

# 基于多点时序监测信息融合的软土地层船坞工程安全状态动态预警

彭铭<sup>1,2</sup>, 马佩琪<sup>1,2</sup>, 朱艳<sup>3</sup>, 陈献军<sup>4</sup>, 王开放<sup>3</sup>, 周杰鑫<sup>3</sup>

(1.同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2.同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; 4.沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

**摘要:** 软土地层船坞工程因地质条件复杂、施工周期长等特点, 面临土体参数不确定性高、传统预警误差大等挑战。针对上述问题, 本文提出一种基于多点时序监测信息融合的安全状态动态预警方法。首先, 构建贝叶斯网络模型, 利用网络节点响应关系和蒙特卡洛(MCS)模拟计算先验概率; 然后, 引入时序监测数据, 通过马尔可夫链-蒙特卡洛算法(MCMC)更新后验概率, 动态量化安全系数( $F_s$ )、失效概率( $P_f$ )等指标, 实现监测信息与安全状态直接关联。最后, 基于软土特性与相关规范, 建立包含 5 级预警级别、3 种响应状态的动态预警标准。以上海某船坞工程为例, 该方法融合多点时序监测信息进行参数反演, 有效降低土体参数不确定性(变异系数降低 14%~30%); 同时实现时效性安全评价, 安全系数时变曲线随变形增大呈规律性递减; 基于此建立分级动态预警标准, 判定船坞施工期处于安全级 I ( $F_s=1.945 > 1.50$ ,  $P_f < 0.001\%$ ); 并通过设计极端工况模拟验证了预警标准在危险状态下触发预警的可行性。本文构建的动态预警体系, 显著提升了参数反演精度与安全评价的准确性与实时性, 有效规避了单一数据误报风险, 增强了动态预警的精度和全面性, 为同类工程风险防控提供科学方法。

**关键词:** 贝叶斯网络; 多点时序监测信息融合; 动态预警; 软土地层; 船坞工程

中图分类号: P753

收稿日期: 2025-05-06

## Dynamic Early Warning of Safety Status for Dock Engineering in Soft Soil stratum Based on Multi-point Time-Series Monitoring Information Fusion

PENG Ming<sup>1,2</sup>, MA Peiqi<sup>1,2</sup>, ZHU Yan<sup>3</sup>, CHEN Xianjun<sup>4</sup>, WANG Kaifang<sup>3</sup>, ZHOU

Jiexin<sup>3</sup>

(1.College of Civil Eng., Tongji Univ., Shanghai 200092, China; 2.Key Lab. of Geotechnical and Underground Eng. of Ministry of Education, Tongji Univ., Shanghai 200092, China; 3. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 4. Hudong Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

**Abstract:** Dock engineering in soft soil stratum faces challenges such as high uncertainty of soil parameters and large errors in traditional early warning due to complex geological conditions and long construction periods. To address these issues, this study proposes a dynamic early warning method for safety status based on multi-point time-series monitoring information fusion. First, a Bayesian network model is constructed, which utilizes the response relationships of network nodes and Monte Carlo Simulation (MCS) to calculate prior probabilities. Then, time-series monitoring data are introduced to update posterior probabilities through the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) simulation,

基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人计划资助(23XD1434800); 上海市服务业发展引导专项资金-专项基金重点项目(No. 06162021301); 国家自然科学基金-联合基金重点项目(No. U23A2044)

第一作者简介: 彭铭(1981-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事地质灾害、大坝安全与溃坝机理分析。E-mail: pengming@tongji.edu.cn, ORCID: 0000-0001-9134-4391

通讯作者简介: 朱艳(1986-), 女, 研究员, 博士, 主要从事海岸带工程灾害防治及智能化设计研究工作。E-mail: zhuyan@ndri.sh.cn

dynamically quantifying indicators such as the safety factor ( $F_s$ ) and failure probability ( $P_f$ ) to establish a direct correlation between monitoring information and safety status. Finally, based on the characteristics of soft soil and relevant specifications, dynamic early warning criteria incorporating 5 warning levels and 3 response states are established. Applying the method to a dock project in Shanghai, this method integrates multi-point time-series monitoring information for parameter inversion, effectively reducing the uncertainty of soil parameters (with the coefficient of variation decreased by 14%~30%). Meanwhile, it realizes time-sensitive safety evaluation, where the time-varying curve of the safety factor shows a regular decrease as deformation increases. Based on this, a hierarchical dynamic early warning standard is established, which determines that the dock is in Safety Level I during the construction period ( $F_s=1.945 > 1.50$ ,  $P_f < 0.001\%$ ). Additionally, the feasibility of the early warning standard triggering alerts under hazardous conditions is verified through extreme working condition simulation. The proposed dynamic early warning system significantly improves the accuracy of parameter inversion and the accuracy and real-time performance of safety evaluation, effectively avoids the risk of false alarms from single-source data, enhances the precision and comprehensiveness of dynamic early-warning, and provides a scientific method for risk prevention and control in similar engineering projects.

**Keywords:** Bayesian network; Multi-point time-series monitoring information fusion; Dynamic early warning; Soft soil stratum; Dock engineering

## 0 引言

软土海岸带船坞工程具有水陆交界地质复杂、开挖规模大、暴露周期长等特点。坞室开挖过程中,施工扰动与流固耦合等效应显著增加土体力学参数的不确定性(赵晶等,2018),易引起土体持续变形、支护结构强度衰减(冯师和刘羿辰,2022),还可能降低工程安全计算与预警系统的可靠性,甚至可能引发灾难性事故。如2004年新加坡地铁环线临海基坑事故,因反演分析误差、安全评估偏差及监测预警滞后等因素,支护结构由局部变形演变为区域性失稳,最终造成4死3伤及周边管线损毁。此类长周期复杂工程中,土体参数会随时间发生潜在变化,初期灾害迹象隐蔽、易被忽视,而后续通过灾害链传导引起突发性破坏事件。因此,降低土体参数反演误差,实现时效性安全评价与动态预警,对工程风险早发现、早处置进而保障工程安全建设具有重要意义。然而,如何将土体参数演化规律、工程安全评估模型和监测信息进行有效融合,量化时间因素的影响,仍是当前面临的关键难题。

实际工程中,土体参数确定主要有两种方法:一是室内外土工试验,该方法虽可直接获取土体物理力学指标,但仅反映局部土体特征,难以体现参数的时变特性(何军涛等,2012),且试验误差会影响工程计算精度。二是基于现场实测数据的参数反演方法,现有遗传算法(于京池等,2022)、粒子群算法(杨道学等,2019)及贝叶斯方法(王丽芳等,2024;朱艳等,2016;Peng et al, 2014)等被用于位移反演分析,可有效降低参数不确定性对工程计算的不良影响。然而,其中大部分算法假定目标土体参数为常数,导致反演结果为一系列定值,且由于计算模型和观测数据存在误差,上述定值与土体参数的真实值也存在相应的误差,所得反演结果与土体参数真实值仍存在较大偏差。

在工程安全评价领域,主要方法分为物理力学原理驱动与数据驱动两类。前者以土体本构关系和经典力学理论为核心,揭示工程系统响应规律:传统力学解析法计算高效、操作简便,但因忽略土体非线性变形与复杂边界条件,误差较大且对复杂问题适用性不足(杨庆年,2010);物理模型试验能直观呈现物理机制,但存在缩尺效应显著、成本高周期长等问题(Guo et al., 2025);数值仿真可处理复杂工况,却因简化假设存在误差累计,且大量计算时资源消耗大(Qiu et al., 2024)。后者以机器学习算法为核心,通过数据驱动预测工程响应状态,如神经网络(周小棚等,2020)、支持向量机(李尚明等,2023)等方法,可提升复杂工程安全评估准确性(Wang et al., 2025; Fan et al., 2025),但其“黑匣子”特性导致因果关系难以解释,难以揭示失效机制与工程响应的内在联系,且实际工程中高质量监测数据常存在稀缺、不完整等问题,制约了模型泛化能力(Markus et al., 2019; Xu et al., 2024)。

当前工程预警主要依据国家规范设定监测频率与阈值,以监测数据或变化速率超出预设阈值时触发报警机制。然而,现有预警模式存在较多局限:一方面,现有单一信息预警仅反映工程局部特性,常因难以定位真实风

险源，导致工程中错报、误报与漏报现象频发（王海飙等, 2010）；另一方面，静态阈值无法动态适配施工步序、地质特性及环境荷载等时变因素，难以捕捉工程失稳的渐进演化特征，致使预警滞后于实际风险发展（Tian et al., 2025）。此外，多数监测点仅记录数据变化，未与工程安全评价建立因果关系，未能充分发挥安全预警功能（杨军等, 2022）。而且，目前缺乏相应的动态预警标准和安全状态量化体系，使得工程管理人员难以依据监测信息快速、准确地判断工程预警级别与安全状态，进而影响科学决策的制定与实施。

针对上述问题，本文提出一种基于贝叶斯原理的安全状态动态预警方法，通过其数据整合与逻辑推理能力实现对工程土体参数、监测信息及安全评价的联合分析。该方法融合多点时序监测信息降低土体力学参数反演的不确定性，并基于更新后的参数实时评估工程安全状态，建立时序监测信息与安全系数的直接联系。基于此，进一步建立适用于软土地层船坞工程的预警标准，实现工程动态预警。期望本文的研究成果能为复杂地质条件下的工程安全预警与风险防控提供有益参考。

## 1 方法原理

本文基于贝叶斯原理，提出一种融合多点时序监测信息的安全状态动态预警方法。该方法主要由构建贝叶斯网络模型、量化网络先验概率分布、动态更新后验概率分布以及建立安全状态预警标准四部分构成，如图 1 所示。

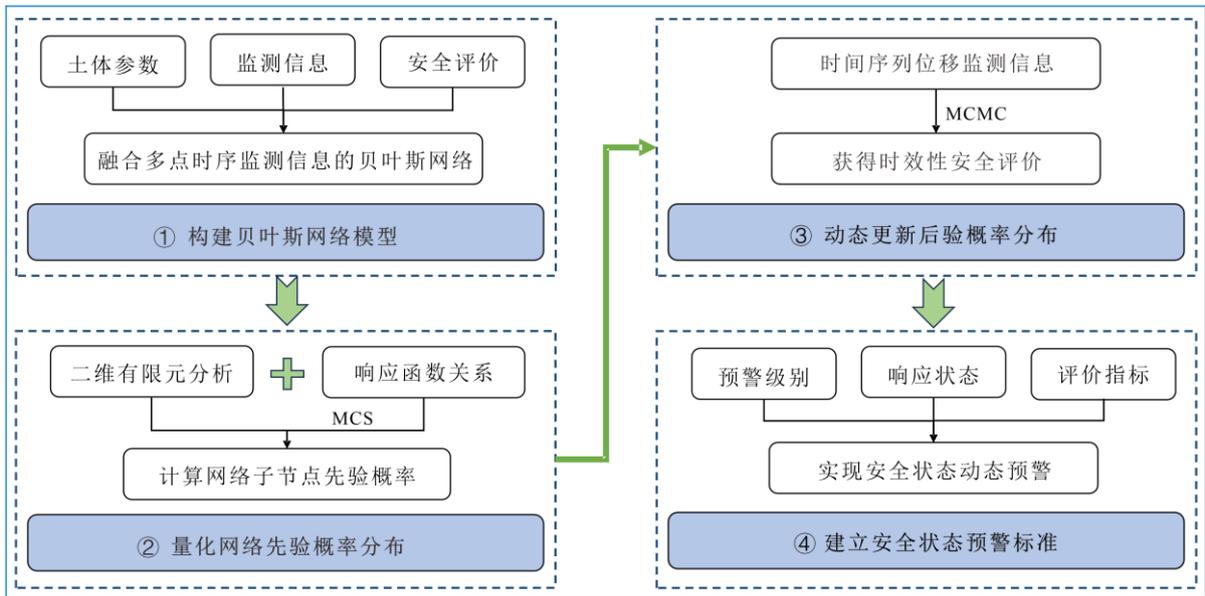


图 1 所提方法的技术路线图

Fig.1 The framework of the proposed method

### 1.1 融合多点时序监测信息构建贝叶斯网络

实际工程中单一监测点预警常因设备误差或局部扰动引发错报、误报和漏报等风险，本文基于贝叶斯网络原理融合多点时序监测信息，旨在实现空间多点信息互补，协同验证工程整体安全性，从而提高工程动态预警准确性和全面性。在贝叶斯网络中，土体力学参数作为根节点，连接监测信息与安全评价两类子节点。两类子节点虽无直接关联，但均为土体力学参数的关键性能指标。现场监测数据能直接反映工程实际状态（Liu et al., 2023; Wu et al., 2021），反之土体参数的改变也会直接影响工程的整体安全性。例如，支护结构变形增大可能是由于粘聚力  $c$  或内摩擦角  $\varphi$  减小，而折减的力学参数将导致安全系数  $F_s$  降低或失效概率  $P_f$  增大，从而触发不同等级的安全预警标准，如图 2 所示。

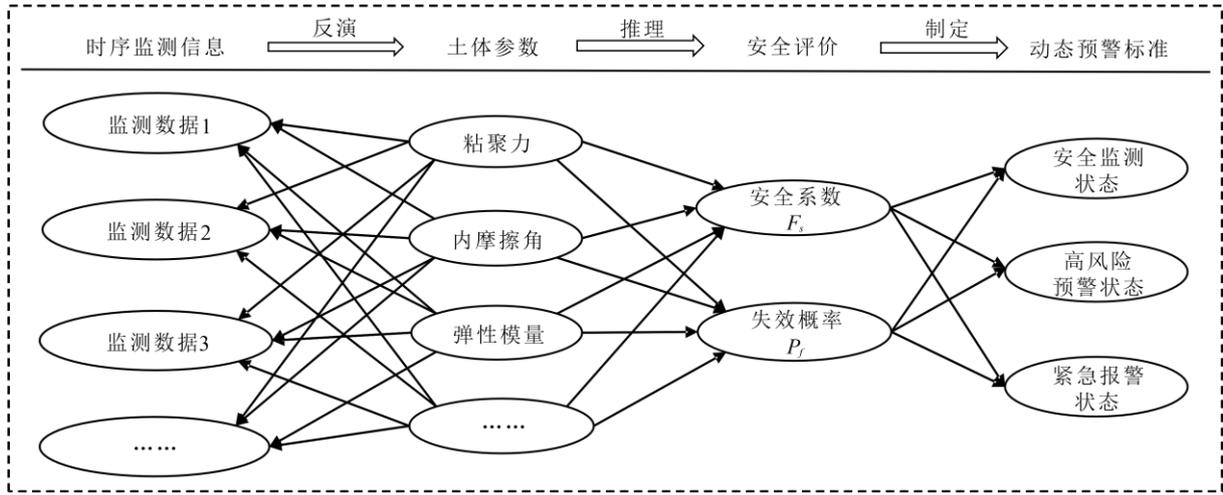


图2 融合多点时序监测信息的贝叶斯网络

Fig.2 A Bayesian network integrating multi-point time-series monitoring information

## 1.2 量化网络先验概率分布

基于图 2 中的因果网络关系，本文通过确定节点之间的响应关系来量化网络。在贝叶斯参数更新的框架下， $\theta$  代表土体参数的随机变量，其先验信息以概率分布  $f(\theta)$  表示。为确定子节点的先验概率分布，首先通过有限元分析获得网络节点或参数之间的定量关系，随后采用响应面法代替传统确定性数值模型，建立节点间的响应关系。最后，利用蒙特卡洛模拟(MCS)计算子节点的先验条件概率和船坞工程的安全系数/失效概率。

### 1.2.1 有限元分析方法

#### (1) 渗流-应力耦合原理

PLAXIS 2D 作为一款计算功能强大的有限元分析软件，提供了渗流应力耦合分析功能，该软件的渗流应力耦合分析理论是在 Biot 固结理论 (Biot and Maurice, 1941) 的基础上建立起来的，可以直接考虑骨架颗粒变形与孔隙水之间的相互作用，即“直接耦合”。渗流场与应力场的耦合计算需同时满足应力平衡方程(1)和渗流连续方程(2)。

基于有效应力原理和虚功原理，某体积域内的应力平衡方程可以表示为 (吕从聪等, 2018):

$$\iiint_V (\boldsymbol{\sigma}' - \chi u_w \mathbf{I}) : \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV = \iint_S \mathbf{T}_S \cdot \delta \mathbf{v} dS + \iiint_V \mathbf{T}_V \cdot \delta \mathbf{v} dV + \iiint_V s n \rho_w g \cdot \delta \mathbf{v} dV \quad (1)$$

式中： $\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力； $\chi$ 为饱和度  $s$  的函数，当土体完全饱和时， $\chi=1$ ；当土体非饱和时， $\chi = \chi(s)$ ，干土 $\chi=0$ ； $u_w$ 为孔隙水压； $\mathbf{I}$ 为单位矩阵； $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 为虚应变； $\delta \mathbf{v}$ 为虚位移场； $\mathbf{T}_S$ 为单位面积的表面张力， $\mathbf{T}_V$ 为单位体积的体积力（不含流体重量）， $n$ 为孔隙率， $V$ 为体积， $S$ 为面积边界， $\rho_w$ 为流体密度， $g$ 为重力加速度。

流经  $dV$  的流体应满足连续性方程，即单位时间内流入土体的流体体积等于流体体积的增加速率，其表达式为：

$$\frac{d}{dt} \left( \iiint_V \frac{\rho_w}{\rho_w^0} s n dV \right) = - \iint_S \frac{\rho_w}{\rho_w^0} s n \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_w dS \quad (2)$$

式中： $\mathbf{v}_w$ 为从边界  $S$  流入的平均速度， $\mathbf{n}$ 为边界  $S$  的外法线方向向量， $\rho_w^0$ 为流体参照密度。

在上述应力平衡方程和渗流连续方程的基础上，采用有限元离散，得到增量形式的耦合有限元方程，在满足位移边界和渗流边界的条件下，对耦合控制方程进行求解。

#### (2) 强度折减法基本原理

强度折减法是一种用来计算工程整体稳定性安全系数的方法，其基本原理是通过定义强度折减系数  $F_r$ ，将土体的粘聚力和内摩擦角逐渐进行折减，使得土体的抗剪强度逐渐降低，当基坑两侧土体处于临界破坏状态时，认

为此时折减系数  $F_r$  即为基坑整体稳定性安全系数  $F_s$ 。折减后的抗剪强度参数表达式为：

$$c_m = c / F_r \quad (3)$$

$$\varphi_m = \arctan\left(\tan \varphi / F_r\right) \quad (4)$$

式中： $c$ 、 $\varphi$ ； $c_m$ 、 $\varphi_m$  分别为折减前后土体的粘聚力与内摩擦角； $F_r$  为强度折减系数。

PLAXIS 2D 软件中在进行工程整体安全系数计算时，即采用强度折减法。此外，软件中强度折减计算与高级岩土本构模型结合使用时，由于不考虑刚度的应力相关性以及土体硬化效应，将自动同步本构模型中的土体强度参数（粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ）进行折减计算，即以标准的摩尔-库仑模型进行安全系数计算。

### (3) 土体材料本构模型

相较于传统的弹性、理想弹-塑性等本构模型，小应变土体硬化模型（HS-Small model）具有能考虑软黏土应变硬化、其刚度依赖于应力历史和应力路径等特点，更适用于模拟复杂环境软土深基坑开挖。HS-Small 模型是由 Benz（2006）在 HS 模型的基础上结合修正的 Hardin-Drnevich 剪切模量关系式（Hardin and Drnevich, 1972）建立的，土体硬化本构模型应力应变曲线如图 3(a)所示，图中  $q_f$  为摩尔-库仑剪切强度，主应力空间屈服面如图 3(b)所示。

偏应力与主应变之间的关系式由公式(5)表示：

$$-\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{q_a - q} \quad (5)$$

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left( \frac{\sigma_3' + c \cot \varphi_p}{p^{\text{ref}} + c \cot \varphi_p} \right)^m \quad (6)$$

式中： $q_a$  为渐进偏应力； $E_{50}$  为 50%极限荷载所对应的割线模量； $q$  为偏应力自变量； $p^{\text{ref}}$  为参考围压，取 100kPa； $\sigma_3'$  为三轴试验中有效围压； $E_{50}^{\text{ref}}$  为参考围压下 50%极限荷载所对应的割线模量； $m$  为与刚度应力水平相关的幂指数； $c$  为粘聚力； $\varphi_p$  为内摩擦角。

切线刚度模量和卸载再加载模量分别如公式(7)和(8)所示：

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left( \frac{\sigma_3' + c \cot \varphi_p}{p^{\text{ref}} + c \cot \varphi_p} \right)^m \quad (7)$$

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left( \frac{\sigma_3' + c \cot \varphi_p}{p^{\text{ref}} + c \cot \varphi_p} \right)^m \quad (8)$$

式中： $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  为参考围压下土体切线模量； $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为参考围压下土体卸载再加载模量。

HSS 模型的盖帽屈服面表达式为：

$$f^c = \frac{\bar{q}^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \quad (9)$$

式中： $p$  为平均应力； $\alpha$  为盖帽屈服面在  $p$ 、 $q$  轴截距的比值； $p_p$  为初始固结压力； $\bar{q}$  为偏应力。

HSS 模型共有 13 个参数，其中包括 11 个 HS 硬化模型参数和 2 个新增的用于描述小应变刚度行为的参数（王卫东等, 2023）：初始剪切模量  $G_0$  和阈值剪应变  $\gamma_{0.7}$ 。小应变区域内剪切刚度与应变之间的双曲线关系，如公式(10)所示：

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 0.385 \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|} \quad (10)$$

式中： $G_0$ 为初始剪切模量； $\gamma_{0.7}$ 为阈值剪应变，即剪切模量  $G$  降低至初始剪切模量  $0.7G_0$ 时所对应的剪应变，Benz（2006）建议取  $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$ 。

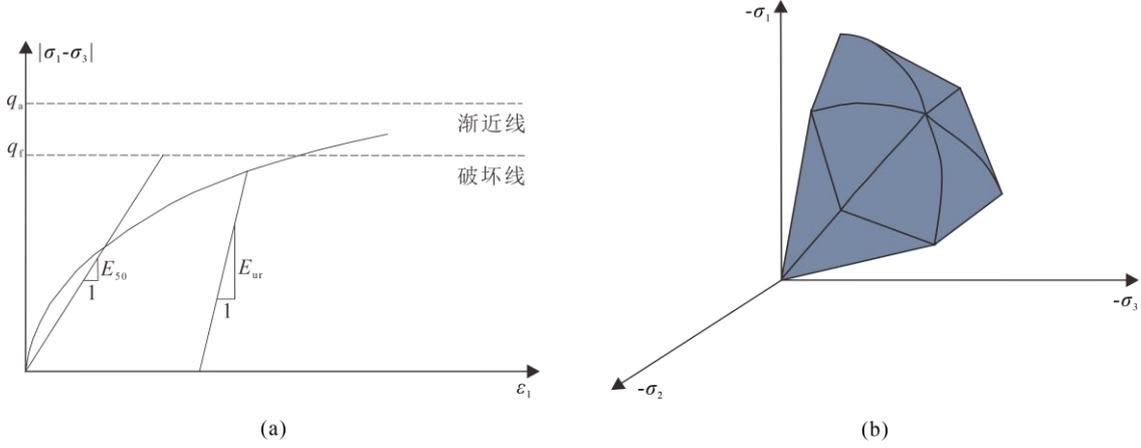


图3 土体硬化本构模型(姜焱培和周晓敏, 2021): (a)标准排水三轴试验主加载下双曲线应力-应变关系; (b)主应力空间屈服面  
Fig.3 Soil hardening constitutive model(Jang and Zhou, 2021): (a) Hyperbolic stress-strain relation in principal loading for a standard drainage triaxial test; (b) Principal stress space yield surface

### 1.2.2 响应函数关系建立

响应面法通过构建随机变量  $\theta$ （输入参数）与岩土体响应（包括极限状态函数及监测点响应）之间的隐式函数关系，以简洁数学表达式替代复杂数值模型计算。本文通过贝叶斯网络模型建立节点或变量之间的三次响应面函数，如下式：

$$G(X) = \sum_{i=1}^n a_{3i} x_i^3 + \sum_{i=1}^n b_{2i} x_i^2 + \sum_{i=1}^n c_{2i} x_i + d_0 + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad (12)$$

式中： $X = X_1, X_2, \dots, X_n$ 为土体力学参数组成的随机变量； $n$ 为随机变量的个数； $a_{3i}, b_{2i}, c_{1i}, d_0$ 为响应面系数； $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为计算响应值与实测真实值之间的误差，为确保计算结果的准确和可靠性，本文考虑两种误差：一是数值模拟过程中产生的模型误差  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ ，二是建立响应面方程时产生的响应面误差  $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 。响应面系数可以通过基于数值模拟的最小二乘法获得。

根据船坞工程的破坏模式，坞室两侧土体沿潜在滑移面发生整体失稳破坏的极限状态函数表示如下：

$$g(X) = F_s(X) - 1.0 \quad (13)$$

式中： $F_s(X)$ 为工程安全系数； $F_s = 1.0$ 为判断工程是否稳定的安全系数限值，当  $F_s < 1.0$ ，表明工程不稳定。

### 1.2.3 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法（MCS）因适应性广、精度高，被广泛应用于系统可靠度分析中。采用式(13)作为极限状态函数的代理模型，利用蒙特卡罗模拟很容易计算得到船坞工程的失效概率  $P_f$ ：

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(X)] \quad (14)$$

$$I[g(X)] = \begin{cases} 1, & g(X) \leq 0 \\ 0, & g(X) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中， $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为蒙特卡洛模拟随机抽样产生的样本， $N$  为样本总量。由失效概率可计算出船坞工程的可靠度指标  $\beta$ ：

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (16)$$

式中： $\Phi^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布函数的反函数，通过可靠概率  $(1 - P_f)$  计算可靠度指标  $\beta$ 。

通过确定性计算结果确定响应面函数后，在不输入任何监测信息的情况下，应用 MCS 来计算节点或参数的先验概率分布。

### 1.3 动态更新后验概率分布

在获得节点或变量的先验概率分布后，可以利用时间序列的多点监测数据计算它们的后验分布 (Mahadevan et al., 2001)。定义  $t_1 \sim t_N$  时刻，工程响应的监测值为  $m(t) = \{m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t)\}$ ，下标  $n$  为贝叶斯更新中使用的观测点数目；相应的理论计算值为  $M(\theta, t) = \{M_1(\theta, t), M_2(\theta, t), \dots, M_n(\theta, t)\}$ ；各点的理论值与实测值的残差向量为  $\varepsilon(t) = \{\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_n(t)\}$ ，其中  $\varepsilon_i(t) = m_i(t) - M_i(\theta, t)$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ， $t=1, 2, \dots, N$ 。假设残差向量  $\varepsilon$  服从正态分布  $N(\mu_\varepsilon(t), \sigma_\varepsilon(t))$  (Peng et al, 2014)， $\theta$  为待反演参数的随机向量，则似然函数为 (仇文岗等, 2022; 林东等, 2024)：

$$L(\theta | m(t)) = \prod_{t=1}^N \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varepsilon(t)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{m_i(t) - M_i(\theta, t) - \mu_\varepsilon(t)}{\sigma_\varepsilon(t)} \right)^2 \right] \quad (17)$$

根据贝叶斯定理，由式(17)和随机变量先验分布  $f(\theta)$  可以得到  $\theta$  的后验概率密度函数如下：

$$f(\theta | m(t)) = kf(\theta)L(\theta | m(t)) \quad (18)$$

$$k = \left[ \int f(\theta) f(m(t) | \theta) d\theta \right]^{-1} \quad (19)$$

式中： $k$  为归一化系数。

在实现随机变量  $\theta$  的后验概率分布动态更新后，据此可进一步动态预测工程安全系数  $F_s$ ，从而实现时效性安全评价，其中失效概率和可靠度指标根据 1.2.3 节介绍方法获得。安全系数  $F_s$  的后验分布、均值和方差计算如下式(20)-(22)所示：

$$f(F_s | m(t)) = \int f(F_s | \theta) f(\theta | m(t)) d\theta \quad (20)$$

$$\mu(F_s) = \int F_s f(F_s | m(t)) dF_s \quad (21)$$

$$V(F_s) = \int F_s^2 f(F_s | m(t)) dF_s - \mu(F_s)^2 \quad (22)$$

式中： $f(F_s | \theta)$  为  $F_s$  关于反演参数  $\theta$  的概率分布。

由于式(17)涉及高维积分难以直接求解，因此本文采用马尔科夫链-蒙特卡罗模拟 (MCMC) 来解决这一问题。Metropolis 算法 (Metropolis et al., 1953) 是生成马尔可夫链运用最广泛的方法之一，其计算过程如下：

(1) 初始化：选择一个初始状态  $\theta_0$  为当前马尔科夫链样本，满足  $f(\theta_0) > 0$ ，并设定总迭代次数为  $N$ 。

(2) 迭代生成样本：对于  $i=1, 2, \dots, N$ ，执行以下操作：

(a) 生产候选样本：从建议分布中抽取候选样本  $\theta^* \sim q(\theta^* | \theta_{i-1})$ 。理论上，建议分布可以是任意分布，但为简化计算，建议分布通常选择对称分布 (如高斯分布或均匀分布)，即  $q(\theta^* | \theta_{i-1}) = q(\theta_{i-1} | \theta^*)$ 。

(b) 计算接受率：式中  $f(\theta | m(t))$  可由式(17)表示。

$$r = \frac{f(\theta^* | m(t))}{f(\theta_{i-1} | m(t))} = \frac{kf(\theta^*)L(\theta^* | m(t))}{kf(\theta_{i-1})L(\theta_{i-1} | m(t))} = \frac{f(\theta^*)L(\theta^* | m(t))}{f(\theta_{i-1})L(\theta_{i-1} | m(t))} \quad (23)$$

(c) 接受或拒绝候选样本: 从区间[0,1]的均匀分布中抽样出一个随机数  $u$ , 将随机数  $u$  与接受率  $r$  进行比较, 若  $r \geq u$  则马尔科夫链转移到下一个状态; 否则马尔科夫链继续保留当前状态。如下所示:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \theta^*, \quad \text{当 } u \leq r \\ \theta_i &= \theta_{i-1}, \quad \text{当 } u > r \end{aligned} \quad (24)$$

重复(a)~(c), 直至  $i=N$ 。

本文 MCMC 收敛性检验采用 Gelman 等 (1992) 提出的收敛准则。当基于链内方差  $W$  和链间方差  $B$  算得的  $R_{sat} \leq 1.2$  (见式 (25)), 即可判定马氏链收敛。

$$R_{sat} = \sqrt{\frac{N-1}{N} + \frac{M+1}{MN} \frac{B}{W}} \quad (25)$$

式中:  $N$  为每条马氏链的迭代次数;  $M$  为马氏链的数目 (通常, 取 3)。

#### 1.4 建立安全状态预警标准

根据 1.3 节和公式(17)~(22)中利用监测数据动态更新工程安全状态的模型, 本文构建了适用于软土地层船坞工程的安全状态预警标准 (如图 4 所示), 该标准包含 5 个预警等级和 3 个响应状态, 并以安全系数  $F_s$ 、失效概率  $P_f$  和可靠度指标  $\beta$  作为预警判据。通过将安全评价映射到多点位移监测空间, 实现了监测信息与工程安全状态的直接关联, 使利用监测信息直接评估工程安全状态成为高效可行的方法。

在预警等级划分过程中, 本文结合相关规范和研究 (Zheng et al., 2025), 将预警等级划分为五级: 安全级 I (绿色)、注意级 II (蓝色)、警示级 III (黄色)、警戒级 IV (橙色)、警报级 V (红色)。这五个等级分别对应土体变形失效过程的五个典型阶段, 反映了监测点位移信息与安全状态的对应关系。进一步, 将预警等级 I~V 级归并为三类响应状态: ① “安全监测状态” (I~II 级): 安全级 I 和注意级 II, 对应工程可控的小变形, 变形量处于设计允许范围, 不影响船坞整体稳定性, 暂无需采取行动; ② “高风险预警状态” (III~IV 级): 警示级 III 和警戒级 IV, 其中警示级 III 对应变形初次加速阶段, 表明支护结构变形超出设计预期, 预示局部异常风险, 应重点关注高风险区域; 警戒级 IV 对应变形二次加速阶段, 标志结构临近极限状态即将发展为系统性失效, 应采用回填反压、坑内堆载等紧急措施; ③ “紧急报警状态” (V 级): 警报级 V, 对应变形持续加速, 表明支护体系即将失稳, 船坞工程安全性面临重大威胁, 应启动应急预案, 进行抢险救援。

各预警等级的限值依据安全系数准则与失效概率准则 (可靠度指标) 综合确定 (Li et al., 2016)。在安全系数方面, 以工程整体稳定性为核心控制目标, 依据《干船坞设计规范》(CB/T 8524-2011) 和《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012), 一级基坑安全系数要求  $F_s \geq 1.3$ , 二级  $F_s \geq 1.2$ , 三级  $F_s \geq 1.1$ , 考虑软土地区土体强度衰减特性, 安全系数在上限基础上提高 0.1~0.2 (覃子玲等, 2022), 故确定安全级 I 下限值为  $F_s=1.50$ ; 综合《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)、《上海市基坑工程技术规范》(DG/TJ 08-61-2010) 和《软土地区工程地质勘察规范》(JGJ 83-1991) 等规范, 划定注意级 II 阈值为  $F_s=1.35\sim 1.50$  (其中  $F_s=1.35$  为安全监测状态触发临界值), 警示级 III 阈值为  $F_s=1.20\sim 1.35$ ; 参照 (GB 50330-2013) 中边坡稳定临界值  $F_s=1.05$ , 确定其为警戒级 IV 下限值, 同时作为警报级 V 上限值和紧急报警状态触发临界值。

在失效概率方面, 基于可靠度理论及参数变异性分析, 以承载能力极限状态为控制基准, 遵循《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153-2008) 与《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50199-2013)。综合考虑延性破坏和脆性破坏, 取脆性破坏结构目标可靠度指标  $\beta=4.2$  (对应失效概率  $P_f=0.001\%$ ) 作为安全级 I 下限值, 延性破坏结构目标可靠度指标  $\beta=3.2$  (对应失效概率  $P_f=0.07\%$ ) 作为注意级 II 下限值及安全监测状态触发临界值。结合工程实例及失效模式分析 (吴贤国等, 2022), 当支撑体系出现显著位移时失效概率达 1%~10%, 整体坍塌事

故中失效概率通常超过 10%，故划定警示级Ⅲ下限值为  $\beta=2.2$ （对应失效概率  $P_f=1\%$ ），警戒级Ⅳ下限值为  $\beta=1.2$ （对应失效概率  $P_f=10\%$ ），后者同时作为警报级Ⅴ上限值及紧急报警状态触发临界值。

预警等级判定遵循“不利判别”原则，即综合两类判据结果，取其中风险等级较高者作为最终判定结论。五级预警体系的划分兼顾了规范要求与软土工程特性，为船坞工程安全状态的准确评估与分级管控提供了重要支撑，有助于提前部署各阶段针对性防控措施。

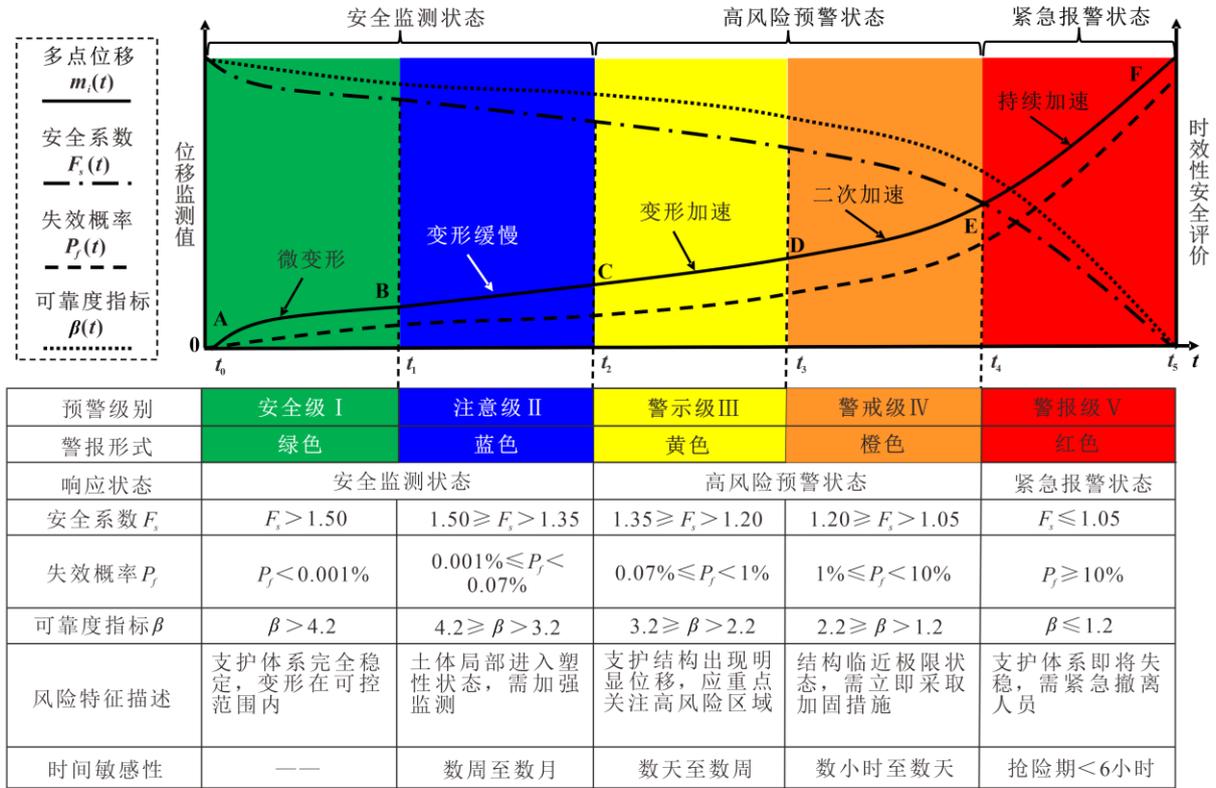


图 4 船坞工程安全状态预警标准

Fig.4 Standard for safety status warning of the dock engineering

注：1.上述各预警等级的限值以软土地区 I 级船坞工程进行设定，在推广应用中，应结合具体工程安全等级、地质条件和施工要求等，重新设定合理的临界参数。

2.图中位移监测曲线遵循典型滑坡蠕变发展五阶段（Zheng et al., 2025），此处仅用于展示监测点位移和安全评价间的对应关系，具体变形趋势和各预警级别对应的变形范围、持续时间应根据实际情况确定。

### 1.5 动态预警方法流程

为了便于船坞安全状态的动态预警和方法复用，将上述所涉及的预警方法实现流程与框架抽象总结如图 5 所示。整体预警模型由四个主要步骤组成：

- (1) 建立贝叶斯网络模型：确定影响随机变量  $\theta$ ，构建“监测信息-土体参数-安全评价”的因果关系；
- (2) 计算先验概率分布：基于贝叶斯网络，运用数值模拟和响应面法建立响应函数，并运用 MCS 获得监测信息  $M$  和安全系数  $F_s$  的先验条件概率分布；
- (3) 获得时效性安全评价：运用 MCMC 实现多点时序监测信息动态反演分析，得到随机变量  $\theta$  的后验概率分布  $P(\theta|m)$ ，进而推导出安全系数的后验概率分布  $P(F_s|m)$  和对应失效概率，实现时效性安全评价，将监测信息与安全评价建立联系。
- (4) 实现动态预警：基于步骤（3）的时效性安全评价和相关规范研究，建立包含 5 个预警级别、3 种响应状态的安全状态预警标准，实现工程动态预警。

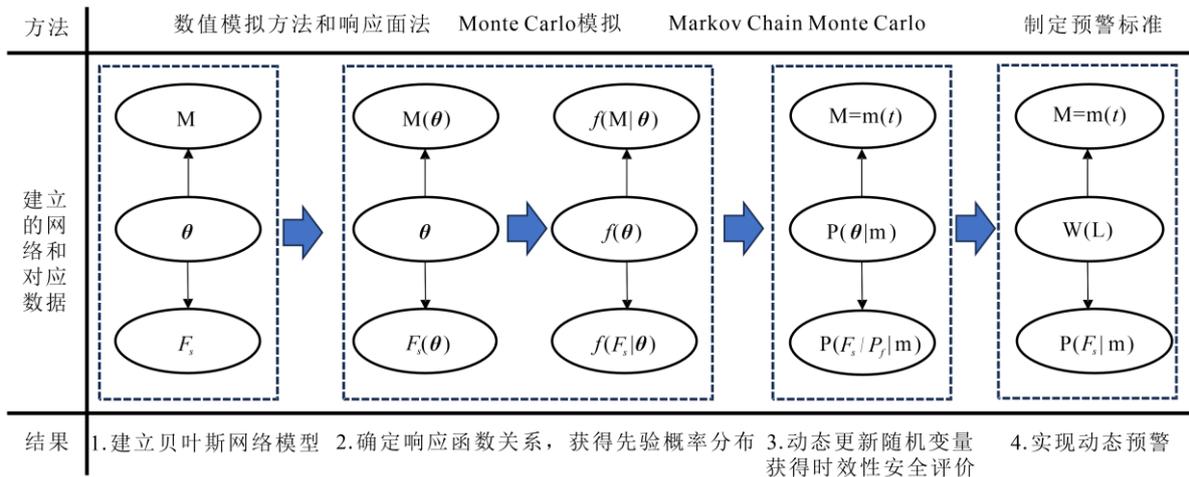


图5 融合多点时序监测信息的安全状态动态预警流程图

Fig.5 Procedure for dynamic safety status early warning integrating multi-point time-series monitoring information

注:  $M$ =监测信息;  $\theta$ =随机变量(土体参数);  $F_s$ =安全系数;  $m(t)$ =时序监测信息;  $M(\theta)=M$ 关于 $\theta$ 的响应函数;  $F_s(\theta)=F_s$ 关于 $\theta$ 的响应函数;  $f(\theta)=\theta$ 的先验概率;  $f(M|\theta)=M$ 的先验条件概率;  $f(F_s|\theta)=F_s$ 的先验条件概率;  $P(\theta|m)$ =在 $m(t)$ 的条件下 $\theta$ 的后验概率;  $P(F_s/P_j|m)$ =在 $m(t)$ 的条件下 $F_s$ 或 $P_j$ 的后验概率;  $W(L)$ =基于预警标准进行安全状态动态预警(预警级别 Level: 安全级I, 注意级II, 警示级III, 警戒级IV, 警报级V)。

## 2 工程算例应用

### 2.1 工程概况

本文以上海某造船基地二期船坞工程为研究对象,其典型断面如图6所示。该船坞坞室宽度92m,开挖深度10.5m,坞室钢筋混凝土底板厚约1~1.2m,坞室桩基为 $\Phi 600$ PHC管桩,坞墙廊道下方为热轧型组合钢板桩,长27m,坞墙锚碇系统由组合钢板桩、钢拉杆( $\Phi 90@1400$ mm)、块石棱体、锚碇板桩(长12m,450mm $\times$ 500mm)构成,坞墙廊道桩基及坞墙与锚碇体之间的吊车道桩基均为 $\Phi 600$ 或 $\Phi 800$ PHC管桩。地质土层参数见表1,施工进度见表2。

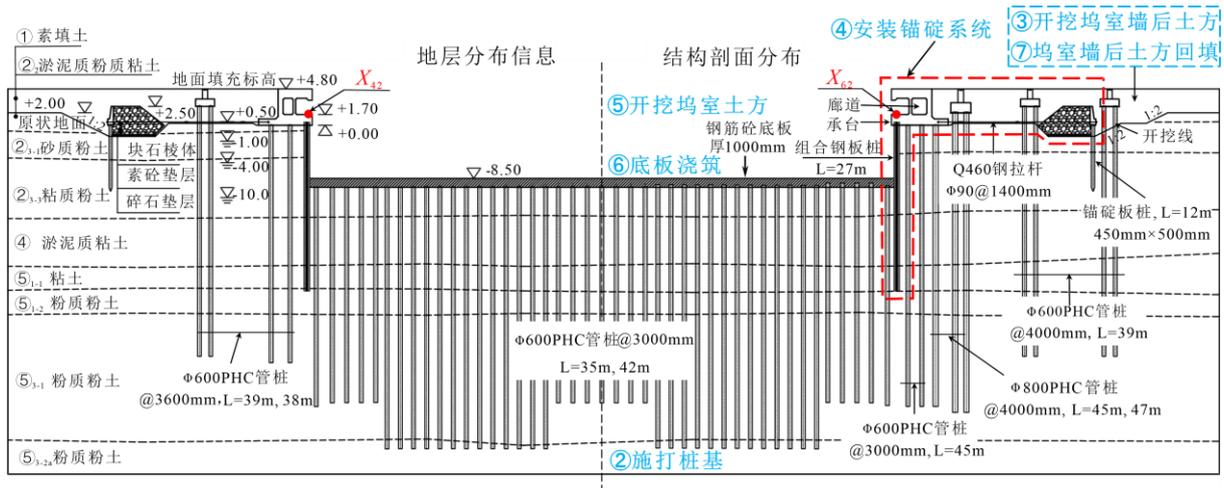


图6 船坞典型断面示意图(单位:m)

Fig.6 The typical section of the dock engineering (unit: m)

表1 土层力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of soil layers

土层	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	平均厚度 (m)	粘聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\varphi$ ( $^{\circ}$ )	压缩模量 $E_{s1-2}$ (MPa)	渗透系数 $K$ (m/s)
①杂填土	18.5	3.0	10.0	10.0	5.0	$5.00 \times 10^{-6}$
② <sub>2</sub> 淤泥质粉质粘土	18.0	2.0	13.0	20.5	5.3	$2.00 \times 10^{-7}$
② <sub>3-1</sub> 砂质粉土	18.7	4.5	8.0	27.0	9.2	$2.80 \times 10^{-5}$
② <sub>3-3</sub> 粘质粉土	18.0	10.0	10.0	23.5	7.6	$1.15 \times 10^{-5}$
④淤泥质粘土	16.9	7.0	12.0	11.0	2.4	$3.51 \times 10^{-8}$
⑤ <sub>1-1</sub> 粘土	17.3	4.0	14.0	13.0	2.7	$2.80 \times 10^{-8}$
⑤ <sub>1-2</sub> 粉质粘土	17.8	4.0	16.0	16.0	3.4	$4.42 \times 10^{-8}$
⑤ <sub>3-1</sub> 粉质粘土	18.2	20.0	20.0	20.5	4.5	$5.91 \times 10^{-7}$
⑤ <sub>3-2a</sub> 粉质粘土	18.2	5.0	21.0	22.5	5.0	$5.91 \times 10^{-7}$

考虑到船坞工程施工周期长，部分应力传感器因施工振动损坏，孔隙水压力计因泥沙淤积数据漂移，致使数据完整率和可靠性不足；而位移监测点采用预埋法，受扰动较小，数据连续完整，且坞壁水平位移是反映坞室开挖阶段整体稳定性的关键指标。因此，本文选取坞室两侧承台顶部 2 个典型位移监测点 ( $X_{42}$  和  $X_{62}$ ) 进行研究，监测点位置见图 6。

图 7(a)展示了监测点的水平位移时变曲线：2022 年 10 月，典型断面附近开始施工，并对坞室两侧变形进行监测，锚碇系统安装阶段，位移波动较小；2022 年 11 月至 2023 年 2 月为坞室开挖期间，位移呈线性增长趋势；同年 2 月至 4 月为底板浇筑阶段，位移小幅增长，总体趋于稳定；底板混凝土养护 1 个月后，5 月至 6 月实施回填土作业，因钢板桩后侧土压力累积，位移呈现阶梯式微增；此后坞室两侧施工完毕，变形渐趋平稳。下文将以该时序监测数据进行参数反演，实时评估船坞整体稳定性，实现安全动态预警，验证所提预警方法的工程适用性。

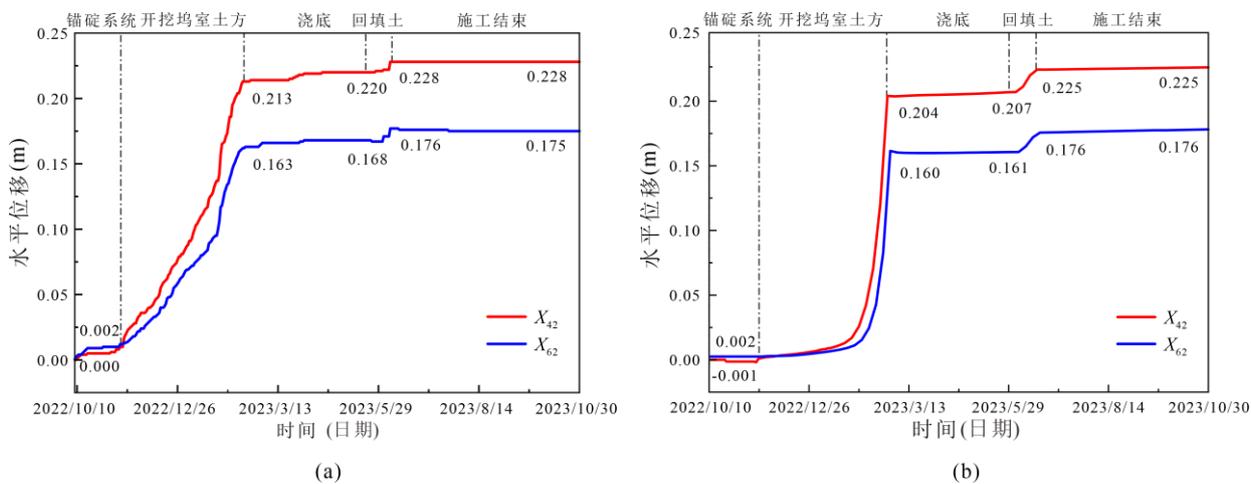


图 7  $X_{42}$  和  $X_{62}$  监测点水平位移时变曲线：(a)实际监测；(b)数值模拟

Fig.7 Horizontal displacement time-varying curves of  $X_{42}$  and  $X_{62}$ : (a) Measured monitoring; (b) Numerical simulation

## 2.2 数值模型建立

通过有限元软件 PLAXIS 2D 模拟坞室开挖期流固耦合作用下坞室两侧的变形情况，为后续建立响应面方程提供物理力学原理基础。选取 1m 厚的典型断面，数值模型几何尺寸为 252.0m $\times$ 1.0m $\times$ 68.5m。对坞室核心区进行网格优化处理，粗糙因数为 0.7071，其余非核心区粗糙因数为 1.0，总计生成 4118 个单元，37307 个节点，网格划分如图 8 所示。

模型位移边界条件设定为：底部固定约束和两侧法向约束。为了模拟施工阶段的渗流过程，计算类型采用“流固耦合”分析，初始水位为-1.0m；开挖实施后，坞室外水位降至-4.0m，坞室内水位控制为-10.0m，模型底部及侧面设定为不透水边界。根据实际施工过程，选取 8 个典型的施工步进行计算，坞室两侧施工荷载取 20kPa，计

算步骤和地下水位变化见表 2。

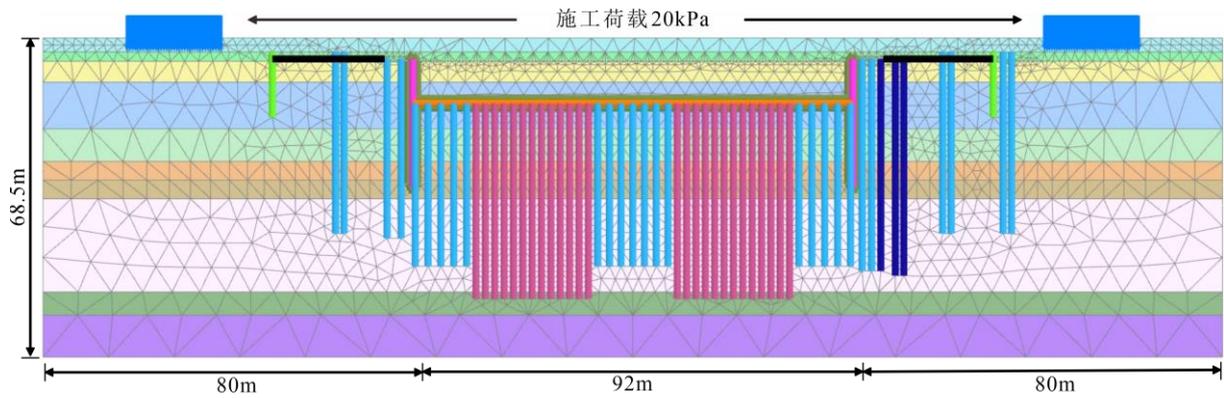


图 8 船坞工程二维有限元数值模型

Fig.8 2D finite element model for the dock engineering

土体的本构模型采用小应变土体硬化模型（HS-Small）。各土层主要参数取值参考王卫东等（2023）提出的上海软土 HS-Small 模型参数经验系数法，具体如表 3 所示。船坞廊道、承台和块石棱体采用线弹性本构模型。钢拉杆采用点对点锚杆模拟，PHC 管桩与锚碇板桩采用 Embedded 桩模拟，坞室底板和热轧型组合钢板桩采用板单元模拟，各结构截面尺寸遵循等效刚度原则，相关结构参数见表 4。

表 2 船坞施工步骤与地下水位变化表

Tab.2 Construction steps of the dock and changes in groundwater level

施工步骤	时间	工况	地下水位(m)	
			坞室外	坞室内
1	—	初始应力场建立	-1.0	-1.0
2	—	施打桩基（位移清零）	-1.0	-1.0
3	—	开挖坞室墙后土方	-4.0	-4.0
4	2022.10—2022.11	安装锚碇系统	-4.0	-4.0
5	2022.11—2023.02	开挖坞室土方	-4.0	-10.0
6	2023.02—2023.04	坞室内底板施工	-4.0	-10.0
7	2023.05—2023.06	坞室墙后土方回填	-1.0	-9.5
8	2023.06—2023.10	施工结束	-1.0	-9.5

表 3 船坞各土层 HS-Small 模型主要参数取值表

Tab.3 Parameters of HS-Small model for each soil layer in the dock

土层号	$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	$E_{50}^{ref}$ (MPa)	$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	$G_0^{ref}$ (MPa)	$p^{ref}$ (kPa)	$\psi$ (°)	$\gamma_{0.7}$ ( $\times 10^{-4}$ )	$\nu_{ur}$	$m$	$R_f$
①	5.0	5.0	15.0	60.0	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
② <sub>2</sub>	4.8	5.7	28.5	85.5	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
② <sub>3-1</sub>	8.2	9.9	49.5	148.0	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
② <sub>3-3</sub>	6.8	8.2	40.8	122.0	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
④	2.1	2.6	17.1	51.2	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
⑤ <sub>1-1</sub>	2.5	3.0	14.7	44.2	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
⑤ <sub>1-2</sub>	3.1	3.7	18.3	54.9	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
⑤ <sub>3-1</sub>	4.0	4.8	24.1	72.3	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9
⑤ <sub>3-2a</sub>	4.5	5.4	26.8	80.4	100	0.0	2.0	0.2	0.8	0.9

表 4 船坞结构参数表

Tab.4 Parameters of the dock structures

结构	单元	材料类型	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (MPa)	泊松比	截面积 (m <sup>2</sup> /m)	惯性矩 (m <sup>4</sup> /m)
PHC 管桩	Embedded 桩	弹性	20.0	3.80×10 <sup>4</sup>	0.2	0.17( φ600)	0.0053( φ600)
						0.24( φ800)	0.015( φ800)
混凝土底板	板	弹性	25.0	2.55×10 <sup>4</sup>	0.2	1.00	0.083
混凝土廊道	土体	线弹性	25.0	3.15×10 <sup>4</sup>	0.2	—	—
块石棱体	土体	线弹性	25.0	5.00×10 <sup>2</sup>	0.2	—	—
拉杆	锚杆	弹性	—	2.05×10 <sup>5</sup>	0.2	0.0064	—
锚碇板桩	Embedded 桩	弹性	20.0	2.05×10 <sup>5</sup>	0.2	0.25	0.0052
热轧箱型组合钢板桩	板	弹性	20.0	2.05×10 <sup>5</sup>	0.2	0.35	0.0035

注：“( )” 内为不同直径类型的 PHC 管桩。

### 2.3 构建贝叶斯网络

基于力学原理分析船坞变形主要控制因素及其相互因果关系，建立“监测信息-土体参数-安全评价”贝叶斯网络模型，如图 9 所示。随机变量选取典型力学参数粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和弹性模量  $E$ ，其参数的改变会引起中间节点监测信息 ( $X_{42}$ 、 $X_{62}$ ) 与安全系数 ( $F_s$ ) 的改变。同时，监测信息的变化反过来也会导致随机变量发生改变，进一步影响船坞工程安全系数 ( $F_s$ )，从而实现船坞工程安全状态动态更新的目标，其中  $W(L)$  为基于预警标准进行安全状态动态预警（预警级别 Level: 安全级 I，注意级 II，警示级 III，警戒级 IV，警报级 V）。

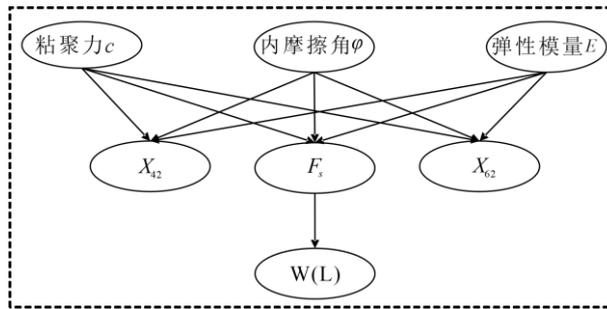


图 9 “监测信息-土体参数-安全评价” 贝叶斯网络

Fig.9 A Bayesian network of “monitoring information- soil parameters- safety factor”

由于土层众多，选取组合钢板桩影响范围内的五层土体开展敏感性分析（详见下文 3.1.3 节），结果表明土层 ②<sub>3.3</sub> 的力学参数对坞室两侧变形的敏感性和影响权重显著高于其他土层。因此，本文以该关键土层的力学参数为代表建立响应函数关系（Li et al., 2016; 张湾等, 2016）。对应随机变量参数分布类型根据《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》（GB50199-2013）第 6.1.2 条，采用对数正态分布，变异系数  $cov$  取值参考文献（Phoon and Kulhawy, 1999; Peng et al, 2014; 骆飞等, 2015），具体如表 5 所示。

表 5 随机变量及其分布特征

Tab.5 Random variables and their distribution characteristics

随机变量	分布类型	以② <sub>3.3</sub> 土层为代表		
		均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	变异系数 $cov$
$c$ (kPa)	对数正态分布	10.0	2.00	0.2
$\varphi$ (°)	对数正态分布	23.5	2.35	0.1
$E$ (MPa)	对数正态分布	7.56	0.756	0.1

### 3 结果分析

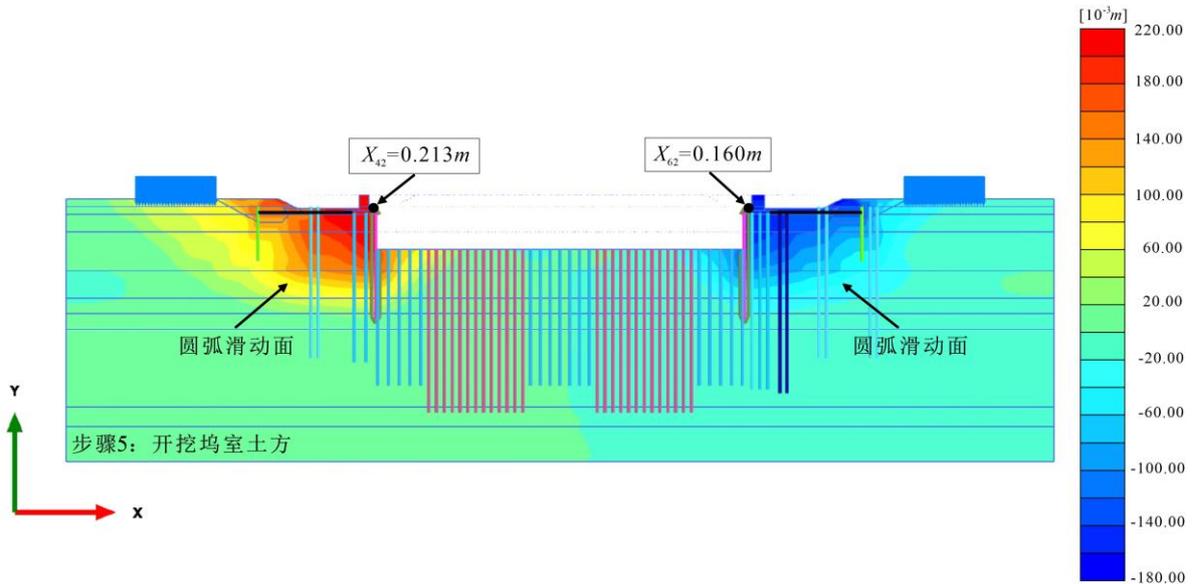
#### 3.1 确定性计算结果

##### 3.1.1 船坞整体安全性评估

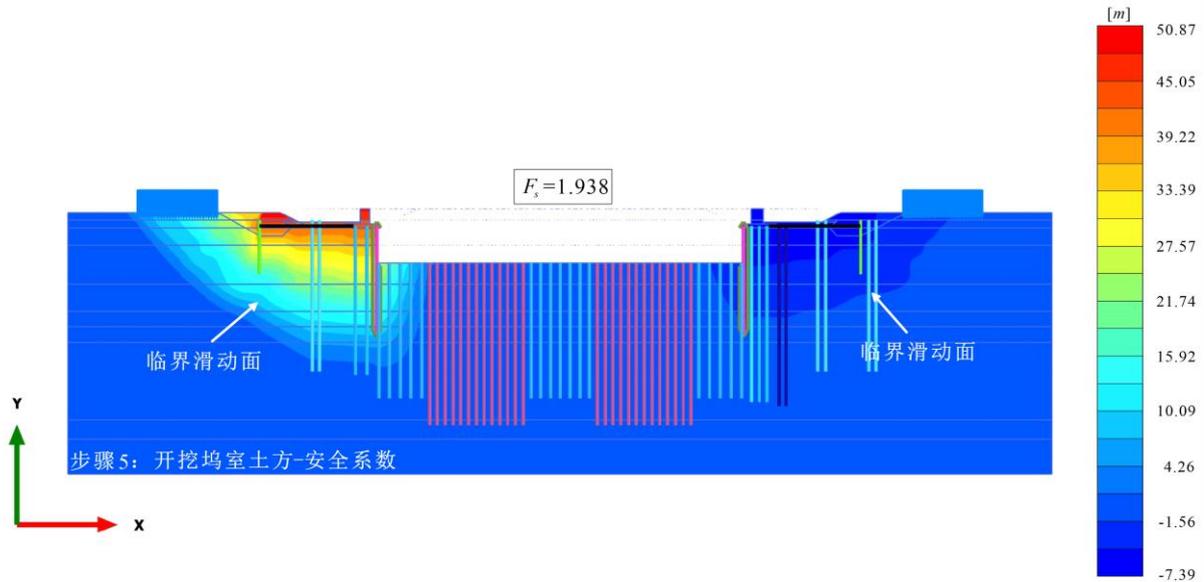
由于所涉工况较多，本节选取施工步骤5“开挖坞室土方”这一最危险工况，重点分析坞室两侧的水平变形情况。该工况下锚碇系统混凝土强度已达标，地下水位也已降至设计水位。

由图 10(a)水平位移云图可见，坞室开挖后两侧水平位移显著增大，组合钢板桩后方呈现圆弧滑动面，塑性变形区以廊道顶部为扇心呈扇形分布，变形随距扇心距离增加呈梯度衰减。在坞室开挖和施工荷载的双重作用下，被动土压力减小而主动土压力增大，最大水平位移出现在承台顶部：左侧承台为 0.204m，右侧承台为 0.160m。右侧变形量较小，是由于其承台下与块石棱体前后布置的 PHC 管桩数量多于左侧，因此锚碇系统对变形的约束效应更强。此外，块石棱体前缘土体受锚拉作用及施工荷载影响产生应力集中，其水平位移量较周边土体偏高，符合实际。

由图 10(b)安全系数水平位移云图可见，船坞整体稳定性安全系数  $F_s=1.938$ ，远大于预警标准 1.50。强度折减法计算下，坞室两侧可以看到清晰的临界滑动面，左侧由于支护结构相对较少，滑动风险更大。但船坞总体呈现较强韧性，在变形较大的情况下，仍能保持整体稳定性。



(a)



(b)

图 10 船坞工程二维有限元数值模型：(a)水平位移云图；(b)安全系数水平位移云图(强度折减计算)

Fig.10 2D finite element model for the dock engineering: (a) Horizontal displacement cloud map; (b) Horizontal displacement cloud map of safety factor (strength reduction)

### 3.1.2 监测结果对比验证

图 7 展示了流固耦合作用下承台顶部水平位移在不同工况下的时变曲线，图 7(a)为实际监测数据，图 7(b)为数值模拟结果。可以看到，数值模拟结果与现场监测数据的整体变形趋势一致，且在各关键节点的吻合度较高。表 6 给出了关键工况下承台顶部监测点  $X_{42}$  和  $X_{62}$  水平位移实际监测值与模拟值的对比结果，相对误差均小于 5%。这表明所构建的数值模型、参数选择和计算方法均合理，能够较准确反映坞室支挡结构的水平变形规律，适用于后续响应面的构建。

表 6 各关键步骤水平位移模拟值与实测值对比

Tab.6 Comparison of simulated and measured horizontal displacement values for each key step

施工步骤	工况	$X_{42}(m)$		$X_{62}(m)$	
		实际监测	数值模拟	实际监测	数值模拟
4	安装锚定系统	0.000	-0.001	0.002	0.003
5	开挖坞室土方	0.213	0.204	0.163	0.160
6	坞室内底板施工	0.220	0.207	0.168	0.161
7	坞室墙后土方回填	0.228	0.225	0.176	0.176

### 3.1.3 监测信息对各土层力学参数的敏感性分析

监测信息的敏感性分析可作为船坞参数反演的基础。由于承台顶部水平位移最大，本节以监测点  $X_{42}$  和  $X_{62}$  的水平位移信息为依据，针对粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和弹性模量  $E$  三类随机变量，以及组合钢板桩影响深度范围内的五层土体开展敏感性分析。

图 11 的确定性计算结果表明：同一土层条件下，该土层随机变量参数增大时，两侧承台顶部水平位移均呈下降趋势。其中，内摩擦角  $\varphi$  对水平位移的影响最为显著，粘聚力  $c$  次之，弹性模量  $E$  的影响相对较弱，随机变量敏感性排序为： $\varphi > c > E$ 。进一步分析发现，相同随机变量变化下，土层②<sub>3-3</sub>的水平位移响应幅度显著高于其他土层。这主要归因于该土层紧邻组合钢板桩、厚度较大且处于开挖核心区域，故敏感性最大；土层④位于钢板桩中下部，敏感性次之；而位于表层且厚度较薄的土层①、②<sub>2</sub> 和②<sub>3-1</sub>，其敏感性相对较低。土层敏感性排序为：

②<sub>3-3</sub> > ④ > ① ≈ ②<sub>2</sub> ≈ ②<sub>3-1</sub>。

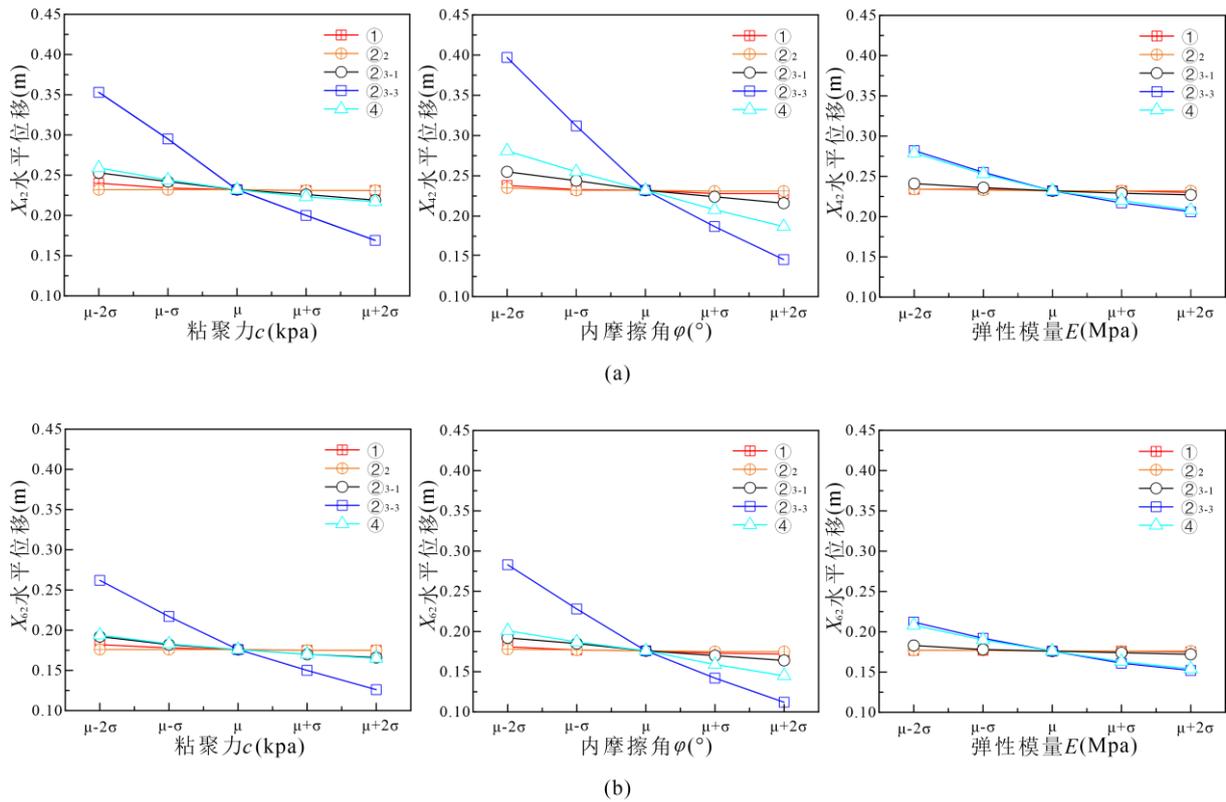


图 11 监测信息对各土层随机变量的敏感性分析: (a)  $X_{42}$  水平位移; (b)  $X_{62}$  水平位移

Fig.11 Sensitivity of monitoring information to random variables in soil layers: (a)  $X_{42}$  horizontal displacement; (b)  $X_{62}$  horizontal displacement

基于各土层参数敏感性分析结果,进一步计算各土层参数的影响权重(影响权重=敏感性系数 $\times$ 参数变异系数),量化各土层参数对最大水平位移(监测点  $X_{42}$ )的权重占比,结果见表 7。数据显示,②<sub>3-3</sub>土层的权重占比达 63.1%,其影响权重中,粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、弹性模量  $E$  分别贡献 33.5%、22.7%、6.9%;④土层的权重占比为 22.5%,其影响权重中,粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、弹性模量  $E$  分别贡献 7.6%、8.5%、6.3%,各参数贡献占比均低于②<sub>3-3</sub>土层;其他土层权重占比合计为 14.4%。上述结果表明,②<sub>3-3</sub>土层是控制工程变形与安全状态的关键土层,其余土层的耦合效应较弱。

表 7 各土层参数对  $X_{42}$  水平位移的影响权重

Tab.7 The influence weight of soil layer parameters on  $X_{42}$  horizontal displacement

土层	参数	敏感性系数	变异系数 $cov$	影响权重	权重占比
② <sub>3-3</sub>	$c$	-0.00463	0.2	0.00926	33.5%
	$\varphi$	-0.0627	0.1	0.00627	22.7%
	$E$	-0.0190	0.1	0.00190	6.9%
④	$c$	-0.0105	0.2	0.00210	7.6%
	$\varphi$	-0.0235	0.1	0.00235	8.5%
	$E$	-0.0175	0.1	0.00175	6.3%
①+② <sub>2</sub> +② <sub>3-1</sub>	---	---	---	0.00398	14.4%
总计	---	---	---	0.02761	100%

### 3.2 贝叶斯网络先验概率分布

贝叶斯网络的量化首先是要确定各节点的先验概率分布,其中根节点的概率分布详见表 5,节点  $X_{42}$ 、 $F_s$  和

$X_{62}$  的条件概率分布则需通过数值模拟构建响应面方程，结合蒙特卡洛(MCS)模拟法进行计算求解。根据式(11)，构建与粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、弹性模量  $E$  相关的三次响应面函数，如下式 (26)：

$$G(c, \varphi, E) = \sum_{i=1}^n a_{3i} x_i^3 + \sum_{i=1}^n b_{2i} x_i^2 + \sum_{i=1}^n c_{2i} x_i + d_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (26)$$

式中： $n=3$  表示有 3 个随机变量； $x_1, x_2, x_3$  分别代表  $c, \varphi, E$ 。

总共考虑了参数  $\mu, \mu \pm 0.5\sigma, \mu \pm \sigma, \mu \pm 1.5\sigma, \mu \pm 2\sigma$  ( $\mu$  和  $\sigma$  分别为  $c, \varphi, E$  的均值和标准差) 的 25 种组合工况，计算  $X_{42}, F_s$  和  $X_{62}$  的响应函数。然后，通过最小二乘法求解出三次响应面函数中各随机变量的系数，具体结果见表 8。

表 8 响应面系数  
Tab.8 Coefficients for response surfaces

响应面系数	$X_{42}$	$X_{62}$	$F_s$
$a_{31}$	-0.00043	-0.00020	0.00041
$a_{32}$	-0.00052	-0.00013	5.18884E-06
$a_{33}$	-0.00313	-0.00079	7.71831E-17
$b_{21}$	0.01785	0.00865	-0.01179
$b_{22}$	0.04342	0.01239	5.74394E-05
$b_{23}$	0.08244	0.02415	0.00067
$c_{11}$	-0.25921	-0.13859	0.14841
$c_{12}$	-1.21821	-0.40367	0.06252
$c_{13}$	-0.76328	-0.27298	-0.01012
$d_0$	15.30828	6.20944	-0.31132
$\sigma_{\varepsilon_2}$	0.02361	0.01401	0.02739
$R^2$	0.97140	0.97880	0.98710

为了验证响应面函数的准确性，从随机变量  $\theta$  空间中随机抽取 15 个样本点，分别用数值模拟和三次响应面函数计算对应点的  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  位移值及安全系数  $F_s$ ，如图 12 所示。对比结果显示，多项式响应面和数值模拟结果基本上位于  $45^\circ$  线( $y=x$ )附近，两种方法计算值呈现良好一致性，但仍存在差异。为此，引入响应面误差  $\varepsilon_2$  量化响应面法与数值模拟间的偏差，其均值与标准差经统计分析确定如表 8 中所示。同时，基于 Peng 等 (2014) 的研究成果，本研究对模型误差分布作出如下假定：安全系数  $F_s$  的模型误差  $\varepsilon_1$  服从偏正态分布  $N(-0.025, 0.054)$ ，监测点  $X_{42}$  和  $X_{62}$  的模型误差  $\varepsilon_1$  服从正态分布  $N(0, 0.25\mu)$ ，其中  $\mu$  为对应变量的估计均值。

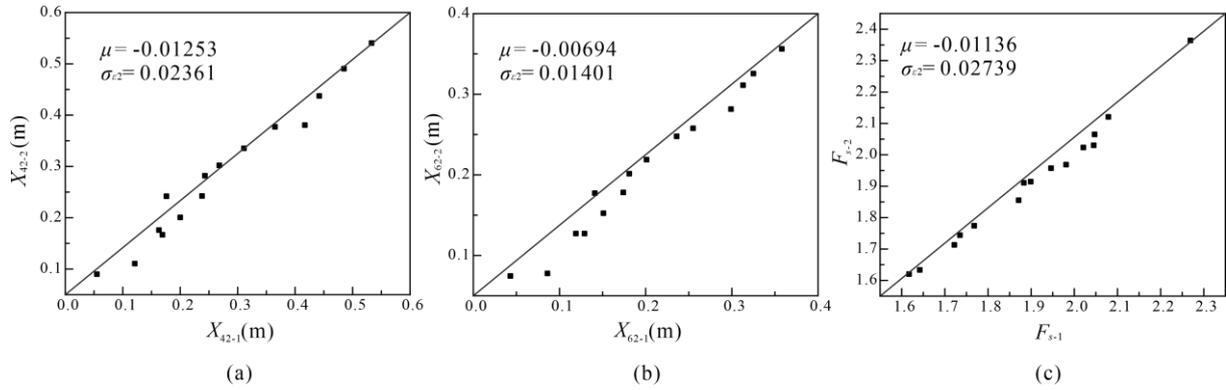


图 12 响应面法与数值模拟结果对比: (a)  $X_{42}$ ; (b)  $X_{62}$ ; (c)  $F_s$

(注: 响应面结果:  $X_{42-1}$ 、 $X_{62-1}$  和  $F_{s-1}$ ; 数值模拟结果:  $X_{42-2}$ 、 $X_{62-2}$  和  $F_{s-2}$ )

Fig.12 Comparison of response function and finite element method results: (a)  $X_{42}$ ; (b)  $X_{62}$ ; (c)  $F_s$

(Note: Response function results:  $X_{42-1}$ ,  $X_{62-1}$  and  $F_{s-1}$ ; Finite element results:  $X_{42-2}$ ,  $X_{62-2}$  and  $F_{s-2}$ )

结合方程(26)进行 10 万次的蒙特卡洛模拟, 得到关于  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  和  $F_s$  的先验分布, 如图 13 所示。在未引入监测信息的情况下,  $X_{42}$  的先验均值和标准差分别为 0.258m 和 0.164,  $X_{62}$  对应值为 0.188m 和 0.112,  $F_s$  的均值和标准差则为 1.909 和 0.205。对比发现, 先验位移结果略高于实际变形值, 先验  $F_s$  较数值模拟结果 1.938 稍低, 但仍显著大于安全阈值 1.50, 表明船坞工程处于整体安全状态。此外,  $F_s$  可依据  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  的实时监测数据进行动态更新, 具体内容将在后续章节详述。

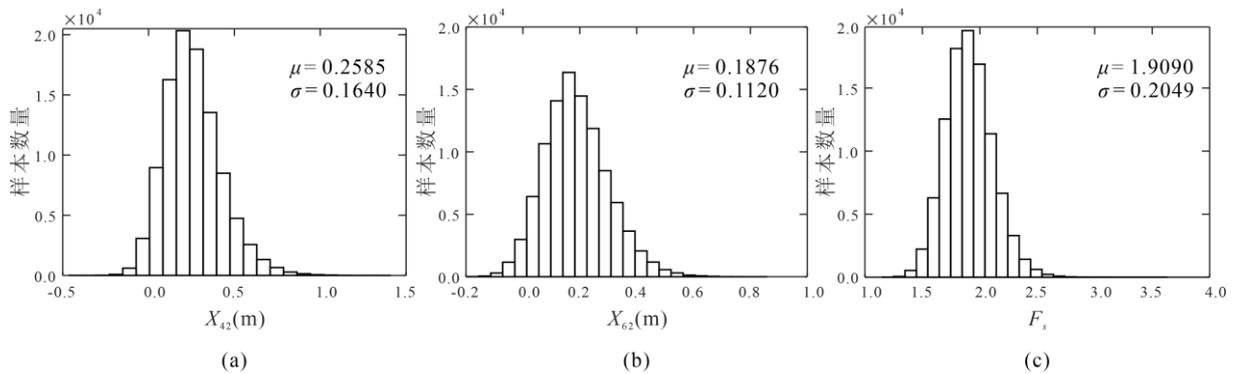


图 13 先验概率分布: (a)  $X_{42}$ ; (b)  $X_{62}$ ; (c)  $F_s$

Fig.13 Prior distributions of: (a)  $X_{42}$ ; (b)  $X_{62}$ ; (c)  $F_s$

### 3.3 基于监测信息的时效性安全评价

基于时序位移监测信息, 本文采用 Metropolis 算法开展 100000 次 MCMC 模拟 (Peng et al., 2014), 实现土体参数动态更新。以典型断面施工结束后 (2023 年 10 月 30 日) 的监测数据 ( $X_{42}=0.228\text{m}$ ,  $X_{62}=0.176\text{m}$ ) 为输入, 设定 3 条马氏链开展土体参数随机反演, 并根据式 (25) 计算各参数的  $R_{\text{sat}}$ 。结果显示, 粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和弹性模量  $E$  的  $R_{\text{sat}}$  统计结果分别为 1.037、1.002、1.014, 3 个参数的  $R_{\text{sat}}$  均  $\leq 1.2$ , 满足 Gelman-Rubin 的收敛标准, 且各参数的样本迭代迹图围绕均值随机震荡、平稳波动 (见图 14 (a)、(c)、(e)), 进一步说明 MCMC 模拟达到收敛状态。

由此计算各土体参数的后验均值与标准差, 后验分布直方图如图 14 (b)、(d)、(f) 所示:  $c$  的均值为 9.967kPa、标准差为 1.719,  $\varphi$  的均值为 23.897°、标准差为 1.638,  $E$  的均值为 7.549MPa、标准差为 0.712。对比土体参数的先验与后验分布 (见表 9) 可知, 引入监测数据后各参数的变异系数降低约 14%~30%, 显著减小了土体参数的不确定性, 为后续船坞工程安全系数与失效概率计算提供了更可靠的参数支撑。

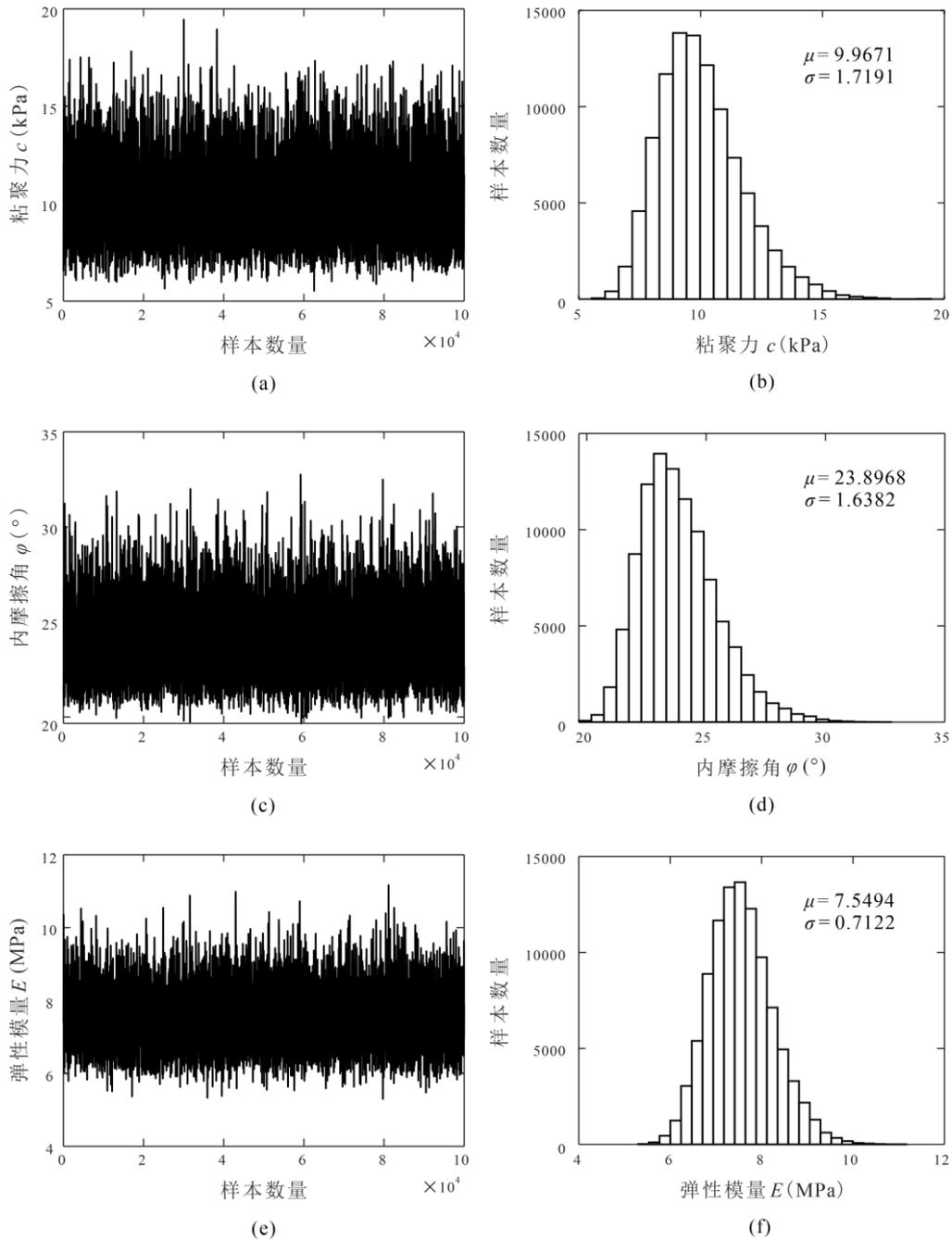


图 14 MCMC 样本迭代迹图：(a)  $c$ , (c)  $\varphi$ , (e)  $E$ ；对应直方图：(b)  $c$ , (d)  $\varphi$ , (f)  $E$

Fig.14 Trace plot of MCMC samples iteration: (a)  $c$ , (c)  $\varphi$  and (e)  $E$ ; and the corresponding histograms (b)  $c$ , (d)  $\varphi$  and (f)  $E$

表 9 随机变量先验分布与后验分布比较

Tab.9 Comparison of prior and posterior distributions of random variables

随机变量	$\mu$		$\sigma$		cov	
	先验分布	后验分布	先验分布	后验分布	先验分布	后验分布
$c(\text{kPa})$	10	9.967	2	1.719	0.2	0.172
$\varphi(^{\circ})$	23.5	23.897	2.35	1.638	0.1	0.068
$E(\text{MPa})$	7.56	7.549	0.756	0.712	0.1	0.094

根据方程式(20)，将动态更新后的  $c, \varphi$  和  $E$  代入计算，获取典型断面在坞室开挖至施工结束期间的“安全系数-水平位移”时变曲线（图 15 (a)）。分析显示，安全系数  $F_s$  随水平位移增大呈规律性递减，与工程实际相符。经 MCMC 动态更新后， $F_s$  的后验均值稳定于 1.945，整个施工期  $F_s > 1.50$ ， $P_f < 0.001\%$  ( $\beta > 4.2$ )，处于安全状态。该结果表明，基于监测数据的动态更新可有效反映安全系数随工程变形的动态演变规律，相较于传统数值模拟方法，该方法实现了船坞工程安全状态的快速评估，显著提升了工程安全评价的效率。

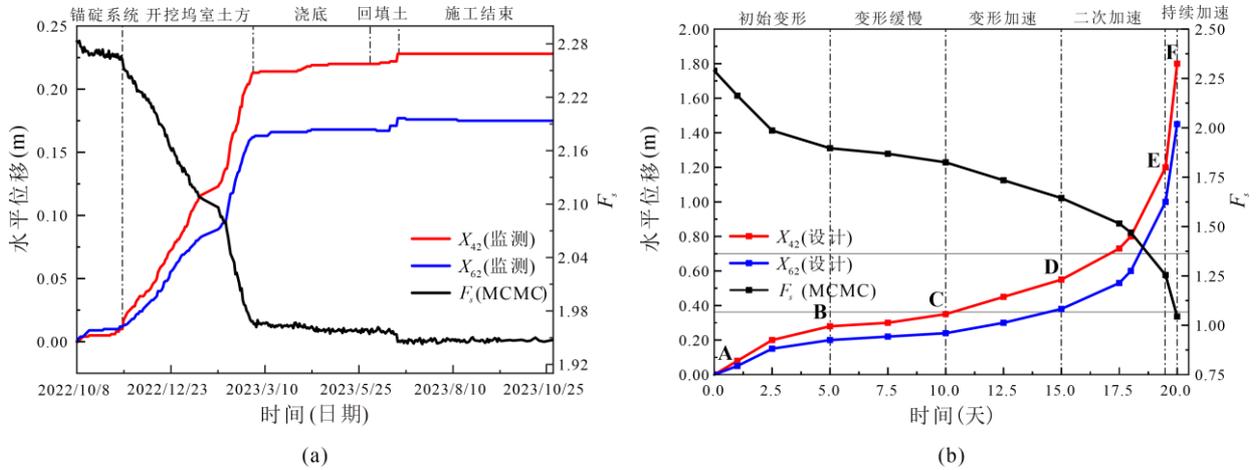


图 15 “安全系数-水平位移”时变曲线：(a)实际船坞工程；(b)设计极端工况

Fig.15 Time-varying curves of “safety factor - horizontal displacement”: (a)Actual dock conditions; (b)Design extreme conditions

### 3.4 船坞工程安全状态动态预警

基于实时监测数据及所构建的动态预警标准，以监测点  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  的位移数据为横、纵坐标，绘制二维安全状态动态预警平面图（见图 16）。结果显示，依据安全系数与失效概率双准则判定，船坞工程在施工期内均处于安全级 I 的安全监测状态（绿色区域），表明工程整体处于安全可控范围。建议在该阶段维持常规监测与设备维护，无需采取干预措施。

鉴于船坞工程设计安全等级较高，仅依托该实际工程案例，难以有效验证本文所提预警标准在高风险和紧急预警状态下的适用性。为此，本文设计极端工况，模拟支护结构发生超大变形失稳破坏的场景（例如，船坞遭受严重风暴潮等自然灾害致土体参数强度衰减）。其中，监测点  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  的变形发展趋势参考 1.4 节图 4 所示的变形破坏发展五阶段（Zheng et al., 2025），具体工况设计详见表 10。相关计算方法与前述船坞工程一致，所得“安全系数-水平位移”时变曲线如图 15(b)所示，同时，将变形五阶段中监测点  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  的位移数据绘制于二维安全状态动态预警平面图（图中 A、B、C、D、E、F 为  $(X_{42}, X_{62})$  在各阶段的坐标点，对应图 15(b)变形五阶段划分）。

表 10 船坞超大变形极端工况设计与安全评价

Tab.10 Design and safety evaluation of extreme working conditions for super large deformation of dock

时间（天）	变形发展		抗剪强度衰减			安全评价		
	$X_{42}(m)$	$X_{62}(m)$	$c(kPa)$	$\varphi(^{\circ})$	$E(MPa)$	$F_s$	$P_f$	$\beta$
0	0.00	0.00	12.3	26.7	8.22	2.29	0	---
1	0.08	0.05	11.5	25.8	7.96	2.16	0	---
2.5	0.20	0.15	10.2	24.3	7.59	1.99	0	---
5	0.28	0.20	9.72	23.3	7.48	1.90	0	---
7.5	0.30	0.22	9.59	23.1	7.43	1.87	0	---
10	0.35	0.24	9.40	22.6	7.39	1.82	0	---
12.5	0.45	0.30	9.07	21.5	7.33	1.73	0	---

15	0.55	0.38	8.75	20.5	7.24	1.64	0	—
17.5	0.73	0.53	8.15	19.0	7.10	1.52	$6.0 \times 10^{-5}$	3.85
18	0.80	0.60	7.87	18.5	7.01	1.47	$2.3 \times 10^{-4}$	3.50
19.5	1.20	1.00	6.13	16.6	6.42	1.25	$3.6 \times 10^{-2}$	1.80
20	1.80	1.45	4.81	14.6	5.93	1.04	$5.0 \times 10^{-1}$	$2.5 \times 10^{-5}$

结合图 15(b)和图 16 分析可知,安全系数  $F_s$  随水平位移增大呈规律性递减:当变形发展至“二次加速”阶段后期,坞室两侧支护结构临近极限状态(点 E:  $F_s=1.25 < 1.35$ , 失效概率  $P_f=3.6\%$ , 可靠度指标  $\beta=1.8$ ),触发“高风险预警”;随后,在无紧急加固措施的情况下,变形在不到 1 天内持续加速,并快速触发“紧急预警”(点 F:  $F_s=1.04 < 1.05$ ,  $P_f=49.8\%$ ,  $\beta=2.5 \times 10^{-5}$ ),表明支护体系濒临失稳,需立即组织施工人员紧急撤离。模拟结果显示,各变形阶段下监测点 ( $X_{42}, X_{42}$ ) 的位移坐标均落在对应预警区域内,表明本文预警标准在危险状态下具备较高的触发准确性与响应时效性。

此外,由图 16 可进一步看出,船坞安全状态与监测点 ( $X_{42}, X_{42}$ ) 的变形呈显著负相关,变形越大,工程安全风险越高,直观展现了融合多点时序监测信息建立的预警标准通过多点互补,协同分析,有效规避单一信息报警的局限(错报,误报及漏报等风险),显著提升船坞工程安全评估和预警的准确性与全面性。

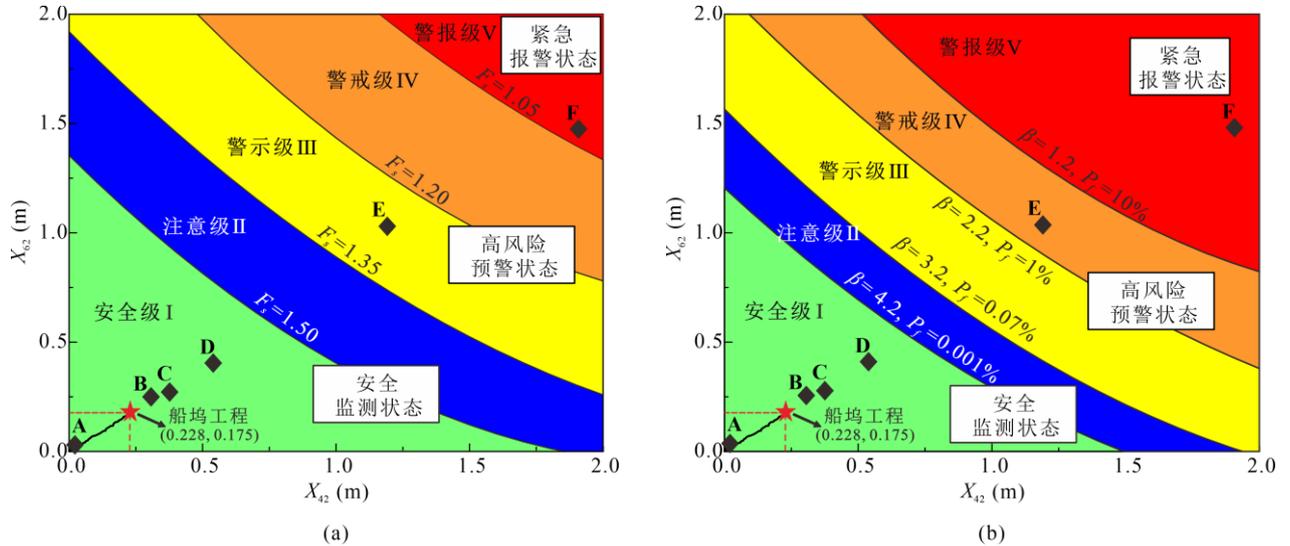


图 16 二维安全状态动态预警平面图: (a)安全系数  $F_s$  预警; (b)失效概率  $P_f$  (可靠度指标  $\beta$ ) 预警

Fig.16 2D dynamic early warning plan of safety status: (a) Safety factor warning ( $F_s$ ); (b) Failure probability  $P_f$  (Reliability index  $\beta$ ) warning  
注: 上述二维预警平面图是由 2 点位移监测信息和预警标准组成,在推广应用,根据工程需求可以选取更多监测点,绘制 2-3 维甚至更高维的动态预警空间。

## 4 讨论

### 4.1 不同开挖方式计算结果对比

实际船坞工程中,坞室开挖多采用“盆式开挖”法,而本文通过“一步开挖”对实际开挖过程进行简化模拟。该简化处理是否会对后续关键计算结果产生显著影响,需通过补充分析予以明确。为此,本节通过开展“一步开挖”与“盆式开挖”的对比计算量化误差影响,进而论证数值模拟中“一步开挖”简化的合理性。

图 17 展示了“盆式开挖”数值模拟的关键步骤及水平位移计算结果云图,表 11 对比了最危险工况下两种开挖方式的模拟结果误差。由图表分析可知,“一步开挖”与“盆式开挖”的水平位移误差为 2.5%~3.7%,安全系

数误差为 4.4%，两类误差均小于 5%，表明“一步开挖”简化对关键计算结果的影响较小。

前文图 7 中  $X_{42}$ 、 $X_{62}$  监测点水平位移时变曲线显示，“开挖坞室土方”阶段的实际变形与模拟变形存在增长趋势差异：数值模拟呈现“前期变形速率小、后期快速增大”的特征，而实际监测中水平位移保持线性增长。这一差异在于开挖方式的作用机制不同：实际工程采用“盆式开挖”时，由中间向两侧分步开挖的施工顺序，使土体应力释放过程较平缓，进而促使水平位移呈现线性变化；数值模拟采用的“一步开挖”，土体荷载与应力状态呈集中式变化，导致开挖后期变形速率显著增大。但总体来看，各关键节点位移十分接近。

结合前文误差分析结果可知，两种开挖方式的关键结果（水平位移、安全系数）误差均控制在 5% 以内；且在计算效率方面，构建响应面需完成 25 组工况计算，数值模拟中单子步流固耦合计算耗时约 1.5h，若采用“盆式开挖”（需划分 3 个施工子步），总计算耗时约 112.5h，而“一步开挖”总耗时仅需约 37.5h，计算效率显著提升。因此，本文综合考虑误差控制与计算效率，选择“一步开挖”简化方案构建响应函数关系。

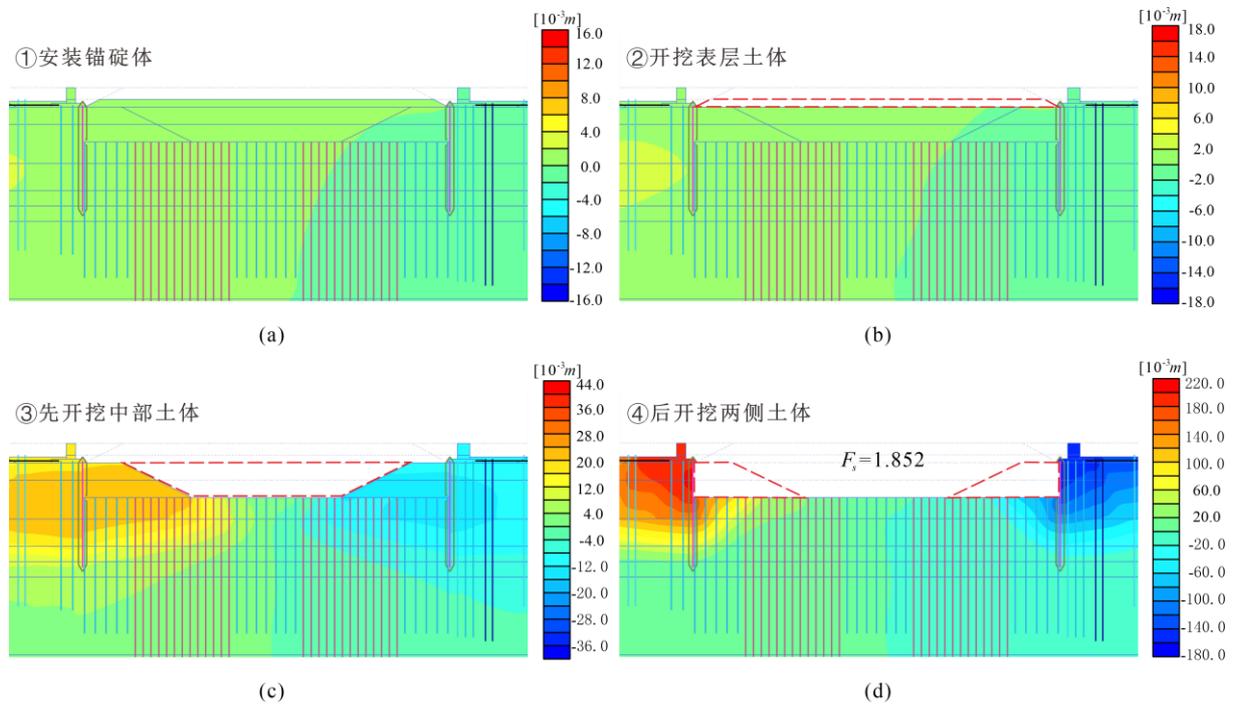


图 17 “盆式开挖”关键步骤水平位移云图：(a)安装锚碇体；(b)开挖表层土体；(c)先开挖中部土体；(d)后开挖两侧土体

Fig.17 Horizontal displacement cloud map of key steps in "basin excavation": (a) Install the anchorage system; (b) Excavate the surface soil; (c) Excavate the middle soil first; (d) Excavate the soil on both sides afterwards

表 11 “一步开挖”与“盆式开挖”模拟结果误差对比

Tab.11 Comparison of simulated results errors between "one-step excavation" and "basin excavation"

工况	监测点/指标	数值模拟		误差	
		一步开挖	盆式开挖	绝对误差	相对误差
最危险工况(m)	$X_{42}$ 水平位移	0.204	0.199	0.005	2.5%
(坞室土体完全开挖， 此时主动土压力最大)	$X_{62}$ 水平位移	0.160	0.154	0.006	3.7%
	安全系数 $F_s$	1.938	1.852	0.086	4.4%

## 4.2 研究不足与展望

相比现有研究,本文提出的动态预警方法呈现出以下特点:其一,在处理土体参数不确定性问题时,通过构建融合多点时序监测信息的贝叶斯网络,有效降低了土体参数的不确定性。在计算过程中,综合考虑模型误差和响应面误差,提升计算结果的准确性。其二,安全评价方面,基于 MCMC 模拟将时序监测信息纳入贝叶斯更新框架,实现了参数的动态更新,进而对船坞工程进行时效性安全评价,实现监测信息与工程安全状态的直接关联。其三,在安全状态预警标准方面,利用监测数据驱动的工程安全状态模型,建立适用于软土地层船坞工程的安全状态预警标准,通过将安全评价映射至多维位移监测空间,实现高效全面动态预警。

然而,目前的方法存在一些局限性,需要在未来的研究中加以改进:首先,受限于现场工程条件,当前仅采用位移监测信息反演单一土层的力学参数,未能充分反映监测类型的多样性和多土层的力学特性;其次,当前计算假设土体均质化,未考虑土体参数的空间变异性,这对预警准确性产生了一定影响;此外,所建动态预警标准侧重于安全状态判定,尚未纳入结构功能性破坏预警指标。

后续研究还需从以下三方面展开优化:一是融合多类型监测信息(包括应力、孔隙水压力等),实现“多土层-多参数”的联合反演,进一步提升复杂地层下参数反演的全面性;二是引入随机场理论进行精细化建模,充分考虑土体参数的空间变异性;三是构建“工程安全-结构功能”双控预警指标体系,提升复杂地层条件下工程预警系统的完备性。

## 5 结论

本文提出一种融合多点时序监测信息的船坞工程动态预警方法,通过有限元分析与响应面法构建土体参数与监测信息的响应关系,利用蒙特卡洛模拟(MCS)量化贝叶斯网络节点先验分布,结合时序监测数据通过马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)模拟实现参数动态更新,并建立适用于软土地层的动态预警标准,以上海某船坞工程和极端工况模拟验证方法可行性。主要结论如下:

(1)基于贝叶斯网络原理融合多点时序监测信息进行参数反演。更新后的土体参数变异系数降低 14%~30%,有效降低了土体参数的不确定性,提高了参数反演精度,为后续安全评估的可靠性和准确性提供保障。

(2)利用时序监测信息更新的土体参数实现工程安全状态的时效性评价。安全系数时变曲线随变形呈规律性递减,后验均值稳定于  $F_s=1.945$ ,表明船坞工程处于安全状态,实现了监测信息与安全状态的直接关联。

(3)针对软土地层船坞工程建立的动态预警标准,包含 5 个预警级别和 3 种响应状态。工程实例表明,船坞施工期内  $F_s>1.50$ ,  $P_f<0.001\%$ ,处于 I 级安全状态,整体安全可控;并通过设计极端工况模拟验证了预警标准在危险状态下触发预警的可行性,展现出多点信息融合对单一数据误报的规避能力,弥补了现有安全评价在预警层面的不足。

## References

- Benz, T., 2006. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. *Stuttgart: University of Stuttgart*, Ph.d thesis.
- Biot, Maurice, A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 12(2):155-164. doi: 10.1063/1.1712886.
- Fan, H., Li, L., Zhou, S., et al., 2025. Prediction and risk assessment of lateral collapse in deep foundation pits using machine learning[J]. *Automation in Construction*, 171106011-106011. doi: 10.1016/j.autcon.2025.106011.
- Feng, S., Liu, Y.C., 2022. Analysis on the whole process displacement during ultra-deep diaphragm wall construction in soft area[J]. *Hans Journal of Civil Engineering*, 11(1):71-78. doi: 10.12677/HJCE.2022.111009 (in Chinese with English abstract).
- Gelman, A., Rubin, D.B., 1992. Inference from iterative simulation using multiple sequences[J]. *Statistical Science*, 1992,7(04):457-472. doi: 10.1214/ss/1177011136.
- Guo, Y.H., Ren, X.P., Liu, S.Q., et al., 2025. Development and application of similar material for physical model test of an ultradeep foundation pit in round gravel strata.[J]. *Scientific reports*, 15(1):16515. doi: 10.1038/S41598-025-99344-7.
- Hardin, B.O., Drnevich, V.P., 1972. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. *Journal of the Soil Mechanics and*

- Foundations Division*, 1972,98(7). doi: 10.1061/JSFEAQ.0001760.
- He, J.T., Zhang, J., Huang, H.W., et al., 2012. Back analysis of displacements of excavation based on multiple response surface method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(12):3810-3817. doi: 10.16285/j.rsm.2012.12.027 (in Chinese with English abstract).
- Jang, Y.P., Zhou, X.M., 2021. Displacement response of large-diameter single-pile offshore windturbine structure based onhardening soil model with smallstrain stiffness[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 42(04):430-437. doi: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1337 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.M., Hong, C.Y., Ji, F.L., et al., 2023. Study on machine vision monitoring and deformation prediction of deep foundation pit[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 19(03):992-1000 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.X., Zhang, M.L., Jiang, H.S., et al., 2016. Assessment of slope stability in the monitoring parameter space[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(7):04016029-04016029. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001490.
- Lin, D., Zheng, J.J., Xue, P.P., et al., 2024. Probabilistic method for displacement back analysis of deep excavations in soft soil based on bayesian method[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(03):52-60. doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.043 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.B., Liu, F.J., Wang, Y.C., et al., 2023. Prediction of retaining structure deformation of ultra-deep foundation pit by empirical mode decomposition with recurrent neural networks[J]. *Environmental Earth Sciences*, 82(23). doi: 10.1007/S12665-023-11214-5.
- Luo, F., Luo, Q., Jang, L.W., et al., 2015. Influence of variation levels of soil strength indexes on the value of slope stability safety factor[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 37(04):77-83. doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.010 (in Chinese with English abstract).
- Lv, C.C., Li, Z.L., Li, D.Q., 2018. Problems of applying seepage pressurein coupling analysis of seepage and stress using ABAQUS[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 35(05):68-72. doi: 10.11988/ckyyb.20161205 (in Chinese with English abstract).
- Mahadevan, S., Zhang, R., Smith, N., 2001. Bayesian networks for system reliability reassessment[J]. *Structural Safety*, 23(3):231-251. doi: 10.1016/S0167-4730(01)00017-0.
- Markus, R., Gustau, C., Bjorn, S., et al., 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science.[J]. *Nature*, 566(7743):195-204. doi: 10.1038/s41586-019-0912-1.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., et al., 1953. Equations of state calculations by fast computing machines[J]. *Chem.Phys*, 21(04):1087-1092. doi: 10.2307/2342435.
- Peng, M., Li, X., Li, D., et al., 2014. Slope safety evaluation by integrating multi-source monitoring information[J]. *Structural Safety*, 49:65-74. doi: 10.1016/j.strusafe.2013.08.007.
- Phoon, K.K., Kulhawey, F.H., 1999. Characterization of geotechnical variability [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999,36(04):612-624. doi: 10.1139/t99-038.
- Qiu, Y., Wang, J.W., Zhang, C., et al., 2024. Numerical simulation study on the impact of excavation on existing subway stations based on BIM-FEM framework[J]. *Buildings*, 14(5). doi: 10.3390/BUILDINGS14051444.
- Tan, Z.L., Li, J.P., Yao, J.P., et al., 2022. Risk assessment index and comprehensive evaluation method for construction of super large excavation in soft soils[J]. *Structural Engineers*, 38(04):176-185. doi: 10.15935/j.cnki.jggcs.2022.04.008 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J.C., Li, Y.L., Luo, Y.H., et al, 2025. Multisource information fusion model for deformation safety monitoring of earth and rock dams based on deep graph feature fusion[J]. *Structural Health Monitoring*, 24(2):925-940. doi: 10.1177/14759217241244549.
- Wang, H.B., Yang, H.X., Zhang, H., 2010. Monitoring and advance warningin deep foundation pit project[J]. *Architecture Technology*, 41(3):4. doi: 10.3969/j.issn.1000-4726.2010.03.019 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.F., Liu, X.L., Xu, K., et al., 2024. Bayesian-MCMC (Markov Chain Monte Carlo) based three-dimensional geological model optimization by data and knowledge fusion[J]. *Earth Science*, 49(08):3056-3070. doi: 10.3799/dqkx.2023.069 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Han, B., Jiang, J., et al., 2025. Machine learning and FEM-driven analysis and optimization of deep foundation pits in coastal area: A case study in Fuzhou soft ground[J]. *Underground Space*, 22:55-76. doi:10.1016/J.UNDSP.2024.11.001.
- Wang, W.D., Li, Q., Xu, Z.H., 2023. Investigation and application of small-strain model parameters for soft clay deposits[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 19(03):844-855 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.J., Peng, L.M., Li, J.W., et al., 2021. Rapid safety monitoring and analysis of foundation pit construction using unmanned aerial vehicle images[J]. *Automation in Construction*, 128. doi: 10.1016/J.AUTCON.2021.103706.

- Wu, X.G., Wang, L., Feng, Z.B., et al., 2022. Analysis on the reliability of metro deep foundation pit system under multiple failure modes[J]. *Modern Tunnelling Technology*, (004):059. doi: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.04.018 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Rong, Z., Pang, R., et al., 2024. A novel method for settlement imputation and monitoring of earth-rockfill dams subjected to large-scale missing data[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 62(PA):102642-102642. doi:10.1016/J.AEI.2024.102642.
- Yang, D.X., Zhao, K., Zeng, P., et al., 2019. Numerical simulation of unknown wave velocity acoustic emission localization based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40(S1):494-502. doi: 10.16285/j.rsm.2018.2026 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Wang, J., Lv, Z.B., et al., 2022. Multi-source information fusion-based study on dynamic safety evaluation of landslide in plateau reservoir area[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 53(04):165-171. doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.04.015 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q.N., 2010. Deformation characteristics analyses of deep foundation pits in Wuhan metro stations[D]. *Huazhong University of Science and Technology* (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.C., Jin, A.Y., Pan, J.W., et al., 2022. GA-BP artificial neural networks for predicting the seismic response of arch dams[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 62(08):1321-1329. doi: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.25.028 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Li, D.Q., Cao, Z.J., 2016. Comparative study of Bayesian methods for back analysis of deep excavation[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 49(06):806-811. doi:10.14188/j.1671-8844.2016-06-002 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.G., Gu, X., Liu, H.L., et al., 2022. Probabilistic back analysis of soil parameters and displacement prediction of unsaturated slopes using Bayesian updating[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 43(04):1112-1122. doi: 10.16285/j.rsm.2021.1150 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Jang, L.W., Luo, Q., et al., 2018. Correlative analysis between variation level of soil strength parameters and influencing factors[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(03):592-601. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-022 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Z., Li, Y., Zhang, Y., et al., 2025. Prediction and pre-warning of step-like landslide displacement based on deep learning coupled with ICEEMDAN[J]. *Measurement*, 246:116585-116585. doi:10.1016/J.MEASUREMENT.2024.116585.
- Zhou, X.P., Xu, Q., Zhao, K.Y., et al., 2020. Research on calibration method of discrete element mesoscopic parameters based on neural network landslide in Heifangtai, Gansu as an example[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(S1):2837-2847. doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0531 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y., Gu, Q.Y., Jang, J., et al., 2016. Reliability analysis for overall stability of large-span double-row steel sheet-piled dock cofferdam based on Bayesian method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37(S1):609-615. doi: 10.16285/j.rsm.2016.S1.080 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 冯师, 刘羿辰, 2022. 软土地区超深地连墙施工全过程变形分析[J]. *土木工程*, 11(1):71-78.
- 何军涛, 张洁, 黄宏伟, 等, 2012. 基于多重响应面法的基坑位移反分析[J]. *岩土力学*, 33(12):3810-3817.
- 姜焱培, 周晓敏, 2021. 基于小应变硬化土体模型的大直径单桩海上风力机结构位移响应研究[J]. *太阳能学报*, 42(04):430-437.
- 李尚明, 洪成雨, 姬凤玲, 等, 2023. 深基坑的机器视觉监测与变形预测研究[J]. *地下空间与工程学报*, 19(03):992-1000.
- 林东, 郑俊杰, 薛鹏鹏, 等, 2024. 基于贝叶斯方法的软土深基坑不确定性位移反演分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 46(03):52-60.
- 骆飞, 罗强, 蒋良滩, 等, 2015. 土体抗剪强度指标变异水平对边坡稳定安全系数取值的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 37(04):77-83.
- 吕从聪, 李宗利, 李东奇, 2018. 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*, 35(05):68-72.
- 覃子玲, 李镜培, 姚建平, 等, 2022. 超大面积软土基坑施工风险评价指标与综合评价方法[J]. *结构工程师*, 38(04):176-185.
- 王海飙, 杨海旭, 张华, 2010. 深基坑工程施工安全监测与预警[J]. *建筑技术*, 41(3):4.
- 王丽芳, 刘肖莉, 徐坤, 等, 2024. 数据和知识融合的 Bayesian-MCMC 三维地质建模[J]. *地球科学*, 49(08):3056-3070.
- 王卫东, 李青, 徐中华, 等, 2023. 软黏土小应变本构模型参数研究与应用[J]. *地下空间与工程学报*, 19(03):844-855.
- 吴贤国, 王雷, 冯宗宝, 等, 2022. 多失效模式下的地铁深基坑系统可靠度分析[J]. *现代隧道技术*, (004):059.
- 杨道学, 赵奎, 曾鹏, 等, 2019. 基于粒子群优化算法的未知波速声发射定位数值模拟[J]. *岩土力学*, 40(S1):494-502.
- 杨军, 旺加, 吕栾, 等, 2022. 基于多源信息融合的高原库区滑坡动态安全评价研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 53(04):165-171.
- 杨庆年, 2010. 武汉地铁车站深基坑变形特性分析[D]. 华中科技大学.

- 于京池, 金爱云, 潘坚文, 等, 2022. 基于 GA-BP 神经网络的拱坝地震易损性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 62(08):1321-1329.
- 张湾, 李典庆, 曹子君, 2016. 基坑开挖参数反分析贝叶斯方法比较研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 49(06):806-811.
- 仇文岗, 顾鑫, 刘汉龙, 等, 2022. 基于贝叶斯更新的非饱和土坡参数概率反演及变形预测[J]. 岩土力学, 43(04):1112-1122.
- 赵晶, 蒋良淮, 罗强, 等, 2018. 土体强度参数变异水平及影响因素关联分析[J]. 工程地质学报, 26(03):592-601.
- 周小棚, 许强, 赵宽耀, 等, 2020. 基于神经网络的离散元细观参数标定方法研究——以甘肃黑方台黄土滑坡为[J]. 岩石力学与工程学报, 39(S1):2837-2847.
- 朱艳, 顾倩燕, 江杰, 等, 2016. 基于贝叶斯方法的船坞双排钢板桩围堰整体稳定性可靠度分析[J]. 岩土力学, 37(S1):609-615.

#### 附参考规范

- 工程结构可靠性设计统一标准:GB 50153-2008[S],2008.
- 建筑边坡工程技术规范(附条文说明):GB 50330-2013[S],2013.
- 水利水电工程结构可靠性设计统一标准:GB 50199-2013[S],2013.
- 干船坞设计规范:CB/T 8524-2011[S],2011.
- 建筑基坑支护技术规程:JGJ 120-2012[S],2012.
- 软土地区工程地质勘察规范:JGJ 83-1991[S],1991.
- 上海市基坑工程技术规范:DG/TJ 08-61-2010[S],2010.

**收稿日期:**

**修回日期:**

**第一作者简介:** 彭铭(1981-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事地质灾害、大坝安全与溃坝机理分析。

E-mail: [pengming@tongji.edu.cn](mailto:pengming@tongji.edu.cn), ORCID : 0000-0001-9134-4391

**通信作者简介:** 朱艳(1986-), 女, 研究员, 博士, 主要从事海岸带工程灾害防治及智能化设计研究工作。E-mail: [zhuyan@ndri.sh.cn](mailto:zhuyan@ndri.sh.cn)

**作者贡献度:** 彭铭: 方法提出, 监督指导, 审阅与编辑, 基金支持; 马佩琪: 方法提出, 数据处理, 论文撰写与修改; 朱艳: 方法提出, 需求开发, 审阅与编辑, 基金支持; 陈献军: 监督指导及项目应用; 王开放: 现场数据采集与分析; 周杰鑫: 典型案例设计。