

超低能耗夹芯墙板金属限位拉结件 受力性能分析

吕安安¹,赵志刚²,董铁良²,常世涛²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 北京市燕通建筑构件有限公司,北京 102202)

摘要 目的 研究针对于保温层厚度大于200 mm的预制超低能耗夹芯墙板的金属限位拉结件的抗拉性能,为该类墙板限位拉结件的研究提供设计依据。**方法** 针对不同直径的金属限位拉结件进行抗拉试验。同时利用有限元软件建立对应的拉结件模型,通过模拟结果与试验结果的对比,分析拉结件的抗拉承载力、安全系数、变形性能。**结果** 直径为5 mm的拉结件抗拉承载力为24.4 kN,直径为6.5 mm的拉结件抗拉承载力为29.3 kN,安全系数为5.88~8,满足安全系数最小值为4的要求。其设计承载力下的位移最大值为2.35 mm,小于墙缝密封胶剪切变性限值。**结论** 该拉结件的抗拉性能可满足我国规范要求,在正常使用情况下不会发生影响接缝性能的变形。

关键词 预制混凝土夹芯保温墙;力学性能;拉结件;安全系数

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Analysis on Mechanical Performance of Metal Limit Connectors on Precast Concrete Sandwich Walls with Ultra-Low Energy Consumption

Lü An'an¹, ZHAO Zhigang², DONG Tieliang², CHANG Shitao²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Yantong Precast Concrete Co. Ltd., Beijing, China, 102202)

Abstract: The study is aimed at the tensile properties of the metal limit connectors of the prefabricated ultra-low energy consumption sandwich wallboard whose insulation layer thickness is more than 200 mm, which provides the design basis for the study of this kind of wallboard limit connectors. Tensile tests are carried out for metal limit connectors with different diameters. At the same time, the finite element software is used to establish the corresponding model of the pulling connectors. By comparing the simulation results with the test results, the tensile bearing capacity, safety factor and deformation performance of the pulling connectors are analyzed. The tensile

收稿日期:2020-07-10

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703703)

作者简介:吕安安(1988—),女,博士研究生,主要从事结构工程方面研究。

bearing capacity of the workpiece with a diameter of 5 mm and 6.5 mm is 24.4 kN, and the tensile bearing capacity of the workpiece with a diameter of 6.5 mm is 29.3 kN. The safety factor is 5.88-8, which meets the requirement of the minimum safety factor of 4. The maximum displacement under the design bearing capacity is 2.35 mm, which is less than the limit of shear densification of the wall joint sealant. The tensile properties of the connectors can meet the requirements of Chinese codes, and the deformation that affects the joint performance will not occur under normal use.

Key words: precast concrete sandwich wall; mechanical properties; connectors; safety factor

随着全球气候变暖问题日益严重,建筑节能问题开始受到各国的普遍关注,从1988年被动式房屋概念被提出,建筑物的节能材料和结构在30多年间得到了不断的变化和发展。在我国,超低能耗建筑作为一种良好的节能方案开始受到人们关注^[1],在严寒和寒冷地区,房屋的外墙保温系统对建筑节能起着至关重要的作用。目前常见的建筑外墙通常为三明治结构,中部的保温板厚度将直接影响室内外的热交换率,决定建筑节能效果^[2-3]。

拉结件对超低能耗夹芯墙板的内、外叶墙起到联结作用,一般分为承重拉结件和限位拉结件两种^[4],承重拉结件同时承受拉力、压力和剪力,而限位拉结件仅承受拉力和压力。限位拉结件主要起到承担风荷载等面外荷载、内外温差较大时温度应力的作用,可以使用金属或非金属材料,其中非金属拉结件只适用于保温层厚度在150 mm以内的情况,金属限位拉结件由于机械性能良好,多用于保温层厚度在150 mm以上夹芯保温墙板^[5]。目前常用的限位拉结件研究多集中于保温板厚度为200 mm以内的夹芯墙板,而针对于保温层厚度超过200 mm的超低能耗夹芯墙板的限位拉结件的研究有限^[6-7]。基于此,笔者针对于保温层厚度大于200 mm的预制超低能耗夹芯墙板的金属限位拉结件的抗拉性能进行力学性能试验和模拟分析,为该类墙板限位拉结件的研究提供设计依据。

1 限位拉结件设计方法

原则上,拉结件设计时不考虑保温板受

压,所有拉力、压力、剪力均由拉结件承担。夹芯墙板的总拉力由限位拉结件和承重拉结件沿拉力作用方向的分量共同承担,一般以锚固破坏控制^[8];夹芯墙板的总剪力由承重拉结件沿剪力作用方向的分量承担,一般由压杆失稳承载力和拉结件节点混凝土破坏承载力较小值控制^[9];夹芯墙板的总压力由限位拉结件和承重拉结件沿压力作用方向的分量共同承担,一般由压杆失稳控制^[10]。

由于限位拉结件的杆件直径较小,安装时一般由人工后插或预先安装后再穿过杆件放置保温板,均很难保证拉结件竖直,存在较大的初始弯曲或偏心,会极大地降低杆件的受压稳定承载力,杆件失稳后,仍需依靠保温板承受压力,这与原设计假定不相符。基于上述分析,笔者暂不进行限位拉结件的受压性能分析,对针式拉结件的受压问题,可通过修改设计方案解决,如设计时不考虑限位拉结件受压,全部由承重拉结件承担压力。

2 金属限位拉结件抗拉试验

2.1 试件设计

试验所采用的金属限位拉结件如图1所示,金属拉结件由白钢制作,实测力学指标见表1。根据文献[6],白钢拉结件的屈服强度不小于400 MPa,抗拉强度为600~930 MPa,断后伸长率不应小于25%,实测指标均满足标准要求。抗拉试验所用混凝土强度等级为C30,上、下层混凝土板长宽均为250 mm×250 mm,厚度均为150 mm,混凝土块的形心线埋设了施加拉力的钢筋,端部

通过机械锚固措施增强锚固能力,防止试验中首先发生锚固失效^[10]。同一参数试件制作两个,试件设计和锚固深度见表 2。金属限位拉结件抗拉试件设计如图 2 所示。



图 1 金属限位拉结件

Fig. 1 Metal limit connector

表 1 拉结件实测力学指标

Table 1 Average value of measured connectors

拉结件	屈服	屈服强	抗拉	断后		
	强度/	度应变/	强度/	强屈比	伸长	弹性
	MPa	10 ⁻⁶	MPa		率/%	模量/ GPa
L5.0-200	716	5 930	875	1.22	27.3	187.7
L6.5-250	741	6 070	912	1.23	28.8	183.0

表 2 拉结件锚固深度

Table 2 Anchorage depth of connector

试件编号	保温板厚度/mm	直径/ mm	锚固深度/mm	
			开口端	闭口端
L5.0-200a	200	5	55	65
L5.0-200b	200	5	55	65
L6.5-250a	250	6.5	55	55
L6.5-250b	250	6.5	55	55

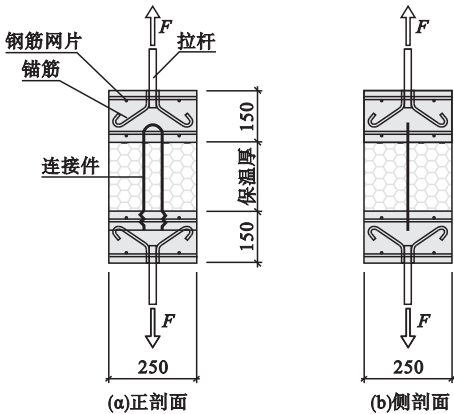


图 2 受拉试件设计图

Fig. 2 Design drawing of tensile specimen

2.2 试验装置

试验加载方式为荷载控制,加载速度为 0.1 kN/s,当拉结件被完全拔出破坏时,停止加载,试验装置如图 3 所示。在试件靠近四

角各设置 1 个位移传感器,以量测上下混凝土板的相对位移,位移测点布置如图 4(a)所示,应变测点布置如图 4(b)所示,其中应变测点 S1、S2 位于拉结件杆件中部位置。



图 3 试验装置

Fig. 3 The devices of test

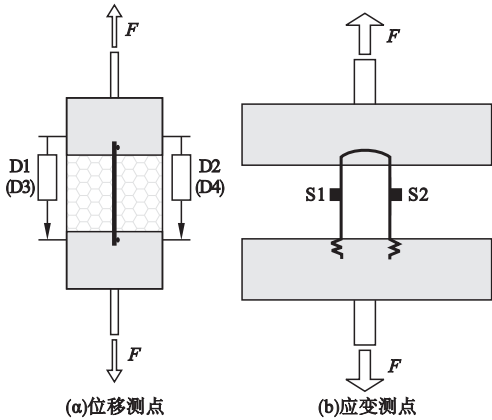


图 4 测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points

2.3 破坏过程分析

试件破坏后的局部破坏状态如图 5 所示。从图中可以看到,开口端在拉力作用下发生锚固破坏,破坏部位混凝土呈椎体拔出。L6.5-250 试件的总体破坏范围比 L5.0-200 更大,但破坏面积均小于 200 mm × 200 mm,说明在实际工程中,限位拉结件的间距应大于 200 mm 以上是合理的,间距过小相邻拉结件可能存在群锚破坏问题^[11-12]。试件 L6.5-250b 发生了限位拉结件封闭端破坏,此时混凝土破坏范围很大,不同于限位拉结件开口端的混凝土锥形破坏,此时发生的为斜截面受拉破坏,这是由于试件制作时锚固长度偏小及上下混凝土浇筑质量不一致导致。

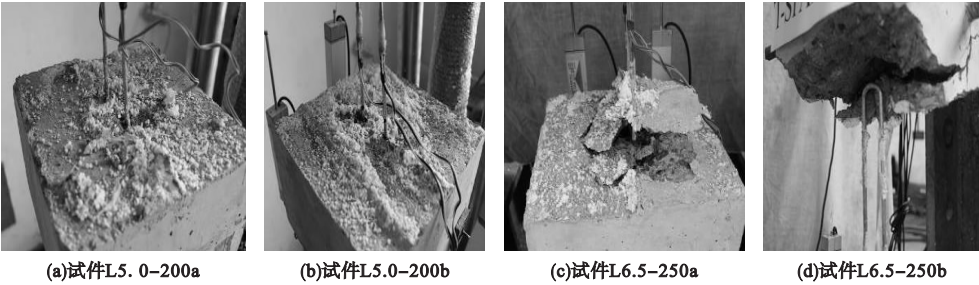


图5 试件受拉局部破坏形态

Fig. 5 Tensile local failure patterns of the specimen

2.4 荷载-位移曲线分析

所示,荷载-应变曲线如图7所示。

各试件荷载-平均竖向位移曲线如图6

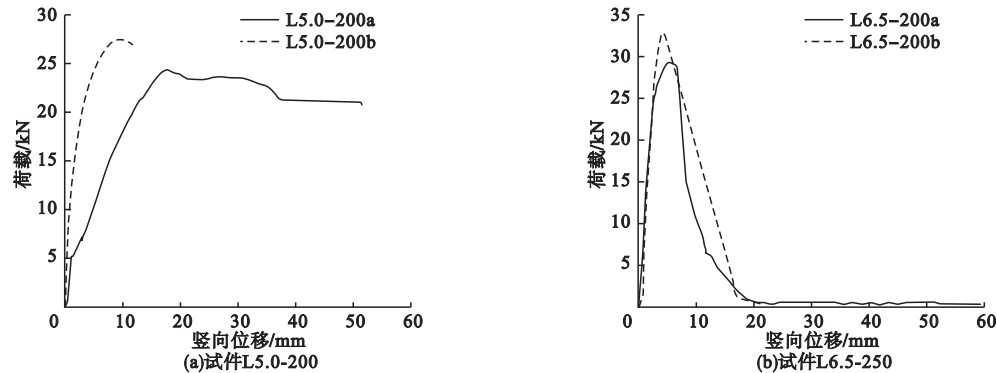


图6 拉结件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of the connectors

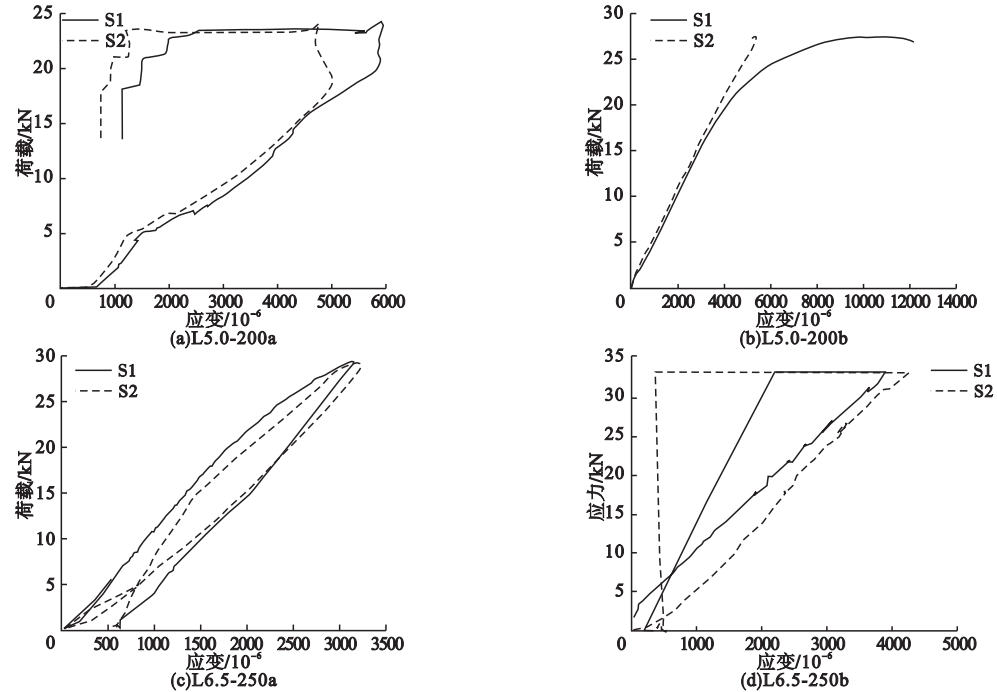


图7 拉结件荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of the connectors

通过图 6、图 7 可以看出,4 个试件的荷载-位移曲线的形态不完全一致,但同一直径的拉结件抗拉极限承载力总体接近。试件 L5. 0-200a 表现为杆件受拉直至屈服,之后两根杆件的锚固端与混凝土几乎同步发生粘结滑移破坏。达到极限荷载时,拉结件的开口端波浪段逐渐被拉直,金属与混凝土之间的粘结力不断减小,杆件应变逐渐减小,荷载持续减小,最终发生金属粘结滑移锚固破坏。试件 L5. 0-200b 破坏形态:一根杆件同 L5. 0-200a 相似,发生了粘结滑移锚固破坏;另一根杆件发生断裂破坏,既材料破坏,发生粘结滑移锚固破坏的杆件应变在荷载值达到最大后逐渐减小,而断裂杆件的应变持续增大,直至发生断裂。试件 L6. 5-250a 发生了典型的混凝土锥形破坏,拉结件开口端的锚固段波浪形结构未发生明显改变,锚固区域混凝土整体以锥形切面发生破坏,破坏后荷载迅速减小至零。拉结件杆件均未发生屈服,处于弹性阶段,荷载-应变曲线的荷载值在达到峰值后按原轨迹迅速返回。试件 L6. 5-250b 与其他试件不同,拉结件封闭端发生混凝土整体受拉破坏,这是由于拉结件锚固端承载力大于该处混凝土受拉承载力,破坏后拉结件整体外露,荷载突降为零。拉结件杆件未发生屈服,处于弹性阶段,应变在荷载达到峰值后也突然减小接近为零。此种破坏情况在工程中应尽量避免。

2.5 承载力分析

对于设计承载力 N_d ,根据拉结件产品技术资料,取 6.0 kN。由于产品的设计资料参考了欧洲规范^[15],采用圆柱体试验测得抗压强度,而我国普遍采用立方体试验测得抗压强度^[13],同时国内外不少规范(文献[10]、文献[14])都规定了锚固承载力和混凝土抗压强度平方根成正比。综合以上依据,笔者对金属限位拉结件的设计承载力进行折减,即 $N_d = 6.0 \times \sqrt{30} / \sqrt{37} = 5.4 \text{ kN}$ 。

对连接件产品,国内和国外目前主要按

分项系数法设计,即效应项为荷载分项系数 γ_L 乘以荷载效应标准值 S_{Lk} ,抗力项为连接件承载力标准值 R_k 除以承载力分项系数 γ_R ,控制效应项不应大于抗力项($\gamma_L S_{Lk} \leq R_k / \gamma_R$)。按安全系数法的概念,应为 $S_{Lk} \leq R_k / K$,相当于安全系数 $K = \gamma_L \gamma_R$ 。拉结件的设计承载力按欧洲规范^[15]进行了荷载组合,其中永久荷载分项系数取 1.35、可变荷载分项系数取 1.5。对承载力分项系数,拉结件参考了欧洲规范混凝土中紧固件的设计要求,将混凝土破坏承载力作为紧固件的极限承载力,因此承载力分项系数同混凝土材料的分项系数一致,取 1.5。按安全系数法的概念,欧洲规范中拉结件的安全系数取值相当于 2.0~2.3。

根据我国的设计规范,拉结件在墙板脱模起吊及运输吊装阶段的作用类似于吊件,根据《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666—2011)规定^[16],普通预埋吊件的安全系数取 4;根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2016)规定^[13],吊环钢筋考虑了全部分项系数的安全系数 $K = 270/65 \approx 4.15$,因此拉结件的安全系数最小值取为 $K = 4$ 。

各试件承载力结果见表 3。在文中安全系数的计算公式为 $K_t = N_u / N_d$,其中 N_u 为试验测得的极限承载力标准值。由于拉结件的设计承载力 $N_d = 5.4 \text{ kN}$ 为设计值,由《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)可知^[17],承载力的分项系数取 1.3,因此设计承载力的标准值为 $N_{kd} = 5.4 / 1.3 = 4.15 \text{ kN}$ 。

表 3 拉结件受拉承载力

Table 3 Bearing capacity of the connectors			
试件编号	N_u/kN	N_{kd}/kN	K_t
L5. 0-200a	24.4	4.15	5.88
L5. 0-200b	27.6	4.15	6.65
L6. 5-250a	29.3	4.15	7.06
L6. 5-250b	33.2	4.15	8.00

从表 3 可以得出,安全系数 K_t 值在 5.88 ~ 8,满足国内一般采用的安全系数最小值为 4 的要求。

2.6 变形分析

各试件的加载点施加荷载值和混凝土四角位移计测量得到的平均位移结果见表 4。从表中可以看出,拉结件达到设计承载力 N_d 时,内外层混凝土板的平均相对位移为 0.4 ~ 2.4 mm,一般认为预制夹芯墙板之间的密封胶最大剪切变形为 1 英寸(即 2.54 mm)^[15],因此认为在正常使用情况下夹芯墙板处密封胶不会发生剪切破坏。

表 4 拉结件承载力与对应变形量

Table 4 The bearing capacity of the connectors and the corresponding deformation

试件编号	N_d /kN	Δ_d /mm	N_u /kN	Δ_u /mm
L5. 0-200a	5. 4	2. 35	24. 4	17. 70
L5. 0-200b	5. 4	0. 36	27. 6	9. 35
L6. 5-250a	5. 4	0. 69	29. 3	5. 49
L6. 5-250b	5. 4	0. 93	33. 2	4. 24

注: Δ_d 为达到 N_d 时内外层混凝土板的相对平均位移;
 Δ_u 为达到 N_u 时内外层混凝土板的相对平均位移。

拉结件达到极限承载力时的位移为 4.2 ~ 17.7 mm,远超过密封胶的最大剪切变形量,因此当充分发挥拉结件的承载能力时,产生的变形量将破坏密封胶的密封性能,为了防止此类情况的发生,保证拉结件在正常

使用情况下的变形量控制在密封胶的最大剪切变形量以内,需要控制拉结件在正常使用情况下发挥的抗拉承载力远小于承载能力极限状态下的抗拉承载力^[18-21]。

3 金属限位拉结件模拟分析

3.1 有限元模型

金属限位拉结件模拟采用的混凝土板均采用实体单元八结点线性六面体单元减缩积分 C3D8R 模拟,内部钢筋网片采用线性三维两节点桁架 T3D2 模拟,限位拉结件采用两结点空间线性梁单元 B31 模拟。模拟过程中下部混凝土块的约束形式采用完全固定形式,模拟试验情况,对上部混凝土施加拉力;钢筋网片与混凝土之间通过内置区域进行约束;限位别针拉结件与混凝土之间也通过内置区域进行约束。有限元模型如图 8 所示。混凝土实体单元的网格尺寸设置为 5 mm,钢筋网片桁架单元结构网格尺寸设置为 6 mm,限位拉结件单元网格尺寸设置为 15 mm。拉结件 L5. 0-200、L6. 5-250 模拟后的位移云图如图 9 所示。通过位移云图可以看出,拉结件与混凝土相接触的部位由于受到拉结件传递的拉应力作用,导致该处混凝土局部受拉,L6. 5-250 的受拉区域较 L5. 0-200 的大,这与试验结果相一致。

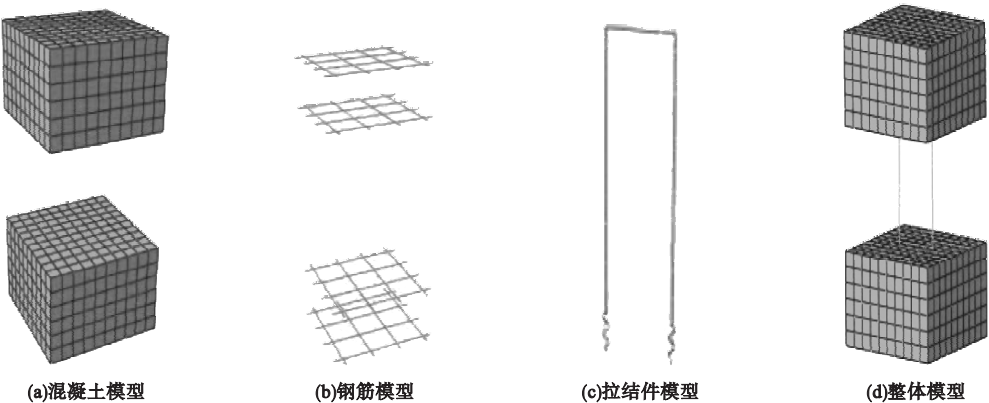


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

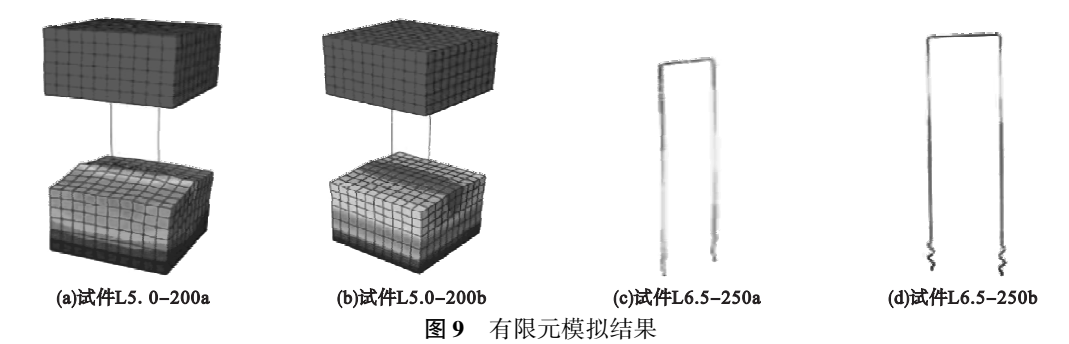


图 9 有限元模拟结果

Fig. 9 The finite element calculation results

3.2 模拟结果与分析

拉结件 L5.0-200 的荷载 - 位移曲线如图 10 所示。从图中可以看出,拉结件在经过弹性阶段后逐渐开始屈服。通过模拟结果可知,拉结件屈服时所对应的极限荷载为 24.32 kN,该值与两组试验值相比,偏差均小于 15%,可认为该模拟结果可靠。安全系数 $K_s = 24.32 / 4.15 = 5.86$,此值大于规范拟定的安全系数最小值 4,满足安全要求。

从图中可以看出,曲线形状与 L5.0-200 相似,屈服时所对应的荷载极值为 30.51 kN,模拟值与试验值相比,偏差均小于 15%,可认为该模拟结果可靠。安全系数 $K_s = 30.51 / 4.15 = 7.35$,此值显著大于规范拟定的安全系数最小值 4,满足安全要求。

4 结 论

(1)在力学性能上,由于混凝土材料的不均匀性,该金属限位拉结件的抗拉破坏形式不同,L5.0-200 的最小抗拉承载力为 24.4 kN,L6.5-250 的最小抗拉承载力为 29.3 kN。安全系数 K 均大于国内规范拟定的最小值 4,说明其抗拉性能可以满足我国规范要求。

(2)在变形性能上,金属限位拉结件达到设计承载力时,混凝土板的相对变形量均小于密封胶最大剪切变形,说明在正常使用情况下密封胶不会发生剪切破坏。

(3)由于拉结件的杆件为光圆的不锈钢,且直径较小,容易在穿过保温层后发生弯曲的现象,施工时如无法保证拉结件垂直安装,则建议不考虑该限位拉结件的抗压性能,按承重拉结件和保温板承受全部受压来设计。

参考文献

[1] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述 [J]. 建筑技术, 2010, 12(41): 1074 - 1077. (JIANG Qinqian. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad [J]. Industrial technology, 2010, 12(41): 1074 - 1077.)

[2] MUGAHED A Y H, ABANG A A A,

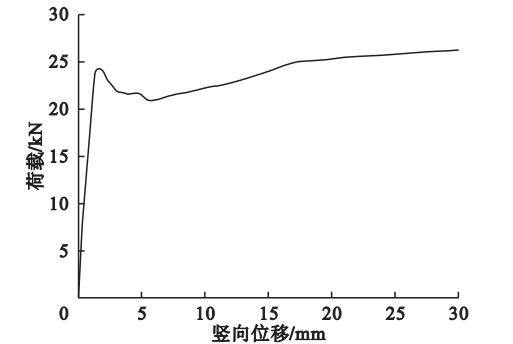


图 10 L5.0-200 荷载 - 位移曲线

Fig. 10 L5.0-200 load displacement curve

拉结件 L6.5-250 荷载 - 位移曲线如图 11 所示。

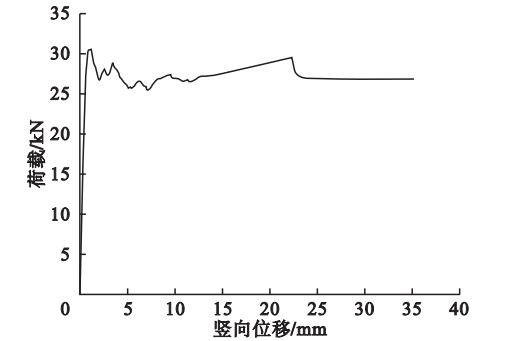


图 11 L6.5-250 荷载 - 位移曲线

Fig. 11 L6.5-250 load displacement curve

- RAIZAL S M, et al. Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels[J]. Construction and building materials, 2016, 107: 307–320.
- [3] 郑旭, 郑勇, 刘海成, 等. 夹心保温外墙板用不锈钢拉结件抗剪承载力研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(12): 63–67.
(ZHENG Xu, ZHENG Yong, LIU Haicheng, et al. Study on shearing capacity of stainless steel connector with sandwich wall[J]. Concrete and cement products, 2020(12): 63–67.)
- [4] 吕安安, 张绍武, 赵志刚, 等. 超低能耗保温夹芯墙板金属夹形拉结件受力性能分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 61–65.
(Lü Anan, ZHANG Shaowu, ZHAO Zhigang, et al. Analysis on mechanical performance of metal clamp connectors on precast concrete sandwich wall with ultra-low energy consumption[J]. Concrete and cement products, 2020(5): 61–65.)
- [5] 朱文祥, 吴志敏, 张海遐, 等. 预制夹芯保温墙体拉结件的研究现状[J]. 建筑节能, 2017, 45(4): 48–51.
(ZHU Wenxiang, WU Zhimin, ZHANG Haixia, et al. Research progress of connectors for precast sandwich insulation wall panel[J]. Building energy efficiency, 2017, 45(4): 48–51.)
- [6] 张绍武, 吕安安, 赵志刚, 等. 装配式夹芯保温板拉结件性能指标评价体系研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 255–262.
(ZHANG Shaowu, Lü An'an, ZHAO Zhigang, et al. Assembling evaluation index of tensile strength of assembled sandwich insulation board department of research[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2020, 36(2): 255–262.)
- [7] 吕安安, 赵志刚, 吕丽萍, 等. 工业化建筑高性能配件性能指标体系建立与评价要求[J]. 混凝土世界, 2020(6): 56–58.
(Lü An'an, ZHAO Zhigang, Lü Liping, et al. The establishment and evaluation requirements of the performance index system of high performance parts for industrial buildings[J]. Concrete world, 2020(6): 56–58.)
- [8] 孟宪宏, 周阿龙, 刘海成. 预制保温外墙板拉结件力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(2): 232–233.
(MENG Xianhong, ZHOU Along, LIU Haicheng. Experiments of mechanical properties on the connectors of sandwich insulation wallboard[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2014, 30(2): 232–233.)
- [9] CHEN Xiong, CHU Mingjin, LIU Jiliang, et al. Shear behavior of precast concrete wall structure based on two-way hollow-core precast panels[J]. Engineering structures, 2018, 176: 74–89.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构后锚固技术规程: JGJ145—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Technical specification for post anchorage of concrete structures: JGJ145—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)
- [11] 申亚楠. 预制夹芯保温复合墙板的研制及适用性评价[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
(SHEN Ya'nan. Development and applicability evaluation of precast sandwich insulation composite wall panel[D]. Beijing: China University of Mining, 2018.)
- [12] 彭军. 装配式钢结构住宅关键技术研究 with 工程实践[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
(PENG Jun. The research on key technology and engineering practice of assembled structure residence[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2015[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.)
- [14] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI318–14[S]. American: [s. n.], 2014.
- [15] British Standards Institution. Design of concrete structures. General rules: EN 1991–1–3: 2003[S]. London: [s. n.], 2003.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工规范: GB 50666—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Code for construction of concrete structures: GB 50666—2011[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Uniform standard for reliability design of building structures: GB50068—2018[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.)
- [18] NAITIO C, HOEMANN J, BEACRAFT M, et al. Performance and characterization of shear ties for use in insulated precast concrete sandwich wall panels[J]. Journal of structure engineering, 2010(11): 21–25.
- [19] 上海市建设管理委员会. 预制混凝土夹心保温外墙板应用技术标准: DG/TJ08—2158—2017 J 1309[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
(Shanghai Construction Management Commission. Technical specification for precast concrete sandwich wall panel: DG/TJ08—2158—2017 J 1309[S]. Shanghai: Tongji University & Building Press, 2018.)
- [20] DAVID C, SALMON A E, MATHE K, et al. Full-scale testing of precast concrete sandwich panels[J]. ACI structural journal, 2008, 94(4): 354–362.
- [21] PANTELIDES C P, REAVELEY L D, MCMULLIN P W. Design of CFRP composite connector for precast concrete elements[J]. Journal of reinforced plastics and composites, 2009, 22(15): 1335–1351.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)