



文章编号:1006-7329(2003)06-0026-07

性态设计方法及能力 - 需求曲线方法的几个问题*

李英民¹, 杨成², 赖明³

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 3.建设部科技司, 北京 100835)

摘要: 简要回顾了性态设计的发展历程, 明确了性态设计的相关概念及其关系, 剖析了性态设计与我国现行抗震设防原则与思想间的关系, 指明了我国抗震设计规范与性态设计接轨的方向, 讨论了目前引起较多关注的能力 - 需求曲线设计方法中的结构模型、水平加载模式、能力 - 需求曲线交角及 $P - \Delta$ 效应影响等问题。

关键词: 性态设计; 基于位移的设计; 能力 - 需求曲线法

中图分类号: TU318

文献标识码: A

Several Problems about Performance Based Design and Capacity - Demand - Diagram Methods

LI Ying - min¹, YANG Cheng², LAI Ming³

(1. College of Civil Engineering, CU, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 3. Department of Science and Technology, Ministry of Construction, Beijing 100835, P. R. China)

Abstract: The development of performance based design method (PBD) is briefly reviewed. The relationship between PBD and the principle of seismic design in current Chinese code is analyzed and the direction to introduce the PBD method to the Chinese code for seismic design of building is given. Then, some problems about the capacity - demand - diagram methods which attracted much attention are discussed, such as the structural models for analysis, the shapes of lateral load distribution for capacity curves, the angles formed by capacity curve and demand curve and $P - \Delta$ effects for capacity curves.

Keywords: performance based design; displacement based design; capacity - demand - diagram methods

近年来, 建筑结构基于性态的设计方法(performance based design, 记为 PBD)逐渐被引入我国, 与之相关的许多概念和设计、分析方法也受到了相当的关注; 关于 PBD 方法的研究也取得了一些成果^[1,2], 为该方法在我国尽快推广应用奠定了基础。但同时也应看到, 学术界和工程界对于该方法

* 收稿日期: 2003 - 09 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50008017)

作者简介: 李英民(1968 -), 男, 山东人, 教授, 工学博士, 主要从事地震工程和结构抗风等研究。

还缺乏系统的认识,甚至存在概念上的偏差,特别是该方法与我国现行规范的关系以及接轨方式还较模糊,对于该方法在具体实施过程中所必须处理的问题认识还不足。本文综述了国内外部分研究成果,对以上内容进行了分析和说明,并针对目前引起较多关注的能力-需求曲线方法提出了应用过程中的若干具体问题及解决的建议。

1 性态设计方法的概念及发展历程

基于性态的设计方法,是指以预定的结构性态目标为依据的结构抗震设计方法。这种方法一经提出,就受到国际地震工程界的普遍关注并引发了对以基于承载力的设计方法为主的抗震设计方法的反思。

1.1 性态设计的发展历程

众所周知,地震发生的强度、频度、时间和空间等具有强烈的不确定性,而地震一旦发生则可能造成毁灭性的后果。在经历了许多震害之后,各国的建筑设计思想已逐步达成共识并形成一种趋势,即对于使用寿命期内不同频度的地震,结构应有不同的抵抗能力。大多数国家的抗震设计规范是基于这一抗震设计思想制定的。我国自《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)^[3]以来所设定的“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设防水准在国际上具有相当的代表性。

回顾历年特别是近年来的震害,人们不难总结出以下正反两方面的结论。一方面,经过抗震设防的结构均经受了地震考验,近年来震害中不乏经抗震设计的房屋较未经抗震设防的房屋震害大为减轻的事例。这表明,现行的抗震设计思路及方法总体上是有效的。另一方面,也不能过分高估现行的抗震设计方法与措施。除了各次震害所反映出的具体技术措施以外,一个值得认真反思的方面是现行的具体抗震设防原则。从发生在上世纪80年代的美国 Santa Cruz 地震和 Loma Prieta 地震到近年来世界各地的大震震害情况(表1)^[4]来看,除少数因违反设计规范或未经抗震设防等原因外,下列三点现象成为震害中值得注意的特点:①经抗震设防的房屋倒塌少,造成的人员伤亡不大,但造成的经济损失却非常巨大,令政府官员、投资商、业主等各方面都难以接受;②地震中造成一些担负震后救灾功能的建筑物(如医院、容纳重要设备的建筑物)在地震过程中遭受严重损坏或倒塌,丧失救灾功能;③即或房屋未倒塌,但震害修复费用昂贵。由此,促使人们对现行抗震设防目标进行审视。如果说现行的抗震目标是“强调共性,保证低限”的话(所谓共性是指所有房屋建筑均满足的设防目标,所谓低限是指规范为最低标准),那么人们在分析总结了上述震害特点的基础上提出“体现个性,保证低限”的要求则是很自然的。此即基于性态的设计思想。

表1 近年一些地震的人员伤亡和经济损失

时间	地点	震级	死亡人数	经济损失	备注
1992.3.13	土耳其,艾耳津坎	6.8	800	8亿美元	违规、不符合抗震规定、偷工减料
1993.9.29	印度,凯拉里	6.2	10 000		未经抗震设计、施工质量低劣
1994.1.17	美国,北岭	6.7	57	>170亿美元	抗震设计、救灾应急得当
1995.1.17	日本,神户	7.2	5438	>1 000亿美元	未经抗震设计(木结构)
1995.5.27	俄罗斯,萨哈林	7.6	2 965		
1996.2.23	中国,丽江	7.0	309	25亿美元	
1996.3.19	中国,伽师	6.924	3亿美元		
1996.5.13	中国,包头	6.4	26	27亿美元	
1997.5.10	伊朗,加恩-伊尔兼德	7.1	1 560		
1998.2.9	中国,张北	6.2	49	9亿美元	
1999.8.17	土耳其,伊兹米特	7.4	17 000	>100亿美元	违规、不符合抗震规定、偷工减料
1999.9.21	中国台湾,集集	7.3	2450	>100亿美元	违规、不符合抗震规定、偷工减料
2001.1.26	印度,古吉拉特	7.7	19 984		未经抗震设计、施工质量低劣

1994年 Northridge 地震之后,美国工程界开始将性态设计纳入规范化设计轨道。1995年,加州工程师协会(SEAOC)将性态设计的概念纳入其研究项目计划 Vision2000, Vision2000 的报告建议了

著名的“性能控制水准图”。1996年,美国应用技术委员会(ATC)和联邦紧急救援署(FEMA)的报告(ATC-40、FEMA-273)中均制定了相应的大纲,希望能够采取更可靠的手段对现有建筑做基于抗震性能上的加固,并建议规范提高对结构的抗震性能设计要求。1997年,美国建筑抗震安全委员会(BSSC)的国家减轻地震灾害计划(NEHRP)条款接受了 Vision2000 报告中关于性能设计的概念,也制定了与 Vision2000 相类似的建筑物性能控制示意图(图 1)。与 Vision2000 不同的是,NEHRP 所采用的设计地震水准比 Vision2000 少了一个,且地震重现期也不同。这是性能设计作为一个新名词第一次出现在正式的美国抗震设计规范当中,并成为《国际规范》(2000)(IBC2000)的制定基础^[5]。

其间,其他抗震发达国家如日本等也开始积极推进性能设计的规范化进程。随着人们对地震灾害综合衡量指标的变化和社会经济承受能力的意识提高,PBD 方法正得到越来越广泛的认同和采纳。

1.2 地震水准和结构性能水准

基于性能的设计方法可以理解为以预定的结构性能目标为依据的结构设计方法,其出发点在于根据建筑物的功能及业主承受能力选择不低于规范最低要求的结构性能目标并据此进行抗震设计。因此,PBD 方法的实施需首先确定两个水准,即地震水准(earthquake level)和结构性能水准(performance level)。地震水准是指同一地区以不同的重现期(或超越概率)划分的地震强度,而性能水准则是指在某设计地震水准下建筑物所能达到的最大破坏程度^[6]。不同地震水准下建筑物预期达到的性能水准称为性能目标。

地震水准的确定目前看来存在较大争议,有的主张分为三个水准(如中国的多遇地震、基本设防烈度地震和罕遇地震),有的主张对 PBD 方法采用更细的水准划分。PBD 方法最大的难度还是来自于性能水准的确定,包括三方面:一是性能水准的界定,采用什么样的界定指标(如使用功能、生命安全、修复难易程度等宏观定性指标)、划分多少性能水准等均需深入研究;二是采用什么样的物理量(又称性能指标)来描述结构性能;三是性能指标与性能水准间的对应关系(涉及到对应关系本身的不确定性、结构体系和结构型式等众多方面)。目前得到较多重视的事实上更多地集中于性能指标问题。鉴于结构复杂的非线性性质,已提出的指标有力、位移、速度、加速度、能量和损伤等。基于不同的性能指标,衍生出多种 PBD 方法,如基于位移的设计方法(DBD 方法)等。从这个意义上讲,长期以来一直沿用的结构抗震设计方法即属于 PBD 方法中基于力的设计(force based design)方法。

2 从性能设计看我国现行建筑抗震设计规范

2.1 我国现行建筑抗震设计规范与性能设计相关的规定及做法

我国现行建筑抗震设计规范^[7]依然遵循了原规范^[3]的抗震设防思想和原则,即按三水准设防目标进行抗震设计,所采取的地震水准和结构性能水准以及相应的性能指标列于表 2。

从性能设计的角度看,我国规范已具有了 PBD 方法的雏形,既规定了三个地震水准,也规定各

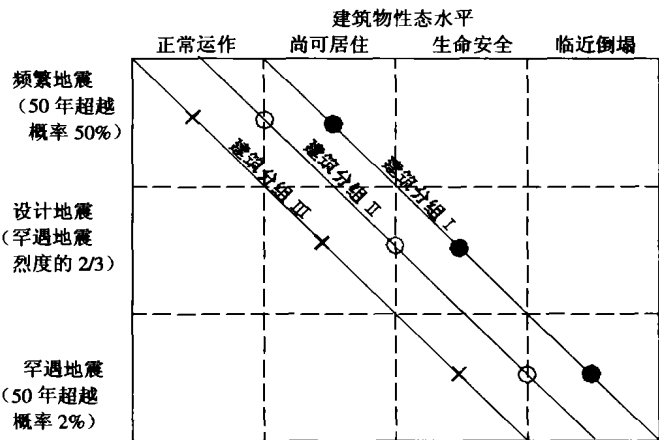


图 1 NEHRP 规定(1997)的各组建筑物性能控制示意

表2 我国抗震设计规范所采取的地震水准、结构性能水准和性能指标

地震水准	结构性能水准	性能指标
多遇地震烈度(重现期50年)	一般不受损坏或不需修理可继续使用	力+位移
抗震设防烈度(重现期475年)	可能损坏,经一般修理或不需修理仍可继续使用	不明确
罕遇地震烈度(重现期约2000年)	不致倒塌或发生危及生命的严重破坏	位移

水准下的结构性能目标,各水准下使用的性能指标也不尽相同(表2)。但是,规范的抗震设防目标在形式上则是统一的、“一刀切的”(规范第1.0.1条^[7]),未赋予业主和设计者自主选择结构性能目标的权力。

事实上,规范所采取的具体措施却使抗震设防效果或者说结构性能依结构不同而不同。与国外规范相类似,规范根据结构重要性等的不同而划定了建筑的抗震设防分类及相应的抗震设防标准,从表3给出的各类建筑的地震作用及抗震措施可以看出,对于甲类及乙类建筑,抗震措施至少按比本地区设防烈度高一度确定,根据我国各地震水准间的统计关系,这时的抗震措施所对应的地震水准实际上相当于罕遇地震,从而使甲类和乙类建筑的性能明显优于丙类建筑。相反地,丁类建筑的抗震性能则较丙类差。由此可以得到与国外规范相类似的地震水准-结构性能水准图如图2所示。此外,规范对不同结构所采取的抗震措施也不尽相同,如对于钢筋混凝土结构进行抗震等级的划分等,也将导致结构在相同地震水准下的性能事实上也并非“一刀切”形式的“三水准”要求。

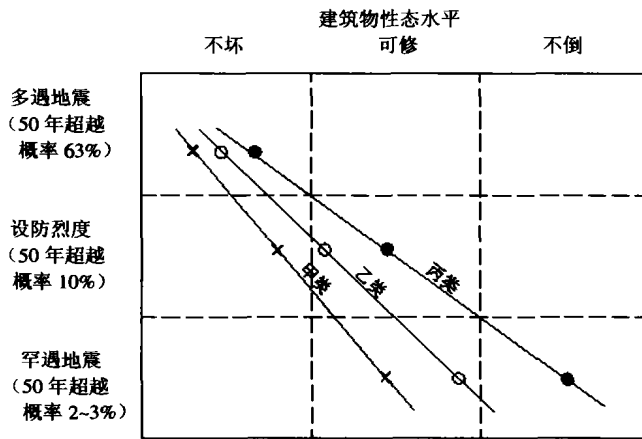


图2 我国甲、乙、丙类建筑物性态控制水准示意

此外,规范对相同结构所采取的抗震措施也不尽相同,如对于钢筋混凝土结构进行抗震等级的划分等,也将导致结构在相同地震水准下的性能事实上也并非“一刀切”形式的“三水准”要求。

表3 我国建筑抗震设防分类和设防标准

设防类别	建筑	地震作用	抗震措施
甲类	重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害的建筑	高于本地区抗震设防烈度的要求,其值应按批准的地震安全评价结果确定	抗震设防烈度为6~8度时,应符合本地区抗震设防烈度提高一度的要求 抗震设防烈度为9度时,应符合比9度抗震设防更高的要求
乙类	地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的建筑	应符合本地区抗震设防烈度的要求	抗震设防烈度为6~8度时,应符合本地区抗震设防烈度提高一度的要求 抗震设防烈度为9度时,应符合比9度抗震设防更高的要求
丙类	除甲、乙、丁类以外的一般建筑	应符合本地区抗震设防烈度的要求	应符合本地区抗震设防烈度的要求
丁类	抗震次要建筑	应符合本地区抗震设防烈度的要求	应允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低,但抗震设防烈度为6度时不应降低

注:对较小的乙类建筑,当其结构改用抗震性能较好的结构类型时,应允许按本地区抗震设防烈度的要求采取抗震措施。

2.2 关于PBD方法的规范化问题

以上的分析表明,我国现行规范事实上已具备了PBD方法的雏形。随着国民经济实力的提高,在满足规范最低要求的前提下根据需求适当提高某些建筑的抗震性能目标将是可行的,也应是规范允许的。因此,PBD方法将在规范中得到应用。

就现行规范而言,引入PBD方法的首要问题是赋予业主和设计者自主选择结构性能目标的权力,这自然涉及到地震水准和结构性能水准的确定。关于地震水准是否有必要在现有的三个水准(分别对应于重现期50年、475年和约2000年)再进行细分的问题,目前看来还存在争议,再增加规定一个重现期为75年或100年的地震水平或许是可以接受的,但过多过细的地震水准则是不必要的,从地震这一强烈不确定现象的实质来看也是不恰当的。至于结构性能水准,一方面需要规定较目前“不坏”、“可修”和“不倒”等三水准更细密的多级别性能水准以供业主和设计者选择,另一方面

则应确定各性能水准的性能指标,该性能指标将是随结构型式、性能水准等而变化的单指标或多指标的综合。由此所确定的结构抗震设防水准将较目前现行规范具有细化、优化和个性化的特点,从而真正实现 PBD 方法。

3 能力 - 需求曲线方法的几个问题

3.1 关于能力谱方法和能力 - 需求曲线方法

注意到承载力不能作为结构进入非线性状态后的性能指标,而变形能力不足和耗能能力不足是结构倒塌的主要原因,基于位移的设计方法(DBD 方法)成为 PBD 方法目前较受重视的实施方案。DBD 方法中发展得较为成熟的是能力谱方法。

1993 年 Mahaney^[8]将给定地震作用具有某阻尼比的位移反应谱和加速度反应谱的纵坐标值(即位移和加速度)按各自对应的周期,分别作为横、纵坐标绘制得出加速度 - 位移响应谱(ADRS),称为需求谱;再按某种荷载加载模式进行结构的推覆分析(pushover analysis)得到结构基底剪力和顶点位移的关系曲线,并根据结构的等效单质点体系按动力学原理换算为表征结构能力的、与 ADRS 相对应的能力谱;最后将二者绘在一张图上,如果二者无交点,则说明结构抗震能力不足。

能力谱方法简单直观,使得非常复杂的结构抗震性能评判大为简化。但在实际应用中却遇到如何得到具有非线性特征的需求谱这样的难题,为此需进行迭代,直至需求谱和能力谱的交点上所对应的结构非线性性质相匹配。这一迭代效率不高,且不可避免地会导致数值发散。

将不同等效阻尼比所对应的需求谱上符合非弹性特征的非弹性需求点连线得到“需求曲线”,以代替单一的需求谱和能力谱相交的能力 - 需求曲线方法是今后能力谱方法发展的主要方向^[9]。Chopra^[10]将能力谱的割线刚度作为等效线性刚度,用滞回耗能和单调加载的体系应变能之比表示等效阻尼比,完成这样的等效线性化过程后,通过延性系数 μ 的连续取值确定需求曲线。ATC - 40 采纳了此方法,作为改进传统能力谱法的建议。

3.2 能力 - 需求曲线方法的几个问题

能力 - 需求曲线方法的结论取决于能力谱曲线和需求曲线的准确确定,前者主要受侧推分析和结构等效单质点化的影响,后者则与结构等效线性化方法有关。归纳起来,以下几方面问题应引起注意:

1) 结构分析模型问题

对于杆件恢复力骨架模型的简化,含软化段的三线型单杆模型假定可以较好地建立能力谱,但无法找到很好的方法来建立参数严格对应的需求曲线。所以,当前的很多关于能力谱方法的分析,从理论上讲都可以利用能力谱下降段的提早出现从而无法和需求谱相交来说明结构抗震能力的不足。但在进行实际模型的计算分析时,能力谱常常是没有下降段的,这是因为为了方便建立需求曲线而常采用屈服后杆件刚度系数 $\alpha \geq 0$ 的二线型恢复力骨架模型所确立的参数。这种没有下降段的二线型能力谱始终都和需求曲线存在交点,因而也不能从结构受力和材料受力的工作机理上来展示结构抗震能力不足的行为特征,这就无法脱离利用最大位移限值来控制结构性能水准的现有规范的旧思路,不利于建立真正的基于位移的结构设计方法。

2) 水平加载模式问题

非线性静力分析需要假定等效水平荷载的分布形式(图 3)。等效水平荷载的分布形式大致可分为固定性分布荷载和适应性分布荷载^[11]。前者例如将倒三角形、矩形、抛物线分布模式在整个加载过程中保持不变;后者则是考虑到作用在结构上的惯性力的分布形状随着结构进入不同程度的非线性状态而发生改变,而必须调整等效水平加载模式的形状,这在理论上是具有一定说服力的。但是,固定的抛物线模式和矩形加载模式事实上可看作是所有适应性分布模式的两种极限情况:抛物线模式将水平力的合力最大程度地集中于结构的上部,矩形分布模式则最大程度地将水平

力合力集中于结构的下部。抛物线模式的能力曲线将最大程度地下伏而矩形加载模式的能力曲线将最大程度地上扬,而适应性加载模式的能力曲线将位于这两条固定性加载模式的能力曲线之间。实际分析表明,适应性加载模式的能力曲线与抛物线模式的能力曲线比较接近。这表明,适应性加载模式相对于固定性加载模式的改进分析效果并不明显。钱稼茹等^[2]也认为适应性加载模式不一定比固定性水平荷载分布模型更合理。

3) 能力-需求曲线交角问题

不同加载模式所对应的能力谱和需求曲线相交得到的顶点位移有差别,差别的大小受需求曲线与能力谱相交方式的影响非常大(图 4)。文献[9]指出,需求曲线和能力谱相交角度近似 90°,这样不同加载模式所对应的能力谱与需求曲线的交点很可能具有相近的横坐标,也就是说计算得到的位移大致相近,而纵坐标即基底剪力则差别较大。但这可能只针对一般的非线性状态。如果结构延性好,能进入较强的非线性状态(如 $\mu \geq 10$),则相交角度可能趋于平缓。这样,需求曲线与能力谱的交点之间可能有较大的横坐标值的差距,即位移相差较大,而纵坐标即基底剪力之间的差距却较小。当然,大多数结构体系可能处于上述二者之间(图 4)。

总的来说,用单一加载模式的能力谱模型还不能有效地把握结构在大震下的表现,可以考虑探求模型参数的变化范围,把由此引起的能力谱的变化限定在一个范围内,并通过该区域范围具有统计意义的代表值估计结构在大震下的表现。笔者基于这一思路做了一些工作,收到了比较好的效果^[12]。这种方法有助于减小由于结构选型、地震动模型、高振型影响等因素所造成的分析误差。

4) 等效线性化问题

能力-需求曲线法的分析结果还随等效线性化方法的不同而不同。除了 ATC-40 采纳的等效线性化方法外,根据结构强度降低系数 R 和需要延性系数之间的关系,Newmark 和 Hall、Miranda 和 Bertero^[13]等学者提出了各自的等效线性化方法。相关分析表明,不同的等效线性化方法有各自的适用条件和范围,超越这些条件,所建立的需求曲线就可能不准确。按等效阻尼线弹性方法确定需求曲线的方法目前应用较多,是一种简便而较为合理的方法,但受到初始周期变化的影响。

另外,在能力谱的确定过程中,当结构的竖向荷载与楼层水平侧移相互作用而对结构产生的附加反应比较明显时, $P-\Delta$ 效应就必须考虑了。大多数平面框架的非线性分析中考虑 $P-\Delta$ 效应的方法都是基于传统梁柱理论中对柱子变形曲线的预先假定,这种方法值得商榷之处在于:初始假定曲线所造成的误差在构件小变形的时候是可以接受的,但如果在结构进入大变形状态甚至接近倒塌时还沿用简单的三次抛物曲线作为单元的侧向挠曲线假定,所造成的误差就相当大。

4 结语

性态设计是一个含义深远且有较强的社会意义的工程问题,其涉及的学科非常广泛。将性态设计的思路尽快完善并正式纳入规范是今后一段时期内的重要研究内容。

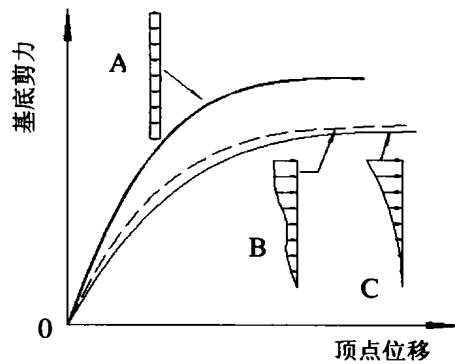


图 3 不同加载模式下侧推曲线差别

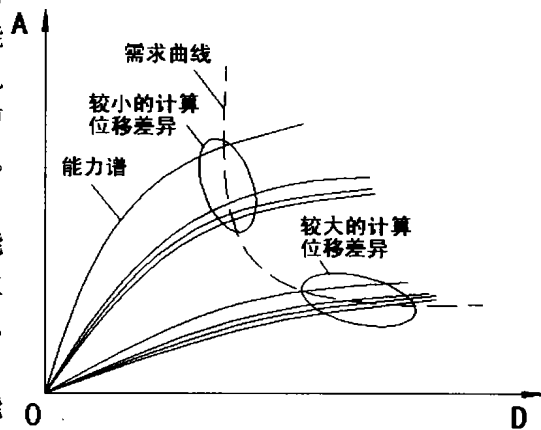


图 4 能力谱和需求曲线的交角

从工程应用的角度看,基于性态的抗震设计的关键问题是处理好材料、构件和结构体系的非线性问题,应加强现有设计、分析方法的准确性和可操作性,从而形成成熟的设计流程来促进性态设计更加广泛的工程应用。

虽然面临诸多问题,但应当看到,性态设计概念的提出已经在提醒结构工程师不应单一的结构性态参数指标而全面地、有针对性地从总体上更优化地完成结构设计。这样,性态设计将更好地融合现有新技术的成果,在未来的工程应用中取得长足的发展。

参考文献:

- [1] 钱稼茹,罗文斌.静力弹塑性分析—基于性能/位移抗震的分析工具[J].建筑结构,2000,30(6):23-26.
- [2] 钱稼茹,罗文斌.建筑结构基于位移的抗震设计[J].建筑结构,2001,31(4):3-6.
- [3] GBJ 11-89,建筑抗震设计规范[S].
- [4] 张敏政.跨世纪的地震工程研究[A].现代地震工程进展[C].江苏:东南大学出版社,2003.
- [5] Hamburger R O, Moehle J P. State of performance based—engineering in the United States[A]. PEER, The Second U. S. — Japan — American Workshop on Performance — Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures[C]. Japan: PEER, 2000.
- [6] 小谷俊介.叶列平,钱稼茹译.日本基于性能结构抗震设计方法的发展[J].建筑结构,2000,30(6):3-9.
- [7] GB 50011-2001,建筑抗震设计规范[S].
- [8] Bracci J M, Kunnath S K., and Reinhorn A M. Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures [J]. Journal of Structure Engineering, 1997, 123(1): 3-10.
- [9] 叶列平,李琪.基于性能/位移的能力—需求曲线设计方法[A].现代地震工程进展[C].江苏:东南大学出版社,2003.
- [10] Chopra A K, Goel R K. Capacity—demand—diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems[M]. University of California, Berkeley: California, US. PEER. 1999.
- [11] 熊向阳.侧向荷载分布方式对静力弹塑性分析结果的影响[J].建筑科学,2001,17(5):9-13.
- [12] 杨成.结构地震反应分析的改进能力—需求曲线方法研究[D].重庆:重庆大学,2003.
- [13] Badoux M. Comparison of seismic retrofitting strategies with the capacity spectrum method[A]. Proc. Of the 11th European Conference on Earthquake Engineering[C]. Rotterdam. 1998.