

柔性连接 AAC 填充墙钢框架抗震性能 影响因素数值分析

陈子夷¹, 王旭峰²

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 2. 中建六局土木工程有限公司, 天津 300308)

摘要:为分析不同因素变化对柔性连接蒸压加气混凝土 (autoclaved areated concrete, AAC) 砌体填充墙钢框架抗震性能影响的趋势和显著性, 基于拟静力试验结果验证了建模方式及参数选取的可行性, 采用 ABAQUS 建立 9 个有限元正交模型, 对模型轴压比、预留缝宽、耗能材料刚度和高跨比进行变参分析。研究结果表明: 预留缝宽、耗能材料刚度、高跨比和轴压比对结构抗震性能指标影响的显著性依次降低。整体上, 增大预留缝宽, 减小耗能材料刚度、高跨比以及轴压比对提高结构的抗震性能有利。实际应用中建议柔性连接 AAC 墙框间缝宽取值在 40 mm 左右, 缝间填充材料的刚度宜在 100~500 N/mm 之间。

关键词: 柔性连接; AAC 填充墙; 数值分析; 影响因素; 抗震性能指标; 显著性

中图分类号: TU352.11; TU392.1

文献标识码: A

Numerical analysis of influence factors on seismic performance of flexible connection AAC infilled wall steel frame

CHEN Ziyi¹, WANG Xufeng²

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. China Construction sixth Bureau Civil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to analyze the trend and significance of the influence of different factors on the seismic performance of flexible connection autoclaved areated concrete (AAC) masonry filled wall steel frame structures, the feasibility of the modeling method and parameters selection was verified based on the results of pseudo-static tests, nine orthogonal finite element models were established by ABAQUS, and variable parameter analysis was carried out on axial compression ratio, reserved seam width, spring stiffness and height span ratio of models. The results show that the effects of reserved joint width, stiffness of energy-consuming materials, height span ratio and axial compression ratio on seismic performance of the structure decrease successively. On the whole, it is beneficial to increase the reserved joint width, reduce the stiffness of energy-consuming materials, high span ratio and axial compression ratio to improve the seismic performance of the structure. In actual application, the recommended value for the joint width between flexible connection AAC wall and frames is around 40 mm, and the stiffness of the filler between reserved joints is between 100~500 N/mm.

Key words: flexible connection; AAC infilled wall; numerical analysis; influence factor; seismic performance index; significance

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-06-14

基金项目: 河南省科技攻关项目 (212102310272); 河南省高等学校重点科研项目 (23A560006)

作者简介: 陈子夷 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构加固研究。E-mail: 912437822@qq.com

通讯作者: 王旭峰 (1995—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事结构抗震研究。E-mail: 2043189088@qq.com

0 引言

近年来,国内外学者对框架填充墙组合体系的抗震性能通过“以强御强”和“以柔克刚”2种思想进行改善^[1]。随着结构抗震韧性思想的提出,研究者开始注重墙框间接触关系的设计研究,提出“工程填充墙”概念^[2],以期提升确定地震下结构延性和承载力。之后不断有学者开展了柔性连接填充墙^[3-5]、阻尼填充墙^[6-7]和摇摆填充墙^[8-9]等不同构造方案的研究。

研究表明影响该组合体系总刚度的因素有框架自身刚度、墙体自身刚度和墙框间构造连接的刚度^[10]。受承载力限制,主体框架的刚度难以明显降低,削弱非结构构件填充墙体刚度和墙框间构造连接的刚度以降低结构震损和协调性能水平则成为必然选择。蒸压加气混凝土(autoclaved aerated concrete, AAC)砌块兼具结构—防火—保温一体化特点,耐久及抗震性能优异^[11-13]。在采用 AAC 砌块削弱填充墙刚度效应的情形下,柔性连接替代刚性连接逐渐发展为必然趋势^[14-15]。

关于填充墙框架结构抗震性能影响因素的研究,大量文献基于墙框刚性连接进行了单因素分析,通过改变结构轴压比、高跨比和墙体构造措施等,仅调整单一参数变化,研究其对结构抗震性能的影响^[16-19],难以评价各因素对抗震性能指标影响的显著性。对柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架抗震影响因素的研究尚为稀少。针对上述问题,文中基于拟静力试验结果对 ABAQUS 中柔性连接 AAC 填充墙钢框架三维数值模型建立和参数选取进行验证,结合正交设计法分析了轴压比、预留缝宽、缝间填充耗能材料刚度和高跨比对该柔性连接体系抗震性能影响的趋势和显著性。

1 数值模型建立

1.1 模型试件概况

模型试件包含 1 榀空框架和 1 榀柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架,均以 1:2 比例缩尺设计制作并进行拟静力试验,轴压比 0.2。2 榀框架尺寸均一致,梁净跨为 1600 mm,柱净高为 1400 mm,见图 1。

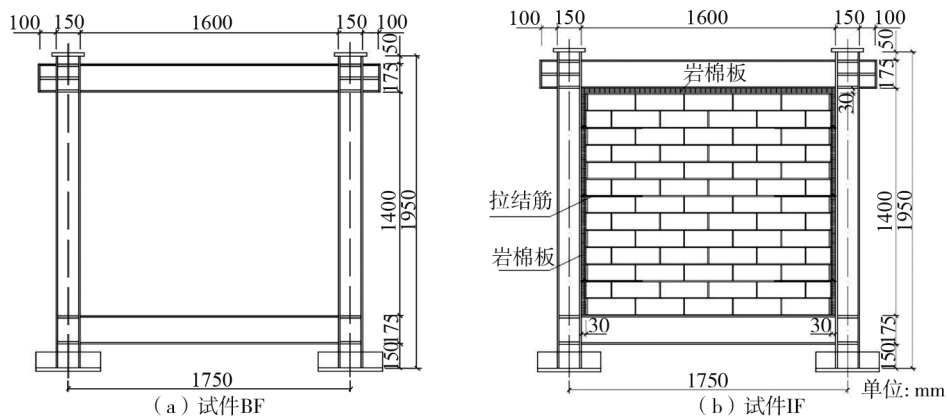


图 1 试件尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawing of specimens

空框架试件 BF 为对照试件。柔性连接试件 IF 墙框间设 30 mm 宽预留缝,见图 1(b),缝间柔性构造参考减震可控式框架式保温填充墙的柔性连接结构^[20],预留缝间均以岩棉板作弹性耗能材料层填塞密实,以硅酮胶黏接材料层于墙框间以及两侧密封,沿 AAC 填充墙高度方向设置 3 道 $\Phi 6$ 水平拉结筋,水平长度为 350 mm,拉结筋在竖向预留缝间于水平面方向弯曲成半圆弧形形成伸缩缓冲部,拉结筋构造见图 2,图中焊接点指该处与框架柱内侧翼缘表面进行焊接。

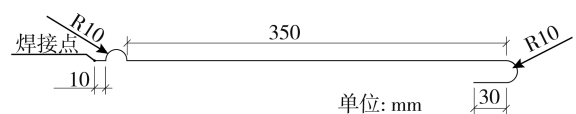


图 2 拉结筋构造

Fig. 2 Structure of tie bar

2 榀框架均采用 Q355B 钢制做,拉结筋采用 HPB235 级,钢材性能测试结果见表 1。钢框架梁、柱采用焊接 H 型钢,截面规格分别为 H175 mm \times 100 mm \times 6 mm \times 8 mm、H150 mm \times 150 mm \times 8 mm \times 10 mm,框架各节点均以焊接连接,钢梁的翼缘、腹板与柱翼缘板分别采用对接焊缝、双面角焊缝焊接。试件 IF 填充墙体以

B06 级 AAC 砌块砌筑,砌块尺寸 300 mm×100 mm×100 mm。制做与 AAC 填充墙同条件养护下的砌体试件测试抗压强度为 3.53 MPa,弹性模量为 1787 MPa。

表 1 钢材力学性能

Table 1 Mechanical property of steels

取样部位	试件厚度(直径)/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	强屈比	伸长率/%
梁腹板	6	419	544	1.30	26.62
柱腹板	8	409	539	1.32	19.92
柱翼缘板	10	385	528	1.37	25.29
加劲肋	14	421	545	1.29	26.53
拉结钢筋	6	594	763	1.28	28.89

1.2 模型建立

图 3 为 2 榀试件的三维数值分析模型。在 ABAQUS/CAE 中采用 C3D8R 实体单元建立钢框架填充墙模型,拉结钢筋采用 T3D2 桁架单元建立,在往复加载过程中试件 IF 中填充的岩棉板表现出良好的弹性变形及恢复能力,采用 SPRING4 弹簧单元对弹性耗能材料层进行模拟。在 Mesh 模块中采用 Structured 技术对各部件划分尺寸为 40 mm 的六面体线性减缩积分单元网格。考虑到试验中填充墙未出现因灰缝抗剪强度不足而开裂,对填充墙模型采用整体式方法建立,以使模型在满足精度要求的前提下提高计算效率。墙框柔性连接中 3 道水平拉结筋的具体位置在模型 BF 中给出,见图 3(a),模型 BF 数值计算时去除拉结筋。同时建立模型 IF 的对比模型 IF-R,除墙框间以刚性连接外,其余参数与试件 IF 均一致,见图 3(c)。

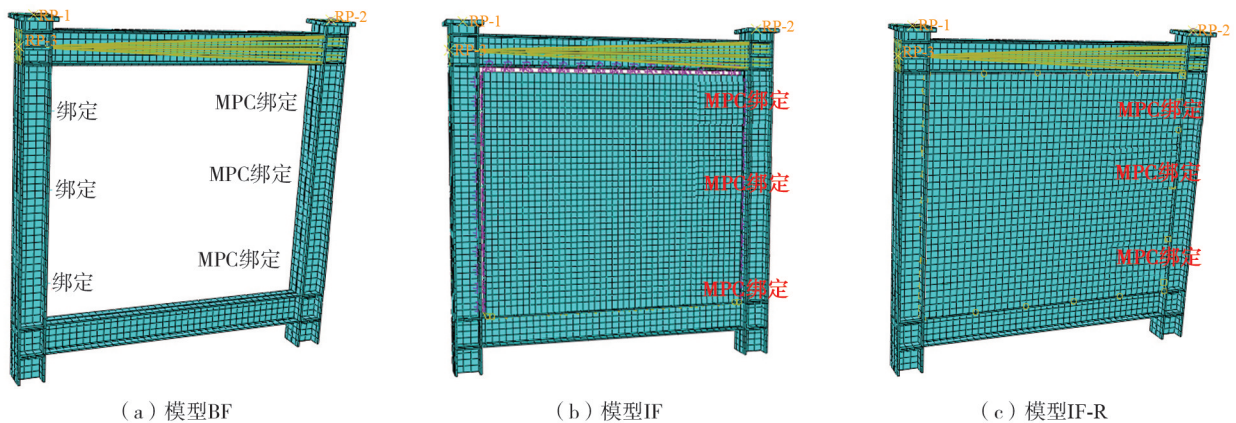


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

模型 IF 中各部件的相互作用在 Interaction 模块中定义。水平拉结筋与钢框架相接触的两点通过 MPC 约束绑定在一起,计算时两者间无相对移动,采用 embedded 方法将拉结筋嵌入到填充墙体中。AAC 墙体底面与相接触位置的框架梁翼缘表面通过 Tie 约束绑定在一起。墙框间的岩棉板以每隔 100 mm 建立一个弹簧单元表示,线刚度取 100 N/mm。根据试验加载方式,在框架左、右柱顶板的上表面各建立参考点 RP-1 和 RP-2,在左框架柱外侧表面的相应位置处建立一参考点 RP-3,将 3 个参考点的自由度分别耦合于相应表面。

在模型 IF-R 中,采用 Surface-to-surface contact 方式建立墙体侧表面、顶面与相应位置框架翼缘表面间的相互作用,翼缘表面为主表面,墙体表面为从表面、法向和切向行为分别以“硬”接触、“罚”摩擦来定义,摩擦系数取 0.45^[21],定义摩擦系数各向同性。其余接触关系的定义与模型 IF 一致。

在 Load 模块中的 initial 分析步中选用“对称/反对称/完全固定”方式对钢框架两柱脚底面同时施加边界条件,定义钢框架柱脚完全固定,即 $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ 。轴压比 0.2 在分析步 Step1 中定义,于参考点 RP-1 和 RP-2 同时施加竖向集中荷载,方向与 ABAQUS/CAE 界面中空间坐标系 Z 轴正向相反。水平循环荷载在分析步 Step2 中定义施加,通过幅值文件创建位移加载制度(图 4)后赋予参考点 RP-3。

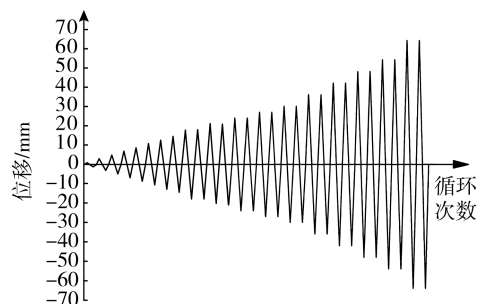


图 4 加载制度

Fig. 4 Loading system

1.3 材料本构

采用二折线随动强化本构建立钢材的应力-应变关系,如图5所示。AAC填充墙体材料特性采用ABAQUS中的混凝土损伤塑性(concrete damage plasticity, CDP)模型来构建,受压和受拉本构分别采用文献[22-23]提出的应力应变方程,如图6所示。

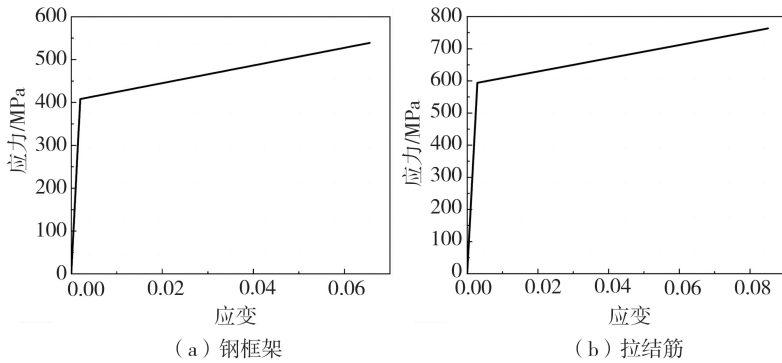


图5 钢材本构关系

Fig. 5 Constitutive relation of steel

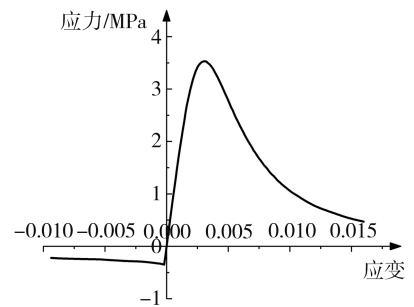


图6 AAC砌体本构关系

Fig. 6 Constitutive relation of AAC masonry

CDP模型中砌体塑性参数见表2,以能量等效模型^[24]来确定塑性阶段AAC填充墙的拉、压损伤参数 d_t 和 d_c ,如图7所示。拟静力循环加载方向改变后,墙体裂缝会发生张开和闭合,压缩刚度在拉伸裂纹闭合后得以部分恢复,拉伸刚度在压裂后则无法恢复^[25],对CDP模型中的受拉刚度恢复因子取 $w_t=0$ 。文中基于编号为M-2的AAC砌体墙试验结果^[26]对选取的砌体本构关系进行验证,受压刚度恢复因子 w_c 不同取值下的计算结果见图8,取 $w_c=0.4$ 。

表2 砌体塑性参数

Table 2 Masonry plastic parameters

参数	膨胀角 / (°)	偏心率	双轴受压与单轴受压极限强度之比	拉、压子午面上的第二应力不变量之比	黏聚系数
取值	30	0.1	1.16	0.667	0.0005

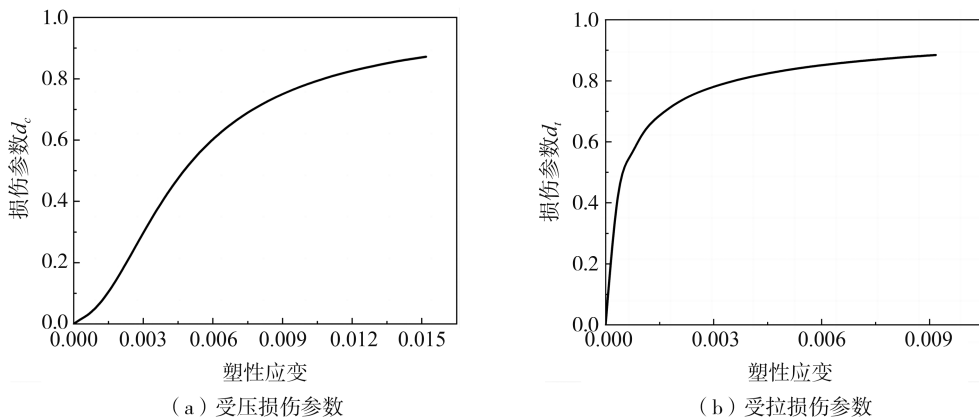
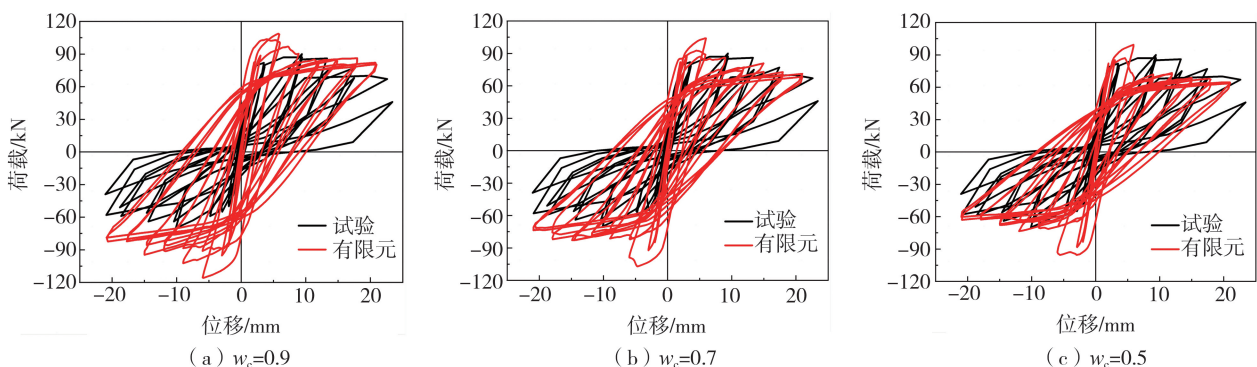


图7 砌体损伤参数

Fig. 7 Masonry damage parameters



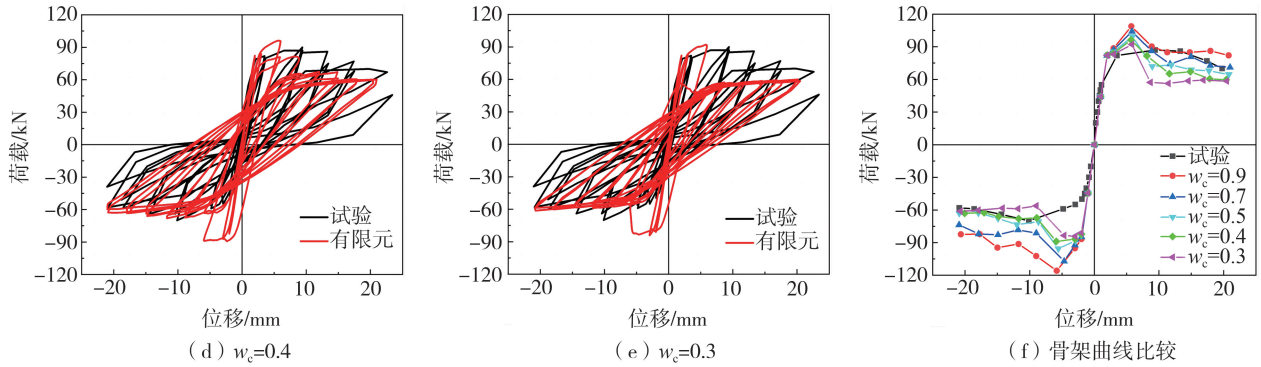


图 8 有限元与试验结果对比

Fig. 8 Comparisons of finite element and experimental result

1.4 模型验证

空框架和柔性连接填充墙框架的试验破坏状态,如图 9 所示。模型 BF、IF 和 IF-R 发生破坏时的应力云图如图 10 所示。滞回曲线、骨架曲线对比如图 11 和图 12 所示。往复荷载循环作用下,模型 BF、模型 IF 与相应试件的破坏特征基本一致,模型 IF 中填充墙体应力沿墙体四周边缘分布,在拉结筋锚固位置处应力明显较大,与拟静力试验结果一致。模型滞回曲线更为饱满,耗能较试验偏大,这是由于试验中存在试件制做安装误差、千斤顶卸压和螺栓松动等因素影响。模型与试验骨架曲线吻合良好,峰值荷载的计算值与试验值基本一致,为试验值的 0.99~1.09 倍。根据模拟结果可知,所用建模方法及参数具有可行性。

对比墙框刚性连接,柔性连接可显著减弱墙体对框架的斜撑效应,墙框间通过拉结筋传力,降低了整体结构的初始刚度,可承受更大的位移变形。

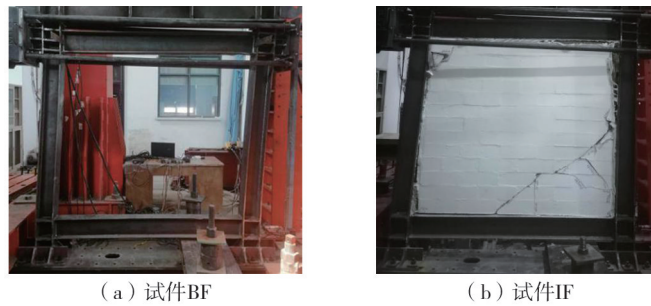
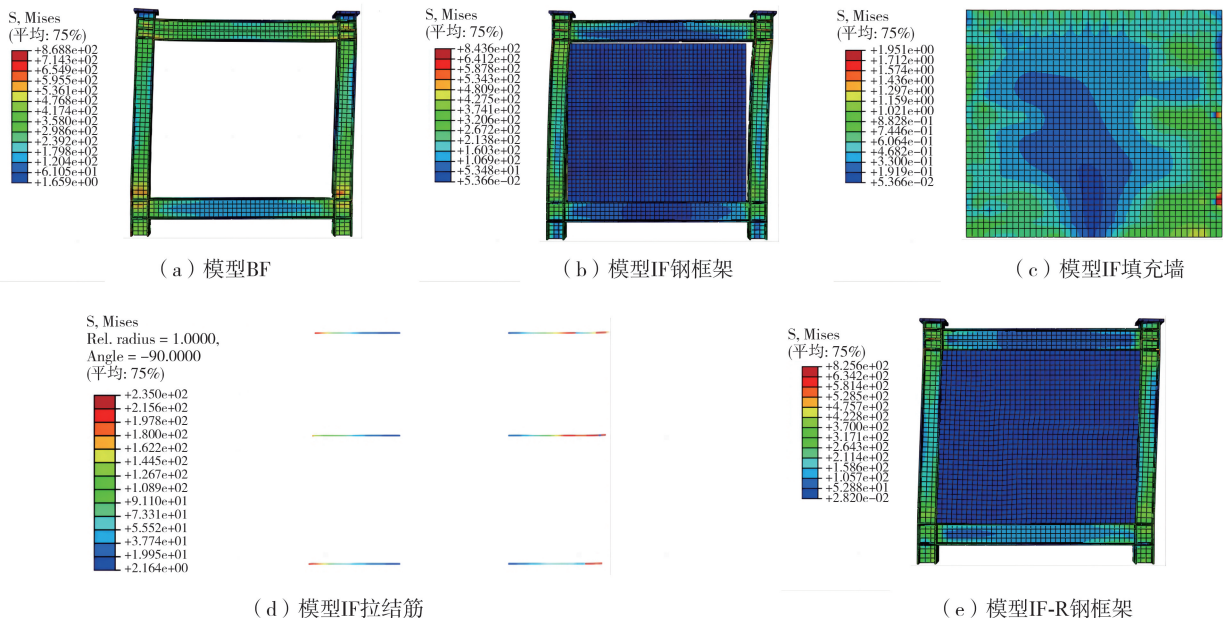


图 9 试件破坏状态

Fig. 9 Failure state of specimens



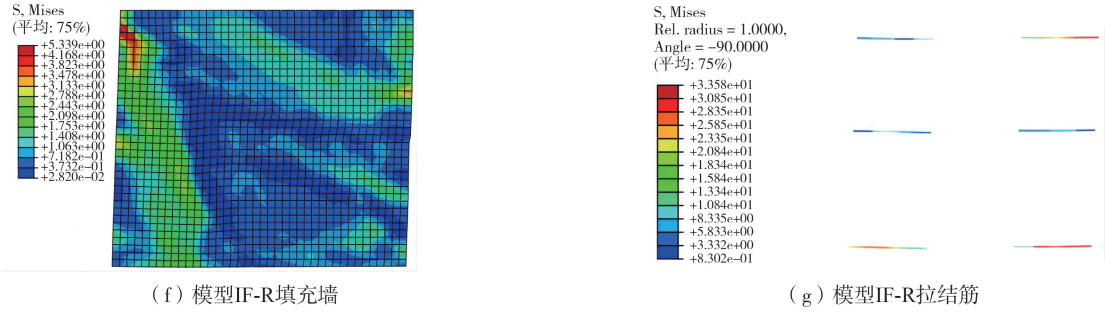


图 10 模型应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of models

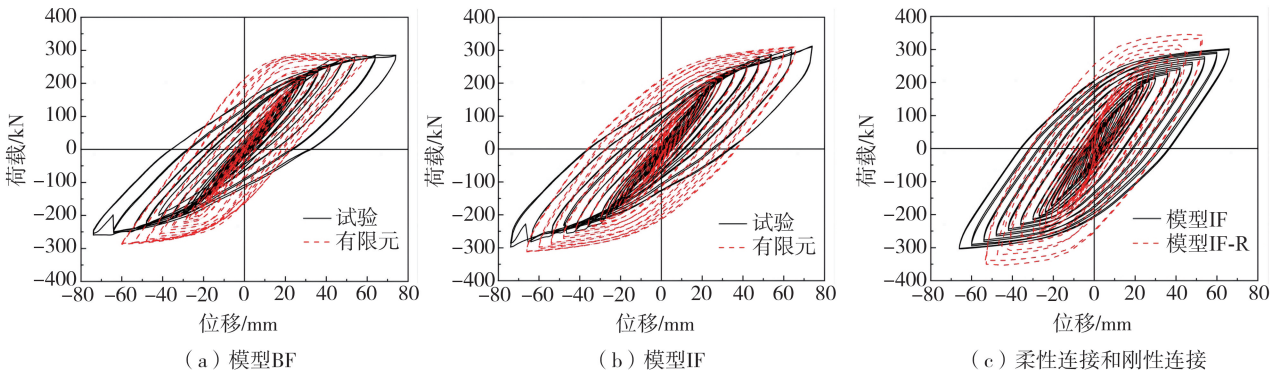


图 11 滞回曲线对比

Fig. 11 Comparison of hysteretic curves

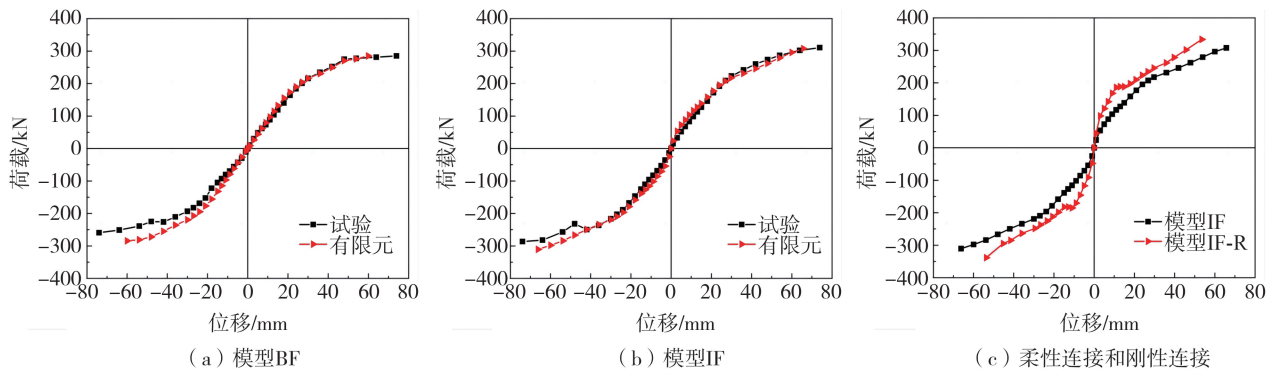


图 12 骨架曲线对比

Fig. 12 Comparison of skeleton curves

2 正交模型方案设计及计算结果

2.1 模型参数与考核指标

正交设计法可将各因素水平借助正交表进行科学安排,以较少的试验量通过极差和显著性方差分析考核评价指标受各因素的影响程度。通过对已有研究分析,本文选取对填充墙框架结构抗震性能有较大影响的4个因素:轴压比(A)、预留缝宽(B)、耗能材料刚度(C)和高跨比(D),每个因素设置3个水平(表3),以分析柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架结构抗震性能评价中各因素的影响程度。

正交试验结果的评价考核是基于定量的极差、方差计算进行的。为便于计算分析各因素对该结构抗震性能的影响,本文以各正交模型整体结构的屈服位移 Δ_y 、峰值荷载 P_{max} 、延性系数 μ 、初始侧向变形刚度 K_0 、达到弹性位移角限值 $[\theta_e]$ 和弹塑性位移角限值 $[\theta_p]$ 时的累积耗能 E_e 和 E_p 作为考核指标。

表 3 因素水平表
Table 3 Factors level

水平	影响因素			
	(因素 A)轴压比	(因素 B)预留缝宽/mm	(因素 C)耗能材料刚度/(N/mm)	(因素 D)高跨比
1	0.1	30	1 000	1.17
2	0.2	40	500	0.90
3	0.3	50	100	0.81

注:模型框架柱高均为 1 575 mm。

2.2 模型方案设计

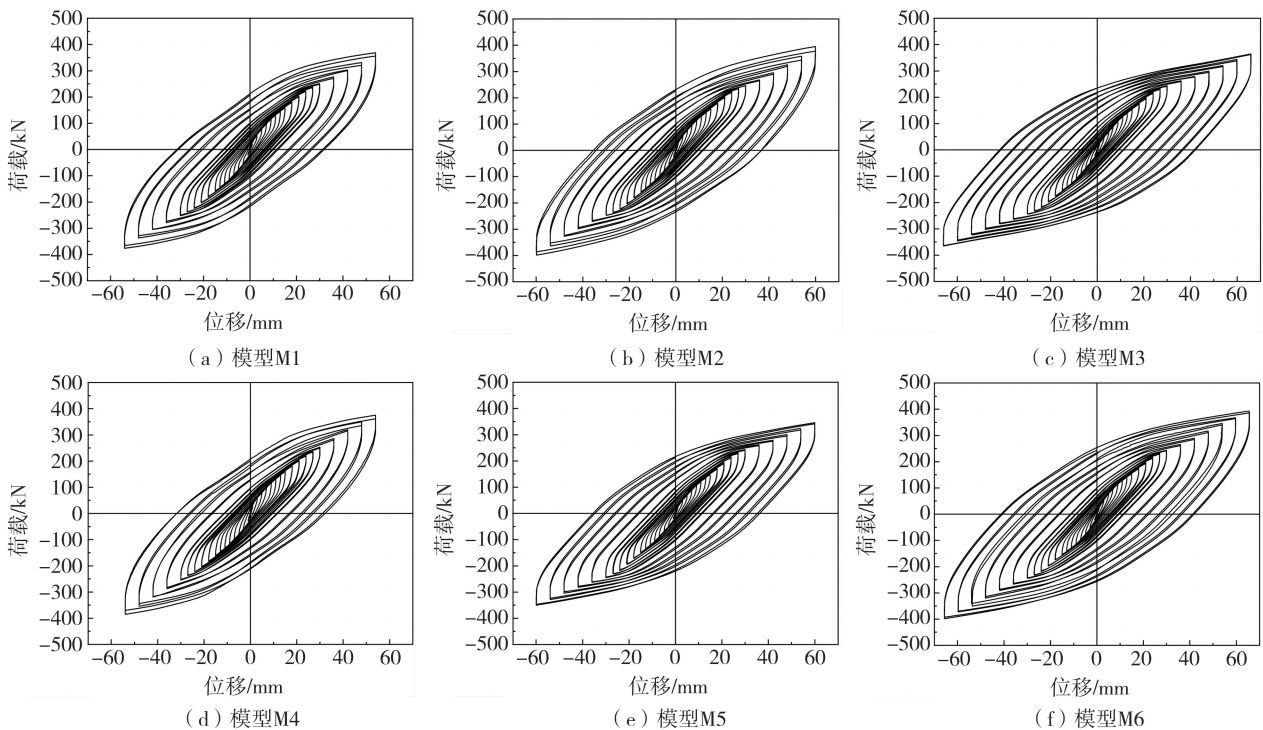
根据表 3 中确定的 4 个因素及相应水平数量,选用 4 因素 3 水平正交表 $L_9(3^4)$ 对各模型具体参数方案进行设计,见表 4。

表 4 模型参数方案正交表
Table 4 Orthogonal table of model parameter schemes

序号	各影响因素的水平取值编号				模型参数方案	模型编号
	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D		
1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1D_1$	模型 M1
2	1	2	2	2	$A_1B_2C_2D_2$	模型 M2
3	1	3	3	3	$A_1B_3C_3D_3$	模型 M3
4	2	1	2	3	$A_2B_1C_2D_3$	模型 M4
5	2	2	3	1	$A_2B_2C_3D_1$	模型 M5
6	2	3	1	2	$A_2B_3C_1D_2$	模型 M6
7	3	1	3	2	$A_3B_1C_3D_2$	模型 M7
8	3	2	1	3	$A_3B_2C_1D_3$	模型 M8
9	3	3	2	1	$A_3B_3C_2D_1$	模型 M9

2.3 正交模型计算结果

根据表 4 中模型 M1~M9 的参数设置,在 ABAQUS 软件中分别建立对应模型,进行数值计算,得到 9 个模型的滞回曲线如图 13 所示。模型骨架曲线、刚度退化曲线分别如图 14 和图 15 所示。柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架模型各考核指标计算结果见表 5。表中 Δ_y 、 P_{max} 和 μ 的值均取推、拉两方向计算结果均值。



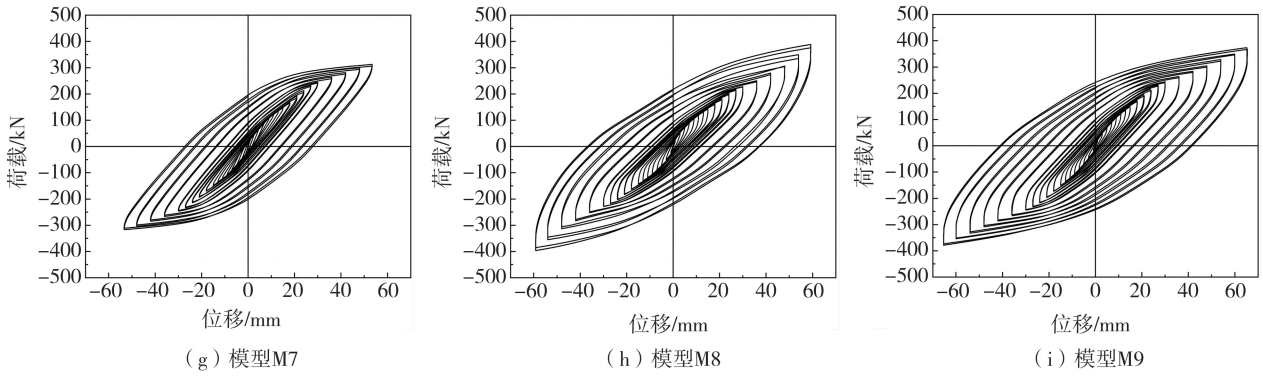


图13 各模型滞回曲线

Fig. 13 Hysteretic curves of each model

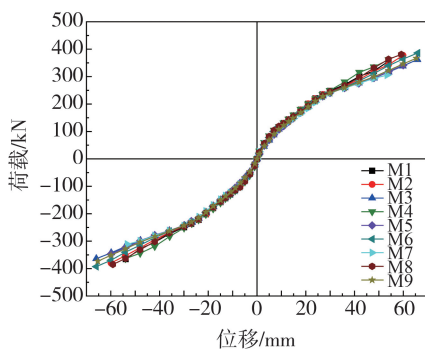


图14 各模型骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves of each model

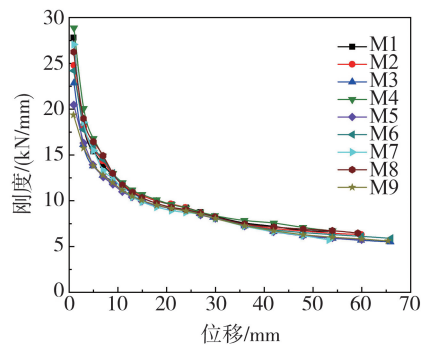


图15 各模型刚度退化曲线

Fig. 15 Stiffness degradation curves of each model

表5 正交模型考核指标计算结果

Table 5 Calculation results of orthogonal model assessment indicators

编号	正交表				考核指标					
	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	Δ_y/mm	P_{max}/kN	μ	$K_0/(kN/mm)$	$E_c/(kN \cdot m)$	$E_p/(kN \cdot m)$
M1	1	1	1	1	5.14	360.79	10.49	27.81	1.069	94.662
M2	1	2	2	2	5.70	378.57	10.51	24.78	1.061	91.004
M3	1	3	3	3	9.57	362.99	6.88	22.86	0.897	87.238
M4	2	1	2	3	6.09	362.28	8.87	28.86	1.333	93.339
M5	2	2	3	1	6.72	344.14	8.92	20.47	0.934	87.967
M6	2	3	1	2	6.92	389.43	9.54	24.20	0.891	89.718
M7	3	1	3	2	6.77	308.44	7.87	27.06	0.845	69.948
M8	3	2	1	3	5.93	382.90	9.98	26.25	1.079	92.993
M9	3	3	2	1	6.93	370.18	9.43	19.36	0.811	88.029

3 数值计算结果分析

3.1 考核指标极差分析

各考核指标的极差分析结果见表6。表中 K_1, K_2, K_3 分别为因素 j (j 取 A、B、C 或 D) 取值为水平 1、2 或 3 时, 相应考核指标计算结果之和; k_1, k_2, k_3 分别为相应因素水平下, 考核指标计算结果的均值。

由表6可知, 轴压比(A)、预留缝宽(B)、耗能材料刚度(C)以及高跨比(D)等4个因素在所取的3个水平之间变化时, 对柔性连接 AAC 填充墙钢框架的屈服位移 Δ_y , 其影响次序为 B→C→D→A, 即墙框间预留缝宽大小对结构屈服位移的影响最大。4个因素对结构峰值荷载 P_{max} 大小的影响次序为 C→B→A→D, 即结构 P_{max} 值的大小受柔性连接墙框预留缝间填充耗能材料刚度大小的影响最重, 表5中的数值计算结果整体上表现为耗能材料刚度越大, 其 P_{max} 值越大, 柔性连接填充墙框架结构越接近于刚性连接。对于结构的延性来说, 4个因素影响次序为 C→B→D→A, 即耗能材料刚度对其影响最大。对结构初始刚度 K_0 , 4个因素的影响顺序依次为 B→D→C→A, 说明整体结构的初始刚度受墙框间缝宽大小影响最大, 其次受主体结构高跨比

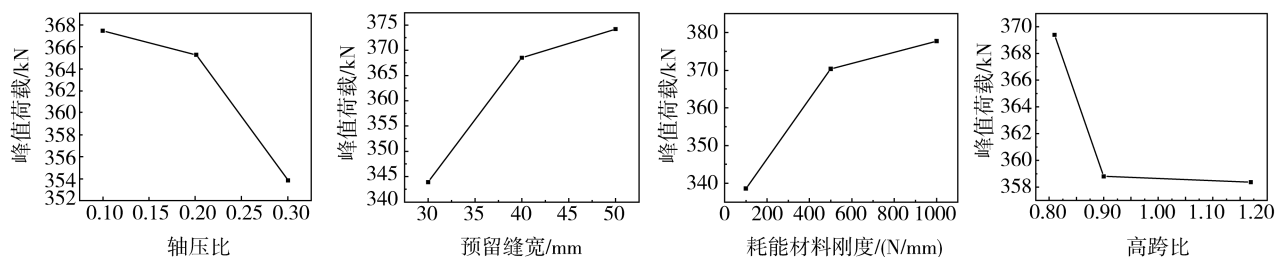
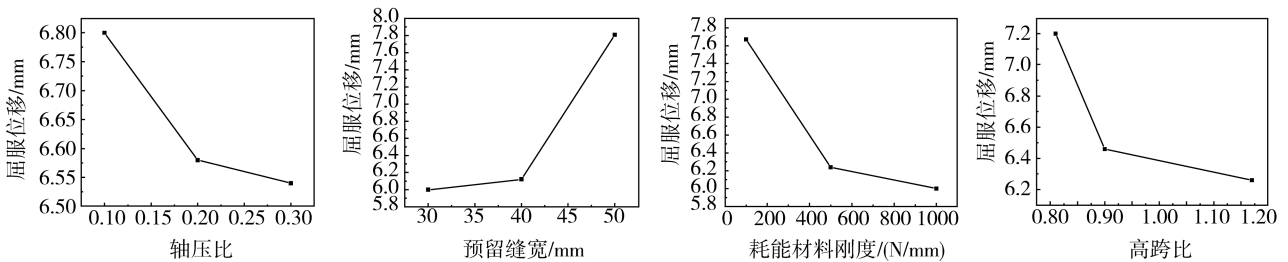
的影响。结构受地震作用位移达到弹性位移角限值 $[\theta_e]$ 时,此时预留缝宽大小对结构的累计耗能有重要影响,其次为耗能材料刚度、高跨比,轴压比影响最小,即 B→C→D→A;当位移达到弹塑性位移角限值 $[\theta_p]$ 时,因素影响次序为 C→D→A→B。

表 6 正交模型考核指标的极差分析

Table 6 Range analysis of orthogonal model assessment indicators

考核指标	因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	极差 R
Δ_y/mm	轴压比	20.41	19.73	19.63	6.80	6.58	6.54	0.26
	预留缝宽	18.00	18.35	23.42	6.00	6.12	7.81	1.81
	耗能材料刚度	17.99	18.72	23.06	6.00	6.24	7.67	1.67
	高跨比	18.79	19.39	21.59	6.26	6.46	7.20	0.94
P_{\max}/kN	轴压比	1 102.35	1 095.85	1 061.52	367.45	365.28	353.84	13.61
	预留缝宽	1 031.51	1 105.61	1 122.60	343.84	368.54	374.20	30.36
	耗能材料刚度	1 133.12	1 111.03	1 015.57	377.71	370.34	338.52	39.19
	高跨比	1 075.11	1 076.44	1 108.17	358.37	358.81	369.39	11.02
μ	轴压比	27.88	27.33	27.28	9.29	9.11	9.09	0.20
	预留缝宽	27.23	29.41	25.85	9.08	9.80	8.62	1.18
	耗能材料刚度	30.01	28.81	23.67	10.00	9.60	7.89	2.11
	高跨比	28.84	27.92	25.73	9.61	9.31	8.58	1.03
$K_0/(\text{kN}/\text{mm})$	轴压比	75.45	73.53	72.67	25.15	24.51	24.22	0.93
	预留缝宽	83.73	71.50	66.42	27.91	23.83	22.14	5.77
	耗能材料刚度	78.26	73.00	70.39	26.09	24.33	23.46	2.63
	高跨比	67.64	76.04	77.97	22.55	25.35	25.99	3.44
$E_e/(\text{kN} \cdot \text{m})$	轴压比	3.027	3.158	2.735	1.009	1.053	0.912	0.141
	预留缝宽	3.247	3.074	2.599	1.082	1.025	0.866	0.216
	耗能材料刚度	3.039	3.205	2.676	1.013	1.068	0.892	0.176
	高跨比	2.814	2.797	3.309	0.938	0.932	1.103	0.171
$E_p/(\text{kN} \cdot \text{m})$	轴压比	272.904	271.024	250.970	90.968	90.341	83.657	7.311
	预留缝宽	257.949	271.964	264.985	85.983	90.655	88.328	4.672
	耗能材料刚度	277.373	272.372	245.153	92.458	90.791	81.718	10.740
	高跨比	270.658	250.670	273.570	90.219	83.557	91.190	7.633

各因素水平取值大小与考核指标间的趋势关系如图 16 所示。对于柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架结构,轴压比、耗能材料刚度和高跨比取值越大,对结构屈服时的位移值越不利,增大轴压比也会削弱结构延性,降低最大承载力,同时整体结构的初始刚度也会随着轴压比和墙框缝宽的增大出现降低。对整体结构的初始刚度、延性和峰值荷载,均随预留缝间填充材料刚度的增大而提高,说明地震时其直接影响墙体与框架间的相互作用程度。4 个因素取值水平对结构达到限值 $[\theta_e]$ 和 $[\theta_p]$ 时的累积耗能影响趋势不一。



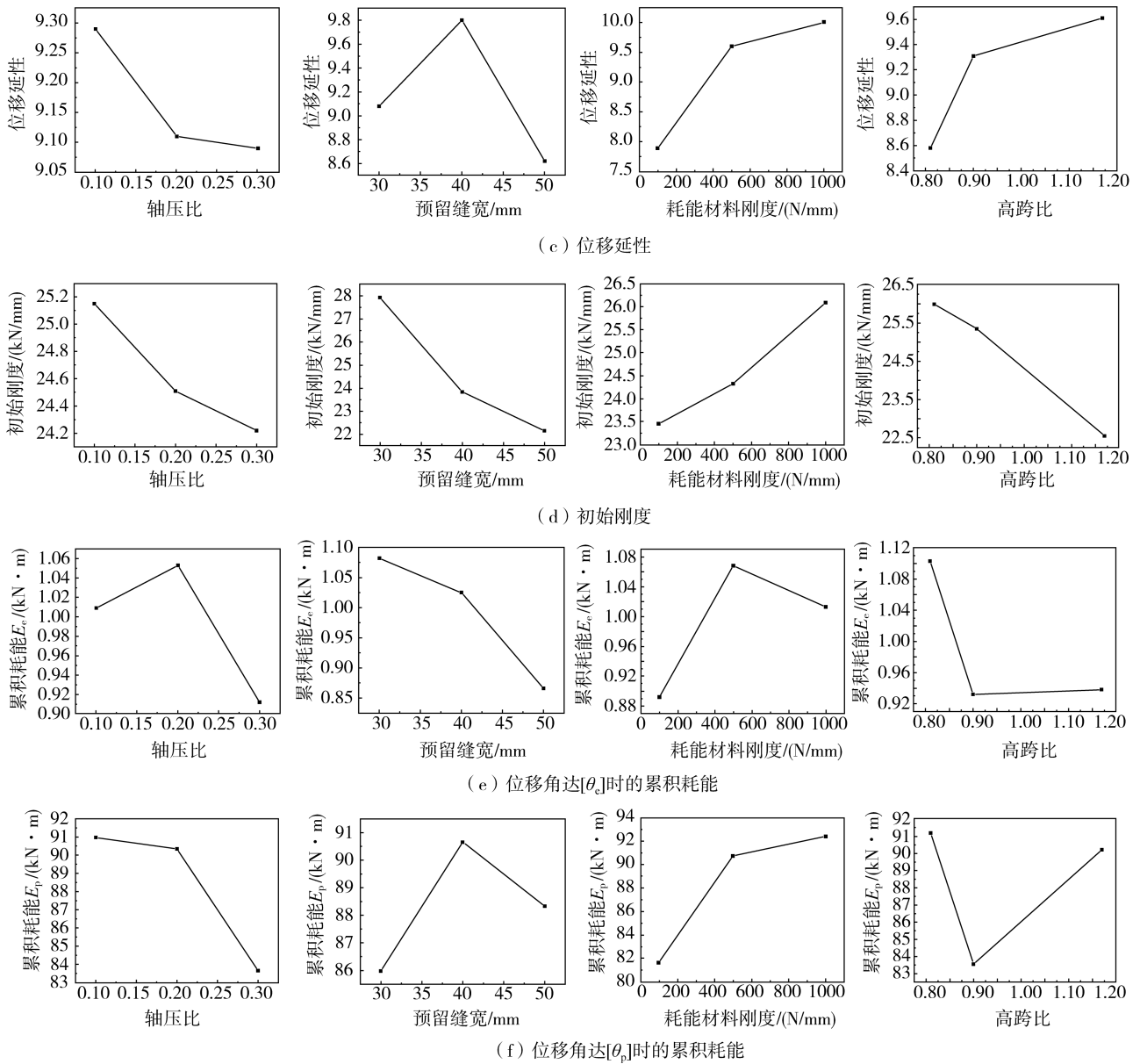


图 16 4 个因素与各指标的关系

Fig. 16 Relationship between four factors and various indicators

3.2 影响因素显著性检验

正交设计分析中,极差分析法直观简单,计算量小,但无法分清各因素对考核指标影响的显著性。因此,将轴压比、预留缝宽、耗能材料刚度和高跨比 4 个因素对柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架抗震性能考核指标的影响程度做进一步的显著性检验,即方差分析。

3.2.1 参数计算

影响因素显著性检验的参数计算,计算总离差平方和,如式(1)所示:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = Q - P \quad (1)$$

式中: SS_T 为反映模型计算结果总差异的总离差平方和; x_i 为相应考核指标值; n 为模型个数; Q 为计算结果的平方和; P 为计算结果和平方的均值。

各因素的离差平方和如式(2)所示:

$$SS_j = \frac{n}{r} \sum_{i=1}^r (k_i - \bar{x})^2 = \frac{r}{n} \left(\sum_{i=1}^r K_i^2 \right) - P \quad (2)$$

式中: SS_j 为因素 j 的离差平方和; r 为因素 j 的水平数; k_i 为 i 水平下模型相应考核指标计算结果的均值; K_i 为 i 水平下模型相应考核指标计算结果的和。

计算误差的离差平方和如式(3)所示:

$$SS_e = SS_T - \sum SS_j \tag{3}$$

计算有限元模型计算结果的总自由度、各因素和误差自由度如式(4)所示:

$$\begin{cases} df_T = n - 1 \\ df_j = r - 1 \\ df_e = df_T - \sum df_j \end{cases} \tag{4}$$

式中: df_T 为总自由度; df_j 为因素 j 的自由度; df_e 为误差自由度。

各因素的 F 值如式(5)所示:

$$F_j = \frac{SS_j / df_j}{SS_e / df_e} = \frac{MS_j}{MS_e} \tag{5}$$

式中: F_j 为因素 j 的 F 值; MS_j 为因素 j 的均方; MS_e 为误差的均方。

3.2.2 显著性分析

依据检验水平 α 于 F 分布表中查找临界值 $F_\alpha(f_j, f_e)$,将计算得到的 F_j 与其比较,以确定因素 j 的显著性,表 7 给出了不同 α 值下对应的显著性水平。

由于模型设计未考虑误差项的影响,为分析 4 种因素对各指标影响程度的显著性,先剔除各考核指标中 4 个因素均方值 MS 最小的一个,以其作为误差项,进行方差分析,结果见表 8。以表 8 中影响显著性最小的因素作为误差项,加入先前剔除的因素继续方差分析,结果见表 9。

根据上述步骤,对表 5 中各模型考核指标值进行参数计算,分析 4 个因素对柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架抗震性能影响的显著性。

表 7 显著性水平表

Table 7 Level table of significance

项目	$F_j > F_{0.01}$	$F_{0.01} \geq F_j > F_{0.05}$	$F_{0.05} \geq F_j > F_{0.10}$	$F_{0.05} \geq F_j > F_{0.25}$	$F_j \leq F_{0.25}$
影响显著性	特别显著	非常显著	显著	有一定影响	无影响
符号表示	***	**	*	*	—

表 8 因素影响程度的方差分析

Table 8 Variance analysis of the influence degree of factors

考核指标	方差来源	SS	df	MS	F	临界值
屈服位移 Δ_y	预留缝宽	6.134	2	3.067	51.117 ***	$F_{0.05} = 19.00$
	耗能材料刚度	5.008	2	2.504	41.733 ***	$F_{0.05} = 19.00$
	高跨比	1.449	2	0.725	12.083 **	$F_{0.10} = 9.00$
	误差(轴压比)	0.120	2	0.060	—	—
	总和	12.711	8	—	—	—
峰值荷载 P_{max}	轴压比	320.876	2	160.438	0.962	$F_{0.25} = 3.00$
	预留缝宽	1564.095	2	782.048	4.690 *	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	2602.065	2	1301.033	7.802 *	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(高跨比)	233.503	2	166.752	—	—
	总和	4720.539	8	—	—	—
延性系数 μ	预留缝宽	2.148	2	1.074	29.027 ***	$F_{0.05} = 19.00$
	耗能材料刚度	7.562	2	3.781	102.189 ****	$F_{0.01} = 99.00$
	高跨比	1.702	2	0.851	23.000 ***	$F_{0.05} = 19.00$
	误差(轴压比)	0.074	2	0.037	—	—
	总和	11.485	8	—	—	—
初始侧向变形刚度 K_0	预留缝宽	52.779	2	26.340	39.022 ***	$F_{0.05} = 19.00$
	耗能材料刚度	10.713	2	5.357	7.936 *	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	20.110	2	10.055	14.896 **	$F_{0.10} = 9.00$
	误差(轴压比)	1.350	2	0.675	—	—
	总和	84.953	8	—	—	—

续表

考核指标	方差来源	SS	df	MS	F	临界值
达到弹性位移角限值时的累计耗能 E_e	预留缝宽	0.075	2	0.038	2.375	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	0.049	2	0.025	1.563	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	0.056	2	0.028	1.750	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(轴压比)	0.031	2	0.016	—	—
	总和	0.211	8	—	—	—
达到弹塑性位移角限值时的累计耗能 E_p	轴压比	98.533	2	49.267	3.010 *	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	200.446	2	100.223	6.123 *	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	103.601	2	51.801	3.165 *	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(预留缝宽)	32.737	2	16.369	—	—
	总和	435.317	8	—	—	—

表9 误差项调整后的方差分析

Table 9 Variance analysis of adjusted error terms

考核指标	方差来源	SS	df	MS	F	临界值
屈服位移 Δ_y	轴压比	0.120	2	0.060	0.083	$F_{0.25} = 3.00$
	预留缝宽	6.134	2	3.067	4.230 *	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	5.008	2	2.504	3.454 *	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(高跨比)	1.449	2	0.725	—	—
	总和	12.711	8	—	—	—
峰值荷载 P_{max}	预留缝宽	1564.095	2	782.048	4.874 *	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	2602.065	2	1301.033	8.109 *	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	233.503	2	116.752	0.728	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(轴压比)	320.876	2	160.438	—	—
	总和	4720.539	8	—	—	—
延性系数 μ	轴压比	0.074	2	0.037	0.043	$F_{0.25} = 3.00$
	预留缝宽	2.148	2	1.074	1.262	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	7.562	2	3.781	4.443 *	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(高跨比)	1.702	2	0.851	—	—
	总和	11.485	8	—	—	—
初始侧向变形刚度 K_0	轴压比	1.350	2	0.675	0.126	$F_{0.25} = 3.00$
	预留缝宽	52.779	2	26.390	4.926 *	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	20.110	2	10.055	1.877	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(耗能材料刚度)	10.713	2	5.357	—	—
	总和	84.953	8	—	—	—
达到弹性位移角限值时的累计耗能 E_e	轴压比	0.031	2	0.016	0.640	$F_{0.25} = 3.00$
	预留缝宽	0.075	2	0.038	1.520	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	0.056	2	0.028	1.120	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(耗能材料刚度)	0.049	2	0.025	—	—
	总和	0.211	8	—	—	—
达到塑性位移角限值时的累计耗能 E_p	预留缝宽	32.737	2	16.369	0.332	$F_{0.25} = 3.00$
	耗能材料刚度	200.446	2	100.223	2.034	$F_{0.25} = 3.00$
	高跨比	103.601	2	51.801	1.051	$F_{0.25} = 3.00$
	误差(轴压比)	98.533	2	49.267	—	—
	总和	435.317	8	—	—	—

对比表8和表9,以考核指标中4个因素均方值最小的一个作为误差项,分析其余因素对结构抗震性能的影响程度是可以接受的。可以发现,预留缝宽和耗能材料刚度对结构屈服位移的影响非常显著,高跨比对

其也有显著影响。结构的延性受到耗能材料刚度大小的影响特别显著,同时预留缝宽、高跨比对其影响也非常显著。整体结构初始刚度受到墙框间缝宽大小的影响也非常显著。4个因素对各抗震性能指标影响的显著性分析表明,对柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架结构应特别重视墙框间的柔性构造,合理预留墙框间缝宽值及选取缝间填充材料。

3.2.3 4个因素对考核指标的影响率

基于工程实用性,对检验水平 α 取 0.05,由式(6)计算各考核指标受4个因素的影响率 $\delta^{[27]}$,如图17所示。

$$\delta = \frac{F_j}{F_\alpha(f_j, f_e)} \quad (6)$$

图17中,各考核指标中未出现的因素为误差项,当 $\delta \geq 100\%$ 时,说明该指标受相应因素的影响显著。结构屈服位移受预留缝宽、耗能材料刚度变化的影响率分别为269.04%、219.65%;预留缝宽、弹簧刚度及高跨比对延性的影响率分别达到了152.77%、537.84%和121.05%;整体结构的初始刚度受到预留缝宽变化的影响率为205.38%;且高跨比变化对整体结构屈服位移、初始刚度的影响率也达到了63.59%和78.40%。因此,在实际工程应用中,应重视预留缝宽、耗能材料刚度和高跨比变化对柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架抗震性能的影响。

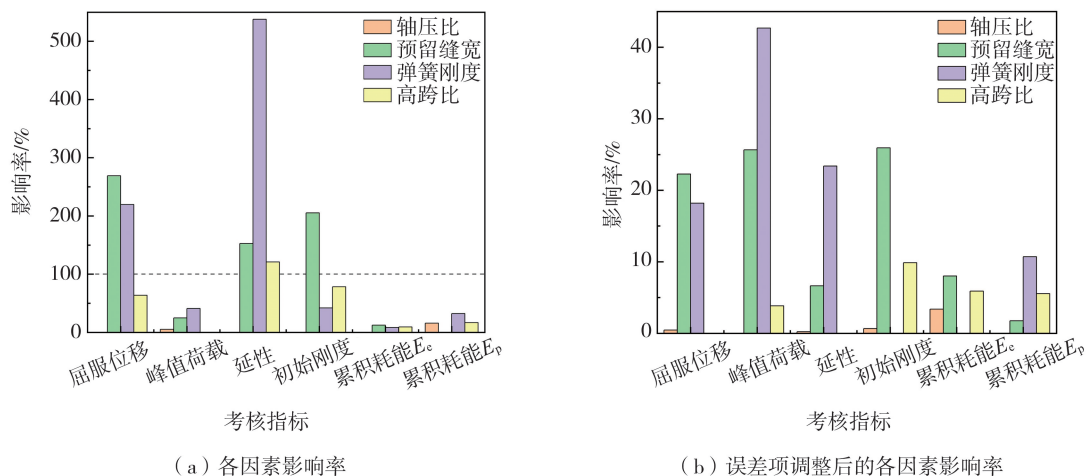


图17 考核指标受各因素的影响率

Fig. 17 Impact rate of assessment indicators by various factors

结合极差分析,综合考虑4个因素对柔性连接 AAC 填充墙钢框架各项考核指标影响的趋势和显著性,预留缝宽对结构性能的影响最为显著,缝宽在40 mm时性能最优;其次为耗能材料刚度的大小,柔性连接墙框预留缝间填充材料刚度的刚度不宜超过500 N/mm;相比于轴压比,高跨比对结构抗震性能的影响更大一些。

4 结论

通过对9榀柔性连接 AAC 砌体填充墙钢框架模型进行变参数值分析,得到以下结论:

1) 增大轴压比,结构各项抗震性能指标均呈下降趋势。在一定范围内增大墙框间缝宽对整体结构的屈服位移、峰值荷载均有提升,初始刚度明显下降,而延性的提升对缝宽限值有要求。减小耗能材料的刚度,会导致整体结构的初始刚度降低,同时其延性也会有所下降,并且峰值荷载也会相应减小,而结构的屈服位移则会增大。高跨比减小,整体结构的初始刚度、屈服位移及峰值荷载均有提高,但会削弱延性。对累积耗能,4个因素的影响趋势不一。

2) 耗能材料刚度对柔性连接 AAC 填充墙钢框架延性的影响特别显著,对其屈服位移的影响非常显著。墙框间缝宽大小对整体结构初始刚度、延性和屈服位移的影响均非常显著。高跨比对结构延性、屈服位移也有非常显著的影响。4个因素对累积耗能的影响均不显著。

3)综合考虑4个因素对柔性连接AAC填充墙钢框架抗震性能的影响程度和趋势,影响程度由高到低依次为预留缝宽、耗能材料刚度、高跨比、轴压比。建议柔性连接墙框间缝宽取值在40 mm左右;预留缝间填充材料的刚度宜在100~500 N/mm之间。

参考文献:

- [1] 郭阳照,周云,朱勇,等. 框架填充墙抗震性能研究的回顾与前瞻[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(6): 1-13.
GUO Yangzhao, ZHOU Yun, ZHU Yong, et al. Retrospect and prospect of the studies concerning the seismic performance of infill frame structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(6): 1-13. (in Chinese)
- [2] MOHAMMADI M, AKRAMI V. An engineered infilled frame: Behavior and calibration[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(6): 842-849.
- [3] ASADZADEH S A, MOHAMMADI M, ATTARI N K A, et al. An experimental study on the effect of frame-to-wall connection type on the seismic behavior of steel frames infilled with autoclave-cured aerated concrete blocks[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(4): 642-656.
- [4] TSANTILIS A V, TRIANTAFILLOU T C. Innovative seismic isolation of masonry infills in steel frames using cellular materials at the frame-infill interface[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020, 24(11): 1729-1746.
- [5] 张永兵,郭新华,李勇,等. 柔性连接填充墙RC框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 187-195.
ZHANG Yongbing, GUO Xinhua, LI Yong, et al. Experimental study on seismic performance of masonry-infilled RC frame building with flexible connection[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 187-195. (in Chinese)
- [6] 周云,郭阳照,杨冠男,等. 摩擦型阻尼填充墙单元的设计及性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 210-217.
ZHOU Yun, GUO Yangzhao, YANG Guannan, et al. Design and performance experimental study of frictionally damped infill wall unit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(4): 210-217. (in Chinese)
- [7] 邹祖银,李少强,朱占元,等. 阻尼填充墙钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊1): 71-78.
ZOU Zuyin, LI Shaoqiang, ZHU Zhanyuan, et al. Experimental study on seismic behavior of steel frame with damping infill wall[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S1): 71-78. (in Chinese)
- [8] TASLIGEDIK A S, PAMPANIN S, PALERMO A. Low damage seismic solutions for non-structural drywall partitions[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(4): 1029-1050.
- [9] PRETI M, BOLIS V. Seismic retrofit of existing frame masonry infill walls by means of sliding joints[C]//16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE. Santiago, Chile, S2017: N285.
- [10] 赵欣,李国强. 轻质砌块填充墙对钢框架地震反应影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 159-161.
ZHAO Xin, LI Guoqiang. Analysis of influences of lightweight infilled walls on seismic responses of steel frames[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(3): 159-161. (in Chinese)
- [11] BHOSALE A, ZADE N P, DAVIS R, et al. Experimental investigation of autoclaved aerated concrete masonry[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7): 04019109.
- [12] LI F L, CHEN G L, ZHANG Y Y, et al. Fundamental properties and thermal transferability of masonry built by autoclaved aerated concrete self-insulation blocks[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(7): 1680.
- [13] 王月栋,张泽宇,郭剑云,等. 钢结构建筑轻质环保围护体系产业化关键技术及产品应用研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(10): 75-92.
WANG Yuedong, ZHANG Zeyu, GUO Jianyun, et al. Research on the key technology and product application of light environment-friendly enclosure system of steel structure buildings[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(10): 75-92. (in Chinese)
- [14] 赵成文,张玉平,陈锦健. 柔性连接应用优势与设计探讨[C]//第八届沈阳科学学术年会论文集,沈阳:沈阳建筑大学,2011: 554-558.
ZHAO Chengwen, ZHANG Yuping, CHEN Mianjian. Application advantage and design discussion of flexible connection[C]//Proceedings of the 8th Shenyang Annual Scientific Conference. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011: 554-558. (in Chinese)
- [15] 贺安琪,赵作周. 蒸压加气混凝土砌块填充墙的易损性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 178-185.
HE Anqi, ZHAO Zuozhou. Study on fragility of autoclaved aerated concrete block infills[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(6): 178-185. (in Chinese)
- [16] 杨俊芬,程锦鹏,翟伟,等. 内填脱硫石膏砌块墙体的新型装配式钢框架抗震性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 147-156.
YANG Junfen, CHENG Jinpeng, ZHAI Wei, et al. Study on aseismic performance of a new type of fabricated steel frame with internal desulfurization gypsum block wall[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 147-156. (in Chinese)
- [17] 薛建阳,戚亮杰,罗峥,等. 型钢再生混凝土框架—填充墙结构抗震性能水平和容许变形值研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 15-20.
XUE Jianyang, QI Liangjie, LUO Zheng, et al. Study on seismic performance levels and allowable deformation values of steel reinforced recycled concrete frame structure with infilled wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 15-20. (in Chinese)

- [18] 朱杰崑. 不同新型填充墙钢框架结构受力性能的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
ZHU Jiekun. Research on mechanical properties of steel frame structures with different new types of infill walls[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 黄群贤, 郭子雄, 朱雁茹, 等. 混凝土空心砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 110-118.
HUANG Qunxian, GUO Zixiong, ZHU Yanru, et al. Experimental study on seismic behavior of RC frames infilled with concrete hollow blocks[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 110-118. (in Chinese)
- [20] 陈贡联, 赵顺波, 陈震, 等. 减震可控式框架式保温填充墙的柔性连接结构: CN208267163U[P]. 2018-12-21.
CHEN Gonglian, ZHAO Shunbo, CHEN Zhen, et al. Flexible connection structure of shock-absorbing and controllable frame insulation filled wall: CN208267163U[P]. 2018-12-21. (in Chinese)
- [21] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB 50003—2011 Code for design of masonry structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [22] 张云云. 蒸压加气混凝土自保温砌块砌体基本力学性能试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
ZHANG Yunyun. Experimental study on basic mechanical properties of autoclaved aerated concrete masonry[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese)
- [23] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
GUO Zhenhai. Strength and constitutive relations of concrete: Principles and applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
- [24] G-U Newman. The continuous damage theory of brittle materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 48(22): 809-815.
- [25] 周晓洁. 柔性连接新型砌体填充墙框架结构抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHOU Xiaojie. Study on seismic behavior of flexible connection frame structure infilled with new masonry[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [26] 王志朋. 蒸压加气混凝土自保温砌块墙体抗震性能研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
WANG Zhipeng. Study on Seismic behavior of autoclaved aerated concrete self insulation block walls[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese)
- [27] 闫春岭, 唐益群, 刘莎. 地铁荷载下饱和软黏土累积变形特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 978-982.
YAN Chunling, TANG Yiqun, LIU Sha. Accumulative deformation characteristics of saturated soft clay under subway loading in Shanghai[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 978-982. (in Chinese)