# 汶川地区震后钢筋混凝土框架结构的地震易损性研究◎

郑山锁1,马德龙1,刘洪珠2

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266000) 摘要:以汶川地震为研究背景,针对震后典型钢筋混凝土框架结构进行地震易损性研究。基于 Cornell 理论框架结合汶川地质资料, 拟合出考虑场地特点的地震危险性模型, 同时定义损伤水平状态 及限值指标,以概率解析易损性研究方法为基础,运用考虑地震动参数的解析易损性评估方法绘制 汶川地区钢筋混凝土框架建筑的地震易损性曲线。研究结果表明:考虑地震动参数的概率解析易 损性研究方法是一种有效的地震易损性评估方法;以PGA作为地震强度输入指标的结构反应,随 自振周期的增大体系最大响应的相关性降低,结构各个损伤状态的失效概率均随之增大。

关键词: 地震工程; 地震易损性; 地震危险性; 钢筋混凝土框架 中图分类号: TU528.01 文献标志码:A **文章编号:**1000-0844(2015)01-0131-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0131

# Seismic Vulnerability of Post-earthquake Reinforced **Concrete Frame Structures in the Wenchuan Area**

ZHENG Shan-suo<sup>1</sup>, MA De-long<sup>1</sup>, LIU Hong-zhu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: The purpose of this study was to analyze the seismic vulnerability of the post-earthquake reinforced concrete frame structure in Wenchuan, China. High earthquake intensities and large areas that are affected increase grievous personal and economic losses. Based on disaster investigations, reinforced concrete frame structures accounted for the high proportion of buildings destroyed. Researchers at Cornell University in the United States proposed a probabilistic method that considers the influence of different seismic intensities in the same area. From a quantitative standpoint, this method can evaluate the seismic hazard level of the target area within a given time period using ground motion parameters and probability analysis to facilitate the engineering seismic design process. A simplified method for assessing vulnerability based on ground motion parameters was proposed, and vulnerability curves for the reinforced concrete frame structure in Wenchuan were drawn to describe the probability of the various levels of damage. The curve between the ground motion parameters and the annual probability based on the Cornell University theory is accurate, reasonable, and somewhat conservative.

This study used the finite element software OpenSEES to conduct nonlinear static and dynamic history analyses. The OpenSEES software is widely used because of advantages in its fiber model division, higher computing speed, and better accuracy. Approximately 300 samples of

① 收稿日期:2014-04-18

基金项目:国家科技支撑计划(2013BAJ08B03);国家自然科学基金(50978218,51108376);高等学校博士学科点专项科研基金 (20106120110003);陕西省科研项目(2012K12-03-01,2011KTCQ03-05,2013JC16)

作者简介:郑山锁(1960-),男,陕西人,博士,教授,博士生导师,从事结构工程抗震研究.

the structure were established using the OpenSEES software in order to perform the nonlinear static analysis. During the analysis, the yield displacement and the maximum story drift were chosen as a measure of the level of seismic capacity in the structure. The two-fold energy equivalent yield displacement method proposed by FEMA273 was also used to determine the yield displacement of structures and maximum story drift. Research methods that consider the probability of earthquake ground motion parameters by combining Latin hypercube sampling, nonlinear static analysis, dynamic time history analysis, and statistical regression analysis are effective for the assessment of seismic vulnerability.

The relationship between the ground motion parameters and failure probability curve can intuitively represent the seismic performance of the structure. Because the method is based on probabilistic seismic demand and aseismic capacity, the prospect is good for its application in seismic vulnerability analysis. The level of damage table and corresponding inter-story displacement angle limit table contained in this paper reflect the characteristics of the building structures and seismic features in earthquake disaster area. The table was based on Wenchuan earthquake survey data and structural seismic codes in China. Combined with the results of the HAZUS risk assessment, it represents an effective standard for evaluation. We also concluded that the proposed method for vulnerability assessment based on ground motion parameters is feasible. With the inputting parameter of the PGA, the correlation of the maximum response of the structure decreases with increases in the natural period and the corresponding probability of structural failure is enhanced.

Key words: earthquake engineering; seismic vulnerability; seismic hazard; reinforced concrete frame

# 0 引言

2008 年汶川发生了 *M*<sub>s</sub>8.0 大地震,此次地震强 度高,波及范围广,人员及经济损失严重。据灾害现 场调查,钢筋混凝土框架建筑占灾区破坏建筑总数 的比例较高,特别是中低层框架建筑,破坏形式多 样,数据记录丰富<sup>[1]</sup>。本文选取汶川地震后典型的 钢筋混凝土框架结构,提出一种简化的考虑地震动 参数的概率解析易损性评估方法,深入研究钢筋混 凝土框架结构的地震易损性能,了解结构在不同强 度等级地震作用下达到各个界限破坏状态的概率表 现,并结合考虑目标场地特点的地震危险性模型,计 算钢筋混凝土框架结构在不同损伤水平状态的年平 均超越概率。

#### 1 地震危险性模型

地震危险性分析中要求给出目标场地将来遭遇 到超过给定地震强度的概率,或称超越概率。美国 学者 Cornell 提出了概率性研究方法<sup>[2]</sup>,该方法综 合考虑了区域范围内所有潜在震源区中不同震级地 震对所研究地区的影响,通过地震动强度参数及其 超越概率水平定量评估目标地区在规定年限内的地 震危险性水平,以便进行工程抗震设计。根据 Cornell 的理论,地震危险性概率模型一定与震级、震中 矩和地震动衰减规律有关。在美国太平洋地震工程 研究中心(PEER)理论框架中,对于超越概率较小 的情况,设计场地地震危险性概率模型可以采用如 下表达式<sup>[3]</sup>:

 $v_{IM}(im) = P[im \ge x] = k_0 \cdot (im)^{-k}$  (1) 其中, im 为地震动强度参数; k<sub>0</sub> 和 k 是危险性曲线 的形状参数。

根据中国地震动参数区划图中标准设计反应谱 及汶川场地特点可确定形状参数的数值:

 $k = 2.375 \ 3, k_0 = 0.024 \ 5,$ 

即地震危险性概率模型的数学表达式:

 $v_{IM}(im) = 0.024 \ 5 \cdot (im)^{-2.375 \ 3}$  (2)

为验证该模型的合理性,本文将按照 Cornell 的假设计算所得的地震动年超越概率,与式(2)计算 的地震动年超越概率进行对比,结果见表 1,并将式 (2)所代表的地震危险性曲线同表 1 中按 Cornell 理论计算的结果绘制于同一张图中(图 1)。从图 2 中可以直观看出各级地震水平的年平均超越概率与 地震危险性概率模型符合得较好。通过对式(2)两 边求取对数,可得:

 $lnv_{IM}(im) = ln0.0245 - 2.3753ln(im)$  (3) 式(3)表示地震动的年超越概率的对数与地震动强 度指标 *im* 的对数成线性关系。

表1表明,本文建立的地震危险性分析模型计 算出的结果与 Cornell 假设计算的结果相比,很接 近甚至偏大,图1、图2可更为直观的显示。这说明 本文建立的地震危险性分析模型是合理的,依照该 公式所绘制的场地地震危险性曲线能够很好地反映 设计场地的危险性信息,而且估计的危险性偏于保 守。

#### 表 1 地震动年超越概率计算结果对比

 
 Table 1
 The comparison of calculation results of ground motion annual exceeding probability



# 2 汶川地区典型 RC 框架建筑及样本生成

### 2.1 汶川地区典型 RC 框架建筑

该建筑位于四川省都江堰市<sup>[4]</sup>,建筑按设防烈 度W度设计,汶川地震中遭遇烈度为W~K度,相当 于遭遇了设计大震或超过设计大震的地震,但该建 筑未倒塌,符合我国现行抗震规范"大震不倒"的目 标。在震后发现,首层框架柱柱端出现塑性铰破坏, 没有实现我国抗震规范所预期的"强柱弱梁"的屈服 机制。震害地区与此建筑相近或相似的破坏建筑较 多,且收集数据齐全。因此,本文以此典型建筑结构 为参考,分别建立了模型1及模型2,两个模型的基 本参数与实例相同,只是结构的高度发生了变化,其 具体数据汇总见表 2。



## Fig.2 Regression analysis of response values

## 2.2 样本的生成

为了研究汶川地区典型钢筋混凝土建筑的地震 易损性表现,本文以实例1、模型1及模型2为原 型,分别建立了100个结构样本,共300个结构样 本。样本考虑了结构材料属性的随机性,涉及的相 关随机变量如混凝土轴心抗压强度 f<sub>e</sub>、钢筋屈服强 度 f<sub>y</sub>、弹性模量 E 均假定符合对数正态分布。同时,利用国家强震台网中心记录的三个主震及两个地方固定台站的地震记录<sup>[5]</sup>,人工合成了 95 条地震

波作为结构的外荷载输入,并利用拉丁超立方抽样 的方法分别形成了 100 个结构与地震动的随机样 本,共计 300 个,作为地震易损性分析的研究对象。

表 2 框架模型参数表

Table 2	Parameters	of	the	frame	models
---------	------------	----	-----	-------	--------

模型编号	桂截面/(mm×mm)	梁截面/(mm×mm)	柱配筋	梁配筋	层高/ mm	跨度/mm	自振周期/s
实例 1	$400 \times 500$	$250 \times 720$	8B18	6B18	2800  imes 6	$7\ 800 + 2\ 800 + 7\ 800$	0.972 6
模型 1	$400 \times 500$	$250 \times 720$	8B18	6B18	$2800 \times 3$	$7\ 800 + 2\ 800 + 7\ 800$	0.5672
模型 2	$400 \times 500$	$250 \times 720$	8B18	6B18	$2800 \times 8$	$7\ 800 + 2\ 800 + 7\ 800$	1.5313

### 3 地震易损性模型

#### 3.1 概率抗震能力分析

概率抗震能力分析(Probabilistic Seismic Capacity Analysis, PSCA) 是指确定结构达到某个设 定的损伤水平状态界限值的概率统计特征,具体来 说,由于结构的空间作用、非弹性性质、材料实效、阻 尼变化等多种因素导致结构本身具有随机性,进而 导致结构破坏极限状态的界限值也具有随机性,这 时就需要通过对灾害资料及实验数据进行统计分析 来确定结构在各个损伤水平状态的概率统计特征, 利用结构的抗震能力概率密度分布函数来描述破坏 状态及抗震能力。文献「6]通过对结构的整体抗震 能力模型参数进行了 K-S 检验,指出结构基于非线 性静力分析的双线性整体抗力模型参数均较好地服 从对数的正态分布。因此,本研究基于以上结论,拟 定结构的抗震能力服从对数正态分布,借助有限元 软件 OpenSEES, 对第 2.2 节生成的 3 组样本进行 非线性静力分析,在分析过程中选用屈服位移及最 大层间位移角作为衡量结构抗震能力水平的指标, 并利用 FEMA273 建议的二折线能量等值法确定结 构的屈服位移,算出最大层间位移角。本文中结构 抗震能力的概率函数C可表示为

$$C = \ln(\hat{C}, \beta_C) \tag{4}$$

其中, Ĉ 为结构抗震能力中位数; βc 为对数标准差。 通过对计算得到的结构顶点最大位移角进行统计分 析,即可获得用于表征结构整体抗震能力的概率函 数, 见表 3。

#### 表 3 结构最大层间位移角的统计值

Table 3 Statistics of the maximum inter-story drift angle

编号	中位数 Ĉ	对数标准差βc
模型 1	0.014 17	0.097 01
实例1	0.010 42	0.135 27
模型 2	0.010 71	0.046 37

#### 3.2 概率地震需求分析

概率地震需求分析(Probabilistic Seismic De-

mand Analysis, PSDA)是指分析结构在随机地震动 作用下的不同响应情况。通过建立地震动强度指标 与结构反应界限破坏指标的函数曲线,可以清晰地 反映出当地震动强度发生变化时结构响应变化的情 况,从而评估建筑结构在不同强度等级地震动作用 下的抗震性能。据文献[7]介绍,工程地震需求参数 (EDP)与地震动参数之间符合指数式关系:

$$E\hat{D}P = a\,(im)^b \tag{5}$$

在本研究中,将式(5)改写成地震动地震需求参数 D 与地震动强度指标 I 的关系式:

$$D = a (I)^b \tag{6}$$

将式(6)两边同时取对数可得:

 $\ln D = \ln(a) + b \cdot \ln(I) = A + B \cdot \ln(I)$  (7) 其中,A、B均是通过对结构在地震作用下的响应数 据进行回归分析得到的形状系数。

在本文中,结构响应的概率函数 D 可表示为

$$D = \ln(\hat{D}, \beta_D) \tag{8}$$

其中, $\hat{D}$ 为结构响应值的中位数; $\beta_D$ 为结构响应值的标准差。

借助有限元软件 OpenSEES<sup>[8]</sup>,根据文献[9]的 选波原则选取地震波,对第 2.2 节形成的 3 组样本 进行动力时程分析,统计出各个结构样本在地震作 用下的响应特征,进而将每个结构-地震动样本的响 应结果绘制于图 3。

依照式(7)的形式,以 PGA 的对数为自变量, 最大层间位移角 θ<sub>max</sub>的对数为因变量进行线性回 归,经回归分析可得出实例 1、模型 1 及模型 2 的结 构反应公式分别为:

 $\ln(\theta_{\text{max}}) = 0.979 \ 78 \ln(PGA) - 2.733 \ 52$  (9) 其线性相关系数为 0.929 03,

 $\ln(\theta_{\max}) = 0.945 \ 29 \ln(PGA) - 2.239 \ 89 \ (10)$ 其线性相关系数为 0.911 27,

 $\ln(\theta_{\max}) = 0.661 \ 77 \ \ln(PGA) - 2.061 \ 71 \ (11)$ 其线性相关系数为 0.858 85。

对比三个结构反应的拟合公式可发现,以PGA



Fig.3 Comparision of seismic vulnerability curves

作为地震强度输入指标的结构反应,随自振周期的 增大,体系最大响应的相关性降低。其具体表现为: 模型1的自振周期为0.5672s.相应的体系最大响 应的相关系数为 0.929 03: 实例 1 的自振周期为 0.972 6 s.相应的体系最大响应的相关系数为 0.911 27:模型 2 的自振周期为 1.531 3 s,相应的体 系最大响应的相关系数为 0.858 85。通过对比可 知,短周期结构的响应相关性好于长周期结构的响 应相关性,以 PGA 作为地震强度输入指标更适合 短周期建筑结构的抗震分析。

极限破坏状态损伤水平等级的划分 3.3

本文基于汶川地震震害资料,结合国内外专家 的研究成果,参照基于性能设计方法的四个性能水 准(正常使用、暂时使用、生命安全、接近倒塌)的分 类,给出了建议的汶川地区 RC 框架建筑损伤水平 表(表4)。

基于 HAZUS 风险评估对损伤状态的划分以 及损伤状态的限值水平[10],结合我国建筑抗震规范 和文献中的损伤划分[11],以我国建筑规范的更新年 份(2001)为时间界限,将汶川地区的建筑结构分为 新建建筑和原旧建筑两大类,并给出了建议的各个 损伤水平状态的损伤指标限值,详见表 5。

损伤水平	性能水准	宏观物理描述	修复难易程度
无损伤(ND)	正常使用	承重构件和非承重构件均无损伤,处于弹性工作阶段	不需修复
轻度损伤(SD)	暂时使用	承重构件和非承重构件存在轻微裂缝,强度及刚 度略有退化,但可近似认为处于弹性工作阶段	较易修复,进行局部修补
中度损伤(MD)	生命安全	非承重构件出现宽而深的裂缝,承重构件出现扩 展裂缝,柱根出现塑性铰,进入弹塑性工作阶段	可以修复,需做修复评估
严重损伤(ED)	接近倒塌	非承重构件开始倒塌,承重构件裂缝贯通,梁 柱保护层混凝土大面积剥落,纵筋和箍筋裸露	不易修复,建议拆除
完全损伤(CD)	倒塌	构件失去承载能力,结构倒塌	无法修复,强制拆除

#### 绘制地震易损性曲线 3.4

第37卷第1期

将结构的极限破坏状态划分为四个损伤水平,

并选取最大层间位移角作为损伤指标及地面最大加 速度(PGA)作为强度指标,则结构地震需求 D 超 过结构抗震能力C的概率可表示为:

$$P_f = P(C/D \leqslant 1) \tag{12}$$

假设前提 D、C 均服从对数的正态分布,则失效概率 P<sub>f</sub> 可由下式计算<sup>[12]</sup>:

$$P_{f} = \Phi \left[ \frac{-\ln(\hat{C}/\hat{D})}{\sqrt{\beta_{c}^{2} + \beta_{d}^{2}}} \right]$$
(13)

其中, $\hat{C}$ 为结构抗震能力中位数; $\beta_c$ 为与之相对应 的对数标准差; $\hat{D}$ 为结构需求中位数; $\beta_a$ 为与之相 应的对数标准值。

- 表 5 汶川地区钢筋混凝土框架结构建议损伤水平状态的 最大层间位移角限值
- Table 5
   The maximum inter-storey drift angle for RC frame buildings in suggested damage state in Wenchuan area

<b>揭</b> 梅水	2001 前	前的建筑	2001 后的建筑		
顶切水	最大层间	整体	最大层间	整体	
半状态	位移角	变形	位移角	变形	
轻度损伤状态	0.000 25	$\Delta_y$ : H	0.000 4	$2\Delta_y$ : H	
中等损伤状态	0.000 4	$3\Delta_y$ : H	0.001	$4\Delta_y$ : H	
严重损伤状态	0.000 8	$8\Delta_y$ : H	0.001 8	$10\Delta_y$ : H	
完全损伤状态	0.002 5	$> 8\Delta_y: H$	0.004	$> 10 \Delta_y$ : H	

注:△,为屈服位移;H为建筑物总高。

通过查询标准正态分布表可确定  $\Phi(x)$ 的数 值,将不同的 PGA 的值代入式(13)中,即可获得结 构在不同地震强度作用下达到极限状态的失效概 率,进而绘制出地震易损性曲线。

将实例1的易损性曲线及模型1、模型2的易 损性曲线绘制于同一坐标系内,如图3所示。经对 比发现,三组结构易损性曲线的整体趋势为,随自振 周期的增大结构超越各个损伤状态的失效概率增 大。在各个损伤状态的具体表现为:当结构处于轻 度损伤状态时,破坏概率值八层框架的比六层框架 的平均大出15.03%,六层框架的比三层框架的平均 大出 11.25%;当结构处于中度损伤状态时,破坏概 率值八层框架的比六层框架的平均大出19.77%,六 层框架的比三层框架的平均大出16.27%;当结构处 于严重损伤状态时,破坏概率值八层框架的比六层 框架的平均大出 21.63%, 六层框架的比三层框架的 平均大出 20.08%;当结构处于完全损伤状态时,破 坏概率值八层框架的比六层框架的平均大出 11. 76%,六层框架的比三层框架的平均大出 8.13%。 不难发现当结构处于轻度、中度及严重损伤状态时, 结构随自振周期的增大,破坏概率值幅度显著提高, 但在完全损伤状态时却发生突变,这可能与结构变 形过大有关。

# 4 结构的年平均超越概率

在一定时间内结构的响应值超越某一极限值的 概率可以用式(15)表示:

$$P_{LS} = \sum P[L_S/I = x]P[I = x] \quad (14)$$

其中, $P[L_s/I=x]$ 表示发生强度为I=x地震时结构的失效概率,即地震的易损性;P[I=x]表示发生强度I=x地震时的概率,通过地震危险性分析得到。

因为地震动强度和结构破坏状态都是接连发生的,可以将式(15)表示为积分的形式<sup>[13]</sup>:

$$P_{LS} = \int_0^\infty F_R(x) \,\mathrm{d}G_I(x) \tag{15}$$

其中, $F_R(x) = P(L_s/I = x)$ , $G_I(x) = P[I \ge x]$ 为 地震动发生强度大于或等于 x 的超越概率。

将式(15)变换可得:

$$P_{LS} = \int_{0}^{m} F_{R}(x) \frac{\mathrm{d}G_{I}(x)}{\mathrm{d}x} \mathrm{d}x \qquad (16)$$

经以上计算,三个模型超越各损伤水平状态的 年平均概率值汇总于表 6。从表 6 可以看出,同一 结构的年平均超越概率随损伤的积累而降低,不同 结构的年平均超越概率随自振周期的增加而增高, 这与结构地震易损性的分析结果一致。

表 6 各个模型超越各损伤水平状态的年平均概率 Table 6 The annual average exceeding probability of the mod-

e	ls	in	every	damage	state
---	----	----	-------	--------	-------

编号	轻度损 伤状态	中度损 伤状态	严重损 伤状态	完全损 伤状态
模型1	0.094 5	0.053 2	0.020 3	0.001 4
实例 1	0.142 9	0.085 0	0.043 3	0.007 3
模型 2	0.309 8	0.189 6	0.093 9	0.021 2

### 5 结论

基于 Cornell 的理论框架,建立了考虑汶川地 区场地影响的危险性模型,得出的地震强度参数与 年超越概率的关系曲线准确合理,且略显保守。

以拉丁超立方抽样、非线性静力分析、动力时程 分析及统计回归分析相结合的考虑地震动参数的概 率解析易损性研究方法,是一种有效的概率曲线关 系,可以直观地反应结构的概率抗震性能,该方法以 概率地震需求及抗震能力为实现基础,具有很好的 应用前景。

基于汶川地震调查资料及我国建筑结构抗震规范,结合 HAZUS 风险评估的研究成果,本文编制的汶川地区钢筋混凝土框架结构损伤水平表及建议的损伤水平状态的层间位移角限值表,它们真实地

Chinese)

反映了灾区的建筑结构特点及地震特征,可以作为 一项有效的评估标准。

以 PGA 作为地震强度输入指标的结构反应, 随自振周期的增大体系最大响应的相关性降低,即 短周期结构的响应相关性好于长周期结构的响应相 关性,以 PGA 作为地震强度输入指标更适合短周 期建筑结构的抗震分析。

#### 参考文献(References)

[1] 李英民,刘立平.汶川地震建筑震害与思考[M].重庆:重庆大学 出版社,2008.

LI Ying-min,LIU Li-ping.The Damage and Thinking of Buildings in Wenchuan Earthquake[M].Chongqing;Chongqing University Press,2008.(in Chinese)

- [2] Cornell C A. Engineering Seismic Risk Analysis [J]. BssA, 1968,158(5):1583-1606.
- [3] Mackie K.Fragility-based Seismic Decision Making for Highway Overpass Bridges[D].Berkeley:Department of Civil and Environmental Engineering of UC Berkeley,2005.
- [4] 清华大学,西南交通大学,重庆大学,等.汶川地震建筑灾害分析及设计对策[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
   Tsinghua University, Southwest Jiaotong University, Chongqing University, et al. The Analysis of Structuredamage in Wenchuan Earthquake and the Design Strategy[M].Beijing: China Architecture and Building Press,2009.(in Chinese)
- [5] 于海英,王栋,杨永强,等.汶川 8.0级地震强震动加速度记录的初步分析[M].地震工程与工程震动,2009,29(1):1-13.
  YU Hai-ying, WANG Dong, YANG Yong-qiang, et al. The Preliminary Analysis of Strong Ground Motion Records from the M<sub>8</sub>8.0 Wenchuan Earthquake[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2009,29(1):1-13.(in Chinese)
- [6] 李刚,程耿东.基于性能的结构抗震设计——理论、方法与应用 [M].北京:科学出版社,2004.

LI Gang, CHENG Geng-dong. Performance-based Seismic De-

sign----Theory,Method and Application[M].Beijing:Science
Press,2004.(in Chinese)

- [7] 龚思礼.建筑抗震设计手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业 出版社,2003.
   GONG Si-li.Code for Seismic Design of Buildings(Version 2)
   [M].Beijing: China Architecture and Building Press,2003.(in
- [8] Mazzoni S, Mckenna F, Scott M H, et al. Opensees Command Language Manual[R].San Francisco: PEER, University of California, Berkeley, 2007.
- [9] 吴小峰,孙启国,狄杰建,等.抗震分析反应谱法和时程分析法数值仿真比较[J].西北地震学报,2011,33(3):276-278.
   WU Xiao-feng, SUN Qi-guo, DI Jie-jian, et al. A Numerical Simulation Comparison between Response Spectrum Analysis and Time History Analysis[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(3):276-278.(in Chinese)
- [10] Fema. HazusMHMR4 Technical Manual[S]. Department of Homeland Security Emergency Preparedness and Response Directorate FEMA Mitigation DivisionWashington D C,2003.
- [11] 刘晶波,王文辉,赵东东,等.循环往复加载的地下结构分析方 法及其在地震损伤分析中的应用[J].地震工程学报,2013,35 (1):21-23.

LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Pushover Analysis Method of Underground Structurs Under Reversal Load and Its Application in Seismic Damage Analysis [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1); 21-23. (in Chinese)

- [12] Hwang H, Liu J B, Chiu Y H. Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges [C]. Memphis: Mid-America Earthquake Center Technical Report, MAEC-RR-4 Project, 2001.
- [13] 吕大刚,王光远.基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J].自然灾害学报,2006,15(2):157-162.
  LU Da-gang, WANG Guang-yuan. Global Seimic Fragilityanalysis of Structures Based on Reliability and Performance [J].Journal of Natural Disasters, 2006, 15(2): 157-162. (in Chinese)