

Experimental Study and Finite Element Analysis on Flexural Behavior of Cement Expanded Perlite Composite Exterior Wall Panels

Lin Fang^{1*}, Chengming Li¹, Dan Lu¹, Xin Cheng², Dengfei Yu²

¹East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai

²Shanghai Shunjie New Material Technology Co., Ltd., Shanghai

Email: *flawsy@163.com

Received: Aug. 3rd, 2020; accepted: Aug. 18th, 2020; published: Aug. 25th, 2020

Abstract

To study the flexural behavior of cement expanded perlite slabs, six specimens under bending were tested. The effects of the reinforcement arrangement and the thickness on the failure modes, load-displacement curves, reinforcement strain and deformation capacity of the specimens were analyzed. Calculation formulas of normal section flexural capacity were established. The capacity of resistance to wind load, earthquake action and uniform floor load was researched. Research results indicate that cement expanded perlite slabs with rebars or galvanized steel wire grid plus rebars have favorable ductility, plastic deformation capacity, capacity of resistance to wind load, earthquake action and uniform floor load, and higher safety performance. The theoretical results of flexural capacity agreed well with the experimental results. The flexural behavior of cement expanded perlite slabs could meet the requirements of serviceability limit stage and bearing capacity limit state. They can be applied to exterior wall panels, internal partition walls, and floor slabs of prefabricated construction engineering. Cement expanded perlite slabs with galvanized steel wire grid have lower bearing capacity and deformation capacity, which cannot be applied to exterior wall panels and floor slabs.

Keywords

Cement Expanded Perlite Slabs, Flexural Behavior, Deformation Capacity, Ductility

水泥膨胀珍珠岩板抗弯性能试验研究

方林^{1*}, 李承铭¹, 卢旦¹, 程欣², 余登飞²

¹华东建筑设计研究院有限公司, 上海

²上海舜杰新材料科技有限公司, 上海

*通讯作者。

摘要

为研究水泥膨胀珍珠岩板的抗弯性能, 完成了6个不同配筋形式、厚度的试件抗弯承载力试验。对不同设计参数试件的破坏形态、荷载位移曲线、钢筋应变、变形能力进行了分析, 建立了水泥膨胀珍珠岩板正截面抗弯承载力计算公式, 研究了其抵抗风荷载、地震作用及楼面均布荷载能力。试验与理论分析结果表明: 配置有钢筋或钢丝网架 + 钢筋的水泥膨胀珍珠岩板具有良好的延性性能、塑性变形能力, 受弯承载力计算值与试验值吻合较好; 具有较好的抵抗风荷载、地震作用及楼面均布荷载能力, 满足正常使用极限状态和承载能力极限状态要求, 安全储备较高, 可应用于装配式建筑工程外墙板、隔墙板及楼板。仅采用镀锌钢丝网架的水泥膨胀珍珠岩板, 承载力很低、变形能力差, 不适用于外墙板和楼板。

关键词

水泥膨胀珍珠岩板, 抗弯性能, 变形能力, 延性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国内外轻质混凝土外墙板、隔墙板、楼板, 应用较广泛地主要为蒸压加气混凝土(AAC)板, 有学者对其受力性能已展开了部分研究[1] [2] [3] [4], 相关规范标准对墙板产品的性能、连接构造、设计等做出了具体规定[5] [6]。本文研究的水泥膨胀珍珠岩板为轻质混凝土板的一种, 采用硅酸盐水泥、水、膨胀珍珠岩、抗裂玻璃纤维、多种添加剂等按一定比例制备形成, 适用于装配式建筑中的外墙板、隔墙板及楼板, 具有轻质、高强度、防火、自保温、防水、隔音、抗冻、制作方便和绿色环保等性能, 无需进行高温蒸压养护, 防火性能达到 B1 级以上, 导热系数不大于 $0.08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 满足建筑墙体使用性能要求, 且无需单独设置保温层, 结构简单。

上海市《装配式建筑墙板技术目录(2018 版)》沪建市管(2018)43 号文, 内墙板目录对三维镀锌钢丝网架水泥膨胀珍珠岩条板常用厚度(90 mm 和 120 mm)、规格(2700 mm × 600 mm)、相应的技术性能参数给出了具体规定, 但其不能直接应用于外墙板和楼板, 平面外承载力较低。为进一步拓展水泥膨胀珍珠岩板适用范围, 了解其整体受力性能和合理的配筋形式, 有必要进行深入研究。国内外还未见相关文献资料, 对水泥膨胀珍珠岩板的受力性能展开研究。

本文作者根据 6 块水泥膨胀珍珠岩板抗弯性能试验, 研究其破坏模式、抗弯性能和变形能力, 为水泥膨胀珍珠岩板在实际工程中的应用提供试验依据和理论基础。

2. 试验概况

2.1. 试件简介

本试验共制作 6 块水泥膨胀珍珠岩板(编号: B1~B6), 所有试件长度均为 3300 mm, 宽度均为 600 mm,

厚度包括 150 mm 和 200 mm；钢筋主要采用直径 2 mm 镀锌钢丝网架、HRB400 级钢筋，保护层厚度分别为 10 mm 和 15 mm，考虑的配筋形式有三种：2 mm 镀锌钢丝网架、2 mm 镀锌钢丝网架+钢筋、钢筋，采用镀锌钢丝网架为上海市《装配式建筑墙板技术目录(2018 版)》推荐的内墙板产品所采用的配筋形式；试件 B1~B6 截面详见图 1，参数设计详见表 1；研制的膨胀珍珠岩水泥材料性能详见表 2，钢筋材料性能详见表 3。

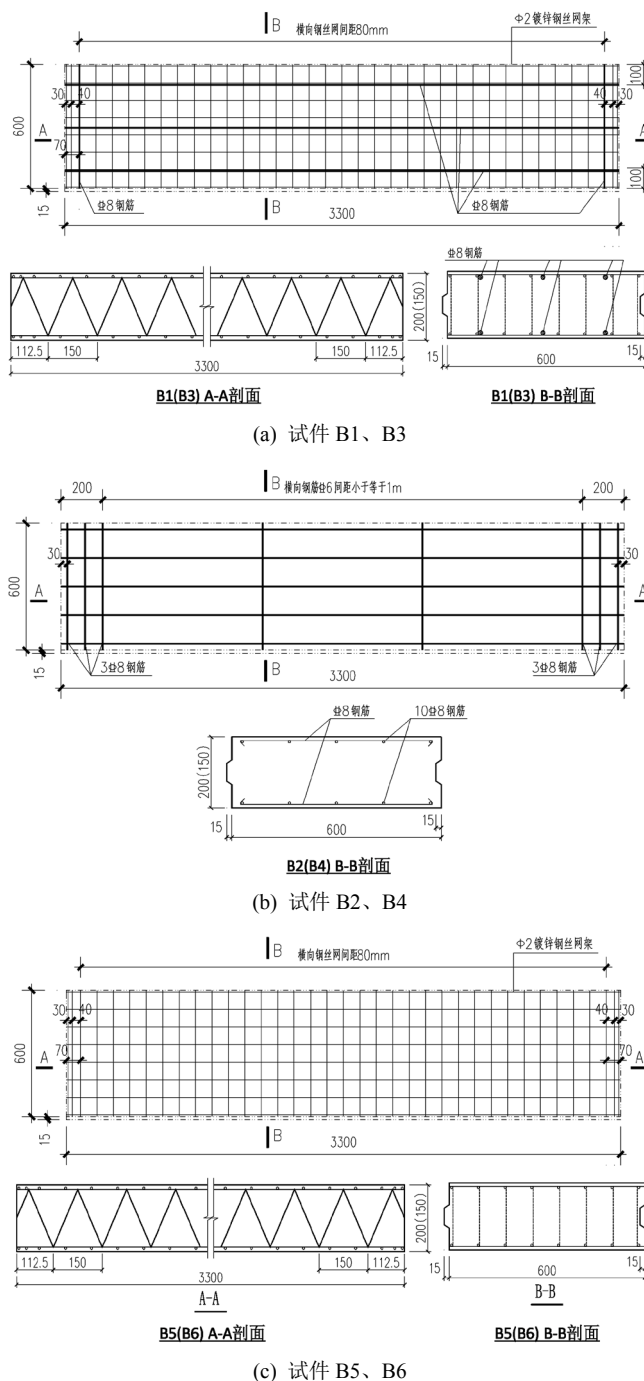


Figure 1. Cross sections of specimens

图 1. 试件截面图

Table 1. Design information of specimens
表 1. 试件参数设计表

试件编号	配筋形式	板厚(mm)
B1	2 mm 镀锌钢丝网架 + 钢筋	200
B2	钢筋	200
B3	2 mm 镀锌钢丝网架 + 钢筋	150
B4	钢筋	150
B5	2 mm 镀锌钢丝网架	200
B6	2 mm 镀锌钢丝网架	150

Table 2. Properties of expanded perlite cement
表 2. 膨胀珍珠岩水泥材料性能

密度/(kg/m ³)	f_{cu} /MPa	f_c /MPa	E_c /MPa
1.02×10^3	5.6	5.5	3.2×10^3

注: f_{cu} 为立方体抗压强度平均值, f_c 为棱柱体轴心抗压强度平均值, E_c 为弹性模量。

Table 3. Properties of reinforcement
表 3. 钢筋材料性能

钢材	直径/mm	f_y /MPa	f_u /MPa
钢丝	2	435.5	1163.2
钢筋	8	452.6	655.6

注: f_y 为屈服强度平均值, f_u 为极限强度平均值。

2.2. 加载装置与测点布置

本次试验主要研究水泥膨胀珍珠岩板平面外抗弯性能, 以等效集中荷载代替平面外均布荷载作用。试验加载方案采用四分点加载法, 在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行, 试验装置如图 2 所示。

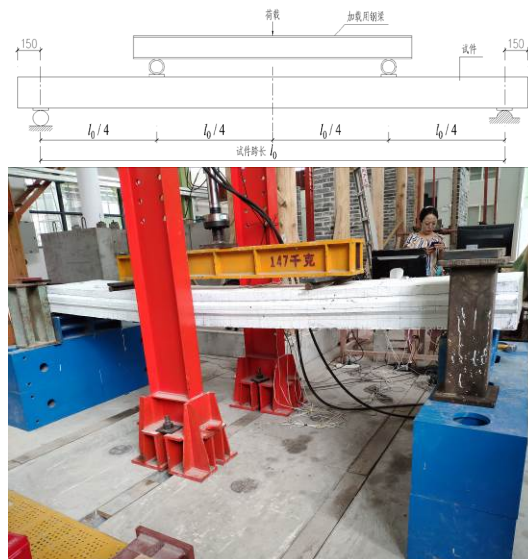


Figure 2. Test setup
图 2. 加载装置

试验采用位移计测量支座、1/4跨、跨中处板的竖向位移。跨中位置粘贴应变片测量板底受拉钢筋和板面受压钢筋应变。试验过程中记录裂缝的发展规律，并观测作动器荷载—位移曲线。

竖向荷载采用位移控制加载，试验正式开始前进行预加载，以检验设备是否正常，位移加载制度：1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、7.5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm……，直到荷载下降到峰值荷载的85%以下或裂缝宽度达到1.5 mm或无法继续加载为止。

3. 试验结果及分析

3.1. 试验现象

1) 试件 B1~B4 在安装完成加载前自重荷载作用下无裂缝出现，B1 和 B2 板加载至 5 mm、B3 和 B4 板加载至 3 mm 时，两四分点之间板底和板侧开始出现细小裂缝。

2) 随着加载位移的增加，试件 B1~B4 上的裂缝逐渐开展，靠近两四分点之间板底和板侧受弯引起的裂缝数量增多，裂缝宽度增大，板底裂缝逐渐贯通，B1~B4 板分别加载至 10 mm、10 mm、7.5 mm 和 20 mm，裂缝宽度达 0.2 mm。试件 B2 和 B4 支座至四分点之间板侧出现少许斜裂缝。

3) 试件 B1~B4 破坏时，受压区均无裂缝产生，荷载增长缓慢，但未出现下降。B1 板加载至 30 mm，B2 板加载至 55 mm，B3 板加载至 50 mm，裂缝宽度达 1.5 mm；B4 板加载至 50 mm 过程中，支座处突然断裂，发生脆性破坏，钢筋未剪断，上一级荷载作用下受弯裂缝宽度达 0.5 mm。由试验现象可知，试件 B1~B3 的破坏形式均为弯曲破坏；试件 B4 最终发生支座处剪切破坏，但板底受拉钢筋早已发生屈服。



Figure 3. Failure modes of specimens
图 3. 试件破坏形态

4) 试件 B5 在加载至 4 mm 时, 跨中板底出现贯通裂缝, 裂缝宽度达 1.5 mm, 峰值荷载为 1.52 kN; 试件 B6 在安装加载梁过程中, 跨中发生脆性断裂。由试验现象可知, 仅采用镀锌钢丝网架的水泥膨胀珍珠岩板受弯承载力很低、变形能力差, 不适用于外墙板和楼板。各试件最终破坏形态如图 3 所示。

3.2. 荷载—跨中位移曲线

图 4 所示为试件 B1~B4 的作动器竖向荷载—跨中位移关系曲线。由图 4 可知:

- 1) 在加载初期, 试件处于弹性阶段, 荷载—位移曲线基本呈线性变化, 试件开裂以后, 钢筋逐渐屈服, 开始进入弹塑性阶段, 抗弯刚度减小。试件破坏时, 荷载未见明显下降。
- 2) 采用钢筋相比于钢丝网架+钢筋的配筋形式, 抗弯刚度增加, 破坏时极限荷载增大。
- 3) 板厚提高, 抗弯刚度增加, 破坏时极限荷载增大。
- 4) 配置有钢筋或钢丝网架+钢筋的水泥膨胀珍珠岩板, 相比于仅采用镀锌钢丝网架, 承载力有较大幅度的提高。

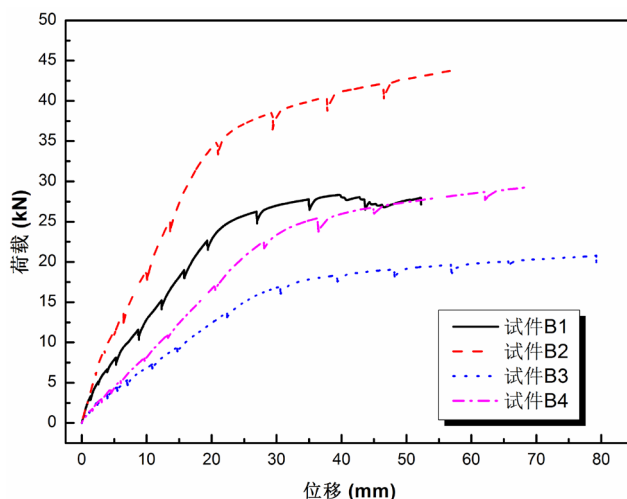


Figure 4. Load-displacement curves

图 4. 荷载—位移关系曲线

3.3. 钢筋应变

试件 B1~B4 跨中位置板底受拉钢筋和板面受压钢筋应变—跨中位移关系曲线如图 5、图 6 所示。钢筋屈服应变取 2263 微应变。

1) 由图 5 可知, 随着跨中位移的增大, 板底受拉钢筋应变逐渐增加, 破坏时各试件钢筋均已发生屈服。屈服时, 试件 B1~B4 对应的跨中位移分别为 21.8 mm、20.6 mm、22.8 mm、32.9 mm。

2) 由图 6 可知, 试件 B1 随着跨中位移的增大, 板面受压钢筋应变逐渐增加, 破坏时钢筋未发生屈服。试件 B2~B4 随着跨中位移的增大, 板面受压钢筋应变先增大后逐渐减小, 过程中钢筋未发生屈服。

3.4. 变形能力

试件 B1~B4 在不同受力状态下的荷载 P 、跨中位移 Δ 、位移延性系数 μ_{Δ} 如表 4 所示。板底钢筋屈服时, 对应的荷载和位移为屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y ; 试件破坏时, 对应的荷载和位移为极限荷载 P_u 和极限位移 Δ_u ; 位移延性系数 $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$; 跨中位移达正常使用阶段允许挠度 $L/200 = 15$ mm 时, 对应的荷载为 $P_{L/200}$, L 为板跨; 裂缝宽度达正常使用阶段允许宽度 0.2 mm 时, 对应的荷载和位移为 $P_{0.2}$ 和 $\Delta_{0.2}$ 。

由表 4 可知:

1) 试件 B1~B4 的位移延性系数依次为 2.40, 2.84, 3.47 和 2.12, 表明配置有钢筋或钢丝网架 + 钢筋的水泥膨胀珍珠岩板具有较好的延性性能, 未发生钢筋屈服立即发生受弯脆性破坏现象。

2) 试件 B1~B4 破坏时极限挠度依次为 1/57、1/51、1/38 和 1/43, 表明配置有钢筋或钢丝网架 + 钢筋的水泥膨胀珍珠岩板具有良好的塑性变形能力。

3) 达到正常使用允许挠度或允许裂缝宽度, 最不利情况下, 试件 B1~B4 对应的荷载 P_s (位移 Δ_s) 分别为: 18.1 kN (15 mm)、24.0 kN (12.9 mm)、7.3 kN (10.8 mm) 和 12.4 kN (15 mm)。

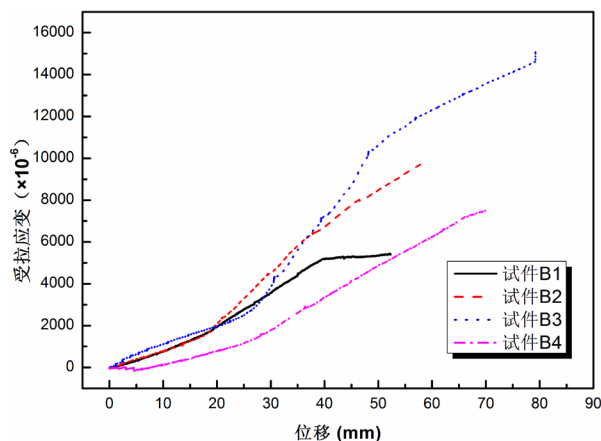


Figure 5. Tensile strain-displacement curves

图 5. 受拉应变 - 位移关系曲线

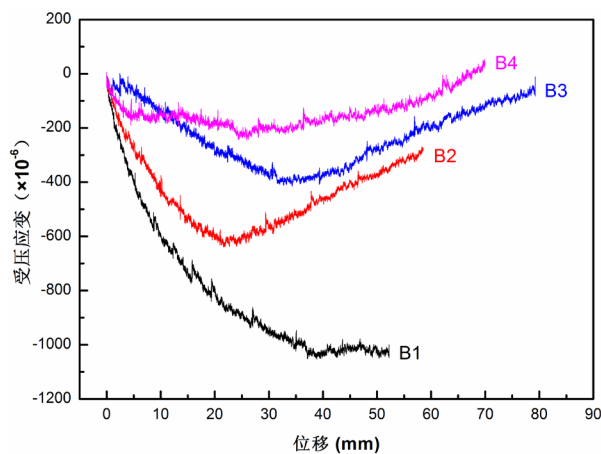


Figure 6. Compressive strain-displacement curves

图 6. 受压应变 - 位移关系曲线

3.5. 正截面承载力分析

本文研发的配置有钢筋或钢丝网架 + 钢筋的水泥膨胀珍珠岩板作为轻质混凝土板, 与蒸压加气混凝土板受力性能较相似, 参考其正截面抗弯承载力计算方法, 建立水泥膨胀珍珠岩板正截面抗弯承载力计算公式:

$$M_{u,cal} = 0.9 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (1)$$

$$f_c b x = f_y A_s + f_{ys} A_{ss}, \quad x \leq 0.5h_0 \quad (2)$$

式中： $M_{u,cal}$ 为正截面受弯承载力； f_c 为棱柱体轴心抗压强度标准值； b 为板材截面宽度； h_0 为截面有效高度； x 为受压区高度； f_y 为纵向受拉钢筋屈服强度； A_s 为纵向受拉钢筋面积； f_{ys} 为纵向受拉钢丝屈服强度； A_{ss} 为纵向受拉钢丝面积。

Table 4. Vertical load, displacement and displacement ductility coefficients of specimens
表 4. 试件的竖向荷载、位移、位移延性系数

试件编号	P_y / kN	Δ_y / mm	P_u / kN	Δ_u / mm	μ_Δ	$\frac{\Delta_u}{L}$	P_{L200} / kN	$P_{0.2}$ / kN	$\Delta_{0.2}$ / mm
B1	24.5	21.8	27.1	52.3	2.40	1/57	18.2	18.1	15
B2	34.7	20.6	44.0	58.5	2.84	1/51	27.3	24.0	12.9
B3	13.6	22.8	19.9	79.2	3.47	1/38	9.2	7.3	10.8
B4	24.6	32.9	28.9	69.9	2.12	1/43	12.4	22.6	28.1

由上式(1)和(2)，计算得到试件 B1~B4 弯矩理论值 $M_{u,cal}$ 。根据极限荷载 P_u 和正常使用允许荷载 P_y ，考虑试件自重，换算得到弯矩试验值 M_u 和 M_s 。 $M_{u,cal}$ 、 M_u 和 $M_{u,cal}/M_u$ 详见表 5 所示。由表 5 可知，弯矩理论值与试验值之比 $M_{u,cal}/M_u$ 在 0.93~1.04 之间，理论值与试验值吻合较好，表明建立的水泥膨胀珍珠岩板正截面抗弯承载力计算公式合理正确。

Table 5. Test and calculated results of bearing capacity and load effect
表 5. 试件承载力试验值、计算值及荷载效应

试件编号	M_y / kN·m	$M_{u,cal}$ / kN·m	$\frac{M_{u,cal}}{M_u}$	M_s / kN·m	M_w / kN·m	M_e / kN·m
B1	11.5	12.0	1.04	8.2	2.4	3.3
B2	17.9	16.7	0.93	10.4	2.4	3.3
B3	8.5	8.4	0.99	3.8	2.4	2.5
B4	11.9	11.6	0.97	5.7	2.4	2.5

3.6. 抵抗荷载作用能力

配置有钢筋或钢丝网架 + 钢筋的水泥膨胀珍珠岩板应用于外墙板，需抵抗风荷载和地震作用；应用于楼板，需承受相应的楼面均布荷载。

1) 风荷载

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012) [7]规定，外墙板的风荷载标准值 ω_k 按下式计算：

$$\omega_k = \beta_{gz} \mu_{sl} \mu_z \omega_0 \quad (3)$$

式中： β_{gz} 为高度 z 处的阵风系数； μ_{sl} 为局部风压体型系数； μ_z 为风压高度变化系数； ω_0 为基本风压。

以上海地区 100 m 高度处 C 类地面粗糙度为基础进行计算，基本风压 $\omega_0 = 0.55 \text{ kN/m}^2$ ，阵风系数 $\beta_{gz} = 1.69$ ，局部风压体型系数 $\mu_{sl} = 2.5$ （考虑最不利），风压高度变化系数 $\mu_z = 1.50$ ，代入上式(3)后得 $\omega_k = 3.5 \text{ kN/m}^2$ 。试件 B1~B4 在风荷载标准值作用下，引起的跨中正截面弯矩效应 M_w 详见表 5。

2) 水平地震作用

计算水平地震作用标准值时，可采用等效侧力法，根据《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1-2014) [8]规定，按下式进行计算：

$$F_{Ehk} = \beta_E \alpha_{\max} G_k \quad (4)$$

式中： F_{Ehk} 为施加于外挂墙板重心处的水平地震作用标准值； β_E 为动力放大系数，可取5； α_{\max} 为水平地震作用影响系数最大值； G_k 为外挂墙板的重力荷载标准值。

考虑抗震设防烈度8度(0.3g)，求得试件B1、B2及B3、B4的水平地震作用标准值 F_{Ehk} 分别为4.4kN和3.3kN，换算得到的跨中正截面弯矩效应 M_e 详见表5。

由表5可知，试件B1~B4弯矩效应 M_w 、 M_e 均小于正常使用允许弯矩 M_s 和极限弯矩 M_u ， $M_s/\max(M_w, M_e)$ 在1.5~3.2之间， $M_u/\max(M_w, M_e)$ 在3.4~5.4之间，表明水泥膨胀珍珠岩外墙板具有较好的抵抗风荷载及地震作用能力，安全储备较高，可应用于实际工程中。

3) 楼面均布荷载

试件B1~B4对应的正常使用允许荷载 P_s 分别为18.1kN、24.0kN、7.3kN和12.4kN，相应的等效楼面均布荷载分别为10.1kN/m²、13.3kN/m²、4.1kN/m²和6.9kN/m²。由计算结果可知，试件B1、B2和B4承载力较高，可运用于楼板，试件B3承载力较低，不建议使用。

4. 结论

1) 配置有钢筋或钢丝网架+钢筋的水泥膨胀珍珠岩板试件破坏时，荷载未见明显下降，受压区均无裂缝产生，板底受拉钢筋屈服，板面受压钢筋未屈服。采用钢筋相比于钢丝网架+钢筋的配筋形式及板厚提高，试件抗弯刚度增加，破坏时极限荷载增大。

2) 仅采用镀锌钢丝网架的水泥膨胀珍珠岩板，承载力很低、变形能力差，不适用于外墙板和楼板。

3) 建立了水泥膨胀珍珠岩板正截面抗弯承载力计算公式，理论值与试验值吻合较好，表明建立的水泥膨胀珍珠岩板正截面抗弯承载力计算公式合理正确，可应用于配筋设计计算。

4) 配置有钢筋或钢丝网架+钢筋的水泥膨胀珍珠岩板具有良好的延性性能、塑性变形能力，较好的抵抗风荷载、地震作用、楼面均布荷载能力，满足正常使用极限状态和承载能力极限状态要求，安全储备较高，可应用于装配式建筑工程外墙板、隔墙板及楼板。

基金项目

国家重点研发计划资助(项目编号：2017YFC0702900) (National Key R&D Program of China (No. 2017YFC0702900))。

参考文献

- [1] 张京街, 张兴伟, 池海. 蒸压加气混凝土楼板抗弯性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(3): 52-58.
- [2] 李志龙, 程才渊. 蒸压加气混凝土楼板抗弯性能试验与有限元理论分析[J]. 结构工程师, 2014, 30(1): 165-170.
- [3] 曲秀姝, 陈志华, 孙国军. 蒸压加气混凝土墙板结构性能的试验与有限元理论研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 268-273.
- [4] 张国伟, 陈博珊, 肖伟, 等. 蒸压加气混凝土外挂墙板受弯性能研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(13): 97-102.
- [5] GB15762-2008. 蒸压加气混凝土板[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [6] JGJ/T17-2008. 蒸压加气混凝土建筑应用技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2008.
- [7] GB50009-2012. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.
- [8] JGJ1-2014. 装配式混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014.