

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.009

基于分区有限元-界面元混合算法的重力坝长期抗滑稳定分析

傅露莹¹, 林潮宁¹, 程家林², 杜效鹄², 李同春¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 为了研究软岩地基上重力坝安全系数的演化规律, 提出了一种基于监测数据的结构面抗剪断强度参数反演方法, 通过建立抗剪断强度参数的时变模型, 应用分区有限元-界面元混合算法, 实现了对重力坝长期抗滑稳定性的动态评估。工程实例验证结果表明, 该方法能够考虑工程参数的真实变化, 提高了分析结果的准确性, 同时能对工程的安全系数进行动态评价。

关键词: 混凝土重力坝; 抗滑稳定; 安全系数迭代解法; 分区有限元-界面元

中图分类号: TV642.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)04-0072-08

Long-term anti-sliding stability analysis of gravity dams based on partitioned finite element-interface element hybrid algorithm

FU Luying¹, LIN Chaoning¹, CHENG Jialin², DU Xiaohu², LI Tongchun¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: In order to study the evolution law of the safety factor of gravity dams on soft rock foundations, a shear strength parameter inversion method of structural plane based on monitoring data was proposed. By establishing a time-varying model of shear strength parameters and applying a partitioned finite element-interface element hybrid algorithm, the dynamic evaluation of the long-term anti-sliding stability of gravity dams was achieved. The verification results of engineering examples show that the proposed method effectively reflects the true variation of engineering parameters, significantly improves the accuracy of analysis results, and ensures dynamic evaluation of the engineering safety factor.

Key words: concrete gravity dam; anti-sliding stability; iterative solution for safety factor; partitioned finite element-interface element method

随着运行时间的增长, 大坝会产生老化、病变等问题, 若不及时处理, 会影响大坝的安全运行, 甚至导致溃坝^[1-4], 因此需把控长期运行过程中大坝的安全性态, 以便提早做出应对措施, 预防灾害发生。滑动失稳是混凝土坝最主要的破坏方式^[5], 会对坝体的安全性、稳定性造成严重威胁, 因此抗滑稳定是混凝土坝安全评价的核心内容。

目前, 众多学者对重力坝的稳定性进行了研究: 韦贞景等^[6]通过确定结构面力学参数和滑移模式, 对滑面深度进行了敏感性分析, 并分析了大藤峡水利枢纽深层抗滑稳定性; 高绪航等^[7]应用分区有限元-界面元法快速求解了重力坝深层抗滑稳定安全系数。目前, 抗滑稳定性方面的研究主要侧重于参数不变情况下的安全系数计算与应用, 未考虑工程参数实际的变化情况。而工程在长期运行中, 在各种荷载和渗透水压的双重作用, 坝基岩体的强度极易产生弱化^[8-12]。廉敬毅^[13]通过材料敏感性分析, 建立时变参数反演代理模型进行反演分析, 揭示了摩擦角随时间呈指数减小并渐趋稳定的时变规律。因此, 为了探究岩体强度参数真实

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005403); 国家自然科学基金项目(52309151); 中国电建集团科技项目(DJ-HXGG-2022-02)

作者简介: 傅露莹(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程研究。E-mail: 402333475@qq.com

通信作者: 林潮宁(1994—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水工程可靠性与风险控制研究。E-mail: linchaoning@hhu.edu.cn

引用本文: 傅露莹, 林潮宁, 程家林, 等. 基于分区有限元-界面元混合算法的重力坝长期抗滑稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 72-79.

FU Luying, LIN Chaoning, CHENG Jialin, et al. Long-term anti-sliding stability analysis of gravity dams based on partitioned finite element-interface element hybrid algorithm[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 72-79.

的变化趋势,对抗剪断强度参数进行反演非常必要。

现有抗滑稳定分析法中,最常用的是有限元法^[14-16],该方法可以详细模拟各种地质条件,全面呈现模型的运行性态和破坏机理。然而,有限元法主要用于求解连续介质问题,不能模拟真实裂缝的张开、滑移。为了解决此问题,Li 等^[17]提出了分区有限元-界面元混合算法,能对不连续结构面的闭合、滑移和张开进行较好地模拟,同时把非线性迭代收缩到接触界面上进行,能大幅度提升计算效率。但分区有限元-界面元混合算法的计算结果只能得到块体的刚体位移、节点的应力应变以及接触点对的状态,不能对稳定性进行评价。随后,Li 等^[18]将混合算法与强度折减法相结合求解安全系数,此方法不仅可以较好地模拟不连续结构面的力学行为以及破坏过程,而且解决了有限元强度折减法在判断失稳时易受人为因素影响的问题。王凯等^[19]采用分区有限元-界面元混合算法求解抗滑稳定安全系数,并通过与传统弹塑性有限元强度折减法进行对比发现,混合算法计算效率更高,判据更明确。

本文考虑深层滑动面的抗剪断强度参数时效变化,采用强度折减法分析结构面破坏发展过程,采用改进粒子群算法根据某工程实测数据反演滑动面抗剪断强度参数,结合反演得到的参数变化曲线,计算工程的安全系数,并预测后期安全系数变化规律,以期重力坝长期抗滑稳定研究提供一种新思路。

1 分区有限元-界面元混合算法

1.1 界面元静力迭代方程

块体界面静力迭代方程是通过界面上力和变形间的非线性关系和刚体形心力的平衡方程,形成以界面上接触力与块体刚体形心位移作为混合变量和界面节点总位移进行迭代求解的混合方程^[20]。对于任何刚体,质心位移由平移分量和旋转分量两部分组成。假设块体 i 的质心位移增量为 $\Delta \boldsymbol{\gamma}_i = (\Delta \bar{u}, \Delta \bar{v}, \Delta \bar{w}, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z)^T$, 其中 $\Delta \bar{u}, \Delta \bar{v}, \Delta \bar{w}$ 分别为该质心点处的平移位移增量分量; $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z$ 分别为质心点处的转动位移增量分量,则相对于块体 i 质心的节点 k 的相对坐标值为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$,其刚性块体增量位移为

$$\Delta \mathbf{u}_g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta z & -\Delta y \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta z & 0 & \Delta x \\ 0 & 0 & 1 & \Delta y & -\Delta x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{u} \\ \Delta \bar{v} \\ \Delta \bar{w} \\ \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{bmatrix}_i = \boldsymbol{\omega}_{ki} \Delta \boldsymbol{\gamma}_i \quad (1)$$

式中: $\Delta \mathbf{u}_g$ 为刚性块体的增量位移; $\boldsymbol{\omega}_{ki}$ 为节点 k 到块体 i 质心的变换矩阵。

根据模型假设,变形仅表现在接触面变形上。节点的总位移由接触面可变形的部分与块体视作刚体的刚性位移部分组成:

$$\Delta \mathbf{u}_t = \Delta \mathbf{u}_c + \mathbf{C} \Delta \mathbf{f} + \Delta \mathbf{u}_g \quad (2)$$

式中: $\Delta \mathbf{u}_t$ 为总增量位移; $\Delta \mathbf{u}_c$ 为外荷载导致的增量位移; $\mathbf{C}$ 为总柔度矩阵中与节点 k 相关的矩阵; $\Delta \mathbf{f}$ 为接触内力增量。

节点 k 在任意节点对接触块体上的总增量位移为

$$\Delta \mathbf{u}_{kt} = \Delta \bar{\mathbf{u}}_k + \mathbf{C}_k \Delta \mathbf{f}_k + \boldsymbol{\omega}_{ki} \Delta \boldsymbol{\gamma}_i \quad (3)$$

式中: $\Delta \mathbf{u}_{kt}$ 为由外部荷载增量和接触力增量引起的电流迭代步长下的总位移增量,它可以通过块体 i 的接触力增量 $\Delta \mathbf{f}_k$ 和 $\Delta \boldsymbol{\gamma}_i$ 迭代求解; $\mathbf{C}_k$ 为与总柔性矩阵中的节点 k 相关的矩阵; $\Delta \bar{\mathbf{u}}_k$ 为仅由于外部荷载增量产生的可变形增量位移。

对于每个接触体,作用在其上的所有力,与步骤 n 处的质心点相关的平衡方程为

$$\mathbf{W}_i \ddot{\boldsymbol{\gamma}}_{ni} + \alpha \mathbf{W}_i \dot{\boldsymbol{\gamma}}_{ni} = \sum_{k=1}^{p_i} \boldsymbol{\omega}_{ki}^T \mathbf{f}_{kn} + \sum_{l=1}^{q_i} \boldsymbol{\omega}_{li}^T \mathbf{F}_{ln} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix}$$

式中: m_i 、 I_i 分别为与块体 i 相关的质量和旋转惯量; α 为质量阻尼系数; $\ddot{\boldsymbol{\gamma}}_{ni}$ 、 $\dot{\boldsymbol{\gamma}}_{ni}$ 分别为步骤 n 时块体 i 的

刚性加速度和刚性速度; p_i 为块体 i 上的接触节点数; q_i 为块体 i 上的总节点数; f_{kn} 为步骤 n 时节点 k 的接触力; F_{ln} 为步骤 n 时作用在块体 i 节点 l 上的外部负载。

对于静态问题,式(4)的左侧为零,则

$$\sum_{k=1}^{p_i} \omega_{ki}^T f_{kn} + \sum_{l=1}^{q_i} \omega_{li}^T F_{ln} = 0$$

(5)

梳理式(3)和式(5),块体 i 上的静态迭代方程为

$$\begin{bmatrix} C_i & \omega_{i\Gamma} \\ \omega_{i\Gamma}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_{in} \\ \Delta \gamma_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -\omega_{i\Omega}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{in} - \Delta \bar{u}_{in} \\ \Delta F_{in} \end{bmatrix}$$

(6)

式中: Γ 为界面边界, ω_r 的维数为 $(p_i d) \times [3(d-1)]$; Ω 为块的整个区域, ω_Ω^T 的维数为 $[3(d-1)] \times (q_i d)$; d 为空间的维数。

1.2 接触状态

接触点对的状态可分为 3 种:张开(用 0 表示)、闭合(用 1 表示)、滑移(用 2 表示),见表 1。

表 1 接触状态定义

Table 1 Definition of contact states

状态	位移条件	应力条件
张开	$\delta > 0$	$f_1 = f_2 = 0$
闭合	$\delta = 0$	$f_1 = -f_2, f_\xi < \sigma_t A, \sqrt{f_\eta^2 + f_\zeta^2} < -\mu f_\xi + Ac$
滑移	$\delta = 0$	$\sqrt{f_\eta^2 + f_\zeta^2} = -\mu f_\xi + Ac, f_\xi > \sigma_t A$

注: δ 为位移; f_1, f_2 为在局部坐标系 $\xi\eta\zeta$ 接触界面上接触点对其中一点的接触力向量; A 为接触点对所控制的面积; f_ξ, f_η, f_ζ 分别为接触力 f 在局部坐标系 ξ, η, ζ 方向的分量; μ 为摩擦系数; φ 为接触面摩擦角; c 为接触面材料黏聚力; σ_t 为接触面材料抗拉强度。

1.3 抗滑稳定性分析流程

分区有限元-界面元混合算法的计算结果只能得到块体的刚体位移、节点的应力应变以及接触点对的状态,而强度折减法通常采用塑性区贯通等判据来判断失稳,判据存在较大争议,且没有统一标准。因此将分区有限元-界面元混合算法与强度折减法相结合进行计算分析,关键步骤包括:①根据坝基的地质结构建立有限元模型,找出最容易发生滑动的软弱结构面,同时在确定的滑动面位置建立接触点对。②将分区有限元-界面元与强度折减法结合。不断折减滑动面上的抗剪断强度参数,在收敛性判断时以接触点对的状态为判断依据,直至点对全部失效,得出的折减系数为真实的抗滑稳定安全系数。

2 重力坝参数反演代理模型的构建

2.1 改进粒子群算法的基本原理

粒子群算法通过粒子速度完成搜寻^[21-22],每个粒子表示了一个潜在的解,其位置和速度表示解的状态和速度。整个粒子群可以看作是一个多维解空间中的群体,每个粒子都具有一个解向量和速度向量,通过不断调整速度和位置来寻找最优解。该算法结构简单,只需调整较少的参数,便于工程实施。

需要注意的是,怎样平衡整体和局部搜索的能力是算法必须解决的问题,Shi 等^[23]通过引入新参数即自适应惯性权重来解决该问题。为了避免陷入局部最优,选取自适应惯性权重优化粒子群算法,使算法可以在搜寻中根据粒子位置进行动态变化搜索最优解。

2.2 代理模型反演分析流程

将接触界面分为 2 组进行赋值,通过材料分组可以改变接触点对的抗拉及抗剪断强度:①先选取靠近坝踵处的一个单元为第 1 组,剩下的单元为第 2 组,对第 1 组进行抗剪断强度参数反演。②判断反演结果是否符合实际情况。由于坝基屈服的不可恢复性,因此设置材料参数在寻优时不可增大,若比前一个最优参数大则剔除。③比较反演结果是否满足精度要求。若达到最大迭代次数后和实际位移误差相差较大,则根据前文判断的塑性区变化方向,从坝踵处向坝趾处,将单元依次加入进行反演。抗剪断强度参数反演流程如图 1 所示。

3 实例验证

3.1 工程概况

某水电站工程位于 Kamchay 河干流上,水电站大坝枢纽工程的高碾压混凝土重力坝高 112 m,正常蓄水位为 150.00m,坝顶高程为 153.00m,坝底高程为 41.00m,坝顶宽 6.0m。本文选择 7 号坝段进行计算,该坝

段的(正)倒垂线分布如图 2 所示。

3.2 模型与计算参数

选取测点所在剖面采用 Hypermesh 进行前处理建模以及网格剖分,有限元模型以上游坝基处作为坐标原点, x 为顺河向, y 为竖直向。对坝基不同结构性质的区域进行了分组处理,该坝段坝基岩体中存在多条顺层面泥岩夹层,其中 L225、L11 和 L12 夹层的规模较大且延伸较长(图 3)。这些夹层性状较弱,力学强度低,同时抗风化能力弱,构成坝基深层抗滑稳定的控制面,在河床下的分布高程依次为 14、24、24、39、50、45 m。地质资料显示,7 号坝段坝基岩体主要为 IV 类岩体,4 条主要软弱夹层中 L12 泥岩软弱结构面是最靠近坝基面、岩石性质最容易破坏的关键结构面,因此选取的深层潜在滑动面如图 3 所示。7 号坝段典型剖面有限元模型如图 4 所示,整体模型采用四结点单元离散,共计 3 758 个节点,360 个单元。荷载考虑库水重和上游坝面水荷载,坝基侧面边界法向约束,模型底面边界采用固定约束。

各岩层材料力学参数如表 2 所示,基于分区有限元-界面元方法,在选取的滑动面上建立了 88 对接触点对,接触单元采用 GOODMAN 单元。将坝体与部分地基视为滑动体,而滑动面以下的地基则被视为基础。

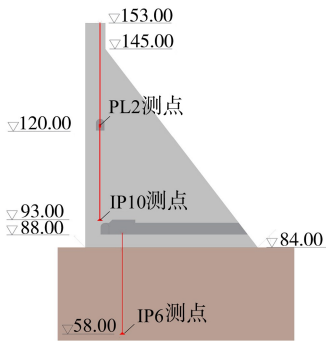


图 2 7 号坝段的(正)倒垂线分布(单位:m)
Fig. 2 Distribution of (positive) inverted vertical lines in dam section No. 7 (unit: m)

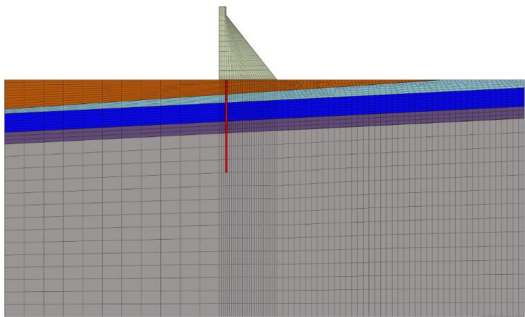


图 4 7 号坝段典型剖面有限元模型

Fig. 4 Finite element model of typical profile of dam section No. 7

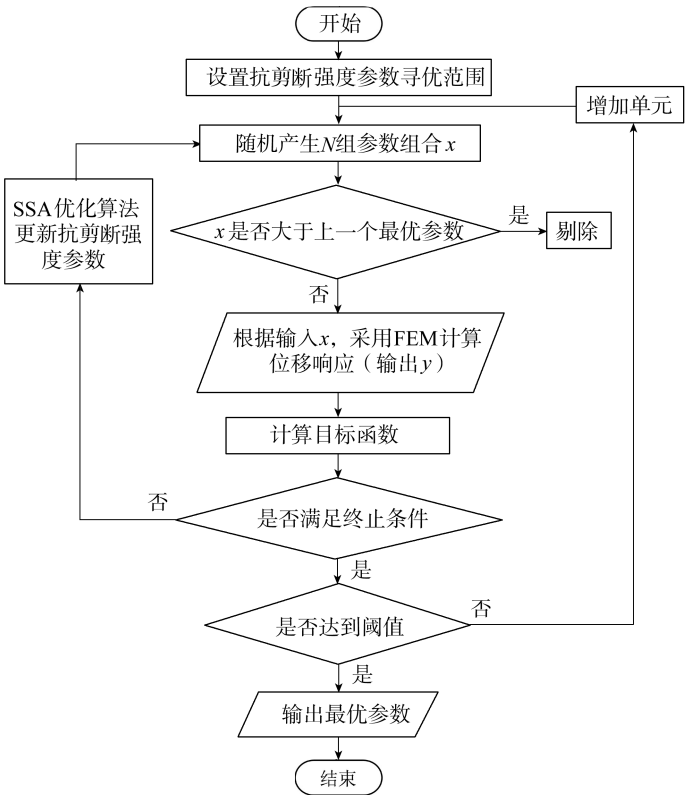


图 1 抗剪断强度参数反演流程

Fig. 1 Inversion flow chart of shear strength parameters

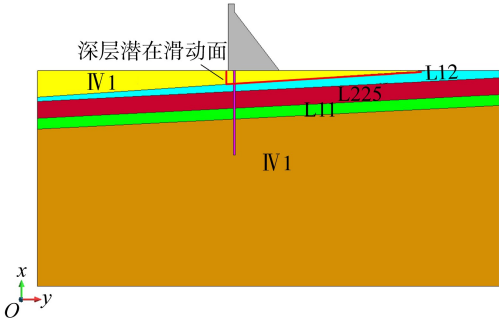


图 3 7 号坝段潜在滑动面示意图

Fig. 3 Potential sliding surface of dam section No. 7

表 2 力学参数

Table 2 Mechanical parameters

区域	变形模量/GPa	泊松比	容重/(kN/m ³)
坝体	23.41	0.167	24.0
IV 1 类岩体	3~5	0.29	25.8
L12	1.45	0.30	23.5
L225	2.75	0.23	25.3
L11	2.75	0.23	25.1

3.3 塑性区扩展情况

为了确定塑性区的位置和大致扩展的方向,采用强度折减法,代入不同的折减系数进行有限元计算。取薄层实体单元对结构面进行模拟,坝基岩体和坝体都利用线弹性本构模型,软弱结构面则利用摩尔库伦屈服准则。不同折减系数下的坝基软弱结构面塑性区的位置及大致的扩展方向如图 5 所示。由图 5 可知,该坝段塑性屈服最先发生在软弱结构面的上游主滑面,随着折减系数的不断增大,塑性屈服区缓慢向下游剪出面扩展,直至整个软弱结构面全部屈服。

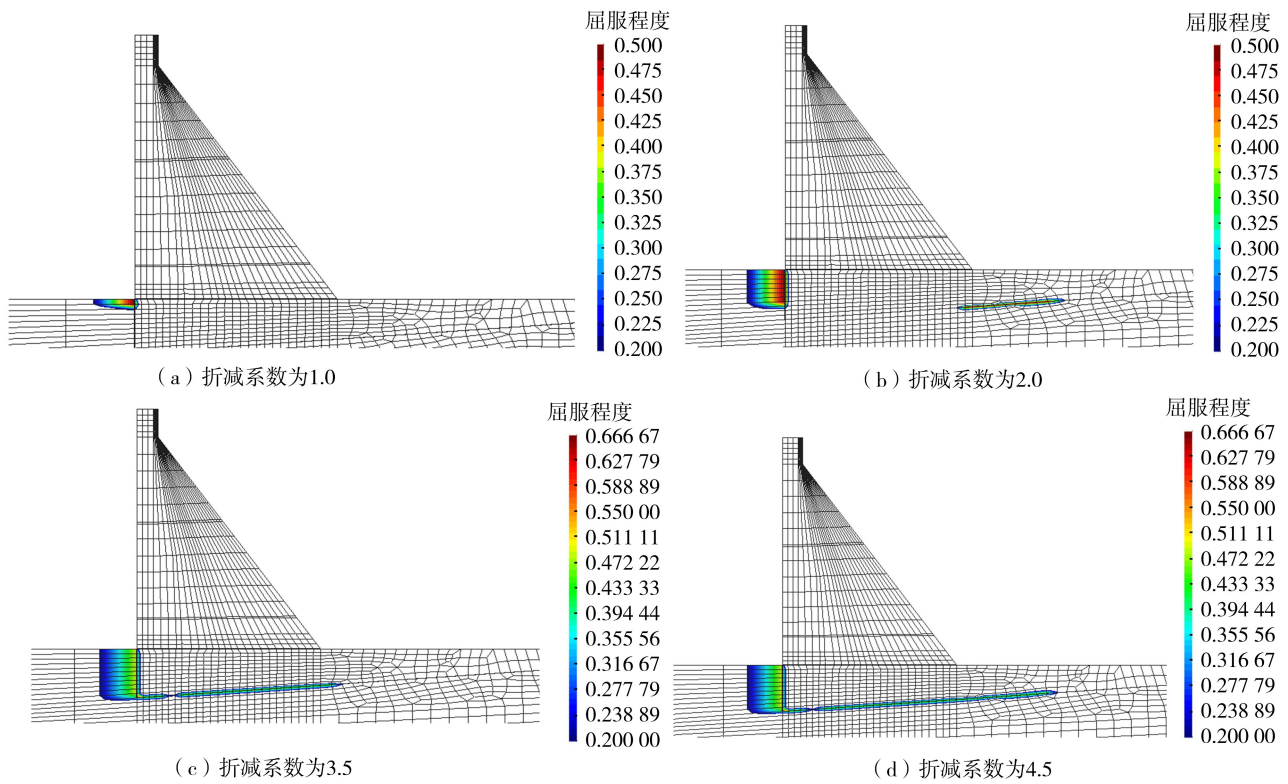


图 5 不同折减系数下塑性区变化

Fig. 5 Changes in plastic zone under different reduction factors

3.4 重力坝抗剪断强度参数反演

坝体及坝基变形模量见表 2,采用改进粒子群算法对深层滑动面的抗剪断强度参数进行反演。设置参数:种群规模取 20,最大迭代次数为 15,惯性权重最大值、最小值分别为 0.8、0.2,学习因子 $c_1=c_2=1.5$ 、 $e_1=0.8$ 、 $e_2=0.3$,待反演参数的取值范围为 $\mu \in [0.38, 0.47]$, $c \in [0.08 \text{ MPa}, 1 \text{ MPa}]$ 。将 2018 年 6 月 26 日作为初始时刻,选取 2018—2023 年的实测位移数据,计算时间间隔为 1 月,计算结果如表 3 和图 6 所示。由表 3 可知,测点拟合的误差较小,拟合效果较好。由图 6 可知,各测点的实测位移过程线与分区有限元-界面元计算拟合全过程趋势相对一致,位移变化规律一致,个别日期差异稍大,总体吻合。

反演得到的抗剪断强度参数变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,黏聚力和摩擦系数随时间变化降低,前期减小幅度较大,后期趋于稳定。此结果说明抗剪断强度参数会弱化,因此有必要反演抗剪断强度参数。选用指数函数拟合,接触面黏聚力、摩擦系数的时效变化拟合曲线分别为 $c = 0.935t^{-0.312}$ 、 $\mu = 0.448t^{-0.022}$,其中 t 为与初始时刻(2018 年 6 月 26 日)相距的月份数。

3.5 重力坝长期抗滑稳定分析

采用分区有限元-界面元混合算法进行迭代计算。迭代过程随机选用 1 个数据点举例,见表 4。计算时总计迭代 4 次,当折减系数迭代至 4.8353 的时候,滑动面上的 88 对接触点对全部失效,由此可以判定该重力坝失稳,得到该重力坝的深层抗滑稳定安全系数为 4.8353。该方法利用接触点对的状态判断收敛性,判

表 3 分区有限元-界面元计算结果评价

Table 3 Evaluation of partitioned finite element-interface element calculation results

测点	均方根误差/mm	平均绝对误差/mm
IP6	0.981	0.781
IP10	0.814	0.619
PL2	1.233	1.062

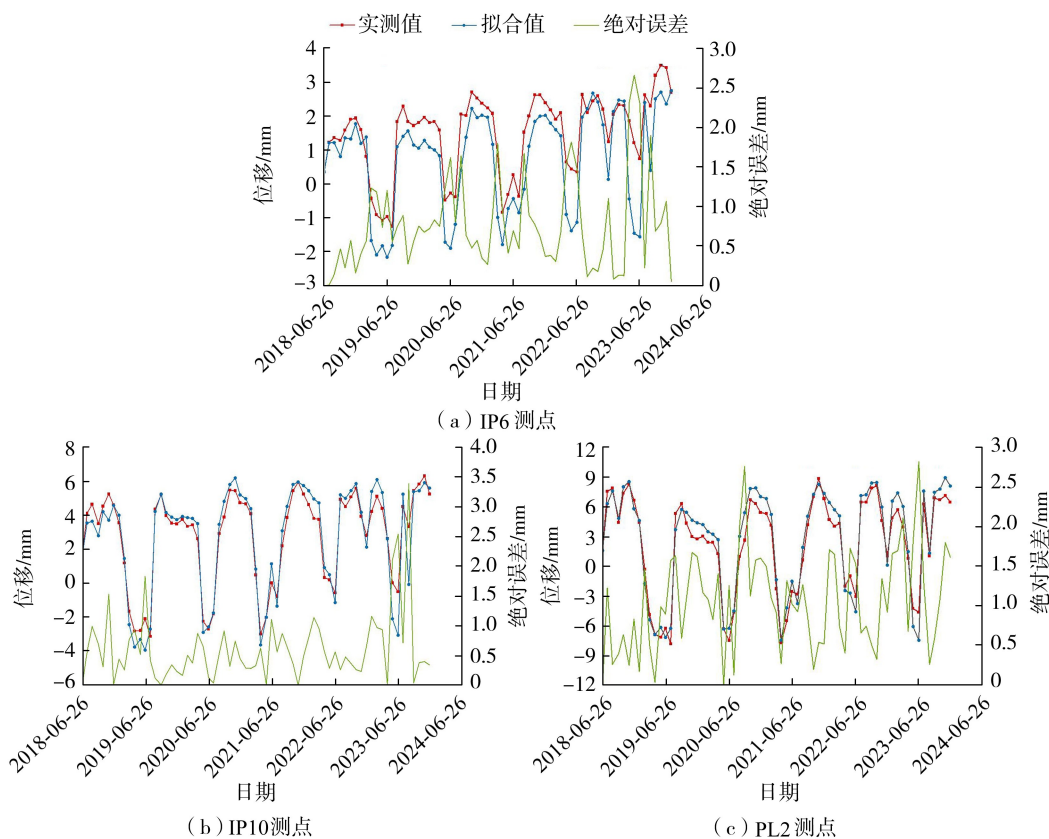


图 6 7 号坝段测点位移拟合曲线

Fig. 6 Displacement fitting curves for measurement point along dam section No. 7

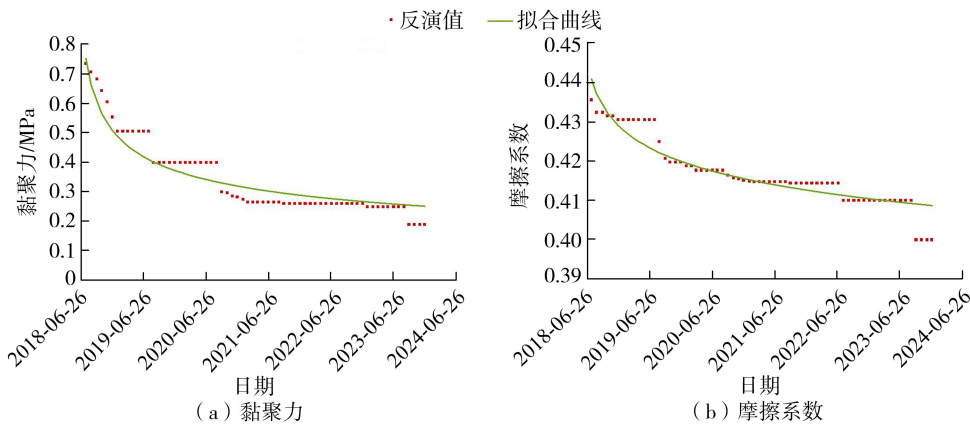


图 7 反演滑动面抗剪断强度参数时效曲线

Fig. 7 Time-dependent curve of shear strength parameters of inverted sliding surface

据清晰明确,不受人为因素干扰。

将所有黏聚力和摩擦系数都代入进行计算,得到 2018—2023 年的安全系数随时间的变化规律(图 8)。

由图 8 可知,7 号坝段的深层抗滑稳定安全系数和水位变化呈负相关关系;安全系数随时间增长而减小,前期降低幅度较大,后期幅度逐渐减小,并逐渐平稳。依据 SL 319—2018《混凝土重力坝设计规范》中各工况对应的安全系数,基本组合的安全系数为 3.0。综合各时段的计算结果,安全系数最小值为 4.44,符合规范要求,该工程 7 号坝段的深层抗滑稳定性能够得到保证更好。

表 4 安全系数迭代过程

Table 4 Iterative process of safety factor				
次数	F_s	F_s^*	失效点对/对	总点对/对
1	1	4.1225	12	88
2	4.1225	4.7088	17	88
3	4.7088	4.8353	49	88
4	4.8353	4.8353	88	88

注: F_s 为假定安全系数; F_s^* 为求解折减后的安全系数。

根据 $c = 0.935t^{-0.312}$ 、 $\mu = 0.448t^{-0.022}$ 计算抗剪断强度系数,选取正常蓄水位代入,对未来的安全系数进行计算,计算结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着参数缓慢弱化,安全系数随时间缓慢减小。根据计算得到的变化规律可得,在现有的材料参数变化趋势下,安全系数大约在 100 a 后小于 3.0,不满足 SL 319—2018《混凝土重力坝设计规范》要求。随着时间变化可以进一步加强重力坝的变形监测,计算参数变化趋势,同时及时对重力坝的抗滑稳定性进行计算分析。

4 结 论

- a. 分区有限元-界面元混合算法可以利用点对的接触状态判断结构是否进入极限平衡状态,将重力坝深层抗滑问题考虑为接触问题,判据较传统方法更加直观,具有明确的物理意义。
- b. 黏聚力和摩擦系数随时间变化降低,且拟合结果较好,存在弱化过程。前期减小幅度较大,后期速度减缓趋于稳定。
- c. 7 号坝段的深层抗滑稳定安全系数和水位变化呈负相关关系,安全系数随时间增长而减小,前期降低幅度较大,后逐渐平稳。2018—2023 年安全系数最小值为 4.44,符合规范要求。根据响应方程计算各参数,然后计算安全系数,得出在现有的材料参数变化趋势下,安全系数大约会在 100 a 后接近规范容许值。随着时间的推移应对重力坝加强监测。

参考文献:

[1] 吴中如. 老坝病变和机理探讨[J]. 中国水利,2000(9):55-57. (WU Zhongru. Analysis on pathological change and mechanism of old dams[J]. China Water Resources,2000(9):55-57. (in Chinese))

[2] 陈云,王义俊,郑霞忠,等. 融合案例挖掘与贝叶斯网络的溃坝事故致因风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):13-21. (CHEN Yun,WANG Yijun,ZHENG Xiazhong,et al. Risk analysis of dam break accident combining case mining and Bayesian network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(4):13-21. (in Chinese))

[3] 李兆宇,贾金生,苏安双,等. 胶结土坝漫顶溃坝模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):98-104. (LI Zhaoyu,JIA Jinsheng,SU Anshuang,et al. Experimental study on overtopping and dam break model of cemented soil dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):98-104. (in Chinese))

[4] 翟巍昆,易富,杜常博,等. 尾矿坝漫顶溃决溃口纵向演化与侵蚀试验[J]. 水利水电科技进展,2023,43(5):45-52. (ZHAI Weikun,YI Fu,DU Changbo,et al. Longitudinal evolution of breach and erosion tests for tailings dam overtopping failure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):45-52. (in Chinese))

[5] REN Q W,XU L Y,WAN Y H. Research advance in safety analysis methods for high concrete dam[J]. Science in China Series E:Technological Sciences,2007,50(Sup1):62-78.

[6] 韦贞景,于景宗,张冬冬. 大藤峡水利枢纽泄水闸坝段深层抗滑稳定性问题[J]. 长江科学院院报,2020,37(8):170-174. (WEI Zhenjing,YU Jingzong,ZHANG Dongdong. Deep anti-sliding stability of release sluice segment of Datengxia hydro-project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(8):170-174. (in Chinese))

[7] 高绪航,刘晓青,杜效鹤. 基于分区刚体—界面元方法的重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 水电能源科学,2024,42(4):123-127. (GAO Xuhang,LIU Xiaoqing,DU Xiaohu. Stability analysis of deep anti-sliding of gravity dam based on partitioned rigid body and interface element method[J]. Water Resources and Power,2024,42(4):123-127. (in Chinese))

[8] 孙涛,陈媛,陈建叶,等. 大藤峡坝坝典型坝段坝基稳定模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(1):179-189. (SUN Tao,CHEN Yuan,CHEN Jianye,et al. Model experimental study on foundation stability of typical section of Datengxia

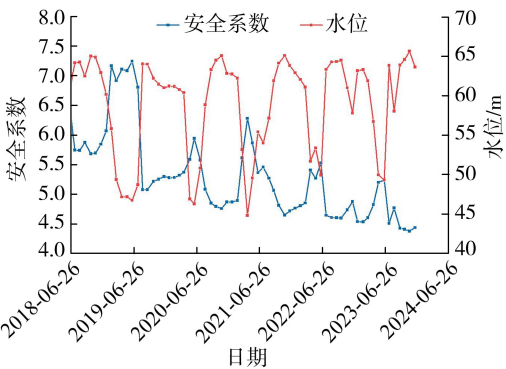


图 8 7 号坝段 2018—2023 年安全系数

Fig. 8 Safety factor of dam section No. 7 from 2018 to 2023

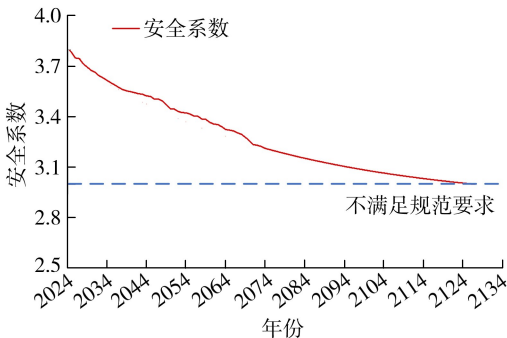


图 9 长期安全系数变化规律

Fig. 9 Long-term safety factor variation pattern

sluice dam[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2022,18(1):179-189. (in Chinese))

[9] 唐茂颖,段斌,张林,等. 深厚覆盖层上的高闸坝整体稳定地质力学模型试验研究[J]. 水力发电,2017,43(6):105-109. (TANG Maoying, DUAN Bin, ZHANG Lin, et al. Experimental study on global stability of high gate dam founded on deep overburden by geomechanical model[J]. Water Power,2017,43(6):105-109. (in Chinese))

[10] 陈媛,张林,杨宝全,等. 白鹤滩电站左岸强卸荷区边坡稳定试验研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(3):144-150. (CHEN Yuan, ZHANG Lin, YANG Baoquan, et al. Stability of the left bank high slope in strong unloading area of Baihetan hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(3):144-150. (in Chinese))

[11] XU Bo, WANG Shida. Sensitivity analysis of factors affecting gravity dam anti-sliding stability along a foundation surface using Sobol method[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 399-407.

[12] 张宗堂,肖天祥,高文华,等. 交通荷载下煤矸石路基填料累积变形 PSO-BP 神经网络预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2024,44(2):87-91. (ZHANG Zongtang, XIAO Tianxiang, GAO Wenhua, et al. PSO-BP neural network prediction model for cumulative deformation of coal gangue subgrade filler under traffic loading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):87-91. (in Chinese))

[13] 廉敬毅. 重力坝时变参数反演及可靠度分析[D]. 武汉:华中科技大学,2022.

[14] 熊堃,何蕴龙,刘俊林. Hardfill 坝的整体稳定安全度[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(5):550-555. (XIONG Kun, HE Yunlong, LIU Junlin. Integral stability of Hardfill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2011,39(5):550-555. (in Chinese))

[15] 马强,温立峰,党侃. 考虑断层影响的 RCC 高拱坝静动力计算分析研究[J]. 水电能源科学,2021,39(11):132-135. (MA Qiang, WEN Lifeng, DANG Kan. Static and dynamic analysis of RCC high arch dam considering influence of faults[J]. Water Resources and Power,2021,39(11):132-135. (in Chinese))

[16] 方文杰,李艳,戚翔宇,等. 基于有限元法的进水闸闸室结构安全复核研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(增刊 2):158-164. (FANG Wenjie, LI Yan, QI Xiangyu, et al. Research on structural safety recheck of intake sluice chamber structure based on finite element method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(Sup2):158-164. (in Chinese))

[17] LI Tongchun, LIU Xiaoqing, ZHAO Lanhao. An interactive method of interface boundary elements and partitioned finite elements for local continuous/discontinuous deformation problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2014, 100(7):534-554.

[18] LI Tongchun, HE Jinwen, ZHAO Lanhao, et al. Strength reduction method for stability analysis of local discontinuous rock mass with iterative method of partitioned finite element and interface boundary element[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015,2015:872834.

[19] 王凯,李同春,程井. 基于分区有限元与块体界面元混合算法的重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 中国农村水利水电,2020(5):98-102. (WANG Kai, LI Tongchun, CHENG Jing. Deep sliding stability analysis of gravity dams based on the iterative method of partitioned finite elements and interface boundary elements[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(5):98-102. (in Chinese))

[20] QI Huijun, LI Tongchun, LIU Xiaoqing, et al. A fast local nonlinear solution technique based on the partitioned finite element and interface element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2022,123(10):2214-2236.

[21] 佟大威,杨传会,余佳,等. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(3):91-98. (TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, et al. Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):91-98. (in Chinese))

[22] 杜镇瀚,钟启明,董海洲,等. 基于贝叶斯网络的堰塞坝稳定性快速评价模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):37-45. (DU Zhenhan, ZHONG Qiming, DONG Haizhou, et al. Rapid evaluation method of landslide dam stability based on Bayesian network[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(4):37-45. (in Chinese))

[23] SHI Yuhui, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]//1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage:IEEE,1998:69-73.

(收稿日期:2024 - 07 - 24 编辑:刘晓艳)