

多排焊钉推出试验试件力学性能

苏庆田, 韩旭, 任飞

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 单排焊钉推出试验与多排焊钉推出试验得到的单钉承载力有一定的差别, 为了明确焊钉排数对多排焊钉的抗剪承载力的影响, 进行了 1 组单排焊钉基本力学试验和 4 组不同排数的多排焊钉力学性能试验. 试验结果表明, 焊钉排数对焊钉的抗剪承载力有影响, 换算得到的单个焊钉承载力随排数的增加而降低, 焊钉排数的影响随排数的增加而趋于稳定, 其影响值在 15% 以内. 结合试验结果, 给出了焊钉排数对其抗剪承载力影响的表达式. 此外, 根据多排焊钉的荷载-滑移曲线, 给出了多排焊钉的荷载-滑移关系表达式, 与试验结果比较表明, 所给表达式的结果与试验结果吻合较好.

关键词: 剪力钉; 推出试验; 多排; 受力特点; 抗剪强度

中图分类号: TU312

文献标志码: A

Static Behavior of Push-out Specimen with Multi-row Stud Connectors

SU Qingtian, HAN Xu, REN Fei

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

Abstract: The shear bearing capacity of single stud obtained from single-row stud push-out test and that from multi-row stud push-out test are different to some degree. In order to clarify the effect of the stud row numbers on the ultimate strength of the stud, one single stud push-out test and four multi-row stud push-out tests with different rows were carried out. The test results show that the number of stud rows affects the stud shear bearing capacity, and the average capacity of single stud connector decreases by increasing the number of stud rows, while the influence of the number of stud rows tends to be stable with the increasing of the number of row, also the influence value is within 15%. Combined with the push-out test, the expression of the number of stud row affecting the shear bearing capacity of stud is given. In addition, based on the load-slip curves of multi-row stud, the expression of the load-slip relation of multi-row stud is proposed. Compared to testing results, the new expression

has a better match with the experimental values.

Key words: headed stud shear connector; push-out test; multi-row; mechanical behavior; ultimate shear strength

目前圆柱头焊钉连接件是钢与混凝土组合结构中应用最广泛的一种连接件形式^[1]. 焊钉一端通过专用焊接器具与钢结构相连, 焊钉其他部位包裹了混凝土, 实现了连接钢与混凝土的作用.

由于推出试验能够较为安全地评估连接件的承载力, 20 世纪 50 年代后通过推出试验对焊钉连接件的抗剪性能进行了大量的研究. 研究包括不同焊钉长度与直径比的焊钉破坏模式^[2], 混凝土强度对焊钉承载力影响^[3], 目前规范范围以外的大直径焊钉的静力性能和抗疲劳性能^[4-5]; 也有采用数值计算方法分析焊钉连接件的受力特性^[6-7].

以往研究主要开展单钉的推出试验, 很少涉及不同排数的多排焊钉受力性能研究. 实际工程中拱桥结构的拱肋、斜拉桥的桥塔和悬索桥的桥塔等会采用钢结构与混凝土结构的混合结构. 在混合结构构件的组合截面范围内设置多排焊钉连接件, 其受力与组合梁中的有较大不同^[8]. 混合结构中焊钉受力不均匀, 焊钉受力与焊钉的排数有一定影响, 因此有必要研究不同排数下焊钉连接件的受力性能.

本文进行了 5 组不同排数的焊钉推出试验, 分析研究了不同排数焊钉的受力性能.

1 连接件推出试验

目前相关规范给出了关于标准推出试验的建议试验方法, 而关于多排焊钉连接件力学性能测试的方法没有相关的规范规定. 为了能够与标准推出试验结果进行对比, 本文在测试多排焊钉连接件力学

性能时采用了标准推出试验的方法。

1.1 试件设计与制作

本文选取了桥梁结构中常用的直径 22 mm、长度 200 mm 的焊钉进行单钉和多排焊钉力学性能测试。

设计了 1 个标准推出试验试件(编号 SS-2)和 4 个多排焊钉推出试验试件(编号为 GS-12, GS-24, GS-36 和 GS-48), 试件如图 1 所示。试件中焊钉最大排数的选择主要根据现有的压力机的加载能力确定。

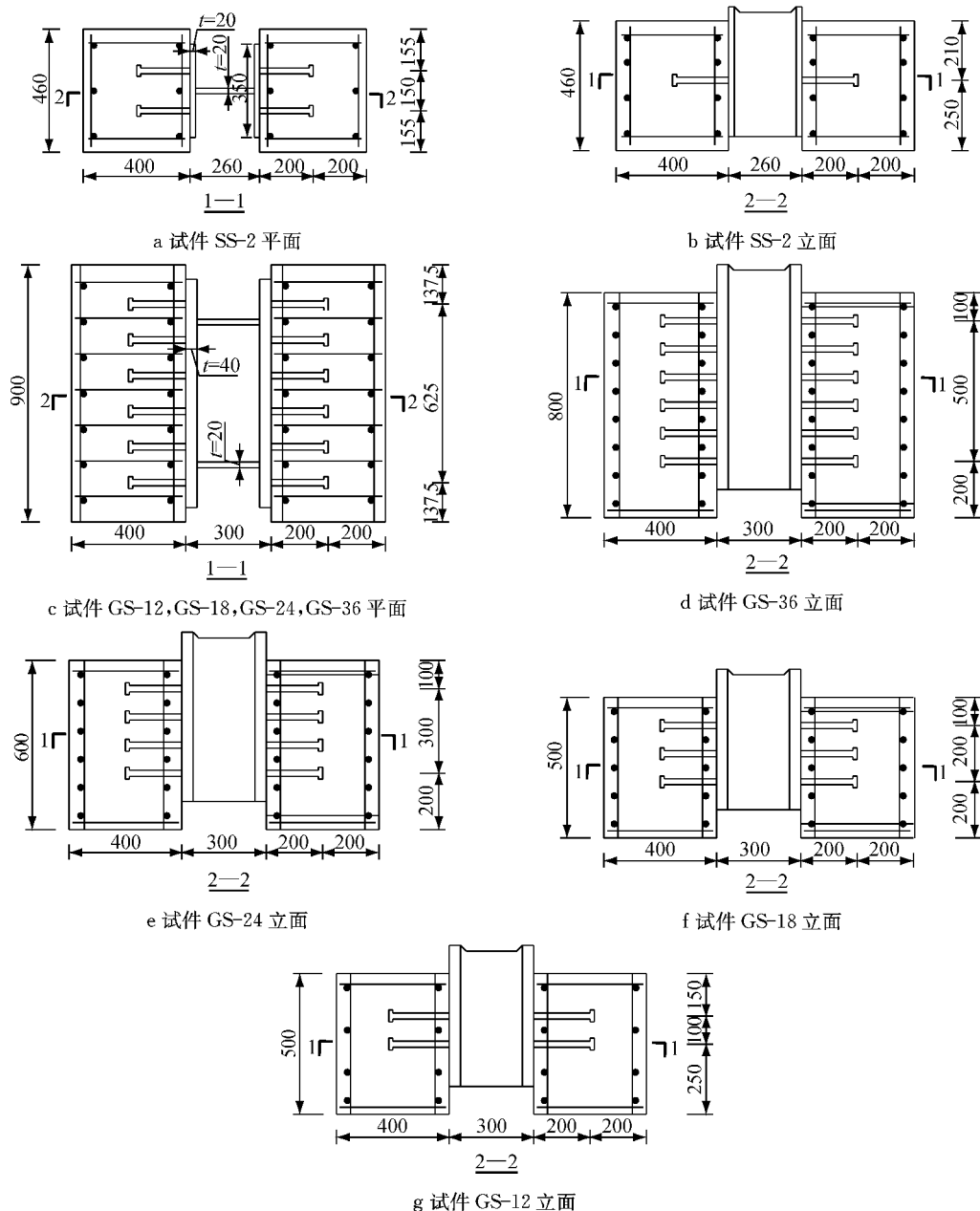


图 1 试件构造图(单位:mm)

Fig.1 Specimens configuration (unit: mm)

试件制作顺序为先把焊钉焊接到工字形钢构件的翼缘上,将钢构件竖立放置绑扎钢筋并支护模板,使焊钉处于侧立位置浇注混凝土,在室外自然条件下养护混凝土。为了减少钢翼缘与混凝土间的黏结和摩擦效应,在钢翼缘上涂抹润滑油。

1.2 加载测试

试件加载采用 20 000 kN FCS 佛力试验机加

载,如图 2 所示。加载时试验机活动端直接压在工字形钢构件的两块翼缘板上,使得试件两侧对称加载。试验加载时为了保证试件底部均匀受力,在试件底部设置细砂垫层。

在试件所有连接件的中心位置设置了 4 个位移计,测试试件中钢与混凝土间的相对滑移,得到连接件的荷载-滑移曲线。



图 2 加载试验体系
Fig.2 Test set-up

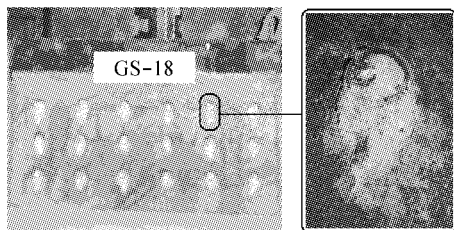
2 试验结果

2.1 材性试验

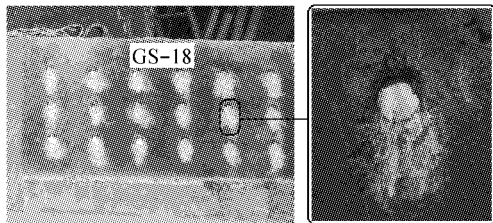
试件中的混凝土采用了干硬性高强度混凝土,试验当天测得混凝土立方体抗压强度为 72 MPa. 直径 22 mm 焊钉的屈服强度和抗拉强度分别为 367 MPa 和 480 MPa,伸长率为 28.8%.

2.2 破坏形态

由于试件中的混凝土采用了干硬性高强度混凝土,所有推出试件的破坏形态均为结合面处焊钉剪断,没有发生混凝土的破坏现象. 焊钉在结合面处的断裂情况如图 3 所示,每个结合面处的焊钉的断裂位置在焊钉焊缝的圆环内,断裂面光滑.



a 钢板界面处



b 混凝土界面处

图 3 连接件的破坏形态

Fig.3 The mode of failure

2.3 荷载-滑移曲线

推出试验中工字形钢构件受到向下的荷载作用后,所有的竖向力由钢构件与混凝土实体块间的焊钉以剪力的形式承担,焊钉发生剪切变形,焊钉的剪切变形即为钢与混凝土间的相对滑移. 因此,荷载-

滑移关系是直接反映焊钉抗剪性能的重要指标. 图 4a~4e 是本次试验试件的荷载-滑移曲线. 图中横坐标为每个试件上 4 个位移计的平均值. 从图中可以看出,所有推出试验的荷载-滑移曲线由三阶段组成,即弹性上升阶段、塑性上升阶段和下降阶段. 其中弹性上升阶段,荷载和滑移成线性关系,最大弹性荷载约为极限荷载的 40%~50%,该阶段中的焊钉刚度较大,滑移量增长较小但荷载增长较快. 在塑性上升阶段,荷载-滑移曲线呈现出明显的转折段,在该阶段中焊钉的刚度明显减少,滑移量增长较快但荷载增加较少,所有试件呈现出良好的延性. 当试件达到最大承载力后进入荷载下降阶段,该阶段荷载下降速度较快,其中单钉试件的变形量明显比多排焊钉试件的变形量小.

由每个试件的总体荷载和试件中连接件的数量进一步得到了单个焊钉平均荷载-滑移曲线,如图 4f 所示. 由图 4f 可以看出,不同试件的荷载-滑移曲线有一定的差别,其中弹性阶段均比较接近,但塑性阶段差别较大.

2.4 剪切承载力和极限滑移

所有试件的极限抗剪承载力 P_t 、单钉抗剪承载力 P_u 、极限抗剪承载力对应的滑移 S_u 以及最大滑移 S_{max} 结果见表 1. 从表中可以看出,焊钉排数对焊钉的承载力有较大的影响,相对于试件 SS-2 单钉承载力,试件 GS-12,GS-18,GS-24 和 GS-36 试件的单钉承载力分别下降了 7.0%,11.5%,12.2% 和 13.6%,随着焊钉排数的增加,单钉承载力降低程度增大. 由此可见,焊钉排数对焊钉静力是不可忽视的.

表 1 试件试验结果

Tab.1 Test results of specimens

试件编号	P_t /kN	P_u /kN	S_u /mm	S_{max} /mm
SS-2	792.3	198.1	6.66	8.06
GS-12	4 423.2	184.3	6.25	13.11
GS-18	6 310.8	175.3	6.96	14.09
GS-24	8 347.2	173.9	6.02	10.55
GS-36	12 319.2	171.1	5.27	10.06

从表 1 可以看出,焊钉排数对 S_u 的影响不明显,除了试件 GS-36 外,其他试件的 S_u 均超过了 6 mm. 根据 Eurocode-4^[9] 规定,当一个连接件的特征滑移量(荷载下降到极限承载力 85% 时对应的滑移量)超过 6 mm 时可以视其为延性连接件. 从图 4e 可以看出,试件 GS-36 的特征滑移量已经大于 6 mm. 由此可见,焊钉排数不改变焊钉作为延性连接件的性质.

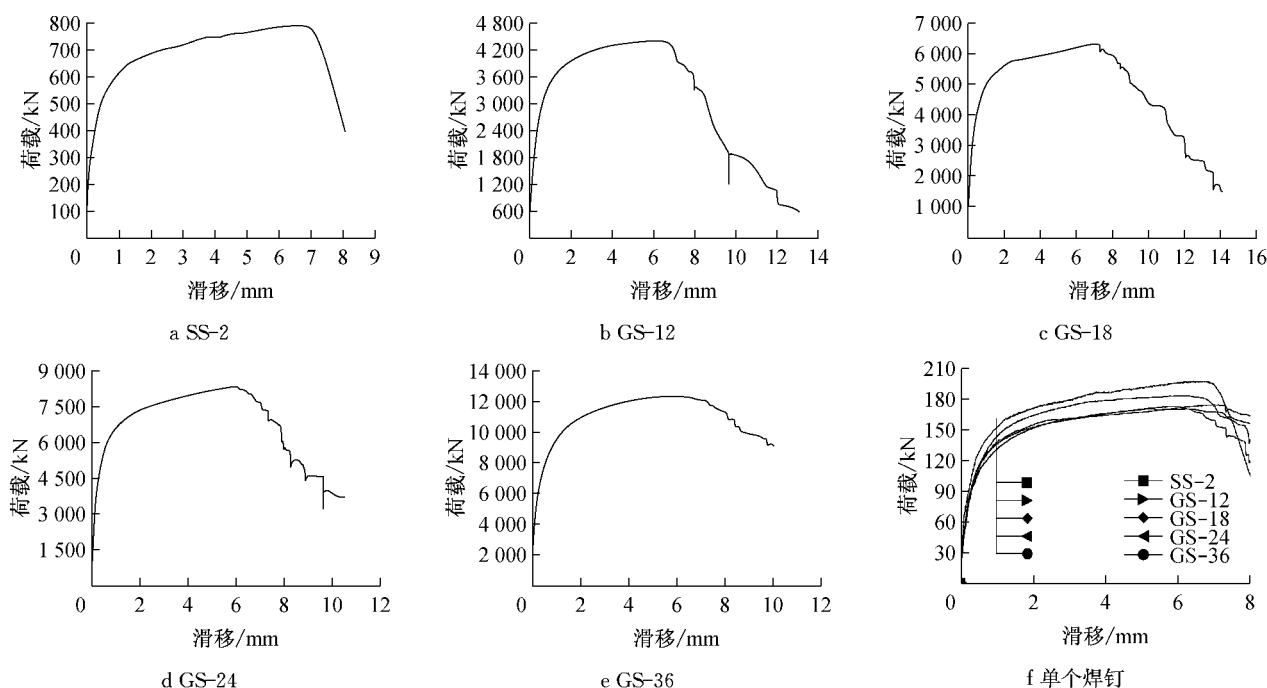


图 4 荷载-滑移曲线

Fig.4 Load-slip curves

3 试验结果讨论

3.1 荷载-滑移表达式

根据 Eurocode-4 对延性连接件规定特征滑移量大于 6 mm 的要求,绘制荷载-滑移曲线如图 5 所示.图中横坐标取值范围为 0~6 mm,纵坐标为单钉荷载 P 与单钉抗剪承载力 P_u 的比值.

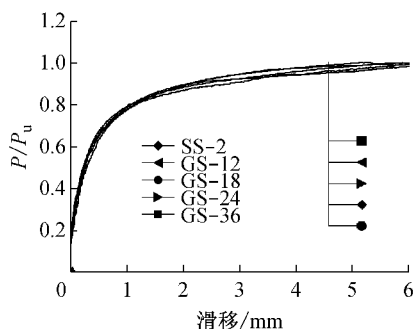


图 5 量纲一化荷载-滑移曲线

Fig.5 Unit load-slip curves

研究人员根据试验结果,对荷载-滑移关系进行了非线性回归,得到了相关表达式.

文献[3]给出的表达式如下:

$$\frac{P}{P_u} = \frac{2.24(s-0.058)}{1+1.98(s-0.058)} \quad (\text{普通混凝土}) \quad (1)$$

$$\frac{P}{P_u} = \frac{4.44(s-0.031)}{1+4.24(s-0.031)} \quad (\text{高强度混凝土}) \quad (2)$$

式(1),(2)中: P 为焊钉受到的剪力; P_u 为焊钉的极限承载力; s 为滑移量.

文献[10]给出的表达式如下:

$$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.55s})^{0.3} \quad (3)$$

文献[11]给出的表达式如下:

$$\frac{P}{P_u} = \frac{s}{0.5 + 0.97s} \quad (4)$$

文献[12]给出的表达式如下:

$$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.5s})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{单钉}) \quad (5)$$

$$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.7s})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{多钉}) \quad (6)$$

根据图 5 中各个试件的荷载-滑移曲线特点,本文给出高强度混凝土包裹焊钉的荷载-滑移关系表达式为

$$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.61s})^{0.34} \quad (7)$$

为了验证不同的焊钉荷载-滑移曲线关系表达式在多排焊钉中的适用性,根据式(2)~(7)绘制各个试件的荷载-滑移试验曲线如图 6 所示.从图 6 可以看出,各个表达式的形状与试验曲线形状相似,其中式(2)和式(4)的结果与试验曲线的误差稍大,式(7)的结果与试验最接近.

3.2 抗剪承载力

目前 Eurocode-4^[9], AASHTO LRFD^[13] 和我国 GB50017—2003^[14] 等规范给出了单个焊钉抗剪承

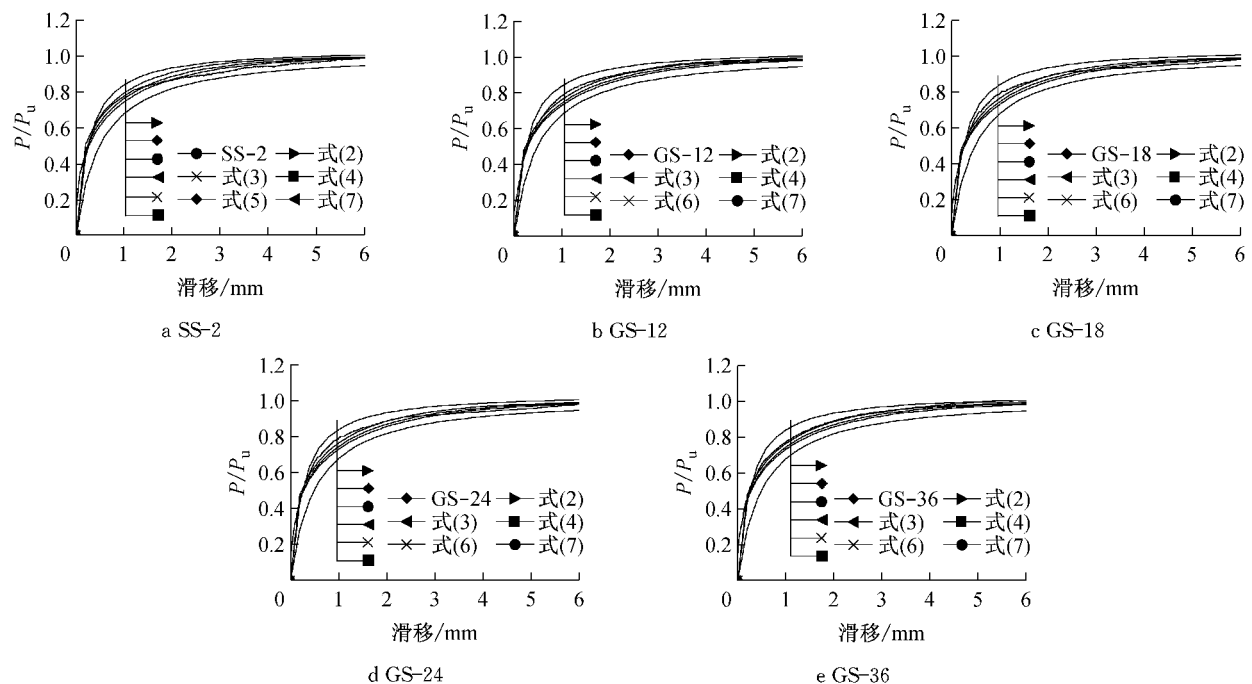


图 6 试验结果与回归曲线

Fig.6 Test results and regression curves

承载力 P_u 的计算方法。

Eurocode-4 的表达式如下:

$$P_u = \min\{0.8f_u A_{sv}, 0.29d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}\} \quad (8)$$

式中: f_u 为焊钉材料的极限抗拉强度,不大于 500 MPa; A_{sv} 为焊钉截面面积; d 为焊钉直径; f_{ck} 为混凝土圆柱体抗压强度; E_{cm} 为混凝土弹性模量。

AASHTO LRFD 的表达式如下:

$$P_u = 0.5A_{sc} \sqrt{f'_c E_c} \leq 0.85A_{sc} f_u \quad (9)$$

式中: A_{sc} 为圆柱头焊钉截面面积; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; E_c 为混凝土弹性模量; f_u 为焊钉材料的极限抗拉强度。

我国 GB50017—2003 规范的表达式如下:

$$P_u = 0.43A_s \sqrt{f_c E_c} \leq 0.7A_s f_u \quad (10)$$

式中: A_s 为圆柱头焊钉截面面积; f_c 为混凝土立方体抗压强度; E_c 为混凝土弹性模量; f_u 为焊钉材料的极限抗拉强度。

表 2 中给出了不同计算方法与试验结果的对比情况。从表中可以看出,我国规范预估的焊钉极限承载力最低,美国的最高,各个规范计算的承载力均小于试验测试值。由于试验测试值与各个规范计算值之间的比值受到焊钉排数的影响,因此在多排焊钉设计承载力取值时必须考虑多排焊钉对承载力降低的影响。

表 2 试件试验结果和计算结果

Tab.2 Test results and the calculated values of specimens

试件编号	$P_{u,T}/\text{kN}$	$P_{u(8)}/\text{kN}$	$P_{u(9)}/\text{kN}$	$P_{u(10)}/\text{kN}$	$P_{u,T}/P_{u(8)}$	$P_{u,T}/P_{u(9)}$	$P_{u,T}/P_{u(10)}$
SS-2	198.1	146	155.1	127.7	1.36	1.28	1.55
GS-12	184.3	146	155.1	127.7	1.26	1.19	1.44
GS-18	175.3	146	155.1	127.7	1.20	1.13	1.37
GS-24	173.9	146	155.1	127.7	1.19	1.12	1.36
GS-36	171.1	146	155.1	127.7	1.17	1.10	1.34

注: $P_{u,T}$ 为单钉抗剪承载力试验值; $P_{u(8)}$, $P_{u(9)}$, $P_{u(10)}$ 分别为式(8)~(10)单钉抗剪承载力计算值。

根据试验中多排焊钉相对于单个焊钉承载力降低影响程度,拟合得到焊钉承载力折减系数 α 的表达式如下:

$$\alpha = -0.0022n^3 + 0.0318n^2 - 0.1537n + 1.151 \geq 0.85 \quad (11)$$

式中: n 为焊钉的排数。

式(11)与试验结果对比如图 7 所示。

对多排焊钉在采用现有方法计算其承载力时,需考虑焊钉排数对单钉承载力的降低系数,使焊钉的抗剪极限承载力与抗剪设计强度具有足够的安全系数。

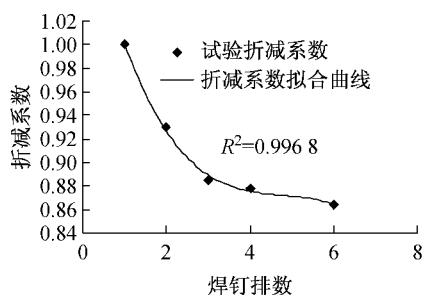


图 7 焊钉强度折减系数

Fig. 7 Reduction coefficient of the connector shear capacity

4 结论

通过 1 组单钉试验和 4 组不同排数的多排焊钉推出试验得到如下结论:

(1) 不同排数焊钉的荷载-滑移曲线呈现出明显的线弹性阶段、塑性阶段和荷载下降阶段. 不同排数的焊钉对试件的弹性刚度影响较小, 但对塑性阶段的刚度影响较大. 所有试件的特征滑移量均超过了 6 mm, 表明多排焊钉没有改变单个焊钉延性性质.

(2) 不同排数焊钉对单个焊钉的抗剪承载力有较大的影响, 随着焊钉排数的增加焊钉的抗剪强度下降, 同时焊钉抗剪强度下降幅值随着焊钉排数的增加趋向稳定, 焊钉强度下降幅值在 15% 以内.

(3) 根据焊钉的荷载-滑移试验曲线, 提出了多排焊钉的荷载-滑移关系表达式, 计算结果与试验值吻合.

(4) 根据现有不同规范中焊钉抗剪承载力计算方法, 提出了对于多排焊钉连接件的抗剪承载力需考虑其强度折减系数, 从而保证焊钉的极限抗剪强度和设计抗剪强度之间留有足够的安全系数.

参考文献:

[1] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
NIE Jianguo. Steel-concrete composite structure: experiment,

theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005.

- [2] Viest I M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete-steel T-beams [J]. Journal of American Concrete Institute, 1956, 27(8): 875.
- [3] Li An, Krister C. Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 36(1): 15.
- [4] Shim Changsu, Lee Pilgoo, Yoon Taeyang. Static behavior of large stud shear connectors [J]. Engineering Structure, 2004, 26: 1853.
- [5] Lee Pilgoo, Shim Changsu, Chang Sungpil. Static and fatigue behavior of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 1270.
- [6] Nguyen Huuthanh, Kim Seungeock. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65: 1909.
- [7] Ellobody Ehab, Young Ben. Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 682.
- [8] 王巍, 苏庆田, 吴冲. 施工过程对连续组合梁中剪力连接件受力的影响 [C] // 第 20 届全国结构工程学术会议论文集: 第二册. 北京: 清华大学出版社, 2011: 372-378.
WANG Wei, SU Qingtian, WU Chong. Mechanical behavior of shear connector in continuous composite girder under construction [C] // Proceedings of the 20th National Conference on Structural Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 372-378.
- [9] Eurocode-4 EN 1994 Design of composite steel and concrete structures. part 1-1 general rules for buildings [S]. Brussels: CEN-European Committee for Standardisation, 2004.
- [10] Wojciech L, Ernest K. Behavior of composite beams prestressed with external tendons: experimental study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 1353.
- [11] XUE Weichen, DING Min, WANG Hua, et al. Static behavior and theoretical model of stud shear connectors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6): 623.
- [12] 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.
- [13] AASHTO LRFD. Bridge design specifications [M]. 3rd ed. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [14] Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.