

DOI:10.11918/202004083

贝叶斯估计的桥梁结构地震易损性分析

董俊^{1,2}, 曾永平¹, 陈克坚¹, 郑晓龙¹, 刘力维¹, 庞林¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 四川建筑职业技术学院 交通与市政工程系, 成都 610399)

摘要: 地震易损性分析方法目前已成为评估桥梁结构抗震性能的重要手段, 为弥补常用易损性分析方法的不足, 提高易损性分析效率, 引入贝叶斯估计方法, 提出一种基于贝叶斯估计的桥梁地震易损性分析方法(简称 BEM 法), 以某铁路高烈度地震区 4 跨典型铁路简支梁桥为工程背景, 开展不同墩高简支梁桥的易损性分析。采用常用易损性分析方法, 计算结果验证了 BEM 法的正确性, 并开展了不同墩高简支梁桥的抗震性能评估, 结果表明: BEM 法弥补了常用方法的不足, 在保证计算精度前提下提高了分析效率, 大幅减少计算工作量, BEM 法具有良好的稳定性, 有着较好的工程应用前景。

关键词: 桥梁工程; 贝叶斯估计; 地震易损性分析; 先验分布; 后验分布

中图分类号: U448.23; U442.55

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)09-0088-11

Seismic vulnerability analysis of bridge structures using Bayesian estimation

DONG Jun^{1,2}, ZENG Yongping¹, CHEN Kejian¹, ZHENG Xiaolong¹, LIU Liwei¹, PANG Lin¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Department of Transport and Municipal Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Chengdu 610399, China)

Abstract: The seismic vulnerability analysis method has been widely used to evaluate the seismic performance of bridge structures. In order to make up for the shortcomings of common analysis methods of bridge seismic vulnerability and improve the efficiency of vulnerability analysis, the Bayesian estimation method was introduced to the analysis of seismic vulnerability for bridge structures, and a bridge seismic vulnerability method based on Bayesian estimation(referred to as BEM) was proposed. Taking a typical four-span railway simply supported beam bridge in strong earthquake area as the engineering background, the vulnerability analysis of the bridge with different pier heights was carried out. The correctness of the proposed method was verified by taking the analysis results of common methods as reference. Results indicate that BEM can overcome the shortcomings of common bridge vulnerability analysis methods, improve the analysis efficiency of bridge seismic vulnerability analysis method, and greatly reduce the computational burden on the premise of ensuring accuracy. The method has good stability and a great prospect in engineering application.

Keywords: bridge engineering; Bayesian estimation; seismic vulnerability analysis; prior distribution; posterior distribution

中国是地震频发国, 近年来西部地区时常发生地震^[1]。随着中国铁路交通运输网络的快速发展, 西部地区铁路网正逐步完善, 长昆、云桂、西成、成贵铁路陆续开通, 拉林、成兰、玉墨、成昆复线、丽香正在紧锣密鼓地进行建设, 上述铁路不可能完全避开潜在地震区域, 而即将开工建设的川藏、渝昆等铁路也将穿越数十条活动断裂带, 由于西部山区地形复杂多变, 为跨越该地区铁路简支梁桥被广泛采用, 因此西部地区铁路桥梁将面临高烈度地震区的严峻挑战。地震已经严重影响到中国铁路运输网的运营安

全^[2], 而中国现行铁路抗震设计规范并未涉及高烈度地震区桥梁抗震性能设计和评估的方法^[3], 因此亟需开展西部高烈度地震区典型铁路简支梁抗震性能评估的工作。

目前世界各国利用多种抗震评估方法开展桥梁结构抗震性能分析, 其中桥梁地震易损性评估方法被广泛采用^[4], 该方法分 3 大类: 经验法^[5]、试验法^[6]、理论分析法^[7]。因桥梁震害资料匮乏, 理论分析法被各国学者广泛采用, 文献[8]基于蒙特卡洛法对美国伊利诺伊南部多跨简支梁桥进行地震易损性分析, 研究了土壤液化对桥梁地震易损性的影响。文献[9]基于极大似然估计法对带减隔震支座的多跨连续梁开展了易损性分析。文献[10]基于云图法对加拿大魁北克省 55 号高速公路一座三跨连续梁桥开展了易损性分析, 研究了减隔震支座对桥梁抗震性能的影响。文献[11]对已使用 30 a 的

收稿日期: 2020-04-14; 修订日期: 2021-06-20

基金项目: 高速铁路基础研究联合基金(U1934207);

四川省科技计划项目(2019YFG0048);

中国中铁二院科研项目(KYY2018059(18-20))

作者简介: 董俊(1988—), 男, 博士, 高级工程师

通信作者: 董俊, dj07swjtu@126.com

简支梁桥进行了地震易损性分析,考虑了结构材料劣化性能对桥梁结构抗震性能的影响。文献[12]基于云图法对近海多跨连续梁桥开展了易损性分析,研究了非一致氯离子侵蚀下桥梁地震损伤风险变化规律。文献[13]对采用减震樨-活动支座的铁路连续梁进行减震效果和易损性分析。上述学者采用了传统分析法建立了桥梁易损性曲线,而这些传统方法往往需要计算大量的时程分析结果才能保证易损性分析的精度^[4],且不同墩高、不同跨度桥梁计算结果不能相互参考,都需要“一桥一算”,结果相对独立。此时,若依然采用常用方法来开展西部地区各种墩高、各类跨径的典型铁路桥梁的地震易损性评估,则计算量巨大,会占用大量计算资源,且不易实现。

因此,为了提高桥梁地震易损性分析的效率,减少计算工作量,并得到真实可靠的分析结果,同时使类似桥梁分析结果可相互借鉴,本文引入贝叶斯估计法(Bayesian estimation method, BEM),建立一种基于贝叶斯估计的桥梁易损性分析方法(下文简称BEM法),以8度地震区某典型铁路简支梁桥为研究对象,运用BEM法建立不同墩高、不同跨度常见铁路简支梁桥的易损性曲线,评估桥梁的抗震性能,并采用常用易损性分析方法(云图法^[7],简称CM法)计算结果验证本文方法的正确性和适应性,在此基础上,对本文方法的应用推广也进行了详细的阐述。

1 贝叶斯估计的桥梁地震易损性分析方法

1.1 贝叶斯基本原理

目前贝叶斯理论已成为统计学领域主要分析方法之一^[14],贝叶斯估计是利用贝叶斯定理结合新的证据及以前的先验概率,来得到新的发生概率。贝叶斯理论的基本形式为先验信息 \oplus 样本信息得到后验信息^[15]:

$$\pi(\theta) \oplus p(x|\theta) \Rightarrow \pi(\theta|x) \quad (1)$$

式中: \oplus 表示贝叶斯定理; $\pi(\theta)$ 为未知参数 θ 的先验分布; $\pi(\theta|x)$ 为后验分布,即 θ 取一定值时,样本 x 对 θ 的条件分布函数。

对于贝叶斯估计, $\pi(\theta)$ 是表征抽样之前对参数 θ 的认知, $\pi(\theta|x)$ 是表征抽样后对参数 θ 有新的认知。先验和后验出现了差异,是因为某些因素条件变化后,在抽取新样本 x 后对参数 θ 认知上也随之发生变化。因此 $\pi(\theta|x)$ 可认为是利用总体及抽样信息对 $\pi(\theta)$ 进行客观调整后的认知。贝叶斯方法具体计算步骤如下:

1)假设 Θ 是参数 θ 的分布函数,结合当前 θ 已

有的抽样信息,可得到变量 Θ 的先验分布为 $\pi(\theta)$ 。

2)由文献[15]可知,变量 X 的概率密度函数可等价于 Θ 取特定数值对应的条件密度函数,这里定义为 $p(\theta|x)$ 。

3)由先验分布 $\pi(\theta)$ 得到具体的观测参数 θ ,由条件密度函数 $p(\theta|x)$ 确定具体的观测数据 $x=(x_1, \dots, x_n)$,则这些观测数据的联合条件概率密度函数为 $p(x|\theta) = \prod_{i=1}^n p(\theta|x_i)$,这个联合密度函数又称为似然函数,记为 $L(\theta)$ 。结合观测数据与先验信息,便可得到观测值 x 与 θ 的联合密度函数 $h(x, \theta) = p(x|\theta)\pi(\theta)$ 。

4)对 $h(x, \theta)$ 进行积分,可以得到样本的边缘密度函数为

$$m(x) = \int_{\Theta} h(x, \theta) d\theta = \int_{\Theta} p(x|\theta)\pi(\theta) d\theta \quad (2)$$

5)根据贝叶斯理论,参数 θ 的后验分布则为

$$\pi(\theta|x) = \frac{h(x, \theta)}{m(x)} = \frac{p(x|\theta)\pi(\theta)}{\int_{\Theta} p(x|\theta)\pi(\theta) d\theta} \quad (3)$$

其离散形式表达式为

$$\pi(\theta_i|x) = \frac{p(x|\theta_i)\pi(\theta_i)}{\sum_j p(x|\theta_j)\pi(\theta_j)} \quad (4)$$

基于上述计算步骤可知,贝叶斯估计法是基于原事物的先验分布信息,在事物条件变化后,结合新的观测信息,推测新事物的后验信息。已有研究^[16]表明相似桥梁结构在地震作用下的地震响应具有类似的规律。正是由于存在类似的计算规律,设计人员进行全线铁路桥梁抗震设计时,才往往选取典型桥梁开展抗震分析,不会对全线所有桥梁一桥一算,而是以典型桥梁结果作为设计的依据,而这些桥梁的数量及计算工作量依然庞大。而本文正好利用类似桥梁地震响应规律相似的特点,将贝叶斯估计法引入到桥梁易损性分析中,利用已有桥梁易损性评估结果开展类似桥梁的易损性分析,间接提高分析效率。

1.2 贝叶斯估计的易损性计算理论

由文献[4]可知,桥梁结构地震易损概率为

$$P_f(\text{IM}, C) = P[D \geq C | \text{IM}] \quad (5)$$

式中: $P_f(\text{IM}, C)$ 为损伤概率; D 为结构地震响应需求值; C 为结构抗震能力值; IM 为地震波强度指标。

求解 P_f 首先需要建立地震动强度与结构地震需求之间的关系,即概率地震需求模型^[1]:

$$\ln \hat{D} = A \ln(\text{IM}) + B \quad (6)$$

式中: \hat{D} 为桥梁结构地震需求中位值; A 、 B 为需求模型的未知参数, 可通过最小二乘法求得。

文献[17]给出了桥梁地震易损性函数:

$$P[D \geq C | IM] = \Phi \left[\frac{\ln(IM) - \ln \alpha}{\beta} \right] \quad (7)$$

式中: $\Phi[\cdot]$ 为标准高斯累计分布函数; α 、 β 分别为易损性函数中位值和对数标准差, $\alpha = \exp[(\ln \hat{C} - B)/A]$, $\beta = \sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}/A$, 其中 $\beta_{D|IM}$ 为桥梁需求对数标准差, β_C 为桥梁抗震能力对数标准差, 计算方法见文献[18], 由易损性函数可知, 结构易损性曲线取决于形状参数 α 和 β 的值。

因此在开展桥梁易损性分析时, 可以利用贝叶斯理论来解决一些类似桥梁的易损性分析问题, 即基于原桥计算结果, 对类似桥梁开展适量的地震时程分析, 运用贝叶斯理论重新评估 α 和 β 的分布特征, 从而建立新桥的易损性曲线。

本文对“类似桥梁”的定义说明: 首先类似桥梁须与原桥有相同的结构类型(如简支梁、连续梁、连续刚构、拱桥等), 以简支梁桥为例, 当改变原桥跨度、墩高、配筋率、桩基数量、桥墩主梁截面形式等设计参数, 或者在原桥上增加减震耗能装置等措施形成新的简支梁桥, 若新桥的地震响应规律与原桥相近, 且原桥与新桥各构件地震易损性部位类似, 则可视本文所说的类似桥梁。下面将详述具体计算方法。

1.2.1 确定易损性函数形状参数的先验分布

将式(7)桥梁结构易损性函数变为

$$P_f(IM) = f(IM, \alpha, \beta) \quad (8)$$

由于桥梁结构参数具有随机性, 使得桥梁构件的抗震能力值也具有一定的随机性, 进而桥梁构件地震易损性函数形状参数也具有不确定性, 文献[1, 19]研究表明桥墩及支座构件的形状参数 α 和 β 可近似认为服从对数正态分布和均匀分布。假设原桥结构充分考虑结构参数的随机性, 确定桥梁构件抗震能力 C 的分布函数, 而后基于 IDA 分析法, 通过时程分析计算出 N 组 $\{(IM_i, D_i), i = 1, \dots, N\}$ 地震强度与构件最大地震响应值, 对响应值进行最小二乘得到概率需求模型及拟合参数 A 和 B , 从而可得到 α 和 β 的分布函数 $f'_\alpha(\alpha)$ 和 $f'_\beta(\beta)$, 则形状参数 α 和 β 的联合先验分布函数为

$$f'_{\alpha, \beta}(\alpha, \beta) = f'_\alpha(\alpha) f'_\beta(\beta) = \iint \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\alpha} \exp\left(-\frac{(\ln \alpha - \ln \mu_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2}\right) \times \left(\frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right) d\alpha d\beta \quad (9)$$

式中: σ_α 为桥梁在特定损伤状态下对应形状参数 α 的均值和标准差, 具体计算方法见 2.4 节; β_1 、 β_2 分别为桥梁构件特定损伤状态下形状参数 β 的均匀分布上、下限值, 计算方法见文献[4]。

根据概率统计分析理论^[20], 易损性函数式(7)可改写为

$$P'(IM, \alpha, \beta) = \iint \Phi \left[\frac{\ln(IM) - \ln \alpha}{\beta} \right] \times f'_{\alpha, \beta}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \iint \Phi \left[\frac{\ln(IM) - \ln \alpha}{\beta} \right] \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\alpha} \exp\left(-\frac{(\ln \alpha - \ln \mu_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2}\right) \times \left(\frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right) d\alpha d\beta \quad (10)$$

1.2.2 确定新桥似然函数

在贝叶斯推论的理论框架中, 需要寻求更新参数的“知识”, 这里可以理解为寻找类似桥梁新的地震响应和需求模型似然函数。即通过时程分析得到其他类似桥梁结构的地震响应分析结果, 这里的类似桥梁与原桥计算参数存在一些差异, 如墩高、跨度、配筋、构造尺寸等参数存在差异, 或者调整地震波, 如远场地震波改为近场地震波, 通过时程分析获得的一组新的时程分析响应数据, 新的计算结果可由 3 个矢量数据组成数组:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} (IM_1) & (n_1) & (r_1) \\ (IM_2) & (n_2) & (r_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (IM_k) & (n_k) & (r_k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

数组 \mathbf{Y} 表明了将地震强度 IM 分为 k 个强度等级, 在地震动强度为 IM_i 时, 进行了 n_i 次测试或计算分析, 这其中观察到了 r_i 次结构发生了某种程度的地震损伤破坏。

基于数值分析结果 \mathbf{Y} , 可以得到似然函数:

$$\left\{ \begin{aligned} & \mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_k]^T \\ & y_i = [IM_i, n_i, r_i], i = 1, 2, \dots, k \\ & L(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}_r, \mathbf{Y}) = \prod_{i=1}^k L(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}_r | y_i) \propto \\ & \prod_{i=1}^k P'_f(IM_i; \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}_r)^{r_i} (1 - P'_f(IM_i; \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}_r))^{n_i - r_i} = \\ & \prod_{i=1}^k \left[\Phi \left(\frac{\ln(IM_i) - \ln \tilde{\alpha}}{\beta_r} \right) \right] \times \\ & \left[\left(1 - \Phi \left(\frac{\ln(IM_i) - \ln \tilde{\alpha}}{\beta_r} \right) \right) \right]^{n_i - r_i} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

1.2.3 计算新桥形状参数的后验分布

由1.1节贝叶斯基本原理分析可知,未知参数的后验分布函数可由式(3)求解得到,因此,基于贝叶斯估计可得到新桥形状参数 $\tilde{\alpha}$ 和 β_r 的联合后验分布函数为

$$f''_{\tilde{\alpha},\beta_r}(\tilde{\alpha},\beta_r) = \frac{L(\tilde{\alpha},\beta_r | Y) \times f'_{\alpha,\beta}(\tilde{\alpha},\beta_r)}{\iint L(\tilde{\alpha},\beta_r | Y) \times f'_{\alpha,\beta}(\tilde{\alpha},\beta_r) d\tilde{\alpha}d\beta_r} \quad (13)$$

得到新桥各构件易损性曲线形状参数 $\tilde{\alpha}$ 和 β_r 的联合后验分布函数,便可通过积分计算出新桥对应形状参数 $\tilde{\alpha}$ 和 β_r 的分布函数:

$$\begin{cases} f''_{\tilde{\alpha}}(\tilde{\alpha}) = \int f''_{\tilde{\alpha},\beta_r}(\tilde{\alpha},\beta_r) d\beta_r \\ f''_{\beta_r}(\beta_r) = \int f''_{\tilde{\alpha},\beta_r}(\tilde{\alpha},\beta_r) d\tilde{\alpha} \end{cases} \quad (14)$$

故依据概率统计分析理论,可得新桥的地震易损性函数计算公式:

$$P''(IM;\tilde{\alpha},\beta_r) = \iint \Phi \left[\frac{\ln(IM) - \ln \tilde{\alpha}}{\beta_r} \right] \times f''_{\tilde{\alpha},\beta_r}(\tilde{\alpha},\beta_r) d\tilde{\alpha}d\beta_r = \frac{\iint L(\tilde{\alpha},\beta_r | Y) \times f'_{\alpha,\beta}(\tilde{\alpha},\beta_r) d\tilde{\alpha}d\beta_r}{\iint L(\tilde{\alpha},\beta_r | Y) \times f'_{\alpha,\beta}(\tilde{\alpha},\beta_r) d\tilde{\alpha}d\beta_r} \quad (15)$$

采用式(15)便可得到变化设计参数后桥梁结构的地震损伤概率,从而建立桥梁易损性曲线。

1.3 算法分析步骤

本文所提方法分析步骤如图1所示。主要分为以下7步:1)研究原桥主要设计参数的随机性,抽样生成桥梁设计参数分析样本组;2)搜集桥址区域实测地震波或根据规范反应谱生成人工地震波,构成桥梁地震波输入样本组;3)基于生成的桥梁设计参数建立模型,再与地震波组合,开展时程分析,获得原桥关键构件最大地震响应;4)研究构件损伤指标,考虑结构参数的不确定性,研究不同损伤状态下损伤指标的分布函数及分布参数,获得损伤指标临界值;5)利用最大响应数据建立概率地震需求模型,获得原桥易损性函数形状参数中位值以及参数的先验分布函数,而后建立原桥地震易损性曲线;6)建立其他类似桥梁数值仿真模型,输入少量地震波,进行桥梁模型时程分析,提取最大响应;7)利用新桥计算结果求解似然函数,获得新桥后验分布函数,进而建立新桥易损性曲线。前5步是常用易损性评估方法的分析步骤。为获得先验信息,实际应用时,若原桥的先验信息可以通过已有的研究文献

确定,则不用开展前5步分析,直接确定原桥易损性函数形状参数及其对应的先验分布函数。

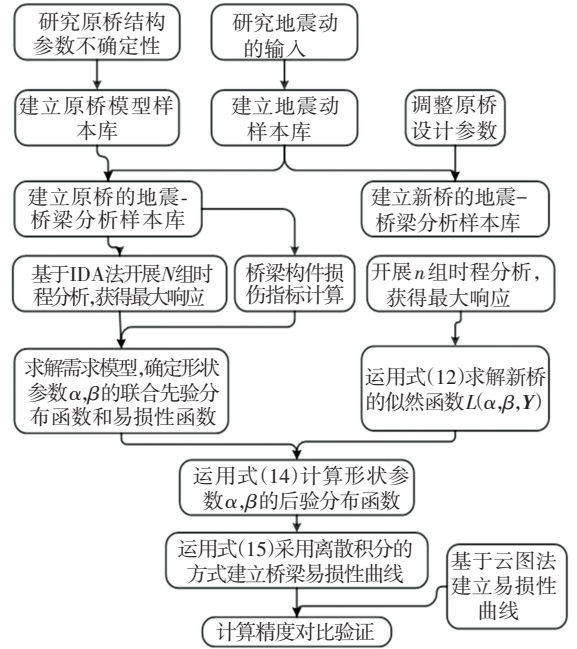


图1 基于贝叶斯估计的易损性分析流程图

Fig.1 Flow chart of vulnerability analysis based on Bayesian estimation

2 工程实例

2.1 工程概况及有限元模拟

本文首先以成兰铁路8度0.3g地震区4×24 m等墩高速铁路简支梁桥为研究对象,利用BEM法建立不同墩高简支梁各关键构件的地震易损性曲线,而后采用传统易损性分析方法验证本文方法的正确性,在此基础上运用本文算法开展4×32 m典型铁路等墩高简支梁地震易损性分析。之所以选取等墩桥梁为分析对象,主要是成兰铁路全线简支梁桥数量众多,如果针对每座桥进行抗震设计,则工作量巨大,有限的时间和人力资源无法完成这样的计算工作,故设计人员不会“一桥一算”,而是选取典型等墩高简支梁进行抗震性能分析(即以典代线的思路),并且经过长期的研究发现,采用等墩高计算出的桥梁抗震性能,与实际类似桥梁分析结果差异不大,故采用等墩高进行抗震分析。

对于24 m简支梁桥,本文拟研究5种墩高(10、12.5、15、17.5、20 m)的易损性情况,如果按照常规易损性分析方法开展分析则工作量巨大,考虑到5种模型桥梁均为简支梁桥,其中墩高、桥墩截面尺寸、配筋率等参数不同,而桩基、主梁、支座参数保持一致,符合前文“类似桥梁”的定义;因此本文以24 m跨15 m墩高简支梁作为先验信息,按云图法先

求解 15 m 墩高模型的易损性曲线,其他 10、12.5、17.5、20 m 墩高桥梁作为待求解的后验信息,采用本文提出的 BEM 法建立各墩高桥梁易损性曲线。

简支梁上部结构为预应力混凝土 T 梁,采用 C55 混凝土;24 m 跨梁高 2.1 m,32 m 跨梁高 2.5 m,桥梁总宽 4.9 m,3~25 m 为实心墩,26~35 m 为空心墩,2#~4#墩高度相等,采用 ZK 活载形式;桥梁支座采用摩擦摆支座,活动支座型号为 TJGZ (CRRC)-FPB-3000ZX-0.3g,固定支座型号为 TJGZ (CRRC)-FPB-3000GD-0.3g,采用钢防落梁进行限位,图 2、3 分别给出了主梁和桥墩截面示意图,各桥墩截面几何参数见表 1,表 2、3 分别给出了实心墩和空心墩关键截面钢筋设计参数。

及被动土压力则依据美国加州桥梁抗震设计规范进行求解;采用等效土弹簧模拟桩土作用。

表 1 简支梁实心桥墩截面几何参数

Tab.1 Geometric parameters of solid pier section of simply supported beam

墩高/m	墩身坡度	墩底		墩身体积/m ³
		d/cm	(d+B)/cm	
3	1:0	210	360	6.6
5	1:0	210	360	19.8
8	1:0	210	360	39.7
10	35:1	256	406	52.1
12.5	35:1	270	420	81.6
15	35:1	284	434	111.0
17.5	35:1	299	449	140.5
20	35:1	313	463	168.3
25	35:1	341	491	235.0
30	40:1	500	680	264.5
35	40:1	525	705	325.0

表 2 实心桥墩截面钢筋设计参数

Tab.2 Design parameters of solid pier section

墩高/ m	a ₁ / cm	a ₂ / cm	钢筋根数				墩身线刚度/ (kN·cm ⁻¹)	
			N ₁	N ₂	N ₃₋₁	N ₃₋₂	纵向	横向
3	14.84	14.84	62	15	27	27	57 148	157 158
5	14.84	14.84	62	35	57	57	13 889	38 195
8	14.84	14.84	6 962	55	87	87	3 631	9 985
10	12.96	14.98	71	68	108	108	3 012	7 483
12.5	12.35	14.88	74	85	156	134	1 824	4 404
15	11.95	14.98	77	102	186	159	1 218	2 861
17.5	11.42	14.89	80	118	214	183	884	2 026
20	11.09	14.98	83	135	342	207	674	1 509
25	10.34	14.98	89	170	348	261	440	947

表 3 空心桥墩截面钢筋设计参数

Tab.3 Design parameters of hollow pier section

墩高/ m	a ₁ / cm	b ₁ / cm	钢筋根数				墩身线刚度/ (kN·cm ⁻¹)	
			N ₁₋₁	N ₁₋₃	N ₂	N ₃	纵向	横向
30	20.5	17	92	92	92	262	815	1 353
35	21.4	17.5	92	92	92	294	596	919

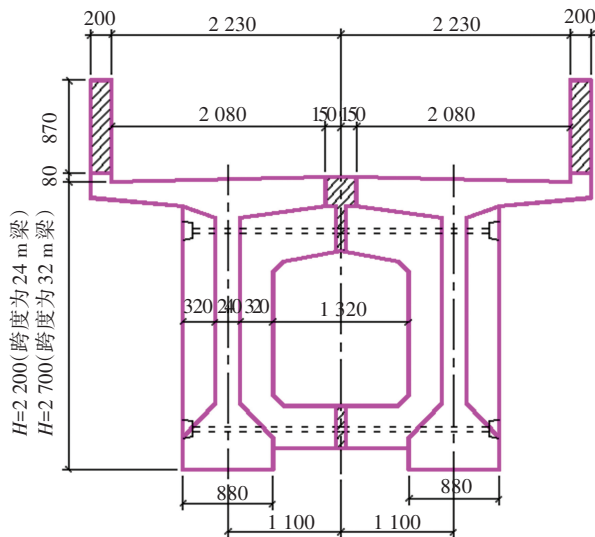
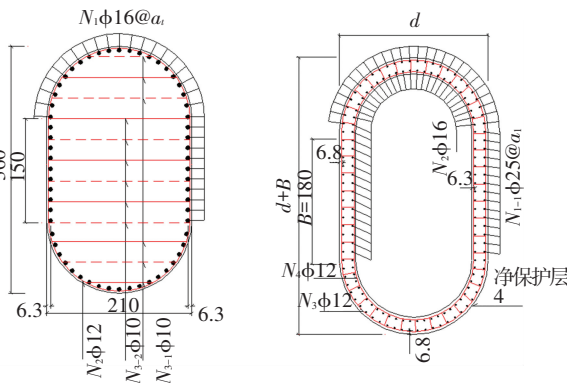


图 2 主梁截面示意 (mm)

Fig.2 Schematic of main beam section (mm)



(a) 实心墩截面 (b) 空心墩截面

图 3 桥墩截面示意 (cm)

Fig.3 Schematic of pier section (cm)

采用 OpenSees 建立桥梁模型,用梁单元模拟 T 形主梁,纤维单元模拟圆端形桥墩,桥墩混凝土和钢筋力学本构分别采用 Kent-Scott-Park 和双线性滞回本构模型;支座采用 OpenSees 中的摩擦摆支座单元模拟,桥台刚度采用弹簧单元进行模拟,其有效刚度

2.2 地震波选取

鉴于成兰铁路穿越四川省北部地区,为保证分析输入地震波与线路穿越地区地震特征相似,故采用汶川地震波作为输入地震,基于文献[21]确定了本文计算用到的 100 条汶川地震动,因 15 m 墩高简支梁桥依然采用云图法建立易损性曲线,其他墩高

简支梁采用本文所提贝叶斯法建立易损性曲线,而云图法需要足够数量的地震波,因此为了获得足够地震动分析样本,将所选汶川地震波 PGA 归一化,并将每条波的 PGA 调整为 10 个不同峰值,从 0.1g 至 1.0g,步长为 0.1g,通过调幅的方法生成 1 000 条地震波,形成了地震波数据样本。

2.3 参数不确定性

受到施工、材料供应、外部其他因素的影响,桥梁结构性能及自身荷载存在不确定性^[21],这些不确定性使得桥梁的抗震能力并不是一个确定值,因此需从概率的角度运用概率论分析方法来研究这些不确定性参数的取值。参考文献[22]研究成果,选取混凝土屈服荷载、混凝土容重、钢筋屈服荷载、钢筋硬化比、二期恒载、支座摩擦系数、固定支座挡块剪断力等作为主要随机性参数,取值详见文献[1, 22],采用随机抽样方法得到 1 000 组上述参数组成

的桥梁参数样本。

2.4 桥梁构件损伤指标

本文研究对象为常用跨度简支梁桥,为了建立简支梁桥的易损性曲线,本文参考文献[16]研究成果选取位移延性比作为桥墩损伤指标,以墩梁相对位移作为支座的损伤状态评判值。

对于桥墩损伤指标,考虑 2.3 节所列参数的不确定性,按照参数的分布特征进行抽样,抽取 1 000 组参数样本,然后通过 OpenSees 软件编程程序,循环开展每组参数下桥墩 Pushover 分析,提取桥墩在轻微、中等、严重、完全破坏 4 种状态对应的 1 000 组墩顶位移结果,并计算出 4 种损伤状态对应的位移延性比,利用 MATLAB 软件对每种损伤状态下的 1 000 组位移延性比结果进行统计分析,得到桥墩各损伤状态下损伤指标的均值和标准差,表 4 为桥墩和支座纵桥向损伤指标计算结果。

表 4 桥梁构件纵桥向损伤指标汇总

Tab.4 Values of damage indexes of bridge members in longitudinal direction

墩高/ m	桥墩位移延性比				支座构件相对位移/mm			
	轻微破坏	中度破坏	严重破坏	完全破坏	轻微破坏	中度破坏	严重破坏	完全破坏
10	$1 < \mu < 1.106$	$1.106 < \mu < 1.631$	$1.631 < \mu < 4.627$	$\mu > 4.627$	30	60	120	180
12.5	$1 < \mu < 1.108$	$1.108 < \mu < 1.589$	$1.589 < \mu < 4.561$	$\mu > 4.561$	30	60	120	180
15	$1 < \mu < 1.113$	$1.113 < \mu < 1.546$	$1.546 < \mu < 4.536$	$\mu > 4.536$	30	60	120	180
17.5	$1 < \mu < 1.123$	$1.123 < \mu < 1.527$	$1.527 < \mu < 4.512$	$\mu > 4.512$	30	60	120	180
20	$1 < \mu < 1.181$	$1.181 < \mu < 1.412$	$1.412 < \mu < 4.447$	$\mu > 4.447$	30	60	120	180

2.5 计算先验分布及地震易损性曲线

基于 2.4 节得到的损伤指标值,将桥梁参数样本与地震波随机匹配形成桥梁分析模型,开展时程分析,得到 1 000 组 $\{(PGA_i, D_i), i = 1, \dots, N\}$ 地震强度与构件最大地震响应值,通过最小二乘法拟合得到各关键构件的概率地震需求模型,进而计算出形状参数 α, β 的分布函数及分布参数。由于篇幅有限,下面仅给出 15 m 墩高简支梁 3#墩的分析结果。图 4 给出了 15 m 墩高简支梁 3#墩顶位移延性比的概率地震需求模型,表 5 给出了 15 m 墩高简支梁 3#桥墩易损性函数形状参数的先验分布信息。

表 5 15 m 墩高 24 m 跨简支梁 3#墩易损性函数先验分布信息

Tab.5 Prior distribution information for pier #3 of simply supported beam (span=24 m, pier height=15 m)

损伤状态	$\ln \alpha \sim N(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2)$		$\beta \sim U(\beta_1, \beta_2)$	
	μ_α	σ_α	β_1	β_2
轻微损伤	0.549	1.231	0.735	0.905
中等损伤	0.589	1.231	0.735	0.905
严重损伤	0.731	1.231	0.776	0.947
完全破坏	1.476	1.231	0.776	0.947

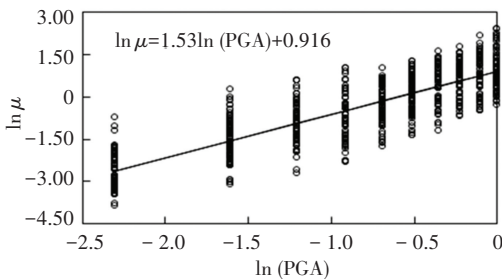


图 4 15 m 墩高 24 m 跨度简支梁 3#墩需求回归模型

Fig.4 Probabilistic seismic demand model for pier #3 of simply supported beam (span=24 m, pier height=15 m)

基于 3#墩易损性函数形状参数 α 和 β 的先验分布参数,利用 MATLAB 软件编程对式(10)进行离散积分求解,便可得到不同地震峰值加速度 PGA 条件下 4 种损伤状态对应的桥墩地震损伤发生概率(见表 6),图 5 给出了对应的 3#墩地震易损性曲线。

由图 5 分析表明:在 8 度罕遇地震作用下 ($PGA = 0.57g$), 3#墩发生轻微损伤概率约为 53%,而发生完全破坏的概率小于 8%,桥墩抗震性能良好。

表 6 15 m 墩高 24 m 跨度简支梁 3#墩地震损伤概率计算结果

Tab.6 Results of seismic damage probability of pier #3 of simply supported beam (span=24 m, pier height=15 m)

PGA/g	损伤概率 P'			
	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	完全破坏
0.1	0.03	0.01	0	0
0.2	0.13	0.05	0.02	0.01
0.3	0.25	0.12	0.05	0.02
0.4	0.36	0.19	0.08	0.03
0.5	0.46	0.26	0.13	0.06
0.6	0.54	0.33	0.17	0.08
0.7	0.60	0.39	0.22	0.10
0.8	0.66	0.45	0.26	0.13
0.9	0.71	0.50	0.30	0.16
1.0	0.74	0.54	0.34	0.19

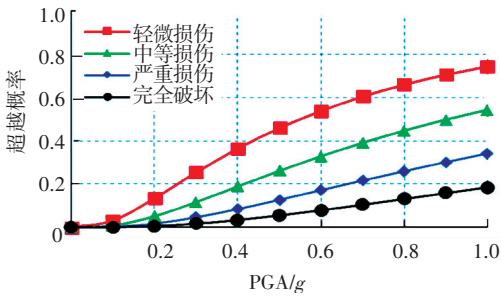


图 5 15 m 墩高 24 m 跨度简支梁 3#墩易损性曲线

Fig.5 Seismic vulnerability curves of pier #3 of simply supported beam (span=24 m, pier height=15 m)

2.6 计算后验分布及其易损性曲线

对 24 m 跨径 10、12.5、17.5、20 m 墩高典型铁路简支梁桥,基于本文 1.2 节提出的 BEM 法,通过少量计算修正其他墩高桥梁的易损性函数形状参数,从而建立各墩高的桥梁易损性曲线。通过反复试算,在满足计算精度前提下最终选取 30 条地震波来计算新桥后验分布参数(按随机抽样法从 100 条地震波中抽出 30 条波组成地震分析样本),将地震波样本依据 PGA 调幅 10 个不同的激励水平,从 0.1g 至 1.0g,步长为 0.1g,共组成 300 组地震动样本库。开展每种墩高的时程分析,记录在各损伤状态下桥墩的失效次数见表 7,将其代入式(12)中就可得各墩高桥梁结构的似然函数 $L_i(\tilde{\alpha}, \beta_r, y_i)$ 。

将先验分布计算结果与似然函数计算结果代入式(13)便可得到新桥易损性形状参数 $\tilde{\alpha}$ 和 β_r ,联合后验分布函数 $f''_{\tilde{\alpha}, \beta_r}(\tilde{\alpha}, \beta_r)$,由联合后验分布函数可求解出形状参数的分布函数及后验分布信息,由于篇幅有限,表 8 仅给出桥墩构件的后验分布信息。

表 7 各墩高简支梁 3#桥墩各损伤状态失效次数计算结果

Tab.7 Failure times of each damage state of pier #3 of simply supported beam with different pier heights

墩高/m	PGA/g	损伤次数			
		r_1	r_2	r_3	r_4
10	0.1	0	0	0	0
	0.2	2	0	0	0
	0.3	5	1	0	0
	0.4	8	2	0	0
	0.5	11	3	1	0
	0.6	13	5	1	0
	0.7	16	6	2	0
	0.8	18	8	3	1
	0.9	19	9	3	1
	1.0	21	11	4	1
12.5	0.1	0	0	0	0
	0.2	2	0	0	0
	0.3	6	1	0	0
	0.4	9	3	0	0
	0.5	12	4	1	0
	0.6	15	6	2	0
	0.7	17	8	3	1
	0.8	19	10	4	1
	0.9	20	11	5	2
	1.0	22	13	5	2
17.5	0.1	0	0	0	0
	0.2	4	1	0	0
	0.3	8	3	0	0
	0.4	12	6	1	0
	0.5	15	8	2	1
	0.6	18	11	3	2
	0.7	20	13	5	3
	0.8	22	15	7	4
	0.9	23	16	8	5
	1.0	24	18	9	6
20	0.1	1	0	0	0
	0.2	6	2	0	0
	0.3	11	5	1	0
	0.4	15	8	2	1
	0.5	18	10	4	1
	0.6	21	13	6	2
	0.7	22	15	7	3
	0.8	24	17	9	4
	0.9	25	19	10	5
	1.0	26	20	12	6

注: r_1 为轻微损伤发生次数; r_2 为中等损伤发生次数; r_3 为严重损伤发生次数; r_4 为完全破坏发生次数。每种地震 PGA 强度下共计 30 条地震波。

基于形状参数的后验分布函数及分布参数值,通过对式(15)进行积分便得到特定地震强度 IM 条件下新桥构件地震损伤发生概率,将各强度 IM 下的损伤概率连线便可得到构件地震易损性曲线。值得注意的是在求解式(15)积分时,可利用 MATLAB 软件采用离散积分的方式求解最终结果。

由于篇幅有限,下面仅给出了各墩高 24 m 简支梁 3#桥墩及对应支座地震易损性曲线计算结果(见

图6、7,纵向地震作用)。分析表明:在相同强度地震作用下,随着墩高的逐渐增大,其桥墩与支座发生损伤的概率越大,在罕遇地震作用下,20 m墩高桥墩发生轻微损伤的概率达到66%,中等损伤达到43%,支座发生轻微损伤的概率为70%,中等损伤概率为46%。此外在罕遇地震下各墩高桥墩发生完全破坏的概率均小于8%,表明桥墩的抗震性能良好。

2.7 算法验证

为研究本文算法是否正确,下文将采用目前常用的分析方法(云图法)进行验证,研究两种算法分析结果的一致性情况,对于常用方法建立易损性曲线的具体步骤:分别建立各墩高数值模型,考虑参数不确定性,抽样提取1000组桥梁分析样本,与1000组地震动匹配,建立桥梁-地震动分析样本,然后根据1000组样本的计算结果,建立各墩高桥梁的概率需求模型,而后利用式(7)建立10、12.5、17.5、20 m墩高简支梁的易损性曲线,并将其与本文算法结果进行对比,分析两种算法的差异性,来验证本文所提方法的正确性。

由于篇幅有限,图8给出了两种方法计算出的

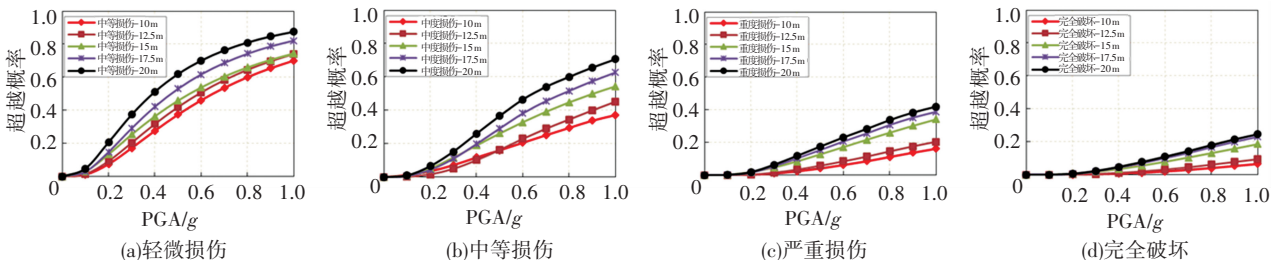


图6 24 m跨径各墩高桥梁3#桥墩易损性曲线

Fig.6 Seismic vulnerability curves of pier #3 of simply supported beam with different pier heights (span = 24 m)

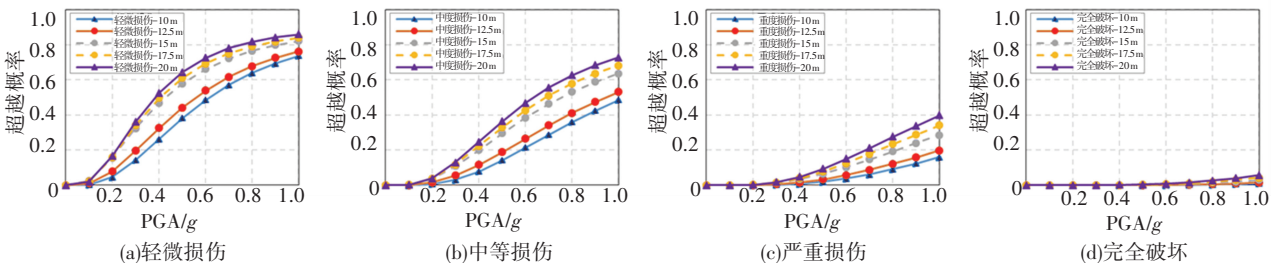


图7 24 m跨径各墩高桥梁3#桥墩支座易损性曲线

Fig.7 Seismic vulnerability curves of bearings of pier #3 of simply supported beam with different pier heights (span = 24 m)

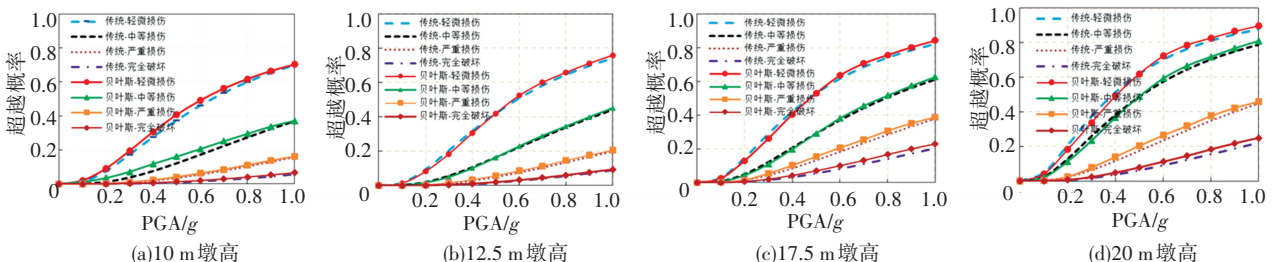


图8 两种分析方法得到的3#墩构件纵向易损性曲线

Fig.8 Seismic vulnerability curves of members of pier #3 in longitudinal direction obtained by two methods

10、12.5、17.5、20 m墩高桥梁3#墩易损性结果。分析可知:本文方法与常用方法计算结果较为吻合,所算出的损伤概率曲线几乎重合,这说明本文所建立的方法是正确的。

表8 不同墩高24 m简支梁3#墩易损性函数后验分布信息
Tab.8 Posterior distribution information for pier #3 of simply supported beam with different pier heights (span = 24 m)

墩高/m	损伤状态	$\ln \bar{\alpha} \sim N(\mu_{\bar{\alpha}}, \sigma_{\bar{\alpha}}^2)$		$\beta \sim U(\beta_1, \beta_2)$	
		$\mu_{\bar{\alpha}}$	$\sigma_{\bar{\alpha}}$	β_1	β_2
10	轻微损伤	0.717	1.193	0.675	0.857
	中等损伤	0.772	1.193	0.675	0.857
	严重损伤	1.029	1.193	0.716	0.898
	完全破坏	2.229	1.193	0.716	0.898
12.5	轻微损伤	0.630	1.254	0.727	0.881
	中等损伤	0.675	1.254	0.727	0.881
	严重损伤	0.863	1.254	0.766	0.920
	完全破坏	1.768	1.254	0.766	0.920
17.5	轻微损伤	0.485	1.223	0.697	0.872
	中等损伤	0.522	1.223	0.697	0.872
	严重损伤	0.633	1.223	0.737	0.912
	完全破坏	1.252	1.223	0.737	0.912
20	轻微损伤	0.480	1.174	0.673	0.835
	中等损伤	0.531	1.174	0.673	0.835
	严重损伤	0.592	1.174	0.715	0.877
	完全破坏	1.187	1.174	0.715	0.877

为深入分析两种算法计算结果的差异特征,图 9 给出了两种算法概率偏差变化趋势。

由图 9(a)分析可知,对于 10 m 墩高简支梁 3# 桥墩,两种算法结果偏差小,轻微损伤状态出现了最大偏差 4.2%,轻微和中等两种损伤的偏差曲线走势相近,均是正弦波变化形式。对于严重和完全破坏状态,两种方法偏差较小,最大偏差值均在 0.7% 左右,综上对于 10 m 墩高桥梁两种算法概率偏差均小于 4.5%,计算结果较为吻合。

由图 9(b)分析可知,对于 12.5 m 墩高简支梁,两种方法计算的 3# 墩损伤概率偏差最大为 3.8%,出现在轻微损伤时;轻微和中等损伤对应的偏差曲线走势一致,近似服从正弦波式的变化。而对于严

重损伤、完全破坏下的概率偏差较小,最大偏差值为 2.9%,故两种方法计算结果较为吻合。

由图 9(c)分析可知,对于 17.5 m 墩高桥梁,3# 桥墩在轻微、中等、严重、完全破坏 4 种状态下的最大概率偏差分别为 2.21%、1.97%、3.03%、2.96%,前两种损伤状态的偏差曲线变化趋势一致,后两种损伤状态的偏差曲线变化趋势一致。

由图 9(d)分析可知,对于 20 m 墩高简支梁,3# 墩两种方法计算结果最大概率偏差达到 5.61%,为轻微损伤状态的计算结果,但较大偏差仅出现在 $PGA \approx 0.2g \sim 0.4g$ 时,其他范围内两者的概率偏差均小于 4%。对于中等、严重、完全破坏状态对应的概率偏差值均小于 4%。

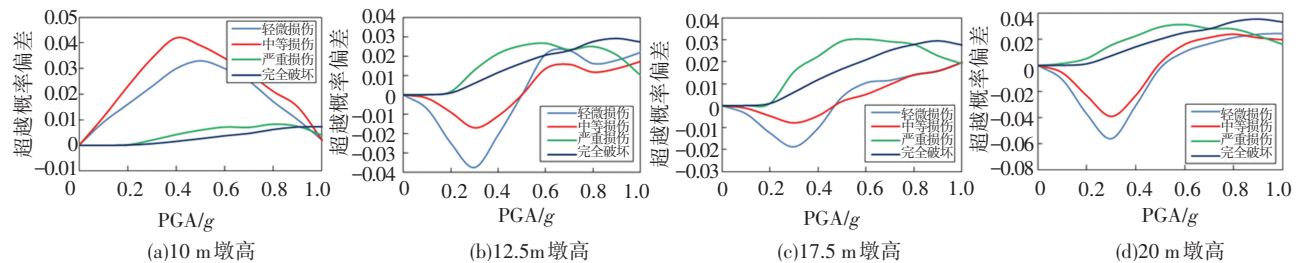


图 9 两种分析方法 3# 桥墩构件损伤概率偏差

Fig.9 Damage error probability of members of pier 3# obtained by two methods

表 9 给出了 CM 法和 BEM 法开展一种墩高桥梁易损性分析时所需计算耗时(总耗时间用 1 台电脑同时计算 6 个桥梁模型,将 1 000 条地震波结果全部算完所需总时间表示)。由表 9 可知本文所提方法计算工作量相比传统分析方法可减少 50% 以上,显著提高了分析效率。

表 9 BEM 法和 CM 法计算耗时

Tab.9 Comparison of time consumption of BEM and CM

方法	PGA(按 0.1g 调幅)	地震波总数	总耗时/h
CM	0.1g ~ 1.0g	100 × 10	52.8
BEM	0.1g ~ 1.0g	30 × 10	19.4

综上所述,对于各墩高桥梁关键构件,基于贝叶斯估计的易损性分析法与常用方法建立的桥梁易损性曲线变化趋势一致,局部 PGA 出现最大概率偏差 5.61%,依据文献[23]研究成果,上述偏差在工程应用允许的范围内,这表明本文算法是正确的,此外本文算法在保证精度的前提下,显著降低了计算工作量,提高了分析效率,因此本文算法具有良好的计算效率和稳定性。

2.8 典型铁路 32 m 简支梁地震易损性分析

2.7 节验证了本文算法的正确性,并对典型铁路 24 m 跨径简支梁桥开展了易损性分析,为研究常用 32 m 跨径铁路简支梁桥的地震易损性,运用本文提出的易损性分析方法,以 2.5 节中 4 × 24 m 跨简支

梁 15 m 墩高模型计算结果为先验信息,对 4 × 32 m 跨径简支梁 7 种实心墩高(墩高分别为 3、5、8、10、15、20、25 m)和两种空心墩高(墩高分别为 30、35 m)桥梁开展地震易损性分析,图 10、11 分别为 BEM 法计算得到的桥墩、支座构件在纵向地震作用下的易损性曲线。

由图 10(a)、10(b)分析可知:在轻微和中等损伤状态下,实心墩随着墩高增高,其越容易发生地震破坏,25 m 墩最易发生地震损伤,3 m 墩高最不容易发生地震损伤。分析其原因为墩身截面尺寸随墩高的增加按一定规律增长,是墩高对损伤概率起决定性作用,故出现墩底损伤概率随着桥墩高度的增加而增加的现象。对于空心截面的桥墩,其地震损伤概率均小于 15 m 以上墩高的实心墩,轻微和中等损伤状态下桥墩损伤排序为 25、20、15、35、30、10、8、5、3 m。对于所有桥墩而言,当设计地震时($PGA = 0.3g$),各桥墩轻微损伤发生概率小于 50%,中等损伤发生概率小于 30% 左右,这说明设计地震下部分桥墩出现屈服;在罕遇地震下($PGA = 0.57g$),10 m 以下桥墩出现轻微、中等破坏的概率不超过 35%。

由图 10(c)和 10(d)分析可知:对于严重损伤状态,25 m 墩高的桥墩最易损,其次是 35、20、30 m 墩高,10 m 以下桥墩发生严重损伤概率较低。对于完全破坏状态,在罕遇地震下($PGA = 0.57g$),所有

墩高桥墩几乎不会发生完全破坏,这说明各墩高桥墩具有良好的抗震性能。

由图 11 分析可知:对 25 m 墩高以下简支梁,随着墩高的增加支座易损概率并非线性增加,其墩高的易损排序为:25、20、15、3、5、10、8 m。对于 3 m 和

5 m 墩高梁桥支座易损性的变化规律与其他墩高存在较大差异。3 m 和 5 m 墩高对应支座损伤概率均高于 8 m 和 10 m 墩高结果。对于 30 m 以上墩高简支梁,地震作用下,墩高越高,支座越容易损伤,且墩高对支座地震损伤影响较敏感。

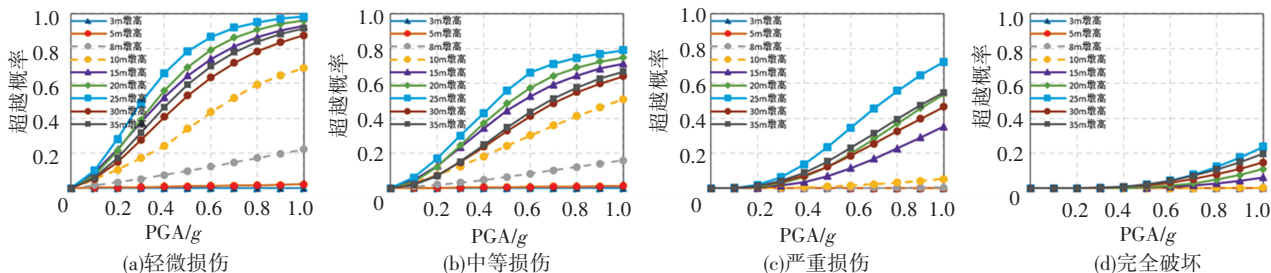


图 10 32 m 跨度简支梁 3#桥墩地震易损性曲线

Fig.10 Seismic vulnerability curves of pier #3 of simply supported beam (span=32 m)

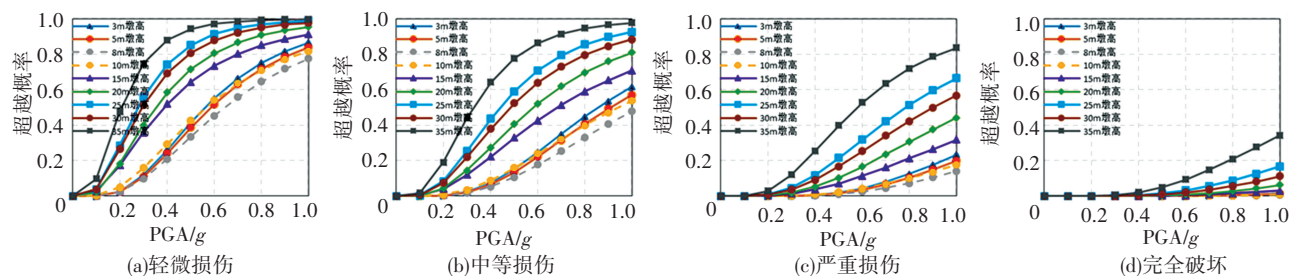


图 11 32 m 跨度简支梁 3#墩活动支座易损性曲线

Fig.11 Seismic vulnerability curves of bearings of pier #3 of simply supported beam (span=32 m)

3 方法推广应用分析

本文将贝叶斯理论应用到桥梁易损性分析中,基于已有易损性结果,结合贝叶斯理论通过少量计算建立其他类似桥梁易损性曲线,最后提出了一种新的易损性分析方法。相比常用易损性分析方法(如云图法、似然函数法、蒙特卡洛法),可显著减少计算工作量,适用于多种情况下的应用,具体说明如下:

1) 目前各国学者主要开展远场地震易损性评估,对近断层区桥梁易损性评估研究较少,主要的一个原因是大部分地区缺乏实测近断层地震波记录,易损性分析需要的近断层地震样本不足,只能通过人工地震波来弥补,但人工地震波有时不能反映实际情况,因此可以利用本文算法,通过少量桥址地区近断层地震动实测样本计算分析便可建立起桥梁近断层地震易损性曲线,对桥梁进行抗震性能评估。此外,对于相同桥梁在不同地震烈度、不同特征周期、不同场地类型地震作用下的易损性特征,也可运用本文算法方便、快捷地开展分析评估,研究地震动特性对桥梁抗震性能的影响。

2) 目前常用桥梁易损性分析方法都是“一桥一算”,这导致运用地震易损性分析方法开展桥梁抗震设计参数(如配筋率、截面尺寸、支座摩擦系数、支座刚度、桩基强度等)优化分析难度较大,主要是

所需计算工作量巨大,实施起来很困难。而本文算法提供了一种高效的途径,先利用常用方法计算一种桥梁参数的易损性结果,而后利用贝叶斯方法通过少量计算便可开展设计参数优化分析。

3) 目前国内外学者利用桥梁易损性分析方法比选桥梁抗震加固方案,因合理的加固方案一般是多种方案的组合,因此导致方案比选过程中需要开展大量计算,分析效率低。故可采用本文所提方法进行多种方案易损性分析,既减少计算工作量,又可快速地对加固方案的设计参数进行优化分析。

4) 目前高烈度区全线铁路桥梁设计过程中,往往需要对比多种桥式方案,如不同跨径、不同墩高、不同减隔震措施等参数均需要优化比选。而采用传统易损性分析方法来评估这些桥梁抗震性能时,需要开展大量计算分析工作。此外在简支梁桥设计过程中,通常会“以典代线”,选取典型桥梁进行抗震性能评估,由于不能一桥一算,有时可能会使一些桥梁设计偏于不安全,有时还可能提高工程造价,因此可采用本文算法,通过少量计算评估各种参数下桥梁抗震性能,优化设计方案。

4 结 论

1) 将贝叶斯理论引入易损性分析中,提出了一种新的桥梁易损性分析方法(BEM法),提高了易损

性分析效率,并对该方法的正确性进行验证,以某 8 度地震区典型 24 m 和 32 m 铁路简支梁为研究对象,开展了不同墩高桥梁抗震性分析,并对本文方法在多个领域的推广应用进行了论述。

2) 所提出的基于贝叶斯理论的桥梁地震易损性评估法与常用方法相比计算结果一致,偏差较小,故 BEM 法计算理论和分析结果是正确的。

3) 通过本文算法与常用方法对比分析表明:本文算法在满足计算精度前提下可减少计算工作量 50% 以上,提高分析效率,具有较好的适应性。当需要开展大规模桥梁地震易损性评估、桥梁多种减震方案比选、桥梁多种抗震加固方案比选时,建议采用 BEM 法开展分析。

参考文献

- [1] 董俊. 铁路高墩大跨刚构-连续组合体系桥梁近场地震易损性分析研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2016
DONG Jun. Fragility analysis of railway long span rigid frame-continuous combination system bridge with high pier subjected to near-fault ground motion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016
- [2] 董俊,曾永平,单德山. 高墩大跨铁路桥梁构件三维地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3):141
DONG Jun, ZENG Yongping, SHAN Deshan. Three-dimensional seismic vulnerability analysis of long-span railway bridge components with high pier[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3):141
- [3] 铁路工程抗震设计规范:GB 20111—2006 [S]. 北京:中国计划出版社, 2006
Code for seismic design of railway engineering: GB 20111—2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006
- [4] NIELSON B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005
- [5] DUKES J. DESROCHES R, PADGETT J E. Sensitivity study of design parameters used to develop bridge specific fragility curves [C]//15th World Conference of Earthquake Engineering. Lisbon: [s.n.], 2012:34
- [6] BANERJEE S, CHI C. State-dependent fragility curves of bridges based on vibration measurements[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2013, 33(10):116
- [7] 董俊,单德山,张德华,等. 非规则桥梁近、远场地震易损性对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3):159
DONG Jun, SHAN Deshan, ZHANG Erhua, et al. Near and far-field seismic fragility comparative analysis of irregular bridge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):159
- [8] BIGNELL J, LAFAVE J. Analytical fragility analysis of southern Illinois wall pier supported highway bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 39(7):709
- [9] BHUIYAN A R, ALAM M S. Seismic vulnerability assessment of a multi-span continuous highway bridge fitted with shape memory alloy bar and laminated rubber bearing[J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(4):1379
- [10] TAVARES D H, SUESCUN J R, PAULTRE P, et al. Seismic fragility of a highway bridge in Quebec[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(11):1131
- [11] MOSLEH A, RAZZAGHI M S, JARA J, et al. Seismic fragility analysis of typical pre-1990 bridges due to near- and far-field ground motions [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2016, 8(1):1
- [12] 胡思聪,王连华,李立峰,等. 非一致氯离子侵蚀下近海桥梁时变地震易损性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4):62
HU Sicong, WANG Lianhua, LI Lifeng, et al. Time dependent seismic fragility assessment of offshore bridges subject to non-uniform chloride-induced corrosion [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(4):62
- [13] 曹小伟. 减震榀-活动支座铁路连续梁桥地震易损性分析 [D]. 北京:北京交通大学, 2019
CAO Xiaowei. Seismic vulnerability analysis of railway continuous girder bridge with steel bar damper-movable support [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019
- [14] SWAINE R B, DEFINETTI B. Theory of probability[J]. Technometrics, 1974, 23(2):204
- [15] 李大垣. 基于贝叶斯理论的钢筋混凝土梁柱中节点抗剪强度研究 [D]. 西安:长安大学, 2012
LI Dayuan. Research on shear strength of RC beam column interior joints based on the Bayesian theory [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012
- [16] 马腾. 川藏铁路简支梁桥地震易损性及风险评估研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2016
MA Teng. Seismic vulnerability and risk assessment research of railway simply supported girder bridge for Sichuan-Tibet [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016
- [17] 肖明洋. 高墩混凝土连续刚构桥地震易损性分析 [D]. 成都:西南交通大学, 2013
XIAO Mingyang. Seismic vulnerability analysis for concrete continuous rigid bridge with high piers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013
- [18] 陈力波. 汶川地区公路桥梁地震易损性分析研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2012
CHEN Libo. Seismic vulnerability analysis for highway bridges in Wenchuan region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012
- [19] TADINADA S K. A Bayesian framework for probabilistic seismic fragility assessment of structures [D]. North Carolina: North Carolina State University, 2012
- [20] DEGROOT M H, SCHERVISH M J. Probability and statistics [M]. Englewood Cliff: Pearson Education, 2010
- [21] 董俊,曾永平,单德山. 核密度估计的桥梁结构地震易损性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3):109
DONG Jun, ZENG Yongping, SHAN Deshan. Seismic fragility analysis of railway bridge using kernel density estimation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3):109
- [22] TAVARES D H, PADGETT J E, PAULTRE P. Fragility curves of typical as-built highway bridges in eastern Canada [J]. Engineering Structures, 2012, 40(7):107
- [23] MADSEN H O, KRENK S, LIND N C. Methods of structural safety [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1986