

地震地面运动特性对结构地震需求的影响研究现状*

陈亮¹, 章劲松²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽交通职业技术学院 土木工程系, 合肥 230051)

摘要: 在结构抗震设计和分析中, 地震地面运动特性(用幅值、频谱特性和持时表示)的变异性对于结构地震需求的影响最大。震害经验表明, 各类结构的震害均表现为这三个基本要素综合影响的结果。因此, 从地震工程学和结构抗震两个方面, 对国内外结构地震需求分析研究现状进行了较为全面的论述, 包括分析方法、研究内容、影响因素等, 重点论述了地面运动三要素对结构地震需求的影响, 提出了存在的问题和今后尚需开展的研究工作。

关键词: 桥梁工程; 基于性能的地震工程学; 地震需求; 地面运动强度参数; 频谱特性; 持时

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2011)01-0075-06

0 引言

在结构抗震设计和分析中, 需要预计在工程场地处的特定地震灾害环境下, 待建或已建结构可能遭受到的最大地震反应以及相应的破坏规律, 并将这种预计结果进行量化。在这个过程中, 有很多不确定因素会对预计结果产生影响, 对这些不确定因素需要认真考虑并尽量减小其对结构地震需求预计的影响, 从而提高精确性和计算效率。而且, 在基于性能的地震工程学(Performance-Based Earthquake Engineering, 简称PBEE)中, 一个重要任务就是处理在这个过程中每一步所出现的不确定因素, 而这些不确定因素均可视为随机变量, 只有这样才能更加准确地预计结构的概率地震需求和破坏规律, 如易损性曲线等。在各种不确定因素中, 地震地面运动特性的变异性对于结构地震需求的影响最大(Lee, Mosalam, 2006)。地震地面运动特性主要可以用幅值、频谱特性和持时三个基本要素来表示。震害经验表明, 各类结构的震害表现是这三个基本要素综合影响的结果(解丽等, 2008)。

1 对于结构地震需求的预计研究

在结构抗震研究中, 已有大量结果(Muto,

1960; Sozen, 1980; Moehle, 1992)表明, 当结构屈服并进入非线性阶段时, 结构的破坏更直接地与变形有关而不是与侧向力的水平有关; 大量试验研究结果(Krawinkler, Zohrei, 1983; Chai *et al*, 1995; El-Bahy *et al*, 1999)表明, 采用累积破坏参数和能量参数来预计结构的地震需求和能力更为合理, 它们能够对可能的破坏水平提供更好的指示作用。因此, 对于结构地震需求的定义主要为结构在地震作用下的力、位移和滞回耗能等。近年来, 随着基于性能的地震工程学(PBEE)和抗震设计理论(Performance-Based Seismic Design, 简称PBSD)的出现以及不断发展, 概率理论被引入到地震需求预计中, 其中以美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, 简称PEER)的研究最为详细。例如Mackie和Stojadinovic(2003, 2004)详细研究了在基于性能的抗震设计中如何对地震需求进行预计以及基于性能的地震工程学的应用, 包括地震危险性分析和概率地震需求分析, 并将此方法运用于美国加利福尼亚州高速公路高架桥的抗震研究中。PEER基于性能的地震工程学理论框架见图1。

PEER基于性能的地震工程学分析由4个性质不同却相互联系的阶段组成: ①地震危险性分析(Hazard analysis)——用来描述工程场地的地震活

* 收稿日期: 2010-03-16.

基金项目: 安徽省交通科技进步计划项目(200907001)资助.

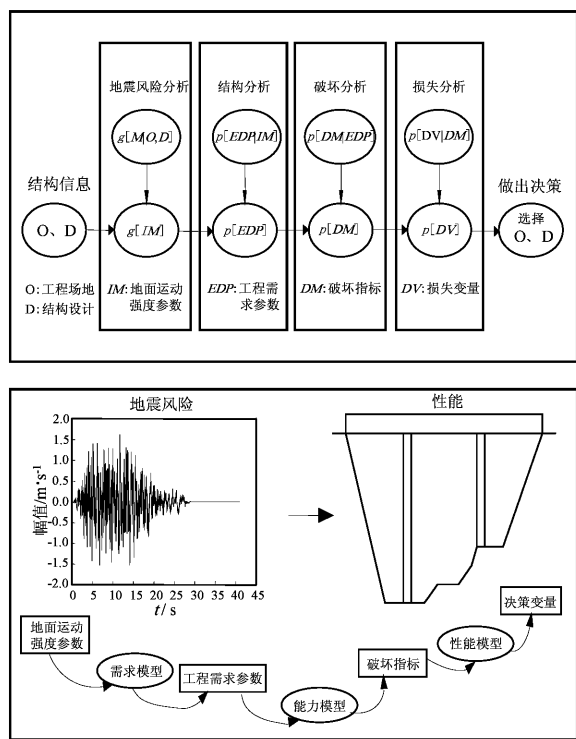


图1 基于性能的地震工程学 (PEER) 理论框架

Fig. 1 PEER performance-based earthquake engineering framework

动性；② 工程模型的结构分析 (Structural analysis) ——用来获取所需要的结构地震反应参数；③ 破坏分析 (Damage analysis) ——将结构分析中所获取的反应参数转化为结构的物理破坏状态；④ 损失分析 (Loss analysis) ——将破坏状态与结构的性能参数结合起来。其中，第一个阶段主要运用地震工程学理论来预计工程场地未来的地震危险性，第二个阶段需要通过结构动力分析对结构地震需求进行概率预计。动力分析中通过对强震地面运动记录的选择将前两个分析阶段有机地联系起来。

除了太平洋地震工程研究中心，其它国家的学者也在积极开展相关研究工作：Hesameddin 和 Eduardo (2005) 通过研究提出了可以考虑到地面运动特性中不确定性的基于概率的地震反应分析方法；Cornell 等 (2002) 详细阐述了 PBEE 的概率基础；Dimitrios 和 Cornell (2002, 2004) 将增量动力分析 (Incremental Dynamic Analysis, 简称 IDA) 分析用于预计结构的地震需求，并提出了可以考虑到倒塌的结构地震需求分析方法；Mackie 和 Stojadinovic (2002a, 2002b) 采用概率地震需求

分析 (probabilistic seismic demand analysis, 简称 PSDA) 来预计结构地震需求，并将 PSDA 和 IDA 分析两种方法进行了对比分析。Shome 等 (1997, 1998, 1999) 研究发现结构地震需求是服从对数正态分布的。

在结构地震需求预计中，有很多不确定因素会对预计结果产生影响。Hesameddin 等 (2005) 研究了未来地面运动特性中的不确定性对于结构地震反应预计的影响；Lee 和 Mosalam (2006)、Kwon 和 Elnashai (2006) 通过大量试验和计算分析得出结论：在所有的不确定性因素中，地面运动的不确定性对于结构地震需求的影响最大。美国 Stanford 大学的 Blume 地震工程研究中心一直致力于地面运动特性对于结构地震反应影响的研究，并涌现出了大批知名学者如 Shome、Deierlein、Krawinkler 等。Shome 等 (1998) 和 Baker (2005) 研究发现震级 M 和距离 R 对结构地震需求的影响较小，而对地面运动特性的影响很大，这就要求在预计结构地震需求时要选择合理的输入地面运动；Lervolino 和 Cornell (2005) 研究发现在结构非线性地震反应分析中，地面运动记录并不需要严格按照震级和距离来选择；Bolt (2004) 认为在结构非线性动力分析中，对于地震需求的预计应该更多地考虑到输入地面运动的特性；Jalayer (2003) 研究发现地面运动记录的选择对于非线性动力分析的正确性有显著影响；Bozorgnia 等 (2007) 对高层建筑结构地震分析中输入地面运动的选择、修正和模拟给出了建议；Praveen 和 Malhotra (2003) 通过研究提出了利用修正反应谱的方法为特定场地的动力反应分析选择并修正输入地面运动。PEER 和 Blume 两大地震工程研究中心的研究相得益彰，将地震工程学与结构抗震有机地联系在一起。

2 地面运动强度参数 (IM) 的选择

在结构抗震设计和分析以及 PBEE 和 PBSA 中，我们必须要将地面运动强度水平作为一个参数进行量化，来描述工程场地的地震活动性，地震动幅值就是地面运动强度参数 (IM) 最直接的选择之一。一个合理的 IM 必须能够将地面运动强度水平与结构地震反应水平联系起来，特定的结

构地震反应水平需要对应着特定的地面运动强度水平,否则这个 IM 就是不合理的或需要改进。选择合理的 IM ,对于在特定地震灾害环境下的工程场地,预计结构可能遭受的峰值反应、破坏规律以及对于 PBEE 和 PBSB 都是十分重要的。但面对几十种不同定义的地震动幅值,选择哪一个参数比较合理又成了一个非常棘手的问题。

Krawinkler 等 (2003) 研究了规则框架结构的位移和延性需求对于地面运动的依赖性,并建立了这些需求参数与 IM 之间的统计关系。Bommer 等 (2004) 通过研究发现 Arias 强度和结构基本周期处的谱加速度对于圬工结构的破坏可以起到很好的指示作用。Mackie 和 Stojadinovic (2003) 对比了 23 个可以为高速公路桥梁建立概率地震需求模型的 IM ,发现在桥梁结构基本周期处的谱值如谱加速度、谱位移等是最合适的 IM ,因为它们可以有效地减小地面运动不确定性的影响。在考虑采用什么样的 IM 时,还必须注意地面运动危险性水平的可计算性问题,即进行概率地震危险性分析及其降解过程并建立地面运动危险性曲线的难度水平 (Jamie *et al.*, 2008)。

此外,还有很多学者提出了许多不同性质和类型的 IM ,但大多数都是针对建筑结构、框架结构等,针对桥梁结构的 IM 研究很少。例如,Appliel Technology Council (1985) 选择修正的 Mercalli 强度作为 IM ; FEMA (1997) 在 HAZUS 的风险预计软件包中采用峰值地面运动加速度 PGA 和峰值地面位移 PGD 作为 IM ,最新版本的 HAZUS 则采用周期为 1 s 处的谱加速度和 PGD 作为 IM (FEMA, 2003); Shome 等人 (1998) 研究发现,采用结构基本周期的谱加速度作为 IM 比 PGA 更加有效。最近,一些更加复杂的多参数和向量 IM 相继被提出,如考虑多个关键周期谱加速度组合的多参数 IM (Cordova *et al.*, 2000; Luco, Cornell, 2007)、考虑谱加速度和谱形参数的标量和向量 IM (Baker, 2005)、考虑非线性谱位移和谱形参数的标量和向量 IM 等 (Tothong *et al.*, 2006)。还有一些学者提出用 IM 即可将地面运动危险性与结构地震反应联系起来 (Han *et al.*, 1997; Bazzurro *et al.*, 1998; Jalayer *et al.*, 2004),但对于全概率方法,不使用 IM 就意味着在分析中需要更多的地面运动记录和结构分析。因此,采用哪种 IM 更为合理仍

然是一个存在争议的问题。

3 频谱特性对于结构地震反应的影响研究

在地震地面运动的三个主要特性中,频谱特性对于结构地震反应和概率地震需求影响的研究以及相关文献很少,且大部分集中于谱匹配技术或谱匹配的人工波对于结构地震反应的影响。Hancock 和 Bommer (2007) 采用谱匹配技术将一组实际地震波与某一平滑谱进行匹配来分析强地震动持时对于结构非弹性地震反应的影响。Naeim (1995) 通过对比分析谱匹配的人工波与经调幅后和某一规范平滑设计谱相匹配的实际地震波对于一座基础隔振建筑物的计算结果,发现谱匹配的人工波有可能产生非常保守的结果。Barenberg (1989) 对比分析了频率在 1 ~ 10 Hz 的单自由度结构,得出结论:谱匹配的人工波计算结果对于高频结构体系 ($f_0 > 5$ Hz) 可能是非保守的。因此,一些规范如 American Society of Civil Engineers (2005) 规定对于结构动力分析需要使用原始的实际地震波。Praveen 和 Malhotra (2003) 提出将调幅后的地面运动反应谱进行平滑化,使所得的平滑谱在所感兴趣的范围内匹配场地特定的反应谱,这样所选择的地面运动可以在频谱特性上模拟特定场地的控制地震事件(如多遇地震、罕遇地震等)。Jorge (2000) 研究了地面运动反应谱,发现其对于结构位移需求影响很大,特别是当结构进入大非线性阶段之后,影响就非常大,并提出基于使用特定谱形的方法可以更加精确、高效地预计结构地震反应,同时还发现对于一个特定的地震事件,使用经谱匹配技术修正过的加速度记录来预计结构的非线性地震需求可能会得到非保守的结果。Baker (2005) 研究了地震工程学中的谱形参数 ε ,并将其引入到 IM 中,为 PBEE 中的概率地震需求分析提出了一个可以考虑到谱形影响的向量 IM 以及一个新的反应谱——条件均值谱 (CMS- ε),同时为这个向量 IM 发展了相应的向量概率地震危险性分析,探讨了将 CMS- ε 和向量 IM 结合使用,通过考虑谱形的方法以提高概率地震需求模型的精确性和计算效率。PEER 也已经认识到高质量的地面运动记录对于基于性能的地震工

程学和抗震设计理论的重要性,因此发起了一个地面运动研究计划——地面运动的选择和修正计划 (Ground Motion Selection and Modification Program, GMSM),它整合了 PEER 的研究者以及其他机构专家的力量,如南加州地震中心和美国地质调查局等。

综上所述,由于谱匹配记录的正确性在地震工程学和结构抗震领域存在着很大争议,其与原始的实际地震波计算所得结构地震需求之间存在着一定差异,因此在预计结构地震反应的峰值或破坏规律时,采用谱匹配记录是可行的,因为它可以提高预计精度。但在基于概率的 PBEE 和 PBS D 中,应尽量使用原始的实际地震波,只有在这种实际地震波很少的情况下,才考虑采用谱匹配记录。

4 持时对结构地震反应的影响研究

地震地面运动持时对结构破坏的影响程度研究有以下几个难点:① 目前至少有 30 种对于持时的不同定义;② 地震作用下结构行为的复杂变化;③ 很难将持时与地面运动的其他特性进行解耦。

人们对持时对于结构地震反应的研究比对 *IM* 的研究要少得多,在已有的研究结果中发现:① 对于无退化非线性体系,强震持时影响一般不大;② 对于退化性强的非线性体系尤其是具有下降段恢复力特性的体系,持时对最大反应的影响较大 (Takizawa, Jennings, 1980);③ 持时对退化或无退化非线性体系的能量耗损累积有重大影响 (Nagahashi 等, 1980)。Lervolino 等 (2006) 对具有不同本构关系、不同周期的单自由度结构进行分析,发现持时对于结构位移需求参数如漂移比、位移延性等影响很小,且这个结论与单自由度结构的周期和滞回关系无关;Hancock 和 Bommer (2007) 采用谱匹配技术将一组实际地震波与某一平滑谱进行匹配来分析强地震动持时对结构非弹性地震反应的影响,发现持时对于峰值反应如层间漂移比等影响不大,但对累积破坏参数如滞回耗能和疲劳破坏等影响显著;Bommer (2004) 采用新的本构关系专门对圬工结构进行了分析,发现持时对于具有明显刚度和强度退化的圬工结构影响很大。一些学者还提出了如何在地震分析中考虑持

时的影响:Praveen 和 Malhotra (2003) 提出通过概率地震危险性分析及其降解过程获得对于处在特定地面运动强度水平下的特定工程场地的持时中位数,再选择持时等于或接近持时中位数的地震波;Shome (1997) 则提出在 *IM* 中增加一个持时参数来考虑持时对于工程需求参数的概率预计以及概率地震需求模型的影响;陈亮等 (2008, 2009a, 2009b) 分析了持时对于桥墩结构和桥梁结构体系不同性质工程需求参数如位移需求参数和能量需求参数的影响,发现持时对于桥梁结构位移需求参数 (墩顶漂移比、位移延性系数、支座位移和梁端最大位移等) 的影响甚微,但对能量需求参数 (标准化滞回能量等) 或包含能量项的累积和疲劳破坏参数 (Park and Ang 破坏指数等) 的影响显著。此外还探讨了采用能量需求参数建立概率地震需求模型的可能性,以及在其中如何考虑持时的影响。

5 结语

多年来,在国内外地震工程学研究,地震学与结构抗震两者之间缺乏联系。随着基于性能的地震工程学 (PBEE) 和抗震研究设计 (PBS D) 理论的出现以及不断发展,地震学的重要性日益凸显。基于性能的地震工程学分析的第一个重要阶段就是地震危险性分析,其结果将直接应用于随后的各个阶段和模型。只有选择具有合理地震动特性的地面运动,符合实际地震灾害环境,才能使计算结果如概率地震需求、易损性曲线等更加真实、可信,从而作为结构设计、分析和加固等的重要依据。

参考文献:

- 陈亮,李建中,盛光祖. 2008. 强地面运动持时对钢筋混凝土桥墩地震需求的影响[J]. 振动与冲击, 27(11): 154-159.
- 陈亮,李建中,盛光祖. 2009a. 如何考虑强地面运动持时的影响建立概率地震需求模型[J]. 地震研究, 32(1): 56-61.
- 陈亮,李建中,盛光祖. 2009b. 考虑强地面运动持时的概率分布对桥墩结构概率地震需求的影响[J]. 公路交通科技, 26(2): 47-52.
- 解丽,卢永坤,非明伦. 2008. 汶川 8.0 级地震桥梁震害[J]. 地震研究, 32(增刊): 530-534.
- Applied Technology Council. 1985. Earthquake damage evaluation data for California[OL]. ATC-13. (1985) [2010-03-01] <http://>

- www.atcouncil.org/pdfs/atc13.pdf.
- American Society of Civil Engineers. 2005. Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities [S]. Structural Engineering Institute, Working Group for Seismic Design Criteria for Nuclear Facilities, ASCE/SEI 43-05, Reston, VA, 81 pp.
- Baker J W. 2005. Vector-Valued Ground Motion Intensity Measures for probabilistic Seismic Demand Analysis [D]. Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California.
- Barenberg M E. 1989. Inelastic response of a spectrum-compatible artificial accelerogram [J]. Earthquake Spectra. 5(3):477-193.
- Bozorgnia Y, Luco N, Naeim F, *et al.* 2007. Ground motion selection, modification and simulation for seismic analysis of tall buildings [C]//Proceedings of ASCE Structural Congress. Long Beach, California, USA.
- Bazzurro P, Conell C A, Shome N, *et al.* 1998. Three proposals for characterizing MDOF nonlinear seismic response [J]. Journal of Structural Engineering. 124(11):1281-1289.
- Bolt B A. 2004. Seismic input motions for nonlinear structural analysis [J]. ISET journal of earthquake technology. 41(2-4):223-232.
- Bommer J J, Guido M, Jonathan H, *et al.* 2004. The influence of strong-motion duration on the seismic response of masonry structures [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2:1-26.
- Chai T H, Romstad K M, Bird S M. 1995. Energy-based linear damage model for high-intensity seismic loading [J]. Structural Engineering. 121(5):857-864.
- Cordova P P, Deierlein G G, Mehanny S S F, *et al.* 2001. Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure [C]//The Second U. S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, 11-13 September, 2000, 187-206.
- Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, *et al.* 2002. Probabilistic basis for 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering. 128(4):526-533.
- Vamvatsikosa D C, Cornell C A. 2002. The Incremental Dynamic Analysis And Its Application To Performance-Based Earthquake Engineering [C]//12th European Conference on Earthquake Engineering, 479.
- Vamvatsikosa D, Cornell C A. 2004. Applied Incremental Dynamic Analysis [J]. Earthquake Spectra. 20(2):523-553.
- El-Bahy A, Kunnath S K, Stone W C, *et al.* 1999. Cumulative seismic damage of circular bridge columns: benchmark and low-cycle fatigue tests [J]. ACI Struct J. 96(4):633-641.
- FEMA. 1997. HAZUS 97; Technical Manual. Federal Emergency Management Agency [OL], (1997-03-21) [2010-03-16], Washington, DC, http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/hz_library2.shtm.
- FEMA. 2003. Earthquake model. HAZUS-MH MR1: Technical Manual. Federal Emergency Management Agency, (2003-09-10) [2010-03-01]. Washington, DC, http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/hz_library2.shtm.
- Han S W, Wen Y K. 1997. Method of reliability-based seismic design I: Equivalent nonlinear systems [J]. Journal of Structural Engineering. 123(3):256-270.
- Hesameddin A, Eduardo M. 2005. Probability-based seismic response analysis [C]//Engineering Structures. 27:1151-1163.
- Hancock J, Bommer J J. 2007. Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response [J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering. 27:291-299.
- Jorge Eduardo Carballo Arevalo. 2000. Probabilistic seismic demand analysis: spectrum matching and design [D]. Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California.
- Jalayer F. 2003. Direct Probabilistic Seismic Analysis: Implementing Non-Linear Dynamic Assessments [D]. Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California.
- Jalayer F, Beck J L, Porter K A. 2004. Effects of ground motion uncertainty on predicting the response of an existing RC frame structure [C]//13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Jamie E, Padgett, Bryant G, *et al.* 2008. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios [J]. Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 37:711-725.
- Krawinkler H, Zohrei M. 1983. Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions [J]. Comput Struct. 16(1-4):531-541.
- Krawinkler H, Medina R, Alavi B. 2003. Seismic drift and ductility demands and dependence on ground motions [J]. Engineering structures. 25:637-653.
- Kwon O-S, Elnashai A. 2006. The effects of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure [J]. Engineering Structure. 28:289-303.
- Lervolino I, Cornell C A. 2005. Record selection for Nonlinear Seismic Analysis of Structures [J]. Earthquake Spectra. 21(3):685-713.
- Lervolino I, Manfred G, Cosenza E. 2006. Ground motion duration effects on nonlinear seismic response [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 35:21-38.
- Lee T H, Mosalam K M. 2006. Probabilistic seismic evaluation of reinforced concrete structural components and systems [R]//Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley. PEER Report.
- Luco N, Cornell C A. 2007. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions [J]. Earthquake Spectra; 23:357-392.
- Mackie K, Stojadinovic B. 2002a. Optimal Probabilistic Seismic Demand Models for Typical Highway Overpass Bridges [C]//12th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 467.

- Mackie K, Stojadinovic B. 2002b. Relation between probabilistic seismic demand analysis and incremental dynamic analysis [C]//National Conference on Earthquake Engineering.
- Mackie K, Stojadinovic B. 2003. Seismic Demands for Performance – Based Design of Bridges[R]//Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley.
- Mackie K, Stojadinovic B. 2004. Fragility curves for reinforced concrete highway overpass bridges [C]//Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada.
- Moehle J P. 1992. Displacement – based design of RC structures subjected to earthquakes [J]. *Earthquake Spectra*, 8(3):403 – 428.
- Muto K. 1960. Nonlinear response analyzers and application to earthquake resistant design [C]//Proceedings, Second World Conference on Earthquake Engineering, Japan. 2:649 – 668.
- Nagahashi S. 1980. Effects of ground motion duration upon earthquake response of structure[C]//Proc, 7th WCEE. Nagasaki institute of Applied Science, Nagasaki City, Nagasaki, Japan.
- Naeim F, M Lew. 1995. On the use of design spectrum compatible time histories [J]. *Earthquake Spectra*. 11(1):111 – 127.
- Praveen K, Malhotra. 2003. Strong – motion records for site – specific analysis [J]. *Earthquake Spectra*. 19(3):557 – 578.
- Shome N, Cornell C A, Bazzurro P, *et al.* 1997. Earthquake, records and nonlinear MDOF responses[R]. Report No. RMS – 29, Reliability of Marine Structures, Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
- Shome N, Cornell C A, Bazzurro P, *et al.* 1998. Earthquakes, records and nonlinear responses [J]. *Earthquake Spectral*. 14(3):469 – 500.
- Shome N. 1999. Probabilistic seismic demand analysis of non – linear structures [D]. Ph. D. Thesis, Stanford University.
- Sozen M A. 1980. Review of earthquake response of RC buildings with a view to drift control[C]//In State – of – the – Art in Earthquake Engineering; 7th World Conference on Earthquake Engineering, Ergunay O, Erdik M. Turkey:383 – 418.
- Stewart J P, Chiou B S J, Bray J D, *et al.* 2001. Ground Motion Evaluation Procedures for Performance – Based Design[R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley. PEER Report.
- Takizawa H, Jennings P C. 1980. Collapse of a Modal for Ductile Reinforced Concrete Frames under Extreme Earthquake Motion [J]. *EE-SD*, 8(2):117 – 144.
- Tothong P, Cornell C A. 2006. Improved probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, attenuation relationships, and near – fault effects [D]. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Ph. D. Thesis, Stanford University.

Review of the Research on the Effects of Characteristics of the Earthquake Ground Motions on Structural Seismic Demands

CHEN Liang¹, ZHANG Jin-song²

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

(2. Department of civil engineering, Anhui communications vocational and technical college, Hefei 230051, Anhui, China)

Abstract

The uncertainties of three essential factors of earthquake ground motions, namely amplitude, frequency content and duration, have most important effects on structural seismic demands for the structural seismic design and analysis. Previous seismic disasters have shown that the comprehensive effects of three essential characteristics dramatically influenced the collapse and failure of all kinds of structures. The review of the research on structural seismic demand analysis is presented in two aspects—earthquake engineering and earthquake resistance of structures, including analysis methods, research contents and effect factors, especially three essential factors of earthquake ground motions.

Key words: bridge engineering; performance-based earthquake engineering; structural seismic demands; intensity measures; frequency content; duration