第51卷第1期 大连理工大学学报 Vol. 51, No. 1
2011年1月 Journal of Dalian University of Technology Jan. 2011

文章编号：1000-8608(2011)01-0084-06

基于贝叶斯理论的大坝体系可靠度计算方法

徐 强[1]， 陈健云[*1,2]， 李 静[1]， 范书立[1]

（1. 大连理工大学 土木工程学院，辽宁 大连 116024；
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要： 提出了大坝体系可靠度的改进计算方法. 首先，通过响应面法拟合极限状态函数，进而通过JC法求出大坝单元的失效概率. 然后，通过设定失效模式，以复合极限状态函数为准则，搜索出相应的失效路径；基于贝叶斯公式和Cauchy-Schwarz不等式，通过推导得出大坝以某种失效模式失效时的失效概率的上限，从而得出大坝整个体系的可靠度. 最后，结合规范，施加地震荷载、静水压力和动水压力进行了实例验证，并对各种荷载进行了敏感性分析. 结果表明，与常规求解大坝体系可靠度方法相比，其优点为考虑了多条失效路径，使用的为其失效概率的上限，计算偏于保守.

关键词： 贝叶斯公式；Cauchy-Schwarz不等式；体系可靠度；响应面法；失效路径；极限状态函数

中图分类号： TV698.21 **文献标志码：** A

0 引 言

非平稳地震作用下结构可靠性分析，主要包括失效路径搜索、失效模式相关性、非平稳地震波结构随机响应分析等方面. 近年来，国内外许多学者对混凝土重力坝在非平稳地震动过程中的可靠度计算进行了一系列的研究，使得可靠度的计算取得了较大的进展. 丁阳等[1] 对大跨度空间结构在非平稳地震动过程中的响应进行了分析. 曹晖等[2] 对结构在非平稳地震动过程中非线性响应进行了分析. 而在非平稳地震动过程的结构响应分析中，林家浩[3] 提出的虚拟激励法无疑是一个强有力的工具. 汪梦甫[4,5] 使用虚拟激励法对非比例阻尼线性体系在非平稳地震动过程中的响应进行了分析. 孙建梅等[6] 使用虚拟激励法对多点输入下大跨空间索结构进行了分析. 而在可靠度计算中，龚文俊等[7] 使用虚拟变量法对结构可靠度参数敏感性进行了分析. Moore 等[8] 分析了随机荷载下可靠度的置信区间. Zheng 等[9] 改进了响应面方法，将之应用于随机结构的运算中. Guan 等[10] 对响应面中的自变量的选取进行了研究. Gupta 等[11] 计算了非线性系统下应力的概率分布. Gomes 等[12] 和 Cheng 等[13] 尝试使用神经网络对结构的可靠度进行计算. Kaymaz 等[14] 和 Gavin 等[15] 通过加权回归的方法改进了响应面法. Wong 等[16] 分析了响应面法的收敛性. Zou 等[17] 改进了 Monte Carlo 法使之更有效地产生实验点. Léger 等[18] 将随机有限元理论以及可靠度理论用于对混凝土重力坝可靠度的评估. Castillo 等[19] 对混凝土重力坝的可靠度进行了敏感度分析. Song 等[20] 尝试使用体系可靠度解决混凝土重力坝的可靠度分析.

从目前研究来看，地震作用下的重力坝可靠性问题中关于失效路径的搜寻以及相应的失效模式的概率分析还有很多问题需要阐述和解决：一方面，有限元法分析地震作用下各种失效模式的功能函数和可靠度指标的计算量十分巨大，对于破坏路径的搜寻均没有进行到底，这主要是由于搜寻破坏路径的准则过于复杂，计算量过于庞大；

收稿日期： 2008-12-20； **修回日期：** 2010-11-11.
基金项目： “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714107)；教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-06-0270)；国家自然科学基金资助项目(50978043).
作者简介： 徐 强(1982-)，男，博士生，E-mail：xuqiang528826@163.com；陈健云*(1968-)，男，教授，博士生导师，E-mail：eerd001@dlut.edu.cn.

另一方面，大坝在动力作用下的可靠性研究仅限于大坝可靠度分布或局部抗拉性能可靠度，得到的可靠性指标不能反映大坝的整体可靠性. 而且，某一条破坏路径的失效概率并不能代表某种失效模式的整体概率.

针对以上问题，本文基于响应面法、Cauchy-Schwarz 不等式、贝叶斯公式，利用虚拟激励法推导出一种计算大坝结构体系失效的方法；并利用公式，推导出大坝结构体系的失效概率.

1　模型的建立

1.1　坝体体系中单元失效概率的推导

设坝体中的单元 i 失效的事件为 A_i，坝体某种失效模式为 B_j. 给出一种极限状态函数 $Z(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，设定响应面 $g(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 拟合极限状态函数 $Z(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，可得到

$$\min \quad \beta_i = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sqrt{\left(\frac{x_1 - Ex_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2 - Ex_2}{\sigma_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{x_n - Ex_n}{\sigma_n}\right)^2}$$

$$\text{s. t.} \quad g(x_1, x_2, \cdots, x_n) = 0 \tag{1}$$

式中：β_i 为坝体中的单元 i 的可靠指标.

使用 JC 法就可以计算出 β_i，从而得出失效概率

$$P(A_i) = 1 - \Phi(\beta_i) \tag{2}$$

1.2　坝体体系中失效路径的搜索

使用 Monte Carlo 法随机模拟一些随机变量 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ m 次，将这些随机变量赋给每个单元作为其随机参数. 每一次都按照失效模式 B_j，按以下方法进行搜索：当每次使用 Monte Carlo 法随机模拟一些随机变量 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 时，以极限状态函数 $Z(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为准则，搜索出坝体中的单元 i 附近 n 个单元极限状态函数的最小值

$$Z_{\min} = \min_{j=1}^{n}(Z_j) \tag{3}$$

作为失效发展的下一个单元，然后重复上一个步骤重复搜索，从而搜索出 m_j 条最可能的失效路径. 设经过坝体中的单元 i 的最可能的失效路径有 h_i 条，则坝体以失效模式 B_j 失效时，坝体中的单元 i 失效的概率为

$$P(A_i \mid B_j) = h_i / m_j \tag{4}$$

设坝体以失效模式 B_j 失效时，坝体中的单元 i 和单元 r 仍然没有失效的次数为 d_{ir}，则单元 i 和单元 r 联合可靠度的概率为

$$P(\overline{A}_i \overline{A}_r \mid B_j) = d_{ir} / m_j; \quad i < r \tag{5}$$

1.3　坝体体系中某种失效模式的概率推导

由贝叶斯定理可以得出

$$P\left(B_j \,\middle|\, \bigcap_{l=1}^{k} A_l\right) P\left(\bigcap_{l=1}^{k} A_l\right) = P\left(\bigcap_{l=1}^{k} A_l \mid B_j\right) P(B_j) \tag{6}$$

当单元 1，单元 2，…，单元 k 都失效时，失效模式 B_j 必然发生，从而可以得出

$$P\left(B_j \,\middle|\, \bigcap_{l=1}^{k} A_l\right) = \frac{P\left(\bigcap_{l=1}^{k} A_l \mid B_j\right) P(B_j)}{P\left(\bigcap_{l=1}^{k} A_l\right)} = 1 \tag{7}$$

进而得出

$$1 - P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l\right) = \left(1 - P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l \mid B_j\right)\right) P(B_j) \tag{8}$$

这里设

$$P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l\right) = \alpha P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l \mid B_j\right); \quad \alpha > 1 \tag{9}$$

α 按照下式取值：

$$\alpha = P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l\right) \Big/ P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l \mid B_j\right) \approx \left[\sum_{l=1}^{k} (1 - P_f(A_l)) - \sum_{1 \leqslant j < i \leqslant k} \left[(1 - P_f(A_j)) \times (1 - P_f(A_i))\right]\right] \Big/ \left[\sum_{l=1}^{k} (1 - P(A_l \mid B_j)) - \sum_{1 \leqslant j < i \leqslant k} P(\overline{A}_i \overline{A}_r \mid B_j)\right] \tag{10}$$

其中 P_f 为失效概率.

则可以得出

$$P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l \mid B_j\right) = \frac{1 - P(B_j)}{\alpha - P(B_j)} \tag{11}$$

假设随机变量 $Y_i(\omega)$，可以得出

$$Y_i(\omega) = \begin{cases} 0; & \omega \notin \overline{A}_i \mid B_j \\ 1; & \omega \in \overline{A}_i \mid B_j \end{cases} \tag{12}$$

进而得出式(13)、(14)、(15)：

$$2 \sum_{1 \leqslant i \leqslant r \leqslant k} P(\overline{A}_i \overline{A}_r \mid B_j) = E((Y_1 + \cdots + Y_k)^2) - E(Y_1^2 + \cdots + Y_k^2) \tag{13}$$

$$EY_i = EY_i^2 = P(\overline{A}_i \mid B_j) \tag{14}$$

$$P(Y_1 + \cdots + Y_k > 0) = P\left(\bigcup_{l=1}^{k} \overline{A}_l \mid B_j\right) \tag{15}$$

由 Cauchy-Schwarz 不等式

$$E \mid XY \mid \leqslant (EX^2)^{1/2} (EY^2)^{1/2} \tag{16}$$

可以得出

$$(E(Y_1 + \cdots + Y_k))^2 \leqslant P(Y_1 + \cdots + Y_k > 0) \times E((Y_1 + \cdots + Y_k)^2) \tag{17}$$

将式(11)、(13)～(15)代入上式,可以得出

$$P(\bigcup_{l=1}^{k}\bar{A}_l \mid B_j)=\frac{1-P(B_j)}{\alpha-P(B_j)}\geqslant \left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))\right)^2\Big/\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))+2\sum_{1\leqslant i\leqslant r\leqslant k}P(\bar{A}_i\bar{A}_r \mid B_j)\right) \tag{18}$$

由式(18)可以得出

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{f}}(B_j)\leqslant &\left(\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))+2\sum_{1\leqslant i\leqslant r\leqslant k}P(\bar{A}_i\bar{A}_r \mid B_j)\right)\times\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))-\sum_{1\leqslant j<i\leqslant k}P(\bar{A}_i\bar{A}_r \mid B_j)\right)-\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P_{\mathrm{f}}(A_l))-\sum_{1\leqslant j<i\leqslant k}(1-P_{\mathrm{f}}(A_j))(1-P_{\mathrm{f}}(A_i))\right)\times\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))\right)^2\right)\Big/\\ &\left(\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))+2\sum_{1\leqslant i\leqslant r\leqslant k}P(\bar{A}_i\bar{A}_r \mid B_j)-\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))\right)^2\right)\times\left(\sum_{l=1}^{k}(1-P(A_l \mid B_j))-\sum_{1\leqslant j<i\leqslant k}P(\bar{A}_i\bar{A}_r \mid B_j)\right)\right)\end{aligned} \tag{19}$$

从而可以得出当坝体以失效模式 B_j 失效时,失效概率 $P(B_j)$ 的上限.

1.4 坝体体系中整个体系失效概率的推导

由于坝体体系的失效模式种类很少,可以假设坝体的失效模式 B_j 都相互独立,利用公式可得到坝体整个体系的失效概率为

$$P\left(\bigcup_{j=1}^{s}B_j\right)=\sum_{j=1}^{s}P(B_j)-\sum_{1\leqslant j<i\leqslant s}P(B_j)P(B_i)+\cdots+(-1)^{s-1}P(B_1)\cdots P(B_s) \tag{20}$$

1.5 非平稳随机地震动荷载作用下荷载的施加

分别按照规范施加静水压力、扬压力. 按照 Westergaard 公式施加动水压力. 使用虚拟激励法[4,5],构造虚拟激励如下式:

$$\bar{\boldsymbol{v}}(t)_i=g(t)\sqrt{\lambda_i}\boldsymbol{\phi}_i\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{21}$$

式中:λ_i、$\boldsymbol{\phi}_i$ 是输入地震动功率谱矩阵的复特征对;$g(t)$ 是地震动的调制函数.

代入下式

$$(\boldsymbol{M}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{w}})\ddot{\boldsymbol{V}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{V}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{V}=-[(\boldsymbol{M}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{w}})\boldsymbol{\varphi}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{g}}]\ddot{\bar{\boldsymbol{V}}} \tag{22}$$

式中:$\ddot{\boldsymbol{V}}$、$\dot{\boldsymbol{V}}$、$\boldsymbol{V}$ 为体系节点的加速度、速度、位移向量;$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{M}$ 为体系的刚度、阻尼、质量矩阵;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}$ 为不可压缩库水的附加质量矩阵;$\boldsymbol{\varphi}$ 为影响矩阵;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{g}}$ 为坝体和库水对坝体与地基交界面上节点自由度的质量贡献;$\ddot{\bar{\boldsymbol{V}}}$ 为河谷表面自由场运动.

相应的坝体动应力反应可表示为

$$\boldsymbol{\sigma}(t)_i=(\boldsymbol{A}_{\mathrm{r}}+\mathrm{i}\boldsymbol{A}_{\mathrm{i}})\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{23}$$

式中:$\boldsymbol{A}_{\mathrm{r}}$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{i}}$ 均为求解得到的实向量. 设 $S_{aa}(\omega,t)$ 的秩为 k,则动反应的功率谱密度 $S_{yy}(\omega,t)$ 可由下式得到:

$$S_{yy}(\omega,t)=\sum_{i=1}^{k}\boldsymbol{\sigma}^*(t)_i\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{T}}(t)_i \tag{24}$$

相应的动应力反应的方差为

$$\sigma_\sigma^2(t)=\int S_{yy}(\omega,t)\mathrm{d}\omega \tag{25}$$

2 实例分析

重力坝坝高 160 m,正常蓄水位时坝前水深 155 m,坝后水深 10 m,其中上下游折坡面相对建基面的高程分别为 80、140 m. 坝体的混凝土强度为 C20. 荷载分别考虑了坝上游水压力、坝下游水压力、浪压力、扬压力、动水压力和地震加速度. 以平面八节点单元将大坝划分为 1 639 个单元,得到的有限元图形如图 1 所示. 岩基容重为 18.878 kN/m^3,泊松比 $\lambda=0.3$. 分别按照规范施加静水压力、扬压力. 按照 Westergaard 公式施加动水压力和地震动荷载,其峰值加速度为 0.1g. 其各种参数值见表 1[21].

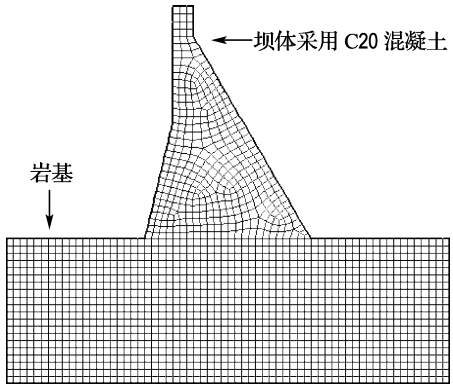

图 1 坝体及地基材料分区图

Fig. 1 Subzone of materials in dam and its foundation

表 1　各种参数值

Tab. 1　The values of all parameters

C20 混凝土的抗压强度			C20 混凝土的抗拉强度			C20 混凝土的弹性模量		
分布	均值/Pa	变异系数	分布	均值/Pa	变异系数	分布	均值/Pa	变异系数
对数正态	13.4×10^6	0.1	对数正态	1.76×10^6	0.1	正态	3.50×10^{10}	0.1
地基的黏聚力			地基的摩擦因数			地基的弹性模量		
分布	均值/Pa	变异系数	分布	均值	变异系数	分布	均值/Pa	变异系数
正态	0.61×10^6	0.1	对数正态	0.82	0.1	正态	4.00×10^{10}	0.1

本文采用的失效准则是抗滑稳定极限状态方程：

$$g(x)=\frac{-f\sigma_y+c-\tau_{xy}}{c} \tag{26}$$

式中：f 为内摩擦因数，c 为黏聚力，σ_y 和 τ_{xy} 分别为正应力和剪应力. 按照表 1 给出的参数运用 Monte Carlo 法，得出 50 组服从一定分布的随机参数. 设有 4 种失效模式：

B_1　失效模式为在坝趾处，坝体局部出现破坏，失效路径向基岩发展，引起基岩破坏；

B_2　失效模式在基建面上，发生坝体抗滑失稳；

B_3　失效模式是在上游折坡面，失效路径向坝体内部扩展，坝体局部出现破坏；

B_4　失效模式是在坝头处，失效路径向坝头另一侧扩展，坝头出现破坏.

按照式(1)、(2) 得出坝体中的单元 i 的失效概率分布 $P(A_i)$；施加各种荷载，以式(25) 计算出的动应力均方差加入到各个单元的应力中，按照式(3)，以式(26) 为极限状态，搜索出 m 条可能的失效路径，按照式(4)、(5) 得出 $P(A_i \mid B_j)$ 和 $P(\overline{A}_i\overline{A}_r \mid B_j)$，按照式(10) 计算 α，代入式(19) 得到坝体以失效模式 B_j 失效时，失效概率 $P(B_j)$ 的上限. 代入式(20) 得到大坝体系的可靠度.

通过参数的随机选取，得到坝体的失效路径如图 2；得到的各种模式失效概率和地震荷载峰值加速度的关系如表 2；得到坝体体系的失效概率和地震荷载峰值加速度的关系如图 3；得到坝体体系的可靠度和地震荷载峰值加速度的关系如图 4.

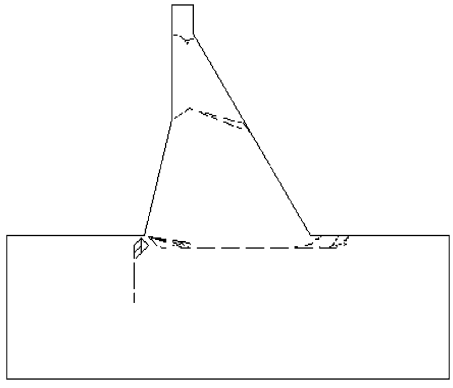

图 2　大坝的失效路径

Fig. 2　The failure paths of dam

表 2　各种模式失效概率

Tab. 2　Failure probability in some failure modes

地震荷载峰值加速度	失效模式的失效概率上限/%				坝体体系的失效概率/%	坝体体系的可靠度/%
	B_1	B_2	B_3	B_4		
$0.10g$	3.524	3.813	1.145	9.415	16.902	83.098
$0.15g$	3.727	3.946	1.164	9.677	17.448	82.552
$0.20g$	3.779	4.188	1.220	10.294	18.308	81.692
$0.25g$	4.056	4.350	1.305	10.878	19.279	80.721
$0.30g$	4.422	4.714	1.416	11.855	20.862	79.138
$0.35g$	5.093	5.433	1.628	13.260	23.418	76.582
$0.40g$	5.867	6.249	1.872	15.581	26.895	73.105

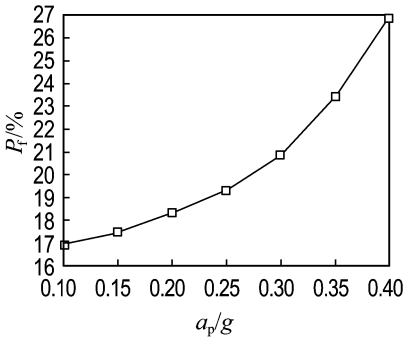

图 3 坝体体系的失效概率

Fig. 3 The system failure probability of dam

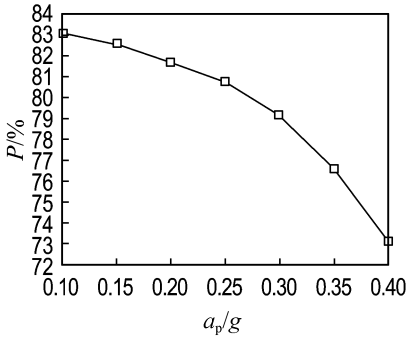

图 4 坝体体系的可靠度 P

Fig. 4 The system reliability P of dam

通过对图 2 的分析可以看出,大坝可靠度比较低的地方在上游折坡面、基建面、坝趾、坝踵处.而且失效路径有 3 条:第 1 条失效路径可能是在坝趾处,坝体局部出现破坏,失效路径向基岩发展,引起基岩破坏;第 2 条失效路径可能在基建面上,发生坝体抗滑失稳;第 3 条失效路径可能是在上游折坡面,失效路径向坝体内部扩展,坝体局部出现破坏.应对上游折坡面、基建面、坝趾、坝踵处进行加固,才能有效地提高坝体的可靠度.

同时可以看出,大坝失效模式不再由某一失效路径决定,而是可能由几条失效路径共同决定.然后,这些失效模式共同决定大坝整个体系的可靠度.

通过对表 2 的分析可知,坝体系统的失效概率较低,坝体偏于安全.同时可知坝体的系统失效概率随着地震峰值加速度的增加呈指数增加,坝体的系统可靠度随着地震峰值加速度的增加呈指数递减.说明坝体的系统可靠度对地震峰值加速度的敏感度很高.

3 结 论

本文基于响应面法、Cauchy-Schwarz 不等式、贝叶斯公式,利用虚拟激励法推导出了一种计算大坝结构体系失效的方法.首先,基于响应面法计算大坝单元的失效概率;然后,利用一种简单的准则搜索破坏路径,从搜索出的破坏路径利用 Cauchy-Schwarz 不等式、贝叶斯公式反推出某种失效模式发生的概率;最后利用公式,推导出大坝结构体系的失效概率.实例验证表明,本文模型是可行的.本文模型采用复合强度准则研究大坝可靠度的计算方法,搜索失效路径的方法简单,并且得到的大坝某种失效模式的失效概率为其上限,计算得到的大坝体系的可靠度比较保守,更能反映大坝的体系可靠度.

参考文献:

[1] 丁 阳,张笈玮,李忠献. 地震动非平稳性对大跨度空间结构随机地震响应的影响[J]. 天津大学学报, 2008, **41**(8):984-990

[2] 曹 晖,林学鹏. 地震动非平稳特性对结构非线性响应影响的分析[J]. 工程力学, 2006, **23**(12):30-35

[3] 林家浩. 随机地震响应的确定性算法[J]. 地震工程与工程振动, 1986, **5**(1):89-93

[4] 汪梦甫. 非比例阻尼线性体系平稳随机地震响应计算的虚拟激励法[J]. 计算力学学报, 2008, **25**(1):94-99

[5] 汪梦甫. 用虚拟激励法求解非比例阻尼线性体系的非平稳随机地震响应[J]. 力学季刊, 2006, **27**(4):598-605

[6] 孙建梅,叶继红,程文瀼. 多点输入下大跨空间索结构的虚拟激励法[J]. 振动与冲击, 2005, **24**(4):107-119

[7] 龚文俊,刘 扬,张建仁. 基于虚拟变量法的结构可靠度参数敏感性分析[J]. 长沙交通学院学报, 2006, **22**(1):12-16

[8] MOORE L J, SA Ping. Comparisons with the best in response surface methodology [J]. **Statistics & Probability**, 1999, **44**:189-194

[9] ZHENG Y, DAS P K. Improved response surface method and its application to stiffened plate reliability analysis [J]. **Engineering Structures**, 2000, **22**:544-551

[10] GUAN X L, MELCHERS R E. Effect of response surface parameter variation on structural reliability estimates [J]. **Structural Safety**, 2001, **23**(4):429-444

[11] GUPTA S, MANOHAR C S. Improved response

surface method for time variant reliability analysis of nonlinear random structures under no stationary excitations [J]. **Nonlinear Dynamics**, 2004, **36**: 267-280

[12] GOMES H M, AWRUCH A M. Comparison of response surface and neural network with other methods for structural reliability analysis [J]. **Structural Safety**, 2004, **26**: 49-67

[13] CHENG Jin, LI Q S, XIAO Ru-cheng. A new artificial neural network-based response surface method for structural reliability analysis [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2008, **23**: 51-63

[14] KAYMAZ I, MCMAHON C A. A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2005, **20**: 11-17

[15] GAVIN H P, YAU Siu-chung. High-order limit state functions in the response surface method for structural reliability analysis [J]. **Structural Safety**, 2008, **30**: 162-179

[16] WONG S M, HOBBS R E, ONOF C. An adaptive response surface method for reliability analysis of structures with multiple loading sequences [J]. **Structural Safety**, 2005, **27**: 287-308

[17] ZOU Tong, MOURELATOS Z P, TU Jian. An indicator response surface method for simulation-based reliability analysis [J]. **Journal of Mechanical Design**, 2008, **130**: 071401-1-11

[18] LÉGER P, LARIVIÈRE R, PALAVICINI F, *et al*. Performance of gated spillways during the 1996 Sanguinity flood (Que´bec, Canada) and evolution of related design criteria [C] // **Proceeding of ICOLD 20th Congress**. Beijing: [s n], 2000: 417-438

[19] CASTILLO E, MINGUEZ R, CASTILLO C. Sensitivity analysis in optimization and reliability problems [J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2008, **93**: 1788-1800

[20] SONG Jun-ho, KANG Won-hee. System reliability and sensitivity under statistical dependence by matrix-based system reliability method [J]. **Structural Safety**, 2009, **31**: 148-156

[21] 范书立，陈健云，范武强，等. 地震作用下碾压混凝土重力坝的可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报，2008(3): 564-571

Calculation method for system reliability of dam based on Bayes theory

XU Qiang[1], CHEN Jian-yun[*1,2], LI Jing[1], FAN Shu-li[1]

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An improved calculation method for system reliability of dam is proposed. Firstly, through fitting limit state function by response surface method, the failure probability of dam units was obtained by JC method. Then, the failure paths were searched by setting failure mode according to composite limit state function, and based on Bayes formula and Cauchy-Schwarz inequality, the upper limit of failure probability for failure mode and system reliability of dam were deduced. Finally, according to the criterion, seismic load, hydrostatic pressure and hydrodynamic pressure were applied to the gravity dam model to verify the example and sensitivities of these loads were analyzed. Compared with other conventional algorithms, this method has some strong points: more failure paths are considered and the upper limit of failure probability is used for greater security.

Key words: Bayes formula; Cauchy-Schwarz inequality; system reliability; response surface method; failure path; limit state function