

[文章编号] 1002-8412(2010)01-0013-06

基于 DA 分析的结构抗地震倒塌能力研究

陆新征, 叶列平 (清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 结构体系的合理性对提高结构在极端灾害下的抗倒塌能力具有非常关键的作用,但目前尚缺少对结构体系合理性和抗倒塌能力的定量化评价方法。本文以结构抗地震倒塌为例,首先对结构的安全储备进行了讨论,指出结构的安全储备包括构件层次的安全储备和整体结构体系安全储备,并对影响结构体系安全储备的因素进行了分析。而后,为了更好地评价整体结构体系的抗地震倒塌安全水平,介绍了近年来国际上趋向采用的基于增量动力分析(DA)的倒塌储备系数(CMR),并以框架结构为例介绍了用倒塌储备系数衡量整体结构抗倒塌能力的具体方法。

[关键词] 结构;抗倒塌;增量动力分析(DA)

[中图分类号] TU312⁺.1 [文献标识码] A

Study on the Seismic Collapse Resistance of Structural System

Lu Xin-zheng, Ye Lie-ping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Beijing 100084, China)

Abstract: Structural system is very important for the collapse resistance of structures under extreme disasters. But currently there is still lack of quantitative evaluation method for structural system. Taking aseismic structures as examples, the safety margins of structures are discussed, and it pointed out that the structural safety margin is made up of safety margin that is beneath the structural element level and the safety margin of global structural system. Factors that may control the safety margin of global structural systems are analyzed then. In order to give a better evaluation for the safety of whole structure, Collapse Margin Ratio (CMR) is introduced, which is based on Incremental Dynamic Analysis (DA) and is receiving more international focus recently. Frame examples are given to illustrate how to evaluate the structural collapse resistance under Mega-earthquake with CMR.

Keywords: structural system; seismic collapse resistance; Incremental Dynamic Analysis (DA)

Email: ylp@mails.tsinghua.edu.cn

1 引言

结构是作为一个由各种构件所组成的整体系统来承受各种外界荷载作用的。而长久以来,由于分析能力和历史习惯,结构工程设计往往重视构件较多,而对结构体系的重视存在不足,突出表现在现行规范大量篇幅用于对构件设计的定量化规定,而对结构体系的量化设计规定缺少明确要求,结构体系设计多依赖于设计人员的经验和水平。这一情况导致按现行规范设计的结构,其整体安全性能有较大

差异,突出表现在结构在极端灾害荷载下的抗倒塌能力。尽量避免由于结构倒塌而造成的人员重大伤亡,不仅是结构工程师最重要的任务,也是体现结构安全性的最重要标志。近年来,多次发生工程结构在灾害荷载下的倒塌教训,如 512 汶川地震中大量房屋建筑倒塌^[1],2003 年 113 衡阳大火造成建筑倒塌等^[2],提醒我们要重视结构体系的研究,加强结构体系的安全性设计。本文以框架结构抗震为例,通过分析结构的安全储备,以及国内外规范的有关规定,尝试提出定量化确定结构体系安全度的方法。

2 结构的安全储备

结构是一个由各种构件通过各种节点连接组成的复杂系统。根据系统论的观点,由局部单元(或

[收稿日期] 2009-06-02

[基金项目] 国家自然科学基金重大研究计划重点项目资助(90815025);国家科技支撑计划课题(2006BAJ03A02)

子系统)组成的系统,如果是一个“合理系统”,则其整体性能会优于局部单元(或子系统)性能之和,即所谓“整体大于局部之和”;如果是“不合理系统”,则其整体性能会劣于局部单元(或子系统)性能之和,即所谓“整体小于局部之和”^[3]。在以往的地震灾害中,上述情况都有明显案例。例如,林同炎设计的美洲银行大厦,由4个子筒通过连梁组成一个整体。在地震中,连梁破坏耗能,保护了核心筒剪力墙,实现大震不倒,达到了“合理系统”的“整体大于局部之和”的目标^[4]。而地震中大量出现的薄弱层破坏现象,则是“不合理系统”的典型代表,由于局部楼层的破坏导致整体结构丧失功能,那些未破坏楼层构件的安全储备没有得到有效利用,出现了“整体小于局部之和”的情况。

从上述分析可以看出,作为一个系统,结构的安全储备可分为“构件层次的安全储备”和“结构体系层次的安全储备”。

2.1 构件层次安全储备

构件层次的安全储备已经为各国工程人员所熟知,其一般性表达式为:

$$L S \leq R \left(\frac{f_M}{M} \right) \quad (1)$$

式中, S 为作用效应; L 为作用效应分项系数; R 为构件抗力函数; f_M 为材料强度; M 为材料分项系数,为构件强度折减系数(例如稳定系数等)。

L , M 和 R 共同组成了构件层次的安全储备。根据我国规范经验,由 L , M 和 R 组成构件安全储备大概在 2.6~2.8之间。

经过多年工程实践,虽然对式(1)的具体表达式(例如我国混凝土规范设计公式中一般没有直接给出,而美国ACI规范中没有直接给出 M)和具体数值(如分项系数取值大小)还存在争议,但是总体说来是可行且基本可靠的。

2.2 结构体系安全储备

结构体系是作为一个整体来抵抗各种外界作用的,安全的构件不代表安全的结构。根据以上系统整体与局部的关系,合理的结构体系,其“结构体系层次的安全储备”大于其“构件层次的安全储备”之和;而不合理的结构体系,其“结构体系层次的安全储备”取决于某些构件的安全储备,甚至取决于一些安全储备较小的构件。在极端灾害荷载下整体结构的抗倒塌能力,则是“结构体系层次安全储备”的

体现,因此可以作为评价结构体系是否合理的定量化指标。

实际上,经过多年的工程实践,目前工程界所广泛采用的主要结构形式,其整体安全性要显著高于构件的安全水平。从失效概率上来说,构件的可靠指标值在 2.7~3.2之间,即失效概率约为 3×10^{-4} ,而实际经验表明整体结构的失效概率是 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 左右^[5]。可见结构体系通过各个构件之间的共同工作,实现了比构件要高得多的安全性。

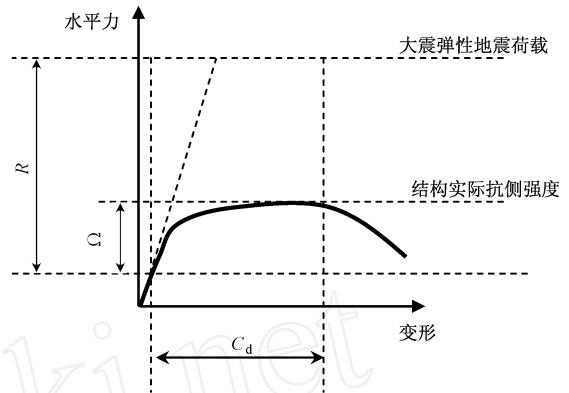


图 1 结构的承载力和变形安全储备

Fig 1 Structural strength and deformation safety margins

对于不同形式的荷载作用,结构整体安全储备也有所差别。例如,对于静载作用(如重力),则安全储备主要取决于承载力储备;而对于动载作用(如地震、冲击),则安全储备既包括承载力储备,也包括变形能力储备。而目前世界各国成功的抗震实践,就是在罕遇地震下承载力储备难以满足时,通过变形能力储备,利用延性来耗散地震输入的能量,避免了罕遇地震下结构的倒塌破坏。其基本概念如图1所示,图中曲线为结构的实际侧向承载力和变形曲线,其中, R 为强度折减系数; C_i 为超强系数; C_d 为变形能力系数,其含义介绍如下:

(1) 强度折减系数 R

由于罕遇地震作用下的弹性地震力很大,结构如照此设计,经济代价太高,故需要将结构的设计承载力适当降低,例如,我国规范所采用的小震弹性设计承载力大约是大震弹性地震力的 $1/5.7$ ^[6],也就是我国结构相当于设计大震的强度折减系数 R 大约等于 5.7。按 R 折减后的地震作用与其它荷载组合后,根据构件层次安全储备的要求,就得到构件设

计结果。

(2) 超强系数

对于设计合理的实际结构 (即整体安全性较好的“合理系统”),结构的整体抗震承载力是要高于小震弹性地震力的。这个结构实际抗侧承载力和小震弹性设计承载力之间的差别就是“超强系数”。

即为结构的承载力安全储备。通过 Pushover分析发现,常见结构的超强系数一般能达到 2.0 ~ 3.0,剪力墙结构等往往还要更高^[7]。

(3) 变形能力系数 C_d

而当遭遇更大的地震作用时,则需要通过构件的塑性变形去耗散地震能量。结构在大震下的变形能力与小震弹性设计变形之间的差别即为“变形能力系数 C_d ”, C_d 即为结构的变形安全储备。如果结构不存在超强或者强化行为,即为理想弹塑性关系,且小震设计点即为结构的实际屈服点 (这个在实际工程中是不存在的,通常结构实际屈服点要高于小震设计点),则变形能力系数 C_d 即为结构的延性系数 μ 。而变形安全储备和承载力安全储备之间的转换关系也就是所熟知的 $R-\mu$ 曲线。这也是第一代性能化抗震设计规范,如美国 FEMA-273 / 274, ATC-40 等的理论基础。

由以上所述不难看出,由于目前各国抗震规范均基于承载力设计, R 一般已经规定了,进而构件层次的承载力储备已经确定。一个优秀的结构体系设计,就是在 R 相同的情况下,使结构尽可能有效率的获得更大的 μ 和 C_d ,比如关键构件中震弹性设计 (增加 μ)或提高配箍率增加构件的延性 (增加 C_d)。

2.3 随机性对结构整体安全储备的影响

前面讨论的结构安全储备,是假定结构的承载力和变形能力都是确定的,并未考虑结构的随机性。当考虑到结构的随机性时,结构整体安全储备又有其特点。作为一个由多个具有随机性局部组成的系统,整体和局部之间的关系对系统整体性能也有着显著的影响。

以最简单的串连系统为例,其强度是由最薄弱的环节控制,如一个简单框架结构体系,就是由各楼层形成的一个串连系统,如果局部出现薄弱层破坏,则整体结构失效。其失效机制可简单表示为

$$P_{(Global)} = (P_{(Story1)} P_{(Story2)} \dots) \quad (2)$$

所以,为了使存在薄弱层的串连结构体系具有与合理的结构体系相近的破坏概率,有必要提高结

构的整体承载力或变形安全储备,如我国抗震规范 5.2.5条,5.5.2~4条^[6],即是遵循该原则。

与串连系统相对应的是并联系统,如果结构的延性良好且不同构件强度存在一定的随机差异,则并联系统的失效概率要小于串连系统,可以表示为

$$P_{(Global)} = (P_{(Element1)} + P_{(Element2)} \dots) \quad (3)$$

Whittaker等^[8]经过理论分析指出,如果两个并联构件强度完全不相关,则其一起失效的概率是单个构件的 1/1.414。与此相应,如果一个结构体系中缺少这种并联系统 (或称为冗余结构),则其失效概率就会较大,因而同样有必要提高其整体承载力或变形安全储备。美国结构设计规范 UBC^[9]的地震作用计算中,采用了一个考虑结构冗余度的系数 (Redundancy Factor),如果结构冗余度不足,则要通过提高承载力安全储备来减少结构的失效概率。

当不考虑竖向地震时,UBC规范给出的地震作用表达式为

$$E = E_h \quad (4)$$

式中, R 为冗余度系数; E_h 为由反应谱得到的水平地震作用。对于地震作用计算方向,冗余度系数的表达式为

$$R = 2 - \frac{6.1}{r_{max} \sqrt{A}} \quad (1.0 \leq R \leq 1.5) \quad (5)$$

式中: A 为楼层面积 (m^2); r_{max} 为计算方向的地震层剪力最大的构件与该方向总地震层剪力之比, r_{max} 取结构下部 2/3高度范围各层的所有各抗侧力构件的地震层剪力分担系数 r_i (i 为楼层编号)中的最大者。

如果结构中存在一个构件承担的地震层剪力比重过大,即 r_{max} 很大,或其从属楼面面积很大,则该结构的冗余度就越小,也即如果该构件一旦破坏失效,可能导致结构倒塌的范围越大,故此时冗余度系数取值也要越大,相应就提高结构的地震作用,即增加了该结构的承载力储备。而对于具有多重防线的结构体系,如双重结构体系,根据式 (5)得到的冗余度系数 (Redundancy Factor)可以乘以 0.8,以考虑多道防线对结构冗余度的贡献。为了避免跨数较少的框架结构的冗余度过低,UBC还规定延性抗弯框架结构的冗余度系数不超过 1.25 (D类场地)或 1.1 (E、F类场地),即需要增加跨数或增加柱的数量来增加结构冗余度。这表明地震作用增加最高可达 25% (D类场地)或 10% (E、F类场地)。



3 结构体系抗地震倒塌能力的评价

3.1 第一代性能化抗震设计的局限和结构倒塌储备系数

第一代性能化抗震设计规范,如 FEMA-273/274^[10]和 ATC-40^[11]等,虽然在结构性能化设计方面作出了重要的开拓作用,但是它将结构的“性能点”具体到各个构件,如某个构件在某个塑性铰转角下是“安全的”(Life Safe)或者“将倒塌”(Collapse Prevention),但是无法回答整体结构的安全水平。同样,第一代性能化设计所依赖的重要分析手段——Pushover分析,也存在着很多理论缺陷,特别是在结构接近倒塌时,Pushover近似的静力分析存在很多问题。因而性能化设计迫切需要一个更加可靠的“尺子”,用于评价结构的真实抗倒塌能力。

近年来,美国 ATC委员会组织了一系列有关倒塌储备系数(Collapse Margin Ratio,简称 CMR)的研究^[12]。所谓倒塌储备系数,就是比较结构的实际抗地震倒塌能力和设防需求之间的储备关系。这一研究是借助于近年来更强的计算机和更精确的数值模型,基于增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, DA)的倒塌模拟来获得结构抗倒塌能力评价方法。其方法是,通过输入逐步增大地震记录强度的 DA 分析,直至结构计算模型发生倒塌破坏,由此得到结构在某个地震强度输入下的倒塌模式,并用该地震强度作为结构抗地震倒塌能力的评价指标。但一次 DA 分析只针对某一个具体地震记录进行,所以地震记录的选取对计算结果至关重要。事实上,由于地震和结构的随机性,用确定性的分析结果来评价结构抗地震倒塌能力也有其缺陷。借助于现在计算机强大的分析能力,ATC-63计划建议通过大量地震记录(不少于 20条)计算,来考虑不同地震动输入的差异影响,用所有地震动输入下分析结果的平均值作为结构的抗倒塌能力评价标准。这样,当选择的地震记录足够多且地震波选择合理时,基于 DA 分析得到的倒塌率就具有足够的代表性,可以充分考虑不同地震波的峰值、频谱和持时效果及其差异的影响。ATC-63委员会推荐了相应的地震记录数据库。如果结构在某一地面运动强度下(ATC-63建议以结构第一周期地震影响系数 $S_a(T_1)$ 作为地面运动强度指标),有 50%的地震波输入发生了倒塌,则该地面运动强度就是结构体系的平均抗倒塌能力。将此地面运动强度和结构的设

计大震强度比较,就可以得到结构的倒塌储备系数 CMR,即

$$CMR = S_a(T_1)_{50\%} / S_a(T_1)_{\text{大震}} \quad (6)$$

式中, $S_a(T_1)_{50\%}$ 为有 50%地震输入出现倒塌对应的地面运动强度 $S_a(T_1)$; $S_a(T_1)_{\text{大震}}$ 为规范建议罕遇地震下的 $S_a(T_1)$,对于我国结构,可以按下式计算

$$S_a(T_1)_{\text{SED}} = (T_1)_{\text{大震}} g \quad (7)$$

其中, $(T_1)_{\text{大震}}$ 为规范规定对于周期 T_1 的罕遇地震下水平地震影响系数,可按规范表 5.1.4-1取值; g 为重力加速度。

3.2 CMR分析的应用举例

尽管 CMR分析还有着诸多问题(例如地震波输入是否具有足够代表性、动力数值模型是否足够精确合理等),但是就目前而言,该方法是获得结构抗倒塌能力评价相对最为可靠的方法。它为分析整体结构行为,判断不同结构体系的优劣,提供了一个比较可靠的“尺子”。基于 CMR分析,美国 ATC委员会已经对现行结构抗震设计进行了大量分析研究并获得了很多有益成果。例如,美国原本根据长期抗震工程实践,对延性框架结构有一个最小地震水平力要求(ASCE7-02及以前版本)。然而在 ASCE7-05规范中,将这个最小地震水平力要求取消了。ATC委员会通过 CMR分析,发现取消最小地震水平力要求会导致 8层以上延性框架的倒塌概率明显增大,传统的经验是有其内在合理性的,因而已经准备在新版的 ASCE7规范中重新恢复最小地震延性指标^[12]。并且,ATC委员会正在准备启动 ATC-76计划,以期利用 CMR分析,对现行美国规范各类结构的抗震安全性能进行更加系统的评价。

本文利用 CMR方法,也开展了一些研究。由于结构倒塌是一个非常复杂的非线性动力过程。以往受到计算手段的限制,一般以间接手段,如层间位移角超过 1/50等,来作为结构倒塌的判据,这并不科学。随着计算手段的发展,先进的结构非线性分析工具已经可以准确模拟结构倒塌的整个非线性过程,包括相应的材料非线性、几何非线性、接触非线性等。清华大学在 MSC.MARC 软件上开发的 THUFBER 系列程序,可以实现复杂钢筋混凝土结构在地震下倒塌全过程的模拟^[13~15]。图 2所示为基于 THUFBER 程序计算得到的框架结构倒塌全过程模拟。因此,本文直接以倒塌的真实物理定义“结构丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的

生存空间 作为倒塌的判据 (图 2 中 (d)),实现倒塌全过程的真实模拟。

而 8 层框架的倒塌概率接近 50% (图中竖虚线)。由于影响结构体系抗地震倒塌能力的因素很多,如

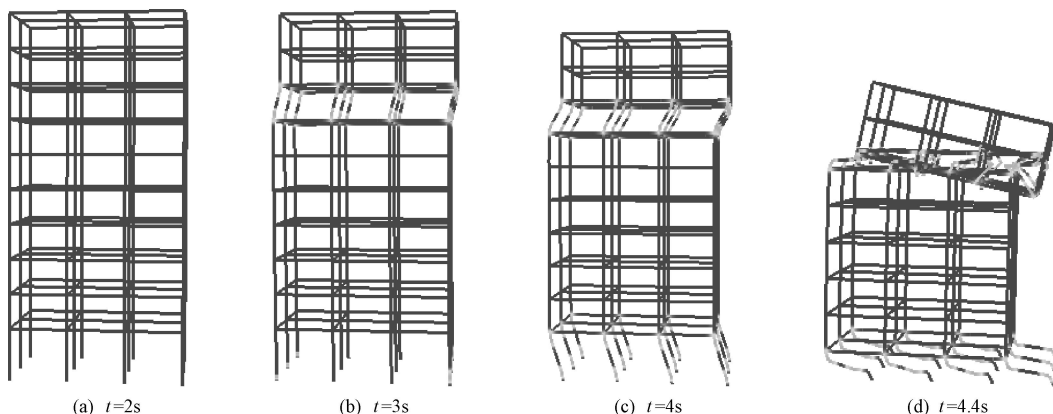


图 2 结构在不同时刻的变形 (PGA = 2000gal)
Fig 2 Deformation of structure at different time (PGA = 2000gal)

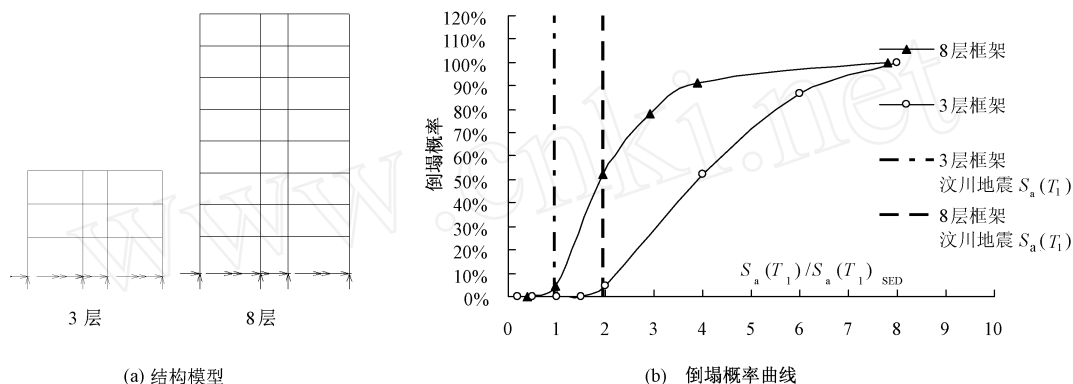


图 3 我国 7 度设防框架结构的倒塌概率
Fig 3 Collapse possibilities of frames with Design intensity VII in Chinese code

按上述方法对图 3(a)按我国规范 7 度设防设计的 3 层和 8 层框架结构进行了初步分析 (层高首层 4.2m,其他各层层高 3.6m,跨度 6m + 2.7m + 6m),得到在不同强度地面运动下的倒塌概率见图 3 (b)。从图中可见,8 层框架倒塌概率达到 50% 时的 $CMR = 1.9$,而 3 层框架的 $CMR = 3.8$,这是由于 8 层框架的层数多于 3 层框架,其抗倒塌能力也就相对较差。由此可见,虽然同样是按照现行规范设计的结构,由于结构体系安全性的差异,其抗地震倒塌能力有显著差别。需要说明的是,这两个框架在设计大震下倒塌概率都小于 5%,可以认为能达到“大震不倒”的安全要求,但如果遭遇类似汶川的巨震,则 8 层框架更容易倒塌。为此,本文用汶川地震中什邡 - 八角地震记录 NS 波也进行了分析,结果是,3 层框架的倒塌概率几乎为 0 (图中竖点划线),

结构跨数增加,冗余度增加,其 CMR 会增大;又如,框架结构因填充墙合理设置,提高了结构体系的承载力储备,其 CMR 也会增大,这些情况在汶川地震震害中都有所体现。由于涉及的分析工作量很大,有关问题有待今后进一步研究。

4 结语

汶川地震后,工程界和研究界对超过设防水准的“巨震”日益给予重视,而无论是“大震”还是“巨震”,通过大幅度提高构件强度来提高结构安全性势必会导致造价的显著提高,对于我国这样一个发展中国家也是不适宜的。因此开展结构整体安全性研究,充分利用结构的整体安全储备来减少巨震下结构倒塌导致的人员伤亡,具有非常重要的现实意义。

本文讨论了结构的安全储备,指出结构的安全

储备包括构件层次安全储备和结构体系层次安全储备。而整体结构层次安全储备对经济合理的抗震设计具有极其重要的意义。基于 DA 的倒塌储备系数分析,为研究地震灾害下结构的整体安全储备提供了一个重要的依据。通过分析不同结构的整体安全储备,进而对整体安全性显著不足的结构采取适当的改进,可以非常有效的提高结构在极端灾害下的安全水平,这是今后结构工程和防灾减灾研究的一个重要方向。

参考文献 (References):

- [1] 清华大学土木结构组,西南交通大学土木结构组,北京交通大学土木结构组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1~9
Civil and structural groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University Analysis on building seismic damage in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1~9 (in China)
- [2] 江见鲸,等.防灾减灾工程学[M].北京:机械工业出版社,2005
Jiang J J. et al Disaster prevention and mitigation engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2005 (in China)
- [3] 叶列平,曲哲,陆新征,冯鹏.提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J].建筑结构学报,2008,29(4):42~50
Ye Lie-ping, Qu Zhe, Lu Xin-zheng, Feng Peng Collapse prevention of building structures: a lesson from the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42~50 (in Chinese)
- [4] 林同炎, S. D. 斯多蒂斯伯利著.结构概念和体系(高立人,方鄂华,钱稼茹译)[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.第二版
Lin Tong-yan Stotesbury S. D. Structural concepts and systems for architects and engineers (Translated by Gao L R, Fang E H and Qian J R) [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (2nd Edition) (in Chinese)
- [5] 秦权,林道锦,梅刚.结构可靠度随机有限元——理论及工程应用[M].北京:清华大学出版社,2006
Qin Quan, Lin Dao-jin, Mei Gang Reliability stochastic finite element methods: theory and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006 (in Chinese)
- [6] GB50011-2001,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2001
GB50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001 (in Chinese)
- [7] 叶列平,陆新征,马千里,程光煜,宋世研,缪志伟,潘鹏.屈服后刚度对建筑结构地震响应影响的研究[J].建筑结构学报,2009,(2):17~29
Ye Lie-ping, Lu Xin-zheng, Ma Qian-li, Cheng Guang-yu, Song Shi-yan, Miao Zhi-wei, Pan Peng Influence of post-yielding stiffness to seismic response of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 17 - 29 (in Chinese)
- [8] Whittaker A, Hart G, Rojahn C. Seismic response modification factors [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(4): 438~444
- [9] UBC, International Conference of Building Officials, Uniform building code[S]. Whittier, Calif, 1997
- [10] FEMA273, FEMA274, FEMA356, NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings[S]
- [11] Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1996 Applied Technology Council, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[S]. ATC-40, 1996
- [12] Quantification of building seismic performance factors, ATC-63 Project Report (90% Draft) [R]. FEMA P695 / April 2008
- [13] 汪训流,陆新征,叶列平.往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J].工程力学,2007,24(12):76~81
Wang Xun-liu, Lu Xin-zheng, Ye Lei-ping Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads[J], Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76~81 (in Chinese)
- [14] 叶列平,陆新征,马千里,汪训流,缪志伟.混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J].工程力学,2006,23(sup. II):131~140
Ye Lie-ping, Lu Xin-zheng, Ma Qian-li, Wang Xun-liu, Miao Zhi-wei Seismic nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(sup. II): 131~140 (in Chinese)
- [15] Lu X Z, Lin X C, Ma Y h, Li Y, Ye L P. Numerical simulation for the progressive collapse of concrete building due to earthquake [A]. Proc the 14th World Conference on Earthquake Engineering [C]. October 12 - 17, 2008, Beijing, China, CDROM