DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808146

波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接承载力研究

苏明周[1,2], 赵 凯[1,2], 孙艳文[3]

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2.结构工程与抗震教育部重点实验室(西安建筑科技大学), 西安 710055; 3.中国建筑标准设计研究院有限公司, 北京 100048)

摘 要: 为研究波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接承载力,考虑钢板厚度、钢板面层是否热浸镀锌等因素,对波纹钢板连接试件进行静力拉伸试验,并设计同等条件下平板连接试件试验为对照组.从试件的破坏模式、纵向接缝的滑移荷载、极限荷载、滑移位移和极限位移等方面进行分析.研究结果表明:热浸镀锌对连接试件的极限荷载基本无影响;当连接试件发生孔壁承压破坏时,波纹连接试件极限荷载比同等条件下平板连接试件高12%~20%,两者极限位移相差不大;当连接试件发生螺杆剪坏时,两者极限承载力基本相同,平板连接试件极限位移约为波纹板连接试件的1.3~1.7倍.通过规范计算结果与试验结果的对比分析,建议波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接的承载力偏于安全地按JGJ 99—2015计算.

关键词: 波纹钢板;高强度螺栓;纵向接缝;承载力;极限位移

中图分类号: TU391;TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)06-0122-07

Study on the bearing capacity of high strength bolt connection for longitudinal seam of corrugated steel plates

SU Mingzhou[1,2], ZHAO Kai[1,2], SUN Yanwen[3]

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance (Xi'an University of Architecture and Technology), Ministry of Education, Xi'an 710055, China; 3. Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: To study the bearing capacity of high strength bolt connection, static tensile tests on longitudinal seam of corrugated steel plate (CSPs) specimens were carried out by considering hot-dip galvanized and non-galvanized steel plates with different thicknesses, and flat plate specimens were designed under the same condition for comparison. The failure mode, the ultimate load and slip load of the longitudinal seam, and the limit and slip displacement of the specimens were analyzed. Results reveal that hot-dip galvanizing almost did not affect the ultimate load. When bearing failure at bolt hole occurred, the ultimate load of the CSP connections was about 12% to 20% higher than that of the flat plate specimens, while there was little difference in the limit displacement between them. When bolt shearing failure occurred, the ultimate displacement of the flat plate connections was about 1.3 to 1.7 times of the CSP ones, but their ultimate bearing capacities were similar. Based on the comparison between the standard calculation result and the test result, it suggests that the design formulae of JGJ 99—2015 are safe to calculate the bearing capacity of longitudinal seam strength of CSP with high strength bolt connection.

Keywords: corrugated steel plate; high strength bolt; longitudinal seam; ultimate load; ultimate displacement

波纹钢管廊相比传统钢筋混凝土管廊有自重轻、对基础要求低、造价低、施工周期短、密闭防潮性好、管理方便等优点(见图1),解决了钢筋混凝土管的模板制作复杂、钢筋不容易保持均匀曲率导致混凝土保护层剥落、内压下混凝土易开裂等缺点[1].

根据环压理论,波纹钢管廊结构在受力时主要承受切向剪力,在连接处力与螺栓杆垂直,与平直波纹钢板连接试件受力一致.但目前国内外对波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接承载力的研究较少.Lee等[2]研究了波纹钢板连接试件以钢材强度及板件厚度为参数的极限承载力;尹凌峰等[3]对螺栓连接的金属波纹板进行静力拉伸试验,研究了波纹板螺栓连接受剪破坏现象和力学性能;Kim-Lee[4]使用数值模拟方法评估了截面尺寸为400 mm×150 mm的深波纹钢板接缝强度;张威[5]分析了采用不同材料的波纹板在拉伸方向上的变形能力和波峰、波谷部位的应力分布情况.现行规范中,美国ASTM A796/A796M—2010[6]设计标准对具体材料、波形、板厚、螺栓直径和强度等级及数量等情况下给出承载力,不便于工程中设计采用;中国GB/T 34567—2017[7]对冷弯波纹钢管进行了分类并在设计及连接上提出

收稿日期: 2018-08-29
基金项目: 十三五国家重点研发项目(2016YFC0701503)
作者简介: 苏明周(1971—),男,教授,博士生导师
通信作者: 赵 凯, zhaokai930518@163.com

相应规定,但并未提出关于纵向接缝承载力的计算方法.

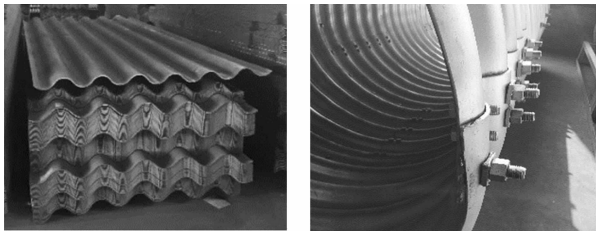


图 1　波纹钢板结构连接

Fig. 1　Structural connection of CSP

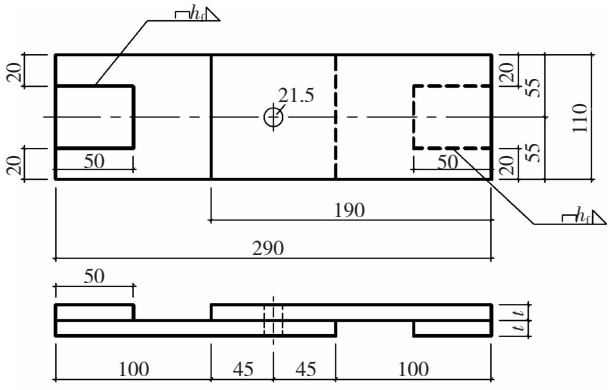
波纹板连接件中的高强度螺栓位于波纹钢板波峰或波谷处,导致高强度螺栓与连接板之间的接触面情况与平板不同. 另外,平板连接件中,板件承压厚度为同一受力方向钢板厚度之和,平垫片对承压没有作用,螺杆剪切面积为剪切处栓杆截面积. 在波纹板连接试件中,凹凸垫片会增加板件承压承载力,螺杆剪切面积为曲面面积. 因此,其受力形式与平板连接相比会有所不同,有必要对波纹钢板结构的高强度螺栓连接受力性能进行深入研究.

本文考虑钢板厚度、面层是否热浸镀锌等因素,对波纹钢板连接件进行静力拉伸试验,并设计同等条件下平板连接试件试验为对照组,对试件的破坏模式、纵向接缝极限荷载、滑移荷载、连接试件极限位移和滑移位移等方面进行分析.

1　试验设计

1.1　试件设计

平板连接试件参考 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》[8] 设计,波形板连接试件按照 GB/T 34567—2017《冷弯波纹钢管》拼装波纹管中波 200 mm×55 mm 尺寸进行设计,宽度取一个波宽,波纹试件垫片采用附录 B 中的凹凸垫片. 试件钢材为 Q235 钢材,考虑不同的破坏模式,板件名义厚度取 4、6、8、10 mm,每种厚度分别设计了 3 个普通试件与 3 个热浸镀锌试件. 高强度螺栓均为 8.8 级 M20 规格,螺杆长度为 100 mm,并设有热浸镀锌与未镀锌(黑件)两种类型. 由于镀锌螺栓的扭矩系数离散性较大,且在施加规范规定的预拉力时容易损坏,很难保证预拉力按规范规定施加,因此每组试件中的高强度螺栓施加不同预紧力以研究预紧力对试件极限荷载的影响. 平板连接试件与波形板连接试件简图见图 2、3. 试件参数见表 1,PP 代表平板连接试件,CP 代表波纹板连接试件,Z 代表镀锌处理.



(焊脚尺寸 h_f 取值为:$h_f>6$ mm 时, $h_f=(t-2)$mm; $h_f\leqslant 6$ mm 时,$h_f=t$)

图 2　平板连接试件简图(mm)

Fig. 2　Flat plate specimen (mm)

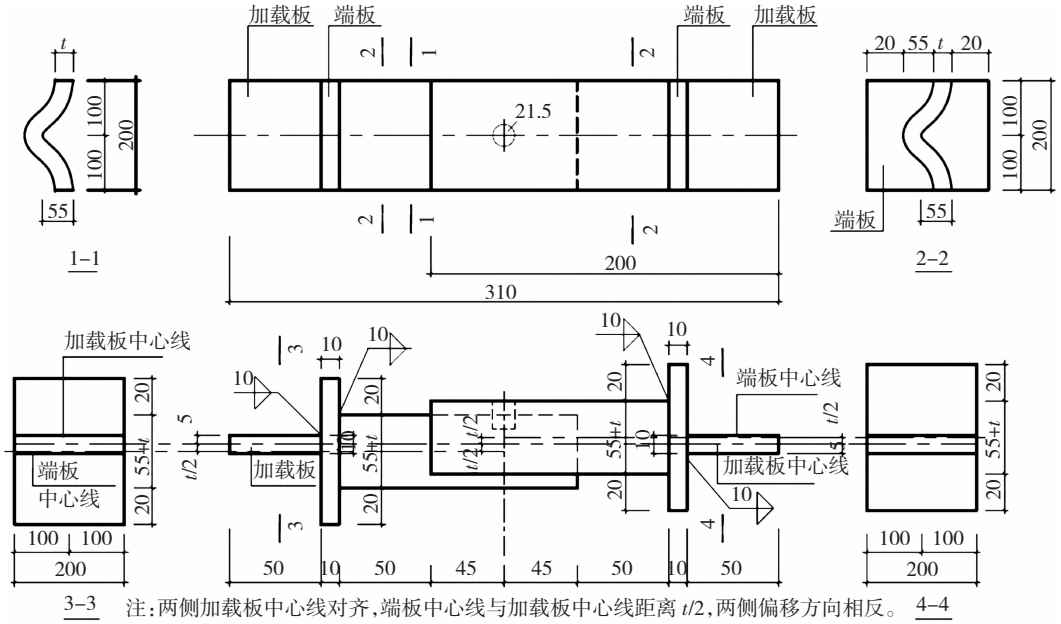


图 3　波形板连接试件简图(mm)

Fig. 3　Corrugated plate specimen (mm)

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of the specimens

试件编号	板件材料	波形 $p \times e$/mm	板厚 t/mm	端距/mm
PP1/PP1Z	Q235	—	4	45
PP2/PP2Z		—	6	45
PP3/PP3Z		—	8	45
PP4/PP4Z		—	10	45
CP1/CP1Z		200 × 55	4	45
CP2/CP2Z		200 × 55	6	45
CP3/CP3Z		200 × 55	8	45
CP4/CP4Z		200 × 55	10	45

根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》[9] 中的相关规定对制备的试样进行材性试验. 每种板厚热浸镀锌和未镀锌材性试样各一组,每组 3 个试样. 材性试验结果取平均值,材料性能见表 2,表中 f_y、f_u 分别为钢材的屈服强度和抗拉强度,E 和 δ 分别为钢材的弹性模量和伸长率. 热浸镀锌及普通板件材性结果为 $f_y \geqslant 235$ MPa、$f_u \geqslant 370$ MPa、$\delta \geqslant 20\%$,均满足 GB 50017—2017《钢结构设计标准》[10] 要求.

由表 2 可知,热浸镀锌板件的弹性模量小于普通板件,原因是锌的弹性模量小于钢材的弹性模量;热浸镀锌试样的屈服强度相比未镀锌试样有明显提高,但两者的抗拉强度基本相同,原因可能是镀锌层产生一定的附着力提高板件屈服强度,但在试样屈服后附着力被释放,从而对抗拉强度没有影响.

表 2 钢材性能参数

Tab. 2 Material properties of the specimens

试样编号	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E /10^5 MPa	δ/%
CP1Z/PP1Z	4	326	389	1.95	37.2
CP2Z/PP2Z	6	312	404	2.05	32.0
CP3Z/PP3Z	8	296	394	1.99	38.7
CP4Z/PP4Z	10	339	462	2.08	36.3
CP1/PP1	4	287	393	2.05	35.1
CP2/PP2	6	283	406	2.16	38.0
CP3/PP3	8	258	391	2.24	43.6
CP4/PP4	10	319	442	2.28	36.8

1.2 测点布置

因螺栓孔四周会出现应力集中现象,且螺栓受力及孔周边变形情况是本次试验研究的重点,因此应变测点均为靠近上部板件孔壁布置单向应变片,只采集荷载方向应变,应变布置方案见图 4. 试验所用应变采集系统为与试验加载装置配套设备 MTS FlexDAC 20,可实时记录荷载与位移、应变的关系.

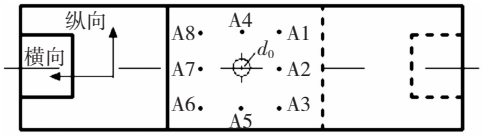


图 4 试件测点布置

Fig. 4 Instrumentation arrangement

1.3 试验过程

热浸镀锌及黑件高强度螺栓连接副的扭矩系数采用扭矩控制法测定,取扭矩系数平均值对每组试件的高强度螺栓施加规范规定预紧力的 50%、75%、100% 以作对比. 静力拉伸载荷试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室 MTS 250 kN 疲劳试验机上进行,加载速率2 mm/min. 试件在加载初期发生滑移时,根据滑移荷载测定试件摩擦面的抗滑移系数,继续加载直至试件发生破坏或者荷载下降到最大承载力的 80% 以下. 由于试验机夹具的变形及夹具与试件端部的滑移极小,可忽略不计,而试件的弹性变形相对于连接件的变形也很小,因此试件的位移采用加载装置夹具位移,不再另外布置位移计. 加载装置见图 5.

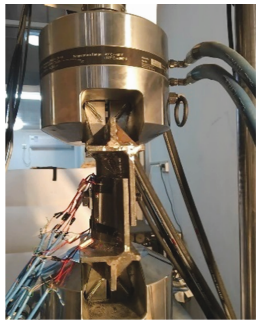


图 5 试验加载装置

Fig. 5 Test setup

2 结果及分析

2.1 扭矩系数试验

本次试验设计有热浸镀锌板件及热浸镀锌高强度螺栓,经过热浸镀锌处理后镀层光滑,高强度螺栓连接副的扭矩系数随之增大,影响高强度螺栓预紧力施加的精确性和连接的可靠度. 因此在试件加载前对高强度螺栓扭矩系数进行了测定,采用 FC – LW20/200 kN 传感器、配套 FC – DT01 数显仪表和扭矩扳手组成高强度螺栓扭矩系数测定装置(见图 6).



图 6 扭矩系数测定装置

Fig. 6 Torque coefficient test setup

根据式(1)可求得扭矩系数,并计算扭矩系数的平均值和标准差.

$$T = KDP, \tag{1}$$

式中:T 为施加的扭矩,N · m;K 为扭矩系数; D 为螺栓的公称直径,mm;P 为螺栓所受的预拉力,kN;每种类型的试件各测定了 10 组对应类型的高强度螺栓,扭矩系数结果见表 3.

由表 3 可知,黑件高强度螺栓在未镀锌普通平板连接下的扭矩系数满足 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》表 6.3.1 要求(平均值 0.110 ~ 0.150,标准差不大于 0.010). 黑件高强度螺栓在未镀锌波纹板连接下的扭矩系数大于未镀锌平板,原因是高强度螺栓的螺帽与螺母不能与波纹板件紧密的贴合,所施加的预紧力不能均匀的传递到板接触面上. 热浸镀锌高强度螺栓在热浸镀锌板件下的扭矩系数明显大于未镀锌的试件,表明高强度螺栓在热浸镀锌后扭矩系数明显增大,但由于在测定过程中扭矩系数离散性较大,表 3 仅取其平均值分析.

表 3　扭矩系数测定结果

Tab. 3　Torque coefficient test results

试件类型	扭矩系数平均值	标准差
未镀锌平板	0.140	0.009
未镀锌波纹板	0.162	0.015
镀锌平板	0.201	0.007
镀锌波纹板	0.243	0.017

2.2　抗滑移系数试验

连接试件的抗滑移荷载及滑移量试验结果见表 4,每组试件的高强度螺栓分别施加预紧力规范值 P = 125 kN 的 50%、75%、100% 进行对比,试件所施加的扭矩根据式(1)计算. 抗滑移系数为:

表 4　抗滑移系数测试结果

Tab. 4　Anti-sliding coefficient test results

试件编号	预紧力/kN	热浸镀锌				试件编号	预紧力/kN	未镀锌			
		扭矩系数	滑移荷载/kN	滑移量/mm	抗滑移系数			扭矩系数	滑移荷载/kN	滑移量/mm	抗滑移系数
	62.50		12.8	2.50			62.50		27.9	2.40	
PP1Z	93.72	0.201	26.4	2.20		PP1	93.72	0.140	26.3	0.80	
	125.00		30.4	2.10	0.243		125.00		39.9	2.20	0.319
	62.50		13.9	2.00			62.50		20.1	0.90	
CP1Z	93.72	0.243	26.8	1.49		CP1	93.72	0.162	21.4	1.00	
	125.00		40.5	2.37	0.324		125.00		38.7	2.10	0.310
	62.50		20.1	1.10			62.50		24.6	2.91	
PP2Z	93.72	0.201	25.6	1.23		PP2	93.72	0.140	28.9	3.27	
	125.00		33.5	2.60	0.268		125.00		40.9	2.68	0.327
	62.50		20.1	3.17			62.50		28.6	4.02	
CP2Z	93.72	0.243	29.4	3.81		CP2	93.72	0.162	36.8	3.99	
	125.00		40.2	2.98	0.322		125.00		52.6	3.33	0.421
	62.50		18.6	2.68			62.50		22.1	1.62	
PP3Z	93.72	0.201	34.1	1.26		PP3	93.72	0.140	33.4	2.10	
	125.00		40.3	2.01	0.322		125.00		43.4	1.82	0.347
	62.50		21.2	0.38			62.50		26.0	1.21	
CP3Z	93.72	0.243	31.1	0.33		CP3	93.72	0.162	37.6	1.03	
	125.00		37.2	1.17	0.297		125.00		50.7	0.77	0.406
	62.50		22.3	0.56			62.50		20.8	1.63	
PP4Z	93.72	0.201	29.3	1.02		PP4	93.72	0.140	30.5	1.03	
	125.00		38.2	1.16	0.306		125.00		44.6	2.02	0.357
	62.50		19.7	1.32			62.50		18.9	2.03	
CP4Z	93.72	0.243	32.2	0.96		CP4	93.72	0.162	27.9	0.87	
	125.00		51.7	0.62	0.414		125.00		34.9	0.23	0.279

$$\mu = \frac{N_V}{n_f \sum_{i=1}^{m} P_i}, \tag{2}$$

式中:N_V 为试验测得的滑移荷载,kN; n_f 为摩擦面面数;$\sum_{i=1}^{m} P_i$ 为试件滑移一侧高强度螺栓预拉力之和,kN; P_t 为高强度螺栓预拉力实测值,kN; 试验时控制在 0.95 P ~ 1.05 P.

根据表 4 可看出抗滑移系数呈如下规律:

1)未镀锌的 PP1、PP2、PP3、PP4 试件的抗滑移系数平均值约为 0.34,满足中国 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》中 3.2.4 对 Q235 "钢丝刷清除浮锈或未处理的干净轧制表面"的抗滑移系数 0.30 的要求.

2)热浸镀锌试件的抗滑移系数总体上小于未镀锌试件,原因是板件经热浸镀锌后镀层光滑,板件之间的抗滑移系数减小.

3)同等条件下波纹试件的抗滑移系数总体上大于平板试件,原因是波纹试件中接触面是曲面,且凹凸垫片对抗滑移系数也有贡献.

2.3 连接试件试验

2.3.1 试验现象

试验过程中,试件的破坏模式分两种:孔壁承压破坏、螺杆剪切破坏. 无论波纹试件或平板试件,板厚为4、6 mm 试件均发生孔壁承压破坏(图7),板厚为8、10 mm 试件均发生螺杆剪切破坏(图8).

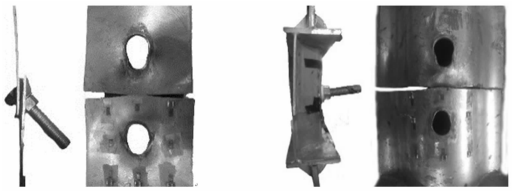


图7 孔壁承压破坏形态

Fig. 7 Bolt hole bearing failure

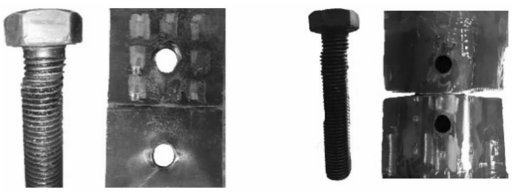


图8 螺杆剪切破坏形态

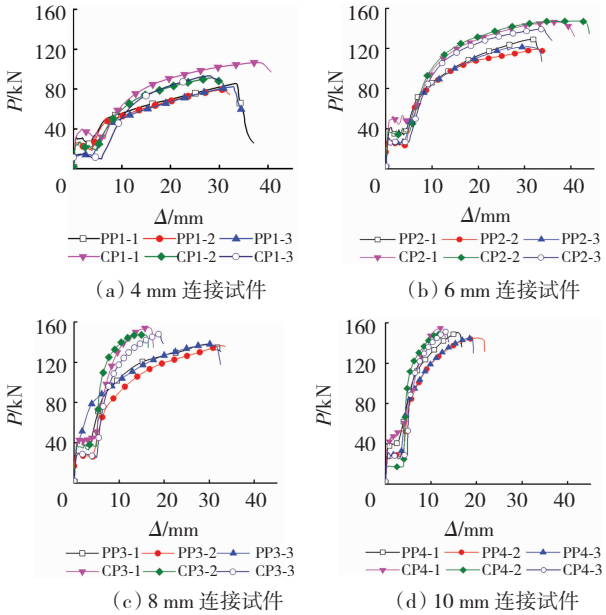
Fig. 8 Bolt shearing failure

连接试件的变形包括螺杆和孔壁之间的相互挤压变形、螺杆的剪切变形以及连接板的拉伸变形,其中后两项所占比例很小,可忽略不计. 观察试件孔径变形,平板试件孔径在横向、纵向均有明显变形,而波纹板试件沿纵向有明显变形. 平板试件在加载后期出现螺栓大幅度倾斜现象,导致试件破坏加速,而波纹板试件中螺栓未发生明显倾斜,表明波纹试件对于螺栓孔的变形约束能力大于平板试件.

2.3.2 荷载 – 位移曲线

图9 ~ 10 为普通试件及热浸镀锌试件的 $P-\Delta$ 曲线. 试件在发生孔壁承压破坏情况下,波纹板试件的极限承载力均大于同等条件下的平板试件,两者的极限位移基本相同;试件在发生螺杆剪切情况下,波纹板试件与平板试件的极限荷载基本相同,前者的极限位移小于后者.

试件极限承载力随板厚的增加而增加,当试件的破坏模式由孔壁承压破坏过渡到螺杆剪切破坏后极限承载力则趋于稳定不再增加. 对比同等条件下普通试件与热浸镀锌试件 $P-\Delta$ 曲线,可看出热浸镀锌对试件的极限承载力及极限位移均未有明显影响.

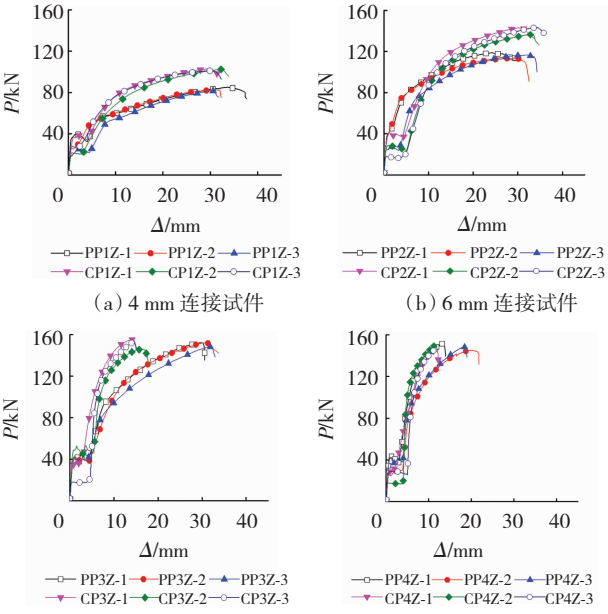


(a) 4 mm 连接试件 (b) 6 mm 连接试件

(c) 8 mm 连接试件 (d) 10 mm 连接试件

图9 普通连接试件荷载 – 位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of common connector



(a) 4 mm 连接试件 (b) 6 mm 连接试件

(c) 8 mm 连接试件 (d) 10 mm 连接试件

图10 镀锌连接试件荷载 – 位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of galvanized connector

2.3.3 受剪承载力

采用中国 JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》[11] 和美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构规范》[12] 进行承载力对比分析,比较计算中的差异,并对波纹板连接试件极限承载力设计计算提出建议.

1)《高层民用建筑钢结构技术规程》高强度螺栓连接极限承载力计算方法:

$$\text{抗剪承载力:}\ N_{vu}^{b} = 0.58 n_f A_e^{b} f_u^{b}, \tag{3}$$

$$\text{承压承载力:}\ N_{cu}^{b} = d\sum t f_{cu}^{b}. \tag{4}$$

式中:n_f 为螺栓连接的剪切面数量;A_e^b 为螺栓螺纹处的有效面积,mm^2;f_u^b 为螺栓钢材的抗拉强度最小

值,N/mm^2;f_{cu}^b 为螺栓连接板件的极限承压强度,N/mm^2;d 为螺杆直径,mm;$\sum t$ 为同一受力方向钢板厚度之和,mm.

2)美国《钢结构规范》高强度螺栓连接标准值的规定(承压计算时不考虑孔径变形对承载力的影响):

抗剪标准值: $R_n = F_n A_b$,　　(5)

承压标准值: $R_n = 3.0dtF_u$.　　(6)

式中:F_n 为螺栓的公称剪切强度,N/mm^2;A_b 为螺杆或螺纹处的公称面积,mm^2;F_u 为连接板材料规定最小抗拉强度,N/mm^2.

连接试件极限承载力试验结果见表 5、6:

1)试件无论镀锌与否,当发生孔壁承压破坏时,波纹板试件的极限承载力均比同等条件下平板试件极限承载力大 12% ~20%,原因在于波纹板试件破坏时,板件承压厚度为曲面厚度,增大了孔壁的承压能力. 而平板试件破坏时,板件承压厚度为同一受力方向钢板厚度之和;波纹板试件的极限位移大于平板试件的极限位移,原因在于加载过程中,孔壁承压处处于三向受压状态,而波纹板试件孔壁承压处由于螺母与板件贴合程度的不紧密,孔壁的约束减小.

试件发生螺杆剪切破坏时,平板试件与波纹板试件的极限承载力基本相同,前者的极限位移比后者大,约为 1.3 ~1.7 倍. 原因是试件发生螺杆剪切破坏时,螺杆剪切面积基本相同,故极限承载力基本相同;平板刚度较波纹板小,因而变形较大.

2)试验中对每组 3 个试件的高强度螺栓分别施加规范规定预紧力的 50%、75%、100%,试验结果表明同组试件在不同预紧力下试件极限承载力差别不大,原因在于高强度螺栓连接件的连接形式由摩擦型转为承压型后,预紧力对于板件在横向受力已无影响.

3)由于热浸镀锌板件与普通板件的材料抗拉强度差别不大(见表 2),对比表 5、6 试验极限承载力平均值可看出热浸镀锌板试件与未镀锌板试件在极限承载力上也差别不大,因此热浸镀锌对试件受剪承载力影响不大.

4)JGJ 99—2015 计算结果表明,对 4、6 mm 试件破坏模式分析是正确的,对 8 mm 试件的理论分析破坏模式与实际情况不符. 剪切破坏时承载力计算值比试验值小约 10% ~19%,承压破坏时比试验结果小很多,表明对承压破坏模式规范计算过于保守. 美国 ANSI/AISC 360—16 对各类型试件的破坏模式预测正确,剪切破坏时承载力计算与试验结果很接近,但承压破坏时计算承载力偏大,偏于不安全. 因此,波纹板高强度螺栓连接的承载力可偏于安全地按中国规范 JGJ 99—2015 计算.

表 5　镀锌连接试件试验与规范承载力

Tab. 5　Galvanized connection test and standard ultimate bearing capacity

试件编号	JGJ 99—2015 ①		ANSI/AISC 360—16 ②		$\overline{P}_{ut}$/kN	$\overline{\Delta}_u$/mm	$\frac{①}{\overline{P}_{ut}}$	$\frac{②}{\overline{P}_{ut}}$	破坏模式
	N_{vu}^b/kN	N_{cu}^b/kN	R_{n1}/kN	R_{n2}/kN					
PP1Z	122	46.1	143.8	92.2	83.1	31.7	0.555	1.110	承压破坏
PP2Z	122	70.2	143.8	140.4	126.5	28.3	0.555	1.110	承压破坏
PP3Z	122	92.9	143.8	185.8	144.2	29.2	0.846	0.997	剪切破坏
PP4Z	122	134.4	143.8	268.8	150.4	12.5	0.811	0.956	剪切破坏
CP1Z	122	46.1	143.8	92.2	102.1	30.3	0.452	0.903	承压破坏
CP2Z	122	70.2	143.8	140.4	141.0	32.8	0.497	0.995	承压破坏
CP3Z	122	92.9	143.8	185.8	145.9	15.4	0.836	0.985	剪切破坏
CP4Z	122	134.4	143.8	268.8	141.7	11.6	0.861	1.014	剪切破坏

注:$\overline{P}_{ut}$、$\overline{\Delta}_u$ 为同组试件试验极限承载力平均值、试验位移平均值;R_{n1}、R_{n2} 为 ANSI/AISC 360—16 抗剪承载力标准值、承压承载力标准值. 承载力计算值取与试验破坏模式对应的值.

表 6　普通连接试件试验与规范承载力

Tab. 6　Common connection test and standard ultimate bearing capacity

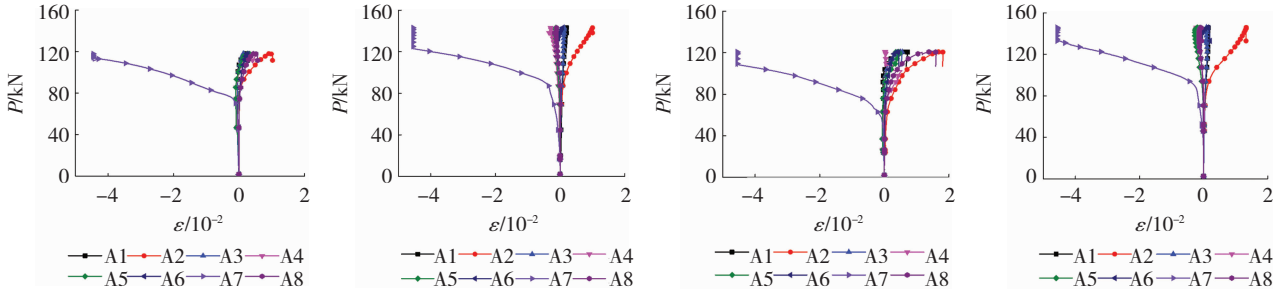
试件编号	JGJ 99—2015 ①		ANSI/AISC 360—16 ②		$\overline{P}_{ut}$/kN	$\overline{\Delta}_u$/mm	$\frac{①}{\overline{P}_{ut}}$	$\frac{②}{\overline{P}_{ut}}$	破坏模式
	N_{vu}^b/kN	N_{cu}^b/kN	R_{n1}/kN	R_{n2}/kN					
PP1	122	47.2	143.8	93.1	82.4	31.7	0.573	1.129	承压破坏
PP2	122	73.1	143.8	143.3	126.1	31.3	0.579	1.136	承压破坏
PP3	122	93.8	143.8	187.2	148.5	30.5	0.822	0.968	剪切破坏
PP4	122	132.6	143.8	264.0	150.4	16.2	0.811	0.956	剪切破坏
CP1	122	47.2	143.8	93.1	97.1	31.3	0.486	0.958	承压破坏
CP2	122	73.1	143.8	143.3	144.3	34.7	0.507	0.993	承压破坏
CP3	122	93.8	143.8	187.2	153.8	17.2	0.793	0.935	剪切破坏
CP4	122	132.6	143.8	264.0	159.6	12.3	0.764	0.901	剪切破坏

2.3.4　荷载 - 应变曲线

图 11 ~12 为 6、8 mm 试件的荷载 - 应变曲线,曲线中 A7(最大受压处)测点突然出现垂直上升的原因是 A7 处的应变片在拐点处已达到量程,但此

时试件并未到达极限状态,因为拐点所对应的荷载小于其他测点曲线拐点对应的荷载.

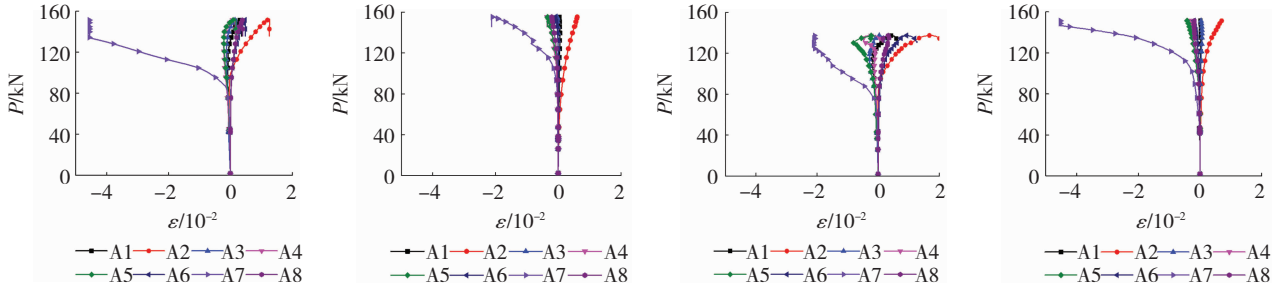
对比平板试件与波纹板试件各测点应变值,A7测点曲线在应变较小时出现弯折表示此处板件进入屈服阶段,此时波纹板试件所受外部荷载大于平板试件. 平板试件各测点应变值均大于同等条件波纹板试件,表明平板试件孔径的变形较大,而波纹板试件对孔径变形的约束能力较强,原因是波纹板试件在波纹方向(纵向)有较大的柔度,在垂直波纹方向(横向)有较大的刚度.



(a) PP2Z-1 (b) CP2Z-1 (c) PP2-1 (d) CP2-1

图 11 6 mm 板件荷载 - 应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of 6 mm connector



(a) PP3Z-1 (b) CP3Z-1 (c) PP3-1 (d) CP3-1

图 12 8 mm 板件荷载 - 应变曲线

Fig. 12 Load-strain curves of 8 mm connector

3 结 论

1)材性试验结果表明,热浸镀锌对板件的屈服应力有明显的提高,对抗拉强度基本无影响. 热浸镀锌板件的弹性模量小于未镀锌板件,说明板件经热浸镀锌处理后抵抗变形能力降低.

2)黑件高强度螺栓经热浸镀锌后,扭矩系数平均值及离散性均较大,影响构件连接可靠度. 板件经热浸镀锌后抗滑移系数明显减小,工程设计中构件若按摩擦型连接设计应考虑抗滑移系数的降低.

3)无论连接试件镀锌与否,当试件发生孔壁承压破坏时,同种厚度的平板连接试件极限承载力小于波纹板连接试件,两者极限位移相差不大. 当试件发生螺杆剪切破坏时,两者极限承载力基本相同,波纹板试件的极限位移小于同等条件下的平板试件.

4)对于波纹钢板连接试件的极限承载力理论计算,若按美国 ANSI/AISC 360—16 计算虽接近真实值,但发生承压破坏时偏于不安全,因此建议偏安全地按中国规范 JGJ 99—2015 计算.

参考文献

[1] 张永浩. 金属波纹板螺栓连接受力性能分析与试验研[D]. 南京:东南大学, 2010

[2] LEE J K, HO C D, YANG Y T. Seam strength of corrugated plate with high strength steel [J]. Archives of Institute of Civil Engineering, 2007, Nr1: 129 - 143

[3] 尹凌峰, 张永浩, 唐敢, 等. 波纹板螺栓连接受力性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 124

[4] KIM S, LEE J. Numerical evaluation of deep corrugated steel plate seam strength[J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(2): 315

[5] 张威. 波纹板在拉伸载荷下的力学性能研究[D]. 扬州:扬州大学,2016

[6] Standard practice for structural design of corrugated steel pipe, pipe-arches, and arches for storm and sanitary sewers and other buried applications: ASTM A796/A796M—2010[S]. Maine: American Society of Materials and Tests, 2010

[7] 冷弯波纹钢管: GB/T 34567—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017

[8] 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011

[9] 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010

[10] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017

[11] 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015

[12] Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360—16 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016

(编辑 赵丽莹)