

粉煤灰泡沫混凝土墙体面外偏压承载力 数值模拟及简化计算

郝负洪^{1,2,3}, 刘永超¹, 秦立达¹, 王洪泽¹, 孙浩¹

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051;

3. 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要 目的 提出一种粉煤灰泡沫混凝土墙体结构, 对墙体进行平面外偏压力学性能研究及参数分析, 为该墙体在村镇低、多层建筑中的推广应用奠定基础。方法 设计3种粉煤灰泡沫混凝土墙体模型, 采用ABAQUS有限元分析软件对墙体平面外偏压力学性能进行研究; 建立104个墙体模型并展开参数化分析, 研究高宽比、内置冷拔钢丝间距、冷弯薄壁C型钢厚度等关键参数对墙体平面外偏压力学性能的影响规律; 最后建立适用于不同截面参数及高宽比的粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压承载力简化计算式。结果 有限元分析所得墙体损伤位置基本与试验结果吻合, 墙体极限承载力有限元分析值与试验值之比在1.114~1.147; 墙体截面参数中冷拔丝间距对平面外偏压承载力相关曲线的影响为正相关, 高宽比、冷弯薄壁型C钢厚度为负相关。结论 平面外偏压承载力简化计算式计算结果基本位于有限元分析曲线内部且曲线趋势一致, 可以较为准确地预测粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压承载力, 为墙体在工程实践中的设计提供一定理论依据。

关键词 泡沫混凝土墙体; 偏心受压; 力学性能; 有限元分析; 简化计算

中图分类号 TU398⁺.9

文献标志码 A

引用格式: 郝负洪, 刘永超, 秦立达, 等. 粉煤灰泡沫混凝土墙体面外偏压承载力数值模拟及简化计算[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 818-829. (HAO Yunhong, LIU Yongchao, QIN Lida, et al. Numerical simulation and simplified calculation of bearing capacity for solid fly ash foam concrete wall under out-of-plane eccentric compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5): 818-829.)

Numerical Simulation and Simplified Calculation of Bearing Capacity for Solid Fly Ash Foam Concrete Wall under Out-of-plane Eccentric Compression

HAO Yunhong^{1,2,3}, LIU Yongchao¹, QIN Lida¹, WANG Hongze¹, SUN Hao¹

收稿日期: 2024-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272190); 中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0189)

作者简介: 郝负洪(1977—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事新型节能建筑结构等方面研究。

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, China, 010051; 2. Engineering Technology Research Center for Building Inspection, Identification and Safety Assessment of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, China, 010051; 3. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, China, 010051)

Abstract: This paper proposed a thermal insulation and load-bearing fly ash foam concrete wall and investigate the mechanical properties of the wall under out-of-plane eccentric compression and analyze the parameters, in order to lay a foundation for the popularization and application of the wall in low-rise and multi-storey buildings in villages and towns. Three kinds of fly ash foam concrete wall models were designed, and ABAQUS finite element software was used to study the mechanical properties of the wall under out-of-plane eccentric compression. 104 wall models were established and parametric analysis was carried out to study the influence of key parameters such as aspect ratio, built-in cold-drawn steel wire spacing, and thickness of cold-formed thin-walled C-section steel on the mechanical properties of the wall under out-of-plane eccentric compression. Finally, a simplified calculation formula for the out-of-plane eccentric compression bearing capacity of fly ash foam concrete walls with different cross-section parameters and aspect ratios is established. The damage location of the wall obtained by the finite element analysis was basically consistent with the test results, and the ratio of the finite element analysis value to the test result value of the ultimate bearing capacity of the wall was between 1.114 and 1.147. The influence of cold drawn wire spacing on the correlation curve of out-of-plane eccentric compression bearing capacity in the wall section parameters is positively correlated, and the height-width ratio and the thickness of cold-formed thin-walled C steel are negatively correlated. The calculation results of the simplified calculation formula of the out-of-plane eccentric compression bearing capacity are basically located inside the finite element analysis curve and the curve trend is consistent. It can accurately predict the out-of-plane eccentric compression bearing capacity of the fly ash foam concrete wall and provide a theoretical basis for the design of the wall in engineering practice.

Key words: foam concrete wall; eccentric compression; mechanical properties; finite element analysis; simplified calculation

随着国务院办公厅《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》^[1]的出台,大宗工业固废资源化利用已逐渐成为构建绿色低碳循环经济体系的重要组成部分。工业固废粉煤灰作为一种优质的活性掺合材料,具有胶凝性、体积稳定性、耐久性良好的优点。泡沫混凝土是一种轻质多孔材料,由于泡沫混凝土中存在大量均匀分布的封闭孔隙,与普通混凝土材料相比具有质轻、保温节能性好、防火隔音性能优异等特点。在建筑中应用泡沫混凝土可以显著降低结构自重,并提高其防火、保温、隔音等性能。但泡沫混凝土抗压强度相对较低,其在实际工程中主要应用于非承重构件,导致泡沫混凝土墙体作为结构构件的应用研究则非常有限。将工业固废粉煤灰作为一种

辅助胶凝材料取代部分水泥研制出的粉煤灰泡沫混凝土墙体,既具有保温节能结构一体化的优点,又可以缓解工业固废粉煤灰大量堆存、综合利用率低、扬尘污染环境等问题。

关于泡沫混凝土墙体轴心受压力学性能的试验研究方面,徐志峰等^[2]、H. Péter 等^[3]发现在墙体内部填充泡沫混凝土后可以显著改善轻钢立柱的稳定性和承载能力,从而提高墙体的竖向承载力。Li Jie 等^[4]对轻钢龙骨内填泡沫混凝土剪力墙进行了轴压试验,发现外包冷弯薄壁型钢可以限制泡沫混凝土变形使其强度提高,填充泡沫混凝土后的墙体具有良好的延性和承载力。泡沫混凝土墙体偏心受压力学性能研究方面,E. Eltayeb 等^[5]给出了混凝土强度、钢板屈曲应力、墙

体尺寸和偏心距影响下泡沫橡胶混凝土填充异型钢组合墙的承载力公式。王建超等^[6]通过理论分析给出了不同参数下泡沫混凝土墙体在偏心荷载作用下的计算长度建议值、竖向承载力计算公式。但大多数研究中泡沫混凝土只作为保温填充材料而不参与墙体的承重,荷载主要由轻钢立柱或钢板承担,以上研究为泡沫混凝土墙体作为承重构件提供了研究方向。

目前关于泡沫混凝土墙体力学性能的试验研究和理论分析主要集中在轴心受压性能、受剪性能^[7]、抗震性能^[8-10]等,对平面外偏心荷载作用下泡沫混凝土墙体受力性能的研究还比较少,但在实际工程结构中沿墙厚方向存在偏心距时,上部传来的竖向荷载会产生较大的面外弯矩,墙体可能处于面内和面外荷载共同作用的复合受力状态,在楼板跨度较大的结构中也会出现在支撑剪力墙处产生较大弯矩同时剪力墙承担很大的竖向荷载的情况,面外弯矩会导致墙体发生平面外偏压失稳破坏。粉煤灰泡沫混凝土墙体具有优良的实用价值和发展前景,开展墙体平面外偏心受压的数值模拟及参数分析研究,可为此类墙体在复杂荷载共同作用下合理评估墙体的承载能力提供依据。

综上所述,笔者采用 ABAQUS 有限元分

析软件建立粉煤灰泡沫混凝土墙体模型,对墙体平面外偏压力学性能进行非线性有限元分析,并对墙体模型展开参数化分析,研究墙体的高宽比、内置冷拔钢丝间距、外包冷弯薄壁 C 型钢厚度等关键参数对墙体平面外偏压承载力的影响规律;通过粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压相关关系曲线,拟确定墙体大、小偏心界限点坐标(λ_M, λ_N);建立墙体轴压承载力 N_u 及面外受弯承载力 M_u 的计算公式;在此基础上提出粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压承载力的简化计算式,为粉煤灰泡沫混凝土墙体在工程实践中的设计提供理论依据。

1 有限元模型建立及分析

1.1 墙体模型设计

利用 ABAQUS 有限元分析软件建立 FW、CW1、CW2 等 3 种墙体模型并进行有限元分析。设计墙体长×宽×厚为 1 500 mm×1 000 mm×200 mm,底梁长×宽×厚为 1 700 mm×300 mm×260 mm。粉煤灰泡沫混凝土干密度为 1 200 kg/m³,其立方体抗压强度为 13 MPa;冷弯薄壁 C 型钢为 Q345 型,厚度分别为 0 mm、1 mm、2 mm;墙内配置为 4 mm 冷拔钢丝网,间距为 100 mm,墙体设计参数见图 1。

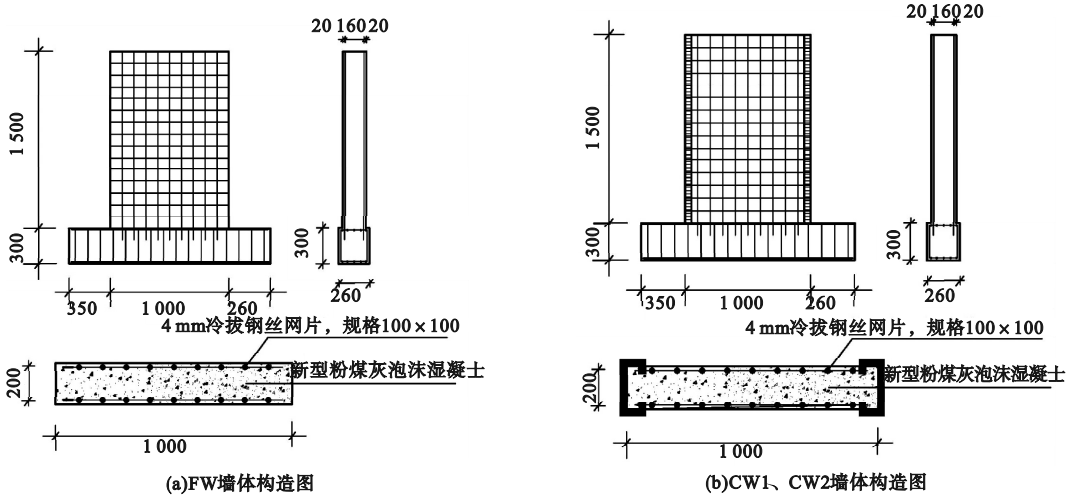


图 1 粉煤灰泡沫混凝土墙体构造

Fig. 1 The concrete wall structure of solid waste fly ash foam

1.2 有限元模型

粉煤灰泡沫混凝土墙体模型中墙体、底梁采用 8 节点减缩积分的 C3D8R 三维实体单元,冷弯薄壁 C 型钢采用 S4R 三维壳单元,冷拔钢丝网片采用 T3D2 线性桁架单元。墙体、底梁选择单元尺寸分别为 20、50 mm,冷拔钢丝网片、冷弯薄壁 C 型钢选择单元尺寸为 30 mm。粉煤灰泡沫混凝土墙体模型见图 2。

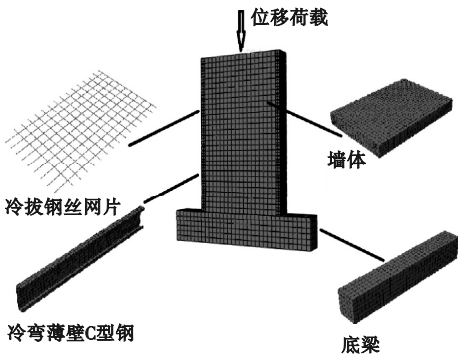


图2 粉煤灰泡沫混凝土墙体模型

Fig. 2 The concrete wall model of solid waste fly ash foam

1.3 材料本构关系

冷拔钢丝和冷弯薄壁 C 型钢的本构关系采用双直线模型,模型屈服后的应力-应变关系简化成直线,钢材弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ MPa、钢材屈服强度 $f_y=345$ MPa、泊松比 $\nu=0.3$ 。

本构模型选用 ABAQUS 提供的混凝土损伤塑性模型(CDP 模型),粉煤灰泡沫混凝土的受压应力-应变关系采用课题组前期试验研究所得到的应力-应变关系表达式^[11],则应力-应变关系表达式及曲线分别见式(1)、图 3。

$$\sigma = \begin{cases} 0.52(20.304 - \frac{18.72}{1 + (\frac{\varepsilon}{0.0093})^{2.629}}), & 0 < \varepsilon \leq 0.0132; \\ 4.205 + 9.253e^{\frac{-\varepsilon}{0.0134}}, & \varepsilon > 0.0132. \end{cases} \quad (1)$$

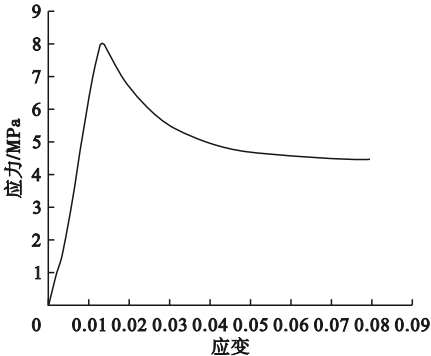


图3 粉煤灰泡沫混凝土本构曲线

Fig. 3 The constitutive curve of solid waste fly ash foam concrete

CDP 模型将损伤指标引入混凝土模型中,能较好地分析构件因混凝土材料损伤发展时的力学性能。损伤指标采用文献[12]提出的 Sidiroff 的能量等价原理计算得出。

单轴受压损伤指标:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \sqrt{k_c [\alpha_a + x(3 - 2\alpha_a) + x^2(\alpha_a - 2)]}, & x \leq 1; \\ 1 - \sqrt{\frac{k_c}{\alpha_c(x - 1)^2 + x}}, & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

其中, d_c 为混凝土单轴受压损伤演化指标; x 为名义应变与峰值受压应变的比值; $\alpha_a = 2.4 - 0.0125f_c^*$; $\alpha_c = 0.157f_c^{*0.785} - 0.905$; $k_c = f_c^*/(\varepsilon_c E_0)$; f_c^* 为混凝土单轴抗压强度, E_0 为初始弹性模量, ε_c 为与 f_c^* 对应的混凝土峰值压应变。

1.4 接触及边界条件

墙体与底梁的接触选取绑定(tie)的方式,冷拔钢丝网片用内置区域(embed)的方式埋置到泡沫混凝土墙体中。冷弯薄壁 C 型钢与泡沫混凝土墙体接触的相互作用类型为表面与表面接触(standard),两者相互作用属性中切向行为的摩擦公式采用罚函数,界面摩擦系数取 0.6;法线方向的接触采用硬接触。平面外偏压作用下墙体顶部边界条件为限制 X、Z 水平方向的位移和绕

X、Y方向的转角,偏心距为 30 mm,底梁边界条件类型为完全固定。加载方式采用位移控制,垂直加载面进行加载。边界条件见图 4。

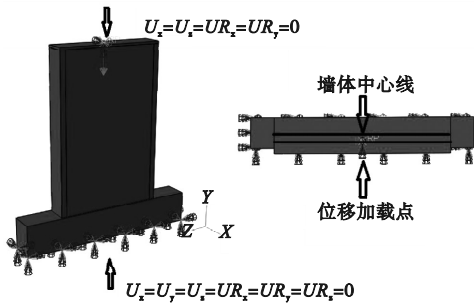


图 4 边界条件
Fig. 4 The boundary conditions

1.5 有限元模拟结果分析

1.5.1 荷载-位移曲线对比分析

有限元分析的荷载-位移曲线与笔者研究团队前期试验^[11]所得出的荷载-位移曲线基本吻合。对于极限承载力两者接近,有限元分析值较试验值偏高,因为在有限元分析过程中粉煤灰泡沫混凝土为理想均质材料,而试验试件内部存在一定的原始缺陷,以及未考虑冷拔钢丝与粉煤灰泡沫混凝土之间的粘结滑移。峰值点后有限元分析过程没有考虑泡沫混凝土的累计损伤效应,曲线与试验结果相比下降较为缓慢。墙体极限承载力有限元分析值与试验结果值之比在 1.114 ~ 1.147,吻合较好。墙体竖向荷载-竖向位移曲线对比见图 5。

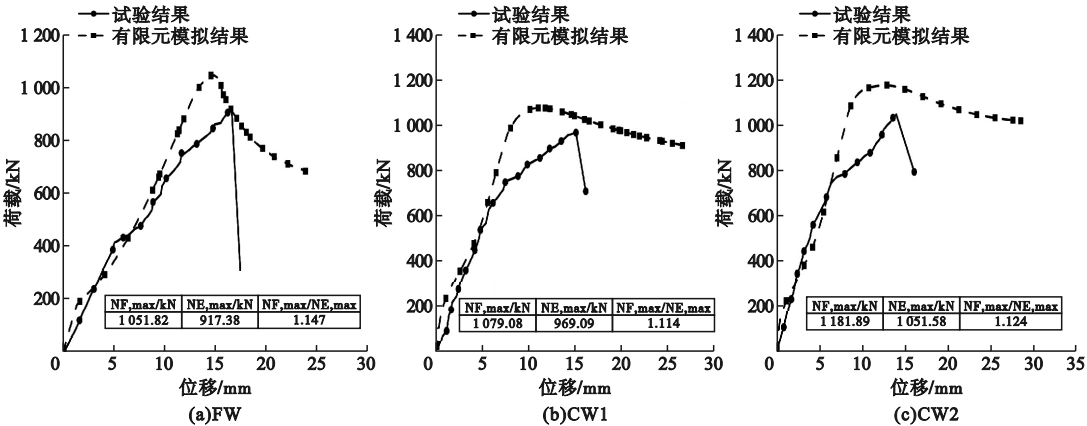


图 5 粉煤灰泡沫混凝土墙体竖向荷载-位移曲线对比

Fig. 5 The load-displacement curves comparison of experimental and simulation results for fly ash foam concrete wall

1.5.2 破坏形态对比分析

FW 墙体在竖向偏心荷载作用下偏心一侧墙面应力较大,应力从上至下递减,墙面平均最大压应力值为 6.13 MPa。FW 墙体偏心一侧墙面受压损伤主要集中于墙面中上部,墙面出现裂缝并逐渐贯通并脱落。CW1、CW2 墙体在竖向偏心荷载作用下偏心一侧墙面顶部应力较大,受压损伤主要集中于墙面上部左、右角,墙面上部出现裂缝并向下扩展。随着冷弯薄壁 C 型钢厚度的增加,墙面平均最大压应力值也逐渐增大,分别为

6.49 MPa、7.00 MPa。冷弯薄壁 C 型钢平均压应力呈现出从上至下,从偏心一侧向对侧逐渐递减的特征,平均最大压应力值分别为 351.1 MPa、367.7 MPa。冷弯薄壁 C 型钢对泡沫混凝土起到明显约束作用,对墙体的平面外偏心受压承载力有显著提升作用。图中虚线圆框包围区域为墙体主要发生破坏部位,可以得出有限元分析所得墙体损伤位置基本与试验吻合,表明有限元模型具有较好的适用性。FW、CW1、CW2 墙体有限元分析结果和试验结果对比见图 6。

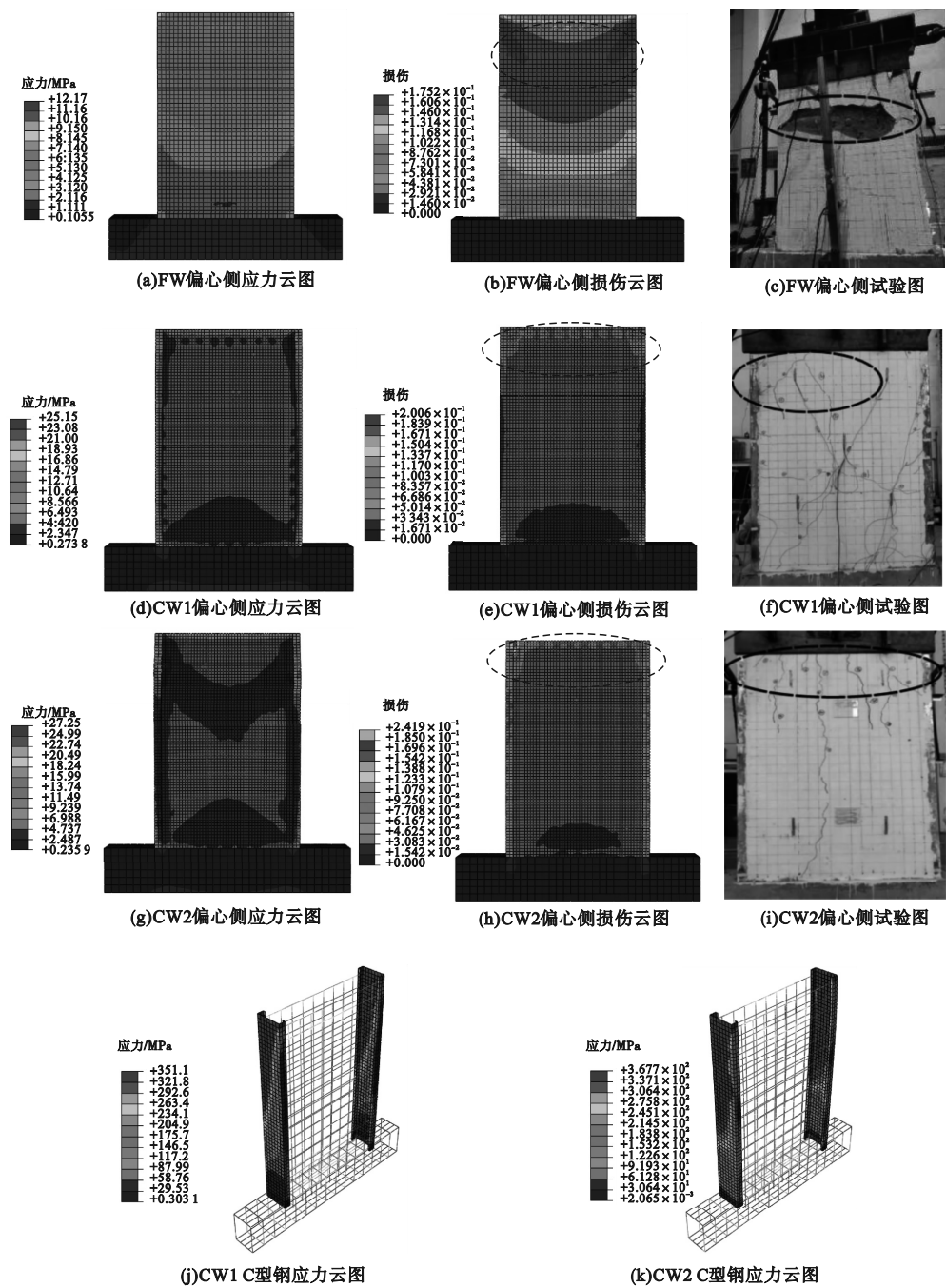


图 6 粉煤灰泡沫混凝土墙体有限元分析与试验对比

Fig. 6 The comparison of finite element analysis and experimental results for fly ash foam concrete wall

2 平面外偏压承载力计算公式拟合

2.1 参数分析

对墙体平面外偏压力学性能进行参数化分析,研究高宽比、内置冷拔钢丝间距、外包

冷弯薄壁 C 型钢厚度等关键因素对粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压力学性能的影响规律。CW1 ~ CW13 等墙体模型在有限元分析时偏心距分别取 0 mm、30 mm、60 mm、90 mm、120 mm、150 mm、180 mm;并建立各墙体相应的受弯有限元模型,共计 104 个。

为便于分析将有限元模拟所得 $N-M$ 关系曲线横、纵坐标分别除以 N_u 、 M_u ,再对各参数影响下的 $N/N_u-M/M_u$ 关系曲线进行分析,确

定各参数对 $N/N_u-M/M_u$ 关系曲线影响规律。墙体参数见表 1,墙体参数化分析结果见图 7。

表 1 粉煤灰泡沫混凝土墙体参数化分析基本信息

Table 1 Basic information of parametric analysis for fly ash foam concrete wall

试件编号	墙高/mm	墙宽/mm	墙厚/mm	冷拔钢丝间距/mm	C 型钢厚度/mm
CW3	1 500	1 400	200	100	2
CW2	1 500	1 200	200	100	2
CW4	1 500	1 000	200	100	2
CW5	1 500	800	200	100	2
CW1	1 500	1 000	200	100	1
CW6	1 500	1 000	200	100	2.5
CW7	1 500	1 000	200	100	3
CW8	1 500	1 000	200	50	2
CW9	1 500	1 000	200	75	2
CW10	1 500	1 000	200	125	2
CW11	1 800	1 000	200	100	2
CW12	2 100	1 000	200	10	2
CW13	2 400	1 000	200	100	2

由图 7 可知,出冷拔丝间距从 50 ~ 125 mm 逐渐增大时,关系曲线逐渐外凸,界限点横、纵坐标 λ_M 、 λ_N 分别增长 48.47%、9.32%;当墙体高宽比从 1.875 至 1.071 逐渐减小时,关系曲线逐渐外凸,界限点横纵坐标 λ_M 、 λ_N 分别增长 47.69%、0.24%;当墙体高宽比从 1.5 ~ 2.4 逐渐增大时,关系曲线逐渐内凹,界限点横纵坐标 λ_M 、 λ_N 分别增长 9.28%、1.52%;当墙体外包冷弯薄壁型 C 型钢厚从 1 ~ 3 mm 逐渐增大时,关系曲线逐渐内凹,界限点横坐标 λ_M 减小 30.44%、纵坐标 λ_N 增加 14.27%。综上所述,墙体截面参数冷拔丝间距对归一化偏压 $N-M$ 关系曲线的影响为正相关,高宽比、冷弯薄壁型 C 钢厚度为负相关。

2.2 平面外偏压承载力相关曲线特征点计算公式

(1) $N/N_u-M/M_u$ 关系曲线界限点拟合
基于 2.1 节的参数分析,以墙体冷拔丝间距、高宽比、外包冷弯薄壁 C 型钢厚度为参数,对粉煤灰泡沫混凝土墙体偏压 $N/N_u-M/M_u$

关系中间界限点横、纵坐标 λ_M 、 λ_N 进行非线性回归分析拟合。将冷拔丝间距转化为墙截面配筋率 ρ_1 、外包冷弯薄壁 C 型钢厚度转化为冷弯薄壁 C 型钢面积与墙正截面有效面积 bh_0 之比 ρ_2 代入分析,得到墙体 $N/N_u-M/M_u$ 关系模型界限点与冷拔丝间距、高宽比、外包冷弯薄壁 C 型钢厚度的关系,其表达式如下:

$$\lambda_M = \frac{11.92}{(l/h)} - 0.89 \log(1 + 1.15 \times 10^7 \rho_1) - 3.81 \times 10^4 \times \rho_2 - 2.72 \times 10^3 \left(\frac{l}{h}\right) \rho_1 + 121 \left(\frac{l}{h}\right) \times \rho_1 + 4.43 \times 10^8 \times \rho_1^2 \rho_2.$$

(3)

$$\lambda_N = \frac{-0.069}{(l/h)} - 1.48 \times 10^3 \log(1 - 0.904 \rho_1) - 1.17 \times 10^3 \rho_2^2 - 7.07 \times 10^3 \left(\frac{l}{h}\right) \rho_1 + 20.43 \left(\frac{l}{h}\right) \times \rho_2 - 3.25 \times 10^7 \rho_1^2 \rho_2.$$

(4)

$$\rho_1 = \frac{A_s}{bh_0}.$$

(5)

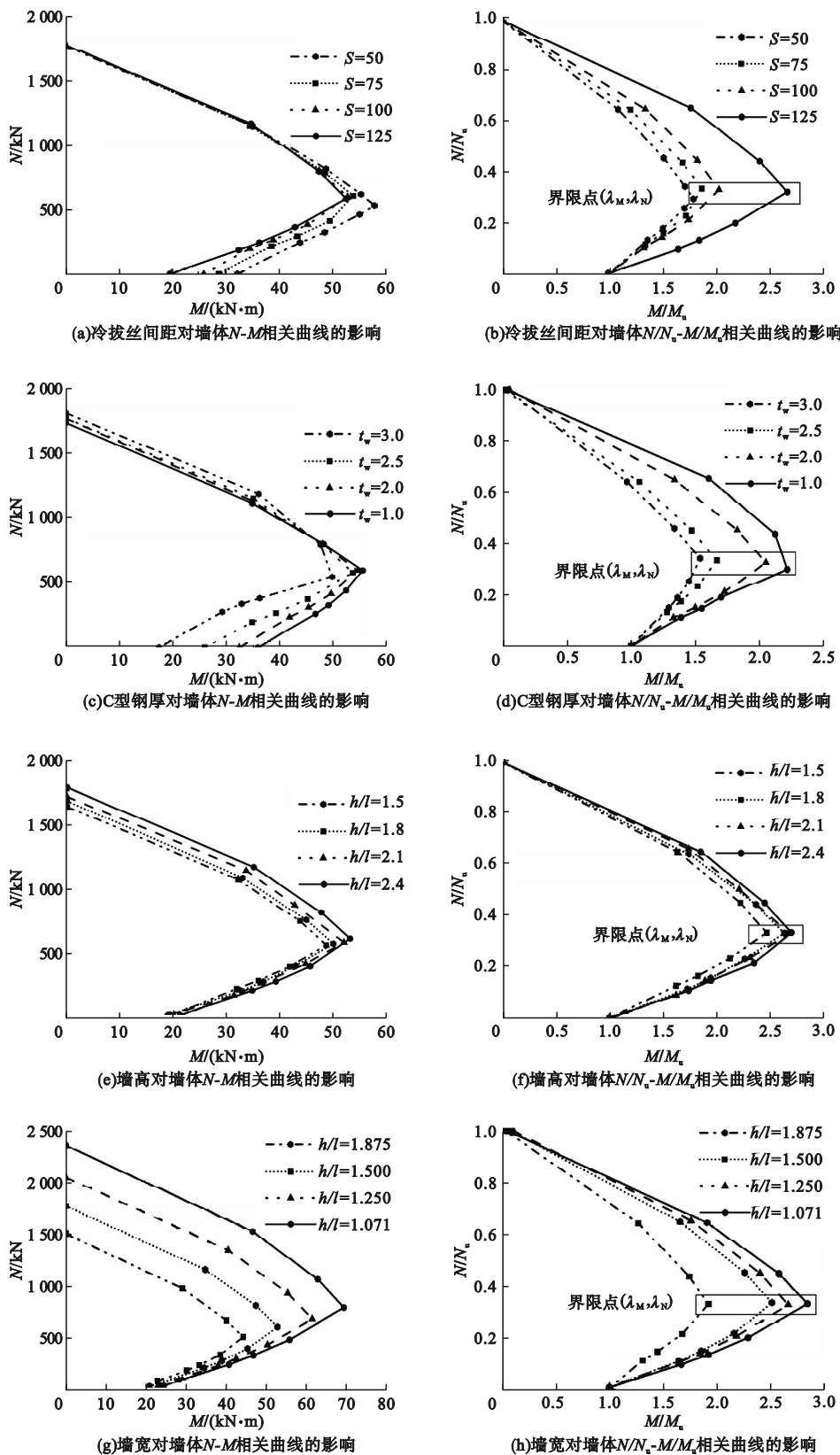


图7 粉煤灰泡沫混凝土墙体面外偏压参数化分析结果

Fig. 7 The eccentric parametric analysis results of out-of-plane for solid waste fly ash foam concrete wall

$$\rho_2 = \frac{A_p}{bh_0} \tag{6}$$

式中: h 为墙体截面宽度,mm; h_0 为墙体截面有效宽度,mm; b 为墙厚,mm; l 为墙高,mm; A_s 、 A_p 分别为冷弯薄壁 C 型钢受拉、受压翼缘的截面面积,mm²。

$N/N_u - M/M_u$ 关系曲线界限点横、纵坐

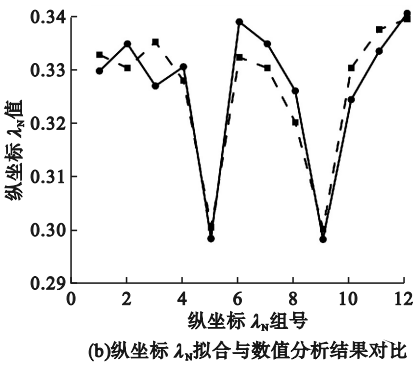
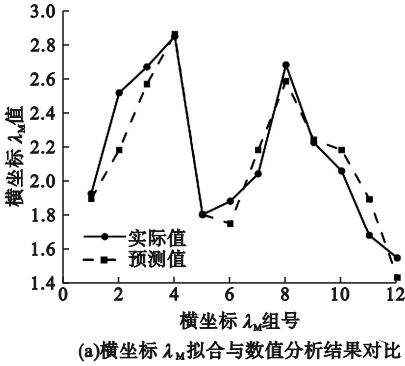


图 8 界限点横纵坐标 λ_M、λ_N 拟合结果与数值分析结果对比

Fig. 8 The comparison of experimental fitting and numerical analysis results for boundary points λ_M and λ_N

(2)轴压承载力

轴压承载力采用文献[13-14]中正截面轴压承载力公式进行计算:

$$N_u = 0.9\varphi(f_c A_c + f_y A_s + f_p A_p) \tag{7}$$

式中: N_u 为轴向承载力,kN; A_c 为泡沫混凝土截面面积,mm²; A_s 为冷拔钢丝截面面积,mm²; A_p 为冷弯薄壁 C 型截面面积,mm²; f_c 为泡沫混凝土轴心抗压强度,MPa; f_y 为冷拔钢丝钢筋网片的屈服强度,MPa; f_p 为冷弯薄壁 C 型钢的屈服强度,MPa; φ 为墙体稳定系数;墙体轴压承载力计算简图见图 9。

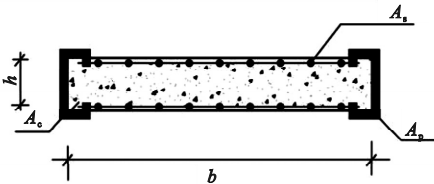


图 9 墙体轴压承载力计算简图

Fig. 9 The calculation diagram of axial compression bearing capacity for the wall

(3)受弯承载力

受弯承载力按照文献[13-14]中矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算,定义

标 λ_M、λ_N 拟合公式结果与数值分析结果对比见图 8。关系系数为 0.915,模型预测值与有限元模拟值有较高的吻合度,说明拟合公式能够较好反映冷拔丝间距、高宽比、外包冷弯薄壁 C 型钢厚度对 $N/N_u - M/M_u$ 关系模型界限点的影响规律,可以作为 $N/N_u - M/M_u$ 关系模型界限点的预测公式。

全截面屈服为受弯极限状态,忽略受拉区混凝土强度,对受拉钢筋合力点取矩可得:

$$M_u = f_p A'_p h_0 + f_p x t [0.667x + (h - x - a_s)] - f_p \times (h - x) t \times \frac{2(h - x - a_s)}{3} + \alpha_l f_c b x (h_0 - a'_s - 0.5x) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) + f_p A_p a_s \tag{8}$$

混凝土受压区高度按下列公式确定:

$$\alpha_l f_c b x = f_p A_p + f_p A_{pt} + f_y A_s - f'_y A'_s - f'_p A'_{pc} - f_p A'_p \tag{9}$$

混凝土受压区高度符合下列条件:

$$x \leq \zeta_b h_0 \tag{10}$$

$$x \geq 2a'_s \tag{11}$$

式中: M_u 为受弯承载力; f_p 为冷弯薄壁 C 型钢的屈服强度; f_c 为泡沫混凝土轴心抗压强度; A_p 、 A'_p 分别为冷弯薄壁 C 型钢受拉、受压腹板的截面面积,mm²; A_{pt} 、 A'_{pc} 分别为冷弯薄壁 C 型钢受拉、受压翼缘的截面面积,mm²; h_0 为截面有效高度,mm; ζ_b 为相对界限受压区高度; b 为截面宽度,mm; h 为截面高度,mm; x 为泡沫混凝土等效受压区高

度,mm; a_s 为受拉区冷拔钢丝至截面受拉边缘的距离,mm; a'_s 受压区冷拔钢丝至截面受压边缘的距离,mm; t 为冷弯薄壁 C 型钢腹板厚度,mm; α_1 为受压区泡沫混凝土压应力影响系数,取 1.0;墙体受弯承载力计算简图见图 10。

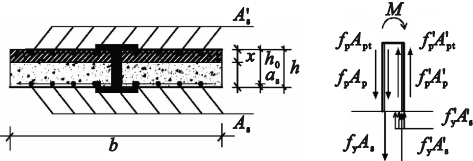


图 10 墙体受弯承载力计算简图

Fig. 10 The calculation diagram of pure bending bearing capacity for the wall

公式计算结果与有限元分析结果对比见图 11,相关系数分别为 0.905、0.901;公式计算值与试验值比较见表 2,表明墙体轴压承载力公式及受弯承载力公式具有较好的精度。

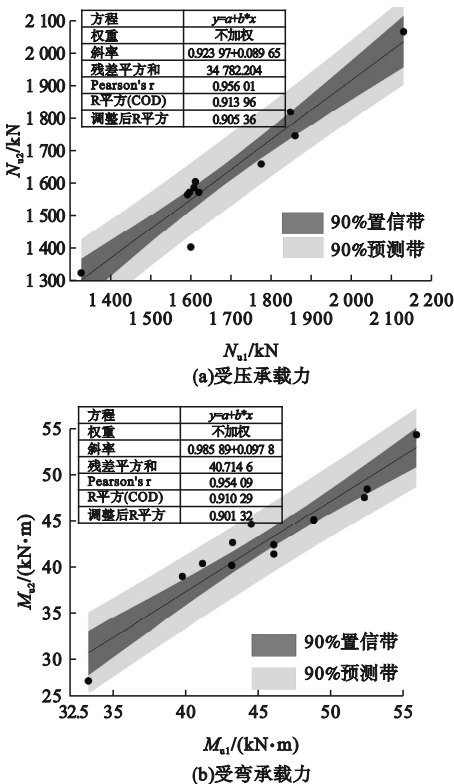


图 11 公式计算结果与有限元分析结果对比

Fig. 11 The comparison result of formula calculation and finite element analysis

表 2 粉煤灰泡沫混凝土墙体轴压承载力公式计算值与试验值比较

Table 2 The axial compression bearing capacity comparison of calculation results and measured values for solid waste fly ash foam concrete wall

试件型号	承载力/kN		试验值/计算值
	计算值	试验值	
FW	1 302. 31	1 385	1. 06
CW1	1 392. 76	1 452	1. 04
CW2	1 576. 23	1 713	1. 09

2.3 粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压承载力简化计算公式

依据墙体模型受力特点、曲线形状及文献[15–16],采用三折线模型简化描述粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压 $N/N_u - M/M_u$ 关系,通过图 12 可以得出三个分界点分别为 $(1, 2.5\lambda_N)$ 、 (λ_M, λ_N) 以及 $(1, 0)$, 结合 2.1 节参数分析及 2.2 节特征点公式拟合结果,粉煤灰泡沫混凝土墙体偏压承载力简化计算公式如下:

$$\begin{cases} \frac{N}{N_u} = (2\lambda_N - 1) \frac{M}{M_u} + 1, 2\lambda_N < \frac{N}{N_u} \leq 1; \\ \frac{N}{N_u} = \left(\frac{\lambda_N}{1 - \lambda_M}\right) \frac{M}{M_u} + \left(2\lambda_N - \frac{\lambda_N}{1 - \lambda_M}\right), \\ \lambda_N \leq \frac{N}{N_u} \leq 2\lambda_N; \\ \frac{N}{N_u} = \left(\frac{\lambda_N}{\lambda_M - 1}\right) \frac{M}{M_u} + \frac{\lambda_N}{\lambda_M - 1}, \frac{N}{N_u} < \lambda_N. \end{cases} \quad (12)$$

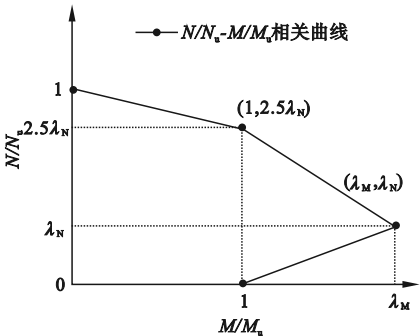


图 12 粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压相关曲线

Fig. 12 The correlation curve of out-of-plane eccentric compression for fly ash foam concrete wall

2.4 粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压简化计算公式验证

2.4.1 有限元分析与简化公式计算结果对比分析

选取三个墙体模型进行验证,将有限元分析结果与简化公式计算出的关系曲线进行对比。墙体参数见表3,结果对比见图13。由图13可知,公式计算结果与有限元分析曲线吻合较好,公式计算结果基本位于有限元分析曲线内部且曲线趋势一致,公式计算结果较有限元分析结果相对保守,结果偏安全。

表3 粉煤灰泡沫混凝土墙体基本信息

Table 3 Basic information of the specimens

试件编号	墙高/mm	墙宽/mm	墙厚/mm	冷拔钢丝间距/mm	C型钢厚度/mm
CW14	1 500	900	200	100	2
CW15	1 500	1 000	200	100	1.5
CW16	1 500	1 000	200	80	2

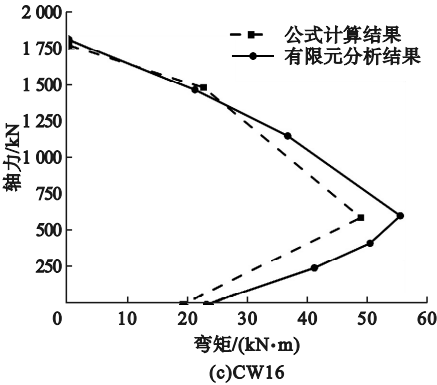
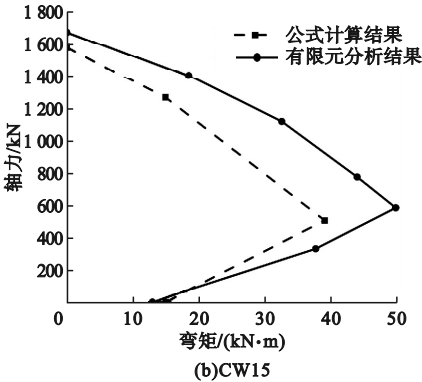
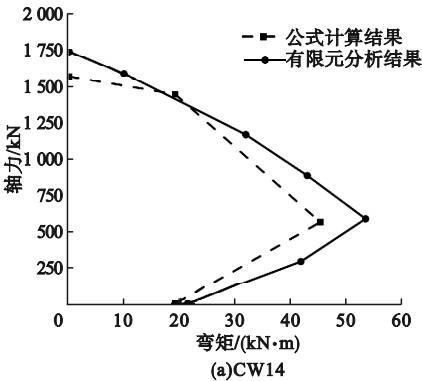


图13 有限元分析与公式计算结果对比

Fig. 13 Comparison results of finite element analysis and formula calculation

3 结 论

(1)得到了3种粉煤灰泡沫混凝土墙体试件的竖向荷载-位移曲线,曲线形态基本吻合;极限承载力有限元分析值与试验结果之比在1.114~1.147;试件的损伤云图与试件的破坏形态与试验结果吻合较好,有限元模型具有较好的适用性。

(2)墙体截面参数中冷拔丝间距为影响 $N/N_u-M/M_u$ 关系曲线的正关系参数,高宽比、冷弯薄壁型C钢厚度为影响 $N/N_u-M/M_u$ 关系曲线的负关系参数;笔者提出了墙体平面外偏压承载力相关曲线中界限点坐标 (λ_M, λ_N) 的计算公式、轴压承载力 N_u 及面外受弯承载力 M_u 的计算公式,计算结果与数值分析结果关系系数分别为0.915、0.905、0.901,表明所提出的界限点坐标公式、墙体轴压承载力公式及受弯承载力公式具有较高的精度。

(3)笔者提出了粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压承载力简化计算公式,数据回归分析的相关系数为0.91;表明该公式可以较好地预测粉煤灰泡沫混凝土墙体平面外偏压承载力,研究结果可以为该墙体在工程实际设计提供依据。

参考文献

[1] 发改委环资司. 关于加快构建废弃物循环利用

- 用体系的意见[J]. 中华纸业, 2024, 45(3): 2.
(The Department of Environmental Resources under the National Development and Reform Commission. Opinions on accelerating the construction of waste recycling system [J]. China pulp & paper industry, 2024, 45(3): 2.)
- [2] 徐志峰, 陈忠范, 朱松松, 等. 秸秆板轻钢高强泡沫混凝土剪力墙轴心受压性能研究[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 219–231.
(XU Zhifeng, CHEN Zhongfan, ZHU Songsong, et al. Study of lightweight steel high-strength foamed concrete shear wall covered with straw board subjected to axial loading [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(7): 219–231.)
- [3] PÉTER H, LÁSZLÓ D. Experimental investigations on ultra-lightweight-concrete encased cold-formed steel structures [J]. Thin-walled structures, 2016, 101: 100–108.
- [4] LI Jie, CHEN Zhongfan, CHEN Wenwen. Axial load-bearing capacities of pre-cast self-insulation walls made by foam concrete [J]. Structures, 2020(27): 1951–1961.
- [5] ELTAYEB E, MA X, YAN Z G. Composite walls composed of profiled steel skin and foam rubberized concrete subjected to eccentric compressions [J]. Journal of building engineering, 2022, 46: 103715.
- [6] 王建超, 杨文涛, 周静海, 等. 轻钢泡沫混凝土组合墙体偏心受压承载力计算研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(11): 56–60.
(WANG Jianchao, YANG Wentao, ZHOU Jinghai, et al. Calculation study on eccentric compressive bearing capacity of light steel foam concrete combination wall [J]. Building science, 2018, 34(11): 56–60.)
- [7] WANG Jianchao, QIU Ziming, LIANG Jiahe. Experimental investigations on the lateral performance of foam concrete light steel keel composite wall [J]. Journal of building engineering, 2023, 72: 106551.
- [8] HAO Yunhong, QIN Lida, HE Xiaoyan, et al. Experimental study on seismic behavior of fabricated lightweight steel solid waste high-strength foam concrete composite wall [J]. Structures, 2023, 52: 921–932.
- [9] HAO Yunguo, WANG Hongze, QIN Lida, et al. Dynamic characteristics and response analysis of a new type of prefabricated fly ash foam concrete structure [J]. Structures, 2023, 57: 105074.
- [10] ZHOU Ding, LIU Dianzhong, LI Kuolin. Experimental study on seismic performance of fabricated steel foamed concrete T-shaped wallboard [J]. Advances in civil engineering, 2020, 2020(1): 8841116(21).
- [11] 郭卓轩. 一种新型固废粉煤灰泡沫混凝土墙体受压力学性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2022.
(WU Zhuoxuan. Study on compressive mechanical properties of a new type of solid waste fly ash foam concrete wall [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2022.)
- [12] 熊涛. 装配整体式发泡混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
(XIONG Wei. Experimental study on seismic performance of assembled monolithic foamed concrete shear wall [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.)
- [13] 中国建筑科学研究院. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
(China Academy of Building Research. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Building Construction Press, 2010.)
- [15] 朱浩. 桁架式多腔体钢板组合剪力墙面外偏压试验与理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
(ZHU Hao. Experimental and theoretical study on out-of-plane eccentric compression of truss multi-cavity steel plate composite shear wall [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.)
- [16] 黄真锋, 张素梅, 陈杰, 等. T形多腔钢-混凝土组合构件压弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 108–119.
(HUANG Zhenfeng, ZHANG Sumei, CHEN Jie, et al. Research on bending performance of T-shaped multi-cavity steel-concrete composite members [J]. Journal of building structures, 2020, 41(5): 108–119.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)