

文章编号:1673-2049(2018)03-0079-08

带竖向销键夯土墙抗震性能试验

刘 强¹, 童丽萍¹, 许启铿²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南工业大学 河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:为定量分析带竖向销键夯土墙的抗震性能,开展了6片带竖向销键夯土墙的水平低周反复荷载试验,分析了夯土墙的破坏过程和破坏形态,以植筋率、销键直径等为参数,研究了夯土墙滞回曲线、骨架曲线、承载力及变形性能、刚度退化规律和耗能能力等抗震性能。结果表明:夯筑分层处是夯土墙受力薄弱环节,竖向销键对夯土墙的抗侧承载力影响较小,对延性有比较显著的改善;随着植筋率的增加,延性系数先增大,后减小;随着竖向销键直径的增大,延性系数逐渐减小;竖向销键对夯土墙初始刚度有一定程度的削弱,对刚度退化趋势影响不明显;竖向销键可明显提升夯土墙耗能能力;各试件等效黏滞阻尼系数随加载进程波动较明显;极限位移状态下,各试件的等效黏滞阻尼系数在0.13~0.24范围;所得研究结果可为深入了解带竖向销键夯土墙的抗震性能及其实际应用提供理论依据。

关键词:夯土墙;竖向销键;低周反复加载;抗震性能;植筋率;延性

中图分类号:TU361

文献标志码:A

Experiment on Seismic Performance of Rammed Earth Wall with Vertical Pin

LIU Qiang¹, TONG Li-ping¹, XU Qi-keng²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. Key Laboratory of Grain & Oil Storage Building and Safety of Henan Province,
Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: In order to analyze the seismic performance of rammed earth walls with vertical pin quantitatively, the low cyclic loading tests on six rammed earth walls with vertical pin were carried out, and the failure process and failure forms of rammed earth walls were analyzed. Taking the rebar planting rate and the diameter of vertical pins as parameters, the seismic performances, such as hysteresis curves, skeleton curves, bearing capacity and deformation, stiffness degradation law, energy dissipation capacity, were studied. The results show that the rammed stratification is the weak link of rammed earth walls. The vertical pin has little influence on the lateral bearing capacity of rammed earth walls, and has a significant improvement on ductility. With the increase of the rebar planting rate, the ductility coefficient increases firstly and then decreases. With the vertical pin diameter increasing, the ductility coefficient decreases gradually. The vertical pin weakens the initial stiffness of the rammed earth wall and has no

收稿日期:2017-10-17

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAL03B03)

作者简介:刘 强(1989-),男,河南郑州人,工学博士研究生,E-mail:lq6564@163.com。

通信作者:童丽萍(1960-),女,陕西周至人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:tongliping@zhu.edu.cn。

obvious influence on the trend of the stiffness degradation, and the vertical pin can significantly enhance the energy dissipation capacity of rammed earth wall. The fluctuation of the equivalent viscous damping coefficient with the loading process is obvious; under the condition of the limit displacement, the equivalent viscous damping coefficient is in the range of 0.13-0.24. The Study results can provide a theoretical basis for indepth understanding the seismic performance of rammed earth wall with vertical pin and its practical application.

Key words: rammed earth wall; vertical pin; low cyclic loading; seismic performance; rebar planting rate; ductility

0 引言

夯土房屋是以生土为主要建筑材料,以层层夯实的夯土墙为主要承力构件的传统民居。夯土房屋具有浓郁的地域特色和民俗特色,承载着中国源远流长的传统建筑文化。由于夯土房屋具有易于取材、施工简单、造价低廉、冬暖夏凉等显著优势,时至今日在中国农村地区,尤其是中西部地区仍有较广泛应用。中国夯土房屋分布大多处于较为贫困和偏远的地区,许多位于地震多发区。由于夯土材料强度低等先天不足,加之夯土房屋多由当地工匠凭经验建造,基本没有考虑抗震设防,在历次地震中,大量夯土房屋出现墙倒屋塌,造成生命财产损失惨重,夯土房屋表现出较差的抗震性能^[1-5]。

夯土墙作为夯土房屋主要抗侧构件,其抗震性能直接影响房屋的结构安全。已有研究提出了设置砖柱、设置竹筋、内置绳网、设置铁丝网等多种技术措施并分析了各技术措施对夯土墙抗震性能的影响^[6-9]。这些研究所提出的技术措施对提高夯土墙的抗震性能均有显著作用,对后续研究也有较好的指导意义。在已有研究基础上,《镇(乡)村建筑抗震技术规程》(JGJ 161—2008)^[10]定性提出了夯土墙在上下层接缝处应设置木杆、竹竿等竖向销键以提高墙体的抗震承载力,但竖向销键植筋率、尺寸等因素对夯土墙抗震性能的影响尚不明确,并不能有效指导竖向销键应用于改善夯土墙抗震性能的工程实践。

为定量分析带竖向销键夯土墙的抗震性能,本研究选择植筋率、竖向销键直径为主要参数,开展带竖向销键夯土墙的水平低周反复荷载试验,分析墙体的破坏过程和破坏形态,研究夯土墙滞回曲线、骨架曲线、承载力及变形性能、刚度退化规律和耗能能力等抗震性能。所得研究结果可为深入了解带竖向销键夯土墙的抗震性能及其实际应用提供理论依据,从而进一步完善夯土房屋的结构设计方法及相

应规范规程。

1 试验概况

1.1 试件设计

根据河南省典型硬山搁檩式夯土房屋(双开间单屋架)的实际尺寸,取尺寸为 4 800 mm×3 600 mm×600 mm 的承重山墙为原型,采用 1:4 缩尺比例,试件尺寸为 1 200 mm×900 mm×150 mm。试验设计了 6 个试件,试件编号分别为 W1,W2,W3,W4,W5,W6,主要参数为植筋率、销键直径等,植筋率定义为竖向销键截面面积与夯土墙横截面面积的比。试件设计方案如表 1 所示。

表 1 试件设计方案

Tab. 1 Design Schemes of Specimens

试件编号	有无竖向销键	植筋率/%	销键直径/mm
W1	无		
W2	有	0.22(单排)	10.0
W3	有	0.44(双排)	10.0
W4	有	0.66(3 排)	10.0
W5	有	0.66(单排)	17.2
W6	有	0.66(单排)	22.5

按照传统夯筑工艺制作夯土墙试件,相应分层处设置竖向销键。试件 W1 不设置竖向销键,为对照组;试件 W2 的植筋方式及几何尺寸如图 1 所示,试件 W3,W4,W5,W6 与其类似。试验所用黏土取自当地郊区,选择均匀土质以保证黏土物理力学性能的一致性。竖向销键采用天然圆芯藤条,为减小试件所用天然圆芯藤条的力学性能差异,从每根长天然圆芯藤条中部截取长度为 180 mm 的藤条作为竖向销键。底梁采用热轧普通槽钢,型号为 22a;每根底梁长度为 1 700 mm,槽钢两端各切割一个圆弧形切口,以便于地锚连接。拆模后的夯土墙试件放置于实验室自然养护 30 d,如图 2 所示。养护期实验室平均温度为 31.5℃,空气湿度为 41%。试件养护结束后,紧贴墙体两侧底端,在底梁上焊接长

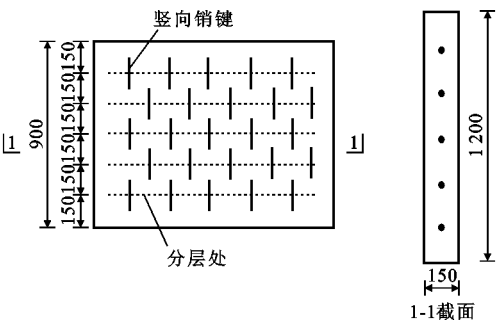


图 1 试件 W2 几何尺寸及构造(单位:mm)

Fig.1 Geometrical Dimensions and Details of Specimen W2 (Unit:mm)



图 2 拆模后的夯土墙试件

Fig.2 Rammed Earth Wall Specimen After Form Removal

50 mm、高 50 mm 的钢板,以限制墙体滑动。

1.2 材料性能

制作夯土墙试件的同时,各试件制备 3 个边长为 150 mm 的立方体试块。与各试件相对应,试块编号依次记为 B1~B6。试块与夯土墙试件在相同实验室环境中自然养护 30 d。各试件的土料试块抗压强度如表 2 所示。

表 2 土料试块抗压强度

Tab.2 Compressive Strengths of Soil Blocks						
试块编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6
抗压强度/MPa	1.35	1.17	1.02	1.08	1.15	1.01

参考《竹材物理力学性质试验方法》(GB/T 15780—1995)^[11],采用万能试验机进行 3 种直径的天然圆芯藤条试样的顺纹拉伸试验,从每种已截取完成的藤条中随机各抽取 10 根,试验加载速率控制为 20 mm·min⁻¹,根据拉伸应力-应变曲线计算该试样的顺纹抗拉强度和拉伸弹性模量^[12]。天然圆芯藤条试样的顺纹抗拉强度及拉伸弹性模量如表 3 所示。

1.3 加载方案

采用拟静力试验方法进行带竖向销键夯土墙的

表 3 藤条顺纹抗拉强度及拉伸弹性模量

Tab.3 Tensile Strength and Elasticity Modulus Along Grain of Canes

藤条编号	藤条直径/mm	顺纹抗拉强度/MPa	拉伸弹性模量/MPa
1	10.0	45.43	595.36
2	17.2	59.68	524.65
3	22.5	51.21	563.31

抗震性能试验研究^[13]。试验加载装置如图 3 所示,水平往复荷载由电液伺服作动器施加在墙体平面上,竖向荷载采用配置钢锭的方式施加。根据文献[14],夯土墙的竖向应力取 4.94 kPa,竖向荷载取 0.89 kN。加载制度参考《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[13],水平加载采用位移控制。正式试验前,以 0.5 mm 位移值预加反复荷载 2 次;正式试验时,每级位移增量为 1.0 mm,加载至 16.0 mm 后,每级位移增量为 2.0 mm;前两级加载循环 1 次,之后各级加载循环 3 次,加载制度如图 4 所示。试验中规定推力为正,拉力为负。水平荷载下降至极限荷载的 85% 以下,或墙体裂缝开展严重,墙体有倒塌危险时,结束试验。

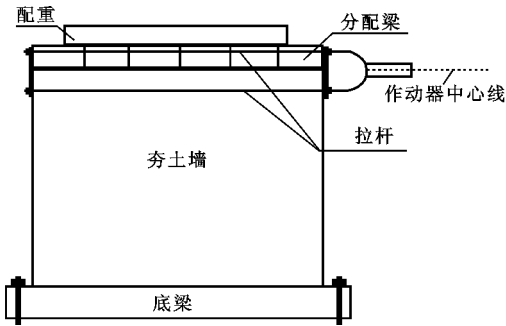


图 3 试验加载装置

Fig.3 Loading Device of Test

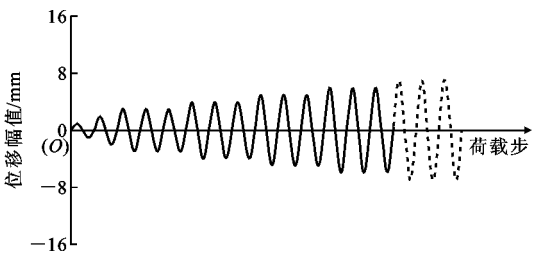


图 4 低周反复加载试验加载制度

Fig.4 Loading System of Low Cyclic Loading Test

1.4 量测方案

试验测试参数主要包括加载点的作用力及墙体不同高度处水平位移,各试件量测方案相同。测点布置如图 5 所示:位移计 T1,T2,T3 从上至下依次

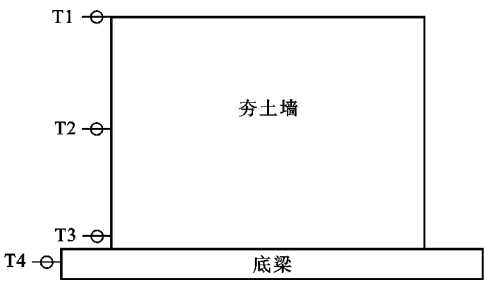


图 5 测点布置

Fig. 5 Arrangement of Measuring Points

监测墙体顶部、中部、底部水平位移;位移计 T4 用于监测底梁的水平位移,以确定其锚固情况;位移计量程均为 $\pm 50\text{ mm}$ 。

2 破坏现象

图 6 为 6 片夯土墙试件的最终破坏形态。总体上,所有墙体破坏过程和破坏形态类似:加载初期,夯土墙试件主要表现为局部水平裂缝及少量斜裂缝,水平裂缝多出现于夯筑分层处;随施加位移增大,墙体中部水平裂缝和斜裂缝发展明显,裂缝逐渐延伸、加宽,形成主裂缝;由于作动器施加的往复荷载作用,墙体上部两侧端板位置也出现水平裂缝;加载后期,裂缝进一步开展,墙体中部水平裂缝和斜裂缝逐渐贯通墙体;随位移进一步增大,水平裂缝下部墙体出现竖向裂缝,墙体出现明显沿主裂缝滑移以

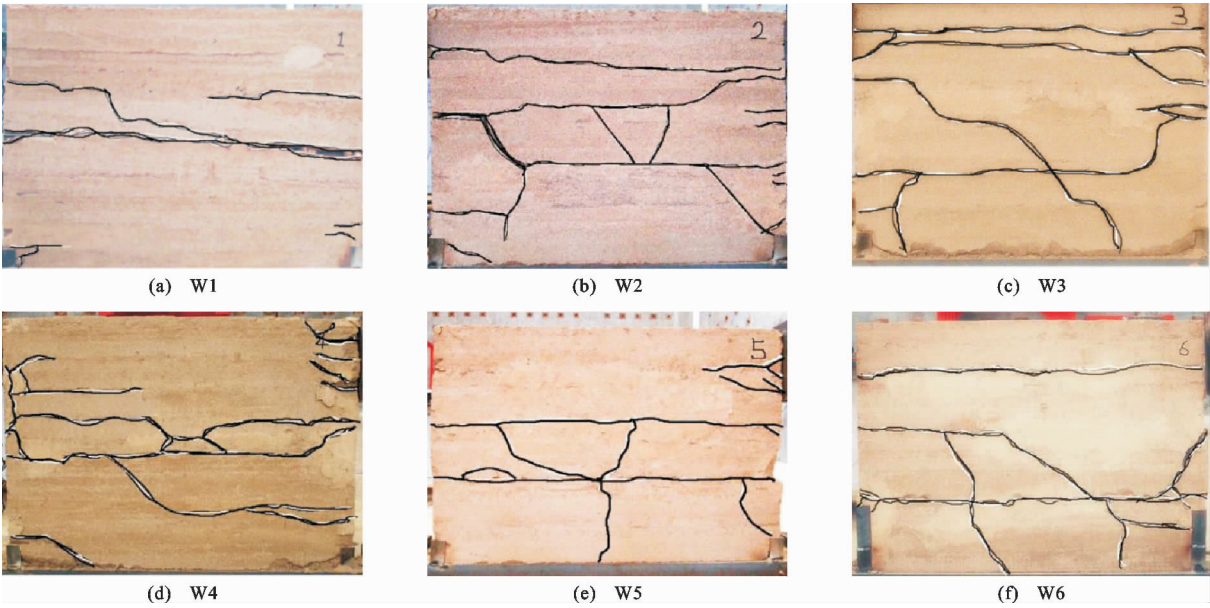


图 6 各试件破坏形态

Fig. 6 Failure Forms of Specimens

及被抬起的现象。墙体最终被水平通缝及斜裂缝分割为若干个较大块体,承载力退化,墙体破坏。

试件 W1 未设置竖向销键,与其他试件相比,其墙体裂缝最少,破坏主裂缝仅有水平通缝及拉向斜裂缝,推向未出现斜裂缝;裂缝主要位于墙体中部且沿夯筑分层处,墙体下部几乎没有裂缝。由于夯土墙传统营造中上下版筑之间仅做拉毛处理,分层处黏结强度远小于版筑内夯土强度,且版筑上下层缺乏有效的连接,墙体本身整体性较差,水平荷载作用下,不能发挥整个墙体的承载能力,夯土墙分层处是其受力薄弱部位。试件 W2~W6 均于夯筑分层处设置竖向销键,其破坏裂缝明显多于试件 W1,尤其是斜裂缝明显增多,说明竖向销键增强了夯土墙分层处的连接,改善了墙体的整体性,水平荷载作用下,夯土墙整体受力性能发挥更充分。

对比各试件破坏形态还可发现,设置竖向销键的墙体水平通缝仍出现于夯筑分层处,这主要是由于土体本身与竖向销键黏结较弱;试件养护结束后土体干缩,土体与竖向销键会发生一定剥离,进一步削弱了二者黏结;另外作为竖向销键的藤条较柔软,与夯土墙刚度差异明显,竖向销键与夯土墙协同受力性能一般。因此,尽管竖向销键可增强墙体整体性,但水平荷载作用下夯筑分层处仍然是其受力薄弱环节。

3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线

各夯土墙试件滞回曲线如图 7 所示。加载初期,各试件滞回性能基本相似,滞回曲线基本呈细长形,包围面积较小,卸载后的残余变形很小,墙体刚

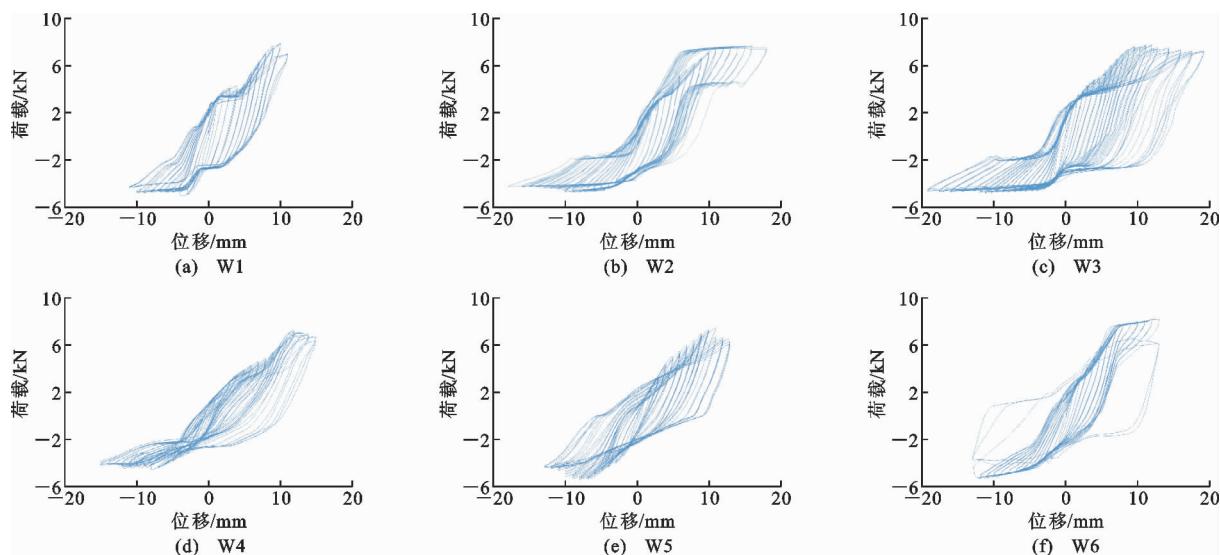


图7 各试件滞回曲线

Fig.7 Hysteresis Curves of Specimens

度退化不明显,墙体受力基本处于弹性阶段。对于试件 W1,当水平位移加载至 2~4 mm 时,滞回环逐渐向位移轴倾斜,刚度逐渐退化,滞回环面积增大,试件进入弹塑性阶段,同时滞回环出现捏缩现象,尤其是受拉方向更为明显。随着水平位移增大,滞回环面积继续增大,推拉向荷载逐步达到极限荷载,之后仅进行到下一级加载,水平荷载即下降到极限荷载的 85%,表现出明显脆性特征。

对于试件 W2,当水平位移加载至 2~11 mm 时,试件进入弹塑性阶段,滞回环轻微捏缩,滞回曲线形状与 W1 类似。随着水平位移增大,滞回环面积继续增大,捏缩现象明显,刚度退化显著,滞回曲线出现塑性平台,墙体表现出较好延性。设置竖向销键的试件 W2 较未设置竖向销键的试件 W1 的滞回环面积略有增加,但仍相对较小,说明竖向销键可提高夯土墙的延性,但此时的植筋率(0.22%)对墙体耗能能力提高程度有限。

试件 W3 的滞回曲线最为饱满,滞回环包围的面积较大,尤其以推向最为显著,表明植筋率为 0.44% 时,竖向销键可明显提高墙体的耗能能力。试件 W4 的滞回曲线捏缩现象明显,水平荷载达到极限荷载后,继续加载,水平位移增长明显而水平荷载下降缓慢,墙体表现出明显延性。从滞回环面积看,W4 的滞回环包围面积与 W3 相比明显较小,而与 W1 较为接近,表明较高植筋率并不利于提高夯土墙的耗能能力。

对于试件 W5,当水平位移加载至 2~11 mm 时,试件进入弹塑性受力阶段,出现轻微捏缩现象;当水平位移加载至 12 mm 时,承载力降至极限承载

力的 86% 左右,继续加载,水平荷载下降缓慢,墙体表现出一定延性;水平位移在 5~13 mm 范围时,各级加载的后一圈循环荷载峰值均比上一圈小,说明墙体强度及刚度均有退化。试件 W6 的滞回曲线有明显捏缩现象,水平位移加载至 7~13 mm 时,出现塑性平台,墙体表现出一定延性;当水平位移加载至 13 mm 第 1 次循环时,达到极限承载力,而第 2 次循环时,承载力直接降至极限承载力的 74%,墙体表现出脆性。试件 W4, W5, W6 植筋率相同而销键直径依次增大,对比其滞回曲线可知,随销键直径增大,墙体延性逐渐降低,尤其是试件 W6 已表现出一定脆性。

3.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 8 所示。对比可以发现:弹性阶段各墙体的骨架曲线几乎都为直线且基本重合,各试件差异较小;弹塑性阶段随着荷载的增大,骨架曲线开始发生弯曲,刚度下降,各试件差异逐渐明显;达到极限荷载以后,试件 W2, W3 骨架曲线下下降段较为平缓,承载力及刚度退化缓慢,墙体仍具有较好的承载能力及变形能力,说明合理设置竖向销键的夯土墙具有较好的延性及抗震性能。试件 W1, W4, W5, W6 的骨架曲线下下降段较陡,承载力及刚度衰减明显,植筋率过高以及直径较大不利于发挥竖向销键作用。由各骨架曲线还可看出,设置竖向销键的墙体 W2~W6 相较于未设置销键的墙体 W1,抗侧承载力没有明显变化,而极限位移均有不同程度增加,可知竖向销键对夯土墙在低周反复荷载作用下的抗侧承载力影响较小,而对其延性有较显著改善。

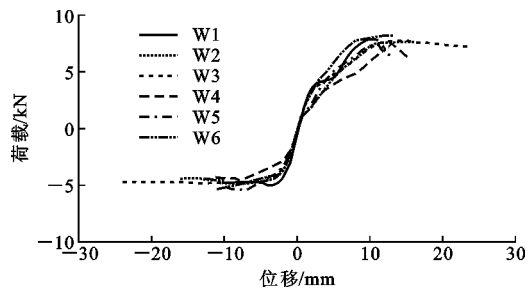


图 8 各试件骨架曲线

Fig. 8 Skeleton Curves of Specimens

3.3 承载力及变形性能

结合试验现象及滞回曲线发现,滞回曲线进入弹塑性受力阶段时,6 片墙体表面均未出现明显裂缝,说明此阶段裂缝主要存在于墙体内部;同时考虑到试验中开裂点(开裂荷载及相应位移)的判断受人为因素影响明显,本研究采用基于能量等效的理想弹塑性(EEEP)方法^[15]定义结构的屈服荷载 P_{yield} 、屈服位移 Δ_{yield} 、屈服位移角 θ_e 、延性系数 D 、 $\theta_e = \Delta_{yield}/h$ ($h=900\text{ mm}$), $D = \Delta_u/\Delta_{yield}$ (Δ_u 为结构破坏时的极限位移)。通过平均骨架曲线(正骨架曲线与负骨架曲线的绝对值取平均值)确定各结构的屈服荷载 P_{yield} 与相应的屈服位移 Δ_{yield} 、结构破坏时的极限位移 Δ_u 与相应的极限荷载 P_u 。各试件主要力学性能参数如表 4 所示,其中 θ_u 为极限位移角。

表 4 试件主要力学性能参数

Tab. 4 Main Mechanical Performance Parameters of Specimens

试件编号	P_{yield}/kN	Δ_{yield}/mm	θ_e	P_u/kN	Δ_u/mm	θ_u	D
W1	6.16	4.85	1/186	6.35	10.67	1/84	2.20
W2	5.64	4.32	1/208	6.07	15.97	1/56	3.69
W3	6.01	5.15	1/175	6.30	23.96	1/38	4.65
W4	4.73	4.14	1/218	5.99	12.98	1/69	3.14
W5	5.93	5.37	1/168	6.23	12.71	1/71	2.37
W6	6.65	5.71	1/158	6.77	12.63	1/71	2.19

图 9 为屈服荷载(极限荷载)与植筋率关系曲线。各试件屈服荷载随植筋率增加变化较小,极限荷载表现出类似规律,植筋率对屈服荷载和极限荷载影响不明显,说明夯土墙屈服荷载和极限荷载对植筋率不敏感。由表 4 可知:试件的屈服位移角 θ_e 在 1/218~1/158 之间,平均值为 1/186;极限位移角 θ_u 在 1/84~1/38 之间,平均值为 1/65;试件的位移延性系数在 2.20~4.65 之间,平均值为 3.04。图 10 为延性系数与植筋率关系曲线。由图 10 可知,延性系数随植筋率变化较明显。随着植筋率增加,试件 W1~W4 的延性系数先增大,后减小。试件 W2~W4 的延性系数较 W1(未设置竖向销键)

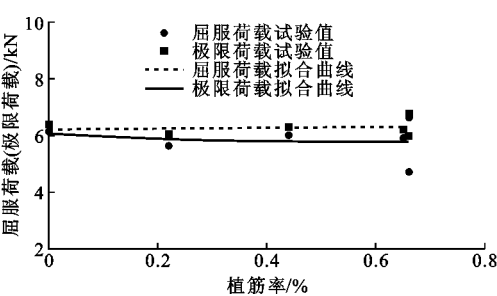


图 9 屈服荷载(极限荷载)与植筋率关系

Fig. 9 Relationship Between Yield Load (Ultimate Load) and Rebar Planting Rate

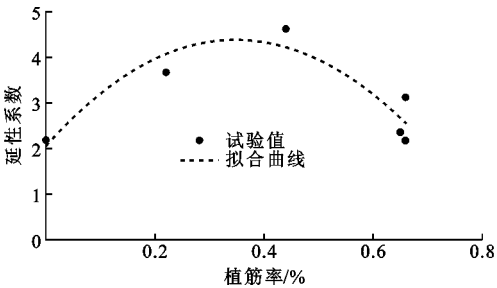


图 10 延性系数与植筋率关系

Fig. 10 Relationship Between Ductility Coefficient and Rebar Planting Rate

明显增大,平均提高了 73.94%;试件 W3 的延性系数最大,较 W1 提高了 111.36%。植筋率对夯土墙延性影响显著。试件 W4~W6 植筋率相同,随竖向销键直径增大,延性系数逐渐减小;尤其是试件 W5,W6(销键直径分别为 17.2,22.5 mm),二者延性系数与 W1 较为接近,说明竖向销键直径较大时不利于发挥其对夯土墙延性的改善作用,竖向销键直径不宜过大。针对本研究所涉及的夯土房屋类型,选择延性系数等于 3 作为夯土墙延性限值,建议竖向销键植筋率合理范围为 0.08%~0.6%。

3.4 刚度退化

为反映试件在反复荷载作用下的刚度,以割线刚度来表示其有效刚度,各级循环有效刚度定义为正负加载的峰值之和与位移之和的比值,以 K_i 表示^[6],即

$$K_i = \frac{|P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

式中: $P_i, -P_i$ 分别为第 i 次循环的正、负方向峰值荷载; $\Delta_i, -\Delta_i$ 分别为第 i 次循环的正、负方向峰值位移。

各试件有效刚度曲线见图 11。由图 11 可知,相对于 W1,设置竖向销键的墙体 W2~W6 的初始刚度均有所降低。这主要是由于夯筑墙体时,竖向销键周围土体相较于无销键位置更不易被夯实,造

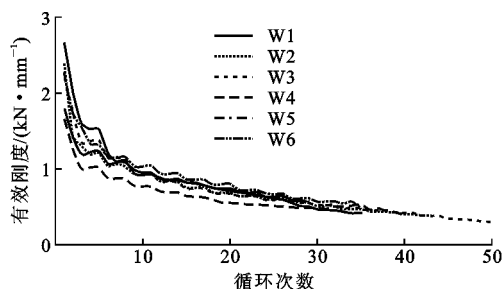


图 11 试件有效刚度曲线

Fig. 11 Effective Stiffness Curves of Specimens

成初始刚度有一定程度的降低;同时,土体干缩后,竖向销键与土体之间会产生间隙,进一步造成初始刚度降低。设置竖向销键对夯土墙初始刚度有一定削弱。试件在加载初期,刚度随位移增加而显著降低;继续加载,各试件刚度下降变缓,此时竖向销键发挥作用;各墙体刚度退化规律基本相同。植筋率、销键直径等参数对墙体刚度退化性能的影响不明显。

3.5 耗能能力

耗能能力可通过滞回曲线所包围的面积以及等效黏滞阻尼系数来衡量^[6]。各试件加载循环的耗能情况如图 12 所示。加载前期,随着侧向位移增加,各试件加载循环的耗能呈直线上升趋势;加载后期,由于试件极限位移不同,各试件加载循环的耗能差异较明显,其中试件 W3 耗能显著高于其他试件,此时竖向销键的植筋率及直径均较合理。试件 W4 在加载循环过程中的循环耗能比其他试件小,尤其是小于同等植筋率的试件 W5, W6,再次说明竖向销键植筋率不宜过大,且应充分考虑竖向销键直径对耗能性能的影响。由图 12 可知,总体上,竖向销键改善了夯土墙的延性,设置竖向销键的夯土墙耗能性能较未设置竖向销键的夯土墙均有提升。

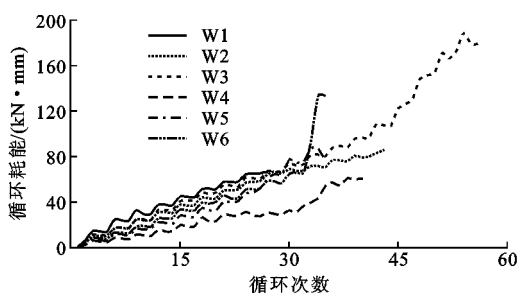


图 12 各试件加载循环耗能

Fig. 12 Loading Cyclic Energy Dissipations of Specimens

各试件加载循环等效黏滞阻尼系数如图 13 所示。由图 13 可知,整个加载过程中,各试件等效黏滞阻尼系数波动均较为明显。加载前期,等效黏滞阻尼系数随加载进程显著增加。试件 W1, W2, W3 的等效黏滞阻尼系数普遍高于试件 W4, W5, W6。

此阶段,试件 W1 的等效黏滞阻尼系数较大,这主要是由于 W1 在加载过程中较早产生了较宽的斜裂缝和水平裂缝,变形相对较大;同时对于试件 W2~W6,竖向销键已发挥作用,其等效黏滞阻尼系数表现均较稳定。加载后期,试件 W1 等效黏滞阻尼系数有减小趋势,试件 W2, W3 表现仍较稳定,试件 W4, W5, W6 有明显上升段。此阶段,试件 W1 的斜裂缝与水平裂缝相继贯通,试件 W1 最先破坏;尽管试件 W1 的等效黏滞阻尼系数较大,但较早的破坏限制了其总体耗能能力;试件 W4, W5, W6 出现明显上升段,这主要是由于 3 个试件均出现带有一定脆性特征的大变形。试件 W2, W3 在整个加载过程中表现相对较稳定,等效黏滞阻尼系数始终保持在较高水平。极限位移状态下,各试件的等效黏滞阻尼系数在 0.13~0.24 范围。

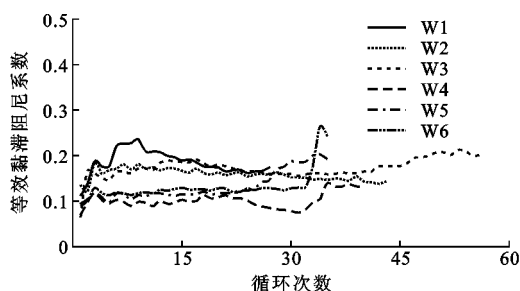


图 13 各试件加载循环等效黏滞阻尼系数

Fig. 13 Loading Cyclic Equivalent Viscous Damping Coefficients of Specimens

4 结 语

(1)各墙体破坏过程和破坏形态类似,墙体主要被水平通缝及斜裂缝分割为若干个较大块体而破坏;竖向销键可增强夯土墙分层处连接,改善墙体整体性;水平荷载作用下,夯筑分层处是夯土墙受力薄弱部位;各墙体滞回曲线有不同程度捏缩现象,合理设置竖向销键可使滞回曲线相对饱满。

(2)夯土墙屈服荷载和极限荷载对植筋率不敏感,延性系数对植筋率较敏感;随植筋率增加,延性系数先增大,后减小;随竖向销键直径增大,延性系数逐渐减小,竖向销键直径较大时不利于发挥其对夯土墙延性的改善作用。

(3)竖向销键对夯土墙初始刚度有一定削弱;植筋率、销键直径等参数对墙体刚度退化趋势影响不明显。

(4)竖向销键可明显提升夯土墙耗能能力;各试件等效黏滞阻尼系数随加载进程波动较明显;极限位移状态下,各试件的等效黏滞阻尼系数在 0.13~

0.24 范围。

参考文献:

References:

- [1] 王毅红,梁 健,张项英,等.我国生土结构研究综述[J].土木工程学报,2015,48(5):98-107.
WANG Yi-hong, LIANG Jian, ZHANG Xiang-ying, et al. Review of Raw-soil Structure in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 98-107.
- [2] 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 Tie-gang, DUAN Wen-qiang, MU Jun, et al. Statistical Analysis and Survey on the Aseismic Performance of the Raw-soil Building Status in China's Rural Areas[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2013, 45(4): 487-492.
- [3] 彭道强.夯土房屋墙体试验与结构性能改良技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
PENG Dao-qiang. Research on Wall Experiment and Structural Performance Improvement of Rammed Earth Building[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [4] 刘 军,褚俊英,赵金波,等.掺和料对生土墙体材料力学性能的影响[J].建筑材料学报,2010,13(4):446-451.
LIU Jun, CHU Jun-ying, ZHAO Jin-bo, et al. Effect of Admixures on Mechanical Properties of Raw Clay Material for Wall[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 446-451.
- [5] 张宗敏,童丽萍.夯土墙房屋纵横墙交接处裂缝成因及控制技术研究[J].郑州大学学报:理学版,2013,45(4):102-108.
ZHANG Zong-min, TONG Li-ping. Study on the Crack Mechanism and Pre-control Measures of Rammed Earth Houses [J]. Journal of Zhengzhou University: Natural Science Edition, 2013, 45(4): 102-108.
- [6] 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 Yong-hong, WANG Yi-hong, HAN Gang, et al. Study on Seismic Behavior of the Rammed Earth Walls with Built-in Rope Nets[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2013, 45(1): 38-42.
- [7] 张 坤,王毅红,梁 健,等.砖柱加强的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,2015,47(3):382-387.
ZHANG Kun, WANG Yi-hong, LIANG Jian, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Rammed Earth Wall Reinforced with Brick Columns and Reinforcement Mortar Belt[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2015, 47(3): 382-387.
- [8] 李梁峰.竹条网加固夯土墙抗震性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):30-35.
LI Liang-feng. Experimental Study on Seismic Performance of Bamboo Net Strengthened Earth Walls [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(6): 30-35.
- [9] 张又超,王毅红,张项英,等.单面钢丝网水泥砂浆加固承重夯土墙体抗震试验研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2015,47(2):255-259.
ZHANG You-chao, WANG Yi-hong, ZHANG Xiang-ying, et al. Experimental Study on Strengthening Rammed-earth Wall with Single Side Ferro-cement Surface Layer[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2015, 47(2): 255-259.
- [10] JGJ 161—2008,镇(乡)村建筑抗震技术规程[S].
JGJ 161—2008, Seismic Technical Specification for Building Construction in Town and Village[S].
- [11] GB/T 15780—1995,竹材物理力学性质试验方法[S].
GB/T 15780—1995, Testing Methods for Physical and Mechanical Properties of Bamboos[S].
- [12] 吕文华,刘杏娥,汪佑宏.棕榈藤材的抗拉强度测试方法[J].木材加工机械,2010(1):20-23.
LU Wen-hua, LIU Xing-e, WANG You-hong. The Test Methods of Axial Tensile Strength of Rattan Canes[J]. Wood Processing Machinery, 2010(1): 20-23.
- [13] JGJ/T 101—2015,建筑抗震试验方法规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specifying of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S].
- [14] 张琰鑫.农村夯土类住宅抗震性能研究[D].郑州:郑州大学,2010.
ZHANG Yan-xin. Study on Seismic Performance of Rural Rammed Earth Buildings [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [15] ASTM E2126-11, Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings[S].