



港口高桩码头海岸岸坡水平位移监测及分析

宋学鹏¹, 孙亚¹, 朱永英², 隋意³, 李永青³,
马野^{1,4}, 程知欣^{1,4}, 尤再进^{3,4}

- (1. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026;
2. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023; 3. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026;
4. 大连海事大学 港口与航运安全协同创新中心, 辽宁 大连 116026)

摘要: 我国沿海地区主要港口的高桩码头面临严重的淤积问题, 导致桩基普遍受损、维护成本居高不下。基于淤泥质岸坡软土位移是造成高桩码头淤积的主要原因, 采用应力片和柔性测斜仪联合测量的方法, 对岸坡软土位移特征进行了长时序监测。探讨了在码头后方堆载作用下软土累积位移的变化量, 以及在码头清淤周期前后软土位移速率的变化。结果表明: 在堆载作用下, 土层内会产生沉降, 迫使土体沿水平方向位移。观测到海岸在1年内的侧向位移向海侧逐渐增大, 且在码头清淤周期前后位移速率存在差异。长时序监测岸坡位移对于沿海港口工程管理至关重要。通过准确分析上述过程, 有助于降低海岸侵蚀、山体滑坡和高桩码头淤积问题所带来的风险。

关键词: 高桩码头; 淤泥质岸坡; 软土位移; 长时序监测

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0085-10

Monitoring and analysis of horizontal displacement of coastal slopes at high-pile wharf in ports

SONG Xuepeng¹, SUN Ya¹, ZHU Yongying², SUI Yi³, LI Yongqing³, MA Ye^{1,4}, CHENG Zhixin^{1,4}, YOU Zaijin^{3,4}

- (1. School of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. College of Marine and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
3. School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
4. Collaborative Innovation Center for Port and Shipping Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The high-pile wharfs of the main ports in the coastal areas of China are confronted with significant siltation issues, resulting in extensive damage to pile foundations and high maintenance costs. Based on the fact that the displacement of soft soil on silty bank slope is the main cause of silting in high pile wharf, the long-term monitoring of the displacement characteristics of soft soil on bank slope is carried out by using a combined measurement method involving stress sheets and flexible inclinometer. The study discusses the cumulative displacement of soft soil under loading at the rear of the wharf and examines changes in displacement rates of soft soil before and after dredging cycles. The results show that there will be settlement in the soil layer under the action of overloading, forcing the soil to move in the horizontal direction. It is observed that the lateral displacement of the coast gradually increases towards the seagoing side within one year, and the displacement rate is different before and after the dredging cycles of the wharf. Long-term monitoring of bank displacements is crucial for the management of coastal port project. Accurately analyzing the process can help reduce the risks caused by coastal erosion, landslides, and siltation problems of high-pile wharfs.

Keywords: high-pile wharf; silty bank slope; soft soil displacement; long-term monitoring

收稿日期: 2024-08-11

作者简介: 宋学鹏 (2000—), 男, 硕士, 研究方向为港口高桩码头岸坡位移及地下水。

近几十年来，随着我国港口水运工程的快速发展，高桩码头的建设取得了显著成果。与此同时，码头岸坡失稳现象时有发生。目前，国内外已经发生多起海岸岸坡失稳案例^[1-3]，其中海底滑坡、海床液化及码头后方堆场荷载等因素是引起码头岸坡失稳的主要原因。因此，岸坡失稳机理的研究已成为海洋岩土工程领域关注的重点^[4]。

目前，国内外已有研究探讨了岸坡失稳的成因。孙鸿程等^[5]采用浅地层剖面探测方法，李九乾等^[6]通过极限平衡力学分析方法，分别研究了海底滑坡对港口码头桩基、海堤等海岸工程设施可能造成的威胁。波浪引起的海床液化是海床稳定性问题中常见的破坏形式^[7]，黄光爵等^[8]通过解析表达式和 FLAC(连续介质力力学分析软件，fast lagrangian analysis of continuum)数值模拟方法探究了海床剪切破坏和液化的成因及影响，提出波浪引起海床液化，进而导致土体滑移，对海床和海上建筑物的稳定性产生影响^[9]。丁琮^[10]采用三维数值仿真技术，赵迪^[11]使用大型室内物理试验模型，李忠诚等^[12]采用有限元的方法，分别对码头后方堆载作用下的岸坡位移与桩基相互作用进行探索性研究，提出准确估算荷载带来的横向挤压力对于高桩码头的长期稳定使用至关重要。Liang 等^[13]采用自主研发的海洋沉积物变形监测原位观测系统，对海底边坡进行为期 75 d 的观测，成功获取不同深度沉积物的横向变形数据。吴刚等^[14]通过埋设 ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯的三元

共聚物，acrylonitrile butadiene styrene)测斜管，并采用测斜仪采集深层土体的水平位移数据，得出高低潮位对岸坡稳定性存在一定影响的结论。

现有研究主要通过数值模拟和物理试验探讨岸坡失稳的原因及影响，对码头现场实测数据的研究相对较少。部分研究采用了原位监测方法，但监测时间普遍较短，难以获得长期数据。为更深入地理解和分析岸坡软土的位移特征，本文以宁波某码头为主要研究对象，采用柔性测斜仪和应力片长时序监测系统，建立现场地质模型及数值模型的方法，探讨高桩码头堆场荷载和码头清淤周期对岸坡软土位移的影响。通过准确预估岸坡位移量，减少其对高桩码头结构带来的潜在风险，研究结果将为港口工程提供数据支持和技术指导。

1 工程概况

码头位于我国海岸线中端，长江三角洲南翼，属于淤泥质海岸高桩码头，见图 1。其地貌类型为山前海积地貌，可分为潮间带(滩涂)和水下岸坡。码头西南部有一条穿山水道，码头后方为砂岩性山体。该区域潮汐性质属非正规半日潮。落潮历时略长于涨潮历时，平均潮差 2.0 m，最大潮差 3.6 m，多年平均潮位 0.32 m(1985 国家高程)^[15]，最高高潮面 2.15 m，最低低潮面 -1.52 m。涨潮流速 1.01 m/s，落潮流速 1.40 m/s。年平均波高 0.2 m，最大波高 1.7 m。冬季含沙量约 0.04 kg/m³，夏季约 0.1 kg/m³。

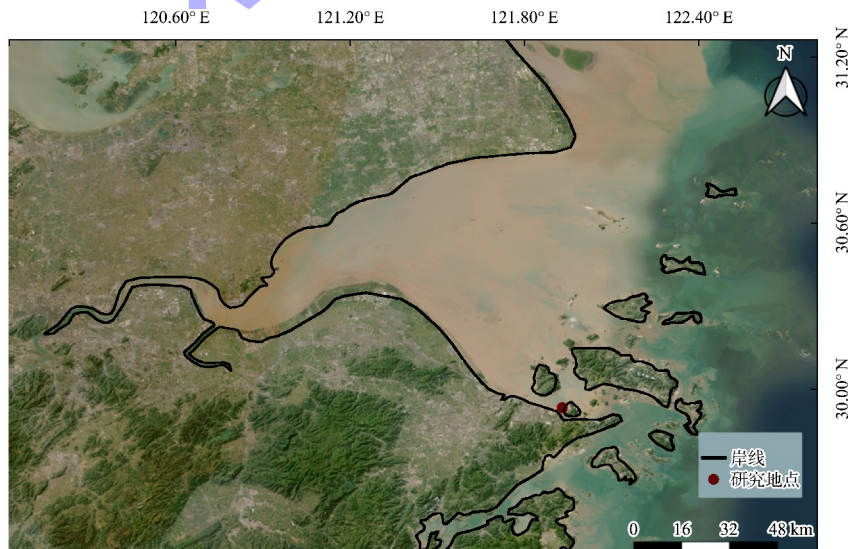


图 1 地理位置
Fig. 1 Geographical location

在码头区域, 将场地勘探深度内土体划分为7个工程地质层, 垂直从上到下依次为: 回填层、淤泥层、流塑黏土、软塑黏土、高风化砂岩、硬塑黏土和灰岩, 其中淤泥层土层厚度约3 m。

2 现场监测方法

2.1 监测内容

通过对码头进行历史数据收集, 结合码头回淤厚度监测数据和港口现场调研结果, 识别出码

头淤积最严重区域的清淤前地形、水文以及桩群分布特征。码头下方的泥沙回淤厚度从4#泊位到1#泊位逐步减少, 2#与3#泊位均为大泊位, 其中2#泊位的桩基损伤更严重。本研究在2#泊位开展现场监测, 仪器安装设置5个监测点位, 其中1、2、4号点位在同一水平方向上, 其余2个监测点作为对照试验, 5个监测点的位置及仪器长度见图2。

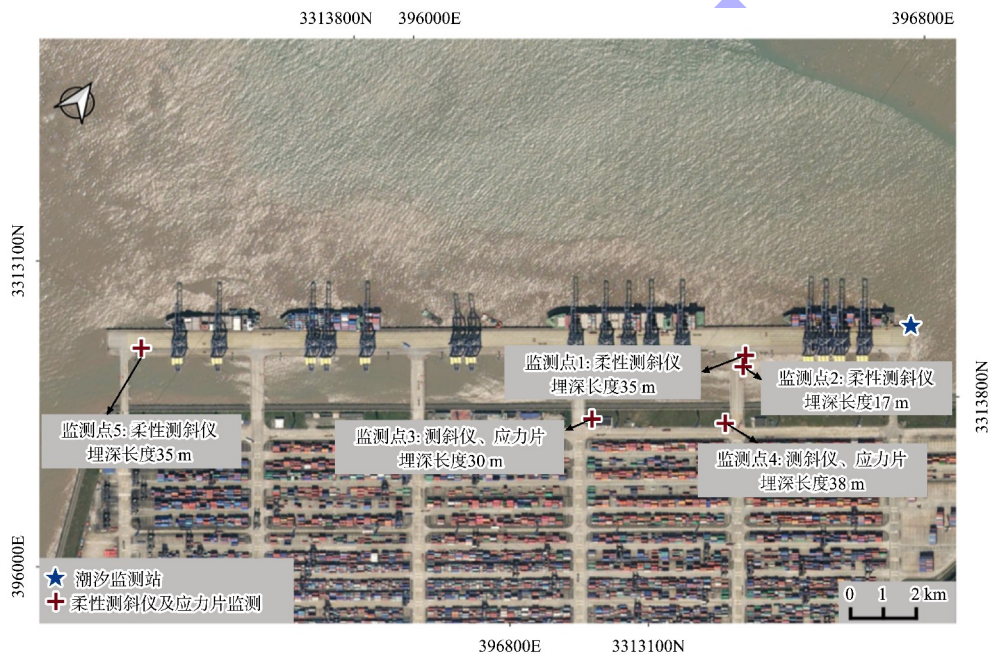


图2 岸坡位移传感器平面布置
Fig. 2 Layout plan of bank slope displacement sensors

2.2 现场测量

根据工程及桩基损伤的实际情况, 在2#泊位的同一横向剖面上, 利用工程钻探机布置了3根测斜管, 管内安装有柔性测斜仪(图3)。其中, 监测点1和2位于码头下方, 水上区段约10 m处采用钢套管进行保护, 以防止海上风浪的破坏; 监测点4设置在码头岸坡, 采用柔性测斜仪与应力

片联合测量方法。每根测斜管的设计孔深约35 m, 但由于监测点2位置泥层中含有抛石, 钻孔深度17 m。通过该监测方法, 可以对码头岸坡在水平及垂直方向上的土体深浅层形变位移、不同深度的土应力变化以及孔隙水压力变化等因素进行长期连续监测, 旨在探究堆场荷载及码头清淤周期对岸坡土体位移特征的长期影响。

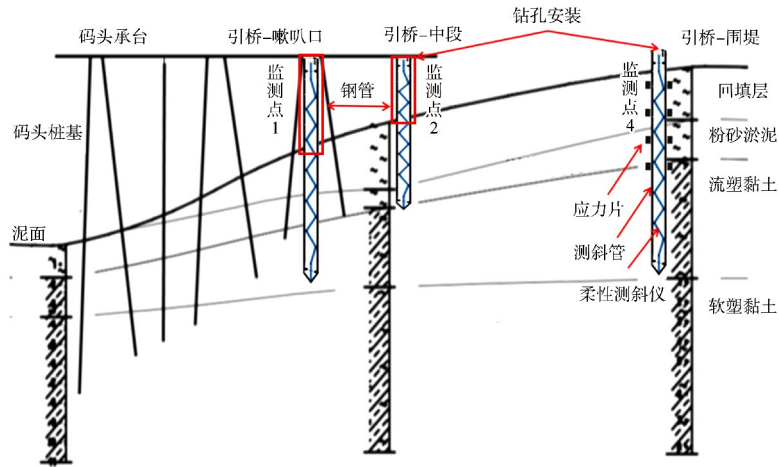


图 3 岸坡位移传感器剖面布置

Fig. 3 Profile layout of bank slope displacement sensors

2.2.1 柔性测斜仪的安装

柔性测斜仪(图 4)装置使用一组密实的阵列,即微机电系统(micro electromechanical system, MEMS)。经过验证的模型计算程序和 MEMS 测量 2D、3D 变形值,通过计算加速度推出位移变化量,通过综合采集器采集柔性测斜仪位移数据。

柔性测斜仪的安装步骤:装置安装前需完成系统的整体测试工作,准备好辅助设备。将设备搬运至 ABS 测斜管管口附近,展开释放设备本身的扭转力。将设备从固定支架上拆下并平铺展开,检查设备的外观和 MARK 线方向,需要现场拼接设备,拼接完成后可用防水胶带保护接头部分。柔性测斜仪的首节导轮固定好牵引钢丝绳后,沿着 ABS 测斜管的待测导向槽(朝海)方向下放,注意 X-MARK 线方向朝向测斜管待测变形方向。安装下压杆,将柔性测斜仪固定在 ABS 测斜管中。最外层使用 316 L 的钢管和支架保护,以防止岸边海上漂浮物和风浪台风的破坏。最后连接电缆,进行仪器的校准。



a) 柔性测斜仪



b) 应力片

图 4 柔性测斜仪及应力片

Fig. 4 Flexible inclinometer and stress sensor

2.2.2 水动力监测仪器

应力片采用 HC-16 微型应力传感器和 HC-25 微型孔隙水压力传感器,通过采集箱收集数据,共设置 2 个监测点位,埋深每隔 5 m 设置 1 个监测点,根据需求在 ABS 测斜管的不同高度处(埋深 5、10、15 和 20 m)进行标记。

采用专用胶水 H-613 粘贴应力传感器和孔隙水压力传感器于标记处,用胶带捆裹应变片固定位置;然后用电工胶布将应变片及引线固定在 ABS 测斜管上;最后用防水胶带将引线另一端的接电位置缠住,为防止进水坏掉在标记处固定应

力片。通过采集箱收集数据, 以无线的方式将连续的监测数据传送到监测云平台。潮汐水位监测位置在码头的最外侧, 主要监测在不同潮汐(如大潮、风暴潮等)的潮位变化(高潮位、低潮位及平均潮位)。安装方式见图 5。

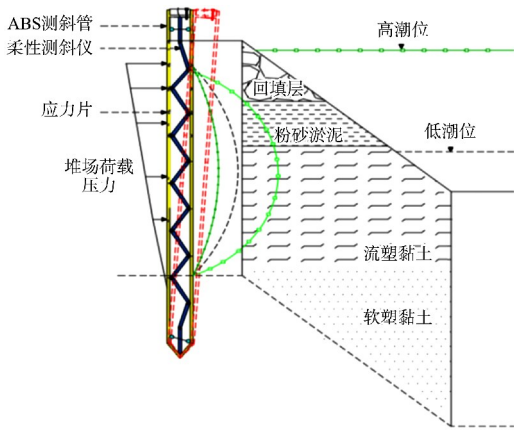


图 5 柔性测斜仪及应力片安装机理

Fig. 5 Installation mechanism of flexible inclinometers and stress sensors

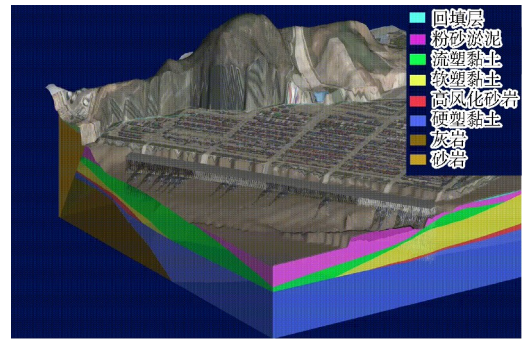
2.3 现场监测数据采集

柔性测斜仪、潮汐监测站及地下水压力传感器均采用无线方式将采集的数据上传到监测云平台, 其中测斜仪共 5 个监测点位, 测量不同埋深的土体位移, 其中孔位每 1 m 采集土体位移数据。监测仪器采集数据频率均为 15 min/次, 目前仪器持续监测时间已有 1 a(2023 年 1—12 月)的数据量。

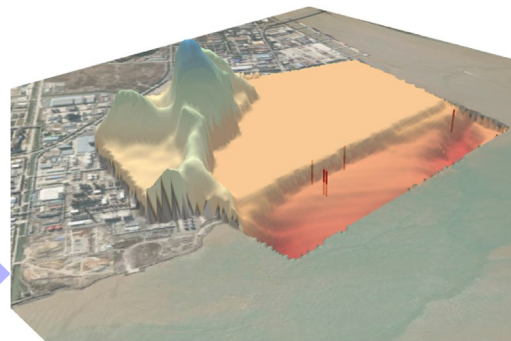
2.4 现场三维地质模型

建立模型需要大量的水文地质数据与参数, 收集整理码头水文、地质资料等, 整理码头前方、下方和后方淤积前后的水深数据; 码头周围水域的水流、波浪、潮汐数据。

根据 181 个钻孔数据, 导入建模软件中, 利用球面插值函数建立码头三维地质模型见图 6, 可以看到现场由上到下地层岩性分布特征以及 5 个监测点位的三维空间分布, 此模型用于分析三维立体示意承台下 1 800 余根桩及后方堆场地质分布条件。



a) 现场水文地质



b) 监测点位三维空间分布

图 6 现场水文地质模型

Fig. 6 Hydrogeological model on site

3 结果和讨论

3.1 潮汐波动分析

码头潮汐监测设备数据结果显示, 研究区域潮汐性质属半日潮, 每日有 2 个极值点, 在 2 个月期间平均潮位稳定在 0.32 m, 最高潮面 2.15 m, 最低潮面 -1.515 m。利用 MATLAB 调和分析^[16]最小二乘法对 2 个月的潮汐数据展开分析, 各分潮对应的角频率、振幅和迟角见表 1。其中全日潮族代表性分潮为 K1, 周期为 23.93 h; 半日潮族代表性分潮为 M2, 周期为 12.42 h; 四分之一日潮族代表性分潮为 M4, 周期为 6.21 h。

表 1 调和分析各分潮结果

Tab. 1 Harmonic analysis results of individual tidal constituents

潮汐	频率/ Hz	振幅/ m	迟角/ (°)	潮汐	频率/ Hz	振幅/ m	迟角/ (°)
M2	0.081	0.936	214.380	M3	0.121	0.014	52.900
2Q1	0.036	0.017	187.670	MK3	0.122	0.016	95.440
Q1	0.037	0.030	239.880	SK3	0.125	0.005	283.280
O1	0.039	0.233	207.700	MN4	0.160	0.023	325.190
NO1	0.040	0.015	67.820	M4	0.161	0.087	289.510
K1	0.042	0.362	59.310	MS4	0.164	0.061	59.590

3.2 潮汐作用下孔隙水压力振荡

图 7 为 4 号监测点在 1 个月内的应力片数据与潮汐数据的对比结果，绘制了埋深 10、15、20 m 的监测数据及潮汐数据。随着深度增加，孔隙水压力的振幅减小，表明潮汐影响在垂直方向上逐渐减弱。当潮汐水位上升时，地下水位上升，增加

孔隙水压力；相反，潮汐水位下降时，地下水位下降，孔隙水压力也随之下降。图 7 还可以看出孔隙水压力随潮汐信号呈规律性波动，且潮汐信号传递存在明显滞后，从浅层逐渐传递到深层，滞后时间约为 100 min。

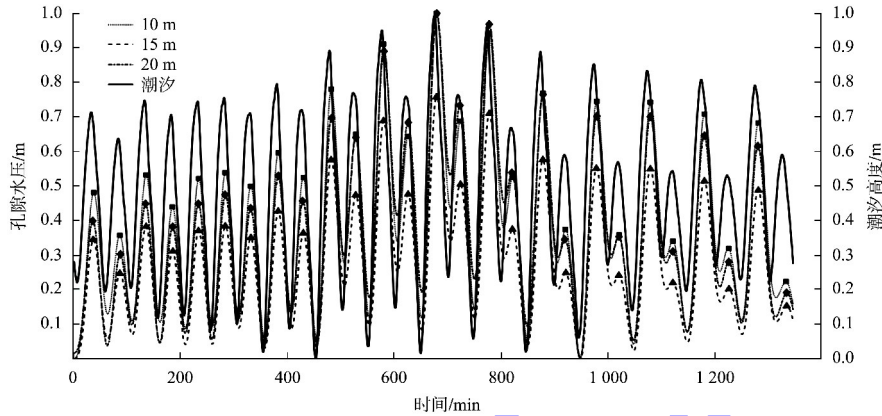


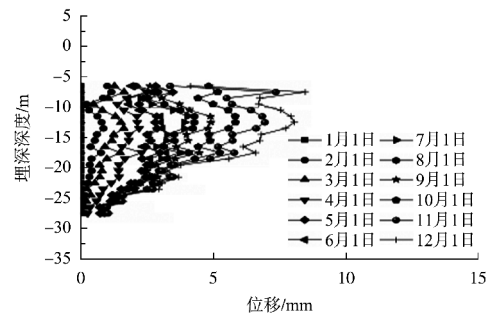
图 7 孔隙水压与潮汐对比
Fig. 7 Comparison between pore water pressure and tides

3.3 码头堆载及清淤作用下海岸横向位移

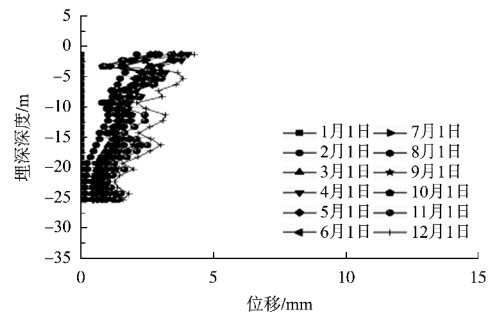
岸坡累计位移量见图 8，统计了 5 个监测点位测斜仪合位移的数据，每间隔 1 个月监测并计算 1 次数据(2023 年 1 月 1 日—12 月 1 日)，可以看出岸坡位移逐渐增大，其中 4 号监测点位位移最大，超过了 10 mm，1 号点位位移也接近 10 mm。这表明，海岸在长期荷载的作用下，侧向位移不断增大，位移达到一定的程度就会破坏码头的结构，进而影响到桩基的使用寿命。

5 号监测点位，表层为淤泥质黏土，位移量波动较大，随着深度增加，位移量及位移速率逐渐减少。

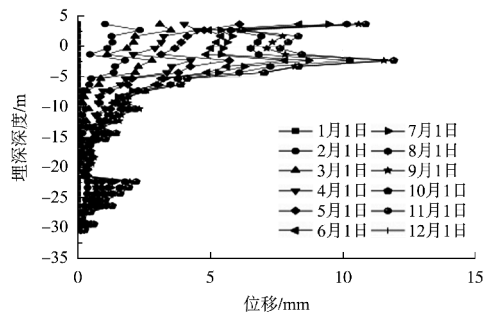
对 4 个监测点位(2022 年 12 月—2024 年 4 月)在不同深度(埋深分别为 5、10、15、20 m)的岸坡土体位移量及位移速率数据进行整合分析，见图 9。由于信号原因，数据偶尔会有缺失，因此对位移数据进行了 15 min 间隔的线性插值，以确保位移速率计算的准确性。结果表明：在岸坡上的 3 号和 4 号监测点位，位移量随埋深增大呈梯度递减，且位移速率依次减小；在码头下方的 1 号和



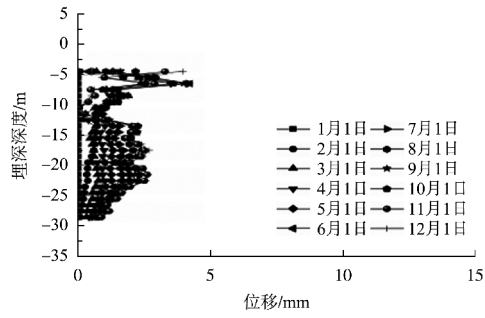
a) 1号点位



b) 3号点位



c) 4号点位

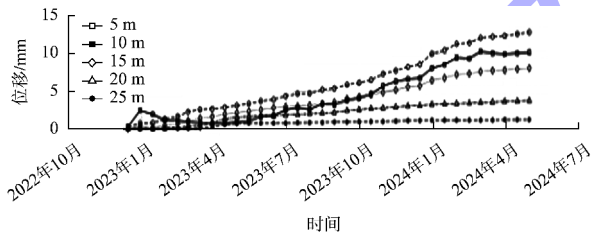


d) 5号点位

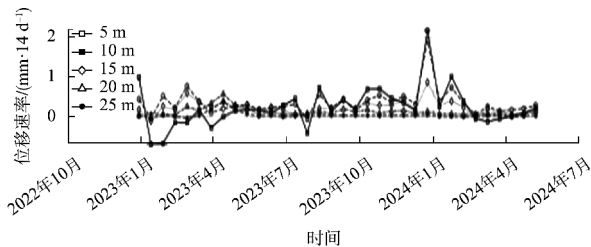
注: 采用 1985 国家高程。

图 8 岸坡总体位移

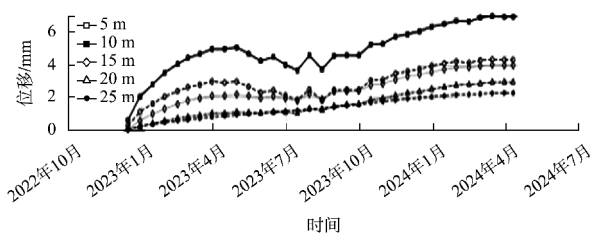
Fig. 8 Overall displacement of bank slope



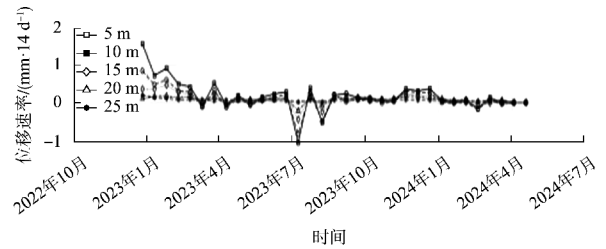
a) 1号点位移



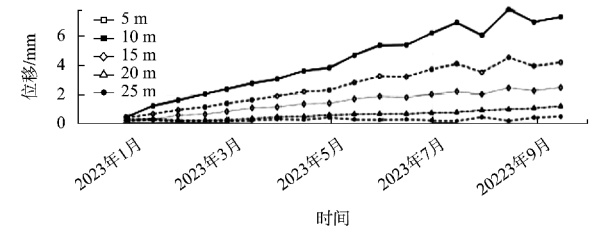
b) 1号点斜率



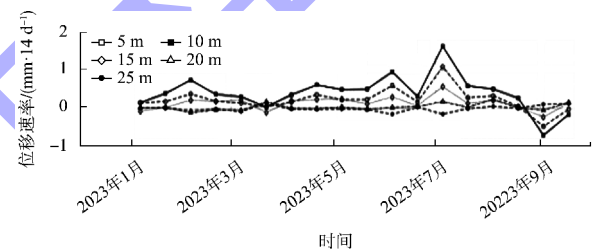
c) 3号点位移



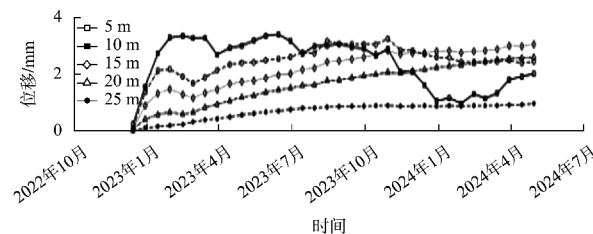
d) 3号点斜率



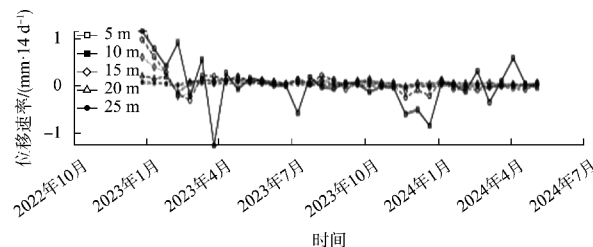
e) 4号点位移



f) 4号点斜率



g) 5号点位移



h) 5号点斜率

图 9 岸坡土体不同深度位移及位移速率

Fig. 9 Displacements and displacement rates of bank slope soil at various depths

根据码头提供的清淤周期(8月—11月中旬), 对海岸侧向位移速率在清淤前、中、后进行分析,

见表2。计算了清淤前8个月、清淤中4个月及清淤后4个月的平均位移速率，结果表明：位于码头下方的1号监测点位，清淤后的平均位移速率大于清淤过程中及清淤前的平均位移速率；位于岸坡的3号和4号监测点位，清淤后的平均位移速率小于清淤过程中及清淤前的平均位移速率；5号监测点位未进行清淤，位移速率没有显著变化。由结果可以看出，清淤周期对码头下方的土体位移影响较大，且表层的位移速率较大。

表 2 清淤周期位移速率变化
Tab. 2 Variation in displacement rates during dredging cycles

点位	深度	位移速率/(mm·月 ⁻¹)		
		清淤前	清淤中	清淤后
1号点	表层	0.037	0.367	0.399
	中层	0.295	0.356	0.490
	底层	0.199	0.231	0.269
3号点	表层	0.261	0.284	0.124
	中层	0.137	0.225	0.089
	底层	0.130	0.178	0.082
4号点	表层	0.530	0.296	0.014
	中层	0.303	0.167	0.012
	底层	0.166	0.082	0.011
5号点	表层	0.172	0.064	0.040
	中层	0.141	0.102	0.031
	底层	0.056	0.013	0.007

为了检验堆载作用下岸坡土体位移实测数据的准确性，基于码头的现场地质模型，使用 Biot 孔隙弹性模型进行反向建模，在码头的1号和4号点进行剖切，见图10。模型顶部边界位于地表回填层3.7 m处，底部边界设置在灰岩层底部-200 m处，并设置与研究现场的仪器埋深一致的探针点，模型长度定义为码头前沿到堆场后方共800 m；堆场部分设置荷载(根据码头资料集装箱向下的荷载为0.08 m/a)，模型被假设为均质和各向同性的多孔介质。

模型在2个监测点位(1号和4号)处与现场位置完全吻合，图11模拟了堆场荷载影响下不同深度(5、10、15和20 m)的岸坡土体位移量，采集间隔为15 min，模拟时间为400 d。结果显示：靠

近堆场的4号点，浅层土体位移量约为14 mm，深层约为9 mm；1号点浅层位移量约为11 mm，深层约为8 mm。由此可见，在堆场荷载持续作用下，沿海岸坡土体向海侧的位移变形量随时间推移呈递增趋势，模拟结果与实测数据基本吻合。

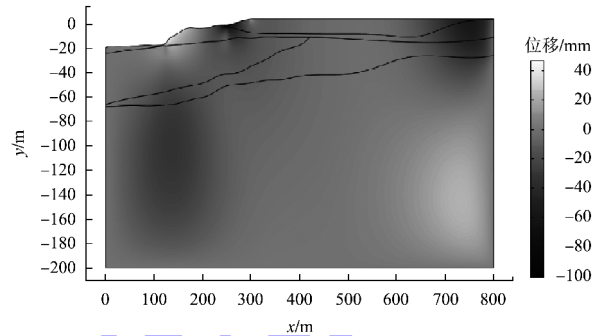


图 10 岸坡土体剖面位移场分布模型
Fig. 10 Profile distribution model of displacement field in bank slope soil

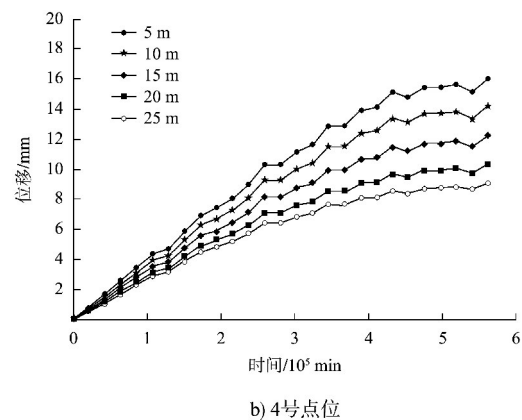
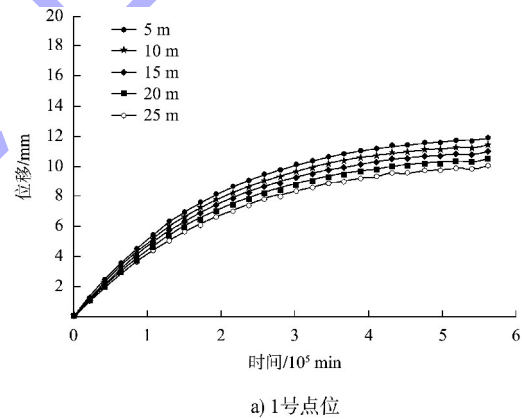


图 11 模拟堆场荷载影响下监测点位位移
Fig. 11 Displacement of monitoring points under effect of simulated yard load

4 结语

1) 应力片与柔性测斜仪联合测量的方法能够对码头岸坡位移及应力变化进行准确的长时序监测。通过对岸坡位移量的精准监测,有助于预防高桩码头桩基受损的风险。

2) 海岸孔隙水压力随潮汐的涨落呈现周期性波动,且之间存在传递规律。在涨潮时,土体的地下水位上升,增加了土体内部的孔隙水压力,导致土体颗粒的有效应力减小。反之,在退潮时,土体的地下水位降低,有效应力增大。这种潮汐传递过程存在一定的滞后性。

3) 在堆场荷载的作用下,海岸土体的位移量向海侧方向逐渐增大,位移量随埋深增大呈递减趋势。在码头清淤前后,码头下方位移速率存在显著差异,清淤后的平均位移速率大于清淤过程中及清淤前的平均位移速率;而距离清淤较远的岸坡及未进行清淤的码头下方在清淤周期内没有显著变化。

参考文献:

- [1] SULLIVAN R A. Behavior of wharf affected by river fluctuations [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1972, 98(9): 939-954.
- [2] THOMAS J E, MORIN W J. Wharf movements due to tidal fluctuations[C]//Geotechnical Measurements. Proceedings of sessions of Geo-Denver 2000, New York: ASCE Press, 2000: 109-125.
- [3] 田双珠,张勇,李越松.天津港高桩码头岸坡变形规律研究[J].水道港口,2006,27(3):180-184.
- TIAN S Z, ZHANG Y, LI Y S. Study on deformation of a high-pile wharf slope from field observation[J]. Journal of waterway and harbor, 2006, 27(3): 180-184.
- [4] JYE L L, KANIRAJ S R, TAIB S N L. Effect of tidal fluctuation on ground movement and pore water pressure[C]//Tunneling and Underground Construction. Proceedings of the Geo-Shanghai 2014 International Conference, New York: ASCE Press, 2014: 35-44.
- [5] 孙鸿程,蔡廷禄,夏小明,等.舟山六横岛海域浅部地层结构与水下滑坡分布特征[J].海洋学研究,2019,37(1):59-66.
- SUN H C, CAI T L, XIA X M, et al. Distribution characteristics of subaqueous landslides in the sea area of Liuheng Island, Zhoushan [J]. Journal of marine sciences, 2019, 37(1): 59-66.
- [6] 李九乾,何元勋.川北某码头工程后缘滑坡机理及治理措施[J].水运工程,2023(S1):150-155.
- LI J Q, HE Y X. Mechanism and treatment measures of landslide at back edge of wharf project in northern Sichuan [J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 150-155.
- [7] ZHOU M Z, QI W G, JENG D S, et al. A non-Darcy flow model for a non-cohesive seabed involving wave-induced instantaneous liquefaction [J]. Ocean engineering, 2021, 239: 109807.
- [8] 黄光爵,郑永来,武伯弢.波浪作用下可液化海床最大液化深度[J].地震工程与工程振动,2012,32(5):146-151.
- HUANG G J, ZHENG Y L, WU B T. The maximum liquefaction depth of liquefiable seabed under wave loading [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2012, 32(5): 146-151.
- [9] 韩涛,张庆河,张金凤,等.波浪作用下砂质海床最大液化深度[J].中国港湾建设,2006,26(2):27-28.
- HAN T, ZHANG Q H, ZHANG J F, et al. Maximum liquefaction depth of sandy seabed under waves [J]. Chinaharbour engineering, 2006, 26(2): 27-28.
- [10] 丁琼.后方堆载作用下高桩码头变形研究[D].天津:天津大学,2010.
- DING Q. Analysis of the deformation of high-pile wharf under the effect of rear yard load [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [11] 赵迪.库岸砂泥岩填方区框架码头桩基受力特性模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- ZHAO D. Simulation research on stress characteristics of wharf frames pile foundation in sandstone-mudstone filled location at reservoir bank [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [12] 李忠诚,朱小军.地面超载条件下土体侧移模式及对邻近桩基影响分析[J].岩土力学,2007,28(S1):809-814.
- LI Z C, ZHU X J. Soil lateral mode and numerical analysis of pilefoundataion subjected to adjacent

surcharge loads [J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(S1): 809-814.

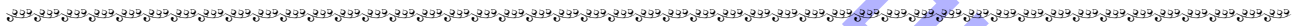
[13] LIANG T Y, XUE L, HOU Y K, et al. Research on deformation of submarine slope in Zhoushan Islands by in-situ observation [J]. E3S web of conferences, 2021, 261: 03015.

[14] 吴刚, 陈柏州. 潮位涨落对岸坡深层土体水平位移的影响[J]. 天津建设科技, 2018, 28(1): 51-54.
WU G, CHEN B Z. Effect of tide fluctuations on horizontal displacement of deep slope soils [J]. Tianjin construction science and technology, 2018, 28(1): 51-54.

[15] CHEN Y J, YIN M Y, ZHONG L F, et al. Analysis of the current navigation environment and Countermeasures in the northern waters of Zhoushan [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Science and Material Application (ESMA). Xi'an: IOP Publishing, 2020, 440(5): 052092.

[16] PAN H D, LV X Q, WANG Y Y, et al. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia River Estuary using S₂-TIDE [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(9): 6598-6619.

(本文编辑 赵娟)



(上接第 34 页)

[4] 郑洁, 柳存根, 林忠钦. 绿色船舶低碳发展趋势与应对策略[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 94-102.
ZHENG J, LIU C G, LIN Z Q. Low-carbon development of green ships and related strategies [J]. Strategic study of CAE, 2020, 22(6): 94-102.

[5] 石慧, 张彦, 袁成清, 等. 内河船舶绿色化评估体系及评估方法研究[J]. 中国航海, 2024, 47(1): 131-138.
SHI H, ZHANG Y, YUAN C Q, et al. On assessment system for examining inland ship greenization level and its application [J]. Navigation of China, 2024, 47 (1): 131-138.

[6] 贺林林, 金勇, 彭银霞, 等. “双碳”背景下国内外绿色港口建设发展综述[J]. 水运工程, 2024(7): 42-50, 67.
HE L L, JIN Y, PENG Y X, et al. Review of green port construction and development under carbon peaking and carbon neutrality goals background [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 42-50, 67.

[7] 胡海龙, 陈思卉, 罗俊懿. “碳达峰碳中和”背景下绿色低碳港口建设策略研究 [J]. 交通企业管理, 2024, 39(2): 3-6.
HU H L, CHEN S H, LUO J Y. The green and low carbon port construction strategies under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Transportation enterprise management, 2024, 39(2): 3-6.

[8] 李海波. 港口碳达峰碳中和实现路径[J]. 中国港口, 2022(2): 5-9.
LI H B. Realization path of carbon neutralization in port peak carbon dioxide emissions [J]. China ports, 2022(2): 5-9.

[9] 张宜民. 港口行业实现碳达峰与碳中和目标的挑战及对策[J]. 中国港口, 2021(10): 16-19.
ZHANG Y M. Challenges and countermeasures for port industry to achieve peak carbon dioxide emissions and carbon neutralization [J]. China ports, 2021(10): 16-19.

[10] 蔡健哲, 徐言民, 金其强, 等. 长江武安段航道整治工程绿色施工评价指标体系研究 [J]. 水运工程, 2024(10): 98-103.
CAI J Z, XU Y M, JIN Q Q, et al. Green construction evaluation index system for waterway regulation project in Wuhan-Anqing section of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 98-103.

[11] 高超, 陈刚, 文训科, 等. 四川省适水货物“公转水”运输的经济性[J]. 综合运输, 2023, 45(8): 134-139, 151.
GAO C, CHEN G, WEN X K, et al. On the economy of “highway transportation to shipping” for water-suitable cargos in Sichuan Province [J]. China transportation review, 2023, 45(8): 134-139, 151.

(本文编辑 王传瑜)