

# 高强度砂浆群钉连接件抗剪承载力试验

苏庆田, 李 雨

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 在混凝土桥面板预留孔浇筑高强度砂浆包裹群钉连接件以实现钢梁与混凝土有效结合. 为了得到高强度砂浆包裹的焊钉的剪切强度及分析不同群钉布置形式对抗剪承载力的影响, 进行了 1 组单钉基本力学试验和 5 组不同群钉布置形式的焊钉力学性能试验. 试验结果表明: 采用高强度砂浆包裹焊钉的连接方式可靠, 焊钉具有较高的抗剪强度, 单钉承载力平均值为 197.2 kN. 在群钉连接件中不同的焊钉布置方式对承载力有一定影响, 总体上随焊钉数量的增多, 平均的单钉承载力呈下降趋势, 焊钉数量最多的 NS25 试件, 其平均单钉承载力为 160kN, 为单钉推出试验值的 81%. 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:** 剪力钉连接件; 推出试验; 群钉; 高强度砂浆; 抗剪强度

**中图分类号:** TU312

**文献标志码:** A

## Shear Capacity of Grouped Stud Connector Embedded by High Strength Mortar

SU Qingtian, LI Yu

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

**Abstract:** Using the high strength mortar to pour into the hole prepared in the concrete bridge deck to fulfill the effective connection of steel girder and concrete. 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 in some degree. In order to test the shearing strength of the studs wrapped by the high strength mortar and compare the influence of group studs layout form on its shear strength, one group of single stud specimen and five groups specimens with different studs layout were carried out. The test results show that the connecting method by wrapping the studs with high strength mortar is reliable, and the shearing strength of the studs is high, and the average capacity of

single stud is 197.2 kN. There are some influences on the shearing capacity of different group studs layout form. With the increase of stud row number the average single stud shear capacity is decline. The specimen NS25 with the maximum stud numbers has the average single stud shear capacity of 160kN, which is 81% of the capacity of the single stud test. According to the load-slip curves of multi-row stud, the expression of load-slip relation of multi-row stud is proposed. Compared to testing results, the expression has a better match with the experimental values.

**Key words:** stud shear connector; push-out test; group studs; high strength mortar; shearing strength

在连续组合结构桥梁的负弯矩区, 顶板混凝土受拉容易开裂. 为了避免混凝土开裂或减少混凝土裂缝宽度, 可采取一系列方法, 如施加预应力、支座顶升与回落、预弯钢梁等<sup>[1]</sup>, 其中在负弯矩区混凝土中施加预应力是最常用的方法. 在常规的钢-混凝土组合梁由于混凝土和钢梁先结合为一体, 在施加预应力时有较大部分的预应力会转移到钢梁上, 使预应力施加效果降低. 因此, 文献<sup>[2]</sup>提出后结合组合梁. 后结合组合梁是在钢梁上浇筑混凝土桥面板, 桥面板按一定间距预留孔洞, 孔洞内布置了连接在钢梁上翼缘的焊钉连接件, 此时钢梁与混凝土没有被连接件连接; 当混凝土达到一定强度后张拉桥面板内预应力钢筋, 再在桥面板预留孔洞内浇筑高强度砂浆包裹孔洞内部的焊钉, 等砂浆达到一定强度后就实现了混凝土桥面板与钢梁的连接. 由此可见, 在后结合组合梁中施加的预应力能够全部施加到混凝土而不会转移到钢梁中, 使得预应力的施加效率高. 但在后结合组合梁中钢与混凝土之间的连接方式与常规的组合梁有较大的不同, 后结合组合梁是靠按一定间距布置的群钉实现钢与混凝土的结合. 目前

关于焊钉连接件承载力已经开展大量的研究<sup>[9-7]</sup>,得到了单个焊钉连接件的承载力计算方法和焊钉的荷载-滑移关系. 群钉连接件的受力与在梁长度方向均匀布置焊钉的受力不同,文献[8-9]对焊钉群排效应进行了试验研究,通过对不同直径的焊钉、不同焊钉间距等情况下的多排焊钉承载力试验研究,得到焊钉的群排效应对其承载力有影响,群钉承载力比单钉承载力要下降 10%~15%. 以前主要是针对混凝土包裹的焊钉特性研究,而对于高强度砂浆包裹的焊钉特性研究较少. 采用高强度砂浆来包裹焊钉方便施工,但其在组合梁中的连接可靠程度值得仔细研究.

进行了 1 组单钉基本力学试验和 5 组不同群钉布置形式的焊钉力学性能试验,测试高强度砂浆包裹焊钉的抗剪力性能,分析研究了不同群钉布置形式的受力性能.

## 1 连接件推出试验

目前相关规范给出了标准推出试验的建议试验

方法<sup>[10]</sup>,而群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的结果进行对比,在测试群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

选取了桥梁结构中常用的直径 22 mm,长度 200 mm 的焊钉进行单钉和群钉力学性能测试. 设计了 1 个标准推出试验试件(编号 NS2)和 5 组不同布置形式群钉推出试验试件(编号为 NS9, NS12, NS16, NS20 和 NS25),试件如图 1 所示. 试件 NS9, NS12, NS16, NS20 和 NS25 的群钉分别采用 3×3, 4×3, 4×4, 5×4 和 5×5(数值分别代表横向行数×纵向列数)的布置形式,群钉中焊钉的行间距为 110 mm,列间距为 90 mm. 每组有 3 个相同的试件,共计 18 个试件,每组试件的具体信息见表 1.

试件制作顺序为先把焊钉焊接到钢构件的翼缘上,并制作带预留孔的混凝土块,等混凝土达到一定强度后把混凝土与钢结构拼装到一起. 为了保证两侧的砂浆能够同时浇筑,本次试验把焊钉处于侧立位置浇筑砂浆,因此在混凝土块的顶部开设砂浆浇

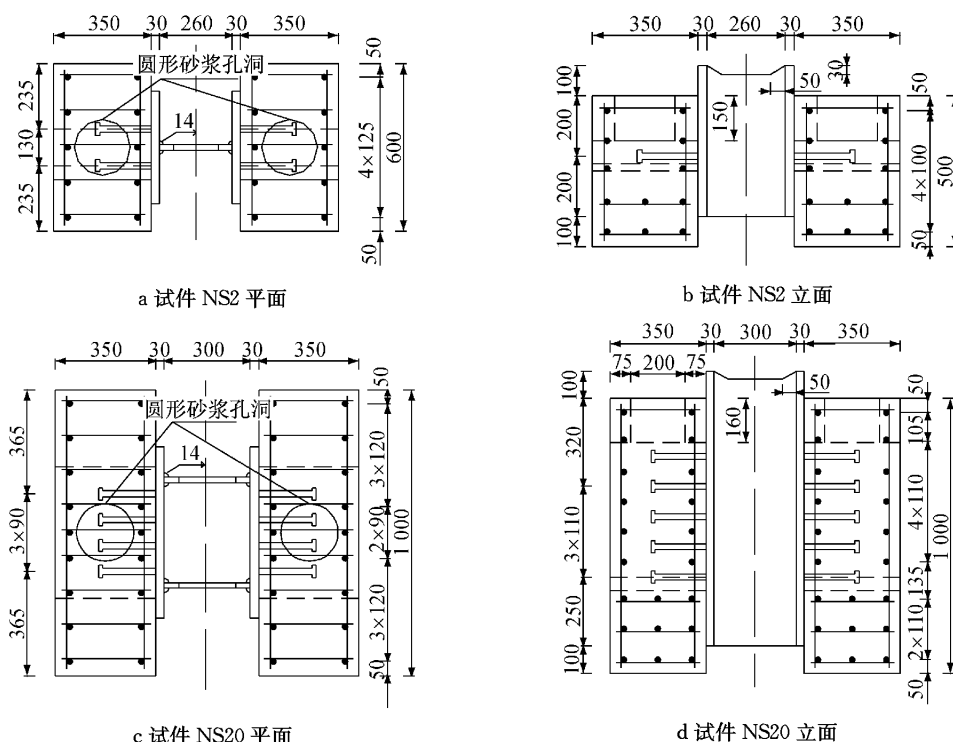


图 1 试件构造图(单位:mm)

Fig.1 Specimens configuration (unit: mm)

筑孔,使得砂浆从上而下流入预留孔中. 浇筑完成后,试件在室外自然条件下养护.

### 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.

表1 连接件试件分组

Tab.1 Grouping of specimens

试件组	试件数/个	焊钉数/个	焊钉 $\phi$ /mm
NS2	3	4	22×200
NS9	3	18	22×200
NS12	3	24	22×200
NS16	3	32	22×200
NS20	3	40	22×200
NS25	3	50	22×200

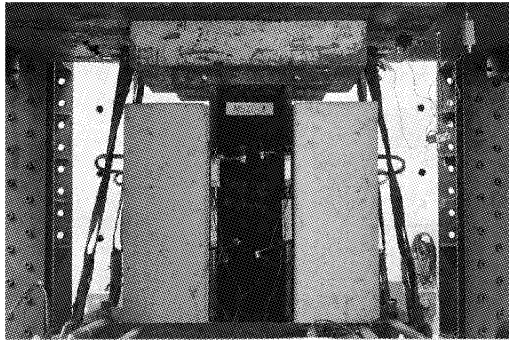
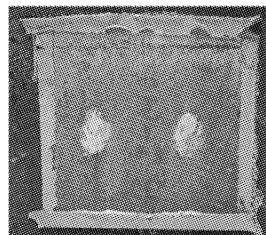


图2 加载试验体系

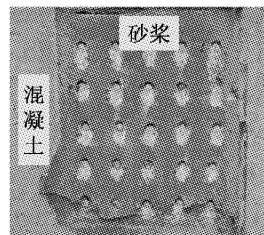
Fig.2 Test set-up



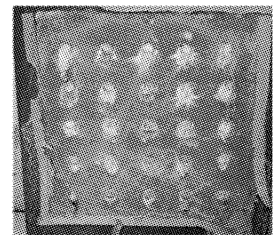
a 试件 NS2 界面处混凝土



b 试件 NS2 界面处钢板



c 试件 NS25 界面处混凝土



d 试件 NS25 界面处钢板

图3 连接件的破坏形态

Fig.3 Mode of failure

### 2.3 荷载-滑移曲线

推出试验中测试得到的荷载-滑移关系是直接反映焊钉抗剪性能的重要指标. 图 4a—4f 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 4 可以看出, 所有推出试验的荷载-滑移曲线由 2 阶段组成, 即弹性上升阶段和塑性上升阶段. 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.

每组试件中 3 个试件的荷载-滑移曲线总体上比较接近, 但是个别组别的 3 个试件的荷载-滑移曲线略有不同, 这主要是由于试件中焊钉的焊接质量的不同造成的, 后文将详细分析.

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.

## 2 试验结果

### 2.1 材性试验

为了与常规的组合梁强度相匹配, 试件预留孔洞的砂浆采用高强度砂浆, 试验当天测得立方体抗压强度为 62.1 MPa. 直径 22 mm 焊钉的屈服强度和抗拉强度分别是 389 MPa 和 519 MPa.

### 2.2 破坏形态

所有推出试件的破坏形态均为结合面处焊钉剪断, 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. 从图 3 中看出试件的填充砂浆与混凝土明显的层次界面, 填充砂浆及混凝土均没有发生破坏现象.

### 2.4 剪切承载力和极限滑移

所有试件的极限抗剪承载力  $P_t$ , 平均单钉抗剪承载力  $P_u$ , 极限抗剪承载力对应的滑移  $S_u$  的具体结果见表 2. 从表中可以看出, 在不同的焊钉布置方式中随着焊钉数量的增多  $P_t$  在增大, 但  $P_u$  在降低. 相比于试件 NS2 的  $P_u$ , 试件 NS9, 试件 NS12, 试件 NS16, 试件 NS20 和试件 NS25 的  $P_u$  分别降低 3.0%, 10.4%, 9.2%, 15.6% 和 18.9%. 这说明采用群钉的抗剪承载力受到其布置形式的影响较大, 不能简单把所有焊钉的单个抗剪承载力总和作为群钉的抗剪承载力, 必须考虑焊钉数量的影响.

从表 2 可以看出焊钉排数对  $S_u$  有一定的影响, 随着焊钉数量的增加  $S_u$  呈现减少的趋势. 根据 Eurocode-4<sup>[10]</sup> 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 时可以视为延性连接件. 从表 2 可以看出, 所有试件特征滑移量已经大于 6 mm. 由此可见, 群钉连

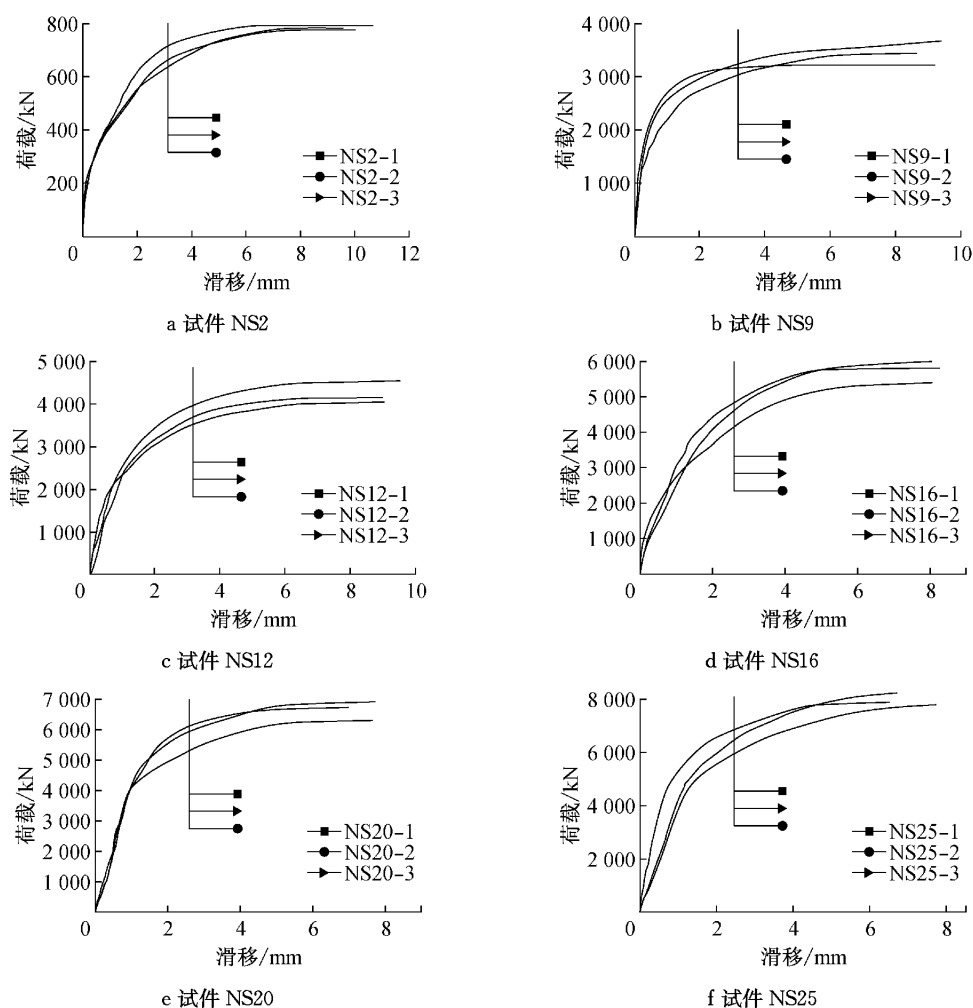


图 4 荷载-滑移曲线

Fig.4 Load-slip curves

表 2 试件试验结果

Tab.2 Test results of specimens

试件排数	试件编号	$P_t$ /kN	平均值/ kN	$P_u$ /kN	平均值/ kN	$S_u$ / mm	平均值/ mm
1	NS2	1	799.6	199.9		10.71	
		2	784.8	196.2	197.2	9.59	10.16
		3	781.5	195.4		10.18	
3	NS9	1	3 669.1	203.8		9.41	
		2	3 442.8	191.3	191.3	8.66	9.10
		3	3 218.9	178.8		9.23	
4	NS12	1	4 539.2	189.1		9.52	
		2	4 037.5	168.2	176.6	9.05	9.19
		3	4 136.5	172.4		8.99	
	NS16	1	5 981.1	186.9		8.06	
		2	5 816.3	181.8	179.0	8.27	8.13
		3	5 383.0	168.2		8.06	
5	NS20	1	6 758.1	169.0		6.98	
		2	6 303.2	157.6	166.4	7.84	7.52
		3	6 912.2	172.8		7.75	
	NS25	1	7 803.0	156.0		7.88	
		2	8 258.0	165.1	160.0	6.82	7.08
		3	7 930.0	158.6		6.53	

接中焊钉的布置形式不改变焊钉作为延性连接件的性质。

在相同组的3个试件的荷载-滑移曲线不同也直接反映在表2中的承载力中,如试件 NS9-3(表示试件 NS9 组的第3个试件)的承载力明显比试件 NS9-1 和试件 NS9-2 的低,这主要是由于焊钉焊接质量的不同造成的。尽管目前的《电弧螺柱焊用圆柱

头焊钉》(GB10433—2002)<sup>[11]</sup>中规定了焊钉连接件的焊接要求,如直径为22 mm的焊钉,焊接后焊趾连续,焊趾圆周外径为29 mm,焊趾高为6 mm,但是实际焊接过程中不可能保证每个焊钉的焊接质量都达到完全相同的程度。图5给出了试件 NS9-3 中有3个焊钉的焊接质量存在肉眼可以观察到的缺陷,这些缺陷直接影响了群钉抗剪承载力。

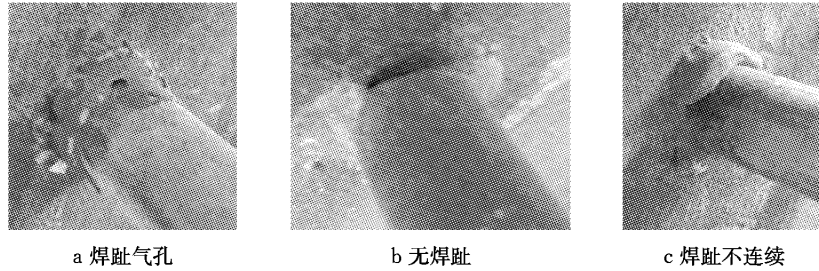


图5 焊钉焊接缺陷

Fig.5 Welding flaws of studs

尽管每组中3个试件所有焊钉的焊接质量不相同,使得3个试件的承载力不同,根据 Eurocode-4<sup>[1]</sup>规定同一组相同试件的承载力与平均值相差不应超过10%,可视为试验结果有效。该试验中单个试件承载力与组平均承载力最大相差为7.1%,说明试验结果是有效的。

### 3 试验结果讨论

#### 3.1 荷载-滑移表达式

根据 Eurocode-4<sup>[10]</sup>对延性连接件规定特征滑移量大于6 mm的要求,绘制荷载-滑移曲线图6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。

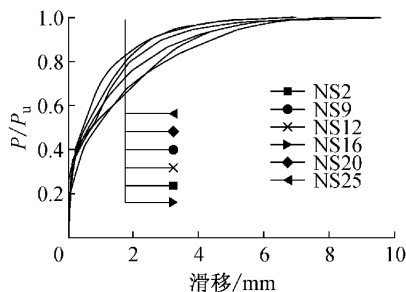


图6 量纲化荷载-滑移曲线

Fig.6 Unit load-slip curves

目前已有相关混凝土包裹的焊钉的荷载-滑移关系表达式。文献[4]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[12]给出的表达式如下:

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

文献[13]给出的表达式如下:

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

文献[14]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6中各个试件的荷载-滑移曲线特点,对荷载-滑移关系进行了非线性回归,得到高强度砂浆包裹焊钉的荷载-滑移关系表达式为

$$\frac{P}{P_u} = (1 - e^{-0.51s})^{0.50} \quad (7)$$

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)~式(7)绘制各个试件的荷载-滑移试验曲线如图7所示。从图7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<sup>[10]</sup>, AASHTO LRFD<sup>[15]</sup> 和中国 GB50017—2003<sup>[16]</sup>等规范中给出了混凝土包裹单

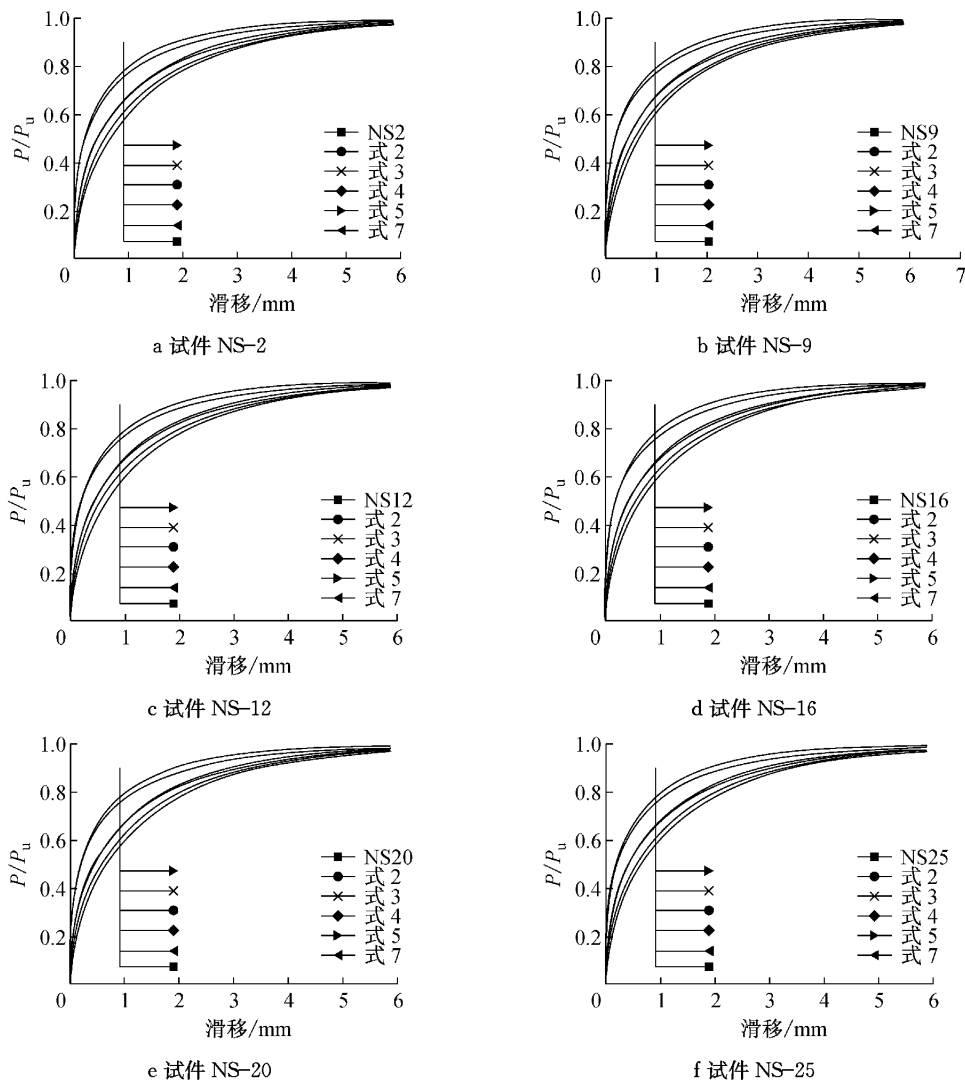


图7 试验结果与回归曲线

Fig.7 Test results and regression curves

个焊钉抗剪承载力  $P_u$  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。

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。

将试验中高强度砂浆的材性代替以上各表达式中混凝土的材性，表 3 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单钉试验试件 SS-2 的测试值，但是随着焊钉数量的增加，试件中平均单钉承载力在降低，在群钉连接件设计承载力取值时必须考虑焊钉布置方式对承载力降低的影响，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。由于试验群钉布置形式数量有限难以给出具体的焊钉连接数量对抗剪承载力的折减系数，后续将进一步深入研究该问题。

## 4 结论

对高强度砂浆包裹的焊钉连接件进行了 1 组单

表3 试件试验结果和计算结果

Tab.3 Test results and 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	192.7	152.0	167.7	138.1	1.27	1.15	1.40
NS-9	191.3	152.0	167.7	138.1	1.26	1.14	1.39
NS-12	176.6	152.0	167.7	138.1	1.16	1.05	1.28
NS-16	179.0	152.0	167.7	138.1	1.18	1.07	1.30
NS-20	166.4	152.0	167.7	138.1	1.09	0.99	1.20
NS-25	160.0	152.0	167.7	138.1	1.05	0.95	1.16

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)—式(10)单钉抗剪承载力计算值。

钉推出试验和5组不同布置方式的群钉推出试验得到如下结论:

(1) 采用高强度砂浆包裹焊钉连接件可以有效地把钢结构中力传递到混凝土中,试验表明所有试件的破坏均为焊钉根部的剪断,没有砂浆提前破坏,说明在实际工程中可以采用高强度砂浆作为焊钉和混凝土间的连接介质。

(2) 焊钉布置形式对群钉的抗剪承载力有较大的影响,随着焊钉数量的增加,群钉中平均单个焊钉的承载力在降低,不同焊钉布置形式均能保持焊钉的延性性质。

(3) 根据焊钉的荷载-滑移试验曲线,提出了高强度砂浆包裹群钉的荷载-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计算高强度砂浆包裹群钉连接件的承载力时,须考虑连接件数量对其抗剪承载力的折减,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] 黎丁实. 后结合预应力钢-混凝土组合曲线连续梁桥受力特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2014.  
LI Dingshi. Study on mechanical characteristics of post-combined prestressed composite continuous curved beam bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [3] Viest I M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete-steel T-beams [J]. Journal of American Concrete Institute, 1956, 27(8): 875.
- [4] An Li, Cederwall Krister. Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 36(1): 15.
- [5] Shim Changsu, Lee Pilgoo, Yoon Taeyang. Static behavior of large stud shear connectors[J]. Journal of Bridge Engineering ASCE, 2004, 26: 1853.
- [6] Lee Pil-Goo, 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.
- [7] Nguyen Huu Thanh, Kim Seung Eock. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65: 1909.
- [8] Okubo N, Kurita A, Komatsu K, et al. Experimental study on static and fatigue characteristics of grouped stud[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 48(A): 1391.
- [9] Okada J, Yoda T, Lebet J P. A study of the grouped arrangement of stud connectors on the shear strength behavior [J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake, 2004, 766: 81.
- [10] 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.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB10433—2002 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
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 Standard Press, 2003.
- [12] Lorenc Wojciech, Kubica Ernest. Behavior of composite beams prestressed with external tendons: experimental study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 1353.
- [13] XUE Weichen, DING Min, WANG Hua, et al. Static behavior and theoretical model of stud shear connectors[J]. Journal of Bridge Engineering ASCE, 2008: 623.
- [14] 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.
- [15] AASHTO LRFD. Bridge design specifications [M]. 3rd ed. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
Ministry of Construction of China. GB50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.