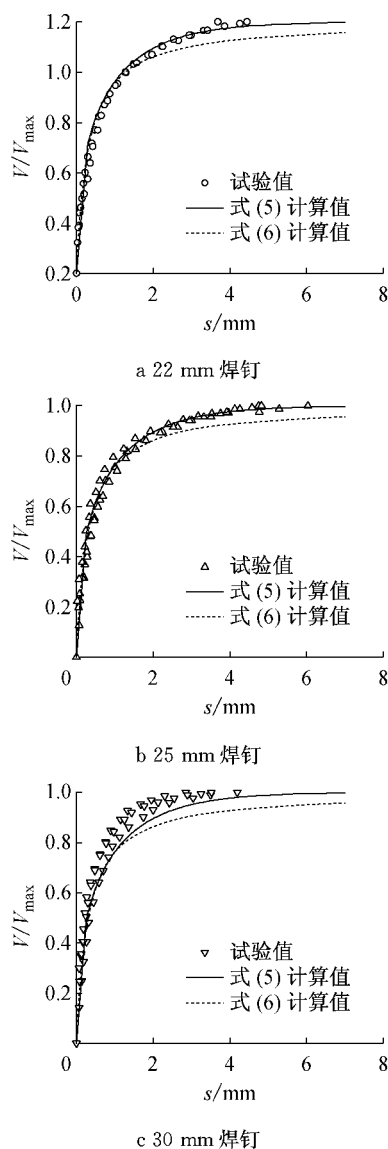


图 6 剪力-滑移曲线计算式与试验结果比较

Fig.6 Comparison of the measured load-slip curves and the predicted ones

直径 30 mm 焊钉,需要进行进一步的试验研究,以提出适宜于大直径焊钉的剪力-滑移曲线。

6 结论

(1) 开展了直径 22 mm、25 mm 和 30 mm 焊钉连接件的抗剪承载性能模型试验,结果表明,相对于直径 22 mm 焊钉,直径 25 mm 和 30 mm 焊钉的抗剪承载力平均增加约 14% 和 42%,采用大直径焊钉可有效增加焊钉的抗剪承载力。

(2) 相对于直径 22 mm 焊钉,直径 25 mm 和 30 mm 焊钉的抗剪刚度平均增加约 35% 和 106%,采用大直径焊钉可显著增加焊钉的抗剪刚度。然而,对于常规焊钉和大直径焊钉均缺乏能够较为准确预测焊

钉刚度的显式表达式,实际结构分析时较为不便,需进一步研究。

(3) 基于承载力试验数据,对《公路钢结构桥梁设计规范(送审稿)》、规范 Eurocode 4^[8] 和规范 AASHTO LRFD^[9] 中焊钉连接件的抗剪承载力设计式对于大直径焊钉的适用性进行了评估。结果表明,三者均能较为保守地计算大直径的抗剪承载力,其中,Eurocode 4 最为保守。然而,计算值的安全量随着焊钉直径的增大而逐渐减小。对于直径 22 mm 焊钉,试验值与三者计算值比值的平均值分别为 2.22,2.43 和 1.83;而对于直径 30mm 焊钉,则分别降为 1.69,1.85 和 1.39。

(4) 本文模型试验采用的是剪切方向单排 2 个焊钉的布置方式,仅能反映不同直径焊钉之间单钉受力行为的差异。实际桥梁钢-混凝土结合面中一般布置有大量焊钉,焊钉间距和个数均对其受力行为产生一定的影响,需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 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. Experimental research on the load-bearing capacity of large diameter shear connector [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(2): 67.
- [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 connectors [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(5): 659.
- [3] 荣学亮,黄侨,赵品. 考虑疲劳损伤的栓钉连接件抗剪承载力研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 88.
RONG Xueliang, HUANG Qiao, ZHAO Pin. Study on shear capacity of stud connectors subjected to fatigue damage [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 88.
- [4] Badie S S, Tadros M K, Kakish H F, *et al.* Large shear studs for composite action in steel bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(3): 195.
- [5] Shim C S, Lee P G, Yoon T Y. Static behavior of large stud shear connectors [J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1853.
- [6] XUE Dongyan, Liu Yuqing, YU Zhen, *et al.* Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Constructional steel Research, 2012, 74:1.
- [7] 徐海军,刘玉擎,李杨,等. 外露式钢锚箱索塔锚固结构受力机理试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2014, 42(5): 346.
XU HaiJun, LIU Yuqing, LI Yang, *et al.* Experimental study on stress mechanism of exposed steel anchor box cable-tower anchorage [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(5): 346.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. Brussels: Ernst & Sohn, 2004.
- [9] American Associate of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. 4th ed. Washington D C: American Associate of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T10433—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.
- [11] Oehlers D J, Coughlan C G. The shear stiffness of stud shear connections in composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1986, 6(4): 273.
- [12] 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.
- [13] Buttry K E. Behavior of stud shear connectors in lightweight and normal-weight concrete [R]. Columbia: Missouri State Highway Department and University of Missouri-Columbia, 1965.