

高笑娟,梅帅,蔡俊超,等.双波板主次梁连接节点的抗剪性能试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):224-231.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250421

GAO Xiaojuan, MEI Shuai, CAI Junchao, et al. Experimental study on shear performance of double-corrugated-plate primary-secondary beam connections[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(2): 224-231. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250421

双波板主次梁连接节点的抗剪性能试验研究

高笑娟¹, 梅帅¹, 蔡俊超^{1*}, 查支祥², 王韬², 曹纳德²

(1. 河南科技大学 土木建筑学院, 河南 洛阳 471023; 2. 浙大宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 为提高钢结构装配化施工效率并增强结构稳定性, 提出一种对扣双波板主次梁连接节点, 该节点由双波形钢板与两块槽钢组成。设计22组节点试件, 通过静载试验分析其破坏模式及荷载-位移曲线, 揭示该节点的力学行为与承载力机制。研究结果表明: 在对扣双波板腹腔内设置冷弯槽钢可有效约束平面外变形, 提高节点的承载力和稳定性; 试件破坏模式为螺栓穿透或双波板弯折处断裂; 试件归一化极限抗剪承载力主要取决于双波板的板厚、板高和板长, 与波形板平直板及斜子板宽度无关; 提出双波板连接节点归一化极限抗剪承载力计算式。研究结论为对扣双波板主次梁连接节点在钢结构领域的应用提供参考。

关键词: 双波板; 主次梁节点; 静载试验; 剪切屈曲; 抗剪承载力

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)02-0224-08

Experimental study on shear performance of double-corrugated-plate primary-secondary beam connections

GAO Xiaojuan¹, MEI Shuai¹, CAI Junchao^{1*}, ZHA Zhixiang², WANG Tao², CAO Nade²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. School of Civil Engineering, NingboTech University, Ningbo 315100, China)

Abstract: To enhance the construction efficiency and structural stability of prefabricated steel structures, this study proposes a novel back-to-back double-corrugated-plate connection for primary and secondary beams. The connection system comprises double-corrugated steel plates and two cold-formed channel steels. Static load tests were conducted on 22 groups of specimens to analyze their failure modes and load-displacement curves, thereby elucidating the underlying mechanical behavior and load-transfer mechanisms. The results demonstrate that the installation of cold-formed channel steels within the corrugated webs effectively constrains out-of-plane deformation, thereby improving the load-bearing capacity and overall stability of the connection. The failure modes observed were either bolt shear-through or fracture at the bends of the corrugated plates. The normalized ultimate shear capacity was found to be primarily governed by the thickness, height, and length of the corrugated plates, while it remained independent of the widths of the flat and inclined plate segments. A predictive formula for estimating the normalized ultimate shear capacity is derived. The findings of this study offer valuable insights for the application of such connections in steel structures.

Keywords: double-corrugated-plate; primary-secondary beam connections; static load test; shear buckling; shear capacity

0 引言

钢结构中的主次梁常通过连接腹板来传递剪

力。传统方法是次梁的上侧翼缘板及部分腹板切除后, 用连接件固定在主梁腹板上^[1-3]。当主次梁的截面高度相当时, 需对次梁上下翼缘板和部

收稿日期: 2025-10-11 修回日期: 2025-11-18 接受日期: 2025-12-08 责任编辑: 黄琦

基金项目: 煤炭资源绿色开采教育部重点实验室课题(KLXGY-KB2510); 城市固废能源与建材转化中心项目(2024ZD05); 宁波市自然科学基金项目(2024J092)

作者简介: 高笑娟(1973-), 女, 河南 洛阳人, 博士, 教授, 主要从事钢结构与地下结构方面的研究。E-mail: gaoxjly@163.com

通信作者: 蔡俊超(1988-), 男, 河南 开封人, 博士, 副教授, 主要从事钢结构与地下结构方面的研究。E-mail: caijunchaoedut@126.com

分腹板进行切口^[4]。上述处理方法均会导致次梁端部的局部稳定性和承载能力降低。为避免切口损伤导致的节点承载力下降,学者对节点的连接方法不断改进。HAWXWEL等^[5]、ELTAS等^[6]以偏心端板作为次梁与主梁的连接件,虽能有效避免切口引起的承载力下降,却难以解决偏心效应造成的受力不均问题。LOPEZ等^[7]以附加端板为节点连接件,研究其弯曲状态下的刚度与极限承载力,结果表明,该构造可提高节点稳定性,但由于采用焊接工艺,材料可能发生脆化,从而降低抗冲击与疲劳性能。AHMED^[8]、URBONAS等^[9]、MOHAMADI-SHOOREH等^[10]、KATULA等^[11]和李彩霞等^[12]提出齐平端板连接方式,即在次梁端部设置端板,并通过螺栓或焊接将它固定于主梁上。该节点构造简单、经济性好,但对结构承载力及施工空间要求较高。NATESAN等^[13]以冷弯双角钢为连接件,通过螺栓实现主次梁的连接。该方法具有轻质高强的特点,适用于小跨度结构,但其承载力有限,对结构重量与性能的限制较为严格。SARRAJ等^[14]提出将鳍板(钢板)固定于次梁腹板并与主梁相连,该节点适应性强,但对结构性能与施工精度要求较高。此外,刘素丽等^[15]、魏文晖等^[16]将钢板通过螺栓连接至主梁加劲肋上,虽在一定程度上解决了传统节点承载力下降的问题,但仍存在结构缺陷,例如偏心效应可能产生附加偏心距,导致应力分布不均。尽管上述连接方式有效规避了切口对构件承载力的削弱,但存在的偏心效应、承载力不足、焊接脆性以及施工精度和构造空间的要求较高等问题依然突出。

波形钢板结构性能较好,在实际工程中应用广泛。例如,在桥梁结构中用作钢梁腹板,充分发挥高抗剪性能,提高梁结构承载力^[17-18];在桁架结构中作为“KT”形与“K”形方钢管节点^[19-20],显著提升节点的承载能力与延性;作为焊接钢框架节点,有效提高结构的抗倒塌性能^[21]。

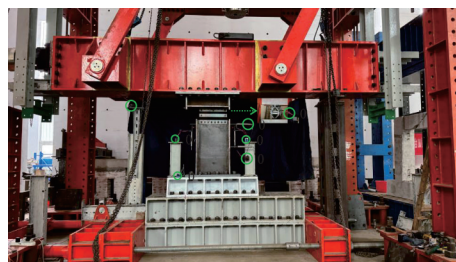
作者基于前期专利^[22],以波形钢板(简称波板)作为主梁腹板和次梁腹板之间的节点,实现次梁的免切口。该节点的特点如下:波板不仅是主次梁的连接件,还是结构的一部分。结构不仅具有波形钢板良好的抗屈曲能力,而且轻质高强;此外,该节点采用全螺栓连接,既可保证施工质量与效率,又可有效避免焊接残余应力带来的不利影响。设计22组节点试件,通过静载试验,研究其破坏模式、荷载-位移曲线及应力-应变,以期为该新型节点在钢结构领域的应用提供理论依据

和设计参考。

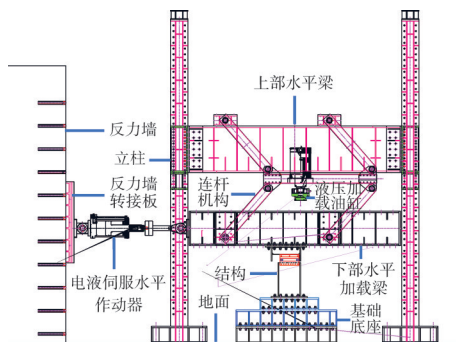
1 波板节点静载试验

1.1 试验加载装置

试验加载装置与结构加载示意图1,其中绿色圆圈标记处为位移计布置点。主梁的侧面焊接端板,通过高强度螺栓与上部四连杆加载梁连接。次梁的底部焊接端板,用高强度螺栓固定于基础底座上。次梁与主梁的腹板之间,采用波板作为连接件并用高强度螺栓固定。加载梁的左侧连接液压作动器,从左往右施加水平载荷,并保持平动。为限制平面外位移,加载梁的两端设置支撑。采用位移加载方式,加载速率为2 mm/min。当双波板发生破坏或其荷载下降至极限承载力的80%以下时,停止试验并进行卸载。



(a) 加载装置



(b) 结构加载示意

图1 试验加载装置与结构加载示意

Fig.1 test loading setup and structural loading schematic

1.2 试件设计

将两块波板对扣并夹住次梁的腹板,在波板腹腔内两侧设置冷弯槽钢以增强其局部刚度。为提高波板的抗扭性能与整体稳定性,对扣双波板的两翼与主梁的腹板连接,采用穿心螺栓紧固。这种一体化连接方式使双波板兼具节点构件与连接件功能,从而避免次梁切口。与前期专利^[22]相比,本文采用槽钢代替上下连接件及侧向连接件,简化结构。节点整体采用全螺栓连接,其中,对

扣双波板与次梁的连接可在工厂或地面预先安装,现场高空作业时,只需安装主梁腹板与双波板两翼的连接螺栓。双波板的平面内刚度较小,在安装过程中具备良好的容错性,便于现场调整安装误差,可显著提高装配式结构的施工效率与安装精度。试件结构组成及受力示意图2。

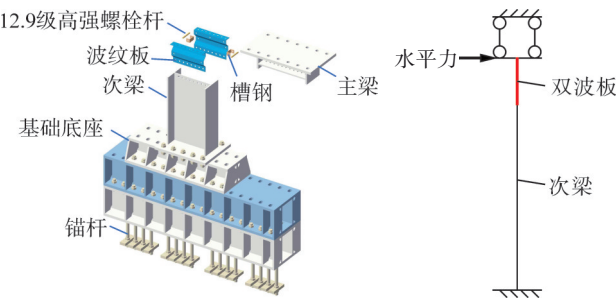


图2 试件结构组成及受力示意

Fig.2 structural configuration and force of the specimen

本文设计的次梁底部可视为固定支座,连接双波板顶部的主梁视为滑动支座。该种约束方式与文献[23]、文献[24]相似,节点的受力方式与次梁的实际受力情况较为相符。双波板所受的剪力等于水平力,受手风琴效应影响,可忽略双波板所受弯矩。

次梁采用无切口的工字型截面焊接钢板梁,其尺寸见图3。其中,次梁腹板厚度 t_w 为9.7 mm;翼缘板厚度 t_f 为16.1 mm;腹板高度 h_w 为400 mm;翼缘板宽度 B_f 为250 mm。对扣双波板和槽钢均为平钢板冷弯制成,波板的背面贴有应变花,具体尺寸见图4。

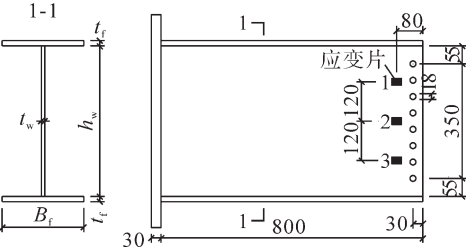


图3 次梁尺寸(单位:mm)

Fig.3 secondary beam size (unit: mm)

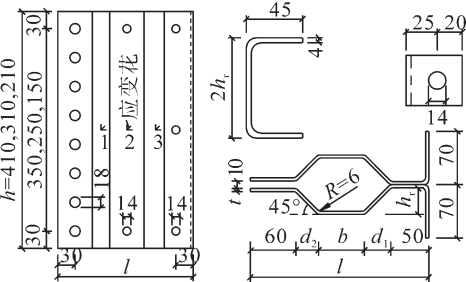


图4 波板尺寸(单位:mm)

Fig.4 corrugated plate size (unit: mm)

图4中, b 为平子板宽度; h_c 为斜子板高度; d_1 、 d_2 为斜子板宽; t 为板厚(公称厚度); h 为板高; l 为板长;折弯角为 45° ; R 为折弯半径。

节点连接采用12.9级高强螺栓,螺杆直径分别为16 mm和12 mm,螺栓孔直径分别为18 mm和14 mm。为保证连接强度,螺栓的最小间距保守设置为50 mm,接近钢结构设计标准^[25]所规定的最小容许距离。按不同的波板板厚、板长和板高,设计并制作22组对扣双波板试件,试件命名方式为“ h - d - b - t - l ”。采用公称厚度为3 mm、4 mm、10 mm和16 mm的Q235B级热轧钢板,其材料拉伸试验结果^[26]见表1。

表1 板材参数的试验结果
Tab.1 test results of plate parameters

公称厚度 /mm	实际厚度 /mm	杨氏模量 E /($10^5 \cdot \text{MPa}$)	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	断裂伸长 率/%
3	2.97	2.08	327.44	463.10	32.71
4	3.68	2.07	318.62	483.10	28.50
10	9.70	2.03	311.69	501.67	20.27
16	16.10	2.04	333.72	517.55	20.38

2 试验结果分析

2.1 试件破坏模式分析

开展22组节点静载试验,试验结果见表2。

表2 试件静载试验结果
Tab.2 static load test results of specimens

试件编号	Q_u/kN	Q_{y0}/kN	Q_u/Q_{y0}	δ_u/mm	失效模式
410-30-70-3-235	264.20	460.40	0.57	27.04	穿透
410-35-60-3-235	271.40	460.40	0.58	24.94	断裂
410-40-50-3-235	264.26	460.40	0.57	20.18	穿透
410-30-70-4-235	385.07	555.10	0.69	24.70	断裂
410-35-60-4-235	362.65	555.10	0.65	24.71	断裂
410-40-50-4-235	366.03	555.10	0.65	24.09	断裂
310-30-60-4-225	287.93	419.71	0.68	37.05	穿透
310-35-50-4-225	308.80	419.71	0.73	40.86	穿透
310-40-40-4-225	299.30	419.71	0.71	43.18	穿透
310-30-70-3-235	204.11	348.11	0.58	31.57	穿透
310-35-60-3-235	176.49	348.11	0.50	22.54	断裂
310-40-50-3-235	179.81	348.11	0.51	23.55	断裂
310-30-70-4-235	272.95	419.71	0.65	34.99	穿透
310-35-60-4-235	274.15	419.71	0.65	42.69	穿透
310-40-50-4-235	262.83	419.71	0.62	36.06	穿透
310-35-70-4-245	238.99	419.71	0.56	25.59	断裂
310-40-60-4-245	244.76	419.71	0.58	28.65	断裂
210-35-60-3-235	121.38	235.81	0.51	43.13	穿透
210-40-50-3-235	118.40	235.81	0.50	43.02	穿透
210-30-70-4-235	150.82	284.32	0.53	40.76	断裂
210-35-60-4-235	147.22	284.32	0.51	37.32	断裂
210-40-50-4-235	156.71	284.32	0.55	48.44	穿透

注: Q_u 为极限抗剪承载力; Q_{y0} 为等效厚度平钢板的剪切屈服载荷, $Q_{y0}=2htf_y/\sqrt{3}$; Q_u/Q_{y0} 为归一化极限抗剪承载力; δ_u 为极限位移。

由表2可知,试件的破坏模式具有高度一致性,主要为螺栓穿透或波板断裂破坏。为了揭示其破坏机理,取两种破坏模式的代表性试件进行分析。不同位移 δ 下试件410-30-70-3-235及试件410-35-60-4-235的破坏模式分别见图5、图6。

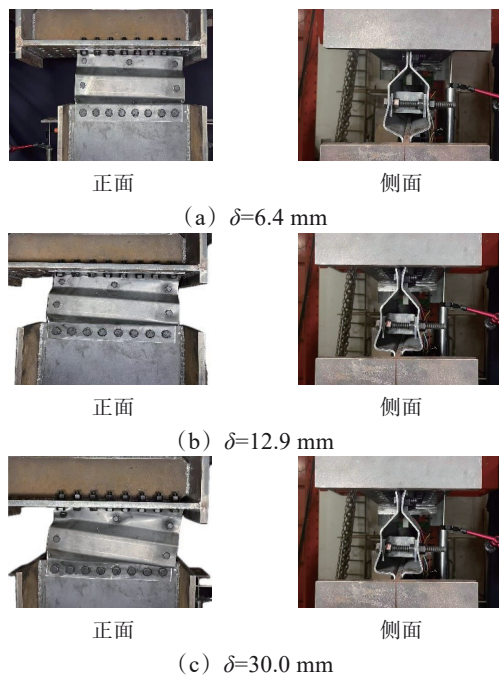


图5 不同 δ 下试件410-30-70-3-235的破坏模式
Fig.5 failure modes of specimen 410-30-70-3-235 under different horizontal displacements

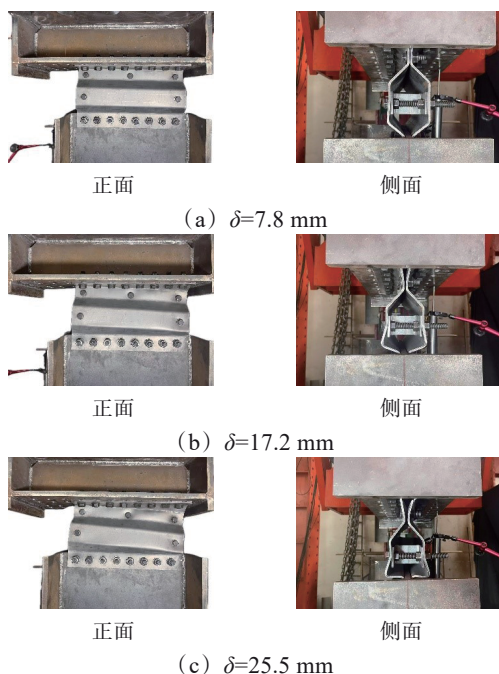


图6 不同 δ 下试件410-35-60-4-235的破坏模式
Fig.6 failure modes of specimen 410-35-60-4-235 under different horizontal displacements

由图5可以看出,波板的腹腔从左侧向右下方倾斜,发生平面内扭转变形,左侧变形不明显,右侧变形较为显著。腹腔部的截面形状由六边形蜂巢状逐渐变为上小下大的葫芦状。位移加载至6.4 mm时,上侧斜子板的折角变小,下侧斜子板的折角变大。随着位移的增大,之前对扣紧贴的双波板上方逐渐被拉开。位移加载至12.9 mm时,双波板上方已分离,下侧斜子板折角由45°向90°靠近。位移加载至30 mm时,双波板上方被螺栓穿透,发生穿透破坏。在加载过程中,腹腔变形较显著,下侧斜子板的折角由45°逐渐向135°靠近,但始终未出现裂缝。腹腔内设置的冷弯槽钢和穿心螺杆保持完好,很好地约束了平面外变形,有效提高了结构的稳定性和承载能力。整体来看,在冷弯槽钢和穿心螺杆的约束下,对扣双波板基本处于平截面状态,结构虽发生了较大变形,但两波板始终保持对称,未发生平面外侧倒或扭转,表明其整体稳定性较好。

由图6可以看出,试件410-35-60-4-235与试件410-30-70-3-235的形态变化基本一致。位移加载至25.5 mm时,双波板上方已被拉开一定距离,即将被螺栓穿透,但后波板的上侧弯折处突然出现裂缝,导致承载力迅速下降,发生断裂破坏。

所有试件在剪力作用下只发生穿透或断裂破坏,未出现两种破坏同时出现的情况,且破坏位置均在试件的右侧上方,表明该位置为结构的薄弱部位。这可能是由于该区域螺栓间距较大,约束作用不足。此外,所有螺栓均未发生破坏,表明所用螺栓的强度满足要求。在实际工程中,需考虑螺栓数量和间距等因素,进一步改进螺栓设置方式,以增强对波板的约束,防止波板被穿透,从而提高结构的整体抗裂性能。

2.2 抗剪承载力-位移曲线分析

试件抗剪承载力 Q 与位移 δ 的关系见图7。所有试件的 Q - δ 曲线变化趋势相似。加载初期,抗剪承载力增长较快,位移超过3~4 mm后,抗剪承载力增长显著变缓。在位移较大、试件发生较大变形时,抗剪承载力缓慢增大, Q - δ 曲线接近直线。一旦发生螺栓穿透或断裂破坏,抗剪承载力迅速减小。破坏发生时,抗剪承载力最大。

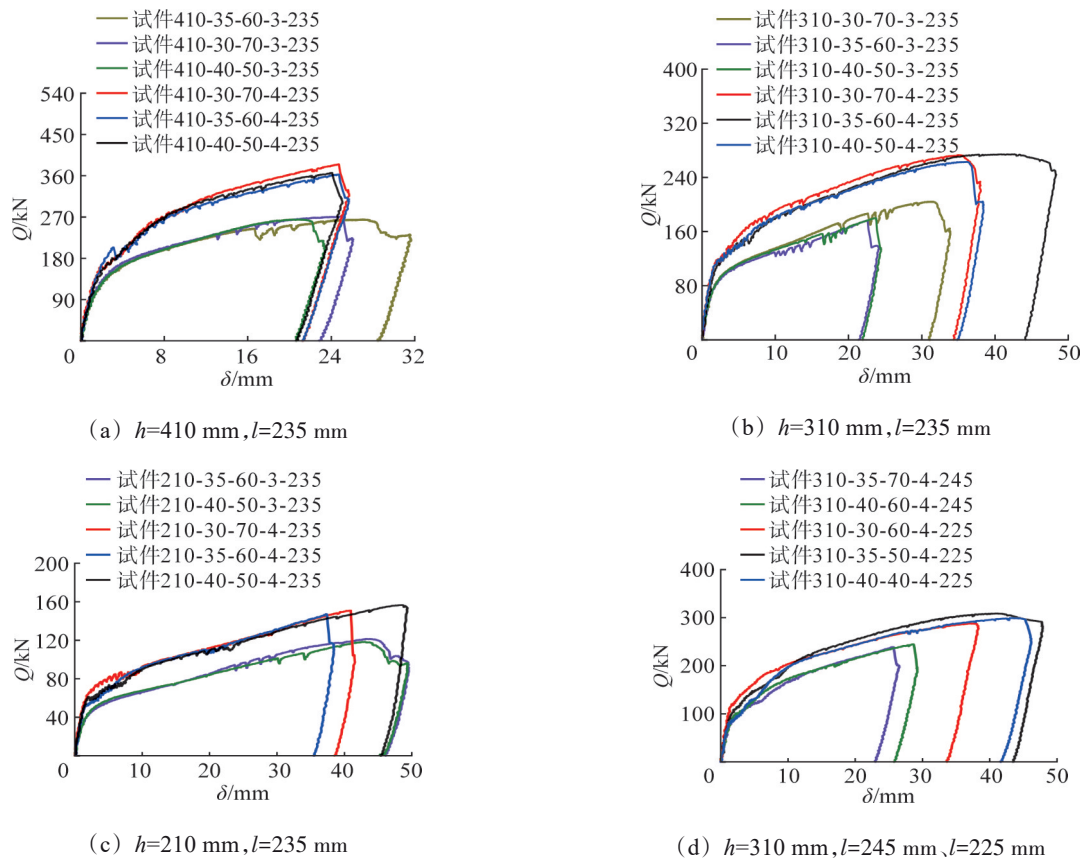
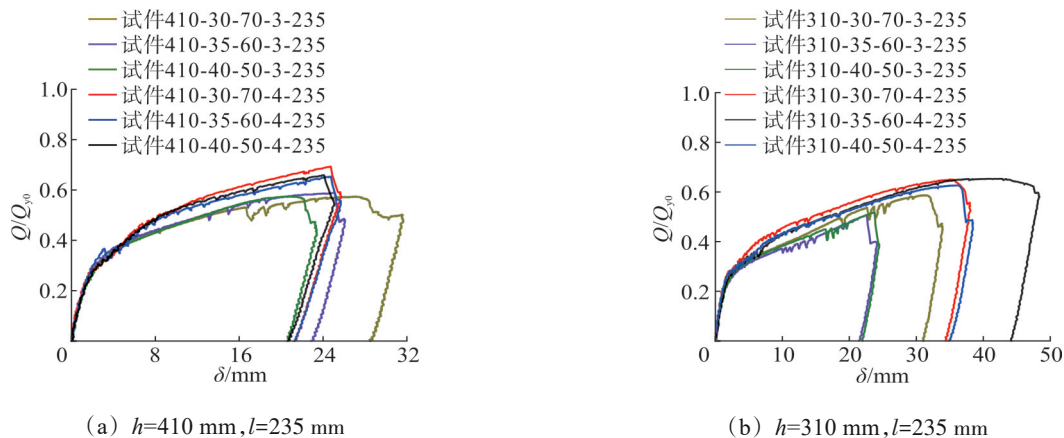


图7 试件抗剪承载力与位移

Fig.7 shear bearing capacity and displacement of specimens

试件归一化抗剪承载力 Q/Q_{y0} 与 δ 的关系见图8。由图8(a)~图8(c)可知,公称直径为4 mm试件的 Q/Q_{y0} - δ 曲线相对更高,表明双波板较厚的试件,其 Q_u/Q_{y0} 更大,稳定性更强。由图8(d)及表2可知,板长最短 ($l=225\text{ mm}$) 试件的 Q_u/Q_{y0} 约为0.68~0.73,板长最长 ($l=245\text{ mm}$) 试件的 Q_u/Q_{y0} 约为0.56~0.58,表明双波板长度较短的试件,其 Q_u/Q_{y0} 更大。双波板高度对结构的稳定性也有

一定影响。试件 410-30-70-4-235、试件 210-30-70-4-235 的 Q_u/Q_{y0} 分别为0.69和0.53,试件 410-30-70-3-235、试件 210-30-70-3-235 的 Q_u/Q_{y0} 分别为0.57和0.50。板高最高 ($h=410\text{ mm}, t=4\text{ mm}$) 试件的 Q_u/Q_{y0} 约为0.65~0.69,板高最短 ($h=210\text{ mm}, t=4\text{ mm}$) 试件的 Q_u/Q_{y0} 约为0.51~0.55,表明板高较高的试件,其 Q_u/Q_{y0} 更大,结构的稳定性更强。



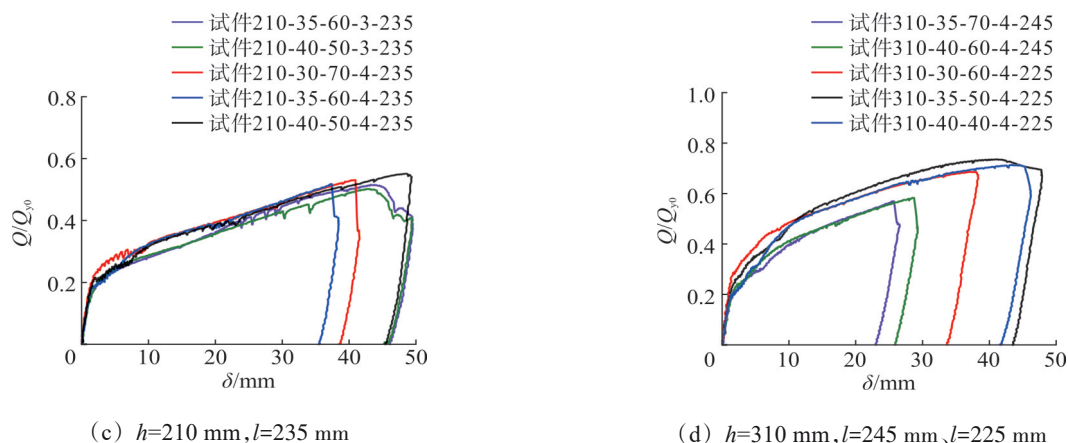


图8 试件归一化抗剪承载力与位移

Fig.8 normalized shear capacity and displacement of specimens

2.3 抗剪承载力-应变曲线分析

部分试件抗剪承载力 Q 与应变 ε 的关系见图9。其中, θ 为应变花与波板高度 h 之间的夹角。由图9可以看出,各试件 Q - ε 曲线的变化趋势基本一致。加载初期,结构只发生微小变形, Q 与 ε 基本呈线性关系,应变较小。抗剪承载力超过极限载荷

50%时,应变迅速增大,表明此时结构变形迅速增大,与静载试验中试件的破坏现象一致。达到峰值抗剪承载力时,节点发生断裂或螺栓穿透破坏,承载力迅速减小。此时应变花在各个方向的应变基本趋于稳定。

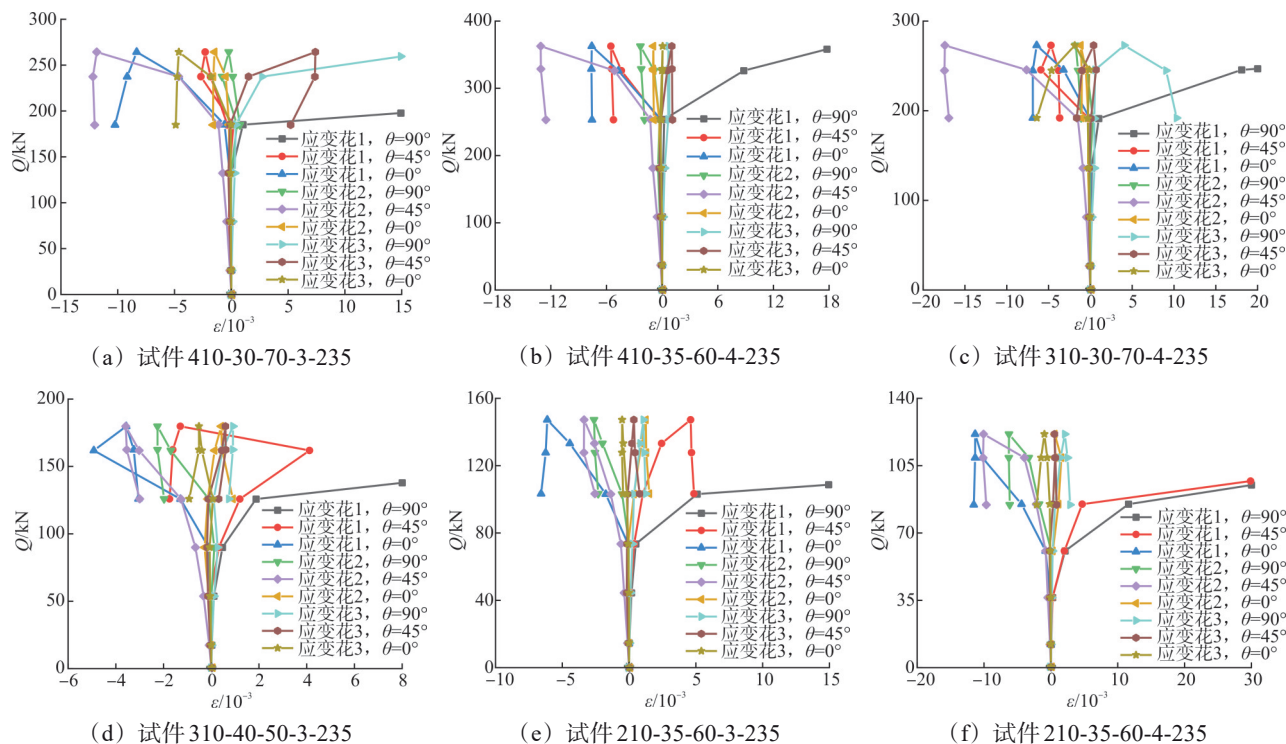


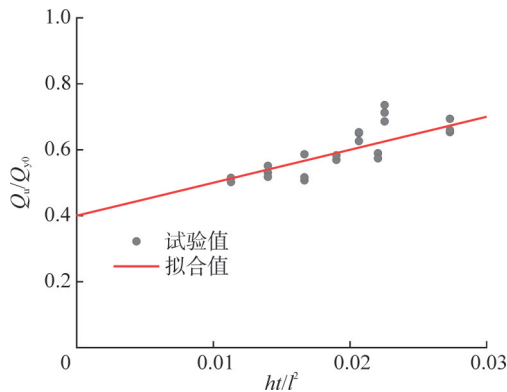
图9 试件抗剪承载力与应变

Fig.9 shear bearing capacity and strain of specimens

2.4 极限抗剪承载力计算式

基于前文分析可以确定, Q/Q_{y0} - δ 曲线与板厚 t 、板长 l 及板高 h 有关,与平子板宽 b 和斜子板宽 d 基

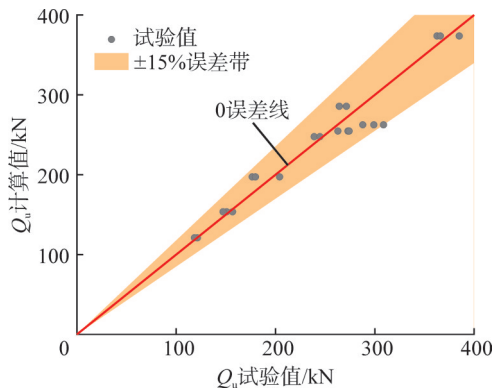
本无关, l 对 Q/Q_{y0} - δ 曲线的影响最大。将 Q_u/Q_{y0} 与 ht/l^2 值进行拟合,结果见图10。

图 10 $Q_u/Q_{y0}-ht/l^2$ 的试验值与拟合值对比Fig.10 comparison between experimental and fitted values of $Q_u/Q_{y0}-ht/l^2$

Q_u/Q_{y0} 与 ht/l^2 呈线性关系,可采用式(1)作为对扣双波板归一化极限抗剪承载力的近似计算式。

$$Q_u/Q_{y0}=0.4+10\frac{ht}{l^2} \quad (1)$$

为验证式(1)的可靠性,将极限抗剪承载力计算值与试验值进行对比,结果见图11。

图 11 Q_u 计算值与试验值对比Fig.11 Q_u comparison of calculated values and experimental values

由图11可见,试验值均分布在±15%的误差带内,且大部分试验值集中在0误差线附近,表明通过式(1)来预测节点的极限抗剪承载力较为可靠。

3 结论

提出一种全螺栓连接的对扣双波板主次梁节点,通过静载试验研究节点的力学行为和承载机制,分析波板几何参数对节点破坏特征和极限抗剪承载力的影响,得出如下结论。

(1) 加载过程中,对扣双波板腹腔在平面内发生扭转变形,截面形状由六边形蜂巢状逐渐转变为上小下大的葫芦状,平面外未发生侧倒或扭

转变形,稳定性较好。

(2) 对扣双波板腹腔内设置的冷弯槽钢和穿心螺杆保持完好,较好地约束了平面外变形,有利于提高结构的稳定性及承载能力。

(3) 归一化极限抗剪承载力主要取决于波板板厚、板长和板高,与平子板宽和斜子板宽基本无关。提出以波板板厚、板长和板高为主要参数的归一化极限抗剪承载力的近似计算式,其计算误差在±15%以内,计算结果较为可靠。

(4) 对扣双波板结构的薄弱部位为右侧上方,主要破坏模式为螺栓的穿透破坏或弯折处断裂。未来研究中,可进一步探讨螺栓数量与间距对节点承载力的影响,从而优化螺栓布置方案,提升节点性能,为工程应用提供更精准的设计依据。

参考文献(References):

- [1] YAM M C H, HE X Z, ZHANG M Y, et al. Study of the strength and behaviour of single-coped beam under combined bending, shear and axial loads[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 213: 113258.
- [2] YAM M C H, FANG C, LAM A C C, et al. Local failures of coped steel beams—a state-of-the-art review[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 102: 217-232.
- [3] ROGER CHENG J J. Design of steel beams with end copes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1993, 25: 3-22.
- [4] LAM A C C, FANG C, YAM M C H, et al. Block shear strength and design of coped beams with double bolt-line connections[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 293-307.
- [5] HAWXWELL D A, TSAVDARIDIS K D. Beam-to-beam eccentric end plate connections-Experimental comparison to fin plate and partial-depth end plate connections[J]. Structures, 2019, 19: 411-423.
- [6] ELTAŞ S, ALI GÜLER M, TSAVDARIDIS K D, et al. On the beam-to-beam eccentric end plate connections: a numerical study[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 188: 110787.
- [7] LOPEZ M, LOUREIRO A, GUTIERREZ R, et al. A new analytical formulation for the stiffness and resistance of the additional plate in bending in beam-to-beam steel joints[J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111476.
- [8] AHMED N Z. Experimental and numerical investigation of the bending behavior in nontraditional steel beam-to-beam tip connections[J]. Structures, 2024, 62: 106260.
- [9] URBONAS K, DANIŪNAS A. Behaviour of semi-rigid steel beam-to-beam joints under bending and axial forces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 1244-1249.
- [10] MOHAMADI-SHOOREH M R, MOFID M, MCCABE S L. Empirical model of the moment-rotation curve of beam-to-beam bolted flush endplate connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(1): 66-72.
- [11] KATULA L, DUNAI L. Experimental study on standard and

- innovative bolted end-plate beam-to-beam joints under bending[J]. Steel and Composite Structures,2015,18(6):1423-1450.
- [12] 李彩霞,童伟伟.端板厚对主次梁连接受力影响的研究[J].安徽建筑,2012,19(1):199-200.
- LI Caixia, TONG Weiwei. Analysis of influence of end-plate thickness on shear connection between main and second bridge[J]. Anhui Architecture,2012,19(1):199-200.
- [13] NATESAN V, MADHAVAN M. Performance of CFS beam-to-beam bolted connection using clip angle and flange strip: experimental investigation[J]. Journal of Structural Engineering, 2019,145(10):04019101.
- [14] SARRAJ M, BURGESS I W, DAVISON J B, et al. Finite element modelling of steel fin plate connections in fire[J]. Fire Safety Journal,2007,42:408-415.
- [15] 刘素丽,陈传新,魏文辉,等.主次梁高强螺栓连接节点偏心距取值研究[J].建筑技术,2013,44(8):739-741.
- LIU Suli, CHEN Chuanxin, WEI Wenhui, et al. Research on eccentricity of primary and secondary beam joints with high strength bolted connection[J]. Architecture Technology,2013,44(8): 739-741.
- [16] 魏文辉,喻梦,高湛,等.主次梁高强螺栓连接节点承载力研究[J].工业建筑,2013,43(6):134-137.
- WEI Wenhui, YU Meng, GAO Zhan, et al. Analysis of shear capacity of beam-and-girder bolt connections[J]. Industrial Construction,2013,43(6):134-137.
- [17] 高立强,袁焕鑫,王奥迪,等.螺栓连接梯形波纹腹板钢梁受剪试验与分析[J].建筑钢结构进展,2025,27(2):54-63.
- GAO Liqiang, YUAN Huanxin, WANG Aodi, et al. Shear test and analysis of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs [J].Progress in Steel Building Structures,2025,27(2):54-63.
- [18] 吴金辉,黄文霞.屈曲状态下桥梁波纹钢腹板的疲劳裂纹扩展行为[J].兵器材料科学与工程,2025,48(5):48-53.
- WU Jinhui, HUANG Wenxia. Fatigue crack growth behavior of corrugated steel webs of bridges under buckling[J]. Ordnance Material Science and Engineering,2025,48(5):48-53.
- [19] 苏瑞,杨国庆,袁琪,等.波纹板加强KT型方钢管节点抗倒塌性能研究[J].建筑结构,2025,55(3):110-115.
- SU Rui, YANG Guoqing, YUAN Qi, et al. Study on collapse-resistance behavior of KT-shaped square steel tube joints strengthened by corrugated plates[J]. Building Structure, 2025, 55 (3):110-115.
- [20] 王佳力,杨国庆,苏瑞,等.波纹板加强K型方钢管节点抗倒塌性能有限元分析[J].结构工程师,2025,41(3):16-23.
- WANG Jiali, YANG Guoqing, SU Rui, et al. Finite element analysis of collapse resistance of K-shaped square steel tube joints strengthened by the corrugated plates[J]. Structural Engineers,2025, 41(3):16-23.
- [21] 弋宇轩.波纹板加强焊接钢框架节点抗连续倒塌性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2024:31-49.
- [22] 王韬,王银辉,罗征,等.一种抗屈曲的钢结构主次梁连接节点:CN113026968A[P].2022-10-25.
- [23] KE K, YAM M C H, LAM A C C, et al. Local web buckling of single-coped beam connections with slender web[J]. Journal of Constructional Steel Research,2018,150:543-555.
- [24] GHADAMI A, JAWDHARI A, POURMOOSAVI G. Buckling and post-buckling behavior of top flange coped I-beams with slender web panels[J]. Thin-Walled Structures,2024,198:111640.
- [25] 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: 106-107.
- [26] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社, 2021:12-49.