

概率模型参数区间变化的在役桥梁可靠性评估

陈旭勇¹, 樊建平²

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:建立了随机变量参数区间变化的在役桥梁可靠性评估模型, 从而验证参数的小变化对在役桥梁可靠性评估的影响。通过实践工程表明, 随机变量参数的小偏差, 对评估结果影响较大, 若以工程界接受的 5% 的偏差为例, 计算发现, 最大失效概率是最小失效概率的 6 248.8 倍。因此, 在役桥梁中, 概率分布不明确时, 不能按设计参数进行可靠性评估, 而应根据实测资料进行概率分布统计。由于受经费及测量手段的限制, 很难得到精确的概率分布函数, 建议采用区间变量的非概率可靠性进行在役桥梁的评估。

关键词:在役桥梁; 可靠性评估; 随机变量; 区间变量

中图分类号: U445

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.09.010

0 引 言

可靠度理论在结构工程分析与设计中的应用始于 20 世纪 40 年代。1947 年, A. M. Freudenthal 发表了“The safety of structures”一文, 初步奠定了基于概率理论的结构可靠性分析基础^[1]。1969 年 C. A. Cornell 提出在可靠度分析中应用直接与结构失效概率相联系的可靠指标 β 来衡量结构可靠度, 并建立了结构可靠度理论的一次二阶矩理论, 即中心点法^[2]。1977 年 Rackwitz 和 Fiessler 提出了当量正态化 R-F 法^[3], 后来被国际安全度联合委员会(JCSS)所采纳, 称 JC 法, 解决了随机变量非正态分布情况下的结构可靠度计算问题。至此, 一次二阶矩模式的结构可靠度表达式与设计方法进入工程实用领域。概率可靠性设计采用概率论理论描述设计中的不确定性, 需要大量的实验数据描述模型的概率分布和隶属函数, 有关研究表明概率可靠性对概率模型参数(均值和方差)的变化极为敏感, 概率数据的微小偏差可能导致结构可靠性出现较大误差^[4,5]。

虽然国内外学者都已认同概率参数的小误差可造成评估结果的较大误差, 但都没有用实践工程加以验证。考虑随机模型参数的不确定性, 本文提出了用区间变量描述模型参数的不确定性时, 提出在役桥梁失效概率的区间估计方法, 从而验

证模型参数的小区间变化对在役桥梁可靠性评估的影响。

1 在役桥梁概率可靠性指标的求解

结构不能完成预定功能的概率称为失效概率。结构的失效概率可用下列公式表达:

$$p_f = \rho[g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0] \quad (1)$$

结构的可靠度(即可靠概率) p_s 与失效概率 p_f 有以下关系:

$$p_s = 1 - p_f \quad (2)$$

结构的可靠指标 β 与失效概率 p_f 有以下关系:

$$\beta = -\phi^{-1}(p_f) \quad (3)$$

式(3)中, $\phi^{-1}(p_f)$ 为标准正态分布的反函数。

一般情况下公路桥梁的最主要荷载是结构恒载 G 和汽车荷载 Q , 把它们作为概率可靠性指标的最基本荷载组合。其极限状态方程为:

$$g(R, S_Q, S_G) = R - S_Q - S_G = 0 \quad (4)$$

若方程 R, S_Q, S_G 均为正态分布, 则其可靠性指标为:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_{SQ} - \mu_{SG}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{SQ}^2 + \sigma_{SG}^2}} \quad (5)$$

式(5)中, $\mu_R, \mu_{SQ}, \mu_{SG}$ 和 $\sigma_R, \sigma_{SQ}, \sigma_{SG}$ 分别为结构抗力 R 、可变荷载效应 S_Q 、永久荷载效应 S_G 的平均值和标准差。

上面公式是假定基本变量是正态分布时确定

收稿日期: 2009-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972084)

作者简介: 陈旭勇(1979-), 男, 湖北武汉人, 博士。研究方向: 桥梁的评估与改造加固、大跨度桥梁的计算分析。

通讯作者: 樊建平(1957-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 桥梁的评估与改造加固、大跨度桥梁的计算分析。

的,当极限状态方程中含有非正态变量时,就要把非正态变量“当量正态化”,再利用 JC 法求得可靠性指标。非正态分布的“函数当量正态化”求得平均值和标准差为:

$$\mu_{X_i} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \sigma_{X_i} \quad (6)$$

$$\sigma_{X_i} = \frac{\varphi[\Phi^{-1}F_{X_i}(x_i^*)]}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (7)$$

x_i^* 为设计验算点,初值可取非概率分布函数的均值。结构自重为正态分布,设计基准期内,汽车荷载效应为正态或极值 I 型分布,结构抗力为对数正态分布

$$R^* = \mu_{R^*} + \alpha_{R^*} \beta \sigma_{R^*} \quad (8)$$

$$S_G^* = \mu_{S_G^*} + \alpha_{S_G^*} \beta \sigma_{S_G^*} \quad (9)$$

$$S_Q^* = \mu_{S_Q^*} + \alpha_{S_Q^*} \beta \sigma_{S_Q^*} \quad (10)$$

其中 $\alpha_i = \frac{\sigma_{X_i} \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_{X_i} \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^*} \right)^2}}$, 非正态分布的均

值和标准差由式(6)和式(7)求得。故对于非正态分布的可靠性指标的求解可利用式(8)到式(10)求得,需采用迭代法求解。

2 概率模型参数区间变化的在役桥梁可靠性评估

在役桥梁的概率分布参数选取一般是参照现有规范的统计参数得到,目前,对这些荷载的概率模型及统计参数的研究大都是针对拟建桥梁而言的,对于既有桥梁,其荷载具有自身的特殊性,因此,在既有桥梁的可靠性评估中,仍然按照结构设计的荷载规范来确定荷载值的方法显然存在不合理性。从理论上讲,在役桥梁结构的部分使用荷载(如桥梁自重荷载、汽车荷载),可以通过现场检测综合确定。但是,由于客观条件的限制(如检测经费),难以获得足够的的数据,因而不能求得精确的荷载概率模型及统计参数。

而随机可靠性模型中,随机变量的均值和标准差是最主要和最常用的两个决定性参数。假设在役桥梁中各变量的概率分布类型具有确定性,但其均值和标准差均有一定的不确定性,并且用区间变量表示。该假设是符合在役桥梁本身特性的,因在役桥梁的均值及标准差受人为因素及信息缺陷等的影响^[6],一般在一区间范围内变化。由

区间变量的一般表达式,则结构抗力、结构恒载、汽车荷载参数区间化可得:

$$\begin{cases} \mu_R = \mu_R^e + \delta_{\mu_R} \mu_R^l \\ \sigma_R = \sigma_R^e + \delta_{\sigma_R} \sigma_R^l \end{cases} \quad \begin{cases} \mu_{S_G} = \mu_{S_G}^e + \delta_{\mu_{S_G}} \mu_{S_G}^l \\ \sigma_{S_G} = \sigma_{S_G}^e + \delta_{\sigma_{S_G}} \sigma_{S_G}^l \end{cases} \quad \begin{cases} \mu_{S_Q} = \mu_{S_Q}^e + \delta_{\mu_{S_Q}} \mu_{S_Q}^l \\ \sigma_{S_Q} = \sigma_{S_Q}^e + \delta_{\sigma_{S_Q}} \sigma_{S_Q}^l \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, $\mu_R^e, \mu_{S_G}^e$ 和 $\sigma_R^e, \sigma_{S_G}^e$ 分别表示 μ_R 和 σ_R 的均值和离差, $\delta_{\mu_R}, \delta_{\sigma_R}$ 为标准化区间变量,其它参数具有相同的意义,在役桥梁评估中,均值为设计参数值。

对于正态分布的随机变量,将(11)式代入(5)式中,易求得可靠性指标的上下界,根据极限特性, δ_Y 分别取 1 或 -1, 则求得上下界为:

$$\beta^u = \frac{(\mu_R^e - \mu_R^l) - (\mu_{S_G}^e + \mu_{S_G}^l) - (\mu_{S_Q}^e + \mu_{S_Q}^l)}{\sqrt{(\sigma_R^e + \sigma_R^l)^2 + (\sigma_{S_G}^e + \sigma_{S_G}^l)^2 + (\sigma_{S_Q}^e + \sigma_{S_Q}^l)^2}} = \frac{\mu_R^l - \mu_{S_G}^u - \mu_{S_Q}^u}{\sqrt{(\sigma_R^u)^2 + (\sigma_{S_G}^u)^2 + (\sigma_{S_Q}^u)^2}} \quad (12)$$

$$\beta^l = \frac{(\mu_R^e + \mu_R^l) - (\mu_{S_G}^e - \mu_{S_G}^l) - (\mu_{S_Q}^e - \mu_{S_Q}^l)}{\sqrt{(\sigma_R^e - \sigma_R^l)^2 + (\sigma_{S_G}^e - \sigma_{S_G}^l)^2 + (\sigma_{S_Q}^e - \sigma_{S_Q}^l)^2}} = \frac{\mu_R^u - \mu_{S_G}^l - \mu_{S_Q}^l}{\sqrt{(\sigma_R^l)^2 + (\sigma_{S_G}^l)^2 + (\sigma_{S_Q}^l)^2}} \quad (13)$$

对于非正态分布的随机变量,其均值和标准差取区间变量,再利用第 1 节介绍的公式进行 JC 法求解。

3 算例分析

某钢筋混凝土桥梁,主要承受结构恒载产生的弯矩 S_G , 汽车荷载产生的弯矩 S_Q , 截面抗力为 R 。经统计分析后得各设计平均值和标准差如表 1, 假设各参数的离差变化范围为均值的 1% ~ 10%, 求其相应的可靠性。

表 1 各变量统计参数表

Table 1 Statistics of each variable parameter table

变量	R	S_G	S_Q
分布类型	对数正态	正态	极值 I 型
平均值	1 250	285	300
标准差	176.8	12.3	25.9
参数离差变化范围	1% ~ 10%	1% ~ 10%	1% ~ 10%

按设计值计算可靠性指标,此时,平均值及标准差见表 1, 参数离差为 0, 利用 JC 法通过 9 次迭代得可靠性指标为 4.942, 见表 2。

表 2 设计值计算的可靠性指标

Table 2 Reliability index of design value

迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

β	3.6893	5.0658	4.9847	4.9540	4.9449	4.9427	4.9422	4.9421	4.9421
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

当平均值和标准差在区间内变化后,通过端点组合法得到对应的可靠性指标上下界,按本文介绍的计算方法计算可靠性指标,计算的结果见表3。

表3 可靠指标界限

Table 3 The boundaries of reliable index

	设计值	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
β^l	4.942	4.748	4.557	4.369	4.184	4.003	3.827	3.655	3.488	3.325	3.168
β^u	4.942	5.136	5.328	5.517	5.704	5.888	6.070	6.250	6.427	6.602	6.776

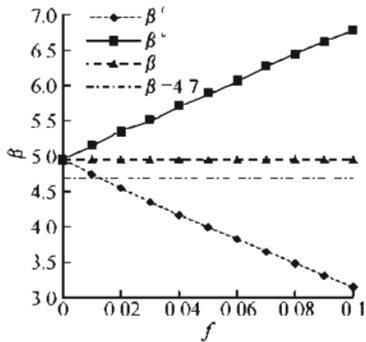


图1 可靠性指标
Fig. 1 Reliable index

从表3及图1的计算结果分析可知,随机模型分布参数的偏差对计算的失效概率的影响很大。若该桥的目标可靠指标为4.7,则从计算结构可知,若由设计参数计算的可靠性指标为4.942,评定该桥安全,当离差为设计值的2%时(即设计平均值和设计标准差的离差为它们的2%),可靠性指标的下限为4.557,评定为不安全,而上限为5.328,该桥安全,可见设计参数值很小的变动会对判定结果有很大的影响。失效概率随着设计值的偏差的增大而增大,当偏差为设计值的5%时,最大失效概率是名义失效概率的151.3倍,最大失效概率是最小失效概率的6248.8倍,而工程中由于施工误差等因素,偏差为名义值的5%以内是常见的。可见对在役桥梁的可靠性评估的随机概率分别及参数选择必须依据大量的现场测量确定,而不能参照仅仅参照现有规范的设计参数进行评估。

4 结 语

本文用区间变量描述随机模型参数的不确定性,提出了考虑概率分布参数不确定性时,在役桥梁失效概率的区间估计方法。实际算例表明桥梁

的失效概率对随机可靠性模型参数的偏差非常敏感。特别是当在役桥梁的可靠性较高时,模型参数的小偏差可导致计算的失效概率出现很大偏差。因此,对于在役桥梁的可靠性评估不能完全采用拟建桥梁的统计参数进行评估,这样可能造成大的误差。在役桥梁工程中,因为实际问题的复杂性,不确定性存在于物理、几何、测量及结构建模的各个方面及各个环节。大多数情况下,受检查手段及经费的影响,通过现场测量得到精确的概率模型是比较困难的,若用区间来描述各参数则可行的、方便的,进而进行区间变量的非概率可靠性评估。

参考文献:

- [1] Freudenthal A M. The safety of structures[J]. Trans, ASCE,1947,112:3-9.
- [2] Cornell CA. A probability-based code[J]. ACI Structural Journal,1969,66(12):20-32.
- [3] Rackwitz R, Ficssler B. Structural reliability under combined Random load sequences[J]. J Computers & Structures,1978(9):58-69.
- [4] Ellishakoff I. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: from A M Freudenthal's criticisms to modern convex modeling[J]. J Computers & Structures,1995,56(6):871-895.
- [5] Ben-Haim Y. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural safety,1994,14(4):227-245.
- [6] 郭书祥,冯立富. 随机模型参数不确定时结构失效概率的区间估计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(2):84-86.
- [7] 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.

(下转第42页)

The application of wavelet neural network on displacement predicting for high-steep slope

LI Yuan-song¹, LI Xin-ping², DAI Yi-fei², TIAN Chang-gui¹, CHEN Qing-yun¹

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, the wavelet neural network is introduced based on the comment of a few methods often used to process monitoring data. Subsequently, the internal relations between monitoring data and the wavelet neural network are discussed. Finally, a displacement predicting model is set up based on wavelet neural network. With engineering practice example as background, the displacement of high-steep slope are processed and predicted by means of the wavelet BP network. The results show that the predicting value by wavelet BP network and measuring value fit very well, and these completely satisfy the requirement of engineering construction monitor and control.

Key words: wavelet neural network; high-steep slope; displacement prediction

本文编辑: 龚晓宁

☆

(上接第 37 页)

Reliability assessment of existing bridges in interval parameters of stochastic model

CNEN Xu-yong¹, FAN Jian-ping²

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The paper establishes existing bridge reliability evaluation model of random variable parameters with interval changes to verify influences of small changes of parameters on reliability evaluation of existing bridge. Practical projects show that small deviation of random variable parameters is of great influence on evaluation results. To take the 5% deviation accepted by the engineering field as an example, calculation results show that the max failure probability is 6 248.8 times of the min failure probability. Therefore, for existing bridge, if the probability distribution is not clear, reliability evaluation shall not be made based on designed parameters but refer to measured data. Due to limitation of funds and measuring methods, it is difficult to obtain exact probability distribution functions. Therefore, we suggest using non-probability reliability of interval variables to evaluate existing bridge.

Key words: the existing bridge; reliability evaluation; random variable; interval variable 本文编辑: 龚晓宁