

文章编号: 1673- 9469(2011) 02- 0001- 04

基于有限元分析的空斗墙砌体结构抗震性能研究

魏翠玲, 周立朋, 张晓欣

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 通过对广大南方乡村地区存在的空斗墙砌体结构进行相关动力检测, 建立了不同工况的空斗墙砌体结构有限元模型, 采用模态分析法对其结构响应进行定性判断, 并运用反应谱分析法对其结构抗震性能进行评估分析。结果表明, 相同烈度下空斗墙所受的平均剪应力约为同尺寸实砌墙的 55%; 空斗墙房屋的门窗洞口、纵横墙交接、楼板和墙体搭接、突出的楼梯间等部位是其抗震薄弱部位; 虽然空斗墙结构形式较为复杂, 但是采用圈梁构造柱的传统构造措施仍然可以提高其抗震性能。

关键词: 空斗墙砌体; 有限元分析; 抗震性能; 加固

中图分类号: TU 352. 1+ 1

文献标识码: A

Study on the seismic performance of cavity wall masonry basing on the finite element analysis

WEI Cui-ling, ZHOU Li-peng, ZHANG Xiao-xin

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: On the base of the dynamic detection on the cavity wall in the large rural areas of South China, the different conditions of the cavity wall finite element model for masonry structures were established. The qualitative structural response was judged by the modal response analysis, and the seismic performance was researched by the response spectrum analysis. The results show that the average shear stress suffered by the empty bucket is 55% of solid walls with the same size under the same intensity. The door and window openings, the vertical and horizontal transfer of the wall, the floor and wall overlap and the projecting stairwell are the weak parts of empty bucket against the earthquake, while the traditional structural measures, such as, beam, pillar, are useful to improve the seismic performance though the cavity wall structure is complicated.

Key words: cavity wall masonry; finite element analysis; seismic performance; reinforcement

在我国南方地区的广大乡村, 存在着大量的已经建成的空斗墙砌体房屋, 这些房屋与采用同厚度的实砌墙所建成的房屋相比, 具有重量轻、节省材料、造价低等优点, 并且由于墙体的空斗, 使其内部形成空气隔层进而提高了其隔热、保温和隔音等方面的性能, 非常符合现在国家大力提倡的“节能减排”要求。

在国家颁布的《建筑抗震设计规范》(GB 50011- 2010) 中, 空斗墙房屋没有被涉及其中。理论

上, 如果按照以剪切变形为主的多层实砌砖墙房屋来计算, 那么空斗墙房屋的总水平地震作用剪力 $F_{EK} = \alpha_1 G_{eq}$, 与其自重成正比^[1]。鉴于空斗墙房屋比实砌墙房屋的自重轻, 所以其水平地震作用 F_{EK} 值应该比采用实砌墙所建的房屋小, 震害相对来说应该轻一些。然而由于空斗墙同时也存在着整体性不足, 竖向承载能力较低, 墙体易开裂等缺点, 一旦地震发生, 空斗墙房屋所造成的破坏和损失往往又非常严重^[2]。

因此,如何评估大量建成的空斗墙房屋的抗震性能,引起了广泛关注。刘昌茂等^[3]通过往复水平荷载试验研究了空斗墙的抗震性能;田世民等^[4]用钢板网片水泥砂浆面层,按照1/2和1/3的比例加固空斗墙后进行竖向承载力试验,得出开裂的空斗墙经过加固后开裂荷载和极限荷载都有较大程度的提高,可表现出一定的延性;翁小平等^[5]采用ANSYS软件对空斗墙墙片进行了数值模拟,并把有限元分析的结果与伪静力试验的试验值进行比较。然而以上研究多是针对空斗墙单片的墙体进行实验或模拟,实际结构中空斗墙却是与其它墙体、楼板等构件作为整体存在的,之间复杂的相互作用难以被完全考虑。本文运用静力检测法确定原空斗墙房屋的砌块和砂浆的强度,根据文献[3]确定原空斗墙砌体结构的强度,结合现场动力检测的相关数据建立空斗墙砌体结构的有限元模型,运用模态分析和反应谱分析的方法对空斗墙整体结构的抗震性能进行评估,并对其加固措施给出建议。

1 材料的本构关系

1.1 混凝土

在分析砌体结构的圈梁和构造柱时,假设所用的混凝土材料为各向同性材料,并且符合剪切变形与拉压变形不耦合的假定。

1.2 砌体

在本文的有限元分析中采用砌体为各向同性的假设,满足虎克定律和单向受压状态下的应力-应变关系^[6]:

$$\varepsilon = -\frac{1}{\zeta} \frac{1}{f_m} \ln \left(1 - \frac{\sigma}{f_m} \right) \quad (1)$$

将式(1)求导变换并赋值,可得到用抗压强度的设计值表示的砌体结构的弹性模量:

$$E = 1200 f_m \sqrt{f_m} \quad (2)$$

本文中所采用的泊松比由经验公式^[7]求得,见式(3),具体取值为 $\nu = 0.15$ 。

$$\nu = 0.3 \left(\frac{\sigma}{f_m} \right)^4 e^{\frac{\sigma}{f_m}} + 0.14 \quad (3)$$

2 空斗墙砌体结构的有限元分析

2.1 单元类型和有限元模型

(1) 墙体部分。砌体结构的离散型较大,可以

认为是一种两相材料,即由弹性的块体和非弹性的砂浆组成,不具有相同性。由于两种不同材料的物理属性有较大差异,在有限元建模过程中可采用整体模型和分离模型两种方法。在本文中由于实际的空斗墙结构型式比较复杂,完全按照其结构形式建立有限元模型较困难。因此采用建立整体模型的方法,即采用壳单元模拟实际中的砌体墙。通过对比现场测试结果与有限元数值模拟分析的方法,确定壳单元的厚度。

表1 有限元分析与实测结果对比

Tab. 1 Finite element analysis and experimental results comparison

编号	实测结果		有限元分析		误差
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz		
X方向	4.942	0.049	5.046		2.1%
Y方向	5.203	0.056	5.395		3.7%

通过调整壳单元厚度,使有限元分析得到的动力参数与实际检测的相一致,就可以建立与原结构有基本相同动力特性的有限元模型。本文在建模型时采用的壳单元厚度为190mm,与文献[3]中基本一致。原空斗墙房屋的动力检测结果与有限元软件模态分析结果见表1,所采用的有限元分析模型见图1。

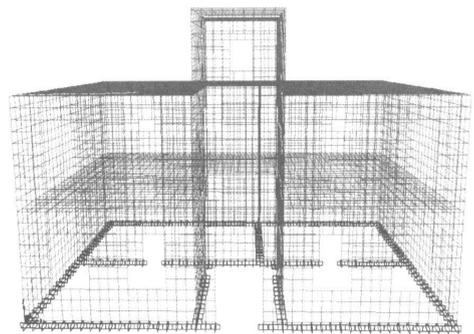


图1 空斗墙房屋的有限元模型

Fig.1 Finite element model of cavity wall housing

(2) 圈梁和构造柱。在软件的分析过程中实际砌体房屋存在的圈梁和构造柱采用框架单元模拟,混凝土设计强度等级为C30,横截面尺寸为 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$,泊松比为0.2,弹性模量取 $3.0 \times 10^7 \text{MPa}$ 。

(3) 楼屋面。实际结构中的楼面和屋面均采用预制板,在有限元分析时采用混凝土壳单元模拟预制板,为更符合实际,释放两端转动约束。

2.2 空斗墙砌体的模态分析

为对空斗墙砌体结构响应进行定性的判断,首先通过模态分析了解其结构的基本性能参数。将建立的空斗墙房屋有限元模型应用通用有限元软件进行6度设防烈度下的模态分析。在分析中

所输入的荷载包括:楼面恒载 2.5kN/m^2 (其中不包括板自重);屋面恒载 3.0kN/m^2 (其中不包括板自重);楼面活载 2.0kN/m^2 ;反应谱的函数选用分析软件中所带的中国2002版规范所给出的反应谱函数。经模态分析得到前三个阵型(图2),输出信息见表2。

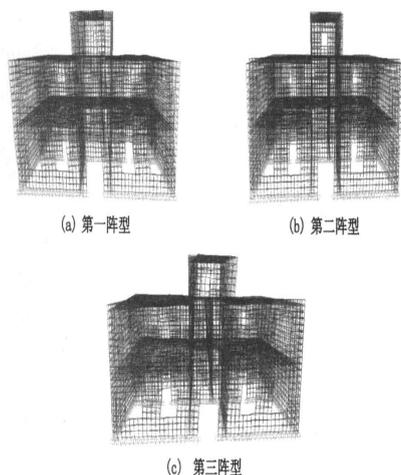


图2 空斗墙房屋前三阵型图

Fig.2 The front three formation map of Cavity Wall Housing

表2 模态分析结果

Tab.2 The results of modal analysis

阵型	周期值/s	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ
第一阵型	0.208 3	0.835 6	0.000 3	0	0.835 6	0.000 3	0	0	0.254 8	0.143 0
第二阵型	0.201 4	0.000 1	0.818 4	0.000 1	0.835 7	0.818 7	0.000 1	0.473 9	0	0.187 9
第三阵型	0.196 3	0.007 2	0.001 9	0.000 6	0.842 9	0.820 6	0.000 7	0.000 1	0.001 4	0.302 8

结合图2和表2可以看出,结构顶部 X 方向的位移很大(图2-a),在第一阵型中,质量参与系数 $UX=0.8356$, $UY=0.0003$, $UZ=0$,由结构的三个平动自由度相比结果可以初步判断,此阵型属于 X 方向的平动阵型。其中 RY 为0.2548,这与 $UX=0.8386$ 相对应,因为结构在 UX 方向平动时的绝大部分质量都是绕 Y 轴旋转的。另外由于模型的约束发生在 XY 平面上,从 $RZ=0.1430$ 可以分析出结构的第一阵型也带有一定的扭转属性,但其值远小于 UX ,也可以判断第一阵型属于 X 方向的平动阵型。

对于结构的第二阵型(图2-b),质量参与系数 UY 为0.8184,而 UX 和 UZ 都基本为0,相对应的扭转自由度质量参与系数 RX 为0.4739, RY 为

0, RZ 为0.1879。同理可以得出第二阵型属于 Y 方向的平动阵型,但是已经带有一定程度的扭转效应;而对于结构的第三阵型,质量参与系数 UX 为0.0072, UY 和 UZ 都基本为0, RZ 为0.3028,很明显此阵型为扭转阵型,但带有一定的 X 方向的平动效应。通过图2-c也可以看出,结构的顶部边角部位扭转较为明显。

因此认为,空斗墙砌体结构存在平扭耦联效应,这种效应发生在前3个阵型中对于结构的危害是很大的,设计时应予以重视。

2.3 不同工况的反应谱分析

为探讨空斗墙砌体结构的抗震性能,作者分别建立了空斗墙房屋,实砌墙房屋,设有圈梁的空

斗墙房屋和设有圈梁构造柱的空斗墙房屋 4 种工况, 来讨论空斗墙与实体墙的差异及影响其抗震性能的因素。将上述 4 种模型分别在 6 度、7 度设防烈度下进行结构的反应谱分析。表 3 为 2 种烈度下各工况的墙体最大剪应力值。

表 3 各工况下墙体最大剪应力值

Tab. 3 The maximum wall shear stress under various conditions N/mm^2

烈度	空斗墙	实砌墙	设置圈梁的	设置圈梁构造柱
	房屋	房屋	空斗墙房屋	的空斗墙房屋
6 度	0.056	0.108	0.039	0.033
7 度	0.114	0.183	0.081	0.075

分析结果显示, 在 6 度设防烈度时, 屋顶墙垛及楼梯间突出处已经发生局部剪切破坏。在设防烈度为 7 度时, 空斗墙房屋的墙体最大剪应力达到 0.114MPa。通过分析得到的最大剪应力峰值结果可以看到, 实砌墙比空斗墙得到的剪应力峰值要大, 但是从分析中的破坏变形状况看, 空斗墙的薄弱区域要比实砌墙的大, 其破坏也比实砌墙的严重, 这也符合实际震害的调查结果。横墙部分区域发生破坏, 并且由于空斗墙砌体的整体性较差, 在纵横墙交接处, 楼板和墙体搭接处, 门窗洞口处薄弱部位也发生破坏。因此, 该结构不能满足 6 度设防要求。在设置一定的构造措施之后, 结构的最大剪应力都有所降低。设置圈梁后结构楼层处整体性增强, 使结构的剪应力峰值下降约 30.3%; 同时设置圈梁构造柱后使结构的纵横墙连接处的整体性得到大大改善, 墙体的剪应力峰值降低幅度达 41.1%。并且楼梯间应力集中区域明显减小, 这样也就使得结构的扭转效应和抗剪能力得到显著的提高, 纵横墙连接处的应力集中问题也得到了一定程度上的缓解。同时表明通过增设圈梁和构造柱的方法能有效改善砌体结构的抗震性能。但是在设防烈度为 7 度时, 即使增设了圈梁和构造柱, 结构仍然会因抗剪强度不足而发生破坏。

通过以上的分析可以得到, 空斗墙房屋抗震性能较差的主要原因是由于其特殊的结构形式导致其块体之间的粘结能力大大降低, 进而使其整体性更差。鉴于其房屋本身的抗震能力较差, 所

以对此类房屋的抗震加固就显得尤为必要。为提高空斗墙砌体的整体性并兼顾抗震加固的经济性, 在提出加固方案之前, 应该首先对其进行抗震鉴定。根据抗震鉴定的结果结合现有的施工技术水平制定出具体的抗震加固措施。可以通过增加构造措施来增加其整体性, 若仍不满足抗震的要求, 可以采用钢筋混凝土板墙对其进行加固。此方法对于提高空斗墙的整体性和延性效果显著, 并且已经应用于工程实例中, 至今工作性能良好。

3 结论

1) 由于墙体内存在空斗的原因, 与实砌房相比, 空斗墙房屋在结构上整体性较差, 震害更严重。

2) 空斗墙房屋一般不能满足 6 度设防要求, 增设圈梁或构造柱等措施可以改善空斗墙房屋的抗震性能。

参考文献:

- [1] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [2] 李校兵, 汤伟民, 张清华, 等. 空斗墙片墙抗侧力性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 9-12.
- [3] 刘昌茂, 冯卫, 杨良荣. 空斗墙房屋抗震性能及加固的试验研究[J]. 地震学刊, 1990(2): 10-15.
- [4] 田世民, 廖娟, 陈龙珠. 空斗墙加固后的承载力试验研究[J]. 浙江建筑, 2000(4): 33-35.
- [5] 翁小平, 王柏生. 基于 ANSYS 的空斗墙片墙抗侧力性能研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(1): 56-61.
- [6] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [7] 候汝欣. 砌体泊松比试验研究[C]// 钱义良, 施楚贤. 砌体结构研究论文集. 湖南: 湖南大学出版社, 1989: 126-129.
- [8] 李亚娥, 黄永东. 玉树地震中砌体结构楼房震害特征分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28(1): 34-36.
- [9] 康艳博, 巩正光, 宋红, 等. 混凝土板墙加固砖墙抗震性能综述[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 80-85.
- [10] 王涛, 孟丽岩, 孙景江, 等. 框架-剪力墙结构三维弹塑性地震反应[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(1): 30-33.

(责任编辑 马立)