

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.010

Q460 高强度钢螺栓抗剪连接承载性能有限元分析

郭宏超¹, 皇焱华^{1,2}, 李炎隆¹, 刘云贺¹, 简政¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082)

摘要: 为了更好地发挥高强度钢材的承载性能, 保证高强度钢材连接节点的性能和质量至关重要, 本文对螺栓预拉力、连接板表面状态、钢材等级及连接板厚度等因素进行了参数分析, 并与 GB50017、ANSI、EC 3 规范理论计算值进行了对比, 讨论了不同规范的适用性。结果表明: 螺栓预拉力对连接抗剪强度和变形没有影响; 抗滑移系数从 0.35 增加到 0.50, 连接的变形值减小 15.5%, 承载力几乎没有提高; 钢材屈服强度从 345 MPa 增加到 690 MPa, 承载力提高了 1.58 倍, 而变形能力明显降低, 延性变差; 增加钢板厚度能显著提高连接承载能力, 连接的破坏模式由钢板横向撕裂破坏发展为栓杆剪切破坏。

关键词: 高强度钢材; 螺栓预拉力; 摩擦系数; 抗剪性能; 折减系数

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)02-0180-07

Finite element analysis of bolt shear connection bearing capacity of Q460 high strength steel

GUO Hongchao¹, HUANG Yaohua^{1,2}, LI Yanlong¹, LIU Yunhe¹, JIAN Zheng¹

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

2. Shaanxi Province Institute of Building Research, Xi'an 710082, China)

Abstract: The performance and quality of high strength steel connection node are essential for the better application of the bearing capacity of high strength steel. In order to make a discussion of the application of different standards, the parameter analysis is made to bolt pretension force, the surface state of connecting plate, steel grade and thickness of connecting plate, compared with theoretical calculating value of standard GB50017, ANSI, EC3. The result shows that the bolt pretension force has no effect on shear strength and deformation; if the anti-slip factor increases from 0.35 to 0.50, the deformation value will decrease by 15.5%, and the bearing capacity almost has no improvement. If the steel yield strength increases from 345 MPa to 690 MPa, the bearing capacity increases by 1.58 times, but the deformation capacity obviously decreases and the ductility weakens; the connection bearing capacity can be obviously improved by the increase of steel thickness, with the failure in connection caused by crosswise tear of steel plate caused by bolt shear.

Key words: high strength steel; bolt pretension force; frictions factor; resisting shear capacity; reduction factor

与普通强度钢材相比, 高强度钢材具有材质均匀、刚度大、塑性和韧性好、可靠性高等优点。建筑中采用高强度钢材能够减轻结构重量、减小构件尺寸、减少焊接作业量、材料环保可回收利用, 其工程应用前景非常广阔, 是发展循环经济、绿色建筑的主要途径之一。为了更好地发挥高强度钢材的承载性

能, 保证高强度钢材连接节点的性能和质量至关重要。高强度钢材与螺栓的屈服强度较为接近, 因此螺栓连接中材料的匹配性、失效模式、塑性变形能力和开孔区域应力集中等问题是研究的关键, 在保证连接强度的同时, 节点应具有一定变形能力, 允许连接钢板应力重分布。

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308454); 中国博士后科学基金资助项目(2013M542371); 陕西省博士后自然科学基金资助项目; 陕西省住建厅建设科技专项资助项目(2014-K12); 西安理工大学科技新星资助项目

作者简介: 郭宏超, 男, 副教授, 博士, 研究方向为高层及超高层钢结构。E-mail: ghc-1209@163.com

国内外对高强度钢连接方面的研究大多停留在定性研究阶段,还没有形成可以普遍应用的高强度钢结构连接节点设计理论和计算方法。Kim 和 Kuwamura^[1-2]通过有限元分析与试验结果对比,研究了冷弯薄壁不锈钢螺栓抗剪连接承载性能,给出了试件的破坏模式和承载性能,分析了卷边对承载力性能的影响。Kim 和 Yura^[3]分析了不同螺栓端距和间距对连接接头承载性能的影响。Pavlina^[4]根据测量钢材硬度估算了钢材的屈服强度和抗拉强度。Može 和 Beg 等人^[5-8]进行了螺栓连接接头试验,并与高强度钢连接试验结果进行了比较,发现 EC3 规范比较保守,承载力计算公式适用于所有等级钢材,钢材等级越高,强度损失越大。Clinton 和 Samuel^[9]进行了 48 组螺栓对接接头静力拉伸试验,研究了端距和钢板宽度对连接承载力和变形性能的影响,并与规范值进行了对比。石永久等人^[10-11]进行了高强度钢材螺栓连接抗剪试验,分析了螺栓端距、板厚及抗拉强度等因素对连接强度和变形的影响,讨论了短接头和长接头连接的承载性能和特点。

本文采用有限元程序对高强度钢材螺栓连接的受力性能进行了数值模拟,分析了螺栓预拉力、摩擦系数、钢材等级和钢板厚度等因素对螺栓连接承载性能的影响规律,给出了相应的破坏模式,并与 GB50017、EC3、ANSI^[12-14] 规范理论计算值进行了对比,讨论了现有规范连接计算公式的适用性。

1 有限元模型

1.1 试件设计

试件的几何尺寸如图 1 所示,连接钢板、上下盖板均采用 8 mm 厚 Q460D 钢材,采用 2 个 10.9 级 M24 高强度螺栓并排连接,试件端距 e_1 、边距 e_2 以及螺栓间距 p_2 等详细尺寸见表 1。

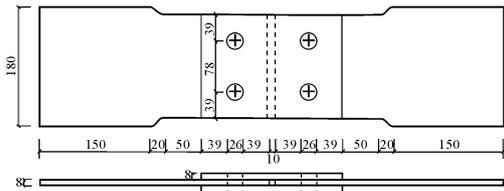


图 1 试件详图

Fig. 1 Layout of specimen

表 1 试件几何尺寸

Tab. 1 Geometric size of test specimen

项目	连接钢板 规格/mm	上下盖板 规格/mm	端距 e_1 /mm	边距 e_2 /mm	螺栓间距 p_2 /mm
尺寸	324×180×8	218×156×8	52	39	78

1.2 材料本构

有限元模型如图 2 所示。连接钢板、高强度螺栓均采用 C3D8R 实体单元。高强度螺栓本构选用理想弹塑性模型,钢材本构关系选用理想强化模型,应力应变曲线如图 3 所示。

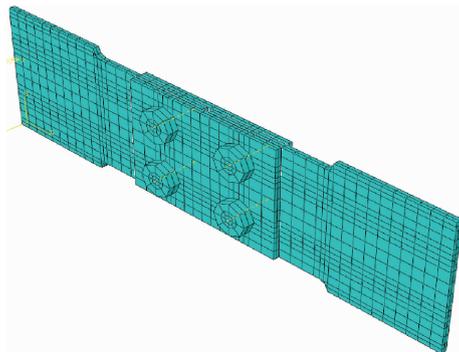


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

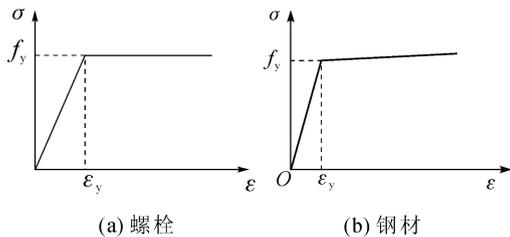


图 3 应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship

在大应变情况下,钢材发生颈缩后断面不断减小会严重影响真实的应力-应变关系,应变关系可通过下式进行修正:

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}}(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (1)$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为真实应力、应变; σ_{nom} 、 ϵ_{nom} 分别为工程应力、应变。表 2 给出了本构关系取值。

表 2 本构关系

Tab. 2 Parameter values of constitutive relations

项目	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /GPa	强化段切线模量 E_t /GPa
Q460 钢板	530	681	252	2.52
高强度螺栓	900	1 000	210	2.10

1.3 求解设定

约束螺栓上下端面节点的全部自由度,在盖板与芯板、螺帽与盖板之间建立接触单元,接触关系采用硬接触。螺栓杆与孔壁之间建立接触单元,接触刚度经反复试算采用 2 000 N/mm,以提高计算效率和收敛性,接触面的荷载由钢板承压来传递,不考虑螺栓杆与孔壁间的摩擦。有限元分析采用位移控制分步加载,最大位移 20 mm,每荷载步取总位移的 5%。

2 结果对比分析

本文以 Q460 高强钢螺栓纵向连接静力拉伸试验为参考,分析了螺栓预拉力、连接板表面状态、钢材等级及连接板厚度等因素对 Q460 高强钢螺栓横向连接承载性能的影响。试件模型如图 4 所示,详细尺寸见表 3。

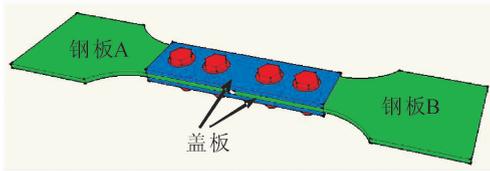


图 4 试件示意图
Fig. 4 Layout of specimen

表 3 试件几何尺寸

Tab. 3 Geometric size of test specimen

项目	连接钢板规格/mm	上下盖板规格/mm	端距 e_1 /mm	边距 e_2 /mm	螺栓间距 p_2 /mm
尺寸	402×78×8	374×78×8	52	39	78

2.1 荷载-位移曲线

有限元及试验荷载-位移曲线如图 5 所示,荷载-位移曲线各特征点汇总见表 4。

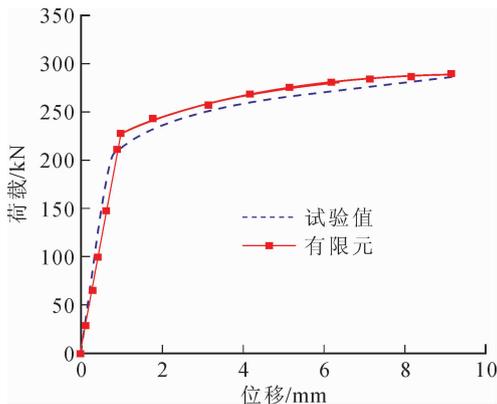


图 5 荷载-位移曲线
Fig. 5 Loading-displacement curve

表 4 荷载-位移曲线各特征点

Tab. 4 The feature points of loading-displacement curve

项目	屈服点		峰值点	
	P_y /kN	Δ_y /mm	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm
试验	205.79	0.82	284.34	9.17
有限元	228.32	0.98	289.72	9.15
差值/%	10.95	19.51	1.89	-0.22

由图 5、表 4 可知,在加载初期,由于施加了螺栓预拉力,主要依靠钢板接触面间的摩擦力传递水平荷载,荷载位移曲线呈线性变化。在螺栓杆与孔

壁紧密接触后,主要依靠钢板承压和螺栓抗剪传递水平荷载,试件的承载力增加幅度不大,但变形量较大,曲线斜率逐渐放缓,说明螺栓连接具有良好变形能力。试件的有限元与试验曲线吻合较好,屈服荷载相差 10.95%,而极限承载力差值在 2% 以内,试件的初始刚度、屈服位移和峰值位移与试验结果均比较接近。综合来看,有限元分析能较好地反映结构的屈服状态和极限状态,承载力与试验结果吻合较好。

2.2 破坏模式

由于试件的边距比端距小,钢板净截面成为薄弱环节,在螺栓杆与孔壁接触部位产生挤压变形后,孔洞附近出现裂纹,螺栓孔附近横向应力发展迅速,最终在最小截面处发生净截面破坏。试件的破坏模式如图 6 所示。

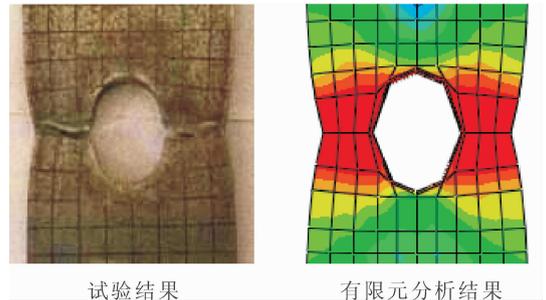


图 6 破坏模式
Fig. 6 Failure modes

3 参数分析

3.1 螺栓预拉力

考虑实际工程中高强螺栓欠拧、超拧因素,设计 0 kN、112.5 kN、225 kN 和 337.5 kN 四种工况分析不同预拉力对高强螺栓连接剪切强度的影响。预拉力 225 kN 的荷载-位移曲线如图 7 所示。

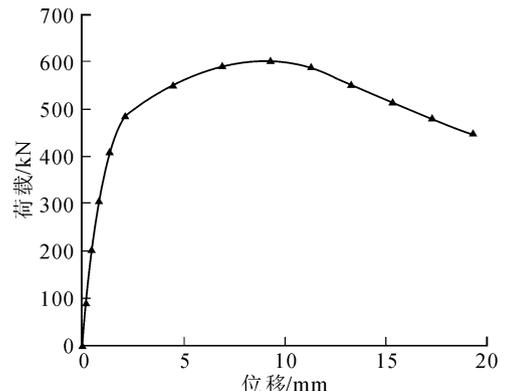


图 7 荷载-位移曲线
Fig. 7 Loading-displacement curve

在 450 kN 以后, 钢板局部屈服, 进入塑性, 连接设计避免了螺杆的剪切破坏, 试件的屈服平台较长, 有较好的变形能力。

不同预拉力值与连接抗剪承载力的关系如图 8 所示。预拉力从 0 kN 增加到 337.5 kN, 极限承载力接近 600 kN, 基本没有变化, 变形值增加 8% 左右。预拉力使螺栓产生轴向变形, 构件破坏时轴向拉应力在屈服点以下, 因此预拉力对连接抗剪承载力没有影响。不同预拉力下连接的破坏模式如图 9 所示。由图可知: 螺栓端距较大, 孔前有明显钢板挤推变形, 最终破坏模式为横向撕裂破坏, 不同预拉力值下连接的破坏模式基本没有变化。

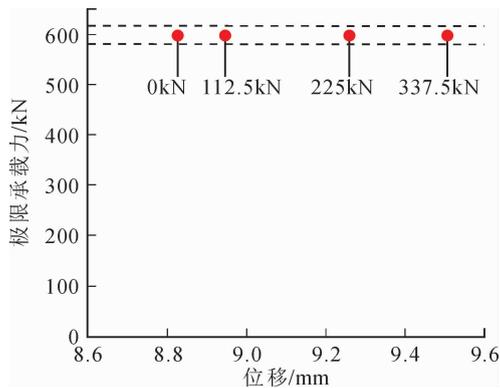


图 8 预拉力与承载力关系曲线

Fig. 8 The relation curve between pretensioning force and bearing capacity

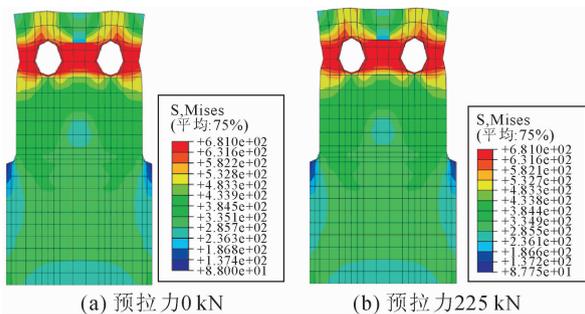


图 9 破坏模式

Fig. 9 Failure modes

3.2 钢板接触面状态

连接接头的摩擦受钢板接触面的粗糙程度影响, 《钢结构设计规范》^[12]对构件接触面不同处理方法规定了不同的抗滑移系数。不同的抗滑移系数下连接的承载力和变形值详见表 5。由表可知, 抗滑移系数从 0.35 增加到 0.50, 极限承载力增加不足 0.1%, 相应变形却减小了 15.5%。不同抗滑移系数下, 试件极限承载力没有增加, 破坏形态以横向撕裂破坏为主。

表 5 极限承载力和变形

Tab. 5 Ultimate loads and deformations

抗滑移系数	极限承载力 P /kN	变形 Δ /mm
0.35	597.07	9.37
0.40	597.96	9.26
0.45	599.36	8.38
0.50	600.26	8.11

3.3 钢板强度

钢板的强度等级不同, 对连接的承载力影响较大, 根据文献^[15]的材性试验结果, 选取不同等级钢材的力学性能指标见表 6。

表 6 钢材力学性能指标

Tab. 6 Mechanical properties of steels

等级	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	伸长率 $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0} / \%$
Q345	345	470~630	22
Q420	420	520~680	19
Q460	460	550~720	17
S690	690	770~940	14

不同等级钢材连接的荷载-位移曲线如图 10 所示。由图可知, 在加载初期, 连接接头的承载力呈线性增长, 达到屈服点后, 曲线出现转折, 位移逐渐增大, 不同钢号的曲线发展趋势基本一致。

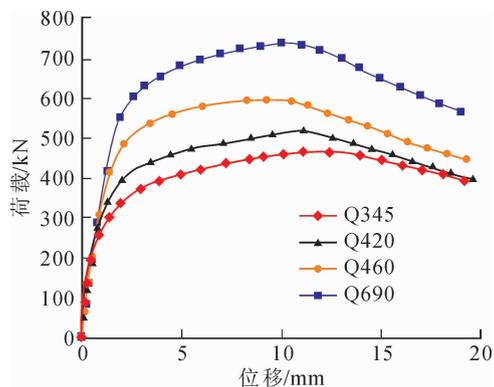


图 10 荷载-位移曲线

Fig. 10 Loading-displacement curve

由表 7 和图 11 可以看出, 随着钢材强度等级的增加, 试件的极限承载力基本呈线性增加, 变形值明显减小。钢材强度等级从 Q345 到 S690, 连接接头的承载力提高了 1.58 倍, 变形值减小了 20% 左右。可见随着钢材强度等级的提高, 连接接头的变形能力降低, 延性变差。

表 7 不同钢材等级的极限承载力和变形
Tab. 7 The ultimate load and deformation of different steel grades

钢材等级	极限承载力 P/kN	变形 Δ/mm
Q345	467.83	12.15
Q420	516.49	11.13
Q460	597.96	9.26
S690	738.28	8.97

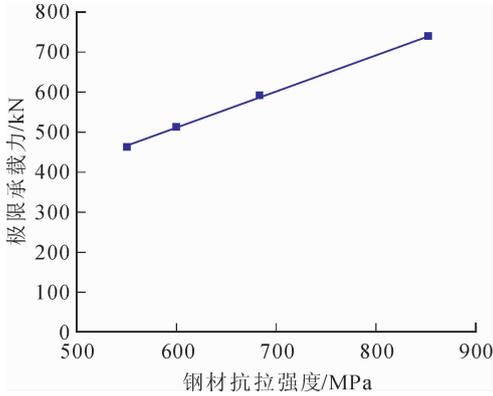


图 11 钢材等级与承载力关系曲线

Fig. 11 The relation curve between steel level and bearing capacity

3.4 连接板厚度

不同钢板厚度下,连接接头的荷载-位移曲线如图 12 所示,破坏模式如图 13 所示。钢板厚度 8 mm 试件,位移 9.5 mm 处达到峰值 598 kN;厚度 12 mm 的试件在位移为 11.5 mm 时达到极限承载力 886 kN;厚度 16 mm 试件在位移 12.5 mm 时达到极限承载力 1 135 kN。随着钢板厚度的增加,连接接头的抗剪强度显著增大,曲线趋势基本一致。

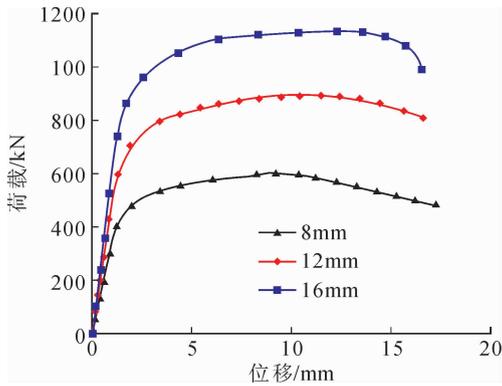


图 12 荷载-位移曲线

Fig. 12 Loading-displacement curve

由图 13 可以看出,厚度 8 mm 和 12 mm 的试件破坏形式为孔前挤压与横向撕裂的联合破坏;厚度 16 mm 的试件在位移超过 15 mm 时,承载力显著下降,螺栓杆发生较大剪切变形,破坏形态为栓杆的剪切破坏。

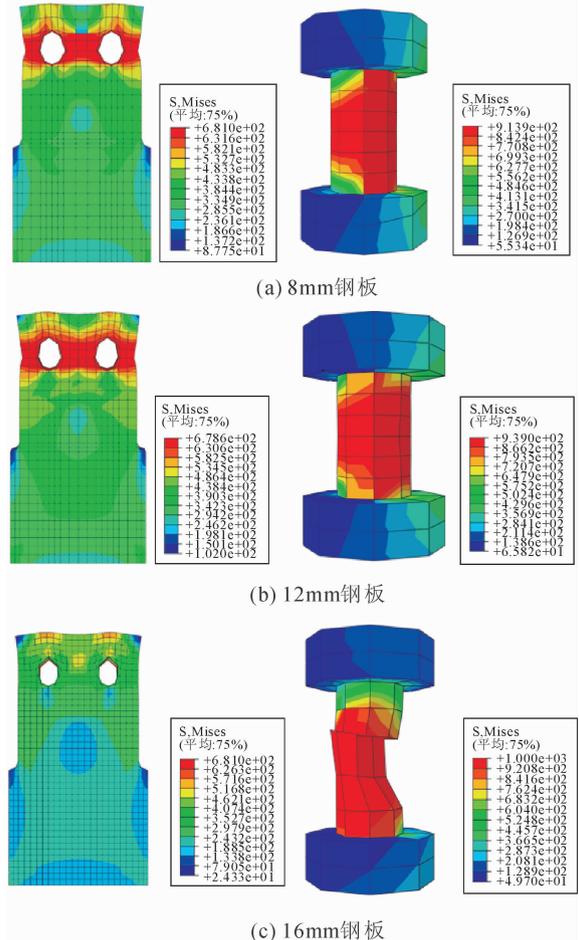


图 13 破坏模式

Fig. 13 Failure modes

4 理论分析

4.1 GB50017 规范

我国钢结构设计规范并未涉及 Q460 及以上高强度钢材连接的具体强度指标和设计依据,承压型连接仍沿用现有规范计算公式:

$$N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b \quad (3)$$

$$N_c^b = d \sum t f_c^b \quad (4)$$

构造要求为: $e_1 \geq 2.0d_0$, $e_2 \geq 1.5d_0$, $p_2 \geq 3.0d_0$ 。

4.2 EC3 规范

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (6)$$

$$k_1 = \min \left\{ 2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right\} \quad (7)$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}, 1.0 \right\} \quad (8)$$

其中 e_1, e_2, p_2 分别表示端距、边距和螺栓间距,且 $e_1 \geq 1.2d_0, e_2 \geq 1.2d_0, p_2 \geq 2.4d_0$ 。

4.3 ANSI 规范

$$R_v = \phi F_u A_b \quad (9)$$

$$R_b = \phi 1.2L_c t F_u \leq \phi 2.4dt F_u \quad (10)$$

4.4 结果分析

EC3 和 ANSI 规范认为连接强度与钢板连接构造及钢材抗拉强度有关,能较真实反映连接的实际承载性能。理论计算值与有限元结果详见表 8。由图 14 可知,ANSI 的理论计算值与有限元分析结果比较接近,可以比较准确的预测高强度螺栓连接承载力;EC3 对边距、间距小于限值需折减连接承载力的规定偏保守;GB50017 规定钢板承压强度设计值为 $1.26f_u$,计算结果偏于保守,安全系数较大,不能充分发挥高强度钢材强度的优势,根据分析结果,

建议 Q460 钢材的钢板承压强度设计值取值范围为 $1.6f_u \sim 2.0f_u$,其中图 14 和表 8 的 GB50017 修正值中钢板承压强度设计值为 $1.8f_u$ 。

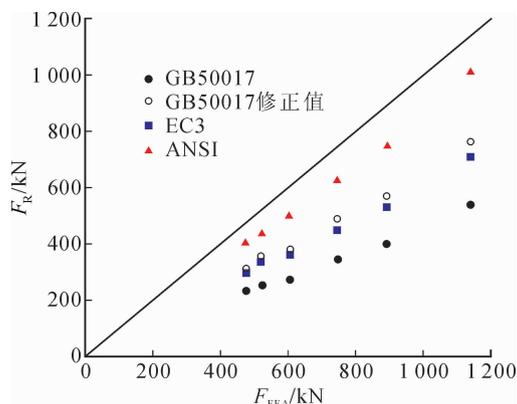


图 14 理论计算值比较

Fig. 14 Comparison of theoretical values

表 8 有限元结果与理论分析比较

Tab. 8 Comparison of finite element result and theoretical analysis

钢材等级	钢板厚度/mm	螺栓直径	预拉力 P/kN	摩擦系数 μ	屈服强度 f_y /MPa	F_{FEA} /kN	F_R /kN			
							GB50017	GB50017 修正值	EC3	ANSI
Q460	8	M24	0	0.40	530	597.17	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	112.5	0.40	530	597.71	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	225	0.40	530	597.96	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	337.5	0.40	530	597.97	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	225	0.35	530	597.07	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	225	0.40	530	597.96	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	225	0.45	530	599.36	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	8	M24	225	0.50	530	600.26	268.80	384.00	348.67	509.93
Q345	8	M24	225	0.40	345	467.83	226.56	323.66	281.60	411.84
Q420	8	M24	225	0.40	420	516.49	251.52	359.31	327.20	449.28
Q460	8	M24	225	0.40	530	597.96	268.80	384.00	348.67	509.93
S690	8	M24	225	0.40	690	738.28	345.60	493.71	437.76	640.22
Q460	8	M24	225	0.40	530	597.96	268.80	384.00	348.67	509.93
Q460	12	M24	225	0.40	530	886.05	403.20	576.00	523.01	764.90
Q460	16	M24	225	0.40	530	1 134.58	537.60	768.00	697.34	1 019.87

5 结论

通过对高强度钢材螺栓连接性能分析,可得到如下结论:

1) 连接钢板破坏时,轴向拉应力在屈服点以下,预拉力对构件的剪切强度和变形并没有影响。

2) 板件接触面的粗糙程度对承压型连接的极限承载力没有影响,抗滑移系数从 0.35 增加到 0.50,变形量减小了 15.5%。

3) 随着钢材强度等级的提高,连接接头承载力

线性增大,而变形量减小约 20%,延性变差。

4) ANSI 规范可以较准确的预测高强度螺栓连接承载力。对于高强度钢材,仍沿用 GB50017 普通螺栓的设计公式,计算结果偏保守,根据分析结果,建议 Q460 钢材的钢板承压强度设计值取值范围为 $1.6f_u \sim 2.0f_u$ 。

参考文献:

- [1] KIM T S, KUWAMURA H, Cho T J. A parametric study on ultimate strength of single shear bolted connections with curling [J]. Thin-Walled Structures, 2008,

- 46(1): 38-53.
- [2] KIM T S, KUWAMURA H. Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear [J]. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(4): 407-421.
- [3] 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.
- [4] PAVLINA E J, VAN TYNE C J. Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(6): 888-893.
- [5] PUTHLI R, FLEISCHER O. Investigations on bolted connections for high strength steel members [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(3): 313-326.
- [6] DUSICKA P, LEWIS G. High strength steel bolted connections with filler plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(1): 75-84.
- [7] 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.
- [8] MOŽE P, BEG D. A complete study of bearing stress in single bolt connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 95: 126-140.
- [9] CLINTON O, SAMUEL EASTERLING W. Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(6): 792-800.
- [10] 石永久, 潘斌, 王元清. 高强度钢材螺栓抗剪连接孔壁承压性能研究及设计建议 [J]. *青岛理工大学学报*, 2013, 34(1): 24-32.
- SHI Yongjiu, PAN Bin, WANG Yuanqing. Investigations and proposed design rules on bolted connections for high strength steel [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2013, 34(1): 24-32.
- [11] 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 connections under shear force [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(1): 56-61.
- [12] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB50017-2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [13] BRITISH STANDARD. Design of steel structures; BS EN1993-1-8: 2005 [S]. BSI, 2008.
- [14] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Specification for Structural Steel Buildings; ANSI/AISC 360-05 [S]. 2005.
- [15] SHI Gang, HU Fangxin, SHI Yongjiu. Recent research advances of high strength steel structures and codification of design specification in China [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2014, 14(4): 873-887.

(责任编辑 王绪迪)