

高强螺栓对蜂窝梁-柱端板连接节点力学行为的影响

毕 然¹, 吴金国¹, 贾连光¹, 潘代琦², 王春刚¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中建二局第四建筑工程有限公司, 天津 300457)

摘 要 目的 研究不同等级高强螺栓的拉力和撬力分布规律以及对蜂窝梁-柱端板连接节点的破坏形式和滞回性能的影响, 为后续研究提供参考。方法 应用 ABAQUS 建立数值模型, 在与试验结果吻合的基础上, 分析螺栓等级、直径、预紧力和端板厚度等参数对蜂窝梁-柱端板连接节点性能的影响。结果 蜂窝梁可以起到转移塑性铰的作用, 减小连接处端板变形; 端板-梁翼腹板双铰耗能破坏的节点延性和耗能性能更好; 端板厚度相同时, 螺栓直径和预紧力对节点极限承载力的影响较小; 撬力随螺栓直径和预紧力的增加而减小, 随端板厚度增加而增大。结论 端板厚度增加有利于蜂窝孔的应力迁移作用, 使节点发生端板-梁翼腹板双塑性铰耗能破坏, 但撬力影响不可忽略; 随螺栓直径和预紧力的增大, 选用较厚端板的节点破坏模式由端板强铰向梁强铰转化。

关键词 蜂窝梁-柱端板连接; 高强螺栓; 双塑性铰; 撬力; 有限元

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Effect of High-strength Bolt on Mechanical Behavior of Castellated Beam-to-Column End Plate Connections

BI Ran¹, WU Jinguo¹, JIA Lianguang¹, PAN Daiqi², WANG Chungang¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

Abstract: This paper was proposed to study the failure mode, hysteretic performance, bolt tension and pry force of castellated beam-to-column end plate connections affected by high-strength bolts, and to provide reference for subsequent research. A numerical model was established by using ABAQUS, and the effects of bolt grade, diameter, preload and end plate thickness on the performance of castellated beam-to-column end plate connections were analyzed based on the results of test. The castellated beam can transfer the plastic hinge and reduce the deformation of the

收稿日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977422)

作者简介: 毕然(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事钢结构和组合结构等方面研究。

end plate. The ductility and energy dissipation performance of end plate-beam-wing web joints are better. When the end plate thickness is the same, the bolt diameter and preload have little influence on the ultimate bearing capacity of the connections. The prying force decreases with the increase of bolt diameter and preload, and increases with the increase of end plate thickness. The increase of the end plate thickness is beneficial to the stress migration of the opening, which causes the energy dissipation failure of the end plate-beam-wing web double plastic hinge at the joint point, but the influence of the prying force cannot be ignored. With the increase of bolt diameter and preload, the failure mode of joints with thicker end plates is transformed from strong hinge of end plate to strong hinge of beam.

Key words: castellated beam-to-column end plate connections; high-strength bolt; double plastic hinge; pry force; finite element method

采用蜂窝梁与端板连接相结合的形式,蜂窝孔的应力迁移作用可缓解端板连接处应力集中程度,避免端板与梁翼缘间焊缝在往复荷载作用下开裂而影响连接的滞回性能。影响蜂窝梁-柱端板连接节点破坏形式和滞回性能的因素较多,高强螺栓是端板连接中重要的传递部件,对高强螺栓的直径、等级和预紧力等对连接性能影响的研究有重要意义。

国内外学者针对高强螺栓对实腹梁-柱端板连接的影响展开研究:施刚等^[1]对端板连接进行试验和有限元研究,给出了螺栓的拉力变化规律和螺栓拉力的计算公式。郭兵等^[2]探讨了端板接触面挤压力的分布规律以及影响撬力的主要因素,给出螺栓的真实拉力值。石永久等^[3]研究指出,撬力随着翼缘板厚度的增加而减小,预紧力大小对撬力影响不大。刘秀丽^[4]研究得出,螺栓间距和端板厚度均对撬力产生影响,其中端板厚度的影响较大。张波、卜永红、连鸣等^[5-7]提出扩孔螺栓、外端板加强型以及可更换耗能梁段的新型端板连接形式,旨在满足强节点弱构件的抗震设计要求的同时,提高节点的延性和耗能能力、具备更高的承载力和更好的安全储备。R. Bai 等^[8]指出忽略撬力作用对连接件和螺栓的影响会导致连接延性不足此外,提出了考虑撬力作用的螺栓弯矩-转角计算公式。M. D'Aniello^[9]对不

同杆径、硬度的高强螺栓进行了单调和往复加载试验,指出 HV 和 HR 高强螺栓不同的力-位移响应会影响螺栓连接在单调和循环作用下的性能。M. Couchaux^[10]通过有限元软件得到端板连接撬力的分布情况,并给出螺栓拉力的推导公式。

综上,目前对高强螺栓连接的研究多集中在实腹梁-柱端板连接节点,对蜂窝梁-柱端板连接节点的研究较少。利用蜂窝梁不仅可以减轻结构自重、满足穿越管线降低建筑层高的要求^[11],还能够起到转移塑性铰保护节点域的作用。基于上述分析,笔者利用有限元方法,考虑螺栓等级、直径、预紧力和端板厚度等影响因素,分析了蜂窝梁-柱端板连接节点的破坏形式、滞回性能和螺栓拉力和撬力分布;研究表明:蜂窝梁可以起到转移塑性铰的作用,减小连接处端板变形,提高节点的延性和耗能性能;螺栓直径和预紧力对节点极限承载力的影响随端板厚度的增加而增大;撬力随螺栓直径和预拉力的增加而降低,随端板厚度增加而增加。

1 有限元模型

1.1 节点设计

有限元模型与试验模型尺寸相同,柱截面为 WH400 mm×300 mm×12 mm×16 mm,蜂窝梁截面尺寸为 WH400 mm×200 mm×8 mm×12 mm,端板尺寸为 WH580 mm×

300 mm × 12 mm,除高强螺栓外,其余材料均为 Q355 钢。在梁上加载点处设置加劲肋,在端板与实腹柱采用 10 个 10.9 级 M22 高强度摩擦型螺栓连接,按轴压比为 0.2 在柱顶施加集中力,在梁端施加竖向循环荷载。试件几何尺寸与构造见图 1。按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T2975—2018)^[12]的要求,实测钢材材料性能见表 1,螺栓的力学性能采用螺栓出厂前检验报告(见表 2)。

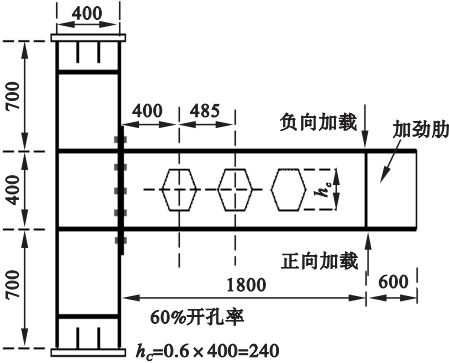


图 1 试件几何尺寸与构造

Fig. 1 The geometry sizes and details of specimens

表 1 钢材材料性能

Table 1 The material properties of steel

试件编号	厚度 t_s /	抗拉强度 /	屈服强度 /
	mm	MPa	MPa
钢板 - 1	8	523	370
钢板 - 2	12	498	350
钢板 - 3	16	491	349

表 2 高强螺栓材料性能

Table 2 The material properties of high-strength bolts

螺栓规格	螺栓级别	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa
M22	10.9 S	1 058	1 186
	8.8 S	760	980

1.2 模型建立

模型尺寸、边界条件与试验相同,端板与柱翼缘间、螺栓帽两端与端板和柱翼缘间、螺杆与孔壁间均设置了面-面接触对,连接抗滑移系数为 0.25。节点域柱腹板、端板和近柱端梁截面均采用了更为精细的网格划分,

网格尺寸为 15,螺栓网格尺寸为 5,其余位置网格尺寸为 30,并在端板厚度方向划分三个单元以保证足够的计算精度。采用空间三维缩减积分实体单元 C3D8R 来模拟^[13-14]。

钢材和高强螺栓的本构关系模型采用双折线模型。满足 Mises 屈服准则,强化准则采用的是随动强化准则,泊松比均取 0.3。采用梁端位移控制的加载方式,在梁端施加反对称循环荷载,加载制度和边界条件如图 2、图 3 所示。

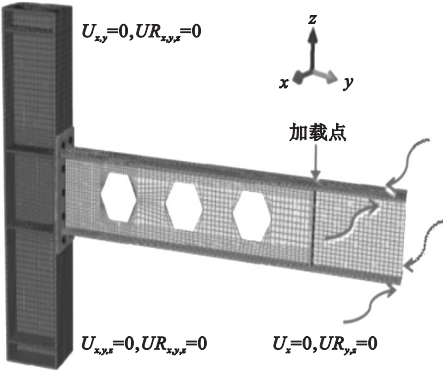


图 2 模型边界条件

Fig. 2 The boundary condition of model

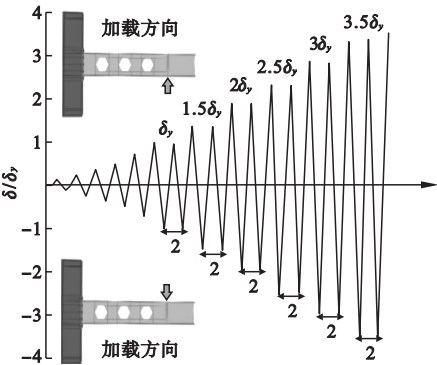


图 3 加载制度

Fig. 3 The loading system

1.3 有限元与试验结果对比

试验试件和有限元模型的破坏形态如图 4、图 5 所示。由于节点域柱腹板设置了加劲肋,约束了柱翼缘的弯曲变形,随弯矩不断增大,端板弯曲变形明显并与柱翼缘之间有较大缝隙。蜂窝孔处梁翼缘有轻微的弯曲变形,梁腹板发生鼓曲。从破坏形态上看,有限元模拟结果与试验吻合较好。

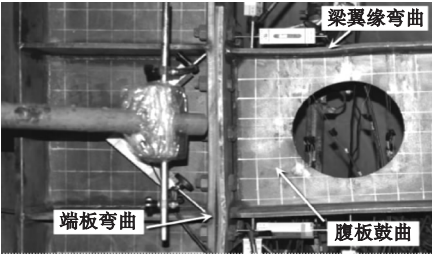


图4 试验破坏形态

Fig.4 The failure mode of test

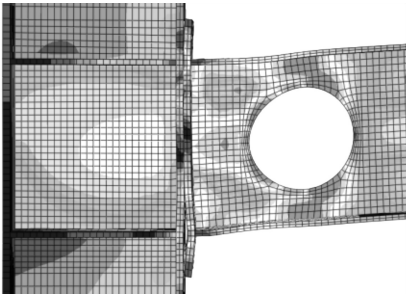


图5 有限元破坏形态

Fig.5 The failure mode of finite element model

有限元与试验的滞回曲线如图6所示。由图6可知,在弹性阶段二者曲线几乎重合,证明有限元模型能够准确的模拟节点的初始转动刚度。由于模型的几何尺寸、边界条件、加载制度都是理想状态,因此有限元模型的正负向极限承载力略高于试验,但误差均小于5%,二者滞回曲线的饱满程度和刚度退化也吻合较好,延性系数和耗能性能几乎相同,说明笔者建立的模型较为准确,可以进行

下一步参数化分析。

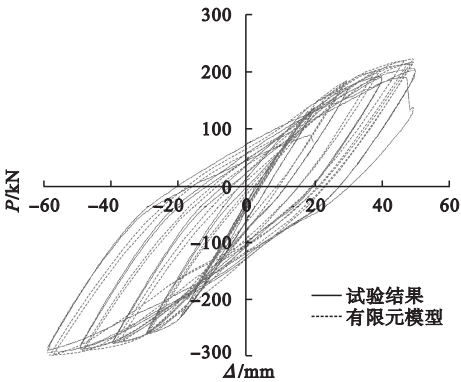


图6 滞回曲线对比

Fig.6 The comparison of hysteretic curves

2 有限元参数分析

2.1 模型设计

设计两组模型,研究端板厚度、螺栓级别、直径和预紧力对节点性能的影响,A组和16A组的端板厚度分别为12 mm和16 mm。两组模型分别设计直径为M16、M20、M22、M24和M27共五种,高强螺栓级别有8.8级和10.9级两种,BASE试件的螺栓直径和预紧力与试验相同。预拉力值采用《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82—2011)中螺栓规格和等级对应的预拉力设计值,各模型设计明细见表3,螺栓数量和排列方式符合强度设计要求。

表3 螺栓参数

Table 3 The bolt parameters

试件编号	螺栓规格	螺栓级别	预拉力/kN	孔径/mm	螺栓/个
A1(16A1)	M16	10.9 S	100	17	12
A2(16A2)	M20	8.8 S	125	21	10
A3(16A3)	M20	10.9 S	155	21	10
A4(16A4)	M22	8.8 S	150	23	10
BASE(16BASE)	M22	10.9 S	190	23	10
A5(16A5)	M24	8.8 S	175	25	8
A6(16A6)	M24	10.9 S	225	25	8
A7(16A7)	M27	8.8 S	230	28	8
A8(16A8)	M27	10.9 S	290	28	8

2.2 破坏模式分析

部分模型的破坏形态如图 7 所示。由图可知,端板厚度对节点的破坏形态起决定作用,A 组模型端板刚度较小,随梁端加载幅度的增加,节点最终在端板位置发生了不同程度的弯曲破坏,螺栓的直径和预紧力对破坏形式影响很小。对比可知,当端板厚度增加

至 16 mm 时,破坏形态发生改变,16A 组均发生了不同程度的端板-梁翼腹板双塑性铰耗能破坏,与 A 组相比,螺栓直径和预紧力对 16A 组的破坏形态影响更加明显。随螺栓直径和预紧力的增加,螺栓对端板弯曲变形的限制作用增强,随之端板变形减小而蜂窝孔处梁翼缘弯曲变形增大。

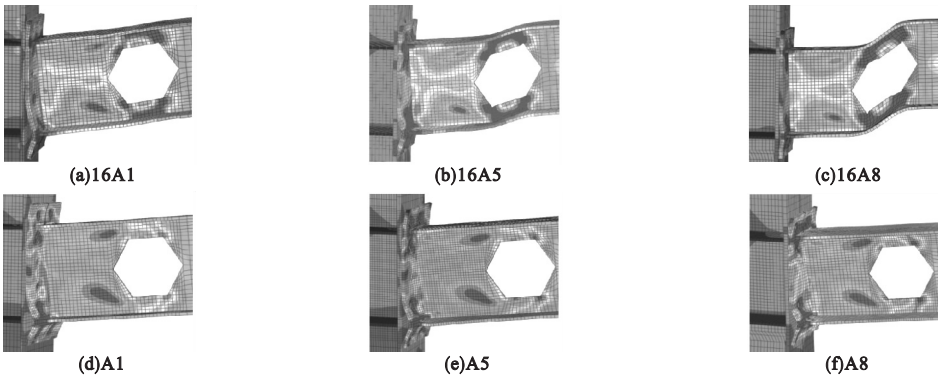


图 7 破坏模式

Fig. 7 The failure mode

2.3 单调和滞回性能分析

单调加载能够高效地判断节点的破坏模式并得到初始转动刚度和螺栓拉力变化规律。循环加载可以更准确的量化地震作用下节点的承载性能、延性和耗能指标。有限元计算结果如表 4 所示。由表可知,随螺栓直径和预紧力的增加,节点的初始转动刚度变化不大,极限弯矩略有提高,由螺栓伸长所引起的转角明显减小,相应的蜂窝梁开孔处塑性转角随之增大。此处对强铰、弱铰做如下规定:端板塑性铰引起的转角大于蜂窝孔引

起的转角,则判定为端板强铰,梁弱铰;蜂窝梁塑性铰引起的转角不足节点总转角的 1/10 则认为是端板单铰破坏。16A 组的破坏模式从端板强铰、梁弱铰向端板弱铰、梁强铰转变。延性系数差别不大,说明螺栓直径和预紧力对节点延性性能影响较小,但从耗能性能来看,端板弱铰、梁强铰的破坏模式耗能性能更好。对比表 4 和表 5 计算结果,前者在初始转动刚度、极限弯矩、延性系数和耗能方面均高于后者,从破坏模式比较可知,端板弱铰、梁强铰优于端板强铰、梁弱铰优于端板单铰。

表 4 16A 组主要计算结果

Table 4 The main calculation results of group 16A model

试件编号	初始转动刚度/ 10 ⁴ (N·m·rad ⁻¹)	极限弯矩/ (kN·m)	螺栓伸长引 起的转角/rad	蜂窝梁塑性铰 引起的转角/rad	破坏模式	延性 系数	耗能 系数
16A1	9.49	396	0.048	0.007	端板强铰,梁弱铰	3.37	1.02
16A2	9.04	402	0.042	0.014	端板强铰,梁弱铰	3.32	1.41
16A3	8.63	405	0.041	0.014	端板强铰,梁弱铰	3.44	1.66
16A4	8.49	403	0.037	0.019	端板强铰,梁弱铰	3.26	1.68
16A5	8.59	407	0.035	0.021	端板强铰,梁弱铰	3.34	1.77
16BASE	8.52	411	0.030	0.026	端板强铰,梁弱铰	3.31	1.93
16A6	8.64	415	0.027	0.028	端板弱铰,梁强铰	3.37	2.11
16A7	9.17	416	0.024	0.032	端板弱铰,梁强铰	3.31	2.19
16A8	9.19	420	0.019	0.037	端板弱铰,梁强铰	3.32	2.41

图8是部分模型滞回加载和单调加载荷载-位移对比曲线。由图可知,单调加载和滞回加载荷载位移曲线在弹性阶段几乎重合,当端板厚度为12 mm时,单调极限承载力略高于滞回承载力,端板厚度为16 mm时则相反;随螺栓直径和预紧力的增加,滞回曲线更加饱满,且端板越厚这种变化越明显。当端板较薄时,节点的性能主要由端板刚度控制,螺栓对节点性能影响较小。图9为各

试件单调加载荷载-位移曲线对比,由于各曲线变化幅度较小,不列出对应试件编号。对比图8、图9可知,节点极限承载力主要受端板厚度的影响,螺栓直径和预紧力对节点极限承载力的影响都非常有限,端板12 mm厚模型中极限承载力最大降低11.4%,端板16 mm厚模型中极限承载力最多仅降低5.7%。

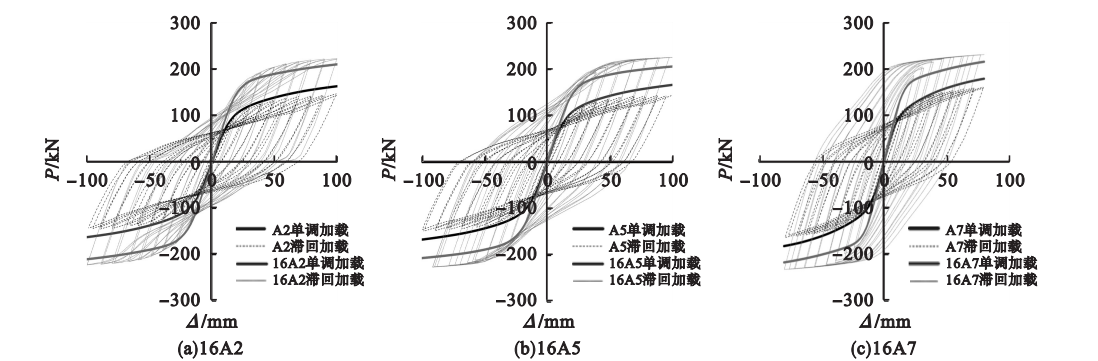


图8 荷载-位移曲线对比

Fig. 8 The comparison of load-displacement curves

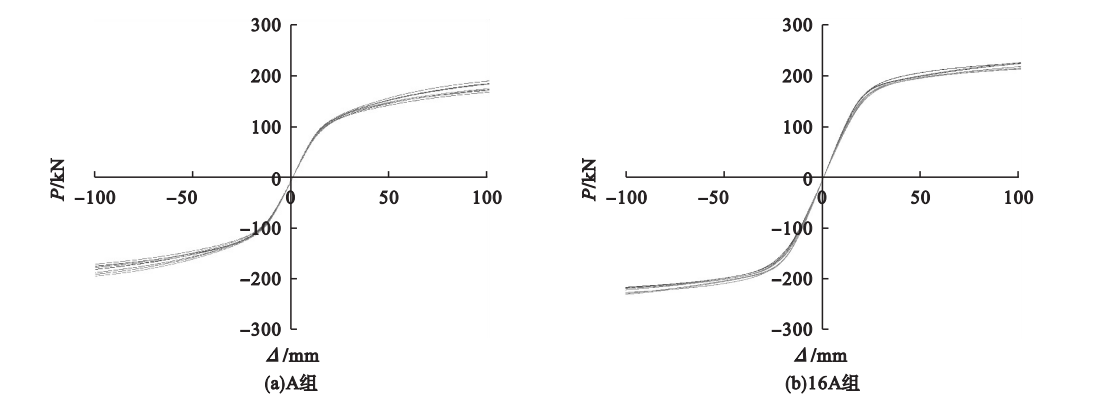


图9 单向加载荷载-位移曲线对比

Fig. 9 The comparison of load-displacement curves under unidirectional loading

2.4 螺栓拉力和撬力分析

从梁端施加竖向力到节点破坏,受拉区螺栓的受力状态可以分为三个阶段:①螺栓所在位置端板与柱翼缘未分离,随梁端荷载增大,由螺栓预紧力引起的端板与柱翼缘预压力逐渐减小为零,即图10所示各排螺栓所对应端板接触应力值随加载趋于0;②螺栓

所在位置端板和柱翼缘发生分离,直至螺栓受拉屈服;③螺栓屈服后,直至达到极限抗拉强度。以往研究中,在计算螺栓拉力时,仅考虑螺栓预紧力和梁端弯矩所引起的应变,实际上螺栓拉力受撬力影响很大,因此笔者通过有限元计算得到考虑撬力作用下螺栓各受力状态时的拉力,如表5所示。

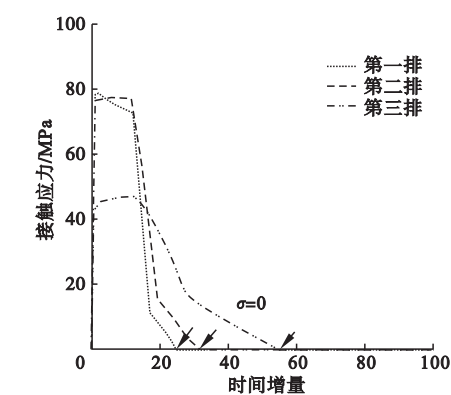


图 10 16A3 端板接触应力

Fig. 10 The contact stress of 16A3 at end plate

表 5 试件参数

Table 5 The specimen parameters

试件编号	$N_1/10^5\text{N}$	N_1/P	$N_2/10^5\text{N}$	N_2/P	$N_3/10^5\text{N}$	N_3/P	$N_4/10^5\text{N}$	N_4/P	$N_5/10^5\text{N}$	N_5/P
16A1	1.294	1.294	1.650	1.650	2.094	2.094	2.218	2.218	2.256	2.256
16A2	1.987	1.590	2.153	1.722	2.490	1.992	2.543	2.034	2.778	2.222
16A3	2.225	1.435	2.445	1.577	2.778	1.792	2.861	1.845	3.208	2.070
16A4	2.357	1.571	2.581	1.721	2.855	1.903	2.993	1.995	3.195	2.130
16BASE	2.704	1.423	2.981	1.569	3.221	1.695	3.478	1.830	3.657	1.925
16A5	2.423	1.385	2.879	1.645	3.299	1.885	3.593	2.053	3.687	2.107
16A6	2.900	1.289	3.301	1.467	3.615	1.607	3.849	1.711	4.101	1.823
16A7	3.380	1.469	3.583	1.557	3.794	1.649	4.064	1.767	4.309	1.873
16A8	3.751	1.293	3.940	1.359	4.038	1.392	4.405	1.519	4.551	1.569

注: N_1 为第一排螺栓处端板与柱翼缘接触压力为零时螺栓拉力实测值; N_2 为第二排螺栓处端板与柱翼缘接触压力为零时螺栓拉力实测值; N_3 为第一排螺栓屈服时螺栓拉力实测值; N_4 为第二排螺栓屈服时螺栓拉力实测值; N_5 为第一排螺栓达到受拉极限强度螺栓拉力实测值; P 为螺栓预紧力设计值。

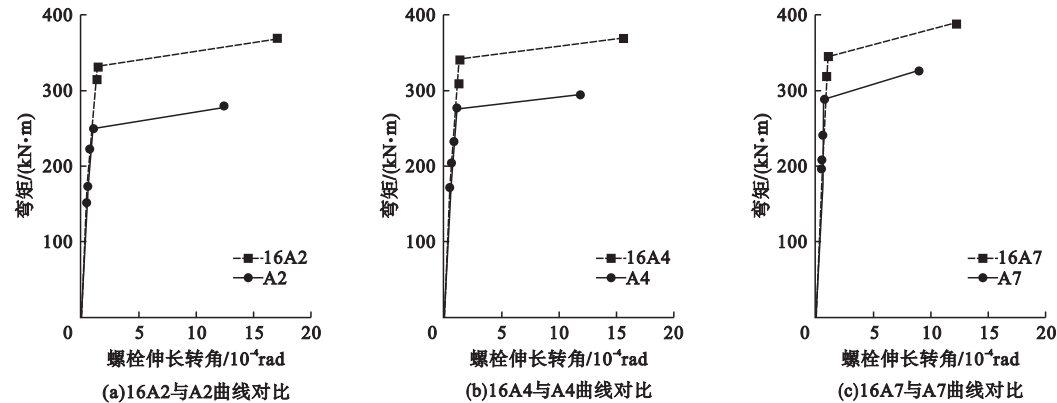


图 11 螺栓伸长转角 - 弯矩曲线

Fig. 11 The elongation angle-bending moment curve of bolt

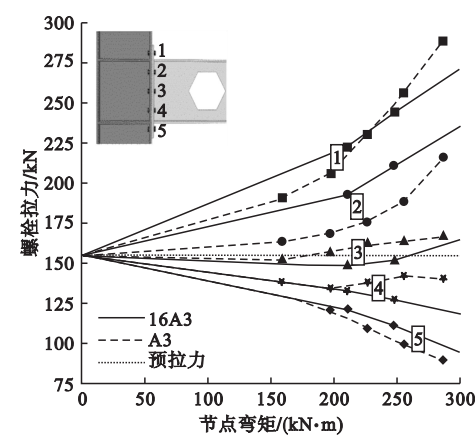
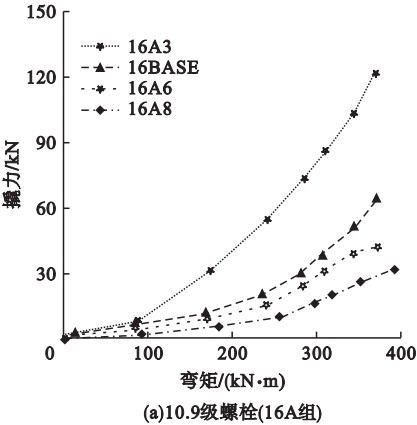


图 12 螺栓拉力 - 弯矩曲线

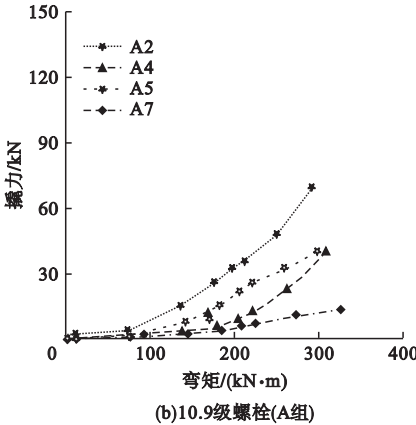
Fig. 12 The tension-bending moment curve of bolts 各不相同,在加载初期螺栓 3 的拉力几乎与预拉力相等。随弯矩的增大至一排螺栓达到抗拉极限强度时,此时螺栓 1 至螺栓 5 拉力值分别为 2.07、1.85、1.25、0.64、0.48 倍的

预拉力。与 16A3 相比,A3 各螺栓拉力值的变化幅度略小。第一排螺栓拉力始终大于第二排,当弯矩相同时,螺栓拉力随端板厚度增加而增加。

撬力随弯矩变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知,螺栓等级和预紧力对撬力有较大影响。16A 组的撬力变化规律相似,撬力随弯矩增大而增大,随螺栓直径和预拉力的增加,撬力降低。当弯矩均达到 300 kN·m 时,10.9 级螺栓的预拉力从 155 kN 至 290 kN 的撬力分别为 81 kN、37 kN、30 kN 和 17 kN,是预拉力的 52%、19%、13% 和 6%。A 组的撬力变化规律与 16A 组相似,但撬力总体有明显降低,说明端板厚度对撬力影响较大,弯矩相同时,撬力随端板厚度增加而增加。



(a)10.9级螺栓(16A组)



(b)10.9级螺栓(A组)

图 13 撬力随弯矩变化曲线

Fig. 13 The changing curve of pry force with bending moment

3 结 论

(1)采用蜂窝梁-柱端板连接的形式可以起到转移塑性铰的作用,减小连接处端板变形;当开孔参数相同时,节点可发生端板单铰、端板强铰梁弱铰以及端板弱铰梁强铰三种破坏形式,端板厚度、螺栓直径和预紧力对破坏模式都有较大影响。

(2)发生端板-梁翼腹板双塑性铰耗能破坏的节点延性和耗能性能更好;端板厚度

均为 16 mm 时,螺栓直径和预紧力对节点极限承载力的影响最高仅为 5.7%,发生端板-梁翼腹板双塑性铰耗能破坏,螺栓直径和预紧力仅影响双铰强弱关系;薄端板时,发生端板单铰破坏,螺栓直径和预紧力对破坏模式没有影响。

(3)螺栓等级和预紧力对撬力有较大影响,撬力随弯矩增大而增大,随螺栓直径和预拉力的增加,撬力降低;端板厚度对撬力影响较大,弯矩相同时,撬力随端板厚度增加而增加,最高值可达 1.05 倍的预紧力。

参考文献

- [1] 施刚,石永久,李少甫,等. 多层钢框架半刚性端板连接的循环荷载试验研究[J]. 建筑结构学报,2005(2):74-80.
(SHI Gang, SHI Yongjiu, LI Shaofu, et al. Cyclic tests of semirigid end-plate connections in multi-story steel frames [J]. Journal of architectural structure,2005(2):74-80.)
- [2] 郭兵. 外伸式端板螺栓连接中的撬力分析[J]. 建筑结构,2006,36(8):10-12.
(GUO Bing. Analysis of prying force in extended end-plate bolted connections [J]. Building structure,2006,36(8):10-12.)
- [3] 石永久,王萌,王元清,等. 钢框架端板连接半刚性节点受力性能分析[J]. 工程力学,2011,28(9):51-58.
(SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing, et al. Analysis on the behavior of steel frame end-plate connections [J]. Engineering mechanics,2011,28(9):51-58.)
- [4] 刘秀丽,王燕. 外伸端板连接构造参数变化对撬力的影响[J]. 世界地震工程,2015,31(3):148-155.
(LIU Xiuli, WANG Yan. Influence of extended end-plate connection construction parameters change on prying force in extended end plate [J]. World earthquake engineering,2015,31(3):148-155.)
- [5] 张波,胡淑军,熊进刚,等. 扩孔螺栓连接型消能梁段的力学模型及参数研究[J]. 世界地震工程,2019,35(3):73-82.
(ZHANG Bo, HU Shujun, XIONG Jingang, et al. Study of mechanical model and influential parameters for a new type of SSL-SSBC [J]. World earthquake engineering,2019,35(3):73-82.)
- [6] 卜永红,张冬芳,闫刘学,等. 外端板加强式节点抗震性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(8):65-70.
(BU Yonghong, ZHANG Dongfang, YAN Liuxue, et al. Experimental study on seismic behavior of outer end-plate reinforced connection [J]. Journal of huazhong university of science and technology(natural science edition),2019,47(8):65-70.)
- [7] 连鸣,程倩倩,苏明周,等. 带端板螺栓连接可更换耗能梁段的高强钢框筒结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(11):29-40.
(LIAN Ming, CHENG Qianqian, SU Mingzhou, et al. Experimental study on seismic performance of high-strength steel framed-tube structures with end-plate connected replaceable shear links [J]. Journal of architectural structure,2021,42(11):29-40.)
- [8] BAI R, CHAN S L, HAO J P. Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects [J]. Journal of constructional steel research,2015,113:13-27.
- [9] D'ANIELLO M, CASSIANO D, LANDOLFO R. Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable gr10.9 bolt assemblies [J]. Journal of constructional steel research,2016,124:77-90.
- [10] COUCHAUX M, HIAJ M, RYAN I, et al. Effect of contact on the elastic behaviour of tensile bolted connections [J]. Journal of constructional steel research,2017,133:459-474.
- [11] 贾连光,郎玉霄,毕然,等. 设置横向加劲肋的正六边形孔蜂窝钢梁滞回性能研究[J]. 工程力学,2019,36(11):168-182.
(JIA Lianguang, LANG Yuxiao, BI Ran, et al. Study on hysteretic behavior of regular hexagonal honeycomb steel beams with transverse stiffeners [J]. Engineering mechanics,2019,36(11):168-182.)
- [12] 冶金工业信息标准研究院. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社,2018.
(Institute of Metallurgical Industry Information Standards. Steel and steel products-location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: China Standards Press,2018.)
- [13] ELADLY M M. Behaviour of stainless steel beam-to-column bolted connections-part 1: simplified FE model [J]. Journal of constructional steel research,2020,164:1-9.
- [14] 贾连光,王瑞峰. 蜂窝式钢框架梁柱节点的试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,27(3):436-441.
(JIA Lianguang, WANG Ruifeng. Analysis on performance of the beam-column node of cellular steel frame [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2021,27(3):436-441.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)