



新型土坯墙体房屋抗震性能试验研究

苏何先^a, 潘文^a, 柏文峰^b, 白羽^a, 杨晓东^a

(昆明理工大学 a. 建筑工程学院 b. 建筑及城市规划学院, 昆明 650500)

摘要:提出了一种新型土坯墙房屋,对新型土坯墙房屋承重墙体的受力及抗震性能进行试验研究。设计三片新型土坯墙试件,研究土坯墙体在竖向荷载和反复水平荷载作用下的破坏过程、破坏形态、滞回曲线和骨架曲线特征以及墙体水平承载力和变形能力等,同时,研究新型构造措施对土坯墙抗震性能的作用。试验表明:新型土坯墙体的破坏模式与配筋混凝土小型空心砌块相似,土坯墙体具有良好的承载力和变形能力。新型构造措施对墙体整体抗震性能作用明显,其连接构造至关重要。与计算结果比较得出,在建筑抗震概念设计原则指导下,抗震设防7度区采用新型土坯墙建造二层房屋具有可行性。

关键词:新型土坯墙;低周反复荷载试验;抗震性能;构造措施;滞回曲线

中图分类号:TU361 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0054-08

Seismic behavior of new adobe walls structure

Su Hexian¹, Pan Wen¹, Bai Wenfeng², Bai Yu¹, Yang Xiaodong¹

(a. School of Civil Engineering, b. Faculty of Architecture & City

Planning, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China)

Abstract: A new adobe wall structure was proposed and mechanisms and seismic behavior were studied. Three pieces of the specimen of the new adobe wall structure were designed. Vertical loads and low cycle horizontal loads were applied on the specimen in order to study the failure process, failure mode, hysteretic curve and skeleton curve feature. The horizontal bearing capacity and deformation capacity of the wall were also examined. Meanwhile, attention was paid to the influence of the seismic details of the wall structure on anti-seismic capacity. Test results show that the failure mode of the new adobe wall is similar to that of reinforced concrete masonry wall. The new adobe wall has favorable bearing capacity and deformation capacity. In addition, its anti-seismic performance is affected by the new seismic measures, in particular the connection. Compared with the theoretical calculation results, it is feasible to build a two-story structure housing by the new adobe wall in the 7 degree fortification regions.

Key words: new adobe wall; quasi-static test; seismic behavior; hysteretic curve; seismic detail

收稿日期:2015-06-10

基金项目:国家科技支撑计划(2014GA009)

作者简介:苏何先(1982-),男,博士生,主要从事工程抗震研究,(E-mail) sxhh870@163.com。

Received:2015-06-10

Foundation item: National Science and Technology Support Plan (No. 2014GA009)

Author brief: Su Hexian (1982-), PhD candidate, main research interest: earthquake engineering, (E-mail) sxhh870@163.com.

随着生态文明时代的到来,人们开始普遍关注生态危机、能源危机、环境污染的相关问题。从人居环境可持续发展的观念,民族传统建筑文明及生态文明的社会层面上来说,生土一直被认为是西部边远农村最有发展前景的生态建筑材料^[1]。因此,近年来,生土建筑的研究受到了越来越多的重视^[2-5]。土坯墙房屋作为生土建筑的一种结构形式,不仅具有绿色环保等生态上的优势,而且在经济和功能上具有很多优点。例如,在经济上具有造价低、方便就地取材,在功能上具有保温隔热、隔音等特点。因此,土坯墙房屋仍然大量存在于中国农村民居建筑中^[2]。然而,此类建筑也存在一些缺点,比如主体结构材料离散性大、强度低,且主体结构一般由泥浆砌筑,从而造成结构的整体性较差,房屋各构件之间的连接薄弱^[6]。显然,这些缺点导致其在抗震能力方面存在着明显的不足^[7]。鉴于此,规范规定传统二层土坯建筑只允许在6度及非抗震设防区使用,7度、8度抗震设防区被禁止^[8]。

为克服传统土坯建筑存在的以上缺陷,提出一种新型土坯墙建筑。其主要具有以下特点:首先,在生土中掺入少量添加料,通过改善生土的离散性,使制作的土坯块强度提高^[9-10]。添加料中含粘接性和耐水性良好的成分,使制作的土坯块的耐候性能得到提升,砌筑而成的土坯墙体具有良好的抵抗雨水侵蚀的能力。其次,配制性能优于土坯块的砌筑浆料。前期材性试验表明,新配制砌筑浆料粘接性能明显优于普通泥浆,可以用来提高土坯墙体的砌筑整体性。其三,采用新型构造措施,在墙体内浇筑钢筋混凝土暗柱暗梁,形成与配筋混凝土小型空心砌块类似的结构体系,即通过采用新型构造措施来增强生土房屋的连接构造和整体性。

针对新型土坯墙建筑在抗震性能方面能否改善传统土坯墙建筑存在的一些不足^[6],在7度、8度抗震设防区建造二层新型土坯建筑的可行性等方面的问题,通过抗震试验进行研究验证。

1 土坯墙体抗震试验设计

1.1 试件设计

试验墙体尺寸取为3 000 mm×2 400 mm×280 mm,土坯用开发的土坯模具制作,土坯标准尺寸为280 mm×280 mm×140 mm,更换土坯模具的附加组件制作暗柱暗梁部位使用的带孔或开槽异形土坯块,土坯平压强度不低于MU2.0。设置暗柱部位用

带孔异形土坯块砌筑形成120 mm的竖向圆孔,在圆孔内插入一根直径14 mm的通长钢筋。设置暗梁部位用开槽异形土坯块砌筑形成宽120 mm,深80 mm的水平槽,水平槽内配置两根直径14 mm的水平钢筋,两水平钢筋之间设置直径6 mm,间距200 mm的拉筋,水平钢筋两端采用135°弯钩锚固,将竖向钢筋与水平钢筋绑扎连接形成暗柱暗梁的钢筋骨架,所用钢筋均为HPB235。配筋完成后,在圆孔和水平槽内灌筑C20细石混凝土形成墙体的暗柱暗梁。为确保试验结果的可靠,考虑到材料的离散性、施工因素及试验因素可能对试验结果产生影响,因此,本次试验共制作相同的3片墙体试件,用来验证新型土坯墙体的抗震性能。试件底梁用槽钢焊接,墙体顶部浇筑钢筋混凝土压梁(3 000 mm×280 mm×150 mm),压梁一端预埋连接钢板。墙体试件如图1,墙体所用材料力学性能实测结果见表1。

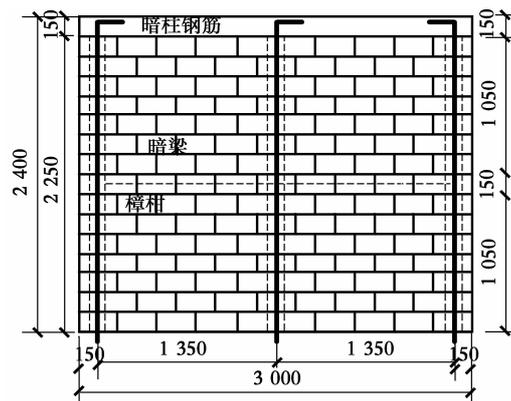


图1 试件尺寸

Fig. 1 Size of specimen

表1 材料力学性能

Table 1 Material mechanics performance MPa

项目	土坯平 压强度	混凝土 强度	钢筋抗 拉强度
实测值	3.76~4.69	21.3	376.4
设计值	≥2.0	20	370

1.2 加载设计

3片墙体试验的加载过程和加载程序相同,且均采用墙顶加载方案,见图2。竖向荷载利用液压千斤顶施加,荷载通过加载梁分配到墙顶。加载梁与混凝土压梁之间铺设细砂垫层以确保两者接触均匀。液压千斤顶与门式加载架之间放置滚轴,保证在竖向荷载不变的情况下墙体顶端可以产生水平位移。试验时,竖向荷载一次加至设计荷载并保持至

试验结束。竖向荷载是根据承重土坯墙房屋的实际尺寸,按带阁楼的木屋盖瓦屋面房屋的实际荷载计算得到^[6]。采用拟静力试验方案进行墙体竖向荷载和反复水平荷载作用下的试验^[11]。反力墙为水平加载的反力基座,电液伺服作动器施加水平荷载。加载采用位移控制,分级施加,每级位移增量 2 mm,循环 3 次,加载位移小于 10 mm 时,加载速率 0.4 mm/s;位移值大于 10 mm 后,加载速率 0.8 mm/s。

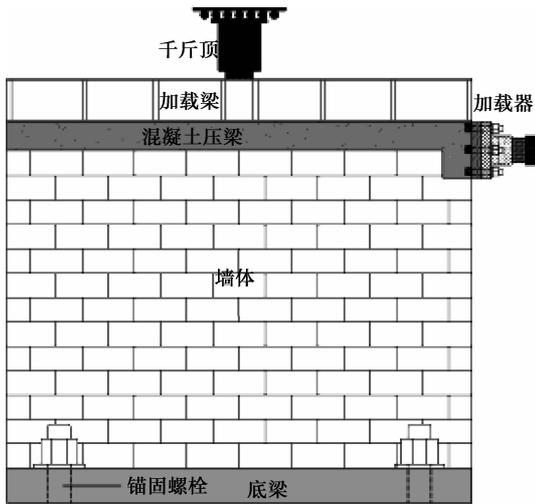
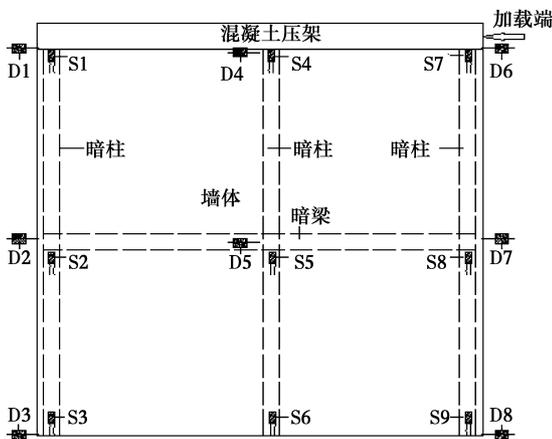


图 2 加载方案

Fig 2 Loading scheme

1.3 测量方案

墙体抗震试验需要测量墙体变形,从而反映结构位移及延性。墙体顶部加载对应位置、墙体底部、中间均布置位移测点。土坯墙体的每根暗柱钢筋上端、中部及下端对称粘贴应变片,用于测量试验过程中墙体暗柱受力情况。试验测点编号及布置见图 3。



注: D1~D8为试验测点编号, S1~S9为应变测点编号

图 3 测点布置

Fig 3 Survey points of specimen

2 试验现象及试验结果分析

2.1 墙体破坏情况

试验墙体初期开裂均是墙体两侧首先出现斜向裂缝,斜裂缝得到一定程度发展后,沿墙体砌缝薄弱部位出现水平裂缝。随着反复荷载的持续增加,墙体水平裂缝和斜裂缝都不断扩展,此过程中斜裂缝的扩展受到暗梁阻碍,同时,斜裂缝发展方向也有所改变。同样,水平裂缝的扩展也受到了暗柱的约束,阻止了出现沿墙体水平截面完全贯通的水平裂缝。试验后期,水平裂缝与斜裂缝相交贯通,形成两个滑移破坏面,最终墙体上下滑移面之间出现滑移。由于上下面之间的滑移,1#墙体加载端暗柱与暗梁之间的连接钢筋被拉开,连接破坏端暗柱下端弯曲外鼓,包裹该暗柱土坯块体脱落,墙体严重破坏。2#、3#墙体未出现土坯块体崩落现象,2#墙体剪切破坏特征最典型。3#墙体在试验后期出现了少量的平面外滑移。各墙体破坏状况如图 4,试验墙体均表现出剪切破坏特征。低周反复荷载试验结束后,墙体严重破坏,但仍具有承受较大竖向荷载的能力,通过对墙体试压,试验后的墙体在 4 倍竖向荷载作用下均未发生整体压溃现象。结合试验过程中观察到的试验现象和各试件的破坏形态,可见土坯墙体中设置暗柱暗梁的构造措施能对土坯块起到有效的约束作用,防止土坯块体在反复水平荷载作用下的松散脱落,增强了墙体的整体性,同时,构造措施还能抑制裂缝在全墙面的开展和延伸。1#墙体由于暗梁暗柱之间的连接破坏导致整个构造措施失效,墙体破坏程度最严重,墙体的破坏形态也与 2#、3#墙体存在差异,可见,新型构造措施对土坯墙体的抗震性能作用明显,暗柱暗梁之间的连接措施非常重要。



图 4 墙体破坏图

Fig4 Failure patterns of walls

2.2 墙体滞回曲线及骨架曲线

通过记录试验加载过程中的荷载和位移,绘制出该土坯墙体的滞回曲线图。各土坯墙体滞回曲线

如图5所示。从滞回曲线图可以看出,随着加载幅值的增加,滞回环饱满程度有逐渐增加的趋势。这表明试件累积的塑性变形能逐渐增大,也即耗能能力不断增加。但随着加载幅值的增加,滞回环同时产生捏拢现象,说明土坯墙体试件沿裂缝产生了水平错动。3#墙体滞回曲线与1#、2#墙体滞回曲线存在一些差异,这主要是因3#墙体在加载后期出现了少量平面外滑移。

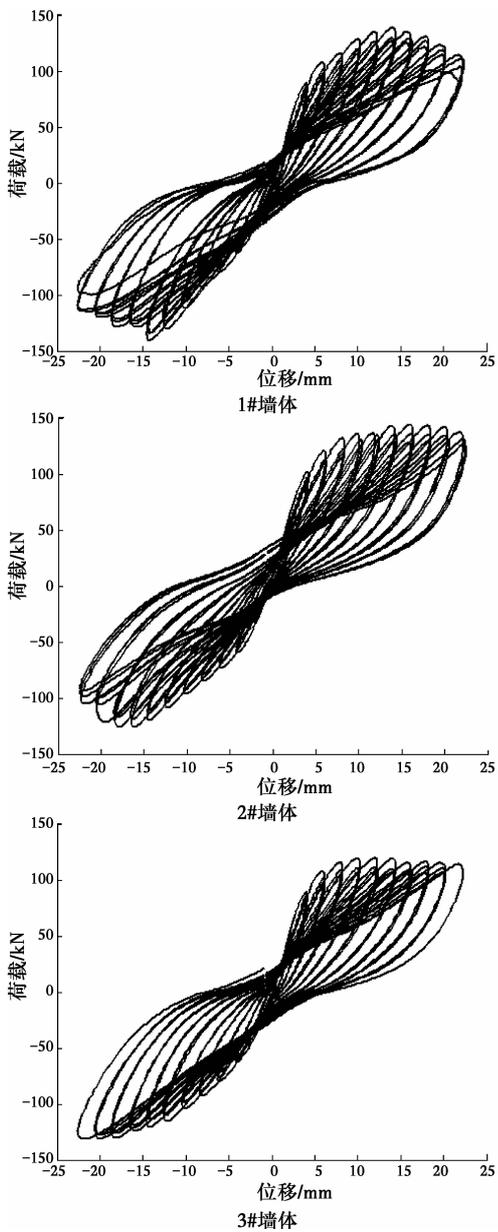


图5 滞回曲线

Fig5 Hysteretic loop

连接各加载周首次循环的峰值点,可得到荷载-位移骨架曲线,如图6所示。通过试验观察和荷载-位移骨架曲线可以发现,从开始加载到破坏,3片试验墙体大致都经历了近似弹性、弹塑性及破坏三阶段。

当施加位移为6 mm的循环阶段1#墙体出现裂缝,初裂时对应水平荷载65.6 kN。随着位移增加,墙体裂缝不断出现并发展,继续加载直至墙体严重破坏,得到水平荷载最大值为136.1 kN,墙体破坏时的最大位移值22.6 mm。2#墙体施加位移为8 mm的循环阶段出现裂缝,对应水平荷载77.6 kN。加载至15.9 mm时,水平荷载达到最大值144.1 kN,继续加载,位移至22.3 mm时,墙体严重破坏。3#墙体施加位移也是在8 mm阶段出现裂缝,对应水平荷载76.2 kN。加载至15.2 mm时,水平荷载达到最大值124.5 kN,继续加载,位移至22.6 mm时,墙体出现平面外滑移,为防止墙体发生平面外倒塌,在水平荷载并未出现明显下降的情况下停止了试验。试验数据见表2。

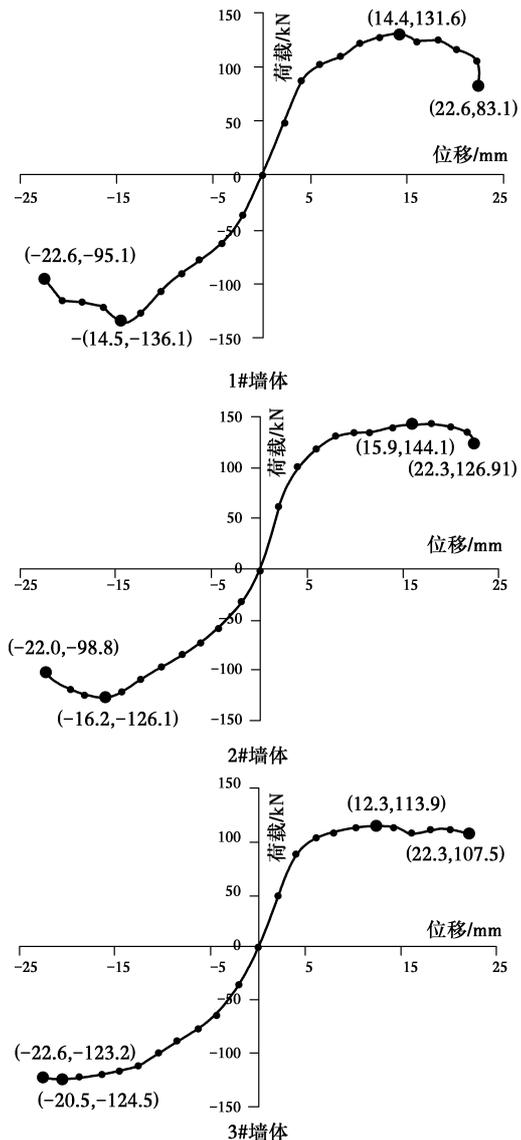


图6 骨架曲线

Fig6 Skeleton curve

表 2 所列破坏荷载取试件最大荷载出现之后,随变形增加而荷载下降至最大荷载的 85% 时的相应荷载^[11]。在低周反复荷载试验中,破坏荷载可作为终止加载的条件,本次试验除 3 # 墙体因后期出现平面外滑移而提前结束试验外,1 # 墙体和 2 # 墙体的最后一级荷载均低于破坏荷载。从骨架曲线和表 2 数据可见,3 片墙体测得试验数据差异较小,仅 3 # 墙体由于在加载后期出现平面外滑移,导致其最大水平承载力偏小。这表明本文提出的新型土坯墙体受力性能是稳定可靠的。

表 2 测试结果
Table2 Test results

墙体编号	初裂荷载/kN	初裂位移/mm	最大荷载/kN	最大位移/mm	破坏荷载/kN
1#	65.6	5.69	136.1	22.6	115.7
2#	77.6	7.88	144.1	22.3	122.5
3#	76.2	6.13	124.5	22.6	105.8

2.3 墙体位移

分别在墙体顶端、墙体中部及底部外设位移计。底部位移计主要用于监测墙体底座是否滑移。试验过程中墙体底座未出现明显滑移,仅墙体破坏阶段出现最大为 0.52 mm 的底部位移。图 7 为 3 片墙体的位移包络曲线。

根据位移包络曲线可知,在反复荷载作用下,墙体变形过程可分为两阶段。第一阶段,即在施加的位移荷载较小时,沿墙体高度的位移近似线性,且在正向(推)和反向(拉)荷载作用下墙体变形呈对称关系,这说明此阶段墙体竖向的变形近似弹性,水平向未出现明显塑性变形。随反复荷载的增加,墙体加载点远侧 D1 测点和近侧 D6 测点的位移幅值出现差异,D6 测点的位移幅值等于施加的控制位移,与 D6 测点的位移幅值相比,D1 测点的位移幅值有逐渐减小的趋势,且 1 # 和 3 # 墙体 D1 测点的位移曲线在加载后期出现了偏移现象,3 片墙体中部 D7 测点的位移曲线均出现明显的偏移。以上现象表明墙体水平向和竖向在墙体变形的第二阶段都产生了塑性变形。结合试验现场的观察,发现 1 # 墙体位移曲线出现偏移是墙体构造措施破坏失效引起的,3 # 墙体则是因墙体出现平面外滑移造成的。

2.4 钢筋应变

墙体暗柱钢筋顶端锚固在混凝土压梁内,钢筋上端应变测点布置在混凝土压梁底部。在墙体顶部承受均布竖向荷载作用下,墙体顶部各应变测点数

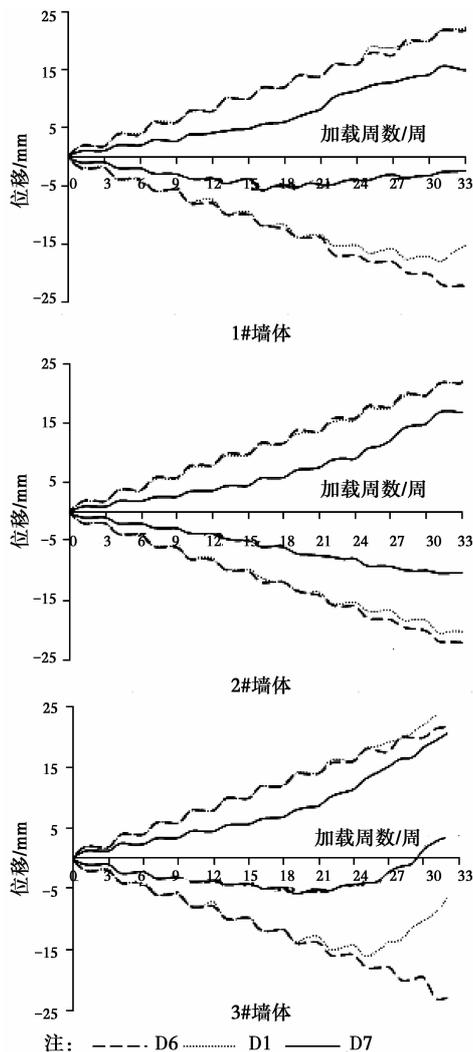


图 7 墙体位移包络曲线图

Fig7 Displacement envelope curve of walls

注: D6 为墙顶加载点测点; D1 为墙顶加载点远侧测点; D7 墙体中部测点。

据基本一致。试验中也以此作为竖向荷载是否达到均布的校核方法。墙体中部和墙体底部钢筋应变值存在一定差异。但应变值都大于顶部钢筋应变值。因墙体顶端施加有给定均布荷载,各应变测点实际测量应变值明显大于墙体在均匀受力情况下的应变值。这说明混凝土暗柱承担了更多的墙体竖向荷载。3 片墙体中钢筋应变规律相同,将 1 # 墙体应变结果列于表 3。

表 3 竖向荷载作用下钢筋应变

Table 3 Strain value of steel under vertical loads

测点部位	应变/ $\mu\epsilon$		
	墙体左侧	墙体中央	墙体右侧
钢筋上端	-68.12	-60.06	-67.75
钢筋中部	-200.68	-165.89	-178.52
钢筋下端	-170.47	-86.24	-150.51

墙体暗柱钢筋粘贴应变片除进行竖向荷载作用下暗柱参与承载情况的了解外,试验墙体在水平反复荷载作用下暗柱钢筋应变变化情况也是试验研究

的重点。水平荷载作用下3片墙体暗柱钢筋应变曲线如图8所示。

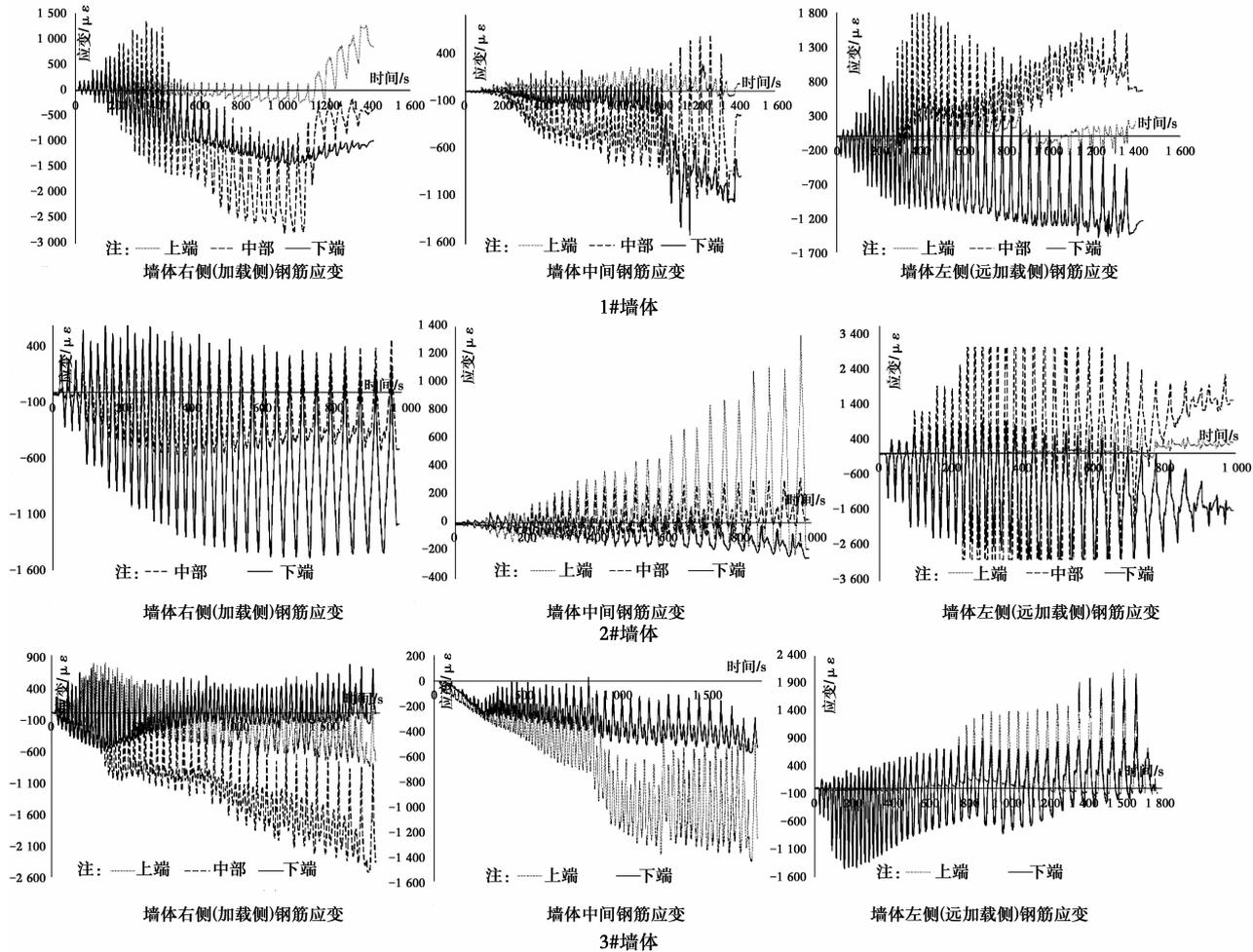


图8 水平荷载作用下钢筋应变曲线

Fig 8 Strain curve of steel under horizontal loads

由图8的应变曲线可见,水平反复荷载作用下,3片墙体暗柱钢筋多数测点的应变幅值都超过钢筋屈服应变值,各墙体两侧暗柱钢筋中部和下部尤为明显,部分测点的应变幅值甚至超过极限应变。水平加载结束后,多数测点残余应变值较大,表明钢筋相应部位产生了塑性变形,钢筋发生屈服。应变幅值超过钢筋应变极限的测点时,后期应变幅值均出现下降,钢筋作用降低,说明相应部位混凝土暗柱发生破坏,试验结束后剥离出对应部位暗柱也验证了此结论。

根据水平反复荷载作用下钢筋应变曲线可以判定,墙体暗柱参与工作现象明显,不同位置受力差别很大,墙体中间暗柱受力较左右两侧暗柱小,前几级荷载作用下,墙体左右侧暗柱钢筋应变呈拉压交替

变化,但拉压应变值不完全对称,后期荷载作用下应变曲线发生畸变,并且均出现不同程度的偏移,分析认为这主要反映了墙体工作状态的变化,同时,水平加载过程中墙体顶部竖向荷载的分布也会改变,一定程度上这也会对钢筋应变产生影响。由墙体暗柱钢筋上中下三处的应变曲线可见,两侧暗柱中部和下部应变变化幅度(各循环周应变峰值与谷值之差)比上端大,表明墙体暗柱中部和下部承受的荷载变化更大。由应变曲线可得出以上一些规律,但3片墙体试验所得应变曲线个性差异明显。本次应变测试存在以下不足:2#墙体和3#墙体暗柱部分位置应变规律未得到;2#墙体远加载侧在加载中期出现应变超限是前期未考虑到的;本次试验也发现,水平荷载作用下,应变片粘贴方位直接影响测试结果,由

于受钢筋尺寸限制,仅采用对称方式粘贴了两片应变片,如能沿钢筋周边粘贴两片应变片,试验数据的准确性应该会更高。

3 与理论计算对比分析

土坯建筑的墙体在截面验算中采用基本烈度计算墙体承受的地震作用标准值,以砌体抗剪强度平均值计算土坯墙体的极限承载力^[8]。土坯墙体地震作用标准值和受剪极限承载力计算按参考文献^[8]附录 A 的方法进行,水平地震作用标准值计算为式(1),墙体极限承载力计算为式(2)。

$$F_{Ekb} = \alpha_{\max b} G_{eq} \quad (1)$$

$$V_b \leq \gamma_{bE} \zeta_N f_{v,m} A \quad (2)$$

式中: $\alpha_{\max b}$ 为基本烈度的水平地震影响系数最大值, G_{eq} 为等效重力荷载, γ_{bE} 为极限承载力抗震调整系数, ζ_N 为抗剪强度的正应力影响系数, $f_{v,m}$ 为非抗震设计的抗剪强度平均值, A 为墙体横截面面积。

试验以两层土坯建筑为参照,土坯墙体地震作用下的水平地震剪力计算也以此为基础。两层土坯建筑开间尺寸为 3 600 mm、2 700 mm 和 3 600 mm 三开间,进深 6 000 mm,二楼现浇钢筋混凝土楼板密度 2.5 kN/m²,抹灰层密度 0.34 kN/m²,细石混凝土面层密度 0.8 kN/m²,活荷载 2.0 kN/m²;木屋架屋面折算荷载(恒载与活荷载组合)3.5 kN/m²;土坯自重 20 kN/m³,横墙承重,结构等效重力荷载取一、二层重力荷载代表值之和的 95%。抗震设防烈度 7 度(0.1 g)时, $\alpha_{\max b} = 0.23$, $\gamma_{bE} = 0.85$, $\zeta_N = 1.15$, $f_{v,m} = 0.125$, 其中,砌筑泥浆抗压强度平均值取 1.0 MPa。通过理论计算得出试验土坯墙体极限承载力为 102 kN,试验土坯墙体在 7 度基本烈度地震作用下承受水平地震作用为 79.2 kN,在 8 度(0.2 g)基本烈度地震($\alpha_{\max b} = 0.45$)作用下试验墙体承受水平剪力为 154.9 kN。水平地震作用与试验结果比值如表 4。

表 4 最大承载力与作用之比

Table 4 The ratio of ultimate load to action kN

墙体 编号	极限承载力		设防 7 度		设防 8 度	
	计算	试验	作用	比值	作用	比值
1#	102	136.1	79.2	1.72	154.9	0.88
2#	102	144.1	79.2	1.82	154.9	0.93
3#	102	124.5	79.2	1.57	154.9	0.80

从表 4 可见,3 片墙体极限承载力试验值均大于理论计算极限承载力 102 kN,说明 3 片墙体均满足设计要求。比较水平地震作用标准值与试验结果可得,新型抗震土坯墙体满足 7 度抗震设防要求,抗剪有足够的储备。低周反复荷载试验后,试验墙体严重破坏,在严重破坏的土坯墙体上施加使用重力 4 倍的竖向荷载而未发生整体压溃,说明新型土坯墙体具有良好的抗震性能和整体性。后续针对新型土坯墙体房屋进行的模拟地震振动台试验中,新型土坯墙体房屋在 7 度罕遇地震作用下未倒塌。因此,在建筑抗震概念设计原则指导下,新型抗震土坯墙完全可用于抗震设防 7 度区二层土坯建筑的建设。但由表 4 所示,墙体最大承载力与 8 度时地震作用标准值的比均小于 1,所以,采用新型抗震土坯墙建造的二层土坯房屋还无法满足 8 度抗震设防抗剪承载力要求。

4 结 论

1)土坯墙体在低周反复荷载试验中均出现剪切破坏特征,其破坏模式与配筋混凝土小型空心砌块相似。浇筑暗柱暗梁等构造措施能有效改善土坯墙体延性,这是因为暗梁处交叉裂缝被隔断,有效的阻止了剪切裂缝向整体墙面发展。同时,因暗梁暗柱的设置,墙体在严重损坏情况下仍具有较大的竖向承载能力,通过试压得出,受损墙体均可承受 4 倍竖向荷载而未发生整体压溃。

2)墙体试验中,1#墙体因暗梁暗柱出现连接破坏,暗柱下端弯曲外鼓,包裹该暗柱土坯块体严重脱落,墙体发生破坏。2#、3#墙体未发生暗柱与暗梁连接破坏,直至试验结束均未出现土坯块体严重脱落现象。因此,土坯墙体内设置暗梁暗柱可以对土坯产生约束作用,防止墙体在水平荷载作用下土坯块体崩落及墙体整体崩塌,同时,该新型土坯墙体暗梁暗柱连接构造必须有可靠的保证。

3)根据应变数据可知,竖向荷载作用下,因设置暗梁暗柱,较多竖向荷载被暗柱承担,墙体中下部更明显。可见,墙体暗梁暗柱的设置对墙体受力性能会产生明显的影响。

4)由墙体滞回曲线可见,随加载幅值的增加,墙体累积的塑性变形能逐渐增大。同时,滞回环产生捏拢现象,说明土坯墙体试件沿裂缝产生了水平错动。由墙体荷载-位移骨架曲线可知,3 片墙体所能承受的最大水平荷载分别是 136.1、144.1、

124.5 kN,明显大于抗震设防烈度为7度时墙体承担的地震作用79.2 kN。通过抗震试验与抗震计算结果比较得出,新型抗震土坯墙满足7度抗震设防要求,抗剪有足够的安全储备。因此,在建筑抗震概念设计原则指导下,新型抗震土坯墙可用于抗震设防7度区二层土坯建筑的建设。

参考文献:

- [1] 王军,吕东军.走向生土建筑的未来[J].西安建筑科技大学学报,2001,33(2):147-149.
Wang J, Lu D J. To the future of the immature soil buildings [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. 2001,33(2):147-149. (in Chinese)
- [2] 王毅红,卜永红,刘挺.生土结构房屋的承重土坯墙体抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(Sup):526-530.
Wang Y H, Bu Y H, Liu T. Study on the aseismic behavior of adobe walls of raw-soil structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(Sup):526-530. (in Chinese)
- [3] 周铁钢,胡昕,余长霞.新疆石膏土坯墙民居抗震试验与工程实践[J].地震学报,2008,30(3):315-320.
Zhou T G, Hu X, Yu C X. Shaking table model test and project practice of new gypsum-adobe wall dwellings in Xinjiang, China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008,30(3):315-320. (in Chinese)
- [4] 于文,葛学礼,朱立新.新疆喀什老城区生土房屋模型振动台试验研究[J].工程抗震与加固改造,2007,29(3):24-29.
Yu W, Ge X L, Zhu L X. Experimental study on shaking table test of adobe building model of kashi, Xinjiang [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007,29(3):24-29. (in Chinese)
- [5] Bui Q B, Hans S, Morel J C, et al. First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings [J]. Engineering Structures, 2011, 33: 3690-3695.
- [6] 葛学礼,朱立新,黄世敏.镇(乡)村建筑抗震技术规程实施指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ge X L, Zhu L X, Huang S M. Implentation Guide to Aseismic technical specification for building construction in town and village[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [7] 王沛钦,郑山锁,柴俊,等.走向生土建筑结构[J].工业建筑,2008,38(3):102-105.
Wang P Q, Zheng S S, Chai J, et al. To earth buildings and their structures [J]. Industrial Construction, 2008,38(3):102-105. (in Chinese)
- [8] JGJ 161—2008 镇(乡)村建筑抗震技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
JGJ 161—2008 Seismic technical specification for building construction in town and village [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 陶忠,潘兴庆,潘文,等.云南农村民居土坯墙单块土坯力学特性试验研究[J].工程抗震与加固改造,2008,30(1):99-104.
Tao Z, Pan X Q, Pan W, et al. Mechanics characteristics of adobe of rural houses in Yunnan Province [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008,30(1):99-104. (in Chinese)
- [10] 吴锋,李钢,贾金青,等.传统土坯抗压强度的试验研究[J].工程抗震与加固改造,2012,34(5):56-61.
Wu F, Li G, Jia J Q, et al. Experimental study of traditional adobe block compressive strength [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012,34(5):56-61. (in Chinese)
- [11] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
JGJ 101—96 Specificating of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)

(编辑 胡玲)