



体外预应力加固砌体结构振动台试验研究

马人乐¹, 蒋璐¹, 梁峰², 李旭¹

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:基于地震作用下砌体结构墙体通常由于受剪能力不足而发生破坏的特点,提出了体外预应力对砌体结构进行抗震加固的方法,即在墙体两侧埋设并张拉预应力筋,使墙体在交角处和主要受力段受到预压力,以提高墙体的抗剪强度,改善砌体结构的抗震性能。为了验证该方法的有效性,制作了2个1:4整体模型,其中1个模型采用体外预应力法加固,进行了模拟地震振动台模型对比试验。试验结果表明:采用体外预应力法对砌体结构墙体施加竖向整体预应力,可以提高墙体的抗剪、抗弯强度,改善墙体的延性和耗能能力,增强结构的整体性,提高结构整体刚度,且很少增加结构自重,是一种较为理想的抗震加固方法。

关键词:砌体结构; 体外预应力; 抗震加固; 模拟地震振动台试验; 地震反应

中图分类号:TU362.02 TU317.1 **文献标志码:**A

Shaking table tests of masonry structures strengthened using external prestressing technique

MA Renle¹, JIANG Lu¹, LIANG Feng², LI Xu¹

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Architectural Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co., Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the failure characteristics of masonry structures under earthquakes, a strengthening strategy using external prestressing techniques was presented. The external prestressing technique proposed in this research was that the junctions and the main support regions of the walls were pre-pressured by stretching the tendons located on both sides of the walls. It is believed that the shear strength and the seismic performance of the masonry wall structures can be improved by applying this external prestressing technique. The effectiveness of this technique was investigated experimentally through shaking table tests of two 1:4 scaled whole models, including an experimental model and a control one. The results show that this technique can not only increase the shear strength and the bending strength of the walls, but also improve the ductility and the energy dissipation capacity of the walls. Furthermore, the integrity and the overall stiffness of the structure are also enhanced without substantial increase of the structure weight.

Keywords: masonry structure; external prestressing; seismic strengthening; shaking table model test; seismic response

作者简介:马人乐(1951—),男,浙江嵊县人,教授。E-mail:marenle@tongji.edu.cn

通讯作者:蒋璐(1986—),男,湖北汉川人,博士研究生。E-mail:jlhb2008@126.com

收稿日期:2010年7月

0 引言

在历次地震中,大量砌体结构墙体因剪切变形而破坏,并造成过度的平面内变形;而与之正交的墙体则因平面外变形过大,抗弯能力差而倒塌,随之造成砌体结构的整体坍塌。因此,改善砌体结构的抗剪性能是减小结构在地震作用下变形、维持结构整体稳定性的关键。目前,我国仍有 80% 以上的房屋为砌体结构建筑,且绝大部分建于上世纪七八十年代,由于历史、经济等原因,这些房屋并未进行抗震设计,抗震性能较差^[1],需要对其进行抗震加固。而当前砌体结构常用的一些加固方法,如钢丝网水泥砂浆面层法、粘钢法、粘贴碳纤维布法等,存在一些问题难以解决:首先,加固费用较高,不适于在抗震加固中推广采用;其次,存在二次受力问题,且在墙与墙垂直交界线以及墙与楼板的水平交界线上,都很难达到加固效果的连续性。目前,对早期砌体结构的抗震加固还没有一种性价比很高的加固方法。

国内外对砌体结构的研究表明^[2-3],砌体截面向压应力是影响砌体抗剪强度的一个重要因素,根据砌体的剪-压相关性,适当增大砌体墙体的压应力可以提高砌体墙体的受剪能力。基于此,本文提出采用体外预应力法对砌体结构进行抗震加固,即通过在墙体两侧(贴紧墙体)从基础到屋顶压梁按构造柱的平面分布要求埋设并张拉预应力筋,使墙体在转角处和主要受力段受到预压力,以提高墙体的抗剪强度,抵消墙体中的拉应力,从而改善砌体结构的整体抗震性能。为了验证该方法的有效性,课题组在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行了模拟地震振动台模型对比试验。

1 试验概况

1.1 模型设计

振动台试验模型选取了 80 年代左右建成的典型砌体结构预制楼板教学楼中的 1 个基本单元,按 1:4 缩尺建造了 2 个相同的模型,其编号为模型一和模型二(模型一未采取任何加固措施,模型二采用体外预应力法进行加固),进行对比试验。

模型共计 4 层,层高 900mm,开间 2100mm,进深 1650mm,悬挑外廊宽度 450mm,模型平面布置见图 1 所示。墙体采用 60mm 厚烧结普通砖砌筑,每层楼面板下均设置有圈梁,无构造柱,每层楼面设有 2 根现浇花篮梁,楼板为 50mm 厚预制板(若楼板按 1:4 缩尺模拟,厚度应为 25mm;考虑到实际模型制作精度,预制楼板的厚度未按 1:4 缩尺,楼板多于 25mm 厚度

的那部分质量计为楼面的附加质量)。

原型结构墙体采用 MU10 烧结普通砖, M7.5 砂浆。为了保证模型与原型的正应力和剪应力相似关系一致,要求加速度相似关系取值为 1。这里弹性模量的相似关系取为 1.0,模型墙体材料仍选用 MU10 烧结普通砖, M7.5 砂浆(将原型结构砖块 240mm × 115mm × 90mm 按比例切割,切割后尺寸为 60mm × 28.75mm × 22.5mm)。楼面花篮梁混凝土强度等级为 C20,纵向钢筋采用铁丝,箍筋采用焊接铁丝网。预应力筋直径为 6mm,采用 45 号钢加工而成。模型二 B 轴 1、2 层墙体附加的交叉斜撑直径为 8mm,采用 8.8 级螺杆加工而成。模型的主要相似关系见表 1 所示。模型一施工完毕后全景图如图 2 所示。

表 1 模型主要相似关系

Table 1 Main similitude parameters of models		
物理性能	物理参数	相似常数
几何性能	长度	0.25
	应变	1.0
材料性能	等效弹性模量	1.0
	等效应力	1.0
	质量密度	4.0
	质量	0.0625
荷载性能	集中力	0.0625
	线荷载	0.25
	面荷载	1.00
动力性能	周期	0.5
	频率	2.0
	加速度	1.0
	重力加速度	1.0

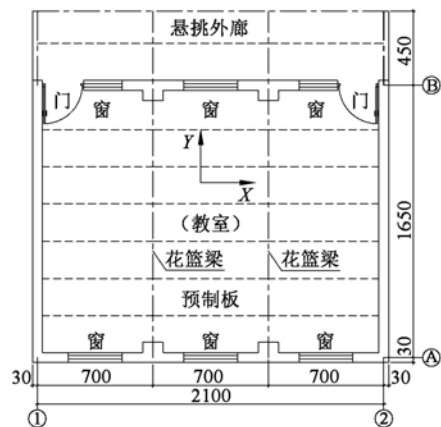


图 1 模型平面布置

Fig. 1 Planar layout of models

1.2 加固方案

对模型二按构造柱的平面分布要求布置预应力筋(图 3),对墙体施加竖向整体预应力。

考虑到 B 轴墙体开洞较多,墙体面积小,下部 1、2 层墙体自重压应力较大,可施加的预压力较小,因此由预压力所带来的墙体抗剪强度增加有限,所以



图2 模型一现场照片
Fig. 2 Overview of model-one



图4 模型二交叉斜撑布置(1,2层)
Fig. 4 Cross bracing struts at first two stories of model-two

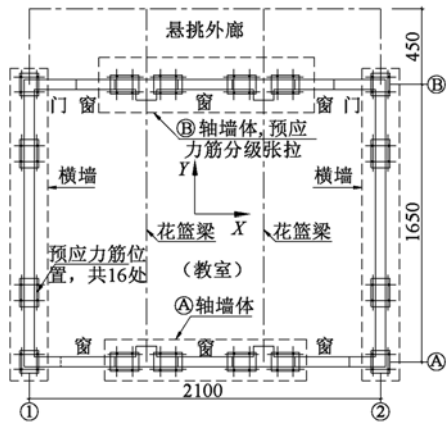


图3 模型二预应力筋平面布置
Fig. 3 Plan layout of prestressing tendons for model-two

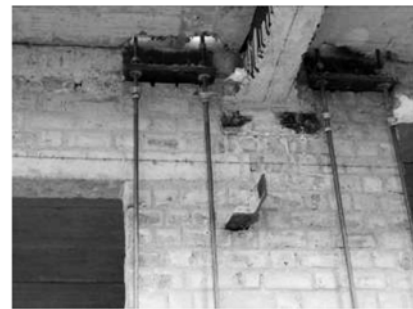


图5 分级键设置
Fig. 5 Grade key set for stretching step by step

在⑧轴墙体1,2层设置交叉斜撑以增加墙体的抗剪能力(图4),通过拧紧斜撑两端的螺母给斜撑施加一定的预应力。而⑧轴3,4层墙体自重压力小,墙体有较高的受压承载力,可对其施加较大的预压力。为了解决⑧轴墙体1层、2层以及上部两层按3段分级张拉的问题,在⑧轴墙体1,2层交界圈梁处以及2,3层交界圈梁处设置2组“分级键”来解决上下墙体的分级张拉(图5),具体做法:将预应力筋张拉至第1层所需的拉力时,拧紧1,2层交界圈梁处分级键上下的螺母,将第1层的预应力值固定,然后继续张拉预应力筋至第2层所需的拉力时,拧紧2,3层交界圈梁处分级键上下的螺母,将第2层的预应力值固定,然后再张拉预应力筋至上部两层所需的拉力后拧紧顶部螺母固定。

各墙段预应力筋施加的预拉力值见表2,由于每根预应力筋所施加的预拉力值较小,张拉时采用扭矩法,在每根预应力筋上贴应变片,接通DH 3818静态应变采集仪,通过拧紧屋面张拉垫板(图6)上的螺母将各预应力筋张拉至其设定的应变。模型二施工完毕后的全景图见图7。



图6 屋面张拉垫板
Fig. 6 Plate on roof

表2 模型二各墙段预应力筋预拉力值
Table 2 Tension force of prestressing tendons at different locations of model-two

预应力筋位置	各段预应力筋所需的预拉力/kN		
	①、②轴横墙	④轴墙体	⑧轴墙体
4层墙段	0.73	0.03	4.54
3层墙段	3.79	1.16	4.54
2层墙段	5.78	1.92	3.85
1层墙段	6.64	2.17	2.82

注:实际张拉值:①、②轴横墙不需分级张拉,全墙高张拉至6.64kN;④轴墙体不需分级张拉,全墙高张拉至2.17kN;⑧轴墙体按3段分级张拉,1层墙段张拉至2.82kN,2层墙段张拉至3.85kN,3,4层墙段张拉至4.54kN。



图7 模型二现场照片

Fig.7 Overview of model-two

1.3 试验方案

1.3.1 附加质量

原型结构的等效质量(1.0恒载+0.5活载)为284.8t,根据质量相似关系 $S_m = 0.0625$ 推算的模型结构的质量应为17.8t,而根据1:4缩尺建造的模型自重为5.56t,因此需在模型上附加配重质量12.24t。试验根据原型结构各楼层质量分布,按相似关系确定模型各楼层附加质量,具体到屋面上的配重为2.73t,2、3、4层楼面的配重均为3.17t。

附加质量放置完毕以后,模型总质量(模型自重+人工配重质量块)为17.8t,模型总质量与基础梁质量总和为20.38t。

1.3.2 地震动输入和试验工况

试验为双向输入模拟地震振动台试验,根据7度抗震设防要求,为模拟多类场地条件,地震波选用2组天然波:分别为现场记录的El Centro波(Ⅱ、Ⅲ类场地)和汶川波(Ⅱ类场地),以及1组上海人工波SHW2(Ⅳ类场地)。El Centro波和汶川波为双向输入,上海人工波为单向输入。

试验初始采用白噪声对模型进行动力特性(频率、阻尼)测试,然后在各水准地震作用试验阶段,依次对模型输入El Centro波、汶川波和SHW2波,观察裂缝并进行记录,至出现较严重裂缝时停止,在各水准地震作用试验阶段结束后,都对模型进行白噪声扫频,以观察模型动力特性的变化。具体加载制度见表3。

1.3.3 传感器布置

为了监测不同地震工况作用下各预应力筋中预应力的变化情况,在模型二的预应力筋上布置有12个应变片(P1~P12),如图8所示。其中B轴墙体上的预应力筋分3段张拉,在每一张拉段上布置2个应变片:P7、P8布置在第1段(1层墙体),P9、P10布置在第2段(2层墙体),P11、P12布置在第3段。

模型一与模型二的加速度传感器以及位移传感器的布置完全一致,见图9、10。在基础梁上布置了2个加速度传感器(A1、A2),2个位移传感器(D1、

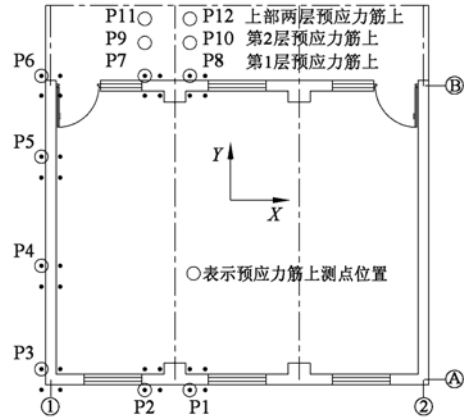


图8 预应力筋上测点布置

Fig.8 Sensors for prestressing tendons

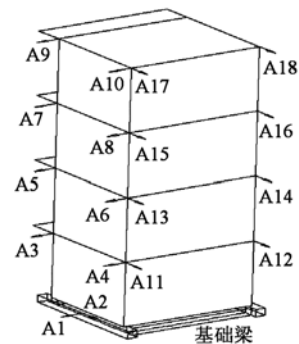


图9 加速度传感器布置

Fig.9 Arrangement of acceleration transducers

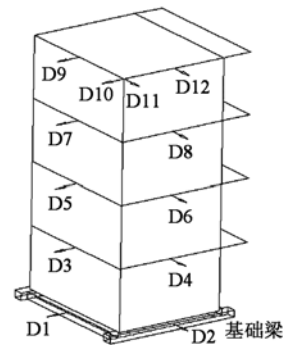


图10 位移传感器布置

Fig.10 Arrangement of displacement transducers

D2),用以记录基础梁的地震反应。2~4层楼面及屋面各布置了4个加速度传感器,用于记录模型各层的地震加速度反应;另外,在2~4层楼面各布置了2个位移传感器(X、Y向),在屋面上布置了4个位移传感器(X、Y向各布置2个),用于记录模型各层及屋面的位移情况以及模型整体的扭转情况。

2 试验结果及分析

2.1 破坏现象

需要说明的是,模型二在吊装过程中由于工人

表3 试验加载工况
Table 3 Test program

地震影响	工况序号	工况编号	主振方向	地震激励	X 向输入	Y 向输入	备注
7 度多遇	1	W1	第一次白噪声		0.050g	0.050g	双向白噪声
	2	F7EXY	X 向	El Centro	0.035g	0.030g	双向地震
	3	F7EYX	Y 向		0.030g	0.035g	
	4	F7WXY	X 向	汶川波	0.035g	0.030g	双向地震
	5	F7WYX	Y 向		0.030g	0.035g	
	6	F7SHX	X 向	SHW2	0.035g	—	单向地震
	7	F7SHY	Y 向		—	0.035g	
7 度基本	8	W2	第二次白噪声		0.050g	0.050g	双向白噪声
	9	B7EXY	X 向	El Centro	0.100g	0.085g	双向地震
	10	B7EYX	Y 向		0.085g	0.100g	
	11	B7WXY	X 向	汶川波	0.100g	0.085g	双向地震
	12	B7WYX	Y 向		0.085g	0.100g	
	13	B7SHX	X 向	SHW2	0.100g	—	单向地震
	14	B7SHY	Y 向		—	0.100g	
7 度罕遇	15	W3	第三次白噪声		0.050g	0.050g	双向白噪声
	16	R7EXY	X 向	El Centro	0.200g	0.170g	双向地震
	17	R7EYX	Y 向		0.170g	0.200g	
	18	R7WXY	X 向	汶川波	0.200g	0.170g	双向地震
	19	R7WYX	Y 向		0.170g	0.200g	
	20	R7SHX	X 向	SHW2	0.200g	—	单向地震
	21	R7SHY	Y 向		—	0.200g	
8 度罕遇	22	W4	第四次白噪声		0.050g	0.050g	双向白噪声
	23	R8EXY	X 向	El Centro	0.400g	0.340g	双向地震
	24	R8EYX	Y 向		0.340g	0.400g	
	25	R8WXY	X 向	汶川波	0.400g	0.340g	双向地震
	26	R8WYX	Y 向		0.340g	0.400g	
	27	R8SHX	X 向	SHW2	0.400g	—	单向地震
	28	R8SHY	Y 向		—	0.400g	
9 度罕遇	29	W5	第五次白噪声		0.050g	0.050g	双向白噪声
	30	R9EXY	X 向	El Centro	0.620g	0.527g	双向地震

操作不慎导致②轴横墙底部出现 1 条水平裂缝,使模型二出现轻微损伤。两模型破坏现象如下:

模型一:在 7 度多遇与 7 度基本地震作用试验阶段,模型一墙体均无明显开裂现象。进入 7 度罕遇地震作用试验阶段后,①轴墙体 1 层出现细长斜裂缝,窗间墙出现水平通缝;③轴 3、4 层花篮梁下部墙体出现较长阶梯形斜裂缝,窗角亦出现若干条细长裂缝。模型一在 8 度罕遇地震作用的第 23 工况 El Centro 波下发生最终破坏:底层四角墙体均被压溃,并且四角均出现了明显的扭转滑移现象(图 11);①轴横墙沿墙根底部出现通长水平裂缝,出现明显的弯曲破坏(图 12);②轴横墙墙根处裂缝由阶梯形逐渐演化成水平缝;①轴墙体 1 层窗间墙水平缝贯通;③轴墙体 1 层中部窗户上下角均出现较长斜裂缝。模型一的破坏是由弯、剪、扭的复合作用造成,破坏在①、②、③、④轴 4 片墙体上均存在,其中①、②轴横墙破坏较为严重。

模型二:在 7 度多遇地震作用试验阶段,模型二墙体无明显开裂现象。在 7 度基本地震作用试验阶

段,①轴墙体 1 层窗角出现 2 处细微裂缝,其余各处完好无损。进入 7 度罕遇地震作用试验阶段后,①轴墙体 1 层窗角先前出现的 2 处裂缝有所扩展,窗间墙有多条新的裂缝出现,裂缝较细,分布较密;③轴墙体 1 层斜撑脚部附近出现几处细长斜裂缝。在 8 度基本地震作用试验阶段,①轴墙体在此前各工况出现的裂缝继续扩展,在 1 层窗间墙上又有新的裂缝出现;③轴墙体 1 层斜撑脚部裂缝继续扩展,并在斜撑脚部又出现数条新的斜裂缝,窗角出现新的斜裂缝。模型二在 9 度罕遇地震作用的第 30 工况 El Centro 波下发生最终破坏,破坏形态以剪切破坏为主,并伴随有明显的扭转特征;破坏主要集中在①、③轴墙体上:①轴 1 层窗间墙在此前各工况下产生的裂缝贯通,最终形成明显的“X”形裂缝(图 13);①轴与③轴交界处墙体开裂、②轴与①轴交界处 2 层楼面圈梁被压碎,有明显的扭转特征;③轴 1 层斜撑被拔出,最终形成“X”形裂缝(图 14);①轴横墙完好,②轴横墙沿原吊装裂缝下部,出现 1 条水平裂缝。

由模型破坏现象可以看出:在 7 度多遇和 7 度罕



图 11 墙角扭转滑移

Fig. 11 Torsional slip at corner



图 12 ①轴横墙裂缝

Fig. 12 Crack in transverse wall of axis ①



图 13 ①轴窗间墙 X 形裂缝

Fig. 13 X-shaped cracks in wall between windows of axis ①



图 14 ②轴 1 层斜撑破坏

Fig. 14 Damage of cross bracing struts in wall of axis ② at story one

遇地震作用试验阶段,模型基本处于弹性工作阶段。在 7 度罕遇地震作用试验阶段,随着墙体裂缝的开展,结构刚度下降,模型进入弹塑性阶段。

总体而言,模型一破坏比较突然。在破坏之前(主要指 7 度罕遇地震作用阶段)裂缝出现较少,且裂缝分布较散。破坏时裂缝也较少,基本是 1 条主裂缝贯通,且裂缝较宽(宽度达 5mm),墙体刚度急剧下

降,抗剪承载能力丧失,说明砌体结构的脆性特点。模型一的①、②轴墙体的弯曲破坏也证明了本文关于砌体结构破坏过程的描述正确:④、⑤轴墙体由于剪切破坏并发生过度的平面内变形,导致与其正交的①、②轴墙体受弯破坏。

模型二在破坏前(主要指 7 度罕遇地震作用阶段和 8 度罕遇地震作用阶段)裂缝有一定程度的开展,裂缝细长,且分布较密。破坏时主裂缝是由先前各工况产生的裂缝贯通形成,因此主裂缝周围同时存在许多细小裂缝。

模型一最终发生明显的扭转、弯曲破坏,模型二虽然也表现出一定的扭转特性,但整体是以剪切破坏为主,表明模型二的整体抗扭转能力以及墙体受弯能力较模型一都有显著提高。另外,由①、②、④、⑤轴 4 片墙体的破坏情况对比可知,对①、②轴墙体施加预压力后的加固效果较对④、⑤轴墙体(较大开洞)施加预压力后的加固效果显著。

2.2 动力特性

对各次白噪声扫频后的结果进行分析,得到不同水准地震试验阶段前后模型的频率如表 4 所示。

表 4 模型频率

Table 4 Variation of frequencies of models

振型	模型编号	模型频率/Hz				
		第 1 次白噪声	第 2 次白噪声	第 3 次白噪声	第 4 次白噪声	第 5 次白噪声
1 阶 (扭转)	模型一	6.15	6.15	5.96	5.66	—
	模型二	7.03	6.83	6.83	6.35	5.46
2 阶 (X 向平动)	模型一	7.13	7.13	6.84	6.35	—
	模型二	7.62	7.62	7.62	7.42	5.86
3 阶 (Y 向平动)	模型一	7.42	7.42	7.23	6.84	—
	模型二	8.11	8.11	8.11	7.52	7.13

由传递函数推算得到两模型 1 阶振型均为扭转,这与其破坏时都表现出明显的扭转特性比较吻合,分析其原因:从模型平面图可以看出,两模型在④、⑤轴墙体上有较大的开洞,并且⑤轴墙体上的开洞面积要大于④轴,使得模型的刚度中心向④轴偏移;按照 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》^[4],悬挑外廊活荷载为 2.5kN/m²,教室活荷载为 2.0kN/m²。根据质量相似关系将其折算成楼层附加质量时,外走廊单位面积的质量块多于教室内单位面积质量块,这样就使得模型重心向⑤轴偏移,造成重心和刚度中心有较大偏移。并且这两个对比模型是按照 80 年代左右建成的典型砌体结构预制楼板教学楼中取出的 1 个基本单元缩尺建造,模型整体性不强,所以两模型结构都有较大扭转效应。但模型二的抗扭转性能及整体性较模型一要好,即采用体外预应力法加固能够增强结构的整体性,提高结构整体抗扭转能力。

由两模型频率变化情况对比可以看出:

(1)前3阶初始频率模型二较模型一分别高出14.3%、6.9%、9.3%。表明采用体外预应力法对墙体施加竖向整体预应力可以提高结构整体刚度。

(2)随着台面输入地震动幅值的增大,结构频率逐渐下降,模型二较模型一频率下降幅度大。试验开始到第5次白噪声扫频结束,模型二的前3阶频率较其前3阶初始频率分别下降22.3%、23.1%、12.1%;从试验开始到第4次白噪声扫频结束,模型一的前3阶频率较其前3阶初始频率分别下降7.9%、10.9%、7.8%。砌体结构的特点是破坏前墙体刚度很大,在破坏之前的各工况刚度虽有所下降但降幅很小,破坏后墙体刚度迅速下降甚至完全丧失,而采用体外预应力法加固后模型二在破坏之前刚度已有明显下降,表明采用体外预应力法对砌体结构墙体施加竖向整体预应力可以改善墙体的延性,延缓墙体的刚度退化。

依据功率谱分析法^[5]由传递函数推算模型前2阶阻尼比变化见图15。由图中可以看出:随着台面输入加速度峰值的增加,模型阻尼比随之逐渐增大。模型二的前2阶阻尼比较模型一的前2阶阻尼比略有提高。表明采用体外预应力法加固后墙体的耗能能力有所增强。一般普通实体墙以剪切变形为主,变形能力小,呈脆性破坏,墙体中的裂缝不能得到充分的发展,其耗能主要依靠结构本身的破坏^[6],如裂缝的产生和发展,底部剪切滑移等过程消耗能量,因而耗能能力有限。而对墙体施加预应力以后,其脆性性质有所改变、能够承受一定的弯矩作用,墙体的受弯性能提高、耗能能力增强。

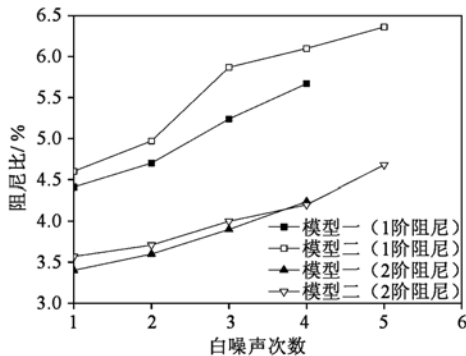


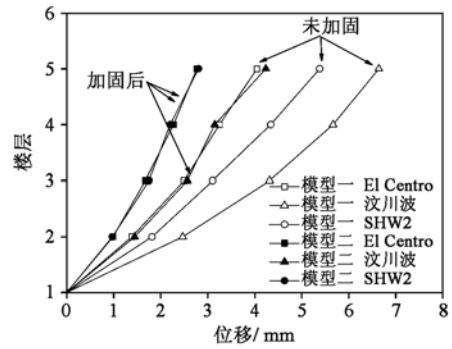
图15 模型前2阶阻尼比变化

Fig. 15 First two damping ratios of models

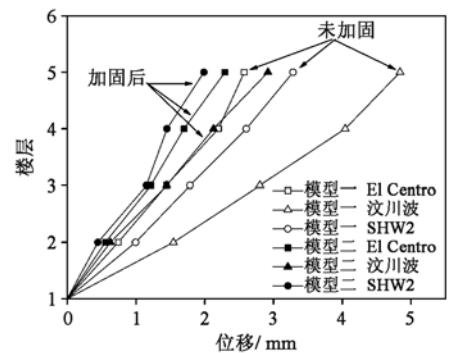
2.3 位移反应

在7度多遇地震作用和7度基本地震作用试验阶段,模型一与模型二均处于弹性阶段,模型位移反应都很小且基本相当。随着地震水准的提高,进入7度罕遇地震作用试验阶段后,由于墙体裂缝的开展,模型一结构刚度急剧下降,其位移反应较模型二明显增大,见图16;而模型二由于预压力的作用,在此

阶段裂缝开展较少,刚度下降缓慢,其结构整体仍然表现出较强的弹性。



(a) X向



(b) Y向

图16 7度罕遇地震作用阶段模型位移反应

Fig. 16 Displacement of models under rare earthquake of intensity 7

2.4 加速度反应

在7度多遇地震作用和7度基本地震作用试验阶段,模型一与模型二均处于弹性阶段,两模型加速度放大系数都近似呈倒三角形分布;进入7度罕遇地震作用试验阶段后,X向模型一的加速度放大系数较模型二明显减小,并且已不再呈倒三角形分布(图17)。可以看出模型一X向由于底层墙体的开裂破坏,起到了一定的减震作用,因此上部加速度放大系数增幅减小,而模型二由于预应力的作用,X向底层开启的裂缝闭合,结构整体仍表现出较强的弹性,加速度放大系数仍近似呈倒三角形分布。

2.5 模型二预应力筋应变反应

随着地震水准的提高,预应力筋的应变逐步增大。在8度罕遇地震作用试验阶段,横墙及分级键设置处预应力筋上各测点最大应变包络如图18所示。底层预应力筋(测点P8)的最大应变在8度罕遇地震作用试验阶段达 488.91×10^{-6} ;横墙两端部预应力筋上测点P3、P6在各水准地震作用试验阶段的应变较中部测点P4、P5的应变要高,由于在地震作用下墙体中产生的剪应力并非均匀分布,而是呈现两端大、向中部逐渐减小的趋势,且墙体中同时也存在着

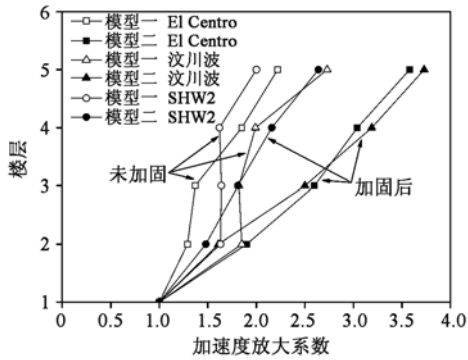


图 17 7 度罕遇地震作用阶段模型 X 向加速度放大系数
Fig. 17 Acceleration amplification factor in X direction of models under rare earthquake of intensity 7

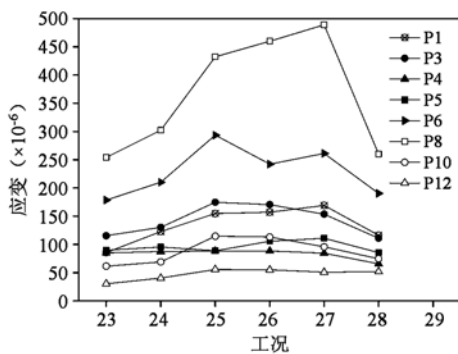


图 18 8 度罕遇地震作用阶段模型二预应力筋最大应变包络线

Fig. 18 Maximum strain envelope of prestressing tendons in model-two under rare earthquake of intensity 8

弯矩作用;地震作用时,墙体开裂往往也是在端部首先发生,然后再逐渐向中部延伸,因此在实际加固设计时,可适当增加墙体两端(纵横墙交角处)的预压力,防止墙体端部率先破坏。

3 结论

(1) 采用体外预应力法对砌体结构墙体施加竖

向整体预应力可以增强结构的整体性和结构抵抗扭转的能力,提高结构整体刚度;此外,还可改善墙体的延性,延缓墙体的刚度退化。

(2) 采用体外预应力法加固后,墙体的脆性性质有所改变,能够承受一定的弯矩作用,其受弯性能提高、耗能能力增强。

(3) 体外预应力法对于横墙(无开洞墙体)的加固效果较有较大开洞墙体的加固效果好。在实际加固设计时,可考虑对受力较大的独立窗间墙部分施加多向体外预应力以重点提高其抗震性能。

参 考 文 献

- [1] 刘克. 砌体结构地震荷载裂缝的非线性分析[D]. 天津:天津大学,2007. (LIU Ke. Nonlinear analysis of cracks under seismic load in masonry structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [2] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003. (SHI Chuxian. The theory and design of masonry structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 苏小卒. 砌体结构设计[M]. 上海:同济大学出版社,2002. (SU Xiaozu. Design of masonry structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002. (in Chinese))
- [4] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. (GB 50009—2001 Load code for the design of building structures[S]. (in Chinese))
- [5] 吕西林. 复杂高层建筑结构抗震理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:261-262. (LU Xilin. The application and seismic theory for high-rise structures [M]. Beijing: Science Press, 2007: 261-262. (in Chinese))
- [6] 郑山锁,薛建阳,王斌. 砌体结构抗震[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:13-33. (ZHENG Shansuo, XUE Jianyang, WANG Bin. Seismic masonry structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 13-33. (in Chinese))