

基于构件的 RC 连续梁桥地震体系易损性分析

钟 剑, 庞于涛, 曹飒飒, 袁万城

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 提出了考虑各构件(桥墩、支座、桥台)地震响应相关性的体系易损性计算方法. 首先利用均匀设计得到 56 个结构-地震样本对, 得到各构件的地震响应; 其次通过 Matlab 计算得到联合概率地震需求模型(JPSDM), 并计算出对应的各构件能力样本; 最后借助蒙特卡洛抽样(MCS)得到桥梁结构体系易损性曲线. 以一座 3 跨连续梁桥的非线性 Opensees 模型为例, 结果表明不考虑构件相关性的体系易损性会带来较大误差.

关键词: RC 连续梁桥; 易损性曲线; 构件相关性; 体系易损性

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

Seismic Fragility Methodology for RC Continuous Bridges Based on Components Correlation

ZHONG Jian, PANG Yutao, CAO Sasa, YUAN Wancheng

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new method for system fragility is proposed in this paper with consideration of the seismic correlation of bridge fragments (piers, bearings, abutments). Firstly, 56 structure-earthquake sample pairs are obtained by uniform design, which are used to get the seismic responses of components. Secondly, the joint probabilistic seismic demand model (JPSDM) is established by Matlab. Then the corresponding capability for each component are calculated. Finally, the bridge structure system fragility curve can be obtained with Monte Carlo Sampling (MCS). The nonlinear Opensees model of a three-span continuous girder bridge is established as a case study. The results prove that larger errors will be brought in if the component correlation in fragility analysis is not considered.

Key words: RC continuous girder bridge; fragility curves; component correlation; system fragility

作为目前抗震理论研究的热点问题, 美国太平洋地震工程研究中心(PEER)于 2005 年提出了新一代基于性能的地震工程研究框架, 其中地震易损性分析为该框架重要环节和热点之一.

地震易损性分析描述桥梁结构在不同水平地震作用下超越某一极限状态或性能水平的概率^[1], 是评价结构在不同强度地震作用下损伤概率的十分有效的方法^[2]. 地震易损性曲线可以分为经验曲线和理论曲线. 经验易损性曲线^[3-4]是基于过去收集到的地震震灾资料, 应用统计归纳的方法进行地震易损性估计, 其局限于震害资料的缺乏以及结构的变化性, 经验易损性曲线的应用是有限的. 相反, 理论易损性曲线在工程和科研中得到越来越多的应用^[5]. 理论易损性曲线通常从桥梁结构的地震动响应分析中得到, 可以分为反应谱分析方法^[6]、非线性静力分析方法^[7]及非线性时程分析方法^[8]. 它包括 3 个主要部分: ① 地震动输入的模拟; ② 考虑桥梁结构的不确定性对桥梁结构的模拟; ③ 获得桥梁结构的地震响应分析, 并通过回归分析合成易损性曲线.

Choi 等^[1], Padgett 等^[2], Hwang 等^[6], Shinozuka 等^[7]为易损性的理论和方法做出了很多贡献. 国内也已有较多地震易损性的研究成果, 很多专家学者在基于构件破坏的桥梁结构易损性分析方面做了很多工作^[9-12]. 研究表明, 桥梁作为一个系统比任何一个构件都更容易损坏^[1]. 为得到桥梁体系易损性曲线, Choi 等^[1], Zhang 等^[5]建立了各个构件的易损性曲线, 分别假定各构件之间完全不相关和完全相关得到桥梁体系的易损性曲线的上下界; 庞于涛等^[12]、李立峰等^[13]通过一次界限法和二次界限法也得到了体系易损性的上下界.

但是假设构件地震响应完全相关或者完全不相关是不确切的^[5], 因此本文提出考虑各构件(桥墩、支座、桥台)地震响应相关性的体系易损性计算方

收稿日期: 2014-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(51278376, 50978194, 90915011)

第一作者: 钟 剑(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震与振动. E-mail: china01zhong@126.com

通讯作者: 袁万城(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震与振动. E-mail: yuan@tongji.edu.cn

法. 利用均匀设计得到 56 个结构-地震样本对, 进行非线性时程分析得到各构件的地震响应; 通过 Matlab 计算各个桥梁构件地震响应的协方差矩阵, 建立联合概率地震需求模型(JPSDM); 计算出对应的各构件能力样本; 借助蒙特卡洛抽样(MCS)得到桥梁结构体系易损性曲线. 以 3 跨钢筋混凝土(RC)连续梁桥的 Opensees 模型为例, 同时考虑了地震动和结构本身的不确定性, 形成考虑构件相关性的体系易损性曲线, 并传统的方法比较, 对全桥的抗震性能进行评估和分析.

1 方法介绍

1.1 构件易损性曲线

易损性曲线可以描述为在给定的地面运动强度(I_M)下结构的需求(D)超出其能力(C)的条件概率^[2], 计算公式如下所示:

$$P_r = P[D \geq C | I_M] = P[D - C \geq 0 | I_M] \quad (1)$$

Cornell 建议地震作用下的平均需求可表示为

$$\ln S_d = \ln a + b \ln I_M \quad (2)$$

式中: a 和 b 是统计的回归系数. 进一步假定地震作用下需求服从两参数的对数正态分布^[14], 概率地震需求模型(PSDM)可以表示为

$$P[D \geq C | I_M] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln C - \ln S_d}{\beta_{D|I_M}}\right) \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, $\beta_{D|I_M}$ 为地震需求的标准差, 表示为

$$\beta_{D|I_M} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln C_i - (\ln a + b \ln I_{M_i})]^2}{n-2}} \quad (4)$$

许多学者在研究的过程中假定构件的能力极限状态服从对数正态分布^[15-16]. 因此, 结合概率需求模型可以推出, 易损性依然服从于对数正态分布, 表示为

$$P_r = P[D \geq C | I_M] = \Phi\left(\frac{\ln(S_d/S_C)}{\sqrt{\beta_{D|I_M}^2 + \beta_C^2}}\right) \quad (5)$$

式中: S_C 为结构能力的平均值, β_C 为结构能力的对数标准差.

1.2 体系易损性曲线

体系易损性曲线可以通过构件的重要性以及震后的修复花费来推导得出^[5,17], 或者利用联合概率地震需求模型基于构件水平得到^[1-2,18].

桥梁结构体系超越某一特定极限状态的概率 $P[F_s]$ 为所有单个构件超越该极限状态的联合概率 F_i , 如下所示:

$$P[F_s] = \bigcup_{i=1}^n P[F_i] \quad (6)$$

假定桥梁体系的各构件满足串联体系, 任何一个构件的损伤可以导致同等水平的体系的损伤^[5], 因此, 体系的损伤状态(D_{ss})可以用构件水平的最大损伤状态(D_{Si})来表示, 即

$$D_{ss} = \max D_{Si} \quad (7)$$

Choi 等^[1]通过一阶可靠度理论, 分别假定各构件之间完全不相关和完全相关得到桥梁体系的易损性曲线的上下界.

$$\max_{i=1}^n [P(F_i)] \leq P(F_s) \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(F_i)] \quad (8)$$

真实的体系易损性曲线介于上下界之间, 实际的曲线要依赖于构件地震响应的相关系数. 为了得到精确的模拟, 通常考虑构件地震响应的相关性, 建立联合概率地震需求模型, 用蒙特卡洛抽样得到体系可靠度曲线^[2,19].

第 1 步, 建立概率地震需求模型(PSDM). 本模型既考虑地震动的随机性, 又考虑结构的几何参数和材料的变异性, 通过均匀设计建立若干个桥梁模型和地震动对应的样本, 通过非线性时程分析得到各个样本的地震响应.

第 2 步, 对若干个概率地震需求模型的地震需求数据样本进行统计, 通过数理统计计算得到各个构件地震需求的相关系数和协方差矩阵, 得到联合概率需求模型.

第 3 步, 考虑材料的变异性, 计算出每个概率地震需求模型(PSDM)所对应的构件能力样本.

第 4 步, 对构件的能力样本和考虑地震响应相关性的构件需求样本进行蒙特卡洛抽样, 借助 Matlab 软件计算得到体系易损性曲线.

1.3 均匀设计

均匀设计最早在导弹试验设计中运用, 在多参数、多水平的试验中, 通过均匀设计能够显著减少试验样本数量. 由于在研究桥梁结构易损性过程中, 有很多不确定因素, 如果按常规方法需要大量的试验, 而通过均匀设计可以大大减小试验的次数, 同时满足试验精度.

本文采用均匀设计表, 此处以 $U_8(8^4)$ 均匀设计表为例, 说明均匀设计具体步骤. 在 4 因素 8 水平数的试验设计中, 采用普通设计所需试验样本为 $4^8 = 65\,536$, 通过采用正交设计, 可将试验样本个数降低为 $8^2 = 64$, 而通过采用 $U_8(8^4)$ 均匀设计表, 仅需 8 个样本即可充分反映参数随机性. 在 $U_8(8^4)$ 均匀设

计表中,将各因子的取值区间 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ 等距离划分为7个区间,从而获得包括两个边界值在内的8个取值点,然后根据均匀设计表确定各因子的取值。

2 案例分析

2.1 桥梁描述及数值模拟

本文以一座3跨混凝土连续梁桥为例,跨径布置 3×38 m,墩高8 m,为 $1.7 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$ 正方形柱.主梁采用C50预应力混凝土,桥墩混凝土为C40,钢筋采用HRB335,纵向配筋率为0.8%,配箍率为0.5%。混凝土桥梁的总体布置如图1所示。

使用Opensees程序建立桥梁结构的3D非线性模型.上部结构在地震作用下基本保持弹性,因此使用线弹性梁柱单元模拟.用碰撞单元考虑地震作用下主梁与桥台的碰撞效应.为简化起见,本例中不考虑桩土共同作用,假定墩底固结。

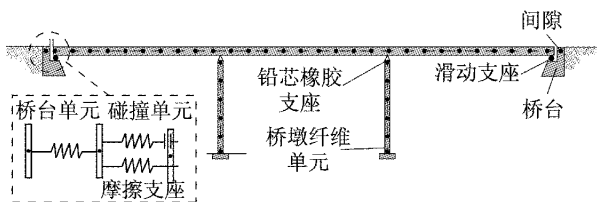


图1 混凝土桥梁的总体布置

Fig. 1 General configuration of reinforced concrete bridge

2.1.1 桥墩

墩柱由于要承受巨大的地震力,允许桥墩在强震作用下形成塑性铰,故墩柱采用弹塑性纤维梁柱单元来模拟。

用UCfyber程序和Opensees软件都可以计算出桥墩的能力曲线. Nielson^[20]、庞于涛等^[12]比较了两者的吻合度,本文也比较了桥墩纤维截面Opensees和UCfyber计算的弯矩曲率曲线,图2a表明两者曲线吻合度非常高.在考虑材料的变异性之后,就形成了56个不同的桥墩样本,这样通过Opensees编程计算就显得非常方便,故本文采用Opensees来计算桥墩的能力。

2.1.2 桥台

Caltrans^[21]给出了仅考虑桥台土效应的被动线性刚度,但是桥台的刚度应该包括桩的侧向刚度^[20,22],因此本文中桥台刚度为包括桥台土以及桩基的联合刚度.研究指出,随着桥台位移的增加,桥台刚度会降低,当达到极限土压力时,桥台刚度变为零,因此桥台的被动刚度应该由多段直线来表示.桩

基的刚度也是变化的,Choi^[22]假设其力学曲线为三折线模型(见图2b)。

2.1.3 支座

桥台布置滑动摩擦支座,两个墩位置布置铅芯橡胶支座,其力学性能曲线见图2c,d.图中 μ 为滑动摩擦系数, N 为支座承受的压力, X_y 为临界位移, F_y 为屈服力, K_1 和 K_2 分别为起始刚度和屈服刚度.在文中,按规范^[23]取 $\mu_y=0.02$, $X_y=0.002$ 。

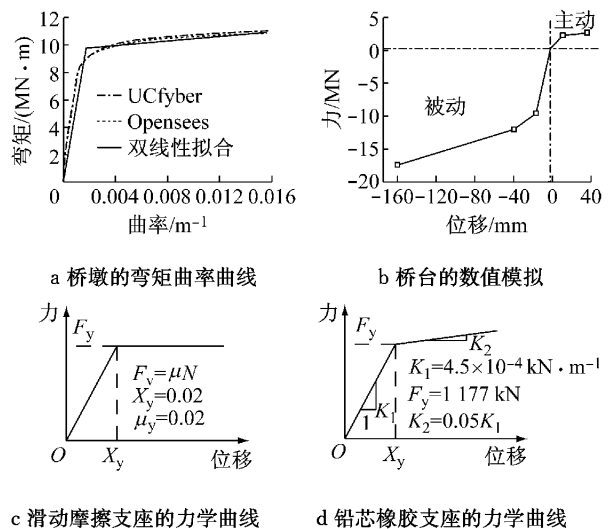


图2 桥梁构件模拟

Fig. 2 Modeling of bridge components

2.2 结构的不确定性

Pan等^[24]曾对影响结构响应的多种因素敏感程度做过参数分析,结果表明支座的摩擦系数、钢筋的屈服强度、混凝土的抗压强度、伸缩缝长度以及上部结构重量是比较重要的不确定因素,因此在模拟中必须考虑其不确定性. Padgett等^[25]则通过完整的试验设计来研究32个不确定性参数对易损性曲线的影响,认为地震的方向、桥台的主动刚度以及伸缩缝长度是最重要的不确定因素.本文综合以上两位学者的研究成果,考虑支座的摩擦系数(μ)、钢筋的屈服强度(f_y)、混凝土的抗压强度(f_c)、伸缩缝长度(δ)、上部结构重量(W)、铅芯橡胶支座的屈服刚度(K_y)及桥台的主动刚度(K_a)的不确定性,详见表1。

变量组由7个独立变量组成,本文采用 U_{56} (56⁷)均匀设计表,用第1.3节的方法获得56结构随机样本,与56条地震波对应,形成56个“结构-地震波”样本对。

2.3 地震动选取以及地震动强度指标

本文中的桥梁所在的场地为中软场地土,场地类别为III类.从PEER强震记录数据库选取56条III类场地地震波,这些波的震级为6.0~6.7,峰值

表 1 桥梁模型的不确定因素及其概率分布

Tab.1 Uncertainty and probability distribution incorporated in analytical bridge models

参数变量	分布类型	统计参数	
		参数一	参数二
μ	对数正态分布	-3.22	0.50
$f_y^{[26]}$	正态分布	388.3	26.6
$f_c^{[26]}$	正态分布	39.01	4.70
$\delta^{[18]}$	正态分布	76.2	24.1
$W^{[13]}$	正态分布	26.25	2.60
K_y	正态分布	1 460	146
$K_a^{[22]}$	均匀分布	7.0	1.5

加速度(PGA)为 0.068~0.877。图 3 给出了调幅后的阻尼比为 5%的各条地震波的谱加速度曲线以及平均谱加速度曲线。

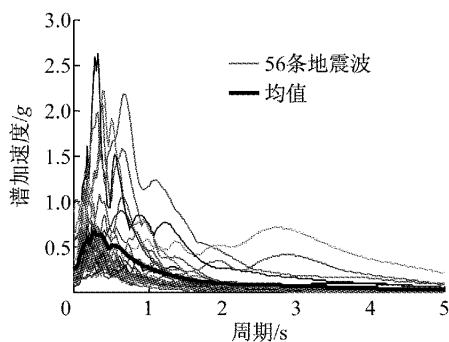


图 3 56 条地震波反应谱

Fig.3 Response spectrum of 56 waves

地震动可以通过 PGA、峰值速度(PGV)、周期对应的反应谱值 $S_a(T)$ 等强度指标来描述^[27]。Mackie 等^[17]建议,概率分析结果的线性一致性可以作为 I_M 能否应用的判断标准。基于此标准,PGA 和 PGV 都是 I_M 的比较好的选择。Padgett 等^[28]对 I_M 进行效率、可适用性以及危害可计算性的评价表明:PGA 是比较合适的地震动强度指标。

因此,本文选择 PGA 作为地震动强度指标。为简化起见,本文仅研究在纵向地震作用下的桥梁结构响应,因此只考虑纵向地震动输入。

2.4 概率地震需求模型(PSDM)

根据第 2.2 节提供的 56 个“结构-地震波”样本对,利用 Opensees 进行 56 次非线性时程分析,并记录相关构件的地震响应。根据式(2)回归出各构件响应均直线与方差。图 4 和表 2 为响应云图及线性回归数据。

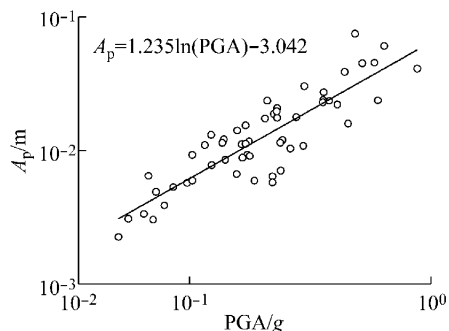
2.5 损伤指标及其极限状态

大量震害调查结果表明,落梁破坏、支座破坏、桥台破坏和墩柱破坏都会导致结构系统失效,落梁发生在支座破坏之后,故本文考虑支座、桥台和墩柱

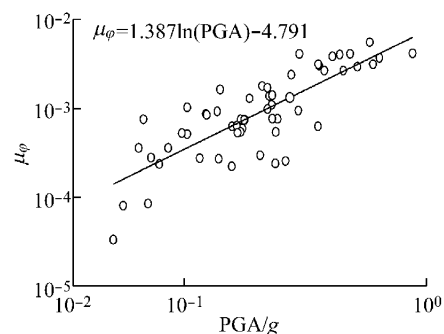
表 2 各构件的概率地震需求模型

Tab.2 Probabilistic seismic demand models for component responses

构件	线性拟合	R^2	$\beta D/I_M$
桥台变形-被动, A_p/m	$1.235\ln(\text{PGA}) - 3.042$	0.89	0.45
桥台变形-主动, A_a/m	$1.065\ln(\text{PGA}) - 2.647$	0.82	0.40
桥墩曲率延性, μ_ϕ	$1.387\ln(\text{PGA}) - 4.791$	0.88	0.68
橡胶支座位移, LRB/m	$1.051\ln(\text{PGA}) - 1.933$	0.84	0.42
滑动支座位移, SLB/m	$0.922\ln(\text{PGA}) - 1.861$	0.86	0.50



a 桥台变形-被动



b 桥墩曲率延性

图 4 概率需求地震模型

Fig.4 Probabilistic seismic demand models

这 3 种构件破坏形式^[13]。Hwang 等^[15]的研究表明,桥梁结构的破坏过程可用 4 种状态来描述:轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤。Nielson^[20]利用贝叶斯方法(Bayesian approach)结合了物理定义(physics-based approach)和描述定义(descriptive approach),并考虑损伤状态的变异性,得到各个构件的损伤均值和变异系数,详见表 3。N/A 表示该种损伤不会对桥梁结构的正常运行造成长期的破坏,因此在计算该损伤体系易损曲线时不考虑该构件^[25]。

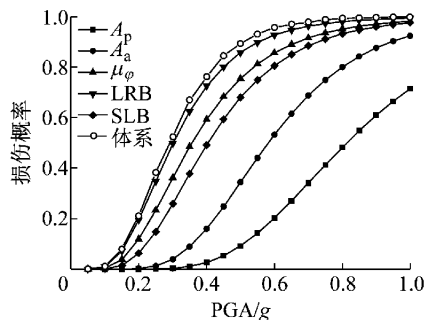
2.6 构件易损性曲线

利用式(5)能够计算出各个构件的地震易损性曲线,从图 5 中可以看出,在轻微损伤和中等损伤状态下,铅芯橡胶支座是桥梁结构最易损构件,最不易破坏构件是桥台,滑动摩擦支座和桥墩介于中间。

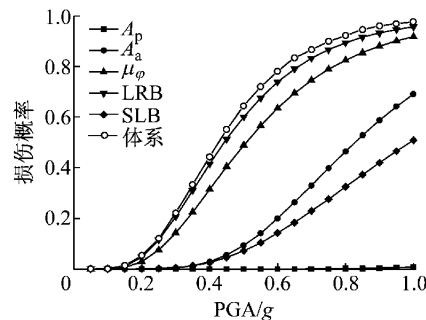
表3 构件极限状态的均值和变异系数

Tab.3 Medians and dispersions for bridge component limit states

构件	轻微损伤		中等损伤		严重损伤		完全损伤	
	S_c	β_c	S_c	β_c	S_c	β_c	S_c	β_c
桥台变形-被动, A_p /mm	37.0	0.46	146.00	0.46	N/A	N/A	N/A	N/A
桥台变形-主动, A_a /mm	9.80	0.70	37.90	0.90	77.20	0.85	N/A	N/A
桥墩曲率延性, μ_φ	1.29	0.59	2.10	0.51	3.52	0.64	5.24	0.65
橡胶支座位移, LRB/mm	6.00	0.25	20.00	0.25	40.00	0.47	187.00	0.65
滑动支座位移, SLB/mm	37.40	0.60	104.00	0.55	136.00	0.59	187.00	0.65



a 轻微损伤



b 中等损伤

图5 构件和体系易损性曲线

Fig.5 Fragility curves for component and bridge system

2.7 体系易损性曲线

利用各个构件地震响应的联合概率分布和极限状态通过蒙特卡洛抽样计算得到体系易损性曲线。首先计算得到各个构件地震响应的协方差矩阵,见表4;其次对各个构件的地震需求和能力进行样本抽样,取样本数 $N_s = 10^5$;对每个PGA,需求大于能力的样本数记为 n ,对于该PGA下结构体系的失效概率 $P = n/N_s$;对于所有的PGA重复上一步骤,可以计算得到4个损伤状态的易损性曲线,见图5。可以看出,地震作用下结构系统比单个构件更容易遭受地震破坏,仅用单个构件(比如桥墩)的易损性来评估桥梁结构的易损性往往高估了结构的抗震能力。

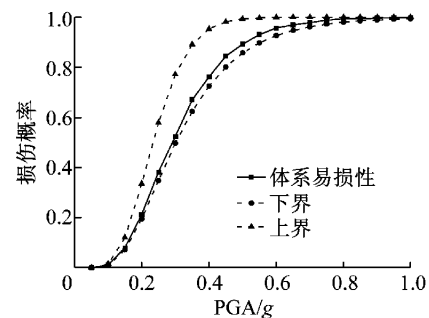
利用式(8)计算出桥梁结构体系易损性曲线的上下界,上界为假设各构件地震响应完全不相关,下界为假设各构件地震响应完全相关。从图6可以看到,真实的考虑构件地震响应相关性的结构体系易

损性曲线介于上下界之间,上下界相对于真实易损性曲线的最大误差可以到达20%。

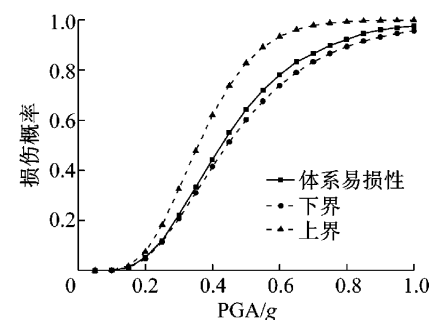
表4 各构件地震响应的协方差矩阵

Tab.4 Covariance matrix of components seismic response

	A_p	A_a	μ_φ	LRB	SLB
A_p	0.196	0.142	0.115	0.081	0.049
A_a	0.142	0.155	0.102	0.072	0.060
μ_φ	0.115	0.102	0.444	0.320	0.251
LRB	0.081	0.072	0.320	0.240	0.188
SLB	0.049	0.060	0.251	0.188	0.171



a 轻微损伤



b 中等损伤

图6 体系易损性曲线上下界

Fig.6 Bridge and system fragility bounds

3 结论

(1) 对于3跨连续梁桥,地震作用下桥梁结构作为一个体系比任何一个单独构件都要容易损伤。

(2) 考虑构件地震响应相关性得到的体系易损性曲线介于上下界之间,通过一次二阶矩得到上下

界的最大误差可以达到20%,显然用此体系易损性曲线来进行地震风险评估更为准确。

参考文献:

- [1] Choi E S, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(2): 187.
- [2] Padgett J E, DesRoches R. Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008, 37(8): 1157.
- [3] Basoz N I, Kiremidjian A S, King S A, *et al.* Statistical analysis of bridge damage data from the 1994 Northridge, CA, Earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 1999, 15(1): 25.
- [4] Shinozuka M, Feng M Q, Lee J, *et al.* Statistical analysis of fragility curves [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2000, 126(12): 1224.
- [5] Zhang J, Huo Y L. Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(8): 1648.
- [6] Hwang H, Jernigan J, Lin Y. Evaluation of seismic damage to Memphis bridges and highway systems [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2000, 5(4): 322.
- [7] Shinozuka M, Feng M Q, Kim H K, *et al.* Nonlinear static procedure for fragility curve development [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2000, 126(12): 1287.
- [8] Karim K R and Yamazaki F. A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32(10): 1603.
- [9] 张菊辉. 基于数值模拟的规则梁桥墩柱的地震易损性分析 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
ZHANG Juhui. Study on seismic vulnerability analysis of normal beam bridge piers based on numerical simulation [D]. Shanghai, Tongji University, 2006.
- [10] 王建民, 王国亮, 聂建国, 等. 基于概率的桥梁结构地震危害性分析 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(11): 86.
WANG Jianmin, WANG Guoliang, NIE Jianguo, *et al.* Probability based seismic risk analysis of bridge structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(11): 86.
- [11] 焦驰宇. 基于性能的大跨斜拉桥地震易损性分析 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
JIAO Chiyu. Performance based seismic fragility analysis of long-span cable-stayed bridges [D]. Shanghai: Tongji University 2008.
- [12] 庞于涛, 袁万城, 党新志, 等. 考虑材料劣变过程的桥梁地震易损性分析 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(3): 348.
PANG Yutao, YUAN Wancheng, DANG Xinshi, *et al.* Stochastic fragility analysis of bridges with a consideration of material deterioration [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(3): 348.
- [13] 李立峰, 吴文朋, 黄佳梅, 等. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(10): 152.
LI Lifeng, WU Wenpeng, HUANG Jiamei, *et al.* Study on system vulnerability of medium span reinforced concrete continuous girder bridge under earthquake excitation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(10): 152.
- [14] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, *et al.* Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, 128(4): 526.
- [15] Hwang H, Liu J B, Chiu Y H. Seismic fragility analysis of highway bridges [R]. Memphis: Center for Earthquake Research and Information, The University of Memphis, 2001.
- [16] Mackie K R, Stojadinovic B. R-Factor parameterized bridge damage fragility curves [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, 12(4): 500.
- [17] Mackie K R, Stojadinović B. Fragility basis for California highway overpass bridge seismic decision making [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2005.
- [18] Nielson B G, DesRoches R. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007, 36(6): 823.
- [19] Kwon O S, Elnashai A S. Fragility analysis of a highway overcrossing bridge with consideration of soil-structure interactions [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2010, 6(1/2): 159.
- [20] Nielson B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [21] Caltrans. Caltrans Structures Seismic Design References [S]. Sacramento, CA: California Department of Transportation, 1990.
- [22] Choi E. Seismic analysis and retrofit of mid-America bridges [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2002.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Ministry of Transport of PRC. JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [24] Pan Y, Agrawal A K, Ghosh M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York state [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, 12(6): 689.
- [25] Padgett J E, Ghosh J, Duenas-Orsorio L. *et al.* Effects of liquefiable soil and bridge modelling parameters on the seismic reliability of critical structural components [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9(1): 59.
- [26] 中华人民共和国交通部. GB/T 50283—1999 公路工程结构可靠度设计统一标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
MOC of China. GB/T 50283—1999 Unified standard for reliability design of highway engineering structures [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [27] Mackie K, Stojadinović B. Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007, 36(13): 1953.
- [28] Padgett J E, Nielson B G, DesRoches R. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008, 37(5): 711.