第33卷 第4期
2011年12月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 33 No. 4
Dec., 2011

甘肃武都典型夯土民房承重墙体抗剪强度试验研究

徐舜华[1,2]，王兰民[1,2]，王 强[1,2]，袁中夏[1,2]

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地，甘肃 兰州 730000；
2. 中国地震局兰州地震研究所，甘肃 兰州 730000)

摘 要：武都是甘肃省典型夯土民房使用地区。试验中使用武都当地常用土料，完全按照当地施工工艺夯筑两片夯土墙体试件，利用伪静力方法研究墙体抗剪强度。结果显示：(1)上覆荷载对夯土墙体的水平承载力和变形影响较大，随着上覆荷载从10 kN增加到18 kN，开裂荷载和极限荷载分别增加了217%和359%，极限顶点位移则降低了30%；(2)在水平往复荷载的作用下，夯土墙体始终沿着夯土层间水平和垂直接触裂缝处产生破坏，最终碎裂成块体。最后提出了使用铁丝网来加固现存夯土民房承重墙体的建议。

关键词：武都；夯土民房；承重墙体；抗剪强度

中图分类号：TU411.93 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2011)04－0354－05

Experimental Study on Shearing Strength of Typical Rammed Earth Wall in Wudu Area, Gansu Province

XU Shun-hua[1,2], WANG Lan-min[1,2], WANG Qiang[1,2], YUAN Zhong-xia[1,2]

(1. *Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China*;
2. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Wudu is the area where using typical rammed earth rural houses in Gansu province. In experiments two wall specimens are built using local material and local construction technology, and the shearing strength of wall is investegated by pseudo-static test, the results show(1) the overlying load on the wall has greater effect on horizontal load capacity and deformation of the wall, with the overlying load from 10 kN to 18 kN, cracking load and ultimate load increased by 217% and 359%, ultimate top displacement is reduced by 30%; (2) the rammed earth wall is always destroyed along the horizontal and vertical contacts between layers, and eventually is fragmented into blocks with the role of horizontal cyclic loading. At last, this paper recommend to reinforce the rammed earth bearing wall of the existing rural houses with iron mesh.

Key words: **Wudu area; Rammed earth house; Bearing wall; Searing strength**

0 引言

我国是遭受地震灾害最为严重的国家之一，地震破坏大多数发生在农村地区，地震造成的死亡人员近60%为农村人口[1]。目前我国约有6.5亿农村人口居住在地震烈度Ⅵ度的地震危险区[2]。由于农村经济发展水平较低，防灾意识不强，还存在大量抗震性能较差的生土类房屋。据调查，在2008年汶川8.0级地震中生土建筑农房多达80%倒塌或成为危房，是造成农村地区人员重大伤亡的直接原因[3]。

夯土墙体承重房屋是生土类民房的一个重要类型，其在西北地区，尤其甘肃省农村地区占有较大比例，并在将来一段时间仍然会大量存在。这些抗震

收稿日期：2010-07-14
基金项目：中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项；中国地震局兰州地震研究所论著编号：LC2011051
作者简介：徐舜华(1974－)，男(汉族)，黑龙江拜泉人，助理研究员，主要从事岩土地震工程方面的研究..

性能差的农房的存在给人民生命财产造成了巨大的安全隐患[4-5]。甘肃省武都农村地区广泛使用夯土墙体承重房屋，是甘肃省夯土民房的典型代表地区。在汶川 8.0 级地震中，这类生土房屋损害严重，也造成了相当数量人员的伤亡。

夯土民房墙体的抗震性能的试验研究相对土坯墙体民房要少。王毅红等[6]、谭冠平[7]、李德荣等[8]曾对西安、昆明和兰州的夯土墙体进行过抗震强度试验研究，提出了相应地区的夯土墙体抗震性能评价。依据试验结果与经验可知，由于各地区使用的夯土土料不尽相同，夯土墙体强度存在较大的差异性。本文在汶川 8.0 级地震的影响背景下，通过实验对甘肃省陇南强震区广泛使用的夯土民房墙体进行抗震性能研究，提出抗震能力评价和加固建议，以有效地提高其抗震强度，减少灾害损失。

1　试验设计

夯土墙体强度试验使用土料均来自武都地区，为当地常用夯土土料，夯土中未添加任何掺合料，完全按照当地施工工艺夯筑墙体。参考当地夯土墙体的典型尺寸，试验夯土墙体尺寸设计为 1 600 mm×900 mm×300 mm，按同样的施工方法，同时夯筑 2 片墙体试件进行比较试验。墙体夯筑完成后放置半年，充分晾干后才进行试验。晾干后夯土墙体参数平均值见表 1。

表 1　夯土墙土工试验结果

密度/(g·cm^{-3})	含水量/%	C 值/MPa	φ 值/°
1.56	1.8	0.181	14

待墙体晾干后，吊装在图 1 所示装置上，再利用千斤顶给墙体顶部施加一定大小的力(参考当地屋顶重量)，力通过一块钢板施加到墙体顶部，用来模拟屋顶的重量。然后对夯土墙体模型施加水平低周

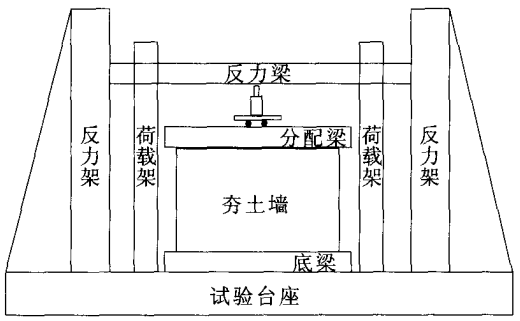


图 1　试验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental device.

水平往复荷载，进行伪静力试验，模拟墙体在实际结构的受力状态下抵抗水平往复荷载作用的能力，同时利用墙体两侧安装的位移传感器测量墙体变形，图 2 为加载示意图。加载方式为力与位移混合控制，力控制为每级加载增量为 4 kN，每级低周往复实现 3 个循环，直至破坏。1 号墙体上覆压力为 10 kN，2 号为 18 kN。

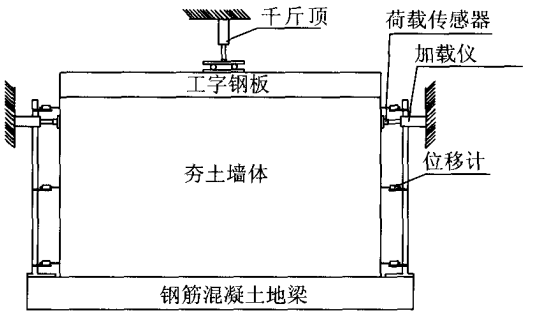


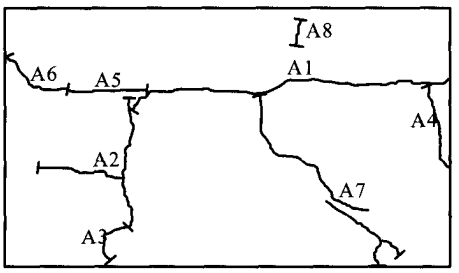
图 2　夯土墙体试验加载示意图

Fig. 2　Loading test sketch of rammed earth wall.

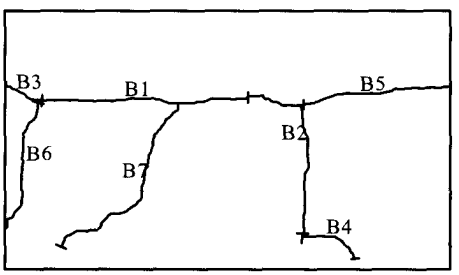
2　试验结果分析

2.1　墙体破坏过程与破坏形态

试验发现两片墙体试件从开始加载水平荷载直到破坏，均经历了弹性、弹塑性和大变形破坏三个阶段，都表现出了剪切破坏的形态特征，见图 3、图 4。图中 A、B 表示墙体一侧，数字代表裂缝出现顺序。



(a) A面

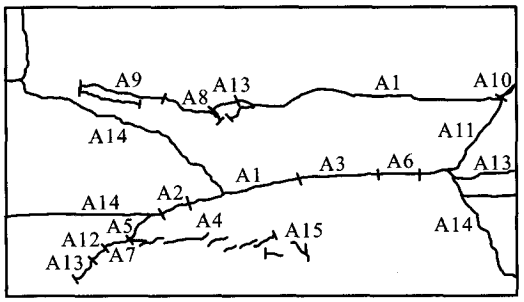


(b) B面

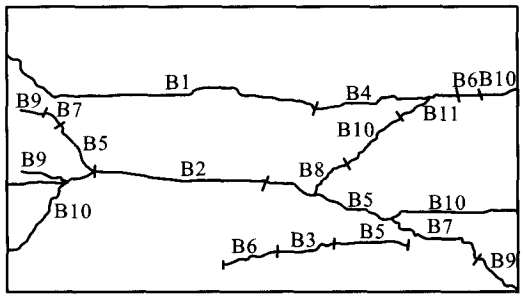
图 3　1 号夯土墙体破裂形态

Fig. 3　No. 1 rammed earth wall fracture morphology.

从墙体试件破坏过程可以看出，前期夯土墙体主要是局部出现水平裂缝和少量斜裂缝，随后，在往



(a) A面



(b) B面

图 4 2 号夯土墙体破裂形态

Fig. 4 No. 2 rammed earth wall fracture morphology.

复荷载的作用下，在前期裂缝的基础上裂缝不断加宽、延伸，并且墙体沿裂缝开始出现微小滑移，最后阶段前期裂缝沿水平和倾斜两个方向贯通整个墙体，并且伴随有新的与水平交叉的斜裂缝出现，当贯穿整个墙体时，墙体即达到极限状态，最终墙体碎裂成几个较大的块体，失去承载力。

两片墙体破坏过程非常相似，裂缝发展规模却不尽相同。2 号墙体前期出现的水平裂缝长度较短，并在往复荷载的作用过程中，裂缝加宽、延伸的长度也较 1 号墙体为短，发展速度更慢，这从裂缝出现的序号当中可以看出来。主要原因是施加在 2 号墙体的上覆荷载较 1 号墙体为大所致。

夯土墙体 A 面与 B 面裂缝的发生与发展基本是对称的，这说明沿墙体厚度方向夯筑比较均匀，这对研究墙体的整体抗震性能是有利的。

2.2 墙体水平承载力

夯土墙体试件在水平荷载作用下开裂荷载和极限荷载见表 2。从表中可以看出，因施加的竖向荷载不同，两面墙体试件的开裂荷载与极限荷载随着上覆荷载的增加得到了很大的提升。随着竖向荷载从 10 kN 增加到 18 kN，2 号墙体的开裂荷载和极限荷载分别增长了 217%和 359%。

2.3 墙体变形能力

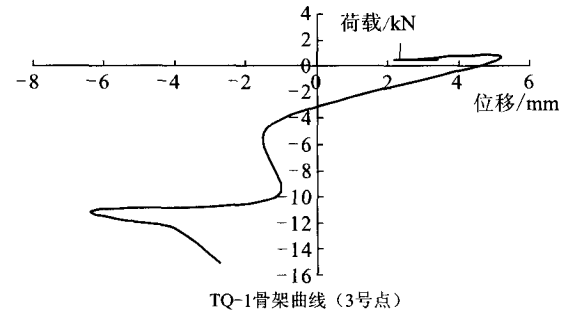
从 1 号墙体的骨架线(图 5(a))可以看出，在水平加载的正反两个方向位移呈现不对称分布，在第一次位移平台后，在反向荷载达到 10 kN 以上时(正向荷载大于 4 kN)，位移开始出现急剧增长，墙体破坏后位移出现小幅回弹。

表 2 墙体试件在水平荷载作用下开裂荷载和极限荷载

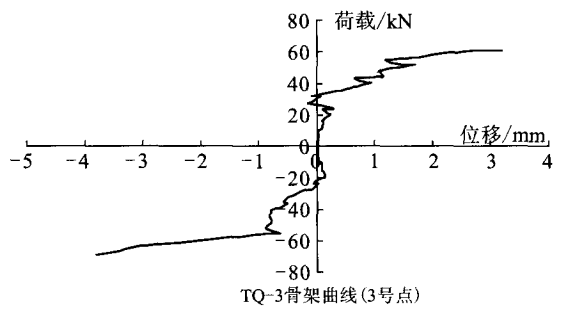
墙体编号	竖向荷载/kN	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	极限顶点位移/mm
1 号	10	10.08	15.02	6.71
2 号	18	31.97	68.95	4.68

从 2 号墙体骨架线(图 5(b))可以看出，由于上覆荷载的增加，大致消除了墙体位移变形不对称的状况，第一次位移平台出现以后，在正向荷载大于 31.97 kN 时，位移出现急剧增长，并在墙体最终破坏时，未出现位移反弹现象，说明墙体完全贯通破坏。

从最终墙体破坏以后变形(表 2)来看，在水平往复荷载的作用下，夯土墙体破坏时出现了较大的变形，其中 2 号墙体的极限顶点位移较 1 号墙体减小了 30%，体现了竖向荷载的影响。



(a) 1号墙体



(b) 2号墙体

图 5 墙体骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of rammed earth walls.

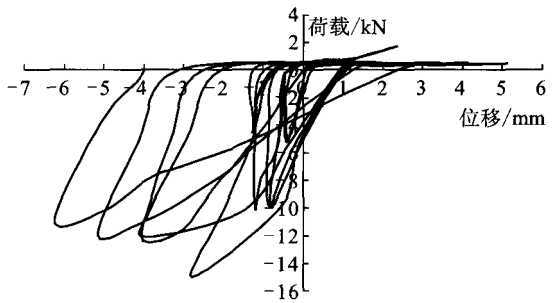
2.4 滞回曲线分析

从夯土墙体滞回曲线可以看出，由于破坏形态大致相同，2 片墙体荷载－位移滞回曲线具有一些相同的特点。当水平荷载小于初裂荷载时，荷载－位移滞回曲线一个加载循环所形成的滞回环面积较小，说明墙体表现出明显的弹性变形特性，此时墙体处于弹性阶段；当施加荷载达到初裂荷载后，墙体出现第一条斜裂缝，墙体进入弹塑性工作阶段，滞回曲

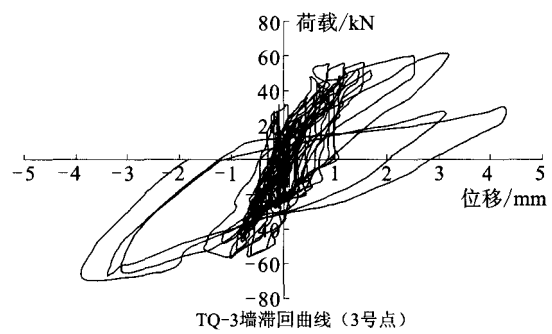
线形成滞回环，面积逐步增大；随着荷载的增加，新的斜裂缝不断出现，原有裂缝不断加宽、延伸，并伴随有新裂缝出现，墙体刚度逐渐退化，水平荷载产生的主拉应力形成斜裂缝。

在墙体变形后期，墙体达到开裂荷载后，由滞回曲线上每级位移的两次循环可以看出，后次循环的峰值均略小于前次循环，表现出墙体强度和刚度均略有退化。施工薄弱部位的水平裂缝发展并逐渐贯通，水平抗力则主要由水平裂缝处的剪摩阻力提供。由于墙体裂缝张合明显，滞回环面积逐渐增大，直至不能形成闭合，最后墙体贯通、破坏。

从图 6(a)可以看出，1 号夯土墙体达到其开裂荷载 10 kN 后，滞回环面积开始逐渐扩大，当荷载达到 15 kN 峰值以后，再继续施加的水平往复荷载逐渐下降，同时滞回环面积继续扩大，位移不断增加，荷载却开始下降。



(a) 1号墙体



(b) 2号墙体

图 6　墙体滞回曲线

Fig. 6　Hysteretic curves of rammed earth walls.

从图 6(b)可以看出，2 号夯土墙体达到其开裂荷载 31.97 kN 后，滞回环面积开始逐渐扩大，当荷载达到 68.95 kN 峰值以后，再继续施加的水平往复荷载逐渐下降，同时滞回环面积继续扩大，位移不断增加，荷载却开始下降。

除了极限位移变形和水平开裂、破坏荷载不同外，1 号墙体水平承载力具有明显的不对称性，而 2 号墙体在水平正反两个方向的承载力则大致相同，可能为上覆压力增加减小了这种不对称性。

3　影响夯土墙体抗震性能因素分析与加固建议

3.1　抗震性能分析

影响夯土墙体强度的因素有很多，主要有材料、上覆压力、施工质量等几个方面。

(1) 夯土墙材料的影响

夯土墙体材料直接影响墙体的承载能力。墙体材料的强度越高，墙体的承载力越大。作为甘肃省典型夯土民房的代表，武都农村地区的土料具有其区域特色，见表 3。并且，在夯筑墙体过程中不加入任何掺合料，完全是素土墙体，含水量则随着时间的延长降低到 1%以下。本次试验中，因凉干时间较正常民房层墙体短很多(当地夯土房屋经过几十年甚至上百年的风干)，含水量未能降低到 1%以下，可能对墙体强度有一定影响。

表 3　武都夯土房屋土料颗粒含量

>0.05	0.05～0.005	<0.005	定 名
19.4	55.3	25.2	重粉质壤土

(2) 上覆压力的影响

从 2 个墙体试件的试验结果来看，上覆压力对墙体抗剪承载力有较大影响，在一定范围内，墙体竖向压应力越大，抗剪承载力越高。本次试验由于竖向压力大的 2 号墙体试件水平抗剪强度明显高于 1 号墙体试件。

(3) 夯土墙体薄弱接缝位置

从墙体破坏形态来看，施工方法及施工质量对夯土墙体水平抗剪强度有非常显著的影响。夯土层间接缝处及同一水平面上两板垂向接缝处是夯土墙施工的薄弱环节，墙体试件最终破坏都是由于墙体两板接缝处开裂、贯通造成的，最终整个墙体碎裂成块状。层间接缝处形态可见图 7，夯土墙体在汶川地震中的破坏形态见图 8。

夯土墙体抗剪强度实质是土的抗剪强度问题，可用土体抗剪强度库伦－摩尔准则表示：

$$\tau_a = c + \tan\varphi\,\sigma_a \tag{1}$$

斜面上的抗剪强度可简化为

$$[\tau] = c + \sigma_Y \tan\varphi \tag{2}$$

式中$[\tau]$为墙体水平截面的抗剪强度；c 为粘聚力；σ_Y 为截面处所受的正压应力；φ 为内摩擦角。

在忽略夯土墙体试件薄弱接缝的条件下，利用公式(2)计算可得墙体抗剪强度，与试验所得抗剪强度的比较见表 4。计算中，c 与 φ 值取自表 1。

图7 夯土墙体层间接触形态

Fig. 7 Interlayer contacts of rammed earth wall.

图8 汶川地震中武都夯土墙体碎裂倒塌

Fig. 8 Rammed earth wall collapsed fragmentation in Wudu during Wenchuan earthquake.

表4 夯土墙体抗剪强度比较

墙体试件编号	竖向荷载/kN	开裂强度/MPa	极限强度/MPa	计算值/MPa
1号	10	0.037	0.055	0.186
2号	18	0.118	0.255	0.19

从表4中可以看出，开裂强度与极限强度总体上较忽略夯土墙体试件薄弱接缝的条件下计算所得墙体抗剪强度为小，说明在施工过程中产生的夯土层间接缝是夯土墙体的应力薄弱部位，是最容易发生破坏的位置。两个墙体试件抗剪强度的理论计算值几乎相同，是因为在忽略夯土墙体薄弱接缝的条件下，其抗剪强度理论上与夯土块体相同，在达到一定强度后夯土墙体受上覆荷载的影响在减小。试验中，2号墙体试件的极限强度超出了计算值，可能的原因是设计的上覆压力值过大，导致墙体压密所致。

3.2 加固建议

经过2008年汶川8.0级地震的浩劫，甘肃省陇南地区在政府重建资金的帮助下，大量遭到破坏的夯土民房得到了修缮或者重建为现浇砖房。在未来一段时间内，大量建造新的夯土民房机会较小。着眼于现存夯土民房的加固而不是通过改造施工工艺建房是比较务实的做法；同时还要考虑加固夯土民房的经济性。

根据此加固改造思路，夯土材料不可改造，而该地区屋顶重量（上覆压力）基本是一定的，通过增加构造柱则会产生较大的经济负担。这样，加固的唯一途径，就是通过加固夯土墙体的薄弱接缝处来增强墙体的水平承载力。

基于以上分析，本文建议利用具有一定强度的铁丝网（对于经济条件较好的家庭可使用热镀锌钢丝网，以加强网罩的耐腐蚀性）来双面加固夯土墙体，铁丝网价格便宜，市场上有各式各样的成品。主要做法是，清除原有墙体表面抹泥，把铁丝网紧紧贴于墙面，在均匀分布的点上用铁钉（或者采用 φ4 低碳冷技钢筋变成 90°角）把铁丝网固定到墙面上，铁钉打入土墙深度不小于 10 cm，间距可采用 80 cm，呈梅花状布置，表面用草泥进行抹面处理。这样做的主要用意是利用铁丝网把整个夯土墙体“捆”成一个整体，把墙体的强度转换为铁丝网＋墙体的强度，除了有效增加夯土墙体强度外，这样做还有一个好处，在墙体碎裂时可以保证墙体不倒塌，能够有效保护人员生命安全。需要注意的是，铁钉不能太短，太短就不能把铁丝网的强度施加到墙体上，铁钉也不宜过长、过密，可能会破坏墙体的自身强度。

4 结论

（1）承重夯土墙在低周水平反复荷载作用下发生剪切破坏，破坏由水平剪力在墙体夯土层间水平和垂向接缝处形成的水平裂缝和斜裂缝控制，随着裂缝的加宽、加长，斜裂缝与水平裂缝相交、贯通，墙体就达到了剪切破坏的极限状态，最终碎裂成块体，失去承载力，这是造成人员伤亡的最主要原因。

依据夯土墙体破坏接触面的分析，以及通过夯土墙体抗剪强度计算比较，也可以得到夯土墙体应力薄弱部位为夯土层间接触缝的结论。可以说，施工工艺（或者夯筑结构）决定了夯土墙体的破坏方式与破坏状态。

（2）夯土墙体变形能力受竖向荷载影响较大。随着上覆压力的增加，墙体极限变形量在减小，增加了墙体的弹性。

（下转385页）

式，为辖区内的各类 IP 设备、仪器与服务运行监控管理工作提供了帮助，实现了故障联动报警功能，提高了业务系统的故障响应与处置能力。

近一年的使用中，系统先后为强震台网、信息网络、前兆台网提供了全面的仪器、网络、业务服务情况监控，得到了用户好评，特别是在信息网络与前兆台网内，此系统已经为日常监控的重要手段。

另外，在此系统的建设过程中，受到兄弟单位的大力帮助，特别是山东省地震局王方建，河北省地震局李永庆及中国地震台网中心赵军等同仁，在此表示感谢。

[参考文献]

[1] 李刚，周利霞，王晓磊，等. 高速区域网络环境中的网站负载均衡系统[J]. 西北地震学报，2009，31(3)：296-301.

[2] 宋磊，王静文. OpenBSD 下基于 Nagios 的网络服务监控报警系统的研究[J]. 电脑编程技巧与维护，2009，(14)：112-113.

[3] 李晨光. Linux 系统网络管理模块的实现[J]. 铁路计算机应用，2008，(17)：35-37.

[4] 何辉，权晓红，石全民，等. 自主设计网管系统——开源软件以及自由软件应用于网络管理方案[J]. 中国教育网络，2009，(6)：42-47.

[5] Richard C Harlan. Network Management with Nagios[J]. Linux Journal，2003.

(上接 358 页)

(3) 夯土墙体抗剪强度受竖向荷载影响较大。随着上覆压力的增加，墙体的开裂荷载、极限荷载得到了较大幅度的增长，有利于提高墙体抗震能力。

(4) 夯土墙体的不对称性会大大降低墙体的抗剪强度。

(5) 使用具有一定强度的铁丝网来加固现存夯土民房承重墙体，是一种针对夯土墙体薄弱部位的加固改造方法，对于经济不发达的农村地区来讲，也是一种方便、经济、有效的加固方法。

[参考文献]

[1] 王兰民，林学文. 农村民房抗震理论与技术[M]. 兰州：甘肃科学技术出版社，2006.

[2] 中国地震动参数区划图(GB18306－2001)[S]. 北京：中国标准出版社，2001.

[3] 任祥道. 透过“5.12”汶川地震思考农房抗震[J]. 四川建筑，2008，28(4)：6-7.

[4] 石玉成，王兰民，林学文. 黄土生土建筑震害预测研究[J]. 西北地震学报，2004，26(3)：206-211.

[5] 王峻. 黄土地区农村民房生土建筑土墙体材料抗震性能的试验研究[J]. 西北地震学报，2005，27(2)：158-162.

[6] 王毅红，苏东君，刘伯权，等. 生土结构房屋的承重夯土墙体抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报，2007，39(4)：451-456.

[7] 谭冠平. 云南农村民居典型土筑墙基本力学试验研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2007.

[8] 李德荣，黎海南，陈丙午. 甘肃农村土墙承重平房抗震性能的试验研究[J]. 工程抗震，1987，(3)：14-19.