

# 内置绳网承重夯土墙体抗震性能试验研究

卜永红<sup>1</sup>, 王毅红<sup>1</sup>, 韩岗<sup>2</sup>, 李丽<sup>3</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 中联西北工程设计研究院, 陕西 西安 710082;  
3. 宁夏建设职业技术学院土木工程系, 宁夏 银川 750021)

**摘 要:**提出一种内置绳网的生土结构房屋承重夯土墙体及其建造技术, 对该种夯土墙与按照传统方法夯筑的承重夯土墙的受力及抗震性能进行试验研究, 各设计了一片墙体试件. 对试件施加竖向荷载和低周反复水平荷载, 对比研究两种夯土墙体在地震荷载作用下的破坏过程、破坏形态、滞回曲线和骨架曲线的特征以及墙体的水平承载力和变形能力等. 分析内部设置绳网对夯土墙体水平受力性能和变形性能的影响. 研究结果表明, 与传统夯土墙相比, 内置绳网夯土墙体的承载和变形能力更高, 将该种夯土墙应用于生土结构房屋, 可使房屋的整体性增强, 抗震能力得到提高.

**关键词:**生土结构; 夯土墙; 内置绳网; 夯筑方法; 抗震性能; 试验研究

**中图分类号:** TU361

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)01-0038-05

生土由于碎散的特性, 造成其力学性能复杂. 对生土结构房屋现状的调研、灾害调查和前期的试验研究表明, 传统生土墙夯筑方法建造的承重墙体抵抗水平地震作用的能力较差, 抵抗剪切变形的能力较低, 墙体整体性不足, 土体容易开裂、塌落而导致墙体承载力下降<sup>[1-6]</sup>. 国内外对生土结构承重墙体抗震性能及构造措施的试验研究极少, 现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)对生土结构房屋也涉及较少. 为提高生土结构夯土墙体的抗震性能, 提出一种内置绳网承重夯土墙体及其建造技术, 并通过试验对比研究使用该技术建造的夯土墙体的抗震性能, 分析新方法的可行性, 为村镇生土住宅结构的建造和加固处理提供新的实用技术.

## 1 内置绳网夯土墙体的设计与建造技术

针对生土夯土墙体的缺点, 将抗拉和变形能力较好的草(棕)绳等材料编织的绳网放置于夯土墙中, 以增强夯土墙的整体性, 提高其承载和变形能力. 内置绳网夯土墙示意图如图1所示.

该种内置绳网夯土墙体的建造方法, 可采用下列步骤实现:

步骤一, 根据夯土墙的尺寸及结构要求编制绳网, 绳网的面积大于与绳网面相平行的夯土墙面的面积, 将编好的绳网在水中浸湿待用;

步骤二, 开挖墙体基槽, 夯实地基, 砌筑墙体基础及墙根, 根据夯锤直径、夯土墙的厚度及结构要求将绳网放置于墙体基础适当位置, 绳网面与夯土墙外立面平行, 绳网底端埋置于墙体基础中;

步骤三, 支打夯模板;

步骤四, 依次摆动绳网, 填入各部分的生土;

步骤五, 竖向拉展绳网, 用夯锤夯打各部分土体, 并确保夯筑密实;

步骤六, 重复上述步骤三至步骤五, 直至整个夯土墙体建造完成;

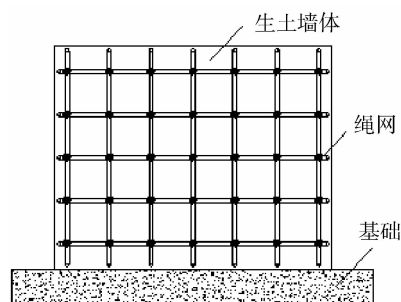


图1 内置绳网夯土墙

Fig. 1 Walls with built-in rope nets

收稿日期: 2012-08-27 修改稿日期: 2012-12-30

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAJ04A03-10); 村镇住宅建筑设计标准研究(2008BAJ08B10-06)

作者简介: 卜永红(1975-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事工程结构抗震研究.

步骤七,将夯土墙两侧伸出的绳子与墙体木构造柱连接,夯土墙上部伸出的绳子与木圈梁或木屋架连接.

2 夯土墙体的模型试件设计

2.1 材料力学性能

白棕绳的抗拉强度一般达到钢丝绳抗拉强度的 10%左右(约 120~200 N/mm<sup>2</sup>).试验用黄土单轴抗压试验测得其屈服强度为 1.96 MPa,极限强度为 2.2 MPa<sup>[7]</sup>.

2.2 试件制作

以村镇带阁楼共两层的木屋盖瓦屋面生土房屋底层承重夯土墙体为试验研究对象,墙体原型尺寸为 4 950×3 900×720 mm(长×高×厚).采用 1:3 缩尺比例设计了两片试验模型墙体(尺寸为 1 650×1 300×240 mm),1 片普通夯土墙试件(W-1)和 1 片内置绳网夯土墙试件(W-2),试件中绳网采用直径 8 mm 的白棕绳编织,网格大小约为 300×300 mm.

2.3 水平地震力及竖向荷载计算

根据试验模型的原型房屋实际荷载,模型对应竖向荷载 58.87 kN,按单质点体系用底部剪力法计算的不同地震烈度下所遭受的地震作用计算结果如表 1 所示:

3 试验概况及破坏过程

3.1 加载方案

采用拟静力试验方案,进行墙体在低周反复荷载作用下的加载试验.采用门式反力架作为竖向加载的反力基座,油压千斤顶竖向加荷,分配梁将单点集中荷载转化为均布荷载.以钢结构反力架作为水平加载的反力基座,50T 电液伺服作动器施加水平荷载.加载装置现场照片见图 2.

3.2 测点布置与加载制度

试验在墙体顶部作动器中心线处和墙体中部安装了位移计,测量墙体加载点及中部水平位移,在墙体对角线方向设置剪切变形杆,测定墙体剪切变形,其中位移计 3 装在加载远侧下端,位移计 4 装在加载近侧下端.试验中观察记录试件裂缝发生与开展情况.

加载时,先对墙体施加 58.87 kN 的竖向荷载,记录各测点位移计初始读数.采用位移控制的加载制度,每级增幅 0.5 mm,加载速度 0.1 mm/s,加至 6 mm 后,每级增幅 1.0 mm,并循环 2 次,加载速度 0.2 mm/s.

3.3 试验过程及现象

试件 W-1 经历了墙体加载裂缝的出现、裂缝的增多和延伸、主裂缝的贯通和扩展、试件破坏几个过程.在加载到 0.5 mm 时出现加载开裂裂缝.随着位移的增加,在初始的水平和竖直干缩裂缝下方出现和发展的拉向 45°斜裂缝与初始裂缝相交,而推向裂缝一直未出现.位移加至推 9 mm 时,墙根略有松动,整个墙体有被抬起迹象,推力达到极限荷载 46.34 kN.随着位移的增大,拉向 45°斜裂缝向上向下延伸,形成了整个贯通的拉向斜裂缝.在拉 12 mm 时,斜裂缝将墙体分割成几个块体,墙体松动破坏,试验结束.整个试件的裂缝图如图 3 所示.图中粗线标出的交叉裂缝为墙体临界裂缝,图中数字表示裂缝出现时相应的墙体加载位移值.

试件 W-2 在推 1.5 mm 时,墙体中铺设草绳的部位顺着草绳方向出现细微裂缝,最宽裂缝为 0.2 mm,随着位移的增加,新裂缝不断出现,主要是沿着基础顶面开始向上延伸的竖直裂缝和一些在加有草绳的墙体处出现的水平裂缝,位移加至推 7.0 mm,加载点近端墙角有被抬起的迹象,此时推力已达

表 1 地震力计算结果

Tab.1 Result of calculation of earthquake strength

设防烈度	6 度	7 度	8 度
模型对应地震作用 $F=\alpha_{\max}G_{\text{eq}}/9(\text{kN})$ ( $G_{\text{eq}}=1\,104\text{ kN}$ )	14.72	28.21	55.18

注:表中  $G_{\text{eq}}$  为重力荷载代表值,  $\alpha_{\max}$  为水平地震影响系数最大值,其取值按《镇(乡)村建筑抗震技术规程》(JGJ161—2008)确定,设防烈度为 6、7、8 度时,  $\alpha_{\max}$  取值分别为 0.12、0.23、0.45.



图 2 试验现场

Fig.2 The experimen spot

极限荷载 53.33 kN. 当位移大于 8.0 mm, 由于墙体被反复抬起落下, 墙体中线偏离基础轴线最大达 23 mm, 墙角被抬起部分土体不断剥落. 随着位移加大, 墙角土体在水平偏移的摩擦力和水平推力、竖向荷载的共同作用下不断

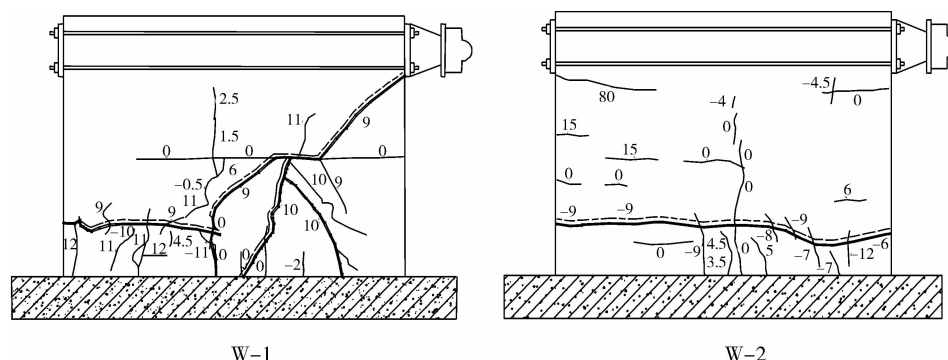


图3 墙体裂缝图

Fig. 3 Crack patterns in the wall

开裂,直到位移加至拉 12 mm 时,墙体根部被分割的土体塌落增多,墙根受损严重,试验结束. 但整个墙体除墙角外比较完整,没有大的裂缝,墙体裂缝与局部破坏图见图 3.

## 4 试验结果分析

### 4.1 滞回曲线和耗能分析

分析试件的滞回曲线(见图 4),试件 W-1 滞回曲线,在第一、三象限都有明显的下降段,分别达到推、拉向的极限荷载时,荷载即开始下降,没有出现塑性平台,而且曲线下降段的斜率较大,表现出明显的脆性特征.

W-2 滞回曲线,曲线第一象限内有下降段,在第三象限内没有下降段,墙体推向破坏早于拉向,这是由于墙体加载拉杆上螺栓出现松动,导致试件拉向实际位移小于理论加载位移,曲线推拉不对称. 相对试件 W-1,其骨架曲线在第一象限内有较长的塑性平台,表现出相对较好的延性. 滞回曲线在推向比较饱满.

由于试件 W-2 第三象限(受拉方向)滞回曲线不能反映构件的实际抗震性能,当采用耗能系数计算试件的耗能能力时,只采用第一象限的滞回曲线计算(结果见表 2),可看出试件 W-1 耗能能力比 W-2 略强,这是因为试验时,试件 W-2 与基础分开,出现滑移,整个墙体除墙角破坏外几乎没有裂缝,比较完整.

### 4.2 墙体水平承载力分析

观察表 2 中数据,W-2 的开裂荷载和极限荷载要明显高于 W-1,W-2 极限荷载相对 W-1 提高了 15%,说明内置绳网能有效抵制夯土墙体内裂缝的开展,延缓墙体开裂,对墙体的极限承载力提高明显. 另外,由于试验墙体混凝土基础表面比较光滑,导致加载时整体性较好的墙体 W-2 在未剪切破坏前侧向偏移出水平加载轴线,墙角侧向摩擦破坏,墙体承载力提前停止增长,否则,墙体水平承载力将会更高.

对照表 1 计算所得的模型在不同设防烈度下的计算地震力,可以看出:两种方法建造的生土墙水平极限承载力都大于 7 度设防烈度、略小于 8 度设防烈度对应的计算地震力.

表 2 墙体开裂荷载、极限荷载及相应的位移

Tab. 2 Cracking load, ultimate load and corresponding displacement of the wall

编号	开裂荷载 /kN	开裂荷载对应位移 /mm	极限荷载 /kN	极限荷载对应位移 /mm	极限位移 /mm	延性系数	耗能系数
W-1	8.66	0.5	46.34	9	12	2.10	1.61
W-2	17.53	1.5	53.33	7	12	2.48	1.42

### 4.3 墙体变形性能分析

图 4 骨架曲线和表 2 数据显示试件 W-1 在 9 mm 达到极限荷载后,荷载下降较快,加载到 12 mm 其荷载值下降到极限荷载 85% 以下,延性较差;试件 W-2 骨架曲线荷载达到峰值后,下降相对较慢,延

性相对较好,表明内置绳网措施有利于提高墙体的后期变形能力。

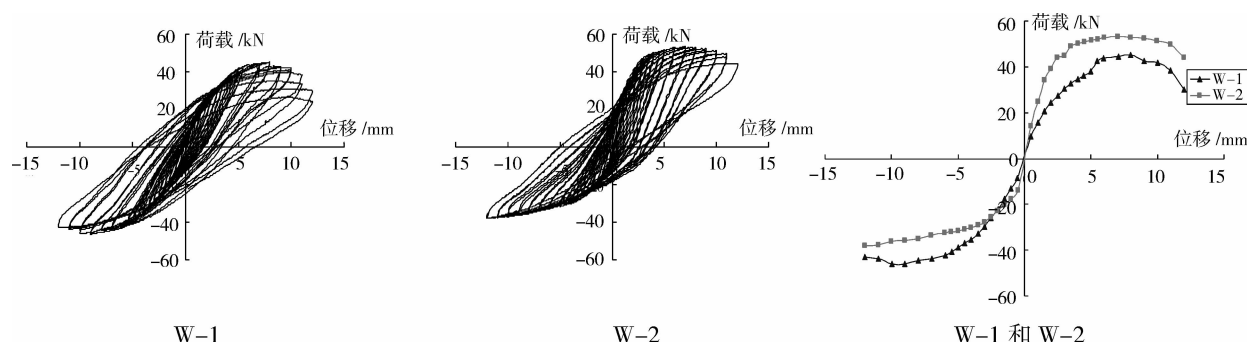


图 4 滞回曲线与骨架曲线

Fig. 4 Hysteretic loop and skeleton curve

图 5 墙体剪切变形曲线显示,试件 W-1 在推拉加载位移达到  $\pm 10$  mm 时,墙体对角线方向剪切变形位移分别达到 4 mm 和 8 mm 左右,而试件 W-2 在整个试验中墙体对角线方向剪切变形位移不超过 1 mm,墙体整体并未破坏,而是墙体根部与基础间的摩擦力引起的墙体底部破坏。

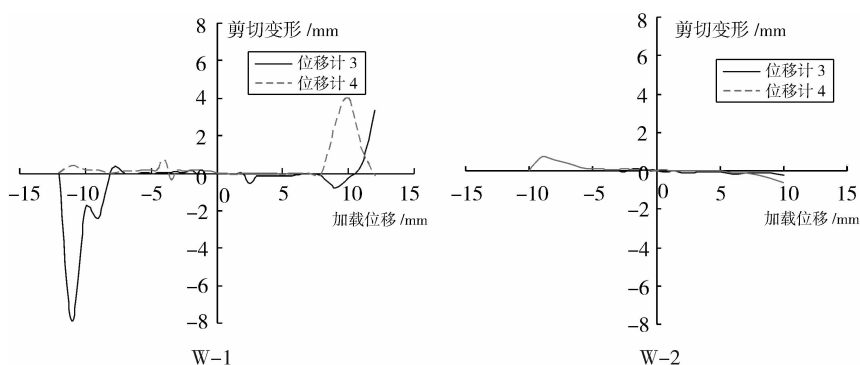


图 5 墙体剪切变形曲线

Fig. 5 Shear deformation curve

#### 4.4 墙体破坏机理分析

分析墙体试验结果,普通

夯土墙由于土体材料的离散性和施工的偶然性,使得墙体各部分的抗剪能力有差别,这就使得墙体破坏形态各不相同,但类似砌体结构墙体剪切破坏特征,反复推拉使得墙体裂缝在向 X 型裂缝发展的过程中,墙体中施工薄弱部位的初始裂缝或初始缺陷与加载中的斜剪裂缝贯通,使得裂缝的发展方向变化,引起墙体抗剪薄弱部位的土体损坏,而不能形成完整的 X 型主裂缝,但临界裂缝都是在 X 型裂缝的某部分发展,引起损坏,使得墙体丧失承载能力。

类似于钢筋混凝土结构墙体中的钢筋和混凝土,只有合适的材料匹配应用才能使结构或构件表现出优良的力学性能,内置绳网承重夯土墙体由于将土体的抗压特性与绳索的抗拉特性相结合,改善了夯土墙的抗剪能力,对夯土墙的水平承载和变形能力有较大提高,并且由于绳网的存在,使得夯土墙的整体性大大增强,试验结果也表明内置绳网夯土墙的破坏是由于墙体的局部破坏,而不是普通夯土墙的剪切破坏。

## 5 结 论

(1)与传统夯土墙破坏是由于墙体的剪切破坏相区别,内置绳网承重夯土墙由于内置绳网增强了墙体的整体抗剪切能力,在试验中其破坏是由于墙体与基础的偏移摩擦引起墙角局部破坏丧失承载能力。

(2)内置绳网承重夯土墙体由于将土体的抗压特性与绳索的抗拉特性相结合,使得夯土墙构件表现出较好的力学性能,提高了夯土墙的水平承载和变形能力,提高了承重夯土墙的抗震性能。

(3)在生土结构中,将内置绳网承重夯土墙构件中的绳网与房屋中的其他构件相连接,如屋盖、木梁木柱、基础等,可以提高房屋的整体性,改善生土结构房屋的抗震性能。

## 参考文献 References

- [1] 王毅红,李 丽. 村镇既有生土结构房屋抗震性能现状分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(s1):462-467.  
WANG Yi-hong, LI Li. Research and analysis on aseismic behavior of existing country raw-soil Structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(s1):462-467.
- [2] 王毅红,卜永红. 我国村镇民居的建造习惯与抗震性能评析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(3):60-67.  
WANG Yi-hong, BU Yong-hong. Assessing on construction habituation and seismic behavior of village and town building in china[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(3):60-67.
- [3] 常卫华,王建卫,徐福泉. 村镇生土住宅结构现状研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(s1):375-378.  
CHANG Wei-hua, WANG Jian-wei, XU Fu-quan. Study on existing situation of adobe and rammed earth building construction in town and village[J]. Building Structure, 2010, 40(s1):375-378.
- [4] 石玉成,林学文. 黄土地区生土建筑震害特征及防灾对策研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3):87-92.  
SHI Yu-cheng, LIN Xue-wen. Earthquake Damage Characteristics of raw soil building loess areas and disaster prevention countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3):87-92.
- [5] 王毅红,苏东君. 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:自然科学版, 2007, 39(4):451-455.  
WANG Yi-hong, SU Dong-jun, et al. Experimental study on seismic behavior of raw-soil structure with rammed earth wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(4):451-455.
- [6] 卜永红,王毅红,李 丽,等. 不同夯筑方法的承重夯土墙体抗震性能试验研究[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(6):72-76.  
BU Yong-hong, WANG Yi-hong, LI Li, et al. Experiment on seismic behavior of raw-soil structure with rammed earth walls in different construction methods[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(6): 72-76.
- [7] 刘 挺. 生土结构房屋的墙体受力性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2006.  
LIU Ting. Experimental study on bearing performance of raw-soil structure walls[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.

## Study on seismic behavior of the rammed earth walls with built-in rope nets

BU Yong-hong<sup>1</sup>, WANG Yi-hong<sup>1</sup>, HAN Gang<sup>2</sup>, LI Li<sup>3</sup>

(1. School of Construction Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research, Xi'an 710082, China;

3. Department of Civil Engineering, Ningxia Construction Vocational and Technical College, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** A new design of rammed earth walls with built-in rope nets with its construction technology was proposed. Two specimens were built by way of the new construction technology and traditional construction technology, with the mechanical behavior and seismic behavior studied. Vertical loading and low cycle reversed horizontal loading were carried out on specimens aimed to study the failure process, failure mode, hysteretic curve and skeleton curve feature. The horizontal bearing capacity and deformation capacity of the walls also were studied, with the influence of the built-in rope nets analyzed. Test results indicated that compared with the traditional construction method, the horizontal bearing capacity and deformation capacity of the new design wall was improved by built-in rope nets construction method. Thus, with the built-in rope nets rammed earth walls, the integrity of the raw-soil structure houses is strengthened, and the seismic behavior improved.

**Key words:** raw-soil structure; rammed earth wall; built-in rope nets; construction technology; seismic behavior; experimental study