Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2017, 6(4), 345-354
Published Online July 2017 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2017.64040

Hans汉斯

Experimental Research on Structural Behavior of High-Strength Bolted Grouted Sleeve Flush Endplate Connections

Lisi Tang, Shouchao Jiang

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: 1224545240@qq.com

Received: May 27th, 2017; accepted: Jun. 10th, 2017; published: Jun. 15th, 2017

Abstract

A new type of flush endplate connection, named better-tolerance high-strength bolted grouted sleeve flush endplate connection, was developed for splice H-shape steel. In this paper, the static loading failure tests were conducted on two specimens in order to evaluate load transfer mechanism, strength capacity, tensile force distribution of high-strength bolts and failure mode of this type of connection, furthermore, the other two specimens of its corresponding type of high-strength bolted flush endplate connections were designed to compare their mechanical performances. The experimental results indicate that by comparing with high-strength bolted flush endplate connections, the bending capacity and ductility of high-strength bolted grouted sleeve flush endplate connections increases remarkably, the shearing capacity and the tension distribution of the bolts in the compression zone is basically the same, but with the increase of the load, the tension distribution of bolts in tension zone is smaller than the high-strength bolt endplate flush endplate connections. The results show that since the bolt aperture can be properly opened largely without affecting its mechanical performance, so this type of connection can effectively solve the installation difficulty of high-strength bolts, and facilitate to install at construction sites.

Keywords

High-Strength Bolt, Grouted Sleeve, Expansive Cement, Flush Endplate

高强螺栓灌浆套管端板拼接节点试验研究

唐立思，蒋首超

同济大学土木工程学院，上海
Email: 1224545240@qq.com

收稿日期：2017年5月27日；录用日期：2017年6月10日；发布日期：2017年6月15日

文章引用: 唐立思, 蒋首超. 高强螺栓灌浆套管端板拼接节点试验研究[J]. 土木工程, 2017, 6(4): 345-354.
https://doi.org/10.12677/hjce.2017.64040

摘　要

本文提出了一种新型H形截面钢高强螺栓端板拼接节点，即容错度较好的高强螺栓灌浆套管端板拼接节点。为研究此节点的受力性能，实验设计了2个足尺试件，对其进行静力加载破坏试验，分析节点的受力特性、承载力性能、高强螺栓的拉力分布规律及破坏模式，并同时设计2个试件与该节点对应的高强螺栓端板拼接节点进行受力性能的对比。试验结果表明：相较于高强螺栓端板拼接节点，该节点的抗弯承载力及延性提高较显著；抗剪承载力基本相同；受压区螺栓的拉力分布基本一致，受拉区螺栓的拉力分布，随着荷载的增大，其拉力始终小于高强螺栓端板拼接节点的受拉区螺栓。研究表明此节点由于端板上可以适当地开大螺栓孔径的大小而不影响其受力性能，故可以有效地解决高强螺栓的安装难度，便于施工现场安装。

关键词

高强螺栓，灌浆套管，膨胀水泥，端板拼接

1. 引言

高强螺栓端板连接具有构造简单、承载力高、施工方便等特点，在钢结构工程中得到了广泛应用，主要用于钢框架、轻钢门式钢架中的梁柱连接、梁梁拼接等[1]。根据端板的位置和大小的不同，端板连接可分为两端外伸式、一端外伸式、平齐式和内缩式等四种见图 1。目前，国内外学者对端板拼接节点的研究多集中在常规端板拼接节点的稳定性[2]、拼接后对节点的屈服及承载力的影响[3]，或端板拼接的接触分析等[4]，主要侧重于对常规端板拼接形式受力性能的研究。在钢结构中，端板拼接节点现场安装使用高强螺栓较多而且对螺栓孔安装精度要求较高，难于满足钢结构施工安装速度。灌浆套管连接是兴起于海洋工程领域中的一种新型钢管连接方式见图 2。它由两根不同直径的钢管和灌注于钢管环状空间的水泥浆组成，依靠浆体和钢管之间的粘结力传递荷载作用。灌浆套管连接具有良好的承载性、延性及灵活的布置形式，且施工方便、造价低廉，因此也常用于海洋平台受损构件维修与加固[5]。

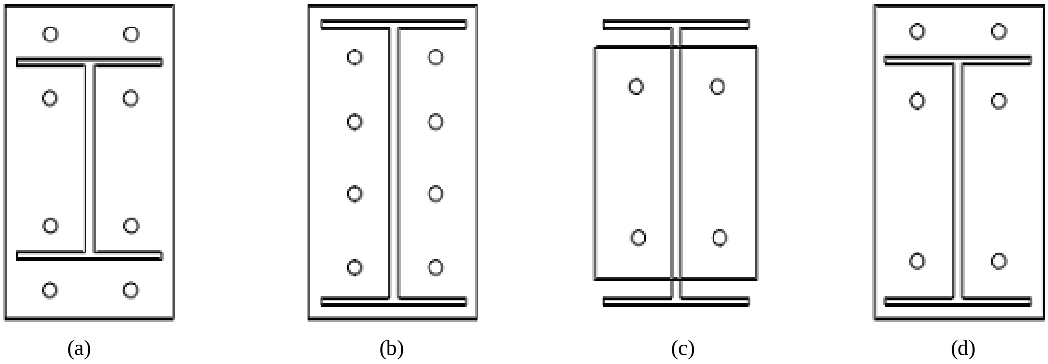


Figure 1. Classification of endplate connections. (a) Both ends of the overhang type; (b) Flush type; (c) Telescopic; (d) The external type
图 1. 端板连接分类。(a)两端外伸式；(b)平齐式；(c)伸缩式；(d)一端外审式

预应力灌浆套管连接作为灌浆套管连接技术的一种，通过在水泥中加入膨胀剂产生的膨胀预压力来保证水泥环和钢管间接接触密实，从而提高连接的性能。灌浆套管连接有三种连接形式分别为半套管连接、内套管连接及外套管连接见图 3。

本文基于灌浆套管连接具有较高的几何协调性及安装精度要求不高的特点，提出一种新型 H 形截面钢高强螺栓端板连接，即容错度较好的高强螺栓灌浆套管端板拼接节点，其构造见图 4。介绍此节点的制作及安装过程，并对其进行静力加载破坏试验以分析此节点的承载力性能、高强螺栓的拉力分布情况及破坏模式，同时与其对应的常规构造高强螺栓端板拼接节点进行受力性能对比，验证该型连接的结构可靠性。

2. 试验概况

2.1. 节点制作及安装

高强螺栓灌浆套管端板拼接节点由焊接 H 型钢、外套管、内钢棒、端板、高强螺栓及膨胀浆体组成。对焊接 H 型钢的腹板按一定尺寸要求进行切剖之后，将外套管和端板与其焊接构成预制好的上下端构件如图 5(a)所示；在上面外套管需要预留好灌浆孔和溢浆孔以便于后面通过其进行灌注膨胀浆体来实现此拼接节点。高强螺栓灌浆套管端板拼接节点的安装过程分为 3 个步骤：第一步将内钢棒插入到下端构件

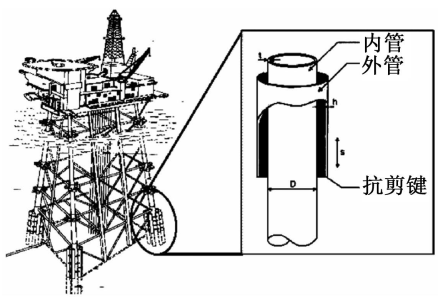


Figure 2. Grouted pile-to-sleeve connections in offshore structures
图 2. 海洋平台中的灌浆套管连接

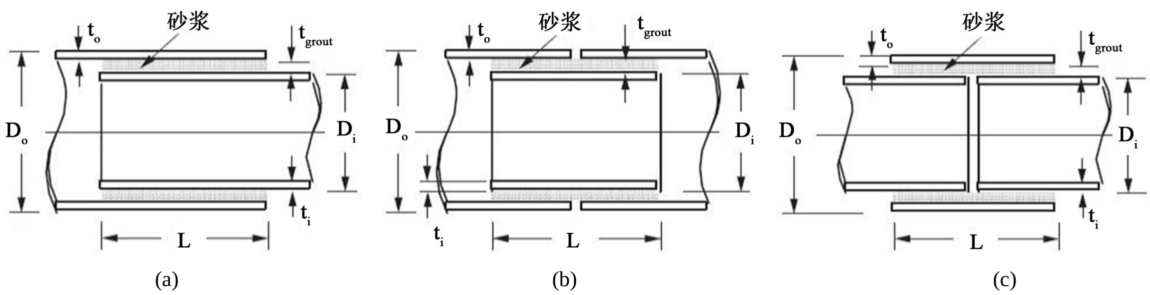


Figure 3. Grouted sleeve connections. (a) half sleeve connection; (b) inner sleeve connection; (c) outer sleeve connection
图 3. 灌浆套管的连接形式。(a) 半套管连接；(b) 内套管连接；(c) 外套管连接试件

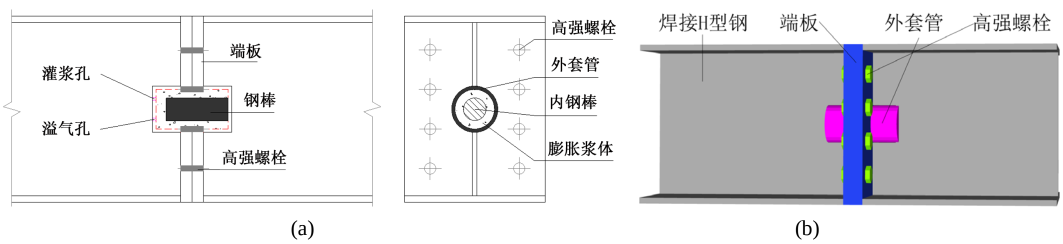


Figure 4. Configuration of high-strength bolted grouted flush endplate connection. (a) 2D figure; (b) 3D figure
图 4. 高强螺栓灌浆套管端板拼接节点构造。(a)二维图；(b)三维图

的外套管里，第二步利用高强螺栓将上下端构件的端板拧紧，第三步通过灌浆孔进行灌注膨胀浆体并对其进行养护，试件的安装步骤如图 5(b)所示。

2.2. 试件设计

试验设计了 2 种类型的端板拼接节点，每个类型 2 个试件：高强螺栓灌浆套管端板拼接节点，编号为 BG1、BG2 和常规构造高强螺栓端板拼接节点，编号为 B1、B2。试件的被连接构件采用焊接 H 截面钢，规格为 330 × 250 × 8 × 12，试件 BG1、BG2 的腹板详细构造见图 6，加劲肋厚度为 10 mm，端板厚度为 20 mm，端板开孔的具体构造见图 7，钢材采用 Q345 钢，10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓，膨胀浆体按照文献中的组成与配合比[5]采用：水泥标号 42.5，膨胀剂为硫铝酸钙类膨胀剂，膨胀水泥配合比见表 1。

本文设计该节点时，假设当端板拼接处的剪力较接近螺栓群的抗剪承载力时，考虑外套管里的内钢棒及浆体的抗剪作用，高强螺栓只承受由弯矩产生的拉力，故端板上的螺栓孔设计时可以适当地开大；将拼接节点设计在较靠近支座，使试件的破坏由剪力控制。

内钢棒设计时假设由焊接 H 型钢的腹板承受全部的剪力来估算其面积，内钢棒直径取 40 mm，而且为了避免受力过程中内钢棒因长度过长而受弯破坏，取长度为 125 mm；取上下面外套管长度为 50 mm，厚度为 6 mm，上面外套管预留两个 Φ15 灌浆孔和溢浆孔，详图见图 8。各试件主要设计尺寸见表 2。

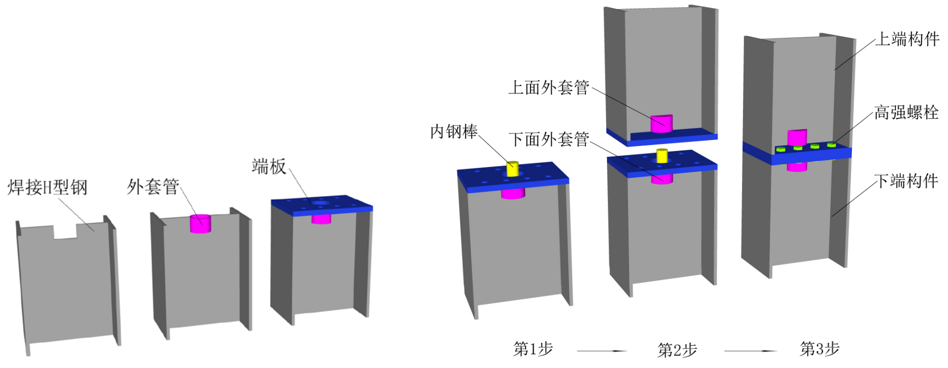


Figure 5. Production of connection and installation steps. (a) Nodes to make; (b) Node installation step
图 5. 节点制作及安装步骤。(a)节点制作；(b)节点安装步骤

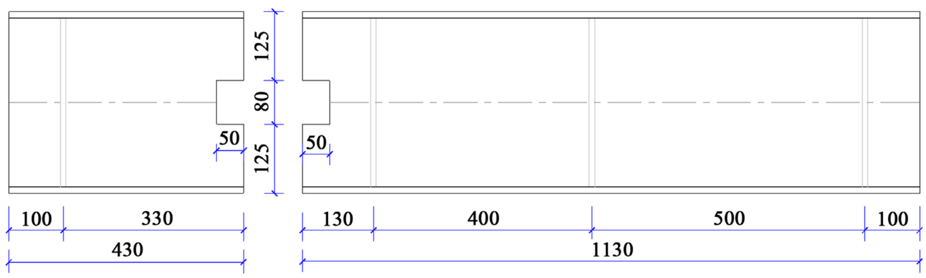


Figure 6. Configuration of webs of connected member
图 6. 被连接构件腹板构造图

Table 1. Mix ratio of expansive cement (Mass ration)
表 1. 膨胀水泥配合比(质量比)

材料	水泥	膨胀剂	砂胶比	水胶比	减水剂参量
质量比	0.9	0.1	0.35	0.36	0.25%

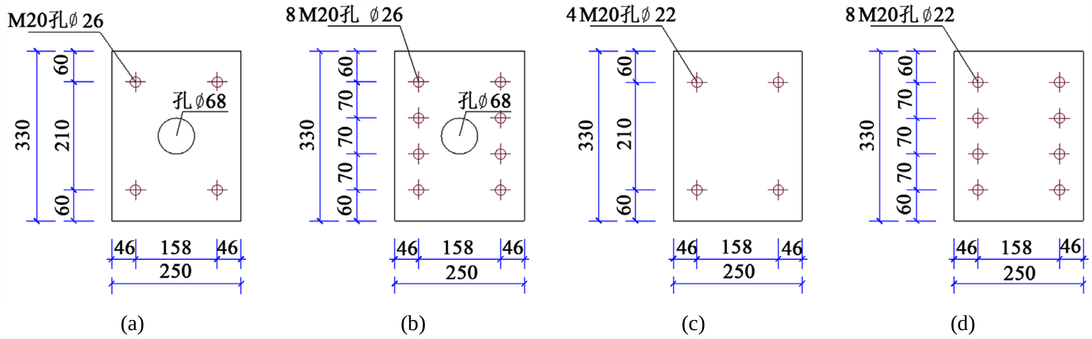


Figure 7. Configuration of endplate opening. (a) BG1; (b) BG2; (c) B1; (d) B2
图 7. 端板开孔构造图。(a) BG1；(b) BG2；(c) B1；(d) B2

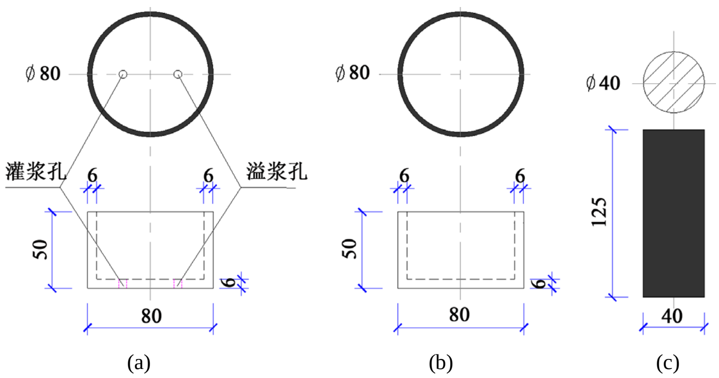


Figure 8. Configuration of sleeve and steel bar. (a) The outer sleeve; (b) Under the coat; (c) The steel bar
图 8. 外套管及内钢棒详图。(a)上面外套管；(b)下面外套；(c)内钢棒

Table 2. Main parameters of specimens
表 2. 各试件主要参数

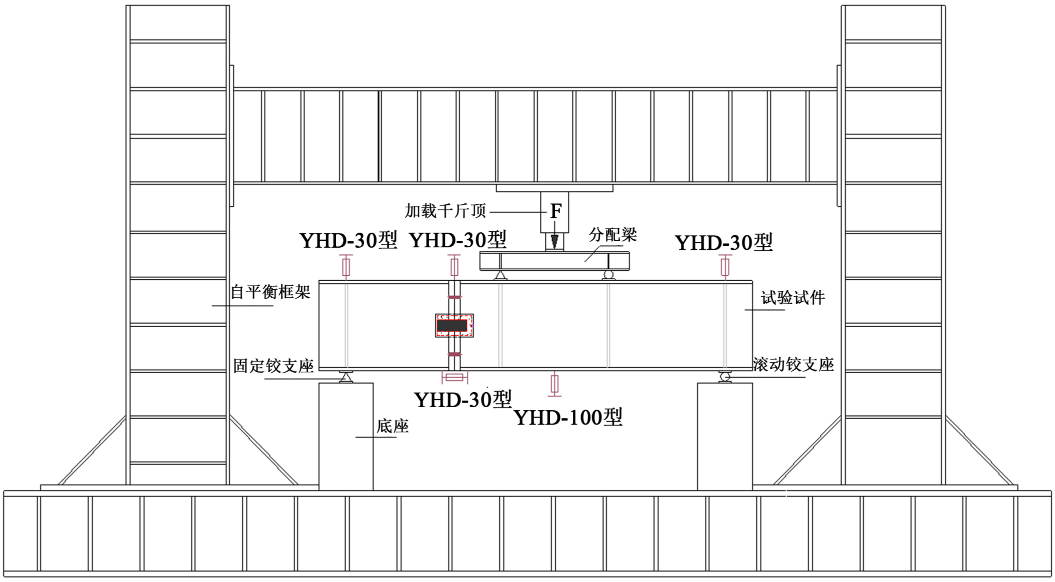
试件形式	编号	螺栓孔径	端板	外套管	内钢棒
常规构造高强螺栓端板拼接节点	B1	Φ22	330 × 250 × 8 × 12	/	/
	B2	Φ22	330 × 250 × 8 × 12	/	/
高强螺栓灌浆套管端板拼接节点	BG1	Φ26	330 × 250 × 8 × 12	Φ80 × 长度 50 mm	Φ40 长度 125 mm
	BG2	Φ26	330 × 250 × 8 × 12	Φ80 × 长度 50 mm	Φ40 长度 125 mm

2.3. 加载装置

本试验在同济大学结构抗火实验室完成，采用 200 t 千斤顶单向静力加载直至试件破坏，试件采用两点对称进行加载，试验加载装置及现场加载见图 9。采用力加载方式，加载初期进行分级加载，每级加载均 30 kN，稳定 2 min。当试件的荷载-位移曲线出现非线性趋势时，调整为每级 10 kN，稳定 2 min，直至试件破坏。

2.4. 测试方案

试验主要观测试件的承载力、端板相对竖向错动及水平张开和高强螺栓的应力分布情况。试件的两端支座处及跨中处分别布三个竖向位移计，编号 1、2、3，均用以测量在加载过程中相应截面处的竖向位移，另外还在端板拼接处上面和下面分别布置一个竖向位移计和水平位移计，以测量端板的竖向相对错动和水平张开位移，编号 4、5。试件的位移计布置见图 10。



(a)

(b)

Figure 9. Loading system. (a) Test load schematic; (b) Test site loading
图 9. 试验加载装置。(a)试验加载示意图；(b)试验现场加载

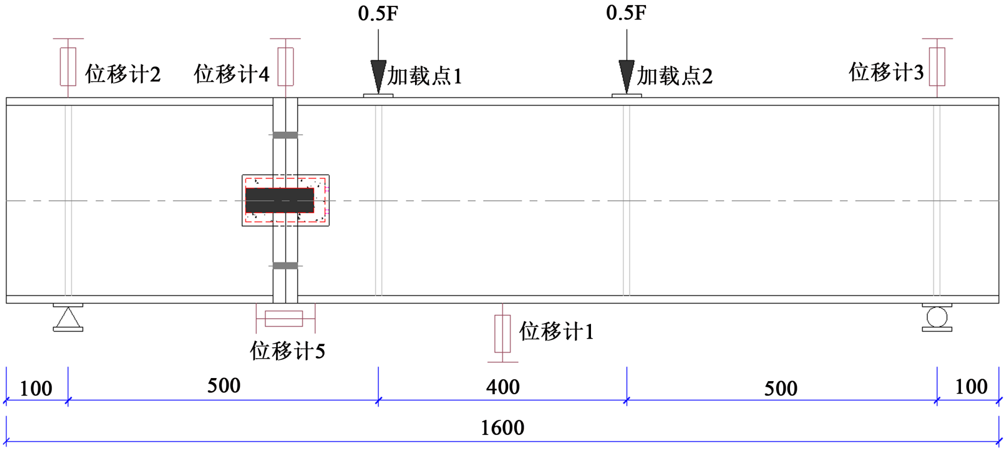


Figure 10. Layout of displacement transducers
图 10. 位移计布置图

对于每个试件，考虑其节点螺栓受力的对称性，只选取一列螺栓进行测量其应变。每个螺栓在螺杆上对称地开两个槽；在槽底放置应变片，表面用树脂覆盖加以保护；在螺栓头中对应槽的位置各开一个孔，用以引出导线，高强螺栓的应变片测点布置见图 11。

3. 试验现象与破坏特征

各拼接节点试件的破坏模式基本相同，主要是受拉区螺栓(最底排螺栓)被拉断、梁受压翼缘局部屈曲及端板局部弯曲，见图 12。相对于常规构造高强螺栓端板拼接节点(试件 B1、B2)，高强螺栓灌浆套管端板拼接节点(试件 BG1、BG2)端板的弯曲变形较小，这是由于浆体及套管本身能约束端板的平面外变形。

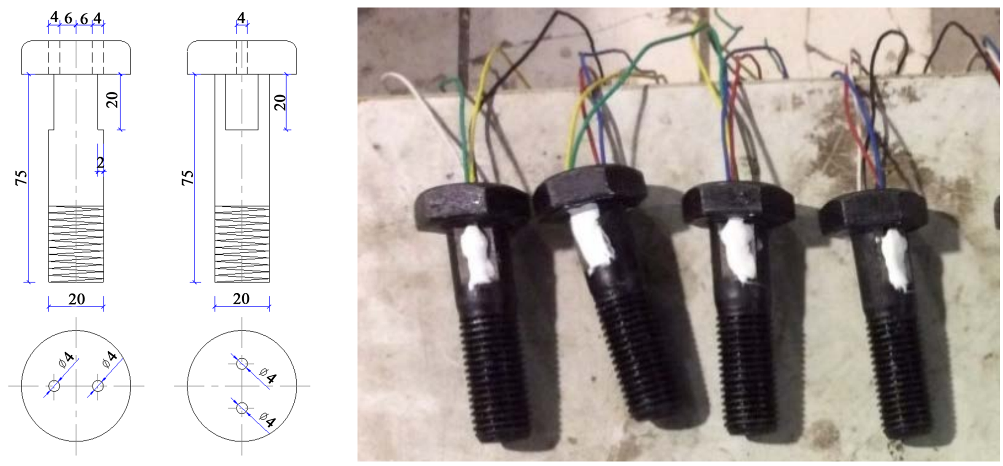


Figure 11. Layout of strain gauges on the high-strength bolts
图 11. 高强螺栓应变片布置图

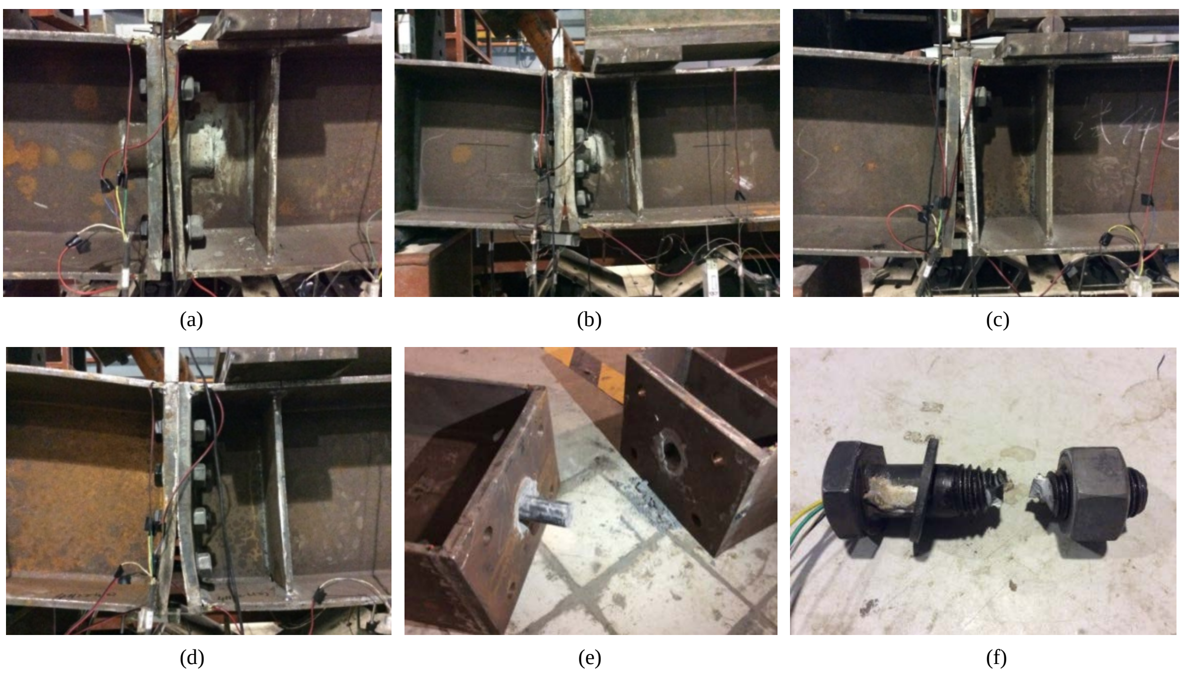


Figure 12. Failure state of connections. (a) BG1；(b) BG2；(c) B1；(d) B2；(b) Inner bar and expansion cement；(c) High strength bolt
图 12. 各节点试件破坏模式。(a) BG1；(b) BG2；(c) B1；(d) B2；(b)内钢棒及膨胀水泥；(c)高强螺栓

开始加载后，试件 B1 和 BG1 的受力过程基本一致直至到 933 kN，试件 B1 因端板拼接处的剪力超过螺栓抗剪承载力而破坏，而试件 BG1 仍可以继续承受外荷载，直至荷载达到 1024 kN 时，最低排螺栓被拉断。类似的，试件 B2 和 BG2，试件 B2 在荷载达到 1082 kN 时，最低排螺栓被拉断、梁受压翼缘鼓起及端板有明显弯曲变形，而试件 BG2 还能继续承受一定的外荷载，直至到 1220 kN，最低排螺栓有颈缩破坏现象，但并没有被拉断，端板变形相较于试件 B2 较小，这主要是端板之间存在相对错动小，螺栓只受弯矩引起的拉力作用，承受剪力较小，套管也对端板的平面外变形起了约束作用。试验加载完毕后，拆开试件 BG1，发现外套管里的内钢棒有微小弯曲变形，受拉侧的膨胀浆体有局部拉碎，而试件 BG2 由于膨胀浆体对端板的粘结作用较强则不好拆开。

4. 试验结果分析

4.1. 荷载——跨中位移曲线

图 13 给出了两种端板拼接节点试件的荷载——跨中位移曲线的对比。可得到高强螺栓灌浆套管端板拼接节点试件的承载力及其延性比常规构造高强螺栓端板拼接节点试件有一定提高，尤其是试件 BG2 比试件 B2 有明显提高。试件 BG1、BG2 的千斤顶施加力的大小，相对于试件 B1、B2 分别提高了 8.88%，11.31%。

4.2. 荷载——端板水平张开曲线

各拼接节点试件的荷载—端板水平张开曲线对比见图 14。从图中可知，在弹性范围，这两种端板拼接节点的初始转动刚度基本一致，由于灌浆套管的存在，接头刚度略有提高。当外荷载较接近螺栓群的抗剪承载力后，随着荷载的增加，相对于高强螺栓灌浆套管拼接节点试件而言，常规构造高强螺栓端板拼接节点试件的刚度下降很快，导致节点破坏时其端板弯曲变形较大。

4.3. 剪力——端板竖向错动曲线

各拼接节点试件的剪力—端板竖向错动曲线对比见图 15。从此图中可知，高强螺栓灌浆套管端板拼接节点试件，相对于常规构造的高强螺栓端板拼接节点试件而言，抗剪承载力相当，略有提高。

4.4. 高强螺栓的拉力分布

试验测得各拼接节点试件的荷载—螺栓拉力曲线对比见图 16，图中括号里面的 1、2、3、4 分别表示依照受压区向受拉区顺序的第 1、2、3、4 排螺栓。由图 16 可知，这两种端板拼接节点试件受压区高强螺栓的受力性能基本上相同，拉力基本不变；而高强螺栓灌浆套管端板拼接节点试件 BG1、BG2 的最低排螺栓拉力始终小于常规构造高强螺栓端板拼接节点试件 B1、B2 的最低排螺栓拉力。随着荷载的增大，试件 B1、B2 的最低排螺栓拉力的增加速度较快，直至被拉断。

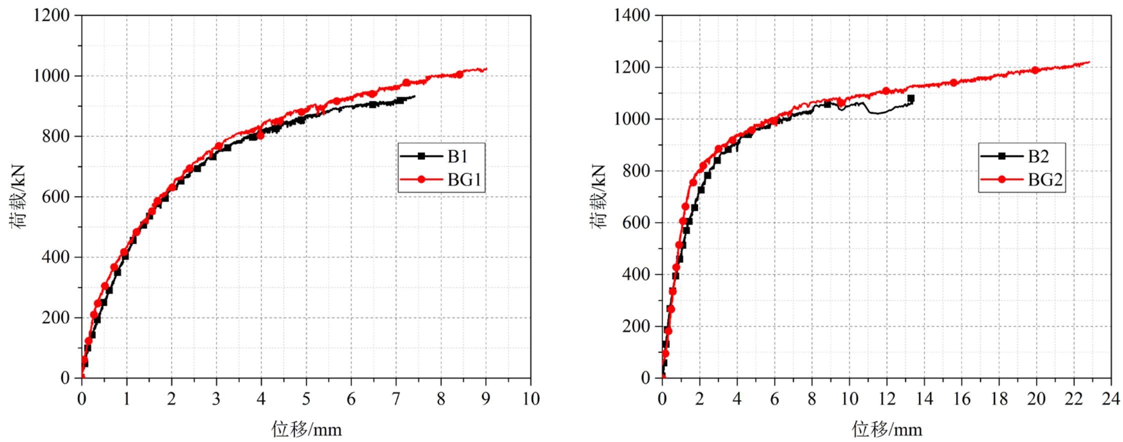
表 3 给出各拼接节点试件试验的主要结果。

5. 结论

通过对高强螺栓灌浆套管端板拼接节点以及与其对应的常规构造高强螺栓端板拼接节点进行静力加载试验研究，可以获得以下结论：

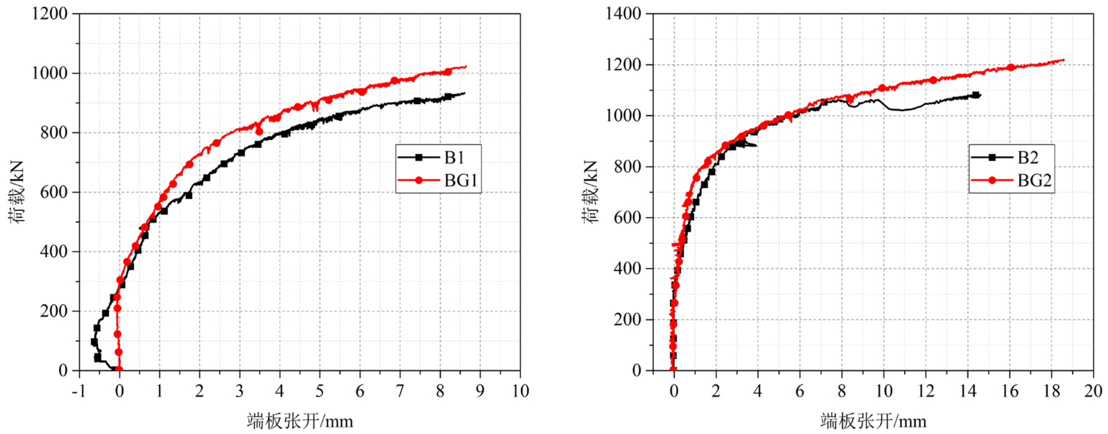
1) 两种端板拼接节点试件的破坏形态：主要为受拉区最低排螺栓被拉断、梁受压翼缘局部屈曲、受拉区螺栓处的端板弯曲变形，相对于试件 B1、B2，试件 BG1、BG2 的端板弯曲变形较小，这是由于外套管对平面外变形起了约束作用；

2) 相较于常规构造高强螺栓端板拼接节点，高强螺栓灌浆套管拼接节点的抗弯承载力及延性有一定提高，特别是试件 BG2 提高较明显；抗剪承载力基本相同，略有提高；初始转动刚度基本相同，随着



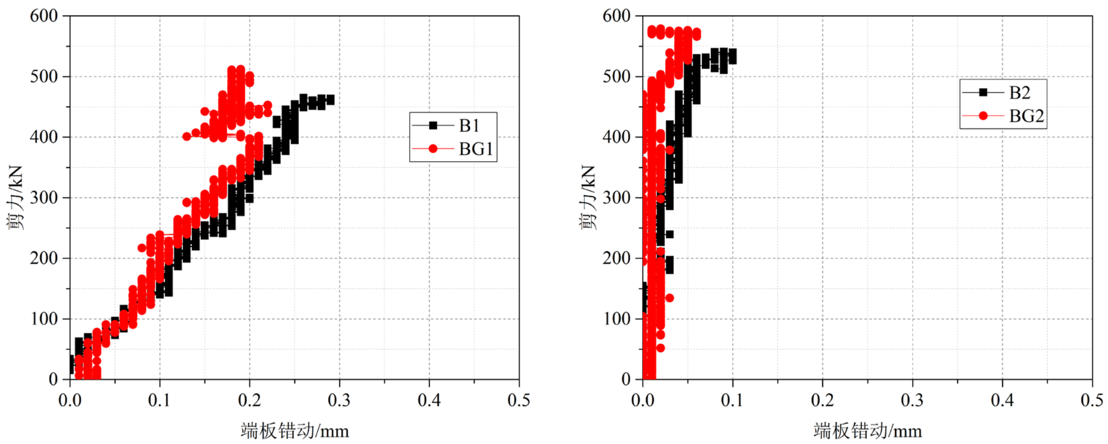
(a) (b)

Figure 13. Load-displacement curves. (a) B1 and BG1; (b) B2 and BG2
图 13. 荷载——跨中位移曲线。(a) B1 和 BG1；(b) B2 和 BG2



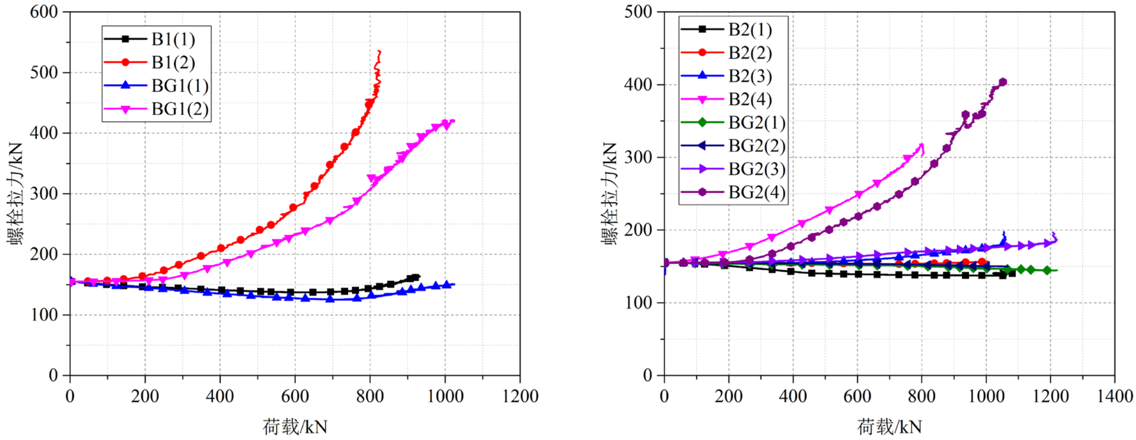
(a) (b)

Figure 14. Load-horizontal stretch curves. (a) B1 and BG1; (b) B2 and BG2
图 14. 荷载——端板水平张开曲线。(a) B1 和 BG1；(b) B2 和 BG2



(a) (b)

Figure 15. Load-vertical sliding curves. (a) B1 and BG1; (b) B2 and BG2
图 15. 剪力——端板竖向错动曲线。(a) B1 和 BG1；(b) B2 和 BG2



(a) (b)

Figure 16. Load-bolts tension curves. (a) B1 and BG1; (b) B2 and BG2
图 16. 荷载—螺栓拉力曲线。(a) B1 和 BG1；(b) B2 和 BG2

Table 3. Test results
表 3. 主要试验结果

试件形式	试件编号	极限荷载/kN	极限位移/mm	竖向错动/mm	水平张开/mm
常规构造高强螺栓端板拼接节点	B1	933	7.41	0.45	8.61
	B2	1082	13.31	0.09	14.62
高强螺栓灌浆套管端板拼接节点	BG1	1024	9.01	0.19	8.65
	BG2	1220	22.81	0.02	18.57

荷载的增加，比常规构造的刚度下降较慢；受压区螺栓的拉力分布基本相同，随着荷载的增大，其受拉区螺栓的最低排螺栓的拉力增加速度始终小于常规构造高强螺栓端板拼接节点试件；

3) 此新型的端板拼接节点可在不降低连接性能的情况下适当加大螺栓孔径，可以有效地解决实际工程中对高强螺栓的安装难度，以便于施工安装。

参考文献 (References)

[1] 楼国彪，李国强，雷青. 钢结构高强度螺栓端板连接研究现状(I)[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(2): 8-21+36.

[2] 刘永健，张俊光，张国玺，等. 节段拼接的钢箱柱稳定承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 23-27.

[3] Snijder, H.H. and Hoenderkamp, J.C.D. (2008) Influence of Endplate Splices on the Load Carrying Capacity of Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **64**, 845-853. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.020

[4] Lindner, J. (2008) Old and New Solutions for Contact Splices in Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **64**, 833-844. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.026

[5] 刘仁勇. 实心预应力灌浆套管节点在往复荷载下的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2014.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究