

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.054



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 考虑渗流作用的重力坝稳定与应力可靠度分析

杨鸽<sup>1</sup>, 蔡一坚<sup>1</sup>, 马玉福<sup>2</sup>, 吴琦<sup>1</sup>, 刘西军<sup>1</sup>, 张联宇<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 3. 西南交通大学智慧城市与交通学院, 成都 611756)

**摘要:**重力坝服役期间, 渗流会对大坝稳定及应力产生不利影响, 研究重力坝在渗流作用下的可靠度具有重要意义。将响应面法与随机有限元法结合, 提出考虑渗流作用的重力坝稳定与应力高效可靠度分析方法。依托某水电站工程, 通过敏感性分析, 确定影响重力坝抗滑稳定与应力的关键不确定性参数; 基于响应面法构建渗流作用下重力坝抗滑稳定安全系数的功能函数, 计算多破坏模式的失效概率并与不考虑渗流作用的结果进行对比分析; 采用概率失效分析方法定量分析关键不确定性参数对重力坝失效概率的影响。结果表明: 考虑渗流作用计算得到的失效概率较高, 忽略渗流作用会导致低估重力坝失效概率; 比较 3 种失效模式, 坝踵拉裂与沿坝基面滑动失稳最容易发生, 其次是坝趾压坏。

**关键词:**重力坝; 渗流作用; 可靠度; 响应面法; 抗滑稳定

**中图分类号:** TV642.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0145-10

## Efficient reliability analysis of stability and stress of gravity dam considering seepage effect

YANG Ge<sup>1</sup>, CAI Yijian<sup>1</sup>, MA Yufu<sup>2</sup>, WU Qi<sup>1</sup>, LIU Xijun<sup>1</sup>, ZHANG Lianyu<sup>3</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, P. R. China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China; 3. Institute of Smart City and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China)

**Abstract:** During the service lifetime of gravity dams, seepage flow could adversely affect the dam stability and its stress distribution. In investigating the reliability of gravity dams, it holds paramount importance to account for the seepage effects. In this study, an efficient reliability analysis is conducted to evaluate the stability and stress distribution of gravity dams incorporating the influence of seepage effects. This analysis involves integrating the response surface method and random finite element approach. For a hydropower station project, the key uncertain parameters affecting the stability and stress distribution of gravity dams are identified through a parametric sensitivity analysis. Using the response surface method, the performance function for the anti-sliding stability safety factor of gravity dams under the seepage effects is established, and the failure probability

**收稿日期:** 2024-02-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(42002287)

**作者简介:** 杨鸽(1987-), 女, 高级工程师, 主要从事水利工程可靠度分析和信息化设计研究, E-mail: yang\_g@hdec.com。

**Received:** 2024-02-26

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 42002287)

**Author brief:** YANG Ge (1987-), senior engineer, main research interests: reliability analysis and information design of hydraulic engineering, E-mail: yang\_g@hdec.com.

considering multiple failure modes is calculated. Meanwhile, the simulated results are compared with those obtained without considering the seepage effects. The influence of key uncertainty parameters on the failure probability of gravity dam is quantitatively analyzed by the probabilistic failure analysis. These findings show that accounting for seepage effects leads to higher failure probabilities, indicating that neglecting these effects may underestimate the likelihood of dam failure. In comparison with the three failure modes, the heel cracking of the gravity dam and sliding instability along dam-foundation interface are most likely to occur, followed by the dam toe cracking. The results could provide a theoretical foundation and technical guide for evaluating the reliability of practical dam projects.

**Keywords:** gravity dam; seepage effect; reliability; response surface method; anti-sliding stability

重力坝是水利枢纽建设的主要坝型之一。多变的大坝服役环境和运行工况以及复杂的地质条件给重力坝工程的安全运行带来诸多不确定因素。大坝蓄水运行后,渗流场与应力场之间会产生一种相互耦合的机制,这种相互耦合作用使得大坝的渗流场与应力场重新分布,从而对大坝稳定及应力产生影响<sup>[1]</sup>。因此,研究在考虑渗流作用下的重力坝稳定与应力可靠度具有重要意义。

重力坝可靠度计算往往需要借助有限单元法等数值分析方法,但采用数值分析方法通常计算效率较低,不适用于计算需求量大的大型水工结构工程。可靠度计算常用方法有一次二阶矩法、蒙特卡罗法、响应面法等。郝志强等<sup>[2]</sup>借助混合模拟法,通过响应面法拟合一个响应面来代替未知的真实状态曲面,再进行 Monte Carlo 随机抽样,从而对重力坝进行稳定可靠度分析;尹金超等<sup>[3]</sup>构建了复杂地基条件下重力坝沿滑移通道的抗滑稳定功能函数,结合响应面方程和验算点法分析了抗滑稳定可靠度;熊铁华等<sup>[4]</sup>基于响应面法研究了重力坝的坝基面抗滑稳定可靠度及坝体单元可靠度,验证了方法的有效性。目前关于重力坝可靠度研究主要侧重于可靠度分析方法的探讨,大多仅考虑单一应力场分析,常忽略渗流-应力耦合作用的影响。

在重力坝运行过程中涉及应力场与渗流场间的复杂相互作用,尤其是水库蓄水后,坝体、坝基及两岸绕坝渗流可能会引起扬压力增加,甚至导致重力坝失稳破坏。长期以来,许多学者围绕重力坝工程中渗流场与应力场的耦合模型进行了深入探讨。例如,常晓林等<sup>[5]</sup>通过推导渗透系数与体积应变之间的函数关系,建立了重力坝的渗流-应力耦合模型,研究表明,渗流作用对重力坝稳定性的影响不可忽略;吕从聪等<sup>[6]</sup>基于竖向应力和孔隙静水压力平衡理论建立了重力坝渗流-应力耦合模型并验证了其有效性;沈振中等<sup>[7]</sup>应用应力场和渗流场的无单元法耦合分析模型,深入研究了东方红重力坝及其坝基应力场和渗流场的相互作用问题,结果表

明,渗流过程对坝体应力分布状态存在不利影响。现有研究表明,渗流作用对重力坝稳定性和应力分布性态的影响不容忽视<sup>[8]</sup>。由于渗流-应力耦合模型复杂,计算量大、计算耗时长,因此,针对重力坝稳定与应力可靠度分析问题,以往研究中较少考虑渗流-应力耦合作用,导致可靠度计算中涉及渗流、应力两个物理场的关键不确定性因素不明确。因此,考虑渗流作用的重力坝稳定及应力高效可靠度分析和关键不确定性因素识别是当下需要解决的重点问题。

笔者结合响应面法与随机有限元法,提出了考虑渗流作用的重力坝稳定与应力高效可靠度分析方法。该方法将渗流场得到的渗透体积力作用于应力场,以真实反映渗流场对应力场的影响,建立多种失效模式下的响应面函数,实现可靠度高效分析,在计算效率和计算精度方面都具有明显优势。依托某水电站工程,开展重力坝失效影响参数的敏感性分析,建立坝踵拉裂、坝趾压坏及沿坝基面滑动 3 种失效模式下的响应面函数,计算得到 3 种失效模式的失效概率及影响因素贡献度。

## 1 考虑渗流作用的重力坝稳定与应力分析

### 1.1 渗流应力基本理论

目前重力坝可靠度分析中大多仅考虑结构在荷载作用下发生变形,将坝体、坝基视为不透水材料,库水的影响采用静水压力作用在坝体或坝基表面、扬压力作用在坝基面,而往往忽略坝体和坝基内部渗流作用的影响<sup>[9]</sup>。然而,在实际工程中,由于水头差造成水体在多孔介质中发生渗流运动,产生的渗透体积力作用于坝体和坝基。渗透体积力与渗流场密切相关,渗流场分布影响渗透体积力分布,进而影响应力场分布。重力坝的安全运行受控于渗流场与应力场的共同作用,控制方程为

#### 1) 应力场基本方程

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u] = \frac{1+\nu}{E}\sigma - \frac{\nu}{E}\delta\bar{\sigma} \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为应力张量; $u$ 为位移; $f$ 为体积力; $\epsilon$ 为应变张量; $\delta$ 为Kronecker符号; $\bar{\sigma}$ 为平均应力; $E$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比。

将式(2)代入式(1),可得到用位移表示的应力平衡方程

$$\frac{E}{2(1+\nu)}(\nabla u)^T + \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)}\nabla u + f = 0 \quad (3)$$

## 2) 渗流场基本方程

$$v_i = -\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla z) \quad (4)$$

$$S \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(v_i) = 0 \quad (5)$$

式中: $v_i$ 为流体速度; $\mu$ 为流体动力黏滞系数; $\rho$ 为流体密度; $g$ 为重力加速度; $p$ 为水压力; $\kappa$ 为渗透率; $S$ 为储水系数。需要说明的是,本研究假定坝体混凝土与坝基岩体的孔隙均较小,应力场对二者的孔隙变形及渗透系数变化影响较小,进而对渗流场影响较小,故仅考虑渗流场对应力场的影响。

通过渗流场与应力场的基本方程,根据研究的具体问题给定边界条件与初始条件,可进一步建立考虑渗流场-应力场的耦合模型,用于分析渗流场对应力场的耦合效应。

## 1.2 确定性分析模型与失效模式

对于重力坝而言,一般采用坝踵和坝趾应力条件、坝基抗滑稳定(沿建基面或深层滑动)来控制其安全性<sup>[10]</sup>。应用可靠度分析原理,对坝踵拉裂、坝趾压坏和沿坝基面滑动3种失效模式进行可靠度计算。依据《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2018)<sup>[11]</sup>确定这3种失效模式的判定标准。

1) 坝踵拉裂失效:采用线弹性有限元法计算的坝基应力,其坝踵部位垂直于拉应力区的宽度 $L$ 小于坝踵至帷幕中心线的距离 $[L]$ 。

$$L \leq [L] \quad (6)$$

2) 坝趾压坏失效:在各种荷载组合下,坝趾最大压应力 $\sigma$ 不大于混凝土抗压强度 $f_c$ 。

$$\sigma \leq f_c \quad (7)$$

3) 沿坝基面滑动失效:对于重力坝,沿坝基面的抗滑稳定安全系数 $K'$ 不小于1。

$$K' = \frac{f'(W \cos \beta - U + P \sin \beta) + c'A}{P \cos \beta - W \sin \beta} \geq 1 \quad (8)$$

式中: $K'$ 为按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数; $f'$ 为坝基接触面间的抗剪断摩擦系数; $W$ 为坝基接触面上的总竖向力(不含扬压力); $P$ 为坝基接触

面上的总水平力; $U$ 为坝基接触面上的扬压力; $c'$ 为坝基接触面间的抗剪断黏聚力; $A$ 为坝基接触面截面积; $W$ 与 $P$ 由线弹性有限元法计算出的坝基应力经积分计算得到, $W = \int_a^b s_y dx$ , $P = \int_a^b s_{xy} dx$ ,其中, $s_y$ 为坝基面上的竖向应力, $s_{xy}$ 为坝基面上的水平应力。

采用数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行线弹性有限元分析。该软件以有限元法为基础,通过求解单物理场偏微分方程或多场偏微分方程组来实现任意多物理场耦合。针对不考虑渗流作用与考虑渗流作用两种情况,通过构建有限元计算模型,导入有限元软件进行分析,并输出坝踵与坝趾处的应力以及坝基面的竖向力与水平力。

## 2 可靠度分析与概率失效分析

### 2.1 基于响应面的高效可靠度分析

基于随机有限元法,采用非侵入方式将有限元理论与蒙特卡罗方法(MCS)结合,开展可靠度分析。考虑参数不确定性的影响,通过有限次的数值计算得到系统输出响应值,进而计算结构的可靠度指标及失效概率。然而,随机有限元法的计算结果要达到较高计算精度需要足够多的样本量,参照相关文献<sup>[12]</sup>,计算样本数 $N$ 需满足

$$N \geq 100/P_f \quad (9)$$

式中: $P_f$ 为预先估计的失效概率。在工程实际中,一般要求失效概率 $P_f$ 较小,因此所需样本数量庞大。例如,对于失效概率为 $10^{-4}$ 的事件,需要抽样 $N=10^6$ 次,采用随机有限元法计算可靠度时,存在计算量大、耗时长、效率低的问题,使得该方法在实际工程应用中受到限制。为了克服这一不足,在保证计算精度的前提下,采用响应面法计算重力坝稳定与应力可靠度。

基于有限次确定性计算,采用响应面法建立复杂系统输入(随机变量 $x$ )与输出(系统响应 $Z$ )关系 $Z=g(x)$ 。所得响应面近似代表真实函数 $\bar{Z}=\bar{g}(x)$ 。将功能函数看作随机变量的显式表达式,再结合一次二阶矩法、JC法或蒙特卡罗法进行结构可靠度计算。例如,基本随机变量为 $x_i(i=1, 2, \dots, n)$ 时,不含交叉项的二阶响应面函数为<sup>[13]</sup>

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

式中: $a$ 、 $b_i$ 和 $c_i$ 均为待定系数。

### 2.2 概率失效分析

概率失效分析是利用蒙特卡罗方法中产生的失效样本评估不确定性参数对失效概率的影响。采用假设检验式(11),将失效样本 $\mu_0$ 与所有样本 $\mu$



进行统计比较,进而评价不确定性参数对大坝失效概率的影响程度。通过建立的响应面函数,利用产生的大量失效样本,计算 $Z_H$ ,以评估 $\mu$ 与 $\mu_0$ 之间的统计差异,针对重力坝3种失效模式进行概率失效分析<sup>[14]</sup>。

$$Z_H = \frac{|\mu - \mu_0|}{\sigma / \sqrt{n}}$$

(11)

式中: $\mu$ 、 $\sigma$ 为所有样本的均值和标准差; $\mu_0$ 为失效样本均值; $n$ 为失效样本个数。

由此,基于考虑渗流-应力的耦合模型,提出将响应面法与随机有限元法相结合的可靠度分析方法。主要包括参数敏感性分析、功能函数构建、结构可靠度计算3个方面,具体计算流程如图1所示。

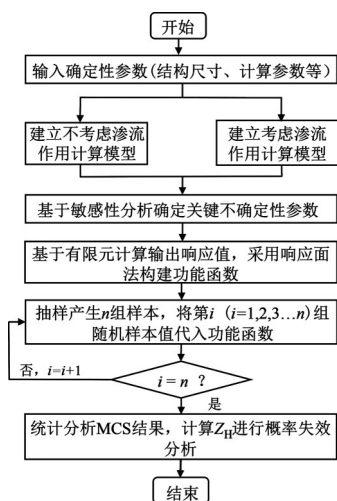


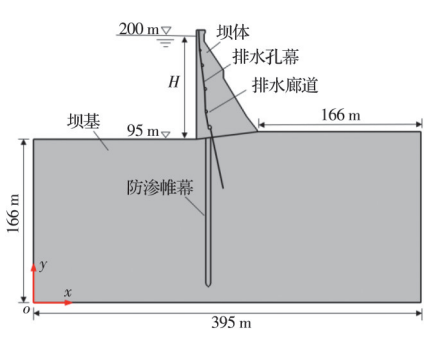
图1 重力坝可靠度随机有限元分析流程

Fig. 1 Flowchart for reliability analysis of gravity dam using random finite element analysis

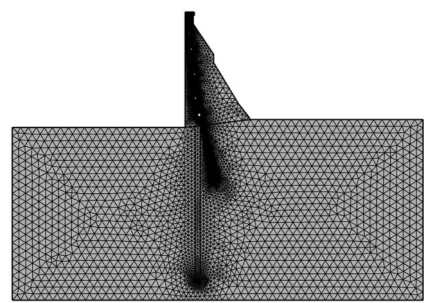
3 工程背景

某水电站位于清江流域,是一座以发电为主、兼有防洪、航运等功能的大型水利水电工程。坝型为混凝土重力拱坝,正常高蓄水位200 m,死水位160 m,水库总库容34亿m<sup>3</sup>,最大坝高151 m。

根据项目需求和设计报告,选取20#~21#非溢流坝段作为研究对象,建立含坝体和坝基的二维有限元计算模型,顺水流为 $x$ 方向,竖直向上为 $y$ 方向,模型范围由坝踵位置向上游、坝基底部、坝趾和下游各延伸1.5倍坝高,如图2(a)所示。上游水深为105 m,下游水深为0 m。坝体和坝基中设有排水孔、排水廊道以及防渗帷幕,排水孔直径为0.2 m,防渗帷幕深度为155 m。采用三角形网格进行剖分,在局部重要部位进行网格加密处理,有限元网格单元总数为29 034,节点总数为14 757,见图2(b)。



(a) 几何模型



(b) 有限元网格

图2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

计算模型中涉及坝体、坝基、防渗帷幕和排水孔幕4种材料,均视为各向同性线弹性材料。根据工程资料与相关文献<sup>[15]</sup>确定计算材料参数,见表1。

表1 计算材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	容重/ (kN/m <sup>3</sup> )	渗透系数/ (m/d)
坝体	20	0.167	24.0	1.0×10 <sup>-6</sup>
坝基	12	0.25	26.0	3.6×10 <sup>-4</sup>
帷幕	12	0.25	26.0	1.6×10 <sup>-5</sup>
排水孔幕	20	0.167	24.0	1.0×10 <sup>-4</sup>

为了对比研究不考虑渗流作用和考虑渗流作用对重力坝可靠度分析的影响,选取的计算条件为:

1)不考虑渗流作用。只进行单一应力场的计算分析。考虑的计算荷载包括自重、上下游水压力和坝基扬压力。水压力及扬压力均以面力形式施加;模型底部施加竖向位移约束,两侧施加水平位移约束。

2)考虑渗流作用。需进行渗流场和应力场的分步计算,先计算渗流场,得到渗透体积力,再将其以体力形式作用于应力场中,计算边界条件及荷载如下:

渗流场:上游坝体及坝基面为定水头边界(水头为271 m),下游坝基为定水头边界(水头为174 m),

排水廊道、下游坝面为可能溢出边界。采用空气单元法<sup>[16]</sup>处理可能溢出边界,在其表面施加透水层,透水层厚度为0.001 m,渗透系数为 $1 \times 10^{-3}$  m/d,通过迭代确定自由面和溢出点位置。

应力场:考虑的计算荷载包括自重和坝体、坝基渗透体积力。施加方式为坝体考虑渗透力和浮容重,坝基只考虑渗透力。边界条件同上,即不考虑渗流场。

## 4 结果分析

### 4.1 确定性分析结果与讨论

基于有限元方法计算不考虑渗流作用和考虑渗流作用下的坝踵垂直拉应力分布宽度、坝趾最大压应力及抗滑稳定安全系数,计算结果见表2。依据《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2018)<sup>[11]</sup>,3种失效模式符合相应的控制标准。通过两种情况对比发现,考虑渗流作用会使计算得到的坝踵垂直拉应力分布宽度变大、坝趾应力增加,抗滑稳定安全系数减小,说明坝体、坝基内部渗流过程会对重力坝稳定与应力产生不利影响。

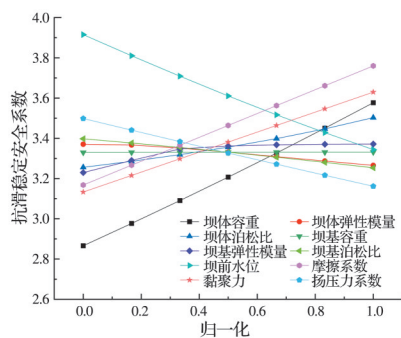
表2 确定性分析计算结果

Table 2 Calculation results from deterministic analysis

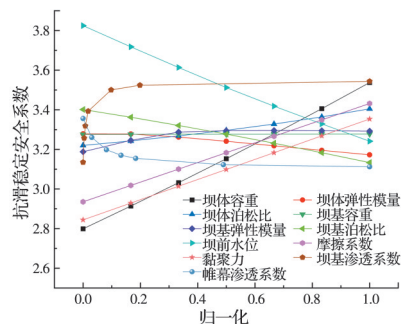
计算条件	坝踵垂直拉应力 分布宽度/m	坝趾最大压 应力/MPa	抗滑稳定安 全系数
不考虑渗流	3.9	8.0	3.44
考虑渗流	8.3	8.6	3.19

为了确定影响大坝失效的主要因素,采用控制变量法对输入参数进行重力坝稳定与应力敏感性分析,确定关键不确定性参数。考虑的参数包括坝体与坝基容重、弹性模量与泊松比以及扬压力系数、坝前水位、帷幕渗透系数、坝基渗透系数、摩擦系数和黏聚力。

图3为采用归一化公式 $(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$ 处理后,不考虑渗流与考虑渗流两种情况下,各参数对坝基面抗滑稳定安全系数的影响。随着坝体容重和泊松比、坝基接触面黏聚力和摩擦系数、坝基渗透系数的增加,抗滑稳定安全系数增加,有利于坝基面抗滑稳定;随着坝基泊松比、坝体弹性模量、坝前水位、扬压力系数、帷幕渗透系数的增加,抗滑稳定安全系数减小,不利于坝基面抗滑稳定;坝基容重与坝基弹性模量对坝基面抗滑稳定影响不大。如图3(a)所示,不考虑渗流作用下,主要敏感因子为坝体容重、坝前水位、扬压力系数、摩擦系数及黏聚力;如图3(b)所示,考虑渗流作用下,主要敏感因子为坝体容重、坝前水位、坝基渗透系数、帷幕渗透系数、摩擦系数及黏聚力。



(a) 不考虑渗流



(b) 考虑渗流

图3 各参数对坝基面抗滑稳定安全系数的影响

Fig. 3 Influences of different parameters on anti-sliding stability safety factor

在不考虑渗流作用下,坝踵拉裂失效模式主要敏感因子为坝体容重、坝前水位和扬压力系数;考虑渗流作用下,其主要敏感因子为坝体容重、坝前水位、坝基渗透系数和帷幕渗透系数。在不考虑渗流作用下,坝趾压坏失效模式主要敏感因子为坝体容重、坝前水位、扬压力系数和混凝土抗压强度;考虑渗流作用下,其主要敏感因子为坝体容重、坝前水位、坝基渗透系数、帷幕渗透系数和混凝土抗压强度。

### 4.2 可靠度分析结果与讨论

基于参数敏感性分析结果,选取主要敏感因子作为随机变量,参考相关文献<sup>[17-18]</sup>,确定基本变量统计特征,见表3。根据项目资料可知,该水电站的死水位为160 m,校核洪水位为204.54 m,可靠度分析中,假定坝前水位在死水位与校核洪水位区间范围内均匀变化;结合工程现场勘察资料可知,坝基岩体质量为Ⅲ类岩体,并依据文献<sup>[17]</sup>取摩擦系数的变异系数为0.22,黏聚力的变异系数为0.4,分布类型均为正态分布。

针对坝踵拉裂、坝趾压坏及沿坝基面滑动3种失效模式,分别构建拉应力分布宽度、坝趾最大压应力及坝基面竖向力和水平力4个响应的响应面,将随机样本代入构建的响应面,可以计算4个响应,然后将得到的响应代入式(6)~式(8),即可判断当

表 3 基本随机变量统计值<sup>[17-18]</sup>  
Table 3 Statistical distribution of random variables<sup>[17-18]</sup>

随机变量	单位	分布类型	均值/最小值	变异系数(最大值)
坝体容重 $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	正态分布	2 400	0.03
坝前水位 $H$	m	均匀分布	160(死水位)	204.54 (校核洪水位)
扬压力系数 $\alpha$		正态分布	0.25	0.3
帷幕渗透系数 $K_c$	m/d	对数正态分布	$1.6 \times 10^{-5}$	0.46
坝基渗透系数 $K_f$	m/d	对数正态分布	$3.6 \times 10^{-4}$	0.7
摩擦系数 $f'$		正态分布	1.0	0.22
黏聚力 $c'$	MPa	正态分布	0.9	0.4
混凝土抗压强度 $f_c$	MPa		23.07	0.16

前随机样本条件下 3 种失效模式是否失效,若至少存在一种失效模式失效,则认为当前随机样本条件下系统失效。由于随机变量维度增加,导致响应面拟合的非线性程度相应提高,为了降低非线性程度带来的影响,通过拟合坝基面竖向力和水平力来提高响应面拟合精度。

采用拉丁超立方抽样方法,在标准空间中生成 1 000 组 $[-4, 4]$ 范围内的标准正态随机样本,并将标准正态随机样本转换为实际空间样本。针对随

机变量抽样出现负值的情况,采用截断高斯分布的方式处理,其中下限值为 0.000 1,上限值为 100 000。基于随机有限元法进行 1 000 次计算,得到对应失效模式下的响应值,选取 70% 样本进行响应面的拟合,剩余 30% 样本用于验证构建响应面的精度。其中,对于拉应力分布宽度这一响应而言,当坝踵完全受压时,拉应力分布宽度为 0,计算发现,1 000 次模拟结果中存在多个结果为 0 的样本。这些样本会影响响应面的拟合精度,因此,在进行拉应力分布宽度响应面拟合时,首先将结果为 0 的样本去除,然后按照上述步骤拟合响应面。

采用不同阶次多项式拟合响应值发现,坝趾最大压应力、坝基面竖向力和水平力采用不含交叉项的 5 阶多项式拟合效果较好,拉应力分布宽度采用不含交叉项的 4 阶多项式拟合效果较好。据此,基于响应面公式式(12)、式(13)构建输入随机变量与输出响应值功能函数,可以得到不考虑渗流情况下坝踵垂直拉应力分布宽度  $R_1$ 、坝趾最大压应力  $R_2$ 、坝基面竖向力  $R_3$  及水平力  $R_4$  的功能函数,以及考虑渗流情况下坝踵垂直拉应力分布宽度  $S_1$ 、坝趾最大压应力  $S_2$ 、坝基面竖向力  $S_3$  及水平力  $S_4$  的功能函数。各功能函数的待定系数见表 4。最后,基于建立的响应面函数,采用蒙特卡罗模拟方法生成大量样本,分别计算重力坝 3 种失效模式对应的失效概

表 4 各功能函数的待定系数  
Table 4 Coefficients of different performance functions

系数	不考虑渗流				考虑渗流			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$a$	-2.1	5.0	$7 \times 10^4$	$3 \times 10^4$	-6.58	5.84	$6 \times 10^4$	$3 \times 10^4$
$b_1$	6.0	2.29	-1 750	$1 \times 10^4$	18.95	2.45	-3 545	1 187
$c_1$	-0.5	$4 \times 10^{-3}$	2 396	-107	-0.71	0.03	2 443	-41.3
$d_1$	0.24	-0.04	-1 005	49.5	0.12	-0.04	-878	82.8
$e_1$					-0.14	0.06	1 283	-97.4
$b_2$	-0.87	0.14	-14.4	416	-7.19	0.14	18.6	409.6
$c_2$	0.02	$4 \times 10^{-3}$	-27.6	25.6	-0.02	$8 \times 10^{-4}$	20.9	-3.27
$d_2$	$-6 \times 10^{-3}$	$-3 \times 10^{-3}$	-12.6	-7.28	0.03	$2 \times 10^{-4}$	-11.7	-1.42
$e_2$					0.02	$2 \times 10^{-3}$	-5.5	2.12
$b_3$	-0.24	-0.19	153	-1 047	1.11	-0.21	306.0	1 030
$c_3$	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$	-3.78	6.23	$-1 \times 10^{-3}$	$-3 \times 10^{-3}$	-19.5	-5.34
$d_3$	$-2 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-5}$	10.3	-6.0	$-3 \times 10^{-3}$	$-7 \times 10^{-4}$	18.5	-12.7
$e_3$					$4 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	-31.3	23.8
$b_4$	0.05	$-7 \times 10^{-3}$	0.9	-21.3	-0.056	$-7 \times 10^{-3}$	-1.29	-21.4
$c_4$	$-7 \times 10^{-4}$	$-3 \times 10^{-4}$	2.0	-1.8	$1 \times 10^{-3}$	$-2 \times 10^{-4}$	-1.72	-0.3
$d_4$	$1 \times 10^{-3}$	$-2 \times 10^{-4}$	-0.3	0.6	$-2 \times 10^{-3}$	$-5 \times 10^{-5}$	0.13	-0.04
$e_4$					$-3 \times 10^{-3}$	$-2 \times 10^{-4}$	3.27	-0.79
$b_5$		$7 \times 10^{-3}$	-5.3	36.0		$7 \times 10^{-3}$	-10.7	35.9
$c_5$		$-1 \times 10^{-4}$	-0.13	-0.26		$1 \times 10^{-4}$	0.95	0.11
$d_5$		$7 \times 10^{-5}$	-0.25	0.59		$7 \times 10^{-5}$	-0.52	0.67
$e_5$						$-4 \times 10^{-4}$	0.63	-1.36



率及系统失效概率。

$$R = a + \sum_{i=1}^n b_i \gamma^i + \sum_{i=1}^n c_i H^i + \sum_{i=1}^n d_i \alpha^i, i = 1, 2 \dots 5 \quad (12)$$

$$S = a + \sum_{i=1}^n b_i \gamma^i + \sum_{i=1}^n c_i H^i + \sum_{i=1}^n d_i K_c^i + \sum_{i=1}^n e_i K_f^i, i = 1, 2 \dots 5 \quad (13)$$

图4与图5为坝踵垂直拉应力分布宽度与坝趾最大压应力的响应面拟合对比图。可以看到,不考虑渗流与考虑渗流两种情况下观测值与预测值的误差较小,其中坝踵垂直拉应力分布宽度响应面函数的拟合优度  $R^2$  均达到0.97以上,坝趾最大压应力响应面函数的拟合优度  $R^2$  均达到0.99以上,说明拟合效果较为理想。

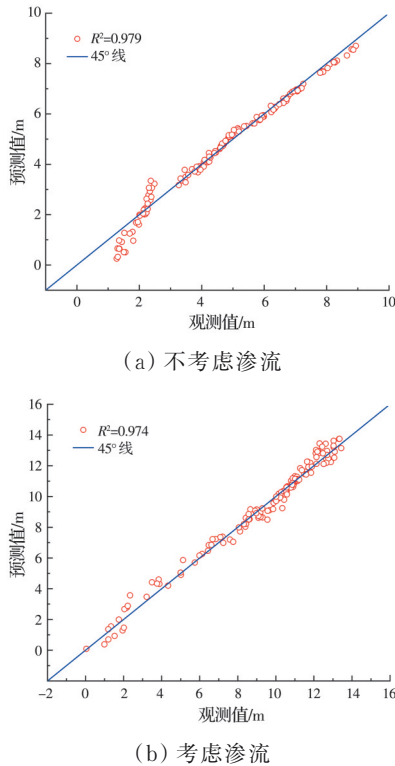


图4 坝踵垂直拉应力分布宽度响应面拟合对比

Fig.4 Width corresponding to the vertical tensile stress of the dam heel through the response surface fitting

图6为坝基面的竖向力与水平力响应面拟合对比图。不考虑渗流与考虑渗流两种情况下,将坝基面的竖向力与水平力样本进行拟合计算,可以观察到,拟合值符合原始观测值的趋势,并且拟合优度  $R^2$  均在0.99以上,说明拟合效果较好。

基于构建的响应面函数,采用蒙特卡罗模拟随机生成  $10^7$  组样本,根据3种失效模式的失效判断准则,统计分析拟合样本的失效个数并计算失效概率。基于有限元模型单次计算耗时需1 min,若采用

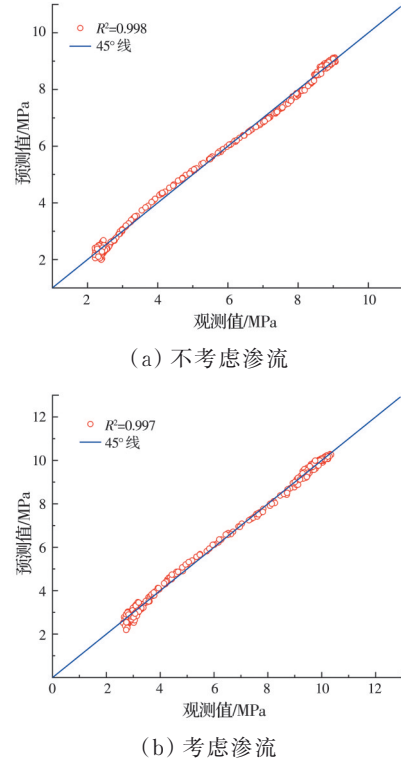


图5 坝趾最大压应力响应面拟合对比

Fig.5 Stress of the dam toe through the response surface fitting

蒙特卡罗方法,针对如此大样本则不理想。相较而言,在保证计算精度的前提下,采用响应面法能大幅提高计算效率。由此可见,在考虑渗流应力耦合的基础上,采用响应面法计算重力坝可靠度效率较高,可适用于小概率水平下大型复杂水工结构的可靠度分析。

3种失效模式下的失效概率计算结果见表5。由表5可见,坝趾压坏失效发生的概率最小,坝踵拉裂失效与沿坝基面滑动发生的概率较大,这是由于坝踵处应力较集中,容易发生开裂。重力坝系统可靠度计算得到的失效概率均大于3种失效模式下的失效概率,接近于沿坝基面滑动的失效概率。同时,考虑渗流作用后,重力坝发生失效的概率明显增大,说明坝体坝基内部渗流过程将直接影响重力坝的稳定运行,大幅增加重力坝坝踵拉裂及沿坝基面滑动的可能性。因此,在重力坝可靠度分析中有必要考虑渗流作用的影响。本文计算的失效概率数量级与相关文献中给出的数据较为一致<sup>[19]</sup>。

#### 4.3 概率失效分析

图7为3种失效模式下的  $Z_H$  绝对值。在图7(a)中,不考虑渗流:  $H > \gamma > \alpha$ ; 考虑渗流:  $\gamma > H > K_c > K_f$ , 两种情况下坝体容重与坝前水位的不确定性对坝踵拉裂失效概率影响较大,其他参数不确定性影

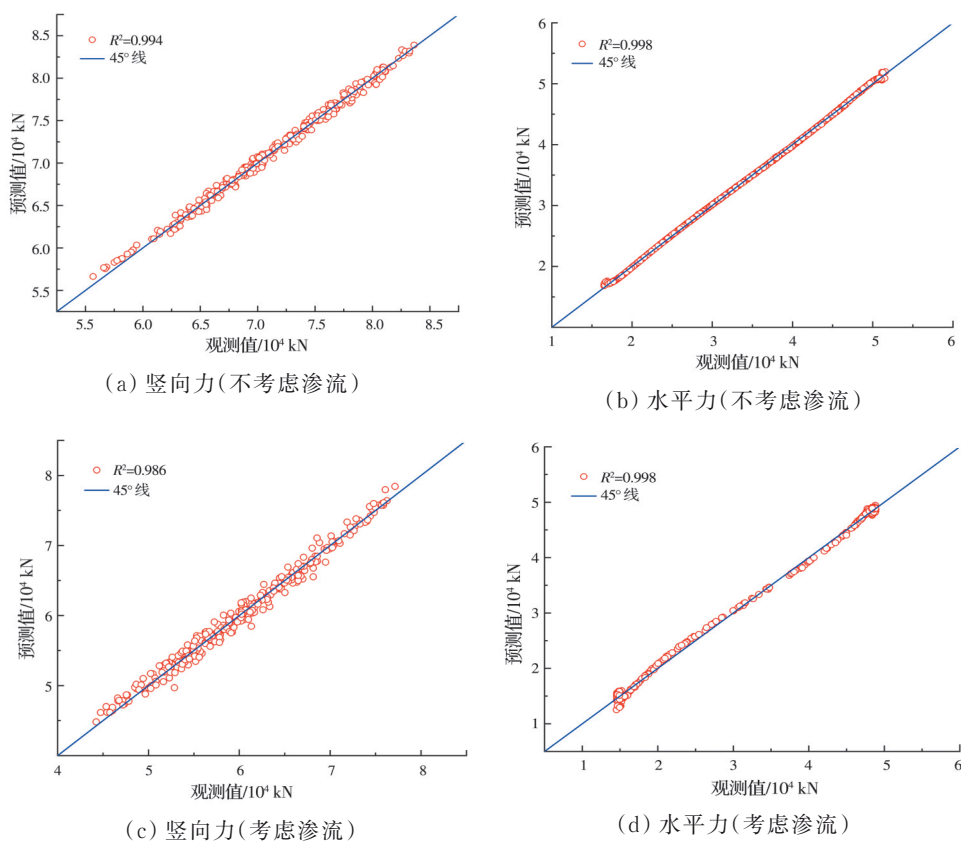


图 6 坝基面竖向力与水平力响应面拟合对比

Fig.6 Vertical and horizontal forces of the dam foundation through the response surface fitting

表 5 可靠度计算结果

Table 5 Reliability calculation results

计算条件	坝踵拉裂		坝趾压坏		沿坝基面滑动		系统失效模式	
	失效个数	失效概率	失效个数	失效概率	失效个数	失效概率	失效个数	失效概率
不考虑渗流	1	$1\times10^{-7}$	55	$5.5\times10^{-6}$	295	$2.95\times10^{-5}$	238	$2.38\times10^{-5}$
考虑渗流	636	$6.36\times10^{-5}$	169	$1.69\times10^{-5}$	764	$7.64\times10^{-5}$	878	$8.78\times10^{-5}$

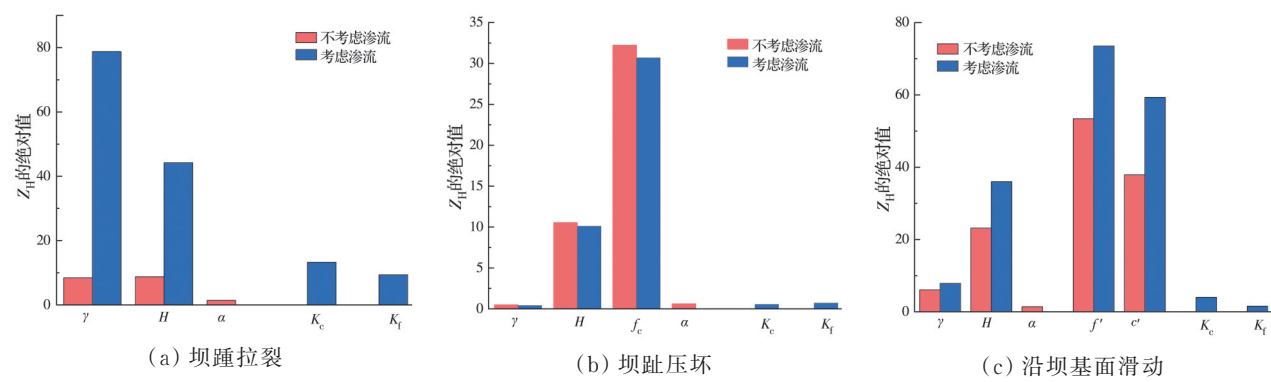


图 7 假设检验统计量  $Z_H$

Fig.7 Hypothesis testing statistic  $Z_H$

响较小。在图 7(b)中,不考虑渗流: $f_c>H>\alpha>\gamma$ ;考虑渗流: $f_c>H>K_f>K_c>\gamma$ ,两种情况下混凝土抗压强度的不确定性对坝趾压坏失效概率的影响最为显著,其他参数不确定性影响较小。

在图 7(c)中,不考虑渗流: $f'>c'>H>\gamma>\alpha$ ,考虑渗流: $f'>c'>H>\gamma>K_c>K_f$ ,可以发现,摩擦系

数和黏聚力的不确定性对沿坝基面滑动的失效概率影响最大,其次是坝前水位,其他参数不确定性影响较小。该定量分析结果与参数敏感性定性分析结果基本一致,表明利用概率失效分析定量评估不确定性参数对重力坝可靠度的影响具有合理性。



## 5 结论

通过将响应面法与随机有限元法相结合,提出了考虑渗流作用的重力坝稳定与应力高效可靠度分析方法。依托某水电站工程,针对不考虑渗流作用与考虑渗流作用两种情况,对影响大坝抗滑稳定和应力的不确定性参数进行敏感性分析,计算重力坝在3种失效模式下的失效概率,分析各随机变量对重力坝失效概率的贡献度,结果表明:

1)采用响应面法大幅提高了重力坝可靠度分析效率,抗滑稳定敏感性定性分析与概率失效分析结果基本一致,表明该方法对重力坝可靠度分析的高效性与适用性。

2)渗流作用会对重力坝稳定性和应力产生不利影响,忽略渗流作用导致高估重力坝安全性和可靠性。换言之,在重力坝稳定性和应力分析中,需要合理地考虑渗流作用,避免高估安全系数和低估重力坝失效概率。

3)考虑3种失效模式发现,坝基面滑动与坝踵拉裂的失效概率较大,其次是坝趾压坏,表明在坝体结构设计和监测中需重点关注坝基面滑动和坝踵拉裂的风险。坝前水位、坝体容重、坝基面抗剪强度参数对重力坝失效贡献最显著,在工程实践中应特别关注这些关键因素,以确保重力坝工程的安全稳定运行。

## 参考文献

- [1] ZHONG D H, WANG Z, ZHANG Y C, et al. Fluid-solid coupling based on a refined fractured rock model and stochastic parameters: A case study of the anti-sliding stability analysis of the Xiangjiaba project [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8): 2555-2567.
- [2] 郝志强,武亮,姚激.基于有限元方法的重力坝强度可靠度计算[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):120-121,126.  
HAO Z Q, WU L, YAO J. Reliability computation for strength of gravity dam based on FEM [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(1): 120-121, 126. (in Chinese)
- [3] 尹金超,赵泽鹏,张瀚,等.复杂地基下重力坝抗滑稳定可靠度分析[J].水电能源科学,2020,38(11):80-84.  
YIN J C, ZHAO Z P, ZHANG H, et al. Reliability analysis of anti-sliding stability of gravity dam under complex foundation [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 80-84. (in Chinese)
- [4] 熊铁华,常晓林.基于响应面的三维随机有限元法在大型结构可靠度分析中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2005,38(1):125-128.  
XIONG T H, CHANG X L. Application of 3-D stochastic FEM based on response surface in large structure reliability analysis [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(1): 125-128. (in Chinese)
- [5] 常晓林,袁曦.基于流-固耦合的强度折减法在重力坝抗滑稳定分析中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(5):545-549.  
CHANG X L, YUAN X. Application of strength reduction method considering hydro-mechanical coupling to analyze anti-sliding stability of gravity dams [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(5): 545-549. (in Chinese)
- [6] 吕从聪,李宗利,李东奇.ABAQUS渗流应力耦合分析中渗透荷载施加问题探讨[J].长江科学院院报,2018,35(5):68-72.  
LV C C, LI Z L, LI D Q. Problems of applying seepage pressure in coupling analysis of seepage and stress using ABAQUS [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(5): 68-72. (in Chinese)
- [7] 沈振中,陈小虎,徐力群.重力坝应力-渗流相互作用的无单元耦合分析[J].岩土力学,2008,29(增刊1):74-78.  
SHEN Z Z, CHEN X H, XU L Q. Coupled analysis of stress-seepage interaction for gravity dam by element-free method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup 1): 74-78.
- [8] ZHU X B, WANG X L, LI X, et al. A new dam reliability analysis considering fluid structure interaction [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8): 2505-2516.
- [9] 王亚军,张我华,张楚汉,等.碾压混凝土重力坝的广义损伤可靠度及敏感性[J].土木建筑与环境工程,2011,33(1):77-86.  
WANG Y J, ZHANG W H, ZHANG C H, et al. Generalized damage reliability and sensitivity analysis on rolled-concrete gravity dam [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1): 77-86. (in Chinese)
- [10] 李会军,李宗利,王亚红.重力坝系统可靠度及敏感性研究[J].中国农村水利水电,2014(5):81-85.  
LI H J, LI Z L, WANG Y H. Research on system reliability and sensitivity of gravity dams [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(5): 81-85. (in Chinese)
- [11] 混凝土重力坝设计规范:SL 319—2018[S].北京:中国水利水电出版社,2018.  
Design specification for concrete gravity dams: SL 319—2018 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2018. (in Chinese)
- [12] 贺志军,曹吉,赵炼恒,等.非线性Mohr-Coulomb破坏准则下边坡可靠度上限[J].土木建筑与环境工程,

- 2016, 38(6): 1-9.
- HE Z J, CAO J, ZHAO L H, et al. Upper bound reliability analysis of slope with nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(6): 1-9.
- [13] 黄俊, 赵江, 段祥睿, 等. 基于强度折减法的抗滑桩加固边坡可靠度分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 11-18.
- HUANG J, ZHAO J, DUAN X R, et al. Reliability analysis for soil slopes reinforced with piles using shear strength reduction method [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 11-18. (in Chinese)
- [14] WANG Y, CAO Z J, AU S K. Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7/8): 1015-1022.
- [15] 陈益峰, 周创兵. 隔河岩坝基岩体在运行期的弹塑性力学参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 968-975.
- CHEN Y F, ZHOU C B. Back analysis on elasto-plastic mechanic parameters of rock foundation of geheyan dam during running period [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 968-975. (in Chinese)
- [16] LI X X, LI D Q. A numerical procedure for unsaturated seepage analysis in rock mass containing fracture networks and drainage holes [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 23-34.
- [17] 李斌, 周兴波, 孙平. 抗剪断参数对抗滑稳定可靠度指标的影响[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 31-35.
- LI B, ZHOU X B, SUN P. Influence of shear parameters on the reliability index of anti-sliding stability [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 31-35. (in Chinese)
- [18] 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, 31(4): 40-45.
- ZHANG J Z, LI G Q. A study on system reliability and expectancy of gravity dam in service [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(4): 40-45. (in Chinese)
- [19] 蒋水华, 张曼, 李典庆. 基于 Hermite 正交多项式逼近法的重力坝可靠度分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(2): 170-174.
- JIANG S H, ZHANG M, LI D Q. Reliability analysis of gravity dam using Hermite orthogonal polynomials approximation method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(2): 170-174. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)