

Performance Investigation on Mechanical Properties of End Plate Connection with High-Strength Bolts under Cyclic Loading

Xiaolei Li, Zhiyu Wang

Institute of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu Sichuan
Email: 2016223055098@stu.scu.edu.cn

Received: May 10th, 2018; accepted: May 22nd, 2018; published: May 29th, 2018

Abstract

In order to study the mechanical properties of end plate connection with high-strength bolts, three connection specimens were tested by cyclic loading test. The influences of the tube wall thickness and the diameter of bolts were analyzed. The experimental results show that increasing the tube wall thickness and the diameter of bolts can raise bearing capacity and reduce stiffness degradation of end plate connection with high-strength bolts at the same magnitude of displacement.

Keywords

End Plate Connection with High-Strength Bolts, Cyclic Loading, Bearing Capacity, Stiffness Degradation

高强螺栓端板连接钢管柱节点在循环荷载作用下的力学性能分析

李晓磊, 王志宇

四川大学建筑与环境学院, 四川 成都
Email: 2016223055098@stu.scu.edu.cn

收稿日期: 2018年5月10日; 录用日期: 2018年5月22日; 发布日期: 2018年5月29日

摘要

为研究高强螺栓端板连接钢管柱节点在循环荷载作用下的力学性能, 进行了3个连接件的循环加载试验,

分析了钢管管壁厚度和螺栓规格对连接件承载力和刚度退化的影响。研究表明: 增加管壁厚度和提高螺栓规格均能提高高强螺栓端板节点在同一位移量级下的承载力以及有效地减小端板连接件的刚度退化程度。

关键词

高强螺栓端板, 循环荷载, 承载力, 刚度退化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

焊接和螺栓连接是传统钢结构节点中最常见的两种连接方式, 其中焊接由于其工艺性能不稳定, 且耗时长、增加工程成本, 后逐渐被高强螺栓连接所代替, 高强螺栓连接件是采用高强螺栓将钢构件相连, 是钢结构中应用较多的一种连接形式。目前国内外针对该连接形式已经做了一些相关的研究和分析, 研究表明, 高强螺栓连接是半刚性连接[1], 具有较好的抗震性能和延性, 且安装简单, 可以节省人力。

半刚性连接是一种介于刚性连接和柔性连接的节点连接形式, 兼具刚性节点和柔性节点的优点, 但其在地震作用下应力状态复杂。基于此, 国内外学者对高强螺栓端板这种典型的半刚性节点做了大量的力学性能研究。Krishnamurthy [2]等人对端板连接的承载力性能进行了有限元分析, 通过建立有限元模型得到分析结果, 并和实际的试验实测结果进行对比发现, 二维模型和三维模型所得结果均与试验结果有所差异, 且三维模型的差异大于二维模型, 美国 AISC 规范在制定时采用了其中的相关结论。但该研究的有限元分析在现在看来并不精确, 研究者在建立的三维模型中简化了螺栓、以及撬力等因素的影响; Morrison [3]等人设计了一种外伸端板连接件, 既在端板上布置多排螺栓, 并计算端板厚度, 从而判断其端板类型, 最后使用 Kennedy [4]提出的考虑撬力作用后的计算模型计算螺栓力; 石文龙等人对梁柱半刚性组合连接节点在地震作用下的抗震性能进行了试验研究。通过对设计节点试件进行循环加载, 对其变形能力和耗能能力进行对比分析。最终发现, 地震荷载作用下, 半刚性连接节点具有良好的耗能能力和承载能力; 陈绍蕃[5]等人总结了各国规范中关于门式钢架无加劲肋外伸端板连接件的规定, 在考虑厚度等设计影响因素下, 提出了一种更为实用的计算模型, 并通过试验结果和计算模型结果进行比较, 其数值基本吻合。

以上研究大多基于理论分析且没有考虑钢管设计参数以及高强螺栓规格对节点力学性能的影响以及端板节点在竖向地震荷载作用下的刚度退化分析等, 都有待深入研究。基于此本文设计了不同钢管柱壁厚和螺栓直径的高强螺栓钢管柱端板连接件, 并对其施加由位移控制的竖向循环荷载以模拟竖向地震作用, 对高强螺栓钢管柱端板节点的力学性能及其影响因数, 以刚度退化影响程度做出深入研究, 为实际工程设计提供参考依据。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

本试验设计了三种试件模型, 分别对比钢管柱壁厚和螺栓直径两个变量对节点在循环荷载作用下的

刚度退化程度的影响, 试件模型见图 1。节点的破坏模式主要以钢管管壁变形和螺栓破坏为主, 采用 20 mm 厚的梁端板, 刚度较大, 其弯曲变形几乎可以忽略, 因此不存在撬力[6]。

方钢管柱长度为 300 mm, 截面尺寸为 200 mm × 200 mm。螺栓采用 8.8 级高强螺栓, 螺栓规格为 M16 和 M12, 以考虑螺栓相对于钢管壁受力的强弱关系。各试件编号及详细参数见表 1。

2.2. 试验装置及加载

试验设备采用日本岛津(SHIMADZU)公司生产的 EHF-EM200k2-040 型电液伺服疲劳试验机, 该试验机由试验台、4890 控制器、液压系统、作动器、计算机、冷却水循环系统等组成; 其中, 加载系统由计算机系统、电控信号处理系统和油泵组成, 整体系统配套循环制冷系统, 保障长期疲劳加载过程的散热条件。

试验台由空心方钢管柱、两个工字型钢横梁和工字型钢横梁一端焊接的钢板, 通过高强螺栓连接而成, 其中, 钢横梁尺寸为 775 mm × 250 mm × 200 mm, 所焊接钢板板厚 25 mm, 所有连接件试件中的空心钢管柱均采用 Q235 钢, 所有连接件的力学性能参数见表 2 [6], 试验加载见图 2。

2.3. 试验加载方案

本次试验各试件都将进行 2 次完整的循环加载, 加载过程前期为弹性阶段, 主要是为了研究节点的弹性性能, 接下来的位移会增加, 增加到直至使节点中某一个组件首次出现屈服, 我们将这一个位移称为 δ , 随着加载的进行, 位移会以 δ 依次递增, 具体加载方案见图 3。

3. 承载力及刚度退化分析

3.1. 骨架曲线

骨架曲线是每次位移控制下的循环加载达到的承载力最大峰值的轨迹, 不论是在任何时间的运动,

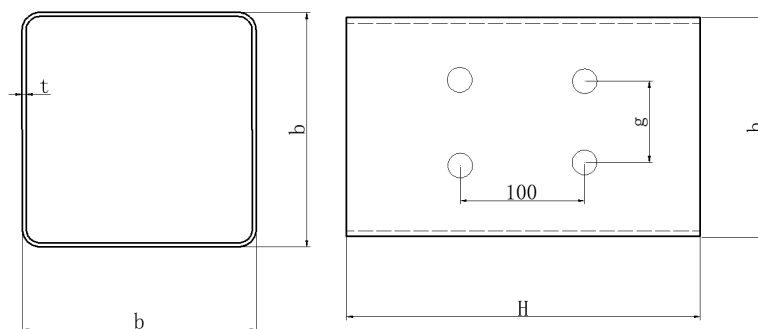


Figure 1. The geometric details of the test specimens
图 1. 试件模型图

Table 1. Detailed parameters of specimen
表 1. 试件详细参数

试件	高强螺栓类别	螺栓规格	t/(mm)	g/(mm)	H/(mm)
G-5-6-20	8.8 级高强螺栓	M16	5	6	300
G-8-6-20	8.8 级高强螺栓	M12	8	6	300
G-8-6-20	8.8 级高强螺栓	M16	8	6	300

注: G 代表高强螺栓试件; t 为钢管柱壁厚, mm; g 为螺栓孔横向间距, cm; H 为钢管柱截面高度, mm。

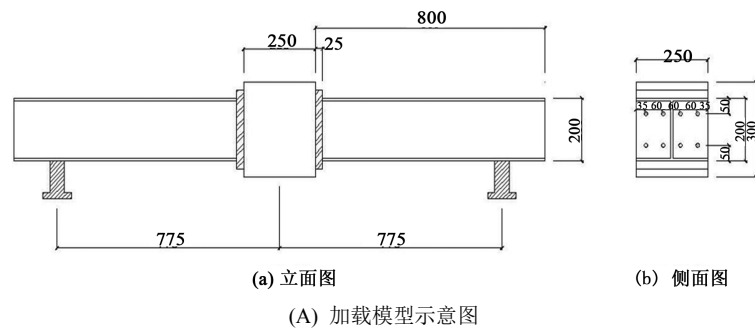


Figure 2. Experimental test set-up
图 2. 试验加载图

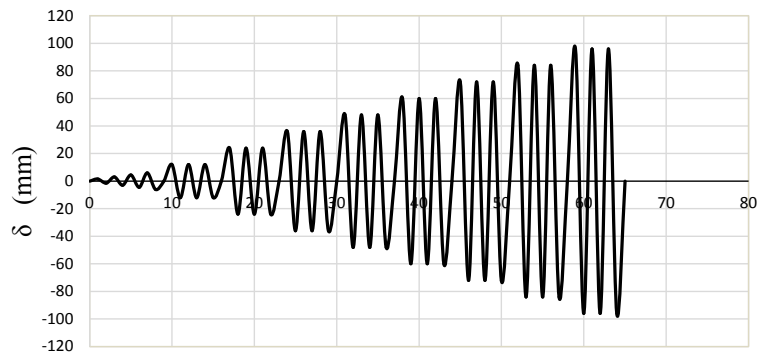


Figure 3. Loading scheme
图 3. 加载方案示意图

骨架曲线包含所有的峰点，并且峰点在达到骨架曲线以后只能沿着骨架曲线前进。本试验的骨架曲线是通过位移和承载力关系的滞回曲线得到的，因此也可以将骨架曲线称之为包络线。定义骨架曲线的作用一般有两个方面：一是直观地衡量和比较结构构件的抗震性能；二是骨架曲线与相应的单调加载的位移-承载力曲线类似，能够比较准确地反应结构构件的承载能力、刚度、强度、变形等性能。

各试件的骨架曲线如图 4 所示。各试件在位移控制的循环荷载作用下，都存在弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。试件的骨架曲线在弹性阶段都为一条直线，呈现出弹性性质的变形；随着荷载进一步的

Table 2. Mechanical properties of materials**表 2.** 材料力学性能

试样材料	弹性模量(10^5 MPa)	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)
200 mm × 200 mm × 5 mm	1.88	277.33	435	34
200 mm × 200 mm × 8 mm	1.65	258.03	425	32
8.8 级高强螺栓	2	960	1010	12

加载, 骨架曲线开始出现弯曲现象, 承载力开始沿着骨架曲线弯曲方向增加, 增长速度快于位移的增长, 导致试件的刚度进一步的降低, 变形也越来越明显, 直至试件失效。

在两次完整的位移控制的循环加载下, 各试件均得到了两条骨架曲线, 通过比较可以定性地看出: 第二次循环加载下各试件的承载能力均要低于第一次循环加载, 说明各试件在经历过第一次循环加载后, 由于试件产生了相应的塑性变形, 刚度有所退化。

3.2. 承载力分析

通过试验得到以上骨架曲线, 再根据参量的不同, 对试件的承载能力进行定量的相互比较发现, 影响试件承载能力的因素主要有以下两点:

1) 钢管柱壁厚的影响。钢管柱的壁厚影响着试件的刚度, 壁厚为 5 mm 试件的刚度相较于壁厚为 8 mm 试件的刚度而言有所下降, 将试件 G-5-60 和试件 G-8-60(M16)的骨架曲线进行比较可以容易地发现壁厚为 8 mm 的试件的承载能力的增幅在初始就比壁厚为 5 mm 的试件高, 并且当位移达到约 25 mm 时, 壁厚为 5 mm 的试件失效, 而壁厚为 8 mm 的试件的承载力继续增加, 直至位移到约 32 mm 时, 承载力达到最大, 试件宣告失效。故通过增加钢管柱的壁厚, 可以有效地提高端板节点的承载力性能, 且在同一位移量级下提高率最高可达到 183.3%。

2) 螺栓规格的影响。螺栓规格的不同主要是螺栓杆直径栓孔的大小不同, 本次试验中, 螺栓规格从 M12 增加到 M16, 对比试件 G-8-60(M12)和试件 G-8-60(M16)的骨架曲线可以看出, 螺栓规格从 M12 增大到 M16, 在位移约 42 mm 之前, 两个试件的承载力均保持稳定增长, 随着位移继续增大, 试件螺栓规格为 M12 的试件失效, 而螺栓规格为 M16 的试件继续保持稳定增长, 直至试件失效; 同时, 螺栓规格为 M16 试件承载力增长率明显高于螺栓规格为 M12 试件, 并且在同一位移量级下, 承载力最大提高率约 27.3%。

3.3. 刚度分析

3.3.1. 刚度影响因素分析

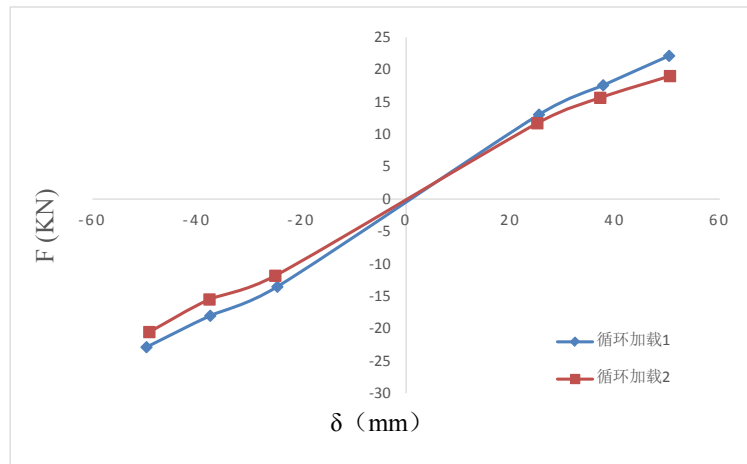
试件的刚度可用线性刚度来表示, 线性刚度 K_i 应按下式计算:

$$K_i = |F_i|/\delta \quad (1)$$

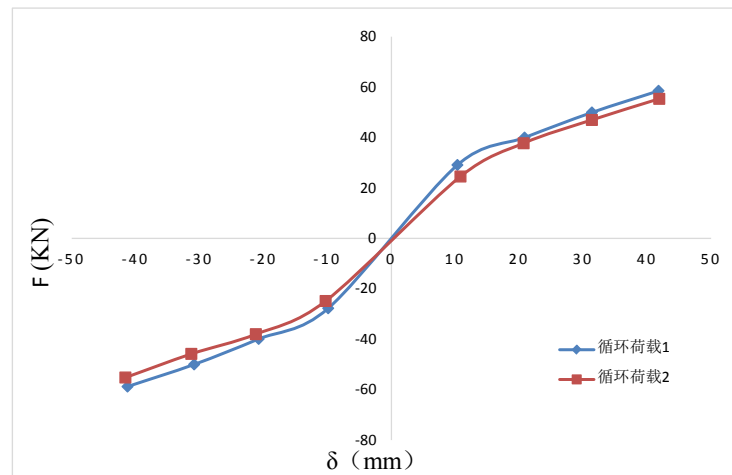
式中, F_i 为第 i 个试件的弹性阶段与弹塑性阶段的临界荷载, 即屈服荷载; δ 为该临界荷载下的位移值, 即屈服位移。在本文刚度统计中, 分别取试件两次完整周期的循环加载下得到的正、负临界荷载和临界位移, 作为刚度统计的依据, 表 3 是不同试件第一次完整周期下的循环加载刚度表、表 4 是不同试件第二次完整周期下的循环加载刚度表。

通过对不同参量试件的刚度进行定量的相互比较发现, 影响高强螺栓钢管柱端板节点刚度的因素可以归纳为以下两点:

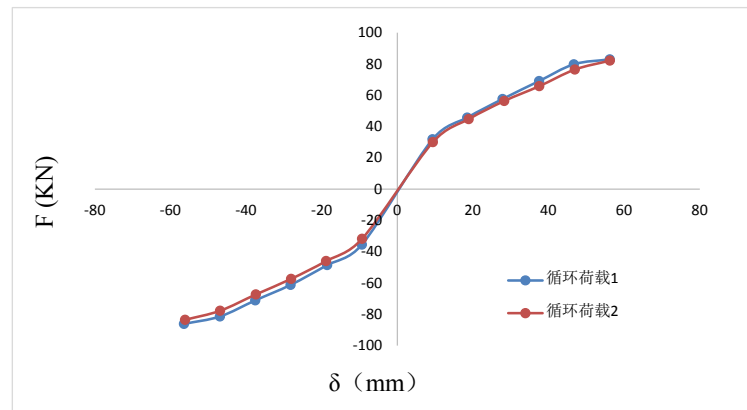
1) 钢管柱壁厚的影响。对比试件 G-5-6-20 和 G-8-6-20(M16), 可以发现, 壁厚从 5 mm 增加到 8 mm,



(a) 试件 G-5-60



(b) 试件 G-8-60(M12)



(c) 试件 G-8-60(M16)

Figure 4. Skeleton curve of specimens
图 4. 各试件骨架曲线示意图

钢管柱的刚度增加了 580.1%，原因是壁厚的增加使钢管连接面刚度增大，变形减小，因此高强螺栓端板节点刚度得到很大提高。

Table 3. Rigidity of first cyclic loading
表 3. 试件第一次循环加载刚度表

试件编号	屈服荷载		屈服位移		线性刚度	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
G-5-6-20	13.06	-13.53	25.41	-24.63	0.51	0.55
G-8-6-20(M12)	29.14	-27.69	10.31	-9.89	2.83	2.80
G-8-6-20(M16)	31.91	-35.40	9.31	-9.38	3.43	3.77

Table 4. Rigidity of second cyclic loading
表 4. 试件第二次循环加载刚度表

试件编号	屈服荷载		屈服位移		线性刚度	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
G-5-6-20	11.73	-11.83	25.09	-25.03	0.47	0.47
G-8-6-20(M12)	24.56	-24.81	10.79	-10.29	2.28	2.41
G-8-6-20(M16)	30.12	-31.69	9.40	-9.32	3.20	3.40

2) 螺栓规格的影响。对比试件 G-8-6-20(M12)和 G-8-6-20(M16), 螺栓规格从 M12 到 M16, 端板节点的平均线性刚度(注: 取第一次循环加载下正向和负向刚度平均值)从 2.82 kN/mm 增加到 3.60 kN/mm, 增加率为 27.7%。这是因为螺栓规格增大, 也就是螺栓尺寸增大, 使得螺栓抗拉能力更好, 不易被拉断, 因此让试件可以承受相对更大的荷载, 端板节点刚度也得到提高。

3.3.2. 刚度退化影响因素分析

从表 3 和表 4 可以看出, 各试件在经过第二次循环加载后其刚度相较于第一次循环加载均有明显退化情况发生, 这是由于损伤累积所产生的刚度退化。正向的退化情况明显优于负向的退化情况, 以负向刚度为例, 通过比较各试件的第一次和第二次循环加载下的刚度可以发现:

1) 增加钢管柱壁厚可以抑制端板节点的刚度退化。对比试件 G-5-6-20 和 G-8-6-20(M16), 可以发现, 壁厚从 5 mm 增加到 8 mm, 端板节点的刚度退化率也 25.5%减小到 9.8%。

2) 提高螺栓规格可以抑制端板节点的刚度退化。对比试件 G-8-6-20(M12)和 G-8-6-20(M16), 螺栓规格从 M12 到 M16, 端板节点的刚度退化率从 13.9%减小到 9.8%。

4. 结论

1) 增大钢管管壁厚度和螺栓规格均可提高高强螺栓端板节点在同一位移量级下的承载力, 其中增大钢管管壁厚度的影响最为显著, 提高率最高可达到 183.3%。

2) 增加钢管管壁厚度和提高螺栓规格均能提高高强螺栓端板节点的刚度, 使钢管连接面的变形减小, 其中增加管壁厚度效果最为明显。

3) 高强螺栓钢管柱的端板节点存在明显的刚度退化现象, 而钢管柱壁厚和螺栓规格对端板连接件刚度退化程度有明显影响, 在一定范围内增加钢管柱壁厚, 提高螺栓规格可有效地减小端板连接件的刚度退化程度。

参考文献

[1] 匡祯斌. 钢结构螺栓端板连接节点的受力性能分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.

- [2] Krishnamurthy, N. (1978) Fresh Look at Bolted End-Plate Behavior and Design. *Engineering Journal*, **15**, 39-49.
- [3] Morrison, S.J. (1986) Studies of Certain End-Plate Moment Connections, Master of Science Thesis, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman.
- [4] Kennedy, N.A., Vinnakota, S. and Sherbourne, A.N. (1981) The Split-Tee Analogy in Bolted Splices and Beam-Column Connections, Joints in the Structural Steel Wok. *Proceedings of the International Conference on Joints in Steelwork*, Middles Brough, United Kingdom, 138-157.
- [5] 陈绍蕃. 门式刚架端板螺栓连接的强度和刚度[J]. 钢结构, 2000, 21(6): 30-34.
- [6] GB50017-201x. 钢结构设计规范[S]. 中华人民共和国国家标准.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org