

文章编号: 1000 - 1301(2012)04 - 0001 - 06

基于推覆分析的 RC 框架地震倒塌易损性预测

陆新征, 张万开, 柳国环

(清华大学 土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于倒塌率的结构倒塌易损性分析是目前评价结构抗倒塌能力最合理的方法。但是, 目前基于增量动力分析 (IDA) 的倒塌率分析方法, 工作量和实施难度大, 很难直接用于工程设计, 因此有必要研究便于工程应用的新方法。本文基于 18 个典型多层 RC 框架结构的 IDA 倒塌率分析和静力推覆分析, 发现 RC 框架在大震下的倒塌率及抗倒塌安全储备 (CMR) 与静力推覆得到的结构位移安全储备之间存在较好的相关关系。依据此关系, 建议了保证大震倒塌率的推覆位移安全储备, 并通过 9 个 RC 框架结构算例进行了验证。本文方法简单易行, 可供规则多层 RC 框架结构抗倒塌设计参考。

关键词: 静力推覆分析; 地震倒塌易损性; IDA; 倒塌率; 位移安全储备

中图分类号: P315.9; TU375.4 **文献标志码:** A

Prediction of seismic collapse vulnerability of RC frame based on pushover analysis method

LU Xinzhen, ZHANG Wankai, LIU Guohuan

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

Abstract: The collapse-vulnerability analysis based on collapse probability is the most reasonable method to evaluate the collapse resistant capacity of structures. However, currently collapse probability analysis is mostly based on incremental dynamic analysis (IDA), which is difficult to be directly used for engineering design due to relatively heavy workload and complicated procedure. Therefore, it is necessary to develop a new method, which is convenient for engineering application. In this paper, 18 RC frames are analyzed respectively by using pushover analysis and IDA. Then, the correlation between the results of pushover and those of IDA are studied. The results show that there are fairly good correlated relations between the collapse margin ratio (CMR), the collapse probability under maximal considered earthquake (MCE) and the displacement margin ratio from pushover analysis. Based on these relations, the design displacement margin ratio of pushover analysis to meet the requirement of the collapse probability under MCE is recommended. Nine additional RC frames are used to validate the proposed displacement margin ratio, which shows this method is easy to use and can provide reference for engineering design of regular multi-story RC frame.

Key words: pushover analysis; seismic collapse vulnerability; IDA; collapse probability; margin ratio

收稿日期: 2011 - 12 - 15; 修订日期: 2012 - 02 - 07

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目 (2012BAJ07B012); 国家自然科学基金项目 (90815025, 51178249); “教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET - 10 - 0528)

作者简介: 陆新征 (1978 -), 男, 副教授, 主要从事防灾减灾和非线性计算. E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn

引言

建筑物在强震下的倒塌破坏是造成人员伤亡和财产损失的主要原因。因此保证强震作用下建筑结构的抗倒塌能力,是建筑抗震设计的核心目标。由于强震下结构的倒塌破坏机制和抗倒塌能力受地震动参数(峰值、频谱、持时等)和结构体系与结构形式的影响,因此目前强震作用下结构抗倒塌能力评价最为合理的方法是基于弹塑性时程分析的倒塌易损性分析方法。该方法采用增量动力弹塑性时程分析方法(Incremental Dynamic Analysis, IDA)^[1]获得在不同地震强度下的结构倒塌率,作为结构抗倒塌能力的评价依据。目前,国内外研究者已基于 IDA 方法对结构的倒塌易损性进行了大量的研究^[1-5],为探求结构的倒塌原因,改进结构抗震设计方法提供了重要参考。

IDA 方法虽然准确可靠,但存在计算量大、地震动记录选取对分析结果影响大、不便于工程应用等问题。而静力推覆分析(Pushover Analysis)因操作简单、且可以较好地描述整体结构的非线性特征,对于规则的中低层结构有较好的适用性,目前已在工程界得到大量应用。本文基于 18 个典型多层 RC 框架结构,分别采用 IDA 倒塌率分析和静力推覆分析,研究其倒塌率及抗倒塌安全储备指标(CMR)与静力推覆分析得到的结构位移安全储备之间的相关关系,进而依据此关系可利用静力推覆分析结果来评价结构的抗地震倒塌能力,可供规则多层 RC 框架结构抗地震倒塌设计参考。

1 RC 框架分析对象

采用 PKPM 软件设计了 18 个不同结构参数的 RC 框架结构作为分析对象,各框架的场地类别为 II 类场地,设计地震分组为第 2 组,建筑类别为丙类,设防烈度为 7 度,层数分别为 6 层、9 层、12 层。框架各跨跨度相等,纵向柱距均为 6 m,横向跨度分为 4 m、6 m、8 m 三种,各层层高相等,层高分 2.8 m 和 3.6 m 两种。梁柱纵筋为 HRB335 级,箍筋为 HPB235 级。楼面、屋面恒载均取为 7 kN/m²(含楼板自重),活载为 2 kN/m²。详细结构参数见文献[7]。取出典型单榀平面框架作为分析对象,采用清华大学开发的基于通用有限元软件 MSC. MARC 的 THUFIBER 程序^[5]建立分析模型。关于 THUFIBER 程序的详细介绍和验证参见文献[5]。

2 IDA 倒塌易损性分析

2.1 地震动记录的选取

本文 IDA 倒塌易损性分析采用的地震动输入为美国 FEMA - P695^[4]建议的 22 条远场地震动记录,再加上国内常用的 El Centro 记录,共 23 条。

2.2 倒塌判断准则和倒塌率

由于本文以倒塌概率作为不同结构在同一地震强度下抗倒塌能力的比较标准,因此需要一个倒塌判别准则。基于 THUFIBER 程序优异的非线性计算能力,本文直接以“结构楼层丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的生存空间”^[5]作为结构倒塌的判据。在程序计算时,取结构主要构件竖向坠落位移超过 1m 作为倒塌判据。

将上述地震动记录逐个输入到上一节的各个框架模型上,并逐步增大地震动强度 IM (Intensity Measure),直至结构发生倒塌,得到结构的地震动倒塌易损性曲线。根据文献[4, 5]的研究,本文采用第一周期谱加速度 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标。

除通过倒塌易损性曲线定量评价结构的抗倒塌能力外,美国 FEMA - 695^[4]还建议采用倒塌储备安全系数(Collapse Margin Ratio, CMR)作为结构抗倒塌能力评价的定量指标,其定义为:

$$CMR = I_{M50\%} / I_{MMCE} \quad (1)$$

式中 $I_{M50\%}$ 为倒塌率为 50% 时对应的地面运动强度,即如果在某一地震动强度下,有 50% 的地震动输入导致结构倒塌,则该地震动强度(记为 $I_{M50\%}$)就是结构的平均抗倒塌能力; I_{MMCE} 为规范建议罕遇地震下的地震动强度(MCE: Maximal Considered Earthquake, 设计大震)。CMR 值越大,表示结构抗倒塌的储备越高,即抗倒塌能力越大。

2.3 IDA 分析得到的大震倒塌率和 CMR

基于 IDA 倒塌率分析得到 RC 框架算例在罕遇地震下的倒塌率及 CMR 分析结果见表 1。从表中结果可以看出, 跨度较大的结构抗倒塌能力相对较弱。

尽管 IDA 方法可以较为准确地得到结构的抗倒塌能力, 但是计算过程较为复杂, 不便于工程大量推广。故需要研究更加简便的预测结构抗倒塌能力的方法, 如静力推覆方法等。

表 1 各框架的计算结果

Table 1 Computational results of different frames

编号	CMR	设计大震倒塌率 (%)	S_{d0} (mm)	S_{du} (mm)	$K_d = S_{du} / S_{d0}$
2.8_6_4	2.200	6	69.73	133.00	1.910
2.8_6_6	1.600	19	93.31	110.00	1.180
2.8_6_8	1.000	48	120.00*	83.00	0.700*
3.6_6_4	4.800	0	110.74	320.00	2.890
3.6_6_6	2.700	2	146.47	230.00	1.570
3.6_6_8	1.500	19	150.00*	143.00	0.950*
2.8_9_4	2.600	0	128.04	187.00	1.460
2.8_9_6	1.800	8	165.00*	164.00	0.990*
2.8_9_8	2.000	16	161.52	172.00	1.060
3.6_9_4	4.200	2	189.93	358.00	1.880
3.6_9_6	2.200	4	261.53	295.00	1.130
3.6_9_8	1.700	15	238.76	295.00	1.240
2.8_12_4	3.100	4	199.81	280.00	1.400
2.8_12_6	1.600	9	290.00*	262.00	0.900*
2.8_12_8	1.400	21	266.91	271.00	1.020
3.6_12_4	3.100	0	352.11	532.00	1.510
3.6_12_6	1.900	5	530.00*	480.00	0.910*
3.6_12_8	1.500	6	419.08	454.00	1.080

注: 表中加“*”号的数值表示结构能力谱曲线与需求谱无交点, 根据能力谱曲线估计得到性能点位移值。

3 静力推覆分析

3.1 推覆侧力模式和算法

对于地震作用下结构振动以第一振型占主导的规则结构, 静力弹塑性推覆分析的侧力模式可近似按结构一阶振型确定。本文研究中的 18 个 RC 框架结构均为这类结构, 因此其侧力模式采用美国 FEMA-356^[6] 建议的第一组侧力模式中的倒三角模式。

文献 [8] 提出的多点位移控制推覆分析计算方法能够获取结构从弹性阶段到完全失去水平承载力 (倒塌) 的全过程, 可获得整体结构的完整性能曲线, 故本文采用该方法进行推覆分析。

3.2 能力谱和需求谱

本文采用 ATC-40^[9] 建议的能力谱-需求谱法确定结构的大震性能点。能力谱 S_a-S_d 曲线由推覆分析得到的结构基底剪力 V_b 与结构顶点位移 u^{roof} 关系曲线转换得到。需求谱则由我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) (简称《抗规》)^[10] 反应谱曲线确定。但是, 我国《抗规》反应谱在结构周期 $T > 5T_g$ 时反应谱按直线下降, 使得需求谱在长周期段偏高较多, 可能会造成与能力谱没有交点的问题。因此, 本文参考美国、日本等国外反应谱曲线, 在 $T > 5T_g$ 时反应谱仍采用 $(T_g/T)^\gamma$ 的指数形式下降。以这样改造过的我国规范反应谱作为弹性需求谱。

结构进入塑性后, 按照 ATC-40^[9] 建议的方法计算结构的总阻尼比, 然后按照我国规范建议, 以此结构总阻尼比修正弹性需求谱得到弹塑性需求谱 (见图 1)。

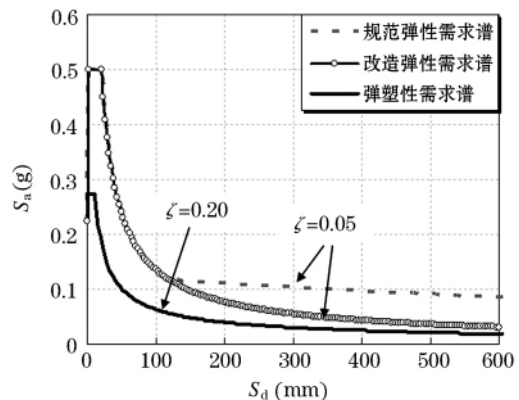


图 1 规范弹性谱、改造弹性谱和弹塑性谱
Fig. 1 Code elastic response spectrum, modified elastic response spectrum and elastic-plastic response spectrum

3.3 推覆分析结果

推覆分析得到的典型结构能力曲线如图2所示。图中 S_{d0} 表示能力谱法得到的性能点位移, S_{du} 表示由多点位移控制推覆分析得到的能力谱曲线的极限点位移(抗侧承载力降低至小于峰值承载力的85%)。各算例性能点和极限点对应的最大层间位移角情况如表1所示。

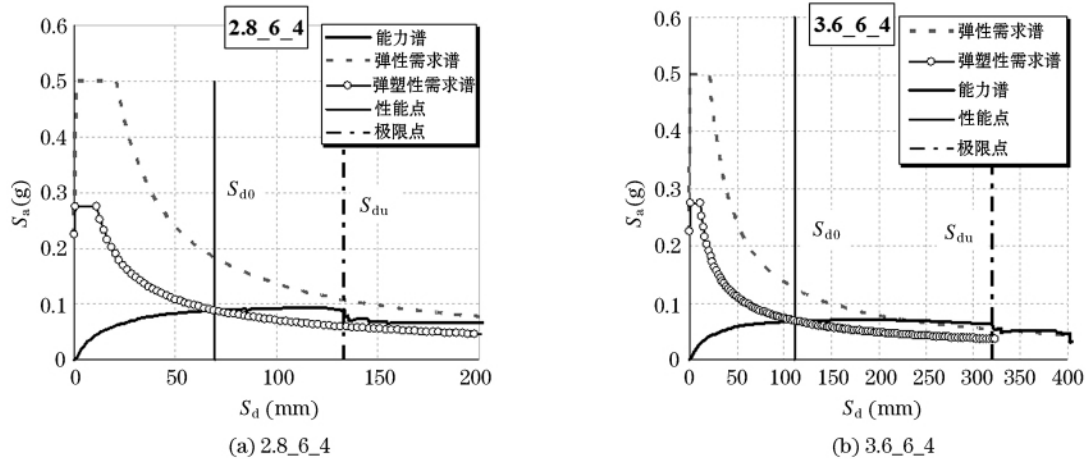


图2 典型推覆计算曲线

Fig. 2 Typical pushover analysis curves

定义极限点位移 S_{du} 与性能点位移 S_{d0} 的比值称为位移安全储备 K_d ,即 $K_d = S_{du} / S_{d0}$ 。按上述方法分析得到各算例结构的 K_d 如表1所示。

4 位移安全储备与 IDA 结果的关系

4.1 CMR 与位移安全储备的关系

以 IDA 分析得到的抗倒塌安全储备指标 CMR 值为纵坐标,以静力弹塑性分析得到的位移安全储备 K_d 为横坐标绘制图表,可以得到 CMR 与位移安全储备 K_d 之间的关系如图3所示。从图中可见,CMR 与位移安全储备有一定的相关性,即结构位移安全储备 K_d 越大,则结构抗倒塌安全储备指标 CMR 也越大,二者可以回归出一条直线。

4.2 设计大震下倒塌率和位移安全储备的关系

以 IDA 分析得到的设计大震下倒塌率为纵坐标,以静力弹塑性分析得到的位移安全储备 K_d 为横坐标绘制图表,得到设计大震下结构的倒塌率与位移安全储备之间的关系如图4所示。从图中可见,设计大震下结构的倒塌率与位移安全储备有一定相关性。根据边界条件:取极端情况,当位移安全储备为0时倒塌率为100%,位移安全储备为无穷大时倒塌率为零,可回归出一条指数曲线。考虑到结构倒塌分析的离散性,分别回归出设计大震下倒塌率和安全储备之间的上包线、中值线和95%保证率线,得到的公式如式(2)~式(4):

$$\text{中值线: } P_{\text{collapse|MCE}} = e^{-1.95K_d} \quad (2)$$

$$95\% \text{ 保证率线: } P_{\text{collapse|MCE}} = e^{-1.04K_d} \quad (3)$$

$$\text{上包线: } P_{\text{collapse|MCE}} = e^{-0.95K_d} \quad (4)$$

4.3 RC 框架结构保证大震倒塌率的位移安全储备

由图4可知,RC 框架结构在设计大震下的倒塌率与结构位移安全储备有一定的关系,故建议可采用多点位移控制推覆分析和能力谱法得到的位移安全储备来估算结构在大震下的倒塌率,如表2所示。例如,当

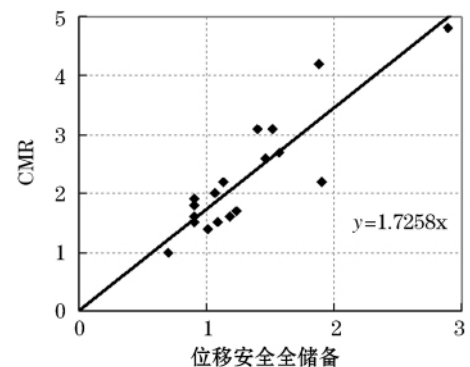


图3 CMR 与位移安全储备的关系曲线

Fig. 3 Relation curves between CMR and displacement margin ratio

要求结构大震倒塌率不大于 5% 时, 则基于多点位移控制推覆分析得到的极限点位移与能力谱法得到的性能点的位移比不得小于 1.53(取中值) 或 2.12(取 95% 保证率)。这样就可以很容易通过基于多点位移控制静力推覆分析和能力谱法来实现定量化的抗倒塌设计。

表 2 建议的相应于设计大震倒塌率的位移安全储备

Table 2 Displacement margin ratio corresponding to the collapse probability under the maximal considered earthquake

设计大震 下倒塌率(%)	位移安全 储备中值	位移安全储备 95% 保证率值	位移安全 储备上限值
0.50	2.72	3.76	4.07
1.00	2.36	3.27	3.54
5.00	1.53	2.12	2.30
10.00	1.18	1.63	1.77

为了验证本文方法的合理性, 运用该方法对文献 [11]、文献 [12] 中设计的 RC 框架结构进行了验证计算。文献 [11] 基于 IDA 方法给出了设防烈度分别为 7 度、7.5 度、8 度的 3 个 6 层 RC 框架办公楼的倒塌易损性分析结果, 文献 [12] 基于 IDA 方法给出了 6 个设防烈度分别为 7 度、7.5 度、8 度的乙类和丙类建筑的 5 层 RC 框架结构的倒塌易损性分析结果。对这些框架按本文建议方法计算了设计大震下的倒塌率, 并与文献 [11, 12] 的倒塌率分析结果进行对比, 如图 4 和表 3 所示。由图 4 和表 3 可知, IDA 方法得到的大震倒塌率与本文建议方法估算得到的大震倒塌率中值大致相近, 且均位于 95% 包络线之内, 说明了本文方法的合理性。

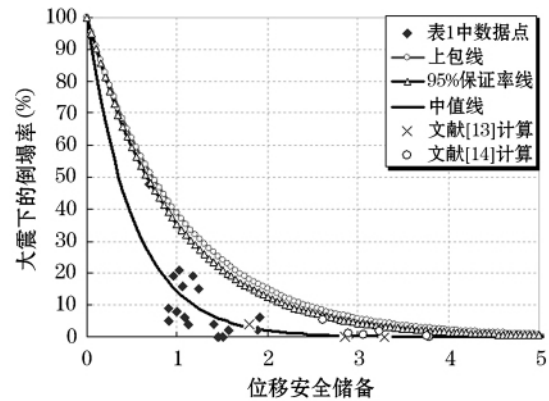


图 4 设计大震下倒塌率和位移安全储备之间的关系及验证计算

Fig. 4 Relation curves between the collapse probability under design large earthquake and the displacement margin ratio and validation of proposed method

表 3 验证计算结果

Table 3 Validation of proposed method

框架编号	设防 烈度(度)	S_{d0} (mm)	S_{du} (mm)	K_d	IDA 方法 倒塌率(%)	中值公式(2) 计算结果(%)	95% 保证率公式 (3) 计算结果(%)	上包线公式 (4) 计算结果(%)
SF1-7 ^[11]	7	175.7	316.3	1.80	4.00	2.99	7.90	9.63
SF1-7.5 ^[11]	7.5	217.0	715.0	3.29	0.00	0.16	0.97	1.38
SF1-8 ^[11]	8	269.2	770.3	2.86	0.00	0.38	1.77	2.43
7B ^[12]	7	79.83	302.31	3.79	0.10	0.06	1.95	2.74
7C ^[12]	7	87.19	252.06	2.89	1.03	0.36	4.95	6.42
7.5B ^[12]	7.5	99.90	315.82	3.16	0.89%	0.21%	3.73%	4.96
7.5C ^[12]	7.5	118.10	276.87	2.34	5.34	1.03	8.73	10.78
8B ^[12]	8	99.62	375.26	3.77	0.38	0.06	1.99	2.79
8C ^[12]	8	100.89	327.20	3.24	1.89	0.18	3.43	4.59

5 结语

为了便于工程应用, 本文提出了基于静力弹塑性分析预测 RC 框架地震易损性的思路 and 具体方案。以 18 个不同结构尺寸的 RC 框架为研究对象, 将静力弹塑性分析结果与 IDA 分析得到的 CMR 结果和设计大震下的倒塌率进行了对比。研究表明: RC 框架的 CMR 值和设计大震下的倒塌率与推覆分析的位移安全储备和能量安全储备之间存在着一定的相关关系, 通过数据回归分析可得到由位移安全储备估计地震倒塌率的计算公式。最后, 建议了通过控制结构推覆位移储备以满足结构设计大震下倒塌率要求的方法。本文提出的基于静力推覆分析预测 RC 框架倒塌易损性的方法简单、易行, 便于工程人员参考和应用。

需要说明的是, 本文采用位移安全储备来近似估计大震倒塌率, 该方法适用于推覆曲线无显著强化的 RC 框架结构, 对于推覆曲线有强化的 RC 框架-剪力墙结构和 RC 剪力墙结构, 本文方法偏于保守。另外,

本文仅研究了12层(含)以下的规则框架结构。超过12层时可能由于高阶振型参与较多,Pushover方法的实用性有待进一步检验。

参考文献:

- [1] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 2002, 31(3): 491-514.
- [2] 陆新征,叶列平. 基于IDA分析的结构抗地震倒塌能力研究[J]. *工程抗震与加固改造* 2010, 32(1): 13-18.
LU Xinzheng, YE Lieping. Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2010, 32(1): 13-18. (in Chinese)
- [3] 吕大刚,于晓辉,王光远. 基于单地震动记录IDA方法的结构倒塌分析[J]. *地震工程与工程振动* 2009, 29(6): 33-38.
LU Dagang, YU Xiaohui, WANG Guangyuan. Structural collapse analysis based on singlerecord IDA method [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6): 33-38. (in Chinese)
- [4] FEMA-P695. Quantification of Building Seismic Performance Factors [S].
- [5] 陆新征,叶列平,缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 37-104, 143-162, 271-283.
LU Xinzheng, YE Lieping, MIAO Zhiwei. *Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 37-104, 143-162, 271-283. (in Chinese)
- [6] FEMA-356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings [S].
- [7] 唐代远,陆新征,叶列平等. 柱轴压比对我国RC框架结构抗地震倒塌能力的影响[J]. *工程抗震与加固改造* 2010, 32(5): 26-35.
TANG Daiyuan, LU Xinzheng, YE Lieping, et al. Influence of axial compression ratio to the seismic collapse resistance of RC frame structures [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2010, 32(5): 26-35. (in Chinese)
- [8] 黄羽立,陆新征,叶列平等. 基于多点位移控制的推覆分析算法[J]. *工程力学* 2011, 28(2): 18-23.
HUANG Yuli, LU Xinzheng, YE Lieping, et al. A pushover analysis algorithm based on multiple point constraints [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(2): 18-23. (in Chinese)
- [9] ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building [S].
- [10] GB50011-2010 建筑抗震设计规范 [S].
GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings [S]. (in Chinese)
- [11] 施炜,叶列平,陆新征等. 不同抗震设防RC框架结构抗倒塌能力的研究[J]. *工程力学* 2011, 28(3): 41-48.
SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzheng, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 41-48. (in Chinese)
- [12] Tang B X, Lu X Z, Ye L P, et al. Evaluation of collapse resistance of RC frame structures for Chinese schools in seismic design categories B and C [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 10(3): 369-377.