

# 砖柱加强的夯土墙体抗震性能试验研究

张 坤, 王毅红, 梁 捷, 张又超, 仲继清

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了改善我国传统方法建造的夯土墙体抗震性能, 提出砖柱锚杆构造和砖柱配筋砂浆带构造两种新型夯土墙体, 通过 5 片 1:3 缩尺墙片模型试验, 观察各试件的破坏过程与形态, 分析试件的滞回曲线、骨架曲线特征, 对比采取构造措施与不采取构造措施墙体的水平承载力和变形能力, 研究构造措施对夯土墙体受力性能及变形性能的影响。研究表明, 与传统夯土墙相比, 采用砖柱锚杆与砖柱配筋砂浆带混合构造的夯土墙的极限承载力和变形能力提高, 破坏的脆性特征明显改善, 此类构造用于实际生土结构, 可增强生土结构房屋的整体性, 提高其抗震能力。

**关键词:** 生土结构; 夯土墙; 砖柱锚杆; 配筋砂浆带; 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(2015)03-0382-06

## Experimental study on seismic performance of rammed earth wall reinforced with brick columns and reinforcement mortar belt

ZHANG Kun, WANG Yihong, LIANG Jian, ZHANG Youchao, ZHONG Jiqing

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic performance of rammed earth wall by traditional building method, the two new rammed earth wall with the brick column anchor structure and brick column reinforced mortar are proposed. Through five walls model test with 1:3 scaled-down, failure process and the form of each specimen were observed, the hysteresis curves and skeleton curves were studied. The horizontal bearing capacity and deformation capacity of the walls were compared between wall with structural measure and without it, and the influence of stress performance and deformation performance of rammed earth wall by structural measures were studied. Test results indicated that compared with traditional rammed earth walls, ultimate bearing capacity and deformation capacity of rammed earth walls after taking brick column anchor and brick column reinforced mortar mixed structure are improved, brittleness of damage is also improved obviously. This kind of structural measure used for actual adobe structure could strengthen the integrity of the row-soil structure houses and improve the seismic behavior.

**Key words:** raw-soil structure; rammed earth wall; brick column anchor; reinforced mortar; seismic performance; experimental study

生土结构民居在我国村镇地区仍大量存在, 生土房屋就地取材造价低廉、技术简单、绿色环保、保温隔热性能优越, 但传统营建工艺方法使生土房屋结构抗震能力不足, 限制了生土房屋的推广及应用<sup>[1-4]</sup>。历次地震后的宏观调查表明<sup>[5-7]</sup>, 生土结构震害普遍十分严重, 在西部地区, 大地震中损坏或倒塌的农房半数以上为生土房屋, 针对上述问题, 本文研究提出砖柱锚杆构造、砖柱配筋砂浆带构造的新型生土夯土墙体, 通过 5 个模型试件的试验对比, 研究两种新型混合结构承重夯土墙体的抗震性能, 验证此类构造措施的有效性, 为行业标准《镇(乡)村建筑抗震技术规程》(JGJ161-2008)的修订提供试验依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

夯土墙试件以单片土墙作为试验研究单元, 墙片尺寸为 1 650 mm×1 300 mm×240 mm (原型尺寸 4 950 mm×3 900 mm×720 mm)。

试验设计了 5 片 1:3 缩尺模型试件, 分别为素

夯土墙试件, 编号为 W-1; 带砖柱和锚杆拉结的夯土墙试件 2 个, 编号为 W-4-1、W-4-2(见图 1、2); 带砖柱和配筋砂浆带结构的夯土墙试件 2 个, 编号为 W-5-1、W-5-2(见图 1、2)。

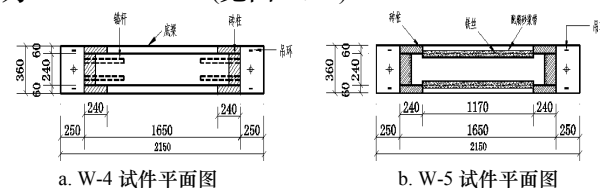


图 1 试件平面图

Fig.1 Plan of the walls

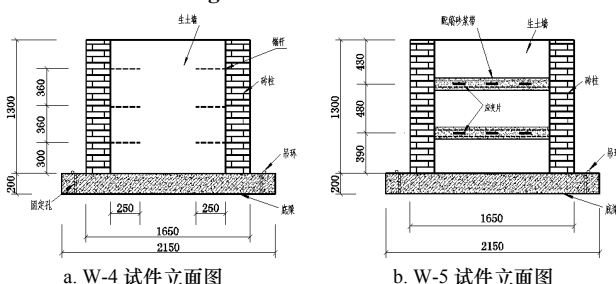


图 2 试件立面图

Fig.2 Elevation of the walls

收稿日期: 2014-11-05

修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 博士点基金《生土基混合结构抗震性能试验研究》(课题编号: 20130205110012)

作者简介: 张坤(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事结构工程抗震及生土方面研究. E-mail: 491543584@qq.com

表 1 模型与原型相似关系  
Tab.1 Similarity relationship between model prototype

| 物理量  | 长度  | 质量  | 位移  | 弹性模量 | 应变  | 应力  | 弯矩   | 轴、剪力 |
|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|
| 相似关系 | 1:3 | 1:9 | 1:3 | 1:1  | 1:1 | 1:1 | 1:27 | 1:9  |

表 2 土工试验结果  
Tab.2 Results of soil test

| 名称 | 最优含水率 /% | 最大干密度 /g·cm <sup>-3</sup> | 粘聚力 /kPa | 内摩擦角 /° |
|----|----------|---------------------------|----------|---------|
| 素土 | 18.2     | 1.72                      | 61.32    | 33.64   |

模型与原型的相似参数关系见表 1 所示, 夯土墙体材料性能参数见表 2 所示. 试验采用钢筋混凝土梁模拟实际生土结构房屋的基础, 梁的表面为浇筑混凝土后的自然毛面, 和实际结构中的毛石基础面较为接近, 但比毛石基础面的抗滑能力低. 在室内养护 28 d 后开始在底梁上夯筑墙体, 夯土墙完全按民间工艺制作, 模具采用定型钢模板, 模板高度 300 mm, 每层虚铺 150~180 mm, 夯实至 100 mm. 夯土材料现场测得含水量为 18.9%, 略大于最优含水率<sup>[8]</sup>. 试件在室内养护三个月后砌筑砖柱, 砌筑完成后继续室内养护一个月后开始试验.

墙体试件测点布置位置见图 3 所示. 测点 1~4 分别安装百分表, 其中 1、2 测点监测在底梁与地面

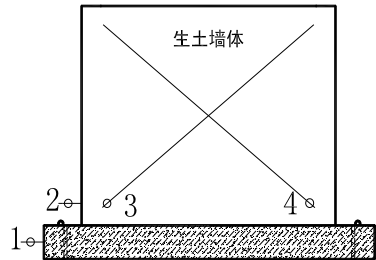


图 3 试件测点布置  
Fig.3 Measuring points on walls

2 试验结果与分析

2.1 试验破坏过程及破坏形态

试验加载过程中, 试件经历了弹性、弹塑性和破坏三个工作阶段, 全部 5 个试件均为剪切破坏. 墙体破坏形态见图 5 所示, 试件随位移的循环而表现出的试验现象描述如下.

W-1 试件在拉 0.5 mm 时墙体中部、靠近初始水平裂缝下方出现细微斜裂缝; 随着位移的增加, 在初始的水平和竖直干缩裂缝下方出现的拉向 45°斜裂缝与初始裂缝相交, 而推向裂缝一直未出现; 推 9 mm 时, 墙体出现贯通裂缝, 墙根略有松动, 整个墙体有被抬起迹象; 位移继续增大, 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, 在推 12 mm 时, 多数裂缝已发展完全, 墙体松动破坏, 试验结束.

W-4-1 试件在推 1 mm 时收缩通缝处出现多条

间、墙体与底梁间是否产生滑移; 3、4 测点测定墙体在两个 45 度对称方向的剪切变形; W-5 试件在各砂浆带表面沿长度方向分别布置三个应变片(见图 2), 通过应变测试数据分析砂浆带在低周反复荷载作用下的变形情况, 进而研究砂浆带受力参与的情况.

1.2 加载装置与加载制度

试验时, 模拟墙体实际受荷状态, 在墙顶施加恒定竖向荷载和低周反复水平荷载.

竖向荷载是根据承重夯土墙房屋的实际尺寸, 按带阁楼的木屋盖瓦屋面房屋的实际荷载计算, 为 529.83 kN. 竖向荷载加载前, 为保证荷载均匀作用在墙体上, 在墙顶平铺 20~30 mm 厚水泥砂浆找平层, 然后安装工字钢, 将轴力稳压装置的集中荷载转化为均布荷载作用在墙顶, 一次加至缩尺试件的设计竖向荷载 58.87 kN, 维持恒定, 并一直保持到试验结束.

低周反复水平荷载由美国 MTS 公司生产的 50T 电液伺服作动器施加, 作用在墙体平面内, 试验装置见图 4. 为较好观察试件破坏过程, 试件加载采用位移控制, 每级 0.5 mm, 加至 4.0 mm 后, 每级 1.0 mm; 加至 10.0 mm 后, 每级 2.0 mm, 各循环 2 次, 加载速度 0.2 mm/s, 直至试件破坏为止.

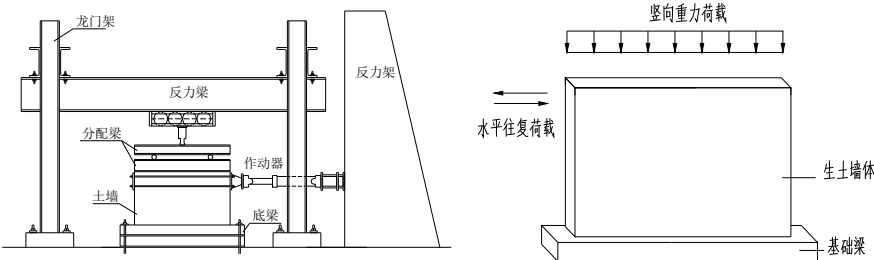


图 4 试验装置图  
Fig.4 The pictures of test setup

细小裂缝; 随着位移的增加, 新裂缝不断出现, 主要是距墙底 260 mm、550 mm 的两条水平通缝, 以及在推 2.5 mm、拉 2.0 mm 时两个方向的斜裂缝, 由加载板下方斜向延伸至墙底, 和原始收缩裂缝贯通; 推 6 mm 时墙底两条通缝完全形成, 出现鼓土掉皮现象, 通缝间的斜缝将墙体分割成数块; 推 14 mm 时砖柱开始出现多条竖向裂缝; 推 18 mm 时裂缝发育完全, 试件破坏.

W-4-2 试件在拉 1 mm 时原始受压竖向裂缝向上延伸; 拉 9 mm 时距墙底 300 mm 处出现水平通缝, 伴随大量斜裂缝出现, 且斜裂缝之间开始相互贯通、延伸, 主要和加载板下方通缝、受压竖向裂缝相交; 拉 14 mm 时加载板处砖柱开裂, 有滑移的趋势; 推 24 mm 时出现剪切斜裂缝, 和通缝贯通, 砖柱滑移、开裂, 试验结束.

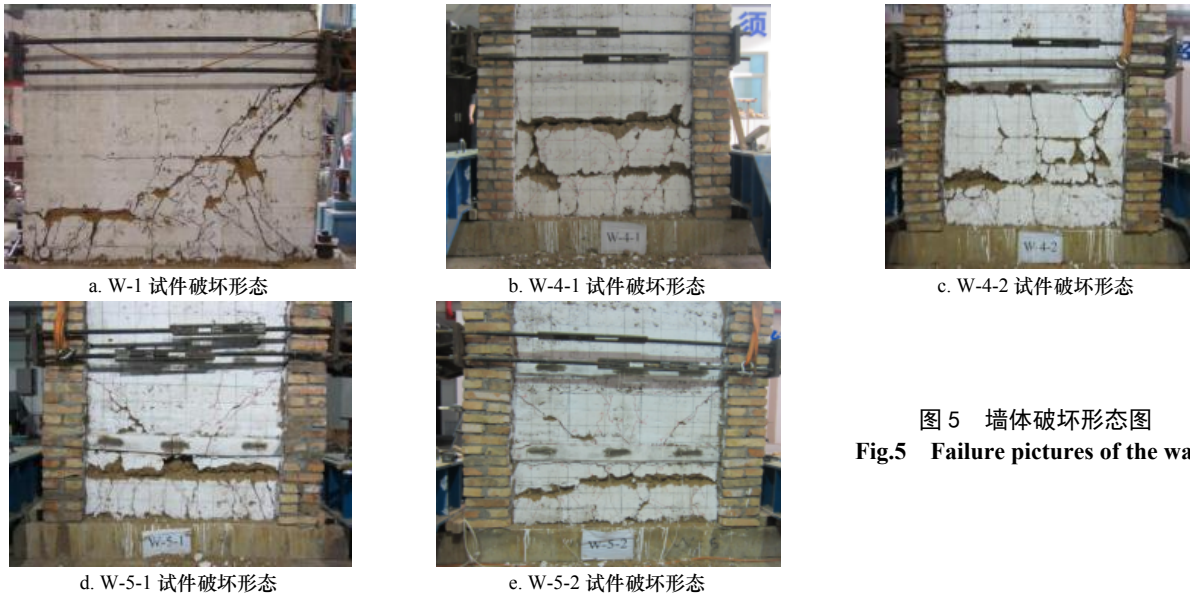


图 5 墙体破坏形态图  
Fig.5 Failure pictures of the walls

W-5-1 试件在推 1.5 mm 时砂浆带角部出现斜缝;拉 4.0 mm 时,出现沿 45° 方向的斜裂缝,并随着位移增加,斜缝两头继续发展,向下延伸至墙底,和原始收缩裂缝贯通,向上延伸至加载杆下方,在底部砂浆带处裂缝被断开;位移加载至拉 10 mm 时,砖柱被抬起,距墙底高 280 mm 处通缝形成,伴随鼓皮掉渣现象;推 12.0 mm 时,底部砂浆带突然出现三条竖向裂缝;推 14.0 mm 时,推向剪切斜裂缝出现,从加载板处一直延伸至砂浆带,和砂浆带处竖缝贯通,继续向下延伸,和砂浆带底部通缝相接;继续加载,拉 20 mm 时,砂浆带中铁丝被拉断,砂浆带中部和墙体完全分离,两边砖柱底部也出现大量竖向裂缝,停止加载,试验结束.

W-5-2 试件在推 1.5 mm 时砂浆带和墙体连接底部出现水平裂缝;拉 8.0 mm 时,砂浆带下部 100 mm 处出现水平通缝,并伴随鼓皮掉渣现象;位移加载至拉 12 mm、推 14 mm 时,两条对称的 45° 剪切斜裂缝分别出现,由加载板下方开始一直延伸至砂浆带,越过砂浆带和通缝相交;推 16 mm 时,通缝处已开始大量掉土,砂浆带部分已翘起,有和墙体脱离的趋势;推 20.0 mm 时,砂浆带已完全凸起,两边砖柱出现竖向裂缝,停止加载,试验结束.

由于混凝土底梁表面较光滑,和夯土墙的粘结相对较弱,在加载过程中墙体有翘起的现象,导致试件在底梁上滑移,甚至偏移水平加载轴线,影响墙体破坏形态,使墙体承载能力不能充分发挥,提前退出工作<sup>[9-11]</sup>. 实际生土结构房屋纵横墙共同工作,墙体与基础底面在在水平作用下发生滑移的可能性很小,且实际毛石或砖基础、灰土基础与生土墙体的接触面比试验制作的混凝土底梁粘结抗滑性

能高,因此现阶段房屋破坏的薄弱部位是上部墙体.

本次试验为防止墙体翘起滑移现象,在墙根处铺设方木,固定于压梁之下,试验过程中发现墙体有轻微翘起现象,但几乎未出现滑移,基本保证了试验加载的完整性. 本课题组多次试验均出现墙体与基础接触面的翘起滑移现象,或多或少地影响了试验结果的准确性. 若改进试验装置,使墙体与基础间不发生滑移翘起现象,墙体所能承受的水平荷载还有增加的可能,这也是在后续试验中尚待进一步解决的问题. 从另一个角度分析,墙体在采取各种构造措施后,承载力有较大的提高,则实际房屋中墙体与基础面的粘结滑移问题也应引起重视. 当墙体与基础接触面水平粘结抗剪能力低于房屋墙体水平抗力时,也会发生类似在实验室出现的滑移破坏形态,即当生土墙体抗水平作用能力提高后,墙体与基础的连接措施或为新的研究课题.

2.2 墙体水平承载能力和变形能力

试件在水平荷载作用下的开裂荷载、极限荷载以及对应的位移见表 3 所示. 按底部剪力法计算并考虑缩尺模型的相似关系,得到模型试件的水平地震剪力值见表 4 所示.

表 3 墙体开裂荷载、极限荷载及相应位移  
Tab.3 Cracking load ,ultimate load and corresponding displacement of the wall

| 试件    | 开裂荷载<br>/kN | 开裂荷载<br>对应位移<br>/mm | 极限荷载<br>/kN | 极限荷载<br>对应位移<br>/mm | 极限位移<br>/mm |
|-------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| W-1   | 8.66        | 0.5                 | 46.34       | 9                   | 12          |
| W-4-1 | 23.42       | 1                   | 49.20       | 8                   | 16          |
| W-4-2 | 18.30       | -1                  | 56.79       | 14                  | 24          |
| W-5-1 | 22.60       | 1.5                 | 51.90       | 12                  | 20          |
| W-5-2 | 20.05       | 1.5                 | 50.02       | 16                  | 20          |



表 4 地震烈度和墙体水平地震作用的关系 (kN)  
Tab.4 Relationship between seismic intensity and horizontal geological process on walls (kN)

| 设防烈度                    | 6 度   | 7 度   | 7 度(0.15g) | 8 度   |
|-------------------------|-------|-------|------------|-------|
| $\psi=a_{\max}G_{eq}/9$ | 14.72 | 28.21 | 44.15      | 55.18 |

注: 表中 $\psi$ 为缩尺模型对应的地震作用, 式中  $G_{eq}=1104\text{kN}$ ,  $a_{\max}$  值按《镇(乡)村建筑抗震技术规程》(JGJ161-2008)确定, 设防烈度 6、7、7 (0.15g)、8 度时,  $a_{\max}$  分别取 0.12、0.23、0.36、0.45。

观察表 4 中数据, 砖柱锚杆拉结的试件试验结果差别较大, W-4-1 开裂荷载高, 但极限荷载和极限荷载所对应的位移较小, W-4-2 开裂荷载小, 但极限荷载和极限荷载所对应的位移在所有试件中最大, 分析可知土体材料的离散性和夯土墙施工中各种偶然因素的影响导致试验结果差异较大; 采用砖柱配筋砂浆带构造措施的两个试件得到的试验结果数据离散性较小, 对墙体承载能力增加不显著, 但试件开裂位移、极限荷载对应位移以及极限位移较未采取的试件明显提高。

选取 W-5-1 试件配筋砂浆带的应变片测试数据进行分析, 砂浆带的应变和加载位移的关系曲线见图 6, 砂浆带破坏现象见图 7。

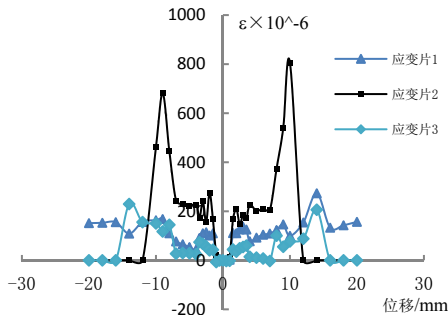


图 6 砂浆带应变与加载位移关系曲线  
Fig.6 Strain and load-displacement curve of mortar



图 7 砂浆带裂缝图  
Fig.7 Cracks map of mortar

从图 6 中可以看出, 随着加载位移的增长, 砂浆带的变形随之增大, 并且承受着一定的拉力, 试验加载后期砂浆带出现裂缝(见图 7), 包裹在内的铁丝被拉断。结合试验现象分析可知, 砂浆带对墙体的环箍作用较大, 可以有效延缓墙体开裂, 并抑制裂缝发展, 明显改善墙体的脆性破坏特征。

通过不同混合结构的夯土墙体的对比试验可

看出, 设置砖柱砂浆带(W-5)的效果优于设置砖柱锚杆(W-4)的效果。从墙体最终破坏图分析, W-5 的斜裂缝发育完全, 两条砂浆带之间的墙体破坏现象较轻, 砂浆带与砖柱很好的形成了生土墙体的束框, 而 W-4 的锚杆不连通, 锚杆方向与水平受力方向一致, 不能将两侧砖柱拉结形成共同受力模式; 从理论分析, 在墙顶设圈梁或设置贯通锚杆, 对夯土墙体的承载力提高可能更好, 但这还有待下一步的试验论证。

结合上述分析和表 3 数据可知, 采取以上构造措施墙体试件的开裂荷载、极限荷载以及其对应位移较未设置的夯土墙都有不同程度的提高, 说明砖柱、配筋砂浆带可以有效约束生土墙体的变形, 在一定程度上提高墙体承载能力, 明显提高墙体的整体性和延性性能。

对比分析表 3 和表 4 中的数据, 素夯土墙试件 W-1 在 6 度时开裂, 7 度时接近极限荷载; W-4 和 W-5 试件在接近 7 度时开裂, 水平极限荷载大于 7 度, 略小于 8 度对应的计算地震力。设置砖柱、配筋砂浆带的夯土试件的抗裂能力、承载能力、整体稳定性等都得到了不同程度提高, 可以在 8 度以下地区使用。

2.3 滞回曲线及骨架曲线

试件荷载-位移滞回曲线和骨架曲线见图 8 所示。结合试验分析各曲线可看出以下特点:

(1) 加载初期试件处于弹性阶段, 滞回曲线接近直线, 滞回环面积较小; 墙体出现第一条斜向剪切裂缝, 各曲线出现少量残余变形, 曲线斜率开始下降, 刚度不断退化, 滞回环面积增大, 试件进入弹塑性阶段; 加载后期, 试件裂缝发育完全, 宽度较大, 在荷载作用下反复张开闭合, 滞回环由初始的梭形逐渐变为弓形。

(2) 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。

(3) 带砖柱试件 W-4 和 W-5 的滞回曲线在后期卸载过程中会出现平行于纵轴的区间段, 即在卸载过程中试件所受的力在减少, 而位移却几乎未变化, 结合试验分析可知试件制作过程中墙体和砖柱粘结处有空隙, 试验后期, 加载板处砖柱出现滑移后, 加剧了曲线的这种趋势。

(4) 从试件 W-4-1、W-4-2 滞回曲线可以看出, 试件加载初期, 曲线与试件 W-1 相比趋势较陡, 试件初始刚度较大; 随着位移的增加, 曲线斜率变化较为平缓, 刚度退化较慢; 在到达峰值后, 由于砖柱的存在, 试件表现出一定的延性性能, 曲线在第

一三象限内有塑性平台出现,试件 W-4-2 表现尤为明显;曲线下降阶段斜率随反复加载而逐渐降低,试件刚度逐渐退化.从骨架曲线可以看出,试件 W-4-1、W-4-2 承载力较试件 W-1 有所提高,且试件 W-4-2 将近提高 22%,表明砖柱参与了墙体受力,一定程度提高了墙体的承载力和延性性能.

(5) 试件 W-5-1、W-5-2 滞回曲线整体趋势和 W-4 试件类似,墙体初始刚度较 W-1 试件较大,加

载过程中曲线斜率变化较为平缓,刚度退化较慢;曲线拉向塑性平台表现较为明显,表明砖柱和配筋砂浆带参与工作,墙体的延性较 W-1 试件有很大的提高.试件 W-5-2 墙体夯筑质量较差,墙根部位夯土较虚,试验加载至试件荷载峰值后,墙根开始成块掉土,荷载急剧下降,但是由于砖柱和配筋砂浆带的约束,墙体整体稳定性良好.

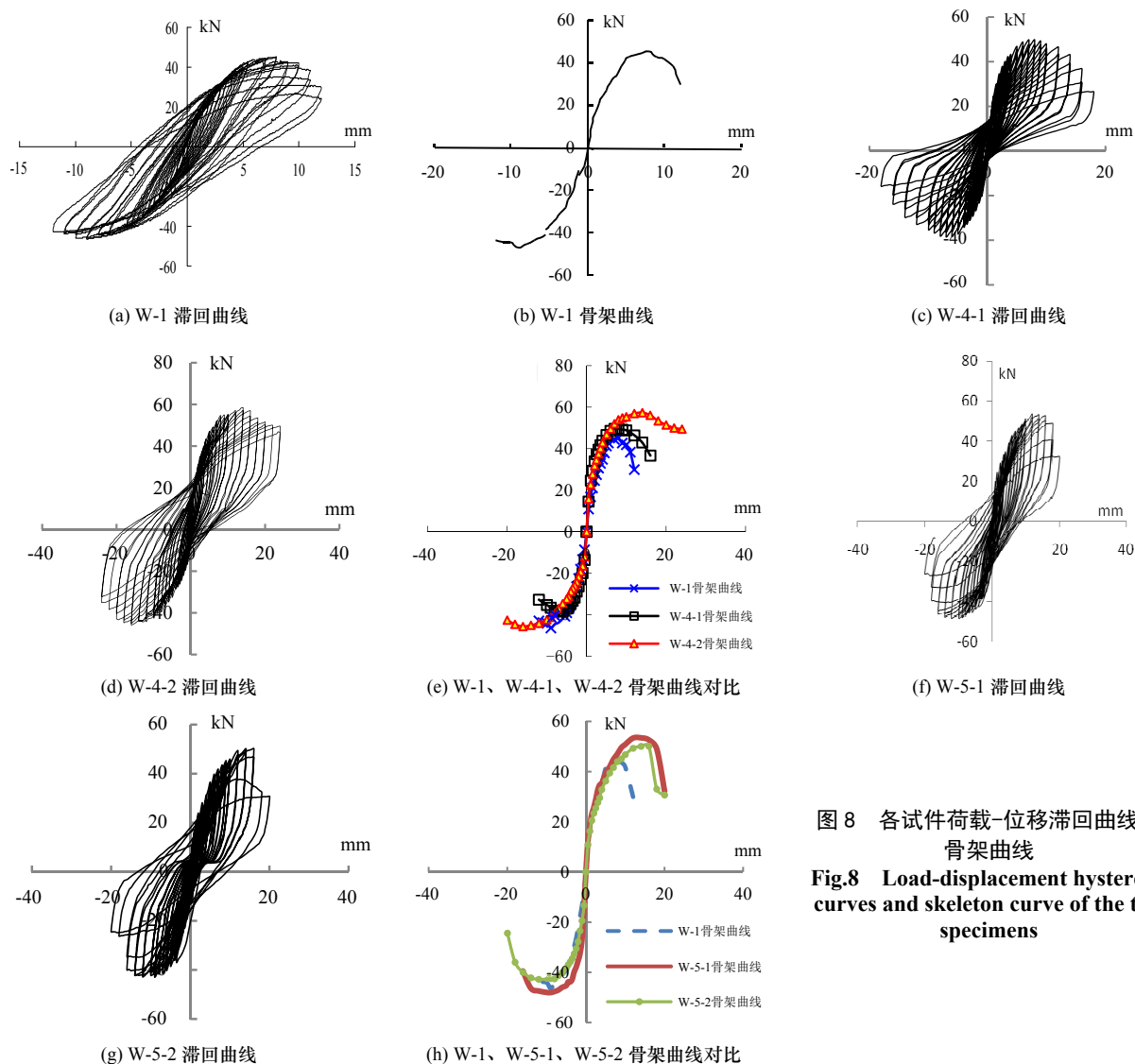


图8 各试件荷载-位移滞回曲线及骨架曲线

Fig.8 Load-displacement hysteresis curves and skeleton curve of the test specimens

### 3 结论

(1) 带砖柱和锚杆拉结的夯土墙试件主要从夯土接茬的通缝处破坏,剪切斜缝发育不充分;设置砖柱和配筋砂浆带构造的夯土墙试件属于典型的 X 型剪切破坏,推、拉方向剪切斜缝发育完全,当配筋砂浆带断裂或脱离墙体丧失承载力后两条剪切斜缝和砂浆带下方通缝贯通,墙体破坏.

(2) 设置砖柱和锚杆、砖柱和配筋砂浆带构造可有效约束夯土墙体的变形,抑制墙体裂缝发展,

提高墙体的整体稳定性,改善传统夯土墙体的脆性破坏特征,防止墙体破碎倒塌,使夯土墙体的承载力和延性性能得到提高.

(3) 试验加载过程中采取了措施,防止试件在混凝土底梁上翘起或滑移,使墙体的承载能力和变形能力得到充分发挥.实际工程中亦应注意采取措施加强基础和墙体的抗剪能力和抗滑性能,有助于改善房屋的整体受力性能.

(4) 试验中砖柱受加载工字钢作用的影响,使墙体两端的砖柱与墙体共同受力,对墙体的各项力学性能影响显著,因此在实际工程中,应保证砖柱和屋架、梁等构件有可靠连接,使其共同受力.配筋砂浆带在施工中应采取措施加强和墙体的粘结,否则在荷载作用下会脱离墙体,失去对墙体的拉接和约束作用.

(5) 对比两种混合结构生土墙体,砖柱配筋砂浆带构造措施对墙体的延性影响相对略大,砖柱锚杆构造措施对墙体承载能力影响相对略高.

(6) 试验中受到试件的数目和试验条件的限制,采用砖柱锚杆混合结构墙体试验结果差别较大,有待进一步试验研究;砖柱配筋砂浆带混合结构墙体中砂浆带对墙体的各项力学性能影响显著,所以砂浆带的位置、设置数目、强度以及和墙体的粘结措施等因素对墙体的影响有待于深入研究.

#### 参考文献 References

- [1] 王毅红,李丽,王冲锋,等.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 Yihong, Li Li, Wang Chongfeng, et al. Research and analysis on a seismic behavior of existing country raw Soil structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 462-467.
- [2] 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,2010,4(S1):375-378.  
CHANG Weihua, WANG Jianwei, XU Fuquan. Study on existing situation of adobe and rammed earth building Construction in town and village[J]. Building Structure, 2010, 4(S1): 375-378.
- [3] 周铁钢,段文强,穆钧,等.全国生土农房现状调查与抗震性能统计分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2013,45(4):487-492.  
ZHOU Tiegang, DUAN Wenqiang, MU Jun, et al. Statistical analysis and survey on the aseismatic performance of theraw-soil Building Status in China's rural areas[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2013, 45(4): 487-492.
- [4] 李少荣.既有村镇生土房屋安全性能评价研究[D].西安:长安大学,2012.
- LI Shaorong. Study on Safety Evaluation of Existing Town and Village Raw-soil Structure[D]. Xi'an: Chang'an university, 2012.
- [5] 崔彬彬.汶川地震中村镇建筑的震害分析及抗震减灾措施研究[D].西安:长安大学,2009.  
CUI Bingbing. Analyze of earthquake damage in village and research on seismic fortification measure[D]. Xi'an: Chang 'an university, 2009.
- [6] 王赞,张波.生土建筑在灾后重建中的应用研究[J].世界地震工程,2009,25(3):159-161.  
WANG Yun, ZHANG Bo. Research on application of raw soil buildings in reconstructions after earthquake disasters[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(3): 159-161.
- [7] 杨华.灾后重建背景下夯土墙结构民居抗震试验研究与示范[D].西安:西安建筑科技大学,2010.  
YANG Hua. Seismic test of rammed earth wall and reconstruction of demonstrate residence after Panzhuhua earthquake[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2010.
- [8] 岳星朝.生土基材料受压及受剪强度试验研究[D].西安:长安大学,2014.  
YUE Xingchao. The research of Raw soil base material compression and shear strength test[D]. Xi'an: Chang 'an university, 2014.
- [9] 王毅红,樊琨,陈全杰,等.村镇生土结构房屋抗震加固措施试验研究[J].工程抗震与加固改造,2011,33(6):77-81.  
WANG Yihong, FAN Kun, CHEN Quanjie, et al. Experimental Study on Anti-seismic Strengthening Measures on Raw-soil Structure Houses in Villages[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(6): 77-81.
- [10] 卜永红,王毅红,韩岗,等.内置绳网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,2013,45(1):38-42.  
BU Yonghong, WANG Yihong, HAN Gang, et al. Study on seismic behavior of the rammed earth walls with built-in rope nets[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2013, 45(1): 38-42.
- [11] 陈全杰.既有村镇生土结构房屋承重夯土墙体加固试验研究[D].西安:长安大学,2011.  
CHEN Quan Jie. Experimental Study on Reinforced-Ramming Walls of Existing Country Raw-soil Structure[D]. Xi'an: Chang'an university, 2011.

(编辑 桂智刚)