

8度区框-剪结构中框架在罕遇地震下的反应性态

韦 锋¹, 陈文科², 傅剑平¹, 白绍良¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市设计院, 重庆 400015)

摘 要: 框架-剪力墙结构中的框架的受力性能不同于纯框架结构。为了考察框架-剪力墙结构中的框架在强震下的抗震性态, 首先严格按中国设计规范完成了1个8度0.3g分区24层和1个8度0.2g分区30层框架-剪力墙结构的抗震设计。然后对结构进行了在相当于罕遇水准的多条地面运动输入下的非弹性动力反应分析, 初步识别了结构的地震反应性态。分析结果表明, 结构中的框架部分在强震下基本保持未屈服状态, 而剪力墙连梁是结构主要的塑性耗能部件, 部分墙肢底部也进入了屈服后的塑性变形状态。从框架部分所处的偏有利的受力状态和设计规范对其所采取的强化措施这2个方面分析了框架部分未进入屈服的原因。建议对我国8度区总高超过60m的框架-剪力墙结构中的框架部分的现行抗震构造措施可有条件地适度放松。

关键词: 抗震设计; 框架-剪力墙结构; 框架; 动力反应; 非弹性反应

中图分类号: TU973.31; TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0060-06

Seismic Behaviors of Frames in Frame-Wall Structures under Rare Earthquakes on the Zone of Fortification Intensity 8 in China

WEI Feng¹, CHEN Wen-ke², FU Jian-ping¹, BAI Shao-liang¹

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Design Institute, Chongqing 400015, P. R. China)

Abstract: To investigate the seismic behaviors of frames in frame-wall structures (dual system), which may be different from those of frame structures, two frame-wall structures were designed conforming to current Chinese design codes. One is a twenty-four-story building on the Zone of Fortification Intensity 8 (0.3g), and the other is a thirty-story building on the Zone of Fortification Intensity 8 (0.2g). Then inelastic dynamic response analyses of the two structures were conducted with series of inputs of ground motions in a rare earthquake level. The seismic behaviors of the two structures were investigated preliminarily. It was found that the columns and beams of the frames in the frame-wall structures did not experienced yielding under strong earthquake, while coupled beams in walls were the major energy-dissipation elements with their post-yielding plasticity. And the bases of some walls formed hinges as well. The reasons for the frames of dual system remained non-yielding states were analyzed and discussed from the aspects of their favorable load-carrying state and strengthening measures for them in dual systems in Chinese design codes. A preliminary proposal was made that it may be feasible to loosen moderately some seismic fortification measures concerning the frame in the dual system with a height exceeding 60m on the Zone of Fortification Intensity 8.

Key words: seismic design; frame-wall structures; frames; dynamic response; inelastic response

收稿日期: 2009-09-11

基金项目: 教育部博士点基金(新教师基金)(200806111017); 重庆市自然科学基金(CSTC, 2008BB0188)资助项目

作者简介: 韦锋(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构工程抗震研究, (E-mail) civil1203@cqu.edu.cn.

框架-剪力墙结构是由剪力墙部分和框架部分通过水平刚度很大的各层楼盖而协同工作的复合结构形式。其剪力墙和框架的反应性态均不同程度地影响着整体结构的综合抗震性能。因剪力墙的侧向抗弯、抗剪能力很强,其侧向刚度明显大于框架部分,在形成侧向协同工作状态后,下部各层剪力墙对框架起侧向扶持作用,并承担了大部分剪力。受独立剪力墙的“弯型特征”及独立框架的“剪切特征”的影响,从中部向上,框架各层剪力的比重逐步增大,直到顶部楼层框架反过来对剪力墙起侧向扶持作用。但总体上看,依然是剪力墙对结构的侧向刚度和侧向抗地震能力起主导作用。

针对上述受力特点,到目前为止,不论研究界还是工程界自然把注意力首先放在剪力墙部分,对框架部分则倾注的注意力和研究工作较少,对这部分抗震措施往往只是从概念上设想将其适度加强。以我国设计规范为例,其中更多地是以高层建筑的影响性和复杂性为思考背景,将8度区总高60 m以上和9度区的框架-剪力墙的框架部分取为一级抗震等级;同时,考虑到剪力墙设置数量较多,侧向刚度较大时,框架部分在某些楼层分担的层剪力比重可能过少,从而担心其梁、柱适应强震下可能出现的复杂受力状态的潜在承载能力不足,从而对它分担的层剪力下限作了不小于 $0.2V_0$ 和 $1.5V_{fmax}$ 的规定(其中 V_0 为结构底部总剪力, V_{fmax} 为按框架-剪力墙结构进行弹性分析所得的框架部分各楼层地震剪力中的最大值,见《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[1]第6.2.13条和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)^[2]第8.1.4条)。这些措施都是从防止框架部分过弱的角度来着眼的。也因为上述原因,近年来已知的专门针对框架-剪力墙中框架部分的研究工作也不多见。在研究工作中涉及其中框架部分的有:

1)20世纪80年代美、日联合完成了7层框架-剪力墙足尺模型抗震性能拟动力试验;与此同时,美国加州大学 Berkley 分校 A. E. Aktan 和 V. V. Bertero 对相应结构的1/5缩尺模型进行了振动台试验,并通过计算机模拟分析对试验结果作了验证^[3];20世纪90年代初,中国张川也对该结构的1/10缩尺模型完成了振动台试验及计算机模拟验证^[4]。这些试验及分析结果均证实,在相应预计最大地震下,剪力墙底部和部分洞口连梁发生了程度不等的明显损伤,但框架部分除跨度较小的框架梁形成塑性铰外,其余梁、柱均保持在未屈服状态。

2)21世纪初 Mario S. Lopes 和 Rita Bento^[5]对

框架-剪力墙结构算例进行了非弹性动力分析,在对剪力墙的侧向刚度和基础的嵌固程度做了折减以使整体结构有充分变形的前提下,分别对框架柱采用较大增强措施使框架梁在非弹性动力反应下屈服和对框架梁采用增强措施使框架柱在非弹性动力反应下屈服,其分析结果表明,由于剪力墙的强有力扶持作用,不论框架梁还是框架柱形成塑性铰,对结构整体抗震性能的影响都不大。

3)2006年,胡庆昌^[6]针对中国钢筋混凝土框架-剪力墙结构的“强柱弱梁”措施及框架部分承担最小地震剪力的调整措施作了讨论,认为这些措施可能偏严,且指出通过 $0.2V_0$ 和 $1.5V_{fmax}$ 两个方面控制框架部分各层所承担最低剪力的做法可能造成逻辑上的混乱。并介绍了美国规范 UBC 规范最初提出 $0.2V_0$ 控制条件的着眼点。

4)笔者所在研究团队曾通过另外算例经非弹性动力反应分析对框架-剪力墙结构的强震反应做了考察^[7-8],其算例表明,按中国规范设计的框架-剪力墙结构实例,在剪力墙侧向刚度不是过弱时,即使将地震作用增大到超过罕遇地震水准,使剪力墙底部进入了局部屈服后状态,结构的整体变形依然也只能达到使框架部分形成少量塑性铰的地步。

以上这些试验及分析结果均表明,不论是从分担楼层剪力的角度还是从框架-剪力墙结构在罕遇水准或更高地震作用下达到的变形状态来看,其框架部分均处在较为有利的状态。

1 模型结构及弹性分析主要结果

为了进一步识别和讨论钢筋混凝土框架-剪力墙结构,特别是其中的框架部分的强震反应性态,笔者完成了2个模型结构(结构1和结构2)的设计和相当于罕遇水准的多条地面运动输入下的非弹性动力反应分析。其中结构1和结构2分别为8度 $0.2g$ 区的30层和8度 $0.3g$ 区的24层框架-剪力墙结构,其总高均大于60 m,故剪力墙和框架部分均属一级抗震等级。2个结构的平面布置如图1所示,其中只表示出了沿分析方向布置的剪力墙。楼面及屋面结构布置成横向承重方式,沿纵向在2个横向边跨设置了2道等距的次梁将楼面板分隔成连续单向板。楼面恒载和屋面恒载分别取 4.0 kN/m^2 和 4.5 kN/m^2 ;外围填充墙及女儿墙线荷载统一取为 5 kN/m ;楼面和屋面活荷载均取为 2.0 kN/m^2 ,地震作用按振型分解反应谱法确定。

2个结构的层高在底层均为3.9 m,在标准层均为3.3 m;结构1的总高度为99.6 m,结构2的总高

度为 79.8 m。结构各竖向构件的截面尺寸及其混凝土强度等级沿楼层的变化如表 1 所示。结构 1 的剪力墙连梁高度取为 1 200, 宽度与同楼层的剪力墙宽度相等, 属于小跨高比连梁; 结构 2 的剪力墙连梁统一取为 300 宽、750 高, 属于普通连梁。2 个结构的梁截面尺寸见图 1, 不同楼层对应位置的梁截面均相同; 中间 4 榀横向框架梁统一取相同的截面。结构楼面板厚取为 100 mm, 屋面板厚取为 120 mm。

2 个结构的弹性内力分析使用 ETABS 软件完成。根据高层规程 JGJ3—2002^[2], 按整体增大系数法计算出的 2 个结构的重力二阶效应系数均小于 10%。若按规范的规定可不考虑二阶效应的影响, 但为了细致考察结构的实际受力, 2 个算例均按实际的二阶效应系数来进行抗震变形验算和内力计算, 但在竖向构件截面设计时, 将其偏心距增大系数 η 取为 1.0, 以免重复计算二阶效应。结构构件内力严格按照规范规定进行调整, 截面设计严格按照规

范规定方式完成, 不考虑人为的内力重分布措施, 除构造要求外选筋不人为加大, 以尽量避免人为因素导致的构件控制截面承载能力的提高。表 2 给出了 2 个结构的主要弹性内力分析结果。可以看出地震作用标准值下的结构弹性层间位移角已接近规范规定的 1/800 限值, 且剪力墙及柱的轴压比也已接近规范规定的限值(分别为 0.5 和 0.75), 表明模型结构属于恰好满足规范各项要求的偏不利受力情况。

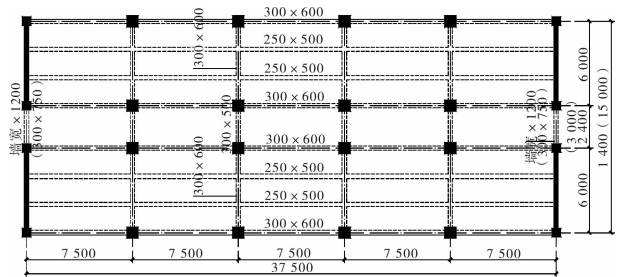


图 1 2 个算例结构的平面布置图(括号内数字用于结构 2)

表 1 2 个结构的竖向构件及其混凝土等级沿高度的变化

结构 1 (30 层)				结构 2 (24 层)							
剪力墙截面		柱截面		柱、墙砼等级		剪力墙截面		柱截面		柱、墙砼等级	
1~5 层	300	1~6 层	1 000×1 000	1~30 层	C35	1~3 层	250	1~6 层	800×800	1~5 层	C40
6~20 层	250	7~12 层	900×900	4~24 层	200	7~12 层	750×750	6~15 层	C35		
21~30 层	200	13~18 层	800×800			13~18 层	700×700	16~24 层	C30		
		19~24 层	700×700			19~24 层	650×650				
		25~30 层	600×600								

表 2 结构弹性内力分析结果

	结构 1	结构 2
抗震设防烈度	8 度(0.2 g)	8 度(0.3 g)
最大层间位移角	1/947	1/875
框架柱最大轴压比	0.71	0.75
剪力墙最大轴压比	0.45	0.31

2 非弹性动力反应分析及主要结果

利用重庆大学结构工程与防灾研究中心编制并经严格校准的 FW-EPA 程序^[7,9]完成了 2 个模型结构各在 5 条相当于罕遇地震水准的地面运动输入下非弹性动力反应分析。该程序适用于各层楼、屋盖在其平面内视为无穷刚性的钢筋混凝土框架结构、框架-剪力墙结构的无扭转拟三维动力分析。其框架部分的梁、柱单元采用修正单分量模型和改进武田滞回模型, 其中考虑了水平地震作用引起的柱轴

力变化对滞回模型的影响, 以及梁纵筋在不同节点中的粘结滑移对动力反应的影响。在确定各杆端恢复力模型的屈服弯矩时, 取用材料强度的平均值以反映实际已建成工程中材料强度的平均水平, 并参照国外研究成果考虑了有效板宽范围内与梁平行的板筋对梁抗负弯矩能力的贡献^[10]。对剪力墙肢使用多竖杆模型, 其中用剪切弹簧来模拟剪力墙的非线性剪切变形。

分析结果表明, 在结构 1 和结构 2 在各自地震设防分区的罕遇水准地面运动输入下, 有一定数量的剪力墙洞口连梁端部形成了塑性铰; 墙肢底部依地面运动输入的不同有一部分约束边缘构件纵筋或靠近边缘构件的腹板竖向分布筋进入屈服, 但屈服后变形增长不显著。而框架梁、柱则无一例外地都未进入屈服后状态, 且大多数梁、柱端在罕遇水准地震输入下所处的最大转动变形状态与屈服转角尚相差较远。在表 3 和表 4 中分别给出了 3 条地面运动

输入下底部剪力最大时刻结构底部剪力在剪力墙和框架之间的分配情况以及该截面总倾覆力矩在剪力墙与框架之间的分配情况。在表5中则给出了地面

运动输入下2个结构的最大水平位移反应信息。其它更详细的分析结果详见文献[11]。

表3 罕遇水准地面运动输入下结构底部剪力最大时所对应的框架与剪力墙底部楼层剪力分配

地震波	结构1				结构2			
	结构总剪力/ kN	框架总剪力/ kN	剪力墙总剪力/ kN	框架部分 所占比例/%	结构总剪力/ kN	框架总剪力/ kN	剪力墙总剪力/ kN	框架部分 所占比例/%
El Centro	25 144.3	4 454.2	20 690.1	17.7	20 865.8	1 137.4	19 728.5	5.5
Taft	15 846.6	2 732.2	13 114.4	17.2	14 761.9	1 392.9	13 369.0	9.4
USA04614	18 967.7	2 979.4	15 988.3	15.7	11 983.3	1 037.3	10 946.0	8.7

表4 罕遇水准地面运动输入下结构总倾覆力矩最大时所对应的框架与剪力墙倾覆力矩分配

	结构1				结构2			
	结构总倾覆 力矩/(kN·m)	框架部分 倾覆力矩/ (kN·m)	剪力墙部分 倾覆力矩/ (kN·m)	框架部分 所占比例/%	结构总倾覆 力矩/(kN·m)	框架部分 倾覆力矩/ (kN·m)	剪力墙部分 倾覆力矩/ (kN·m)	框架部分 所占比例/%
弹性分析	290 771	95 336	195 434	32.8	304 400	89 126	213 271	29.3
El centro	313 282	75 045	238 137	24.0	441 016	113 370	327 646	25.7
Taft	323 291	42 737	280 554	13.2	303 368	94 890	208 478	31.3
USA04614	427 315	103 780	323 535	24.3	369 567	96 268	273 299	26.0

根据表3所列结果,结构1和结构2的框架部分总剪力占整个结构总剪力的比例都比较小,可以看出,即使是在罕遇地震作用下,框架部分剪力占结构总剪力的比例均未超过20%(20%是结构设计时规范规定的框架部分剪力应占结构总剪力的最小比例)。这也表明,在剪力墙的墙肢底部进入屈服后状态之后,框架与剪力墙之间的内力重分布并不显著,仍然是剪力墙承担了绝大部分的水平地震作用,这与文献[7]的分析结果是一致的。而从表4来看,框架部分所承担的倾覆力矩比例相对较大,结构1和结构2的最大比例分别达到了32.8%和31.3%,这与水平地震作用在框架柱中引起的拉、压轴力较大有关。从总体位移反应来看,2个结构的顶点位移量均较小,而最大层间位移角则分别为0.37%和0.56%,根据文献[12],可以初步判断剪力墙已经进入了屈服后状态,而框架梁、柱端都还处于屈服前的“准弹性”状态。

表5 罕遇水准地面运动输入下结构的水平位移信息

地震波	结构1		结构2	
	顶点位移/ m	最大层间 位移角/%	顶点位移/ m	最大层间 位移角/%
El centro	0.17	0.32	0.31	0.56
Taft	0.21	0.34	0.21	0.37
USA04614	0.27	0.37	0.22	0.56

3 对分析结果的讨论

3.1 对框-剪结构中框架部分受力特点的分析

从以上弹性结构分析和非弹性动力反应分析结果中都不难看出,框架部分在框架-剪力墙结构中所承受的水平作用从总体上说占的比重偏小,这种状态完全可以一直维持到罕遇水准的地震作用下。通过对分析结果的总体考察,该文认为形成这种特点的原因在于:

1) 框架-剪力墙结构中剪力墙部分(如图1中两端山墙轴线的两片联肢墙)本身的侧向变形特征为弯剪型(因为是联肢墙,所以不是纯弯曲型),其侧向刚度,特别是在中下部楼层将明显大于具有剪切型侧向变形特点的框架部分。在形成共同工作状态后,剪力墙部分必将承担绝大部分水平力和由水平力产生的倾覆力矩。从表2和表3可以看出,这种相对受力状态可以维持到罕遇水准地面运动输入过程中。

2) 大部分实际框架-剪力墙结构中的剪力墙部分的侧向刚度很大,故在弹性结构分析中所得各层层间位移就将明显小于单独受力的框架结构。加之在多数工程情况下因一级抗震等级剪力墙肢底部加强区约束边缘构件竖向钢筋构造配筋率较高,再加上竖向分布钢筋的作用,导致墙肢底部截面抗弯能

力常有不小幅度的超强,使墙肢底部屈服推迟,因此,即使在罕遇水准地面运动输入下,框架-剪力墙结构能达到的最大层间位移角(见表 5)依然明显低于框架梁、柱形成塑性铰时所需要的层间位移值。这是框架部分在罕遇水准地面运动输入下未进入屈服状态的主要原因。由于分析结果表明在相当数量地面运动输入下已达到的层间位移距梁、柱形成塑性铰所需的位移尚有较大差距,因此,即使地震作用从罕遇水准进一步加大,剪力墙底部进入屈服,框架部分也很难很快进入较普遍屈服状态。而且,还值得一提的是,剪力墙截面因沿受弯高度方向配筋,故其竖向钢筋屈服体现为由外向内逐渐发展的过程,而且这个过程发展相对漫长,塑性转动增长缓慢,这一过程在联肢墙中因多个墙肢的陆续屈服就更为漫长。

3)当层数较多的框架结构单独经历强震反应时,常因柱截面及混凝土强度等级沿结构高度的变化、构造措施原因或柱抗弯能力增强措施不够强等原因,而在动力反应过程中某个瞬时相对较弱的楼层中形成若干个柱端进入屈服的局,从而使该楼层刚度下降,在以后的反应过程中塑性变形将继续集中于该楼层,从而形成所谓“动力反应薄弱楼层”的不利于抗震可靠性的动力反应状态(称之为“动力反应薄弱楼层”是想有别于用简单静力方法就可以发现的强度或刚度相对偏弱的通常所说的“薄弱楼层”)。但在框架-剪力墙结构中由于有了剪力墙,而且剪力墙的屈服部位可以有效控制在结构底部,即使框架部分某些楼层的柱端在更强地震下形成塑性铰,因相应楼层的剪力墙始终保持弹性,有效牵制了框架部分的自由变形,从而可以完全杜绝上述“动力反应薄弱楼层”的形成。这是应该看到的框架-剪力墙结构在实现塑性机构总体控制思路后在抗震反应性态方面存在的一个特殊优势。

可以想象,在对框架-剪力墙结构中的剪力墙采取了证明能保证其良好反应性态的抗震措施之后,不免担心因框架部分承担的楼层剪力和倾覆力矩份额过小而把框架部分设计得能力储备不足,这种担心在未经结构试验或有效的非弹性动力反应分析证实框架部分在强震下的有利状态之前自然更为强烈。于是,以此为背景,在设计规范中给出了若干增强框架部分的设计措施。根据该文对完成了弹性分析和抗震设计,再完成了非弹性动力反应分析的 2 个模型结构各设计步骤的效果及各项分析结果的综合分析,认为按目前中国抗震设计规范完成设计的

框架-剪力墙结构中的框架部分是通过下列措施得到了实质性加强的。

1)高层建筑框架-剪力墙结构确定地震作用时使用的振型分解反应谱法在用 SRSS 法进行振型组合时考虑的是基于随机振动理论的多振型叠加时的偏不利外包效应,与实际地面运动输入下多自由度体系每个时点各质点处在不同大小和不同方向的振动状态的真实反应相比至少在中、下部楼层的层剪力和层倾覆力矩的层面上是偏安全的。这一偏安全的设计效果不仅有利于框架部分,也同时有利于剪力墙部分。

2)一级抗震等级框架柱抗震最小配筋率在文中 2 个模型结构的大部分框架柱的截面设计中起控制作用,从实例配筋结果看出,这一抗震措施所需的柱纵筋配筋量超过了规范关于框架柱的强柱弱梁措施以及最小楼层剪力调整措施对框架柱的控制配筋量,从而反映出框架柱最小配筋率对框架剪力墙结构中框架柱的增强作用。

3)前面引言中所述中国设计规范对框架部分承担的最小楼层剪力的规定虽然对框架柱配筋量的增大作用在上述模型结构中不及最小配筋率要求严格,但对框架梁的纵筋配置数量有较明显的增强作用。

4)规范对一级抗震等级框架柱轴压比的规定常对框架部分柱截面尺寸的选择起控制作用,框架-剪力墙结构层间位移角的限制条件也要求中上部楼层框架柱的截面尺寸不致过分收小,从而也间接与最小配筋率的规定一起对推迟框架柱的屈服发挥作用。

3.2 适度放松框-剪结构中框架部分抗震措施的初步设想

从前述已有试验结果和分析结果,特别是严格按中国现行规范及规程对框架-剪力墙结构中框架部分采取的增强措施设计的 2 个结构实例的非弹性动力反应分析结果,以及对影响这类结构框架部分强震性能的诸多因素及结构强震反应特征的分析中,即使是从审慎的角度也会看出中国现行规范对这类结构框架部分的抗震措施有谨慎放松的可能性。

首先可以考虑根据文献[6]援引美国 S K Ghosh 教授的解释,把框架部分承担的层剪力限制条件局限于 $0.2V_0$,取消不小于 $1.5V_{fmax}$ 的要求,这是因为只着眼于保证底部几层框架部分承担的层剪力不致过小就已经足够,大于 $1.5V_{fmax}$ 的这一

全面提高(指全部楼层)框架部分所承担剪力的做法可能显得过于慎重。

其次,建议可将一级框架部分柱的最小配筋率(全部纵筋)由1.0%下降到0.8%,而0.8%也就是现行美国规范^[13-14]规定的最严格要求。

但是,不建议降低一级抗震等级的柱抗弯能力增强措施,因为正如欧盟抗震规范 EC8-EN1998-1^[15]所强调的,这一措施是引导框架部分的塑性铰首先在梁端形成的必要措施。

当然,上面的建议是在整体结构全面符合抗震规范要求,特别是剪力墙部分全面满足抗震规范及高层建筑混凝土结构技术规程要求的前提下提出的。

4 结 语

由于剪力墙抗侧刚度和强度都很大,框架-剪力墙结构的整体受力主要是剪力墙起主导作用,而框架处于相对有利的受力状态。在强震作用下,尽管剪力墙墙肢底部可能进入屈服,但除墙底塑性铰区以外的剪力墙均还保持弹性或准弹性受力,故框架-剪力墙结构以剪力墙为主导的受力状态并无明显改变,再加上中国设计规范对框架部分承担的最小楼层剪力的规定以及对框架柱的最小配筋率规定等抗震措施对框架部分的增强作用,即使在罕遇地震作用下,框架-剪力墙结构中的框架部分仍很难进入屈服。根据已有的试验和分析结果,笔者认为,与纯框架结构相比,可以适度降低对框架-剪力墙结构中框架部分的抗震措施要求,在整体结构全面符合抗震规范要求的前提下,可适度放松框架部分承担的最小楼层剪力的规定和框架柱最小配筋率的规定。

参考文献:

- [1] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [2] JGJ 3-2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] BERTERO V V, AKTAN A E, CHARNEY F A, and Sause R. U. S.-Japan cooperative earthquake research program: earthquake simulation tests and associated studies of a 1/5th-scale model of a 7-story reinforced concrete test structure[R]. Report No. UCB/EERC-84/05, University of California, Berkeley, California, June 1984.
- [4] 张川. 钢筋混凝土框架-抗震墙结构的抗震性能及模型化研究[D]. 重庆:重庆建筑大学土木工程学院,1994.
- [5] LOPES M S, BENTO R. Seismic behavior of dual systems with column hinging[J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(4): 657-677.
- [6] 胡庆昌. 钢筋混凝土框剪结构抗震设计若干问题的探讨[J]. 建筑结构,2006,36(6): 84-86.
HU QING-CHANG. Some problems relating to seismic design of R/C frame-wall structure [J]. Building Structures, 2006, 36(6): 84-86.
- [7] 韦锋. 钢筋混凝土框架和框架-剪力墙结构非弹性地震反应性态的识别[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2005.
- [8] 陈小英. 基于非线性动力分析的框-剪结构抗震规定的验证[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2005.
- [9] 杨红. 基于细化杆模型的钢筋混凝土抗震框架非线性动力反应规律研究[D]. 重庆:重庆建筑大学土木工程学院,2000.
- [10] PANTAZOPOULOU S J, FRENCH C W. Slab participation in practical earthquake design of reinforced concrete frame[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 479-489.
- [11] 陈文科. 基于非线性动力分析的八度区一级框-剪和框-筒结构抗震规定研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2007.
- [12] PANAGIOTAKOS T B, FADIS M N. Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 135-148.
- [13] IBC2006 International building code[S]. Country Club Hills, Illinois, USA; International Code Council, INC., 2006.
- [14] ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills, Michigan, USA; American Concrete Institute, 2007.
- [15] EN 1998-1: 2004, Eurocode 8; design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings[S]. London, Thomas Telford Publishing Ltd, 2005.

(编辑 王秀玲)