

咬合式高强螺栓连接抗剪承载力试验和数值模拟

郭小农¹, 章 颜¹, 蒋首超¹, 熊 哲²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 广东工业大学 土木工程系, 广东 广州 510006)

摘要: 在传统高强螺栓连接的基础上, 研发了新型咬合式高强螺栓连接. 进行了 4 个传统高强螺栓连接和 14 个咬合式高强螺栓连接的抗剪承载力试验, 详细介绍了试验过程, 描述了试验现象. 试验结果表明, 咬合式高强螺栓连接的破坏模式主要为板件错动破坏; 连接板表面刨槽处理可大幅提高连接承载力; 螺栓预紧力越大, 连接承载力越高; 连接板的刨槽深度越大, 连接承载力越高. 建立了有限元模型, 将数值分析获得的破坏模式、荷载-位移曲线与试验结果进行比较, 验证了二者的一致性, 表明数值模型可用于后续大规模数值分析.

关键词: 咬合式高强螺栓连接; 受剪试验; 板件错动破坏

中图分类号: TU395

文献标志码: A

Experimental Research and Numerical Simulation of Bearing Capacity of a New Type of Occlusive High Strength Bolt Shear Connection

GUO Xiaonong¹, ZHANG Yan¹, JIANG Shouchao¹, XIONG Zhe²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the conventional high strength bolt connection, a new occlusive high strength bolt shear connection was developed. Shear bearing capacity experiment of 4 conventional high strength bolt connections and 14 occlusive high strength bolt connections was conducted. The experimental process and the collapse phenomena were introduced and described in detail. It is found that the failure mode of occlusive high strength bolt connection is mainly the dislocation of plates. Grooving on plates could effectively increase the load-bearing capacity of the connection. Moreover, the capacity of the connection increases as the bolt pretension and the depth of grooves increase. A finite element

model (FEM) was established, and the failure mode and the load-deformation curves of the connection was simulated. It is indicated that the FEM is effective because of good agreements between the results of the experiment and that of numerical model. Thus, it is believed that the established FEM could be used to execute the subsequent numerical analyses.

Key words: occlusive high strength bolting connection; shearing bearing test; dislocation of plates

高强螺栓连接是现代钢结构的主要连接型式之一, 按传力方式可分为承压型高强螺栓连接和摩擦型高强螺栓连接. 前者主要依靠孔壁承压和螺杆抗剪来传递剪力, 虽然其极限承载力通常比后者高, 但不宜用于直接承受动力荷载和疲劳荷载的连接. 后者依靠连接面间的摩擦传递剪力. 经处理后, 摩擦面的摩擦因数 μ 一般小于 0.55, 故当连接受力较大时, 所需螺栓数量较多, 易导致耗材增加、施工速度降低.

针对传统高强螺栓连接的不足, He 等^[1]提出了一种新型套筒螺栓连接, 该螺栓连接在传统高强螺栓连接的螺杆周围加入双层套筒, 极大地提高了螺栓连接的刚度和耗能性能. 马人乐等^[2-3]设计了长圆孔变形性高强螺栓连接节点, 节点的翼缘与腹板螺栓孔均开成长圆形, 受力过程中高强螺栓由摩擦型变成承压型, 通过滑动增加节点的延性变形能力. Tizani 等^[4]发明了一种螺纹抽钉螺栓连接, 将扭矩施加于螺帽上时, 锥台形螺母使螺杆周围的套筒底部张开, 紧贴孔壁, 相当于在传统螺栓连接中施加螺栓预紧力. 在此基础上, Wang 和 Ellison 等^[5-6]分别对其进行深入研究, 分析了该连接方式的强度、初始刚度等力学性能. Annan 等^[7-8]通过对摩擦面镀锌的

收稿日期: 2016-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51478335)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空间钢结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 蒋首超(1971—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程结构抗火. E-mail: scjiang@tongji.edu.cn

方式提高传统高强螺栓连接的抗滑移性能,从而提高连接承载力。

为进一步改进高强螺栓连接受力性能,笔者提出一种新型咬合式高强螺栓连接形式.该连接主要由 3 部分组成:两侧盖板、中间芯板和高强螺栓.盖板和芯板表面均采用刨槽处理,并通过高强螺栓将盖板和芯板夹紧.钢板的具体尺寸和槽口形式可根据实际工程受力情况确定,其余构造与传统高强螺栓连接节点相同.为满足安装误差的要求,盖板开圆孔,芯板沿受力方向开长圆孔。

新型咬合式高强螺栓连接承载力大,可大幅降低工程所需螺栓数量,故此类连接不仅外形美观、节约钢材,还能加快施工速度,应用前景广阔。

1 试验简介

1.1 试件设计

共设计了 18 个高强螺栓连接试件,各试件盖板尺寸均为 330 mm×160 mm,螺孔直径为 12 mm;芯板尺寸为 350 mm×180 mm,在构件加工时与连接端板焊接,且在芯板靠近端板位置增设加劲肋,以保证芯板刚度,使芯板内应力尽可能均匀分布。

试件 CLJ-A1~A4 为传统高强螺栓连接试件,板件接触表面进行喷砂处理,每块芯板上开 8 个圆形螺孔,螺孔直径为 13 mm,试件详图如图 1 所示,部分试件照片如图 2 所示.试件 NLJ-A1~A4, NLJ-B1~B3, NLJ-C1~C3, NLJ-D1~D4 为新型咬合式高强螺栓连接试件,其构造如图 3 所示.板件接触表面进行刨槽处理,为了安装方便,芯板上开有沿受力方向的长圆孔,其规格为 2Φ14 mm×114 mm,14 mm 为圆弧直径,114 mm 为长圆孔总长.试件详图如图 4 所示,部分试件的照片如图 5 所示.所有节点均采用双盖板连接,螺栓型号采用 M12,性能等级为

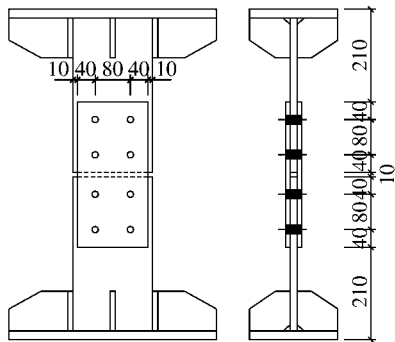


图 1 传统高强螺栓连接试件加工图(单位:mm)

Fig.1 Operation drawing of conventional high strength bolt connection specimens (unit: mm)

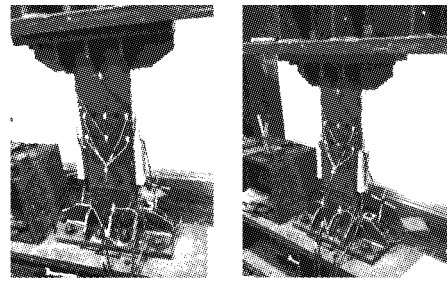
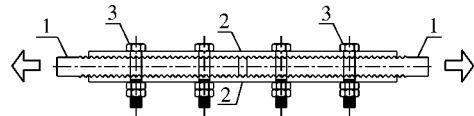


图 2 传统高强螺栓连接试件

Fig.2 Specimens of conventional high strength bolt connection



1—芯板; 2—盖板; 3—高强螺栓

图 3 咬合式高强螺栓连接节点示意图

Fig.3 Configurations of occlusive high strength bolt connection

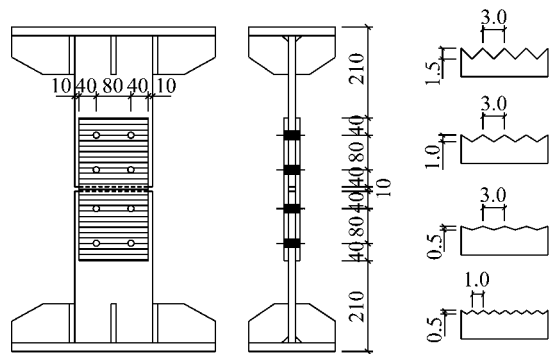


图 4 咬合式高强螺栓连接试件加工图(单位:mm)

Fig.4 Operation drawing of occlusive strength bolt connection specimens (unit: mm)

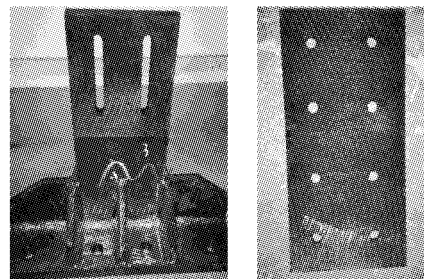


图 5 咬合式高强螺栓连接试件

Fig.5 Occlusive high strength bolt connection specimens

8.8 级,为了控制和记录螺栓预紧力的大小及其变化情况,在螺帽上开槽引线布置应变片,螺栓详图及照片如图 6,7 所示.所有板件的材料牌号均为 Q235B.

表 1 给出了所有试件的具体信息和实测尺寸.表 1 中,“CLJ”,“NLJ”为试件编号,分别代表了传统高强螺栓连接试件和新型咬合式高强螺栓连接试

表 1 试件实测尺寸
Tab.1 Geometrical parameters of specimens

试件编号	表面处理	螺杆直径/ mm	有效直径/ mm	芯板尺寸/ (mm×mm)	芯板厚度/ mm	盖板尺寸/ (mm×mm)	盖板厚度/ mm
CLJ-A1,CLJ-A2 CLJ-A3,CLJ-A4	喷砂处理	11.60	10.05	350×180	30.00	330×160	9.70
NLJ-A1,NLJ-A2 NLJ-A3,NLJ-A4	槽口形式 A 3.0 mm×1.5 mm	11.60	10.05	348×180	18.57	330×161	7.87
NLJ-B1,NLJ-B2 NLJ-B3	槽口形式 B 3.0 mm×1.0 mm	11.60	10.05	348×180	19.50	331×160	5.88
NLJ-C1,NLJ-C2 NLJ-C3	槽口形式 C 3.0 mm×0.5 mm	11.60	10.05	350×180	18.85	330×160	6.15
NLJ-D1,NLJ-D2 NLJ-D3,NLJ-D4	槽口形式 D 1.0 mm×0.5 mm	11.60	10.05	345×180	18.57	332×161	4.87

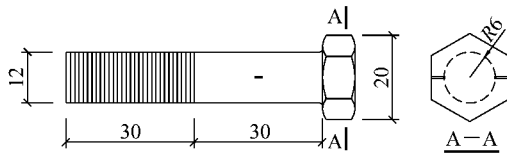


图 6 螺栓加工图(单位: mm)
Fig.6 Operation drawing of bolts (unit: mm)

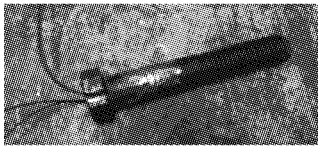


图 7 螺栓
Fig.7 Bolts

件;“A”,“B”,“C”,“D”表示试验组别,代表连接板件的槽口形式分别为 3.0 mm×1.5 mm,3.0 mm×1.0 mm,3.0 mm×0.5 mm 和 1.0 mm×0.5 mm.

1.2 加载方式

本试验采用单向拉伸加载,加载方式如图 8 所示.对连接 CLJ-A1~A4 采用 30 t 千斤顶加载,其余连接采用 100 t 千斤顶加载.加载时荷载作用线与试件中心线重合.

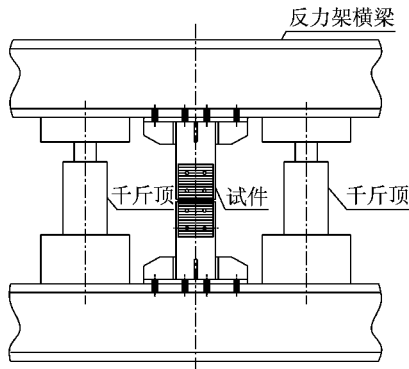


图 8 加载方式示意图
Fig.8 Schematic diagram of loading mode

1.3 测点布置

对试件 CLJ-A1~A4,在上、下两块芯板加劲肋之间布置位移计(D1,D2)测量板件的相对滑移.盖板在 B—B,C—C 截面处各布置 6 枚纵向应变片(S1~S12),用于测量节点受力时盖板孔壁周围的应力;芯板的 A—A,D—D 截面处各布置 4 枚应变片(S13~S20),用于校核轴力的大小,如图 9 所示.

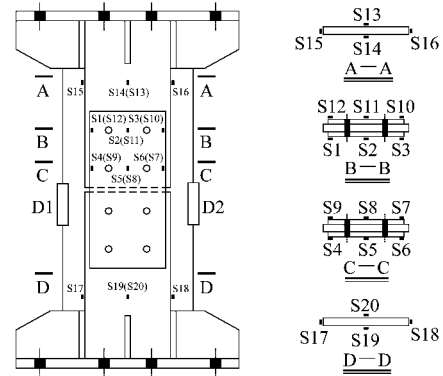


图 9 传统高强螺栓连接构件测点布置图
Fig.9 Measuring point arrangement of conventional high strength bolt connection specimens

对于试件 NLJ-A1~A4, NLJ-B1~B3, NLJ-C1~C3 和 NLJ-D1~D4,在上、下两块芯板加劲肋之间布置位移计(D1,D2)测量板件的相对滑移.盖板在 A—A,B—B 截面处各布置 6 枚纵向应变片(S1~S12),用于测量节点受力时盖板孔壁周围的应力;螺栓所在 C—C,D—D 截面处各布置 4 枚应变片(S13~S20),沿螺栓杆壁上、下表面对称布置,方向与螺栓轴线一致,用于控制和测量螺栓预紧力的大小及其变化,如图 10 所示.

1.4 材性试验

试验前从连接节点板件取样,制作了 3 个哑铃型材料拉伸试样^[9],拉伸试验结果如表 2 所示,破坏后的拉伸试样如图 11 所示.

表 2 材性试验结果

Tab.2 Test results of material properties

试件编号	弹性模量 E/GPa	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	伸长率 $\delta_5/\%$	断后收缩率 $\Psi/\%$
M1	190.2	307.7	453.1	43	51
M2	202.6	311.4	446.1	42	55
M3	194.6	323.7	457.3	42	51
平均值	195.8	314.3	452.3	42	52

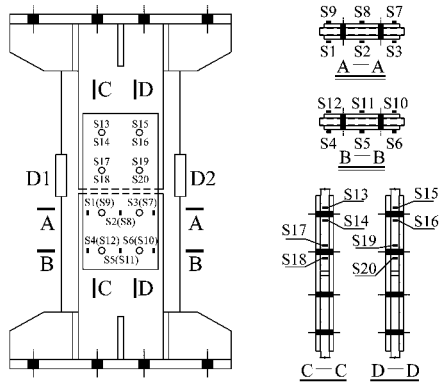


图 10 咬合式高强螺栓连接构件测点布置图

Fig.10 Measuring point arrangement of occlusive high strength bolt connection specimens

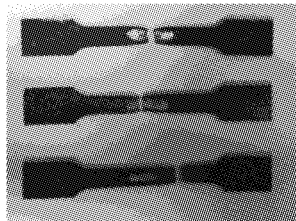
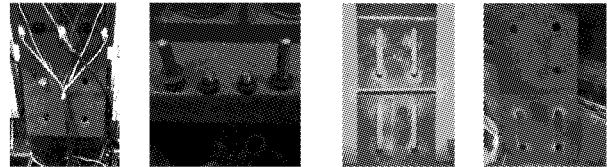


图 11 材性试验试样

Fig.11 Material property of test specimens

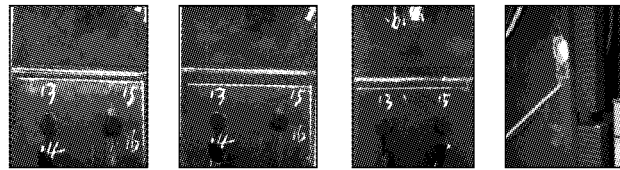
2 试验现象

典型试件破坏形态如图 12 所示. 各试件的破坏模式与最大荷载列于表 3, 其中螺栓预紧力 P 按钢结构设计规范 GB 50017^[10] 取值. 由表 3 可见, 传统高强螺栓连接的破坏模式是螺杆剪断, 其承载力在 191~221 kN 之间; 而新型咬合式高强螺栓的传力



a CLJ-A1 螺栓剪断

b NLJ-A4 板件错动



c NLJ-C1, NLJ-C2 板件错动

d NLJ-D4 板件错动

图 12 部分试件破坏时照片

Fig.12 Photos of specimens after testing

表 3 试验结果汇总

Tab.3 Results of tests

试件编号	槽口形式	螺栓预紧力	最大荷载/kN	破坏模式	主要破坏现象
CLJ-A1	无	0.8P	207.24	螺栓剪断	螺孔塑性挤压变形 螺栓断裂崩落
CLJ-A2			191.71		
CLJ-A3			221.89		
CLJ-A4			215.26		
NLJ-A1	3.0 mm×1.5 mm	0.1P	497.98	板件错动	芯板与盖板错动 2 齿口
NLJ-A2			530.33		
NLJ-A3			666.48		
NLJ-A4			904.86		
NLJ-B1	3.0 mm×1.0 mm	0.1P	238.54	板件错动	芯板与盖板错动 3 齿口
NLJ-B2			325.88		
NLJ-B3			383.76		
NLJ-C1	3.0 mm×0.5 mm	0.1P	164.78	板件错动	芯板与盖板错动 2 齿口
NLJ-C2			数据异常		
NLJ-C3			270.17		
NLJ-D1	1.0 mm×0.5 mm	0.1P	228.28	板件错动	芯板与盖板错动 2 齿口
NLJ-D2			276.21		
NLJ-D3			330.81		
NLJ-D4			338.28		

模式为板件错动,其承载力比传统连接形式有大幅提高,最高达 904.86 kN.

3 试验结果分析

3.1 实测承载力

传统高强螺栓连接的剪断面位于螺纹处,由钢结构设计规范^[10-12],可计算得到传统高强螺栓连接承载力设计值 N_v^b 为

$$N_v^b = 4n_v \frac{\pi d_e^2}{4} f_v^b = 158.6 \text{ kN} \quad (1)$$

式中: n_v 为螺栓受剪面数目; d_e 为螺栓在螺纹处的有效直径; f_v^b 为螺栓的抗剪强度设计值.

我国规范中,连接的抗力分项系数为 1.30,故可得传统高强螺栓连接的承载力标准值 N_{vk}^b 为

$$N_{vk}^b = 1.3N_v^b = 206.18 \text{ kN} \quad (2)$$

由表 3 可知,传统高强螺栓连接试件 CLJ-A1~A4 的承载力实测平均值为: $N_{c,ave} = 209.03 \text{ kN}$;将咬合式高强螺栓连接试件的抗剪承载力实测值记为 $N_{n,exp}$,则可定义提高系数 α_1 及 α_2 为

$$\alpha_1 = \frac{N_{n,exp}}{N_{c,ave}} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{N_{n,exp}}{N_{vk}^b} \quad (4)$$

表 4 列出了各试件 α_1 及 α_2 值.从表 4 可知,连接板表面刨槽处理可大幅提高连接承载力;螺栓预紧力越大,连接承载力越高;连接板的刨槽宽度越小、深度越大,连接承载力越高.

表 4 承载力提高系数

Tab.4 Comparison of bearing load capacity

试件编号	α_1	α_2
NLJ-A1	2.42	2.38
NLJ-A2	2.57	2.54
NLJ-A3	3.23	3.19
NLJ-A4	4.39	4.33
NLJ-B1	1.16	1.14
NLJ-B2	1.58	1.56
NLJ-B3	1.86	1.84
NLJ-C1	0.80	0.79
NLJ-C2		
NLJ-C3	1.31	1.29
NLJ-D1	1.11	1.09
NLJ-D2	1.34	1.32
NLJ-D3	1.60	1.58
NLJ-D4	1.64	1.62

3.2 实测荷载-位移曲线

设连接所受荷载为 F ,芯板与盖板相对滑移为 d (位移计 D1,D2 读数平均值).图 13、图 14 分别为传

统高强螺栓连接和咬合式高强螺栓连接在轴向拉力作用下的实测荷载-位移曲线.由图 13 可见,试件变形过程可分为 4 个阶段^[13].加载初期,荷载-位移曲线基本为直线且板件相对滑移可忽略不计.随荷载增加,连接开始滑移,荷载-位移曲线进入平台段.荷载继续加大,连接进入孔壁承压初期,荷载-位移曲线接近直线但刚度较之前有所下降.随荷载进一步增大,孔壁塑性区逐渐向周围扩展,荷载-位移曲线逐渐趋于平缓,最终荷载值达到螺栓抗剪强度而发生螺杆剪断破坏.由图 14 可见,加载初期,荷载-位移曲线基本为直线且板件相对位移很小.当荷载逐渐增加至试件极限承载力时,芯板与盖板齿口错动,试件发生破坏.当发生板件错动破坏时,试件基本处于弹性阶段,塑性发展不明显,螺栓及孔壁几乎没有可见变形.对比图 13、图 14 可知,当传统连接试件达到极限承载力时,最大相对位移已经达到了 10 mm

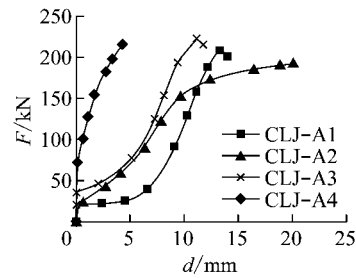


图 13 传统高强螺栓连接荷载-位移曲线

Fig.13 Load-displacement of conventional high strength bolt connections

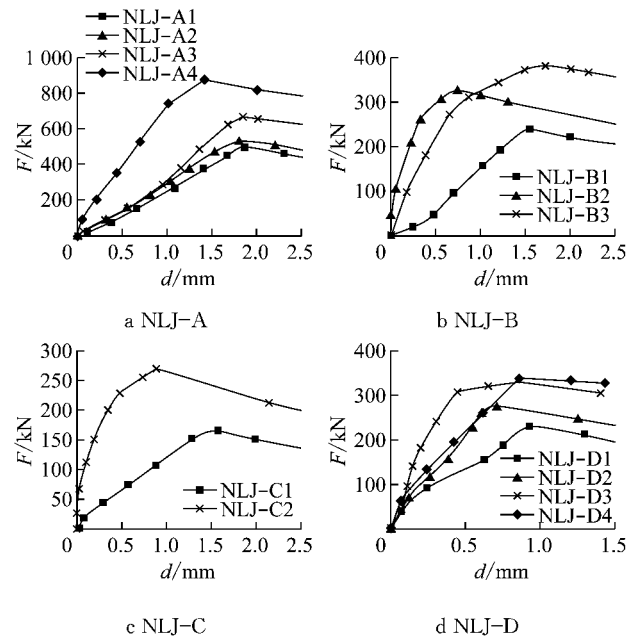


图 14 咬合式高强螺栓连接荷载-位移曲线

Fig.14 Load-displacement of occlusive high strength bolt connections

以上,破坏模式为螺栓剪断破坏;对于新型咬合式连接,当试件达到极限承载力时,最大相对位移均不超过 2.0 mm,试件基本处于弹性状态,螺栓仅起到夹紧板件的作用,不参与抗剪,破坏模式为板件错动破坏。

结合表 3,表 4 可知:槽口形式及螺栓预紧力对咬合式高强螺栓连接的承载力有较大影响。槽口形式相同时,螺栓预紧力越大,芯板与盖板间挤压应力越大,板件摩阻力增大,板件发生相对滑动愈加困难,连接承载力增大;螺栓预紧力相同时,试件槽口宽度越小,深度越大,齿口咬合越牢固,板件间相对滑动困难,连接承载力相应增大。

3.3 实测荷载-应变曲线

图 15 给出了传统高强螺栓连接试件 CLJ-A2 盖板实测荷载-应变曲线。加载初期,由于螺栓预紧力作用,当轴向拉力施加在试件上时盖板应变极小。

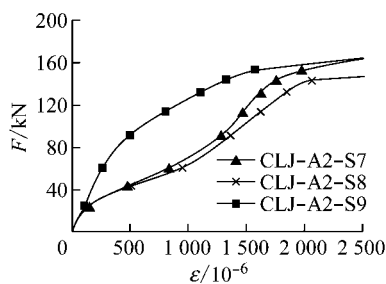


图 15 CLJ-A2 荷载-应变曲线
Fig.15 Load-strain of specimen CLJ-A2

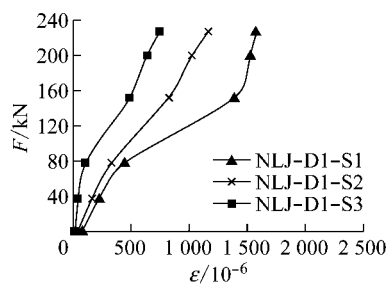


图 16 NLJ-D1 荷载-应变曲线
Fig.16 Load-strain of specimen NLJ-D1

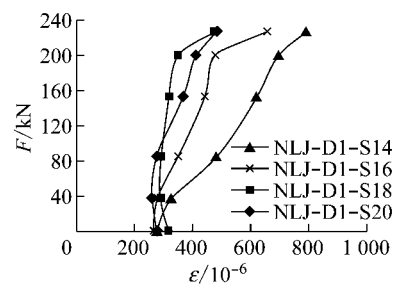


图 17 NLJ-D1 荷载-螺栓轴向应变曲线
Fig.17 Load-bolt axial strain of specimen NLJ-D1

加载中期,螺栓开始滑移,盖板应变迅速增长,曲线出现转折,由于荷载偏心,3 条荷载-应变曲线不再重合。加载后期,孔壁逐渐承压,应变增大,但刚度较之前有所下降,曲线出现第二个转折。此后孔壁塑性区逐渐扩展,应变达应变片限值而破坏。

图 16 给出了咬合式高强螺栓连接试件 NLJ-D1 盖板实测荷载-应变曲线。从图 16 中可知,整个加载过程均处于弹性阶段,盖板应变随荷载的增大而增大,直至最终板件错动导致连接节点破坏。图 17 给出了咬合式高强螺栓连接试件 NLJ-D1 荷载-螺栓轴向应变曲线。由图 17 可见,由于荷载偏心,4 条荷载-应变曲线并不完全重合,但其趋势走向一致。加载初期,螺栓轴向应变变化不明显。随荷载增大,板件出现滑移,从初始阶段的齿口凸起与凹槽紧密互嵌咬合状态,逐渐相互分离,板件间隙增大,导致螺栓应变增大。

4 数值模型

采用 ABAQUS 6.11/Standard^[14] 对本次试验进行模拟,以试验试件 NLJ-A1~A3 为例建立有限元模型。

4.1 几何尺寸

因试件几何尺寸、荷载、边界条件具有对称性,数值模型采用 1/8 模型,如图 18 所示。由于试件受拉破坏时螺栓没有明显变形,为便于建模,有限元模拟中省略螺栓,将预紧力直接施加于垫片上。同时,板件宽度取扣除开孔后的有效宽度,并将连接板件依据齿口分区。

4.2 接触面设置

由于试验中螺栓与盖板表面间存在滑移,不能设置绑定约束,故设为面面接触,切向定义为罚摩擦,摩擦系数为 0.2,法向设置为硬接触,滑移公式为有限滑移,离散化方法为“表面-表面”。

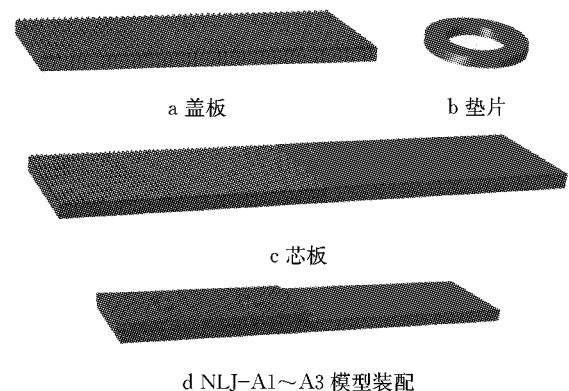


图 18 数值模型部件图及装配图
Fig.18 FE models and assembly of connection specimens

对于盖板与芯板齿口间的接触,设置面面接触。由于摩擦分量较小,故定义切向为罚摩擦,摩擦因数取 0.2,法向设置为硬接触,并允许接触后分离。

盖板表面与垫圈的接触、盖板与芯板齿口间的接触,如图 19 所示。图 19a 中盖板上表面为主面,垫

片下表面为从面;图 19b 中芯板齿口表面为主面,盖板齿口表面为从面.

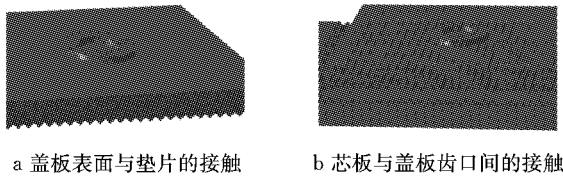


图 19 各接触面设置

Fig.19 Setting up of interfaces

4.3 边界条件

由于有限元分析采用 1/8 模型,故在连接板件的 $x-z$ 切面设置关于 y 轴对称的约束(YSYMM),其中盖板的 $y-z$ 切面设置为关于 x 轴对称的约束(XSYMM),芯板的 $x-y$ 切面设置为关于 z 轴对称的约束(ZSYMM).此外,为模拟试验中垫片与盖板表面的相对滑移,仅允许垫片发生 z 向位移,在初始分析步中对其上表面设置 x, y 向位移约束及 3 个方向的转角约束.各边界条件设置如图 20 所示.

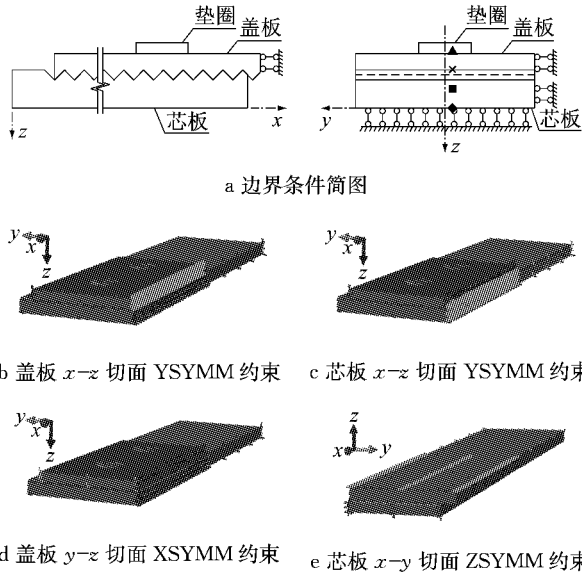


图 20 边界条件设置

Fig.20 Setting up of boundary conditions

4.4 单元类型与网格划分

本数值模型部件接触面较多,材料具有非线性性质,且部件多具有尖锐角,因此对网格划分质量要求较高.根据文献[15-16],C3D8R 单元为线性减缩积分单元,对位移的求解比较精确,且能克服剪切自锁问题,虽可能存在沙漏问题,但通过细分网格得以解决.故本文最终采用 C3D8R 单元模拟板件和垫圈.

各部件的网格划分如图 21 所示.其中连接板件使用结构网格划分技术,垫片使用扫掠网格划分技

术.由于模型齿口较多,采用中性轴算法,得到了质量较高的网格.各部件网格均为六面体.

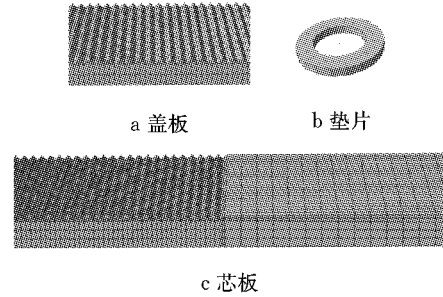


图 21 部件网格划分

Fig.21 Meshes of specimens

4.5 荷载与分析步

模型采用位移加载,加载面为芯板未开槽一侧的 $y-z$ 表面.共采用了 3 个分析步:①在垫片上施加均布压强,模拟螺栓初始预紧力;②调整垫片上均布压强的大小,模拟螺栓预紧力在加载中的变化过程,并在加载面施加微小位移 0.01 mm;③施加位移荷载.

5 数值分析与试验结果对比

5.1 破坏模式

图 22~24 对比了试件 NLJ-A1~A3 试验和数值模拟所得的破坏模式及变形情况.数值分析结果表明,模型对称面处的盖板和芯板之间出现板件张开现象时,连接达到极限承载力;此时盖板和芯板之间的齿口已经发生较大错动;因而无法继续承载;这一现象和试验的破坏模式较为接近.

以试件 NLJ-A1 为例,数值模型较好地模拟出了表 3 所述的变形模式,即随着位移荷载的施加,连接板件发生相对滑移,当二者相对位移超过半个齿口宽度时,板件发生错动破坏.

5.2 荷载-位移曲线

图 25 对比了试件 NLJ-A1~A3, NLJ-A1、NLJ-B3 和 NLJ-C1 试验及数值模拟所得的荷载-位移曲线.由图 25 可见,在加载初期,数值分析结果和试验结果非常接近;但达到极限承载力之后,二者逐渐出现偏差.其原因在于:在试验中,板件错动时盖板齿口波峰与芯板齿口波峰相对,螺栓轴向伸长,错动后连接板件齿口再次咬合,此时螺栓出现松动,预紧力迅速下降,故荷载-位移曲线出现了下降段;而在有限元模型中,施加于垫片上的压力无法模拟螺栓的伸长,故当荷载达极限承载力后,不会出现螺栓的卸载现象,故荷载-位移曲线不会出现下降段.

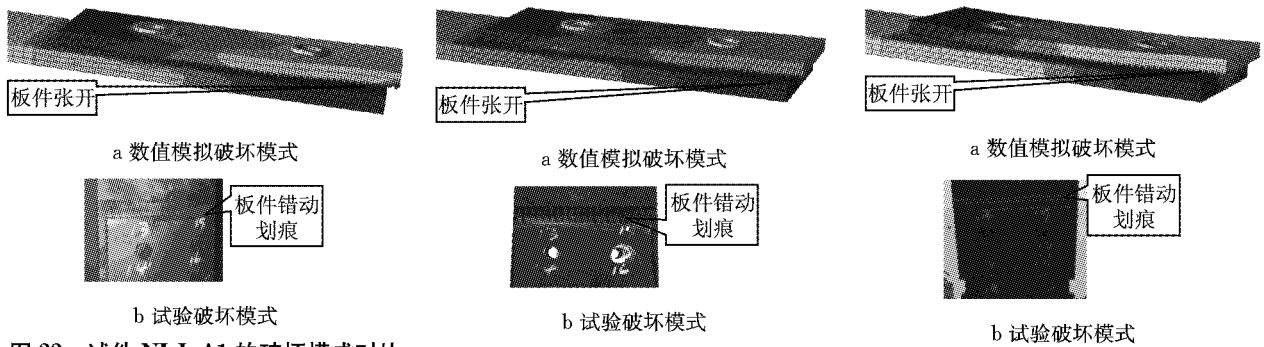


图 22 试件 NLJ-A1 的破坏模式对比
Fig.22 Comparison of failure modes in NLJ-A1

图 23 试件 NLJ-A2 的破坏模式对比
Fig.23 Comparison of failure modes in NLJ-A2

图 24 试件 NLJ-A3 的破坏模式对比
Fig.24 Comparison of failure modes in NLJ-A3

表 5 列出了不同槽口形式的咬合式高强螺栓连接承载力的有限元分析结果和实测结果. 从表 5 中可以看出,二者平均误差为 3.54%,最大误差为

6.93%,最小误差为 1.44%. 因此,数值模型所得承载力与试验实测承载力吻合良好.

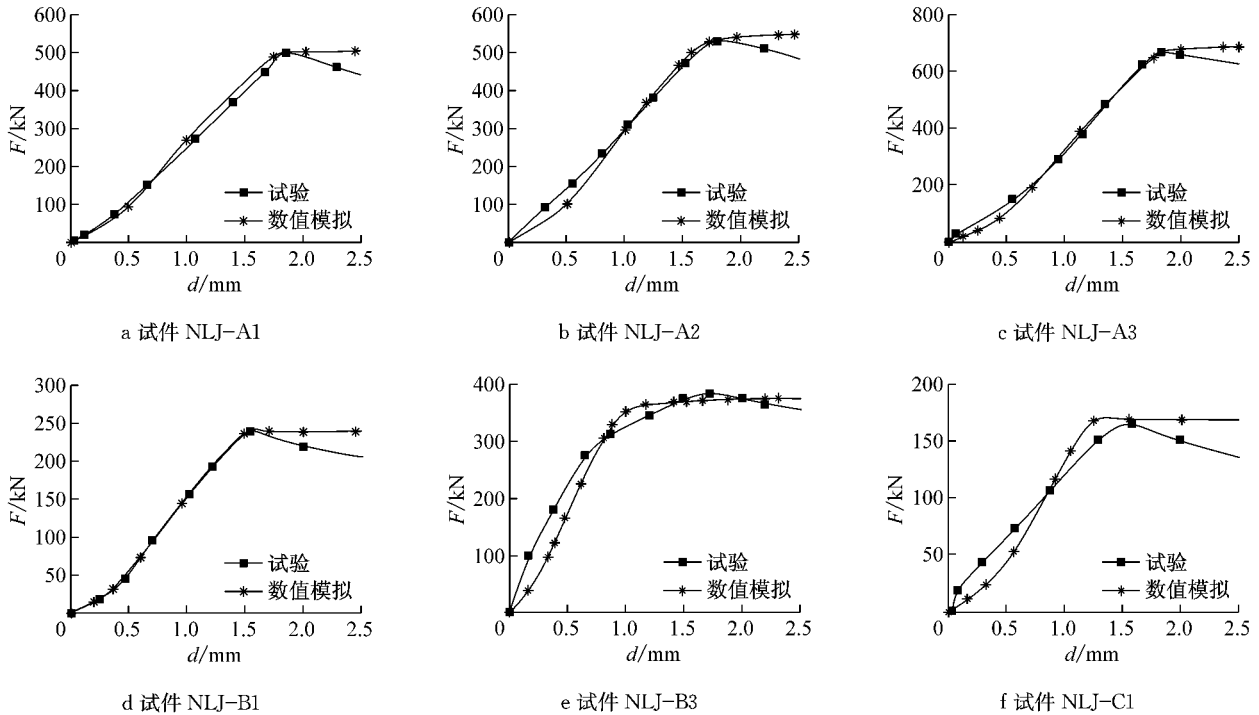


图 25 试验与数值模拟的荷载-位移曲线对比

Fig.25 Comparison of load-displacement between tests and FE models

表 5 承载力对比分析

Tab.5 Comparisons of ultimate loads

编号	实测承载力/kN	数值模拟承载力/kN	误差/%
NLJ-A1	497.98	505.14	1.44
NLJ-A2	530.33	551.21	3.94
NLJ-A3	666.48	686.60	3.02
NLJ-B1	238.54	247.55	3.78
NLJ-B3	383.76	357.15	6.93
NLJ-C1	164.78	168.25	2.11
平均误差			3.54

6 结论

在传统高强螺栓连接节点的基础上,研发了新型咬合式高强螺栓连接节点. 进行了 4 个传统高强螺栓连接和 14 个咬合式高强螺栓连接的抗剪承载力试验,建立了相应的数值模型,并对比了连接的破坏模式和受力方向荷载-位移曲线. 通过本文的试验和数值研究,可得出如下结论:

(1) 传统承压型高强螺栓连接节点的主要破坏模式为螺栓剪切破坏,而咬合式高强螺栓连接节点的主要破坏模式为板件错动破坏,破坏时盖板和芯板均处于弹性状态,螺栓不参与抗剪。

(2) 经板件刨槽处理的咬合式高强螺栓连接节点承载力远高于相同条件下的传统承压型高强螺栓连接节点,最大放大倍数可达 4.39。螺栓预紧力越大,咬合式高强螺栓连接节点承载能力越高;槽口形式对连接承载力有很大影响,槽口越深,承载力越大。

(3) 建立了新型咬合式高强螺栓连接的数值模型;数值分析与试验所得的破坏模式较为接近,荷载-位移曲线在板件错动之前吻合良好,故该模型可用于咬合式高强螺栓连接的大规模数值分析。

参考文献:

- [1] HE M, ZHAO Y, MA R. Experimental investigation on lateral performance of pre-stressed tube bolted connection with high initial stiffness[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(5):762.
- [2] 马人乐, 杨阳, 陈桥生, 等. 长圆孔变型性高强螺栓节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(1):101.
MA Renle, YANG Yang, CHEN Qiaosheng, *et al.* Seismic performance testing study on high strength bolt connections with slotted holes[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(1):101.
- [3] 马人乐, 李渊, 梁峰, 等. 钢管混凝土梁柱长圆孔变型性高强螺栓节点抗震性能试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2010, 12(6):25.
MA Renle, LI Yuan, LIANG Feng, *et al.* Seismic performance testing study on high strength bolt connections with slotted holes between concrete-filled steel tubular column and reinforced concrete beam [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2010, 12(6):25.
- [4] TIZANI W, RIDLEY-ELLI D J. The performance of a new blind-bolt for moment-resisting connections [C] // *Tubular Structures X: Proceedings of the 10th International Symposium on Tubular Structures*. Rotterdam: A A Balkema, 2003:395-400.
- [5] WANG Z Y, TIZANI W, WANG Q Y. Strength and initial stiffness of a blind-bolt connection based on the T-stub model [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(9): 2505.
- [6] ELLISON S, TIZANI W. Behaviour of blind bolted connections to concrete filled hollow sections[J]. *Engineering Structures*, 2004, 82(22):16.
- [7] ANNAN C D, CHIZA A. Characterization of slip resistance of high strength bolted connections with zinc-based metallized faying surfaces [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(6): 2187.
- [8] ANNAN C D, CHIZA A. Slip resistance of metalized - galvanized faying surfaces in steel bridge construction [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 95(3): 211.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国标准化委员会. 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差: GB/T 709—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Dimension, shape, weight and tolerances for hot-rolled steel plates and sheets: GB/T 709—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [10] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of steel structures: GB 50017—2003 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for high strength bolt connections of steel structures: JGJ 82—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [12] ECCS. Eurocode 3. Design of steel structures: CEN/TC 250/SC9-PT9 [S]. London: ICE Publishing, 2002.
- [13] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一. 钢结构基本原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
SHEN Zuyan, CHEN Yangji, CHEN Yiyi. *Fundamental of steel structures* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [14] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例讲解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SHI Yiping, ZHOU Yurong. *Explanation of finite element analysis software ABAQUS* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [15] BURSI O S, JASPART J P. Benchmarks for finite element modelling of bolted steel connections [J]. *Journal of Construction Steel Research*, 1997, 43(1-3):17.
- [16] BURSI O S, JASPART J P. Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections [J]. *Computers & Structures*, 1998, 69(3):361.