DOI:10.19951/j. cnki. 1672-9331. 2022. 03. 008

文章编号:1672-9331(2022)03-0078-09

引用格式:杨春侠,曹倩,曾楠,等. 基于改进条件概率法的服役结构可靠性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):78-86. **Citation:**YANG Chunxia,CAO Qian,ZENG Nan, et al. Reliability research of service structure based on improved conditional probability method[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(3):78-86.

基于改进条件概率法的服役结构可靠性研究

杨春侠¹,曹倩¹,曾楠²,李春林¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.江西中煤建设集团有限公司,江西 南昌 330001)

摘 要:【目的】探讨传统可靠度计算方法不适用于服役结构可靠性分析的问题。【方法】对相关变量进行截 尾处理并考虑结构承受的验证荷载的作用,提出了改进条件概率法。利用改进条件概率法对某服役混凝土 重力坝的典型非溢流坝段的结构可靠度进行分析,并考虑结构抗力和荷载时变模型,计算了大坝坝基面抗滑 稳定的动态可靠度。【结果】大坝坝基面的抗滑稳定可靠度随着服役时间的增长而降低,同时考虑验证荷载 的影响对结构可靠度指标具有一定的提高作用。【结论】由于改进条件概率法考虑了验证荷载的影响并对相 关变量进行了截尾处理,其计算结果比经典的可靠度计算方法的计算结果更加符合工程实际情况,为预测服 役工程的剩余寿命提供了参考。

关键词:服役结构;验证荷载;变量截尾;改进条件概率法

中图分类号: TU375 文献标志码: A

0 引言

结构可靠性分析是评估服役结构安全性的重 要方法,通过计算一定时间内结构完成预定功能 的概率来分析结构的安全状态。然而,由于受到 荷载、环境、腐蚀、疲劳等因素的影响,结构抗力随 时间发生变化,结构可靠性的评估难度也就非常 大^[1]。再者,结构在服役过程中所历经的荷载对 结构起验证作用,结构可靠度计算过程中所涉及 的随机变量的分布模型与实际情况往往存在差 异^[2]。因此,考虑结构服役期内验证荷载的影响 以及变量截尾分布对结构可靠性分析尤为重要。

近年来,学者对结构时变可靠度分析方法进行了广泛的研究。ADRIAN等^[3]为计算系统可靠

度,针对结构时变可靠度提出了改进的抽样方法。 在结构可靠度分析中,可以通过对结构施加验证 荷载,改变抗力的分布规律来达到提高结构可靠 度指标的目的。验证荷载对工程结构可靠度的影 响不容忽视^[4]。STEWART^[5]考虑结构在服役过 程中承受的使用荷载,研究了服役结构的可靠度 分析方法,认为验证荷载对结构可靠度的提高是 有利的。

在进行服役结构可靠度分析时,仅考虑已经 历的验证荷载的作用还不完全符合实际。由于结 构可靠度分析以随机变量为基础,所需随机变量 的概率分布能否反应实际情况将直接影响可靠度 分析结果的精度^[6]。然而,许多连续随机变量的 支持区间为(一∞,∞),这与工程实际不符^[7]。因 此,为解决这一问题,还要对所研究的随机变量的 概率分布进行截断,形成新的概率分布^[8]。由于

收稿日期:2021-09-23;修回日期:2021-10-29;接受日期:2021-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678067、51808054)

通信作者:杨春侠(1972-)(ORCID:0000-0003-3556-5434),女,副教授,主要从事结构可靠度、结构抗震方面的研究。 E-mail:ycx3346@126.com

概率分布发生了改变,需要用新的方法来进行结构可靠度分析^[9]。周毅等^[10]针对当量正态化法(简称 JC法)不适用于参数概率分布不完整的情况,利用 MATLAB 软件编制了对变量截尾处理后的 JC 法程序。ZHANG 等^[11]提出了一种利用截断和相关正态变量进行机械系统可靠性和灵敏度的分析方法,结果表明:考虑正态输入变量的相关分布和截尾分布,对评估失效概率和机械系统的可靠性、灵敏度是非常重要的。对截尾概率分布的研究在机械工程领域相对较多,而在土木工程领域相对较少^[12-13]。

基于以上对验证荷载和变量截尾处理对结构 可靠度影响的分析,本研究首先考虑了验证荷载 的影响,并对变量进行截尾处理;然后综合考虑了 两个因素对结构可靠度的影响,提出了考虑验证 荷载的改进条件概率法,并进行了结构可靠度指 标的计算;最后将此方法运用于某服役混凝土重 力坝典型非溢流坝段的研究中,利用抗力和荷载 时变模型,计算并预测了各个时刻大坝坝基面的 抗滑可靠度。

1 截尾概率分布的 JC 法

JC 法即当量正态化法,就是将非正态分布的 随机变量转化成对应的正态分布进行间接求解的 方法^[14]。由于服役工程结构所承受的环境荷载更 加具体,其抗力和荷载效应是建立在实际存在的 信息基础之上的,这些信息不完全等同于拟建结 构的统计特性。在水工结构的可靠度分析中,由 于极限状态方程复杂,随机变量变异系数大及随 机变量分布的两端受几何或物理限制等,因此,结 构可靠度分析往往需要对某些随机变量的分布进 行截尾处理。然而不同变量的截尾值是不同的, 如上游水位,其最大值不能高于坝高;材料的抗拉 强度、抗压强度、摩擦系数、抗剪凝聚力和被动土 压力等一般不能小于0等。在截尾处理后,随机 变量的分布没有了尾部,而结构构件可靠度分析 中的 JC 法正好在这部分工作,因此,传统 JC 法已 经不再适用于服役结构的可靠度分析,需要对其 进行专门的处理。

假设有一随机变量 x,其概率分布函数为 $F_x(x)$,概率密度函数为 $f_x(x)$,在 x_p 处的截尾 分布如图 1 所示。



图1 概率密度函数截尾示意图

Fig. 1 Schematic diagram of truncation for probability density function

进行截尾处理后的概率密度函数变为: 左截尾:

$$f_{x}^{*} = \begin{cases} \frac{f_{x}(x)}{1 - F_{x}(x_{p})}, & x \ge x_{p} \\ 0, & x < x_{p} \end{cases}$$
(1)

右截尾:

$$f_x^* = \begin{cases} f_x(x) \\ \overline{F_x(x_p)}, & x \leq x_p \\ |0, & x < x_p \end{cases}$$
(2)

式(1)和式(2)为随机变量截尾后的概率密度 函数,由上式可以看出,截尾处理后的概率密度函 数缺少两端的数据。而在应用传统 JC 法进行结 构可靠度分析计算时,要求随机变量有完整的概 率分布,即要求变量的概率密度函数的分布曲线 是完整的。因此,传统 JC 法一般不适用于进行过 截尾处理的概率密度函数,需要对概率密度函数 进行进一步的处理。本研究考虑对截尾处理后的 概率密度函数进行当量正态化,使概率密度函数 再次形成完整的正态分布。在此基础上,对处理 后满足正态分布的概率密度函数,采用二阶矩阵 法求得结构或构件的可靠度指标。下面讨论在截 尾概率分布下 JC 法的运用过程。

将截尾后的概率密度函数 $f_x^*(x)$ 补齐,曲线 上的表现形式为将曲线向左(或向右)延长(如图 1 的虚线部分所示)从而使 $f_x^*(x)$ 在($-\infty$, $+\infty$) 区间上形成完整的分布。

对于左截尾的函数,对其进行补齐处理后,函 数曲线向端部延长从而增大了与坐标轴围成的面积。设增大的面积为 F_x(x_p),则:

$$F_{x}^{*}(x) = \int_{-\infty}^{x} f_{x}^{*}(x) dx = \int_{-\infty}^{x} \frac{f_{x}(x)}{1 - F_{x}(x_{p})} dx = \frac{1}{1 - F_{x}(x_{p})} \int_{-\infty}^{x} f_{x}(x) dx = \frac{F_{x}(x)}{1 - F_{x}(x_{p})}$$
(3)

式中: $F_x^*(x)$ 为截尾后的概率分布函数。

由式(3)可知, $F_x^*(x_p)$ 的值为:

$$F_{x}^{*}(x_{p}) = \frac{F_{x}(x_{p})}{1 - F_{x}(x_{p})}$$
(4)

延长后的 $f_x^*(x)$ 是一条 $F_x(+\infty) > 1$ 的曲 线,即 $F_x(+\infty) = 1 + F_x^*(x_p)$,而 $F_x(+\infty) > 1$ 并不符合概率论规律,因此在进行计算时需要扣 除大于 1 的那部分面积;另外,在运算过程中,由 于实际分布不可能存在 $x < x_p$ 的情况,所以凡是 出现 $x < x_p$ 的数值应当令 $x = x_p + \Delta x$ (Δx 为一 小值),并且重新进行迭代计算。

对于右截尾的函数, $F_x^*(x)$ 的计算公式为:

$$F_{x}^{*}(x) = \int_{-\infty}^{x} f_{x}^{*}(x) dx = \int_{-\infty}^{x} \frac{f_{x}(x)}{F_{x}(x_{p})} dx = \frac{F_{x}(x)}{F_{x}(x_{p})}$$
(5)

由式(5)可知,将函数进行补齐处理后,与坐标轴围成的区域增加了 $\frac{1}{F_x(x_p)}$ -1的面积。同样,在运算过程中,由于实际分布不可能存在 $x > x_p$ 的情况,所以对于 $x > x_p$ 的数值,应当令 $x = x_p - \Delta x$ (Δx 为一小值),并重新进行迭代计算。

在左截尾函数中,当验算点 $x > x_p$ 时,变量的概率密度函数与概率分布函数的表达式为:

$$\begin{cases} f_{x}^{*}(x) = \frac{f_{x}(x)}{1 - F_{x}(x_{p})} \\ \\ F_{x}^{*}(x) = \frac{F_{x}(x) - F_{x}(x_{p})}{1 - F_{x}(x_{p})} \end{cases}$$
(6)

当验算点 $x \leq x_p$ 时,令 $x = x_p + \Delta x$,则 $f_x^*(x)$ 和 $F_x^*(x)$ 的值即可用式(6)进行计算。 在右截尾函数中,当验算点 *x* < *x*^{*p*} 时,变量的概率密度函数与概率分布函数的表达式为:

$$\begin{cases} f_x^*(x) = \frac{f_x(x)}{F_x(x_p)} \\ \\ F_x^*(x) = \frac{F_x(x)}{F_x(x_p)} \end{cases}$$
(7)

当 $x \ge x_p$ 时,令 $x = x_p - \Delta x$,则 $f_x^*(x)$ 和 $F_x^*(x)$ 的值即可用式(7)进行计算。

利用截尾概率分布下的 JC 法分析计算结构 可靠度指标的关键是对一般的分布变量进行当量 正态化处理。设变量截尾分布的概率密度函数为 $f_x^*(x)$,概率分布函数为 $F_x^*(x)$,进行当量正态 化的公式为:

$$\sigma'_{x} = \frac{\phi(\Phi^{-1}F_{x}(x))}{f_{x}(x)} \tag{8}$$

$$\mu'_{x} = x - \sigma'_{x} \Phi^{-1}(F_{x}(x))$$
(9)

式中: σ'_x 和 μ'_x 分别为对变量进行当量正态化后的标准差和均值; $\phi(x)$ 、 $\Phi(x)$ 分别为标准正态概率密度函数和标准正态概率分布函数。

在计算式(8)~(9)中的 $F_x(x)$ 和 $f_x(x)$ 时, 需根据原函数的截尾形式是左截尾还是右截尾以 及x与 x_p 的关系,将式(6)或式(7)中相应的 $F_x^*(x)$ 和 $f_x^*(x)$ 带入即可。

2 工程实例分析

2.1 改进条件概率法

在进行服役结构可靠度计算时,考虑结构所 承受的验证荷载对结构可靠度的影响,利用条件 概率法计算结构可靠度,即把结构经历过的验证 荷载作为概率发生的条件。然而,在进行结构可 靠度分析计算时,有些基本参数会受几何或物理 条件的限制,使得它们的实际取值不能超过某个 限值,如本研究中的上游水位不能高于坝顶高 程^[15]。但在利用JC法计算结构的可靠度时,某些 随机变量的验算点在迭代过程中极有可能出现上 游水位高于坝顶高程的情况。验算点出现这种情 况都会影响上述两个功能函数可靠度值的精度, 进而使得用考虑验证荷载的条件概率法计算得到 的服役结构的可靠性结果存在误差。因此,本研 究提出了随机变量截尾分布下的JC法,即将某些

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

需要考虑实际情况的参数处理成截尾分布的情况,然后利用截尾分布的JC法对考虑验证荷载的 条件概率法中的可靠度指标进行求解。

假设结构的极限状态方程为*R*-*S*=0,其中, *R*为结构抗力,*S*为外荷载,*R*、*S*相互独立。设结 构服役期间所经历的验证荷载为*R*,,由经历验证 荷载后结构的失效定义可知,结构的失效区域为 图 2 中的阴影部分。



图2 经历验证荷载后的结构失效区域

Fig. 2 Structural failure area after proof-load

$$P_{f}^{*} = \frac{1}{1 - F_{R}(R_{p})} \iint f_{R}(r) f_{s}(s) d\sigma =$$

$$\frac{1}{1 - F_{R}(R_{p})} P(R - S < 0 \cap R \ge R_{p}) =$$

$$\frac{1}{P(R \ge R_{p})} P(R - S < 0 \cap R \ge R_{p}) =$$

$$P(R - S < 0 \mid R \ge R_{p}) \quad (1)$$

式中: P_{f}^{*} 为结构失效概率; $f_{R}(r)$ 为抗力 R 的密 度函数; $f_{s}(s)$ 为外荷载 s 的概率密度函数; $F_{R}(R_{p})$ 为验证荷载 R_{p} 对应的抗力分布函数值。

式(10)说明用条件概率法计算考虑验证荷载 的结构失效概率是可行的。

令 $Z_1 = R - S_2 = R - R_p$,则结构失效概率的计算公式如下:

$$P_{f}^{*} = P(Z_{1} < 0 \mid Z_{2} \ge 0) = \frac{P(Z_{1} < 0 \cap Z_{2} \ge 0)}{1 - P(Z_{2} < 0)} = \frac{\Phi(-\beta_{1}) - \Phi(-\beta_{2}) \cdot \Phi\left[\frac{-(\beta_{1} - \rho A)}{\sqrt{(1 + \rho^{2}B)}}\right]}{\Phi(\beta_{2})}$$
(11)

式中: $A = \phi(\beta_2)/\Phi(-\beta_2)$; $B = A(\beta_2 - A)$; β_1 和 β_2 分别为功能函数 Z_1 和 Z_2 的可靠度指标,可 利用截尾概率分布下的 JC 法求得; ρ 为功能函数 Z_1 和 Z_2 之间的相关系数。式(11)即为在验证荷 载条件下运用改进条件概率法计算结构可靠度的 公式。图 3 所示为改进条件概率法的流程。





Fig. 3 Flow of improved conditional probability method

2.2 工程概况

本研究采用多种方法对文献[16]中某服役混 凝土重力坝典型非溢流坝段进行可靠性分析。该 坝为二级建筑物,设计基准期为 50 a,坝体横断面 如图 4 所示,坝底宽度为 58.0 m,坝顶宽度为 10.0 m,坝基面高程为 153.0 m,坝顶高程为 223.0 m,坝基面水平。坝上游面直立,下游面在 213.0 m高程处按坡度1:0.8 折坡。由于该工程 已经建设完成,故其外部轮廓的几何尺寸均是确 定量。取单位坝段进行分析,其设计时的随机变 量及其统计特征见表1。





该典型非溢流坝段坝基面抗滑稳定的极限状 态功能函数为:

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

()

$$Z = g (H_1, H_2, \gamma_c, f', c', \alpha) =$$

$$[2 \ 140\gamma_c + 4H_2^2 - (290\alpha + 25)H_1 - (555 - 290\alpha)H_2]f' + 58 \ 000c' - 5H_1^2 + 5H_2^2 = 0$$
(12)

力折减系数;γ。为坝体混凝土容重;f'为坝体混凝 土与坝基接触面的抗剪断摩擦系数(简称抗剪断 摩擦系数);c'为坝体混凝土与坝基接触面的抗剪 断凝聚力(简称抗剪断凝聚力)。

式中:H1为上游水深;H2为下游水深;a为扬压

表 1 随机变量的统计特征 Table 1 Statistical characteristics of random variables

)

统计参数	上游水深 H_1	下游水深 H ₂	坝体混凝土容重 γ _c	扬压力折减系数 α	抗剪断摩擦系数 <i>f</i> '	抗剪断凝聚力 <i>c</i> ′
均值	67.00 m	28.00 m	23.50 kN/m^3	0.25	1.00	$1 \ 000 \ kN/m^3$
变异系数	0.03	0.03	0.02	0.15	0.18	0.32
标准差	2.010 0	0.840 0	0.470 0	0.037 5	0.180 0	0.320 0
概率分布类型	正态分布	正态分布	正态分布	对数正态分布	正态分布	正态分布

2.3 随机变量的截尾处理

2.3.1 随机变量截尾处理分析

在实际工程中,通常会遇到随机变量分布的 两端受到物理或几何条件限制的情况,也有可能 遇到随机变量变异系数偏大的情况。在对这些情 况进行结构可靠度分析计算时,往往需要对某些 随机变量的分布进行截尾处理,但是对于不同的 变量,其截尾值是不一样的^[17]。在本案例中,上游 水位 H_1 原则上不能高于坝顶高程,即不能大于 70.0 m, f' 和 c' 的值都不能小于 0。因此,需对 上游水位在 70.0 m 进行右截尾,对 f' 和 c' 在 0 处进行左截尾。截尾前后计算结果的比较如表 2 所示。

表2 截尾前后计算结果的比较

 Table 2
 Comparison of calculation results

 before and after truncating

甘木亦导	可靠度	+	
基平文里	不考虑截尾	考虑截尾	- 『哨/第1/ 》0
上游水位 H1	3.721 3	3.729 4	0.22
抗剪断凝聚力 c'	3.721 3	4.131 8	11.03
抗剪断摩擦系数 f'	3.721 3	3.721 3	0.00

由表 2 可知,对随机变量 H₁ 进行右截尾处 理,截去了 H₁ 的右边部分,即截去了可能出现的 较大值,除去了不安全部分,这样可使计算得到的 可靠度指标值有一定的提高;对 c['] 进行左截尾处 理后,其计算结果的变化幅度非常明显;但对于本 案例来说,对 f'进行左截尾对结果无影响。该结果和变量敏感性的分析结果是一致的。在本案例中,c'是第一敏感变量,其次是上游水位 H₁,最不敏感的变量是 f'。

2.3.2 随机变量统计参数的确定

在上述截尾的基础上,对大坝的动态可靠度 进行分析计算,在此过程中随机变量统计参数确 定的好坏是分析结果准确与否的关键。

根据文献[17]、式(12)和极限状态方程 R - S = 0可知,抗力 R的计算式为:

 $R = [2 \ 140\gamma_{\rm c} + 4H_2^2 - (290\alpha + 25)H_1 -$

 $(555 - 290\alpha) H_2]f' + 58 \ 000c'$ (13)

荷载效应 S 的计算式为:

$$S = 5H_1^2 - 5H_2^2 \tag{14}$$

由于组成 R 和 S 的随机变量除 α 以外都是服 从正态分布的,所以根据文献[18]将 α 近似线性 化后,R 和 S 也服从正态分布。R 和 S 的均值为: $\mu_R = 91\ 383.5\ kN$, $\mu_S = 18\ 525.0\ kN$ 。

考虑到结构在实际的服役过程中,环境的变 化、材料性能的蜕变、腐蚀等因素必将使结构抗力 产生退化。导致结构抗力衰减的因素众多且复 杂,为了简化计算,常用一个衰减函数来表达结构 在长期使用过程中的抗力退化。参考指数型模型 公式及文献[19-20],设表1所示的随机变量的分 布类型不随时间变化,各随机变量的衰减函数为:

83

γ_c 的衰减函数为 φ_{γ_c}(t) = e^{-0.000 5t}, f' 和 c' 的衰减函数为 φ_{f',c'}(t) = e^{-0.005t}, α 的衰减函数为<math>φ_a(t) = (1.005)^t。以上各变量在大坝继续使用 期 T_M 内的计算方式如下:

$$\{\mu_{R}(n) = E(R(n)) = \mu_{R_{0}} \cdot a(n)$$
$$\{\sigma_{R}(n) = \sigma(R(n)) = \sigma_{R_{0}} \cdot a(n) \quad (15)$$
$$|\delta(R(n)) = \delta_{R_{0}}$$

式中: $\mu_R(n)$ 为结构在第 n 年剩余抗力的平均值; R(n)为结构在第 n 年的剩余抗力;a(n)为抗力的 确定性衰减函数; $\sigma_R(n)$ 为第 n 年剩余抗力标准 差; $\delta(R(n))$ 为抗力变异系数。

上述只提到了 4 个参数的取法,但该大坝已 经服役了 13 a,上、下游水深采用设计值显然不合 适,而应该采用实测数据。根据 K-S 检验法, H_1 、 H_2 分别服从正态分布 $\mu_{H_1} = 67.54$, $\sigma_{H_1} =$ 0.68 和 $\mu_{H_2} = 20.61$, $\sigma_{H_2} = 0.25$ 。大坝的可变荷 载 H_1 、 H_2 在继续使用期 T_M 内的统计参数等可 由参考文献[18]得出。

3 结果分析与讨论

由于在上文中已分析了 f' 分布的截尾处理 对可靠度指标没有影响,故在此只需对另外两个 变量进行截尾处理分析。假定验证荷载为 18 525 kN,验证荷载前后结构的两个功能函数的相关系 数为 0.8。分以下 4 种情况用不同方法分析服役 大坝坝基面抗滑稳定的动态可靠度,结果如图 5 所示。图 5 中, β_0 为不考虑验证荷载,采用 JC 法 计算得到的大坝抗滑的可靠度指标; β_0 为不考虑 验证荷载,采用截尾 JC 法计算得到的大坝抗滑的 可靠度指标; β 为考虑验证荷载,采用一般条件概 率法计算得到的大坝抗滑的可靠度指标; β_1 为考 虑验证荷载,采用改进的条件概率法计算得到的 大坝抗滑的可靠度指标。

由图 5 可以看出:

 ① 大坝坝基面的抗滑稳定可靠度指标随着服 役时间的增长,其值越来越小,这和实际情况 一致。



图5 服役大坝动态可靠度

Fig. 5 Dynamic reliability of the dam in service

② 将 β₀ 与 β₀ 、β 与 β₁ 进行比较,发现考虑验 证荷载的作用对结构的可靠度指标具有一定的提 高作用,说明考虑验证荷载作用对结构的可靠度 计算是非常必要的。

③ 本案例中,可靠度指标值的提高主要是因 为对随机变量进行了变量分布的截尾处理。在设 计阶段,运用截尾 JC 法计算得到的可靠度指标比 用 JC 法计算得到的可靠度指标提高了 11.4%。

本研究结合某服役大坝典型非溢流坝段坝基 面的抗滑稳定进行了可靠度分析,在分析过程中 考虑了验证荷载和变量截尾对可靠度的影响。本 研究虽然取得了一些理论成果,但有些情况仍需 作进一步的研究。例如,研究中用于分析坝基面 失稳可靠度的极限状态功能函数仍基于传统安全 系数法,此方法过于简化,忽略了坝基面的破坏是 一个渐进过程。因此,如何获得更加合理的结构 功能函数是下一步需要研究的问题。同时,本研 究在分析验证荷载对服役结构可靠度的影响时, 只考虑了确定性验证荷载的影响,未考虑随机性 验证荷载的影响。因此,在后续研究中还需进一 步考虑随机性验证荷载的作用。

4 结论

本研究考虑了结构在服役过程中客观存在的 验证荷载的作用,且对随机变量的分布进行了截 尾处理,提出了改进的条件概率法并用其计算了 服役结构的可靠度指标。考虑抗力和荷载时变模 型,利用不同的分析方法计算了4种不同情形下 服役大坝坝基面抗滑稳定的动态可靠度。得出的 结论如下:

 1)考虑确定性验证荷载作用计算得到的结构 可靠度指标比不考虑验证荷载作用计算得到的可 靠度指标要大,说明不能忽略验证荷载对服役工 程结构可靠度指标的影响。

2)改进条件概率法是结合工程实际情况,对 某些变量进行截尾处理,并考虑验证荷载作用的 一种可靠度计算方法。用该方法得到的计算结果 比用经典的可靠度计算方法得到的计算结果更加 符合工程实际情况。

 3)对随机变量进行截尾处理的可靠度分析方 法更符合工程实际,说明改进条件概率法能够对 服役中结构的寿命进行较好的预测。

〔参考文献〕

 [1] 彭建新,李星,唐皇,等. 锈蚀梁钢板加固后可靠指标 提高量分析与计算[J]. 长沙理工大学学报(自然科 学版),2016,13(1):43-48,68. DOI:10.3969/j.issn. 1672-9331.2016.01.007.

> PENG Jianxin, LI Xing, TANG Huang, et al. Analysis and calculation for improving reliability index of corroded beams strengthened by bonded steel plates [J]. Journal of Changsha University of Science &. Technology (Natural Science), 2016, 13(1): 43-48, 68. DOI:10.3969/j.issn. 1672-9331.2016.01.007.

[2] 封伯昊,张立翔,金峰.基于损伤的混凝土大坝可靠 度分析[J].工程力学,2005,22(3):46-51.DOI:10. 3969/j.issn.1000-4750.2005.03.009.

> FENG Bohao, ZHANG Lixiang, JIN Feng. Reliability analysis of concrete dam based on damage concept [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22 (3): 46-51. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2005.03.009.

- [3] ADRIAN M T, IGNACIO E B, ARMANDO S L, et al. Dealing with epistemic uncertainty in riskinformed decision making for dam safety management[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 191: 106562. DOI: 10. 1016/j. ress. 2019. 106562.
- [4] 陈龙,黄天立.基于贝叶斯更新和逆高斯过程的在役
 钢筋混凝土桥梁构件可靠度动态预测方法[J].工程
 力学,2020,37(4):186-195. DOI:10.6052/j.issn.
 1000-4750.2019.05.0273.

CHEN Long, HUANG Tianli. Dynamic prediction of reliability of in-service RC bridges using the Bayesian updating and inverse Gaussian process[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 186-195. DOI: 10.6052/ j. issn. 1000-4750. 2019.05.0273.

- [5] STEWART M G. Effect of construction and service loads on reliability of existing RC buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127 (10): 1232-1235. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445 (2001) 127: 10(1232).
- [6] 许福友,陈艾荣.基于截尾概率分布的结构可靠性分析[J].工程力学,2006,23(11):52-57.DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2006.11.009.
 XU Fuyou, CHEN Airong. Structural reliability analysis based on truncated probabilistc distribution[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11):52-57.DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.11.009.
- [7] 李明,吴波.基于截尾概率分布的基坑突涌模糊可靠 度分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):294-302,318.

LI Ming, WU Bo. Fuzzy reliability analysis on water inrush in foundation pit based on truncated probability distribution[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1):294-302, 318.

[8] 蒋友宝,陈治茂,吴林华,等. 楼板模型对内廊式对称 普通 RC 框架及改进结构 Pushover 分析结果的影响
[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):
47-52,59. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9331. 2020.
01.008.

JIANG Youbao, CHEN Zhimao, WU Linhua, et al. Influences of slab models on Pushover analysis results for symmetrical normal RC frame with interior corridor and improved structure[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17 (1): 47-52, 59. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9331. 2020. 01. 008.

[9] 叶李斌,张镔锋.加固后现浇钢筋混凝土楼板静载试验分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021, 18(3):32-37. DOI:10.3969/j.issn.1672-9331. 2021.03.005.

YE Libing, ZHANG Binfeng. Static load test analysis of in-situ reinforced concrete floor after reinforcement[J]. Journal of Changsha University of Science
& Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 3237. DOI:10.3969/j.issn. 1672-9331, 2021, 03, 005.

- [10] 周毅,陈波,赵鹏.基于 MATLAB 的截尾分布下 JC 法计算可靠度[J].西部大开发,2011(1):53-54.
 ZHOU Yi, CHEN Bo, ZHAO Peng. Calculation of reliability by JC method under censored distribution based on MATLAB[J]. West China Development, 2011(1):53-54.
- [11] ZHANG F, XU X Y, CHENG L, et al. Mechanism reliability and sensitivity analysis method using truncated and correlated normal variables[J]. Safety Science, 2020, 125: 104615. DOI: 10. 1016/j. ssci. 2020. 104615.
- [12] 金聪鹤,钱永久,徐望喜,等.考虑关联荷载验证时 变抗力的桥梁结构可靠度评估方法[J].振动与冲 击,2021,40(15):146-155. DOI:10.13465/j.cnki. jvs.2021.15.019.

JIN Conghe, QIAN Yongjiu, XU Wangxi, et al. Reliability evaluation method of bridge structure considering time-varying resistance verified by correlated load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (15):146-155. DOI:10.13465/j. cnki. jvs. 2021.15. 019.

[13] 李汇源.基于验证荷载法的既有结构安全性评定 [D].西安:西安建筑科技大学,2009.DOI:10. 7666/d.d195050.

> LI Huiyuan. Safety assessment of existing structures based on proof load method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. DOI:10.7666/d. d195050.

[14] 张建仁,毛杰,彭建新,等.使用碳纤维板加固的 RC 梁桥服役过程可靠度指标分析[J].长沙理工大学 学报(自然科学版),2014,11(2):25-31.DOI:10. 3969/j.issn.1672-9331.2014.02.005.

ZHANG Jianren, MAO Jie, PENG Jianxin, et al. Reliability index analysis of the service process of RC beam bridge reinforced by carbon fiber[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2014,11(2):25-31. DOI:10. 3969/j.issn.1672-9331.2014.02.005.

- [15] 夏雨,张泽俊,余颖烨,等. 一种求算结构可靠度指标的新方法[J]. 计算力学学报,2021,38(2):140-145. DOI:10.7511/jslx20191212001.
 XIA Yu,ZHANG Zejun,YU Yingye, et al. A new method for calculating structural reliability index [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2021, 38 (2): 140-145. DOI: 10.7511/js-lx20191212001.
- [16] 孙铭懋.大坝风险与使用寿命分析方法研究[D].南京:河海大学,2008:15-20.DOI:10.7666/d. y1268244.

SUN Mingmao. Research on dam risk and service life analysis method[D]. Nanjing: Hohai University,2008:15-20. DOI:10.7666/d.y1268244.

[17] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范: SL319-2018[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2018.

> Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design specification for concrete gravity dams:SL319-2018[S]. Beijing:China Water & Power Press,2018.

- [18] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:人民交通出版 社,1990.
 WU Shiwei, Structural reliability analysis[M]. Beijing: China Communications Press,1990.
- [19] 张俊芝,李桂青.服役重力坝系统可靠度及概率寿命探讨[J].水利学报,2000(4):40-45.DOI:10. 3321/j.issn:0559-9350.2000.04.008.
 ZHANG Junzhi,LI Guiqing. A study on system reliability and experctancy of gravity dam in service [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000(4):40-45.DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2000.04.008.
- [20] 牛荻涛. 混凝上结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社,2003:22-30.
 NIU Ditao. Durability and life forecast of reinforced concrete structure[M]. Beijing: Science Press, 2003: 22-30.

Reliability research of service structure based on improved conditional probability method

YANG Chunxia¹, CAO Qian¹, ZENG Nan², LI Chunlin¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Jiangxi Zhongmei Engineering Group Co. , Ltd. , Nanchang 330001, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to explore the problem that the traditional reliability calculation method is not applicable to the reliability analysis of service structures. [Methods] The improved conditional probability method was proposed considering the truncation of correlation variables and the effect of proof-load. The proposed method was applied to analyze the structure reliability of a typical non-overflow section of a concrete gravity dam in service. The dynamic reliability of anti-sliding stability of the dam foundation surface was calculated considering the resistance of structure and the load time-varying model. [Findings] The anti-sliding stability reliability of the dam foundation surface decreases with the increase of service time, and the reliability index of structure can be improved by considering the influence of proof-load. [Conclusions] Due to considering the effect of the proof-load and the truncation of correlation variables, the improved conditional probability method is more in line with the actual situation of the project than the classical reliability calculation method, which can provide some reference for predicting the remaining life of the service project.

Key words: service structure; proof-load; variable truncation; improved conditional probability method

(责任编辑:刘国奇;校对:石月珍;英文编辑:粟森)

Manuscript received: 2021-09-23; revised: 2021-10-29; accepted: 2021-11-20

Foundation item: Projects(51678067,51808054) supported by the National Natural Science Foundation of China Corresponding author: YANG Chunxia(1972-)(ORCID:0000-0003-3556-5434), female, associate professor, research interest; structural reliability and seismic resistance, E-mail:ycx3346@126.com