

水库区抗滑桩加固边坡的变形与稳定性智能分析

罗方悦¹, 曹永华², 张 嘎³, 陈思宇^{3*}

¹北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京

²中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津

³清华大学土木水利学院, 北京

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月12日; 发布日期: 2026年8月24日

摘 要

水库区边坡在周期性水位波动与降雨作用下变形与破坏特性复杂, 且常采用抗滑桩作为主要加固手段。本文选取某典型水库区边坡, 建立了一套变形与稳定性智能分析方法。基于等效桩土条模型与等效水位线概念, 实现抗滑桩加固效应与水位滞后影响的合理表征。发展基于监测数据的智能优化反演算法, 实现宏观本构模型参数的高效标定。分析结果表明边坡整体稳定性良好; 抗滑桩在减小位移和提高安全系数方面的效果显著; 边坡位移以水平向为主呈近线性增长。分析预测结果与全球导航卫星系统(GNSS)监测数据吻合较好, 分析速度快, 从而为水库区抗滑桩加固边坡的变形与稳定性评价提供了有效手段。

关键词

边坡, 水位变动, 抗滑桩, 变形, 稳定性, 参数智能反演

Intelligent Deformation and Stability Analysis of Anti-Slide Pile-Reinforced Slopes in Reservoir Areas

Fangyue Luo¹, Yonghua Cao², Ga Zhang³, Siyu Chen^{3*}

¹School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing

²Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin

³School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing

Received: July 20, 2026; accepted: August 12, 2026; published: August 24, 2026

*通讯作者。

文章引用: 罗方悦, 曹永华, 张嘎, 陈思宇. 水库区抗滑桩加固边坡的变形与稳定性智能分析[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 152-160. DOI: 10.12677/hjce.2026.158211

Abstract

The deformation and failure characteristics of reservoir bank slopes under cyclic water level fluctuations and rainfall are complex, and anti-slide piles are commonly employed as the primary reinforcement measure. In this paper, a typical reservoir bank slope is selected, and a set of intelligent analysis methods for deformation and stability is established. Based on the equivalent pile-soil strip model and the concept of equivalent water level line, the reinforcement effect of anti-slide piles and the influence of water level lag are reasonably characterized. An intelligent optimization inversion algorithm based on monitoring data is developed to achieve efficient calibration of macro-meso constitutive model parameters. The analysis results indicate that the overall stability of the slope is satisfactory; the anti-slide piles effectively reduce deformation and increase stability level of the slope; the slope displacement exhibits a predominantly horizontal and nearly linear growth trend. The predicted results are in good agreement with Global Navigation Satellite System (GNSS) monitoring data, and the analysis is computationally efficient, thus providing an effective means for evaluating the deformation and stability of slopes reinforced with anti-slide piles in reservoir areas.

Keywords

Slope, Water Variation, Anti-Slide Pile, Deformation, Stability, Intelligent Parameter Inversion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水库区边坡在运行期长期暴露在水位周期性波动与降雨环境下, 导致其变形与破坏特性十分复杂。数值模拟表明周期性水位波动会引起边坡稳定性的退化, 特别是极端的快速水位循环会诱发边坡多阶段的渐进破坏模式[1][2]。离心模型试验已揭示水位骤降和干湿循环条件下边坡的渐进破坏机制, 均表现为变形局部化与局部破坏的耦合驱动过程[3][4]。因此, 水库区边坡的变形稳定性分析亟需重点考虑水位变动这一关键因素。

抗滑桩是水库区边坡最常用的加固手段之一。物理试验与解析分析表明揭示了坡体变形过程中抗滑桩被动受力特性演化规律, 证明了合理布置的抗滑桩能够显著提高边坡稳定性并控制变形发展[5][6]。有研究通过荷载传递系数构建了抗滑桩加固边坡的概率极限平衡框架, 或者通过桩土均匀化技术来量化桩的加固效果[7][8]。但目前还未形成针对水库区抗滑桩边坡的有效分析方法。

近年来, 人工智能技术在基于监测结果的材料力学参数反演优化中发挥了重要作用, 显著提升复杂参数优化的收敛性和精度。有研究针对性发展了工程领域的人工智能分析理论, 通过力学分析模型与人工智能技术的深度耦合, 实现了堰塞坝、边坡和风力发电机群等实际工程的有效分析[9]。特别是物理信息神经网络等方法通过将物理规律嵌入深度学习框架, 能够在小样本条件下实现监测数据的质量评估和模型参数的反演优化[10]-[12]。

针对上述研究现状和工程需求, 本文选取某水库区典型边坡, 开展水库区抗滑桩加固边坡的变形与稳定性智能分析, 包括: (1) 基于等效桩土条模型和等效水位线概念实现水位变动与加固结构耦合作用的有效表征; (2) 引入力-水-时耦合的宏细观一体化本构模型和边坡变形-稳定性一体化分析方法, 发展基于智能优化算法的参数反演方法; (3) 对典型水库区抗滑桩加固边坡开展变形与稳定性分析, 验证智能

分析方法的有效性；(4) 分析典型边坡的变形和稳定性规律。

2. 边坡变形 - 稳定性一体化分析方法

以条分法作为基本框架, 采用考虑应力 - 干湿循环 - 流变耦合作用的宏细观一体化本构模型, 以及边坡变形 - 稳定性一体化分析方法开展分析[13]。

2.1. 边坡条分模型

选取一个典型的实际水库区边坡的 2 个剖面, 1 号剖面呈西南 - 东北走向, 2 号剖面呈南 - 北走向。其中, 2 号剖面设置了两排抗滑桩, 第一排抗滑桩桩长 55 m, 桩径 2 m, 桩间距 5 m; 第二排抗滑桩桩长 35 m, 桩径 2 m, 桩间距 4 m。该边坡共有 13 个 GNSS (全球卫星导航系统) 监测点, 边坡的剖面几何示意图及监测点布置情况如图 1 所示。基于边坡条分法基本原理, 将坡体划分为 30 个竖直条块, 再将滑动体划分为边长 5 m 的正方形单元网格, 实现边坡几何建模。分析时先求解正方形单元网格的应变, 再采用积分法计算坡体任意位置的位移。

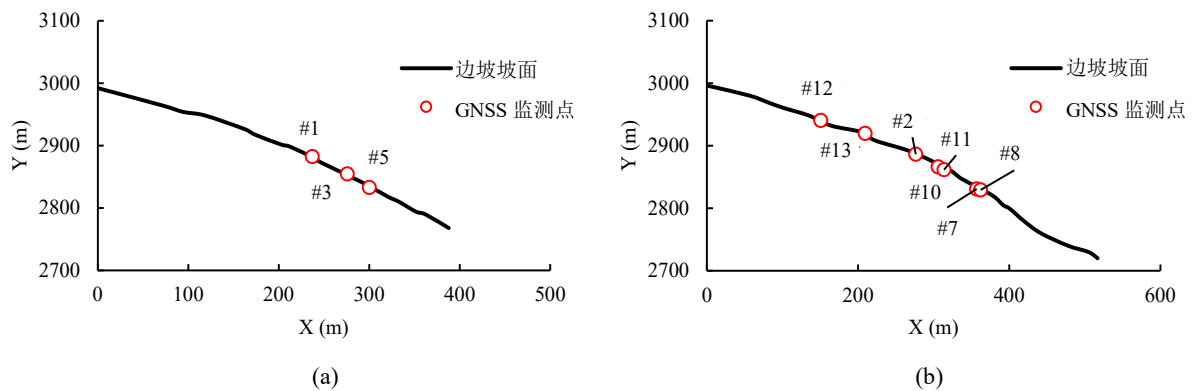


Figure 1. Slope geometry profile and layout of monitoring points. (a) Profile 1; (b) Profile 2. X and Y are the profile coordinates

图 1. 边坡几何剖面及监测点布置。(a) 1 号剖面；(b) 2 号剖面，X 和 Y 为剖面坐标

2.2. 等效桩土条模型

边坡材料采用宏细观一体化本构模型刻画, 其基于宏细观一体化思路建立[14], 将宏观力学特性与细观组构演化关联机理数学化, 有效描述了边坡材料在应力、干湿循环、时间耦合作用下的力学特性。本构模型的应力应变公式如下:

$$\left. \begin{aligned} d\tilde{\varepsilon} &= \frac{1+\nu}{E} d\tilde{\sigma} - \frac{\nu}{E} tr(\tilde{\sigma}) \tilde{I} + \frac{\nu tr(\tilde{\sigma}) \tilde{I} - (1+\nu) \tilde{\sigma}}{E^2} dE + \frac{\tilde{\sigma} - tr(\tilde{\sigma}) \tilde{I}}{E} d\nu \\ dE &= -Ed\Omega + Kn \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n-1} d\sigma_3 \quad d\nu = \nu_0 \nu d\Omega + \frac{bm}{p_a} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{m-1} d\sigma_3 \\ E &= E_0 + \int dE, \quad E_0 = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad \nu = \nu_0 + \int d\nu, \quad \nu_0 = b \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \\ T &= \frac{1}{(\alpha + \varepsilon_1)(1+N)} d\varepsilon_1 + \frac{1}{\beta \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\zeta + N^2} dN + \frac{\eta}{t} dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

该模型共 8 个参数，如表 1 所述。

Table 1. Constitutive model parameters and their optimized results
表 1. 宏细观一体化本构模型参数及其优化结果

参数名称	符号	取值	参数名称	符号	取值
应力组构常数	α	0.11	模量常数	K	120
干湿循环组构常数	β	3.1	模量指数	n	0.38
干湿循环组构指数	ζ	0.47	泊松比常数	a	0.016
流变组构常数	η	0.005	泊松比指数	m	0.09

针对抗滑桩加固的 2 号剖面，采用等效桩土条模型开展建模，将桩所在土条用等效的桩土条块代替 [15]。桩间距是等效桩土条模型的关键变量，采用如下公式计算等效桩土条的模量常数， K ：

$$K = \kappa \frac{D}{L} K_{pile} + \left(1 - \kappa \frac{D}{L}\right) K_{soil} \quad (2)$$

式中 K_{soil} 和 K_{pile} 分别为土和桩材料的模量常数； D 为桩径； L 为桩间距； κ 为桩影响系数。

桩影响系数 κ 反映了桩间距对抗滑桩加固边坡破坏特性的非线性影响，通过其与桩间距的关系来描述：

$$\kappa = e^{-a_1 \left(\frac{L}{D} - 1\right)^{a_2}} \quad (3)$$

式中 a_1 和 a_2 为参数，根据研究经验可分别综合确定为 0.008 和 2。

2.3. 等效水位

对库水位变化引起坡体内部水位变化按照如下方法计算：(1) 库水位时程变化曲线以其最高和最低水位作为特征水位。同时为考虑由于入渗过程导致坡体内部水位变化的滞后效应，将特征水位时刻后移建立等效水位曲线(图 2(a))；(2) 在构建等效水位曲线后，基于历史数据的周期性特征和关键转折点，对未来水位变动趋势进行预测(图 2(b))；(3) 坡体的浸润线与等效库水位具有一一对应关系，其形状用幂函数表示如下：

$$y - y_0 = r_1 (x - x_0)^{r_2} \quad (4)$$

式中 x_0 、 y_0 取等效水位与坡表的交点。公式参数 r_1 、 r_2 可根据工程类比或通过下文的智能优化方法加以确定。参数确定后，即可基于智能优化方法，根据上述公式对未来水位发展过程进行预测。

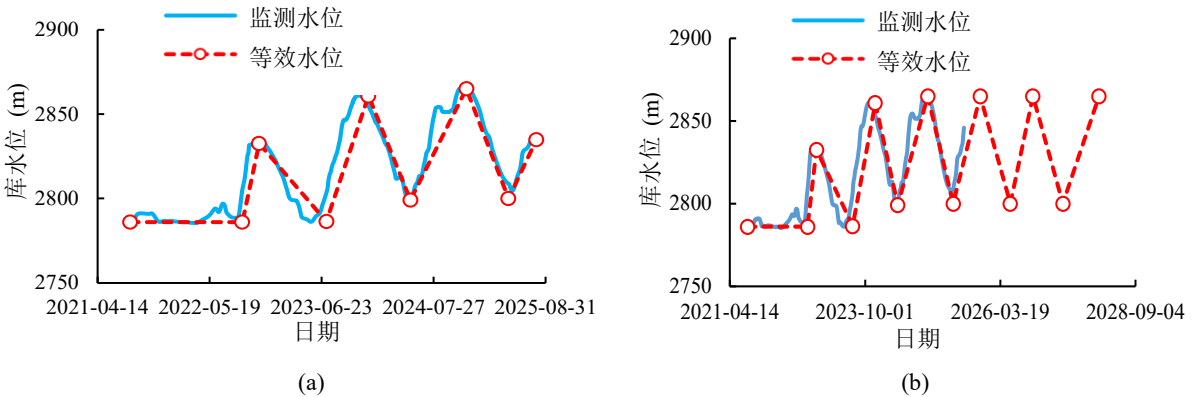


Figure 2. Schematic diagram of the equivalent water level. (a) Optimized results; (b) Predicted results
图 2. 边坡等效水位示意图。(a) 优化的等效水位；(b) 预测的等效水位

3. 本构模型参数的智能优化方法

3.1. 参数智能优化算法

以监测数据为本构模型参数优化的依据,采用一种基于 PSO 的神经网络方法实现参数的最优化智能反演求解,其主要流程为:(1) 构建 Loss 函数,量化边坡位移预测数据与监测数据之间的误差;(2) 开展模型训练,并将每轮训练中得到的本构模型参数和等效水位参数代入边坡变形-稳定性一体化分析方法计算 Loss 函数结果;(3) 通过多次迭代基于 Loss 函数结果修正参数,直至其收敛到预设阈值,从而完成模型训练;(4) 输出当前监测数据条件下本构模型参数和等效水位参数的最优估计,可较为准确地反映结构的实际物理状态。

3.2. 优化效果

图 3 给出了基于监测数据的本构模型参数迭代优化的过程,本文采用标准差作为误差衡量指标。随着迭代次数增加,变形-稳定性一体化分析方法的计算结果逐步趋近于实际监测值,误差迅速下降并趋于收敛。该算法具有较高的计算效率,单次迭代耗时约为 4 s,约 20 次迭代即可实现收敛。2 个边坡剖面共用一套参数,参数优化过程可在 80 s 内完成,满足工程实际对快速响应与实时分析的需求。表 1 给出了本构模型参数的优化结果。

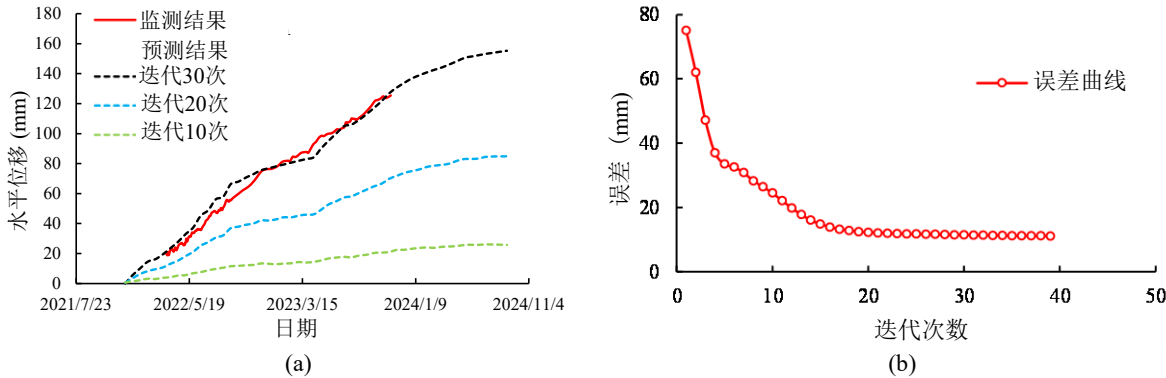


Figure 3. Iterative optimization of constitutive model parameters based on monitoring data. (a) Comparison between monitored and predicted displacements; (b) Error curve

图 3. 基于监测数据的本构模型参数迭代优化。(a) 监测位移与预测位移;(b) 误差曲线

4. 水库区抗滑桩加固边坡分析结果

表 1 给出了基于反演标定的本构模型参数。在此基础上采用边坡变形-稳定性一体化分析方法进行分析,得到了稳定性安全系数、边坡位移等分析成果。

4.1. 稳定性安全系数

图 4 展示了边坡两个剖面在潜在破坏面上的稳定性安全系数预测结果。在初始阶段,安全系数大约接近 1.4。随着水位的变化,各剖面的安全系数逐渐下降,最终接近 1.2。1 号剖面的稳定性安全系数相对较高,而 2 号剖面相对较低。总体来看,边坡整体的稳定性安全系数仍处于较高水平,表明其整体稳定性较好。

4.2. 边坡表面位移

图 5 展示了边坡剖面各监测点的模型模拟结果与实测数据的对比。结果表明,在 1 号剖面中,高程

较高的 1 号监测点受水位影响较小, 位移发展趋势较为平缓, 其变形主要是流变导致的; 高程较低的 3 号和 5 号监测点受水位变动影响显著, 表明水位变动是导致该处变形的主要因素。

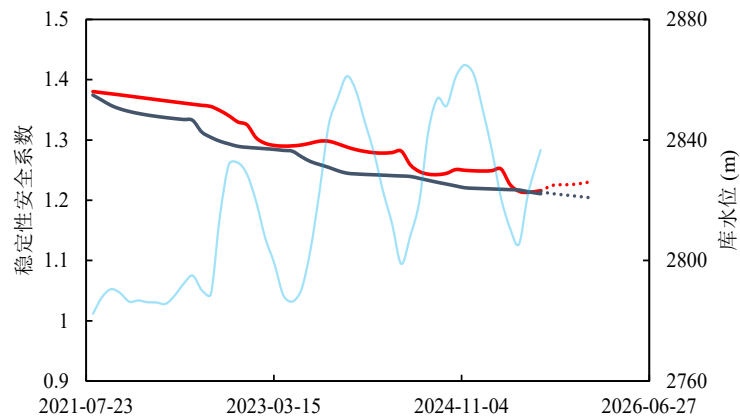


Figure 4. Factors of safety along the potential slip surfaces of the slope
图 4. 边坡潜在破坏面稳定性安全系数

由于抗滑桩作用, 2 号剖面的变形较 1 号剖面显著减小, 表明抗滑桩具有显著的减小变形作用。7 号和 8 号监测点的水平位移与模型预测结果的拟合度较低。因为这两个测点的水平位移测量结果显著大于竖直位移, 且变化规律也不一致, 初步判断应该主要是由于观测误差原因导致的拟合度较低。其余监测点的位移与预测结果拟合较好。总体来看, 随着水位循环次数的增加, 各监测点的变形逐渐趋于收敛, 发展趋势趋于稳定。

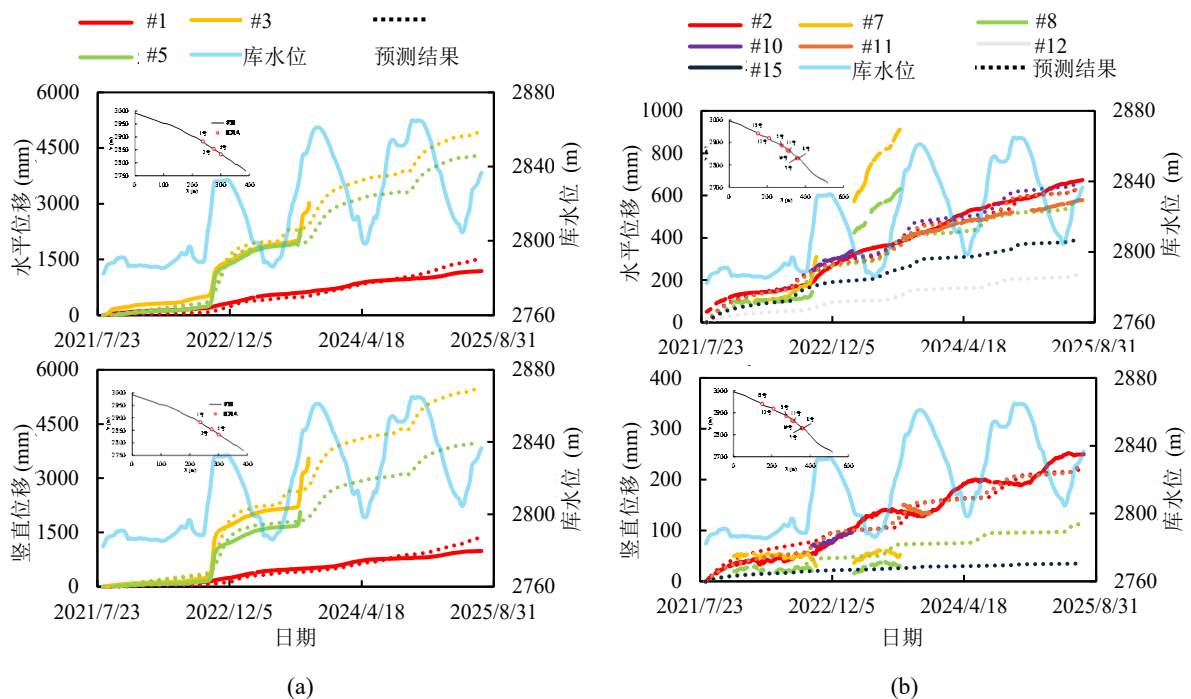


Figure 5. Histories of slope surface displacements. (a) Profile 1; (b) Profile 2
图 5. 边坡表面位移时程曲线。(a) 剖面 1; (b) 剖面 2

4.3. 边坡内部位移

图6展示了边坡2个剖面水平位移和竖直位移分布云图与总位移的矢量图。图7展示了边坡2个坡面坡表的水平位移和竖直位移的空间分布结果。坡表位移的空间分布则选取每年11月份水位达到最高时的位移数据。结果表明,边坡1号剖面的位移主要集中在边坡表面中部附近,距该区域越远位移越小,位移等值线呈圆弧形,水平位移与竖直位移大小相近。2号剖面的整体位移较小,且在采取抗滑桩加固措施后,局部位移进一步减小。

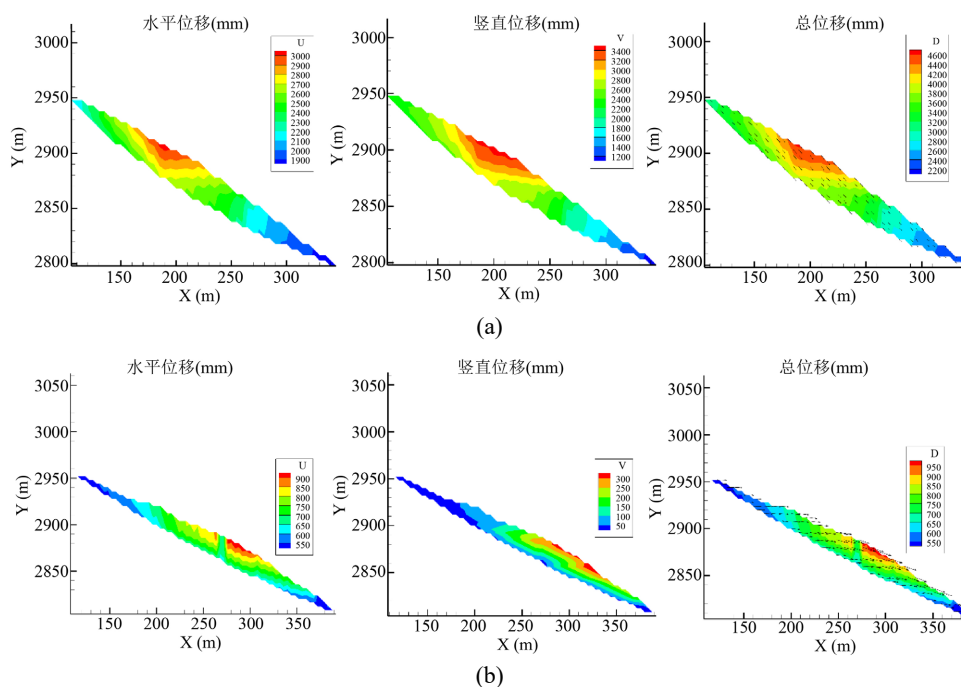


Figure 6. Contour maps of internal displacement distribution within the slope. (a) Profile1; (b) Profile 2
图6. 边坡内部位移分布云图。(a) 剖面1; (b) 剖面2

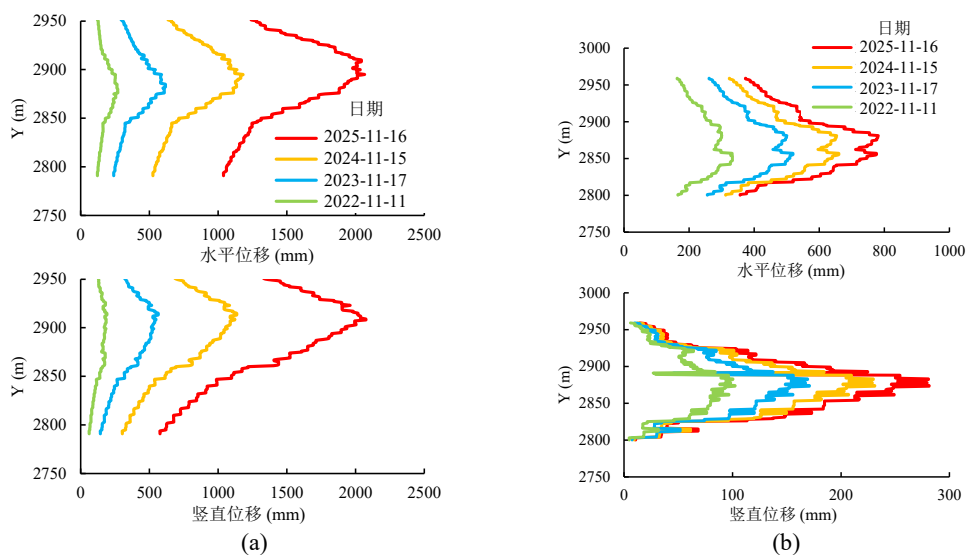


Figure 7. Development trends of internal displacements within the slope. (a) Profile1; (b) Profile 2
图7. 边坡内部位移发展趋势。(a) 剖面1; (b) 剖面2

4.4. 边坡安全趋势评估

该水库区边坡的变形总体呈近线性缓慢增加趋势，两个剖面的稳定性安全系数整体处于 1.2~1.4 之间，边坡处于低风险状态，稳定性较好。对比两个剖面的变形和稳定性安全系数，可以发现抗滑桩在减小位移和提高安全系数方面具有重要作用。

5. 结论

本文针对水库区环境下抗滑桩加固边坡的分析难题，建立了变形和稳定性智能分析框架，为水库区抗滑桩加固边坡的安全评价与运维决策提供了有效工具。得到如下主要结论：

(1) 基于等效桩土条模型与等效水位线概念，将三维抗滑桩群合理简化为二维等效条块，并引入考虑滞后效应的等效水位线，实现了水位变动与加固结构耦合作用的有效表征。

(2) 发展了基于监测数据的本构模型智能参数反演方法，实现了宏细观一体化本构模型参数的高效标定，算法约 20 次迭代即可收敛，单次耗时约 4 秒，兼顾了反演精度与计算效率。

(3) 开展了典型水库区边坡的变形和稳定性分析，模型预测与监测数据吻合较好，验证了有效性。分析表明该边坡整体稳定性良好。抗滑桩在减小位移和提高安全系数方面的效果显著，桩体附近位移明显减小。边坡变形以水平向为主、呈近线性增长。

参考文献

- [1] Wei, S., Ji, F., Ding, J.L., Guan, M. and Lu, Y.P. (2025) Influence of Extremely Rapid Cyclic Reservoir Water Level Fluctuations on Bank Slope Stability: Insights from Model Testing and Numerical Simulation of a Pumped Storage Power Station Slope. *Engineering Geology*, **357**, Article 108380. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108380>
- [2] Deng, Z.Z., Wang, G., Wang, Z.N. and Jin, W. (2024) Modelling Erosion and Stability Degradation of a Reservoir Slope under Periodic Water Level Fluctuations. *Computers and Geotechnics*, **166**, Article 106021. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.106021>
- [3] Luo, F.Y., Zhang, G. and Ma, C.H. (2023) Centrifuge Modeling of Drying-Wetting Cycle Effect on Soil Slopes. *International Journal of Geomechanics*, **23**, Article 04023157. <https://doi.org/10.1061/jjgnai.gmeng-8737>
- [4] Luo, F.Y., Zhang, G., Liu, Y. and Ma, C.H. (2018) Centrifuge Modeling of the Geotextile Reinforced Slope Subject to Drawdown. *Geotextiles and Geomembranes*, **46**, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.09.001>
- [5] Minamide, K., Kun, F., Pipatpongsa, T., Kitaoka, T. and Ohtsu, H. (2019) On the Failure Mechanisms of Slope Due to Undercutting and Reinforcement Effects of Slope Stabilizing Piles. *Japanese Geotechnical Journal*, **14**, 31-41. <https://doi.org/10.3208/jgs.14.31>
- [6] Tao, L.J., Jia, Z.B., Bian, J. and Shi, M. (2022) Analytical Solution of Seismic Analysis of Piled-Reinforced Slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **81**, Article No. 17. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02532-8>
- [7] Wen, J.H., Chu, X.S., Xu, L., Yu, G.M. and Li, L. (2024) Probabilistic Pile Reinforced Slope Stability Analysis Using Load Transfer Factor Considering Anisotropy of Soil Cohesion. *Engineering Reports*, **6**, e12877. <https://doi.org/10.1002/eng2.12877>
- [8] Luo, F.Y., Li, Y., Yao, Y.P. and Zhang, G. (2025) Simplified Analysis Method of Stone Column Reinforced Foundations Based on Homogenization Technique. *Transportation Geotechnics*, **53**, Article 101601. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101601>
- [9] 张嘎, 罗方悦. 工程域人工智能[J]. 土木工程学报, 2026, 59(1): 1-12.
- [10] Haghighat, E., Raissi, M., Moure, A., Gomez, H. and Juanes, R. (2021) A Physics-Informed Deep Learning Framework for Inversion and Surrogate Modeling in Solid Mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **379**, Article 113741. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113741>
- [11] Zhang, Z., Wang, B., Li, Z., Ye, X., Sun, Z. and Dias, D. (2024) Physics-Guided Neural Network-Based Framework for 3D Modeling of Slope Stability. *Computers and Geotechnics*, **176**, Article 106801. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106801>
- [12] Zhou, H., Wu, H., Sheil, B. and Wang, Z. (2025) A Self-Adaptive Physics-Informed Neural Networks Method for Large Strain Consolidation Analysis. *Computers and Geotechnics*, **181**, Article 107131. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107131>

- [13] 罗方悦. 水位变动下土坡变形与破坏耦合机理及分析方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2023: 57-62, 117-128.
- [14] Zhao, Y. and Zhang, G. (2024) A New Macro- and Micro-Coupling Model of Barrier Dam Soil. *Construction and Building Materials*, **440**, Article 137430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137430>
- [15] Zhang, G. and Wang, L. (2017) Simplified Evaluation on the Stability Level of Pile-Reinforced Slopes. *Soils and Foundations*, **57**, 575-586. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.03.009>