

杨建华,叶郁.多层砖房底部两层框架抗震变形性能分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1141-1146.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1141

YANG Jianhua, YE Yu. Seismic Deformation Behavior of a Two-story Frame at the Bottom of a Multistory Masonry Building [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1141-1146. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1141

# 多层砖房底部两层框架抗震变形性能分析

杨建华<sup>1</sup>, 叶郁<sup>2</sup>

(1. 江苏城乡建设职业学院, 江苏常州 213000; 2. 北京林业大学园林学院, 北京 100083)

**摘要:**为实现多层砖房底部两层框架结构的加固,需要研究其抗震变形性能。以某底部两层框架、上部四层砖房建筑为对象,通过 STRAND7 有限元软件构建有限元计算模型,考虑水平荷载与垂直荷载,深入分析多层砖房底部两层框架抗震变形性能。仿真结果表明,建筑结构振型受结构横向楼板刚度的影响较显著,不同振型的频率变化中, $X$  向 1 阶频率与  $Y$  向 2 阶频率变化最快,楼板平面内弯曲频率变化最慢;整体结构在  $X$  向与  $Y$  向分别呈现线性剪切变形和弯剪变形, $Y$  向上由于填充墙发挥抗震墙功能,底部两层框架变形较小;在 7 度多遇地震影响下,底部两层结构中第二层楼板变形较第一层严重,多层砖房底部两层框架建筑结构处于弹性工作状态。

**关键词:** 多层砖房; 底部; 两层框架; 抗震变形性能; 有限元; 计算模型; 荷载

中图分类号: TU241.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1141-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1141

## Seismic Deformation Behavior of a Two-story Frame at the Bottom of a Multistory Masonry Building

YANG Jianhua<sup>1</sup>, YE Yu<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Urban and Rural Construction College, Changzhou 213000, Jiangsu, China;

2. College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To strengthen the bottom two stories of a multistory masonry frame structure, it is necessary to study its seismic deformation performance. Taking a masonry building with a bottom two-story frame and an upper four-story frame as the object, a finite element calculation model was constructed with finite element software STRAND7. Considering the horizontal and vertical loads, the seismic deformation performance of the two-story frame at the bottom of the multistory masonry building was analyzed. Simulation results showed that the vibration mode of the building structure was significantly affected by the lateral floor stiffness. The changes of the first mode frequency in the  $X$  direction and second mode frequency in the  $Y$  direction were the fastest, and the bending frequency in the floor plane changed the slowest. The whole structure showed a linear shear deformation in the  $X$  direction and a flexure-shear deformation in the  $Y$  direction,

收稿日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700633)

第一作者简介: 杨建华(1965-), 女, 江苏常州人, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑工程管理、建筑材料研究等。

E-mail: 826642890@qq.com.

通信作者: 叶郁(1965-), 女, 北京人, 博士, 副教授, 研究方向: 景观生态设计。E-mail: ehinensis@aliyun.com.cn.

due to the filled wall in the Y direction assuming the function of seismic wall. Deformation of the bottom two-story frame was small; under the influence of a 7-degree earthquake, deformation of the second story of the bottom two-story structure was more serious than that of the first story, and the two-story frame structure at the bottom of the multistory masonry house was in an elastic working state.

**Keywords:** multistory masonry building; bottom; two-story frame; seismic deformation performance; finite element; computational model; load

## 0 引言

多层砖房底部两层框架结构具有增加房屋面积、使用灵活、商业价值高、施工简单等优势<sup>[1]</sup>,不仅能够满足当下人们生活与生产过程中的各种需求,还可以大幅提升土地的开发与利用价值。因此在未来较长时间内,多层砖房底部两层框架结构依旧是我国使用较为频繁的建筑结构类型。由于多层砖房底部两层框架结构在本质上是一种由两种不同材料构建而成的复合结构<sup>[2]</sup>,因此其具有“头重脚轻”、刚度分布不均匀的结构特点,地震作用下结构内力与变形受楼板变形影响严重<sup>[3]</sup>,需详细分析其抗震变形性能。

以往分析多层砖房底部两层框架抗震变形性能时,大多使用基于弹塑性动力时程分析通用程序的抗震变形性能分析方法和基于楼层屈服强度系数的抗震变形性能分析方法<sup>[4-5]</sup>。前者在时间步长内以二次曲线拟合动力反应的速度与加速度,利用非线性拟动力方程探讨底部两层框架在罕遇地震作用下的层间

位移和屈服强度系数比等情况,仅考虑罕遇地震条件,忽略多遇地震条件,实用性差;后者以楼层屈服强度系数控制底部塑性变形集中,分析过程中只考虑水平荷载,忽略了垂直荷载,导致分析结果精度低。

针对上述问题,本文提出新的多层砖房底部两层框架抗震变形性能分析方法,采用有限元软件构建模型,考虑水平荷载与垂直荷载,通过运算底部两层极限剪力和极限剪力系数与二层以上砖房部分受剪承载力,分析多层砖房底部两层框架建筑结构在多遇地震下的抗震变形性能。

## 1 抗震变形性能分析

### 1.1 有限元计算模型

以某底部两层框架、上部四层砖房建筑为对象,通过 STRAND7 有限元软件构建多层砖房底部两层框架建筑结构的有限元计算模型<sup>[6]</sup>,其模型如图 1 所示。有限元计算模型中总节点数、杆单元数

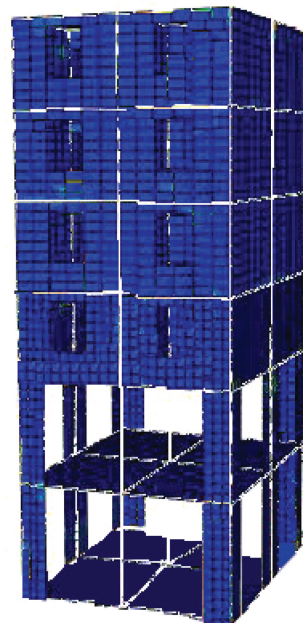
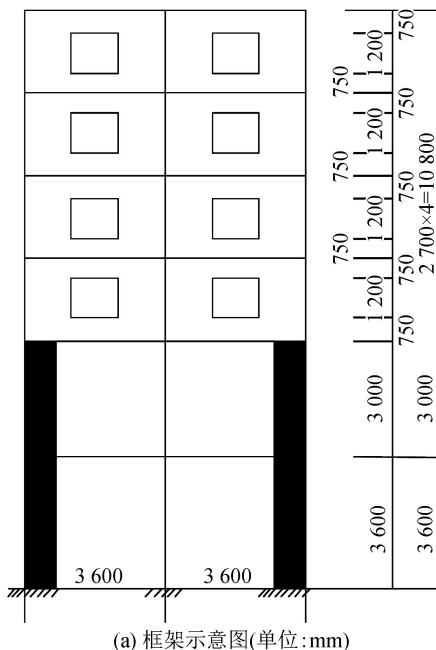


图 1 上部 4 层底部两层砖房框架建筑的示意图及模型

和墙单元数分别为 14 781 个、4 011 个和 14 655 个。建筑框架结构的横向和纵向分别用  $X$  轴和  $Y$  轴表示,其平面形状为长方形,质量和刚度均匀分布,模型中  $X$  方向底部框架含有少量填充墙, $Y$  方向底部两层设有端山墙与楼梯间墙。有限元计算模型基本频率以及底部三层同二层抗侧刚度比分别为 2.5 Hz 和 1.5。设置窗口的尺寸为  $1.2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,门洞的尺寸为  $1.2\text{ m} \times 2.1\text{ m}$ ;上部的四层砖房结构层高均为 2.7 m,底部的底层层高为 3.6 m,底部第二层的层高设置为 3 m,整体结构的总高度设置为 17.4 m。将底部抗震墙及底部框架的混凝土等级设置为 C30,其余的构造柱混凝土等级设置为 C20。

并对此建筑结构模型进行弹性分析,分析过程中进行如下设置:

- (1) 以均质的杆单元和壳单元等效替代钢筋混凝土梁柱和楼板<sup>[7]</sup>,将混凝土特性作为材料特性。
- (2) 以均质的壳单元等效替代砖墙,将砂浆和砖协同工作作为材料特性。
- (3) 通过节点连接梁单元和墙单元<sup>[8]</sup>,忽略滑移和脱离现象。

材料特性如表 1 所列。

表 1 材料特性

Table 1 Material characteristics

材料	混凝土	2 层以上砌体	1 层 2 层砌体
弹性模量/MPa	2 400	2 574	2 259
泊松比 $\mu$	0.2	0.14	0.14
密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	24	18	18

## 1.2 荷载参数

### 1.2.1 水平荷载

建筑结构水平荷载中主要包含风荷载与地震荷载<sup>[9]</sup>。抗震规范中指出,在地震作用下,针对单层与多层建筑组合时,可忽略风荷载,因此在有限元计算模型施加水平荷载过程中忽略风荷载作用。根据相关要求,有限元计算模型中设置的地震荷载是地震设防烈度 7 度,其地震加速度峰值为  $0.15g$ 。

### 1.2.2 垂直荷载

有限元计算模型中考虑垂直荷载,即建筑结构自重系数<sup>[10]</sup>,其取值范围为  $0 \sim 1$ ,若自重系数大于 0,则有限元计算模型自动计算各构件的自重,自重与自重系数相乘后施加在各构件上,框架梁上根据填充墙自重均布荷载<sup>[11]</sup>。不同功能区域的荷载标准值如表 2 所列。

## 1.3 抗震变形性能参数计算

### 1.3.1 底部两层极限剪力与极限剪力系数

将底部两层极限剪力系数作为标准分析有限元

表 2 不同功能区域的荷载标准值

Table 2 Acceleration time-history curve of seismic wave

功能区域	荷载标准值/( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
商业网点	2.8
居室	1.8
屋面	0.6
楼梯	1.8

计算模型中建筑结构底部两层的抗震性能和变形情况。假设极限承载力条件下,建筑结构底部两层框架的变形与建筑结构整体变形匹配<sup>[12]</sup>,即能按照钢筋砼框架在极限承载力条件下的位移确定底部两层框架中不同抗震墙极限承载力的下降,用  $V_R$  表示有限元计算模型中建筑结构底部两层的极限承载力,则有:

$$S_R = S_{yc} + \lambda_1 \sum S_{bw} + \lambda_2 \sum S_{cw} \quad (1)$$

式中: $S_{yc}$  表示钢筋砼框架的极限剪力; $S_{bw}$  表示一片砖的极限剪力; $S_{cw}$  表示底部两层不同抗震墙的极限剪力; $\lambda_1$  表示砖极限承载力的折减系数; $\lambda_2$  表示砼抗震墙的极限承载力折减系数。

用  $\xi_y$  表示有限元计算模型中建筑结构底部两层层间极限剪力系数,则有:

$$\xi_y = \frac{S_R(1)}{S_c(1)} \quad (2)$$

式中: $S_R(1)$  表示底部两层层间极限剪力; $S_c(1)$  表示地震作用下底部两层弹性地震剪力。

### 1.3.2 两层以上砖房部分受剪承载力

多层砖房底部两层框架建筑结构中,底部两层以上的抗侧力构件为砖墙<sup>[13]</sup>。以往的地震灾害与相关实验结论均表明,多层砖房底部两层框架建筑结构两层以上砖房部分的墙体受剪承载力决定其抗震性能。因此在有限元计算模型中,受地震作用影响,在两层以上砖房部分墙体承受的地震作用剪力达到其受剪承载力的条件下,墙体开始产生裂纹<sup>[14]</sup>。当地震作用强度持续提升时,该墙体裂纹快速扩张,出现滑移、错动散落等变形现象,直至承载能力降至最低。

受地震作用影响,两层以上砖房部分墙段最先产生裂纹现象的墙段是最薄弱的墙段,其后实施弹塑性内力重分布,破坏集中现象出现在薄弱的部位与楼层<sup>[15]</sup>。在有限元计算模型中,受地震作用影响受力状态较复杂且应力集中的部位就是两层以上砖房部分的薄弱部位,例如错层的部位、出屋面的小建筑以及纵墙同山墙的连接处等;而墙段与楼层的受剪承载力与其依照固定标准分配到的弹性地震剪力之比较小的墙段与楼层,就是两层以上砖房部分的

薄弱墙段与楼层。

根据弹性分析,在两层以上砖房部分墙体承受的地震剪力大于等于墙体受剪极限承载力的条件下,砖房部分墙体会出现裂纹与变形。若  $\delta_{R_i}(i)$  是二层以上砖房部分墙体的极限剪力系数,则可通过  $\delta_{R_j}(i)$  描述墙体的变形程度:

$$\delta_{R_j}(i) = \frac{S_{R_j}(i)}{S_{c_j}(i)} \quad (3)$$

式中: $\delta_{R_j}(i)$ 、 $S_{R_j}(i)$  和  $S_{c_j}(i)$  分别表示第  $i$  层第  $j$  道墙的极限剪力系数、受剪极限承载力和根据弹性分析承受的地震剪力。

### (1) 砖墙体受剪极限承载力

在有限元计算模型中,通过两层以上砖房部分墙体的极限受剪承载力能够判断其墙体是否出现变形,其运算公式如下:

$$S_{R_j}(i) = 2.222k_v \frac{1}{1.2} \sqrt{1 + 0.45\sigma_0/k_v} \quad (4)$$

式中: $k_v$  和  $\sigma_0$  分别表示非抗震设计的墙体抗剪强度设计值和与重力荷载代表值作用下 1/2 高度位置相对应的砖墙截面平均压应力。

### (2) 层间极限剪力系数

二层以上砖房部分墙段的极限受剪承载力与此墙段弹性分析承受的地震剪力之比,即为各墙段的极限剪力系数。受地震作用的影响,通常会在最薄弱的墙段开始出现裂纹与变形。薄弱墙段的强度随着其裂纹的出现快速下降,此层内不同墙段会出现弹塑性内力重分布现象。在薄弱楼层内不同墙段均出现裂纹的条件下,此层内的墙体承载性能下降,从最薄弱部分开始出现变形。因此在有限元计算模型中,确定二层以上砖房部分楼层受剪承载力以及薄弱楼层时可以采用层间极限剪力系数。

由于不同墙与不同墙段极限剪力系数的不同会产生薄弱部位及此楼层不同墙段的弹塑性内力重分布,因此,在有限元计算模型内可通过加权平均法确定不同墙段极限剪力系数计算楼层的极限剪力系数。其具体过程为:

$$\delta_R(i) = \frac{d}{\sum_{j=1}^d \frac{1}{\delta_{R_j}(i)}} \quad (5)$$

式中: $d$  表示第  $i$  层横向或纵向墙体道数或墙段数。

## 2 模拟计算分析

利用本文提出的多层砖房底部两层框架抗震变形性能分析方法,通过变化建筑结构底部两层的抗

侧刚度,获取不同抗侧刚度比,来运算分析地震作用下衍生结构的动力反应。变化抗侧刚度时需注意: $X$  向和  $Y$  向抗侧刚度变化比例一致;多层砖房底部两层框架建筑结构整体轴线与阻尼比不变;建筑楼层质量分布和楼面荷载条件不变;二层以上砖房部分无任何改变。其中,沿  $X$  方向对建筑模型施加人工地震波,地震波加速度时程曲线如图 2 所示。

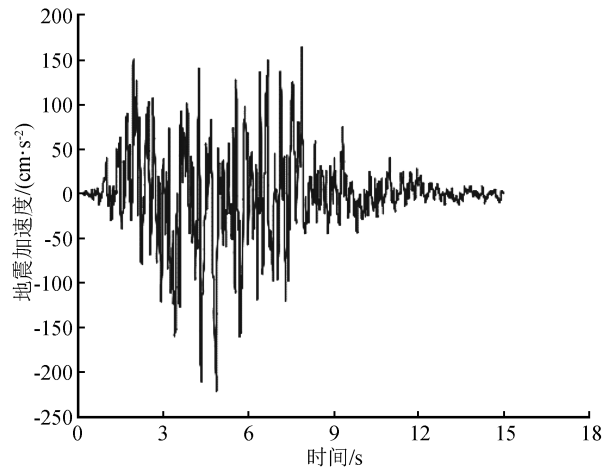


图 2 地震波加速度时程曲线

Fig.2 Seismic wave acceleration time history curve

多层砖房底部两层框架建筑结构抗震变形性能分析结果如下。

### 2.1 建筑结构动力特性分析

将建筑结构第三层同第二层的抗侧刚度比分别设置为 0.6、0.9、1.5、2.3、2.6,采用本文方法分析多层砖房底部两层框架建筑结构前 6 阶动力特性,结果如表 3 所列。

分析表 3 得到,整体结构的第一阶与第二阶动力特性为平动,而第三阶和第四阶则分别为扭转振型和楼板平面内弯曲振型,说明建筑结构振型受结构横向楼板刚度的影响较显著。

由表 3 还能够得到,底部两层抗侧刚度发生改变后,不同振型的频率变化中, $X$  向 1 阶频率与  $Y$  向 2 阶频率变化最快,扭转频率变化居中,楼板平面内弯曲频率变化最慢。

### 2.2 结构地震变形反应

在 2.1 实验设置的抗侧刚度比基础上,采用本文方法分析建筑结构  $X$  向与  $Y$  向的层间位移角与刚度比变化关系,结果如图 3 所示。

分析图 3(a)得到, $X$  向上,整体结构的变形呈现线性剪切变形;底部两层抗侧刚度变化对二层以上砖房部分的影响较小;底部两层的弹性层间位移角变化显著。在底部两层抗侧刚度较小的条件下,整体

表 3 整体结构动力特性

Table 3 Dynamic characteristics of the overall structure

		建筑结构第三层同第二层抗侧刚度比				
		0.6	0.9	1.5	2.3	2.6
建筑 结构 自振 频率 (Hz)与 振型	1 阶	2.99	2.77	2.38	2.07	1.97
		X 向-1 阶	X 向-1 阶	X 向-1 阶	X 向-1 阶	X 向-1 阶
	2 阶	3.23	3.05	2.71	2.42	2.32
		Y 向-1 阶	Y 向-1 阶	Y 向-1 阶	Y 向-1 阶	Y 向-1 阶
	3 阶	3.77	3.55	3.13	2.78	2.65
		整体扭转变形	整体扭转变形	整体扭转变形	整体扭转变形	整体扭转变形
	4 阶	8.24	8.09	7.7	7.35	7.24
		楼板对称弯曲变形	楼板对称弯曲变形	楼板对称弯曲变形	楼板对称弯曲变形	楼板对称弯曲变形
	5 阶	8.66	8.23	7.84	7.63	7.56
		X 向-2 阶	X 向-2 阶	X 向-2 阶	X 向-2 阶	X 向-2 阶
	6 阶	10.82	10.07	8.91	8.05	7.79
		Y 向-2 阶	Y 向-2 阶	Y 向-2 阶	Y 向-2 阶	Y 向-2 阶

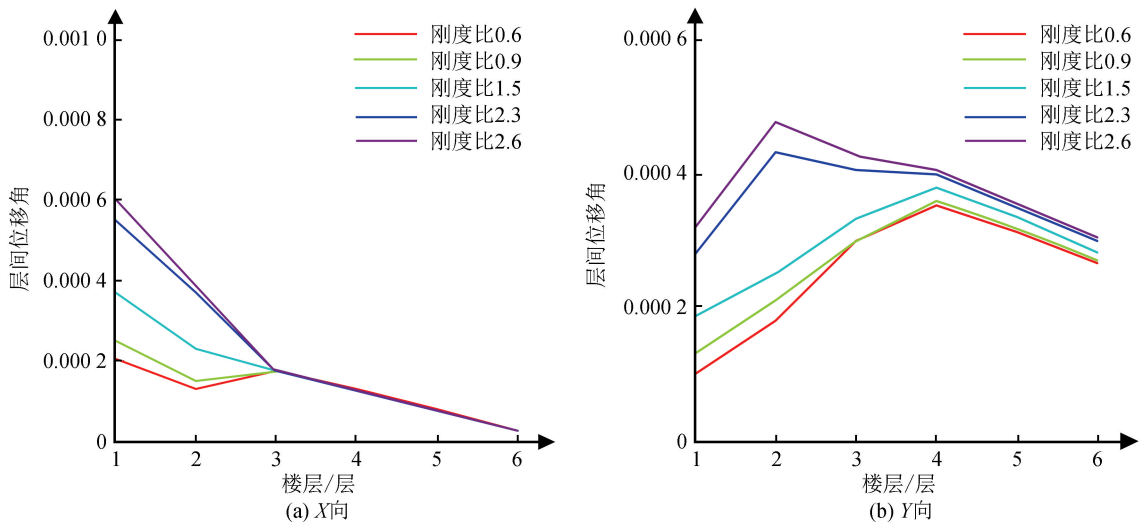


图 3 层间位移角与刚度比变化关系

Fig.3 Variation of story drift ratio with the stiffness ratio

建筑结构的变形均出现在底部两层中;随着底部两层抗侧刚度的提升,底部两层的层间变形大幅降低。

分析图 3(b)得到,Y 向上,整体结构的变形呈现弯剪变形;二层以上砖房部分在一定程度上受底部两层抗侧刚度变化的影响,其中第三层受影响程度最为显著。在底部两层抗侧刚度较小的条件下,底部两层与二层以上砖房部分的变形分别为弯曲变形和剪切变形;随着底部两层抗侧刚度的提升,第三层由剪切变形转变为弯曲变形,其他楼层不变。

结合图 3(a)与图 3(b)可知,X 向与 Y 向上,建筑结构的层间位移角有所差异,出现这种情况的主要原因是 X 向与 Y 向的结构布置有所不同。由于 X 向上,结构底部两层中仅存在少量的填充墙,因此可将其描述为纯框架;相反,在 Y 向上,底部两层中包含端山墙与楼梯间墙等,其墙间距较小,强度

较大,在某种程度上发挥抗震墙功能,导致地震作用下 Y 向底部两层变形较小。

### 2.3 层间位移反应分析

采用本文方法计算 7 度多遇地震作用下,多层砖房底部两层框架建筑结构 Y 向的最大层间位移以及层间位移角,结果如表 4 所列。

分析表 4 得到,建筑结构底部两层中,第一层轴 1 同轴 6 层间位移比与第二层轴 1 同轴 6 层间位移比分别为: $(0.5621/0.2921) = 1.92$ 和 $(0.9810/0.3267) = 3.00$ 。底部两层结构中第二层变形较为严重,各轴线处第一层的层间位移反应都低于第二层的层间位移反应,且底部两层各轴线处的层间位移角都显著低于国家相关规定中设置的 1/800,说明受 7 度多遇地震影响,多层砖房底部两层框架建筑结构处于弹性工作状态。

表4 整体结构层间位移与层间位移角

Table 4 Inter-story displacement and story drift ratio of the overall structure

轴线号	层间位移/cm						层间位移角					
	一层	二层	三层	四层	五层	六层	一层	二层	三层	四层	五层	六层
1	0.292 1	0.326 7	0.447 6	0.486 2	0.471 9	0.386 9	1/10 646	1/9 546	1/6 003	1/5 519	1/5 686	1/6 924
2	0.387 7	0.492 1	0.420 6	0.452	0.455 9	0.362 9	1/8 916	1/7 043	1/6 375	1/5 935	1/5 885	1/6 376
3	0.442 6	0.701 8	0.418 1	0.438	0.440 9	0.344 9	1/7 823	1/4 938	1/6 863	1/6 124	1/6 084	1/7 754
4	0.485 8	0.826 5	0.390 4	0.404 9	0.427 9	0.325 9	1/7 133	1/4 186	1/6 863	1/6 620	1/6 267	1/8 197
5	0.548 7	0.903 6	0.386 4	0.395 9	0.410 1	0.312 9	1/6 319	1/3 825	1/6 933	1/6 769	1/6 539	1/8 530
6	0.562 1	0.981 0	0.301 3	0.373 9	0.380 1	0.312 9	1/6 169	1/3 224	1/8 852	1/7 162	1/7 050	1/8 666

### 3 结论

近年来,多层砖房底部两层框架建筑结构以其性能优势成为临街建筑中使用较为广泛的建筑结构类型,因此本文提出多层砖房底部两层框架抗震变形性能分析方法,以某底部两层框架、上部四层砖房建筑为对象,通过 STRAND7 有限元软件构建有限元计算模型,考虑水平荷载与垂直荷载,详细分析其抗震变形性能。通过实验得到以下结论:

(1) 整体结构的第一阶与第二阶动力特性为平动,而第三阶和第四阶则分别为扭转振型和楼板平面内弯曲振型,且楼板平面内弯曲频率变化最慢。

(2) X 向与 Y 向上,建筑结构的地震位移反应有所差异:X 向呈现线性剪切变形,Y 向呈现弯剪变形;这是由于 Y 向上的填充墙发挥抗震墙功能,底部两层框架变形较小。

(3) 底部两层各轴线处的层间位移角都显著低于国家相关规定中设置的 1/800,说明受 7 度多遇地震影响,多层砖房底部两层框架建筑结构处于弹性工作状态。

### 参考文献(References)

- [1] 吴守君,潘鹏,张鑫.框架-摇摆墙结构受力特点分析及其在抗震加固中的应用[J].工程力学,2016,33(6):54-60,67.  
WU Shoujun, PAN Peng, ZHANG Xin. Characteristics of Frame Rocking Wall Structure and Its Application in Aseismic Retrofit[J].Engineering Mechanics,2016,33(6):54-60,67.
- [2] 刘文渊,孙国华,冷捷,等.新型自复位 K 型偏心支撑钢框架抗震性能分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(6):10-17.  
LIU Wenyuan, SUN Guohua, LENG Jie, et al. Seismic Analysis of an Innovative Self-centering K-shape Eccentrically Braced Steel Frame[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2017,39(6):10-17.
- [3] 冯玉龙,吴京,孟少平,等.底部带有屈曲约束支撑的摇摆墙框架结构抗震性能分析[J].振动与冲击,2016,35(23):35-40.  
FENG Yulong, WU Jing, MENG Shaoping, et al. Aseismic Performance Analysis of Rocking Wall Frame Structures with Buckling-restrained Braces in Base[J].Journal of Vibration and

Shock,2016,35(23):35-40.

- [4] 杜永峰,祁磊,黄小宁,等.基于变形和能量双参数损伤的消能摇摆架-框架结构抗震性能分析[J].工业建筑,2016,46(10):59-64,88.  
DU Yongfeng, QI Lei, HUANG Xiaoning, et al. Aseismic Performance Analysis of Energy-dissipation Light Weight Rocking Frame Structure Based on Deformation and Energy Damage [J].Industrial Construction,2016,46(10):59-64,88.
- [5] 李清,薛耀东,王永花,等.大底盘双塔结构层间隔离震技术的抗震性能分析[J].科学技术与工程,2017,17(1):85-91,114.  
LI Qing, XUE Yaodong, WANG Yonghua, et al. Seismic Performance Analysis of Story Isolated Twin Tower Structure with Large Base [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(1):85-91,114.
- [6] 王星星,叶继红.多层强边柱冷成型钢结构体系抗震性能分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):16-23.  
WANG Xingxing, YE Jihong. Seismic Analysis on Mid-rise Cold-formed Steel Structure with Reinforced End Studs [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017,49(12):16-23.
- [7] 贺强,文艳芳,苏三庆.带屈曲约束支撑的 V 型偏心支撑钢框架抗震性能分析[J].钢结构,2016,31(6):18-22,17.  
HE Qiang, WEN Yanfang, SU Sanqing. Seismic Performance Analysis of V-shaped Eccentrically Braced Frames with Buckling-restrained Braces [J]. Steel Construction, 2016, 31(6): 18-22,17.
- [8] 刘资玉,肖亚明,门雨.填充墙竖向不规则布置对框架结构抗震性能的影响[J].结构工程师,2018,34(2):79-85.  
LIU Ziyu, XIAO Yaming, MEN Yu. Impact of Vertical Irregularities of Infilled Wall on Seismic Performance of Frame Structure [J]. Structural Engineers, 2018, 34(2): 79-85.
- [9] 郭婧,方火浪,张铁群,等.强震作用下核电站反应堆厂房结构的抗震性能分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(6):11-21.  
GUO Jing, FANG Huolang, ZHANG Yiqun, et al. Seismic Performance Analyses of Reactor Building Structures in Nuclear Power Plant under Strong Earthquake Motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(6): 11-21.
- [10] 董志骞,李钢,李宏男.多层中心支撑钢框架结构抗震性能简化评估方法[J].建筑结构学报,2018,39(5):1-9.  
DONG Zhiqian, LI Gang, LI Hongnan. A Simplified Method for Seismic Performance Evaluation of MDOF Steel Concentrically Braced Frames [J]. Journal of Building Structures, 2018,39(5):1-9.

- and Seismic Performance Simulation of a Large Stadium[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(5):131-135,125.
- [8] SIMASATHIEN S, JIANSINLAPADAMRONG C, CHAO S H. Seismic Behavior of Special Truss Moment Frame with Double Hollow Structural Sections as Chord Members[J]. Engineering Structures, 2017, 131:14-27.
- [9] 刘科元,李海滨.地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1):423-426.  
LIU Keyuan, LI Haibin. Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1):423-426.
- [10] NAQVI S, MAHMOUD K, EL-SALAKAWY E. Effect of Axial Load and Steel Fibers on the Seismic Behavior of Lap-Spliced Glass Fiber Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Rectangular Columns[J]. Engineering Structures, 2017, 134:376-389.
- [11] LIU L, ZHAO J X, LI S. Nonlinear Displacement Ratio for Seismic Design of Self-Centering Buckling-Restrained Braced Steel Frame Considering Trilinear Hysteresis Behavior[J]. Engineering Structures, 2018, 158:199-222.
- [12] LI Liang, SHI Peixin, DU Xiuli, et al. Using Numerical Simulation to Determine the Seismic Response of Coastal Underground Structures in Saturated Soil Deposits[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(3):583-595.
- [13] REN F M, CHEN J W, CHEN G M, et al. Seismic Behavior of Composite Shear Walls Incorporating Concrete-Filled Steel and FRP Tubes as Boundary Elements [J]. Engineering Structures, 2018, 168:405-419.
- [14] 王娟.高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型设计[J].地震工程学报, 2018, 40(3):413-420.  
WANG Juan. Panel Structure Instability BIM Model Design of High-Rise Buildings under Continuous Vibration [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3):413-420.
- [15] 申彤,闫维明,周大兴,等.超高层建筑施工塔吊的动力特性和地震响应规律[J].科学技术与工程, 2017, 17(27):255-262.  
SHEN Tong, YAN Weiming, ZHOU Daxing, et al. Seismic Response and Dynamic Characteristics of Cranes on High-Rise Buildings[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(27):255-262.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 1146 页)
- [11] 周绪红,管宇,石宇.多层冷弯薄壁型钢结构住宅抗震性能分析[J].建筑钢结构进展, 2017, 19(6):10-15,50.  
ZHOU Xuhong, GUAN Yu, SHI Yu. Seismic Performance Analysis of Multi-Story Cold-Formed Thin-Walled Steel Structure Residential Buildings[J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(6):10-15,50.
- [12] 包恩和,李风勇,李丽,等.露出型钢柱脚强度对低多层规则钢框架抗震性能的影响[J].科学技术与工程, 2016, 16(17):93-99.  
BAO Enhe, LI Fengyong, LI Li, et al. Influence of Strength of Exposed Steel Column Foot to Anti-seismic Performance of Steel Frames of Low-layer and Multi-layer[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(17):93-99.
- [13] 李伯维,张耀庭.基于 Pushover 的多层钢筋混凝土框架结构设计及抗震性能分析[J].建筑技术, 2016, 47(5):392-395.  
LI Bowei, ZHANG Yaoting. Design and Seismic Performance Analysis of Multi Story Reinforced Concrete Frame Structure Based on Pushover Analysis [J]. Architecture Technology, 2016, 47(5):392-395.
- [14] 张鹏,王艺环,秦国晋.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术, 2018, 14(6):134-141.  
ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin. Non-probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline under Non-random Process Earthquake Excitation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6):134-141.
- [15] 华德峰,卞超,甘强,等.一起 220 kV 变压器绕组变形故障分析[J].江苏电机工程, 2015, 34(2):15-17.  
HUA Defeng, BIAN Chao, GAN Qiang, et al. Analysis of 220 kV Transformer Winding Deformation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2):15-17.