

# 波纹钢板搭接螺栓连接承载力试验研究与计算分析

杨明, 段宝山

(中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**为研究波纹钢板搭接螺栓受力破坏模式与合理的计算方法, 该文对 11 组波纹钢板进行抗压试验, 并按不同国家规范计算分析。研究发现: 波纹钢板搭接螺栓试件连接破坏形式主要表现为栓孔的承压破坏而非螺栓的剪切破坏, 螺栓数量越多, 波纹板破坏位移越小, 易呈现脆性破坏, 延性越差; 采用中国规范计算的破坏荷载相对于美国规范和澳洲规范而言较保守, 对于波长为 380 mm 的波纹板, 中国标准计算值与实测值更接近, 美国规范对 8 mm 板的估计值与实测值较接近, 而澳洲规范计算的值比实测值大, 计算结果偏于不安全。

**关键词:**波纹钢板; 螺栓连接强度; 中国规范; 美国规范; 澳洲规范

波纹钢埋置式桥涵作为一种新型结构, 具有良好的变形适应能力, 在多年冻土、膨胀土、软土、湿陷性黄土等不良地质条件以及高填方路段得到广泛应用。早在 19 世纪末, 国外已有广泛的应用, 近年来中国也开始逐渐推广, 但中国研究比较滞后, 尤其是作为此结构关键设计内容的高强螺栓连接设计, 目前中国既没有统一的设计标准, 现有的各种设计方法也存在明显的不足。

波纹钢板采用高强螺栓连接时, 由于承受弯矩、波纹贴合不紧等因素, 接缝受力模式和平钢板高强螺栓连接具有一定的差异<sup>[1]</sup>。目前国外均采用试验数据作为波纹钢板高强螺栓连接设计的依据<sup>[2-3]</sup>, 中国尚无足够的试验数据支撑, 因此通常照搬国外的螺栓布置形式和试验数据, 或者采用中国 GB 50017—2017《钢结构设计标准》<sup>[4]</sup>进行设计。

由于国内外钢材型号、螺栓型号等方面的不同, 完全采用国外的试验数据将面临巨大的风险; 采用中国 GB 50017—2017《钢结构设计标准》设计时, 其中仅对平钢板螺栓连接进行了规定, 无波纹钢螺栓连接计算内容, 而且研究表明中国 GB 50017—2017《钢结构设计标准》对于平钢板高强螺栓连接计算出的承载力与国外规范相比较为保守, 约为国外规范的 1/2<sup>[5-9]</sup>, 采用此方法势必造成一定的浪费。

基于以上分析, 为了探索波纹钢高强螺栓连接的工程设计方法, 该文以波形尺寸、钢板厚度、螺栓个数为参数, 开展波纹钢搭接高强螺栓连接的试验研究, 并

采用中美澳 3 国规范进行计算对比分析。

## 1 试验设计

### 1.1 试验组编号与参数

波纹钢高强螺栓连接如图 1 所示。依照目前中国企业通用标准, 试验拟采用 3 种不同波形的波纹钢板: 小波形 150 mm×50 mm、200 mm×55 mm, 大波形 380 mm×140 mm, 并考虑两种不同厚度: 5 mm 和 8 mm, 每个波长的螺栓数量参考文献[10—13]中的常用工程设计, 螺栓栓杆直径采用 M20 和 M24 两种。

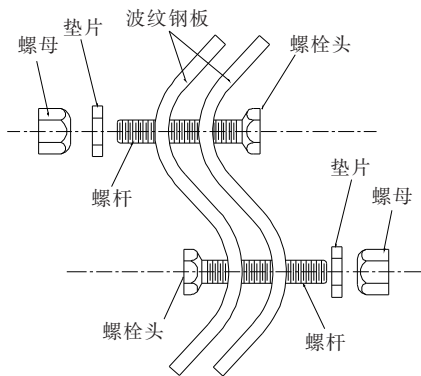


图 1 波纹钢螺栓连接示意图

螺栓个数方面, 参考国内外标准和实际工程结构通用做法, 小波形板件定为每波纹 2 个、3 个或者 4 个螺栓, 大波形板件采用每波纹 6 个螺栓。

试验中所用试件考虑因子数为 4, 根据实际工程

设计需要,每个因素水平数不等,同时参照文献[6]对于每组最少 3 个试件的数量规定,共计需制作 33 个试件,其中 30 个试件带防水垫和密封胶,CO200-5-4 组的 3 个试件为不做任何密封处理的对比试件。

对于材料的选用及构造设置,波纹钢板钢材采用 Q345 钢,要求所有用于制作试件的钢波纹管为同一生产批次产品;高强螺栓选用 S10.9 级 M20、M24 高强螺栓,试件的编号和相关参数见表 1。

表 1 试件参数

波形/ (mm×mm)	T 试件组	板厚/ mm	每波长 螺栓数	螺栓 型号
150×50	150-5-2	5	2	M20
	150-5-3		3	
	150-5-4		4	
	150-8-4	8	4	
	200-5-2	5	2	
200×55	200-5-3		3	M20
	200-5-4		4	
	CO200-5-4		4	
	200-8-4	8	4	
380×140	380-5-6	5	6	M24
	380-8-6	8	6	

注:试件组编号规则:波长(mm)-板厚(mm)-每波长螺栓数;CO 表示对比试件。

1.2 构造设置

对于小波形试件(150 mm×50 mm 及 200 mm×55 mm 波形),横向长度要求每块波纹板采用 2 个波长,纵向长度为 300 mm,最外排螺栓孔中心距波纹板边缘间距为 38 mm,栓孔纵向间距(孔中心距)为 50 mm,栓孔直径宜比螺栓杆直径大 1.5 mm,横向波峰波谷各设置 2 颗 M20 螺栓,对于每波长 3 颗螺栓的试件,可在每波长 4 颗螺栓的试件基础上,每个波峰位置减少 1 颗;对于每波长 2 颗螺栓的试件,可在每波长 4 颗螺栓的试件基础上,每波峰波谷位置各减少 1 颗,使波峰波谷螺栓成错位布置,如图 2(a)所示。

对于大波形试件(380 mm×140 mm 波形),横向长度要求每块波纹钢板采用 2 个波长,纵向长度为 500 mm,最外排螺栓孔中心距波纹板边缘间距为 38 mm,栓孔纵向间距(孔中心距)为 76 mm,横向波峰波谷各设置 3 颗 M20/M24 螺栓,如图 2(b)所示。

试验前需采用扭矩扳手对试件的所有螺栓逐一检

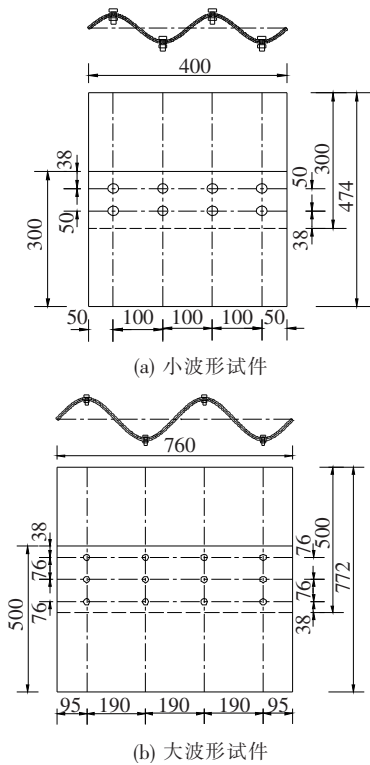


图 2 波形试件尺寸及栓孔布置(单位:mm)

查,保证每颗螺栓的扭矩不小于 220 N·m。构件采用镀锌波纹钢板制作,除对比组 CO200-5-4 试件,其接缝处不进行任何处理之外,其他试件接缝处设置防水密封垫及密封胶;构件的加工要求满足 GB 50755-2012《钢结构工程施工规范》的相关要求。构件的轴向加载需要通过一个钢制端夹具实现,端夹具要求采用 20 mm 平钢板加工成型,分为顶板、左侧支撑板和右侧支撑板 3 部分,支撑板需设置加劲肋板,支撑板同顶板之间采用 M24 高强螺栓连接。

1.3 试验方案

试件安装时,先将试件竖立于底部夹具中心线位置,试件底部夹具夹紧,然后放置顶部夹具并夹紧,校核中心线位置保证加载不偏心,然后采用液压伺服作动器进行加载,小波形试件每 3 t 为一荷载步,单调加载;大波形试件每 5 t 为一荷载步,单调加载,控制加载速率不超过 1 t/min。每加载一个荷载步,读取并记录压力传感器荷载值和两个指针位移计位移值,观察试验过程中钢板的变形情况,出现大偏心大变形则停止加载。根据试验要求,需读取试件的轴向压缩变形,因此需在上夹具处设置一处指针式位移计,位移计台座磁吸安置于下夹具平钢板上,以消除台座沉降的影响,加载布置方案如图 3 所示。

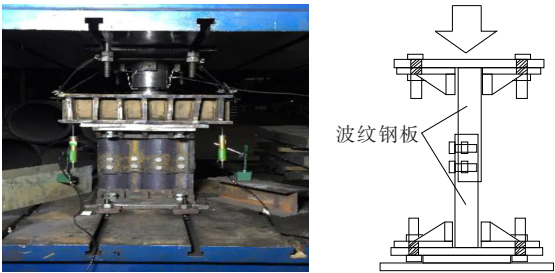


图 3 试验加载方案

2 试验现象与结论

2.1 试件破坏模式

试件的典型破坏形态表现为螺栓剪断、栓孔拉长或钢板屈曲,如图 4 所示。同时根据试验结果,整理出各组试件破坏荷载和主要破坏形式如表 2 所示。

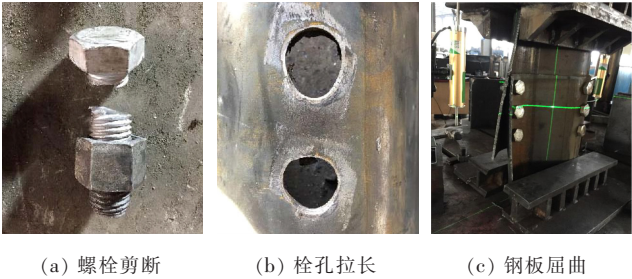


图 4 试件典型破坏形态

表 2 试件的破坏荷载和主要破坏形式

试件编号	极限荷载/kN	极限位移/mm	破坏形态
150-5-2	464.6	9.48	钢板压曲,栓孔拉长
150-5-3	533.3	5.83	钢板压曲
150-5-4	605.6	6.80	钢板压曲
150-8-4	1 058.4	7.88	1 个螺栓剪断,其余栓孔拉长
200-5-2	362.6	10.75	栓孔拉长
200-5-3	410.9	9.60	钢板压曲,栓孔拉长
200-5-4	543.7	7.90	钢板屈曲,栓孔拉长
200-8-4	992.7	5.89	两个螺栓剪断,其余螺栓不同程度损坏
380-5-6	831.5	8.78	钢板屈曲,栓孔拉长
380-8-6	1 259.7	10.05	钢板屈曲,栓孔拉长

由表 2 可以看出:10 组试件中有 7 组试件的破坏形式表现为板件屈曲;7 组试件表现为栓孔拉长(其中 150-8-4 组有 1 个试件出现螺栓剪断);仅 3 个试件

表现为螺栓本身被剪断。众多试件中,仅小波形 8 mm 厚度时,个别螺栓才出现剪断现象。

由此可见,波纹钢板搭接螺栓试件连接破坏形式主要表现为栓孔的承压破坏或钢板的屈曲破坏,而非螺栓的剪切破坏,进而说明目前中国国内设计的高强螺栓安全富余度较大。

2.2 相同破坏形态试件荷载一位移关系

为分析相同破坏形态试件的力学行为,分别选取 3 个同种破坏形态试件进行荷载位移曲线分析。试验试件主要破坏形态表现为栓孔拉长或钢板屈曲,为分析这两种破坏形态下不同试件螺栓力学性能差异,分别选取 3 个板厚相同典型破坏试件绘制荷载一位移图如图 5、6 所示。而螺栓剪切破坏的试件只有 3 个,因此直接绘制荷载一位移图,如图 7 所示。

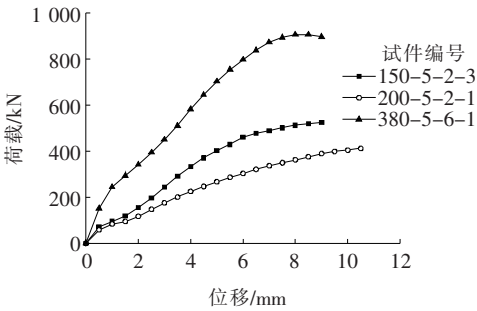


图 5 栓孔拉长试件的荷载一位移曲线

从图 5 可以看出:随着试件波长增大,荷载一位移曲线斜率提高,弹性阶段增长,与栓孔拉长对应的荷载位移曲线在破坏时为平稳段,无明显荷载下降的突变,破坏时位移较大,属于延性破坏,且均发生在板厚较小的试件中。

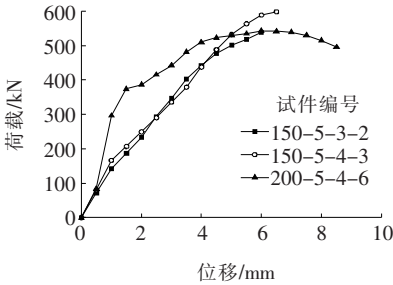


图 6 钢板屈曲对应的荷载一位移曲线

从图 6 可以看出:与钢板屈曲对应的荷载一位移曲线离散性较大,一些试件在肉眼观察到屈曲破坏时无明显荷载下降,也无平稳延伸,而一些试件出现荷载下降,位移增大,此次试验中大部分试件都属于钢板屈曲破坏形态。

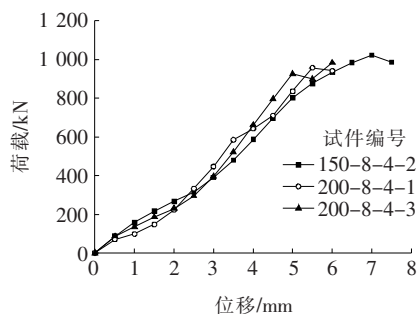


图7 螺栓剪断试件的荷载—位移曲线

从图7可以看出:与螺栓剪断对应的试件荷载—位移曲线在破坏时有一个明显的荷载下降的突变,破坏时位移不大,属于脆性破坏,且均发生在板厚为8 mm的试件中,螺栓型号均为M20。

### 2.3 同种波形试件荷载—位移关系

为分析板厚、螺栓数量对同种波形试件力学性能的影响,将不同板厚或螺栓数量3种波形试件的荷载—位移曲线分别描述如图8~10所示。

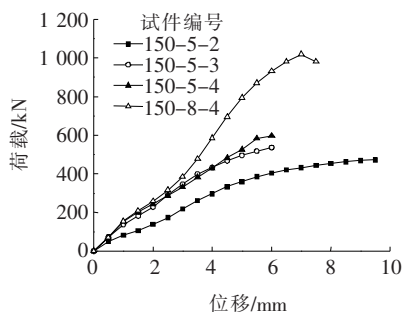


图8 150 mm×50 mm 波形试件组荷载—位移曲线

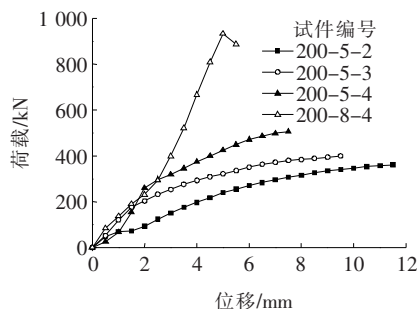


图9 200 mm×55 mm 波形试件组荷载—位移曲线

从图8~10可以看出:对于同种波形试件,随板厚和螺栓数量的增加,试件组荷载—位移曲线斜率均提高,且板厚的影响较为明显。分析原因是:板厚与螺栓数量的增加均能提高试件破坏荷载,但板厚的增加提高了试件刚度。

可见,对于同种波形试件,相同螺栓数的条件下,

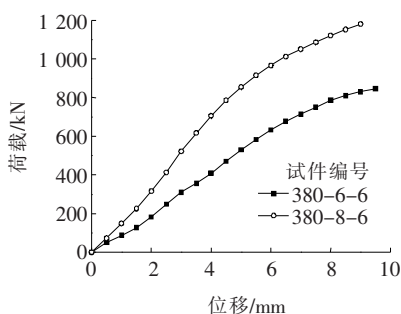


图10 380 mm×140 mm 波形试件组荷载—位移曲线

波形板厚度越大,试件承载力越高;而相同板厚的条件下,螺栓数越多,承载力越高。对于小波形试件组,螺栓破坏时位移较小,属于脆性破坏。

## 3 各国规范计算值与试验值对比

分别应用中国 GB 50017—2017《钢结构设计标准》、AISC 360—10(美国钢结构规范)、AS 4100—1998(澳洲钢结构规范)计算连接的理论极限承载力,分别列出如表3所示。

由表3可以看出:各国规范按照平钢板计算出的高强螺栓连接承载力与波纹形式无关;当钢板厚度一致时,承载力计算值随螺栓数量增加。当螺栓数量相同时,中国规范计算值随板厚逐渐增加,国外规范在板厚较大时有上限值。中外计算值对比可知:在板厚较小时,国外规范计算值普遍比中国规范计算值大60%以上,分析原因主要在于中国规范对于螺栓面积和设计强度的取值小于国外标准,且设计时采用的分项系数也有差别。但板厚较大时,中外规范计算值则较为接近。

对于试验值,承载力不仅随螺栓数量逐渐增加,也随波纹板的厚度逐渐增加。通过150 mm×50 mm与200 mm×55 mm两种波形实测值对比,相同板厚、螺栓数量情况下,承载力随着波形增大逐渐降低。

通过中外规范计算值与实测值的对比,对于小波形波纹钢板螺栓连接,中国规范计算值远小于实测值,仅为实测值的一半左右,但在大波形中,中国规范与实测值吻合较好,说明中国规范在进行小波形螺栓设计时,具有较大的优化空间。对于国外规范,规范计算值与实测值较为接近,但离散性较大,存在多个试件承载力计算值小于测试值的情况,对于380-5-6试件计算结果,美国和澳大利亚规范计算值均比实测值大很多,偏于不安全。



表 3 实测值与 3 种规范计算值的对比

波形/ (mm×mm)	试件编号	计算值/kN			实测值/ kN	计算值/实测值		
		中国规范	美国规范	澳洲规范		中国规范	美国规范	澳洲规范
小波形	150—5—2	156.667	261.317	313.646	464.550	0.34	0.56	0.68
	150—5—3	235.000	391.975	467.469	533.306	0.44	0.73	0.88
	150—5—4	313.333	522.634	623.291	605.625	0.52	0.86	1.03
	150—8—4	629.333	584.634	623.291	1 058.419	0.59	0.55	0.59
	200—5—2	156.667	261.975	311.646	362.604	0.43	0.72	0.86
	200—5—3	235.000	391.975	467.469	410.935	0.57	0.95	1.14
	200—5—4	313.333	522.634	623.291	543.664	0.58	0.96	1.15
	200—8—4	629.333	584.336	623.291	992.729	0.63	0.59	0.63
大波形	380—5—6	849.600	1 262.165	1 346.310	831.488	1.02	1.52	1.62
	380—8—6	1 132.800	1 262.165	1 346.310	1 259.700	0.90	1.00	1.07

4 结 论

(1) 试验中试件的破坏形式主要是以板件屈曲和栓孔拉长为主,只有极少数是螺栓的剪切破坏,即波纹钢板搭接螺栓试件连接破坏形式主要表现为栓孔的承压破坏而非螺栓的剪切破坏。

(2) 通过对试验结果分析发现,相同板厚条件下,螺栓数越多,承载力越高,破坏荷载越大,但是破坏时的位移越小,呈现脆性破坏,延性较差。相同螺栓数的条件下,板厚越大,承载力越高。

(3) 通过试验值与中外规范设计值的对比分析可知,按照国外规范进行波纹钢高强螺栓设计具有较大的风险;中国规范对于小波形的承载力计算值较为保守,具有较大的优化设计空间,对于大波形的计算值则与实测值更接近。考虑到中国钢结构规范与国外计算理念的区别,以及小波形波纹钢采用较大板厚时偶有螺栓剪断的破坏模式发生,建议可根据中国钢结构规范的方法进行波纹钢板高强螺栓连接的设计。

参考文献:

[1] 马森,赵启林. 复合材料波纹夹芯板成型工艺及其端部连接性能研究[J]. 工业建筑,2018,48(11):182—186.

[2] Corrugated Steel Pipe Institute. Handbook of Steel Drainage& Highway Construction Products[M]. Ontario, Canada: Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute,2007.

[3] Hong S O, Nam K W. Verification on the Compressive Behavior of Corrugated Steel Plates due to Details of Bolted Lap Joint[J]. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection,2012,16(1):9—17.

[4] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].

[5] YB/T 5327—2006 冷弯波形钢板[S].

[6] 卢傲,杜细春,段宝山. 波纹钢埋置式结构螺栓连接强度的中美试验值和设计值对比分析[J]. 中外公路,2018,38(4):160—163.

[7] Scottish Executive Development Department. Design of Corrugated Steel Buried Structures with Spans Greater Than 0.9 Metres and up to 8.0 Metres[S]. Ireland: Transport infrastructure Ireland,2002.

[8] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. Washington, American: American Association of State Highway and Transportation Officials,2010.

[9] 刘源泉. 中美钢结构用高强度螺栓及其连接的比较[J]. 钢结构,2013,28(1):59—65.

[10] JGJ 82—2011 钢结构高强度螺栓连接技术规程[S].

[11] ANSI/AISC 360—16, Specification for Structural Steel Buildings[S]. Chicago, American: American Institute of Steel Construction,2010.

[12] A449, Standard Specification for Quenched and Tempered Steel Bolts and Studs[S]. West Conshohocken, American: American Society for Testing and Materials, 2000.

[13] AS 4100—1998, Australian Standard Steel Structures [S]. Homebush, Australia: Standards Association of Australia,1998.