

文章编号: 0253-3782(2006)03-0277-07

# 统一考虑地震环境和局部场地影响的建筑物易损性研究<sup>\*</sup>

温增平<sup>1)</sup>, <sup>\*</sup> 高孟潭<sup>1)</sup> 赵凤新<sup>1)</sup>  
李小军<sup>1)</sup> 吕红山<sup>1)</sup> 何少林<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

**摘要** 提出了一种综合考虑地震环境和场地影响的钢筋混凝土房屋地震易损性分析方法。将地震环境、局部场地和工程结构作为一个整体,以概率地震危险性分析的方式考虑地震环境的影响,在此基础上详细考虑了随局部场地而变化的反应谱形状对结构地震反应及其破坏概率分布的影响。此外,还提出了另一种表述结构易损性的方式,以对应于不同超越概率地震危险水平的方式,提供结构地震破坏概率分布的信息。

**关键词** 地震环境 场地条件 易损性分析

**中图分类号:** P315.9      **文献标识码:** A

## 引言

钢筋混凝土建筑的易损性分析,是开展现代城市或城市群震害预测不容回避的关键问题。随着城市化进程的不断加速,钢筋混凝土房屋已经成为许多城市建筑的主体。估计这些建筑结构在地震中出现各种破坏状态的概率分布,对地震防灾规划和地震灾害应急具有重要价值。因此,有关钢筋混凝土建筑易损性分析的研究受到重视。

自20世纪60年代以来,国内外对钢筋混凝土建筑的易损性分析,进行了大量的研究,也取得了许多重要成果。基于震害资料,Steinbrugge(1969)建立了各类结构的损失率与地震烈度的统计关系,这是20世纪60年代的主要成果。麻省理工学院Whitman等(1973)提出了结构易损性矩阵的概念,并基于震害资料建立了各类结构出现不同破坏状态的概率与地震烈度的统计关系。鉴于震害资料的限制,Applied Technology Council(1985)采用专家评估的途径,建立了各类结构的破坏概率矩阵。自20世纪80年代初以来,尹之潜(1985,1995)、高小旺(1990)、和李凤明等(2001)相继开展了基于烈度的钢筋混凝土房屋地震易损性分析方法研究,取得了一系列成果。近年来,基于地震动参数的易损性分析方法受到重视(National Institute of Sciences, 1999; 温增平, 1999; 陶正如, 陶夏新, 2004; 钟得理, 冯启民, 2004),建立了以峰值加速度等参数表示的易损性曲线。从钢筋混凝土房屋结构易损性研究的现状不难看出,基于统计途径的易损性分析,受震害资料有限性的制约;基于

\* 国家自然科学基金(50578150)、科技部公益事业发展基金、地震科学联合基金(104064)和北京市自然科学基金(8062026)联合资助。中国地震局地球物理研究所论著 06AC1018。

2005-09-11 收到初稿, 2006-04-07 决定采用修改稿。

<sup>\*</sup> 通讯作者。E-mail: wenzp@cea-igp.ac.cn

计算结构地震反应的数值分析方法，大多集中于地震烈度或地震动峰值加速度上；考虑场地条件对结构破坏概率分布影响的易损性方法，还不多见。

然而，局部场地条件对工程结构的地震破坏概率分布影响显著。许多地震的震害现象均表明，场地条件是引起震害局部变化的主要原因。例如，1906年旧金山大地震中，旧金山市内软弱地基上出现了明显较高的震害现象(Wood, 1908)；1923年日本关东地震中，东京都木结构房屋的破坏率明显随场地的冲积层厚度的增加而增高(Kawasumi, 1951)；1967年委内瑞拉地震时，同一地区的震害随场地覆盖土层厚度的不同出现明显的差异，特别是9~12层的房屋在厚冲填土场地上破坏率明显增高(Seed, Idriss, 1970)；在1976年唐山地震中，极震区422水泥厂、唐山钢厂、建筑陶瓷厂的房屋倒塌率为50%，而其附近的其它地方的倒塌率都达90%以上，这也与场地覆盖土层的条件有关(李小军, 1999)；1985年墨西哥地震的震害现象，充分显示了场地条件的影响：在这一地震中，距震中400km外的墨西哥市出现了严重的震害，且震害主要集中在长周期的高层建筑，而中低层结构破坏比较低；墨西哥市的震害不但大大超过其周围地区，而且比震中区还重。

尽管人们就场地条件对震害有显著影响已达成共识，但在开展震害预测时，仍未能详细地考虑局部场地对结构易损性的重要影响。如何合理地考虑局部场地对结构易损性的影响，是有待深入研究的重要问题。为此，本文提出将地震环境、局部场地和工程结构作为一个整体的研究思路，详细考虑由于局部场地引起反应谱形状变化进而导致其对结构地震反应及破坏概率分布的影响。即在概率地震危险性分析的基础上，通过分析局部场地条件对建筑物地震反应的影响，揭示局部场地对钢筋混凝土房屋破坏概率分布的影响。

## 1 地震破坏分析模型

为了能够详细地考虑地震发生的随机性、地震波传播的区域性和场地条件的局部性的影响，本文将联合应用概率地震危险性分析法和土层动力反应分析方法，统一考虑地震环境和场地条件对结构地震破坏的影响，以对应于不同超越概率水平的基岩加速度反应谱表述地震危险性。考虑土层对地震动的影响，以场地相关反应谱为地震输入进行结构地震破坏预测，估计在对应于不同超越概率水平的地震作用下结构可能出现不同破坏状态的分布。

### 1.1 地震危险性分析

依据区域及近场地震构造背景和区域、近场地震活动性的研究，确定对工程场点地震安全性有影响的地震带及潜在震源区划分、地震带及潜在震源区地震活动参数，并利用所确定的适合本区的加速度反应谱的衰减关系，以地震危险性概率分析方法，确定相应超越概率水平的场地相关基岩反应谱。

### 1.2 土层地震反应分析模型

对于某些局部范围内场地条件较为均匀简单的情况，可将场地介质模型简化为成层土层模型，即看作是水平成层介质，也就是认为土层的物理、力学性质以及基岩运动沿水平方向是均匀一致的，土层的特性只是随深度发生变化。本文使用的模型如图1所示，采用一维土层剪切动力反应分析的等效线性化方法，估计局部场地条件的影响。

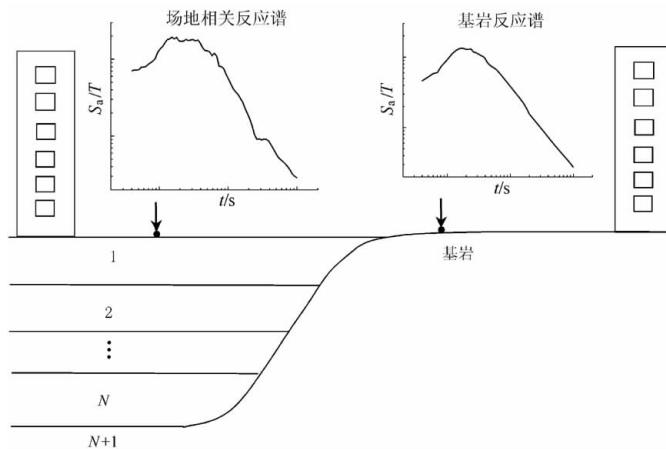


图 1 土层反应分析和建筑物地震破坏分析模型

### 1.3 结构地震破坏估计

#### 1.3.1 楼层地震剪力

以考虑地震环境和局部场地影响的场地相关反应谱作为地震动输入参数，进行结构地震反应分析。第  $x$  楼层的地震剪力为

$$Q_x = \sum_{i=x}^n \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} G_{eq} S_a(T) (1 - \delta_n) + \delta_n G_{eq} S_a(T) \quad (1)$$

式中， $n$  为楼的总层数； $G_{eq}$  为结构等效总重量荷载； $G_i, G_j$  分别为第  $i, j$  层的重量； $S_a(T)$  为工程场地地震相关反应谱； $H_i, H_j$  分别为第  $i, j$  层的计算高度； $\delta_n$  为顶部附加地震作用系数。

#### 1.3.2 楼层屈服剪力

钢筋混凝土框架结构楼层屈服剪力(尹之潜, 1995)为

$$Q_{yx} = 0.2 F_c A_{ux} \quad (2)$$

式中， $F_c$  为混凝土抗压强度； $A_{ux}$  为第  $i$  层平行于地震力方向的剪力墙及柱的总断面积。

#### 1.3.3 楼层的屈服剪力系数

描述结构抗震能力的重要参数楼层屈服剪力系数  $R$  可在公式(1)、(2)的基础上给出

$$R = \frac{Q_{yx}}{Q_x} \quad (3)$$

具有最大延伸率的楼层对结构破坏起主要作用，屈服剪力系数最小的楼层，产生最大的变形和最大的延伸率，具有最小屈服剪力系数的楼层的平均延伸率可由下式给出：

$$\mu_0 = \begin{cases} \frac{1+R^2}{2R^2} & R \leq 1 \\ \frac{1}{R} & R > 1 \end{cases} \quad (4)$$

考虑到结构的体形、施工质量和设计标准对结构地震反应的影响，需要按公式(5)对这些因素进行修正。

$$\bar{\mu} = \mu_0 (1 + \sum C_i) \quad (5)$$

结构地震反应是随机变量, 其概率分布为(尹之潜, 1995)

$$f(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2}\mu\xi\mu} \exp\left[-\frac{(\ln\mu - \lambda)^2}{2\xi^2}\right] \quad (6)$$

$$\lambda = \ln\bar{\mu} - \frac{1}{2}\xi^2 \quad (7)$$

$$\xi^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (8)$$

### 1.3.4 地震破坏估计

基于烈度的易损性分析常采用破坏概率矩阵描述结构的易损性。为适应工程场地地震安全性评价可能给出的结果, 本文提出以对应于不同超越概率的地震危险性水平的结构出现各种破坏状态的概率分布, 描述其易损性。根据破坏状态  $D_j$  和延伸率的破坏准则(尹之潜, 1995), 可以给出在不同概率水平的地震危险水平下, 结构出现不同破坏状态的概率分布。

## 2 结构地震破坏估计算例

在对某一区域地震地质构造、地震活动性及基岩地震动峰值加速度和反应谱衰减关系

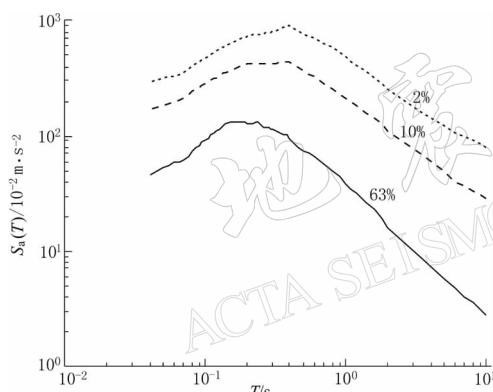


图 2 水平向 50 年不同超越概率水平的基岩反应谱

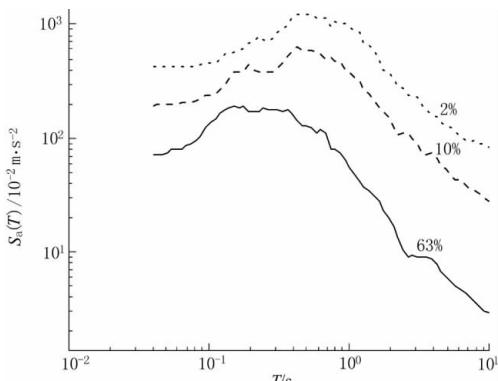


图 3 水平向 50 年不同超越概率水平的场地加速度反应谱

研究的基础上, 得到了如图 2 所示的 50 年超越概率为 63%, 10% 及 2% 的基岩加速度反应谱曲线。表 1 为计算场地钻孔资料。图 3 为工程场地自由地表面处对应于 50 年超越概率为 63%, 10% 及 2% 水平向地震动加速度反应谱曲线。分别以 50 年超越概率为

表 1 场地钻孔资料

土层序号	土层深度 /m	波速 $v_s$ /m·s <sup>-1</sup>	密度 /kg·m <sup>-3</sup>
1	0.0~2.7	165	1 970
2	2.7~6.9	185	2 030
3	6.9~11.8	210	2 020
4	11.8~14.2	240	1 970
5	14.2~17.6	280	1 890
6	17.6~21.2	310	2 020
7	21.2~25.3	345	2 020
8	25.3~33.2	380	2 000
9	33.2~34.7	410	1 980
10	34.7~39.3	450	2 000
11	39.3~40.4	420	1 950
12	40.4~42.9	400	1 960
13	42.9~45.2	410	1 970
14	45.2~53.5	420	2 000
15	53.5~58.1	445	1 820
16	58.1~65.0	465	2 000
17	65~70	490	2 000
18	70~	530	2 000

63%，10%及2%的基岩加速度反应谱和工程场地自由地表处的加速度反应谱为地震输入，对如图4所示按Ⅷ度设计的钢筋混凝土框架剪力墙结构进行地震破坏估计。比较图5基岩(a)和场地上(b)结构出现不同破坏状态的概率分布不难发现，场地条件确实对结构震害有很大影响。不同场地条件的震害差异明显，特别是在50年超越概率2%的情形下，这一影响更为显著。

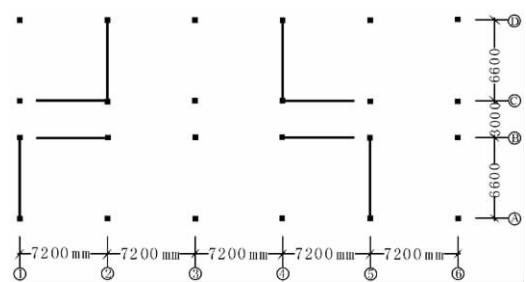


图4 某15层框架剪力墙结构平面图



图5 15层钢筋混凝土结构基岩(a)和地表(b)出现不同破坏状态概率分布对比  
R, S分别代表基岩场地和土层场地；L, M, H分别代表50年超越概率为63%，10%，2%

### 3 讨论和结论

详细考虑地震环境及场地条件对结构破坏概率分布的影响，是揭示震害选择性的有效途径。从本质上讲，建筑物震害的局部变化与场地条件密切相关的原因是由于局部场地改变了反应谱的形状，进而影响结构的地震反应所致。其中，土层愈厚，地震动频谱的长周期成分愈显著，反应谱曲线向右移动；反之，也亦然。土层刚度具有与此类似的作用，随着地基逐渐变软，反应谱最大峰值也逐渐向长周期方向移动；硬地基上的情形，则刚好相反（王钟琦等，1983）。具有较长周期的柔性结构若位于又软又厚的地基上，其震害一般较重。本文实际算例的结果也反映出这一趋势特征，也即本文提出的将地震环境、局部场地及结构作为一个研究整体的易损性分析方法，可以考虑局部场地对地震动不同频谱成分的选择性放大作用，能够揭示地震环境和场地条件对地震破坏选择性的综合影响，有助于认识震害的表现形式与内在本质之间的关系。

本文提出的综合考虑地震环境及场地条件影响的易损性分析方法，使工程场地地震安

全性评价的结果进一步用于震害预测，成为可能。另外，它提出的以对应于不同超越概率地震危险水平的方式提供结构地震破坏概率分布的信息，对地震设防水准选择具有价值。

### 参 考 文 献

- 高小旺. 1990. 钢筋混凝土框架房屋可靠度分析[D]: [学位论文]. 北京: 清华大学, 1~100
- 李凤明, 王绍博, 洪峰. 2001. 工程结构地震破坏概率矩阵分析[J]. 地震工程与工程振动, 21(1): 49~55
- 李小军. 1999. 场地地震动参数的确定[A]. 见: 胡聿贤主编. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 356
- 陶正如, 陶夏新. 2004. 基于地震动参数的建筑物震害预测[J]. 地震工程与工程振动, 24(2): 88~94
- 王钟琦, 谢君斐, 石兆吉. 1983. 地震工程地质导论[M]. 北京: 地震出版社, 4~5
- 温增平. 1999. 建筑物地震易损性分析研究[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 97~134
- 尹之潜. 1995. 地震灾害及损失预测方法[M]. 北京: 地震出版社, 38~73
- 尹之潜. 1985. 多层建筑楼层变位与屈服强度的关系和控制变位防止倒塌问题[J]. 地震工程与工程振动, 5(1): 33~44
- 钟得理, 冯启民. 2004. 基于地震动参数的建筑物震害研究[J]. 地震工程与工程振动, 24(5): 46~51
- Applied Technology Council (ATC). 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data for California*[R]. Washington, D C: Federal Management Agency, ATC-13, 1~20
- Kawasumi H. 1951. On the earthquake-stricken areas and their underground formation in Tokyo[J]. *Journ Archit Build Sci.*, 66: 8
- National Institute of Sciences. 1999. *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS99: Technical Manual*[R]. Washington, D C: Federal Management Agency, 5-1~10
- Seed H B, Idriss I M. 1970. *The Relationship Between Soil Conditions and Building Damage in the Caracas Earthquake of July 29<sup>th</sup>, 1967 (Report EERC 70-2)*[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1~20
- Steinbrugge K V. 1969. *Studies of Seismology and Earthquake Damage Statistics*[R]. Washington, D C: U S Department of Housing and Urban Department, 1~100
- Whitman R V, Reed J W, Hong S T. 1973. Earthquake Damage Probability Matrices[A]. In: *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*[C]. Rome, Italy: Palazzo Dei Congresi, 2 531~2 540
- Wood H O. 1908. Distribution of apparent intensity in San Francisco, in the California earthquake of April 18, 1906[A]. In: *Report of the State Earthquake Investigation Commission*[R]. Washington, D C: Carnegie Institute of Washington, 220~254

# SEISMIC VULNERABILITY ESTIMATION OF THE BUILDING CONSIDERING SEISMIC ENVIRONMENT AND LOCAL SITE CONDITION

Wen Zengping<sup>1)</sup> Gao Mengtan<sup>1)</sup> Zhao Fengxin<sup>1)</sup>  
Li Xiaojun<sup>2)</sup> Lü Hongshan<sup>1)</sup> He Shaolin<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Seismology Institute of Lanzhou, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** A procedure is developed to incorporate seismic environment and site condition into the framework of seismic vulnerability estimation of building to consider the effects of the severity and/or frequency content of ground motion due to seismic environment and site condition. Localized damage distribution can be strongly influenced by seismic environment and surficial soil conditions and any attempt to quantify seismic vulnerability of building should consider the impact of these effects. The seismic environment, site and structure are coupled to estimate damage probability distribution among different damage states for the building. Response spectra at rock site are estimated by probabilistic seismic hazard assessment approach. Based upon engineering representations of soil and amplifying spectral coordinates, frequency content and severity of ground motion are considered. Furthermore the impacts of severity and/or frequency of ground motion effects are considered to estimate the seismic response of reinforced concrete building and damage probability distribution for the building. In addition, a new method for presenting the distribution of damage is developed to express damage probability distribution for the building for different seismic hazard levels.

**Key words:** seismic environment; site condition; vulnerability analysis