

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.04.007

考虑现浇楼板影响的砖砌墙体抗震性能研究

张倚天^{1,2a}, 解圆聪^{2a}, 张望喜^{2a,2b}, 何超^{2a}, 岳风华^{2a}, 陈乐球³, 易伟建^{2a,2b}

(1. 湖南建设投资集团有限责任公司, 长沙 410029; 2 a. 湖南大学土木工程学院; b. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 长沙 410082; 3. 中国石油天然气股份有限公司湖南销售分公司, 长沙 410005)

摘要: 基于 ABAQUS 建立砌体墙片有限元模型, 与选取的试验墙片结果进行对比, 验证有限元模拟的可信度; 再利用有限元模型分别研究现浇楼板、砂浆强度、圈梁截面尺寸、墙顶竖向压应力、开洞率和墙片高宽比对砌体墙片抗震性能的影响。结果表明, 现浇楼板、构造柱和圈梁共同构成整体, 加强了对墙片的约束, 减轻了墙片的损伤; 提高砂浆强度等级, 墙片的承载力和延性将增大; 适当的圈梁截面尺寸能有效减轻墙片的破坏程度; 适当的墙顶竖向压应力能显著降低墙片的破坏程度; 墙片开洞会降低其承载力和位移延性; 增大墙片的高宽比, 墙片的承载力将减小, 且墙片主要破坏形式从剪切型破坏转化成弯曲型破坏。

关键词: 结构工程; 现浇楼板; 有限元分析; 砌体结构; 抗震性能

中图分类号: TU362

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)04-064-14

Seismic performance of brick masonry walls considering the influence of cast-in-situ floor slabs

ZHANG Yitian^{1,2a}, XIE Yuancong^{2a}, ZHANG Wangxi^{2a,2b}, HE Chao^{2a}, YUE Fenghua^{2a},
CHEN Leqiu³, YI Weijian^{2a,2b}

(1. Hunan Construction Investment Group, Changsha 410029, Hunan, P. R. China; 2 a. College of Civil Engineering, Hunan University; b. Key Lab on Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, P. R. China; 3. PetroChina Hunan Marketing Company, Changsha, Hunan 410005, P. R. China)

Abstract: With the help of finite element software ABAQUS, the numerical analysis results of the finite element model of the masonry walls were compared with the experimental results to verify the reliability of the finite element simulation. Based on this, the effects of the cast-in-situ floor slabs, the strength of mortar, the cross-sectional dimension of ring beams, the vertical compressive stress on the top of walls, and the opening and aspect ratios of walls on the seismic performance of masonry walls were investigated. The results show that the cast-in-situ slabs, the constructional columns and ring beams form a complete structure, strengthening the constraint on the wall sheet and reducing the damage. The bearing capacity and ductility of walls increase with the increase of mortar strength. Appropriate cross-sectional dimension of ring beam and vertical compressive stress on the top of

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078201)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52078201).

作者简介: 张倚天(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事组合结构研究, (E-mail) yitianzhang@hnu.edu.cn。

walls can effectively reduce the damage of masonry walls. The bearing capacity and displacement ductility of walls decrease with the opening of walls. The bearing capacity of walls decreases with the increase of the aspect ratio of walls. At the same time, the main failure mode of walls changes from shearing failure to bending failure.

Keywords: structural engineering; cast-in-situ floor slabs; finite element analysis; masonry structure; seismic performance

砌体结构在我国应用广泛,民用和工业建筑的基础、围护墙、内外墙、屋盖等结构构件均可由砌体结构砌筑^[1-2]。提高砌体结构的抗震性能是设计中的一项重点工作^[3]。在强烈地震中,砌体结构房屋的倒塌概率最大。实际工程中发现,砌体结构在地震中发生整体倒塌很大程度上是由于砌体墙片发生开裂破坏继而引发后续破坏。因此,有必要开展对砌体墙片抗震性能的进一步研究,保证其抗震性及安全性^[4]。砌体结构的震害如图1所示。



图1 砌体结构震害

Fig.1 Earthquake damage of masonry structure

近年来,国内外学者通过试验和有限元模拟开展了许多对砌体墙片抗震性能的分析。郑妮娜^[5]通过对芯柱式和现浇构造柱约束墙片的低周反复荷载试验,证明了两者具有相当的抗震性能;张望喜等^[6]对9片砖砌体墙片进行了单调水平荷载试验,分析墙片高宽比、墙顶竖向压应力和不同加载方式对墙片侧向承载力的影响;Quiroz等^[7]对4片具有不同配筋率圈梁和构造柱的墙片完成了低周反复荷载试验,分析了配筋率对墙片抗震性能的影响;王啸霆等^[8]设计并进行了纵墙、带构造柱纵墙以及相对应加固墙片的对照试验,结果表明,采取加固措施的墙片具有更高的抗震性能、强度和刚度;邓明科等^[9]对高延性混凝土(HDC)单面加固构造柱约束砌体墙片进行了拟静力试验,分析了HDC加固对墙片承载力和刚度的影响;Tripath等^[10]通过有限元软件分析,提出了一种适用于约束砌体墙体的拉压杆模型,计算开洞和不开洞的砌体墙片平面内承载力。

在研究砌体墙片抗震性能时,已有的试验和有限元模拟^[11-14]往往忽略了现浇楼板的作用。为研究现浇楼板对砌体墙片抗震性能的影响,文中比较带现浇楼板与否的砌体墙片,分析了砂浆强度、圈梁截面尺寸、墙顶竖向压应力、开洞率和墙片高宽比对砌体墙片抗震性能的影响。

1 有限元模拟方法验证

1.1 试验简介

选取文献[5]中的4个砌体墙片试件进行有限元模拟验证,所选取的砌体墙片依次考虑了带构造柱或开洞与否的4种情况,对墙片的受力情况进行了充分考虑,并与试验结果进行比较,大大提高了有限元分析的可信度。试验墙片的具体参数和正立面尺寸如表1和图2所示。

表1 试件具体参数
Table 1 Parameters of specimens

墙片编号	圈梁尺寸/ mm×mm	构造柱尺 寸/mm× mm	圈梁配筋		构造柱配筋		墙厚/ mm	混凝土 强度/ MPa	砂浆强 度/MPa	烧结普通 砖等级
			纵筋	箍筋	纵筋	箍筋				
W-1	240×120	—	4A10	A6@250	—	—	240	16.8	2.8	MU15
W-2	240×120	—	4A10	A6@250	—	—	240	16.8	4.5	MU15
BCW-1	240×120	240×240	4A10	A6@250	4A10	A6@200/100	240	16.9	3.0	MU15
BCW-2	240×120	240×240	4A10	A6@250	4A10	A6@200/100	240	16.8	3.4	MU15

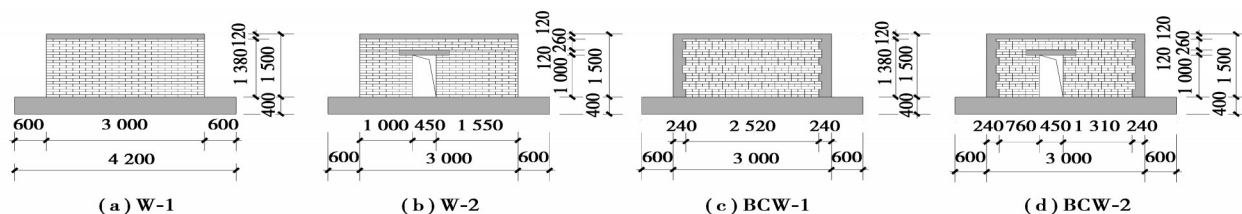


图2 试件示意图

Fig.2 Diagram of specimens

试验加载机制选用荷载-位移混合控制,在结构构件出现裂缝前采用荷载控制,当构件出现裂缝且加载曲线出现明显弯曲之后采用位移控制。墙顶竖向压应力均为0.5 MPa。具体加载装置以及加载机制如图3所示。

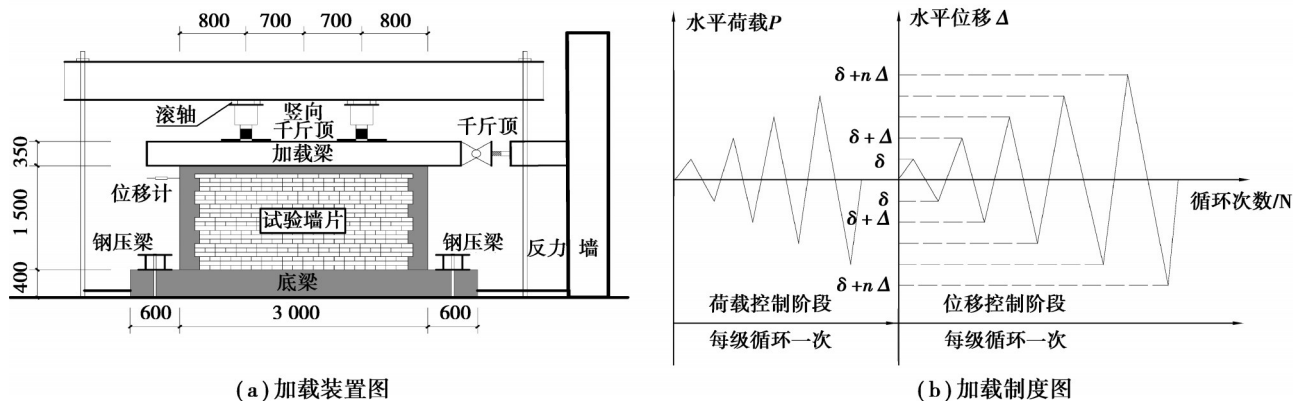


图3 试验加载装置及加载制度

Fig.3 Loading device and loading procedure

1.2 建立有限元计算模型

进行有限元分析时,砌体以及混凝土通过ABAQUS中线性减缩积分单元C3D8R建立;钢筋通过桁架单元T3D2建立并嵌入到混凝土实体内;砌体墙片与构造柱、圈梁之间的连接选用Tie约束来建立,对马牙搓和拉结筋的作用进行有效模拟;网格单元划分控制系数均取60 mm;砌体、混凝土以及钢筋的质量密度分别取2 000、2 500、7 800 kg/m³,泊松比分别取0.15、0.2和0.3;施加的单调水平位移荷载位于加载钢梁的侧面几何中心。荷载-位移曲线取计算的不收敛点或荷载下降至85%峰值荷载对应点为最终点。

模型中混凝土以及砌体部分本构关系通过ABAQUS中的损伤塑性模型建立;其中,混凝土单轴受压和受拉的本构模型根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)提出的混凝土单轴受压(拉)应力-应变关系确定;砌体受压和受拉本构模型参照文献[5,15]选用;钢筋的本构关系选用强化的双折线模型,考虑其屈服

后的强化。

1.3 有限元模拟与试验对比

由于没有明确的统一标准,文中在数值上不对比开裂荷载,仅对峰值点、极限点以及骨架曲线进行对比,如表2和图4所示。其中,极限点为荷载下降至85%峰值荷载时对应的特征点。

表2 有限元模拟值与试验值比较
Table 2 Contrast of finite element simulation and test

墙片编号		峰值点		极限点	
		P_m /kN	Δ_m /mm	P_u /kN	Δ_u /mm
W-1	试验值	264.0	2.50	227.0	7.23
	模拟值	260.2	3.08	221.2	6.03
	误差/%	-1.4	23.20	-2.6	-16.60
W-2	试验值	254.0	2.10	217.0	3.87
	模拟值	233.0	0.96	197.2	2.72
	误差/%	-8.3	-54.30	-9.1	-29.70
BCW-1	试验值	349.0	2.30	297.0	9.00
	模拟值	322.7	2.03	274.3	8.73
	误差/%	-7.5	-11.70	-7.6	-3.00
BCW-2	试验值	280.0	2.14	236.0	6.70
	模拟值	274.3	1.81	233.0	2.70
	误差/%	-2.0	-15.40	-1.3	-59.70

注: P_m 为峰值荷载; Δ_m 为峰值位移; P_u 为极限荷载; Δ_u 为极限位移;误差= $((\text{模拟值}-\text{试验值})/\text{试验值})\times 100\%$ 。

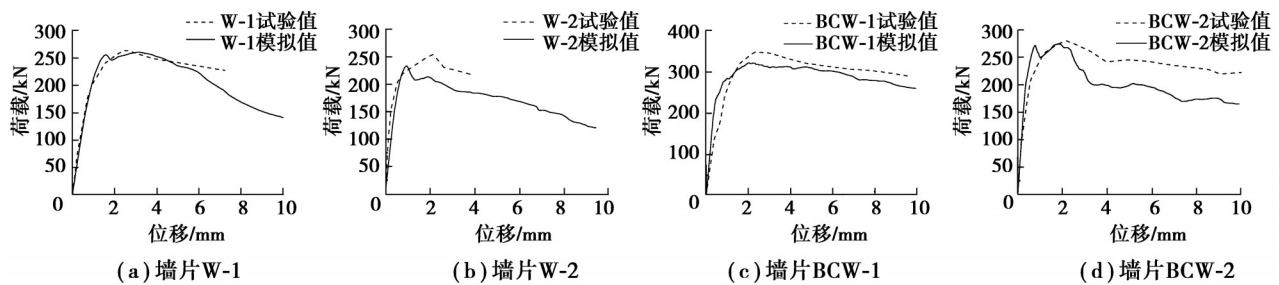


图4 墙片骨架曲线

Fig.4 Skeleton curve of walls

由表2可以看出:1)4个墙片峰值荷载和极限荷载的误差均不大,最大误差出现在墙片W-2,分别相差8.3%和9.1%;2)部分墙片的位移出现较大误差,极限位移的模拟值均要小于试验值,主要原因:试验的砌体墙片中存在灰缝,灰缝开裂后,会加剧水平位移的增长,当达到极限荷载时,水平位移较大;而墙片在有限元分析中选用的是整体式模型,忽略了灰缝的影响,增强了墙片的整体性,极限位移相对较小。

由图4可以看出:通过试验和模拟分别获得的4个墙片的骨架曲线,在上升阶段,均有较好的一致性;而在下降阶段,部分墙片的骨架曲线吻合相对较差,但下降总体趋势均相似。

综上所述,通过有限元软件ABAQUS模拟和试验获得的峰值荷载和极限荷载接近,而对应的位移在部分墙片上存在较大误差,考虑到砌体材料的离散性较大,模拟结果尚在接受范围内;模拟得到的骨架曲线与试验得到的骨架曲线有较好的一致性。因此,基于有限元软件ABAQUS的砌体墙片地震破坏模拟具有较高的可信度。

2 带现浇楼板的砌体墙片抗震性能

2.1 墙片材料、尺寸参数及模型建立

利用ABAQUS建立了16个砌体墙片有限元模型分组对比,主要从峰值荷载、位移延性、层间位移以及墙片应力应变值等方面分析其抗震性能。砌体墙片取3层,层高3 m,墙厚240 mm;构造柱截面尺寸取240 mm×240 mm;过梁截面尺寸取240 mm×120 mm;单侧翼缘宽度取6倍现浇板板厚;砌体墙片模型选用的烧结普通砖和混凝土强度分别为MU15和C20;构造柱中纵筋和箍筋分别为4A12和A6@150,圈梁和过梁中纵筋和箍筋分别为4A12和A6@200,板中配筋为A6@150,A8@150。墙片参数如表3所示,墙片WA-1示意如图5所示。有限元模型的建立参照1.2节。建模时,对墙片带与不带现浇楼板翼缘有着类似的过程,不同之处在于对带现浇楼板翼缘的砌体墙片建立有限元模型时,考虑实际工程中板边缘梁的存在,在垂直于墙面的板边缘需要建立与圈梁等高的梁,配筋方式与圈梁相同。

表3 墙片参数

Table 3 Parameters of walls

墙片编号	圈梁尺寸/mm	板厚/mm	砂浆强度/MPa	竖向压应力/MPa	墙片高宽比	开洞尺寸/mm
W-3	240×120	—	M5	0.6	1.5	—
WA-1	240×120	80	M5	0.6	1.5	—
WA-2	240×120	80	M7.5	0.6	1.5	—
WA-3	240×120	80	M10	0.6	1.5	—
WB-1	240×80	80	M5	0.6	1.5	—
WB-2	240×100	80	M5	0.6	1.5	—
WB-3	240×140	80	M5	0.6	1.5	—
WB-4	240×160	80	M5	0.6	1.5	—
WC-1	240×120	80	M5	0.2	1.5	—
WC-2	240×120	80	M5	0.4	1.5	—
WC-3	240×120	80	M5	0.8	1.5	—
WC-4	240×120	80	M5	1.0	1.5	—
WD-1	240×120	80	M5	0.6	1.5	窗洞(1 200×1 500)
WD-2	240×120	80	M5	0.6	1.5	窗洞(1 200×1 500)×2
WE-1	240×120	80	M5	0.6	1.125	—
WE-2	240×120	80	M5	0.6	2.25	—

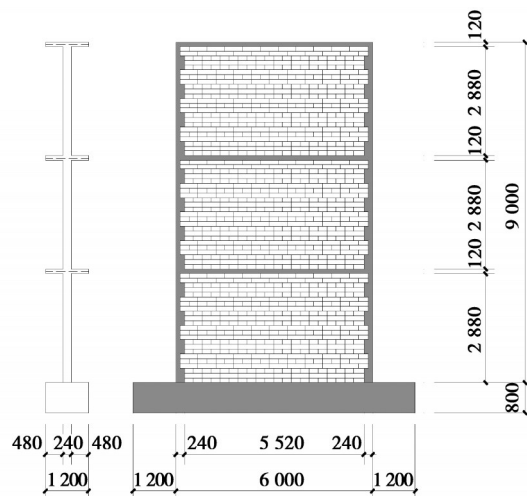


图5 墙片WA-1示意图

Fig.5 Diagram of wall WA-1

2.2 现浇楼板对砌体墙片抗震性能的影响

选取墙片 W-3 和 WA-1,分别为不带现浇板翼缘的墙片和带现浇板翼缘的墙片,施加单向水平力,对比分析现浇楼板对砌体墙片抗震性能的影响。有限元分析结果如表 4~6 和图 7 所示。在表 4 中, P_y 及 Δ_y 通过能量等值法确定,过程如图 6 所示。首先,在荷载-位移曲线中过原点和峰值点做折线 OAD,其中,AD 为水平线,阴影部分面积代表能量,不断调整折线 OAD,使得 $S_{OBM}=S_{MAD}$,此时 A 对应的位移即为屈服位移 Δ_y ,在曲线上对应的荷载即为屈服荷载 P_y 。

表 4 有或无现浇板翼缘的墙片特征点
Table 4 Feature points of walls with or without cast-in-situ slab flanges

墙片 编号	屈服点		峰值点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	
W-3	319.6	5.5	354.3	12.9	2.35
WA-1	330.2	5.4	367.3	11.2	2.07

注: P_y 为屈服荷载; Δ_y 为屈服位移; μ 为延性系数。

表 5 有或无现浇板翼缘的墙片各层层间位移
Table 5 Storey drift of walls with or without cast-in-situ slab flanges

墙片编号	mm		
	一层层间位移	二层层间位移	三层层间位移
W-3	3.8	4.0	5.1
WA-1	3.4	3.5	4.3

表 6 有或无现浇板翼缘的墙片应力应变值
Table 6 Stress and strain values of walls with or without cast-in-situ slab flanges

墙片 编号	墙片	墙片	钢筋	钢筋
	Mises 应力	等效塑性应变	Mises 应力	等效塑性应变
	最大值/Pa	PEEQ 最大值	最大值/Pa	PEEQ 最大值
W-3	2.484×10^7	3.602×10^{-3}	4.200×10^8	2.873×10^{-2}
WA-1	2.110×10^7	3.015×10^{-3}	4.200×10^8	2.686×10^{-2}

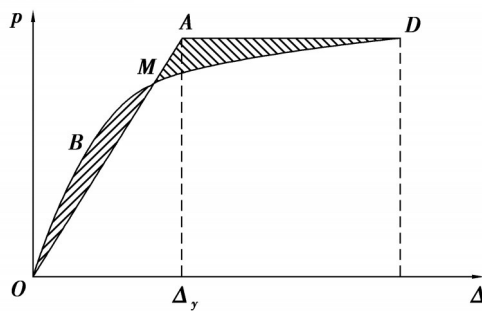


图 6 能量等值法求屈服点
Fig. 6 Energy equivalence method for yield point

砌体墙片延性系数 μ 可以表示为某一特征点位移和基准点位移的比值^[16-17],结合模拟得到的荷载-位移曲线,文中选用的特征点位移为屈服点位移 Δ_y 和峰值点位移 Δ_m ,采用 Δ_m/Δ_y 来评价延性。

表 6 中,墙片与钢筋的 Mises 应力最大值和等效塑性应变 PEEQ 最大值均由 ABAQUS 后处理获得。

由表 4~表 6 和图 7 可以看出:1)现浇板翼缘能有效提高墙片的屈服荷载和峰值荷载;2)带现浇板翼缘的墙片的峰值位移和延性系数较无现浇板翼缘的墙片分别减小了 13.2% 和 11.9%;3)现浇板翼缘会减小墙片各

层的层间位移,一、二、三各层层间位移依次减小了10.5%、12.5%和15.7%,说明现浇板翼缘对墙片的整体性有增强作用;4)就等效塑性应变最大值而言,带现浇板翼缘的墙片相对较小,减小幅度为16.3%,说明现浇板和圈梁、构造柱构成整体,加强了对墙片的约束;5)带现浇板翼缘的砌体墙片初始刚度大于无现浇板翼缘的砌体墙片初始刚度,但在退化阶段总体趋势相似。

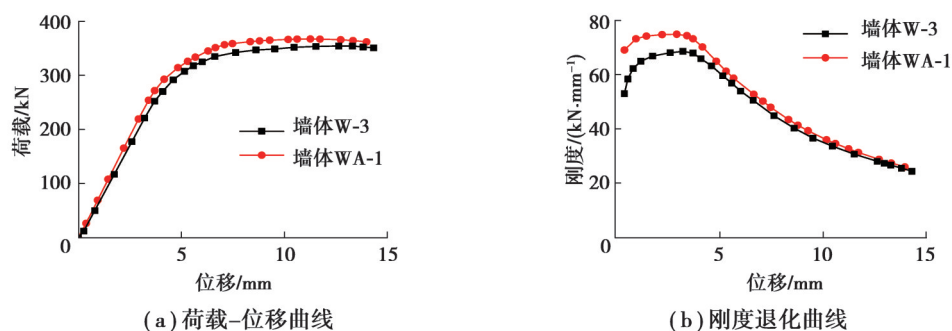


图7 有无现浇板翼缘的墙片荷载-位移曲线和刚度退化曲线

Fig. 7 Load-deformation curves and stiffness degradation curves of walls with or without cast-in-situ slab flanges

综上所述,现浇板翼缘能有效提高墙片的峰值荷载,但峰值位移和延性有所下降;同时,现浇板和圈梁、构造柱构成整体,加强了对墙片的约束,减轻了墙片的损伤。

2.3 砂浆强度对砌体墙片抗震性能的影响

WA组墙片为3片不同砂浆强度的墙片,有限元分析结果如表7~9和图8所示。

表7 不同砂浆强度的墙片特征点

Table 7 Feature points of walls with different mortar strength

墙片 编号	屈服点		峰值点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	
WA-1	330.2	5.4	367.3	11.2	2.07
WA-2	360.6	5.7	401.5	13.9	2.43
WA-3	395.8	4.9	428.4	13.1	2.67

表8 不同砂浆强度的墙片各层层间位移

Table 8 Storey drift of walls with different mortar strength

墙片编号	mm		
	一层层间位移	二层层间位移	三层层间位移
WA-1	3.4	3.5	4.3
WA-2	4.2	4.6	5.1
WA-3	4.1	4.2	4.8

表9 不同砂浆强度的墙片应力应变值

Table 9 Stress and strain values of walls with different mortar strength

墙片 编号	墙片	墙片	钢筋	钢筋
	Mises应力 最大值/Pa	等效塑性应变 PEEQ最大值	Mises应力 最大值/Pa	等效塑性应变 PEEQ最大值
WA-1	2.110×10^7	3.015×10^{-3}	4.200×10^8	2.686×10^{-2}
WA-2	2.559×10^7	2.894×10^{-3}	4.200×10^8	4.837×10^{-2}
WA-3	2.518×10^7	2.147×10^{-3}	4.200×10^8	4.326×10^{-2}

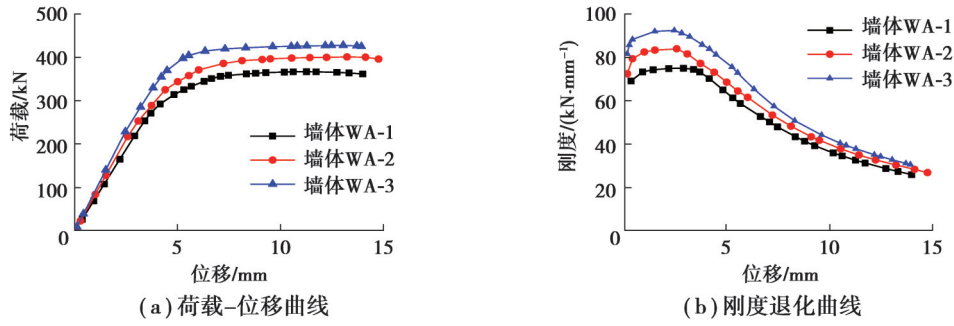


图 8 不同砂浆强度的墙片荷载-位移曲线和刚度退化曲线

Fig.8 Load-deformation curves and stiffness degradation curves of walls with different mortar strength

可以看出,1)墙片峰值荷载和延性系数随砂浆强度的提高而增大,相较墙片 WA-1,墙片 WA-2 和 WA-3 的峰值荷载分别增大了 9.3% 和 16.6%,延性系数分别增大了 17.4% 和 29.0%,表明墙片的承载力和位移延性随砂浆强度的提高而增大。在设计阶段,为保证墙片具有足够的抗震性能,应避免使用强度等级过低的砂浆;2)提高砂浆强度,墙片各层层间位移呈先增大后减小的趋势;3)墙片的等效塑性应变最大值随砂浆强度的提高而减小。墙片 WA-2 和 WA-3 的等效塑性应变最大值相较 WA-1 分别减小了 4.1% 和 28.8%,表明砂浆强度的提高在一定程度上减轻墙片的破坏;4)墙片的初始刚度随砂浆强度的提高而增大,但在退化阶段具有一致的趋势。

2.4 圈梁截面尺寸对砌体墙片抗震性能的影响

WB 组墙片和墙片 WA-1 为 5 片不同圈梁截面尺寸的墙片,有限元分析结果如表 10~12 和图 9 所示。

表 10 不同圈梁截面尺寸的墙片特征点

Table 10 Feature points of walls with different cross-sectional dimensions of ring beams

墙片 编号	屈服点		峰值点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	
WB-1	316.6	5.5	351.0	9.9	1.80
WB-2	318.1	5.4	352.6	10.1	1.87
WA-1	330.2	5.4	367.3	11.2	2.07
WB-3	319.4	5.4	355.2	9.9	1.83
WB-4	318.9	5.5	357.1	10.4	1.89

表 11 不同圈梁截面尺寸的墙片各层层间位移

Table 11 Storey drift of walls with different cross-sectional dimensions of ring beams

墙片编号	mm		
	一层层间位移	二层层间位移	三层层间位移
WB-1	2.9	3.1	3.9
WB-2	3.0	3.1	4.0
WA-1	3.4	3.5	4.3
WB-3	3.0	3.1	3.8
WB-4	3.1	3.3	4.0

表12 不同圈梁截面尺寸的墙片应力应变值

Table 12 Stress and strain values of walls with different cross-sectional dimensions of ring beams

墙片 编号	墙片	墙片	钢筋	钢筋
	Mises应力 最大值/Pa	等效塑性应变 PEEQ最大值	Mises应力 最大值/Pa	等效塑性应变 PEEQ最大值
WB-1	1.858×10^7	4.330×10^{-3}	4.200×10^8	1.521×10^{-2}
WB-2	1.880×10^7	4.038×10^{-3}	4.200×10^8	1.729×10^{-2}
WA-1	2.110×10^7	3.015×10^{-3}	4.200×10^8	2.686×10^{-2}
WB-3	1.961×10^7	3.248×10^{-3}	4.200×10^8	1.622×10^{-2}
WB-4	1.985×10^7	3.310×10^{-3}	4.200×10^8	2.019×10^{-2}

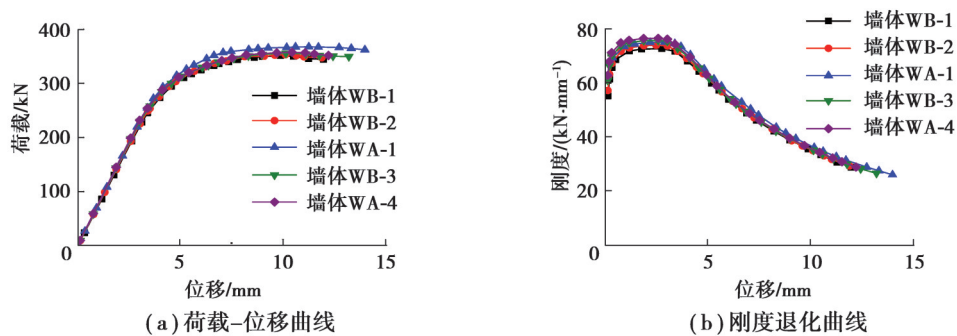


图9 不同圈梁截面尺寸的墙片荷载-位移曲线和刚度退化曲线

Fig. 9 Load-deformation curves and stiffness degradation curves of walls with different cross-sectional dimensions of ring beams

可以看出,1)墙片的峰值荷载和延性系数与圈梁截面高度有关,在圈梁截面高度为120 mm时,均达到最大;而在小于120 mm或大于120 mm时,均有不同程度的减小;2)墙片的各层层间位移在圈梁截面高度为120 mm时达到最大,在其他范围内均比较接近;3)墙片的等效塑性应变最大值在圈梁截面高度为120 mm时最小,而在其他高度下均有一定的增大,相较墙片WA-1,墙片WB-1、WB-2、WB-3、WB-4分别增大了43.6%、33.9%、7.7%和9.8%,表明适当的圈梁截面尺寸能有效减轻墙片的破坏程度。在设计阶段,应严格限制圈梁的截面尺寸,避免使用截面高度过大或过小的圈梁;4)墙片的初始刚度随圈梁截面高度的增大而不断增大,但在退化阶段其总体趋势是相似的。

2.5 墙顶竖向压应力对砌体墙片抗震性能影响

WC组墙片和墙片WA-1为5片不同墙顶竖向压应力的墙片,有限元分析结果如表13~15和图10所示。

表13 不同墙顶竖向压应力的墙片特征点

Table 13 Feature points of walls with different vertical compressive stress

墙片 编号	屈服点		峰值点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	
WC-1	173.1	3.3	191.0	13.1	3.97
WC-2	251.2	4.2	277.3	12.8	3.05
WA-1	330.2	5.4	367.3	11.2	2.07
WC-3	360.9	6.0	397.2	9.6	1.60
WC-4	374.1	6.3	412.5	9.4	1.50

表 14 不同墙顶竖向压应力的墙片各层层间位移

Table 14 Storey drift of walls with different vertical compressive stress

墙片编号	一层层间位移	二层层间位移	三层层间位移
WC-1	4.2	4.4	4.5
WC-2	4.0	4.3	4.5
WA-1	3.4	3.5	4.3
WC-3	2.3	3.1	4.2
WC-4	2.1	3.1	4.2

表 15 不同墙顶竖向压应力的墙片应力应变值

Table 15 Stress and strain values of walls with different vertical compressive stress

墙片编号	墙片 Mises 应力最大值/Pa	墙片等效塑性应变 PEEQ 最大值	钢筋 Mises 应力最大值/Pa	钢筋等效塑性应变 PEEQ 最大值
WC-1	2.002×10^7	2.760×10^{-3}	4.200×10^8	5.513×10^{-2}
WC-2	2.225×10^7	2.655×10^{-3}	4.200×10^8	4.314×10^{-2}
WA-1	2.110×10^7	3.015×10^{-3}	4.200×10^8	2.686×10^{-2}
WC-3	1.763×10^7	5.621×10^{-3}	4.200×10^8	1.021×10^{-2}
WC-4	1.714×10^7	7.272×10^{-3}	3.983×10^8	7.374×10^{-3}

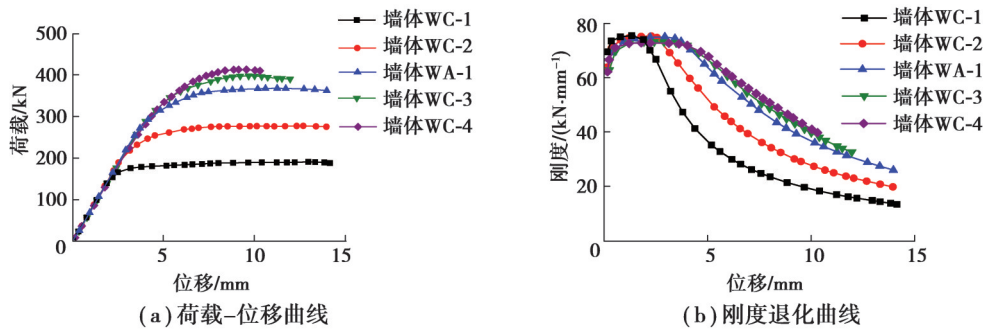


图 10 不同墙顶竖向压应力的墙片荷载-位移曲线和刚度退化曲线

Fig.10 Load-deformation curves and stiffness degradation curves of walls with different vertical compressive stress

可以看出,1)竖向压应力越大,墙片的峰值荷载越大,而峰值位移越小,墙片 WC-2、墙片 WA-1、墙片 WC-3 和墙片 WC-4 相较墙片 WC-1 峰值荷载分别增大了 45.2%、92.3%、108.0% 和 116.0%,峰值位移分别减小了 2.3%、14.5%、26.7% 和 28.2%;2)竖向压应力越大,墙片的延性系数越小,与墙片 WC-1 相比,墙片 WC-2、墙片 WA-1、墙片 WC-3 和墙片 WC-4 分别减小了 23.2%、47.9%、59.7% 和 62.2%,因此,在设计时应严格控制其最大层数;3)墙片的各层层间位移随竖向压应力的增大而减小;4)墙片的等效塑性应变最大值在竖向压应力小于 0.6 MPa 时比较接近,而当竖向压应力从 0.6 MPa 增大到 0.8 MPa 和 1.0 MPa 时,其增大幅度较大,墙片 WC-3 和 WC-4 相较墙片 WA-1 分别增大了 86.4% 和 141.2%,表明适当的墙顶竖向压应力能显著降低砌体墙片的破坏程度;5)竖向压应力的增加会减慢墙片刚度的退化。

2.6 开洞率对砌体墙片抗震性能的影响

WD 组墙片和墙片 WA-1 为 3 片不同开洞率的墙片,有限元分析结果如表 16~18 和图 11 所示。

表16 不同开洞率的墙片特征点

Table 16 Feature points of walls with different opening ratios

墙片 编号	屈服点		峰值点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	
WA-1	330.2	5.4	367.3	11.2	2.07
WD-1	195.4	6.2	225.2	10.5	1.69
WD-2	149.1	7.4	173.6	10.1	1.36

表17 不同开洞率的墙片各层层间位移

Table 17 Storey drift of walls with different opening ratios

墙片编号	mm		
	一层层间位移	二层层间位移	三层层间位移
WA-1	3.4	3.5	4.3
WD-1	2.1	3.7	4.7
WD-2	1.9	3.6	4.6

表18 不同开洞率的墙片应力应变值

Table 18 Stress and strain values of walls with different opening ratios

墙片 编号	墙片 Mises 应力	墙片等效塑性应变	钢筋 Mises 应力	钢筋等效塑性应变
	最大值/Pa	PEEQ 最大值	最大值/Pa	PEEQ 最大值
WA-1	2.110×10^7	3.015×10^{-3}	4.200×10^8	2.686×10^{-2}
WD-1	1.587×10^7	9.413×10^{-3}	3.741×10^8	3.755×10^{-3}
WD-2	1.336×10^7	1.077×10^{-2}	3.606×10^8	1.752×10^{-3}

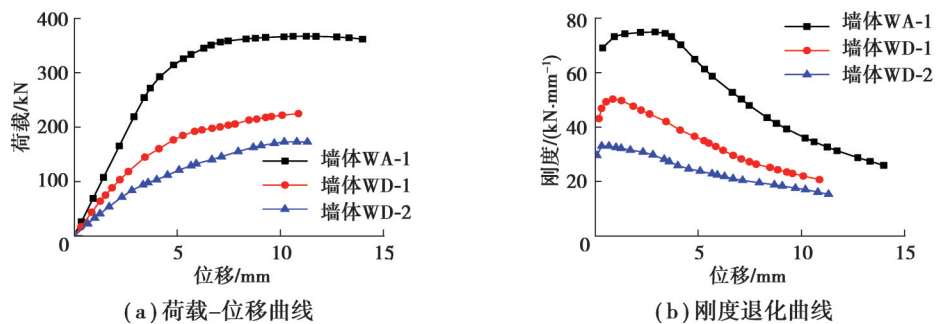


图11 不同开洞率的墙片荷载-位移曲线和刚度退化曲线

Fig.11 Load-deformation curves and stiffness degradation curves of walls with different opening ratios

可以看出:1)开洞率越大,墙片的峰值荷载和延性系数越小,相较墙片WA-1,墙片WD-1及墙片WD-2的峰值荷载分别减小了38.7%和52.7%,延性系数分别减小了18.4%和34.3%,所以,在设计阶段,为保证墙片具有足够的承载力和延性,应对开洞率加以限制;2)与未开洞墙片相比,墙片开洞后一层层间位移减小,二、三层层间位移增大;3)墙片的等效塑性应变最大值随开洞率的增大显著增大,主要出现在洞口周边尤其是角落区域,相较墙片WA-1,墙片WD-1及墙片WD-2分别增大了212.2%和257.2%,表明墙片在开洞后,洞口周边尤其是角落区域属于薄弱区,在地震中会过早破坏从而降低墙片的抗震性能;4)钢筋应力最大值随开洞率的增加而减小,相较墙片WA-1,墙片WD-1及墙片WD-2分别减小了10.9%和14.1%,墙片WA-1的部分钢筋已达到抗拉强度,而墙片WD-1及墙片WD-2的钢筋均未达到抗拉强度,表明开洞会使钢筋强度的发挥不充分;5)开洞率的增大会显著减小墙片的刚度。

2.7 墙片高宽比对砌体墙片抗震性能的影响

WE组墙片和墙片WA-1为3片不同高宽比的墙片,有限元分析结果如表19~21和图12所示。

表 19 不同高宽比的墙片特征点

Table 19 Feature points of walls with different aspect ratios

墙片 编号	屈服点		峰值点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	
WE-1	500.5	5.3	549.3	7.8	1.47
WA-1	330.2	5.4	367.3	11.2	2.07
WE-2	160.1	5.6	178.0	13.1	2.34

表 20 不同高宽比的墙片各层层间位移

Table 20 Storey drift of walls with different aspect ratios

墙片编号	mm		
	一层层间位移	二层层间位移	三层层间位移
WE-1	2.5	2.9	2.4
WA-1	3.4	3.5	4.3
WE-2	3.8	4.2	5.1

表 21 不同高宽比的墙片应力应变值

Table 21 Stress and strain values of walls with different aspect ratios

墙片 编号	墙片 Mises 应力	墙片等效塑性应变	钢筋 Mises 应力	钢筋等效塑性应变
	最大值/Pa	PEEQ 最大值	最大值/Pa	PEEQ 最大值
WE-1	1.731×10^7	3.266×10^{-3}	3.961×10^8	1.091×10^{-2}
WA-1	2.110×10^7	3.015×10^{-3}	4.200×10^8	2.686×10^{-2}
WE-2	1.912×10^7	2.869×10^{-3}	4.200×10^8	2.959×10^{-2}

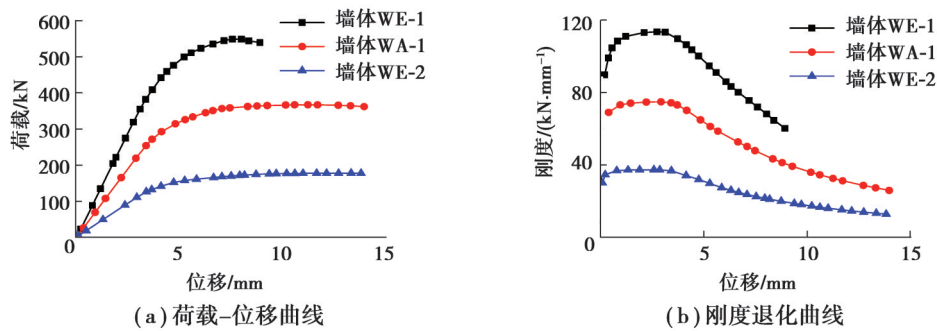


图 12 不同高宽比的墙片荷载-位移曲线和刚度退化曲线

Fig.12 Load-deformation curves and stiffness degradation curves of walls with different aspect ratios

可以看出:1)墙片高宽比的增大会降低墙片的承载力,相较墙片 WE-1,墙片 WA-1 和墙片 WE-2 的峰值荷载分别减小了 33.1% 和 67.6%。在进行设计时,应避免大高宽比墙片的出现;2)墙片的峰值位移和延性系数与墙片高宽比成正比,相较墙片 WE-1,墙片 WA-1 和 WE-2 的峰值位移分别增大了 43.6% 和 67.9%,延性系数分别增大了 40.8% 和 59.2%;3)墙片高宽比的增大会导致墙片的最大层间位移从中间层向上层转移,表明墙片的破坏形式受到墙片高宽比的影响,增大墙片的高宽比,墙片主要破坏形式将从剪切型破坏转化成弯曲型破坏;4)墙片 WA-1 和墙片 WE-2 的部分钢筋已达到抗拉强度,而墙片 WE-1 的钢筋均未达到抗拉强度,表明钢筋强度的利用率在墙片高宽比过小时开始降低,考虑到经济性,不宜使用高宽比过小的墙片;5)高宽比的增大会减小墙片的初始刚度,但墙片的刚度退化会有所减慢。

3 分析与讨论

由有限元分析结果可知,对于峰值位移、延性系数以及等效塑性应变最大值而言,与无现浇板翼缘的墙片相比,带现浇板翼缘的墙片分别降低了13.2%、11.9%和16.3%;带现浇板翼缘的墙片一层、二层和三层层间位移也分别减小了10.5%、12.5%和15.7%。从本质上分析,在带现浇板翼缘的砌体墙片中,现浇板的存在,一方面与墙片中的构造柱、圈梁构成一个整体,相互形成约束作用,增强了砌体墙片的整体性,发挥普通墙片具体的约束砌体的性能;另一方面,现浇板的平面内刚度较大,能有效传递应力,使得水平地震作用能够分布在各个墙片上,单片墙体分担的水平荷载减小,从而提高结构整体的抗震能力。

在圈梁截面高度为120 mm时,墙片的延性系数最大且等效塑性应变最大值最小;而在小于120 mm或大于120 mm时,墙片的延性系数不同程度的减小,等效塑性应变最大值不同程度的增大。由此可见,当圈梁的截面尺寸适当,现浇板与圈梁形成T形截面梁,与不带现浇板翼缘的墙片相比,有效地提高了圈梁的约束刚度和承载能力,此时,现浇板对提高砌体墙片的抗震性能贡献较大;当圈梁截面较小时,其刚度和承载力较小,随着圈梁截面尺寸的增大,圈梁的约束刚度和承载能力有所提高,此时,现浇板和圈梁形成的T形截面梁对砌体墙片的约束也会增大,进而提高墙片的抗震性能;当圈梁截面较大时,砌体墙片在构造柱和圈梁的约束下已具备较好的整体性,此时,现浇板与圈梁形成的T形截面梁对提高墙片的抗震性能贡献较小,甚至不明显。

4 结论

1)算例带现浇板翼缘的墙片与无现浇板翼缘的墙片相比,峰值荷载有所增大,延性系数和等效塑性应变最大值分别减小了11.9%和16.3%。表明现浇楼板能提高墙片的承载力,但会降低其位移延性;现浇楼板与圈梁、构造柱能共同构成整体,加强对墙片的约束,有效减轻其破坏程度。

2)算例墙片随着砂浆强度的提高,峰值荷载增大了9.3%和16.6%,延性系数增大了17.4%和29.0%。表明墙片的承载力和位移延性随砂浆强度的提高而提高。在设计阶段,为保证墙片具有足够的抗震性能,应避免使用强度等级过低的砂浆。

3)算例墙片随着圈梁截面高度的增大,峰值荷载和延性系数先增大后减小,等效塑性应变最大值先减小后增大。表明适当的圈梁截面尺寸能提高墙片的承载力和位移延性并减轻砌体墙片的破坏程度。在设计阶段,应严格控制圈梁截面尺寸,避免使用截面高度过大或过小的圈梁。

4)算例墙片随着竖向压应力的增大,峰值荷载增大了45.2%、92.3%、108.0%和116.0%,延性系数减小了23.2%、47.9%、59.7%和62.2%;当竖向压应力较大时,等效塑性应变最大值显著增大。表明墙顶竖向压应力的增大会提高砌体墙片的承载力,但会显著降低其位移延性,适当的墙顶竖向压应力能显著降低砌体墙片的破坏程度。在设计阶段,应严格控制砌体结构的最大层数。

5)算例墙片随着开洞率的增大,峰值荷载减小了38.7%和52.7%,延性系数减小了18.4%和34.3%,等效塑性应变最大值增大了212.2%和257.2%。表明在开洞后,墙片的承载力和位移延性会降低,其破坏程度会显著加剧。在设计阶段,应对开洞率加以限制。

6)算例墙片随着高宽比的增大,峰值荷载减小了33.1%和67.6%。表明墙片高宽比的增大会显著降低墙片的承载力。在设计阶段,应避免大高宽比的墙片。同时,墙片高宽比也影响着墙片的破坏形态,随着墙片高宽比的增大,墙片的主要破坏形式将从剪切型破坏转化成弯曲型破坏。

参考文献

- [1] 黄学志. 浅谈多层砌体结构房屋的抗震设计[J]. 城市建设理论研究, 2015(25): 2147-2149.
Huang X Z. On the seismic design of multi-story masonry building[J]. Theoretical Research in Urban Conduction, 2015(25): 2147-2149. (in Chinese)
- [2] 刘秦, 王涛. 多层砌体结构房屋震害分析及抗震设计要点[J]. 城市建筑, 2015(21): 65.
Liu Q, Wang T. Seismic damage analysis and key points of seismic design of multi-storey masonry buildings[J]. Urbanism and Architecture, 2015(21): 65. (in Chinese)
- [3] 郑展展, 刘姗姗. 浅谈砌体结构设计中的抗震设计[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(6): 344.

- Zheng Z Z, Liu S S. Discussion on seismic design in masonry structure design[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2015(6): 344 .(in Chinese)
- [4] 郑杰. 砌体结构房屋震害情况与抗震构造设计[J]. 城市建设理论研究, 2015(16): 937.
Zheng J. Earthquake damage and seismic structure design of masonry buildings [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2015(16): 937. (in Chinese)
- [5] 郑妮娜. 装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Zheng N N. Research on seismic behavior of masonry structures with fabricated Tie-columns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [6] Zhang W X, Huang Y H, Zheng K Y, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of brick walls with R. C. flange columns and ring beams[J]. Civil Engineering and Architecture, 2013, 2(2): 31-37.
- [7] Quiroz L G, Maruyama Y, Zavala C. Cyclic behavior of Peruvian confined masonry walls and calibration of numerical model using genetic algorithms[J]. Engineering Structures, 2014, 75: 561-576.
- [8] 王啸霆, 张永群, 王涛. 采用预制RC墙片双面加固的砌体墙片试验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(2): 1-10.
Wang X T, Zhang Y Q, Wang T. Experimental study on masonry walls retrofitted by prefabricated RC panels on both surfaces [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(2): 1-10. (in Chinese)
- [9] 邓明科, 杨铄, 梁兴文. 高延性混凝土单面加固构造柱约束砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 10-19.
Deng M K, Yang S, Liang X W. Experimental studies on seismic behavior of confined masonry walls strengthened with single HDC layer[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 10-19. (in Chinese)
- [10] Tripathy D, Singhal V. Estimation of in-plane shear capacity of confined masonry walls with and without openings using strut-and-Tie analysis[J]. Engineering Structures, 2019, 188: 290-304.
- [11] 褚少辉, 赵士永, 梁耀哲, 等. 玄武岩纤维布加固砌体墙抗震性能试验研究与数值分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(9): 133-136, 85.
Chu S H, Zhao S Y, Liang Y Z, et al. Experimental research and numerical analysis on seismic performance of masonry walls with externally bonded BFRP sheets[J]. Building Structure, 2020, 50(9): 133-136, 85. (in Chinese)
- [12] Zhang S, Yang D M, Sheng Y, et al. Numerical modelling of FRP-reinforced masonry walls under in-plane seismic loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134: 649-663.
- [13] Zhou X J, Du J P, Peng Q M, et al. Hollow block masonry wall reinforced by built-in structural configuration: Seismic behavior analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105815.
- [14] Bagheri B, Lee J H, Kim H G, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of retrofitted masonry walls [J]. Composite Structures, 2020, 240: 111997.
- [15] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, 38(10): 80-82.
Yang W Z. Constitutive relationship model for masonry materials in compression [J]. Building Structure, 2008, 38(10): 80-82. (in Chinese)
- [16] 徐振清. 圈梁构造柱约束砌体结构的抗震性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
Xu Z Q. Seismic performance analysis of confined masonry[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] 文飞. 普通砖砌体墙抗震性能试验及非线性模拟分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
Wen F. Seismic performance test and nonlinear simulation analysis of common brick masonry wall [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)