

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403007



框架填充墙平面外抗震性能数值模拟

孟杰¹, 郭子雄^{1,2}, 谢鑫尧¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究不同程度平面内(IP)损伤,以及加载制度对框架填充墙平面外(OOP)抗震性能的影响,采用 ABAQUS 软件对分离式框架填充墙模型进行分析。模拟结果表明:框架填充墙平面内损伤程度是影响平面外承载力与刚度的重要因素,平面外承载力与刚度随着平面内损伤程度增大而降低;以 1/200 位移角为幅值进行低周往复加载后维持平面内位移,框架填充墙平面外承载力有一定提高,但维持平面内位移对于延缓平面外刚度退化影响不显著;框架填充墙平面内受损程度增加后,达到平面外峰值荷载时墙体面外变形程度增大,以 1/100 位移角为幅值进行低周往复加载后,维持平面内位移对墙体平面外横向变形有一定增大作用。

关键词: 框架填充墙; 平面外; ABAQUS 软件; 抗震性能

中图分类号: TU 375.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0158-08

Numerical Simulationon of Out-of-Plane Seismic
Performance of Frame Infilled WallMENG Jie¹, GUO Zixiong^{1,2}, XIE Xinyao¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To investigate the effect of different degrees of in-plane (IP) damage and the loading system on the seismic performance of the frame infilled wall out-of-plane (OOP), the separation frame infilled wall model using ABAQUS software is analyzed. The simulation results show that the IP damage degree of the frame infilled wall is an important factor affecting the OOP bearing capacity and stiffness, the OOP bearing capacity and stiffness decrease as the IP damage degree increases. After low-frequency cyclic loading with a displacement angle of 1/200 as the amplitude, the IP displacement is maintained, and the OOP bearing capacity of the frame filled wall improves to a certain extent. Maintaining IP displacement has no significant effect on delaying the degradation of out of plane stiffness. As the IP damage degree of frame infilled wall increases, the OOP deformation of infill increases. The degree of IP damage of the frame filled wall increases, the degree of OOP deformation of the wall body increases when reaching the OOP peak load. After low-frequency cyclic loading with a displacement angle of 1/100, maintaining IP displacement has a certain increasing effect on the lateral deformation of OOP wall.

Keywords: frame infilled wall; out-of-plane; ABAQUS software; seismic performance

收稿日期: 2024-03-07

通信作者: 郭子雄(1967-),教授,博士,博士生导师,主要从事工程结构抗震防灾的研究。E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178485);福建省科技计划高校产学研合作项目(2020Y4011)

钢筋混凝土(RC)框架结构因具有建筑平面布置灵活简单、经济效益好等优点,在国内外建筑行业广泛应用。在过去 40 多年中,作为“结构”构件的梁与柱及框架结构整体抗震性得到充分研究,能够较好实现“小震不坏,大震不倒”的设防目标,而作为“非结构”构件填充墙,在我国现行抗震体系设计中还未得到充分重视。在历次强震中,填充墙的不规则布置和不合理砌筑对 RC 框架结构地震反应存在较大影响,特别是填充墙约束作用经常导致框架柱发生剪切脆性破坏^[1],当填充墙损伤严重时又容易出现平面外倒塌震害^[2]。为准确评估框架填充墙抗倒塌能力,需要考虑不同程度平面内损伤对框架填充墙平面外抗震性能的影响。

Ricci 等^[3]提出达到初裂与峰值时刻框架填充墙平面外强度与割线刚度折减系数计算公式。Ricci 等^[4]认为当墙体高厚比小于 20 时,高厚比变化对框架填充墙平面内外耦合效应影响明显。De Risi 等^[5]基于以往数据集与试验结果,研究高宽比对框架填充墙平面内外耦合效应的影响,认为 Ricci 等^[3]提出的框架填充墙平面外强度折减系数计算公式拟合效果最为理想。Di Domenico 等^[6]在 De Risi 等工作上进一步拓展,提出考虑高厚比、高宽比、不同程度平面内损伤等多参数的平面外强度折减系数计算公式。Xie 等^[7]提出框架填充墙平面外承载力与墙体半高处挠度的计算公式。Di Trapani 等^[8]采用 ABAQUS 软件,分析轴向压力施加位置与平面外加载方式对框架填充墙平面外性能的影响。

综上,对框架填充墙平面内外耦合作用的研究取得一定进展。为丰富框架填充墙平面外抗震性能研究成果,本文采用 ABAQUS 软件对分离式框架填充墙模型进行分析,研究不同程度平面内损伤及加载制度对框架填充墙平面外抗震性能的影响。

1 有限元模型建立

1.1 填充墙建模方式

填充墙有限元建模方式主要有整体式建模、分离式建模、精细化建模。整体式建模是将填充墙作为整体,由一种连续均质的各项同性材料构成,适用于分析结构整体响应。整体式建模忽略了砌块与砂浆的相互作用,将墙体视为整个“墙板”,无法模拟裂缝开展与滑移。精细化建模是指将砌块和砂浆分别建立,通过粘性单元模拟砂浆性能,计算精度最高,但该种建模方法计算体量大,且计算不容易收敛。分离式建模是将砌块与砌块周围 1/2 厚度的砂浆组合在一起形成组合砌块,通过定义组合砌块交界面的接触属性,模拟砂浆裂缝开裂与滑移。分离式建模,如图 1 所示。图 1 中: h_m 是砂浆厚度; h_b 是砌块厚度。

1.2 材料本构关系选取

1.2.1 混凝土与钢筋本构关系 采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[9]中规定的混凝土单轴受拉与单轴受压本构关系;采用 ABAQUS 软件的混凝土塑性损伤(CDP)模型定义混凝土材料属性;采用的塑性损伤的膨胀角为 35° ,偏心率为 0.1,双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度的比值为 1.16,拉伸子午面与压缩子午面上第 2 应力的比值为 0.667,粘性参数为 0.000 5。

钢筋本构关系采用 PQ-Fiber 子程序中的 USteel03 钢筋本构,本构关系适用于模拟钢筋混凝土构件中的普通钢筋。

1.2.2 砌体本构关系 采用文献[10]中的砌体受压本构关系,即

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{\eta}{1 + (\eta - 1)(\epsilon_c / \epsilon_{cm})^{\eta/(\eta - 1)}} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cm}} \quad (1)$$

式(1)中: σ_c, ϵ_c 分别为压应力与压应变; η 为砌体弹性模量与峰值点割线模量的比值, $\eta = E\epsilon_{cm} / f_{cm}$, f_{cm} 为砌体抗压强度平均值, ϵ_{cm} 为 f_{cm} 对应的应变, E 为砌体弹性模量。

采用文献[10]中的砌体受拉本构关系,即

$$\left. \begin{aligned} y &= x, & x &\leq 1, \\ y &= \frac{x}{2(x-1)1.7+x}, & x &\geq 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: $y = \sigma_t / f_{tm}$, f_{tm} 为砌体抗拉强度平均值; $x = \epsilon_t / \epsilon_{tm}$, ϵ_{tm} 为 f_{tm} 对应的应变; σ_t, ϵ_t 分别为拉应力与

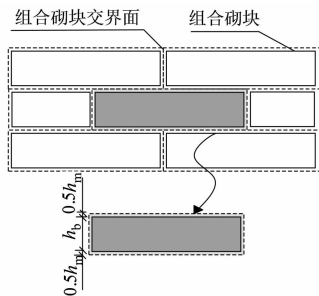


图 1 分离式建模

Fig. 1 Separation modeling

拉应变。

1.3 损伤因子的计算

为描述混凝土与砌体的损伤,采用文献[11]提出的损伤因子计算公式,即

$$\left. \begin{aligned} d_c &= \frac{(1-\eta_c)\tilde{\epsilon}_c^{\text{in}} E_0}{\sigma_c + (1-\eta_c)\tilde{\epsilon}_c^{\text{in}} E_0}, \\ d_t &= \frac{(1-\eta_t)\tilde{\epsilon}_t^{\text{ck}} E_0}{\sigma_t + (1-\eta_t)\tilde{\epsilon}_t^{\text{ck}} E_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: d_c, d_t 分别为受压、受拉损伤因子; E_0 为无损伤的弹性模量; $\tilde{\epsilon}_c^{\text{in}}, \tilde{\epsilon}_t^{\text{ck}}$ 分别为非弹性应变、开裂应变, $\tilde{\epsilon}_c^{\text{in}} = (\epsilon_c - \sigma_c)/E_0, \tilde{\epsilon}_t^{\text{ck}} = (\epsilon_t - \sigma_t)/E_0$; η_c, η_t 分别为受压状态与受拉状态下,材料塑性应变占非弹性应变的比例, $\eta_c = 0.6, \eta_t = 0.9$ 。

1.4 组合砌块界面接触的设置

组合砌块接触界面行为可用粘性接触与摩擦属性进行描述,其中,粘性接触定义为硬接触,描述界面受压情况,使用 ABAQUS 软件提供的牵引力-分离模型描述界面受拉开裂直至失效过程;摩擦属性使用库伦模型描述界面相互摩擦行为。将接触界面损伤演化阶段分为线弹性阶段、粘性接触退化阶段、滑动摩擦阶段。

1.4.1 线弹性阶段 在线弹性阶段,接触面上的粘性接触没有发生损伤,摩擦属性的应力可表示为

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_s \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{t}, \boldsymbol{\delta}$ 为接触面上应力向量与分离向量; σ_n, τ_s, τ_t 为接触界面上法向拉应力与两个切向方向的应力; $\delta_n, \delta_s, \delta_t$ 为接触界面上法向分离分量与两个切向方向的分离分量; \mathbf{K} 为接触界面上的刚度矩阵;Abdulla 等^[12]建议

$$\left. \begin{aligned} K_{nn} &= \frac{E_b E_m}{h_m (E_b - E_m)}, \\ K_{ss} &= K_{tt} = \frac{G_b G_m}{h_m (G_b - G_m)}, \end{aligned} \right\}$$

E_b, E_m 分别为砌块与砂浆的弹性模量, G_b, G_m 分别为砌块与砂浆的剪切模量。

1.4.2 粘性接触退化阶段 当接触界面上的应力组合满足某一准则时,即可认为接触面上的粘性接触发生损伤,接触界面上的摩擦属性开始工作。采用二次应力准则定义损伤触发条件,当接触界面上应力满足下式时认为损伤产生,即

$$\left(\frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n^{\text{max}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_s^{\text{max}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_t}{\tau_t^{\text{max}}} \right)^2 = 1. \quad (5)$$

式(5)中: $\sigma_n^{\text{max}}, \tau_s^{\text{max}}, \tau_t^{\text{max}}$ 为牵引力-分离模型在线弹性阶段的法向方向与两个切向方向的最大应力,在取砌体轴心抗拉强度平均值与抗剪强度平均值的基础上^[13],进一步修正 $\sigma_n^{\text{max}}, \tau_s^{\text{max}}, \tau_t^{\text{max}}$, 即 $\sigma_n^{\text{max}} = 0.141 \sqrt{f_m}, \tau_s^{\text{max}} = \tau_t^{\text{max}} = a \times 0.125 \sqrt{f_m}$, a 为抗剪强度修正系数,推荐值取 2, f_m 为砂浆抗压强度平均值。

用库伦模型描述摩擦属性,临界切应力 τ_{cri} 为

$$\tau_{\text{cri}} = c + u \sigma_n. \quad (6)$$

式(6)中: c 为粘聚力; μ 为摩擦系数, $\mu = 0.7$ 。

在损伤演化的过程中,选用基于能量的混合模式描述损伤演化过程,将牵引力-分离模型下降段指定为线性软化,接触界面上的应力与相对位移关系由式(4)转变为

$$\mathbf{t} = (1-D) \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} \quad (7)$$

式(7)中: D 为损伤演化系数, D 取值 0~1。

1.4.3 滑动摩擦阶段 当损伤演化系数 D 为 1 时,表示粘性接触失去作用,界面上只有摩擦力抵抗界面上的剪力,滑动时界面上的切应力 τ_{sli} 为

$$\tau_{\text{sli}} = \mu \sigma_n. \quad (8)$$

2 有限元建模方法验证

2.1 平面内建模方法验证

2.1.1 试件信息 选用文献[14]中 BF 与试件 AFKJ1 进行平面内建模方法验证。框架为 1 : 2 比例缩尺框架, 填充墙为实心粘土砖砌筑, 墙体厚度为 120 mm。

试件 AFKJ1 尺寸, 如图 2 所示。材料的实测力学性能见文献[14], 柱的设计轴压比为 0.35, 试验中对柱施加的竖向轴力为 328 kN, 试验中轴力保持不变。

2.1.2 模型建立 混凝土实体采用绑定约束方式进行连接, 钢筋采用 embedded 方式嵌入混凝土中。对于平面内荷载, 在梁端设置参考点, 将参考点与梁端耦合约束, 按照试验加载制度在参考点上进行位移控制, 每级荷载进行一次循环。

根据试验边界条件, 对地梁采用完全固定约束模拟地梁锚固情况, 同时, 施加侧向约束防止框架出现面外移动而影响模拟精度。混凝土与砌体单元类型指派为 8 节点 6 面体线性减缩积分 (C3D8R), 钢筋单元类型指派为三维二节点桁架单元 (T3D2), 混凝土与钢筋网格大小为 50 mm, 砌体网格大小控制在 50 mm, 地梁网格大小为 200 mm。

2.1.3 试验结果与模拟结果对比分析 框架填充墙平面内模型, 如图 3 所示。图 3 中: f 为平面内荷载; Δ 为加载位移。

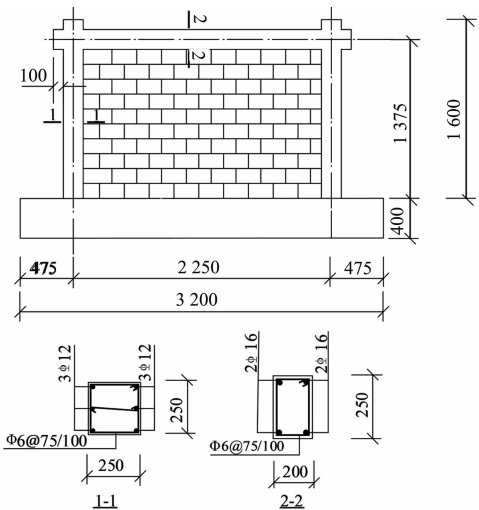
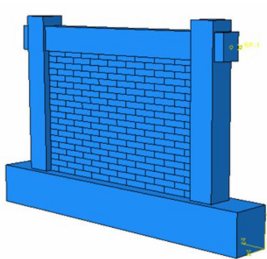
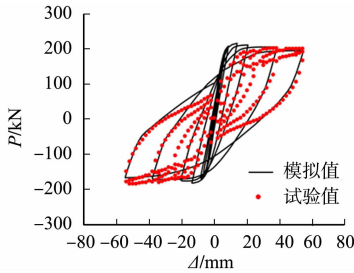


图 2 试件 AFKJ1 尺寸 (单位: mm)

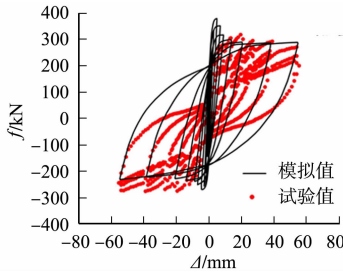
Fig. 2 Dimension of specimen AFKJ1 (unit: mm)



(a) 平面内模型



(b) BF 试件



(c) AFKJ1 试件

图 3 框架填充墙平面内模型

Fig. 3 IP model of frame infilled wall

由图 3 可知: 钢筋采用 embedded 方式嵌入至混凝土中不会产生混凝土与钢筋的滑移, 滞回曲线捏拢情况难以出现, 但从滞回曲线整体看, 模拟值与试验值匹配程度较为良好。

2.2 平面外建模方法验证

2.2.1 试件信息 选用文献[3]中试件 OOP_4E 进行平面外建模方法验证。框架为 2 : 3 比例缩尺框架, 填充墙为空心砌块砌筑, 墙体厚度为 80 mm。试件 OOP_4E 尺寸, 如图 4 所示。材料实测力学性能与加载制度见文献[3]。

2.2.2 模型的建立 采用材料本构关系、网格划分与平面内模型保持一致。在墙体平面外布置参考点, 设置连续分布耦合方式, 将参考点与墙体进行连接, 按照试验加载制度在参考点上进行位移控制。

2.2.3 试验结果与模拟结果对比分析 框架填充

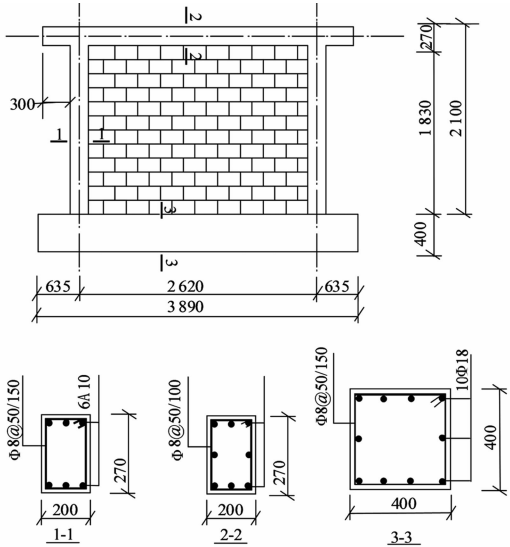


图 4 试件 OOP_4E 尺寸 (单位: mm)

Fig. 4 Dimension of specimen OOP_4E (unit: mm)

墙平面外模型,如图 5 所示。图 5 中: f_{out} 为平面外荷载。

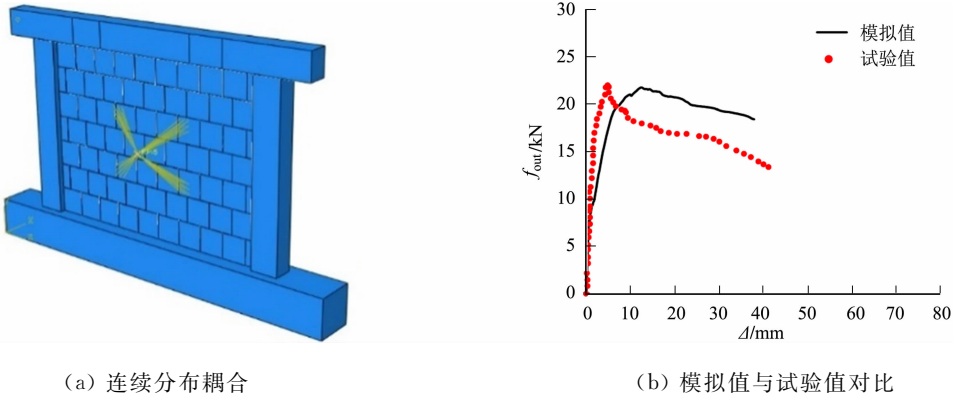


图 5 框架填充墙平面外模型

Fig. 5 OOP model of frame infilled wall

由图 5(b)可知:试件平面外峰值荷载的试验值为 22.02 kN,模拟值为 20.00 kN,相差 9.17%,模拟结果与试验结果匹配程度良好;试件峰值位移的试验值为 4.89 mm,模拟值为 13.42 mm,模拟结果与试验结果存在一定偏差;平面外荷载-位移曲线模拟结果与试验结果趋势接近。

表 1 模型加载工况

Tab. 1 Loading program of models

模型	IP 最大位移角	IP 加载情况	荷载施加情况
BM0	—	—	OOP 单调加载
BM1	1/200	卸载	先 IP,后 OOP
BM2	1/100	卸载	先 IP,后 OOP
BM3	1/200	维持	先 IP,后 OOP
BM4	1/100	维持	先 IP,后 OOP

3 参数分析

为研究不同程度平面内损伤及加载制度对框架填充墙平面外抗震性能的影响,以文献[14]中 AFKJ1 为原型,建立模型 BM0~BM4,模型加载工况,如表 1 所示。表 1 中:IP 为平面内;OOP 为平面外。定义达到 40%峰值荷载的割线刚度为初始刚度^[15],荷载-位移曲线下降至 85%峰值荷载点的割线刚度为极限刚度。

3.1 损伤情况

选用 DAMAGEC 模拟框架填充墙的受损程度(ξ),如图 6 所示。

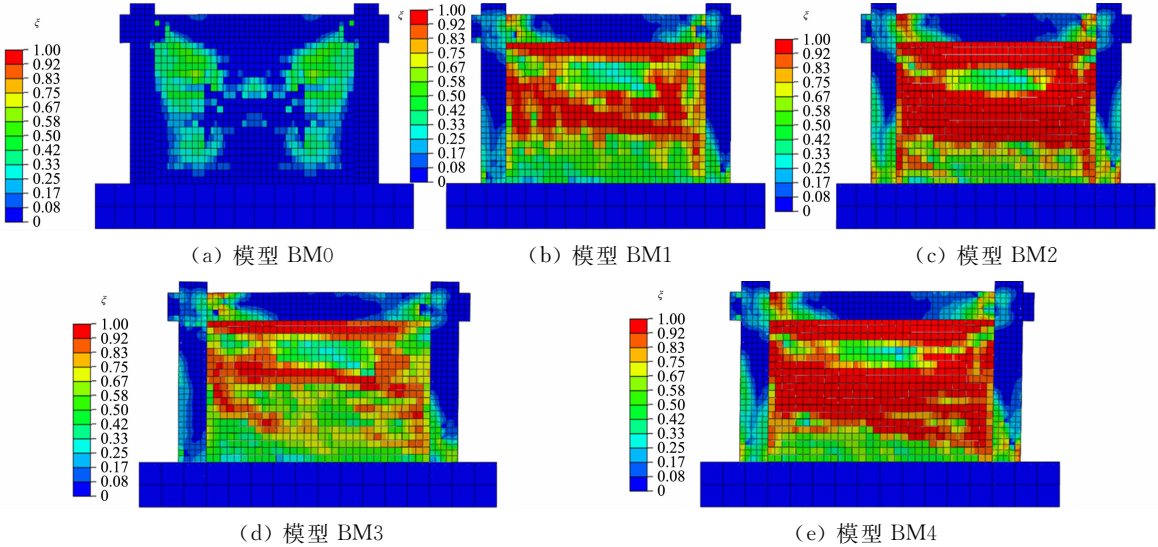


图 6 框架填充墙受损程度

Fig. 6 Damage degree of frame infilled walls

由图 6 可知:在只有平面外荷载作用下,模型 BM0 呈现出双向拱破坏的特点,在框架的梁柱节点处有轻微损伤;在平面内、外荷载作用下,模型 BM1~BM4 随着平面内层间位移角的增大,达到平面外峰值荷载时墙体损伤越严重,框架的梁柱节点处损伤也逐渐增大;对比模型 BM1, BM3 和模型 BM2,

BM4, 维持 1/200 位移角进行平面外加载, 可在一定程度上减轻平面外损伤, 但在 1/100 位移角为幅值加载后, 维持平面内荷载对减轻墙体平面外损伤基本无影响。

3.2 平面外荷载-位移曲线

平面外荷载-位移曲线, 如图 7 所示。图 7 中: $f_{out,p}$ 为平面外峰值荷载。

由图 7 可知: 在达到 40% 峰值荷载之前, 平面外荷载-位移曲线基本呈线性关系, 模型处于弹性工作阶段; 在 40% 峰值荷载至峰值荷载阶段, 模型平面外荷载随着加载位移的增大而增加, 模型平面外荷载-位移曲线呈非线性增加关系, 荷载增长速率不断降低, 组合砌块之间粘性接触基本退出工作, 依靠组合砌块相互挤压与框架之间的顶紧形成拱机制承受外部荷载; 随着模型平面外荷载不断增大, 模型的拱效应不断削弱; 在达到峰值荷载后, 模型平面外荷载逐渐下降, 认为模型进入失效阶段; 荷载退化至 85% 峰值荷载后, 认为框架填充墙退出工作。

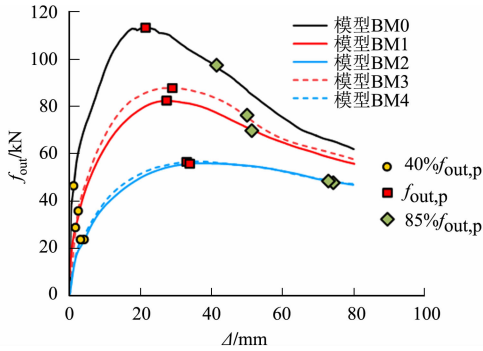


图 7 平面外荷载-位移曲线

Fig. 7 Loading-displacement curves of OOP

3.3 平面外荷载

平面外荷载-位移曲线特征点模拟结果, 如表 2 所示。表 2 中: k_i 为初始刚度; $k_{out,p}$ 为平面外峰值荷载对应的割线刚度; f_i 为平面外极限荷载; k_l 为平面外极限荷载对应的割线刚度。

由表 2 可知: 模型 BM1, BM2 平面外峰值荷载与模型 BM0 的相比分别下降 27. 47%, 50. 70%, 这表明框架与填充墙的相互作用使填充墙发生严重损伤, 随着层间位移角的增大, 墙体平面外峰值荷载下降程度增大; 模型 BM3, BM4 平面外峰值荷载与模型 BM0 相比分别下降 22. 63%, 50. 03%, 这表明在框架填充墙损伤较轻时, 维持平面内位移能够加强框架对填充墙的边界约束, 提高一定的平面外承载力, 但在框架填充墙受损严重时, 维持平面内位移对框架填充墙承载力影响不明显。

表 2 平面外荷载-位移曲线特征点模拟结果

Tab. 2 Simulation results of characteristic points of OOP loading-displacement curves

模型	$k_i/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$f_{out,p}/\text{kN}$	$k_{out,p}/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	f_i/kN	$k_l/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$
BM0	51. 46	113. 47	5. 31	96. 51	2. 31
BM1	14. 14	82. 30	3. 03	69. 92	1. 35
BM2	5. 97	55. 94	1. 53	47. 56	0. 62
BM3	15. 15	87. 78	3. 14	74. 61	1. 47
BM4	7. 71	56. 70	1. 61	48. 15	0. 64

3.4 平面外刚度退化

将平面外刚度用荷载-位移曲线的割线刚度表示, 初始刚度为

$$k_i = f_i / X_i。$$

式中: f_i 为第 i 级荷载, X_i 为第 i 级位移。

初始刚度退化曲线, 如图 8 所示。

根据表 2 与图 8 可知: 模型 BM0 的平面外初始刚度要显著高于模型 BM1~BM4。模型 BM1~BM4 平面外初始刚度与模型 BM0 相比分别下降 72. 52%, 88. 39%, 70. 56%, 85. 02%。这表明框架填充墙平面内损伤对平面外刚度影响明显, 随着层间位移角的增大, 墙体平面外初始刚度愈低。

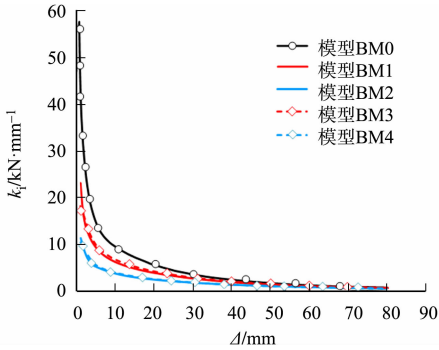


图 8 初始刚度退化曲线

Fig. 8 Initial stiffness degradation curves

从模型 BM1, BM3, 模型 BM2, BM4 的刚度退化曲线对比可以看到, 框架填充墙平面内维持荷载对平面外刚度影响不显著。平面外刚度退化速率随加载位移的增大而减缓, 当加载位移超过墙高的 3% 时, 模型平面外刚度基本相同。

3.5 平面外变形曲线

平面外荷载-变形曲线,如图 9 所示。图 9 中: Δ_V 为竖向位移; Δ_T 为横向位移; H 为模型高度; W 为模型宽度。

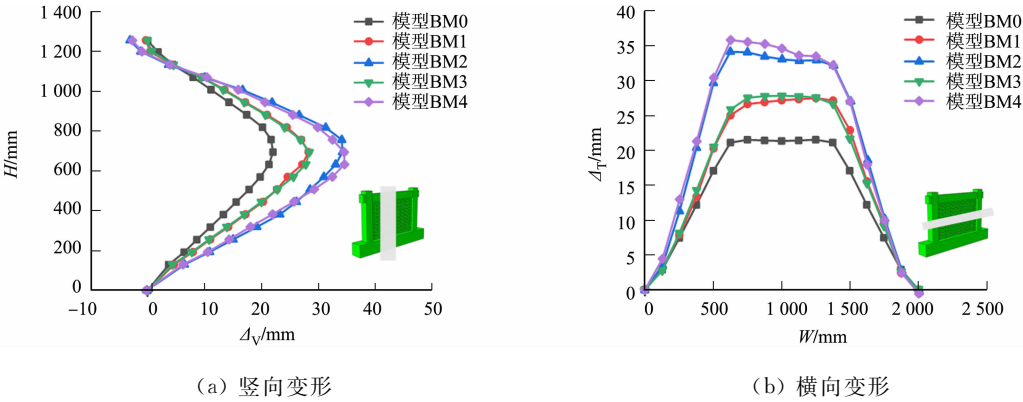


图 9 平面外荷载-变形曲线

Fig. 9 Loading-deformation curves of OOP

由图 9 可知以下 2 点结论。

1) 在平面外荷载下,各模型平面外位移沿着模型的高度分布规律大致相同,即顶层与底层砌体平面外位移小,中部砌体平面外位移大;模型平面外竖向位移曲线呈现抛物线形状,模型 BM0 平面外竖向最大位移为 22.07 mm,而模型 BM1~BM4 平面外竖向最大位移为 BM0 的 1.28,1.55,1.29,1.57 倍;随着平面内层间位移角的增大,达到峰值荷载时框架填充墙平面外竖向变形愈大,维持面内荷载对减小墙体平面外竖向变形无明显影响。

2) 模型平面外横向位移曲线呈现三折线形状,随着平面内层间位移角的增大,达到平面外承载力峰值时平面外横向变形愈大,但平面外横向变形的不均匀性也在增加;模型 BM0 平面外横向最大位移为 21.53 mm,而模型 BM1~BM4 墙体平面外横向最大位移为 BM0 的 1.28,1.59,1.29,1.66 倍;随着平面内层间位移角的增大,达到峰值荷载时框架填充墙面外横向变形愈大,以 1/200 位移角为幅值进行加载后,维持平面内位移对墙体平面外横向变形无明显影响,而 1/100 位移角为幅值进行加载后,维持平面内荷载对墙体平面外横向变形有一定增大作用。

4 结论

- 1) 框架填充墙平面外峰值承载力随着平面内损伤程度增大而降低;当模型 BM1,BM2 加载至 1/200 与 1/100 位移角时,其平面外峰值承载力分别降低 27.47%与 50.70%。
- 2) 框架填充墙平面内加载位移对其平面外承载力有一定影响;模型 BM3,BM4 平面外峰值荷载与模型 BM0 相比分别下降 22.63%,50.03%,
- 3) 框架填充墙平面外刚度随平面内损伤增大而降低,维持平面内位移对延缓平面外刚度退化影响不显著。加载位移超过墙高的 3%时,框架填充墙模型刚度退化速率基本相同。
- 4) 以 1/100 位移角为幅值进行加载后,维持平面内位移对墙体平面外横向变形有一定增大作用,而 1/200 位移角为幅值加载后的墙体维持平面内位移对横向变形无明显影响。

参考文献:

[1] 郭子雄,黄群贤,魏荣丰,等. 填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43 (11):46-54. DOI:10.15951/j. tmgxcb. 2010. 11. 011.

[2] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报,2008(4):1-9. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2008. 04. 001.

[3] RICCI P,DI DOMENICO M,VERDERAME G M. Experimental assessment of the in-plane/out-of-plane interaction in unreinforced masonry infill walls[J]. Engineering Structures, 2018, 173: 960-978. DOI: 10.1016/j. engstruct.

- 2018.07.033.
- [4] RICCI P, DI DOMENICO M, VERDERAME G M. Experimental investigation of the influence of slenderness ratio and of the in-plane/out-of-plane interaction on the out-of-plane strength of URM infill walls[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 191: 507-522. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.011.
- [5] DE RISI M T, DI DOMENICO M, RICCI P, *et al.* Experimental investigation on the influence of the aspect ratio on the in-plane/out-of-plane interaction for masonry infills in RC frames[J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 523-540. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.03.111.
- [6] DI DOMENICO M, DE RISI M T, RICCI P, *et al.* Empirical prediction of the in-plane/out-of-plane interaction effects in clay brick unreinforced masonry infill walls[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111438. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111438.
- [7] XIE Xinyao, GUO Zixiong, BASHA S H. Out-of-plane behavior of clay brick masonry infills contained within RC frames using 3D-digital image correlation technique[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 376: 131061. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131061.
- [8] DI TRAPANI F, VIZZINO A, TOMASELLI G, *et al.* A new empirical formulation for the out-of-plane resistance of masonry infills in reinforced concrete frames[J]. *Engineering Structures*, 2022, 266: 114422. DOI:10.1016/j.engstruct.2022.114422.
- [9] 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.
- [10] 郑妮娜, 李英民, 潘毅. 芯柱式构造柱约束的低层砌体结构抗震性能[J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(1): 24-29, 55. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.2011.01.004.
- [11] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. *工业建筑*, 2014(增刊1): 167-171, 213. DOI:10.13204/j.gyjz2014.s1.227.
- [12] ABDULLA K F, CUNNINGHAM L S, GILLIE M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach[J]. *Engineering Structures*, 2017, 151: 349-365. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.08.021.
- [13] 蒋济同, 周新智. 基于分离式建模的砌体墙力学性能有限元分析参数探讨[J]. *建筑结构*, 2019(增刊1): 640-644. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.S1.133.
- [14] 黄群贤. 新型砌体填充墙框架结构抗震性能与弹塑性地震反应分析方法研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2011.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)