

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.05.011

桥梁复合随机地震易损性分析方法研究及应用

冯清海

(中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 影响桥梁地震安全的不仅是地震强度, 还包括桥梁结构材料强度、结构尺寸, 以及其离散分布特征等, 这些因素也不是唯一确定的, 而是随机的。传统的桥梁地震易损性分析方法已无法满足要求, 需要充分考虑地震、材料等因素的随机性。为了更加全面而充分地确定在多种不确定因素综合影响下, 桥梁结构的地震易损性分布及影响规律, 采用全概率方法进行桥梁地震易损性分析。针对目前结构地震易损性分析方法的不足, 引入人工神经网络和蒙特卡罗技术, 采用动量增量分析方法和推倒分析方法, 同时考虑了桥梁结构参数的随机性和地震动输入的随机性, 提出了桥梁复合随机地震易损性分析方法。主要分析步骤为: 首先, 分别对随机桥梁结构的抗力和随机地震响应进行特征统计, 在此基础上, 再应用蒙特卡罗和神经网络技术对桥梁结构在不同损伤状态下的超越概率进行统计, 绘制桥梁结构复合地震易损性曲线。复合随机地震易损性分析方法从全概率的角度比较全面地反映了桥梁结构的地震易损性, 并具有以下特点: (1) 采用神经网络仿真结构随机性的非线性分析, 大大提高了计算效率; (2) 采用充足地震波进行动量增量分析, 从而考虑了地震强度的随机性; (3) 采用蒙特卡罗随机抽样分析方法, 避免了求解析解的困难。

关键词: 桥梁工程; 复合随机地震易损性; 人工神经网络; 桥梁地震易损性; 增量动力分析

中图分类号: TU311.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 05-0078-06

Study and Application of Method for Analysing Compound Stochastic Seismic Vulnerability of Bridge

FENG Qing-hai

(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Factors influences the seismic safety of bridges are not only the earthquake intensity, but also material strength, size and discrete distribution characteristics of bridge structure, these factors are not uniquely deterministic but random. Traditional bridge seismic vulnerability analysis method is unable to meet the requirements, which need to give full consideration to the randomness of the factors such as earthquake and material. In order to more comprehensively and fully determine the vulnerability distribution and the influence rule of bridge structure under the comprehensive influence of uncertain factors, aiming at the shortcomings of the current structure seismic vulnerability analysis method, a method of compound stochastic seismic vulnerability analysis based on incremental dynamic analysis and pushover analysis, which adopts ANN and MC technology, is presented considering the randomness of structural parameters and seismic response. The analysis steps are: (1) first, the characteristic statistics of the resistance and the random seismic response of the random bridge structure are carried out; (2) on this basis, MC and ANN technology are applied to carry out statistics of the transcendence probability of the bridge structure under different damage states, and the composite seismic vulnerability curve of the bridge structure is drawn. The method of composite random seismic vulnerability analysis reflects the seismic vulnerability of bridge structure comprehensively from the perspective of full probability, and has the following characteristics: (1) the

收稿日期: 2017-12-22

作者简介: 冯清海 (1980-), 男, 湖北钟祥人, 博士, 高级工程师. (fgcfqh@163.com)

nonlinear analysis of the structure randomness by neural network simulation greatly improved the calculation efficiency; (2) the momentum increment analysis by sufficient seismic wave considered the randomness of earthquake intensity; (3) MC random sampling analysis method avoided the difficulty of finding analytic solution.

Key words: bridge engineering; compound stochastic seismic vulnerability; artificial neural network (ANN); bridge seismic vulnerability; incremental dynamic analysis

0 引言

桥梁在受到地震动的作用时,除了地震动本身的不确定性外,结构也存在很大的随机性,如材料强度、刚度的随机性、边界条件的不确定性等。因此,桥梁结构地震易损性实质上是地震随机性和桥梁结构随机性共同影响的结果。国内外应用比较多的关于桥梁地震易损性分析方法主要包括经验易损性曲线^[1-5]、理论易损性曲线^[6-8]等,这些分析方法大多数都仅考虑了地震动的随机性或者结构的随机性,其主要原因在于,对于一个复杂的结构体系,其得到损伤超越概率的解析解非常困难。而采用随机模拟方法,为了能同时考虑结构自身的随机性和地震强度的随机性,计算较困难且工作量大,效率低下等。为了简化计算,Hwang^[7]、Cornell^[8]分别采用假定结构地震响应为正态分布等方法进行随机抽样,但这并不能反映桥梁结构地震响应的真实分布等,结构自身的随机性也无从考虑。

鉴于此,在传统的结构地震易损性分析方法的基础上,引入 ANN (Artificial Neural Network, ANN)^[9]和 MC (Monte Carlo, MC)^[10]技术,结合 IDA (Incremental Dynamic Analysis, IDA)^[11]和 PUSHOVER 分析方法,能够同时考虑桥梁结构的随机性和地震动的随机性,发展了桥梁复合随机地震

易损性分析方法。详细阐述了该方法基本理论及应用过程,比较全面地从全概率的角度反映出桥梁结构的地震易损性,为桥梁结构地震易损性分析开拓了新的思路。

1 桥梁结构复合随机地震易损性分析方法的基本思路

桥梁结构的地震损伤状态受到桥梁结构本身以及随机地震作用等诸多不确定性因素的影响,因此,必须同时考虑桥梁结构本身的随机性和地震动的随机性。

桥梁结构自身的能力可以用抗力函数 $R(M, G, C, \dots)$ 来表示,其中 M, G, C 等分别表示结构的材料、几何尺寸、计算模式等随机变量。同时,在随机地震动作用下,桥梁结构的响应也可以用响应函数 $P(IM)$ 来表示,其中 IM 为地震动输入的随机强度。那么,桥梁结构在随机地震作用下的损伤指标即为结构能力与结构地震响应的综合影响所决定的。可以表示为:

$$DI = f(R(M, G, C, \dots), P(IM)), \quad (1)$$

式中 DI 为一个随机性的损伤指标。

这样,桥梁结构的地震损伤计算就明确为桥梁结构能力与地震响应的分布特征分析及其复合分布的计算。桥梁结构的复合随机地震易损性分析也即在不同地震动输入强度下的桥梁结构损伤指标复合概率统计。其分析流程如图1所示。

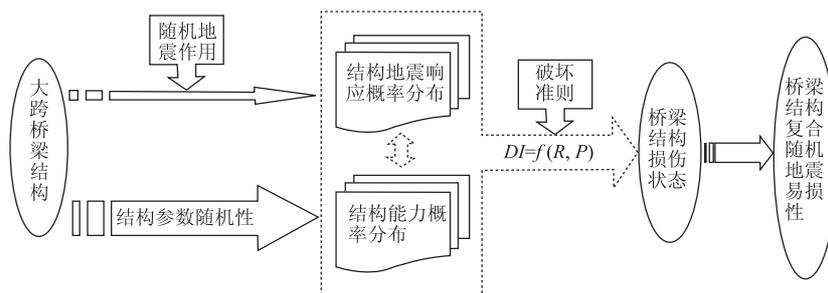


图1 桥梁复合随机地震易损性分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of compound stochastic seismic vulnerability analysis of bridge

2 桥梁结构抗震能力概率统计特征和随机地震响应概率统计特征

2.1 桥梁结构抗震能力的概率统计特征

桥梁结构的抗震能力受到诸多随机影响因素

或不确定性因素的影响,如:材料参数的随机性、几何参数的随机性等。采用 PUSHOVER、ANN 以及 MC 相结合的分析方法,对桥梁结构的抗震能力的概率统计特征进行分析,其分析步骤如下:

(1) 确定影响桥梁结构抗震能力的主要因素及其概率分布特征。

(2) 采用正交设计方法对不同的影响因素进行分析组合, 形成 a 个有限元分析模型。同时, 随机产生 b 个随机有限元模型; 采用 PUSHOVER 方法对每个有限元模型进行分析, 获取 $a + b$ 组桥梁结构抗力。

(3) 建立 RBF 神经网络模型, 并用其中的 a 组分析数据进行神经网络训练, 用另外 b 组分析数据对 RBF 神经网络进行检验, 直至网络训练达到接受误差范围。

(4) 应用蒙特卡罗方法产生 M 组随机数据作为桥梁结构的模型参数, 并输入到训练成熟的 RBF 神经网络中进行仿真, 得到 M 组桥梁结构的抗力。

(5) 对 M 组桥梁结构的抗力性能点进行概率统计特征分析。

2.2 桥梁结构随机地震响应的概率统计特征分析

地震是一种随机性极强的外部作用, 地震发生时间及强度表现出很大的不确定性。因此, 对于桥梁结构的地震响应有必要从概率的角度去分析。同时, 根据文献 [12] 的结论, 地震随机性对结构动力响应的的影响比结构本身的随机性对结构的动力响应的的影响要大许多。因此, 在对桥梁结构随机地震响应特征进行统计时, 没有考虑结构的随机性, 其分析步骤如下:

(1) 建立分析模型, 确定地震输入。建立桥梁结构的有限元分析模型, 并根据场地条件选取多条不同震级的地震波记录。

(2) 进行 IDA 分析, 获取地震响应。对桥梁结构进行 IDA 分析, 获取每条地震在每个时程步时的结构地震响应。

(3) 结构地震响应统计分析。对所得到的桥梁结构地震响应进行概率统计特征分析, 从而确定在不同地震波输入强度下的桥梁结构地震响应的统计特征。

3 桥梁结构复合随机地震易损性分析方法的基本步骤

有了前面的理论基础, 以及桥梁结构的抗震能力分布和随机地震响应分布, 采用蒙特卡罗随机抽样和人工神经网络仿真相结合的方法, 对桥梁结构进行复合随机地震易损性分析, 其分析步骤如下:

(1) 首先根据前面叙述的方法得到桥梁结构抗力和随机地震响应的概率统计特征;

(2) 确定地震动输入强度, 从而确定在此强度下的桥梁结构随机地震响应的统计特征;

(3) 应用蒙特卡罗对随机抗震能力和随机地震响应的概率特征进行抽样, 并用神经网络进行仿真得到结构的抗力;

(4) 确定桥梁结构破坏准则, 并分析每组抽样样本的桥梁结构在全概率条件下的损伤指标;

(5) 根据第 (4) 步分析得到的损伤指标, 统计桥梁结构不同损伤状态下的超越概率;

(6) 当地震输入强度达到预期最大值时, 进入到下一步, 否则, 返回第 (2) 步, 改变地震输入强度重新进行分析;

(7) 绘制桥梁结构复合随机地震易损性曲线。

4 实例分析

4.1 模型简介

某连续梁桥桥型图如图 2 所示, 材料和几何参数及其分布如表 1 所示。场地类型为 III 类场地。采用 OpenSees 软件进行计算。根据文献 [13] 附录 A 中所提供的符合中国场地类型的地震波, 从 PEER 数据库中选取了 56 条地震波, 且各条地震波的震中距均大于 10 km, 地震持时均取为 30 s。

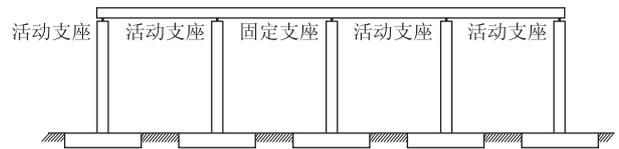


图 2 连续梁桥模型

Fig. 2 Continuous beam bridge model

表 1 桥梁结构模型参数的统计特征^[14-16]

Tab. 1 Statistical characteristics of bridge structure model parameters

随机变量	分布类型	平均值	变异系数
墩柱直径/m	正态分布	2.00	0.02
C30 的抗压强度/MPa	正态分布	26.1	0.17
I 级钢筋屈服强度/MPa	对数正态分布	243.8	0.09
II 级钢筋屈服强度/MPa	对数正态分布	384.8	0.07
II 级钢筋弹性模量/MPa	正态分布	2.0E + 05	0.04
约束混凝土抗压强度/MPa	正态分布	28.0	0.17

4.2 结构破坏准则的确定^[14]

结构破坏准则采用变形与能量双重破坏准则。其表达式为:

$$DI = f(\delta_m, \delta_u, Q_y, \int dE_h, \beta) = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u Q_y} \int dE_h, \quad (2)$$

式中, DI 为系统损伤指标; δ_m 和 δ_u 分别为地震动激起的最大位移和系统的极限位移; $\int dE_h$ 为系统在地震动时程内总的滞回耗能; Q_y 为系统的屈服强度; β 为系统参数, 也即耗能因子, β 的取值一般在 0 ~ 0.85 之间变化, 均值在 0.10 ~ 0.15 左右。

破坏准则中性能指标的量化采用 Park, Ang 和 Wen^[17-18] 所提出的破坏等级、损伤特征与损伤指标 DI 之间的关系, 如表 2 所示。

4.3 结构抗力的概率统计分析

选取 4 个主要的随机变量: 墩的直径、普通混凝土抗压强度、纵向钢筋屈服强度以及纵向钢筋弹性模量。采用的是 $L_{25}(5^6)$ 正交设计表, 构造 RBF 神

表 2 损伤状态的定性描述及损伤指标

Tab. 2 Qualitative description of damage state and damage indicators

破坏状态	损伤特征	Park - Ang 指标 DI
1 无破坏	仅在局部产生微小裂缝	$0.1 \leq DI < 0.25$
2 轻微破坏	微小裂缝分布广泛	$0.1 \leq DI < 0.25$
3 中等破坏	严重开裂或局部保护层剥落	$0.25 \leq DDI < 0.4$
4 严重破坏	混凝土被压碎或纵筋失效	$0.4 \leq DI < 0.8$
5 倒塌	—	$DI \geq 0.8$

经网络的训练样本集, 共 25 个训练样本。利用蒙特卡罗方法随机产生 15 组样本作为检验样本。建立墩的有限元分析模型, 并进行 PUSHOVER 分析。分别对墩顶的极限位移和墩底的屈服剪力进行 ANN 训练和仿真。限于篇幅, 在此仅给出墩顶极限位移的 RBF 网络训练与检验结果, 如表 3 所示。

表 3 RBF 神经网络训练与检验结果 (墩顶极限位移)

Tab. 3 Result for RBF NN training and test (limit displacement of pier top)

样本	样本编号	有限元分析结果/m	RBF 神经网络仿真结果/m	相对误差/%	样本	样本编号	有限元分析结果/m	RBF 神经网络仿真结果/m	相对误差/%
训练 样本	1	0.253	0.249	-1.47	训练 样本	21	0.257	0.252	-1.96
	2	0.242	0.243	0.44		22	0.261	0.259	-0.67
	3	0.234	0.233	-0.48		23	0.234	0.235	0.63
	4	0.220	0.220	-0.15		24	0.226	0.226	0.11
	5	0.210	0.208	-1.00		25	0.216	0.214	-0.77
	6	0.255	0.258	1.30	检验 样本	26	0.229	0.231	1.26
	7	0.244	0.248	1.66		27	0.235	0.239	1.59
	8	0.236	0.235	-0.59		28	0.225	0.228	1.30
	9	0.210	0.212	1.14		29	0.253	0.254	0.63
	10	0.216	0.220	1.66		30	0.230	0.231	0.43
	11	0.259	0.262	1.10		31	0.236	0.240	1.41
	12	0.238	0.236	-0.47		32	0.229	0.230	0.09
	13	0.228	0.226	-1.15		33	0.221	0.222	0.38
	14	0.231	0.233	1.04		34	0.236	0.236	0.17
	15	0.221	0.222	0.09		35	0.221	0.224	1.44
	16	0.252	0.251	-0.47		36	0.250	0.249	-0.40
	17	0.243	0.240	-1.12		37	0.211	0.212	0.57
	18	0.245	0.247	1.08		38	0.224	0.226	0.62
	19	0.237	0.235	-0.59		39	0.233	0.237	1.73
	20	0.211	0.213	0.89		40	0.253	0.252	-0.52

注: 相对误差 = (RBF 神经网络仿真结果 - 有限元分析结果) / 有限元分析结果 × 100。

从表 3 中可以看出, 对墩顶极限位移的 RBF 神经网络训练非常成功, 其训练误差和检验误差均在 5% 以内。这充分说明, 上述两个 RBF 神经网络都能很好地

模拟有限元分析, 从而快速而准确地得到墩顶的极限位移和墩底的屈服剪力。进而, 可以用蒙特卡罗与 RBF 相结合, 得到大量随机的墩顶极限位移和墩底的屈服剪力。

4.4 结构随机地震响应的概率统计分析

对有限元模型作 IDA 分析, 并以 PGA 的自然对数 $\ln PGA$ 为横坐标轴, 以墩顶最大位移响应的自然对数 $\ln D$ 和滞回耗能的自然对数 $\ln E$ 为纵坐标绘制墩的 IDA 曲线, 分别如图 3 所示。

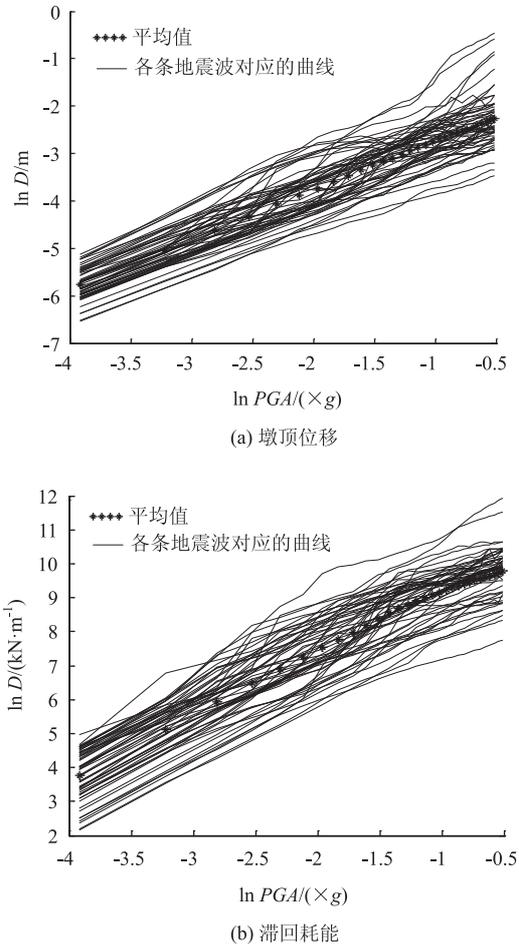


图 3 双对数 IDA 曲线

Fig. 3 Double logarithmic IDA curves

$\sigma^2(\ln D)$ 用分段函数表示为:

$$\sigma^2 = f(\ln PGA) = \begin{cases} 0.060 \ln PGA + 0.346 & 0.02g \leq \ln PGA < 0.16g \\ -0.066 \ln PGA + 0.114 & 0.16g \leq \ln PGA < 0.30g, \\ 0.266 \ln PGA + 0.514 & 0.30g \leq \ln PGA < 0.60g \end{cases} \quad (5)$$

$\sigma^2(\ln E)$ 用分段函数表示为:

$$\sigma^2 = f(\ln PGA) = \begin{cases} -0.014 \ln PGA + 0.802 & 0.02g \leq \ln PGA < 0.04g \\ 0.249 \ln PGA + 1.337 & 0.04g \leq \ln PGA < 0.10g, \\ -0.186 \ln PGA + 0.335 & 0.10g \leq \ln PGA < 0.36g \\ 0.051 \ln PGA + 0.577 & 0.36g \leq \ln PGA < 0.60g \end{cases} \quad (6)$$

因此, 墩顶位移响应 D 和墩的滞回耗能 E 可分别表示为:

$$D = e^{\varepsilon(\cdot)}, \quad (7)$$

$$E = e^{\varepsilon(\cdot)}, \quad (8)$$

通过回归分析, 可以得到 IDA 曲线在自然对数下, $\ln D$ 和 $\ln E$ 与 $\ln PGA$ 的关系可分别表达为:

$$\ln D = 1.032 \times \ln PGA - 2.260, \quad (3)$$

$$\ln E = 1.768 \times \ln PGA + 9.776, \quad (4)$$

进而, 对 $\ln D$ 和 $\ln E$ 分布进行概率统计分析。限于篇幅, 在此仅给出统计结果, 对于确定的 $\ln PGA$, 可近似认为 $\ln D$ 和 $\ln E$ 呈正态分布。其方差分布如图 4 和图 5 所示。

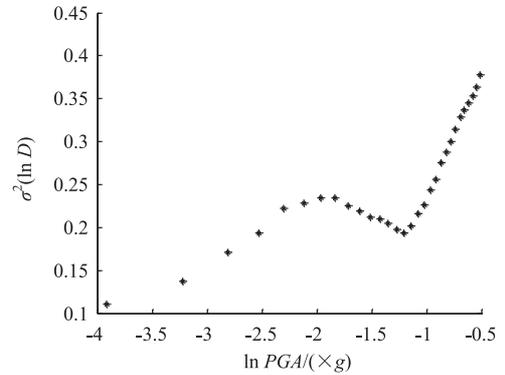


图 4 $\sigma^2(\ln D)$ 随 $\ln PGA$ 变化曲线图

Fig. 4 Curve of $\sigma^2(\ln D)$ varying with $\ln PGA$

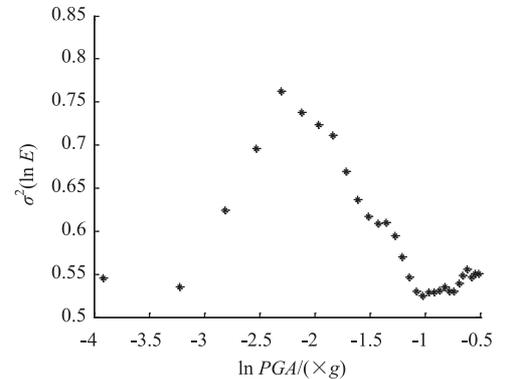


图 5 $\sigma^2(\ln E)$ 随 $\ln PGA$ 变化曲线图

Fig. 5 Curve of $\sigma^2(\ln E)$ varying with $\ln PGA$

式中, e 为自然数; $\varepsilon(\cdot)$ 为正态分布函数; 均值与方差如前文所示。

4.5 结构复合随机地震易损性曲线

按照前文的分析步骤, 并根据本研究中的连续梁桥结构实际, 取 $\beta = 0.2$ 。应用蒙特卡罗法, 随机产生 5 万组对应桥梁结构随机参数对结构的复合随机地震易损性进行分析, 绘制易损性曲线如图 6 所示。图 6 中 4 条易损性曲线将桥梁的损伤状况分为 5 个区间, 分别代表无破坏、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌区间。从图 6 中能够很容易地看出桥梁结构在复合随机地震作用下, 不同损伤状况的超越概率。

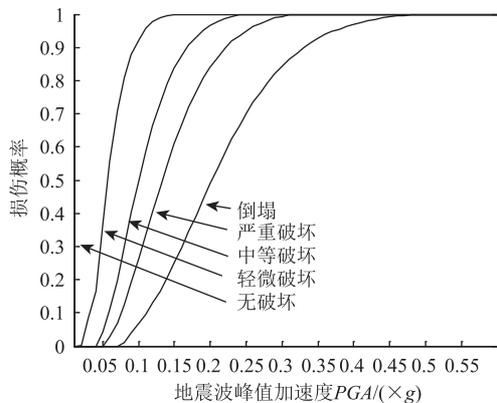


图 6 连续梁桥复合随机地震易损性曲线

Fig. 6 Compound stochastic seismic vulnerability curves for continuous girder bridge

5 结论

在传统结构地震易损性分析方法的基础之上, 采用 ANN-MC 技术结合 IDA 和 PUSHOVER 分析方法, 同时考虑了地震随机性与结构自身的随机性, 发展了桥梁结构复合随机地震易损性分析方法。此方法在比较全面地从全概率的角度反映出桥梁结构的地震易损性的同时, 降低了分析难度, 提高了计算效率, 为桥梁结构地震易损性分析开拓了新的思路。

连续梁桥随机地震作用下, 取对数后的墩顶位移响应和墩的滞回耗能在特定地震强度下呈正态分布, 其均值与 $\ln PGA$ 呈线性关系, 但其方差随着地震强度的对数值呈非线性关系。当 PGA 较小时, 墩顶位移离散性较小; 而当 PGA 较大时, 墩的滞回耗能离散性较小。

参考文献:

References:

[1] 刘震. 中承式钢管混凝土拱桥地震易损性分析 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (8): 72-79, 88.

LIU Zhen. Analysis on Seismic Fragility of Half-through CFST Arch Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (8): 72-79, 88.

[2] 葛胜锦, 熊治华, 翟敏刚, 等. 中小跨径混凝土连续梁桥地震易损性研究 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (7): 60-65.

GE Sheng-jin, XIONG Zhi-hua, ZHAI Min-gang, et al. Research on Seismic Fragility of Medium and Small Sized Concrete Continuous Girder Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (7): 60-65.

[3] 陈力波, 郑凯锋, 栗怀广, 等. 基于扩展增量动力分析的桥梁地震易损性研究 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (9): 43-49, 57.

CHEN Li-bo, ZHENG Kai-feng, LI Huai-guang, et al. Research of Bridge Seismic Vulnerability Based on Extended Incremental Dynamic Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (9): 43-49, 57.

[4] SHINOZUKA M, FENG M Q, LEE J, et al. Statistical Analysis of Fragility Curves [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 (12): 1224-1231.

[5] KIREMIDJIAN A A, BOSOZ N. Evaluation of Bridge Damage Data from Recent Earthquakes [J]. Bulletin NCEEER, 1997, 11 (2): 1-7.

[6] SHINOZUKA M, FENG M Q, KIM H, et al. Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 (12): 1287-1295.

[7] HWANG H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (6): 47-51.

HWANG H, LIU Jing-bo. Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (6): 47-51.

[8] CORNELL C A, FATEMEH J, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (4): 526-532.

[9] 冯清海, 袁万城. BP 神经网络和 RBF 神经网络在墩柱抗震性能评估中的比较研究 [J]. 结构工程师, 2007, 23 (5): 41-47, 69.

FENG Qing-hai, YUAN Wan-cheng. Comparative Study on BP Neural Network and RBF Neural Network in Performance Evaluation of Seismic Resistance for Pier Columns [J]. Structural Engineers, 2007, 23 (5): 41-47, 69.

- [13] 孙明玲, 杨峰, 贝登荣. 基于交通波动理论的排队消散时效分析 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (10): 112 - 116.
SUN Ming-ling, YANG Feng, BEI Deng-rong. Analysis of Queue Dissipation Time Effect Based on Traffic Wave Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (10): 112 - 116.
- [14] 刘伟铭, 管丽萍, 尹湘源. 基于多元回归分析的事件持续时间预测 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (11): 126 - 129.
LIU Wei-ming, GUAN Li-ping, YIN Xiang-yuan. Prediction of Incident Duration Based on Multiple Regression Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 126 - 129.
- [15] 臧金蕊, 宋国华, 万涛, 等. 交通事件下快速路拥堵蔓延消散时空范围模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (5): 179 - 185.
ZANG Jin-rui, SONG Guo-hua, WAN Tao, et al. A Temporal and Spatial Model of Congestion Propagation and Dissipation on Expressway Caused by Traffic Incidents [J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2017, 17 (5): 179 - 185.
- [16] 荣福香, 齐月荣, 蔡琳琳. 基于非参数回归的交通事件影响范围预测 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38 (8): 102 - 103.
RONG Fu-xiang, QI Yue-rong, CAI Lin-lin. Calculate the Affected Area of Traffic Incident Base on Non-parametric Regression [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2015, 38 (8): 102 - 103.
- [17] 高珍, 柯阿香, 余荣杰, 等. 基于随机生存森林的交通事件持续时间预测 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45 (9): 1304 - 1310.
GAO Zhen, KE A-xiang, YU Rong-jie, et al. Urban Expressway Traffic Incident Duration Prediction Based on Random Survival Forests [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2017, 45 (9): 1304 - 1310.
- [18] 何雅琴, 容煜伦, 柳祖鹏, 等. 基于水波原理的城市突发事件交通影响程度研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (5): 151 - 156.
HE Ya-qin, RONG Yu-lun, LIU Zu-peng, et al. Traffic Influence Degree of Urban Traffic Emergency Based on Water Wave Principle [J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2017, 17 (5): 151 - 156.
- [19] 王玮, 过秀成. 交通工程学 [M]. 2版. 南京: 东南大学出版社, 2011.
WANG Wei, GUO Xiu-cheng. Traffic Engineering [M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2011.
- (上接第83页)
- [10] 肖刚, 李天柁. 系统可靠性分析中的蒙特卡罗方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
XIAO Gang, LI Tian-tuo. Monte Carlo Method for System Reliability Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [11] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental Dynamic Analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 491 - 514.
- [12] 胡勃. 桥梁抗震概率性设计方法的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000.
HU Bo. Study on Probabilistic Seismic Design Method for Bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2000.
- [13] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
FAN Li-chu, ZHUO Wei-dong. Seismic Design for Ductility of Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [14] 李继华, 林忠民, 李明顺, 等. 建筑结构概率极限状态设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
LI Ji-hua, LIN Zhong-min, LI Ming-shun, et al. Probabilistic Limit State Design of Building Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990.
- [15] 刘洪兵, 王君杰, 孙利民, 等. 钢筋混凝土桥墩截面能力的概率分析 [J]. 工程力学, 2005, 12 (6): 104 - 111.
LIU Hong-bin, WANG Jun-jie, SUN Li-min, et al. Probability Characteristics of Cross-section Capability of RC Piers [J]. Engineering Mechanics, 2005, 12 (6): 104 - 111.
- [16] HONG H P, ZHOU W. Reliability Evaluation of RC Column [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125 (7): 784 - 790.
- [17] 冯清海. 特大桥梁地震易损性与风险概率分析 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
FENG Qing-hai. Study Analysis on Seismic Vulnerability and Risk Probability of Super-large Bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] PARK Y J, ANG A H, WEN Y K. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111 (4): 722 - 739.