

轻钢泡沫混凝土组合墙体竖向承载力试验

陈大鸿¹,王建超²,潘美旭²,周静海²

(1. 中铁建设集团有限公司,北京 100039;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 为推广轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体的应用,在外部贴纤维水泥压力板的轻钢龙骨组合墙体里灌注泡沫混凝土,研究轴心受压承载力对墙体的影响. 方法 通过对5块轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体进行轴心受压承载力试验,分别研究了有无泡沫混凝土、有无拉条、墙面板与立柱连接自攻螺钉间距对墙体承载力的影响. 结果 内部填充泡沫混凝土后,轻钢立柱不再发生整体弯曲屈曲,只发生局部屈曲;竖向荷载作用下的稳定承载力显著提高;螺钉间距由400 mm加密至200 mm,轴心受压承载力随之增大;拉条对承载力的提高不明显. 结论 在轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体承受轴心受压时,内部填充的泡沫混凝土会发挥一定的作用,建议在进行竖向承载力计算时,考虑泡沫混凝土的影响.

关键词 轻钢;泡沫混凝土;竖向承载力;轴心受压

中图分类号 TU398.7

文献标志码 A

Tests on Vertical Bearing Capacity of Steel-Foamed Concrete-Fiber Cement Pressure Plate Composite Walls

CHEN Dahong¹, WANG Jianchao², PAN Meixu², ZHOU Jinghai²

(1. China Railway Construction Group Co., LTD, Beijing, China, 100039; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to promote the application of steel-foam concrete-fiber cement pressure plate composite wall, to explore the influence of the bearing capacity of the axial compression bearing capacity of the light steel keel wall with the external fiber reinforced concrete pressure plate on the foam concrete. After the test of the vertical axial compression bearing capacity of 5 steel-foam concrete-fiber cement pressure plate composite walls, the effects of filled foam concrete and without foam concrete, with brace and without brace, and the influence of the spacing of the self tapping screws between the wall panel and the column on the stability of the column under the vertical load is obtained. When the foam concrete is filled inside the wall, the flexural bending of the light-weight steel column is no longer occurring, and the column is confined to local buckling. The sta-

收稿日期:2017-06-20

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAJ15803)

作者简介:陈大鸿(1980—),男,高级工程师,主要从事工程设计、管理等方面研究.

bility of the bearing capacity under vertical load is significantly improved. The load capacity increases as the screw spacing is encrypted from 400 mm to 200 mm. The brace does not affect the improvement of bearing capacity. The foam concrete filled in the light steel foam concrete fiber cement pressure plate composite wall will play a certain role when the wall is subjected to the axial compression. It is suggested that the effect of foam concrete should be taken into account when calculating the vertical bearing capacity.

Key words: light steel; foam concrete; vertical bearing capacity; axial compression

轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体^[1-2]作为冷弯薄壁型钢结构住宅体系的竖向承重单元,是由冷弯薄壁型钢墙架柱(一般用C型截面,即卷边槽型截面,作承重)、顶梁和底梁(一般用U型截面,即普通槽钢,作非承重构件),U型截面套在C型截面的端头,外部两侧包墙板,通过自攻螺钉连接而成的承重和维护结构^[3-4]。在轻钢龙骨外部两侧贴纤维水泥压力板,在组成的内部空腔内灌入泡沫混凝土,形成轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体^[5],这种新型组合墙体符合“十三五”建筑节能的规划,具有轻质、环保、施工工期短、效率高、成本低、使用面积增大、保温效果好的优点^[6-7]。

目前,国内外针对未填充泡沫混凝土的组合墙体开展了一系列研究工作,美国学者 Miller 和 Pekoz^[8-9]对卷边C型墙架柱进行了轴压试验,提出了在无支撑和中间加槽钢支撑或双面扁钢带支撑的条件下,计算承载力时将卷边C型钢立柱的计算长度系数取为0.65。澳洲学者 Telue 等^[10]对槽形截面组成的墙柱体系的轴压性能进行了研究,以澳洲规范为基础提出了无支撑和双面石膏板支撑墙架柱的计算长度系数,即在计算承载力时立柱计算长度系数取0.75。英国学者 Tian^[11]通过试验研究了两侧有墙板立柱,一侧有墙板立柱的轴压性能。根据墙板类型、螺钉间距、柱截面尺寸和荷载类型进行了分类研究。墙板板材有三种类型:CSB(硅酸钙板)、CPB(水泥颗粒板)、OSB(定向刨花板)。得到了OSB板支撑立柱的破坏荷载比CPB板高20%,比CSB板高70%。双侧墙板

的立柱比单侧墙板的立柱极限荷载提高很多的结论。并且随着自钻螺钉间距的减小,立柱的极限荷载增加。以及立柱的间距对极限承载力的影响极小,可以忽略不计。

在国内,西安建筑科技大学刘前进等^[12-13]对轻钢立柱墙体进行了轴心承载力性能试验,结果表明考虑墙面对立柱的支撑作用后,立柱的承载力有较大的提高,带墙面试件立柱承载力为不带墙面试件立柱承载力的3倍左右。建议墙面支撑效应立柱长度可偏安全地取0.65计算。长安大学周绪红等^[14-15]对冷弯薄壁型钢结构住宅墙柱体系的轴向性能进行了非线性有限元分析,研究了墙面厚度、螺钉间距、墙架柱间距及钢材强度对墙柱体系轴向性能的影响。认为在实际应用中,当面板与中间构件连接的螺钉间距大于300 mm时,减小螺钉间距墙架柱轴向承载力可显著提高;中间螺钉间距小于300 mm时,继续减小螺钉间距对承载力的提高不明显。因此从受力、经济、施工方便的角度考虑,中间螺钉间距取300 mm最为合理。武汉理工大学的戚超龙^[16]通过试验分析了新型轻钢龙骨组合墙体的竖向极限承载能力。通过对比有无墙板支撑的小墙架柱的临界屈曲荷载,分析墙板支撑对提高各类临界屈曲荷载的作用。最后通过引入初始几何缺陷,求得稳定系数,计算得到了这类墙柱体系的极限承载力。

通过上述的研究发现,已有的研究成果均是针对轻钢组合墙体开展的,组合墙体里面或者是未填充泡沫混凝土,或者是计算中没有考虑内部填充物的影响,而泡沫混凝土作为一种保温隔热材料填入到墙体内部,势

必会对竖向龙骨承载力产生影响^[17]. 笔者正是从这一目的出发,通过对5块轻钢-发泡混凝土组合墙体进行轴心受压承载力试验,分别分析在轴心受压下有无发泡混凝土、有无拉条、墙面板与墙架柱连接自攻螺钉间距三种不同参数对墙架柱稳定承载力的影响. 研究表明,内部填充泡沫混凝土后,改变了轻钢立柱的破坏形态,竖向荷载作用下的稳定承载力显著提高,建议在进行竖向承载力计算时,考虑泡沫混凝土的影响.

1 试验

1.1 试件设计

组合墙体的构成见图1. 组合墙体参数:
 $b=400\text{ mm}$ 、 $B=800\text{ mm}$ 、 $h=1\,200\text{ mm}$ 、 $H=2\,400\text{ mm}$. 试件完全模拟组合墙体实际工程构造,试件整体由两部分组成,上部结构为轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体,下部地梁由C30商品混凝土浇筑,表面抹平以便于安装上部墙体. 将组合墙体的“U”型底梁通过锚栓与混凝土地梁连接,上部立三根“C”型立柱及“U”型顶梁、外部包纤维水泥板,由自攻螺钉连接,使试件内部形成两个空腔;“U”型顶梁上部开两个 $60\text{ mm}\times60\text{ mm}$ 的正方形孔洞,用于浇灌发泡混凝土形成整体结构.

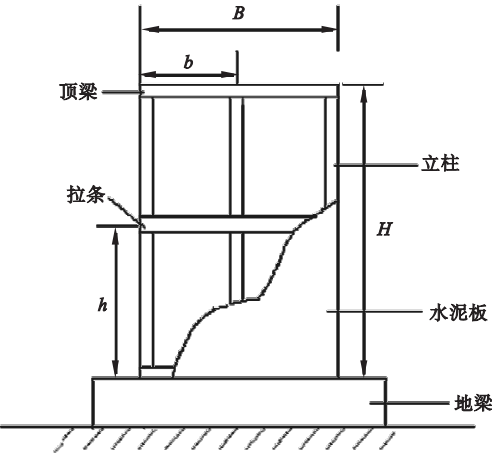


图1 组合墙体示意图

Fig. 1 Test specimen of combined wall

地梁设计如图2所示. 地梁由钢筋混凝土浇制而成,截面 $300\text{ mm}\times400\text{ mm}$,长 $2\,500\text{ mm}$,在中间部分向两侧各突出 $200\text{ mm}\times1\,300\text{ mm}$,并在浇筑前各插入两根 450 mm 长PVC管,待上部墙体制作完成后在预留PVC管中插入钢管,再加一水平钢管焊成脚手架用以支撑地梁上部的轻钢-泡沫混凝土-纤维水泥压力板组合墙体. 在图2所示位置设置弯曲钢筋做成的吊环,用来吊装试件.

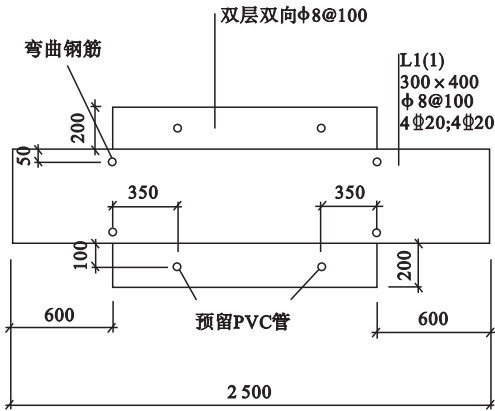


图2 地梁平面图

Fig. 2 Floor plan of ground beam

墙架柱采用冷弯薄壁卷边槽钢,规格C141 \times 41 \times 14 \times 1.6(腹板高度 \times 翼缘宽度 \times 卷边宽度 \times 板件厚度);顶梁及底梁采用冷弯薄壁槽钢,规格U144 \times 48 \times 1.6(腹板高度 \times 翼缘宽度 \times 板件厚度). 钢材横截面如图3所示,钢材参数见表1.

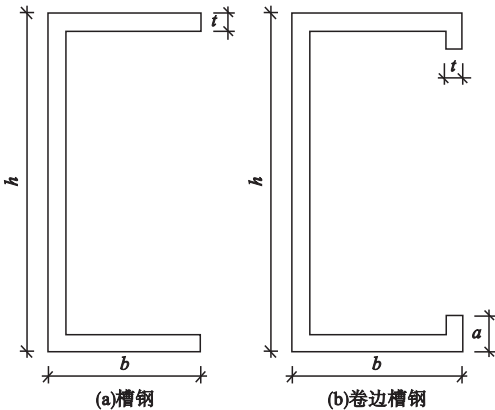


图3 钢材横截面

Fig. 3 Cross section of steel

表 1 钢材参数

Table 1 Dimensions of steel

立柱截面/mm				顶梁截面/mm			拉条截面/mm	
腹板高度 h	翼缘宽度 b	卷边宽度 a	板材厚度 t	腹板高度 h	翼缘宽度 b	板材厚度 t	宽度	厚度
141	41	14	1.6	144	48	1.6	50	1.6

按构造方式分为不灌发泡混凝土、灌发泡混凝土;按墙面板与立柱连接自攻螺钉间距分为 200 mm、300 mm 和 400 mm;按有无

拉条分为无拉条和拉条间距 1 200 mm. 试件编号及分组见表 2.

表 2 试验设计表

Table 2 Details of full scale wall frames

试件编号	墙体高×宽/mm	拉条间距/mm	螺钉间距/mm	发泡混凝土
Q1 - ZYK300	2 400 × 800	2 400	300	无
Q2 - ZYF300	2 400 × 800	2 400	300	有
Q3 - ZYF400	2 400 × 800	2 400	400	有
Q4 - ZYF200	2 400 × 800	2 400	200	有
Q5 - ZYF300 - L	2 400 × 800	1 200	300	有

在实际工程中,施工顺序为先用锚栓将“U”型底梁固定于地梁上,然后将立柱分别按施工要求间距立于底梁上,再在上部安装“U”型顶梁,之后在外部贴水泥板,最后内部填充发泡混凝土. 试件制作过程中,由于需要粘贴应变片,也为了加工方便,将试件制作顺序稍微调整,先将冷弯薄壁型钢框架组合起来,在顶梁和底梁的“U”型钢与立柱的“C”型钢的连接部分分别用冲击电钻钻出孔,再把膨胀螺栓打进去将型钢框架固定.

安装纤维水泥压力板及浇注泡沫混凝土之前,先在竖龙骨上粘贴应变片,在竖龙骨上需要粘贴应变片的各测点位置提前标记,竖龙骨粘贴应变片的位置表面先用角磨机把表面的漆和氧化层打磨掉,在露出其金属表面后,再用细砂纸对竖龙骨表面继续进行打磨;在贴应变片前,用蘸取酒精的脱脂棉将竖龙骨粘贴应变片的位置的表面打磨位置擦拭干净,然后将应变片用 502 胶水粘到龙骨表面,最后使用万用电表对导线的电阻进行测试,测试是否符合规定值,若不符合,则重新粘

贴. 贴好应变片后需要用环氧树脂做防水处理,防止在浇筑泡沫混凝土过程中应变片损坏. 将水泥纤维压力板用自攻螺钉固定在粘贴好应变片的轻钢龙骨上,只留一块墙板,将组合好的墙体用锚栓把底梁固定在地梁上(见图 4),之后将剩余的一块墙板用自攻螺钉打在墙体上,最后从墙体上部预留的两个空洞浇筑发泡混凝土(见图 5).



图 4 固定墙体

Fig. 4 Wall fixation



图5 浇注混凝土

Fig.5 Pouring foamed concrete

水泥纤维压力板的应变片粘贴在与竖向龙骨应变片对应的相同的位置. 安装纤维水泥压力板后,对纤维水泥压力板上需要粘贴应变片的位置按照在竖龙骨上粘贴应变片的步骤进行处理,粘贴应变片,不过不需要再做防水. 纤维水泥压力板应变片采用纸基应变片,为防止应变片在试验前受潮或者损坏,影响试验中数据的采集,纤维水泥板应变片在每个试件进行试验前逐个进行粘贴.

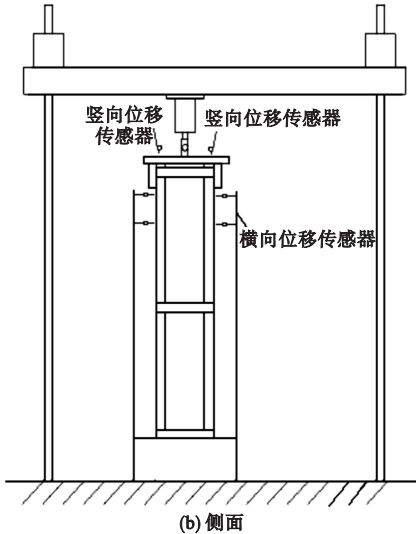
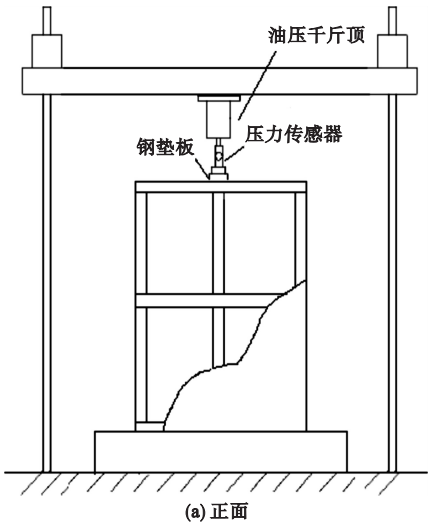


图6 加载装置

Fig.6 Loading device

试件安装就位后首先用红外线水平仪对试件的位置与垂直度校核. 然后通过应变片的读数对红外线水平仪校核的加载点位置是否准确进行判断. 开始加载时,预先加载 10 kN,若竖龙骨同一高度的两侧翼缘上的应变

1.2 材料力学性能

轻钢龙骨、纤维水泥压力板力学性能见表3、表4. 选用 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体抗压强度试模,发泡混凝土立方体抗压强度实测值为 1.68 MPa.

表3 型钢力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel				
材料	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	弹性模量/ MPa
型钢	387.23	469.26	36.36	2.0×10^5

表4 纤维水泥压力板力学性能

Table 4 Mechanical properties of fiber cement pressure plate		
材料	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
纤维水泥压力板	17.15	1.72×10^4

1.3 加载装置和加载方案

试验采用 600 kN 千斤顶配合反力架,为了得到轻钢龙骨中间立柱的极限承载力,加载采用集中加载,在墙体轻钢龙骨中间立柱位置上部放置一块面积 100 mm × 100 mm、厚 20 mm 的钢垫块. 加载装置如图 6 所示.

片的应变读数不一致,说明加载位置存在偏心,必须对加载位置进行重新调整,直到调整到最合适的位置再进行加载. 试验加载示意图如图 7 所示.

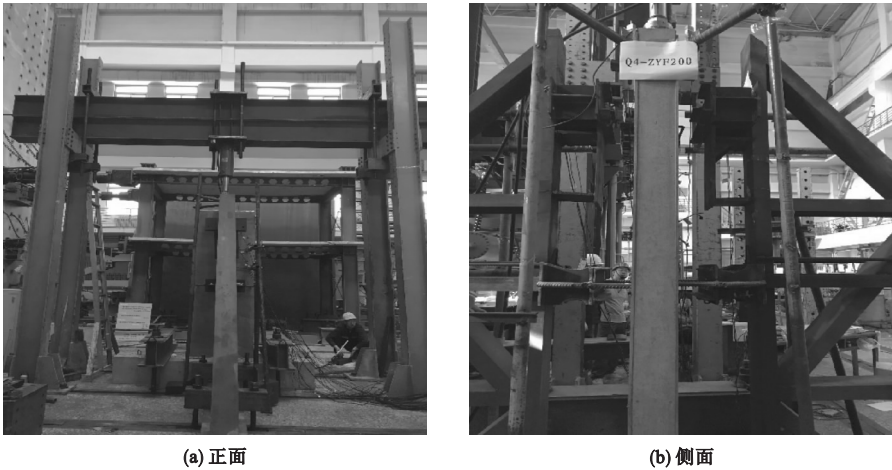


图 7 试验装置

Fig. 7 Diagram of test device

试验加载过程中,采取分级加载的方式,每 10 kN 为一个加载级别,每达到一个级别后持载 1min,加载过程中,仔细观察并记录试件破坏情况. 计算机显示荷载曲线出现峰值不再上升后,即可卸载. 电脑自动记录加载和卸载时的荷载读数与位移传感器、竖龙骨及纤维水泥压力板上不同测点处的应变示数,根据压力传感器和位移传感器接收到的荷载值与位移值绘制荷载 - 位移曲线.

1.4 测点布置与测量内容

实验采用的应变片有两种,分别是粘贴在轻钢龙骨上的应变片和粘贴在纤维水泥压力板上的应变片. 轻钢龙骨应变片共 9 个,纤维水泥压力板应变片共 6 个,位置和编号如图 8、图 9 所示.

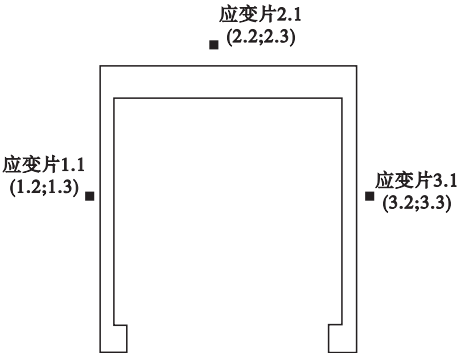


图 8 轻钢龙骨应变片位置

Fig. 8 Position of strain gauge of light steel keel

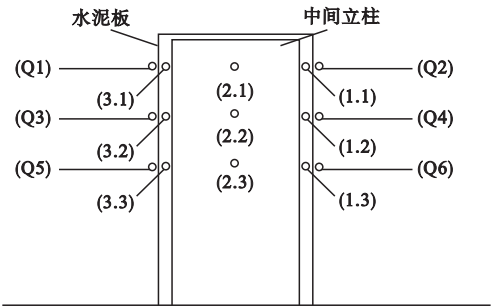


图 9 10 应变片布置图

Fig. 9 Position diagram of strain gauges

2 破坏特征

2.1 空心墙体

试验后拆掉纤维水泥压力板,组合墙体内部中间墙架柱的破坏形态如图 10、图 11 所示.



图 10 墙体内部墙架柱

Fig. 10 Internal wall column of wall



图 11 墙体局部屈曲图

Fig. 11 Local buckling diagram of wall

图 10 为 Q1 - ZYK300 的内部中间墙架柱发生整体弯曲伴随局部屈曲. 图 11 为 Q1 - ZYK300 中间墙架柱的端部破坏形态, 在第一和第二个螺钉间发生局部屈曲.

2.2 填充墙体

拆掉上部墙体的外部水泥板如图 12 所示, 填充发泡混凝土墙体内部浇注的发泡混凝土受压后形成了多条裂缝. 敲掉内部填充的发泡混凝土, 观察组合墙体内部中间墙架柱的破坏形态, 如图 13 所示. 由于外部罩纤维水泥压力板, 内部浇注发泡混凝土, 对中间墙架柱产生了更大的约束作用, 中间墙架柱没有整体弯曲, 只有在第一和第二个螺钉间发生局部屈曲.



图 12 墙体内部发泡混凝土

Fig. 12 Foamed concrete of wall



图 13 墙体局部屈曲图

Fig. 13 Local buckling diagram of wall

整理分析可以发现, 填充泡沫混凝土的组合墙体均发生局部屈曲破坏, 未填充泡沫混凝土的组合墙体发生整体弯曲屈曲, 并伴随局部屈曲破坏. 具体破坏模式和极限承载力见表 5. 从破坏模式可以看出, 组合墙体填充泡沫混凝土后, 对内部立柱会提供一定的约束作用, 从而使破坏模式发生改变.

表 5 试件中间墙架柱破坏模式

Table 5 Failure modes of the mid-studs and ultimate bearing capacity

试件编号	破坏模式	极限承载力/ kN
Q1 - ZYK300	整体弯曲屈曲, 伴随局部屈曲	78. 2
Q2 - ZYF300	局部屈曲	132
Q3 - ZYF400	局部屈曲	136. 9
Q4 - ZYF200	局部屈曲	138. 8
Q5 - ZYF300 - L	局部屈曲	145. 1

3 结果与分析

3.1 荷载 - 位移曲线

试件荷载 - 位移曲线如图 14 所示. Q1 为内部无泡沫混凝土试件, 从图中可以看出, 竖向位移明显大于内部填充泡沫混凝土试件. Q3 试件在加载到 57.6 kN 时发出“嘭”的一声, 结果证明其中螺钉被剪断, 从荷载 - 位移曲线可以看出此时位移突然增大. 墙架柱螺钉间距越密, 试件的竖向位移越小. Q5

为螺钉间距300 mm 且带拉条试件,其竖向位移比螺钉间距 300 mm 且不带拉条的 Q2 略小.

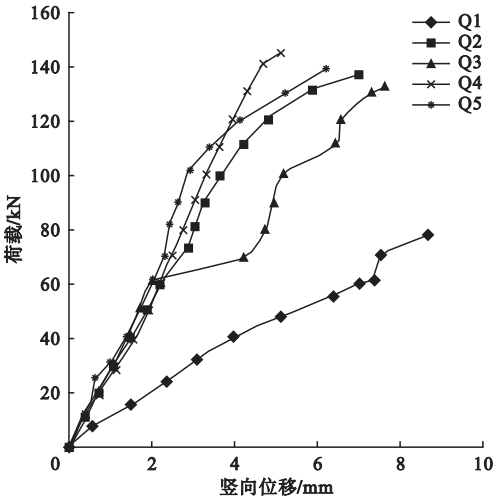


图 14 竖向荷载 - 位移曲线

Fig. 14 Vertical load displacement curves

试件水平位移分为两个:令第二个螺钉位置的水平位移为 S_1 ,第三个螺钉位置的水平位移为 S_2 ,荷载 - 位移曲线如图 15、图 16 所示.从图中可以看出, S_1 明显大于 S_2 ,试件上部鼓胀大于下部,水平位移的总体变化趋势和竖向位移相同.

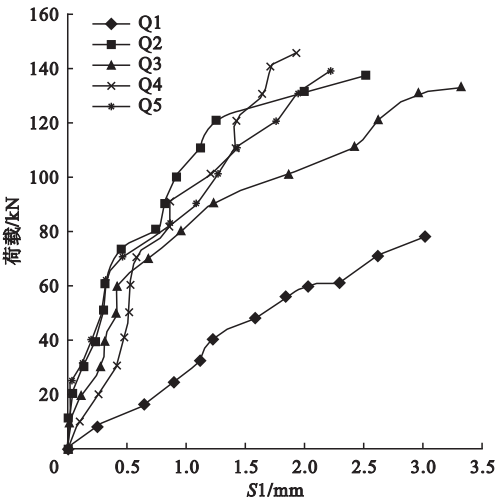


图 15 水平位移 S_1 荷载 - 位移曲线

Fig. 15 Horizontal displacement S_1 load displacement curves

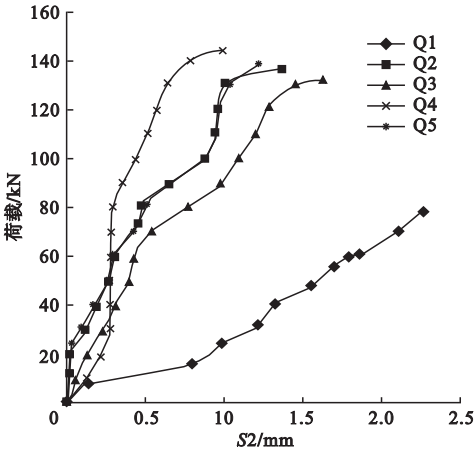


图 16 水平位移 S_2 荷载 - 位移曲线

Fig. 16 Horizontal displacement S_2 load displacement curves

3.2 荷载 - 应变曲线

试件荷载 - 应变曲线分为水泥板荷载 - 应变曲线和轻钢荷载 - 应变曲线,令第一段螺钉间距间的应变为应变 1、第二段螺钉间距间的应变为应变 2、第三段螺钉间距间的应变为应变 3. Q1 - ZYK300 轻钢荷载 - 应变曲线和水泥板荷载 - 应变曲线分别如图 17、图 18 所示.加载到 40 kN 时,试件发生细碎的响声,为内部泡沫混凝土产生裂缝的声音.内部细碎的响声一直持续到力加载到 56 kN,加载到 56.2 kN 时发出一声闷响,此时推测龙骨上螺钉被剪断了.根据图 14 的轻钢应变图也可以看出来,此时应变突然增大.

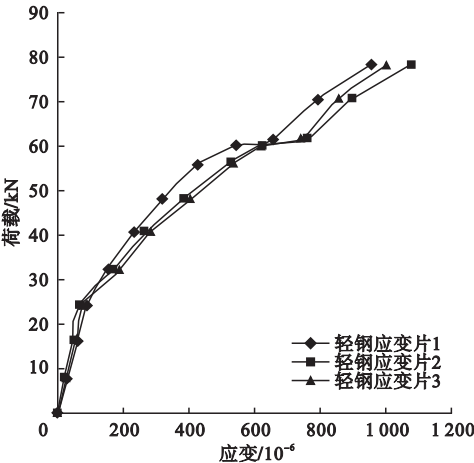


图 17 Q1 - ZYK300 轻钢荷载 - 应变曲线

Fig. 17 Q1-ZYK300 Load strain curves of light steel

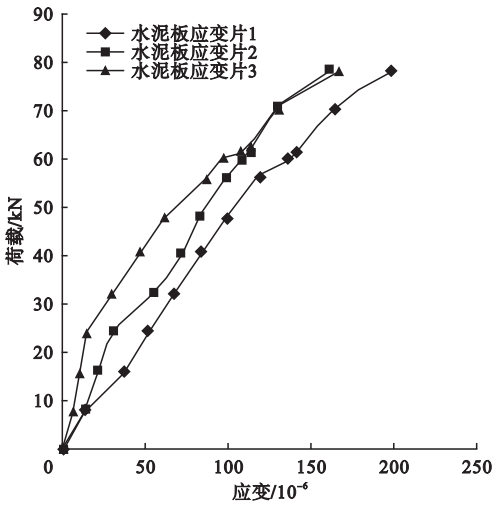


图 18 Q1-ZYK300 水泥板荷载-应变曲线

Fig. 18 Q1-ZYK300 load strain curves of cement slab

Q2-ZYF300 轻钢荷载-应变曲线和水泥板荷载-应变曲线分别如图 19、图 20 所示. 当加载到 59.3 kN 时,试件内部有轻微的细碎响声,内部泡沫混凝土开始产生裂缝,响声一直持续到 68.1 kN,这个阶段泡沫混凝土开裂响声越来越清晰,加载到 68.1 kN 时,发生较大的破裂声.

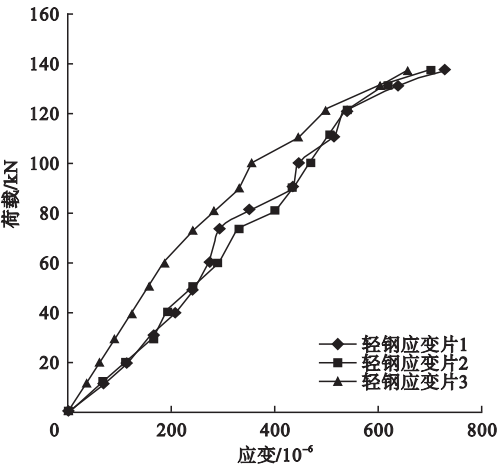


图 19 Q1-ZYK300 轻钢荷载-应变曲线

Fig. 19 Q1-ZYK300 load strain curves of light steel

Q3-ZYF400 轻钢荷载-应变曲线和水泥板荷载-应变曲线分别如图 21、图 22 所示. 加载到 57.6 kN 时,试件内部发出细碎的响声,泡沫混凝土开始产生裂缝. 声音一直断断续续持续到 64 kN,当加载到 64 kN 时发出清脆的响声,与此同时轻钢应变产生突变.

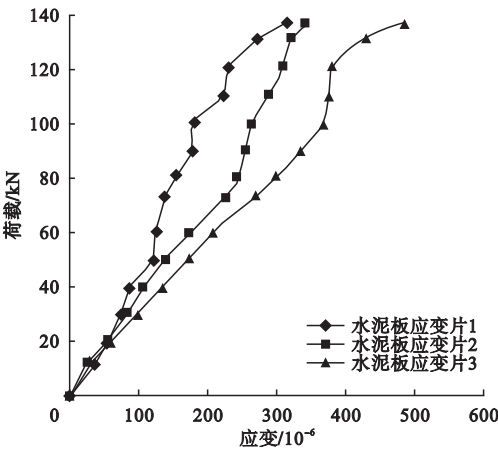


图 20 Q2-ZYF300 水泥板荷载-应变曲线

Fig. 20 Q2-ZYF300 load strain curves of cement slab

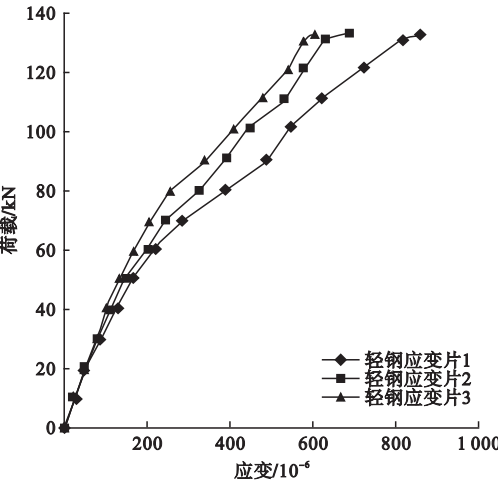


图 21 Q3-ZYF400 轻钢荷载-应变曲线

Fig. 21 Q3-ZYF400 load strain curves of light steel

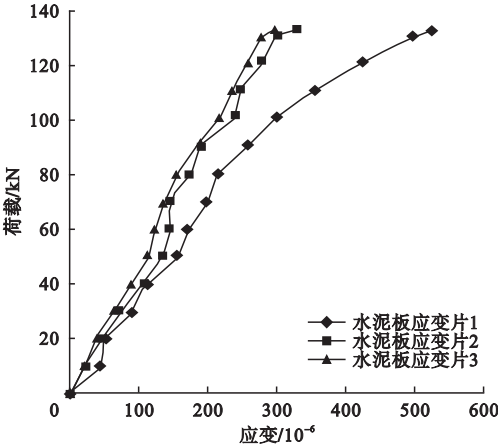


图 22 Q3-ZYF400 水泥板荷载-应变曲线

Fig. 22 Q3-ZYF400 load strain curves of cement slab

Q4 - ZYF200 轻钢荷载 - 应变曲线和水泥板荷载 - 应变曲线分别如图 23、图 24 所示。加载到 65 kN 时,试件内部发出细碎的小声音,泡沫混凝土开始产生裂缝,细碎响声一直持续到 105.8 kN,此时试件发出清脆的响声。

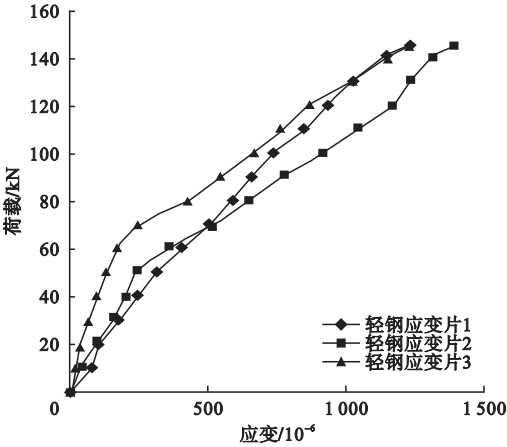


图 23 Q4 - ZYF200 轻钢荷载 - 应变曲线
Fig. 23 Q4-ZYF200 load strain curves of light steel

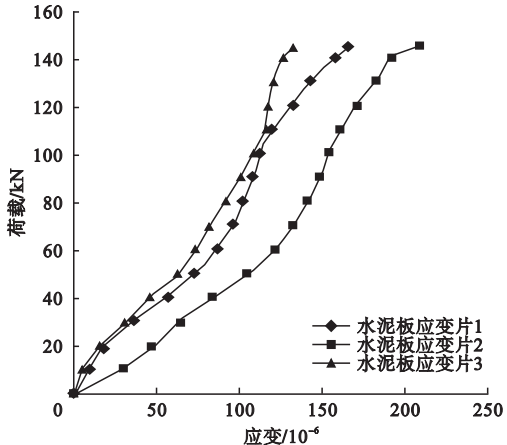


图 24 Q4 - ZYF200 水泥板荷载 - 应变曲线
Fig. 24 Q4-ZYF200 load strain curves of cement slab

Q5 - ZYF300 - L 轻钢荷载 - 应变曲线和水泥板荷载 - 应变曲线分别如图 25、图 26 所示。加载到 50.1 kN 时,试件发出细小的响声,当加载到 65.2 kN 时,试件内部响声变大,加载到 70.2 kN 时,试件发出更大的破裂的响声。此后细碎的响声一直持续到极限承载力。

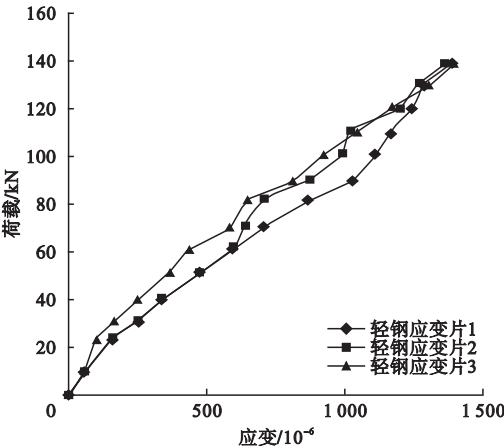


图 25 Q5 - ZYF300 - L 轻钢荷载 - 应变曲线
Fig. 25 Q5-ZYF300-L load strain curves of light steel

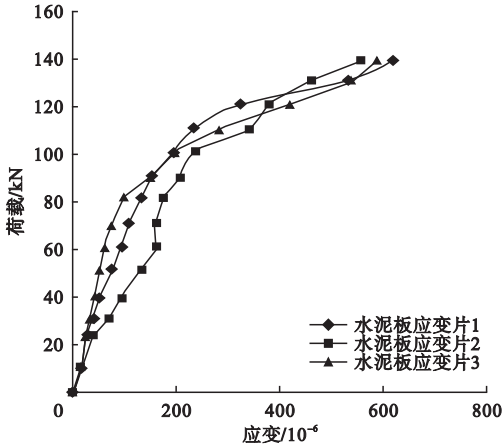


图 26 Q5 - ZYF300 - L 水泥板荷载 - 应变曲线
Fig. 26 Q5-ZYF300-L load strain curves of cement slab

4 结 论

(1) 试验所得到的试件的极限承载力为加载过程中的最大荷载,螺钉间距为 300 mm 的组合墙体,内部填充泡沫混凝土后中间墙架柱的极限承载力提高 75.06%;以 1 200 mm 为间距设置拉条后,相比仅填充泡沫混凝土墙体,中间墙架柱极限承载力仅提高 1.38%;螺钉间距 400 mm 的墙架柱承载力比 300 mm 的降低 3.71%,螺钉间距 200 mm 的墙架柱承载力比 300 mm 提高 5.99%。

(2) 试验过程中泡沫混凝土并不做承重作用,内部灌泡沫混凝土限制了中间墙架柱在墙体内部的位移,因此墙架柱不再发生弯曲破坏,仅在第一段螺钉间距间发生局部屈曲。使中间墙架柱的极限承载力大大提高。在计算及墙体设计中,考虑泡沫混凝土的影响非常有必要。拉条对中间墙架柱的极限承载力提高并不明显,在设计中可以忽略。

参考文献

- [1] 周绪红,石宇,周天华,等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 1-14.
(ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Cold-formed steel framing system of low-rise residential building[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2005, 22(2): 1-14.)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: JGJ 227—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. Technical specification for low-rise cold-formed thin-wall steel buildings: JGJ227—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [3] 郭江然. 浅论泡沫混凝土轻钢龙骨复合墙体发展应用[J]. 砖瓦, 2016(8): 50-52.
(GUO Jiangran. Discussion on the development and application of the foam concrete light steel keel composite wall[J]. Brick and tile, 2016(8): 50-52.)
- [4] 李双营. 发展轻钢结构住宅遇到问题和对策及发展现状和前景分析[J]. 四川建材, 2012, 38(4): 1-5.
(LI Shuangying. Analysis of problems, countermeasures, development status and prospect of developing light steel structure housing[J]. Sichuan building materials, 2012, 38(4): 1-5.)
- [5] 何书明. 泡沫混凝土本构关系的研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
(HE Shuming. Study on constitutive relation of foam concrete[D]. Changchun: Jilin Architectural University, 2014.)
- [6] 刘殿忠, 何书明. 泡沫混凝土的研究现状及发展趋势[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2013, 30(6): 8-11.
(LIU Dianzhong, HE Shuming. Research status and development trend of foam concrete[J]. Journal of Jilin architectural and civil engineering institute, 2013, 30(6): 8-11.)
- [7] 闫振甲. 泡沫混凝土有望成为保温材料首选[J]. 混凝土世界, 2010(1): 22-26.
(YAN Zhenjia. Foam concrete is expected to be the first choice for insulation materials[J]. Concrete world, 2010(1): 22-26.)
- [8] MILLER T H, PEKOZ T. Behavior of cold-formed steel wall stud assemblies[J]. Journal of structural engineering, 1993, 119(2): 641-651.
- [9] MILLER T H, PEKOZ T. Behavior of gypsum-sheathed cold-formed steel wall studs[J]. Journal of structural engineering, 1994, 120(5): 1644-1650.
- [10] TELUE Y, MAHENDRAN M. Behaviour of cold-formed steel wall frames lined with plasterboard[J]. Journal of constructional steel research, 2001, 57(4): 435-452.
- [11] TIAN Y S, WANG J, LU T J, et al. An experimental study on the axial behavior of cold-formed steel wall studs and panels[J]. Thin-walled structures, 2004, 42(4): 557-573.
- [12] 刘前进, 何保康, 周天华, 等. 低层冷弯型钢房屋墙体立柱承载力试验研究[J]. 钢结构, 2004, 19(4): 26-29.
(LIU Qianjin, HE Baokang, ZHOU Tianhua, et al. Experimental study on the bearing capacity of columns of low grade cold-formed steel houses[J]. Journal of steel construction, 2004, 19(4): 26-29.)
- [13] 冯佳贤. 新型轻钢龙骨组合墙体竖向极限承载力分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
(FENG Jiaxian. Analysis of vertical ultimate bearing capacity of new type light steel keel composite wall[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.)
- [14] 周绪红, 李艳敏, 石宇, 等. 竖向荷载作用下冷弯薄壁型钢墙架柱的承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(3): 7-13.
(ZHOU Xuhong, LI Yanmin, SHI Yu, et al. Bearing capacity of cold-formed thin-walled steel frame columns under vertical loads[J]. Journal of building science and engineering, 2006, 23(3): 7-13.)
- [15] 秦雅菲. 冷弯薄壁型钢低层住宅墙柱体系轴压性能理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
(QIN Yafei. Theoretical and experimental research of cold-formed steel residential building wall stud system subject to centric axial loads[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.)
- [16] 戚超龙. 轻钢龙骨组合墙体的竖向承载力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
(QI Chaolong. Study on vertical bearing capacity of lightweight steel keel composite wall[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.)
- [17] 于洋. 现浇轻质复合墙体竖向承载能力试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
(YU Yang. Experimental study on vertical bearing capacity of cast-in-place lightweight composite wall[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2015.)