

农村住宅砌体结构地震破坏数值模拟研究

马宏旺¹, 王兰民², 陈龙珠¹, 李庆松¹

(1. 上海交通大学船建学院安全与防灾工程研究所, 上海 200240; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 73000)

摘要:国内震害调查表明我国农村房屋在地震中破坏严重, 主要原因是农村自建房屋大都缺乏基本抗震措施。近年来有关部门针对农村房屋的抗震性能提出一些改进措施, 但这些措施实际抗震效果如何, 除了极少数通过模型试验验证外, 很少得到验证。本文建立了砌体结构非线性有限元分析模型, 以一幢农宅为研究对象, 通过地震时程反应来再现其在地震作用下的破坏状况。研究表明本文提出数值模型能够较好的模拟砌体结构在地震中破坏过程, 发现结构抗震薄弱部位。通过对三种模型对比分析表明圈梁和构造柱可以有效提高砌体结构整体抗震性能, 但对局部破坏影响不大, 需要在以后抗震设计中加以考虑。

关键词: 自建农宅; 砌体结构; 时程分析; 抗震措施

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0232-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0232

Numerical Simulation of Earthquake Damage in Rural Masonry Buildings

MA Hong-wang¹, WANG Lan-min², CHEN Long-zhu¹, LI Qing-song¹

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 73000, China)

Abstract: Earthquake experience indicates that the buildings of the countryside have sustained more serious damage and destruction than city buildings during recent earthquakes in China. A main reason is that rural buildings have not been strictly designed and constructed according to codes. The Code for Seismic Design of Buildings has been under development for fifty years in China, but it has been given few chances to guide building construction at the countryside's lower economic level. Rural buildings have been constructed by the owners themselves and lack basic earthquake provisions, causing rural buildings to be easily damaged during earthquakes. For this reason, some measures have been proposed in recent years for improving the seismic performance of rural buildings. But most earthquake guidelines have not been verified by building model experiments or actual earthquake experiences. Fortunately, as numerical simulation skills develop, it is becoming possible to simulate the entire earthquake response process for a building. This study proposed a numerical dynamic inelastic earthquake response model for a single-story unreinforced masonry building, using the ABAQUS program. Three levels of earthquake provision were considered: (1) the unreinforced masonry building, with no reinforced concrete (RC) tie columns or RC tie beams; (2) the unreinforced masonry building, including RC tie columns and RC tie beams; (3) the masonry building with reinforced steel in the corners and joints between the horizontal wall and the longitudinal wall and including RC tie columns and RC tie beams. Concrete damaged plasticity was used to represent the behavior of the masonry wall. Masonry in

收稿日期: 2013-03-20

基金项目: 甘肃省灾后重建震灾防御项目(2012540); 国家自然科学基金(51078231)

作者简介: 马宏旺(1972-), 男(汉族), 副教授, 主要从事工程抗震方面的研究工作。

compression was modeled as an elastic-plastic material, and the stress-strain behavior of concrete in compression was assumed to be linear elastic. The earthquake response processes of the three models were simulated from the record of the Wenchuan earthquake, located in Wen County of GanSu province. The analysis results indicated that the numerical method is a better tool for simulating the masonry building earthquake response process. The earthquake measures are very important for improving buildings in the countryside.

Key words: Rural building; Unreinforced masonry building; Time history analysis; Earthquake details

0 前言

2008年5月12日我国四川汶川发生了 $M_s8.0$ 强烈地震,不仅给四川省造成巨大的人员伤亡和经济损失,同时对相邻的甘肃省也带来了重大的损失^[1-2]。通过震后灾害调查得知,房屋倒塌和破坏是带来人员伤亡和经济损失的一个主要因素,且农村房屋的破坏程度要远远大于城市建筑。

农村房屋破坏比城市房屋破坏严重的一个主要原因是农村房屋大都是自建房,没有经过严格的设计和施工。很多情况都是业主按照当地传统的建造方式建房,其建筑风格、建筑材料和结构形式大都从满足使用功能和外观出发,对结构本身抗震性能考虑的较少。尽管我国目前已经有较完善建筑结构设计规范和施工规程,但是由于城乡发展的差距,包括经济差别、建筑从业人员本身的知识水平和传统观念等,使得这些建筑抗震设计规范还没有很好地应用到农村房屋的建造中^[3]。

为了改进农村住宅的抗震性能,需要了解农宅在地震作用下的破坏性状。震后调查最真实地考察了结构抗震性能,但震后调查存在的缺陷就是只能反映既有结构的抗震性能,对于提出改进措施的结构没办法验证。振动台试验能够较真实地反映结构的抗震性能,但振动台试验所需经费较大、试验方案较少,往往受试验设备限制,很难全面去做振动台试验。而随着计算机模拟水平的提高,只要采用建立合理的计算模型及参数,通过计算机模拟结构在地震作用下的反应,也能够很大程度上反映结构抗震性能;还可以按照设计意图调整计算模型,达到更加满意的抗震效果。

鉴于此,本文采用ABAQUS有限元软件^[4],以某一种农宅为研究对象,通过建立合理的砌体结构有限元模型,分析砌体房屋在地震作用下的破坏情况,重点分析砌体结构构造措施对结构抗震性能的影响。但是,由于地震输入和砌体材料本构关系模型的不确定性,计算前还很难做到精确定量分析的

水平。

1 砌体结构有限元模型

根据砌体结构特点,目前有限元模型一般有两种不同模式^[5]:整体式模型和离散式模型。本文主要研究砌体结构整体地震反应性能,比较圈梁、构造柱和拉筋等构造措施对砌体结构抗震性能的影响。尽管离散式模型能更真实地反映砌体结构的破坏情况,但考虑到离散式模型计算量太大,不适合对整幢砌体结构进行建模,故本文采用整体式模型模拟结构地震反应。

1.1 ABAQUS 有限元软件

由于砌体材料多相性、砌体本构关系和破坏准则复杂性等问题,尤其考虑砌体结构非线性过程的分析,目前还没有相对较理想的可用于砌体结构分析的有限元软件。本文研究选用ABAQUS软件建立砌体结构有限元模型,主要考虑到ABAQUS良好的非线性计算能力和能够模拟砌体破坏的材料库和单元库^[4],该软件被不少学者用于砌体结构的抗震分析^[6-7],砌体材料采用混凝土损伤本构模型(Concrete Damaged Plasticity),但所取参数与混凝土材料有别。

1.2 ABAQUS 软件中混凝土损伤塑性模型

混凝土损伤塑性模型通过使用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非线性状态,是一个连续的、基于塑性的损伤模型,可用于单向、循环加载和动态加载等情况,且具有较好的收敛性。具体单向、反复和多轴应力状态屈服条件参考ABAQUS使用手册^[4]。

损伤塑性模型假定损伤后弹性模量可表示为无损弹性模量与损伤因子的关系式:

$$E = (1 - d)E_0 \quad (1)$$

式中, E_0 为材料的初始弹性模量; d 为损伤因子,材料未损伤时,弹性刚度矩阵无退化 $d=0$;材料完全损伤时 $d=1$ 。

1.3 砌体应力—应变关系

本文参考国内外研究砌体本构关系,选用同济大学朱伯龙根据实验结果给出的具有上升段和下降段的两段式砌体受压本构关系^[8]:

$$\frac{\sigma}{f_m} = \begin{cases} \frac{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}{0.2 + \frac{0.8\epsilon}{\epsilon_0}} & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ 1.2 - \frac{0.2\epsilon}{\epsilon_0} & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,ε₀ 为应力—应变关系峰值点所对应的应变,取 0.002,极限压应变取 1.6ε₀。对于砌体结构受拉本构模型,由于学术界没有太多的研究成果,本项目参考混凝土受拉时的破坏模式,极限拉应变取 0.000 1。

2 砌体有限元计算模型的验证

本文通过数值模拟与既有文献试验结果对比,可考察数值模拟的可行性。

2.1 试验构件

文献[5]针对 10 组不同类型的砌体墙片进行了低周期反复加载试验。本文选择 2 片试验墙进行验证,编号分别为 W-2 和 BCW1。试件 W-2 为没有构造柱,开有门洞的普通粘土砖砌墙片;试件 BCW1 为普通现浇构造柱,不开门洞的普通砖砌试件。具体尺寸分别见图 1(a)、(b)。

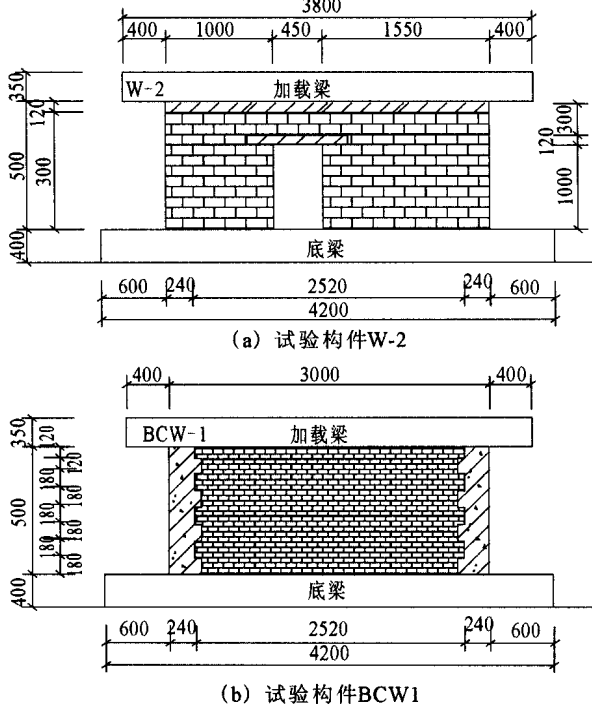


图 1 试件 W-2 和 BCW1 几何尺寸
Fig.1 The geometries of the walls W-2 and BCW1.

2.2 试件墙片采用材料

试验采用普通烧结页岩砖作为墙体砌块材料,依据国家标准试验方法,得到砖的抗压强度值为 22.6 MPa。构件其它参数见表 1、表 2。

表 1 试件基本参数表

Table 1 The basic parameters of walls

试件	构造柱类型	竖向应力/MPa	洞口	砂浆强度/MPa	混凝土强度/MPa
W-2	无	0.5	门	4.5	/
BCW1	现浇	0.5	无	3	16.9

表 2 钢筋力学性能指标

Table 2 The mechanical properties of steel

直径/mm	屈服强度/MPa	屈服应变/μξ	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
10	266	1 204	451	220 845
6.5	278	1 352	493	205 591

2.3 试验构件有限元建模

试件 W-2 和试件 BCW1 有限元模型中砌体和混凝土都采用实体单元 8 节点缩减积分单元(C3D8R),加载梁和过梁采用弹性材料模拟,加载梁与砌体构件采用 Tie 连接一起。构造柱和圈梁混凝土考虑材料的非线性。对于试件 BCW1,构造柱和圈梁配筋采用 Truss 单元模拟,嵌固在圈梁和构造柱混凝土里面。

表 3 试验结果和分析结果对比

Table 3 Results of experiment and simulation

试件	初始开裂荷载/kN		最大荷载/kN		最大荷载对应位移/mm	
	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
W-2	220	205	248	230	2.1	1.5
BCW	200	185	349	337	2.3	1.7

2.4 分析结果与试验结果对比

表 3 给出了初始破坏荷载、最大荷载和破坏荷载试验和数值模拟值;图 2(a)、(b)和图 3(a)、(b)分别给出了构件 W-2 和 BCW1 试验与数值模拟的最终破坏状态。从图 2 和图 3 中可以看出,试验与模拟的破坏状态基本一致。

通过有限元分析和试验结果对比分析可知本文采用 ABAQUS 软件,通过建立砌体结构整体有限元模型,采用损伤混凝土模型模拟混凝土和砌体材料,能够比较好地反映砌体墙片在反复荷载作用下的破坏过程,也能够模拟砌体墙片在圈梁和构造柱约束下的破坏过程。

3 农宅地震时程分析

3.1 农宅结构平面图

选用农宅为一层砖混结构^[9],平面布置见图 4,

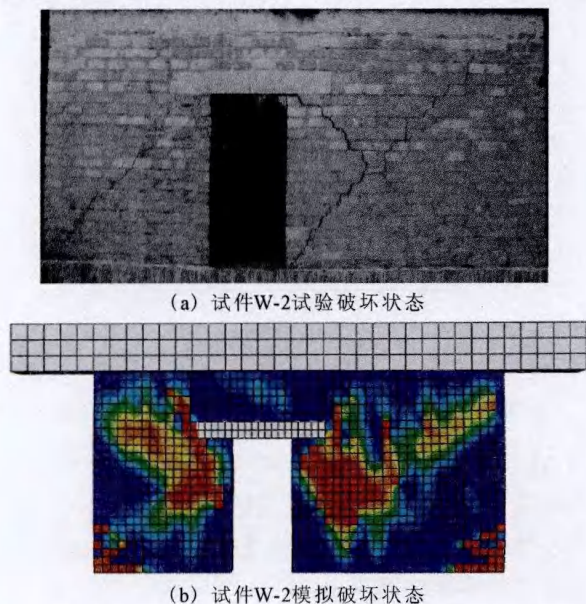


图 2 试件 W-2 试验与模拟破坏状态对比

Fig. 2 Comparison of damaged states between tested and simulated case on W-2.

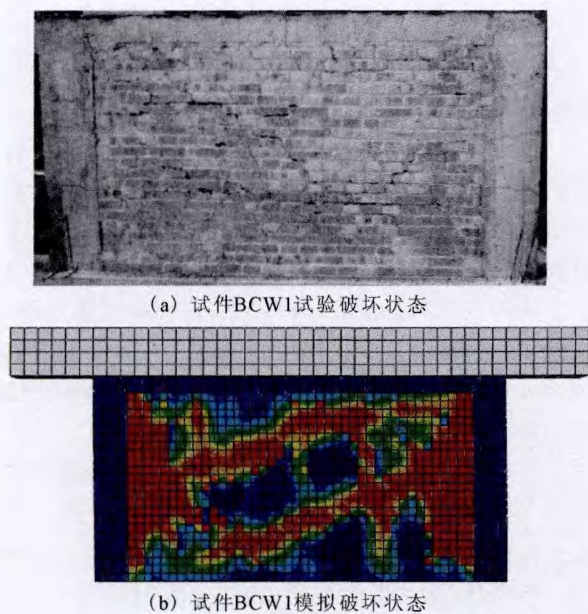


图 3 试件 BCW-1 试验与模拟破坏状态对比

Fig. 3 Comparison of damaged states between tested and simulated case on BCW1.

其斜屋面采用木结构。按Ⅷ度(0.30 g)进行地震时程计算分析。墙体采用 MU10 普通粘土砖;砂浆采用 M5;混凝土强度采用 C20;采用带肋 HRB335 钢筋。活荷载坡屋面 0.5 kN/m²。砌体设计强度为 1.5 MPa;弹性模量为 2 400 MPa;剪切模量取弹性模量的 0.4 倍;泊松比取 0.15。混凝土弹性模量 2.55×10^4 MPa,钢筋直径为 $\Phi 6$,Ⅱ级钢。屋顶自重

为 2.5 kN/m²。

本文中考虑三种情况:(1)纯砌体结构(没有构造柱和圈梁);(2)砌体结构,有构造柱和圈梁,但不考虑墙体与构造柱拉结钢筋的影响;(3)有构造柱和圈梁,同时分析考虑墙体和构造柱拉结钢筋的影响。

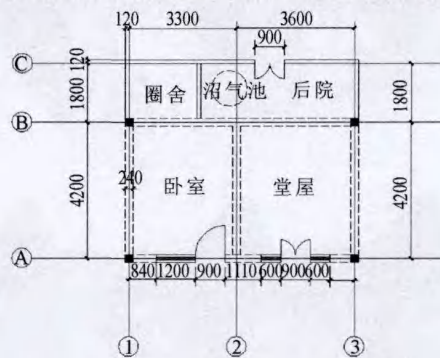


图 4 农宅结构平面布置图

Fig. 4 The masonry building plan.

3.2 农宅有限元模型

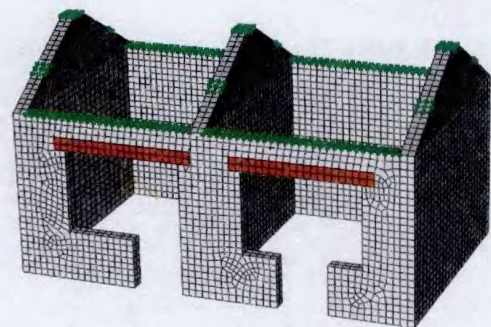
砌体与混凝土都采用 8 节点实体单元 (C3D8R),砌体和混凝土材料都考虑非线性影响,采用混凝土损伤模型模拟砌体和混凝土。构造柱与墙体接触的部位采用 tie 连接,过梁采用弹性材料,过梁与墙体采用 tie 连接。钢筋采用 ABAQUS 软件中 EMBEDDED 方式按照实际配筋位置嵌入结构中。由于屋顶是木结构,刚度很小,在有限元模型中不考虑屋盖刚度的影响。屋面荷载、相应的质量施加在对应墙体的位置。三种情况下的有限元模型见图 5。

3.3 边界条件和加载过程

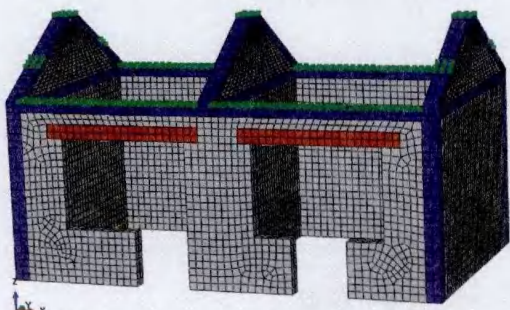
有限元分析分为三个步骤,第一步采用 Static General 步骤施加竖向荷载,模型底面采用固定约束;第二步采用 Linear Perturbation 步骤,分析结构自振周期;第三步采用 Dynamic Implicit 步骤进行地震时程分析,此时底部边界条件经过修改,释放地震作用方向的约束。

3.4 时程分析采用的地震加速度记录

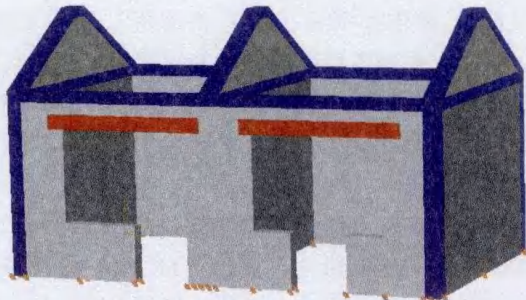
在分析时采用甘肃文县地震台地震记录,X、Y、Z 三分量地震记录的峰值加速度分别为 142.7 cm/s²、141.1 cm/s²、132.0 cm/s²,记录时间间隔 0.005 s。在本项目最大加速度按照Ⅷ度(0.3 g)调整为 530 cm/s²。由于该地震记录持时较长,且前后一段加速度值较小,在分析中从 X 方向原记录 30 s 开始选用了中间 70 s 的地震记录作为输入加速度时程,见图 6。



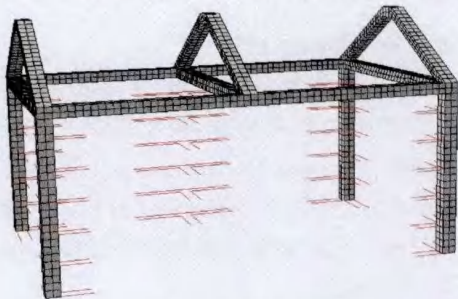
(a) 第一种情况: 纯砌体结构



(b) 第二种情况: 带圈梁构造柱砌体结构



(c) 第三中情况: 带圈梁、构造柱和拉结筋



(d) 圈梁、构造柱和拉结筋模型

图 5 农宅三种有限元模型

Fig. 5 Three finite element models of the building.

3.5 农宅的自振频率

根据建立的有限元模型,分别分析三种模型情况下农宅的自振频率(表 4)。可见农宅纯砌体情况基本自振周期为 0.21 s,振动型式主要以上部山墙振动为主,这也表明了由于木结构屋盖刚度很小,不能把抗侧力墙片联系在一切,导致这些墙片容易破

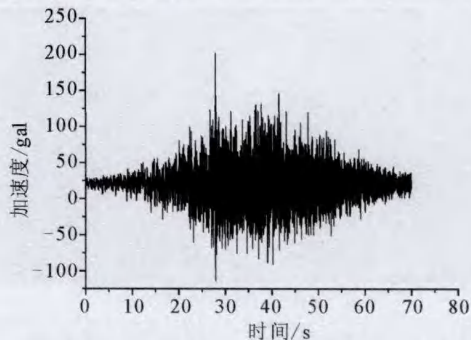


图 6 甘肃文县地震加速度记录

Fig. 6 Acceleration record from Wenxian earthquake.

坏,这在下面的分析中也表明了这一点。而增加了构造柱和圈梁后,基本自振周期减小为 0.13 s,基本振动型式以上部山墙振动为主,而考虑连接钢筋对振型和频率影响都较小。

表 4 农宅不同建模情况下的自振频率(Hz)

Table 4 The frequency of three models

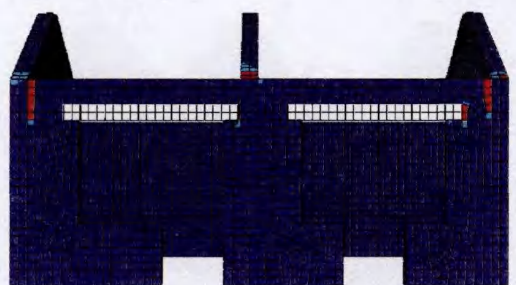
自振频率	第一种情况	第二种情况	第三种情况
1	4.62	7.74	7.75
2	5.37	8.3	8.33
3	5.62	8.48	8.51

3.6 农宅地震时程分析结果

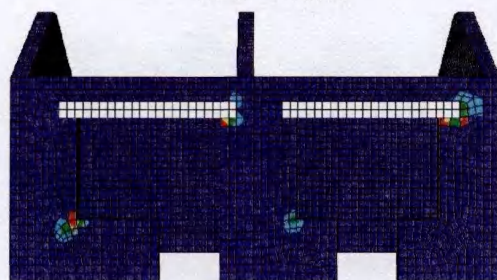
在进行地震时程分析时,先施加自重荷载和活荷载,然后在模型底部施加地震加速度时程,阻尼采用瑞利阻尼,阻尼比取 0.05。三种情况下,农宅在地震作用下的地震损伤过程分别见图 7~图 11。

从分析的结果看,三种模型情况在地震作用下,纯砌体结构最早发生损坏(图 7(a)),损坏发生的部位为纵横墙连接处、山墙上部以及过梁与砌体交接的角部。而增加了圈梁和构造柱后(图 7(b)),砌体结构开始破坏主要发生在过梁和墙片交接的角部和窗洞下角部受力集中的地方,破坏发生的时间比纯砌体结构有所延缓,没有发生纵、横墙片连接处破坏。而增加了构造柱和墙片的连接钢筋后(图 7(c)),砌体结构开始破坏形式与只加构造柱的破坏情况类似,初始破坏集中在过梁与墙片连接的角部和窗洞口的下角部。

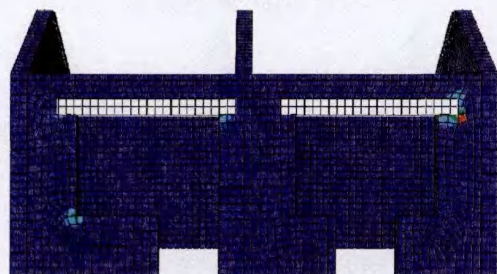
图 8、图 9 给出住宅在地震作用下,当地震达到最大加速度时(510 cm/s^2)结构正面和背面的破坏情况。从图 8 可以看出,三种情况下结构正面的破坏情况相似的是窗洞口下角出现斜裂缝破坏情况,且已经贯通;过梁两端的墙片出现的损害。不同之处是纯砌体结构的纵、横墙之间基本拉裂而增加构造柱后,墙片和构造柱基本没有裂开。从图 9 结构



(a) 第一种情况



(b) 第二种情况



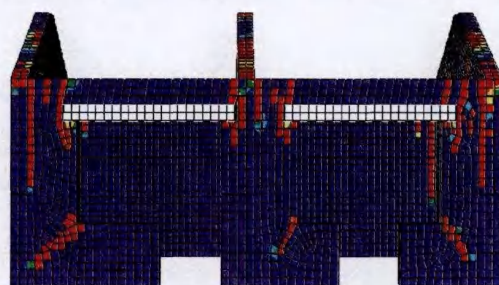
(c) 第三种情况

图 7 三种模型初始破坏状态

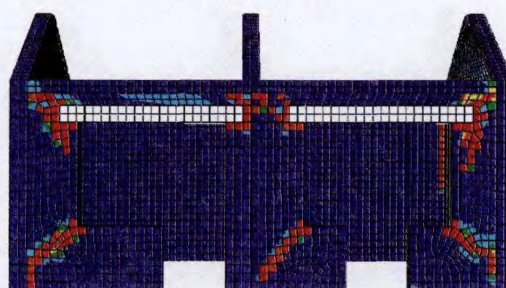
Fig. 7 Initial damaged statesm of three models.

背面可以看出,纯砌体结构三片横墙与纵墙都已拉裂,破坏严重;只设置构造柱中间横墙没有与纵墙拉裂,两边横墙与纵墙有一定程度的开裂;而增加了连接钢筋后,纵横墙只在两边上部局部开裂,破坏较小。从这些现象可以看出,构造措施如圈梁、构造柱和拉筋可以有效地提高砌体结构抗震性能。

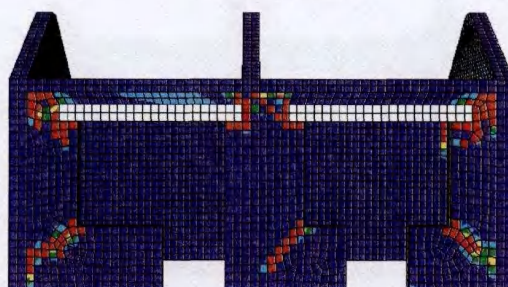
图 10 给出了农宅左单元在地震作用到 50 s 时三种分析模型的破坏情况。可以看出,纯砌体结构(图 10(a))破坏严重,横墙、正立面墙片基本损坏、纵横墙拉裂;而有圈梁和构造柱(图 10(b))的结构,正立面墙片应力集中的地方破坏严重,但纵横墙连接较好,横墙只是局部发生了损坏。从砌体结构破坏可以看出,增加了圈梁、构造柱和拉筋等构造措施后,正立面一些局部破坏(过梁端部墙体、窗洞角部)并没有得到多大改善。主要改善的地方是避免了横墙的严重破坏和纵横墙连接处的开裂,提高了砌体房屋的整体抗震性能和抗倒塌性。图 11 给出了圈



(a) 第一种情况



(b) 第二种情况



(c) 第三种情况

图 8 三种模型在最大加速度时正面破坏情况

Fig. 8 The front damaged states of three models at the Max acceleration.

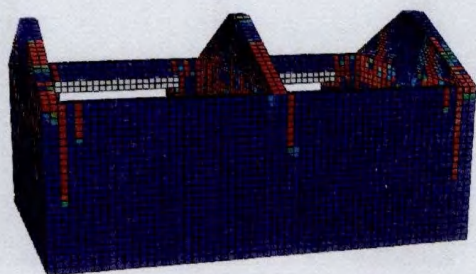
梁和构造柱的破坏情况,破坏大都出现在圈梁和构造柱的端部,故在设计时,可适当提高圈梁和构造柱端部的配箍率。

分析过程还表明,对于这种木屋盖砌体房屋,由于屋盖刚度较低使得各抗侧力墙片没有能够一致抵抗地震作用,导致各墙片特别是山墙上部容易发生平面外破坏,这在设计中要引起重视

4 结语

砌体结构是我国农村地区住房普遍采用的结构形式。为了提高农村住房的抗震性能。首先需要了解砌体结构在地震中反应性状,然后结合当地建筑特点、经济发展和生活传统等情况,综合制定适应于当地农宅砌体结构形式,然后推广于实际农宅建设中。

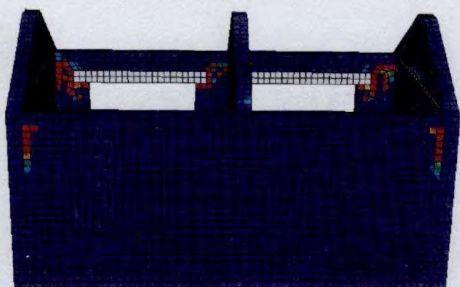
本文建立砌体结构数值分析模型,并通过与文



(a) 第一种情况



(b) 第二种情况



(c) 第三种情况

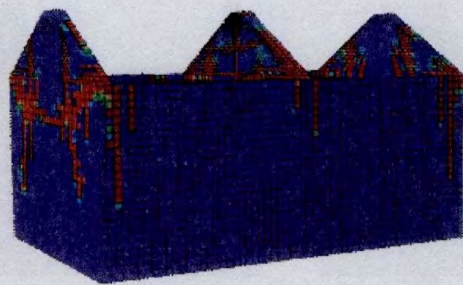
图9 三种模型在最大加速度时背面破坏情况

Fig. 9 The back damaged states of three models at Max acceleration.

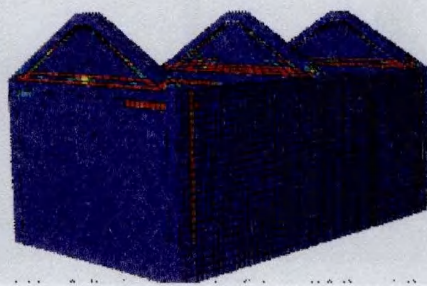
献[5]试验结果进行对比验证,表明本文提出的数值模型可以有效地分析砌体结构在地震破坏形态。通过对已砌体结构自振频率和地震破坏形态表明,构造柱和圈梁能够很好地约束墙片的变形,防止在地震过程中纵、墙开裂,减轻扭转带来的影响,增加砌体结构在地震中的整体性,防止结构倒塌;但构造柱和圈梁对防止门窗洞口和过梁与墙片交接等应力集中部位的破坏,作用较小。为了避免由于局部破坏而对砌体结构整体安全性产生严重影响,应该改进门窗洞口过梁的设计方法。

[参考文献]

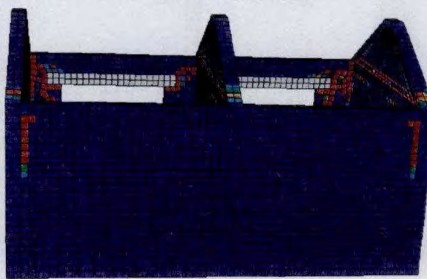
- [1] 刘玮,吴志坚,马宏旺,等. 汶川大地震甘肃陇南地区建筑震害调查[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 179-185.
LIU Wei, WU Zhi-jian, MA Hong-wang, et al. Damage Investigation of Buildings in Southern Gansu Province during the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake[J]. Northwestern Seismological



(a) 第一种情况



(b) 第二种情况



(c) 第三种情况

图10 三种模型在地震结束时背面破坏情况

Fig. 10 The back damaged states of three models at the end of earthquake.

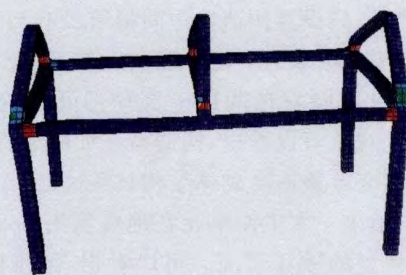


图11 构造柱与圈梁破坏情况

Fig. 11 Damage state of tie columns and beams.

Journal, 2010, 32(2): 179-185.

- [2] 徐舜华,王兰民,王强,等. 甘肃武都典型夯土民房承重墙体抗剪强度试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(4): 354-358.
XU Shun-hua, WANG Lan-ming, WANG Qiang, et al. Experimental Study on Shear Strength of Typical Rammed Earth Wall in Wudu Area, Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 354-358.
- [3] 王兰民,陶裕禄,袁一凡,等. 中国地震安全安居示范工程综述

- [J]. 西北地震学报, 2005, 27(4): 305-311.
- WANG Lan-min, TAO Yu-lu, YUAN Yi-fan, et al. Summary of the Seismic Safe Rural Houses Project[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(4): 305-311.
- [4] ABAQUS Inc. Abaqus GUI Toolkit User's Manual[M]. USA: ABAQUS Inc., 2009.
- [5] 王国珏. 装配式构造柱约束砌体墙抗震性能的非线性模拟分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- WANG Guo-jue. Nonlinear Anti-seismic Simulation and Analysis of Masonry Structure with Assembly Columns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [6] Paikara S, Rai D C. Confining Masonry Using Precast RC Element for Enhanced Earthquake Resistanc[A]// Proceedings of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering [C]. San Francisco, USA, 2006: 1177-1125.
- [7] 周强. 砌体结构抗震试验及弹塑性地震反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- ZHOU Qiang. Seismic Test and Elastic-plastic Seismic Response Analysis of Masonry Structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [8] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- LIU Gui-qiu. The Research on the Basic Mechanical Behavior of Masonry Structure [D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [9] 甘肃省建设厅. 甘肃省村镇抗震农宅设计图集[S]. 2008.
- Gansu Province Construction. Rural building Seismic Design Atlas of Gansu Province[S]. 2008.