

DOI: 10.11779/CJGE202002014

基于区间参数反演的重力坝非概率可靠性分析

魏博文, 占良红, 李火坤*, 徐镇凯

(南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 传统概率可靠性分析方法应用重力坝结构性能和服役性态评估过程中, 其受不确定参数严格随机性、计算结果对参数敏感性及其功能函数高度非线性等多因素制约。提出了基于区间参数的重力坝单元和体系非概率可靠性(Nonprobabilistic Reliability, NR)分析方法。首先, 充分依据重力坝原型监测资料、数学模型和物理模型计算成果获取重力坝区间参数的界限, 综合运用区间数学和NR等理论和方法, 构建了基于区间参数的重力坝单元与体系NR计算模型, 发展了一种基于响应面方法的重力坝NR指标($NR-\eta$)计算方法。其次, 从重力坝系统可能失效路径及失效模式入手, 剖析单一和多重失效模式下重力坝体系的安全性。最后, 通过某重力坝工程表明: 方法能够有效地揭示重力坝局部和整体可靠状态, 计算结果符合重力坝运行特点前提下与该大坝服役背景状况高度吻合。

关键词: 重力坝; 非概率可靠性; 区间参数; 失效模式; 服役可靠性

中图分类号: TV642.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)02-0325-09

作者简介: 魏博文(1981—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事数值安全监控及水工结构方面的科研工作。E-mail: bwwei@ncu.edu.cn。

Non-probabilistic reliability analysis of gravity dams based on inversion of interval parameters

WEI Bo-wen, ZHAN Liang-hong, LI Huo-kun, XU Zhen-kai

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In the evaluation of structural performance and service behavior of gravity dams, the traditional probabilistic reliability analysis method is restricted by many factors, such as strict randomness of uncertain parameters, oversensitivity of calculated results and high nonlinearity of function function. A non-probabilistic reliability (NR) analysis method for gravity dam elements and system based on the interval parameters is proposed. First, according to the prototype monitoring data and the achievements of physical and mathematical models for gravity dams, the interval parameter boundary of the gravity dam is obtained. A NR model based on the interval parameters is established, and a method for calculating NR index ($NR-\eta$) based on response surface method is developed by using the interval mathematics and NR theory. Then, the safety of the gravity dam system in single and multiple failure modes is analyzed from the possible failure paths and modes. Finally, based on a gravity dam, the results indicate that the proposed method can effectively reveal the local and overall reliable states of the gravity dam. The calculated results are in good agreement with the background conditions of the dam under the premise of the operating characteristics of the gravity dam.

Key words: gravity dam; non-probabilistic reliability; interval parameter; failure mode; service reliability

0 引言

关于重力坝可靠度问题的研究, 国内外学者借助概率论、数理统计和随机过程等数学方法, 解决了实际工程中存在的诸多不确定性问题, 然而现有的研究成果较集中基于完整地不确定参数概率分布函数(PDF)基础上^[1-3]。实际上, 对于重力坝这种极为复杂工程而言, 大多不确定参数的实测数据十分有限, 加之重力坝工程失事为小概率事件, 即使是不确定参数概率函数尾部的较小波动, 都将可能导致计算结果

严重偏离工程实际^[4], 这些因素都一定程度上限制了传统可靠性分析方法在大坝工程中的应用。

重力坝工程不确定参数的精确概率分布函数虽难以获得, 但其变化幅度较易确定。近些年在结构领域

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779115, 51869011, 51879126); 江西省水利厅科研课题(201820YBKT29); 江西省青年科学重点项目(20192ACB21022); 江西省杰出青年基金项目(2018ACB21018); 南昌大学研究生创新专项资金项目(CX2018052)

收稿日期: 2018-09-28

*通信作者(E-mail: lihuokun@126.com)

发展起来的 NR 分析方法无需知道不确定参数的 PDF，仅需知道不确定参数集合的上、下界限，以一种 NR- η 来度量结构的安全程度，在处理不确定信息量较少而又可靠性要求较高的问题上有其独特优势和工程适应性。非概率理论起步相对较晚且主要应用于桁架、机械等结构领域。Yakov^[5]最先提出了基于凸模型的非概率理论的概念，但并未给出具体的度量标准。Elishakoff^[6] 和 Qiu 等^[7-8] 利用区间凸模型来描述不确定但有界参数，给出了一种以非概率可靠性度量结构安全程度的方法。Ganzeri 等^[9] 基于多维凸模型的 NR 方法实现了不确定但有界载荷下最优结构设计。亢战等^[10] 提出了一种基于不确定但有界参数的多椭圆凸模型的 NR- η 度量方法，并进一步将该概念推广到拓扑优化领域^[11-13]。Jiang 等^[14] 在数学层面上提出了非概率的相关分析技术，紧接着又利用开发的非概率相关分析技术构造多维椭球凸模型，提高了多维椭圆体的构造效率^[15]。苏国韶等^[16] 运用 NR 分析方法，采用高斯过程回归模型重构隐式功能函数的响应面，发展了一种基于粒子群优化的高斯过程动态响应面方法。最近，一种基于最小体积椭球的建模方法被提出，将最小体积椭球问题转化为半定规划（SDP）问题，从而有效地解决其全局最优的问题^[17]。关于非概率理论在大坝工程中的研究尚处于探索阶段^[18-19]，如何充分利用 NR 方法优势应用于重力坝安全性能分析，本文主要面临以下几个挑战：①重力坝服役当前不确定参数的合理选择及其界限的确定，其直接决定着 NR- η 计算结果的准确性；②重力坝的功能函数常为高度非线性且难以用显式的数学方程给予刻画，如何对其进行精确拟合以实现重力坝 NR- η 高效计算；③如何从 NR- η 角度来有效度量与评估重力坝局部与整个体系的安全状态，以及如何有效验证计算结果的准确性。

为此，本文通过合理确定重力坝区间参数，依据大坝原型监测资料反演重力坝区间参数的界限。在此基础上综合运用非概率和响应面等理论和方法，拟构建和发展重力坝单元和体系 NR 计算模型与方法。最后，结合某现役重力坝工程，计算分析在非概率下该重力坝可能失效路径的破坏行为，从 NR- η 角度深入剖析该坝单一和多重失效模式下体系的安全性。

1 重力坝 NR 计算模型

1.1 基于区间变量的结构 NR 计算模型

对于现役结构工程而言，其不确定性参数在一定区间内波动^[20]。考虑到重力坝服役多年期间受环境、荷载等多因素耦合作用，其参数实际值与设计参考值必然存在一定偏差。为准确分析重力坝真实服役性态，可充分利用重力坝运行性态监测资料，借助区间混合

监控模型反演现役重力坝部分不确定参数的界限。假设用参数向量 $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n\}$ 来代表这些不确定参数相关区间变量集合，其中 x_i 的上、下界分别为 x_i^u 和 x_i^l 。则结构的功能函数可表示为

$$M = g(x) = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n) , \quad (1)$$

式中， M 为区间变量， $g(x)$ 为 x_i 的连续函数。定义 M_{\max} 和 M_{\min} 分别为区间变量 M 的上、下界限值，便可计算其均值 M_c 和离差 M_r ，则结构的 NR- η 为

$$\eta = \frac{M_c}{M_r} . \quad (2)$$

由结构可靠度理论可知，超曲面 $g(x) = 0$ 为失效面，结构的基本参量空间被该失效面分为失效域和安全域，其中 $g(x) < 0$ 表示失效状态， $g(x) > 0$ 表示安全状态。结合式 (2) 判断：若 $\eta > 1$ ，结构可靠，且 η 值越大，结构安全程度相对越高；若 $\eta < -1$ ，结构失效；若 $-1 \leq \eta \leq 1$ ，结构可能安全，可能失效^[21]。

对相关区间变量 x_i 进行标准化变换，式 (1) 满足

$$M = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n) \\ = G(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}, \delta_n) = 0 , \quad (3)$$

式中， $\boldsymbol{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}, \delta_n]$ 为标准化区间向量， δ_i 的变化区域为 $[-1, 1]$ ，其扩展空间为 $\delta_i \in [-\infty, +\infty]$ 。则有

$$\begin{cases} \eta = \min \{ \|\delta\|_\infty \} \\ \text{Subject to } G(\delta) = 0 \end{cases} = \begin{cases} \eta = \min (\max \{ |\delta_1|, |\delta_2|, |\delta_3|, \dots, |\delta_{n-1}|, |\delta_n| \}) \\ \text{Subject to } G(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}, \delta_n) = 0 \end{cases} . \quad (4)$$

对于工程中常见功能函数为多区间变量的线性函数情况，式 (1) 可转化为

$$M = \sum_{i=1}^n A_i r_i - \sum_{j=1}^m S_j . \quad (5)$$

式中 n 为结构抗力参数数量； m 表示结构荷载参数数量； $r_i \in R_i^l$ 和 $s_j \in S_j^l$ 为互不相关区间变量， R_i^l 和 S_j^l 分别为结构抗力和荷载参数的区间变量； A_i 和 B_j 为常数。对 r_i 和 s_j 进行如下变换：

$$\left. \begin{array}{l} r_i = R_i^c + R_i^r \delta_{r_i} \quad (i=1,2,3,\dots,n-1,n), \\ s_j = S_j^c + S_j^r \delta_{s_j} \quad (j=1,2,3,\dots,m-1,m). \end{array} \right\} \quad (6)$$

式中 R_i^c 和 R_i^r 分别为结构抗力参数的均值和离差； S_j^c 和 S_j^r 分别为结构荷载的均值和离差； δ_{r_i} 和 δ_{s_j} 分别为抗力参数和荷载的标准化区间向量。

将式 (6) 代入式 (5) 并联合式 (2)，则结构的 NR- η 可定义为

$$\eta = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n A_i R_i^c - \sum_{j=1}^m B_j A_i S_j^c}{\sum_{i=1}^n |A_i| R_i^r + \sum_{j=1}^m |B_j| S_j^r} & \left(\sum_{i=1}^n A_i R_i^c - \sum_{j=1}^m B_j S_j^c > 0 \right) \\ 0 & \left(\sum_{i=1}^n A_i R_i^c - \sum_{j=1}^m B_j S_j^c \leq 0 \right) \end{cases} , \quad (7)$$

式中, $\eta = 0$ 时, 其前提条件是结构抗力集小于或等于结构荷载集, 在实际工程中该状态可判定结构处于非绝对安全状态 ($\eta \leq 1$)。从非概率角度来分析结构体系安全性, 可将结构单元分为绝对安全 ($\eta > 1$) 和非绝对安全 ($\eta \leq 1$) 两种重点研究对象, 故当 $\sum_{i=1}^n A_i R_i^c - \sum_{j=1}^m B_j S_j^c \leq 0$ 时, 将其结构 NR- η 视为 0。

1.2 重力坝单元与体系 NR 计算模型

(1) 重力坝单元 NR 计算模型

考虑重力坝单元强度破坏, 根据重力坝单元的第一主应力 σ_1 、第二主应力 σ_2 和第三主应力 σ_3 (拉为正, 压为负) 应力状态, 根据参考文献[22]确定三维状态下重力坝单元强度破坏的功能函数为

$$g(x) = \begin{cases} \sigma_1 - \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)f_t}{2f_c} - f_t & \left(\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 f_c + \sigma_3 f_t}{f_c + f_t} \right) \\ \frac{\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 f_t}{2} - f_t & \left(\sigma_2 > \frac{\sigma_1 f_c + \sigma_3 f_t}{f_c + f_t} \right) \end{cases}, \quad (8)$$

式中, $g(x)$ 为重力坝单元强度破坏的功能函数, f_t 和 f_c 分别为重力坝混凝土的抗拉强度和抗压强度。

考虑重力坝沿建基面的滑动失稳, 根据滑动面上所有单元的应力, 重力坝失稳破坏的功能函数^[18]可表示为

$$g(x) = \sum_{i=1}^m (-f \cdot \sigma_{yi} + c - \tau_{xyi})d_i, \quad (9)$$

式中, m 为滑移面上单元总数, f 和 c 分别为抗滑面的摩擦系数和黏聚力, σ_{yi} 和 τ_{xyi} 分别为单元 i 的正应力和剪应力, d_i 为单元 i 沿滑动面的边长。

(2) 重力坝非概率体系 NR 计算模型

重力坝的可能失效路径主要有坝体失效、坝基失效和沿建基面滑动失稳^[23]。一般来说, 在水荷载作用下重力坝的坝踵与坝趾附近坝体和坝基单元较易先发生破坏, 进而向大坝内部发展形成一条破坏通道从而威胁大坝整体安全^[24]。本文在计算得到重力坝单元 η_e 基础上, 分别选择坝踵与坝趾附近的坝体和坝基若干可能最先失效单元作为初始失效单元, 并将其杀死继续搜索下一个相邻失效单元, 进行可能失效路径搜索以获得相应的重力坝失效模式。其失效路径搜索过程可概化如图 1 所示, 其中单元 e_1 为初始失效单元, 在有限元分析中假定其最先失效, 并重新计算搜索出其附近 n 个可能失效单元, 选择与已确定的失效单元所构成的暂时失效路径 η_e 最小的下一个失效单元 e_{2k} , 重复执行该搜索过程直至满足终止条件。

本文将各失效模式下的 m 个破坏单元视为并联关系, 并根据式 (7) 求解各失效模式的 NR- η , 以实现重力坝体系 NR- η_s 的计算。

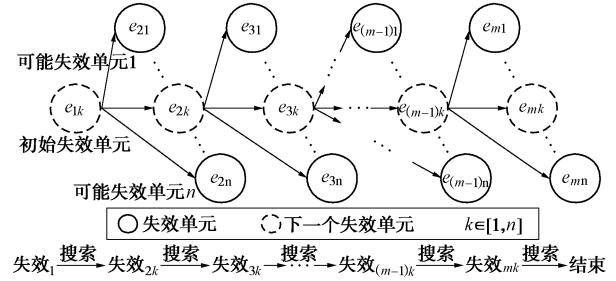


图 1 失效模式搜索示意图

Fig. 1 Schematic diagram of failure mode search

2 重力坝单元与体系 NR- η 计算方法

2.1 基于响应面法的 NR- η 计算

响应面法应用于结构工程 NR- η 计算, 其核心是基于有限的物模试验与数值仿真计算成果, 通过回归拟合得到一个解析表达式 $M = y(x)$ (响应面函数), 以此来近似代替重力坝的真实功能函数 $M = g(x)$ 。响应面函数通常采用不含交叉项的二次多项式模型^[25], 即

$$M = y(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2, \quad (10)$$

式中, a 为常数项, $b = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_{n-1}, b_n]^T$ 和 $c = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_{n-1}, c_n]^T$ 分别为响应面函数的一次项和二次项系数矩阵, n 为参数变量个数。根据拟合好的响应面近似函数 $M = y(x)$, 运用数学规划方法求解 $M = y(x)$ 的最大值和最小值, 该过程可视为有约束的二次规划问题的极值求解过程。其数学模型可表述为

$$\begin{cases} \min M = y(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \\ \text{s.t. } x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad x_i \geq 0 \end{cases}, \quad (11)$$

式中, 重力坝所有参数 x_i 必然有 $x_i \geq 0$, 否则将失去物理意义。基于所拟合好的响应面函数 (目标函数) $M = y(x)$ 可利用 MATLAB 完成其最小值 M_{\min} 优化求解, 然后将目标函数 $M = y(x)$ 改换为 $M = -y(x)$ 便可得到其最大值 M_{\max} , 进而根据式 (2) 计算重力坝单元 NR- η_e 。

2.2 重力坝单元与体系 NR- η 计算流程

基于前述非概率理论及计算模型基础上, 借助仿真软件优势并运用响应面法和二次规划方法, 执行重力坝单元 NR- η_e 的计算步骤如下:

(1) 根据现场试验数据及重力坝原型观测资料反演确定重力坝区间参数的界限, 采用中央复合设计方法选取 $2n+1$ 组样本点。

(2) 利用有限元 ABAQUS 建模进行结构应力分析, 获得各组样本点下的结构响应 (应力)。

(3) 依据计算成果结合式 (8), (9) 分别计算重力坝单元强度破坏和沿建基面抗滑稳定的功能函数响应值。

(4) 根据所有单元的 $2n+1$ 组响应面函数方程组, 确定各单元响应面函数的系数 a , b 和 c 。

(5) 基于拟合得到的响应面函数 $M = y(x)$, 根据式(11)计算功能函数均值 M^c 和离差 M^r (M_{\max} , M_{\min})。

(6) 依据各单元功能函数均值 M^c 和离差 M^r , 根据式(2)计算重力坝单元 $\text{NR-}\eta_e$ 。

为分析重力坝体系的可靠度, 关键技术是搜索出重力坝的可能失效路径, 从而确定其相应失效模式, 该问题实际是大坝单元依次失效过程的确定。根据 2.2 节所述原理着力于搜索所有失效模式下可能失效路径, 并计算各失效模式的 $\text{NR-}\eta$ 以确定重力坝体系的 $\text{NR-}\eta_s$ 。其计算流程如图 2 所示。

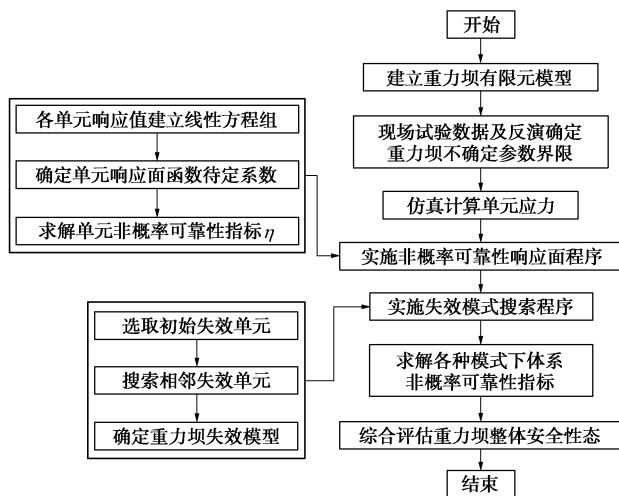


图 2 重力坝体系 $\text{NR-}\eta_s$ 计算流程

Fig. 2 Flow chart of $\text{NR-}\eta_s$ evaluation for gravity dam system

3 工程算例

3.1 工程概况及模型建立

某混凝土重力坝位于吉林省境内松花江流域, 属 I 等水电站枢纽工程。选用该大坝^{#35} 坝段为研究对象, 坝顶高程 267.70 m, 坝基高程 188.60 m, 坝高 79.1 m, 坝段全长 18.0 m, 上游正常蓄水位 263.50 m, 下游水位 193.50 m, 于 1984 年在坝顶有布置一个激光水平位移 D35。为了较为准确地模拟该坝段结构性态, 根据该坝段具体情况, 从坝踵和坝趾向上、下游各取 1.5 倍坝高, 坝基深度取 120.0 m, 利用 ABAQUS 建立有限元模型如图 3 所示。该模型总共 18960 个结点, 14880 个单元, 其中坝体共 7440 个结点, 5795 个单元, 坝基 11520 个结点, 9085 个单元。

3.2 不确定参数界限反演

考虑到各参数变异程度及其对重力坝的安全性影响程度不一。对于变异性较小且对结构安全影响较小

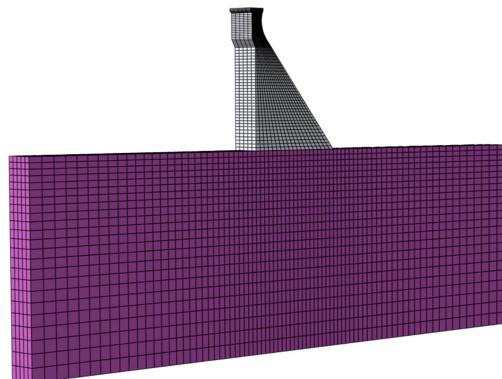


图 3 重力坝有限元模型

Fig. 3 Finite element model for gravity dam

的参数视为确定性参数, 如混凝土、水的重度等相对稳定的数值; 相反, 通常将扬压力系数 α 、坝体与坝基弹性模量 E_c 和 E_r 、凝聚力 c 和 c' 、摩擦系数 f 和 f' 、抗拉强度 f_t 和 f'_t 及抗压强度 f_c 和 f'_c 视为不确定参数。本文以坝体和坝基弹性模量区间反演为例, 选用 2000-01-01—2010-08-31 间测点监测序列资料, 建立区间混合监控模型^[26]进行参数区间界限的反演, 该监测时段内的上游水位过程线和气温过程线如图 4 所示。材料参数的初始值: 坝体和坝基弹性模量分别为 $E_{c0} = 21.00 \text{ GPa}$ 和 $E_{r0} = 16.00 \text{ GPa}$, 坝体和坝基泊松比分别为 0.167 和 0.210。考虑到下游水位较低且变化小, 忽略下游水位影响。为此分别仿真计算 266.00, 263.50, 260.50, 258.00, 255.50, 253.00, 249.50, 246.00, 242.50 m 等典型上游水位情况下坝顶测点 D35 的水平位移值, 运用偏最小二乘法拟合得到水压分量拟合系数如表 1 所示, 并基于所得拟合系数绘制 D35 测点水平实测值、拟合值及残差值曲线如图 5 所示。本文同时考虑水平位移、水位测值误差的影响, 其中水平位移误差最大绝对值 $\Delta\delta = 0.25 \text{ mm}$, 水位测值误差最大绝对值 $\Delta H = 0.10 \text{ mm}$, 坝体和坝基的弹模区间反演结果见表 2。

表 1 水压分量拟合系数

Table 1 Fitting coefficients of water pressure component

系数	a_{11}	a_{12}	a_{13}	$a_{21}-a_{11}$	$a_{22}-a_{12}$	$a_{23}-a_{13}$
D35	0.44253	-0.01015	0.00014	0.10270	-0.00295	0.00002

注: 各系数定义参考文献[26]。

表 2 参数界限反演结果

Table 2 Inversion results of interval parameters

水压调整系数区间值		弹性模量区间值/GPa	
X_I	Y_I	E_{cl}	E_{rl}
[0.858, 0.936]	[0.898, 0.982]	[18.02, 19.66]	[14.37, 15.71]

注: $X_I = E_{c0}/E_{cl}$ 和 $Y_I = E_{r0}/E_{rl}$ 。

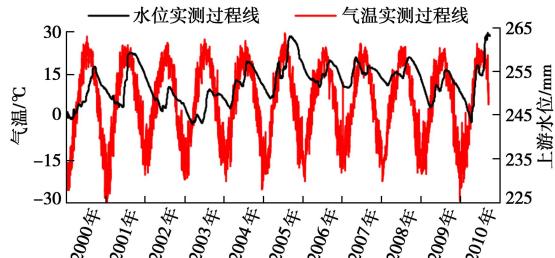


图 4 环境量监测曲线

Fig. 4 Graph of environmental variables

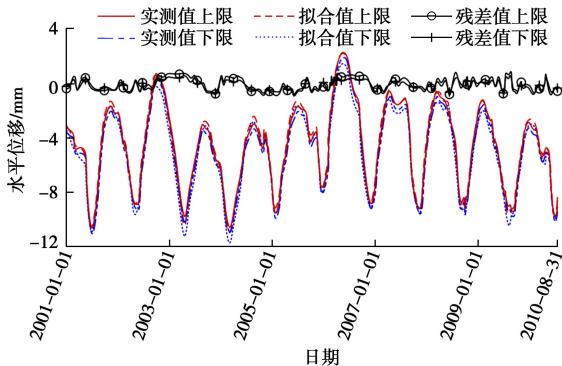


图 5 D35 水平位移实测值、拟合值及残差值曲线

Fig. 5 Actual values, fitted values and residuals curves of horizontal displacement of D35

3.3 重力坝非概率可靠性分析

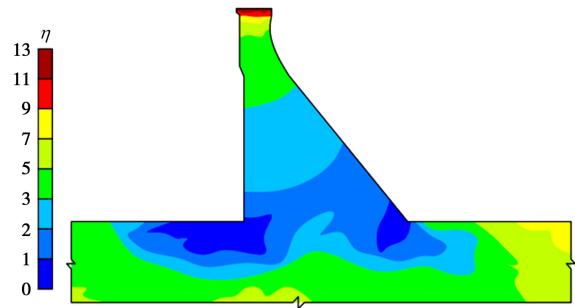
为了以重力坝单元 $NR-\eta_e$ 来度量该坝的可靠状况。首先, 根据大坝实际状况和原始监测资料, 在 3.2 节反演得到的坝体和坝基弹性模量基础上, 结合现场勘测试验结果、设计资料等, 确定荷载、坝体和坝基主要物理力学参数区间如表 3 所示。其次, 根据表 3 使用中央复合设计方法选取 $2n+1$ 个样本点 ($n=9$) 代入有限元 ABAQUS 中进行仿真计算, 并提取 19 组坝体和坝基的单元应力 (计算荷载: 自重+上游水压力+扬压力); 最后, 根据 2.2 节给出的破坏准则计算各单元响应值, 进而确定响应面函数的待定系数, 利用二次规划优化方法结合式 (2) 计算坝体和坝基单元 $NR-\eta_e$ 并绘制其分布云图如图 6 所示。

表 3 主要区间参数界限

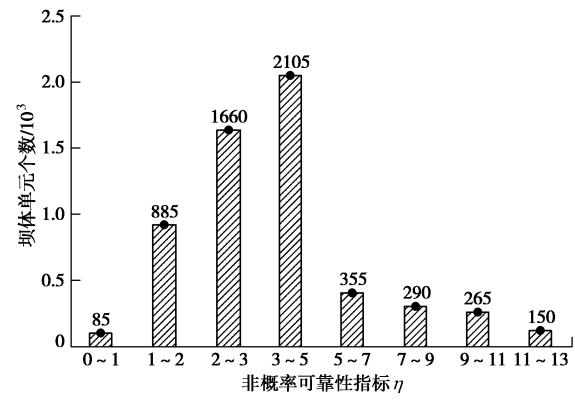
Table 3 Boundaries of main interval parameters

	材料参数	界限范围	均值	离差
荷载	扬压力系数 α	[0.28, 0.32]	0.30	0.02
坝体	混凝土抗拉强度 f_t/MPa	[1.40, 1.70]	1.55	0.15
	混凝土抗压强度 f_c/MPa	[16.00, 18.50]	17.25	1.25
	坝体弹性模量 E_e/GPa	[18.02, 19.66]	18.84	0.82
岩基	岩基抗拉强度 f'_t/MPa	[1.12, 1.44]	1.28	0.16
	岩基抗压强度 f'_c/MPa	[14.60, 17.20]	15.90	1.30
	岩基弹性模量 E_r/GPa	[14.37, 15.71]	15.04	0.67
岩基面	滑移面摩擦系数 f'	[0.82, 1.08]	0.95	0.13
	滑移面凝聚力 c'/MPa	[0.80, 0.96]	0.88	0.08

注: 上游水位为正常蓄水位定值, 混凝土重度取定值 $\gamma_c = 2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图 6 单元 $NR-\eta_e$ 分布云图Fig. 6 Contour map of $NR-\eta_e$ for dam elements

由图 6 可知, 该坝段在坝踵和坝趾附近均出现了不少 $\eta_e < 1$ 的失效单元, 尤其在坝踵附近单元失效的面积更为严重, 其单元 η_e 向远离这两部位的坝顶和坝基方向逐渐增大。在工程实际中, 坝踵和坝趾部位的强度指标是确定整个大坝的安全控制指标的重要依据, 一般需在该部位实施加筋锚固等措施以提高其安全性。图 7 给出了不同指标范围坝体单元个数统计情况, 由图 7 可知, 该坝段坝体失效单元个数为 85 个, 约占坝体总单元个数 1.5%; 坝体中、下部单元 η_e 基本处于 1~3, 约占坝体总单元个数的 43.9%; 坝体上部单元 η_e 处于 3~13, 且增长梯度明显大于坝体下部单元, 约占坝体总单元个数 54.6%, 说明越靠近坝顶的单元其相对更为安全, 这亦符合重力坝受力特点。

图 7 坝体单元 $NR-\eta_e$ 统计图Fig. 7 Statistical graph of $NR-\eta_e$ for dam body elements

实际工程还需重点核算重力坝沿建基面发生滑动失稳破坏的可靠程度, 根据式 (9) 失稳准则计算得到该坝段沿建基面抗滑稳定 $NR-\eta_H = 0.926 < 1$ 。由此可见, 该坝段存在滑动失稳的可能性, 需对该坝段实施补强加固措施以保证其安全长时效役。为验证该坝段抗滑稳定计算准确性, 本文采用 SL 319—2018《重力坝设计规范》刚体极限平衡法按抗剪断强度公式进行了复核计算 (其中, $f' = 0.85$, $c' = 0.85 \text{ MPa}$, $\alpha =$

0.30)，计算得到抗滑稳定安全系数 $K'_c = 2.59$ 低于规范要求 $K' = 3.00$ 。该大坝实际服役过程中，大坝安全监察中心对#35 坝段抗滑稳定进行了大量的研究和复核工作，复核报告表明#35 坝段抗滑稳定不满足规范要求，尤其遇到较极限荷载时，#35 坝段将提前失抵抗能力。虽在随后服役过程中实施了各种除险加固措施以提高大坝整体性能，但由于先天的质量缺陷和严重的渗漏问题该大坝已被推倒重建，这些成果也一定程度上验证了本文计算结果的有效性。

为进一步分析重力坝多重失效模式下的体系 η_s ，首先需选择可能的初始失效单元，再依次寻求下一个相邻的失效单元，从而确定重力坝的失效模式。考虑到坝踵与坝趾附近首先失效的可能性较大及图 6 中 η_e 分布情况，如图 8 所示，在坝踵与坝趾附近分别随机选择出 4 个和 2 个 η_e 较小且对计算参数较为敏感的单元作为初始失效单元，以搜索重力坝的可能失效路径。需要强调的是：①初始失效单元的选择具有随机性，并非纯粹地选择 η_e 最小的单元视为最先失效的单元；②所选择的下一相邻失效单元也并非一定为 η_e 最小的相邻单元，而是选择与之前所有失效单元所构成的暂时失效模式 η_e 最小的单元作为下一个失效单元，各失效模式搜索结果如图 9 所示。

由图 9 可知，除失效模式 2 外，其余失效模式均出现了大量失效单元，坝体和坝基出现了较大的拉裂、剪切破坏区域，其初始失效单元附近区域单元先行发生破坏，后沿坝基面向岩基深处发展，其与图 6 给出的单元 η_e 分布情况相吻合。若在坝踵附近单元最先失效（图 9 (a), (c), (d)），坝踵附近会形成拉应力区，致使坝踵单元发生拉裂破坏，并由坝踵附近沿坝基面成一定角度（约 $0^\circ \sim 45^\circ$ ）向坝趾和岩基深方向继续发展，其中失效单元以拉裂破坏为主，少量单元发生剪切破坏；若在坝趾附近单元最先失效

（图 9 (e), (f)），坝趾附近出现严重的压碎破坏，并由坝趾附近向岩基深处与坝踵方向（向上游与岩基面大致成 45° 方向）继续破坏，发生较严重的压剪破坏；另外，同一部位附近各失效模式之间存在着大量相同的失效单元。以上现象说明大坝的破坏发展方向与最先失效位置直接相关，且各失效模式之间存在某种相关性。依据前述方法结合式 (7) 计算该坝段各失效模式下 $NR \cdot \eta_s$ 如表 4 所示，该坝段最大和最小 $NR \cdot \eta_s$ 分别为 1.301 和 0.854，分别对应失效模式 2 和失效模式 3。

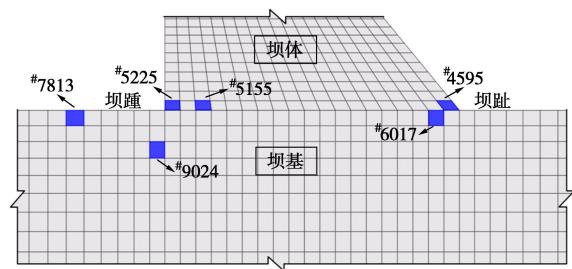
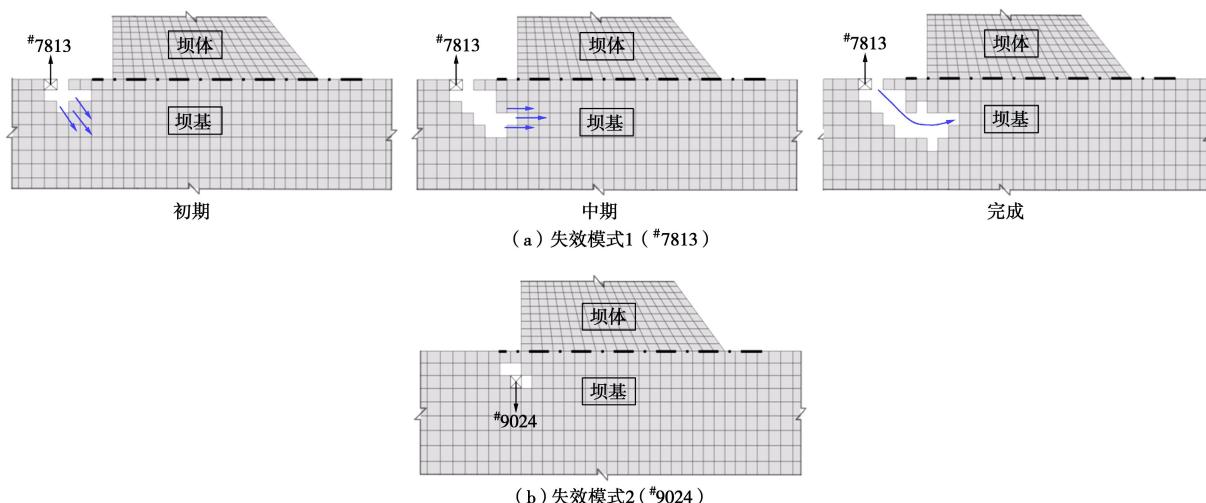


图 8 初始失效单元

Fig. 8 Initial failure elements

在实际工程中不同失效模式可能同时发生且相互影响，并非完全独立发生^[27-28]。为研究各模式之间相关性对重力坝体系 $NR \cdot \eta_s$ 的影响，本文通过对各失效模式间两两组合同时进行失效路径的搜索。由于坝踵和坝趾同侧各失效模式间本身存在大量相同失效单元，故选择同侧两失效模式意义不大，同时为减少计算工作量，为此随机选择图 8 坝踵和坝趾#5225—#4595、#5155—#6017 两种组合单元，假设组合单元同时作为初始失效单元以进行失效路径的搜索，从非概率的角度定量的诠释重力坝失效模式间的相关性，其失效模式搜索结果如图 10 所示。



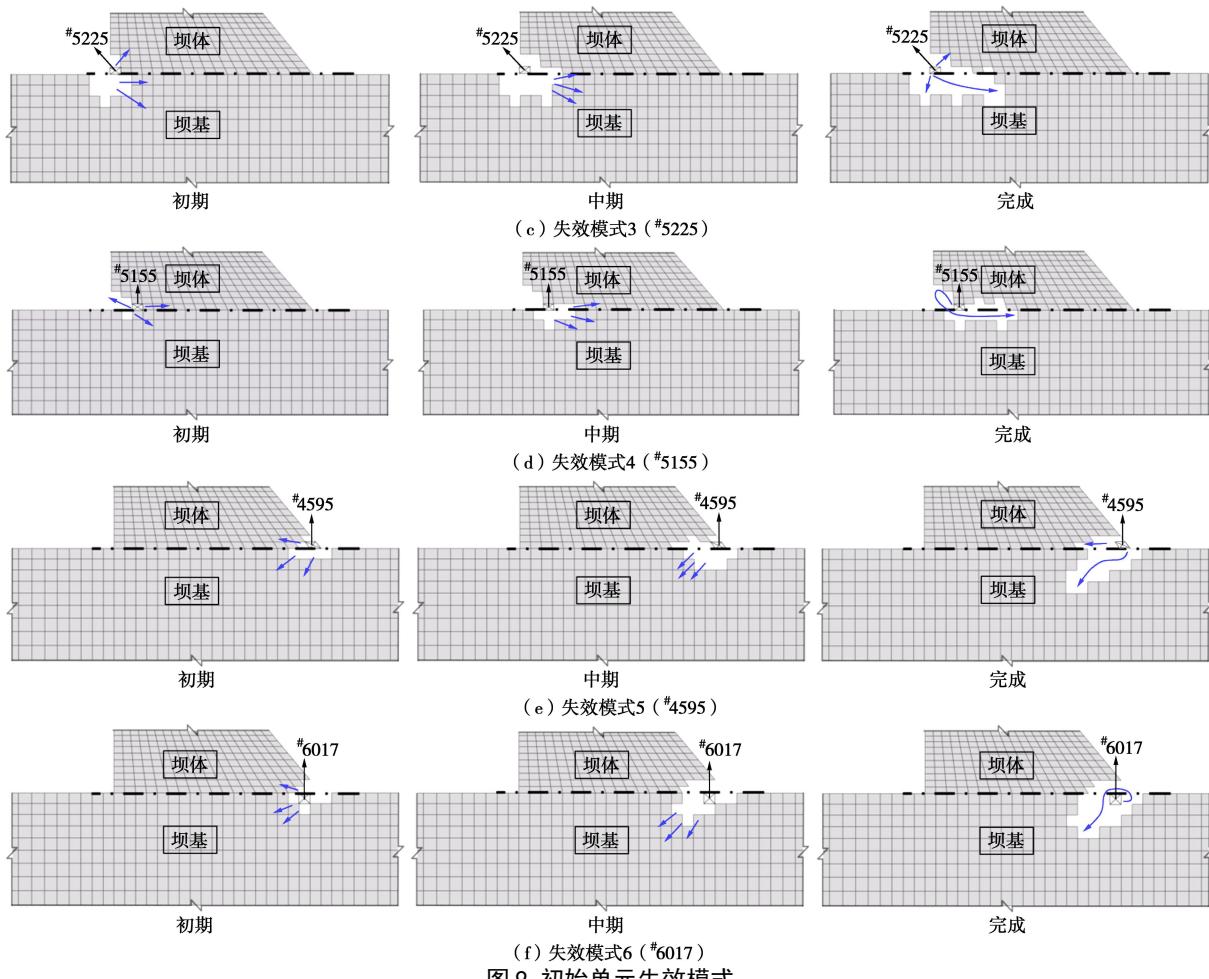


图9 初始单元失效模式

Fig. 9 Failure modes for initial elements

表4 各失效模式下 NR- η Table 4 NR- η of each failure mode

失效模式	失效模式 1	失效模式 2	失效模式 3	失效模式 4	失效模式 5	失效模式 6	#5225—#4595	#7813—#6017
NR- η	0.916	1.301	0.854	0.872	0.914	0.919	0.732	0.835

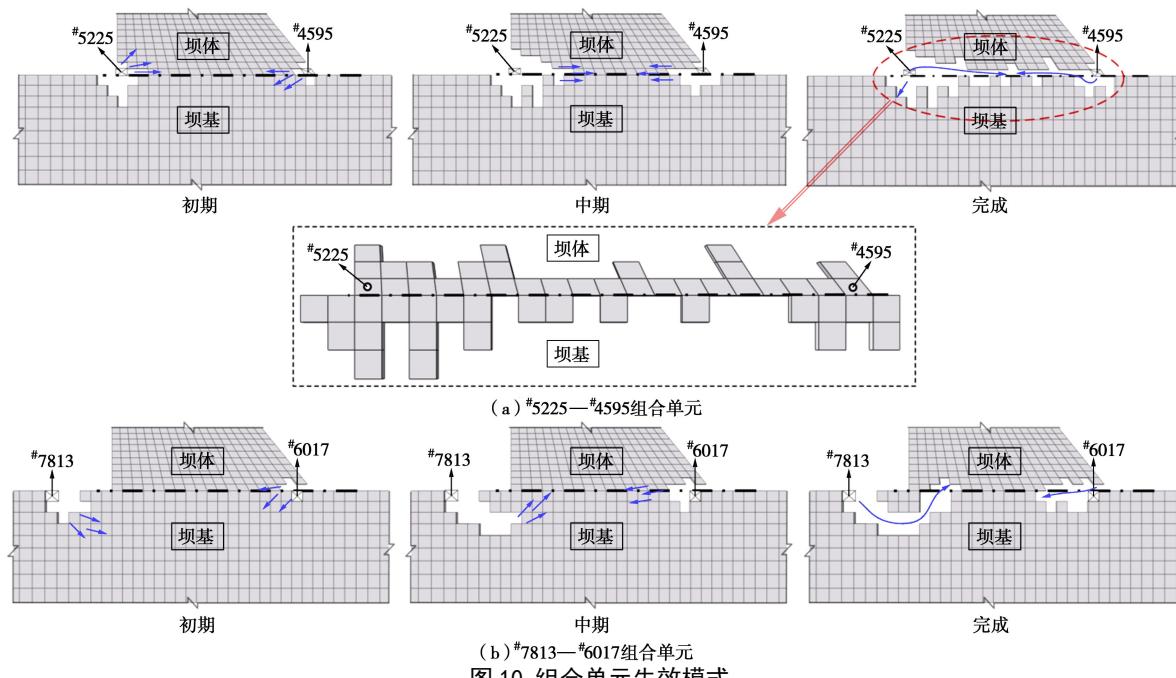


图10 组合单元失效模式

Fig. 10 Failure modes for combination elements

比较图 9, 10 可知, 同时考虑两种失效模式之间的相互影响, 各失效模式的破坏方向并未发生显著变化, 但其将加剧各失效模式的失效程度。其中, #5225—#4595 组合单元失效路径为坝踵与坝趾分别沿建基面向大坝内部发展至形成贯通性裂缝, 产生了较大的拉裂、剪切破坏裂缝, 严重威胁到大坝的安全性。归于重力坝在上游水荷载作用下, 坝踵受拉其单元拉裂破坏为主, 而坝趾承压其单元压剪破坏为主, 随着两部位的单元同步失效, 其有效地受拉单元和承压单元相继减少, 从而对重力坝的破坏为叠加效应。表 4 给出了两组合单元下失效模式的 NR- η , 其组合下的失效模式 NR- η 均低于单一失效模式下的 NR- η 。实际工程中各失效模式可能单独发生亦可能同时发生, 为此, 本文将重力坝体系 NR- η_s 定于最大和最小失效模型 NR- η 之间取值, 即 $0.732 < \eta_s < 1.301$, 表明该坝段整体性能存在一定的安全隐患, 与大坝安全监察中心鉴定结果相符, 为其鉴定结果的有效性提供了印证依据。实际上, 该坝始建于 1937 年, 受当时建设条件限制, 该坝建成以来一直存在严重的缺陷, 尤其是该坝段抗滑稳定未满足规范要求(1973 年及以后复核结果), 虽 1997 年以前对该坝实施了多次补强加固措施, 但其病险问题始终未能彻底解决, 大坝存在极大安全隐患, 现今该坝正在全面治理(重建工作基本完成)中以恢复电站原任务和功能。可见, 此工程背景为本文方法计算结果的有效性提供了强有力地支撑。

4 结 论

(1) 考虑到重力坝失事概率小且不确定参数概率分布信息获取难等的工程特点, 研究构建了一种基于不确定参数界限的重力坝 NR 计算模型, 有效规避了概率可靠性分析中要求不确定性参数完整 PDF 且计算结果对参数高度敏感的局限。

(2) 依据大坝原型监测资料和有限元计算成果, 在实现重力坝不确定参数界限的区间反演的同时, 考虑重力坝功能函数高度非线性且难以显式表达的特点, 建立了一种合理选取区间参数和拟合响应面函数以代替重力坝功能函数的响应面方法, 实现了重力坝 NR- η 的高效计算。

(3) 通过以一种 NR- η 来评估重力坝的安全程度, 在获取重力坝单元 NR- η_s 及搜索其主要的失效模式基础上, 探究了坝踵和坝趾间失效模式的相关性对重力坝体系 NR- η_s 的影响。结果显示本文计算结果较好地印证了该重力坝工程背景下的实际运行状态, 验证了所提方法的有效性和工程适用性。

参 考 文 献:

[1] 张社荣, 王超, 孙博. 重力坝层间抗滑稳定体系的动

- 力可靠度分析方法[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 263–268, 302. (ZHANG She-rong, WANG Chao, SUN Bo. Dynamic reliability analysis method of anti-sliding stability between layers of gravity dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 263–268, 302. (in Chinese))
- [2] 王刚, 秦净净, 管莉莉. 基于遗传算法的重力坝多滑面稳定可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(增刊 1): 3153–3161. (WANG Gang, QIN Jing-jing, GUAN Li-li. Reliability analysis on stability of gravity dam foundation over multiple sliding planes based on GA[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(S1): 3153–3161. (in Chinese))
- [3] HARIRI-ARDEBILI M A, POURKAMALI-ANARAKI F. Support vector machine based reliability analysis of concrete dams[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 104: 276–295.
- [4] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 26–35. (GU Chong-shi, SU Huai-zhi, LIU He-zhi. Review on service risk analysis of dam engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 26–35. (in Chinese))
- [5] YAKOV B H. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227–245.
- [6] BEN-HAIM Y, ELISHAKOFF I. Discussion on: A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1995, 17(3): 195–199.
- [7] QIU Z, CHEN S, ELISHAKOFF I. Non-probabilistic eigenvalue problem for structures with uncertain parameters via interval analysis[J]. Chaos Solitons & Fractals, 1996, 7(3): 303–308.
- [8] QIU Z, ELISHAKOFF I. Antioptimization of structures with large uncertain-but-non-random parameters via interval analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1998, 152(3): 361–372.
- [9] GANZERLI S, PANTELIDES C P. Optimum structural design via convex model superposition[J]. Computers & Structures, 2000, 74(6): 639–647.
- [10] KANG Z, LUO Y, LI A. On non-probabilistic reliability-based design optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters[J]. Structural Safety, 2011, 33(3): 196–205.
- [11] LUO Y, KANG Z, LUO Z, et al. Continuum topology optimization with non-probabilistic reliability constraints based on multi-ellipsoid convex model[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2009, 39(3): 297–310.
- [12] 罗阳军, 亢战, 蔡坤. 考虑非概率可靠性的结构柔顺

- 度拓扑优化设计[J]. 计算力学学报, 2011, **28**(6): 821 - 826. (LUO Yang-jun, KANG Zhan, CAI Kun. A compliance based topology optimization design of structures considering non-probabilistic reliability[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, **28**(6): 821 - 826. (in Chinese))
- [13] 刘国梁, 陈建军, 马洪波. 一种基于非概率可靠性的结构水平集拓扑优化[J]. 工程力学, 2012, **29**(6): 58 - 62. (LIU Guo-liang, CHEN Jian-jun, MA Hong-bo. Structural topological optimization for non-probability reliability in level set method[J]. Engineering Mechanics, 2012, **29**(6): 58 - 62. (in Chinese))
- [14] JIANG C, HAN X, LU G Y, et al. Correlation analysis of non-probabilistic convex model and corresponding structural reliability technique[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2011, **200**(33): 2528 - 2546.
- [15] BAI Y C, HAN X, JIANG C, et al. A response-surface- based structural reliability analysis method by using non-probability convex model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, **38**(15/16): 3834 - 3847.
- [16] 苏国韶, 郝俊猛. 复杂工程结构非概率可靠度分析的高斯过程动态响应面法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(4): 750 - 762. (SU Guo-shao, HAO Jun-meng. Gaussian process based dynamic response surface method of non-probabilistic reliability analysis for complicated engineering structure[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015(4): 750 - 762. (in Chinese))
- [17] KANG Z, ZHANG W. Construction and application of an ellipsoidal convex model using a semi-definite programming formulation from measured data[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2016, **300**: 461 - 489.
- [18] 袁慕勇, 陆廷春, 徐宝松, 等. 基于非概率方法的碾压混凝土重力坝可靠度计算[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, **35**(6): 29 - 33. (YUAN Mu-yong, LU Ting-chun, XU Bao-song, et al. Reliability calculation of rcc gravity dam based on non-probabilistic method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2013, **35**(6): 29 - 33. (in Chinese))
- [19] 张 勇, 赖国伟, 程 睿, 等. 高拱坝的非概率可靠性分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(5): 62 - 65. (ZHANG Yong, LAI Guo-wei, CHENG Rui, et al. Non-probabilistic reliability analysis of high arch dams[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(5): 62 - 65. (in Chinese))
- [20] 方砚兵, 苏永华, 肖 旺, 等. 基于子区间法的隐式功能函数非概率可靠性方法研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 1171 - 1178, 1187. (FANG Yan-bing, SU Yong-hua, XIAO Wang, et al. Non-probabilistic reliability model for implicit performance function based on subinterval method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 1171 - 1178, 1187. (in Chinese))
- [21] 赵明华, 蒋 冲, 曹文贵. 基于区间理论的挡土墙稳定性非概率可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 467 - 472. (ZHAO Ming-hua, JIANG Chong, CAO Wen-gui. Non-probabilistic reliability analysis of retaining walls based on interval theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 467 - 472. (in Chinese))
- [22] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(2): 1 - 10. (YU Mao-hong. Unified strength theory for geomaterials and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(2): 1 - 10. (in Chinese))
- [23] HU J, MA F H, WU S H. Nonlinear finite-element-based structural system failure probability analysis methodology for gravity dams considering correlated failure modes[J]. Journal of Central South University of Technology, 2017, **24**(1): 178 - 189.
- [24] 徐 强, 陈健云, 李 静, 等. 基于贝叶斯理论的大坝体系可靠度计算方法[J]. 大连理工大学学报, 2011, **51**(1): 84 - 89. (XU Qiang, CHEN Jian-yun, LI Jing, et al. Calculation method for system reliability of dam based on Bayes theory[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, **51**(1): 84 - 89. (in Chinese))
- [25] 魏博文, 徐镇凯, 李火坤, 等. 基于 GA-APSO 混合罚模型的混凝土坝力学参数优化反演[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(11): 4211 - 4217. (WEI Bo-wen, XU Zhen-kai, LI Huo-kun, et al. Optimization inversion for mechanical parameters of concrete dam based on GA-APSO mixed penalty model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(11): 4211 - 4217. (in Chinese))
- [26] QIN X, GU C, CHEN B, et al. Multi-block combined diagnosis indexes based on dam block comprehensive displacement of concrete dams[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, **129**: 172 - 182.
- [27] 夏 雨, 张仲卿, 赵小莲, 等. 基于可能失效模式的拱坝安全度评价[J]. 应用力学学报, 2011, **28**(3): 313 - 317. (XIA Yu, ZHANG Zhong-qing, ZHAO Xiao-lian, et al. Safety analysis of arch dam based on possible failure modes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, **28**(3): 313 - 317. (in Chinese))
- [28] 徐 强, 李 静, 陈健云, 等. 非平稳地震动过程中混凝土重力坝受拉失效路径可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, **28**(3): 123 - 128. (XU Qiang, LI Jing, CHEN Jian-yun, et al. Concrete gravity dam reliability analysis on tension failure path under non-stationary ground motion processes[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(3): 123 - 128. (in Chinese))