

doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2014.01.035

现浇与预制再生混凝土框架结构抗震性能对比分析

肖建庄 丁陶 王长青 范氏鸾

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 分别对1/4缩尺且平立面相同的现浇和预制再生混凝土框架结构模型进行了振动台试验,对比研究了2个再生混凝土框架的自振频率、楼层剪力、楼层位移、层间位移等动力反应以及刚度退化、延性等抗震性能.对比分析表明,在弹性和弹塑性阶段前期,随着台面输入加速度峰值的增加,2个模型均呈现自振频率下降、楼层剪力和位移反应逐渐增大的趋势,且动力反应变化趋势和抗震性能差别不大;在弹塑性阶段后期,预制框架后浇节点破坏程度较明显,结构承载力低于现浇框架结构,且刚度退化更为迅速,层间位移较现浇框架结构明显偏大.预制再生混凝土框架抗震能力总体略差于现浇框架,但施工方式的不同对结构延性系数影响不明显.

关键词: 再生混凝土;现浇;预制;振动台试验;抗震性能

中图分类号: TU528.79;TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2014)01-0194-05

Contrastive analysis on seismic performances between cast-in-situ and precast frame structure made of recycled aggregate concrete

Xiao Jianzhuang Ding Tao Wang Changqing Pham Thi Loan

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: One cast-in-situ and one precast one-fourth scaled recycled aggregate concrete (RAC) frame structure model with the same plane and elevation were tested on the shaking table, respectively. The dynamic responses including natural frequency, inter-storey shear force, storey displacement and inter-storey displacement and the seismic performances including stiffness degradation and ductility of the two models were investigated comparatively. The comparative analysis indicates that in the elastic and early elasto-plastic stages, both of the two models present similar dynamic response trends with the increase in peak ground acceleration (PGA); that is, the natural frequency descends, and the inter-storey shear force and the displacement increase gradually. The damage of the precast frame joint is more serious in the later elasto-plastic stage; therefore the bearing capacity is lower than that of the cast-in-situ one. Furthermore, compared with the cast-in-situ frame the stiffness deterioration of the precast frame is more rapid and the inter-storey displacement is obviously larger at this stage. The overall seismic performance of the precast RAC frame is inferior to that of the cast-in-situ one, but the influence of the different construction methods on the ductility coefficient is negligible.

Key words: recycled aggregate concrete (RAC); cast-in-situ; precast; shaking table test; seismic performance

当代混凝土的发展,由追求高强、高性能逐渐向绿色混凝土方向靠拢,对废弃混凝土进行循环再利用的再生混凝土技术是发展绿色混凝土的主要措施之一^[1].同时,预制混凝土结构也是现代建筑

最重要的结构形式之一,具有节约材料和劳动力、提高施工工效、加快施工进度、提高建筑工程的产品质量等优势^[2].相关研究表明,预制施工技术还可减少施工过程中产生的垃圾总量,符合可持续发

收稿日期:2013-06-05. 作者简介:肖建庄(1968—),男,博士,教授, jzx@tongji.edu.cn.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178340,51325802).

引用本文:肖建庄,丁陶,王长青,等.现浇与预制再生混凝土框架结构抗震性能对比分析[J].东南大学学报:自然科学版,2014,44(1):194-198. [doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2014.01.035]

展的趋势^[3-4].再生混凝土耐久性能低于普通混凝土,限制了再生混凝土的推广应用.而预制构件产品质量的可控性又为再生混凝土技术的应用提供了有力的支撑.国内外学者对再生混凝土结构的抗震性能研究已有一定成果,主要涉及再生混凝土节点^[5-6]、构件^[7-8]、平面^[9-10]及整体框架^[11],但尚不清楚预制施工技术对再生混凝土框架抗震性能的影响.为了在地震区推广应用再生混凝土技术,本课题组完成了 2 个 6 层 1/4 缩尺的再生混凝土框架模型的振动台试验,模型的主要区别在于施工方式的不同,分别为现浇和预制结构,以探讨施工方式的不同对再生混凝土框架抗震性能的影响.

1 试验概况

1.1 相似关系

为了最大限度地利用振动台面,将 2 个再生混凝土框架模型的几何相似比均取为 1/4.考虑到实验室噪声的影响,加速度相似比不宜取得过小,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 π 定理^[12],模型设计所需的其他相似关系可根据几何、加速度、弹性模量 3 个相似比来求出.

1.2 模型材料

设计再生混凝土配合比时,均采用再生粗骨料取代率为 100% 的再生混凝土,强度等级为 C30,坍落度范围为 180 ~ 200 mm.再生粗骨料由废混凝土破碎、筛分加工而成,由相似关系得到粒径范围为 5 ~ 10 mm.细骨料选用河砂,水泥均采用海螺牌 42.5R 普通硅酸盐水泥.由于 2 次试验有一定时间间隔,所选再生粗骨料不是同一批次,因此配合比略有不同.现浇框架水、水泥、砂、再生粗骨料的质量比为 1: 1.887: 2.301: 3.312,预制框架结构水、水泥、砂、再生粗骨料的质量比为 1: 1.859: 3.202: 4.554.2 个模型的再生混凝土材料性能详见表 1.2 个模型均采用镀锌铁丝来模拟钢筋.模型中纵向钢筋采用 8[#]和 10[#]镀锌铁丝,箍筋采用 14[#]镀锌铁丝.表 1 中, f_{cn}^1 为再生混凝土梁柱构件立方体平均抗压强度; f_{cn}^2 为后浇再生混凝土立方体平均抗压强度; a 为再生粗骨料吸水率.

表 1 再生混凝土材性性能指标

施工方式	$a/\%$	f_{cn}^1/MPa	f_{cn}^2/MPa
现浇	4.56	38.0	38.0
预制	8.21	37.0	39.1

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,平立

面布置规则按“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设防烈度为 8 度、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.预制框架设计时,考虑到预制构件施工方便,预制梁截面设计与现浇结构略有区别.预制框架梁设计为叠合梁,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.采用柱-柱榫式连接方式,在施工吊装阶段应对上柱榫头的受压承载力进行验算.为了增加上下柱的整体性,在后浇混凝土时应在上部留些许缝隙,后捻干硬性细石混凝土,必要时榫头底部可预埋钢板并与下柱点焊连接.框架平面尺寸和 2 个梁柱的节点详图见图 1.

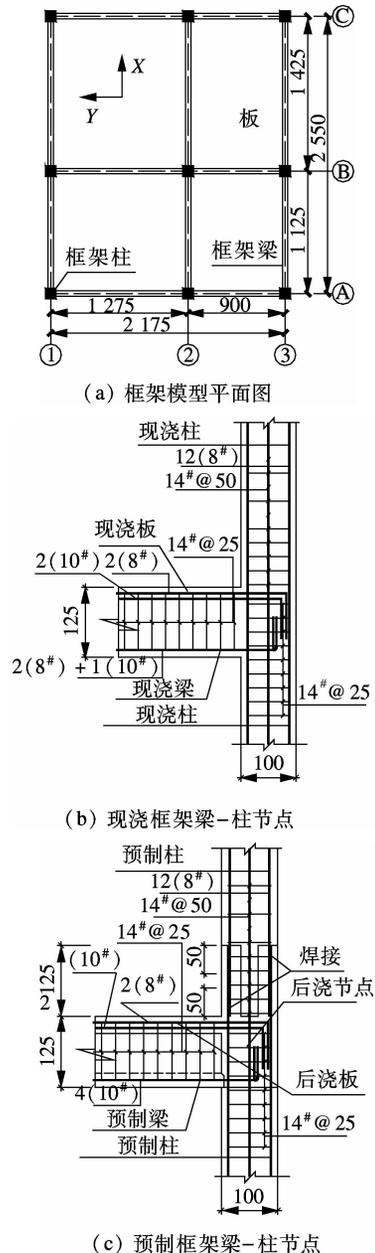


图 1 预制与现浇再生混凝土框架模型(单位:mm)

1.4 波形选择与测点布置

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).2次试验均在结构的每层布置了加速度传感器和位移传感器,主要测试模型结构的楼层加速度和位移.其中,加速度传感器30个,拉线式位移传感器14个.

1.5 试验加载方案

试验时根据模型的动力相似关系,对真实地震记录做了修正,即调整了地震波持续时间和加速度峰值.地震波的持续时间为真实地震的0.368倍.根据抗震设防要求^[13],输入地震波加速度峰值从小到大依次增加,以模拟不同水准地震对结构的作用.2次试验模型的主震方向均为X方向,地震波单向输入.前后输入工况分别为0.066g,0.130g,0.185g,0.370g,0.415g,0.550g和0.750g.模拟的地震水准包括从7度多遇到8度罕遇.

2 试验现象与结果对比

2.1 模型破坏过程对比

在整个试验过程中,现浇与预制再生混凝土框架结构在地震试验中的可见破坏均主要集中在梁端、柱端以及梁柱节点处;主要区别在于试验后期较强地震作用时,预制框架后浇节点的裂缝发展较现浇框架更为明显.

试验结束后,2个模型的破坏都是1层和2层最为严重,梁端均出现塑性铰,部分节点通裂甚至压碎.相比较而言,预制再生混凝土框架结构破坏更为严重,1~2层后浇节点形成斜交叉裂缝,且部分新老混凝土界面产生水平裂缝,保护层严重脱落.在强烈地震作用下,后浇节点刚度退化更为迅速.2个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2.

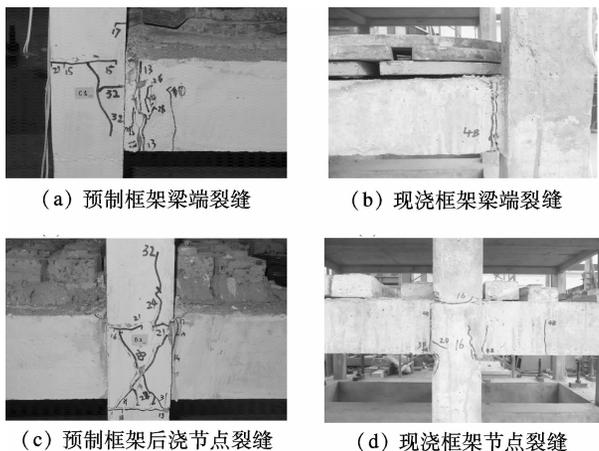


图2 框架模型典型裂缝图

2.2 自振频率对比

以模型在振动台试验前测得的自振频率为基准,2个模型主震X方向在不同工况下的自振频率变化规律见图3.在试验前半阶段,输入较小峰值的地震波激励时,即模型在弹性和弹塑性前期阶段,2个模型频率均不断下降,且输入地震波的能量越大,频率下降的趋势越快,但二者频率下降的趋势基本相同,这表明二者的抗震能力差别不大.在试验的最后阶段,特别是地震波为0.550g~0.750g阶段,预制框架结构频率下降速度明显快于现浇框架结构.结合结构破坏现象分析可知,试验后期预制框架较现浇框架损伤更为严重,这是由于后浇节点刚度退化更为迅速所致.但总体来说,二者的频率下降趋势基本一致.

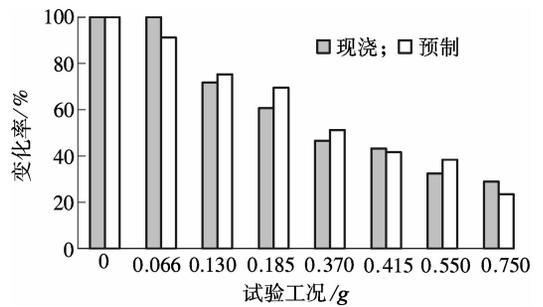


图3 X方向I阶段频率变化图

2.3 楼层剪力对比

图4表示地震波为0.370g(试验中期)和0.750g(试验后期)工况下,模型分别在WCW,ELW和SHW作用下的最大楼层层剪力分布.由图4不难看出,在同一地震水准作用下,现浇框架和预制框架各楼层的最大楼层剪力均沿楼层高度方向呈递减趋势.当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,各楼层的剪力会呈现逐渐增大的趋势;当结构进入严重弹塑性阶段,结构损伤累积,抗侧刚度减小,楼层剪力达到结构最大承载能力.此时,随着台面加速度峰值的增加,模型楼层剪力反而下降.

在地震波为0.370g的地震试验中,2个模型在相同地震波作用下的楼层剪力十分接近,最大楼层剪力已接近和达到最大承载能力值,模型发生较大的破坏,这与试验中观察到的现象是一致的.在0.750g地震水准作用下,预制框架的楼层剪力明显小于现浇结构,2个模型此时均发生较严重的破坏,但预制框架刚度下降更为明显.结合上述试验现象的分析,这是由于在较强地震作用下,预制框架的后浇节点受损破坏更为严重,导致整体结构刚

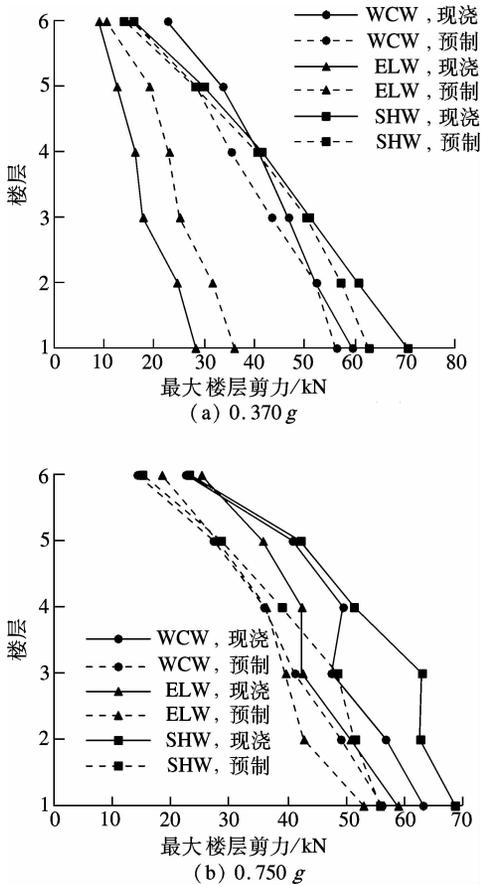


图 4 模型在不同地震峰值下的最大楼层剪力分布图

为明显,这与普通预制混凝土框架结构的特点类似^[14]. 总体上看,2 种结构整体侧向位移曲线均表现出一定的右凸趋势,结构侧向变形曲线呈现剪切型.

在整个试验过程中,2 个模型的最大层间位移基本上都出现在结构的 1 层或 2 层. 表 2 对比了各试验工况下 2 个模型的最大层间位移角. 可以看出,在弹性和弹塑性阶段前期,预制框架结构的最大层间位移角略大于现浇结构,数值上十分接近,但在试验后期,预制结构最大层间位移角的增长幅度远大于现浇结构. 建筑抗震设计规范要求对结构进行抗震变形验算,按照我国建筑抗震设计规范 GB50011—2010^[13],钢筋混凝土框架结构在多遇地震作用下的弹性层间位移角限值为 1/550,在罕遇地震作用下的弹塑性层间位移角限值为 1/50. 由表 2 可知,现浇和预制再生混凝土框架在 7 度多遇(0.066g)和 7 度罕遇(0.415g)地震作用下的最大层间位移角基本能够满足规范要求.

表 2 各工况下 2 个框架模型最大层间位移角

施工方式	试验工况/g						
	0.066	0.130	0.185	0.370	0.415	0.550	0.750
现浇	1/824	1/266	1/174	1/75	1/58	1/34	1/25
预制	1/760	1/199	1/158	1/63	1/40	1/35	1/17

3 抗震性能对比

3.1 骨架曲线和刚度退化对比

图 6 是采用指数函数拟合得到的 2 个模型的骨架曲线. 可以看出,预制框架的极限承载力要低于现浇框架,这点与前面关于最大楼层剪力的对比分析是一致的.

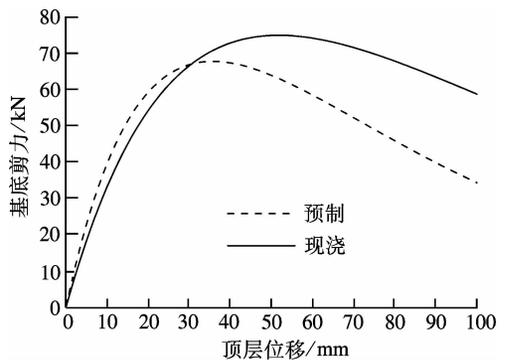


图 6 2 个模型骨架曲线拟合

骨架曲线斜率的变化表示了结构刚度的退化情况. 从图 6 还可以看出,在弹性及弹塑性阶段前期,现浇与预制再生混凝土框架的抗侧刚度退化速度基本相同,但是在弹塑性阶段后期,预制框架刚度的退化较现浇结构降低得快. 这与前文的分析,

度迅速降低.

2.4 位移反应对比

图 5 表示不同试验阶段分别输入 WCW,ELW 和 SHW 时各楼层的最大楼层位移反应. 从图 5 可以看出,在地震试验中输入同一水准地震波时,2 个模型结构的位移变形曲线形状大致相同.

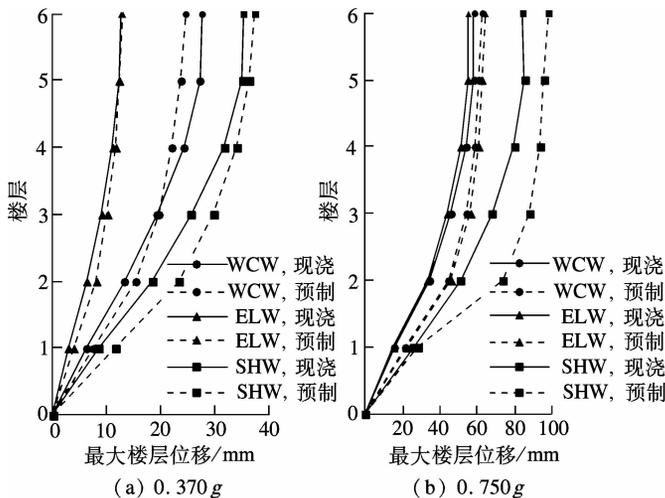


图 5 模型在不同地震峰值下的楼层最大位移

试验过程中,预制框架结构的最大楼层位移基本都大于现浇结构,在试验后期,这一现象表现得更加

在试验后期,预制框架的累积损伤更为严重,部分后浇节点破坏较为严重的结论是一致的。

3.2 延性系数对比

结构的延性是指结构在外荷载作用下,其变形超过屈服,结构进入塑性阶段后,在外荷载继续作用下,变形继续增长,结构不致破坏的性能。

采用通用屈服弯矩法计算2个模型的延性系数^[15]。由延性系数计算公式,现浇再生混凝土框架的延性系数 $\mu_1 = \Delta_u / \Delta_y = 89.50 / 26.87 = 3.32$,预制再生混凝土框架的延性系数 $\mu_2 = \Delta_u / \Delta_y = 68.11 / 17.68 = 3.85$ 。尽管预制施工的再生混凝土框架的极限承载力低于现浇结构,但是预制施工对于结构的延性系数影响不大。

4 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,与现浇再生混凝土框架的抗震性能差别不大。在弹塑性阶段后期,预制框架节点区损伤较严重,结构抗侧刚度退化较快。

2) 现浇与预制框架模型的自振频率均随台面输入加速度峰值的增大而降低,试验前期下降趋势差别不大,后期预制框架由于后浇节点刚度退化更为迅速,自振频率下降速度快于现浇结构。

3) 弹性和弹塑性阶段前期,预制框架的最大楼层剪力、最大楼层位移和最大层间位移均与现浇框架十分接近;在弹塑性阶段后期,预制框架的最大楼层剪力明显小于现浇框架,而预制框架的最大楼层位移和最大层间位移均明显大于现浇框架。

4) 骨架曲线表明在弹性及弹塑性阶段前期,现浇与预制再生混凝土框架的抗侧能力基本相同,但是在弹塑性阶段后期,预制框架的抗侧能力较现浇框架降低得快。

5) 试验表明,现浇和预制再生混凝土框架在弹性和弹塑性前期阶段完全满足现行国家规范规定的7度抗震设防烈度的要求。而在弹塑性阶段后期,预制框架后浇节点处混凝土破坏严重,耗能不佳。本文建议不高于6层的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,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。

参考文献 (References)

[1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 3-4.
 [2] 张季超, 王慧英, 楚先峰, 等. 预制混凝土结构的效益评价及其在我国的发展[J]. 建筑技术, 2007, 38

(1): 9-11.

Zhang Jichao, Wang Huiying, Chu Xianfeng, et al. Benefit evaluation of prefabricated concrete structure and its development in Chian [J]. *Architecture Technology*, 2007, **38**(1): 9-11. (in Chinese)
 [3] Jaillona 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): 309-320.
 [4] Tam V W Y, Tam C M, Zeng S X, et al. Towards adoption of prefabrication in construction [J]. *Building and Environment*, 2007, **42**(10): 3642-3654.
 [5] 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): 650-658.
 [6] Corinaldesi V, Letelier V, Moriconi G. Behaviour of beam-column joints made of recycled-aggregate concrete under cyclic loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, **25**(4): 1877-1882.
 [7] Xiao J Z, Huang X, Shen L M. Seismic behavior of semi-precast column with recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, **35**: 988-1001.
 [8] 胡琼, 卢锦. 再生混凝土柱抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 23-27.
 Hu Qiong, Lu Jin. Experimental research on hysteretic behavior of recycled concrete [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, **44**(2): 23-27. (in Chinese)
 [9] Xiao J Z, Sun Y D, Falkner H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete [J]. *Engineering Structures*, 2006, **28**(1): 1-8.
 [10] 曹万林, 尹海鹏, 张建伟, 等. 再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(2): 191-198.
 Cao Wanlin, Yin Haipeng, Zhang Jianwei, et al. Seismic behavior experiment of recycled concrete frame structures [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, **37**(2): 191-198. (in Chinese)
 [11] Xiao Jianzhuang, Wang Changqing, Li Jie, et al. Shake-Table model tests on recycled aggregate concrete frame structure [J]. *ACI Structural Journal*, 2012, **109**(6): 777-786.
 [12] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52-58.
 Zhang Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, **17**(2): 52-58. (in Chinese)
 [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.
 [14] 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): 66-71.
 Tian Ye, Lü Xilin, Zhao Bin. Shaking table experimental study on a precast concrete frame [J]. *Structural Engineers*, 2008, **24**(1): 66-71. (in Chinese)
 [15] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震工程出版社, 1989: 137-139.