

单面攻丝高强螺栓抗剪连接承载性能试验研究

龚智超¹, 张再华^{1,2*}

¹湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳

²湖南城市学院土木工程国家级实验教学示范中心, 湖南 益阳

收稿日期: 2023年1月27日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月27日

摘要

本文针对高强螺栓单面攻丝抗剪连接的承载性能开展了试验研究, 分别测得了单个螺栓在摩擦阶段的极限抗剪承载力和在承压阶段的极限抗剪承载力。试验结果表明: 攻丝型高强螺栓连接按承压型高强螺栓受剪来设计时, 试验测得的螺栓极限抗剪承载力平均值较计算得到的螺栓极限抗剪承载力均有较大的安全储备, 可以满足承压型高强螺栓的设计要求; 但按摩擦型高强螺栓受剪来设计时, 试验得到的螺栓抗剪承载力平均值较按规范计算的抗剪承载力富余量较少, 并且试验得到的板件间相对滑移比较大, 不能满足摩擦型高强螺栓抗剪时的正常使用极限状态要求。

关键词

攻丝型螺栓连接, 单边紧固连接, 摩擦型抗剪承载力, 承压型抗剪承载力

Experimental Study on Bearing Capacity of Shear Connection of Single Side Tapping High Strength Bolt

Zhichao Gong¹, Zaihua Zhang^{1,2*}

¹College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

²National Experimental Teaching Demonstration Center for Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: Jan. 27th, 2023; accepted: Feb. 17th, 2023; published: Feb. 27th, 2023

Abstract

In this paper, the load-bearing capacity of high-strength bolts with single-side tapping shear
*通讯作者。

connection was experimentally studied. The ultimate shear capacity of a single bolt in the friction stage and the ultimate shear capacity in the pressure stage were measured respectively. The test results show that when the tapping high-strength bolt connection is designed according to the pressure type high-strength bolt, the average value of the ultimate shear capacity of the bolt measured by the test has a larger safety reserve than the calculated ultimate shear capacity of the bolt, which can meet the design requirements of the pressure type high-strength bolt. However, when it is designed according to the friction type high-strength bolt, the average value of the shear bearing capacity of the bolt obtained by the test is less than that calculated by the standard, and the relative slip between plates obtained by the test is relatively large, which cannot meet the normal use limit state requirements of the friction type high-strength bolt in shear.

Keywords

High Strength Bolted Tapping Connection, Single Side Fastening Joint, Frictional Shear Capacity, Bearing Shear Capacity

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统的钢结构高强螺栓紧固连接方式如图 1(a)所示, 作为紧固件的高强螺栓连接副包括螺栓与螺帽以及两个垫圈。连接抗滑移承载能力可以依据钢结构设计规范(GB50017-2003) [1]以及钢结构高强度螺栓连接技术规程(JGJ82-2011) [2]的相关规定进行计算。考虑闭口截面情形下传统高强螺栓装配的困难, 工程中单边紧固高螺栓受到了广泛的关注[3] [4]。目前应用广泛的单边螺栓包括 Holo-bolt, modified Holo-bolt, Ultra-Twist Bolt, Blind Bolt, Huck Bolt, Flow drill and Ajax One-side Bolt 等[4], 相关这些螺栓性能的试验与有限元分析成果的报道也非常多[5] [6] [7]。特别是由 Lindapter International 开发的 Holo-bolt system [8], 相关的研究内容更多。虽然这些螺栓可以有效解决封闭截面装配施工难的问题, 但大多数螺栓都是专利产品, 价格也比普通高强度螺栓贵。同时, 普通高强度螺栓的施工大多需要不同的专业工具, 不利于产品的大规模推广。因此, 一种攻丝型高强度螺栓装配连接方法在工程中受到了关注。

攻丝型高强螺栓采用了图 1(b)所示的攻丝型高强螺栓单面紧固连接, 它采用带攻丝的连接钢板来替代螺母, 极大方便了闭口截面的螺栓装配。但由于通常连接钢板材料性能与螺母存在较大差异, 这种

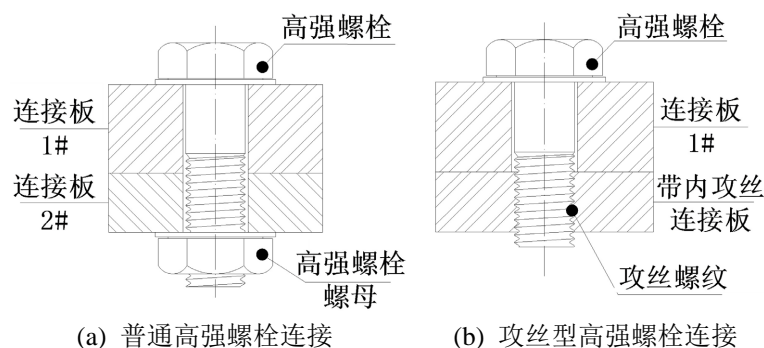


Figure 1. Comparison of high strength bolted connection forms
图 1. 高强螺栓连接形式比较

新型连接方式在剪切状态下的破坏模式、受力机理和承载能力均存在不明确之处, 现行钢结构规范中未包含该类连接类型, 开展对该新型螺栓连接抗剪性能评价的研究工作是十分必要的。针对单边紧固连接的研究, 目前多数研究关注在这类连接的应用[9] [10] [11] [12], 较少考察单个螺栓的受力性能。本文在试验研究基础上, 探讨高强螺栓攻丝型连接的抗剪承载性能。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

试验以单个螺栓为研究对象, 共设计 3 组试件进行研究。试验高强度螺栓选用实际工程中常用的 M20、M24 和 M30, 带内螺纹的连接板厚度取 20 mm 和 24 mm 两种厚度, 各组试件的具体情形如表 1 所示。图 2 给出了各试件的设计制作尺寸, 加工成型后试件如图 3 所示。

Table 1. Grouping of specimens

表 1. 试件分组情况

试件分组	螺栓性能等级	螺栓公称直径	带标准孔连接板厚	带攻丝连接板厚	试件编号
第一组	10.9 级	M20	20 mm	20 mm	M20-20-1
					M20-20-2
					M20-20-3
第二组	10.9 级	M24	20 mm	20 mm	M24-20-1
					M24-20-2
					M24-20-3
第三组	10.9 级	M24	24 mm	24 mm	M24-24-1
					M24-24-2
					M24-24-3
第四组	10.9 级	M30	24 mm	24 mm	M30-24-1
					M30-24-2
					M30-24-3

2.2. 加载方案与测试内容

试验采用 1000kN 级电液伺服万能试验机进行加载(图 4), 加载方式采用位移加载方法。在正式加载之前, 对试件进行预加载, 保证螺栓连接顺利进入正常受剪状态; 同时确保试验仪器工作正常。预加载到预定荷载的 5%后卸载至零, 然后施加单调荷载, 加载速率控制在 2mm/min, 直至试件发生明显破坏或者承载力显著下降, 试验过程中作动器施加的力和位移由 MTS 加载系统记录。

试验过程中主要量测内容包括:

- 1) 两摩擦面间开始发生相对滑移时的剪力值;
- 2) 极限剪力值;
- 3) 荷载—变形曲线。

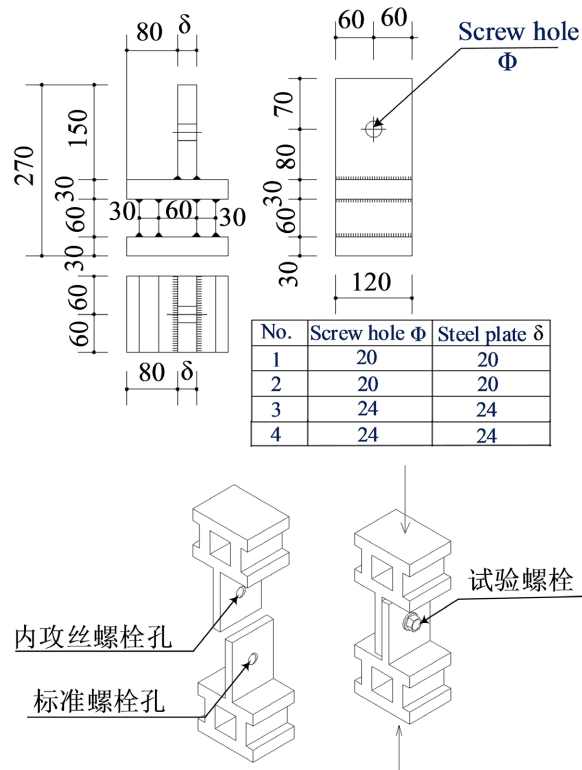


Figure 2. Specimen size and assembly method
图 2. 试件尺寸与装配方式



Figure 3. The specimen after assembling
图 3. 装配成型后试件



Figure 4. Test loading device
图 4. 试验加载装置

3. 试验结果与分析

3.1. 试件抗剪承载力的理论分析

对于普通高强螺栓的抗剪连接, 依据连接失效的极限状态的不同, 可以分为摩擦型抗剪连接与承压型抗剪连接。摩擦型抗剪连接以连接钢板产生相对滑动为极限状态, 是钢结构重要受力构件以及承受动荷载情形下构件连接采用的连接方式; 承压型抗剪连接则以螺杆与落实孔壁相互挤压产生破坏为连接失效的极限状态, 它包括螺杆剪断或是孔壁压坏两种极限情形。我国钢结构高强度螺栓连接技术规程 (JGJ82-2011) 针对两类型抗剪连接给出的极限承载力确定方法分别如式(1)和式(2)所示。

摩擦型抗剪连接单个螺栓承载力:

$$N_{v1}^b = k_1 k_2 n_f u P \quad (1)$$

承压型抗剪连接单个螺栓承载力:

$$N_{v2}^b = \min \left[n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b, d \sum t f_c^b \right] \quad (2)$$

上述抗剪承载力理论分析式中, P 为螺栓连接预紧力, n_f 、 n_v 分别为摩擦面和剪切面的个数, d 为高强螺栓直径, $\sum t$ 为连接在不同受力方向中一个受力方向承压构件的总厚度的较小值, 对于普通钢结构, 系数 $k_1 = 0.9$, 标准孔型连接 $k_2 = 1.0$ 。

针对本文攻丝型高强螺栓连接, 预紧力控制参考 JGJ82-2011 中的规定, M20、M24、M30 的 10.9 级高强螺栓预紧力分别取为 155kN、225kN、355kN, 试验过程采用数显式电动扭矩扳手对高强螺栓预紧力值进行控制。摩擦面处理方式为手工除锈, 摩擦系数取为 0.35, 试件设计为单剪连接, n_f 、 n_v 取值均为 1.0。基于上述条件, 可计算得出各组连接试件的抗剪承载力参考理论值如表 2 所示。

Table 2. Calculation value of shear connection capacity of each group based on JGJ82-2011

表 2. 基于 JGJ82-2011 的各组试件抗剪连接承载力计算值

试件分组	高强螺栓直径	一个摩擦型连接高强螺栓的抗剪承载力 N_{v1}^b (kN)	一个承压型连接高强螺栓的抗剪承载力 N_{v2}^b (kN)
第一组	M20	48.825	75.950
第二组	M24	70.875	109.430

Continued

第三组	M24	70.875	109.430
第四组	M30	111.825	173.910

3.2. 试验现象

通过预加载使试件的支撑约束部位与加载部位接触良好, 进入正式加载阶段。正式加载第一阶段, 螺栓连接处于弹性受力变形阶段, 剪力和位移的增长关系接近于线性变化, 板件和螺栓变形不明显, 当荷载加载达到一定值时, 连接板与自攻螺纹钢板出现明显的相对滑移, 滑移一定的距离后, 剪力和位移的增长关系又接近于线性变化, 继续施加荷载, 临近螺栓连接的极限承载力时, 螺杆发生塑性变形, 最终螺杆剪断破坏, 钢板的螺栓孔壁螺纹处出现微小的挤压变形, 螺栓的抗剪承载力急剧下降, 破坏状态如图 5 所示。

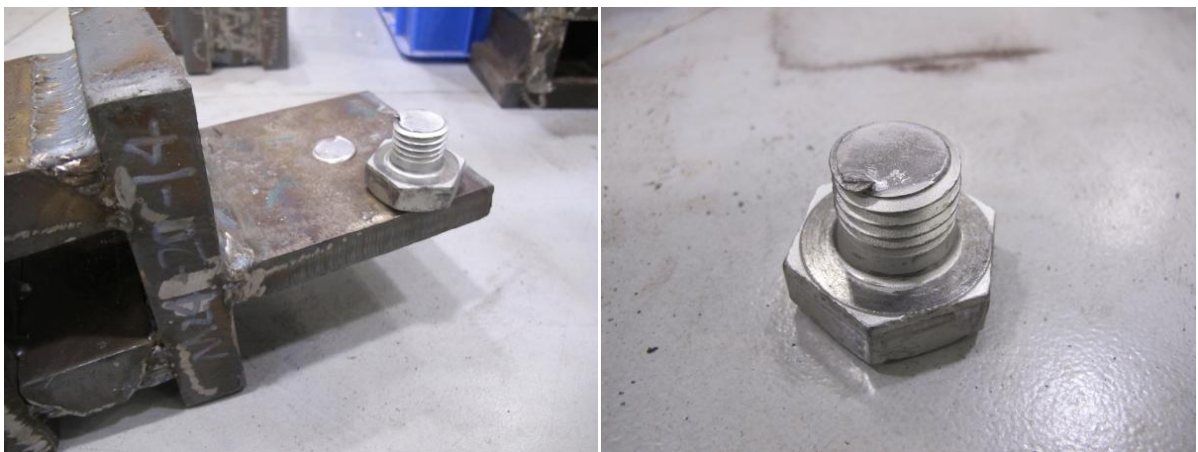


Figure 5. Specimen failure pattern

图 5. 试件破坏形式

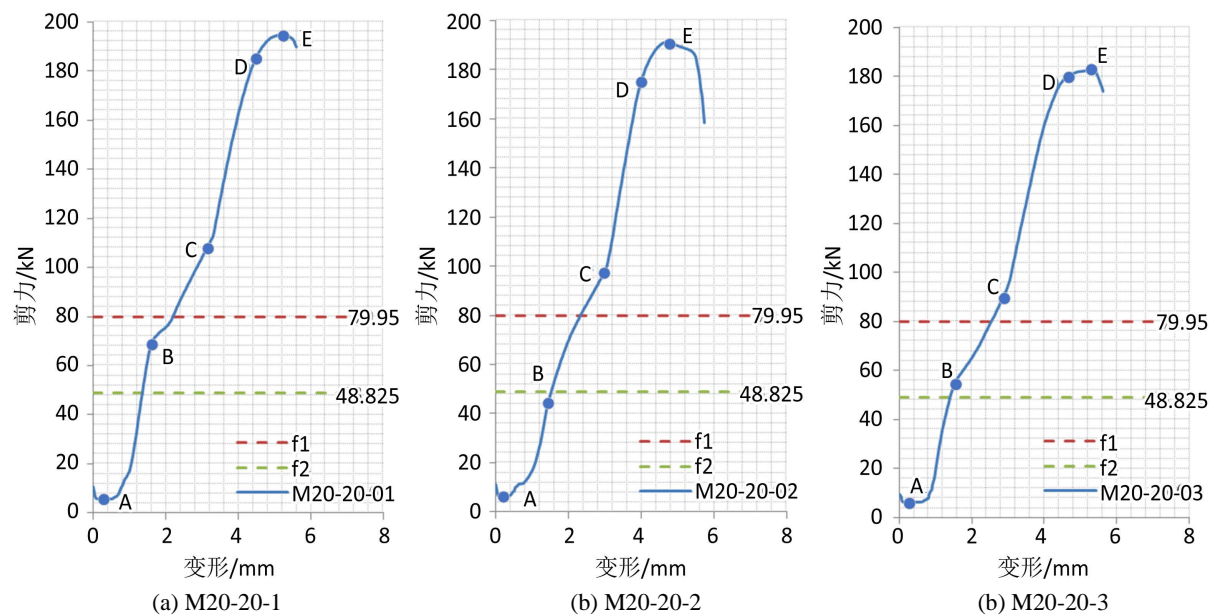


Figure 6. Shear-displacement curve of the first group of specimens

图 6. 第一组试件剪力 - 位移曲线

3.3. 试验结果

由试验得到各组螺栓受到的剪力与连接板件摩擦面两侧相对变形的关系曲线如图 6~9 所示, 图中 f_1 表示一个摩擦型连接高强螺栓的抗剪承载力, f_2 表示一个承压型连接高强螺栓的抗剪承载力; f_1 和 f_2 分别依据 JGJ82-2011 相关规定计算得到(如表 2 所示)。

3.4. 结果分析

1) 从各组试件剪力 - 位移曲线可以看出, AB 段是高强螺栓攻丝型装配连接的摩擦传力阶段, BC 段

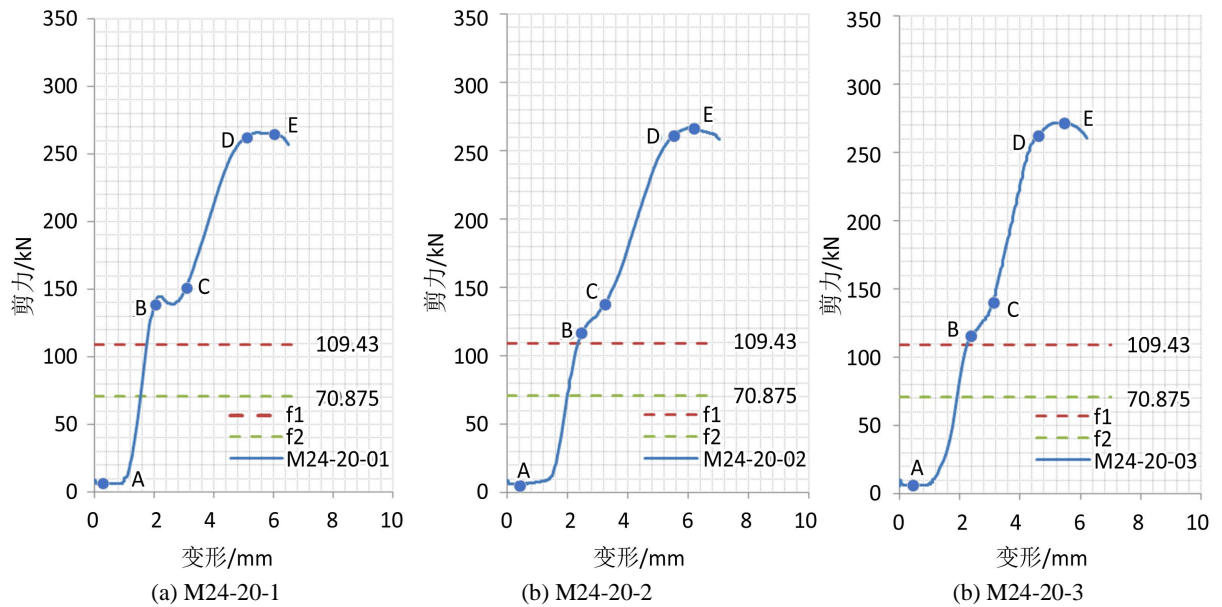


Figure 7. Shear-displacement curve of the second group of specimens

图 7. 第二组试件剪力 - 位移曲线

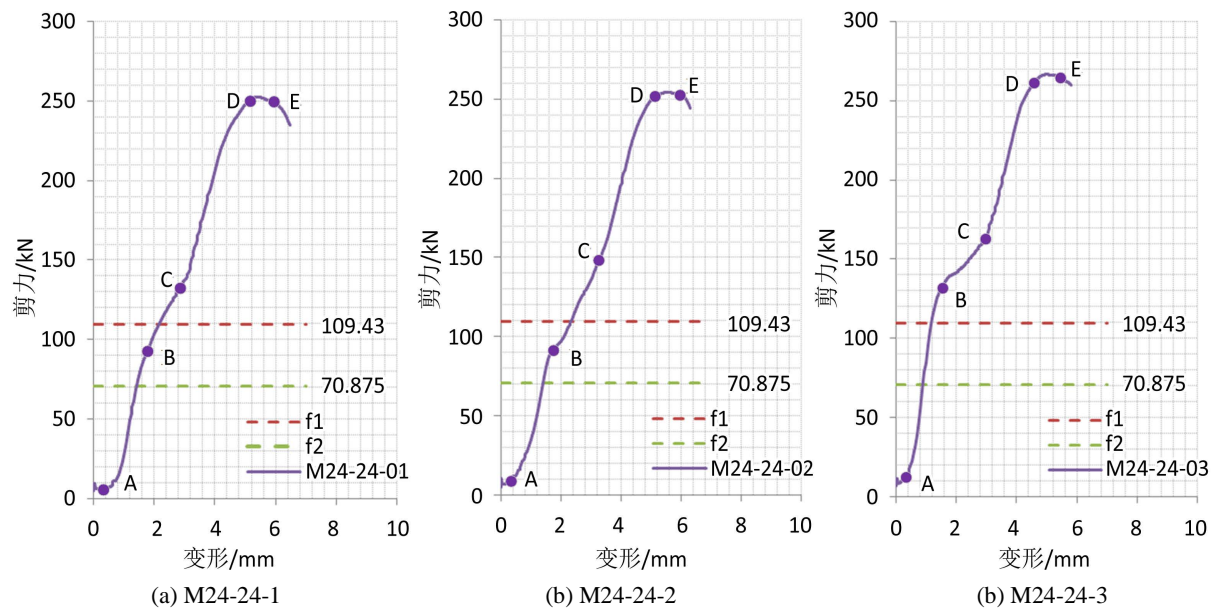


Figure 8. Shear-displacement curve of the third group of specimens

图 8. 第三组试件剪力 - 位移曲线

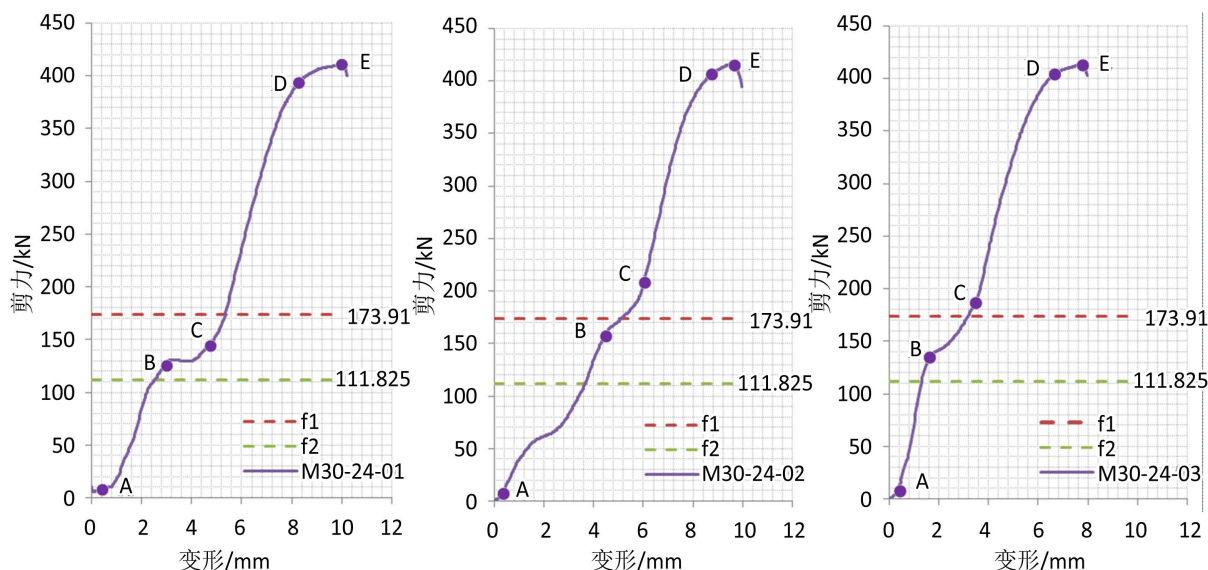


Figure 9. Shear-displacement curve of the fourth group of specimens

图 9. 第四组试件剪力 - 位移曲线

是相对滑移阶段，CD 段则是两连接钢板与螺栓顶紧接触后的承压传力阶段，AB、CD 段均表现为线性受力状态。4 组试件试验结果均显示，攻丝型高强螺栓连接存在一个较长的滑移阶段，这对不容许出现滑移的摩擦型连接来说，是会影响连接的正常使用的。

2) 表 3 汇总了各试件两摩擦面间开始发生相对滑移时的剪力值和极限剪力值，表中将试验值与《钢结构设计规范》中单个 10.9 级 M20、M24、M30 规格高强度螺栓摩擦性连接和承压型连接的抗剪承载力设计值进行了比较。

Table 3. Test results under various loads

表 3. 各级荷载作用下检验测试结果

试件分组	试件编号	摩擦面间开始发生相对滑移时的剪力试验值 Q_1 (kN)	极限剪力试验值 Q_{max} (kN)	$\frac{Q_1}{N_{v1}^b}$	$\frac{Q_{max}}{N_{v2}^b}$
第一组	M20-20-1	67.060	183.070	1.373	2.410
	M20-20-2	42.365	175.025	0.868	2.304
	M20-20-3	54.770	179.525	1.122	2.364
第二组	M24-20-1	138.450	266.080	1.953	2.432
	M24-20-2	105.610	266.830	1.490	2.438
	M24-20-3	108.385	272.165	1.529	2.487
第三组	M24-24-1	81.860	252.375	1.155	2.306
	M24-24-2	83.505	254.095	1.178	2.322
	M24-24-3	123.340	266.430	1.740	2.435
第四组	M30-24-1	124.435	410.495	1.113	2.360
	M30-24-2	162.235	415.475	1.451	2.389
	M30-24-3	129.075	412.805	1.154	2.374

由表中数据可知, 攻丝型高强螺栓连接的摩擦抗剪阶段, 各组试件的平均摩擦抗剪承载力试验值均大于相应普通高强螺栓按规范计算摩擦抗剪承载力, 但数据比较离散, 主要是因为扭矩法施工本身具有较大的离散性, 施加给螺栓的预紧力就有较大的离散性, 并且试验中的板件间的摩擦系数与规范值也有差异。同时有个别试验值(M20-20-2)低于规范计算值, 并且试验的摩擦阶段最大位移值比较大, 不满足摩擦型高强螺栓的正常使用极限状态要求, 不适合按照传统摩擦型高强螺栓的设计准则来进行工程设计。各组试件在承压传力阶段, 攻丝型高强螺栓连接的极限抗剪承载力试验平均值均大于单个承压型高强螺栓抗剪承载力规范计算值, 并且富余量较大, 可见攻丝型高强螺栓连接按照传统承压型高强螺栓的设计准则来进行工程设计是比较合适的。

4. 结论

1) 试验表明: 攻丝型高强螺栓连接与传统高强螺栓连接受剪的各阶段受力机理和破坏模式类似, 同样存在摩擦传力的弹性阶段、板件滑移阶段、螺杆传力的弹性阶段、弹塑性阶段。

2) 攻丝型高强螺栓连接的摩擦抗剪阶段, 试验得到的抗剪承载力离散型较大, 个别试件得到的抗剪承载力小于按普通高强螺栓确定的抗剪承载力规范计算值, 且试验得到的板件间相对滑移也比较大, 不能满足摩擦型高强螺栓抗剪的正常使用极限状态要求, 不适合按照传统摩擦型高强螺栓连接的设计准则来进行工程设计。

3) 攻丝型高强螺栓连接的承压抗剪阶段, 连接的极限抗剪承载力较普通高强螺栓按规范计算的承载力设计值高很多, 该类型连接按传统承压型高强螺栓连接的设计准则来进行工程设计是合适的。

基金项目

湖南省教育厅科学研究重点项目: 攻丝型单边紧固高强螺栓考虑孔型影响的装配连接受力性能与设计计算理论研究(19A095)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ82-2011 钢结构高强度螺栓连接技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 陈珂璠, 李宇晗, 陆金钰. 单边紧固螺栓在结构工程中应用的研究进展[J]. 江苏建筑, 2016(1): 27-30.
- [4] 徐婷, 王伟, 陈以一. 国外单边螺栓研究现状[J]. 钢结构, 2015(8): 27-33.
- [5] Cabrera, M., Tizani, W., Ninic, J., et al. (2021) Experimental and Numerical Analysis of Preload in Extended Hollo-Bolt Blind Bolts. *Journal of Constructional Steel Research*, **186**, Article ID: 106885. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106885>
- [6] Flowdrill Ltd., Flowdrill Brochure (2020) <https://www.flowdrill.com>
- [7] Wang, J., Zhang, L. and Spencer, B. (2013) Seismic Response of Extended End Plate Joints to Concrete-Filled Steel Tubular Columns. *Engineering Structures*, **49**, 876-892. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.01.001>
- [8] Lindapter, T.H.B. (2014) Hollo-Bolt®. *Cavity Fixings*, **2**, 41-43.
- [9] Wang, J.-F., Han, L.-H. and Uy, B. (2009) Behaviour of Flush End Plate Joints to Concrete-Filled Steel Tubular Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, 925-939. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.10.010>
- [10] Wang, J.-F., Han, L.-H. and Uy, B. (2009) Hysteretic Behaviour of Flush End Plate Joints to Concrete-Filled Steel Tubular Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, 1644-1663. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.12.008>
- [11] Javora, A. and Skejić, D. (2017). Resistance Assessment of Beam-to-Column Joints with Different Blind Bolt Systems. *Technical Gazette*, **24**, 1103-1112. <https://doi.org/10.17559/TV-20150923165859>
- [12] Jeddi, M.Z., Sulong, N.H.R. and Ghanbari-Ghazijahani, T. (2022) Behaviour of Double-Sleeve Tubebolt Moment Connections in CFT Columns under Cyclic Loading. *Journal of Constructional Steel Research*, **194**, Article ID: 107302. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107302>