

波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点受力性能

范昕^{1,2}, 李国强³, 周学军⁴, 孙飞飞³

(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. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 4. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 进行了 2 个波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点的静力试验, 分析了节点的静力承载能力, 研究了节点各截面的内力分布, 并将各截面的内力分布试验值与理论公式的计算结果进行对比, 验证了理论公式在计算各截面内力分布时的可靠性。提出波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点各部件的承载力设计公式, 通过将节点各部件的设计承载力与试验承载力的结果进行对比, 验证了波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点设计公式的有效性。

关键词: 波纹腹板 H 型钢; 主次梁铰接节点; 静力性能; 试验研究

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

Static Behavior of Pinned Connections Between Primary and Secondary H-beams with Corrugated Webs

FAN Xin^{1,2}, LI Guoqiang³, ZHOU Xuejun⁴, SUN Feifei³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China State Construction Technical Centre, Beijing 101300, China; 3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. College of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Two static tests of pinned connections between primary and secondary H-beams with corrugated webs were conducted. The test results were compared with the results calculated from theoretical formulas, which validated the theoretical formulas. Design formulas for each part of the pinned connections between primary and secondary H-beams with corrugated webs were proposed. The design carrying capacity of each part calculated by the design formulas were compared with the experimental results, which proved the reliability of design formulas for the pinned connections between primary and secondary H-beams with corrugated

webs.

Key words: H-beams with corrugated webs; pinned connections between primary and secondary H-beams; static behavior; experimental investigation

近年来, 波纹腹板 H 型钢以其较高的抗剪屈曲能力和较好的经济性在钢结构领域得到了广泛的应用^[1-2]。国内外对波纹腹板 H 型钢构件的力学性能已进行了较为深入的研究^[3-4], 但对波纹腹板 H 型钢梁连接节点的受力性能的研究还鲜见报道。连接节点的力学性能对于钢结构非常重要, 直接影响钢结构整体的安全性、可靠性与经济性^[5]。因此针对波纹腹板 H 型钢这种新型构件的连接节点进行受力性能研究十分必要。

本文对波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点进行了试验研究, 并将各截面的内力分布试验值与理论公式的计算结果进行对比, 验证了理论公式在计算各截面内力分布时的可靠性。提出波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点各部件的实用设计公式, 通过将节点各部件的设计承载力与试验承载力的结果进行对比, 验证了波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点设计公式的安全性。

1 试验概况

1.1 试件设计

根据次梁的抗剪承载力进行节点的设计^[6], 设计相同的 2 个节点相互对照, 主梁采用的波纹腹板 H 型钢的型号为 CWA800-300×10, 即梁翼缘宽 300 mm、厚 10 mm, 梁腹板高 800 mm、厚 2 mm, 次梁采用的波纹腹板 H 型钢的型号为 CWA400-200×10,

收稿日期: 2013-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(51008284)

第一作者: 范昕(1986—), 女, 工学博士, 主要研究方向为钢结构连接节点。E-mail: fanxin19861025@163.com

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

即梁翼缘宽 200 mm、厚 10 mm,梁腹板高 400 mm、厚 2 mm. 主次梁腹板均采用如图 1 所示的波形.

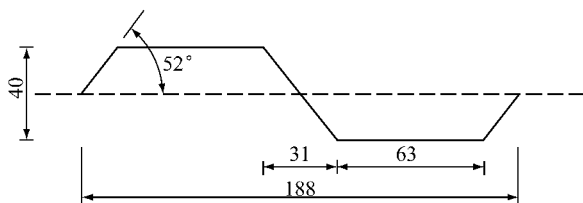


图1 波纹腹板H型钢波形几何参数(单位:mm)

Fig.1 Geometric parameters of the H-shape web corrugation (unit:mm)

由于波纹腹板H型钢腹板较薄且为波折形状,故不能直接采用传统的主次梁铰接节点的构造方法.本文参照传统的H型钢主次梁连接节点构造,在波纹腹板H型钢次梁端焊接端板,端板上焊接次梁连接板,借助高强螺栓和贴板将次梁连接板与主梁加劲肋连接,主次梁翼缘之间未作连接,从而实现主次梁的铰接.节点的几何尺寸如图2所示.次梁翼缘与梁端板通过全熔透对接焊缝焊接,波纹腹板与次梁端板通过双面角焊缝焊接,次梁连接板通过双面角焊缝与梁端板焊接,主梁加劲肋和柱翼缘间也通过双面角焊缝焊接,使用2片贴板将主梁加劲肋与次梁连接板通过10.9级M16高强螺栓连接.除高强螺栓外,所有钢材均采用Q235B钢.

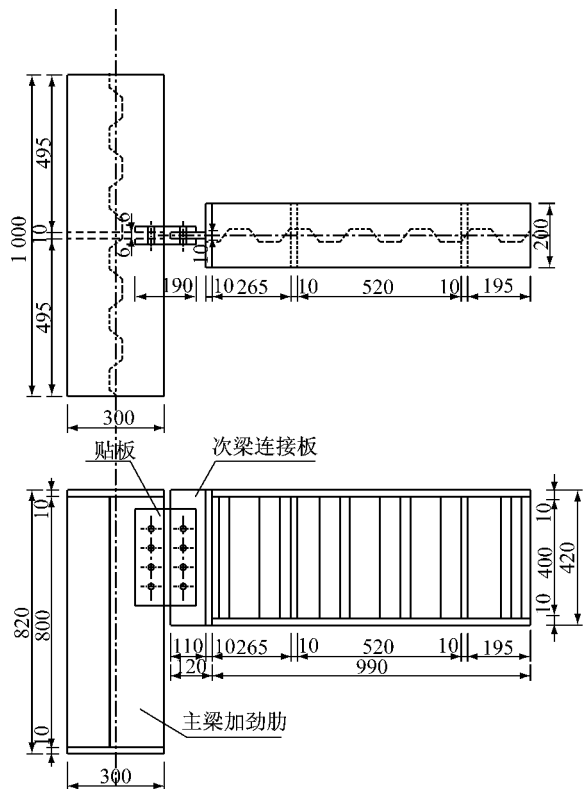


图2 节点几何尺寸示意图(单位:mm)

Fig.2 Dimension of the specimens (unit:mm)

1.2 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)^[7]从同批钢材中切取,然后根据《金属拉伸试验试样》(GB6397—86)^[8]的规定加工成材性试件,加载按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228—2002)^[9]的规定进行,测量了钢材的材料性质,包括屈服强度 σ_y 、抗拉强度 σ_u 和伸长率.材性试验结果如表1所示.

表1 材性试验结果

Tab.1 Material test results

试件厚度/mm	σ_y /MPa	σ_u /MPa	伸长率/%
2	320	457	38.5
6	292	426	40.5
10	278	428	40.5

1.3 加载方案

试验在同济大学结构试验室的试验台座上进行.试验装置主要包括龙门架、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3所示,通过两端有锚杆的压梁将主梁固定在试验台座上,以限制主梁梁端的竖向位移和扭转.通过固定在龙门架上的液压千斤顶对次梁施加竖向荷载,从而在次梁中产生剪力.试验现场布置如图4所示.

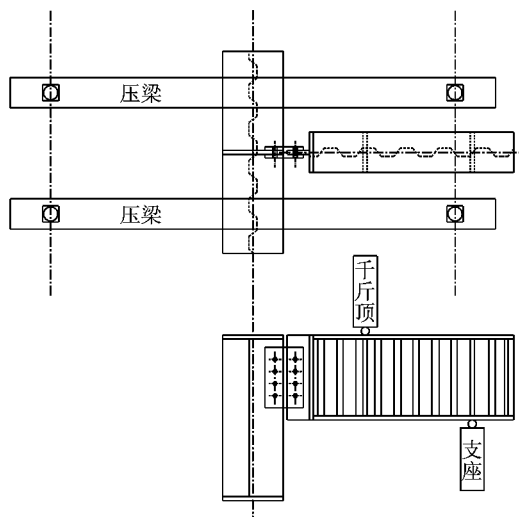


图3 试验加载装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the test setup

试验前根据《波纹腹板钢结构技术规程》(CECS 291:2011)^[10]对次梁按H型钢梁的剪切屈曲承载力进行计算,将计算结果作为预估荷载.根据预估荷载制定加载制度为:预加载阶段以10%预估荷载为一级,共加载三级;正式加载阶段每10kN为一级,两

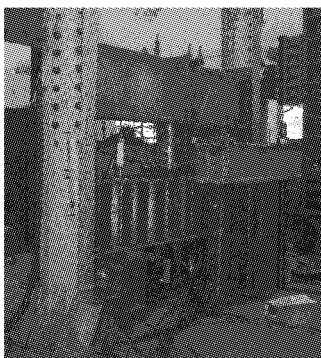


图4 试验安装现场照片

Fig.4 Site of test setup

级之间连续加载;进入塑性后,连续加载至破坏.实际控制时根据测点反馈,对分级加载上限进行调整.

1.4 测点布置及测量内容

测量装置主要包括位移计和应变片,用来测量节点的位移及构件各截面的应力分布状况. 试验中监测了加载点和支座处的位移,其中,位移计 a, b, c 分别测量加载点和支座的竖向位移,位移计 d 测量支座的水平位移. 位移计的测点布置见图 5a; 试验中使用直角应变花测量了试件各截面的应变分布,应变测点布置见图 5b.

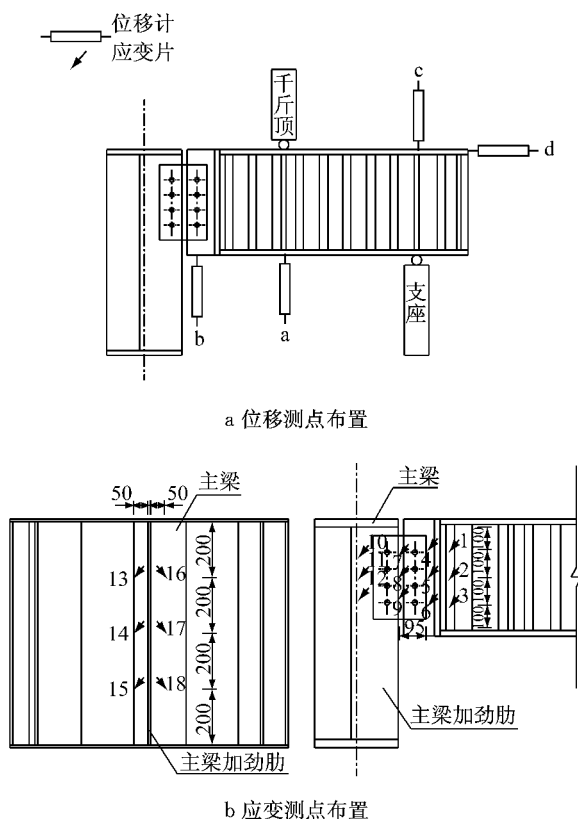


图5 测点布置图(单位:mm)

Fig.5 Arrangement of measuring points(unit:mm)

2 试验结果及与设计公式的对比

2.1 试验现象

2个节点的破坏模式均为波纹腹板 H 型钢次梁腹板剪切屈曲. 节点 1 的外加荷载达到 270 kN 左右时, 波纹腹板屈服; 荷载达到 326 kN 时, 次梁的波纹腹板发生剪切屈曲, 翼缘也有明显变形, 承载力下降至 290 kN 左右; 继续缓慢加载, 位移增长速度加快, 当位移达到 65 mm 左右时, 试件不能继续承载, 破坏状态如图 6 所示. 节点 2 的外加荷载达到 265 kN 左右时, 波纹腹板屈服; 荷载达到 334 kN 时, 次梁的波纹腹板发生剪切屈曲, 翼缘也有明显变形, 承载力下降至 300 kN 左右; 继续缓慢加载, 位移增长速度加快, 当位移达到 42 mm 左右时, 试件不能继续承载, 破坏状态如图 7 所示. 加载过程中除波纹腹板外 2 个节点均无肉眼可见的破坏, 端板未观察到肉眼可见的变形, 梁连接板和 2 片贴板无肉眼可见的破坏, 次梁的波纹腹板与端板间的双面角焊缝无破坏.

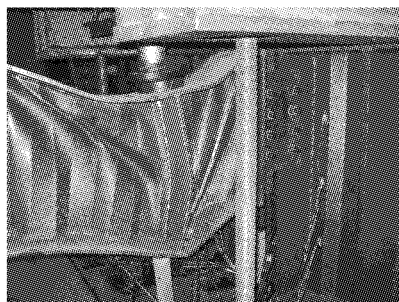


图 6 节点 1 试验照片

Fig.6 Joint 1 after loading test

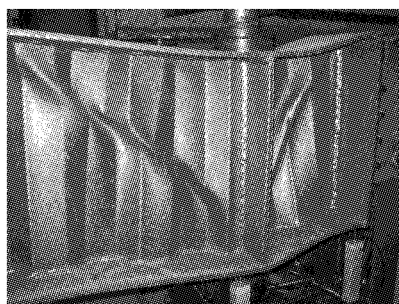


图 7 节点 2 试验照片

Fig.7 Joint 2 after loading test

2.2 荷载位移曲线与承载力

2个节点的荷载位移曲线如图8所示,试件的屈服荷载、极限荷载和破坏位移如表2所示.由图8可见,相对于节点2,节点1的延性较差,其原因可能是节点2次梁的波纹腹板加工时存在一定的初始

缺陷。

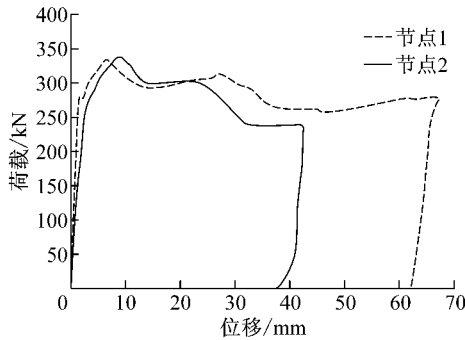


图8 节点荷载位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves from experiments of joints

表2 试验结果

Tab.2 Test results

节点	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏位移/mm
1	270	326	67
2	265	334	42

2.3 各截面剪应力分布

试验中应变测点均使用直角应变花,每个测点得到 ϵ_{0° , ϵ_{45° 和 ϵ_{90° 3 个应变值,根据平面应变状态^[11]分析,有

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ} \quad (1)$$

故剪应变可通过测得的 3 个应变值求得,进而得到各点的剪应力实测值。

2.3.1 波纹腹板与端板间角焊缝邻近截面剪应力分布

图 9,10 所示曲线为波纹腹板与端板间角焊缝邻近截面的 1,2,3 号点的剪应力在线性阶段的分布情况。

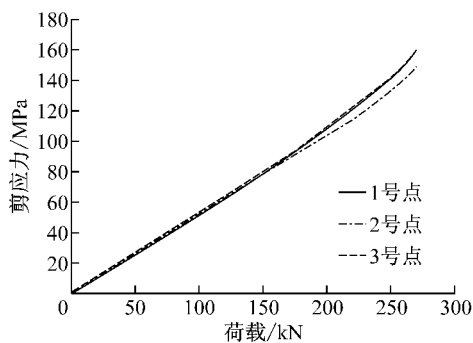


图9 节点1梁腹板剪应力分布

Fig.9 Shear stress contribution of the web of Joint 1

由图 9,10 可见,2 个节点的位于波纹腹板与端板间角焊缝邻近截面的 1 号点、2 号点、3 号点剪应

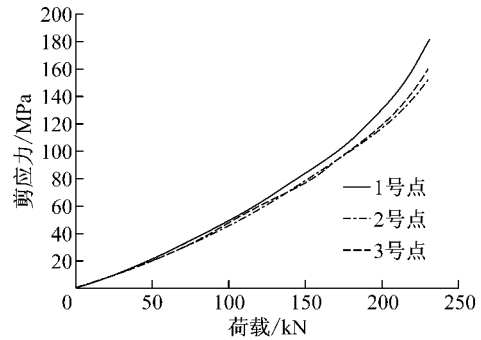


图10 节点2梁腹板剪应力分布

Fig.10 Shear stress contribution of the web of Joint 2

变基本一致,这证明波纹腹板与端板间角焊缝邻近截面的剪力沿截面均匀分布。

计算 3 个测点的剪应变平均值,可得截面的平均剪应力。

波纹腹板 H 型钢梁的截面剪力主要由波纹腹板承担,且剪力沿波纹腹板近似均匀分布,则梁截面的剪应力设计值为^[2]

$$\tau = \frac{V}{h_w t_w} \quad (2)$$

式中: V 为次梁截面设计剪力; h_w , t_w 分别为腹板的高度和厚度。

图 11,12 分别为节点 1,2 的次梁腹板平均剪应力的理论值与试验值曲线。由图 11,12 可见,在弹性阶段,焊缝邻近截面腹板的平均剪应力试验值与理论值很接近,最大相差约 10%,因此可以认为在波纹腹板钢梁与端板的连接中,波纹腹板与端板连接的单面角焊缝承受全部剪力,剪力沿截面均匀分布。

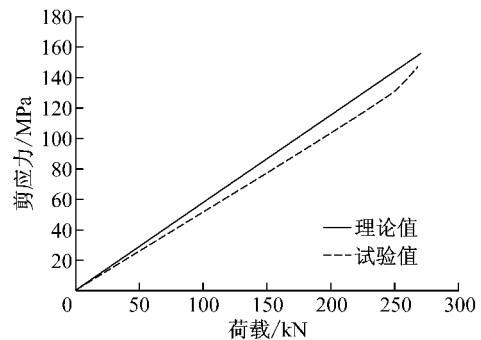


图11 节点1角焊缝附近腹板平均剪应力

Fig.11 Average shear stress near the fillet weld of Joint 1

2.3.2 次梁连接板与端板焊缝邻近截面剪应力分布

试验中,在 2 个节点次梁连接板与端板连接角焊缝附近布置了 3 个测点来测量梁连接板的剪力分

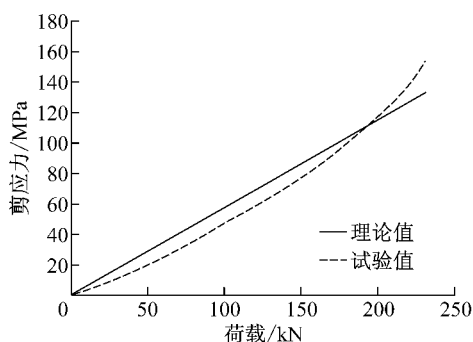


图 12 节点 2 角焊缝附近腹板平均剪应力
Fig.12 Average shear stress near the fillet weld of Joint 2

布,将剪应力随剪力变化的曲线进行对比,如图 13, 14 所示。

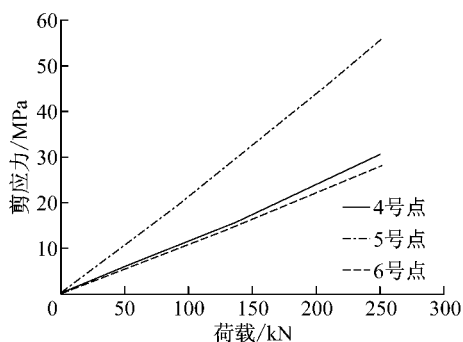


图 13 节点 1 次梁连接板剪应力分布
Fig.13 Shear stress contribution of secondary-beam plate of Joint 1

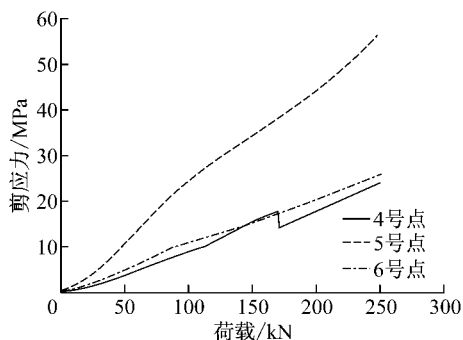


图 14 节点 2 次梁连接板剪应力分布
Fig.14 Shear stress contribution of secondary-beam plate of Joint 2

由图 13,14 可见,5 号点剪应力约为 4,6 号点剪应力的 2 倍,取 5 号点作为计算参考点,剪应力理论值计算公式为

$$\tau = \frac{VS_1}{I_1 t_1} \quad (3)$$

式中: V 为次梁连接板截面设计剪力; I_1 , t_1 , S_1 分别为次梁连接板的截面主轴惯性矩、厚度和截面中点

面积矩。

图 15,16 分别为节点 1,2 的 5 号点剪应力的理论值与试验值曲线。由图 15,16 可知,当截面剪力小于 250 kN 时,连接板的应变基本处于线弹性阶段,试验值均与理论值符合较好,说明用理论公式计算可以准确预测这种节点焊缝处的剪应力。

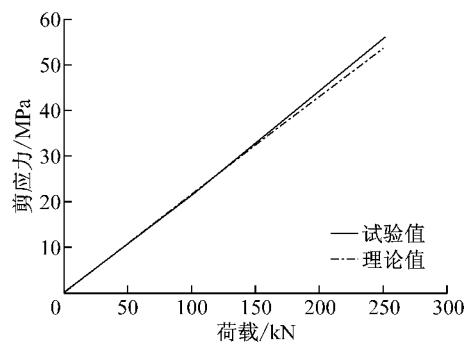


图 15 节点 1 梁连接板 5 号点剪应力
Fig.15 Shear stress of Point 5 of Joint 1

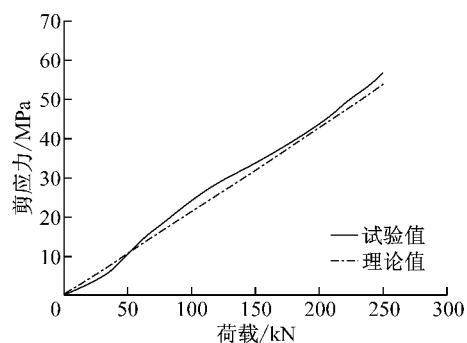


图 16 节点 2 梁连接板 5 号点剪应力
Fig.16 Shear stress of Point 5 of Joint 2

2.3.3 贴板截面剪应力分布

在贴板上布置 3 个应变测点,以考察贴片截面的剪应力分布。节点 1 和节点 2 的 7,8 与 9 号点的剪应力分布曲线如图 17,18 所示。

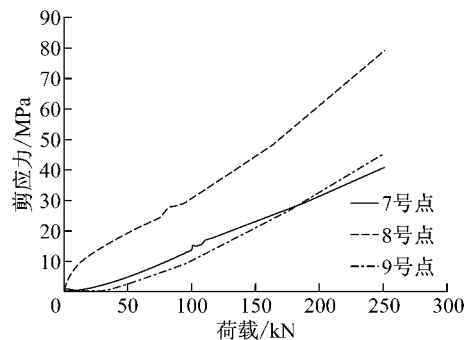


图 17 节点 1 贴板剪应力分布
Fig.17 Shear stress contribution of connecting plate of Joint 1

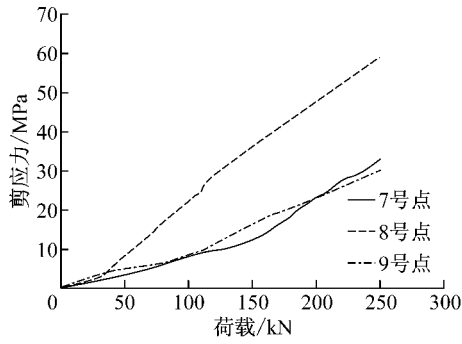


图18 节点2贴板剪应力分布

Fig.18 Shear stress contribution of connecting plate of Joint 2

由图17,18可见,8号点剪应力约为7,9号点剪应力的2倍,取8号点作为计算参考点,剪应力理论值计算公式为

$$\tau = \frac{VS_t}{I_t t_t} \quad (4)$$

式中: V 为贴板截面设计剪力; I_t , t_t , S_t 分别为贴板的惯性矩、厚度和面积矩。

图19,20分别为节点1,2的8号点剪应力的理论值与试验值曲线。由图19,20可见,当截面剪力小于250 kN时,贴板的应变基本处于线弹性阶段,试验值均与理论值符合较好。

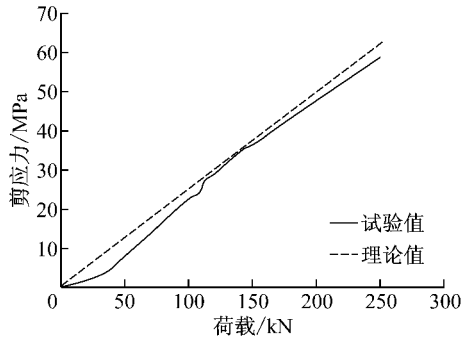


图19 节点1贴板8号点剪应力

Fig.19 Shear stress of Point 8 of Joint 1

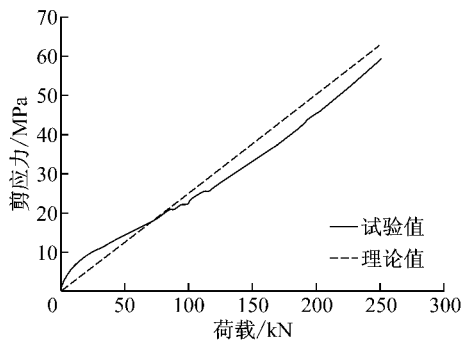


图20 节点2贴板8号点剪应力

Fig.20 Shear stress of Point 8 of Joint 2

2.3.4 主梁加劲肋剪应力分布

在节点1的主梁加劲肋靠近螺栓孔区域布置3个应变测点,以考察加劲肋靠近螺栓孔附近的应力分布。节点1的10,11与12号点的剪应力曲线如图21所示。可以看出,此区域的剪应力较小,并无应力集中现象,这主要是由于主梁加劲肋较高较厚,因此按照构造设置主梁加劲肋即可满足次梁的传力需求,无需计算。

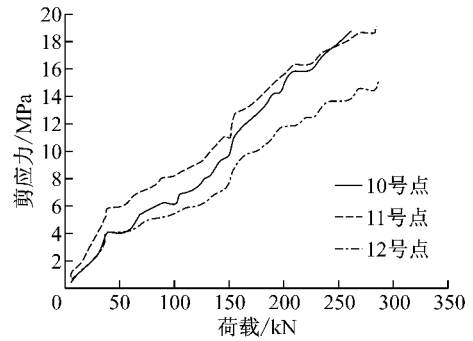


图21 节点1主梁加劲肋剪应力分布

Fig.21 Shear stress contribution of primary beam stiffener of Joint 1

2.3.5 主梁截面剪应力分布

2个节点的主梁加劲肋两侧的波纹腹板上均匀布置3个应变测点,以考察次梁剪力传递到主梁之后主梁波纹腹板的应力分布。2个节点的13,14,15,16,17与18号点的剪应变曲线分别如图22,图23所示。可以看出,沿主梁腹板高度方向剪应变基本上均匀分布。

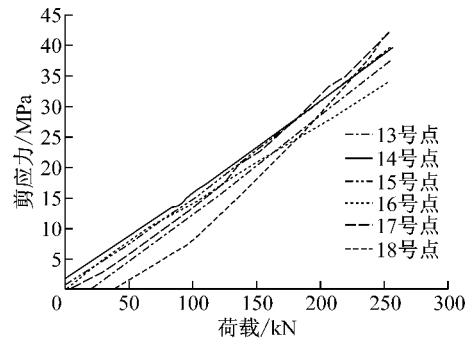


图22 节点1主梁腹板剪应力分布

Fig.22 Shear stress contribution of primary beam web of Joint 1

取15号点作为计算参考点,剪应力理论值计算公式为

$$\tau = \frac{V}{S} \quad (5)$$

式中: V 为主梁截面设计剪力; S 为主梁腹板的截面积。

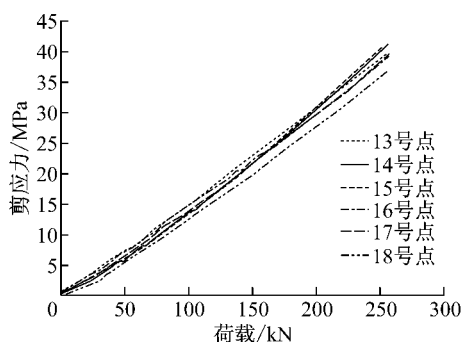


图 23 节点 2 主梁腹板剪应力分布

Fig. 23 Shear stress contribution of primary beam web of Joint 2

图 24, 25 分别为节点 1, 2 的 8 号点剪应力的理论值与试验值曲线. 由图 24, 25 可知, 当截面剪力小于 250 kN 时, 加劲肋附近的主梁波纹腹板的应变基本处于线弹性阶段, 试验值均与理论值符合较好.

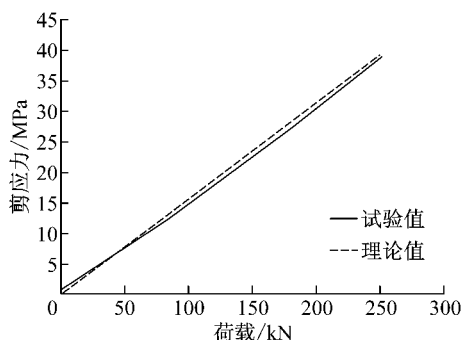


图 24 节点 1 主梁腹板 15 号点剪应力

Fig. 24 Shear stress of Point 15 of Joint 1

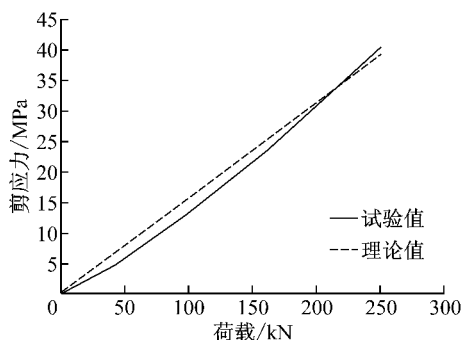


图 25 节点 2 主梁腹板 15 号点剪应力

Fig. 25 Shear stress of Point 15 of Joint 2

3 承载力设计公式

基于试验结果和理论公式, 提出波纹腹板 H 型钢主次梁铰接节点各部件的承载力设计公式.

3.1 次梁连接板承载力

次梁连接板承担次梁传递的剪力, 并通过贴板

和高强螺栓将剪力传递给主梁加劲肋, 次梁连接板的抗剪承载力应按式验算:

$$V = \frac{f_v I_1 t_1}{S_1} \quad (6)$$

式中: V 为次梁连接板截面设计剪力; f_v 为次梁连接板的抗剪强度; I_1, t_1, S_1 分别为次梁连接板的截面主轴惯性矩、厚度和截面中点面积矩.

根据式(6), 计算可得试件的次梁连接板抗剪承载力为 449 kN, 折算为外加荷载为 746 kN.

3.2 贴板承载力

贴板与高强螺栓将次梁连接板传递的剪力传递给主梁加劲肋, 贴板的抗剪承载力应按式验算:

$$V = \frac{f_v I_t t_t}{S_t} \quad (7)$$

式中: V 为贴板截面设计剪力; f_v 为贴板钢材的抗剪强度设计值; I_t, t_t, S_t 分别为贴板的惯性矩、厚度和面积矩.

根据式(7), 计算可得试件的贴板抗剪承载力为 202 kN, 折算为外加荷载为 672 kN.

3.3 高强螺栓群承载力

高强螺栓群与贴板将次梁连接板传递的剪力传递给主梁加劲肋, 高强螺栓群的抗剪承载力应按式验算^[12]:

$$V = n V_v^b \quad (8)$$

式中: V 为高强螺栓群截面设计剪力; n 为高强螺栓的个数; V_v^b 为一个高强螺栓的抗剪承载力.

根据式(8), 计算可得试件的高强螺栓群抗剪承载力为 324 kN, 折算为外加荷载为 538 kN.

3.4 次梁承载力

在钢框架中, 次梁主要承担并传递压型钢板或檩条传递的屋面或楼面荷载, 根据《波纹腹板钢结构技术规程》, 次梁的抗剪承载力应按式验算:

$$V \leq f_v h_w t_w \quad (9)$$

式中: V 为次梁截面设计剪力; f_v 为腹板钢材的抗剪强度; h_w, t_w 分别为腹板的高度和厚度.

根据式(9), 计算可得试件的次梁抗剪承载力为 112 kN, 折算为外加荷载为 245 kN.

由 3.1~3.4 可知, 节点 1, 2 的主次梁铰接节点的承载力由次梁的抗剪承载力控制. 实际试验中, 试件发生次梁波纹腹板剪切屈曲破坏, 主次梁铰接节点的次梁连接板、贴板和高强螺栓完好, 与理论相符. 试件 1, 2 的屈服荷载分别为 270 kN 与 265 kN, 略大于次梁抗剪承载力计算的折算外加荷载.

4 结论

本文对波纹腹板H型钢主次梁铰接节点进行了试验研究,得到节点的荷载-位移曲线和各截面的内力分布.试验结果表明,在波纹腹板次梁与端板的连接中,波纹腹板与端板连接的双面角焊缝承受全部剪力,剪力沿截面均匀分布;波纹腹板的波折不影响连接板与贴板截面的剪力分布.通过对次梁波纹腹板与端板角焊缝附近截面、次梁连接板截面、贴板截面及主梁截面的内力分布试验值与理论公式的计算结果进行对比,验证了理论公式在计算各截面内力分布时的可靠性.

提出波纹腹板H型钢主次梁铰接节点的次梁连接板、贴板、高强螺栓群及次梁的承载力设计公式,通过对承载力设计公式的计算承载力与试验结果进行对比,验证了波纹腹板H型钢主次梁铰接节点承载力设计公式的有效性.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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:同济大学土木工程学院,2009.
ZHANG Zhe. Theoretical and experimental research on the H-beams and the composite beams with corrugated webs [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2009.
- [3] Elgaaly M, Seshadri A. Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(6): 783.
- [4] 郭彦林,王小安,张博浩,等.波浪腹板钢结构设计理论及应用现状[J].工业建筑,2012,42(7):1.
GUO Yanlin, WANG Xiaolan, ZHANG Bohao, et al. The state of art design theory of sinusoidal web steel structures [J]. Industrial Construction, 2012, 42(7): 1.
- [5] Gerstle K H. Effect of connections on frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1988, 10: 241.
- [6] 李国强,张哲,孙飞飞.波纹腹板H型钢梁抗剪承载力[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(6):709.
LI Guoqiang, ZHANG Zhe, SUN Feifei. Shear strength of H-beam with corrugated webs [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6): 709.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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. GB50017-2003 Technical specification for steel structures with corrugated webs [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [11] 傅衣铭,熊慧而.材料力学[M].长沙:湖南大学出版社,2007.
FU Yiming, XIONG Huier. Mechanics of materials [M]. Changsha: Hunan University Press, 2007.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. GB50017—2003 钢结构设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.