

波纹腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接节点抗弯性能

范 昕^{1,2,3}, 李国强¹, 孙飞飞¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国建筑股份有限公司 技术中心, 北京 101300;
3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了一种波纹腹板 H 型钢梁与普通 H 型钢柱采用端板螺栓连接的节点构造。基于高强螺栓抗拉性能的刚性端板模型和 T 形连接件理论, 提出波纹腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接节点的设计方法。进行了 2 个波纹腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接节点的静力试验, 并使用商用有限元分析软件 ABAQUS 建立节点的有限元模型, 将设计弯矩下的高强螺栓最大拉力的试验结果与有限元计算结果进行对比, 证明了高强螺栓拉力计算公式的可靠性; 通过对比设计弯矩和有限元计算的端板屈服弯矩, 证明了端板厚度计算公式的合理性。

关键词: 波纹腹板 H 型钢; 端板连接节点; 静力性能; 试验研究; 有限元方法

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

Bending Behavior of Bolted End-plate Connections of H-beams with Corrugated Webs

FAN Xin^{1,2,3}, LI Guoqiang¹, SUN Feifei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China State Construction Technical Center, Beijing 101300, China; 3. College of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Bolted end-plate connection was proposed as beam-to-column rigid connection between H-beams with corrugated webs and common H-columns. Based on rigid end-plate model and T-stud method on tensile performance of high-strength bolts, a designing method for bolted end-plate connections of H-beams with corrugated webs was proposed. Then 2 static tests of beam-to-column bolted end-plate connections of beams with corrugated webs were conducted, and finite element analyses (FEA) of the specimens were carried out with the commercial software ABAQUS. The maximum tension in bolts under designing moment from test results and FE analysis were presented, which proved the designing method for high-strength bolts to be secure. A comparative study of designing

moment with the end-plate yielding moment proved the reliability of designing method for end-plate.

Key words: H-beams with corrugated webs; bolted end-plate connections; static behavior; experimental investigation; finite element analysis (FEA)

近几十年来, 钢结构以其优越性广泛应用于住宅、学校、医院、办公、娱乐等多高层建筑以及大空间结构^[1-2]。在钢结构设计中, 工程师们总是试图采用承载力效率较高的结构体系和构件。对于主要承受弯矩的 H 型钢梁, 提高抗弯承载力效率最好的途径为增大腹板高度, 减小腹板厚度。但薄腹板在剪力作用下很容易屈曲, 同时在运输及安装过程中其变形不易控制。为了提高其抗剪承载力和刚度, 一般都要增大腹板的厚度, 或是设置加劲肋等来提高腹板的稳定性。这样既增加了构件的用钢量, 又增加了施工工作量, 而且还造成应力集中, 使疲劳强度降低。波纹腹板 H 型钢将平腹板改为波纹腹板(卷板通过机械设备冷压成型), 从而能够以较薄的腹板厚度获得较大的平面外刚度及较高的抗剪切屈曲承载能力, 同时局部承压承载力和抗疲劳能力也有所提高, 因此波纹腹板钢梁具有较为显著的经济优势^[3], 较好的应用前景^[4]。

传统梁柱刚性连接多采用梁翼缘与柱焊接, 梁腹板与柱高强螺栓连接的方式。但波纹腹板 H 型钢梁由于腹板不平整, 不适宜采用传统的梁柱连接方式。为此, 本文提出波纹腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接方案。端板螺栓连接承载性能好, 构造简单, 施工速度快, 质量比较容易得到保证^[5], 将其用于波纹腹板钢梁的连接, 可以在保证承载力的前提下节约钢材, 节省施工时间。国内外针对波纹腹板钢构件的力学性能有了较为深入的研究^[4,6], 但有关波纹腹板

收稿日期: 2013-07-01

第一作者: 范 昕(1986—), 女, 工学博士, 主要研究方向为多高层钢结构。E-mail: fanxin@cecec.com

通讯作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构抗火。E-mail: gqli@tongji.edu.cn

H 型钢梁柱端板螺栓连接节点的受力性能还鲜见报道.

梁柱节点的力学性能将直接影响钢结构的安全性、可靠性与经济性^[7]. 本文建立波纹腹板 H 型钢梁柱螺栓端板连接节点的力学模型, 提出波纹腹板 H 型钢梁柱螺栓端板连接节点的高强螺栓和端板的设计方法, 进行了波纹腹板钢梁与 H 型钢柱的端板螺栓连接节点的试验, 并运用 ABAQUS 软件对试件进行有限元分析, 将试验结果与有限元分析结果和螺栓设计方法进行对比, 验证了波纹腹板 H 型钢梁柱连接节点的设计方法的可靠性.

1 理论模型

平腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接节点设计多采用刚性端板模型或 T 形连接件模型, 我国《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》^[8]对高强度螺栓的拉力分布采用刚性端板模型, 我国《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》^[9]对端板厚度的计算采用 T 形连接件模型.

1.1 螺栓受力模型

我国《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》^[8]假定螺栓受力线性分布且中和轴为螺栓群的形心轴, 通过降低螺栓抗拉设计强度来考虑撬力的不利影响. 如图 1 所示, 将端板视为无弯曲变形的刚性体, 在弯矩 M 作用下, 由于高强螺栓预拉力很大, 被连接构件的接触面一直保持紧密贴合. 中和轴在截面高度中央, 可以认为就在螺栓群形心轴线上. 因此, 受力最大的最上端螺栓拉力 N_1^t 可按下式计算:

$$N_1^t = My_1 / (m \sum y_i^2) \quad (1)$$

式中: y_1 为螺栓群中和轴至最大拉力螺栓的距离; y_i 为每列第 i 个螺栓至中和轴的距离; m 为螺栓列数.

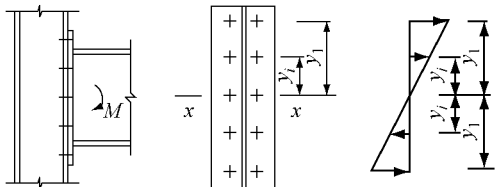


图 1 刚性端板模型
Fig.1 Rigid end-plate model

对单个高强螺栓进行受力分析时可借鉴 T 形连接的计算方法^[10], 如图 2 所示.

螺栓在外力作用前, 已经有预拉力 P , 它和构件与 T 形件翼缘接触面的挤压力 C 相平衡, 在外力

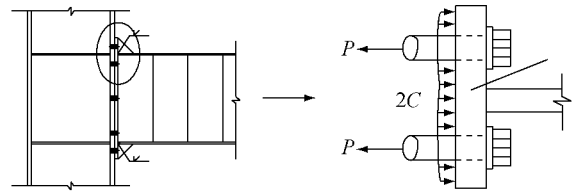


图 2 T 形连接件
Fig.2 T-stub model

N_t 作用后, 使螺栓拉力由 P 增加至 P_t , 而板件间的挤压力却由 C 减小为 C_t , 于是有

$$P_t = N_t + C_t \quad (2)$$

由变形协调关系可知

$$P_t = P + N_t / (A_p / A_b + 1) \quad (3)$$

式中: A_b 为螺栓杆截面面积; A_p 为构件挤压面面积.

通常螺栓杆周围的压缩面积比螺栓杆截面面积大得多, 取 $A_p / A_b = 10$, 为了避免端板式高强螺栓连接板件接触面间被拉开, 规范规定每个摩擦型高强螺栓的抗拉设计承载力不得大于 $0.8P$. 如果 N_t 取 $0.8P$, 代入式(3), 则 $P_t = 1.07P$. 这样, 螺栓在达到设计承载拉力之前, 拉力增量最多为 7%, 显然变化不大, 可以认为螺栓杆内原预拉力 P 基本不变, 即

$$N_t = My_1 / (m \sum y_i^2) \leq 0.8P \quad (4)$$

1.2 端板受力模型

端板连接的破坏形式取决于螺栓和端板之间的相对强弱关系, 以 T 形件为例, 单个螺栓布置的 T 形连接有 3 种可能的破坏机制(假定 T 形连接的腹板强度足够), 分别是翼缘在根部和螺栓位置处屈服(图 3b)、翼缘根部屈服同时螺栓失效(图 3c)、螺栓失效(图 3d)^[11].

我国《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》^[9]以图 3c 中的破坏模式(螺栓失效同时端板屈服)作为临界状态, 采用屈服线理论, 根据不同端板的支承条件, 对端板厚度的确定做出了规定.

如图 4 所示, 波纹腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接节点中, 端板的外伸部位边界条件为两边(直角)支承. 对于翼缘内侧的端板, 由于波纹腹板轴向刚度很小^[12], 可不考虑其对端板的支撑, 因此翼缘内侧的端板的边界条件可认为是两边(平行)支承.

则根据端板支撑条件, 不同部位的端板厚度可按下列公式确定^[11]:

外伸部位

$$t \geq \sqrt{\frac{6e_f e_w N_m}{[e_w b + 2e_f(e_f + e_w)]f}} \quad (5)$$

翼缘内侧

$$t \geq \sqrt{\frac{6e_f a N_t^m}{b(e_f + a)f}} \quad (6)$$

式(5),(6)中: N_m 为端板外伸部位高强螺栓的拉力设计值; N_t^m 为当端板外伸部位的高强螺栓拉力为设计值时,对应的翼缘内侧螺栓拉力值; e_w, e_f 分别为螺栓中心至腹板和翼缘板表面的距离; a 为端板内侧螺栓到螺栓群中心轴的距离; b 为端板的宽度; f 为端板钢材抗拉强度设计值。

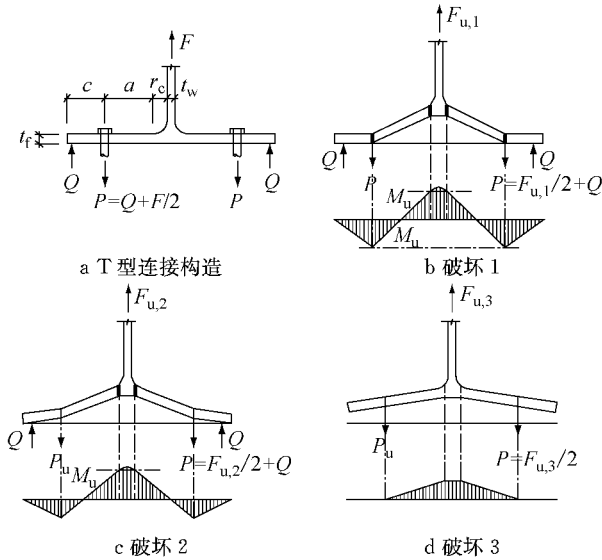


图 3 T 形连接的破坏机制

Fig.3 Failure modes of T-stub model

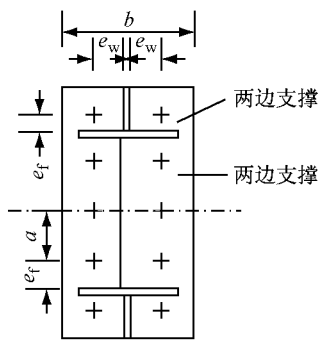


图 4 端板支撑条件

Fig.4 Boundary of end-plate

2 试验研究

为验证波纹腹板 H 型钢梁柱端板螺栓连接节点设计方法的可靠性,进行节点的静力试验,设计了 2 个相同的试件相互对照。

2.1 试件设计

试验中梁采用的波纹腹板 H 型钢规格为 CWA500-200×10,即梁翼缘宽 200 mm、厚 10 mm,

梁腹板高 500 mm、厚 2 mm,腹板采用的波形如图 5 所示。

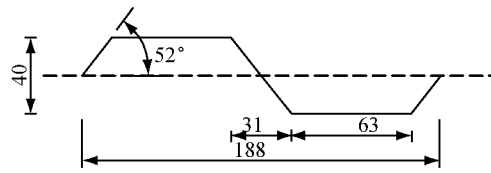
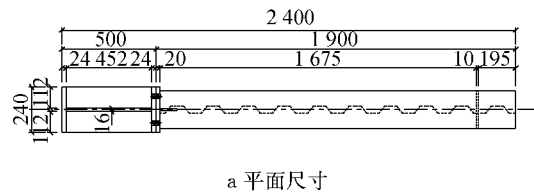


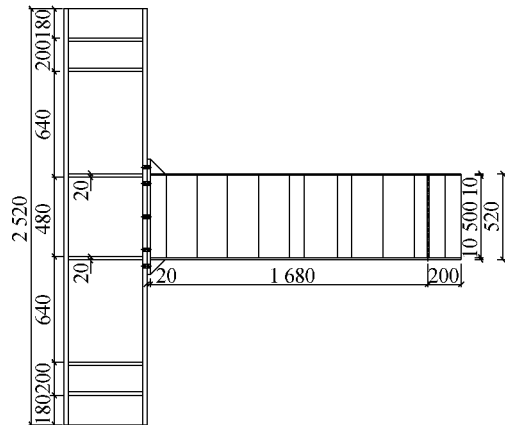
图 5 波纹腹板 H 型钢波形几何参数(单位:mm)

Fig.5 Geometric parameters of the web corrugation (unit: mm)

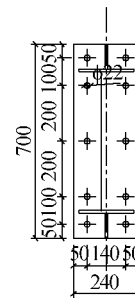
焊接 H 型钢柱截面为 500 mm×240 mm×16 mm×24 mm. 端板厚度为 20 mm,采用 10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓,节点的几何尺寸如图 6 所示.为研究腹板波折对节点受力性能的影响,波纹腹板 H 型钢梁与端板连接处腹板的断点选在波形的最高点,即两列螺栓并不关于波纹腹板对称,两列螺栓与波纹腹板的距离不同。



a 平面尺寸



b 立面尺寸



c 端板尺寸

图 6 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig.6 Dimension of the specimens(unit: mm)

节点梁翼缘与梁端板通过全熔透对接焊缝焊

接,波纹腹板与梁端板通过双面角焊缝焊接,梁端板与柱翼缘通过高强螺栓连接.除高强螺栓外,所有钢材均采用 Q235 钢.

2.2 材性试验

拉伸试件为矩形试样,按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T2975—1998)^[13]从同批钢材中切取,然后根据《金属拉伸试验试样》(GB6397—1986)^[14]的规定加工成材性试样,加载按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228—2002)^[15]的规定进行,测量了钢材的材料性质,包括屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和伸长率.由于试件 J1 与试件 J2 非同期制作,故按第 1 批次(用于试件 J1)和第 2 批次(用于试件 J2)分别取样测试.材性试验结果如表 1 所示.

表 1 材性试验结果

Tab.1 Material test results

试验批次	试件厚度/mm	取样位置	f_y /MPa	f_u /MPa	伸长率/%
1	2	波纹腹板	244	394	34.7
1	10	梁翼缘	297	413	35.7
1	20	端板	303	435	34.7
2	2	波纹腹板	320	457	38.5
2	10	梁翼缘	278	428	40.5
2	20	端板	281	434	35.5

2.3 加载方案

试验在同济大学结构实验室的试验台座上进行.试验装置主要包括水平反力架、龙门架、液压千斤顶、压力传感器、应变及位移测量系统等.

试验的加载装置如图 7 所示,H 型钢柱水平放置,波纹腹板 H 型钢梁垂直放置,柱两端用压梁通过锚杆固定在试验台座上,同时,柱两端水平顶紧,防止滑动.为防止梁发生整体失稳,在梁中段设置垫板,施加水平支撑.固定在水平反力架上的液压千斤顶通过压梁和销轴与波纹腹板 H 型钢梁连接,对试件施加水平荷载,直至试件破坏.试验现场布置如图 8 所示.

试验前根据《波纹腹板钢结构技术规程》(CECS 291:2011)^[16]对波纹腹板 H 型钢梁的受剪屈曲承载力进行计算,作为预估承载力.根据预估荷载制定加载制度为:预加载阶段以 10% 预估承载力为一级,共加载 3 级;正式加载阶段每 10 kN 为一级;进入塑性后,连续加载至构件屈曲或出现过大变形即视为破坏.实际控制时根据测点反馈,对分级加载上限进行调整.

2.4 测点布置及量测内容

量测装置主要包括位移计和应变片,用来测量

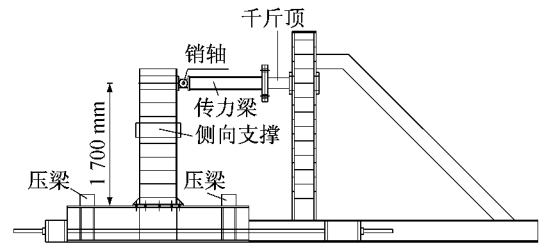


图 7 试验加载装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of the test setup

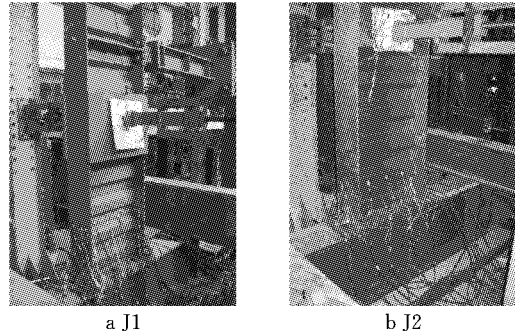


图 8 试验安装现场照片

Fig.8 Site of test setup

试件的位移及构件各截面的应力分布.在梁端支座处设置压力传感器,测量支座处的竖向压力.试验中监测了加载点和支座处的位移,其中,位移计 1,2 分别测量加载点和端板的水平位移,位移计 3,4 测量柱加劲肋两侧各 100 mm 处柱翼缘的竖向位移,以监测柱可能发生的刚性转动.位移计的测点布置见图 9a;试验中使用应变片量测了螺栓的拉应变,每个螺栓布置两个应变片,螺栓编号见图 9b.

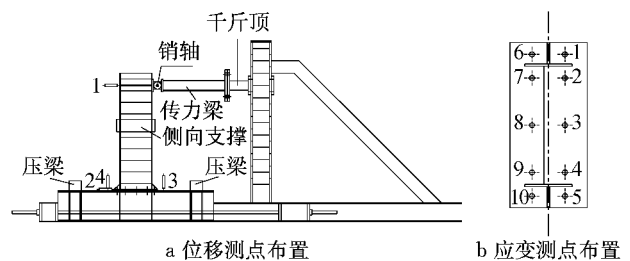


图 9 试件测点布置图

Fig.9 Arrangement of measuring points

每个螺栓在螺栓杆上对称地开两个槽,槽深度 1 mm,宽度 5 mm,长度保证应变片位置在每个试件的端板和柱翼缘的中间;在槽底放置应变片,表面用树脂覆盖加以保护;在螺栓头对应槽的位置各开一个直径 2 mm 的孔,用以引出导线,见图 10.在试件安装过程中,保证每个螺栓上的两个应变片连线垂直于梁翼缘,这样可以测出螺栓截面的最大和最小应变,每个螺栓取其两个应变片测量的平均值作为该螺栓轴向应变值,以计算螺栓拉力.

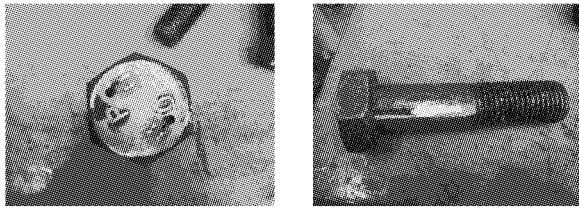


图10 螺栓应变片安装示意图

Fig.10 Measuring points on bolts

2.5 试验现象

2个试件的破坏模式均为波纹腹板H型钢梁腹板剪切屈曲,如图11所示.对于试件J1,当荷载达到约230 kN时,位移约为1.6 mm,波纹腹板屈服;当荷载达到约250 kN时,在加载点处出现较为明显的竖向位移,荷载达到290 kN时,试件产生巨响,波纹腹板发生剪切屈曲,承载力下降至峰值的60%左右,随即卸载.对于试件J2,当荷载达到250 kN左右时,位移约为2.5 mm,波纹腹板屈服,当荷载达到约270 kN时,在加载点处出现较为明显的竖向位移,荷载达到311 kN时,试件产生巨响,波纹腹板发生剪切屈曲,承载力下降至峰值的60%左右.加载过程中两试件均无肉眼可见的破坏,端板均未观察到肉眼可见的变形,波纹腹板与端板间的双面角焊缝无破坏.两个试件的加载过程基本相同,屈服荷载和极限荷载较为接近,破坏模式相同.



图11 试验破坏照片

Fig.11 After loading test

2.6 弯矩-转角曲线

试件弯矩-转角曲线如图12所示.试验结果如表2所示.其中,弯矩值为端板与柱翼缘界面处的外加弯矩值,转角为梁柱轴线夹角相对于无荷载时的改变值.加载时两试件的曲线在线性阶段基本一致,屈服荷载和峰值荷载不同的原因主要是两试件非同批次加工,材料性能指标存在差异.

3 有限元分析

为验证上述模型对波纹腹板H型钢梁柱螺栓

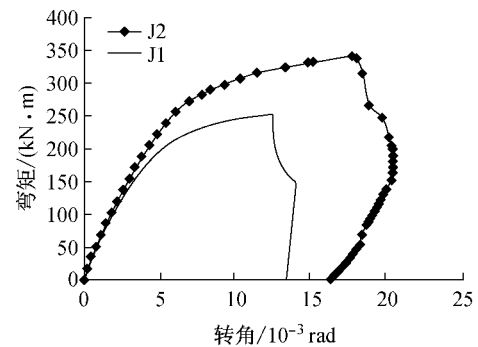


图12 试件弯矩-转角曲线

Fig.12 Rotation-moment curves

表2 试验结果

Tab.2 Test results

试件	屈服弯矩/ (kN·m)	极限弯矩/ (kN·m)	破坏转角/ 10^{-3} rad
J1	195	251	12.2
J2	265	340	17.6

端板连接节点的适用性,采用大型通用有限元计算软件ABAQUS/Standard对波纹腹板H型钢梁柱螺栓端板连接试件进行了建模、分析与计算.

3.1 材料特性

根据试验钢材的材性试验结果建立应力-应变关系,均为双折线模型.根据高强度螺栓制造商提供的产品质量保证书,试验中所用10.9级高强度螺栓M20的屈服强度 $f_{by} = 991$ MPa,抗拉强度 $f_{bu} = 1192$ MPa,伸长率为14.5%,断面收缩率为52%.所有材料的弹性模量均取 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比均取0.3,屈服准则均采用von Mises屈服准则.每个高强螺栓的初始预拉力根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)^[9]中规定选取,各接触面的抗滑移系数取为0.40.

3.2 单元划分与边界条件

在建立模型过程中,对于节点的所有组成部分,均采用实体单元C3D8(8节点六面体二次积分单元),划分单元结果如图13所示,螺栓单元划分如图14所示.

模型边界条件与后文中试验的边界条件一致,为柱两端截面的2个位移约束,并对梁施加面外约束,避免梁的整体失稳.

3.3 加载方法

对梁的设计加载点进行位移加载,加载过程中各子步的荷载通过读取加载点的反力获得.高强度螺栓均施加预拉力.梁端板与柱翼缘之间、螺栓头与梁端板之间、螺帽与柱翼缘之间、螺杆与螺孔之间均创建接触对.由于接触问题为大变形问题,在创建分

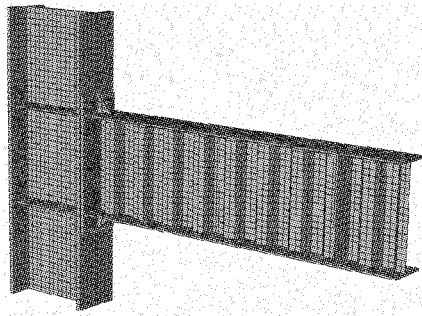


图 13 节点有限元分析模型

Fig.13 Finite element model of the connection

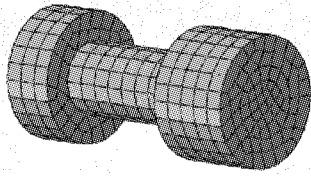


图 14 螺栓网格划分示意图

Fig.14 Meshing of the high-strength bolt

析步时设置几何非线性 Nlgeom 为 on.

4 结果对比

4.1 J2 弯矩-转角曲线

试件 J2 的弯矩-转角曲线与有限元计算所得的弯矩-转角曲线如图 15 所示. 由图 15 可知, 有限元计算得到的曲线在线性阶段与试验曲线较为吻合, 有限元模型能较为精确地模拟试件在弹性阶段的受力性能.

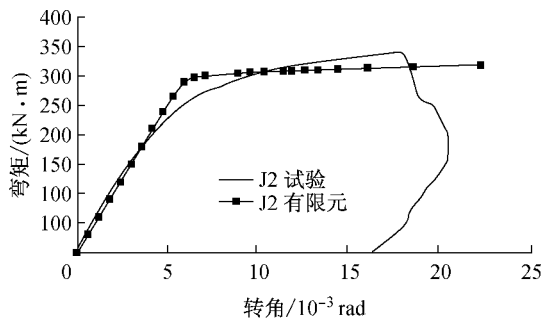


图 15 J2 弯矩-转角曲线的试验与有限元计算结果

Fig.15 Comparison of moment-rotation curves from test and finite element analysis results of J2

4.2 设计弯矩下高强螺栓拉力

由式(1)推导得

$$M = N_t (m \sum y_i^2) / y_1 \quad (7)$$

将 $N_t = 0.8P$ 代入式(7)中, 得到 J1, J2 的设计

弯矩 M 为 $174 \text{ kN} \cdot \text{m}$. 根据式(5)可得 6 号螺栓拉力的理论值. 设计弯矩下 6 号螺栓拉力的测试值、有限元计算值和理论值如表 3 所示.

表 3 6 号螺栓拉力的测试值和有限元计算值对比

Tab.3 Comparison of bolt tension from test and finite element analysis results of bolt 6

试件	设计弯矩/ (kN·m)	6 号螺栓拉力/kN		
		理论值	测试值	有限元计算值
J1	174	166	167.1	156.6
J2	174	166	163.9	156.4

2 个试件在设计弯矩下, 6 号螺栓拉力测试值和有限元计算值与理论值很接近. 有限元计算值略偏小的原因主要是有限元计算中端板与柱翼缘面贴合紧密, 螺栓杆周围的压缩面积与螺栓杆截面的面积之比比理论假设的 10 更大. 因此可认为在设计弯矩作用下, 高强螺栓拉力变化很小, 卸荷后不会出现松弛现象, 高强螺栓的设计方法安全.

4.3 端板屈服弯矩与节点设计弯矩对比

对试件 J2 的有限元分析中, 在外加弯矩为 $174 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (设计弯矩) 时, 端板的 Mises 应力分布如图 16a 所示. 由图 16a 可以看出, 端板未屈服. 继续加大外加弯矩, 至端板外伸部位和翼缘内侧部位屈服, 屈服弯矩如表 4 所示. 端板的 Mises 应力分布如图 16b 和图 16c 所示, 因此可知在螺栓设计弯矩作用下, 端板未屈服, 端板的屈服弯矩大于螺栓的设计弯矩. 端板厚度计算公式安全.

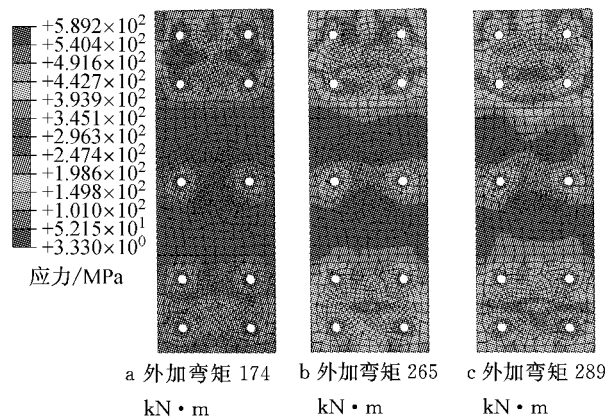


图 16 端板应力分布

Fig.16 Mises stress distribution of end-plate

表 4 端板屈服弯矩

位置	端板屈服弯矩/(kN·m)	
	理论值	有限元计算值
外伸部位	253	265
翼缘内侧	265	289

Tab.4 Yielding moments of end-plate

5 结论

(1) 本文提出波纹腹板H型钢梁柱螺栓端板连接节点的构造方法和设计方法,包括螺栓拉力计算方法和端板厚度计算方法。

(2) 设计并进行了2个波纹腹板钢梁与H型钢柱的螺栓端板连接节点的试验,运用ABAQUS对试验节点进行有限元建模和分析.通过对比设计弯矩下的最大螺栓拉力的测试值、有限元计算值和理论计算值,证明在设计弯矩作用下,高强螺栓拉力变化很小,螺栓拉力计算公式可靠。

(3) 通过对端板的屈服弯矩和节点的设计弯矩对比,可知在设计弯矩下端板未屈服,端板厚度计算公式合理。

参考文献:

- [1] 王元清,石永久,陈宏,等.现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J].建筑结构学报,2002,1:2.
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, CHEN Hong, *et al.* Contemporary lightweight steel structure and its application in China[J]. Journal of Building Structure, 2002, 1: 2.
- [2] 包世华,方鄂华.高层建筑结构设计[M].北京:清华大学出版社,1996.
BAO Shihua, FANG Ehua. Tall buildings structure design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [3] 张哲,李国强,孙飞飞.波纹腹板H型钢研究综述[J].建筑钢结构进展,2008,10(6):41.
ZHANG Zhe, LI Guoqiang, SUN Feifei. Summary of investigation of the H-beam with trapezoidally corrugated web [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(6): 41.
- [4] 张哲.波纹腹板H型钢及组合梁力学性能理论与试验研究[D].上海:同济大学,2009.
ZHANG Zhe. Theoretical and experimental research on the H-beams and the composite beams with corrugated webs[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [5] 郭兵.钢框架梁柱端板连接在循环荷载作用下的破坏机理及抗震设计对策[D].西安:西安建筑科技大学,2002.
GUO Bing. Collapse mechanism and design criterion of steel beam-to-column end-plate connections under cyclic load[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2002.
- [6] Abbas H H, Sause R, Driver R G. Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(8): 806.
- [7] Gerstle K H. Effect of connections on frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1988, 10: 241.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GJ82—91 钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程[S]. 北京:中国计划出版社,1992.
General Administration of Quality Supervision, Inspection, and Quarantine of the People's Republic of China. GJ82—91 Code for design, construction and acceptance of high strength bolting for steel structure[S]. Beijing: China Planning Press, 1992.
- [9] 中国工程建设标准化协会. CECS 102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 102: 2002 Technical specification for steel structures with corrugated webs [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [10] 陈绍蕃. 钢结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
CHEN Shaofan. Steel structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [11] 楼国彪. 钢结构高强度螺栓外伸式端板抗火性能研究[D]. 上海:同济大学,2005.
LOU Guobiao. Behavior and design of extended endplate moment connections with high-strength bolts in fire [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [12] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton R W. Bending strength of steel beams with corrugated webs[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(6): 772.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T2975—1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京:中国计划出版社,2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection, and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T2975—1998 Steel and steel products—location and preparations of test pieces for mechanical testing [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB6397—86 金属拉伸试验试样[S]. 北京:中国计划出版社,1986.
General Administration of Quality Supervision, Inspection, and Quarantine of the People's Republic of China. GB6397—86 Metallic materials—test pieces for tensile testing[S]. Beijing: China Planning Press, 1986.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T228—2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection, and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T228—2002 Metallic materials—tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.
- [16] 中国工程建设标准化协会. CECS 291:2011 波纹腹板钢结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 291: 2011 Technical specification for steel structures with corrugated webs [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.