

文章编号: 1001-4888(2018)04-0583-09

## Q690 高强钢螺栓抗剪连接承载性能试验研究<sup>\*</sup>

郭宏超<sup>1</sup>, 肖枫<sup>1</sup>, 李炎隆<sup>2</sup>, 刘云贺<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西西安 710048; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西西安 710048)

**摘要:** 通过对 22 个 Q690 高强钢螺栓连接接头的静力拉伸试验, 综合分析了其连接的破坏形态、受力性能和匹配性, 讨论了关键参数对承载性能的影响。研究表明: 螺栓横向布置时, 承载力随螺栓端距、边距和间距的增大呈线性增长; 螺栓纵向布置时, 连接的承载力仅随边距增大而增大, 螺栓端距和间距的影响不超过 5%。螺栓孔径对承载力的影响主要体现在净截面面积上, 螺栓强度等级会影响连接的初始滑移荷载, 而对极限承载力影响较小, 与 Q690 钢材匹配的高强钢螺栓建议取 10.9 级以上。EC3 规范能较好地反映端距和边距的影响关系, 但偏于保守, ANSI 规范的拟合结果与试验值更接近。上述研究结果可为国产高强度钢材螺栓连接的设计理论和方法提供基础数据。

**关键词:** 高强度钢材; 抗剪连接; 净截面; 匹配性; 螺栓连接

**中图分类号:** TU391

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-17-046

### 0 引言

屈服强度超过 460MPa 的钢材称为高强度钢材, 与普通钢材相比, 高强度钢材具有材质均匀、刚度大、强度高等优点, 但国内规范对高强钢连接设计方法中没有具体的标准参照, 现有设计方法不能较好地预测螺栓孔的端距、边距以及孔距对高强钢板承压性能的影响。

近年来, 国内外学者对高强钢螺栓连接的受力性能进行了相关试验, 主要研究了连接接头承载力及钢板孔壁承压, 分析端距、边距和螺栓间距大小对接头承载力的影响。Može 等<sup>[1,2]</sup>研究了 S690 高强钢连接接头的延性和承载力, 并与欧洲规范设计结果对比, 发现规范设计值偏保守, 提出了更加准确合理的承载力计算公式。Puthli 等<sup>[3]</sup>对高强钢螺栓连接孔壁承压性能、破坏形式进行预测, 分析了螺栓端距和边距对承载性能的影响。Može 和 Beg<sup>[4]</sup>进行了抗剪试验研究, 并建立有限元数值模型验证试验结果, 分析了孔距的影响, 建议设计时考虑不同螺栓力的分布规律及影响。Kim 等<sup>[5]</sup>研究了不同屈强比下, 螺栓端距、边距和螺栓间距之间的关系。石永久<sup>[6,7]</sup>等对 Q460 高强钢螺栓连接抗剪性能进行了试验, 讨论了螺栓端距、间距和板厚对连接性能的影响, 并给出了设计建议。

本文对两组 Q690 高强度钢材螺栓连接试件进行静力拉伸试验, 研究螺栓横排和纵排下试件的承载性能, 讨论了螺栓强度等级、端距、边距、孔径等参数对承载性能的影响规律, 进而提出适用于高强度钢材螺栓连接的构造建议。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308454); 西安理工大学科技新星项目

第一作者: 郭宏超(1981—), 男, 副教授, 博士, 从事高层及超高层钢结构研究和教学工作。Email: ghc-1209@163.com

通讯作者: 李炎隆(1980—), 男, 教授, 博士, 从事水工结构数值仿真研究和教学工作。Email: liyanlong@xaut.edu.cn

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了 A、B 两组螺栓连接试件,如图 1 所示。A 组螺栓横向布置,B 组螺栓纵向布置,通过改变螺栓强度等级、孔径、连接间距等参数综合分析 Q690 高强钢连接接头的受力性能。钢板选用 8mm 厚 Q690D 轧制钢,采用 12.9 级、10.9 级和 8.8 级高强螺栓。

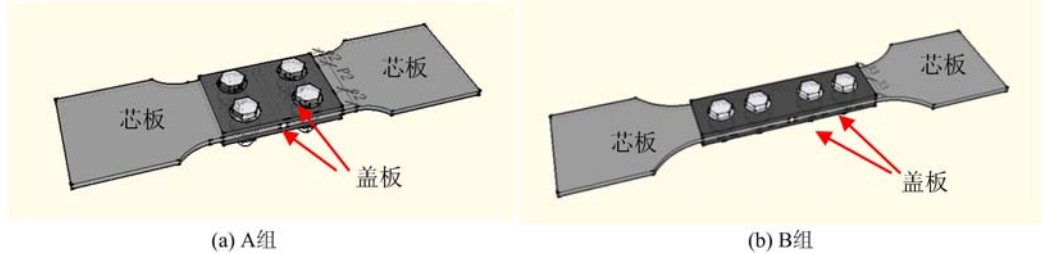


图 1 试件示意图

Fig. 1 Layout of specimen

设计参数:1)端距  $e_1$ , 2)边距  $e_2$ , 3)螺栓间距  $p_2$ , 4)螺栓等级, 5)孔径。GB50017—2003 规定,在普通螺栓连接中  $e_1 \geq 2d_0$ ,  $e_2 \geq 1.5d_0$ ,  $p_2 \geq 3d_0$ 。试件几何尺寸如图 2 所示,详细尺寸见表 1。

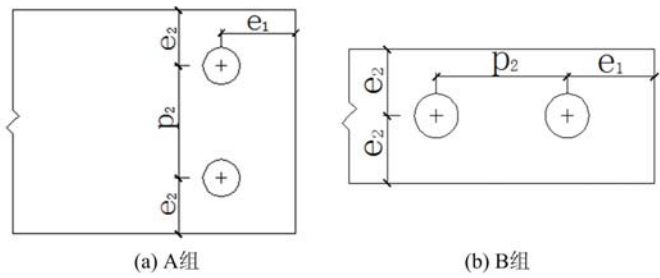


图 2 试件几何参数示意

Fig. 2 Layout of specimen geometry parameters

表 1 试件几何尺寸

Tab. 1 Geometric size of test specimens

| 试件编号        | 螺栓直径 | 螺栓等级 | 厚度/mm | $e_1/d_0$ | $e_2/d_0$ | $p_2/d_0$ |
|-------------|------|------|-------|-----------|-----------|-----------|
| SPE1、SPE12  | M24  | 10.9 | 8     | 2.0       | 1.5       | 3.5       |
| SPE2、SPE13  | M24  | 10.9 | 8     | 2.0       | 1.5       | 3.0       |
| SPE3、SPE14  | M24  | 10.9 | 8     | 2.0       | 1.5       | 2.5       |
| SPE4、SPE15  | M24  | 10.9 | 8     | 2.0       | 2.0       | 3.0       |
| SPE5、SPE16  | M24  | 10.9 | 8     | 2.0       | 1.0       | 3.0       |
| SPE6、SPE17  | M24  | 10.9 | 8     | 2.5       | 1.5       | 3.0       |
| SPE7、SPE18  | M24  | 10.9 | 8     | 1.5       | 1.5       | 3.0       |
| SPE8、SPE19  | M24  | 12.9 | 8     | 2.0       | 1.5       | 3.0       |
| SPE9、SPE20  | M24  | 8.8  | 8     | 2.0       | 1.5       | 3.0       |
| SPE10、SPE21 | M20  | 10.9 | 8     | 2.0       | 1.5       | 3.0       |
| SPE11、SPE22 | M16  | 10.9 | 8     | 2.0       | 1.5       | 3.0       |

1.2 加载装置

试验在西安理工大学结构大厅进行,采用 50 吨 MTS 试验机进行加载。先对试件预加载至 5kN,

然后卸载到零,确保试验设备正常运转后再正式开始,试验加载速率为 1kN/s。试件实际尺寸由游标卡尺测得,位移和应变通过 TDS-303 采集仪记录,实测 Q690D 钢材的力学性能值见表 2,加载装置和测点布置如图 3、图 4 所示。

表 2 钢板的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel plates

| 钢板型号  | 板厚 $t/\text{mm}$ | 屈服强度 $f_y/\text{MPa}$ | 抗拉强度 $f_u/\text{MPa}$ | 弹性模量 $E/\text{GPa}$ | 伸长率 $\delta/\%$ |
|-------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Q690D | 8                | 786.35                | 831.98                | 209.67              | 23.95           |



图 3 加载装置

Fig. 3 Test set-up

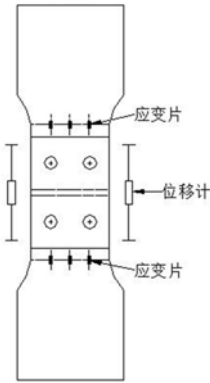


图 4 测点布置图

Fig. 4 Measuring points arrangement

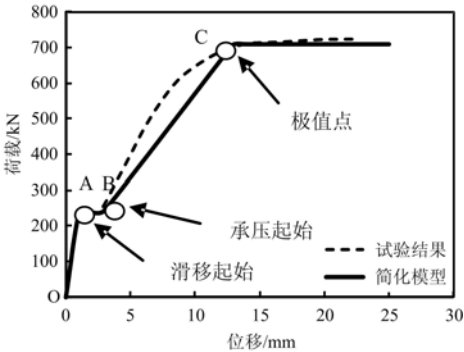


图 5 SPE-2 荷载位移曲线

Fig. 5 Load displacement curves of SPE-2

## 2 试验现象及破坏模式

### 2.1 试验现象

高强度钢材螺栓连接的受力可分为摩擦、滑移、承压和破坏四个阶段,标准试件 SPE2 的荷载位移曲线如图 5 所示。由图可知,摩擦阶段( $O \sim A$ ),水平荷载主要由接触面的摩擦力承担,曲线呈线性增长,试件有轻微响声。在滑移阶段( $A \sim B$ ),加载曲线开始出现转折,继续加载,有较大水平滑移段,侧面可明显看到芯板和盖板间的相对位移显著增大,滑移主要由孔壁与螺杆的间隙和孔壁变形产生,伴有较大响声,钢板表面的氧化皮层有些许脱落。随后,螺杆与孔壁紧密接触,进入承压阶段( $B \sim C$ ),该阶段水平位移的增加量远大于荷载增量,主要依靠钢板孔壁承压承担荷载,曲线斜率放缓,螺栓附近的氧化表皮脱落严重,试件侧面滑移错动十分明显,伴随有很大响声。达到峰值荷载后,进入破坏阶段,连接变形量过大,曲线开始出现下降,试件丧失承载能力,试验结束。

### 2.2 破坏模式

主要有以下几种破坏模式:SPE1、2、4、7、8、9,发生孔前挤推破坏,当参数 $(p_2 + 2e_2)/d_0 \geq 6$ ,  $e_1/d_0 \geq 1.5$ 时,破坏类型大都为图 6(a),破坏始于孔壁挤推处裂纹的产生,终于过度的塑性变形破坏。SPE 3、5,  $(p_2 + 2e_2)/d_0 < 6$ ,  $e_1/d_0 \geq 1.5$ ,均发生混合破坏。SPE3 中  $p_2/d_0 = 2.5$  螺栓间距较小,导致螺栓孔拉长,钢板在孔间剪切断裂破坏,破坏模式如图 6(b)所示;SPE5 中  $e_2/d_0 = 1.5$ ,试件的边距相较于端距设计较小,故发生较大的剪切变形时,孔边产生横向撕裂,发生如图 6(b)所示的破坏模式。SPE6,  $(p_2 + 2e_2)/d_0 \geq 6$ ,  $e_1/d_0 \geq 1.5$ 时,发生图 6(d)破坏模式,B 组 SPE12~22 为净截面破坏,如图 6(e)所示。螺杆与孔壁接触处挤压变形,孔洞附近产生裂纹,横向作用力下发展极快,在截面最小处,发生净截面破坏。SPE10、11,  $(p_2 + 2e_2)/d_0 = 6$ ,  $e_1/d_0 = 2.0$ ,试件孔径不同,发生如图 6(c)所示的端部撕裂破坏。芯板受到螺杆的挤推,孔洞附近变形严重。

## 3 设计公式分析

参考国外与本试验相关文献<sup>[1-4]</sup>,EC3 规范中承压应力的限制是线性函数  $e_1/d_0$  和  $e_2/d_0$  的归一

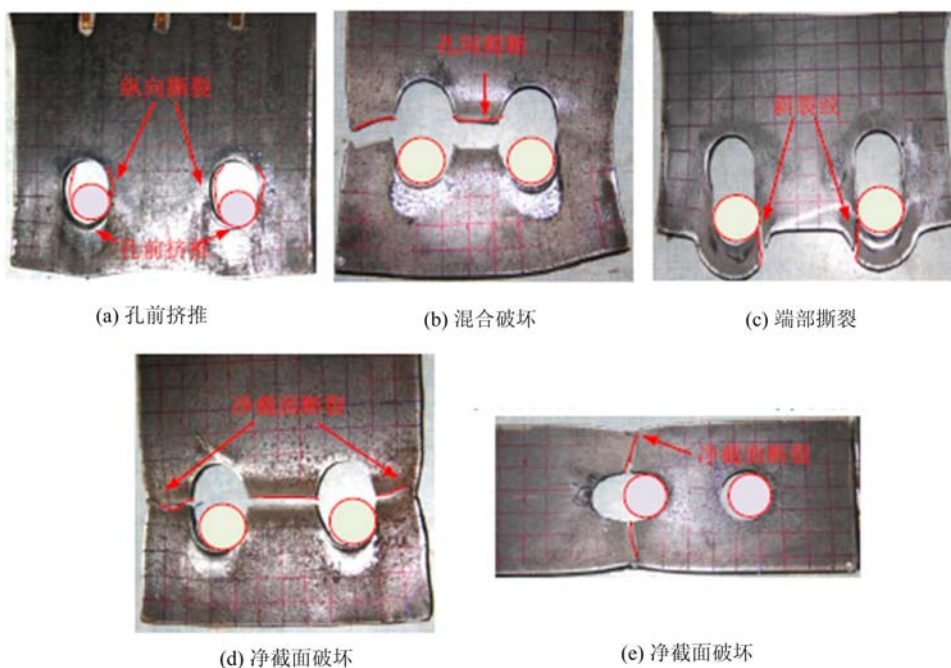


图 6 破坏模式

Fig. 6 Failure modes

化,系数  $k$  的取值建议参考 Može 的修正公式,对于多个螺栓的承压连接:

$$\sum F_{b, new} = mF_{b, new} = m \cdot k_1 k_2 \cdot d \cdot t \cdot f_u \quad (1)$$

$$k_1 = \min(2.6m \frac{e_1}{b_{eff}}; 1.9), k_2 = 0.9 \frac{b_{eff}/2m}{d_0} - \frac{1}{4} \quad (2)$$

有效连接截面宽度同时考虑螺栓间距:

$$b_{eff} = 2e_2 + (m-1)(p_2 - d_0) \quad (3)$$

其中,  $\sum F_{b, new}$  为螺栓群作用下钢板承压承载力设计值;  $m$  为垂直于受力方向的螺栓数量;  $b_{eff}$  为螺栓有效连接宽度;  $f_u$  为钢板抗拉强度;  $d$  为螺栓直径;  $t$  为钢板厚度。

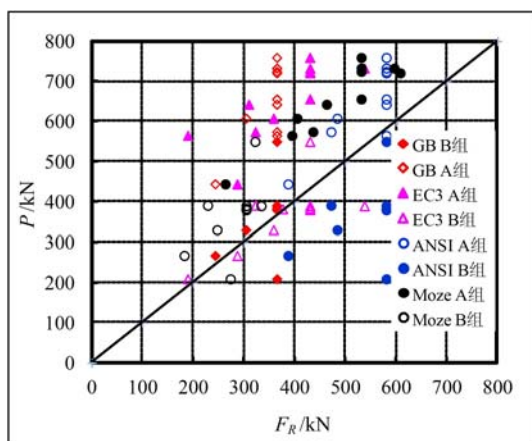


图 7 理论计算值比较

Fig. 7 Comparison of theoretical values

的极限承载力  $P$ 。

钢板承压设计公式对比:

$$\begin{cases} \text{GB50017 规范: } N_c^b = d \sum t f_c^b \\ \text{EC3 规范: } F_{b, Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \\ \text{ANSI 规范: } R_n = \phi 1.2 L_c t F_u \leq \phi 2.4 d t F_u \end{cases} \quad (4)$$

EC3、ANSI、Može 和 GB50017 规范<sup>[8-10]</sup> 的区别在于连接参数的考虑上,GB50017 和 ANSI 在端距、边距和螺栓间距设计之处有不足,EC3 考虑了端距和边距的相互影响,但与 Može 拟合趋势对比显得较为保守,对不同的设计方法,端距和边距对承载性能的影响需细化分析,各国规范计算的承载力值对比见图 7。图中横坐标  $F_R$  为规范计算的承压承载力设计值,纵坐标为试验试件的

## 4 参数分析

### 4.1 螺栓端距

试件端距变化荷载位移曲线如图 8 所示,以孔径伸长量  $d_0/6$  作为判断承载力的标准。由图可知,螺栓横向布置时,端距由  $2.5d_0$  减小到  $1.5d_0$ ,承载力分别降低了 1.17%、33.33%。螺栓纵向布置时,承载力随端距减小降低不超过 5%,说明螺栓横向布置时,端距变化对承载力影响较大,对纵向螺栓连接的影响较小。

不同设计规范端距和承载力关系:

EC3 规范:

$$e_1 < 3d_0 \text{ 时, } \frac{F_b}{f_u dt} = 0.8 \frac{e_1}{3d_0} (2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7) \quad (5)$$

ANSI 规范:

$$\frac{F_b}{f_u dt} = \varphi 1.2 \frac{e_1}{d} = 0.9 \frac{e_1}{d} \frac{d_0}{d} = 0.98 \frac{e_1}{d_0} \leq \varphi 2.4 = 1.8 \quad (6)$$

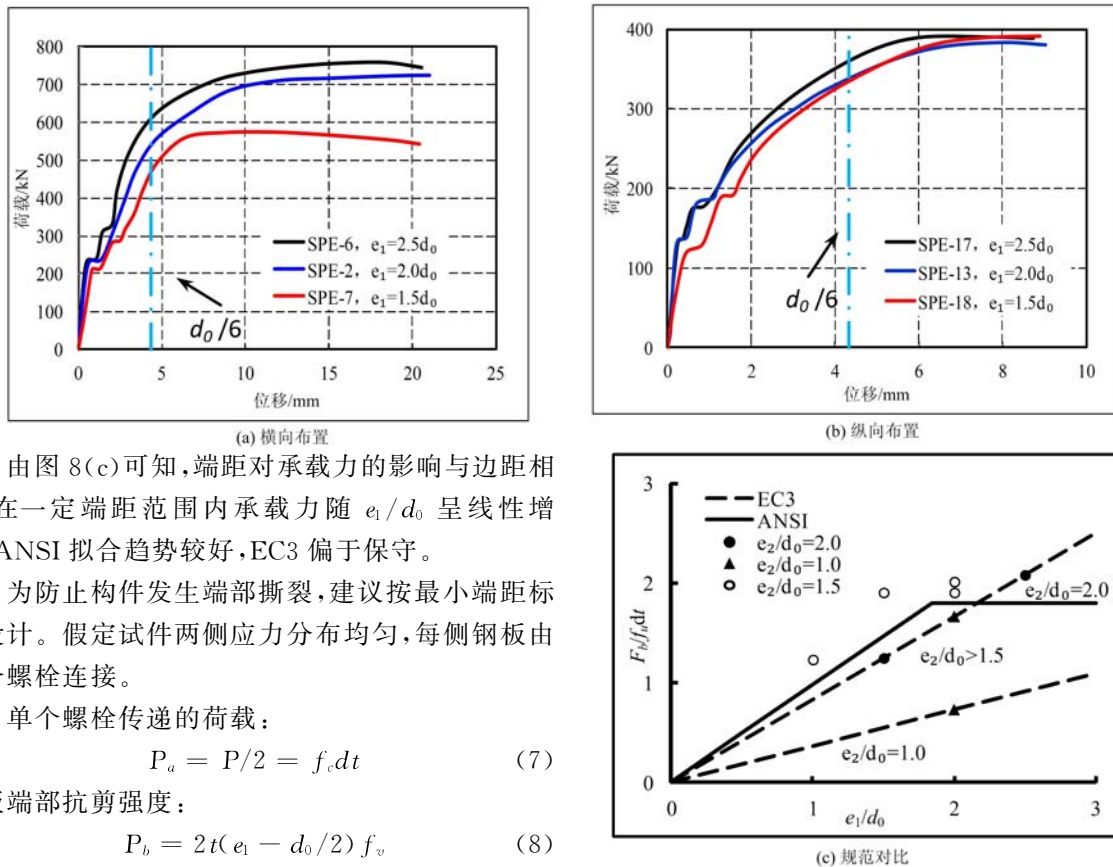


图 8 螺栓端距影响

Fig. 8 The effect of end distance

由图 8(c)可知,端距对承载力的影响与边距相关,在一定端距范围内承载力随  $e_1/d_0$  呈线性增长,ANSI 拟合趋势较好,EC3 偏于保守。

为防止构件发生端部撕裂,建议按最小端距标准设计。假定试件两侧应力分布均匀,每侧钢板由两个螺栓连接。

单个螺栓传递的荷载:

$$P_a = P/2 = f_c dt \quad (7)$$

钢板端部抗剪强度:

$$P_b = 2t(e_1 - d_0/2)f_v \quad (8)$$

其中:  $f_v$  为钢板抗剪强度;  $f_c$  为孔壁承压应力;  $d$  为螺栓直径;  $t$  为钢板厚度。  $f_w$  根据 GB50017 规范取为抗拉强度的  $1/\sqrt{3}$ ;  $d_0$  为螺栓孔径。

令  $P_a \leq P_b$ ,  $d$  与  $d_0$  较接近,近似认为相等,则得

$$\frac{f_c}{f_u} \leq 1.155 \frac{e_1}{d_0} - 0.577 \quad (9)$$

端距  $e_1$  与孔壁承压应力  $f_c$ 、抗拉强度  $f_u$  及螺栓孔径  $d_0$  有关,由图 9 可知:螺栓横向布置时,  $f_c/f_u$  与  $e_1/d_0$  基本呈线性关系。试验的  $f_c/f_u$  值为 1.59,得到  $e_1/d_0 \geq 1.88$ ,因此对 Q690 高强度钢材螺栓连接的端距建议取  $2d_0$ 。

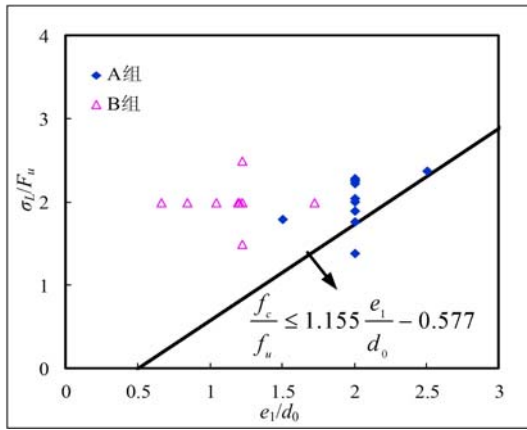
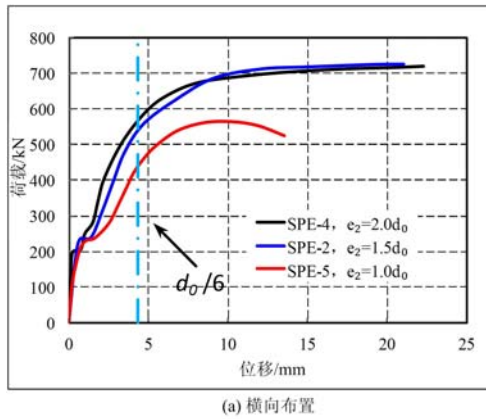
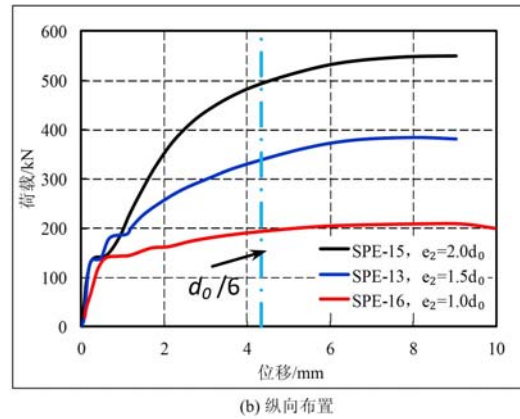


图 9 端距与承压强度关系曲线

Fig. 9 The end distance-bearing strength curve



(a) 横向布置



(b) 纵向布置

图 10 螺栓边距影响

Fig. 10 The effect of edge distance

Može 修正公式:

$$\text{当 } e_2 < 0.7 e_1, \frac{F_b}{f_u d t} = 1.9 \left( 0.9 \frac{e_2}{d_0} - 0.25 \right) \quad (12)$$

$$\text{当 } e_2 \geq 0.7 e_1, \frac{F_b}{f_u d t} = 1.3 \frac{e_1}{e_2} \left( 0.9 \frac{e_2}{d_0} - 0.25 \right) \quad (13)$$

EC3 及 Može 关于承载力与边距的关系如图 11 所示,说明 Može 修正公式的计算结果与试验值更接近。钢板的承压能力与构造形式连接紧密,ANSI 公式中反映出钢板承压强度与钢板几何形式相关,但并未综合考虑多种参数的影响,承压计算与欧规类似。EC3 较真实地反映了连接的承载力,基本符合预测结果。

最小边距由净截面破坏发生在毛截面屈服以后来确定,即

$$\frac{A_n}{A} \geq \frac{f_y}{f_u} \quad (14)$$

其中  $A_n$  为净截面积; $A$  为毛截面积。

螺栓纵向布置时,式(14)也可表示为

$$\frac{2 - (d_0/e_2)}{2} \geq \frac{f_y}{f_u} \quad (15)$$

其中边距  $e_2$  与屈服强度  $f_y$ 、抗拉强度  $f_u$  及螺栓孔径  $d_0$  有关。边距由  $1.0 d_0$  增加到  $2.0 d_0$ , 滑移荷载比较接近,而极限承载力有所提高,结合试验数据,建议边距取值为  $2 d_0$ 。

## 4.2 螺栓边距

图 10 为承载力随边距变化的荷载位移曲线,由图可知:螺栓横向布置时,边距由  $2.0 d_0$  减小到  $d_0$ ,承载力分别降低了 0.51% 和 37.96%;螺栓纵向布置时,边距由  $2.0 d_0$  减小到  $d_0$ ,承载力分别降低了 43.34% 和 83.25%。可见随边距的减小,试件承载力显著下降,边距大小对两种布置方式的影响均较大。

EC3 规范:

$$e_2 < 1.5 d_0 \text{ 时}, \frac{F_b}{f_u d t} = \frac{e_1}{3 d_0} \left( 2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right) \quad (10)$$

$$e_2 \geq 1.5 d_0 \text{ 时}, \frac{F_b}{f_u d t} = \frac{2.5 e_1}{3 d_0} \quad (11)$$

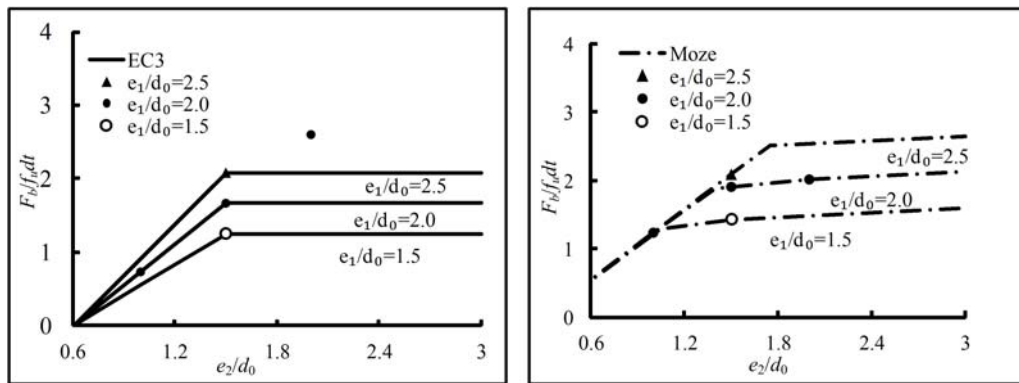


图 11 规范中边距影响

Fig. 11 The effect of edge distance

### 4.3 螺栓间距

由图 12 可知,当螺栓横向布置时,螺栓间距由  $3.5d_0$  减小到  $2.5d_0$ ,承载力分别降低了 1.13%、18.78%。螺栓纵向布置,螺栓间距由  $3.5d_0$  减小到  $2.5d_0$  时,降低幅度不超过 5%,说明螺栓间距对横向螺栓布置承载力影响较大,对纵向螺栓影响较小。

最小螺栓间距的取值,建议采用下式:

$$1 - \frac{2d_0}{p_2 + 4d_0} \geq \frac{f_y}{f_u} \quad (16)$$

螺栓间距受孔径大小和屈强比的制约,从试验曲线来看,间距减少的同时,荷载位移曲线发展趋势基本相同,初始滑移值较接近,建议螺栓间距取  $3d_0$ 。

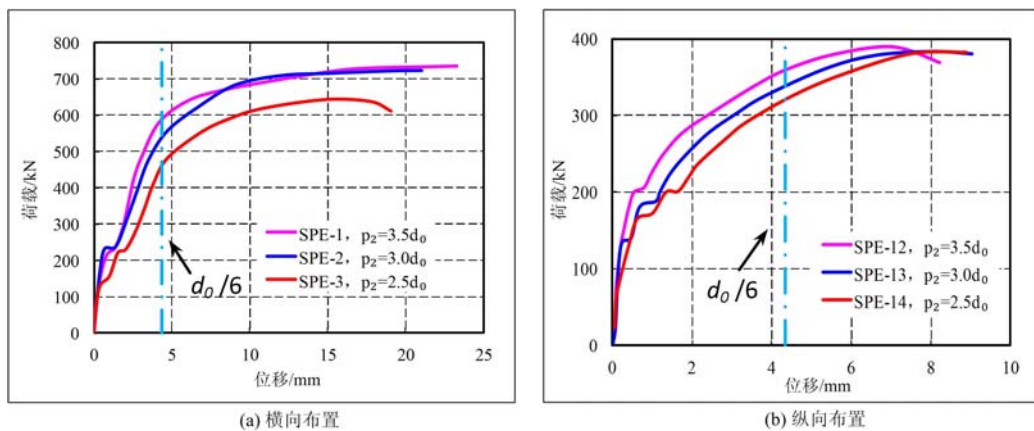


图 12 螺栓间距影响

Fig. 12 The effect of bolt spacing

### 4.4 螺栓强度等级

由图 13 可知,螺栓发生滑移前,荷载位移曲线呈线性变化,初始滑移荷载随螺栓等级的提高而增加。进入承压阶段后,螺栓横向布置时,螺栓等级由 8.8 级增加到 12.9 级,承载力分别增加了 8.43%、1.87%;螺栓纵向布置时,随着螺栓强度等级提高,承载力增幅不超过 5%。说明螺栓强度等级影响连接的初始滑移荷载,而对极限承载力影响较小,与 Q690 钢材匹配的高强螺栓建议取 10.9 级以上,8.8 级螺栓强度偏低。

### 4.5 螺栓直径

由图 14 可知,当螺栓横向布置时,螺栓直径由 M16 增加到 M24,承载力分别提高了 36.83% 和 19.18%。当螺栓纵向布置时,直径由 M16 增至 M24,承载力分别增加了 23.6% 和 16.1%。改变孔径大小,试件的几何尺寸随之变化,对试件净截面面积影响较大,螺栓孔径对试件承载力影响主要体现在净截面面积上。

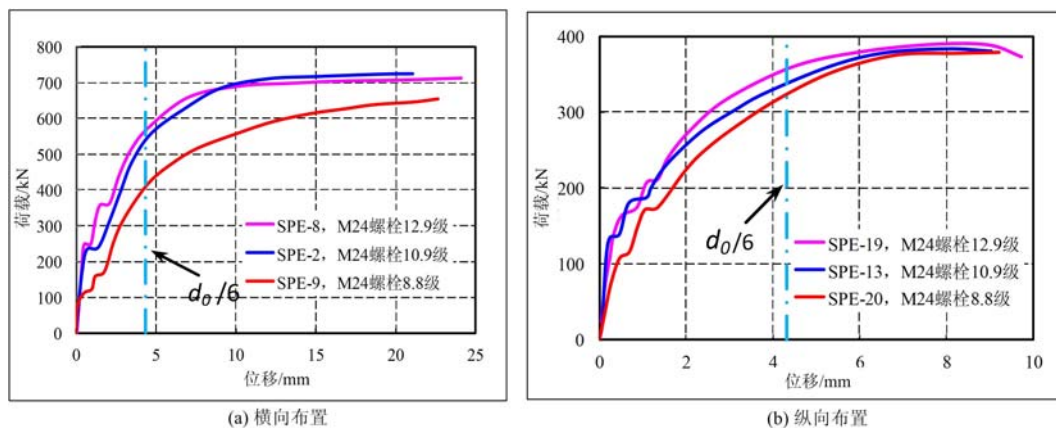


图 13 螺栓等级影响

Fig. 13 The effect of bolt grade

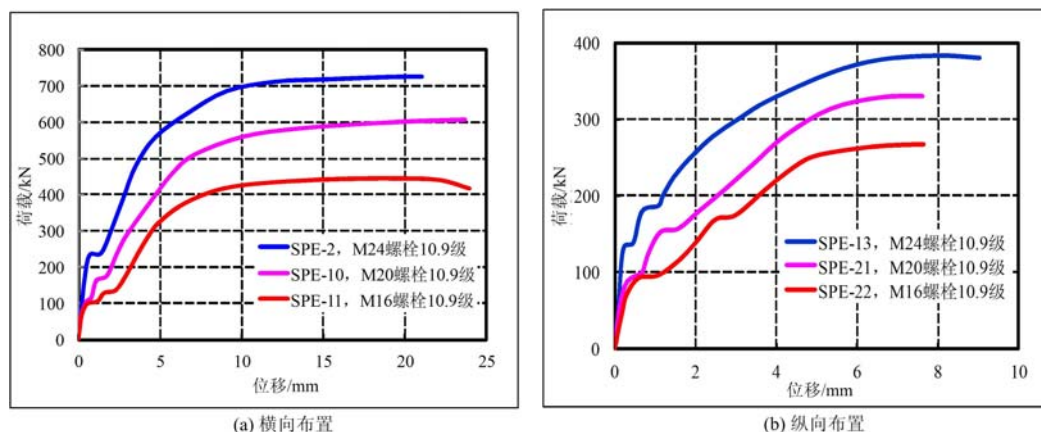


图 14 螺栓直径影响

Fig. 14 The effect of bolt diameter

## 5 结论

通过对 Q690 高强度钢材螺栓连接性能试验及理论分析研究,得出以下结论:

(1) 螺栓横向布置时,连接接头的承载力随螺栓端距和边距的增加呈线性增长,端距和边距对承载力的影响相关性较大。螺栓纵向布置时,连接的极限承载力仅随边距的增大呈线性增长,螺栓端距和间距的影响不超过 5%。

(2) 螺栓孔径对试件承载力影响主要体现在净截面面积上。螺栓强度等级会影响连接的初始滑移荷载,对极限承载力影响较小,与 Q690 钢材匹配的高强螺栓建议取 10.9 级以上。

(3) 建议 Q690 高强度钢材螺栓连接构造取  $e_1 = 2.0d_0$ ,  $e_2 = 2.0d_0$ ,  $p_2 = 3.0d_0$ 。

(4) Moze 修正公式能较好反映端距、边距和承载性能三者之间的关系,亦适用于 Q690 高强度钢材螺栓连接的设计计算。

## 参考文献:

- [1] Može P, Beg D. High strength steel tension splices with one or two bolts[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(8):1000-1010.
- [2] Može P, Beg D. Investigation of high strength steel connections with several bolts in double shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3):333-347.
- [3] Puthli R, Fleischer O. Investigations on bolted connections for high strength steel members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(3):313-326.

- [4] Može P, Beg D. Net cross-section design resistance and local ductility of elements made of high strength steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11):1431—1441.
- [5] Kim H J, Yura J A. The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 49(3):255—269.
- [6] 王萌, 石永久, 王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3):27—34 (WANG Meng, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Analysis on shear behavior of high-strength bolts connection[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3):27—34 (in Chinese))
- [7] 石永久, 潘斌, 施刚, 等. 高强度钢材螺栓连接抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1):56—61 (SHI Yongjiu, PAN Bin, SHI Gang, et al. Experimental study on high strength steel-plate-bolted connection under shear force[J]. Industrial Construction, 2012, 42(1):56—61 (in Chinese))
- [8] GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 中国计划出版社, 2003 (GB50017—2003 Code for design of steel structures [S]. China Planning Press, 2003 (in Chinese))
- [9] BS EN1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints [S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2005.
- [10] ANSI/AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings[S]. American Institute of Steel Construction, Inc., 2005.

## Experimental study on the bearing capacity of Q690 high strength steel bolted shear connection

GUO Hong-chao<sup>1</sup>, XIAO Feng<sup>1</sup>, LI Yan-long<sup>2</sup>, LIU Yun-he<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Based on static tensile experiment of 22 pieces of Q690 high-strength steel bolted joint, the failure mode, mechanical properties and match attribute of this connection are comprehensively analyzed, and the influence of key parameters on bearing capacity is discussed in this paper. Results show that when bolts are arranged transversely, the bearing capacity increases linearly with the increase of bolt end distance, edge distance and spacing between bolts; and when the bolts are arranged longitudinally, the bearing capacity of the connection increases only with the increase of edge distance, and the effect of the bolt end distance and spacing is not more than 5%, respectively. The influence of bolt bore diameter on bearing capacity is mainly reflected in the net section area. The grade of bolt strength affects the initial slip load of the connection, but has little effect on the ultimate bearing capacity. So, the grade of high-strength bolt matching Q690 steel is recommended more than 10.9 levels. Meanwhile, EC3 specification can better reflect the relation between the end distance and the edge distance, but it is conservative. The fitting result of the ANSI specification is closer to experimental values. Thus, above results can provide basic data for the design theory and method of home-made high strength steel bolt connection made in China.

**Keywords:** high strength steel; shear connection; net section; match attribute; bolted connection