

预制再生混凝土框架模型模拟地震振动台试验

肖建庄¹, 丁 陶¹, 范氏鸾¹, 朱永明²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海城建物资有限公司, 上海 200063)

摘要: 选用不同地震波, 通过模拟地震振动台对首例 1/4 缩尺再生粗骨料取代率为 100% 的预制再生混凝土框架模型进行了 3 种地震波输入试验. 通过白噪声扫描得到了该模型结构的自振频率、结构振型、阻尼比等动力特性, 研究了加速度、楼层剪力、位移动力反应, 记录了结构在试验中的开裂等现象. 试验分析表明, 随着地震动峰值强度的增加, 模型呈现自振频率下降、阻尼比增大、加速度放大系数逐渐降低、楼层剪力逐渐增大的趋势; 在弹塑性阶段后期, 后浇节点刚度退化迅速, 层间位移明显增大. 采用层间位移作为评估标准, 对预制再生混凝土框架的抗震能力进行了评价, 表明预制再生混凝土框架抗震性能良好, 但应采取必要措施加强梁柱节点的耗能能力.

关键词: 预制再生混凝土; 框架结构; 振动台试验; 抗震性能; 节点刚度

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

Shaking Table Test on Precast Recycled Aggregate Concrete Frame Structure Model

XIAO Jianzhuang¹, DING Tao¹, THAM Thiloan¹, ZHU Yongming²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Construction Material Company, Shanghai 200063, China)

Abstract: A one-fourth scaled precast concrete frame structure model, which was made of recycled aggregate concrete (RAC) with 100% replacement percentage of recycled coarse aggregate, was tested on the shaking table with 3 different seismic wave inputs. Dynamic characteristics such as natural frequency, vibration mode, damping ratio were assessed through white-noise scanning. Acceleration, inter-storey shear force and displacement dynamic response were investigated. Damage phenomena during the test were described in detail. The test analysis indicates that the natural frequency descends, the damping ratio ascends and the acceleration amplifying factor decreases gradually, the inter-

storey shear force increases gradually with the increase of seismic intensity. In the later elasto-plastic stage, the deterioration of joint stiffness is quite rapid and the inter-storey drift is much larger obviously. The inter-storey drift is adopted as the index to evaluate the seismic performance of the precast RAC frame structure, which shows that the precast RAC frame structure has good seismic performance and some measures should be taken to enhance the energy dissipation of the beam-column joint if it is applied to practice.

Key words: precast recycled aggregate concrete; frame structure; shaking table test; seismic performance; joint stiffness

预制混凝土结构具有节约材料和劳动力, 改善施工工效, 加快施工进度, 提高建筑工程质量等优势. 从环保和节能的角度讲, 应用预制混凝土技术, 可以降低环境污染, 取得较大的经济效益^[1]. 美国于 20 世纪 90 年代进行了一系列的试验研究^[2-3]. 同济大学依托欧盟“预制混凝土结构抗震”第五框架项目, 也对预制结构抗震性能进行了深入研究^[4]. 同时, 有关再生混凝土物理和力学性能的研究也已经取得一定成果^[5], 国内外学者对再生混凝土结构性能, 包括梁^[6]、柱^[7]、节点^[8]及整体框架^[9-10]也有所涉及, 但是在再生混凝土预制结构方面尚未进行系统的研究工作. 本文将进行一个 6 层 1/4 缩尺的预制再生混凝土框架模型的振动台试验, 以加深对该类再生混凝土框架结构抗震性能的了解, 为再生混凝土在预制结构方面的推广应用提供理论和技术支持.

1 模型设计与制作

1.1 相似关系

考虑到试验室振动台性能参数、施工条件和行

车起吊吨位等因素,根据实际结构的平面尺寸,为最大限度地利用振动台面,预制再生混凝土框架模型几何相似比取为 1/4. 考虑到试验室噪声的影响,加速度相似比不宜过小,取为 1. 848,同时再生混凝土弹性模量相似比取为 1. 0. 基于 Buckingham $\pi^{[11]}$ 定理,模型设计所需的其他相似关系可由几何、加速度、弹性模量 3 个相似比求出,详见表 1. 该模型为欠质量人工质量模型.

表 1 模型与原型的相似比

Tab.1 Similitude ratio of the model and its prototype			
物理参数	相似比	相似系数	备注
长度	s_L	0. 250	控制参数
力	$s_L^2 s_E$	0. 063	
加速度	s_a	1. 848	控制参数
时间	$s_L^{1/2} / s_a^{1/2}$	0. 368	
阻尼	$s_E s_L^{3/2} / s_a^{1/2}$	0. 092	
弹性模量	s_E	1. 000	控制参数
泊松比	1	1. 000	

1.2 模型材料

采用海螺牌普通硅酸盐水泥 P. O42. 5, 细骨料选用河砂, 再生粗骨料由废混凝土破碎、筛分加工而成, 由相似关系, 粒径范围为 5~10 mm. 配合比设计时^[12], 采用再生骨料取代率为 100% 的再生混凝土, 强度为 C30, 坍落度范围为 180~200 mm. 混凝土配合比(质量比)为水: 水泥: 砂: 再生粗骨料=1: 1. 859: 3. 202: 4. 554. 减水剂采用巴斯夫普通减水剂. 再生混凝土性能指标见表 2. 采用镀锌铁丝模拟钢筋. 模型中纵向钢筋采用 8 号和 10 号镀锌铁丝模拟, 箍筋采用 14 号镀锌铁丝模拟. 镀锌铁丝性能指标见表 3.

表 2 再生混凝土材性能指标

Tab.2 Mechanical indexes of recycled concretes				
指标	再生粗骨料 表观密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	再生粗骨 料吸水 率/%	预制构件再生 混凝土立方体 抗压强度/MPa	后浇节点再生 混凝土立方体 抗压强度/MPa
平均值	2. 48	8. 21	37. 0	39. 1

表 3 钢筋的材性能指标

Tab.3 Mechanical indexes of steel bars				
型号	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
8 号	3. 94	358	407	200
10 号	3. 32	306	388	200
14 号	2. 32	252	363	200

1.3 模型设计与施工

试验模型为 2 跨 2 开间 6 层的框架结构. 按“强柱弱梁”的原则进行设计, 抗震等级为二级; 模型的配筋和构造要求按烈度为 8 度、设计地震分组为第 2 组、建筑场地为 II 类场地的地震区进行设计^[13]. 根据相似关系, 模型结构总高度为 4 500 mm.

框架梁设计为预制 U 型叠合梁, 梁顶钢筋现场绑扎; 预制构件的连接形式采取柱-柱榫式连接, 节点区柱钢筋采用焊接连接, 节点区和板混凝土采用后浇. 构件配筋设计时考虑了预制施工的特殊性、节点区梁柱钢筋规避等因素, 模型平面布置、截面配筋及梁柱节点详见图 1. 施工顺序为: 分批预制梁和柱, 并预留焊接和锚固钢筋; 下柱上搁置预制梁, 绑扎梁顶钢筋, 吊装上柱, 保证其垂直度, 焊接上下柱钢筋; 绑扎楼板钢筋, 浇筑节点区及板混凝土.

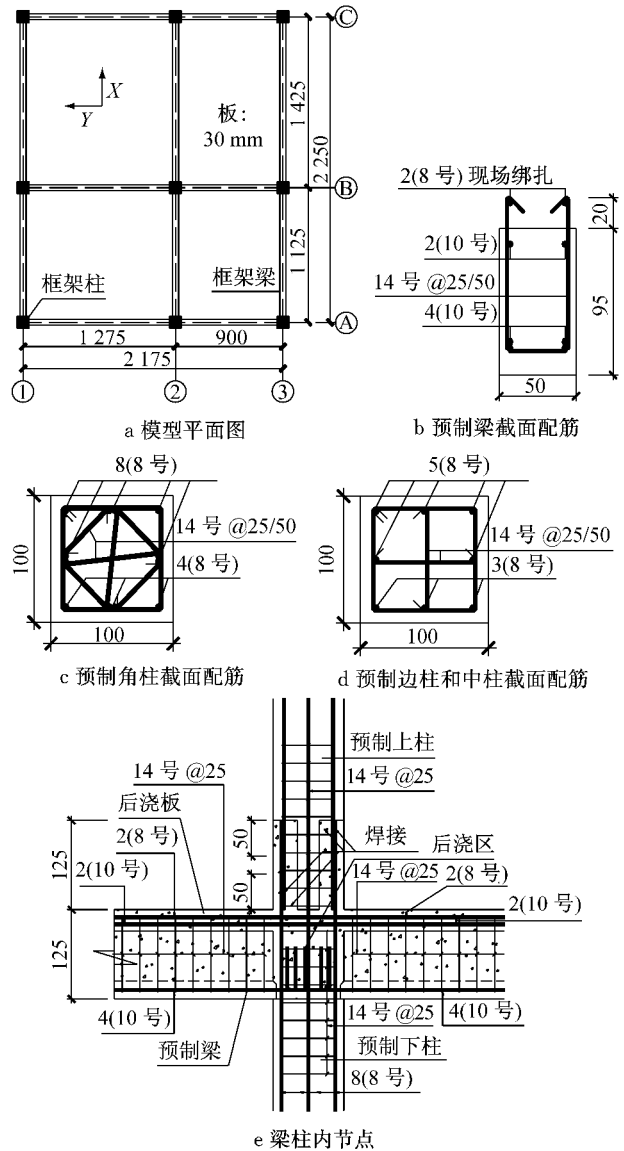


图 1 预制再生混凝土框架模型尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.1 Size and reinforcement of the precast recycled aggregate concrete frame model(unit: mm)

2 振动台试验

2.1 波形选择及测点布置

为了模拟多种场地条件, 振动台所输入的地震

波选用了汶川地震波(WCW)、El Centro波(ELW)和上海人工波(SHW).图2给出了WCW,ELW和SHW加速度时程曲线.本次试验共布置了30个加速度传感器、14个拉线式位移传感器.其中,加速度传感器测量两个方向的加速度,位移传感器用来测量结构两个方向的绝对位移反应.图3是模型施工完毕后放在振动台上的照片.

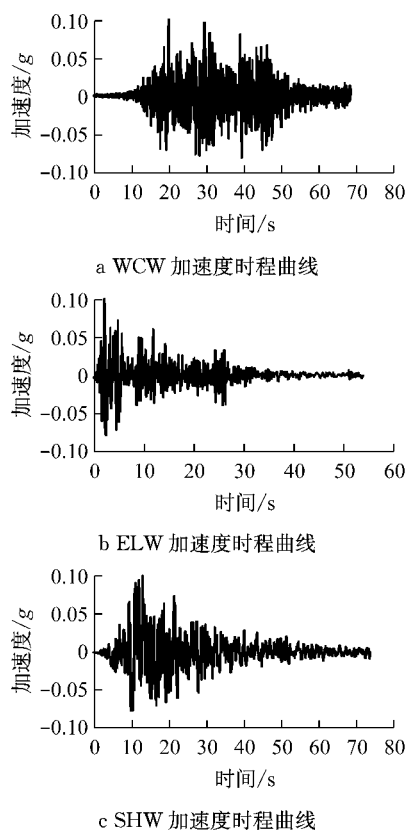


图2 输入波加速度时程曲线($g=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig.2 Time-history curves of the seismic waves($g=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)



图3 振动台上的预制再生混凝土模型

Fig.3 Precast recycled aggregate concrete frame model on shaking table

2.2 试验加载方案

根据抗震设防要求^[13],输入地震波加速度峰值依次增加,以模拟不同水准地震对结构的作用.本次试验模型的主震方向为X方向(X方向和Y方向见图1),地震波单向输入.包括白噪声扫描前后共输入了32个工况,分别为0.066g(7度多遇)、0.130g(8度多遇)、0.185g(7度基本)、0.264g(9度多遇)、0.370g(8度基本)、0.415g(7度罕遇)、0.550g(8度罕遇弱)和0.750g(8度罕遇).同一地震等级试验中,WCW,ELW和SHW依次输入.

2.3 模型破坏过程及特征

模型在经历8度多遇SHW后,1层柱的底部出现了细长的裂缝.7度基本烈度工况后,梁上产生的裂缝向上或向下发展,此时后浇混凝土及预制现浇结合面并未产生明显的裂缝.9度多遇地震后,底层构件普遍出现了开裂现象;同时,2层柱的后浇混凝土节点开始产生裂缝.模型在经历8度基本地震后,在1层和2层梁端产生明显的垂直和斜裂缝的同时,角柱的后浇混凝土节点处也开始产生明显的斜裂缝.8度罕遇弱地震工况后,后浇混凝土节点处的斜裂缝继续发展,2层部分后浇混凝土节点甚至出现了保护层脱落的现象.在8度罕遇工况结束后,模型1~2层破坏相当严重,部分后浇节点出现压坏,形成斜交叉裂缝.从试验结果看出,在试验的后期,遭遇强烈地震时,模型底部后浇混凝土节点刚度退化迅速,呈现半刚接状态,部分预制与现浇结合面产生水平裂缝,破坏形式与现浇再生混凝土框架有较大区别.预制再生混凝土框架试验模型的部分梁柱及节点裂缝发展情况见图4.

3 模型试验结果

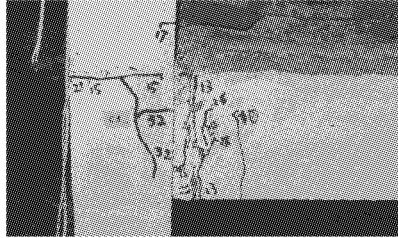
3.1 动力特性

输入台面各级地震波前后均用白噪声对模型进行扫描,可以得到模型结构的自振频率、振型和阻尼比等动力特征参数.

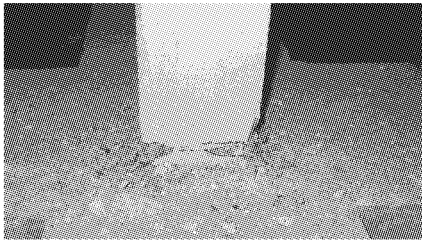
3.1.1 自振频率

表4列出了试验模型在不同工况的前2阶自振频率值.表4的数值表明:在输入小峰值的地震波激励时,模型频率基本保持不变,降低幅度很小,说明模型整体刚度基本没有发生变化.而在输入较大峰值的地震波激励后,模型频率不断下降,且输入地震波的能量越大,频率下降的趋势则越快.结合试验过程结构破坏现象分析,应是试验后期模型结构受到

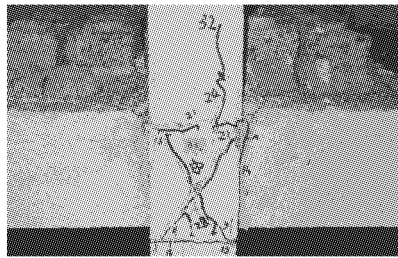
损伤,裂缝增多,后浇节点和构件的刚度迅速退化导致.在最后一个工况结束后,模型自振频率已不足试验前的25%.



a 1层梁端裂缝



b 1层柱底裂缝



c 1层后浇节点裂缝



d 2层后浇节点裂缝

图4 框架模型典型裂缝

Fig.4 Typical cracks of the frame model

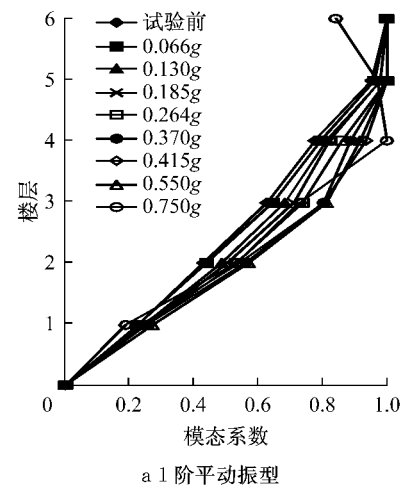
3.1.2 结构振型

图5表示试验模型在不同试验阶段X方向的前2阶平动振型.从图中可以看出,X方向的1阶振型基本属于剪切型.在试验后期,模型振型曲线发生了较大变化.1阶振型和2阶振型在模型底部出现了较为明显的外凸现象,2阶振型幅值零点的位置也不不断下移.这与在试验后期,模型1~3层梁柱裂缝增多,部分后浇节点刚度迅速退化是吻合的.在整个试验过程中,预制再生混凝土框架模型在不同试验阶段的地震反应都以基本振型为主.

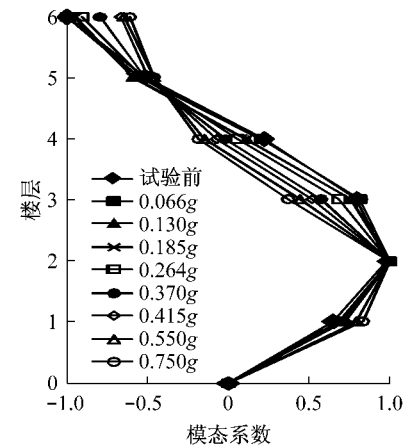
表4 模型各试验阶段实测频率值

Tab.4 Natural frequencies of the model on different stages

工况	方向	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz
试验前	X	4.125	13.625
	Y	4.250	13.750
0.066g	X	3.750	12.625
	Y	4.125	13.250
0.130g	X	3.125	11.125
	Y	3.750	11.875
0.185g	X	2.875	10.750
	Y	3.375	11.500
0.264g	X	2.500	9.875
	Y	3.250	11.250
0.370g	X	2.125	9.125
	Y	2.625	10.375
0.415g	X	1.750	8.000
	Y	2.375	9.250
0.550g	X	1.625	7.250
	Y	2.125	8.750
0.750g	X	1.000	6.750
	Y	1.875	7.750



a 1阶平动振型



b 2阶平动振型

图5 X主方向振型变化

Fig.5 Variation of vibration mode in X direction

3.1.3 结构阻尼比

模型结构的阻尼比由传递函数曲线根据半功率法求得,它反映了结构的耗能特性. 试验前通过白噪声扫描得到模型 X 方向阻尼比约为 0.040, Y 方向约为 0.041. 随后的试验过程中,阻尼比随着地震强度的增加逐渐增大. 例如,在台面输入加速度峰值为 0.370g 的工况中,模型 X 方向阻尼比约为 0.192, Y 方向约为 0.101. 试验结束时,模型 X 方向的阻尼比甚至超过了 20%. 这主要是由于结构累积损伤程度增大而导致耗能的提高. 在试验后期,模型进入弹塑性状态,阻尼比增大的幅度相对于试验前期较大.

3.2 加速度反应

图 6 表示不同试验阶段,模型分别在 WCW, ELW 和 SHW 作用下的加速度放大系数分布. 从图 6 可以看出,加速度放大系数总体上随着楼层的增大而增加. 随着振动台输入加速度峰值的不断增大,加速度放大系数持续减小,这说明随着台面输入加速度峰值的增加,结构进入塑性的程度逐步加深,累积损伤不断加剧,抗侧刚度减小,这与前面自振频率的分析也是一致的. 尤其是结构在经历 0.550g 即 8 度罕遇弱地震后,加速度放大系数减小趋势已经不明显,这表明在此工况后,结构 X 方向抗侧刚度急剧退化. 需要指出的是,模型出现了在某些较大台面峰值下,部分楼层加速度峰值反而大于较小台面峰值时的情况. 根据反应谱理论,加速度放大系数和结构周期之间的关系是非线性和多峰值的. 随着结构破坏的加剧,结构周期逐渐增大,在一定周期范围内,结构的加速度放大系数可能会出现随着结构周期的增大而增大的情况^[14]. 在同水准地震作用即加速度峰值保持相同的情况下,结构加速度反应的规律并不相同. SHW 作用时,加速度放大系数最大. 这体现了地震频谱对结构反应的影响.

3.3 楼层剪力

模型的楼层剪力反应了结构地震内力的大小,图 7 表示不同试验阶段,模型分别在 WCW, ELW 和 SHW 作用下的最大楼层剪力分布. 由图 7 不难看出,在同一地震水准作用下,各楼层的最大层剪力沿楼层高度方向总体上呈递减趋势. 在 0.066g ~ 0.415g 的试验前期,结构处于弹性阶段和弹塑性阶段的初期,随着台面输入加速度峰值的增加,各楼层剪力都呈现逐渐增大的趋势;在 0.415g 的地震试验中,各层的最大层剪力已接近和达到最大承载能力值,部分梁端和后浇节点区已形成塑性铰,模型发生严重破坏,这与试验中观察到的现象是一致的. 在

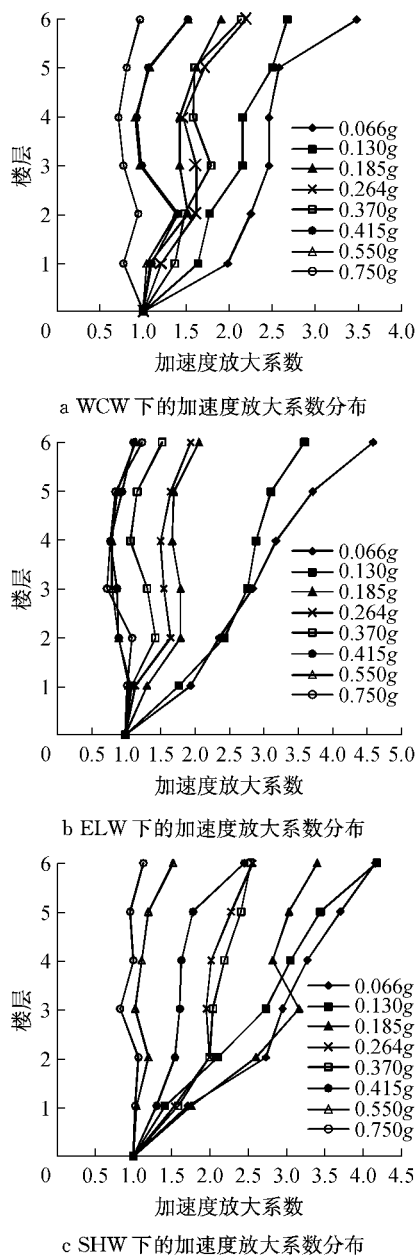


图 6 模型在不同地震波下的加速度放大系数分布
Fig.6 Distribution of acceleration amplitude factors of the model with different seismic wave inputs

0.550g 和 0.750g 的试验后期,结构进入严重弹塑性阶段,结构损伤累积,破坏程度加剧,此时,随着加速度峰值的增加,模型楼层剪力反而随之下降.

3.4 位移反应

图 8 表示不同试验阶段,模型分别在 WCW, ELW 和 SHW 作用下各楼层的最大位移反应. 图 9 表示不同试验阶段,模型分别在 WCW, ELW 和 SHW 作用下各楼层最大层间位移反应. 在地震试验中输入同一水准地震波时,结构的位移变形曲线和层间位移曲线的形状大致相同;随着加速度峰值不断加大,模型各楼层的位移和层间位移也随之增大;

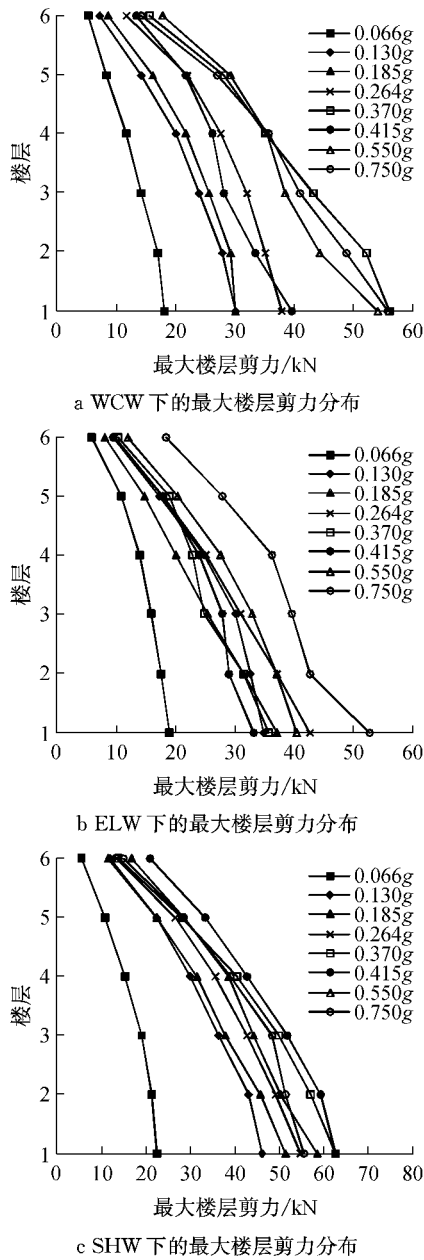


图7 模型在不同地震波下的最大楼层剪力分布

Fig.7 Distribution of the maximum inter-storey shear force model with different seismic wave in puts

在整个试验过程中,2层的层间位移最大,其次是1层的层间位移,其余各层为3层>4层>5层>6层.在试验前期,结构各楼层侧向位移曲线基本上保持为一条直线,说明结构处于弹性阶段;在试验后期,模型1层和2层层间位移的增长幅度大于3~6层层间位移的增长幅度,这是由于在弹塑性阶段,模型1层和2层破坏严重,梁端和节点区出现塑性铰,层间刚度退化较快.从总体上看,结构整体侧向位移曲线表现出一定的右凸趋势,该预制框架的结构变形曲线呈现剪切型.

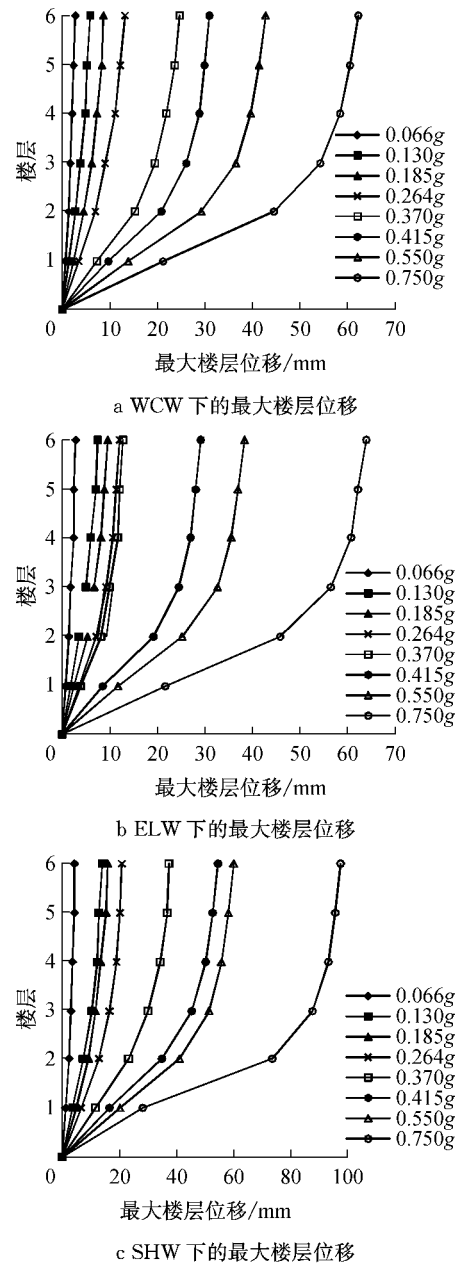


图8 模型在不同地震波下的最大楼层位移

Fig.8 Distribution of the maximum displacement of the model with different seismic wave inputs

4 抗震能力评估

建筑抗震设计规范要求对结构进行抗震变形验算,图10表示地震试验中各楼层最大层间位移角的变化情况.

结合图10,并根据以上对预制再生混凝土框架结构模型各种地震反应的分析可以得到,在7度多遇(0.066g)地震试验中,模型结构没有破坏,仍处于弹性状态,最大层间位移角为1/760,小于1/550,满

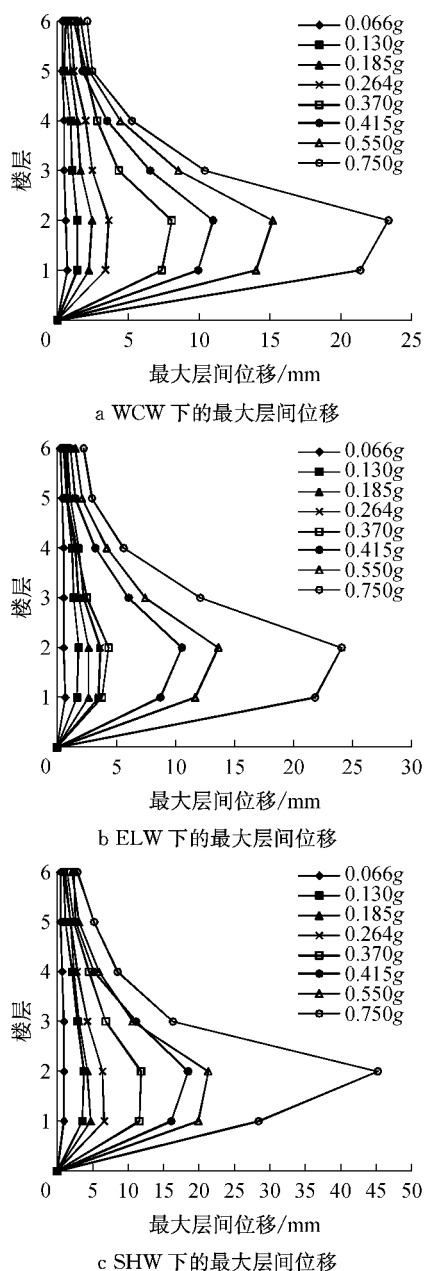


图 9 模型在不同地震波下的最大层间位移

Fig.9 Distribution of the maximum inter-storey drift of the model with different seismic wave inputs

足“小震不坏”的要求;在 7 度基本(0.185g)地震试验中,模型的层间位移角为 1/158,破坏很轻微,主要破坏处于梁端,模型逐渐进入非线性状态,满足“中震可修”的要求;在 7 多罕遇(0.415g)地震试验中,模型破坏已经较为严重,后浇节点已经出现明显的裂缝,并逐渐转为塑性铰,WCW 作用下最大层间位移为 1/68,满足小于 1/50 的规范要求,SHW 作用下达到 1/40,已不满足层间位移角小于 1/50 的规范要求,但可认为满足“大震不倒”的要求。

在 8 度多遇(0.130g)地震试验中,模型的最大层间位移角为 1/199;在 8 度基本(0.370g)地震试验

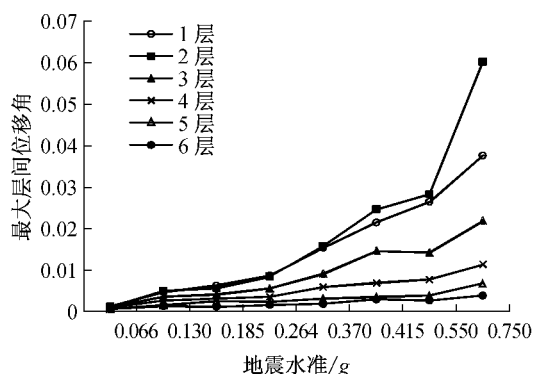


图 10 地震试验中各楼层最大层间位移角

Fig.10 The maximum inter-storey drift ratios in the earthquake test

中,模型的层间位移角为 1/63;在 8 多罕遇(0.750g)地震试验中,最大层间位移角达到 1/17,部分后浇节点出现压坏情况,模型破坏相当严重. 预制再生混凝土框架结构在 8 度多遇和 8 度罕遇地震作用下的最大层间位移角均不满足规范要求. 但是经过多次的重复地震试验后,模型仍没有倒塌,说明预制再生混凝土框架结构有良好的变形能力和抗震能力。

综合分析,预制再生混凝土框架在弹性和弹塑性前期阶段完全满足规范规定的 7 度抗震设防烈度的要求,弹塑性阶段后期节点处后浇混凝土破坏严重,耗能不佳. 本文建议预制再生混凝土框架结构房屋用在 8 度抗震设防烈度要求的地震区时,抗震结构宜按比本地区抗震设防烈度要求提高 1 度的要求进行设计,且预制再生混凝土框架结构的节点连接方式还需进一步研究。

5 结论

通过对首例预制再生混凝土框架模型的振动台试验及其抗震能力评估,可以得到下述结论:

(1)在整个试验过程中,预制再生混凝土框架结构在弹性和弹塑性阶段前期抗震性能较好,在弹塑性阶段后期,节点区损伤严重,梁端和节点区出现塑性铰,后浇混凝土和预制构件的结合面出现水平裂缝,结构抗侧刚度迅速退化。

(2)试验模型的自振频率随台面峰值加速度的增大而降低,阻尼比随着结构损伤程度的增大而增大,结构振动以 1 阶振型为主。

(3)同一地震水准下,加速度放大系数总体上沿楼层高度方向逐渐增大,各楼层的最大楼层剪力沿楼层高度方向总体上呈递减趋势,结构的位移变形

曲线和层间位移曲线的形状大致相同;随着振动台输入加速度峰值的不断增大,加速度放大系数持续减小,各楼层的位移和层间位移也随之增大,结构侧向变形曲线呈现剪切型,楼层剪力呈现先增大后减小的趋势。

(4)预制再生混凝土框架结构在8度多遇和8度罕遇地震下的最大层间位移角均不满足规范要求。但是经过多次的重复的地震试验后,模型结构仍没有倒塌,说明预制再生混凝土框架结构有良好的变形能力和抗震能力。本文建议再生混凝土框架结构房屋用在8度抗震设防烈度要求的地震区时,抗震结构宜按比本地区抗震设防烈度要求提高1度的要求进行设计,在实际中推广,还应采取必要措施加强梁柱节点的耗能能力。

参考文献:

- [1] Jaillon L, Poon C S, Chiang Y H. Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 309.
- [2] Nigel P M J. The PRESSS program-current status and proposed plans for phase III [J]. PCI Journal, 1996, 43(2): 22.
- [3] Nigel P M J, Tao Jianren. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons [J]. PCI Journal, 1993, 40(1): 58.
- [4] 田野,吕西林,赵斌. 预制混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 结构工程师, 2008, 24(1): 66.
TIAN Ye, LÜ Xilin, ZHAO Bin. Shaking table experimental study on a precast concrete frame [J]. Structural Engineers, 2008, 24(1): 66.
- [5] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [6] Choi W C, Yun H D, Kim S W. Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(9): 837.
- [7] 肖建庄,黄一杰. GFRP管约束再生混凝土柱抗震性能与损伤评价 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 112.
XIAO Jianzhuang, HUANG Yijie. On the seismic behavior and damage assessment of recycled aggregate concrete filled GFRP tube column [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 112.
- [8] Corinaldesi V, Moriconi G. Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(5): 650.
- [9] 孙跃东,周德源,肖建庄,等. 不同轴力下再生混凝土框架抗震性能的试验 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1013.
SUN Yuedong, ZHOU Deyuan, XIAO Jianzhuang, et al. Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame under vary cyclic loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(8): 1013.
- [10] XIAO Jianzhuang, WANG Changqing, LI Jie, et al. Shaking table model tests on recycled aggregate concrete frame structure [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(6): 777.
- [11] 张敏政. 地震模拟实验中相似率应用的若干问题 [J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52.
ZHANG Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(2): 52.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ55—2011 普通混凝土配合比设计规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ55-2011 Specification for mix proportion design of ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [14] 吕西林,程海江,卢文胜,等. 两层轻型木结构足尺房屋模型模拟地震振动台试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 41.
LÜ Xilin, CHENG Haijiang, LU Wensheng, et al. Shake table tests of a two-storey light wood framed house [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 41.