DOI:10.11918/201905223

波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接承载力数值分析

苏明周[1,2],赵 凯[1]

(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)

摘 要: 为研究波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接承载力,建立ABAQUS有限元模型,探讨了端距、螺栓预拉力、波形对波纹板连接件承载力的影响.结果表明:为保证板件端部不被剪断,波纹板连接件的端距应不小于$3d_0$;当波纹板连接件发生孔壁承压破坏时,承载力随预拉力的增加而增加,承载力计算公式建议按中国平板连接计算公式乘以1.1的增大系数考虑;当发生螺杆剪切破坏时,预拉力对承载力影响较小,波纹板连接件承载力按平板连接计算公式计算.

关键词: 波纹钢板;纵向接缝;孔壁承压;螺杆剪切;承载力

中图分类号: TU391;TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)08-0192-09

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

SU Mingzhou[1,2], ZHAO Kai[1]

(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)

Abstract: To study the bearing capacity of high strength bolt connection for longitudinal seam of corrugated steel plates (CSPs), finite element models of test specimens were established by ABAQUS software. Influences of end distance, bolt preloading, and waveform of high strength bolt on the bearing capacity of CSP connection were discussed. Results show that the end distance of CSP connectors should be larger than $3d_0$ to avoid the shear fracture of the plate end. When bearing failure at bolt hole occurred, the bearing capacity gradually increased with the increase of bolt preloading. The calculation formula of the bearing capacity of CSP connectors was suggested to be multiplied by the increase factor of 1.1 on the basis of the calculation formula of China for calculating flat plate connectors. When bolt shearing failure occurred, bolt preloading had little effect on bearing capacity, and the calculation formula of the bearing capacity of CSP connectors could be calculated as that of flat plate connectors.

Keywords: corrugated steel plate; longitudinal seam; bearing failure; bolt shearing; bearing capacity

1787年波纹钢板诞生于英国[1],随着科学技术的发展,波纹钢板作为一种特殊结构形式被主要应用于矿山、冶金、化工、污染等领域的涵洞、地下管道、储存工程[2].波纹钢板结构具有良好的受力性能和位移补偿特征,单位面积钢波纹板的惯性矩、截面模量、回转半径远大于平板,具有较强的抗弯能力和抗压能力[3].波纹的存在使局部力的传递方向及变形趋势发生改变,减小局部应力集中现象,起到分散作用[4].

目前,国内外学者对波纹钢板结构研究大多针对整体受力性能,对波纹钢板高强度螺栓连接承载力研究较少,缺少连接承载力的计算方法.现行规范中,美国ASTM A796/A796M—2010[5]设计标准以列表形式给出现有拼装波纹板连接件在具体构造下的承载力,不便于工程设计采用;加拿大《Canadian highway bridge design code》[6]规范中提到埋置式波纹管接缝强度验算按加拿大《Steel structures for buildings》[7]中平板连接计算;中国GB/T 34567—2017《冷弯波纹钢管》[8]中对冷弯波纹钢管进行了分类并在设计和连接上提出相应的规定,但并未给出连接承载力的计算方法.中国大多数学者在验算波纹钢管螺栓连接接缝强度时,一直采用平板连接计算公式,未考虑波纹板与平板受力性能的差异[9-12].

本文基于本课题组前期试验研究成果[13],采用ABAQUS软件建立有限元模型,并以端距、螺栓预拉力、波形为参数,探讨影响波纹板连接件承载力的因素,深入了解波纹板连接件的受力机理,提出波纹板连接承载力计算方法,为工程应用提供设计建议.

1 有限元建模

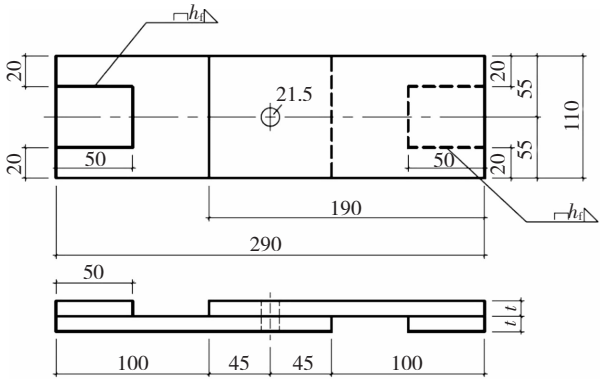
有限元模型采用文献[13]中平板试件和波纹

收稿日期: 2019-05-28
基金项目: 国家自然科学基金(51978564);
陕西省自然科学基础研究计划(2018JM5079)
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

板试件(见图 1、2),具体试件参数见文献[13]. 有无螺纹对高强度螺栓的抗剪承载力基本无影响[14],故高强度螺栓模型忽略螺纹的存在.

1.1　材料本构关系

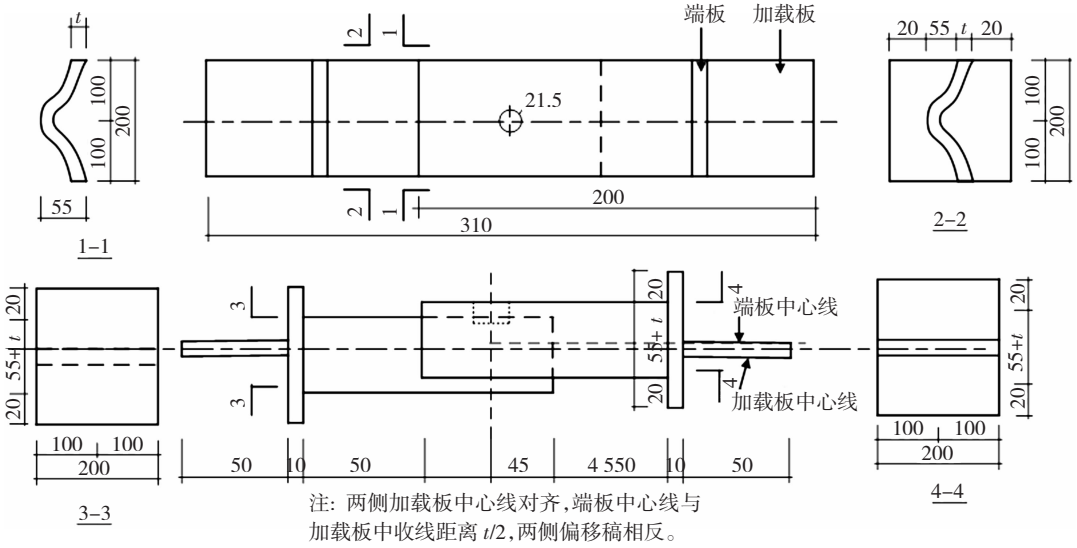
有限元模型中钢材应力 - 应变关系采用"双折线"模型(见图 3(a)),对应的参数设置依据板材的材性试验结果,有限元分析中将板材极限应变与抗拉强度试验名义值均转换为真实值(见表 1). 表中 CP 代表波纹板试件,PP 代表平板试件,平板试件与波纹板试件材性试样相同. 由于螺栓一般由中碳钢或低合金钢经热处理后制成,强度较高,其应力 - 应变曲线没有较大的流幅,故螺栓应力 - 应变关系采用"理想弹塑性"模型(见图 3(b)), 未考虑其强化能力[2],$f_y = 664$ MPa、$E = 2.06 \times 10^5$.



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

图 1　平板连接试件简图(mm)

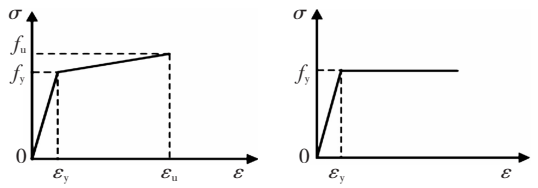
Fig. 1　Flat plate connector specimen(mm)



注: 两侧加载板中心线对齐,端板中心线与加载板中收线距离 t/2,两侧偏移稿相反。

图 2　波形板连接试件简图(mm)

Fig. 2　Corrugated plate connector specimen (mm)



(a) 连接板　　(b) 螺栓

图 3　材料应力 - 应变关系曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of materials

表 1　有限元材性取值

Tab. 1　Material properties of model

试样编号	板厚/mm	屈服应力 σ_y/MPa	弹性模量 $E/10^5$ MPa	极限应变真实值 ε_u	抗拉强度真实值 σ_u/MPa
CP1/PP1	4	287.2	1.95	0.173	461.1
CP2/PP2	6	283.6	1.99	0.154	484.1
CP3/PP3	8	258.3	2.05	0.195	478.2
CP4/PP4	10	319.4	2.24	0.136	508.5

1.2　单元类型及网格划分

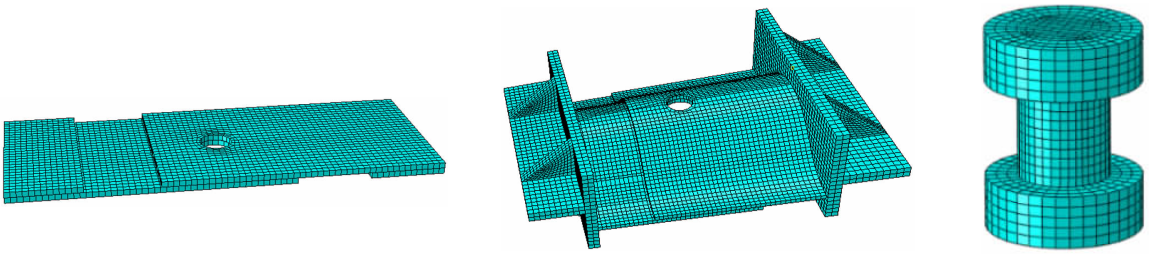
连接件模型选用八节点减缩积分的一阶三维实体单元 C3D8R 进行模拟,该单元适用于接触分析,可以考虑材料非线性,计算结果较精确. 连接件网格划分采用扫略式方法,此方法对于不规则模型易得到形状规则的单元. 由于高强度螺栓及栓孔处易发生应力集中,故连接件整体种子尺寸取 4 mm,螺栓及栓孔局部种子尺寸取 3 mm. 网格划分情况见图 4.

1.3　相互作用

模型中的接触均采用面面接触,法向接触定义为硬接触,切向接触定义为库伦摩擦接触[15]. 抗滑移系数根据试验结果取值,平板试件、波纹板试件的抗滑移系数试验值分别为 0.34 和 0.36.

1.4　边界条件及加载方式

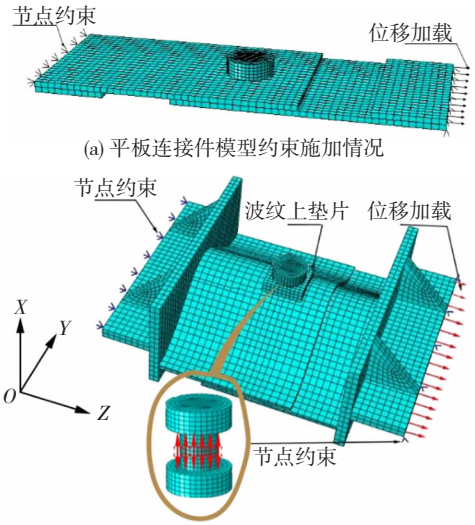
连接板模型左侧端面为固定约束,右侧端面 Z 向施加位移进行加载,限制其他 5 个方向自由度. 高强度螺栓预拉力通过施加紧固力实现,即在螺栓横截面上施加荷载控制预拉力大小,螺栓长度不发生改变,对于 8.8 级 M20 高强度螺栓,模型验证时取预拉力 P = 125 kN,对应试验试件为 PPX - 3/CPX - 3. 整体模型约束施加情况见图 5.



(a) 平板连接板 (b) 波纹板连接板 (c) 高强度螺栓

图 4 模型网格划分

Fig. 4 Finite element model meshing



(a) 平板连接件模型约束施加情况

(b) 波纹板连接件模型约束施加情况

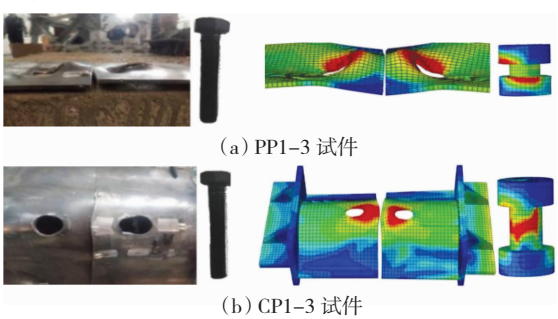
图 5 模型边界条件

Fig. 5 Boundary conditions of model

2 有限元模型验证

2.1 破坏模式对比

因板厚 4 mm 与 6 mm 连接件、8 mm 与 10 mm 连接件具有相似的变形特征和破坏形态，此处仅以板厚 4、8 mm 连接件为例进行有限元与试验结果对比. 图 6 为板厚 4 mm 试件破坏模式对比图，PP1 – 3 模型孔壁周边发生较大程度的鼓曲并有大范围环状屈服区域，栓孔被拉长，与试验结果相吻合. CP1 – 3 试件模型孔壁四周应力沿连接件横向呈带状分布，屈服区域延伸至板件边缘. 提取 CP1 – 3 模型端部单元应变值，已达到极限应变，可判断板件端部发生剪断，与试验破坏模式相同.



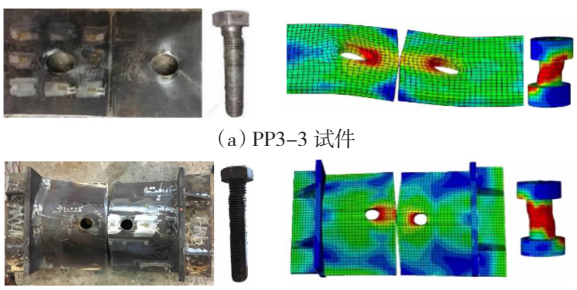
(a) PP1–3 试件

(b) CP1–3 试件

图 6 板厚 4 mm 试件对比

Comparison of failure modes of 4 mm connectors

图 7 为板厚 8 mm 试件破坏模式对比图，PP3 – 3 和 CP3 – 3 试件破坏模式均为螺杆剪切破坏，栓孔变形较小，螺杆发生较大剪切变形. PP3 – 3 试件模型破坏时板件距端部约 55 mm 范围内整体翘曲，未发生孔壁周边小范围凸起现象，与试验现象相同. CP3 – 3 试件模型孔壁处仅发生小面积屈服，螺杆因产生较大区域剪切屈服而破坏，与试验现象吻合良好.



(a) PP3–3 试件

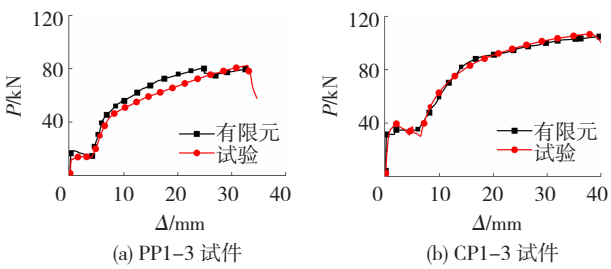
(b) CP3–3 试件

图 7 板厚 8 mm 试件对比

Fig. 7 Comparison of failure modes of 8 mm connectors

2.2 荷载 – 位移曲线对比

CP1 – 3 ~ CP4 – 3、PP1 – 3 ~ PP4 – 3 试件荷载 – 位移曲线的有限元与试验结果对比见图 8 ~ 11.



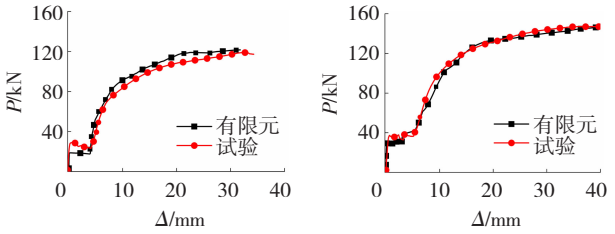
(a) PP1–3 试件 (b) CP1–3 试件

图 8 板厚 4 mm 试件荷载 – 位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of load-displacement curves of 4 mm connectors

由图 8(a) ~ 11(a)可看出有限元模型屈服后的刚度大于试验值，图 8(b) ~ 11(b)可看出波纹板连接件有限元分析荷载 – 位移曲线与试验结果吻合较好，原因在于波纹板栓孔主要沿横向变形，纵向波纹对栓孔变形存在约束，使其应力分布均匀，而平板试件栓孔向四周均发生变形，塑性变形范围较大. 模型的破坏准则为板件的最大应变达到材料的极限应变或螺栓达到全截面屈服. 如果荷载 – 位移曲线有下

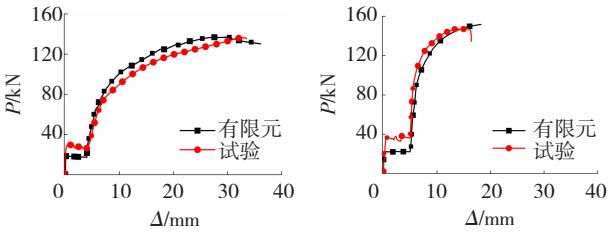
降段，抗剪承载力取曲线峰值；若无下降段，则偏于安全取模型破坏时的最大值.



(a) PP2–3 试件　　(b) CP2–3 试件

图 9　板厚 6 mm 试件荷载 – 位移曲线对比

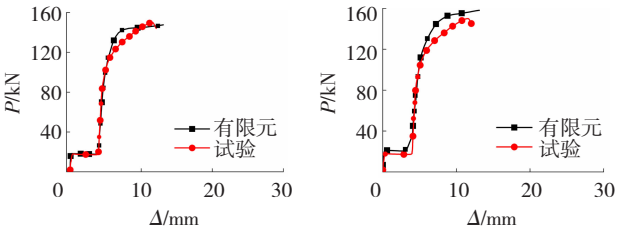
Fig. 9　Comparison of load-displacement curves of 6 mm connectors



(a) PP3–3 试件　　(b) CP3–3 试件

图 10　板厚 8 mm 试件荷载 – 位移曲线对比

Fig. 10　Comparison of load-displacement curves of 8 mm connectors



(a) PP4–3 试件　　(b) CP4–3 试件

图 11　板厚 10 mm 试件荷载 – 位移曲线对比

Fig. 11　Comparison of load-displacement curves of 10 mm connectors

2.3　受剪承载力对比

试验与有限元分析的受剪承载力对比见表 2，表中有限元计算的承载力取值为：当荷载 – 位移曲线有下降段时，连接件承载力取曲线的峰值；当曲线无下降段时，承载力偏于安全的取连接件破坏时的最大值. 从表 2 可得出有限元分析与试验结果相对误差在 5% 以内，表明有限元分析与试验结果吻合良好，存在微小误差的主要原因为：①模型为理想轴心受力状态，试验中存在一定的偏心加载；②建模时未考虑材料本身缺陷.

表 2　试验与模拟分析受剪承载力

Tab. 2　Experimental results and numerical analysis of shear bearing capacity

试件编号	承载力试验值/kN	承载力模拟值/kN	承载力相对误差/%	极限位移试验值/mm	极限位移模拟值/mm	极限位移相对误差/%	试验破坏模式	模拟破坏模式
PP1 – 3	82.3	82.5	0.2	32.8	33.0	0.6	孔壁承压	孔壁承压
PP2 – 3	119.2	121.8	2.0	32.2	33.1	2.8	孔壁承压	孔壁承压
PP3 – 3	141.2	141.8	0.5	32.9	33.2	0.9	螺杆剪切	螺杆剪切
PP4 – 3	150.1	151.2	0.7	11.1	11.8	6.3	螺杆剪切	螺杆剪切
CP1 – 3	106.6	108.7	2.0	38.2	39.7	3.9	端部剪断 *	端部剪断
CP2 – 3	146.9	147.2	0.2	39.2	39.5	0.8	端部剪断 *	端部剪断
CP3 – 3	150.0	151.6	1.1	15.6	16.2	3.8	螺杆剪切	螺杆剪切
CP4 – 3	150.2	156.7	4.3	11.4	11.7	2.7	螺杆剪切	螺杆剪切

注：文献[13]中 CP1/CP1Z、CP2/CP2Z 试件的破坏模式分析有误，应是端部剪断而非承压破坏.

3　参数分析

根据试验与有限元验证可知板件端距和预拉力是影响波纹板连接件承载力的主要因素，故参数分析时考虑端距、预拉力和波形. 同时，对中国 GB/T 34567—2017《冷弯波纹钢管》[8] 中多种波形尺寸波纹板连接件进行建模分析，对比平板连接件承载力，给出波纹板连接承载力计算方法的建议.

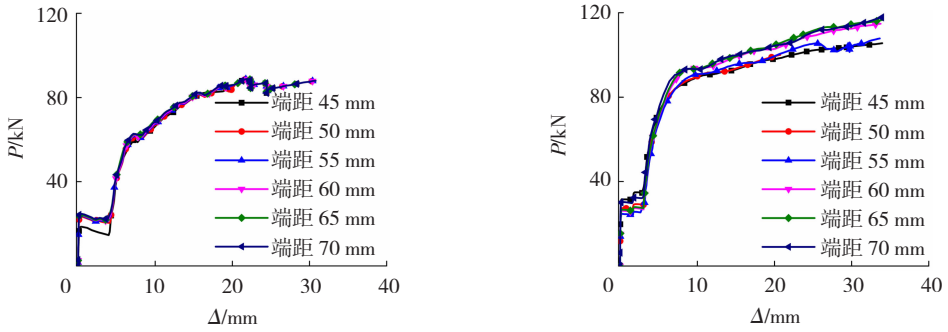
3.1　端距对承载力的影响

通过 2.1 节有限元分析可知平板连接件与波纹板连接件在受拉时端距方向应力分布存在差异，两种连接件端距限值可能不同，故分析平板连接件与波纹板连接件不同端距时极限承载力与极限位移的变化，端距取值为 45、50、55、60、65、70 mm（$2d_0$ ~ $3d_0$）. 板厚为 4、6、8、10 mm 连接件不同端距的荷载 – 位移曲线见图 12 ~ 15.

由图 12(a) ~ 15(a) 看出随着端距的增加，平板连接件的荷载 – 位移曲线变化较小，即连接件极限位移与承载力在板件端距在不小于 45 mm 时不发生明显变化，符合 GB 50017—2017《钢结构设计标准》[16] 中端距限值要求（$2d_0$）.

由图 12(b) ~ 14(b) 可看出波纹板连接件在板

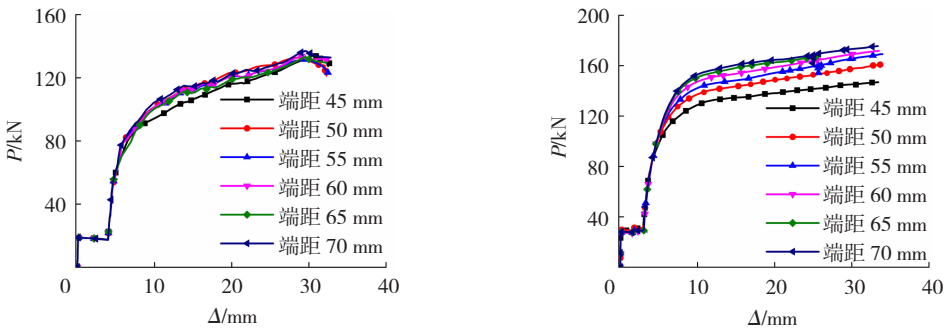
厚为 4、6、8 mm 时荷载 – 位移曲线随端距的增加变化较大，板厚为 4、6 mm 的连接件破坏模式随端距增加由端部剪断过渡为孔壁承压破坏（见图 16）. 当破坏模式为孔壁承压时，端距为 60 mm（2.7d_0），承载力不再增加.



(a) 平板连接件　(b) 波纹板连接件

图 12　板厚 4 mm 连接件不同端距下荷载 – 位移曲线

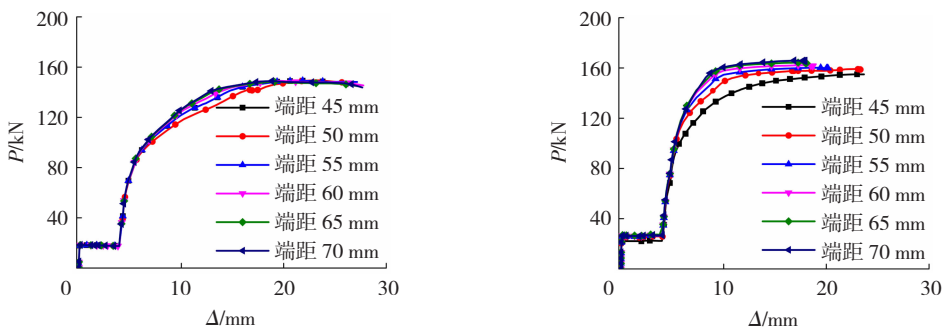
Fig. 12　Load-displacement curves of 4 mm connector at different end distances



(a) 平板连接件　(b) 波纹板连接件

图 13　板厚 6 mm 连接件不同端距下荷载 – 位移曲线

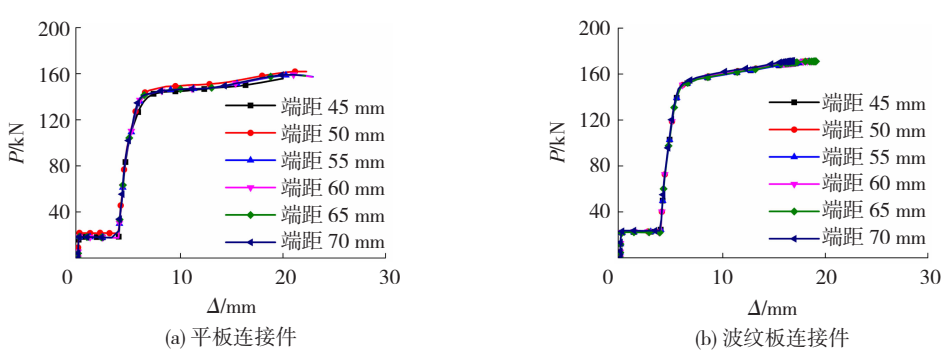
Fig. 13　Load-displacement curves of 6 mm connector at different end distances



(a) 平板连接件　(b) 波纹板连接件

图 14　板厚 8 mm 连接件不同端距下荷载 – 位移曲线

Fig. 14　Load-displacement curves of 8 mm connector at different end distances



(a) 平板连接件　(b) 波纹板连接件

图 15　板厚 10 mm 连接件不同端距下荷载 – 位移曲线

Fig. 15　Load-displacement curves of 10 mm connector at different end distances

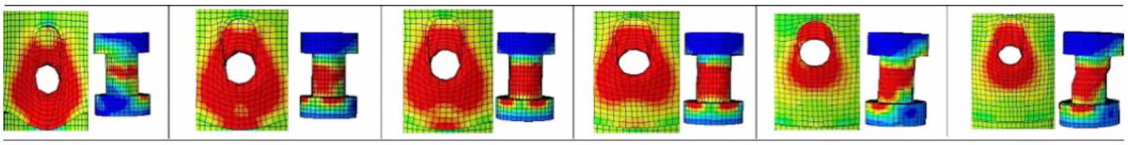


图 16　6 mm 波纹板连接件应力云图随端距变化

Fig. 16　Variation of stress responses of 6 mm corrugated plate connector with different end distances

为使分析结果具有一般性,对中波、大波、深波波形连接件进行不同端距下极限承载力有限元分析. 中波尺寸为 150 mm × 50 mm、200 mm × 55 mm、230 mm × 64 mm,深波尺寸为 300 mm × 110 mm、380 mm × 140 mm,大波尺寸为 400 mm × 150 mm,中波波形连接件采用 8.8 级 M20 高强度螺栓连接(d_0 = 22 mm),深波与大波波形连接件均采用 8.8 级 M24 高强度螺栓连接(d_0 = 26 mm). 计算结果见表 3、4,表中 F_{45} 表示端距取 45 mm 时连接件承载力,"—"表示无此项.

表 3　中波波形连接件不同端距下的承载力

Tab. 3　Bearing capacity of medium wave connectors at different end distances

波形/mm × mm	板厚/mm	F_{45}/kN	F_{50}/kN	F_{55}/kN	F_{60}/kN	F_{65}/kN	F_{70}/kN
150 × 50	5	119.4	128.3	136.5	146.9	149.8	148.9
	6	142.3	158.6	167.8	165.8	162.7	164.5
	7	151.2	157.5	165.5	168.5	172.7	169.8
	8	153.5	160.3	165.5	164.9	166.8	165.8
200 × 55	5	121.2	130.5	135.6	144.7	146.5	145.2
	6	146.6	160.8	169.2	166.5	165.8	167.5
	7	150.3	156.8	167.5	168.9	174.5	170.5
	8	154.6	159.8	160.3	161.9	163.6	163.5
230 × 64	5	123.2	131.5	138.6	145.7	147.3	146.8
	6	145.8	159.9	168.5	167.9	166.8	166.7
	7	152.5	158.7	168.6	167.8	169.2	168.9
	8	—	—	—	—	—	—

表 4　大波、深波波形连接件不同端距下的承载力

Tab. 4　Bearing capacity of large wave and deep wave connectors at different end distances

波形/mm × mm	板厚/mm	F_{55}/kN	F_{60}/kN	F_{65}/kN	F_{70}/kN	F_{75}/kN	F_{80}/kN
300 × 110	5	130.5	152.5	170.2	186.9	187.5	188.5
	6	185.6	193.8	201.5	209.8	212.3	212.8
	7	205.6	224.6	232.8	242.8	246.9	246.2
	8	223.6	235.9	242.8	243.1	243.6	242.2
380 × 140	5	131.8	150.7	171.4	182.3	183.2	184.6
	6	181.8	195.7	205.1	210.5	202.3	211.8
	7	210.3	220.4	235.0	234.5	239.4	237.8
	8	230.5	235.7	239.2	238.2	241.2	240.5
400 × 150	5	135.2	150.2	176.3	183.3	185.3	184.5
	6	190.3	195.1	205.2	211.0	222.5	220.3
	7	210.0	220.3	233.3	241.6	240.1	243.4
	8	225.9	236.8	243.2	246.7	245.3	246.1

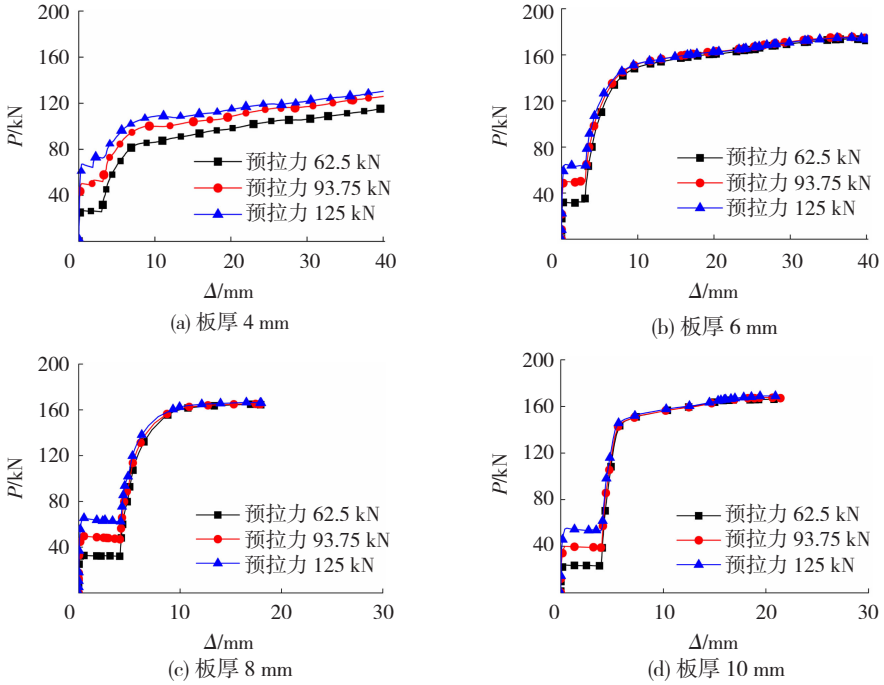
由表 3、4 可知中波连接件在端距取值不小于 60 mm($2.7d_0$)时,承载力趋于稳定;大波、深波连接件端距取值不小于 70 mm($2.7d_0$)时,承载力基本无明显差异. 因此,波纹板连接件不发生端距端部剪断的端距可取 $3d_0$.

3.2　预紧力对承载力的影响

根据文献[13]可知波纹板连接件孔壁处为三向受力状态,螺栓预拉力影响孔壁承压强度. 为深入探讨预拉力对连接件极限承载力的影响,在其他设计参数不变的情况下,板厚为 4、6、8、10 mm 的波纹板连接件端距取 60 mm($2.7d_0$)时的不同预拉力下荷载 – 位移曲线见图 17.

由图 17(a)可看出板厚为 4 mm 波纹板连接件承载力随预拉力的增加而增加,主要原因为波纹板连接件受拉时孔壁处为三向应力状态,预拉力的增大导致板件承压能力增强. 图 17(b) ~ (d)中预拉

力对连接件的荷载 – 位移曲线基本无影响，可知发生螺杆剪切破坏的连接件承载力基本不受预拉力影响. 由图 17 可看出无论试件发生何种破坏，试件的滑移荷载随着预拉力的增加而增加.



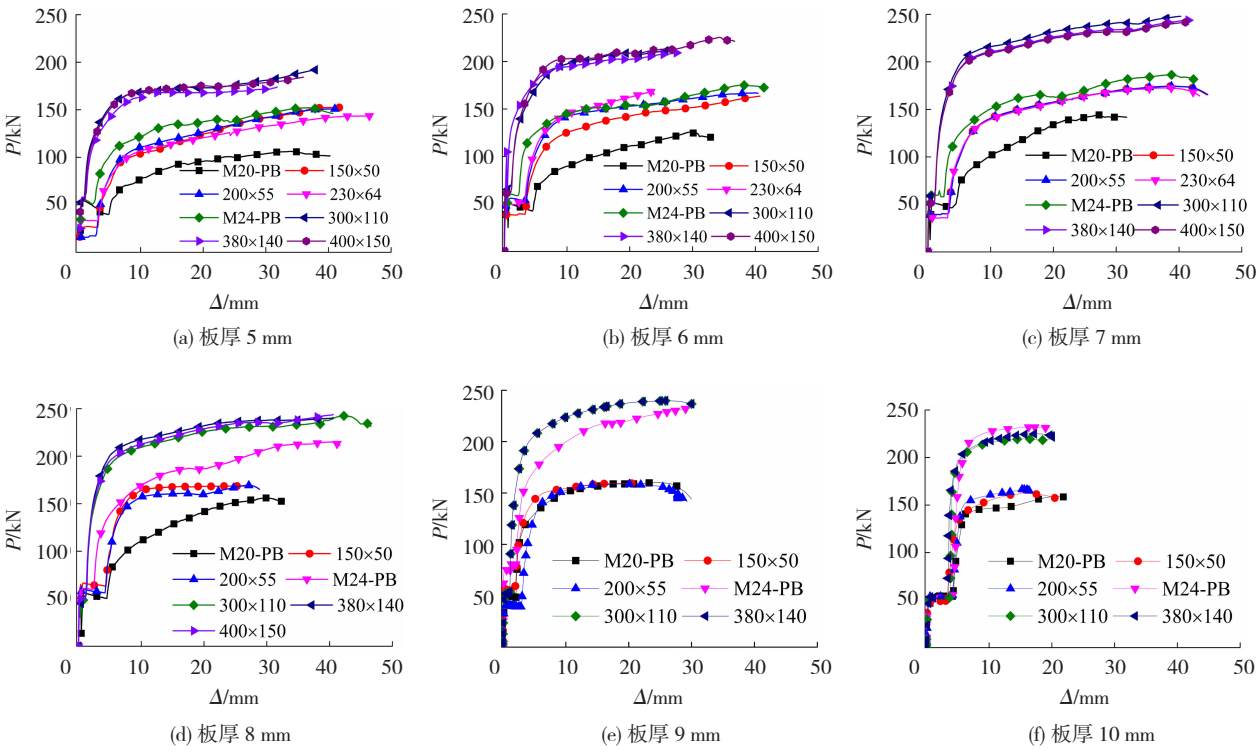
(a) 板厚 4 mm　(b) 板厚 6 mm　(c) 板厚 8 mm　(d) 板厚 10 mm

图 17　不同预拉力时的荷载 – 位移曲线

Fig. 17　Load-displacement curves under different bolt preloading

3.3　波形对承载力的影响

不同波形波纹板连接件、平板连接件荷载 – 位移曲线见图 18，中波波纹板连接件的端距取值为 60 mm，大波、深波波纹板连接件的端距取值为 70 mm，平板连接件的端距取值为 45 mm；M20 高强度螺栓预拉力为 125 kN，M24 高强度螺栓预拉力为 175 kN. 图中 M20 – PB 表示采用 M20 高强度螺栓连接的平板连接件，M24 – PB 表示采用 M24 高强度螺栓连接的平板连接件，图中波纹板连接件的波形尺寸单位为 mm × mm.



(a) 板厚 5 mm　(b) 板厚 6 mm　(c) 板厚 7 mm

(d) 板厚 8 mm　(e) 板厚 9 mm　(f) 板厚 10 mm

图 18　不同波形连接件荷载 – 位移曲线

Fig. 18　Load-displacement curves of connectors with different waveforms

由图 18 可看出 3 种中波波形连接件的荷载 – 位移曲线变化趋势较一致,大波与深波波形连接件荷载 – 位移曲线趋势基本相同. 当板厚不小于 6 mm 时,3 种中波波形连接件均发生螺杆剪切破坏,承载力波动较小. 大波与深波波形连接件在板厚不小于 7 mm 时发生螺杆剪切破坏,承载力无明显变化.

由图 18 可知采用 M20 和 M24 高强度螺栓连接的平板连接件分别在板厚不小于 8 mm 和 9 mm 时,连接件发生螺杆剪切破坏,承载力变化较小. 因波纹板连接件与平板连接件承载力比值应在同等破坏模式下进行,故当波纹板连接件发生螺杆剪切破坏时,平板连接件对应承载力应为同等破坏模式的承载力,即 M20 – PB 试件在板厚不小于 6 mm 时承载力均取发生螺杆剪切破坏时承载力 157.5 kN,M24 – PB 试件在板厚不小于 7 mm 时承载力均取发生螺杆剪切破坏时承载力 236.5 kN. 板厚为 5、6、7、8、9 和 10 mm 的中波、大波和深波波形连接件承载力与同等条件下的平板连接件承载力见表 5.

由表 5、6 可看出当波纹板连接件与同等条件平板连接件均发生孔壁承压破坏时,承载力比值范围为 1.19 ~ 1.41. 当两种类型连接件均发生螺杆剪切破坏时,两者承载力基本相同. 因此,当波纹板连接件发生孔壁承压破坏时,建议在中国平板连接承压计算公式乘以 1.1 的增大系数做为波纹板连接接缝承载力计算公式;当波纹板连接件发生螺杆剪切破坏时,抗剪连接承载力按平板连接计算公式计算.

表 5　M20 高强度螺栓连接件承载力

Tab. 5　Bearing capacity of M20 high strength bolt connectors

板厚/mm	平板承载力/kN	中波承载力/kN			破坏模式
		150 mm × 50 mm	200 mm × 55 mm	230 mm × 64 mm	
5	105.9	149.8(1.41)	146.5(1.38)	147.3(1.39)	孔壁承压
6	157.5	162.7(1.03)	165.8(1.05)	166.8(1.06)	螺杆剪切
7	157.5	168.2(1.07)	164.5(1.04)	169.2(1.07)	螺杆剪切
8	157.5	166.8(1.06)	169.5(1.08)	—	螺杆剪切
9	157.5	160.6(1.02)	162.5(1.03)	—	螺杆剪切
10	157.5	162.5(1.03)	166.5(1.06)	—	螺杆剪切

注:表中“—”表示此种波形连接件无此板厚;表中括号中数值表示波纹板连接件承载力与相应平板连接件承载力比值.

表 6　M24 高强度螺栓连接件承载力

Tab. 6　Bearing capacity of M24 high strength bolt connectors

板厚/mm	平板承载力/kN	大波承载力/kN		深波承载力/kN	破坏模式
		300 mm × 110 mm	380 mm × 140 mm	400 mm × 150 mm	
5	153.3	187.5(1.22)	183.2(1.19)	185.3(1.21)	孔壁承压
6	171.5	212.3(1.24)	202.3(1.18)	222.5(1.30)	孔壁承压
7	236.5	246.9(1.04)	239.4(1.01)	240.1(1.02)	螺杆剪切
8	236.5	243.6(1.03)	241.2(1.02)	245.3(1.04)	螺杆剪切
9	236.5	241.2(1.02)	242.5(1.03)	—	螺杆剪切
10	236.5	239.5(1.01)	238.7(1.01)	—	螺杆剪切

4　结　论

1)利用 ABAQUS 软件建立了波纹板连接件及平板连接件的有限元模型,有限元分析结果与试验结果吻合较好,验证了模型的有效性.

2)发生孔壁承压破坏的波纹板连接件,承载力大于同等条件的平板连接件,并且承载力随螺栓预拉力的增加而增加. 发生螺杆剪切破坏的波纹板连接件,承载力与同等条件的平板连接件承载力基本相同,预拉力对其承载力影响较小.

3)为保证波纹板高强度螺栓连接件不发生端部剪断,板件端距应不小于 $3d_0$.

4)当波纹板连接件按孔壁承压破坏设计时,建议承载力按中国平板连接承压计算公式乘以 1.1 的增大系数;当波纹板连接件按螺杆剪切破坏设计时,抗剪连接承载力按平板连接计算公式计算.

参考文献

[1] 张涛. 1 ~ 4 m 拼装波纹管钢板涵的施工[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(7):113
ZHANG Tao. Construction of 1 – 4 m assembled corrugated steel plate culvert[J]. Heilongjiang Jiaotong Keji, 2010, 33(7): 113

[2] 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
YIN Lingfeng, ZHANG Yonghao, TANG Gan, et al. Experimental study and finite element analysis on mechanical behavior of corrugated plate bolted connection [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4):124

[3] 冯忠居. 公路涵洞新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013
FENG Zhongju. New technology of highway culvert[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013

[4] 尹航. 覆土波纹钢板拱桥力学性能分析及设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008
YIN Hang. Mechanical performance analysis and design method of corrugated steel plate arch bridge covered with soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotng University, 2018

[5] 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

[6] Canadian highway bridge design code: CSA – S6 – 06 [S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2006

[7] Steel structures for building: CSA S16 – 01[S]. Ottawa: Standards Council of Canada, 2005

[8] 冷弯波纹钢管: GB/T 34567—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
Cold – formed corrugated steel pipes: GB/T 34567—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017

[9] 方亚非, 温学钧. 埋置式波纹钢板管结构的计算方法比较[J]. 城市道桥与防洪, 2007(5):126
FANG Yafei, WEN Xuejun. Comparisons of calculation methods for embedded corrugated steel tube structures [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2007(5): 126

[10] 潘建伍, 唐敢, 蔡晨宁, 等. 某钢板仓壁节点试验和整体有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(2): 28
PAN Jianwu, TANG Gan, CAI Chenning, et al. Joint experiment and global finite element analysis on a steel silo wall [J]. Low Temperature Building Technology, 2013, 35(2): 28

[11] 穆程. 大孔径钢波纹管涵洞设计中不同计算方法比较研究[J]. 公路工程, 2014(6):114
MU Cheng. Comparative study of long-span corrugated steel culvert by different design method[J]. Highway Engineering, 2014(6): 114

[12] 公路波纹钢埋置式桥涵设计与施工规范: DB42/T 1195—2016 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016
Code for design and construction of embedded bridges and culverts with corrugated steel for highway: DB42/T 1195—2016 [S]. Beijing: Press of China Communications, 2016

[13] 苏明周,赵凯,孙艳文. 波纹钢板纵向接缝高强度螺栓连接承载力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 122
SU Mingzhou, ZHAO Kai, SUN Yanwen. Study on the bearing capacity of high strength bolt connection for longitudinal seam of corrugated steel plates [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6):122

[14] 杨森,邱贞祥,刘蒙莎,等. 栓焊混合连接抗拉数值模拟分析[C]//北京力学会第 20 届学术年会论文集. 北京: 北京力学会, 2014: 570
YANG Sen, QIU Zhenxiang, LIU Mengsha, et al. Numerical simulation and analysis of tension resistance of bolted-welded mixed joints[C]//Proceedings of the 20th Academic Annual Meeting of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics. Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2014: 570

[15] 蔡斌,段文峰,刘文渊,等. 内六角不锈钢螺栓连接承压承载力设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(1): 110
CAI Bin, DUAN Wenfeng, LIU Wenyuan, et al. Design of bearing capacity under compression for inner-hexagon stainless steel bolted connection [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(1): 110

[16] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017

(编辑 赵丽莹)