

8度区异形柱框架 剪力墙结构的振动台试验研究

刘 建¹, 潘 文², 杨晓东², 李 红¹, 彭春明¹,
王依群³, 严士超³, 康谷贻³, 卢文胜⁴

(1. 昆明市建设局, 云南昆明 650011; 2 昆明理工大学 土木工程系, 云南昆明 650051;

3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 4. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:为了对比异形柱框架 剪力墙结构与框架结构在抗震性能、破坏机理等方面的异同,探讨其在高烈度地震区的适用性,根据相同的背景情况设计制作了一个 1/8比例的 10层异形柱框架 剪力墙模型,进行了振动台试验。根据设计计算的结果和振动台试验中出现的现象及其分析,研究了计算方法的适用性、结构的总体抗震性能和破坏机制。指出该体系具有易于满足位移要求、在大震中以梁铰机制为主、抗倒塌能力强等特点;同时通过与框架结构破坏现象的对比,说明了这种体系可以有效地解决节点承载力问题,在高烈度区应用异形柱结构时应优先采用。

关键词:混凝土框架 剪力墙结构; 异形柱; 高烈度区; 振动台试验; 抗震性能

中图分类号: TU375.403 **文献标识码:** A

Shaking table test of RC shear-wall frame with special-shaped columns designed for seismic fortification intensity 8 zone

LU Jian¹, PAN Wen², YANG Xiaodong², LI Hong¹, PENG Chunming¹
WANG Yiqun³, YAN Shichao³, KANG Guyi³, LU Wensheng⁴

(1. Kunming Construction Bureau, Kunming 650011, China;

2. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

4. State Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on preceding shaking table test on a six-story reinforced concrete (RC) frame with specially shaped columns, a ten-story RC shear-wall frame with specially shaped columns under same conditions is designed for 1/8 scale shaking table test. The test focuses on the differences in seismic performance and damage mechanism between shear-wall frame and frame with specially shaped columns, and suitability for high intensity zones. Based on numerical results of structural design, experimental observation and analysis, the applicability of computational model, global seismic performance and damage mechanism of structure are revealed. Experiment also shows advantages of the structure, that is easy attainment for drift control requirement, predominance of beam hinge mechanism under major shock, and good collapse-proof capacity. The comparison of damage phenomena with frame shows that the shear-wall frame is an effective solution for requirement on joint capacity and is favorable structural system for the application of specially shaped column structures in high intensity zones.

Keywords: RC shear-wall frame; special-shaped column; high intensity zone; shaking table test; performance for earthquake resistance

基金项目: 云南省自然科学基金项目 2005E0024M、2005E0023M、2007E037M, 昆明市建设局科技项目。

作者简介: 刘建 (1967—), 男, 四川荣经人, 高级工程师。

收稿日期: 2005年 5月

0 引言

国家行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006)^[1]将异形柱结构体系分为框架结构和框架-剪力墙结构两种。对于框架结构,其最大适用高度在很大程度上受到节点受剪承载力的控制^[2]。国内外历次地震灾害均表明,框架-剪力墙结构具有比框架结构更好的抗震性能。研究高烈度地震区异形柱框架-剪力墙结构的抗震性能具有重要的工程实用价值。

异形柱结构在高烈度地震区的最大适用高度是行业标准编制中备受关注的问题。对于设防烈度为 8 度的地区采用一般柱的现浇框架-剪力墙体系,抗震规范^[3]和高层规程^[4]允许的最大适用高度为 100m,在实际应用中,柱截面尺寸受轴压比控制。而异形柱的截面尺寸受肢厚、肢厚比、剪跨比(高宽比)等因素限制,不能做得太大(例如,楼层净高 2.5m 的情况下,截面尺寸大致不能超过肢厚 250mm、肢宽 800mm,其截面面积尚不及边长 600mm 的方柱)。在文献 [1] 中规定,在 8 度区 (0.2g) 框架剪力墙结构的最大高度限制为 28m,同时规定“对平面和竖向均不规则的结构,或 6 度、7 度 (0.10g) 建于 I 类场地的结构,及 7 度 (0.15g)、8 度 (0.20g) 建于 II、III 类场地的结构,适用的房屋最大高度应适当降低”。

本文选取的是以 8 度区 (0.20g, 二组) III 类场地为工程背景的 10 层异形柱框架-剪力墙结构,进行振动台试验研究,本次试验和前期完成的 6 层异形柱框架结构的振动台试验^[2]均是由规程主编单位天津大学协同昆明市建设局、昆明理工大学、同济大学完成的,这也是国内首次进行的异形柱框架-剪力墙结构的振动台试验。

1 试验概况

1.1 原型结构设计

考虑到本次试验的目的主要是检验异形柱框架-剪力墙结构在达到预定的高度和层数后的抗震性能,在试验结构的设计上不宜做得过于复杂,以免一些其它的因素在试验中有大的影响。从已建工程中经过选择和简化,确定了如图 1 所示的平面布置(水平向为 X

向)。该工程为 10 层(层高 3m)的丙类建筑,墙、柱混凝土强度等级为 C40,梁板为 C30。

设计计算的主要结果:前 3 阶自振周期分别为 0.6709s(X 向平动)、0.6573s(Y 向平动)、0.5961s(扭转);小震下 X 向和 Y 向底部剪力(CQC)为重力荷载代表值的 12% 左右;最大层间位移角为 1/841(5 层);柱子的纵筋配筋率为 0.97%~2.46%,梁的纵筋配筋率为 0.48%~2.0%,墙的水平配筋率为 0.45%~1.23%。采用 CRSC 及 RC Joint^[5]进行了计算,在考虑了楼层剪力调整后,框剪结构中的异形柱节点可满足规程的要求。各构件配筋见图 1。

1.2 模型相似关系和模型制作

模型的相似关系为 1/8,加速度相似系数为 1,满足用人工质量模拟的弹塑性模型的要求,实现模型与原型开裂的相似性。在模型制作中,为方便施工,梁、板混凝土强度均为 C40,通过最终测得的试块强度和弹性模量,确定其相似关系为 1/6,并据此计算所需的附加质量。模型总高度为 4050mm,其中模型本身高 3750mm,模型底座高 300mm,模型总质量为 10.896t,其中模型和附加质量为 7.16t,底座质量为 3.736t^[6]。制作完成的模型见图 2。

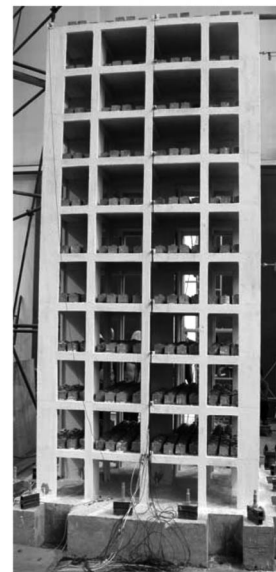


图 2 制作完成的模型

Fig 2 Test model

1.3 试验设备、仪器与测点布置

在结构的每一层均布置相应的传感器。在模型结构的底层和 2 层节点处共布置了 13 个应变片,其中两

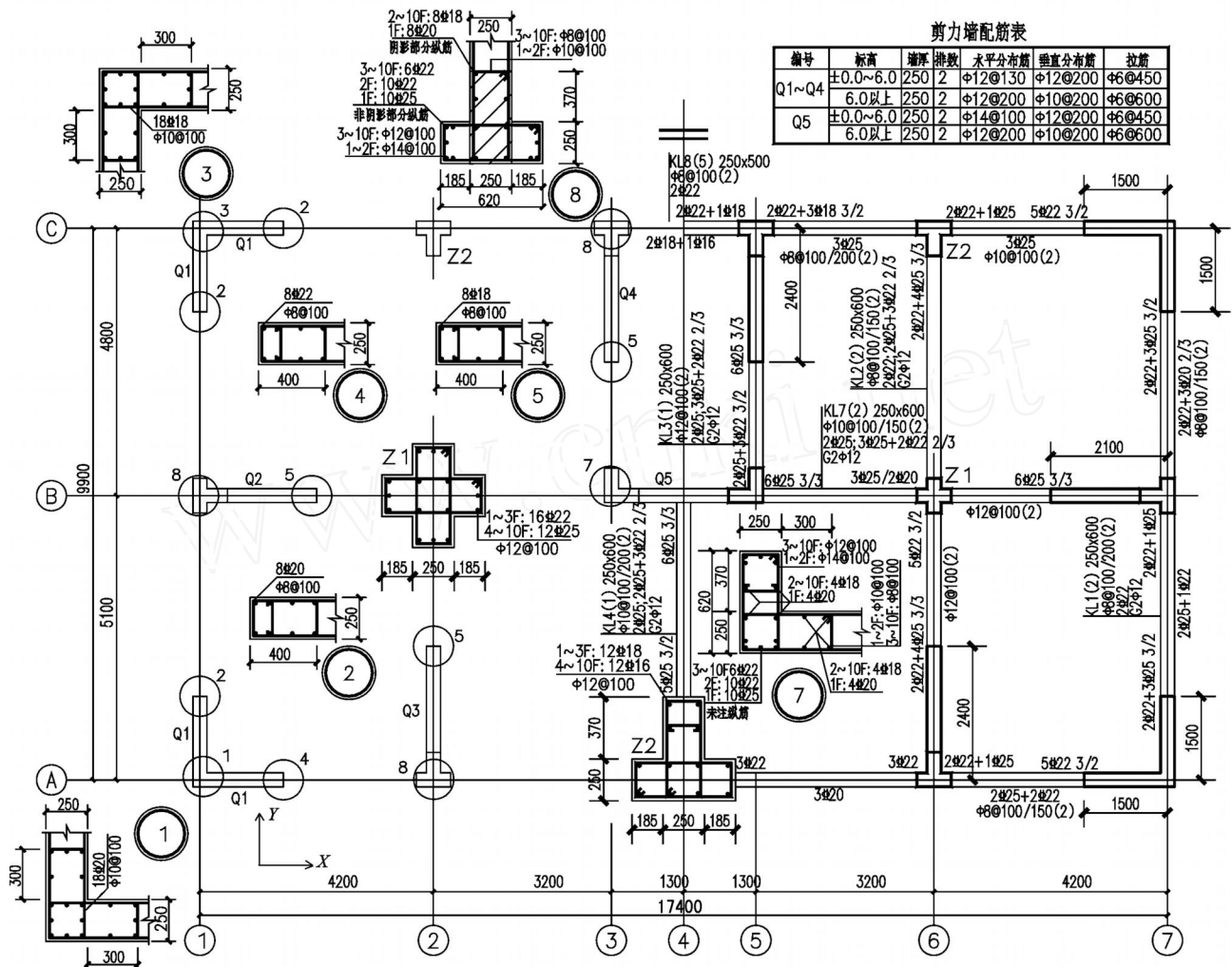


图 1 试验结构平面布置;墙、柱、梁配筋

Fig 1 Layout of test model, reinforcement of shear walls, columns and beams

个是由 3 个应变片组成的应变花。位移传感器布置了 6 个,用于检验屋顶层 X 向和 Y 向的位移、6 层 X 向和 Y 向的位移以及底层 X 向和 Y 向的位移。加速度传感器共布置 23 个:顶层 X 向布置两个, Y 向布置一个,以下各层 X 向和 Y 向各布置一个。

1.4 试验步骤

试验加载工况按照 8 度多遇烈度、设防烈度、罕遇烈度和 8 度罕遇烈度的顺序,在振动台上分四个阶段对模型结构进行模拟地震试验。8 度多遇烈度依次输入为:人工波 (Y 单向、X 单向)、El Centro 波和 Taft 波 (均为 YX 双向、XY 双向); 8 度地震设防烈度依次输入为:人工波、El Centro 波和 Taft 波 (均为 Y 单向、X 单向); 8 度罕遇烈度的输入顺序与多遇烈度相同。在完成上述预定的输入后,根据模型的破坏情况,现场决

定增加了 El Centro 波和 Taft 波 (均为 YX 双向、XY 双向) 的 8 度罕遇烈度共 4 次输入。在多遇烈度水准所有地震波输入前后及以后的每条地震波两次输入后,均对模型进行白噪声扫频,测量模型的自振频率、振型和阻尼比等动力特征参数。地震波持续时间按相似关系压缩为原地震波的 1/2.83。台面输入加速度峰值按前述的相似关系确定。

2 试验现象描述

试验模型在不同试验阶段破坏情况显著变化,具体表现为:

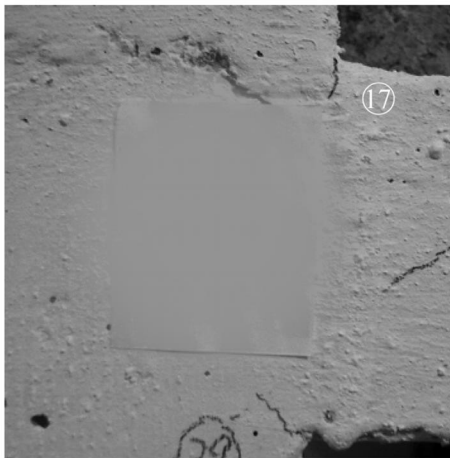
(1)多遇烈度:依次输入峰值加速度为 0.07 g 的人工拟合波、El Centro 波和 Taft 波并进行白噪声扫频

后,模型表面未发现可见裂缝。模型自振频率略为下降,约9%左右,说明结构内部已出现微小裂缝。从总体上看,本试验阶段模型结构基本处于弹性工作阶段。

(2)设防烈度:仍按以上顺序进行峰值加速度为0.20g的输入,在两个单向人工波输入后的白噪声扫描表明自振频率较上次又下降了18%,而在两个单向El Centro波和Taft波之后,其自振频率下降减慢,分别为3.4%和7.5%。此时对模型进行仔细的检查,在2~5层的剪力墙端柱柱顶与梁相交处找到几条长度约为5~15mm、宽度很小的微细斜裂缝(图3中有⑰标示的裂缝)。



(a) 3层



(b) 5层

图3 设防烈度地震波输入后的裂缝

Fig 3 Crack after input of fortification intensity records

(3)罕遇烈度:输入峰值加速度为0.4g的人工波

后(X向和Y向各一次),裂缝大量出现,但长度和宽度有限,宽度多数在0.5mm左右。其中最多的是梁、柱相交处(图4a)和梁、墙相交处的斜裂缝(图4b),剪力墙上也出现少量斜裂缝(图4c);此外,梁、墙相交处出现竖向裂缝(图4d),端柱、剪力墙上出现个别竖向裂缝(图4e,该处在后面的试验工况中压溃脱落),模型内部部分梁出现斜剪裂缝(图4f)。综合裂缝宽度、长度和形态可以认为此时模型中、下部楼层的梁端塑性铰已基本形成。

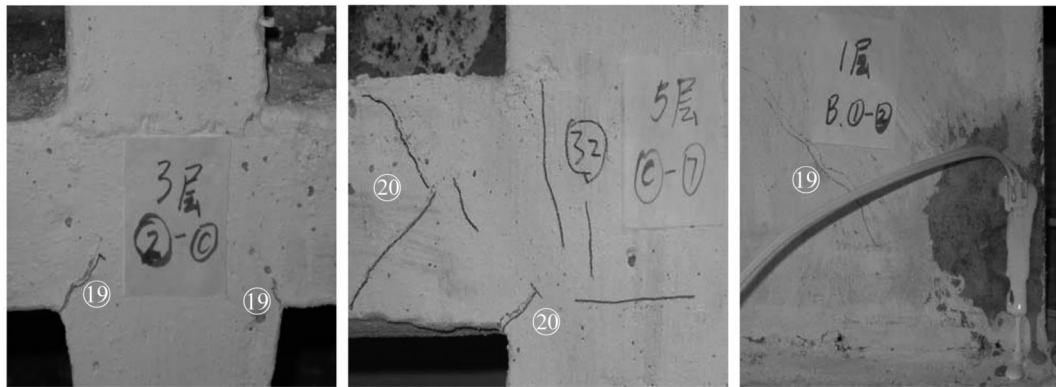
此时结构自振频率下降较大,为得到较准确的试验结果,避免几个单方向大震作用造成的结构损伤累加,研究决定不再进行El Centro波和Taft波的单向输入工况,而直接做双向输入。在El Centro波两次双向(主向0.4g,另一向0.34g)输入后,结构表面既有新出现的可见裂缝,原有裂缝也继续扩展,见图5。

这两个双向输入工况结束后的白噪声扫描发现结构频率下降的并不多(10%左右),但是在其后的Taft波两次双向输入后,各处裂缝有较大发展,部分柱和剪力墙角部出现压坏现象,见图6。

(4)8度强罕遇烈度:8度罕遇输入结束后,虽然裂缝大量出现,刚度降低很大,但是从总体上看,结构破坏并没有太严重。因此研究决定增加试验工况,先进行了El Centro波主方向0.60g、次方向0.51g的两个双向输入(其中一次的台面实测主向峰值达到0.677g),模拟8度强、9度弱罕遇地震;然后又进行了Taft波主方向0.51g、次方向0.43g的两个双向输入,模拟8度(0.3g)罕遇地震。此阶段结构破坏严重,剪力墙和梁联系部位破裂,裂缝贯通;加载过程中,可闻裂缝开裂声。其间两次白噪声扫描的结果表明频率不再下降,说明结构破坏严重,裂缝基本出齐。

输入结束后,框架-剪力墙结构在强震中的各种典型破坏情况在模型中均有出现,例如:底层柱脚和剪力墙脚局部或全部严重破坏、混凝土压酥、个别地方铁丝(钢筋)出现鼓状弓起,见图4e、图5d;之前出现的裂缝进一步开展,很多裂缝开展成梁端通长裂缝;结构上部(5层以上)部分梁柱节点(包括顶层个别节点)的梁端也开始出现细裂缝,形态多为梁端垂直裂缝或由梁端向核心区略有发展;跨度较短的梁出现斜裂缝,有的出现平行楼板的水平缝,见图7。

值得指出的是,本模型在所有输入完成后,其节点的裂缝情况与框架结构模型有较大的不同。框架模型



(a) 梁、柱相交处的斜裂缝

(b) 梁、墙相交处的斜裂缝

(c) 剪力墙上的斜裂缝



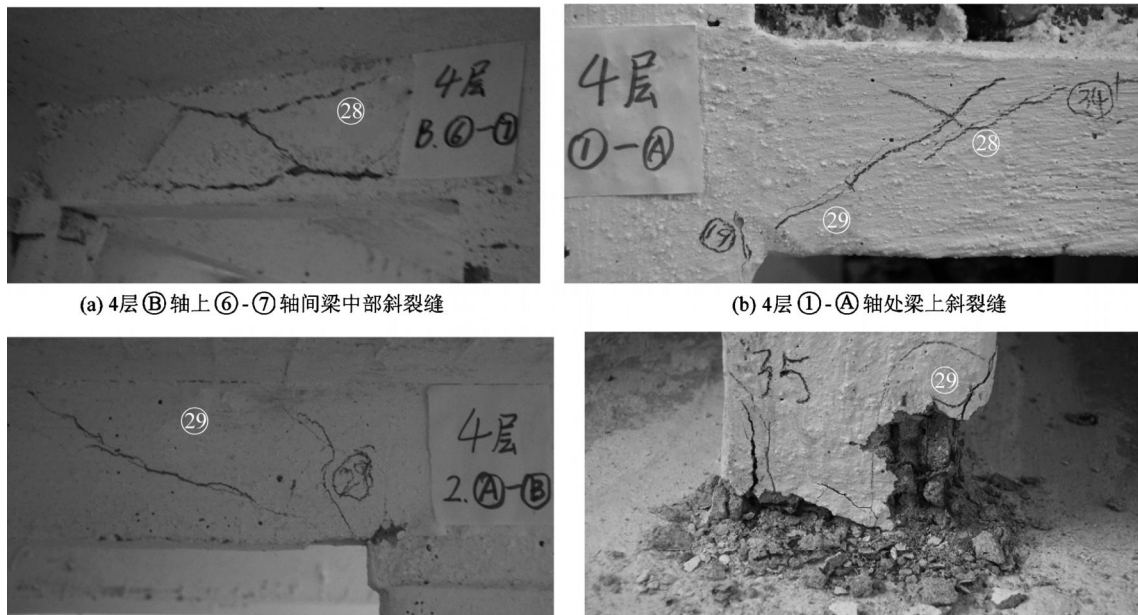
(d) 梁、剪力墙相交处的竖向裂缝

(e) 柱、剪力墙上的竖向裂缝

(f) 模型内侧部分梁上的斜剪裂缝

图 4 罕遇烈度下两个单向人工波输入后的裂缝 (标示为①⑨、②⑩)

Fig 4 Crack after input of first two one-way synthesized record of rare intensity



(a) 4层 B轴上 6-7轴间梁中部斜裂缝

(b) 4层 1-A轴处梁上斜裂缝

(c) 4层 2轴上 A-B轴处梁端部斜裂缝

(d) 底层 5-C轴处柱根部出现竖向裂缝

图 5 罕遇烈度下两次 El Centro波双向输入后的裂缝 (标示为②⑧、③⑨)

Fig 5 Crack after input of two bi-direction El Centro records of rare intensity (marked as 28, 29)

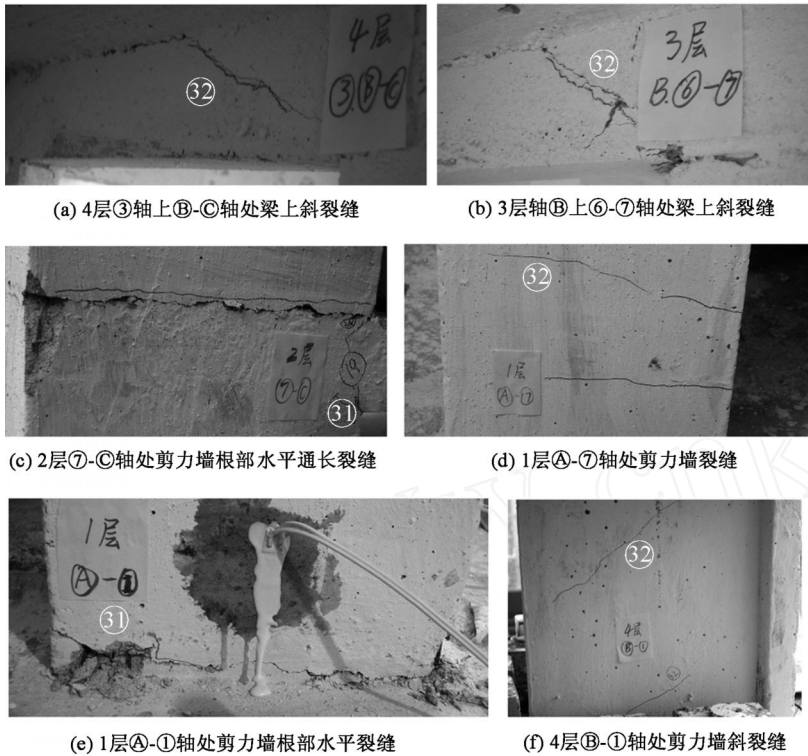


图 6 罕遇烈度下两次 Taft波双向输入后的裂缝 (标示为①、②)

Fig 6 Crack after input of two bi-direction Taft records of rare intensity (marked as ①、②)

中,节点区域的裂缝表现为两种形态:一种是始于梁端,向核心区斜向发展;一种是独立出现在核心区。二者数量接近,前者稍多。但在框架-剪力墙模型中,只有前一种裂缝,且向核心区发展深度有限。这说明剪力墙有效地承担了楼层剪力,且框架柱在设计时尚需进行楼层剪力调整,使得节点的抗剪能力得到了保证。

3 试验结果分析

模型结构前 3 阶频率分别为 5.13Hz (X 向平动)、5.27Hz (Y 向平动) 和 5.41Hz (扭转),按相似比推算原型的周期为 0.551s、0.537s 和 0.523s,较计算值偏小,其原因是模型制作中混凝土统一采用较高的强度等级、微粒混凝土弹性模量偏高、对楼板采取了加强措施等。低阶振型的振动形态主要为平动和整体扭转;模型结构频率随输入地震动幅值的加大而降低,而阻尼比则随结构破坏的加剧而提高;在完成罕遇地震试验后,模型结构前 3 阶



图 7 8 度强罕遇烈度双向输入后的裂缝 (标示为③ ~ ⑧)

Fig 7 Crack after input of bi-direction records of more rare intensity (marked as ③ ~ ⑧)

频率分别降低为 2.36Hz, 2.36Hz和 2.91Hz。

从模型反应推算所得的原型结构总位移角(顶点位移与房屋高度之比)最大值,在 8 度多遇地震作用下为: X 向 1/1399, Y 向 1/1283;基本烈度地震作用下 1/457。罕遇烈度地震作用下为 1/124; 8 度强罕遇烈度地震作用下为 1/108。其中,罕遇烈度下各层总位移包络如图 8 所示。

推算的原型结构层间位移角最大值,在 8 度多遇地震作用下为: X 向 1/813,发生在 8 层; Y 向 1/811,发生在 4 层。均满足弹性层间位移角 1/800 的限值。基本烈度地震作用下为: X 向 1/341,发生在 3 层; Y 向 1/253,发生在 4 层。在罕遇烈度的 3 种输入中,结构在 X 向上对 El Cento 波双向的反应最为强烈,层间位移角最大值达 1/82,高于之前的人工波单向和后续的 Taft 波双向,而这两种波形在 4 次输入中,均未超过弹性层间位移角限值 1/100,详细的数据列于表 1。

4 结论与建议

(1)所采用的计算模型基本能够正确反映结构的动力特性以及在小震输入下的位移反应。

(2)结构的破坏过程可概括为:在小震作用下,有不可见的裂缝出现,结构基本处于弹性阶段。在中震作用下,结构的中下部各层的梁端出现开展较小的垂直裂缝和斜裂缝。在大震作用下,原有裂缝加长加宽,有的发展成为梁、柱、梁、墙相交处梁端的贯通裂缝和交叉裂缝,结构上部各层也有少量类似的裂缝出现;剪力墙上出现斜向和水平裂缝,但尚未形成 X 形交叉;

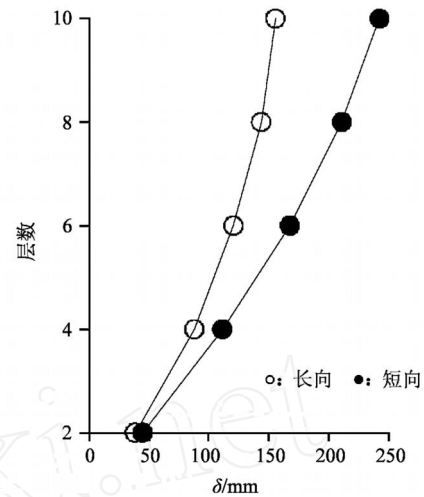


图 8 大震时楼层总位移包络图

Fig 8 Floor relative displacements envelop under major shock

异形柱翼缘尽端的局部压溃现象仅出现在剪力墙的 T 形端柱柱脚,中间的十形柱表现为柱脚附近的竖向裂缝,结构四角剪力墙在角部也有局部压溃。

(3)由本次模型试验,可推算出原型满足:当遭遇低于本地区设防烈度的多遇地震影响时(即 8 度多遇),一般不受损坏或不需修理仍可继续使用;当遭遇 8 度基本地震影响时,有轻微损坏,经一般修理或不需修理仍可继续使用;当遭遇 8 度罕遇地震影响时,不致倒塌或发生危及生命的严重破坏的抗震设防要求。当遭遇 8 度强罕遇地震影响时,整体结构仍未发生倒塌现象。

(4)从位移指标上看,结构仅在 3 种输入地震波中的一种情况下略为超过了罕遇烈度下的位移控制要求 (1/82),且从最终结果可以看到,结构具有良好的

表 1 大震输入下的各层层间位移角

Table 1 Floor drifts under major shock

楼层	人工波 X 单向	人工波 Y 单向	El Cento 双向 (XY)		El Cento 双向 (YX)		Taft 双向 (XY)		Taft 双向 (YX)	
			X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
10	1/249	1/186	1/224	1/177	1/180	1/155	1/309	1/240	1/270	1/265
9	1/202	1/152	1/140	1/134	1/106	1/144	1/240	1/173	1/176	1/197
8	1/135	1/129	1/113	1/133	1/90	1/146	1/179	1/175	1/188	1/145
7	1/135	1/128	1/127	1/111	1/90	1/116	1/209	1/151	1/160	1/161
6	1/195	1/156	1/128	1/164	1/104	1/173	1/242	1/158	1/181	1/196
5	1/195	1/184	1/128	1/204	1/104	1/215	1/242	1/239	1/271	1/196
4	1/200	1/227	1/91	1/258	1/82	1/266	1/266	1/210	1/236	1/234
3	1/265	1/235	1/96	1/237	1/83	1/249	1/149	1/234	1/255	1/107
2	1/342	1/349	1/104	1/464	1/99	1/461	1/314	1/201	1/210	1/276
1	1/305	1/349	1/177	1/464	1/150	1/459	1/267	1/201	1/210	1/196

(下转第 40 页)

earthquake resisting squat shear walls [J]. Journal ACI, 1982, 79 (4): 257-69.

- [4] Salonikios T N. Shear strength and deformation patterns of R/C walls with aspect ratio 1.0 and 1.5 designed to eurocode 8 (EC8) [J]. Engineering Structures, 2002, 24 (1): 39-49.
- [5] 曹万林, 张建伟, 田宝发等. 钢筋混凝土带暗支撑中高剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23 (6): 26-32, 55.
- [6] 曹万林, 张建伟, 崔立长等. 钢筋混凝土带暗支撑双功能低矮剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24 (1): 46-53.

- [7] Cao Wan-lin, Xue Su-duo, Zhang Jian-wei. Seismic performance of RC shear wall with concealed bracing [J]. Advances in Structural Engineering, 2003, 6(1): 1-13.
- [8] 曹万林, 张建伟, 田宝发. 带暗支撑剪力墙体系抗震研究及应用 [J]. 工程力学, 2004, 21 (增刊): 1-12.
- [9] 曹万林, 杨兴民, 黄选明等. 钢筋混凝土带暗支撑一字形截面短肢剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 30-35.
- [10] 曹万林, 张建伟, 田宝发等. 带暗支撑低矮剪力墙抗震性能试验及承载力计算 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 44-51.

(上接第 14 页)

抗倒塌能力。

(5)从模型的破坏过程以及最终的破坏形态上看,首先是梁的大量开裂,逐步形成梁端塑性铰,然后有部分剪力墙和柱上出现裂缝,最后底层的剪力墙和柱的根部混凝土被压溃;在大多数梁、柱和梁、墙节点处,能够较好地形成梁铰耗能机制,可以实现“强柱弱梁”的要求。

(6)在高烈度区采用异形柱结构时,应优先考虑采用框架-剪力墙结构。

参 考 文 献

- [1] JGJ 149—2006 混凝土异形柱结构技术规程 [S].

- [2] 潘文, 刘建, 杨晓东等. 8度区异形柱框架结构的振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (增刊).
- [3] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S].
- [4] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程 [S].
- [5] 王依群. 钢筋砼异形柱结构配筋计算程序 CRSC [C] // 第十六届全国高层建筑结构学术会议论文. 上海: 同济大学出版社, 2000.
- [6] 土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室. 八度区十层异形柱框架-剪力墙结构模型模拟地震振动台试验研究报告 (A20040218—416—2) [R]. 上海: 同济大学, 2004.