

12.9 级高强度螺栓连接外伸端板节点抗震性能数值分析

杨俊芬^{1,2}, 刘盼盼¹, 路 朋¹, 何 琛¹, 张 钦³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部装配式建筑工业化协同创新中心, 陕西 西安 710055;

3. 眉山中车紧固件科技有限公司, 四川 眉山 620000)

摘要: 对 12.9 级高强度螺栓连接的外伸端板节点抗震性能开展数值研究。利用 ABAQUS 验证有限元模型正确的基础上, 分析外伸端板节点的螺栓直径、端板厚度及螺栓预紧力对该节点的破坏模式和抗震性能的影响。结果表明: 改变螺栓直径系列试件, 滞回曲线比较饱满, 节点的耗能能力比较好, 试件的破坏方式为端板屈曲, 梁端形成塑性铰, 螺栓破坏; 端板厚度系列试件的单向加载曲线初期几乎相同, 节点初始转动刚度相同, 但是随着端板厚度的增加, 节点的承载能力明显提高, 端板厚度增大后, 节点的破坏形式有转变到梁翼缘的趋势; 螺栓预紧力改变, 对节点的滞回曲线有一定影响, 但对节点的初始转动刚度、屈服荷载、极限荷载和破坏形式等基本无影响。

关键词: 12.9 级高强度螺栓; 外伸端板节点; 抗震性能; 参数分析; 有限元模拟

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0093-10

Numerical analysis of seismic performance of 12.9 grade high-strength bolt end-plate joints

YANG Junfen^{1,2}, LIU Panpan¹, LU Peng¹, HE Chen¹, ZHANG Qin³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Collaborative Innovation Center for Assembled Buildings in Western China (XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Meishan CRRC Fastener Technology Co., Ltd., Sichuan Meishan 620000, China)

Abstract: Numerical research is carried out on the seismic performance of overhanging end plate joints connected by the grade-12.9 high-strength bolts. Based on the correctness of the finite element model verified by ABAQUS, the influence of bolt diameter, end plate thickness and bolt pre-tightening force on the node's failure mode and seismic performance is analyzed. Results show that :the hysteresis curve of the series of specimens changed by the bolt diameter is relatively full, and the node has good energy dissipation capacity. The failure mode of the specimen is end plate buckling, the beam end forms a plastic hinge, and the bolt is damaged; The unidirectional loading curves of the end plate thickness series specimens are almost the same at the initial stage, and the initial rotational stiffness of the joints is the same. However, as the thickness of the end plate increases, the bearing capacity of the joint is significantly improved. After the thickness of the end plate increases, the failure mode of the joint has a tendency to change to the beam flange. The change of bolt preload has a certain influence on the hysteresis curve of the joint, but has basically no influence on the initial rotational stiffness, yield load, ultimate load and failure form of the joint.

Key words: grade-12.9 high-strength bolt; extended end-plate joint; seismic performance; parametric analysis; finite element simulation

在钢结构门式刚架和低、多层框架体系中, 端板、螺栓、节点域柱翼缘和腹板以及加劲肋等梁柱间通常采用端板节点连接。端板节点主要由 部分组成, 构造特点决定了其具有较强承载能力

收稿日期: 2021-11-08

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 陕西省教育厅服务地方专项科研计划项目(21JC019); 陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-308); 中国中车集团有限公司重点项目(2020CKB055)

第一作者: 杨俊芬(1979—), 女, 副教授, 博士(后), 主要从事钢结构工程的教学和科研工作。E-mail: yjf9807@126.com

的同时还具备一定的柔性^[1]。外伸式端板连接节点因其刚度大、承载力和变形能力较好,在工程中得到广泛应用。典型的外伸端板连接节点形式见图1,节点中梁翼缘和端板采用熔透焊缝,梁腹板与端板采用角焊缝或熔透对接焊缝,一般在工厂进行加工,能够保证焊接质量。端板与柱翼缘采用高强螺栓连接,施工方便。

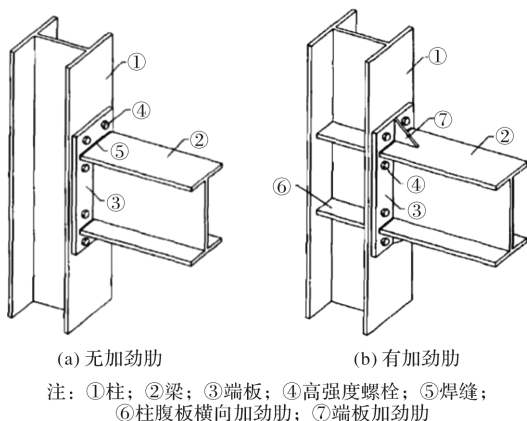


图1 外伸端板连接节点

Fig. 1 Connecting node of outrigger end plate

端板连接构造多样、制作残余应力变形差异大及安装差异等原因,使得端板连接成为一个复杂的问题,相对研究也较多。Jenkins等^[2]对齐平式和外伸式端板节点进行了试验研究,结果表明:端板节点的转动能力和端板厚度以及螺栓预拉力密切相关,并给出了端板节点的设计建议及相关计算公式;Aggarwal^[3-5]等比较了平齐式、两端外伸式和一端外伸式端板形式的节点性能,每组试件3个,通过试验得平齐式端板连接为半刚性连接节点,两端外伸式和一端外伸式端板连接为刚性连接,且两者的极限转角相同,但抗弯能力方面一端外伸式较小。Murray等^[6]提出了无加劲肋外伸端板增加多排螺栓的设计方法,并给出了螺栓受力的简化计算方法,具有较高的精度。王燕^[7]、郭兵^[8]、施刚^[9]等通过低周反复加载试验对端板节点的滞回性能进行了深入研究,认为两端外伸端板节点在循环荷载下具有良好的延性和耗能能力,增加端板厚度和设置加劲肋能够有效地提高端板节点的滞回性能;刘秀丽等^[10]通过算例比较中美欧高强度螺栓外伸端板连接的设计方法,结果表明:按厚板设计时,我国《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82—2011)规程设计偏安全,按薄板设计时我国规范与美欧规范设计基本一致,撬力计算值介于美欧规范

之间。上述研究表明:端板节点的受力性能不仅受到节点构造的影响,还与紧固件的性能紧密相关。

高强度钢材在工程中广泛应用,对螺栓性能提出了更高的要求。目前国内外学者对12.9级高强度螺栓开展一些研究,赵浩洋等^[11]采用SCM440钢生产的12.9级高强螺栓,通过改变调质工艺的淬火温度和回火温度,对螺栓抗拉强度、屈服强度、面缩率的影响进行研究,结果表明:850℃保温时间80 min后淬火和480℃保温时间3 h后淬火的螺栓性能最好。熊云奇^[12]通过对发动机上12.9级高强螺栓断裂原因的分析,得出螺栓断裂原因主要为扭矩施工难以达到理想要求。于同仁、姜婷等^[13]对12.9级高强螺栓冷镦开裂现象进行原因研究,该产品采用SCM440钢生产制作,通过对其退火后的试样进行金相分析,得出其冷镦开裂的主要原因为螺栓在退火处理时只使用了甲醇作为保护气氛,炉内气压降低,外界气体进入,污染了炉内的还原性气氛,使得螺栓在之后的制作中产生裂纹,进而冷镦开裂。姜招喜^[14]对SCM435生产的12.9级高强螺栓服役42 h后发生断裂的原因进行研究,发现螺栓断裂主要由于氢导致的延迟断裂。马鸣图等^[15]对不同加载力和不同表面状态下的12.9级和14.9级螺栓进行试验研究,试验结果表明:两者中螺栓的抗延迟断裂时间均小于规范值720 h,说明螺栓氢脆现象明显,但是经过涂装之后,螺栓的抗延迟断裂时间能明显改善,接近或达到规范值。Darko Beg等^[16]12.9级高强螺栓双剪切面的破坏进行试验研究,发现螺栓破坏为脆性破坏,塑性变形小。Ana M. Giro Coelho^[17-19]对12.9级高强螺栓的端板节点进行试验,节点形式为平齐式和一端外伸式,柱无轴力的情况下进行单推试验研究,发现螺栓破坏为脆性破坏,塑性变形小。

近年来国内外对12.9级高强度螺栓研究主要集中在氢脆断裂机制、材料研制和失效分析等方面,针对12.9级高强度螺栓应用于建筑结构的研究较少。本文选用工程应用广泛的外伸端板连接节点,采用12.9级高强度螺栓连接,通过有限元软件对节点抗震性能开展深入研究,分析外伸端板节点的螺栓直径、端板厚度及螺栓预紧力对该节点的破坏模式和抗震性能的影响。

1 BASE 试件节点设计

根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[20]和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[21]对 BASE 试件进行设计, 具体尺寸见图 2。梁、柱均采用焊接 H 型钢, 截面尺寸分别为 H300×250×8×12 和 H350×300×12×20, 端板厚度 20 mm, 并设置端板加劲肋, 梁、柱长度分别为 1.8 m 和 2.0 m; 在柱腹板梁翼缘对应处设置加劲肋; 设计轴压比为 0.3; 节点螺栓选用 8 个 12.9 级 M24 摩擦型超高强度螺栓。节点梁、柱均采用经济性较好的 Q355B 钢材加工制作。根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[20]计算螺栓预拉力为 $P=0.6075 \times f_u \times A_e$, 取 $1\,220\text{ N/mm}^2$, 施加扭矩 T 的大小按照 $T=k \cdot D \cdot P$ 计算, 式中: k 为扭矩系数; D 为螺栓直径; P 为螺栓预拉力。根据测量扭矩系数结果, K 取 0.14。计算得出 12.9 级超高强螺栓 M24 的预紧力 $P=260\text{ kN}$, 设计扭矩为 $870\text{ N} \cdot \text{m}$ 。紧固螺栓时施工顺序由中间向两边, 先进行初拧, 然后终拧, 初拧扭矩值为终拧的 50%。

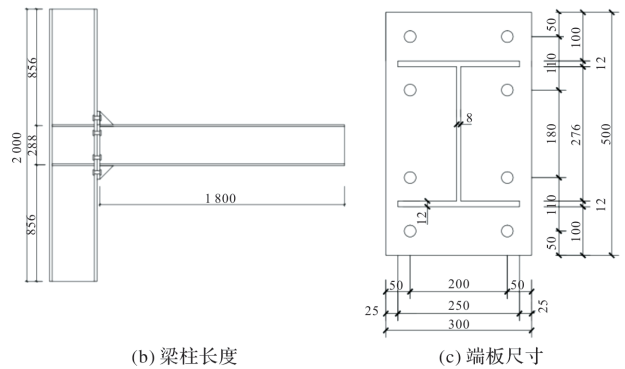
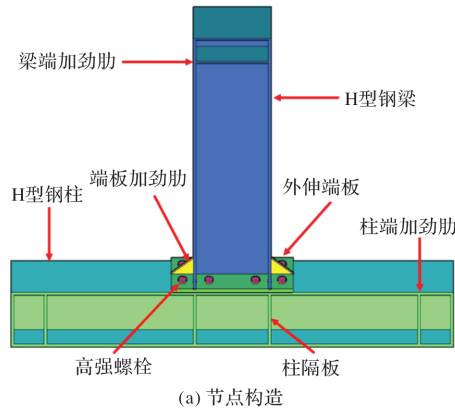


图 2 BASE 试件节点模型尺寸
Fig. 2 BASE specimen node model size

2 有限元模型建立与验证

2.1 单元选取与材料本构关系

各钢部件均采用线性减缩积分单元 C3D8R, 以克服完全积分单元的剪切自锁现象。文中所有型钢、钢板及超高强螺栓的本构关系均采用经典的三折线模型, 见图 3。钢材取为弹塑性材料, 材料屈服判定采用 Von Mises 屈服准则, 强化模型为随动强化模型。材料参数见表 1。

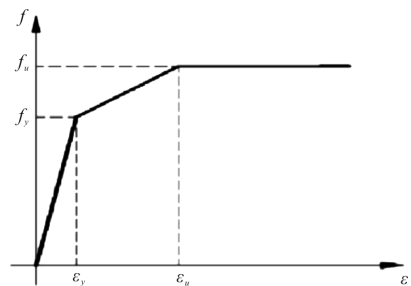


图 3 钢材材料模型
Fig. 3 Steel material model

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters					
钢材类型	$\sigma_y/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\sigma_u/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\epsilon_y/\%$	$E/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$E_{st}/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Q355	355	600	0.17	206 000	0.03E
12.9 级超高强螺栓	1 100	1 220	0.24	206 000	0.1E

2.2 网格划分及约束条件

根据试件的几何尺寸建立有限元模型。单元网格采用扫掠技术划分, 在节点域位置进行局部加密, 端板和梁翼缘间的焊接采用绑定方式模拟, 端板和柱翼缘间采用摩擦接触, 摩擦系数取 0.3。采用梁单元和 MPC 连接并且施加预紧力以模拟高强度螺栓连接, 以避免实体螺栓建模时需要定义较多接触对而可能产生的收敛问题。柱顶端设置 x 、 z 方向的位移约束, 柱底端设置 x 、 y 、 z 三个

方向的位移约束, 柱两端能够自由转动, 符合试验选取的节点模型, 有限元模型见图 4。

2.3 加载方式和加载制度

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ101—2015)^[22], 采用荷载-变形双控制的方法进行加载。试件屈服前采用荷载控制方法, 各级荷载循环加载一次; 屈服后采用位移控制, 各级位移为 1/2 倍的最大屈服位移 Δ_y , 各级荷载循环 3 次。加载方式及加载制度分别见图 5 和图 6。

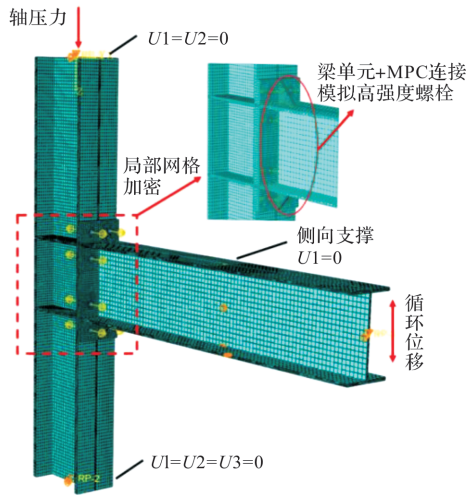


图 4 节点有限元模型

Fig. 4 Node finite element model

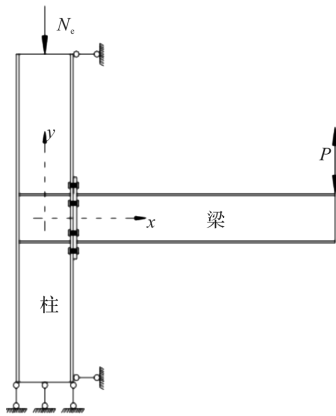


图 5 加载方式

Fig. 5 Loading method

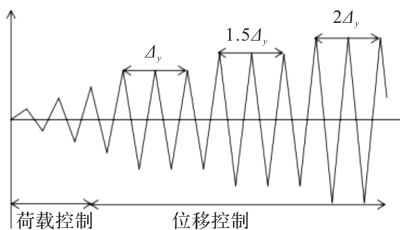


图 6 加载制度

Fig. 6 Loading system

2.4 有限元模型的验证

采用上述建模方法,对课题组试验试件为 YL-24-12.9(节点有加劲肋,12.9 级 M24 螺栓)的 12.9 级高强度螺栓连接外伸端板节点进行建模分析,并将有限元分析结果与试验结果对比分析,有限元模型中钢材材性与试验相同。课题组试验 YL-24-12.9 试件的钢梁尺 $H350 \times 200 \times 8 \times 12$,钢柱尺寸为 $H350 \times 200 \times 12 \times 18$,梁、柱长度分别为 2 m 和 1.6 m。YL-24-12.9 试件构造详图见图 7。

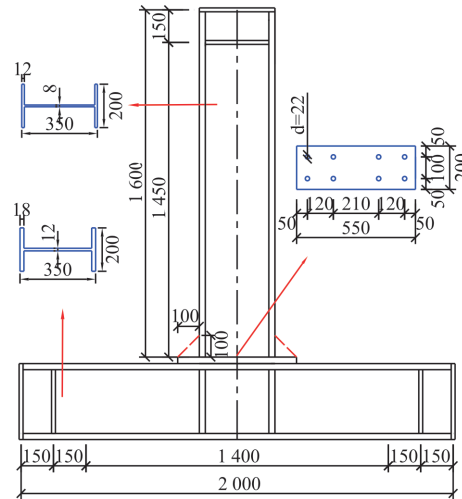


图 7 YL-24-12.9 试件节点构造详图

Fig. 7 Detailed diagram of node structure of YL-24-12.9 test piece

有限元计算应力云图与试验结果破坏模式见图 8。有限元节点模型在达到破坏位移时的变形与试验基本一致;同时,节点域各部分组件全部进入塑性发展阶段,高强度螺栓均达到其极限抗拉强度。有限元计算得到的滞回曲线和试验结果的对比见图 9。计算结果表明数值模拟与试验结果吻合较好,误差基本在 10% 左右,见表 2。有限元计算与试验得到的主要结果接近,滞回曲线基本吻合。

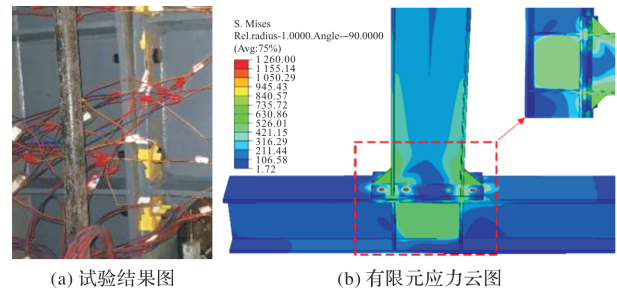


图 8 破坏模式对比分析

Fig. 8 Comparison and analysis of failure modes

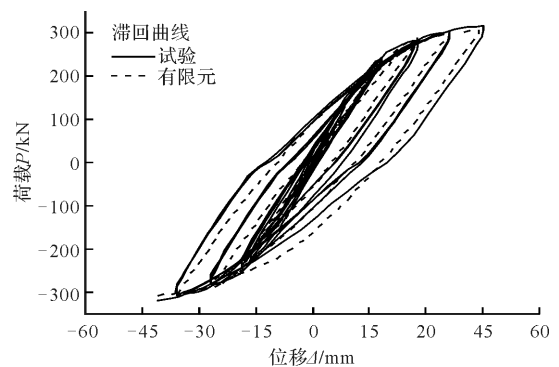


图 9 滞回曲线对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of hysteresis curves

表 2 有限元计算和试验主要结果对比

Tab. 2 Comparison of main results of finite element calculation and test

试件编号	加载 方向	试验		有限元		对比	试验		有限元		对比
		P_y/kN	Δ_y/mm	$P_{y\text{FEM}}/\text{kN}$	$\Delta_{y\text{FEM}}/\text{mm}$		P_u/kN	Δ_u/mm	$P_{u\text{FEM}}/\text{kN}$	$\Delta_{u\text{FEM}}/\text{mm}$	
YL-24-12.9	正向	267.0	23.0	280.1	26.7	1.05	318.0	44.0	312.7	45.0	0.98
	负向	270.0	26.0	279.8	26.8	1.04	317.0	42.0	317.7	36.1	1.00

3 端板节点参数分析试件设计

为研究端板厚度、螺栓直径和螺栓预紧力等因素对连接节点抗震性能的影响, 对 BASE 试件进行参数变换, 具体试件设计见表 3。螺栓系列试件: 仅改变螺栓直径分别为 M27 和 M30, 其他参数与 BASE 试件一致。端板系列试件: 仅改变端板厚度分别为 16 mm 和 24 mm, 其他参数与 BASE 试件一致。预拉力系列试件: 仅改变螺栓预紧力分别为 $0.5P$ 和 $0.7P$, 其他参数与 BASE 试件一致。由于高强度螺栓通常采用扭矩法施加拧紧力矩, 对于 10.9 级及以下等级的高强度螺栓, 采用扭矩扳手施加设计扭矩基本可以达到设计螺栓预紧力, 而 12.9 级高强度螺栓的轴力很大, 施加扭矩很大一部分消耗在摩擦上^[23]。因此, 分析了螺栓预紧力不足对节点滞回性能的影响。

表 3 端板节点参数分析试件

Tab. 3 Test pieces for analysis of end plate node parameters

试件系列	试件编号	螺栓直径	端板厚度	螺栓预
		/mm	/mm	应力
基本试件	BASE	24	20	P
	BOLT1	27	20	P
	BOLT2	30	20	P
端板系列	DB16	24	16	P
	DB24	24	24	P
预拉力系列	YJ05	24	20	$0.5P$
	YJ07	24	20	$0.7P$

4 端板节点抗震性能影响因素分析

利用 ABAQUS 设计建立基本节点形式, 并改变节点中的螺栓直径、端板厚度及螺栓预拉力, 共建立 7 个端板节点模型进行有限元分析, 对模型进行按照 ECCS 建议的加载制度进行加载, 并对节点的破坏模式和抗震性能进行对比分析。

4.1 BASE 试件

极限荷载时 BASE 试件节点的破坏形式见图 10。根据 BASE 端板节点应力云图可知, 在端板的受拉区和受压区分别形成 Y 型屈服区, 柱节点

区部分受力屈服, 螺栓达到破坏应力, 产生弯曲变形。BASE 试件的滞回曲线见图 11。根据滞回环的变化可知, 随着加载增加, 端板会有残余变形, 与柱翼缘的接触面积减小, 滞回曲线会有轻微的捏缩效应。综上, BASE 试件的滞回曲线稳定而饱满。

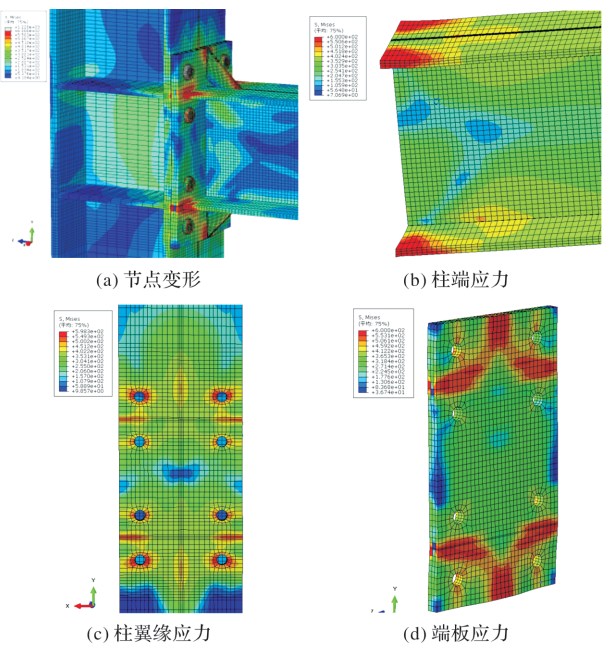


图 10 BASE 试件端板节点应力云图

Fig. 10 Stress cloud diagram of the end plate node of the BASE specimen

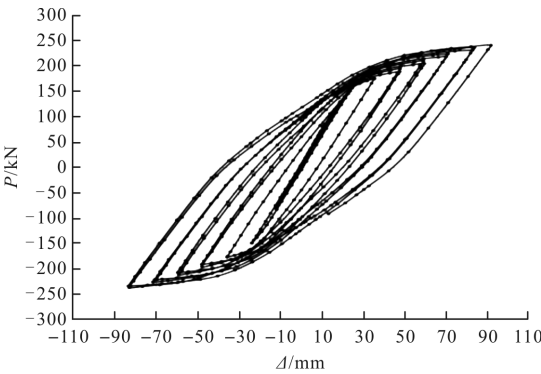


图 11 BASE 试件滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curve of BASE specimen

4.2 螺栓系列试件

螺栓系列试件节点破坏时应力云图见图 12。

同 BASE 试件相比, BOLT1 和 BOLT2 的应力分布趋势基本不变, 但破坏时变形更大, 端板应力分布相同, 但 BOLT2 的极限应力范围更大. 螺栓孔附近已经受力屈服, 发生塑性变形.

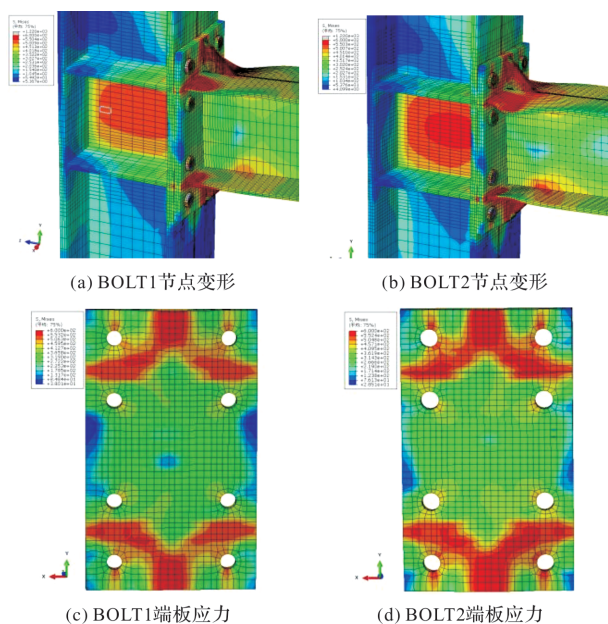


图 12 螺栓系列试件节点应力云图

Fig. 12 The stress cloud diagram of the bolt series test piece node

螺栓系列试件节点滞回曲线和骨架曲线分别见图 13 和图 14.

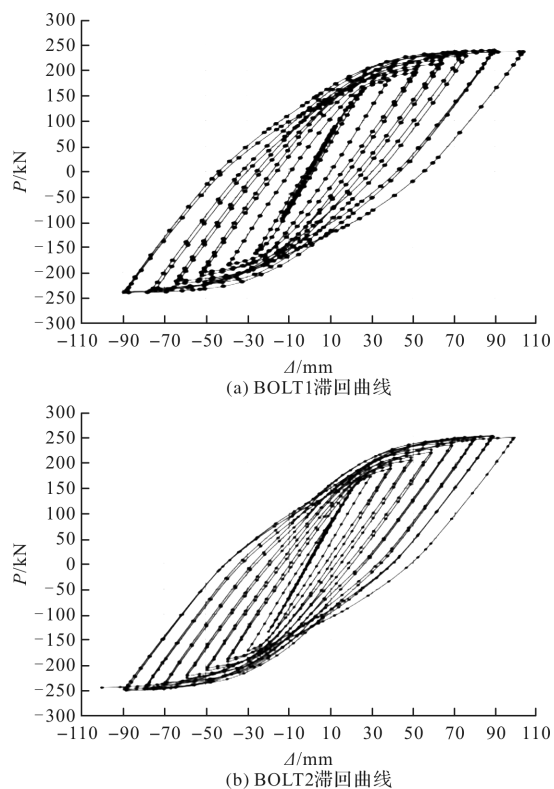


图 13 螺栓系列试件滞回曲线

Fig. 13 Hysteresis curve of bolt series test piece

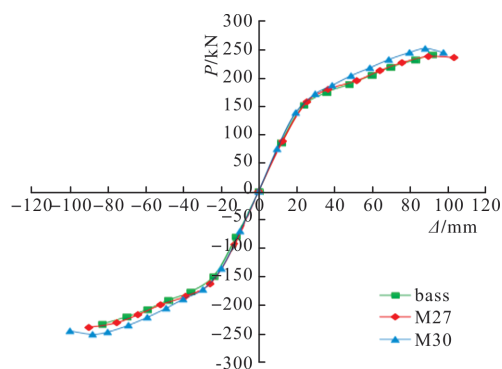


图 14 螺栓系列试件骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curve of bolt series test piece

不同直径的试件滞回曲线饱满, BOLT2 试件捏缩现象最明显, 表明节点具有良好的延性和耗能能力. 屈服前三条骨架曲线几乎重合, 屈服后试件 BASE 和 BOLT1 接近, BOLT2 曲线位移位于两者上方, 刚度和极限承载力有一定提高, 但不明显. 说明螺栓直径增加对节点的刚度和承载力影响较小.

螺栓系列试件螺栓的应力云图见图 15, 随着螺栓直径的增加, 螺栓的屈服面积减小, 但都达到破坏应力, 且破坏面在减小, 受压区螺栓的内力几乎没有影响. 螺栓直径系列试件计算结果见表 4, 数据表明节点螺栓直径的增加对节点的承载力、刚度、极限位移和能力耗散系数等性能影响不大, 但对节点的破坏形式有明显的影响.

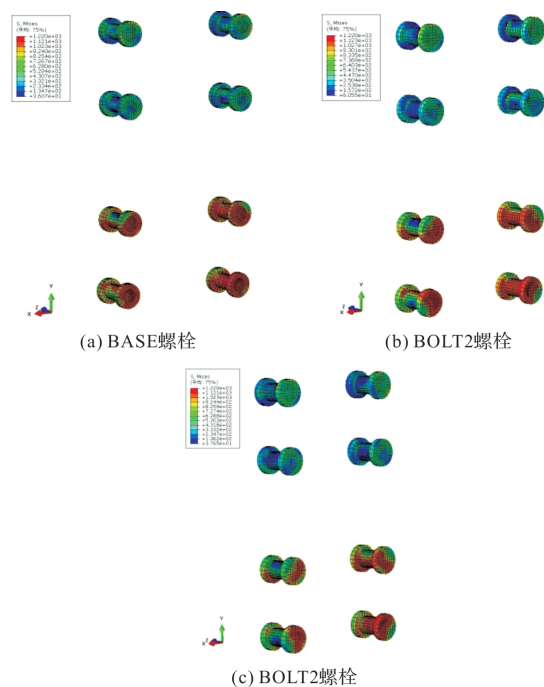


图 15 螺栓系列试件螺栓应力云图

Fig. 15 Bolt stress cloud diagram of bolt series test piece

表 4 螺栓直径系列试件计算结果

Tab. 4 Calculation results of bolt diameter series test pieces

试件编号	初始转动刚度 $K_i/\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$	P_y/kN	Δ_y/mm	能量耗散系数 E	P_u/kN	破坏模式
BASE	20 711	188	47	2.15	241	端板、梁翼缘屈曲, 螺栓破坏
BOLT1	20 138	200	47	2.28	240	端板、梁翼缘屈曲, 螺栓破坏
BOLT2	22 117	200	47	2.19	252	端板屈曲, 梁翼缘形成塑性铰, 螺栓破坏

4.3 端板系列试件

端板系列试件节点破坏时应力云图见图 16. 试件 DB16 端板较薄, 受拉翼缘处具有更明显的变形, 端板厚度增加到 24 mm 时, 端板变形微小, 但梁翼缘变形增大, 受拉区梁腹板屈服. 同时梁翼缘与端板连接处, 端板焊接处受力最大. 随着端板厚度的增加, 柱腹板节点域的受力逐渐增加. 综合来看, 端板厚度的改变, 导致节点破坏形式的改变.

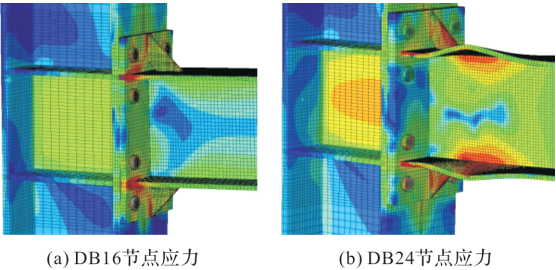


图 16 端板系列试件应力云图

Fig. 16 Stress cloud diagram of end plate series test pieces

端板系列试件滞回曲线和骨架曲线分别见图 17 和图 18.

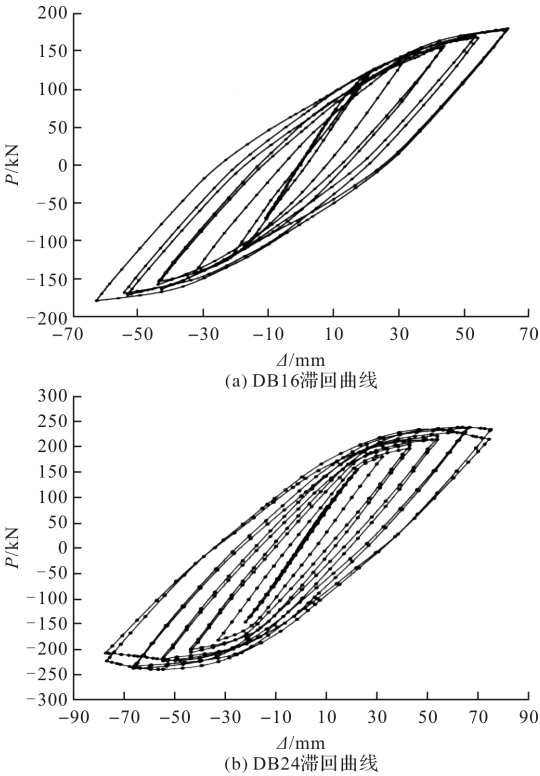


图 17 端板系列试件滞回曲线

Fig. 17 Hysteresis curve of end plate series test piece

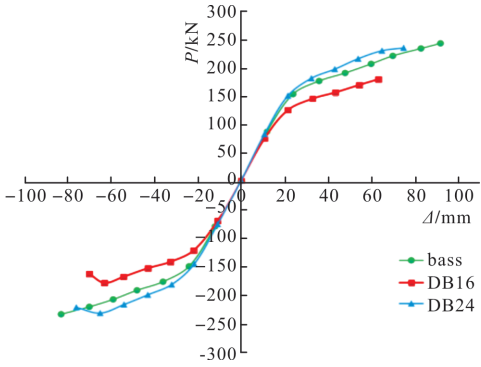


图 18 端板系列试件骨架曲线

Fig. 18 Skeleton curve of end plate series test piece

与 BASE 试件的滞回曲线相比, DB16 的滞回曲线呈梭型, 刚度减小更快, 劣化更严重. 随着加载的进行, 节点刚度明显减小, 在端板与翼缘焊接处和端板加劲肋处发生加大屈曲. DB24 的滞回曲线比较饱满刚度减小较慢, 节点性能良好. 根据骨架曲线知, 端板厚度的增加, 节点的极限承载力提高, 说明端板厚度能提高节点的承载力.

端板系列试件螺栓应力图见图 19.

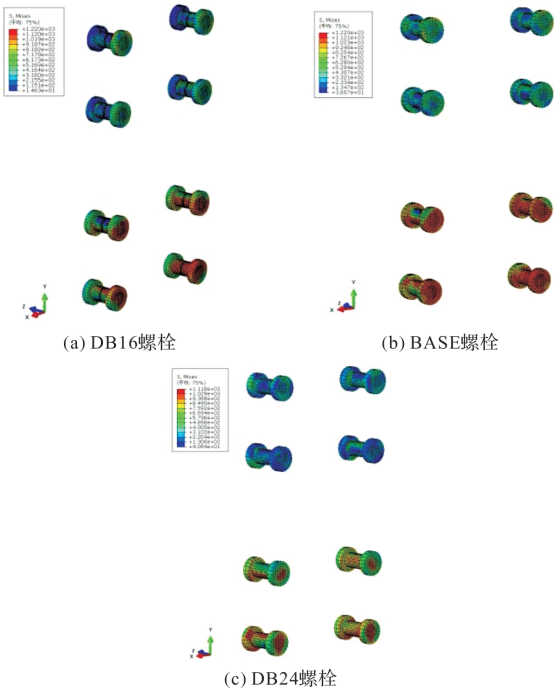


图 19 端板系列螺栓应力云图

Fig. 19 Stress cloud diagram of end plate series bolts

试件 DB16 受拉区螺栓应力在螺杆长度方向已经屈服, 最大应力出现在螺帽与端板的连接处,

达到破坏应力,受压区四颗螺栓受力较小.端板厚度为 20 mm 时,螺帽受力增加,螺杆出现一定面积的破坏应力,最下排螺栓受力最大.端板增加到 24 mm 时,螺栓应力减小.总体来说,端板厚度的改变对螺栓的应力有一定影响.

端板系列试件计算结果见表 5.数据表明,试件的初始刚度相差不多,说明端板厚度的改变对节点的初始刚度影响不大.试件 BASE 和 DB24 的屈服承载力相差不多,DB16 的承载力比 DB24 降

低了 24%,屈服位移降低了 15%,说明随着端板厚度的增加,节点的屈服承载力和屈服位移会增加,但厚度达到一定时,增加不明显.节点的极限承载力,随着端板厚度的增加,承载力提高,但增加幅度会减小.节点的破坏形式在 16 mm 和 20 mm 时,为端板、梁翼缘屈曲,螺栓破坏,厚度为 24 mm 时节点破坏形式为端板屈曲,梁端形成塑性铰,所以端板厚度增大后,节点的破坏形式从端板转变到梁翼缘,构成强节点.

表 5 端板系列试件计算结果

Tab. 5 Calculation results of end plate series test pieces

试件编号	初始转动刚度 $K_i / \text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$	P_y / kN	Δ_y / mm	P_u / kN	破坏模式
BASE	20 711	188	47	241	端板、梁翼缘屈曲,螺栓破坏
DB16	19 801	146	35	180	端板、梁翼缘屈曲,螺栓破坏
DB24	21 862	193	41	233	端板屈曲,梁端形成塑性铰

综上所述端板厚度对节点的滞回性能、转动刚度、螺栓受力以及破坏模式等都有重要影响.在超高强螺栓连接的节点中宜增加端板厚度和设置端板加劲肋,这样能够增强节点刚度,更好地发挥超高强螺栓的力学性能.

4.4 预紧力试件

预紧力系列试件节点应力云图见图 20.随着螺栓预紧力的降低,节点的破坏形式基本相同,试件的应力分布和应力大变化较小.

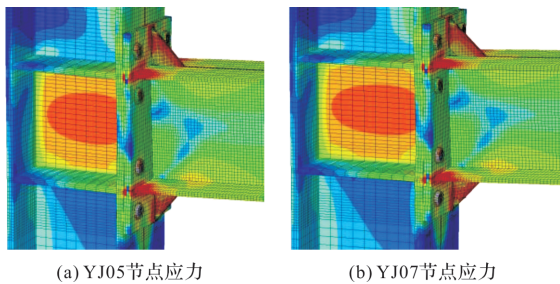


图 20 预紧力系列试件节点应力云图

Fig. 20 The stress cloud diagram of the pre-tightening force series test pieces

预紧力系列试件的滞回曲线和骨架曲线见图 21 和图 22.螺栓预紧力损失对节点的滞回性能有一定影响.三个试件的骨架曲线基本重合,表明螺栓预紧力对节点的刚度影响较小.

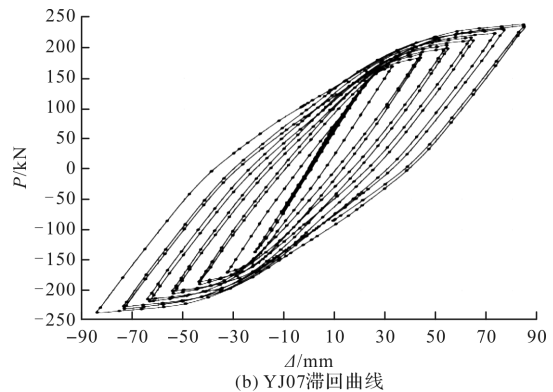
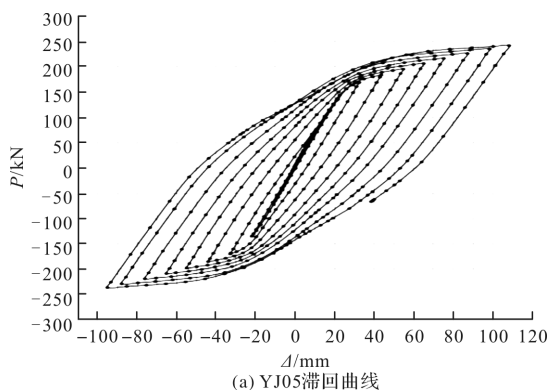


图 21 预紧力系列试件滞回曲线

Fig. 21 Hysteresis curve of pre-tightening force series specimens

图 22 预紧力系列试件骨架曲线

Fig. 22 Skeleton curve of pre-tightening force series test pieces

预紧力系列试件计算结果见表 6,数据表明螺栓预紧力降低,对节点的初始转动刚度、屈服荷载、极限荷载和破坏形式影响较小.

5 结论

本文建立了 7 个端板连接节点模型,研究螺栓直径、端板厚度和螺栓预拉力对节点抗震性能的影响,对模型进行循环加载,得到节点的荷载-位

表 6 预紧力系列试件计算结果

Tab. 6 Calculation results of pre-tightening force series test pieces

试件编号	初始转动刚度 $K_i/\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	破坏模式
BASE	20 711	188	47	241	端板、梁翼缘屈曲, 螺栓破坏
YJ05	20 711	188	47	240	端板、梁翼缘屈曲, 螺栓破坏
YJ07	20 711	188	47	242	端板、梁翼缘屈曲, 螺栓破坏

移曲线和破坏模式, 并对计算结果进行分析, 得出以下结论:

(1)增加螺栓直径, 试件滞回曲线均比较饱满, 节点的耗能能力较好, 节点刚度及承载力提高但程度较小;

(2)增大端板厚度, 节点的承载能力明显提高, 增加端板厚度和设置端板加劲肋更有利于充分发挥 12.9 级高强度螺栓端板节点的抗震性能;

(3)螺栓预紧力损失, 对节点的滞回曲线有一定影响, 但对节点的初始转动刚度、屈服荷载、极限荷载和破坏形式影响较小.

参考文献 References

[1] 郭兵, 顾强. 多层钢框架中梁柱端板连接的强度和刚度[J]. 建筑结构学报, 2004(2): 27-31.
GUO Bing, GU Qiang. Strength and stiffness of beam-column end-plate connection in multistory steel frame[J]. Journal of Building Structures, 2004(2): 27-31.

[2] JENKINS W M, Tong C S, PRESCOTT A T. Moment-transmitting endplate connections in steel construction and a proposed basis for flush endplate design [J]. The Structural Engineer, 1986, 64A (5): 121-136.

[3] AGGARWAL A K, COATES R C, Moment-rotation characteristics of bolted beam column connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1986, 6(5): 303-318.

[4] AGGARWAL A K. Behavior of flexible endplate beam-to-column joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1990, 16(1): 151-175.

[5] AGGARWAL A K. Comparative tests on endplate beam-to-column connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1994, 30(2): 151-175.

[6] ABEL, M. MURRAY, T. M. Analysis and experimental investigation of the extended unstiffened moment end-plate connection with four bolts at beam flange[R]. Report No. CE/VPI-ST 93/08, Blacksburg Virginia, USA: Polytechnic Institute and State University. 1994.

[7] 王燕, 彭福明, 赵桂明. 钢框架梁柱半刚性节点在循环

荷载作用下的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 55-57.

WANG Yan, PENG Fuming, ZHAO Guiming. Experimental study on semi-rigid steel frame beam-column joints under cyclic loading[J]. Industrial Construction, 2001, 31(12): 55-57.

[8] 郭兵, 顾强, 柳锋, 等. 梁柱端板连接的滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3): 8-13.
GUO Bing, GU Qiang, LIU Feng, et al. Experimental study on hysteretic performance of beam-column end plate connection[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(3): 8-13.

[9] 施刚, 石永久, 王元清, 等. 多层钢框架半刚性端板连接的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(3): 391-394.
SHI Gang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, et al. Experimental research on semi-rigid end plate connection of multi-layer steel frame[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2004, 44(3): 391-394.

[10] 刘秀丽, 王燕. 中美欧高强度螺栓外伸端板连接设计方法比较[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(1): 41-49.
LIU Xiuli, WANG Yan. Comparison of design methods for connecting high-strength bolts in China, the United States and Europe[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 44(1): 41-49.

[11] 赵浩洋, 翟瑞银, 金峰. 12.9 级高强度紧固件用钢的调质工艺研究[C]//中国金属学会. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 上海: 上海人民出版社, 2015: 1-6.
ZHAO Haoyang, ZHAI Ruiyin, JIN Feng. Research on the quenching and tempering process of grade 12.9 high-strength fastener steel[C]//China Metal Society. Proceedings of the 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference III. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2015: 1-6.

[12] 熊云奇. 12.9 级高强度螺栓装配拉长断裂原因分析及工艺改进[J]. 汽车科技, 2001(5): 21-23.
XIONG Yunqi. Cause analysis and process improvement of elongation and fracture of 12.9 grade high

- strength bolt assembly[J]. *Automobile Science and Technology*, 2001(5): 21-23.
- [13] 于同仁, 姜婷, 郭湛, 等. 12.9级高强螺栓冷镦开裂的原因分析[J]. *安徽冶金*, 2015(1): 44-46.
- YU Tongren, JIANG Ting, GUO Zhan, et al. Analysis of the causes of cold heading cracks of 12.9 high-strength bolts[J]. *Anhui Metallurgy*, 2015(1): 44-46.
- [14] 姜招喜. 12.9级矿车制动盘螺栓断裂失效分析[J]. *热处理*, 2014(4): 55-57.
- JIANG Zhaoxi. Failure analysis of bolt fracture in brake disc of 12.9 mining car[J]. *Heat Treatment*, 2014(4): 55-57.
- [15] 马鸣图, 李志刚, 熊云奇, 等. 14.9、12.9级高强度螺栓的延迟断裂性能的研究[C]//中国机械工程协会. 海峡两岸第二届工程材料研讨会论文集. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 1-8.
- MA Mingtu, LI Zhigang, XIONG Yunqi, et al. Research on delayed fracture performance of 14.9 and 12.9 grade high-strength bolts[C]//China Mechanical Engineering Association. Proceedings of the Second Cross-Strait Symposium on Engineering Materials. Chongqing: Published by Chongqing University Society, 2009: 1-8.
- [16] Darko Beg, Primož Moze. Investigation of high strength steel connections with several bolts in double shear[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(3): 333-347.
- [17] Ana M. Giro Coelho, Frans Bijlaard. High strength steel in buildings and civil engineering structures: design of connections[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(7): 2132-2150.
- [18] ANA M GIRO Coelho, FRANS S K Bijlaard. Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 63(5): 1228-1240.
- [19] 本格尼·S·塔拉那特. 高层建筑钢、混凝土、组合结构设计[M]. 罗福午译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 435-496.
- Bengueni S Taranat. Steel, concrete, and composite structure design for high-rise buildings[M]. LUO Fuwu Translated. Beijing: China Building Industry Press, 1999: 435-496.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [22] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- China Construction Science Research Institute. Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [23] 胡鹏天, 石永久, 王元清. 12.9级及以上高强度螺栓研发及其工程应用研究[C]//第十二届全国现代结构工程学术研讨会暨第二届全国索结构技术交流会论文集. 天津大学: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2012: 767-775.
- HU Pengtian, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Research and engineering application of grade 12.9 and above high-strength bolts[C]//The 12th national symposium on modern structural engineering and the 2nd national symposium on cable structure technology. Tianjin University: Academic committee of national symposium on modern structural engineering, 2012: 767-775.

(编辑 沈 波)