



重力式船坞边坡多级动态预警系统研究*

殷骏^{1,2}, 赵庆喜^{1,2}, 章祝君^{1,2}, 黄锋³, 朱艳^{1,2}, 马永平^{1,2}

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200090;

2. 上海市海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200090;

3. 上海市水利管理事务中心, 上海 200050)

摘要: 重力式船坞边坡开挖面积大、开挖周期长; 传统的终态位移预警方法难以实现在长开挖周期中各阶段稳定性的差异化评估; 极限平衡分析方法作为静态力学评价模型, 需要坡体准确的物理力学性质指标, 且当船坞边坡在开挖过程中受环境或施工因素影响较大时, 模型将进一步失真, 具有较大的局限性。基于此, 建立船坞边坡多级动态预警系统, 通过自动化监测设备对船坞边坡进行远程、自动、实时监测, 并对时序序列数据进行相似性分析, 识别船坞边坡开挖过程中的异常环境及施工因素, 在此基础上调用 PLAXIS 接口进行各级边坡开挖稳定性评估, 实现重力式船坞边坡多级动态预警。多级动态预警系统在舟山某船坞边坡开挖过程中精确识别到异常环境因素, 并动态调整初始岩土体物理力学参数, 实现各级边坡位移预测及开挖稳定性的超前预报, 指导施工人员及时防护, 避免经济损失和人员伤亡, 能为船坞边坡灾害预报提供新的评估手段和超前预报方向。

关键词: 重力式船坞; 动态预警; 多级预警

中图分类号: U641; TV312

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0209-08

Multi-level dynamic warning of gravity dock slope

YIN Jun^{1,2}, ZHAO Qingxi^{1,2}, ZHANG Zhujun^{1,2}, HUANG Feng³, ZHU Yan^{1,2}, MA Yongping^{1,2}

(1. China Shipbuilding NDR Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Research Center of Ocean & Shipbuilding Engineering, Shanghai 200090, China;

3. Shanghai Water Conservancy Management Center, Shanghai 200050, China)

Abstract: Gravity dock slope excavation is characterized by extensive excavation areas and prolonged construction periods. Traditional terminal displacement warning methods are difficult to achieve differentiated stability assessments across various stages of the long excavation period. As a static mechanical evaluation model, the limit equilibrium analysis method requires precise physical and mechanical property indices of the slope. However, when environmental or construction factors significantly influence the dock slope during excavation, the model becomes further distorted, exhibiting notable limitations. Based on this, this study establishes a multi-level dynamic early warning system for dock slopes. The system employs automated monitoring devices to conduct remote, automatic, and real-time monitoring of dock slopes, followed by similarity analysis of time-series data to identify abnormal environmental and construction factors during excavation. On this basis, the system invokes the PLAXIS interface for stability evaluation at each excavation stage, enabling multi-level dynamic warnings for gravity dock slopes. During the excavation of a dock slope in Zhoushan, the multi-level dynamic warning system accurately identified abnormal environmental factors, dynamically adjusted initial geotechnical physical-mechanical parameters, achieving advanced prediction of slope displacement and excavation stability at all levels, guiding construction personnel to protect in a timely manner, avoiding economic losses and casualties. This system provides new evaluation methods and advanced prediction directions for dock slope disaster prediction.

Keywords: gravity dock; dynamic warning; multi-level warning

收稿日期: 2025-04-10 录用日期: 2025-06-03

*基金项目: 上海市优秀学术/技术项目(23XD1434800)

作者简介: 殷骏(1976—), 男, 高级工程师, 从事水工结构及相关领域研究工作。

重力式船坞是为修造船提供干作业场所的池状建筑物,一般建在海岸较为坚硬的地基上,利用坞体自重抵御渗透上浮力,要求具有良好的稳定性和密实性。重力式船坞因其使用功能要求及场地条件,放坡开挖的方案通常会成为设计者首选。由于船坞开挖面积大、基坑深度大、开挖周期长,尤其是强降雨、临海地区,边坡坡体物理力学性质与边界条件在长时间暴露过程中发生改变,进而导致施工过程中边坡的整体稳定常常处于动态变化之中^[1]。因此,对船坞边坡进行科学有效的分级监测和动态预警就成为重力式船坞结构稳定性的重要一环。

船坞边坡的动态稳定性评价是船坞边坡分级监测和动态预警的有机结合^[2],监测的目的是了解在长周期大开挖过程中,随着边坡应力重分布,坡体应力状态的实时演变的过程,为边坡所处安全状态和边坡失稳预报提供可靠的数据来源和科学依据^[3]。动态预警的关键是建立合理的评价方法与稳定性判别依据。现有众多边坡稳定性预测与评价的众多方法中,极限平衡法和位移时序预测方法一直都是边坡工程稳定性评价和滑坡预测预报所采用的主要方法^[4-5],并且在船坞边坡工程中被广泛采用。极限平衡法作为无时间参数的静态力学评价模型,回避了坡体变形协调关系和相应的本构关系以及和时间因素相关的动态时序关系,且需要坡体准确的物理力学性质指标^[6-8],建模的局限与苛刻条件均使极限平衡法在滑坡的预测预报和监测预警应用中受到了极大局限^[9]。位移时序预测方法是以滑坡位移监测为基础,以位移参数及其变化作为边坡是否稳定和稳定程度的预测参数与评价准则,精度高、易实施。但位移、裂缝等现象作为滑坡的必要条件,难以实现超前准确预报^[10-11]。

同时,由于传统的船坞边坡监测方法依赖

于人工进行周期性的数据采集,此类方法在采集精度、效率以及时效性上均存在较大的局限性,且无法保证数据的连续性和实时性。自动化监测手段的出现使得船坞边坡多级动态预警系统架构成为可能^[12-14],通过监测技术与动态预警的有机结合,达到对具体船坞边坡工程动态评价的目的。

基于此,本文提出一种基于自动化监测的重力式船坞边坡多级动态预警系统架构。基于物联网无线通信网络建立船坞边坡远程自动化监测系统,通过使用由测斜仪、水位计等传感器阵列进行船坞边坡的实时监测。同时建立船坞边坡多级计算模型,阶段性的综合有限元计算结果和实时监测数据,给出船坞边坡动态稳定性评价结论。通过算例验证该方法的适用性,旨在为项目设计、施工提供风险判别依据。

1 船坞边坡多级动态预警系统

1.1 监测系统架构

船坞边坡施工期自动化监测系统监测方案遵循“一坡一方案”和“定性分析为基础,定量分析为手段”的原则,依据船坞边坡前期稳定性分析结果和施工过程可行方案逐级开展监测设计。在保证监测指标科学性的基础上,尽可能做到轻量化,并将可维护性、鲁棒性设计思想融入系统架构过程中。船坞边坡自动化监测系统见图1,具有“两高、两少、三灵活”的特点。“两高”指自动化智能监测系统稳定性高与准确度高;“两少”指自动化智能监测系统的采用可以减少人工运营养护的工作量、减少船坞边坡长期运维养护的非必要投入;“三灵活”指自动化监测系统支持PC端、手机端的灵活使用,同时支持监测点及内容的灵活更新,可以实现船坞边坡的实时预警及监测重点对象灵活调配。



图 1 自动化监测系统

Fig. 1 Automated monitoring system

1.2 动态预警原理

多级动态预警系统由两大部分组成,一部分是智能传感、采集、发射系统,该部分安装在船坞边坡现场,分布式布置在各级边坡上,可将现场位移等数据实时采集自动发射到接收分析系统,由其对原始监测数据进行转化分析及呈现;另一部分基于有限单元法的动态预警系统,该部分完成船坞边坡动态稳定性评价的工作,包括根据岩土体的物理力学参数统计值建立有限元分析模型,获取预警值的初始值,在此基础上,根据现场发来的位移数据进行有限元模型中土体参数置信度评估,获取岩土体参数置信度高的取值,将其应用于有限元分析模型获取预警分布的动态值,实现船坞边坡的动态预警。以上结合现场监测数据及有限元模型的动态评估过程在边坡开挖的每一级均被执行,直至边坡开挖完成,据此实现船坞边坡的多级预警。具体流程见图 2。

相较于传统的极限平衡终态控制方法,多级动态预警系统分级分阶段设置预警值可以实现边坡各阶段稳定性状态的差异化评估,通过时序序列分析将现场监测数据用于评估船坞边坡岩土体初始物理力学参数的置信度,可以识别出初始无时间参数静态力学评价模型中无法考虑的现场开挖及环境因素异常,指导有限元分析模型动态调整,实现船坞边坡稳定性状态的动态评估,进而实现船坞边坡的动态预警。相较于传统的位移时

序预测方法,多级动态预警系统并不依赖针对特定地质得出的位移观测经验模型,对时序序列进行相似分析,用于边坡土体置信度评估可以充分利用边坡不同深度位移数据,且可以识别传统位移时序分析无法反应的突发因素,如降雨和强震导致的边坡稳定性变化,具有较好的普适性和综合性。

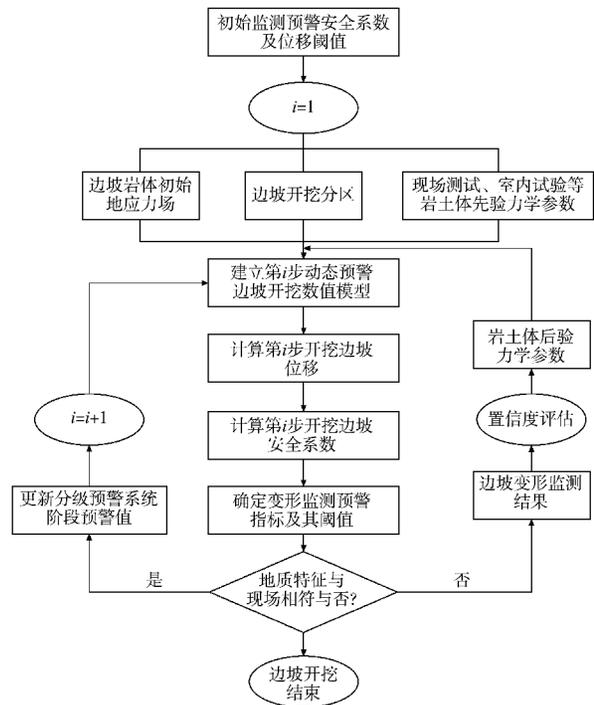


图 2 船坞边坡多级动态预警流程

Fig. 2 Multi-level dynamic warning flow of dock slope

1.3 相似分析原理

动态时间规整算法 (dynamic time warping algorithm, DTW) 是一种时序序列分析方法,通过

累计距离矩阵和路径回溯对齐 2 个长度不同或局部形变的时间序列，从而找到最优的匹配路径，并获取最小距离度量值，实现 n 组时间序列的对比。对于任意两个序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n), Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ ，局部距离：

$$d(i, j) = |x_i - y_j| \quad (1)$$

累计距离矩阵为：

$$D_{cum}(i, j) = d(i, j) + \min \begin{cases} D_{cum}(i-1, j) \\ D_{cum}(i-1, j-1) \\ D_{cum}(i, j-1) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $d(i, j)$ 为局部距离； $D_{cum}(i, j)$ 为累计距离

矩阵，是所有最优匹配轨迹点距离的累加。

Pearson(皮尔逊算法)相似分析方法通过计算 2 个一维变量的标准差和协方差衡量 2 个变量的联合变化，对异常值敏感，对于序列 X 和 Y ，其相关系数表示为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中： r 为效应幅度指标，表示 2 个变量之间的关系强度。

表 1 岩土体物理力学参数分布

Tab. 1 Distribution of geotechnical physical and mechanical parameters of rock and soil mass

编号	黏聚力均值/kPa	黏聚力标准差	黏聚力变异系数	内摩擦角均值/(°)	内摩擦角标准差	内摩擦角变异系数
① ₁	5.0	-	-	28.0	-	-
① ₂	26.2	1.9	0.07	17.4	1.3	0.08
② ₁	11.3	2.4	0.20	10.1	4.4	0.40
② ₃	19.7	5.2	0.27	16.8	2.1	0.13
⑤ ₁	29.2	5.1	0.17	17.7	1.7	0.09
⑤ ₂	27.2	0.4	0.01	17.1	1.3	0.07

2 案例分析

2.1 工程概况

舟山某船坞位于丘陵滨海岛屿区，拟建场地地层起伏较大，根据地质勘察结果，该船坞边坡主要为沉积淤泥质土、粉质黏土以及含砂砾黏性土等，下覆基岩主要为中风化凝灰岩及微风化角砾凝灰岩。船坞坞室区域基坑开挖边坡一般为 1:3，在 -8、-4、0 m，设 4 m 宽平台，在底部含砂砾粉质黏土层可调整为 1:2。船坞边坡典型断面见图 3。船坞边坡自动化监测方案遵循“一坡一方案”原则，依据稳定性分析结果逐级开展设计，施工期船坞边坡监测指标以地表位移、深层水平位移为主，以地下水位监测为辅，根据实际情况灵活设置，分别采用孔隙水压计、固定测斜仪等传感器进行测量。自动化监测系统内置接口设置逻辑为船坞边坡开挖过程中逐级进行边坡动态稳定性相关数据自动化测试，但受限于监测点安装时间过于靠近边坡开挖末期，监测点监测位移与边坡开挖的关联程度及其规律性与全过程监测有所出入，边

坡开挖过程存在位移先于监测点布置释放的问题，这将导致监测位移值小于船坞边坡开挖实际位移值。

综合以上因素，本文实际采用布置在 -4 m 平台的测斜管固定深度间隔的位移数据阶段增量作为置信度评估的依据。船坞边坡尾坞边坡工程监测点布设于 2024 年 08 月 07 日(二级坡)，同年 10 月 1 日开挖至三级坡，于 11 月 16 日开挖结束。

2.2 基本计算模型及样本构建

船坞边坡多级动态预警系统中，边坡的初始动态稳定性结果来源于有限元数值计算，计算参数为岩土体初始物理力学参数分布。船坞边坡典型断面见图 3，边坡分四级开挖，初始地应力场由重力提供，模型建立采用有限元软件 PLAXIS，模型重点模拟了边坡主体、加固构筑物、地形、底层边界和开挖面。基于边坡设计及实际施工过程，构件船坞边坡开挖有限元数值模型，自上而下依次为素填土、淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土、强风化凝灰岩及中风化凝灰岩。地质土层参数见表

1, 其中土体强度参数以标准值计。计算模型采用四面体网格划分。船坞边坡计算分为初始应力场、边坡开挖及边坡加固 3 种阶段, 初始应力场采用重力加载, 计算完成后初始化所有节点的位移和速度, 以准确计算后续各阶段实际位移。船坞边坡采用 HSS 小应变模型计算各级边坡与实际测点对

应位置的位移。采用强度折减法计算船坞边坡的安全系数, 分析边坡危险滑动面。采用双排钢板桩的支护方式进行支护, 钢板桩采用板单元模拟。综合稳定性结果、现场监测数据及有限元计算结果对边坡稳定性及变形机理进行分析, 评估土体初始物理力学参数置信度及初始预警值的合理性。

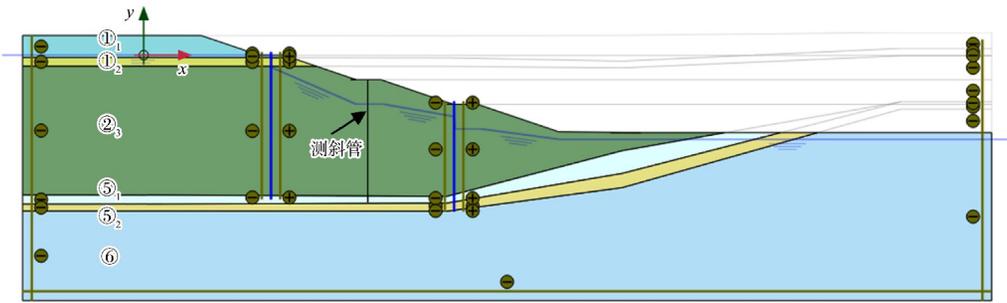


图 3 尾坞边坡典型断面

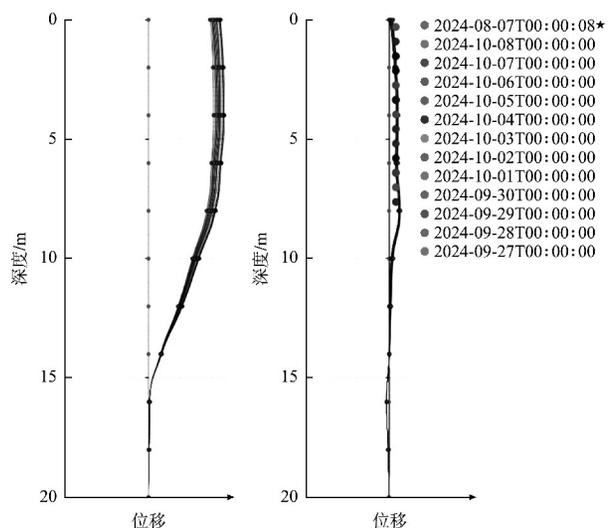
Fig. 3 Typical cross-section of the tail dock slope

2.3 多级动态预警

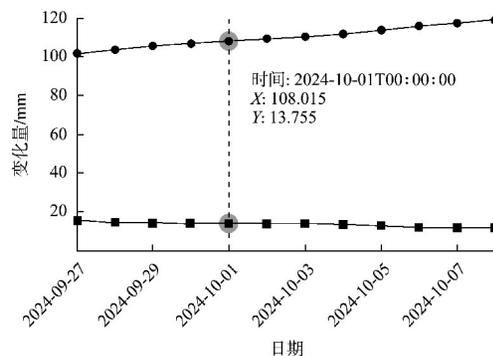
传统船坞边坡稳定性预警通常采用终值预警法, 本文基于动态预警原理, 在工程开挖各阶段基于极限平衡分析分级设置初始开挖阈值, 同步基于相似分析原理处理开挖过程中时序序列数据, 并评估初始模型中土体参数的置信度, 如相似分析产生异常波动, 认为现场产生异常扰动, 根据工程实际状况动态调整土体参数并更新开挖预警阈值, 实现重力式船坞边坡的动态预警。

考虑工程监测点设置于边坡开挖至二级平台之后, 按照预警原理, 系统通过 python 调用 PLAXIS 的 API 接口进行三级坡开挖稳定性及变形计算, 并编写程序自动提取有限元数值模型中现场布置测斜管位置的位移, 位移提取由 -4 m 平台开始, 以 -2 m 的步距向下直至 -22 m, 共 10 个位移输出点, 与测斜管实时感知一致。测斜管不同深度的变形见图 4a)。以 4 个指标作为依据综合判定边坡动态稳定性, 包括测斜管顶位移极值, 见图 4b); 测斜管顶变形速率, 见图 4b); 断面变形比对结果, 见图 4c); 船坞边坡断面位移趋势, 见图 5。自测斜管布置开始, 在系统内逐日更新断面变形比对结果, 见图 4c)。根据船坞边坡时序序列数据相似分析结果判定是否调整初始模型参数并给出

挖至终态的预警值, 实现重力式船坞边坡终态预警中过程状态的动态体现。



a) CX7剖面



b) CX7测点数据过程线(深度: 4 m)

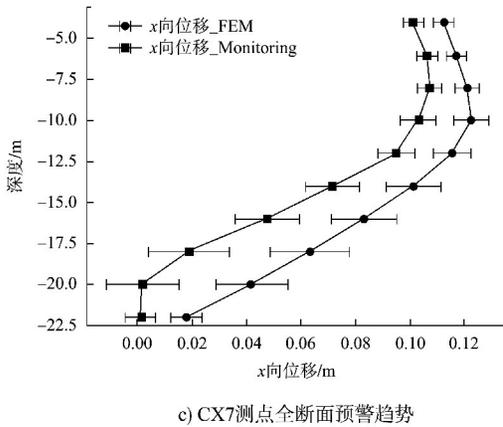


图 4 二、三级边坡开挖动态预警系统
Fig. 4 Dynamic warning system of second and third level slope excavation

重力式船坞边坡初始预警值按照工程经验设置为 100 mm，由 0 m 平台向 -4 m 平台开挖时，边坡位移未达到初始预警，维持初始预警值不变。船坞边坡由 -4 m 平台向 -8 m 平台开挖过程中，船坞边坡位移达到初始预警值，系统告警并启动多级动态预警系统，系统按照初始极限平衡分析模型各级计算结果，分级设置各级边坡开挖预警值。其中三级坡预警值“X 向位移_FEM”，四级坡

预警值“X 向位移_FEM”。

重力式船坞边坡由 -4 m 平台开挖至 -8 m 平台(三级坡)阶段内，实测测斜管断面变形与有限元计算模型断面变形结果一致，测斜管顶变形速率均小于 3 mm/s，船坞边坡断面位移相似分析未见异常，船坞边坡在测斜管所处平面纵断面上并未表现出明显的相对位移，根据多级动态预警系统指标综合判定结果，认为船坞边坡本阶段开挖处于安全状态，本开挖阶段时序序列数据相似分析未识别到异常，维持原有极限平衡分析预警值不变，船坞边坡向四级坡开挖。

重力式船坞边坡由 -8 m 平台向 -12 m 平台(四级坡)开挖过程中，测斜管顶位移极值虽未超过设定预警值，但测斜管顶变形速率出现波动。依照相似分析原理通过动态时间规整算法(DTW)及皮尔逊算法(Pearson)对船坞边坡测斜管位置处船坞边坡全断面位移监测值进行相似性预警分析，对现场边坡土体参数置信度进行重新评估识别是否有异常产生，结果见图 5。

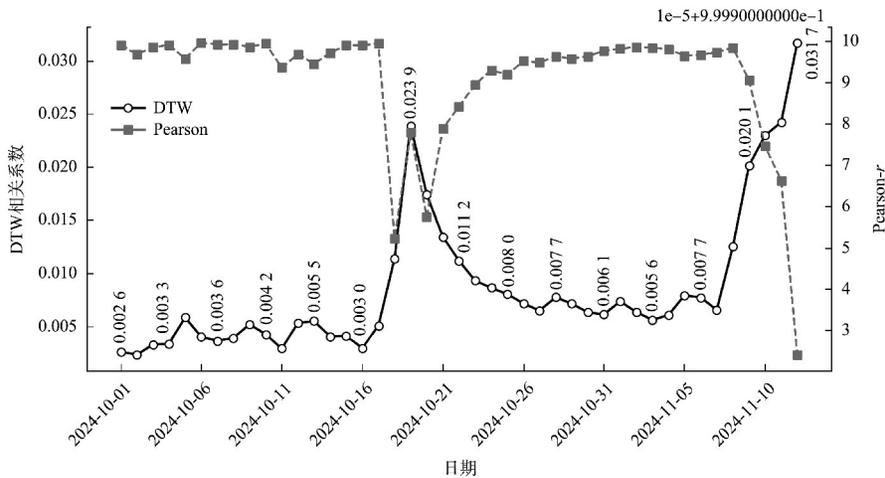


图 5 基于动态规划及皮尔逊相关系数的船坞边坡预警分析
Fig. 5 Early warning analysis of dock slope based on dynamic programming and Pearson correlation coefficient

DTW 及 Pearson 相似性度量结果均表明船坞边坡在 10 月 20 日附近产生了较为明显的相对位移波动，其中 DTW 通过找到 2 个时间序列之间的最佳对齐路径进行相似性度量，由于并未进行 z-score 标准化，度量结果包含相似程度及对象的

整体位置偏移，指示了相对位移和绝对位移的综合变化，Pearson 对幅度缩放和平移不敏感，指示边坡在纵断面上产生了明显的相对位移。预警分析结果表明，船坞边坡在 10 月 20 日附近出现极限平衡分析模型未反映的因素，该因素对船坞边

坡整体位移趋势产生影响,在短暂波动后收敛至正常关系,指示现场地质条件受环境或施工荷载影响产生变化。系统根据动态预警原理启动预警值调整方案。

预警值更新依据为对初始有限元模型调整并重新计算位移阈值,基于相似分析识别出的异常波动对现场进行校核,最大概率因素为船坞边坡现场出现连续降雨,按照舟山地区降雨诱发船坞边坡强度参数折减的工程经验,对船坞边坡强度参数按照边坡即有安全系数进行折减,系统调用 PLAXIS 的 API 接口进行强度参数折减后的船坞四级边坡开挖稳定性及变形计算,更新船坞边坡开挖至四级坡的预警极限位移值为 236 mm。

随着船坞边坡进一步开挖,计算与监测对比见图 6。11 月 11 日船坞边坡监测变形达到预警极限位移值 236 mm,采取增设井点降水、明渠降水、坡底回填等预防措施,同时组织现场施工人员撤离现场,避免了潜在的经济损失和人员伤亡。船坞边坡多级动态预警系统实现重力式船坞边坡终态预警中过程状态的动态体现,及时、准确地对可能的工程失稳做出预警,并结合工程经验做出防治建议,避免了工程事故带来的巨大经济损失和人员伤亡。

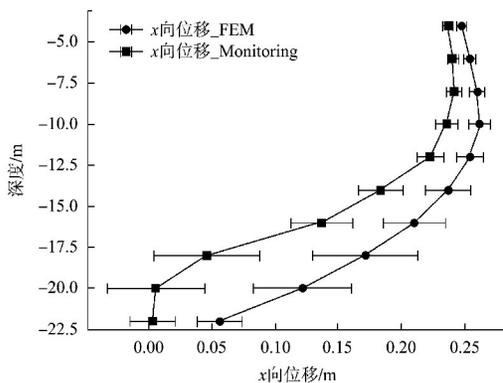


图 6 CX7 测点计算与监测对比(四级坡开挖)

Fig. 6 Comparison of calculation and monitoring of CX7 (excavation of four-level slope)

3 结论

1) 本文通过船坞边坡智能监测及时间序列分析手段建立了重力式船坞边坡多级动态预警系统,

并在舟山某重力式船坞边坡进行了应用。系统通过现场监测数据实时分析,并在异常处调整有限元分析模型实现对船坞边坡不同开挖阶段坡体稳定性的动态预警,避免了工程经济和人员的伤亡。为船坞边坡稳定性预警及超前预报提供了有效的手段和新方法。

2) 船坞边坡开挖面积大、开挖周期长,岩土体参数易受环境因素影响而劣化,对开挖过程中时序序列数据进行相似性分析可以提前识别开挖过程中的潜在风险,及时预警,避免事故。同时以断面变形比对结果、测斜管顶位移极值、测斜管顶变形速率及船坞边坡断面位移趋势 4 个指标作为评判依据,综合判定边坡动态稳定性可以避免单一因素扰动对稳定性结果的误判。

3) 重力式船坞边坡多级动态预警系统可以识别出岩土体参数置信度评估因现场因素出现的异常波动;该研究能服务于船坞边坡安全评估,基于所识别出的异常波动及时进行船坞边坡临界位移阈值分析,但尚未反演岩土体参数动态变化情况。未来可在本文多级动态预警系统的基础上引入贝叶斯网络对岩土体参数进行反演分析,当现场环境出现变化时准确更新岩土体后验参数的动态变化。

参考文献:

- [1] 顾宽海,朱忠余.风险管理技术在某船坞工程设计中的应用[J].港工技术,2014,51(2):37-39.
GU K H, ZHU Z Y. Application of risk management technique to dock engineering design[J]. Port engineering technology, 2014, 51(2): 37-39.
- [2] 陆高明,王哲鑫,刘伯全,等.高陡顺层边坡开挖动态响应及预警研究[J].水利水电快报,2024,45(4):73-77.
LU G M, WANG Z X, LIU B Q, et al. Research on dynamic analysis and early warning of high and steep bedding slope[J]. Express water resources & hydropower information, 2024, 45(4): 73-77.
- [3] 董文文,朱鸿鹄,孙义杰,等.边坡变形监测技术现状及新进展[J].工程地质学报,2016,24(6):1088-1095.

- DONG WW, ZHU H H, SUN Y J, et al. Current status and new progress on slope deformation monitoring technologies[J]. Journal of engineering geology, 2016, 24(6): 1088-1095.
- [4] 张振华, 冯夏庭, 周辉, 等. 基于设计安全系数及破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预警方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 603-612.
- ZHANG Z H, FENG X T, ZHOU H, et al. Research on dynamic early warning method of slope deformation monitoring during excavation based on designed safety factor and failure mode [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(3): 603-612.
- [5] 漆祖芳, 姜清辉, 周创兵, 等. 基于 v-SVR 和 MVPSO 算法的边坡位移反分析方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1185-1196.
- QI Z F, JIANG Q H, ZHOU C B, et al. A new slope displacement back analysis method based on v-SVR and MVPSO algorithm and its application [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(6): 1185-1196.
- [6] 沈保根, 黄涛. 基于有限元极限平衡法的斜坡式护岸稳定性分析[J]. 水运工程, 2018(7): 119-124.
- SHEN B G, HUANG T. Stability analysis of sloping revetment structure based on finite element limit equilibrium method [J]. Port & waterway engineering, 2018(7): 119-124.
- [7] 盛谦, 丁秀丽, 冯夏庭, 等. 三峡船闸高边坡考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 987-993.
- SHENG Q, DING X L, FENG X T, et al. Displacement back analysis for the high slope of the Three Gorges project considering the effect of excavation unloading[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2000, 19(S1): 987-993.
- [8] ZHANG C W, LIU Q, CHEN B Q, et al. Research and practice on slope monitoring of power grid construction based on IoT technology[J]. Journal of physics: conference series, 2023, 2452(1): 012018.
- [9] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- ZHENG Y R, ZHAO S Y. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [10] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081-1090.
- HE M C. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(6): 1081-1090.
- [11] 贺可强, 陈为公, 张朋. 蠕滑型边坡动态稳定性系数实时监测及其位移预警判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1377-1385.
- HE K Q, CHEN W G, ZHANG P. Real-time monitoring of dynamic stability coefficient and displacement criterion of the creep slope[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(7): 1377-1385.
- [12] 朱武, 张勤, 朱建军, 等. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1341-1350.
- ZHU W, ZHANG Q, ZHU J J, et al. Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2022, 44(7): 1341-1350.
- [13] 曹磊. 深基坑开挖边坡稳定性监测实施技术[J]. 水运工程, 2019(3): 130-132, 158.
- CAO L. Implementation technology of slope stability monitoring for deep foundation pit excavation[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 130-132, 158.
- [14] 程刚, 王振雪, 李刚强, 等. 滑坡一体化全维度监测预警技术进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 105-114.
- CHENG G, WANG Z X, LI G Q, et al. Progress and prospect of integrated full-dimensional monitoring and early warning technology for landslides[J]. China safety science journal, 2023, 33(1): 105-114.