

云南农村土木结构房屋有限元抗震分析*

肖梅玲¹, 叶燎原², 刘本玉¹, 冉 晴¹, 张 童¹

(1. 云南大学 城市建设与管理学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南师范大学, 云南 昆明 650092)

摘要: 根据2007年6月3日宁洱6.4级地震现场调查结果, 对破坏较严重的土坯房建立了地震分析模型。对不同的开间、进深及檐口高的房屋, 输入了3类场地超越概率为63%及超越概率为3%的地震波进行了有限元抗震分析。结果表明: 墙厚影响不大, 墙高的影响较大, 墙高增加, 破坏性增加; 因此建议在满足使用功能的前提下, 不增加墙厚, 而减少层高对抗震更为有利, 最后提出了相应的抗震加固措施。

关键词: 土坯房; 主拉应力; 层间位移; 抗震措施; 宁洱6.4级地震

中图分类号: P315.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0276-06

0 引言

我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一。1949年以来, 我国因地震死亡的人数占全国各种自然灾害死亡人数的一半。地震后, 房屋倒塌引起的损失是最严重的(何超, 罗奇峰, 2010)。对于云南高烈度地震区, 地震活动的频度和强度都比较大, 每次地震都会有很多房屋受损或遭受破坏(杨向东, 安晓文, 2001), 遭受破坏最严重的是农村建筑。农村建筑主要是指农民的自建房, 由于农村经济条件较落后, 农民缺乏抗震相关的建筑知识, 一般不按照国家的规范进行建设和管理, 造成此类房屋的综合抗震能力低。为了减小地震灾害, 高惠瑛等(2010), 陈伟等(2005), 曾耀辉(2010)研究农村建筑的综合抗震能力, 建议采取相应措施提高其抗震性能。

云南农村未经抗震设防的农村建筑所占比例很大(卢永坤等, 2007)。甚至还有一部分农村房屋为土坯房, 修建时基本没有考虑抗震设防, 构造措施不合理, 抗震能力较弱^①。大部分房屋的生土墙体无抗震拉结措施, 墙体的整体性很差。因此土坯墙承重的房屋抗震能力较差(郭阳照等, 2006; 王俊特, 2009)。

2007年6月3日5时34分, 云南省普洱市宁洱县发生了6.4级强烈地震。震中位于宁洱镇新平小河村(34.4°N、101.1°E), 震源深度5 km, 震中烈度达Ⅷ度。

宁洱6.4级地震波及宁洱县城及全县各乡(镇), 给当地人民造成很大的经济财产损失, 受灾人数达18万, 农村民房倒塌也比较严重。

通过调查发现: 地震造成的破坏比较严重的有宁洱镇新平小河村、宁洱镇太平寨、宁洱县新民街等。其中, 农村土木结构房屋破坏最严重。

1 土坯结构特点及破坏情况

1.1 土坯结构特点

生土墙体承重型房屋一般呈硬山搁檩型, 即全部墙体用土坯或夯土建成, 前面留有门窗, 墙厚0.4~0.8 m, 墙顶上搁檩, 檩上铺椽建顶(大多为“人”字顶), 房间高3.5~4.0 m, 深6.0~8.0 m, 宽3.0~3.5 m。

据调查, 这种结构的墙体有以下3种形式: ①直接用生土夯实; ②在土中加一些稻草, 然后夯实; ③将生土和稻草混合后, 用一定的模具将泥巴做成土坯砌块, 然后像普通砖砌体一样进行砌筑, 粘结材料为泥浆。这三种墙体, 其厚度为都在400~800 mm之间。

* 收稿日期: 2012-01-16.

基金项目: 地震行业科研专项经费项目(200808061)、云南省自然科学基金项目(2009CD002)和国家自然科学基金项目(41164002)联合资助。

① 叶燎原. 2007. 昆明地区典型农村房屋抗震性能研究及建造技术示范.

该类房屋建筑层数一般在两层（包括两层）以下，多为毛石或独立石基础，少数在开挖的沟中砌筑一定高度的土坯然后再夯实墙体。

1.2 土坯房屋破坏情况

宁洱镇新平小河村地处震源区内，地基较软，地下水位较高，地基面以下1 m就有地下水，地基下沉。在现场调查中发现地裂现象也比较普遍。

该村房屋的破坏情况主要表现为震后少数房屋倒塌、倾斜或墙体局部倒塌，多数房屋墙体变形、开裂、错位，普遍棱瓦、掉瓦。

土坯房中的墙抬梁结构房屋，墙体倒塌；砖木结构梁下墙体开裂。

宁洱县新民街：带有木圈梁、木柱较高的单层土坯房破坏严重，墙体出现拦腰裂缝。

在宁洱镇太平寨，单层土坯房破坏严重。从现场土坯房破坏情况可以看出：山墙尖部分容易发生裂缝。另外在墙基部位也容易发生裂缝，图1为此次地震土坯墙承重结构破坏图。

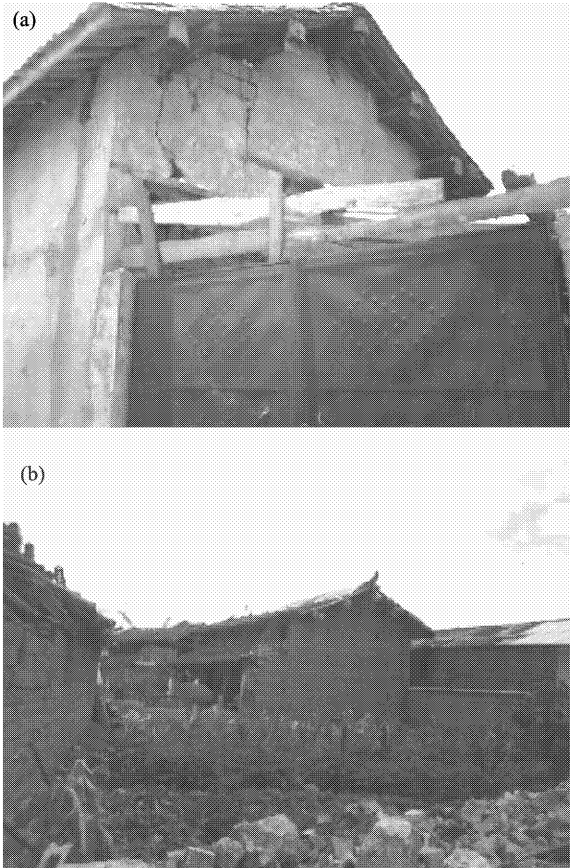


图1 宁洱6.4级地震土坯墙承重结构破坏图
Fig. 1 Load-bearing structure damage of adobe wall in Ning'er $M_s6.4$ earthquake

房屋破坏现象为墙体出现墙体分块，整体性差，也有水平裂缝，阶梯型裂缝。

2 计算模型及参数

对于宁洱地区典型的土坯墙承重房屋，按照不同墙厚及檐口高的房屋分别输入了超越概率为63%（众值烈度）及超越概率为3%（大震）的地震波，用SAP2000进行了有限元抗震计算。墙体用壳单元模拟，与地面接触的约束取为固定端。

2.1 计算参数

土坯干容重 $\gamma = 16.5 \text{ kN/m}^3$ ，弹性模量根据不同土坯标号是不同的，对应的弹性模量 $200R$ ， R 为土坯的抗压强度。本文中取土坯标号为25，砌筑泥浆标号为10，其对应 R 为 105 kN/m^2 ，因此对应的弹性模量 E 为 $2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 。

荷载计算：屋面均布荷载（考虑民房的槽瓦及檩条自重）为 1.4 kN/m^2 ，活荷载为 0.3 kN/m^2 ；根据民房实际情况，在2.8 m处（墙高较高时在3 m处）考虑了楼面荷载，楼面均布荷载为 3 kN/m^2 ，活荷载为 1.4 kN/m^2 。

在建筑抗震设计规范中，一般建筑的设计基准期（设计使用期）为50年，采用了三水准设防标准，相应的超越概率分别为63%、10%、3%。根据宁洱地震现场调查的情况，场地类别有3类。因此假定民房的使用期为50年，分别进行了小震—强度验算和大震—抗倒塌验算，依次输入3类场地超越概率为63%、3%的地震波，地震波数据点数1024。因普洱地区的基本设防烈度为Ⅶ度，超越概率为63%和3%的地震波分别对应的烈度为5.5度和8度。

2.2 破坏程度判别标准

因土坯房在地震作用下的破坏一般是因为主拉应力及位移过大引起的，而对于土坯房的变形位移没有相应的判别标准，可参照类似于砌体结构的变形判别标准（表1）。

3 计算结果分析

3.1 墙厚计算结果

计算中选取墙宽为3 m，墙高也固定（檐口高3 m），输入超越概率63%的地震波，表2中的计算结果是不同墙厚对应产生的应力和位移的最大值。

表 1 土坯房破坏程度判别标准

Tab. 1 Discrimination standard of damage degree of adobe buildings

破坏程度	位移标准
未开裂	$\Delta \leq \frac{H}{1\,500}$
轻微破坏	$\frac{H}{1\,500} < \Delta \leq \frac{H}{1\,000}$
中等破坏	$\frac{H}{1\,000} < \Delta \leq \frac{H}{800}$
严重破坏	$\frac{H}{800} < \Delta \leq \frac{H}{300}$
倒塌	$\Delta > \frac{H}{300}$

表 2 不同墙厚对应的应力及位移

Tab. 2 Stress and displacement of the different wall thicknesses

墙厚/cm	最大主拉应力/kPa	最大剪应力/kPa	位移/m
50	27.28	139.34	0.001
45	27.41	140.02	0.001
40	27.58	140.88	0.001
35	27.79	141.99	0.001
30	28.09	143.46	0.001

3.1.1 强度

因为土不能承受拉力，因此在小震作用下，墙体也会产生拉力，即墙体会产生开裂，强度不满足要求。

发生拉应力的部位（山墙）如图 2，在墙角部位拉应力较大，另外在山墙尖位置也存在拉应力。

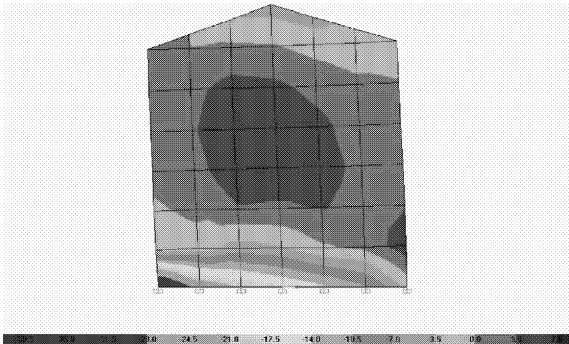


图 2 小震作用下主拉应力分布图

Fig. 2 Principal tensile stress distribution under earthquakes of 63% exceeding probability in 50 years

3.1.2 刚度

在小震作用下，墙体的层间位移反应为 0.001 m，即 $\Delta \leq \frac{H}{1200} = 0.002$ m。刚度满足要求。

从表 2 中可知：墙厚减小，其最大剪应力和最大拉应力也相应增加，但增加幅度不大，墙厚增加 1 倍，最大剪应力增加 7%，最大拉应力增加 7%，最大位移不随墙厚而变化。也就是说，墙厚与最大应力反应和位移反应关系不大。在农村房屋中可以考虑选择较薄的墙，以节省材料。

3.2 墙高计算结果

在考虑墙高影响时，假定墙宽均为 3 m，墙高是以檐口高为准，以下为输入超越概率 63% 和 3% 地震波及分析结果。

3.2.1 最大拉应力

计算时假定墙宽均为 3 m，墙高以檐口高为准，输入超越概率 63% 和 3% 地震波时的最大拉应力与墙高的关系反应如图 3。

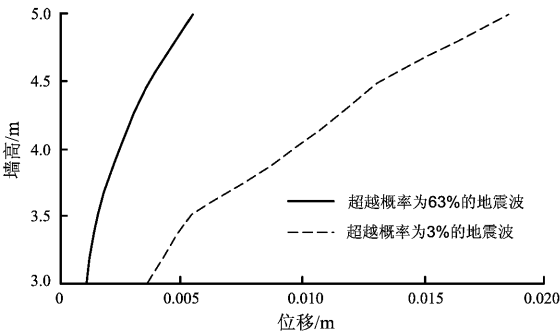


图 3 墙高与最大主拉应力关系曲线（单位：kPa）

Fig. 3 Relation curve between the wall height and the maximum principal tensile stress (unit: kPa)

从图 3 中可知随着墙高增加，最大主拉应力也随之增加，而且大震作用下的主拉应力大于小震作用下的主拉应力。表 3 给出了大震及小震作用下对应的最大主拉应力值。

从表 3 中可以看出，不管是在小震还是大震作用下，都会出现拉应力。也就是在地震作用下都会出现拉裂缝。

主拉应力图（图 4）显示主拉应力出现部位主要在山墙距地 1.5 m 以下部位和檐口区以上至山墙顶部部位；最大主拉应力随墙高增加而增加，墙高增加 67%（从 3 m 增加至 5 m），主拉应力增加 86%。

表 3 不同墙高对应的最大主拉应力
Tab. 3 Maximum principal tensile stress
of different wall heights

墙高/m	超越概率 63% 地震波产生 最大主拉应力/kPa	超越概率 3% 地震波产生 最大主拉应力/kPa
3	27. 28	39. 28
3. 5	31. 94	47. 93
4	37. 72	62. 09
4. 5	43. 18	70. 45
5	50. 68	83. 98

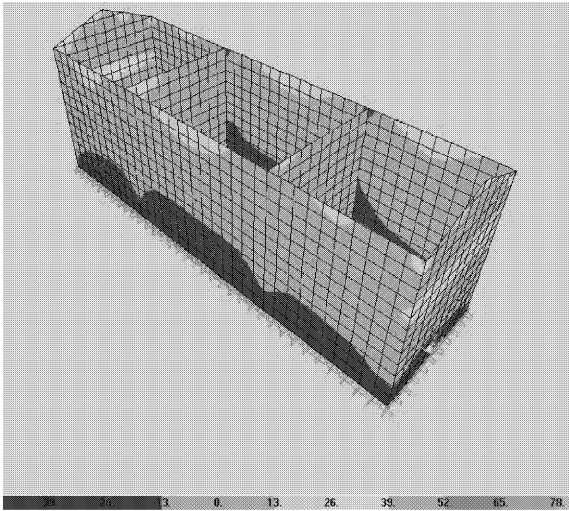


图 4 大震下考虑空间作用的主拉应力图
Fig. 4 Principal tensile stress under earthquakes
of 3% exceeding probability in 50 years
considering the space effect

对此主拉应力的变化特征采取的相应的抗震措施是在地面高程 1.5 m 以下及檐口区以上至山墙顶（出现拉应力部位）用抗拉材料进行加固。

3.2.2 最大剪应力

计算给出了小震和大震作用下的最大剪应力（表 4）。

图 5 显示最大剪应力出现在山墙距地 0.5 m 以下及檐口区 0.3 m 内；并且最大剪应力随墙高增加而增加（图 5），墙高增加 67%（从 3 m 增加至 5 m），剪应力增加 85%。

地震作用下产生的剪应力由横向或纵向截面来承担，也就是由墙宽或墙长和相应的墙厚形成的截面承担剪应力，因墙宽或墙长的数值较大，因此抗剪能力一般是能满足要求。在现场调查中很少发现土坯房因为抗剪能力不足而破损。

表 4 不同墙高对应的最大剪应力
Tab. 4 Maximum shear stress of different wall heights

墙高/m	超越概率 63% 地震波产生 最大主拉应力/kPa	超越概率 3% 地震波产生 最大主拉应力/kPa
3	139. 34	207. 84
3. 5	161. 99	250. 72
4	191. 18	317. 2
4. 5	217. 61	359. 61
5	257. 62	432. 92

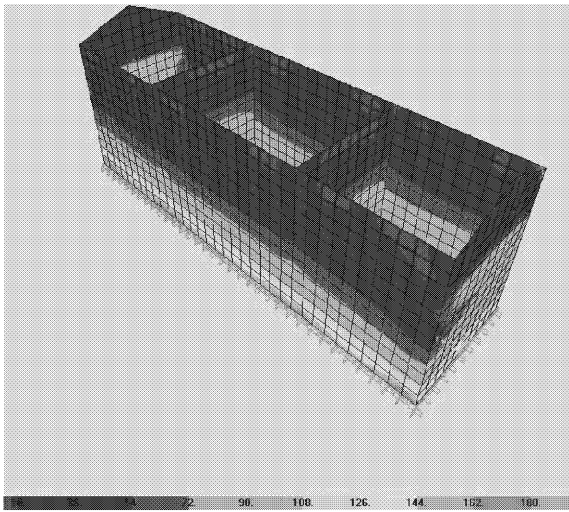


图 5 大震下考虑空间作用的剪应力图
Fig. 5 Shear stress under earthquakes of
3% exceeding probability in 50 years
considering the space effect

3.2.3 最大位移

地震作用下位移过大也是影响土坯房屋破坏的主要原因。因此本文也给出最大的位移反应如表 5、表 6 所示。

表 5 中结果表明：根据砌体的判定标准，在小震作用下土坯房的墙高在 3 ~ 4.5 m 之间，会发生中等破坏，而且随墙的高度或高厚比的增加，地震产生的位移是增加的。当墙高达 5 m 时，房屋会发生严重破坏。

表 6 中结果表明：在大震作用下土坯房墙高为 3 m 时，根据砌体的判定标准，会发生中等破坏，在 3 ~ 4.5 m 会发生严重破坏。且随墙的高度增加，地震产生的位移是增加的。

计算结果表明在大震作用下，如果墙高增加到 5 m，房屋会发生倒塌。宁洱地震震中区的土坯房破坏比较严重，计算结果与实际破坏情况相符。

表 5 小震作用下不同墙高对应的最大位移

Tab. 5 Maximum displacements of different wall height under earthquakes of 63% exceeding probability in 50 years

墙高 /m	高厚 比	超越概率 63% 地震 波产生最大位移/m	$\frac{H}{800} < \Delta < \frac{H}{300}$	破坏程度
3	10	0.001 1	0.003 75 ~ 0.01	中等破坏
3.5	11.7	0.001 5	0.004 38 ~ 0.012	中等破坏
4	13.3	0.002 5	0.005 ~ 0.013 3	中等破坏
4.5	15	0.003 7	0.005 625 ~ 0.015	中等破坏
5	16.7	0.006 5	0.006 25 ~ 0.017	严重破坏

表 6 大震作用下不同墙高对应的最大位移

Tab. 6 Maximum displacements of different wall height under earthquakes of 3% exceeding probability in 50 years

墙高/m	高厚比	超越概率 3% 地震 波产生最大位移/m	$\frac{H}{300}$	破坏程度
3	10	0.003 6	0.01	中等破坏
3.5	11.7	0.005 4	0.011	严重破坏
4	13.3	0.009 8	0.013 3	严重破坏
4.5	15	0.013 1	0.015	严重破坏
5	16.7	0.018 5	0.016 7	倒塌

从表 5、表 6 中可以看出：随墙高的增加，出现在山墙尖的最大位移也随之增加（图 6）。墙高增加 67%（从 3 m 增加至 5 m），最大位移增加 200%。

在这种情况下采取相应的抗震措施是在位移相对较大的部位设置圈梁，就可以减少地震作用下产生的最大位移。

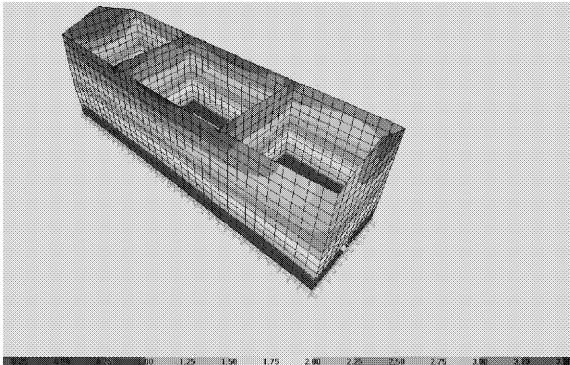


图 6 大震作用下的位移等值线图

Fig. 6 Contour of displacement under earthquakes of 3% exceeding probability in 50 years

4 承重墙的高厚比

墙厚变化与抗震的关系为：墙需要有一定的厚度才能满足稳定要求，就土坯墙承重结构而言，承重墙就像框架结构中的框架柱一样，需要足够的刚度来抵抗外界荷载的作用。因此，墙体厚度应满足一定的要求，使土坯墙结构的墙体有较高的强度和刚度。

参照《砌体结构设计规范》（GB50003 - 2001），土坯墙结构的墙体的高厚比为

$$\beta = H_0/h = \mu_1\mu_2[\beta]. \tag{1}$$

式中， μ_1 为自承重墙允许高厚比的修正系数，可以根据墙的厚度进行修正； μ_2 为门窗洞墙允许高厚比的修正系数，在验算时可根据实际的窗间墙的宽度参照规范取值； $[\beta]$ 值查《砌体结构设计规范》（GB50003 - 2001）可得，墙、柱的允许高厚比的取值为 24；墙体的计算高度按照按该规范中表 5.1.3 取值，取最小的 1.2H 进行计算。

同时，在计算墙体实际高厚比时，墙体计算高度取最小值，以保证其较小值；在计算墙体规范要求高厚比时，窗间墙取较大值，以保证其较大值。在这种情况下，现场破坏的土坯墙承重的房屋，有些墙体高厚比达不到规范的要求。

5 结论及建议

由于农民对房屋震害防御重要性及相关结构房屋抗震知识了解不足，已建土坯墙承重的房屋存在抗震能力严重不足的问题。

从现场调查及抗震验算分析来看，土木结构抗震能力较差的主要原因是土本身作为一种离散材料，抗拉和抗弯强度均较低，易发生变形破坏，从而导致房屋破坏和倒塌。

本文通过对在地震区容易遭受破坏的土坯房抗震验算分析，得出如下结论：

- （1）墙厚的影响：在满足房屋功能的情况下，地震作用与墙厚的关系不大。
- （2）墙高的影响：如果墙宽一定，墙高降低，其最大剪应力和最大拉应力也随之降低；高度或高厚比增加，破坏性增加，墙高达 4.5 m，即使在小震作用下，也会对墙体造成破坏。

(3) 地震最大反应规律(拉应力、剪应力和位移)说明了墙高增加,最大拉应力和剪应力增加,并且位移也增加,破坏性加大。

(4) 小震和大震作用下的影响:小震作用下,当檐口高小于4.5 m时,其变形造成墙体中等破坏;当檐口高为5 m时,变形会造成墙体严重破坏,且随着墙高的增加,破坏程度加大。大震作用下,层高为3 m时,变形都会引起墙体中等破坏;大于3 m小于5 m,变形会使墙体发生严重破坏;墙高大于5 m后,会引起倒塌发生。

参考文献:

陈伟,孟丽军,段树金. 2005. 农村建筑抗震调查的综合分析[J]. 山西建筑,31(9):43-44.

高惠瑛,张铁军,黄声明,等. 2010. 福建省农村房屋抗震性能调查与现状分析[J]. 灾害学,25(增刊):243-247.

郭阳照,黄慧敏,郭永恒. 2006. “7·22”云南盐津地震房屋震害分析[J]. 震害防御技术,1(4):353-358.

何超,罗奇峰. 2010. 山东西北部某县农村房屋抗震性能分析[J]. 结构工程师,26(1):50-55.

卢永坤,周光全,郑定昌,等. 2007. 昆明市“城中村”民房抗震能力调查[J]. 地震研究,30(1):72-76.

王俊特. 2009. 从汶川地震浅谈我省闽南农村地区砌体房屋结构的抗震能力[J]. 福建建筑,(7):52-53.

杨向东,安晓文. 2001. 姚安6.5级地震中房屋震害差异的原因分析[J]. 地震研究,24(2):156-161.

曾耀辉. 2010. 关于提高农村土木房屋抗震能力的思考[J]. 安徽农业科技,(16):8 809-8 810.

GB50003-2001,砌体结构设计规范[S].

Aseismic Analysis of Civil Structure Houses by Finite Element Method in Rural Area of Yunnan

XIAO Mei-ling, YE Liao-yuan, LIU Ben-yu, RAN Jing, ZHANG Tong

(1. School of City Construction and Management, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China

2. Yunnan Normal University, Kunming 650092, Yunnan, China)

Abstract

Based on the site investigation of Ning'er $M_{6.4}$ earthquake on Jun. 3, 2007, we construct the earthquake analysis models for the severe damaged adobe houses. Using finite element method, we analyze aseismic of civil structure houses in different bays, depths and eaves heights when inputting 3 kinds of seismic waves are modeled by exceedance probability of 63% and 3% within 50 years respectively. The results show that the storey height has a greater influence than wall thickness on the aseismic of civil structure houses. The higher of storey height, the more of ruinous cracks occurred. We suggest that reducing the storey height and maintaining the basic wall thickness has more advantage to aseismic for the civil structure house under the prerequisite to satisfy and propose the measure of anti-seismic reinforcement.

Key words: adobe house; principal tensile stress; story drift; aseismic measures; Ning'er $M_{6.4}$ earthquake