

陆进保. 主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法[J]. 华南地震, 2018, 38 (2): 29-34. [LU Jinbao. Seismic Disaster Loss Assessment Method of Concrete Bridge Under Main Aftershock[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2):29-34]

# 主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法

陆进保

(乌鲁木齐职业大学应用工程学院, 乌鲁木齐市 830002)

**摘要:** 地震会导致重大的经济损失及人员伤亡, 对混凝土桥梁造成的损失易较为严重, 因此, 开展混凝土桥梁地震灾害损失评估的研究具有重要的现实意义。传统评估方法主要用于变量衡量混凝土桥梁结构在主余震作用下, 混凝土桥梁的响应和性态水平, 但忽略了余震作用对混凝土桥梁的影响, 导致对地震灾害损失评估耗时大、不准确的问题。在主余震作用下, 提出基于地震灾害损失分解的混凝土桥梁地震灾害损失评估方法。采用非线性动力分析确定易损性函数, 得到易损性曲线图的基础上, 基于参数对数正态分布模型, 分析混凝土桥梁概率地震需求; 以经济损失及人口损失为指标, 进行分解评估的基础上, 建立混凝土桥梁地震灾害损失评估模型, 达到评估混凝土桥梁地震灾害损失的目的。实验结果表明: 采用改进方法进行混凝土桥梁地震损伤评估时, 其评估误差率要优于传统方法, 评估结果更加接近实际情况, 具有一定的优势。

**关键词:** 主余震; 混凝土桥梁; 地震; 灾害; 损失; 评估

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2018)02-0029-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.005

## Seismic Disaster Loss Assessment Method of Concrete Bridge Under Main Aftershock

LU Jinbao

(College of Applied Engineering, Urumqi vocational university, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** The earthquake will cause significant economic losses and casualties, and the damage to the concrete bridge is more serious. Therefore, it is of great practical significance to carry out the research on the loss assessment of the earthquake disaster of the concrete bridge. The traditional evaluation method mainly uses the easily accepted variables to measure the response and state level of the concrete bridge structure under mainshock and aftershocks. However, the effect of aftershocks on concrete bridge is ignored, which leads to the time-consuming and inaccurate problem during the earthquake disaster loss assessment. Under the effect of the main aftershock, the paper proposes the seismic disaster loss assessment method for concrete bridge based on the decomposition of earthquake disaster loss. The paper determines the vulnerability function by using nonlinear dynamic analysis, and analyzes the probabilistic seismic demand of concrete bridges basing on the vulnerability

收稿日期: 2017-07-02

作者简介: 陆进保(1982-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事建筑工程教学工作, 建筑工程设计、施工工作。

E-mail: lujinbao@sohu.com.

curve and the parameter lognormal distribution model. Taking the economic loss and population loss as indicators, and based on the decomposition assessment, the paper establishes the concrete bridge seismic disaster assessment model to assess the concrete bridge seismic disaster loss. The experimental results show that the evaluation error rate of the improved method is better than that of the traditional method, and the evaluation result is closer to the actual situation, and has certain advantages.

**Keywords:** Main aftershock; Concrete bridge; Earthquake; Disaster; Loss; Evaluation

## 0 引言

作为经济发展必不可少载运工具, 交通运输网络必须保证安全畅通, 在地震发生时可为地震灾区人民供应逃生的安全通道, 震后抢险救灾工作顺利进行也得到了保障<sup>[1-2]</sup>。而桥梁工程作为交通运输网络的关键枢纽, 地震作用下, 桥梁结构自身不仅会受到直接的伤害及损伤, 还会干扰震后抢险救灾通道是否畅通, 同时还会扩大其经济损失<sup>[3]</sup>。混凝土桥梁结构所处自然环境比建筑结构更加恶劣且维护受到影响, 使设计使用寿命缩短, 需要增加混凝土桥梁防震标准<sup>[4]</sup>。地震作为一种偶然的事件, 是不可预测的, 每次地震都会使桥梁出现一定的损失<sup>[5]</sup>。为了将地震灾害损失降低到一定程度, 保证工程质量, 需对混凝土桥梁地震灾害损失进行评估。

传统评估方法主要利用投入产出分析法, 对地震灾害损失进行初步分析<sup>[6]</sup>, 建立了基于 LM-BP 神经网络的地震直接经济损失评估模型<sup>[7]</sup>, 实现对地震灾害损失的评估, 但该方法在对混凝土桥梁地震灾害损失进行评估时, 易受到桥梁建设时间及当日发生地震环境的影响, 存在评估不准确的问题。对此, 提出基于地震灾害损失分解的混凝土桥梁地震灾害损失评估方法。

## 1 混凝土桥梁易损性函数及地震需求分析

### 1.1 混凝土桥梁易损性函数

采用非线性动力分析建立易损性函数, 对混凝土桥梁进行有限元模型, 得到桥梁的地震响应以及地震动参数以后, 采用参数化方法形成地震易损性曲线。在混凝土桥梁易损性函数建立过程中, 混凝土桥梁结构的地震易损性曲线可用结构参数的对数正态累积分布函数进行表示, 则混凝土桥梁结构的失效概率可表达式为:

$$P_f(D \geq C | IM=x) = \Phi \left[ \frac{\ln(x/\theta)}{\beta} \right] \quad (1)$$

式中:  $P_f(D \geq C | IM=x)$  为在  $IM=x$  的主余震作用下混凝土桥梁墩部结构需求响应  $D$  高于其抗震能力  $C$  的概率, 地震动强度参数表示  $IM$ ;  $\Phi[\cdot]$  表示基础正态累积分布函数;  $\theta$  表示混凝土桥梁结构易损性函数均值;  $\beta$  表示混凝土桥梁结构易损性函数标准差。混凝土桥梁结构易损性函数可用一个合理的函数对桥梁结构地震损伤概率和地震动参数的关联性进行表达, 其表现模式是一条连续的曲线, 如图 1 所示:

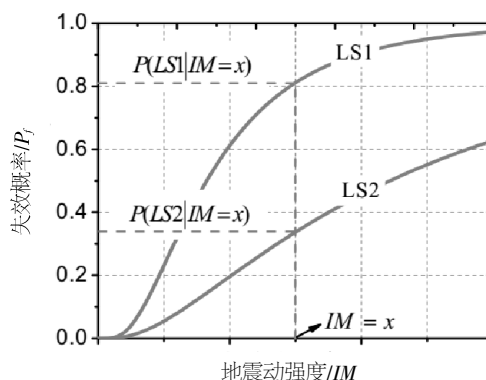


图 1 混凝土桥梁结构地震易损曲线

Fig.1 Seismic vulnerability curve of concrete bridge structure

由此得到混凝土桥梁易损性函数可表示为:

$$P_f(D|IM) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \prod_{i=1}^N P_i^k (1 - P_i) \right] \varphi(x) dx \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为独立的标准正态分布随机变量,  $P_i^k$  为相关有限元模型参数,  $\varphi(x)$  为边缘分布函数。

### 1.2 混凝土桥梁概率地震需求分析

在主余震作用下, 混凝土桥梁结构的概率地震需求分析是评估桥梁在地震灾害损伤评估中的关键环节, 主要以概率地震需求模型进行表示。当地震危险水平一定时, 可通过其概率性对地震需求进行分析, 将桥梁结构响应高于工程需求参数的年频率, 表达式为:

$$\nu_{EDP}(y) = \int_0^x G_{EDPIM}(y|x) d\lambda_{IM}(x) \quad (3)$$

式中:  $\nu_{EDP}(y)$  为混凝土桥梁结构性能的直接指标;  $\int_0^x G_{EDPIM}(y|x)$  为在主余震强度  $IM=x$  时, 混凝土桥梁结构响应超过指定需求值的条件概率;  $\lambda_{IM}(x)$  为地震危险性模型,  $d$  为指定的地震需求水平值。当地震需求响应数据  $\varepsilon$  服从对数正态分布时, 得到其均值与对数标准差为:

$$\eta_\varepsilon = e^{\frac{mean(\ln(\varepsilon))}{\beta_{DIM}}} = 1 \quad (4)$$

$$\sigma \ln(\varepsilon) = \beta_{DIM} \quad (5)$$

式中:  $\beta_{DIM}$  为条件对数标准差。通常情况下  $\beta_{DIM}$  与  $IM$  有关, 可用下式进行计算:

$$\beta_{DIM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(D_i) - \ln(\eta_D)]^2}{n-2}} \quad (6)$$

式中: 第  $i$  次主余震作用下, 混凝土桥梁结构响应峰值表示为  $D_i$ , 响应中  $\eta_D$  的对数平均值为  $\ln(\eta_D)$ 。若混凝土桥梁的结构地震需求符合对数正态分布, 则地震需求  $\eta_D$  和地震动强度参数  $IM$  间需符合如下指数关系:

$$\eta_D(IM) = a(IM)^b \quad (7)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为相应估计参数, 可通过最小二乘回归分析得到。通过上述两个参数进行对数正态分布模型推导, 构建混凝土桥梁结构概率地震需求模型为:

$$P[D > d | IM] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(\eta_D)}{\beta_{DIM}}\right) \quad (8)$$

式中:  $\Phi(\cdot)$  为标准正态累积分布函数;  $d$  为指定的地震需求水平值,  $D$  表示混凝土桥梁结构的地震需求。

## 2 主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估分析

### 2.1 混凝土桥梁地震损失分解评估

在构建混凝土桥梁地震损失评估模型的基础上, 为了提高评估准确度, 进行分解评估, 分别为直接经济损失分解评估、直接经济损失 OEP 曲线分解评估、考虑倒塌与非倒塌的损失分解评估。

#### 2.2.1 经济损失分解评估

依据 PEER 的损失估计理论, 混凝土桥梁地震灾害直接经济损失表达式为:

$$E[DL] = \frac{(1-e^{-\lambda t})}{\lambda} \int_0^\infty E[DL|IM] d\nu(IM) \quad (9)$$

式中:  $t$  为时间,  $\lambda$  为贴现率,  $(1-e^{-\lambda t})/\lambda$  系数接近为 1, 因此在期望年损失估计上不考虑贴现率的影响。

当对混凝土桥梁地震灾害直接经济损失进行不同主余震强度损失分解时, 直接经济损失计算公式如下:

$$E[dl] = \sum_{im=0}^\infty E[DL|IM] \Delta\nu(IM) \quad (10)$$

这里用求和代替式 (18) 中的积分,  $\Delta\nu(IM)$  代替  $d\nu(IM)$  来考虑不同主余震强度下的直接经济损失  $E[DL|IM]$  在  $E[DL]$  中的比重。

主余震强度为  $IM$  时, 对主余震作用下的直接经济损失进行分解计算, 得到结构的期望直接经济损失值为:

$$E[DL]_{im} = E[DL|IM] \Delta\nu(IM) \quad (11)$$

式中:  $E[DL]_{im}$  为直接经济损失。

#### 2.2.2 经济损失 OEP 曲线分解评估

对损失年超越概率(OEP)曲线在主余震强度不同下进行分解, 评估公式如下:

$$\nu(DL > l_i)_{im} = p(DL > l_i | IM) \Delta\nu(IM) \quad (12)$$

式中,  $\nu(DL > l_i)_{im}$  为地震动强度为  $IM$  时, 直接经济损失  $DL$  超越某一特定损失  $l_i$  的概率。

#### 2.2.3 考虑倒塌与非倒塌的损失分解评估

当对混凝土桥梁的直接经济损失进行倒塌与非倒塌损失分解时, 混凝土桥梁地震灾害损失评估公式如下:

$$E[DL] = E[DL]_c + E[DL]_{nc} \quad (13)$$

式中:  $E[DL]_{nc}$  为结构不倒塌时的损失,  $E[DL]_c$  为结构倒塌时的损失。

结构不倒塌时的损失计算公式为:

$$E[DL]_{nc} = \int_0^\infty E[DL|NC, IM] \cdot p(NC|IM) d\nu(IM) \quad (14)$$

式中:  $E[DL|NC, IM]$  为  $IM$  条件下结构不倒塌时的直接经济损失。

结构倒塌时的损失评估计算公式为:

$$E[DL]_c = \int_0^\infty E[DL|C] \cdot p(C|IM) d\nu(IM) \quad (15)$$

式中:  $E[DL|C]$  为结构发生倒塌情况下的期望直接经济损失,  $p(C|IM)$  为设定地震动强度下的倒塌概率。

### 2.2 混凝土桥梁地震灾害损失评估模型

混凝土桥梁地震灾害损失重点包括经济损失、人员损失和设备损失。其中经济损失和人员损失是直接影响损失评估准确度的关键因素。因此,

以地震区域社会经济资料为基础,对混凝土桥梁震后经济损失进行评估。其油管评估参数主要由国家应急数据库统计数据提供。

$$T(p, I, s) = R(p) \varphi(p, s) [N(p, I) / M(p)] \quad (16)$$

式中:  $T(p, I, s)$  为地区  $p$  在主余震为  $I$  烈度区内  $s$  结构类型桥梁的总面积;  $R(p)$  为地区  $p$  的混凝土桥梁总面积;  $\varphi(p, s)$  为地区  $p$  内  $s$  结构混凝土桥梁面积占有比率;  $N(p, I)$  为地区  $p$  在主余震为  $I$  烈度下受灾混凝土桥梁数量;  $M(p)$  为所属地区  $p$  的混凝土桥梁数目。

对此,把震害指数转变成地面真实震害指数,依据《中国地震烈度表》得到地面烈度值  $I$ , 计算式为:

$$DI_C \sim f_1(DI_{RS}) \quad (17)$$

$$I \sim f_2(DI_C) \quad (18)$$

式中:  $DI_C$  表示地面等效震害指数;  $DI_{RS}$  表示震害指数;  $f_1(\cdot)$  为震害指数和地面真实震害指数的相应关系;  $f_2(\cdot)$  为地面震害指数和地震烈度的相应关联。

从发生地震区域的易损性矩阵选取相应烈度和混凝土桥梁的破损比、损失比,求出损失率,即破损比与损失比的积,表达式为:

$$\lambda(I, s, j) \sim f_3(I) \quad (19)$$

$$\eta(s, j) \sim f_4(s) \quad (20)$$

式中:  $\lambda(I, s, j)$  是  $I$  烈度下桥梁  $s$  在  $j$  破坏等级主余震作用下的破坏比;  $\eta(s, j)$  是桥梁  $s$  在  $j$  破坏等级主余震作用下的损失比;  $s$  表示不同形状混凝土桥梁;  $f(I)$  表示烈度  $I$  与桥梁  $s$  之间的易损性矩阵映射。

在得到混凝土桥梁的震害损失率情况下,经过转变主余震烈度,并依据桥梁震害易损性关系进行评估,构建混凝土桥梁震害经济损失评估模型,表达式为:

$$L_f(p) = \sum_i^{N_i} \sum_s^{N_s} \left[ \sum_{j=1}^3 \lambda(i, s, j) \eta(s, j) T(p, i, s) B(p, s) \right] \quad (21)$$

式中:  $L_f(p)$  是地区  $p$  的混凝土桥梁震害直接经济损失;  $B(p, s)$  是地区  $p$  内桥梁  $s$  的平均造价;  $N_i$  是地区  $p$  内各烈度值的总数;  $N_s$  是地区  $p$  内混凝土桥梁数目。

主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失,处经济损失外,亦会出现人口损失,如死亡、受伤等,它们的计算结果,受到现场震害评估的影响,详细计算公式如下所示:

(1) 地震灾害中人员损失评估模型

$$M(I) = M_D(I) + M_H(I) + M_L(I) \quad (22)$$

式中:  $M_D(I)$  为在主余震烈度为  $I$  时,一个地区死亡人数;  $M_H(I)$  为在主余震烈度为  $I$  时,一个地区重伤人数;  $M_L(I)$  为一个地区在主余震烈度为  $I$  时的轻伤人数。

(2) 地震灾害中人员死亡损失评估模型:

$$M_D(I) = C \eta (A_{11} r_{d1} + A_{12} r_{d2} + A_{13} r_{d3}) \quad (23)$$

式中:地震时人员在桥梁上的百分比用  $C$  进行表示;桥梁上人员的密度用  $\eta$  进行表示;地区桥梁毁坏面积用  $A_{11}$  进行表示;地区桥梁严重破坏面积用  $A_{12}$  表示;地区桥梁中等破坏面积表示为  $A_{13}$ ;毁坏桥梁上的死亡率表示为  $r_{d1}$ ;严重破坏桥梁上死亡率表示为  $r_{d2}$ ;中等破坏桥梁上的死亡率表示为  $r_{d3}$ 。

(3) 地震灾害中人员重伤损失评估模型:

$$M_H(I) = C \eta (A_{21} r_{h1} + A_{22} r_{h2} + A_{23} r_{h3}) \quad (24)$$

式中:  $A_{21}$  为地区桥梁毁坏的面积;  $A_{22}$  为地区桥梁严重破坏的面积;  $A_{23}$  为地区桥梁中等破坏的面积;  $r_{h1}$  为毁坏桥梁上的重伤率;  $r_{h2}$  为严重破坏桥梁上的重伤率;  $r_{h3}$  为中等破坏桥梁上的重伤率。

(4) 人员轻伤评估模型:

$$M_L(I) = C \eta (A_{31} r_{l1} + A_{32} r_{l2} + A_{33} r_{l3}) \quad (25)$$

式中:  $A_{31}$  为地区桥梁毁坏的面积;  $A_{32}$  为地区桥梁严重破坏的面积;  $A_{33}$  为地区桥梁上等破坏的面积;  $r_{l1}$  为毁坏桥梁上的轻伤率;  $r_{l2}$  为严重破坏桥梁上的轻伤率;  $r_{l3}$  为中等破坏桥梁上的轻伤率。

综上所述,采用非线性动力分析确定易损性函数,得到易损性曲线图的基础上,基于参数对数正态分布模型,分析混凝土桥梁概率地震需求;以经济损失及人口损失为指标,进行分解评估的基础上,建立混凝土桥梁地震灾害损失评估模型,达到评估混凝土桥梁地震灾害损失的目的。

### 3 实验结果分析

为了验证本文方法在混凝土桥梁地震灾害损失评估方面的有效性,采用传统方法以评估误差率为指标进行对比分析。采用 5 组样本数据输入到评估模型中,样本数据如表 1 所示,经过评估得到评估结果如图 2、图 3 所示:

根据测试样本分析经济损失和人员伤亡实际值与评估值,计算得到评估误差率:

$$R_e = \left( \frac{L_D - A_L}{L_D} \right) \quad (26)$$

式中:  $L_D$  为地震直接经济损失实际值;  $A_L$  为地震直接经济损失评估值;  $R_e$  为评估误差率。

表 1 评估测试样本数据

Table 1 Evaluation of test sample data

组	烈度 1	烈度 2	烈度 3	烈度 4	烈度 5	烈度 6
第一组	0.300 5	0.333 4	0.345 1	0.366 4	0.234 5	0.163 4
第二组	0.395 2	0.505 0	0.282 9	0.227 5	0.357 7	0.226 5
第三组	0.487 6	0.065 8	0.226 5	0.259 2	0.441 1	0.227 5
第四组	0.203 2	0.505 0	0.400 4	0.225 2	0.402 5	0.200 0
第五组	0.426 3	0.285 8	0.294 4	0.207 3	0.469 0	0.226 5

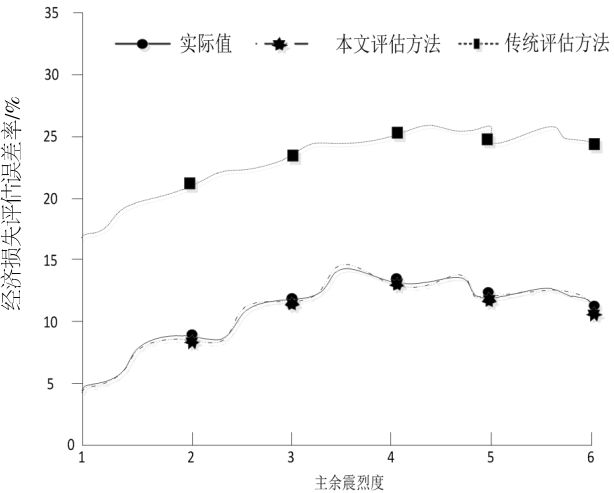


图 2 主余震作用下经济损失评估误差率

Fig.2 Error rate of economic loss assessment under main aftershocks

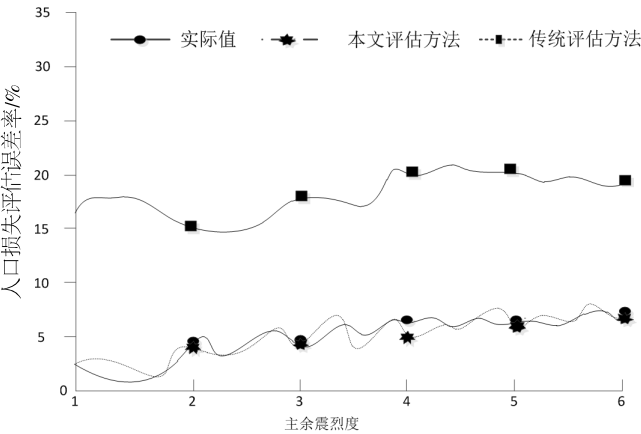


图 3 主余震作用下人口损失评估误差率

Fig.3 Error rate of population loss assessment under main aftershocks

经过计算后，本次震害损失评估经济损失和人口伤亡的评估误差率的最大值和最小值，如下表 1 所示。

通过对比发现，采用本文方法的评估效果无论在经济损失还是人员伤亡方面，均要优于传统方法。并且，运用评估模型得出的经济损失和人员伤亡数评估结果与实际值较为接近，泛华能力良好，综上所述，评估方法验证充分证明了改进方法在地震灾害损失评估方面的有效性和优越性。

表 2 混凝土桥梁地震损伤评估误差对比结果

Table 2 Comparison of seismic damage assessment errors of concrete bridges

极值	经济损失评估误差率/%		人员伤亡评估误差率/%	
	本文方法	传统方法	本文方法	传统方法
最大值	0.145	0.267	0.641	0.201
最小值	0.047	0.168	0.014	0.149

## 4 结论

针对已有方法在评估混凝土桥梁地震灾害损失时，其评估误差率较大的问题，提出基于地震灾害损失分解的混凝土桥梁地震灾害损失评估方法，得到以下结果：

(1) 采用非线性动力分析确定易损性函数，得到易损性曲线图，可为方法的实现提供基础的稳定性；

(2) 通过构建参数对数正态分布模型，解析混凝土桥梁概率地震需求，能有效的分析地震对混凝土桥梁产生的损失情况；

(3) 以经济损失及人口损失为指标，进行分解评估的基础上，建立混凝土桥梁地震灾害损失评估模型，可提供混凝土桥梁地震灾害损失的详细情况。

(4) 实验分析可准确的验证，改进方法在混凝土桥梁震害损失评估方面的有效性及可行性。

## 参考文献:

- [1] 王旭,魏延建,孙得璋,等. 限位墩对不等高桥墩连续梁桥地震响应的影响[J]. 自然灾害学报,2017,26(3):71-79.
- [2] 李杰,代跃,陈淮. 随机地震动场多点激励下宽幅大跨桥梁结构地震响应研究 [J]. 地震工程学报,2017,39(1): 39-44.
- [3] 于晓辉,吕大刚,肖寒. 主余震序列型地震动的增量损伤谱研究[J]. 工程力学,2017,34(3):47-53.
- [4] 张建经,李鸿杰,唐雅蕾,等. 基于芦山主震及余震的地震预警参数与快速震级估算研究[J]. 地球物理学进展, 2017,32(06):2 409-2 414.
- [5] 陈敦,王根会,穆彦虎,等. 铁路大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动研究[J]. 地震工程学报,2017,39(05):820-828+852.
- [6] 魏本勇, 苏桂武. 基于投入产出分析的汶川地震灾害间接经济损失评估[J]. 地震地质,2016,38(4):1 082-1 094.

- [7] 赵士达,张楠,张斯文,等. 基于 LM-BP 神经网络的地震直接经济损失快速评估方法研究[J]. 地震研究,2016,39(3):500-506.
- [8] 李永梅,李玉占,杨博颜. 基于性能的钢框架结构地震易损性分析[J]. 工程抗震与加固改造,2017,39(4):55-59.
- [9] 孙元帝,王贵和,苏强,等. 双向地震作用下互通式斜交桥梁地震响应及碰撞效应分析[J]. 地震工程学报,2016,38(5):693-700.
- [10] 何浩祥,李瑞峰,闫维明. 基于多元模糊评定的桥梁综合地震易损性分析 [J]. 振动工程学报,2017,30(2):270-279.
- [11] 朱永莉,黎大虎,朱建钢. 基于强震动记录的地震生命损失快速评估方法[J]. 地震学报,2017,39(1):143-154.
- [12] 魏本勇,苏桂武. 基于投入产出分析的汶川地震灾害间接经济损失评估 [J]. 地震地质,2016,38(4):1082-1094.
- [13] 梁发云,刘兵,李静茹. 考虑冲刷作用效应桥梁桩基地震易损性分析[J]. 地震工程学报,2017,39(1):13-19.
- [14] 兰日清,李小军,丰彪,等. 近场强震作用下城市桥梁结构灾害评价方法研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(4):135-142.
- [15] 董文,沈占锋,程希萌. 基于高分辨率遥感目标特征库的地震灾情快速评估方法[J]. 地球信息科学学报,2016,18(5):699-707.