



长期服役高桩码头岸坡-结构体系 侧向变形实测与数值模拟^{*}

赵驰宇¹, 李雨润¹, 戴启权², 李海峰³

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300400; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
3. 天津港远航国际矿石码头有限公司, 天津 300452)

摘要: 长期服役高桩码头的侧向变形会导致桩顶变位, 进而影响桩帽与横梁之间的连接, 使得码头的工程安全处于危险状态。依托天津港某长期服役码头, 开展结构位移和地基深层土体水平位移长期监测, 在监测结果的基础上开展数值模拟分析, 研究长期服役高桩码头岸坡-结构体系在蠕变影响下土体水平位移、沉降以及桩身水平位移、沉降等相应规律, 并且研究岸坡后方不同填土厚度对岸坡-结构体系侧向变形的影响。结果表明, 土体蠕变是长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形的一个重要因素, 土体的蠕变变形主要集中于后方堆场沉降和坡面表层淤泥质黏土的竖向位移。岸坡土体的蠕变速率随时间增大而减小。桩身的竖向位移从桩顶到桩底不断减小; 码头结构的受力最不利位置处于桩顶附近, 各排架桩基在水平位移方面差异明显, 越靠内侧越大。随着填土厚度不断增大, 岸坡-结构体系侧向变形不断增大。

关键词: 高桩码头; 岸坡; 长期服役; 土体蠕变; 位移; 现场实测; 数值分析

中图分类号: U 656. 1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0063-08

Lateral deformation measurement and numerical simulation of slope-structure system of high pile wharf in long-term service

ZHAO Chiyu¹, LI Yurun¹, DAI Qiquan², LI Haifeng³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China;
2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;
3. Tianjin Port Yuanhang International Ore Terminal Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The lateral deformation of a long-term service high pile wharf leads to pile top dislocation, which affects the connection between the pile cap and the crossbeam, and put the engineering safety of the wharf in a dangerous state. Based on a long-term service wharf in Tianjin port, we carry out the long-term monitoring of structural displacement and deep soil horizontal displacement, and conduct the numerical simulation analysis based on the monitoring results to study the corresponding laws of soil horizontal displacement and settlement and pile horizontal displacement and settlement of the slope-structure system of long-term service high pile wharf under the influence of creep, and study the influence of different fill thickness behind the slope on the lateral deformation of the slope-structure system. The results show that soil creep is an important factor influencing the lateral deformation of the slope-structure system of the high pile wharf in long-term service, and the creep deformation of the soil is mainly concentrated in the settlement of the rear yard and the vertical displacement of the silty clay on the surface of the slope. The creep rate of the bank slope soil decreases with increasing time. The vertical displacement of the pile

收稿日期: 2023-10-18

*基金项目: 天津市交通运输科技发展计划项目(2022-43); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS20220102)

作者简介: 赵驰宇 (1996—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程岸坡变形研究。

通讯作者: 李雨润 (1978—), 男, 博士, 教授, 从事岩土工程桩基础抗震研究。E-mail: iemlyr7888@hebut.edu.cn

body decreases continuously from the top to the bottom of the pile; the most unfavorable position of the wharf structure is near the top of the pile, and the difference in horizontal displacement of each row of frame pile base is obvious, the more inward the pile is. With the increasing thickness of the fill, the lateral deformation of the slope-structure system increases continuously.

Keywords: high pile wharf; slope; long-term service; soil creep; displacement; on-site measurement; numerical analysis

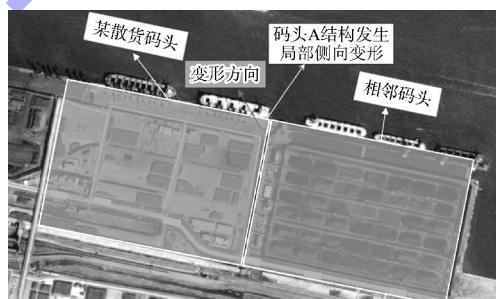
在软土层较厚的港区中高桩码头十分常见,随着长期的土体变形情况加持下,高桩码头一些桩基变为“被动桩”^[1],桩基的变位不断增大,影响桩帽与横梁之间的连接,对工程安全造成危害。随着我国经济飞速发展,各港口都出现了货物堆积量猛增的情况,因后方堆场荷载的长期施加和增大,岸坡土体变形持续增加,许多长期服役高桩码头出现桩帽与横梁发生较大错位和桩端向岸侧倾斜等破坏情况^[2]。这些对港口工程的使用安全造成不小的威胁,根据混凝土结构参数检测和变形监测结果,这些结构损伤主要是因土体蠕变变形导致桩基水平位移不断增大而长期积累,在船舶撞击等共同作用下出现桩基与桩帽连接处应力超出承受能力^[3]。虽然土体蠕变变形带来的错位问题没有船舶撞击等作用那么突然且危险,但其对高桩码头岸坡-结构体系变形的长期积累导致其性能受损的问题也非常值得关注和研究^[4-6]。

因此,研究在土体蠕变影响下高桩码头岸坡-结构体系的侧向变形规律,可为以后高桩码头设计中预防和降低土体蠕变影响提供科学的指导,并为岸坡加固和结构改造给予技术支持。本文以天津港某高桩码头为例,开展对高桩码头岸坡地基深层土体水平位移的长期监测,并对蠕变影响下高桩码头岸坡-结构体系进行数值模拟试验,通过现场监测数据与数值模拟相互对比研究,分析在蠕变影响下长期服役高桩码头岸坡土体的变形规律,并分析在岸坡土体蠕变变形下后方堆场上不同填土厚度对长期服役高桩码头结构侧向变形的影响。

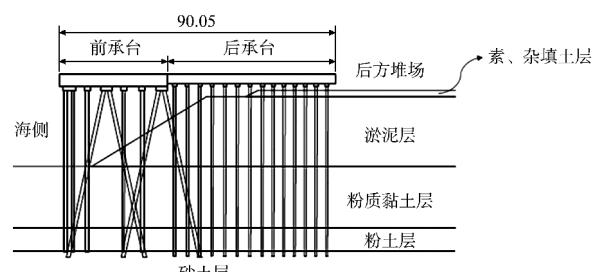
1 工程及水文地质概况

1.1 工程概况

本文研究的高桩码头采用连片式布置,岸线总长 375 m,码头顶面高程为 6.0 m;码头结构按 25 万吨级散货船舶设计,码头承台总宽 90.05 m,其中前、后方承台分别宽 35.00、55.05 m。前承台采用连续梁板式高桩承台结构,后承台采用预制安装预应力简支梁板的结构形式;共分为 7 个结构段,排架间距 6.5 m;每个排架前承台部分有 5 个直桩、4 个 3:1 斜叉桩,后承台部分有 14 个直桩。码头布置见图 1,码头结构断面见图 2。



a) 码头布置



b) 码头结构断面(单位: m)

图 1 码头布置及结构断面

此高桩码头已经服役近 20 年,其岸坡-结构体系的侧向变形情况日益显现,且已危害到港航工程安全。由图 1a) 可知,西侧区域是散货码头,

东侧也有相邻码头, 散货码头东侧连接段因后方长期堆载, 后方承台发生不均匀沉降和水平位移, 靠近挡土墙的后承台桩基出现了不同程度的变位情况, 并且变形还在逐渐增大, 已经威胁到整个码头岸坡-结构体系的使用安全。

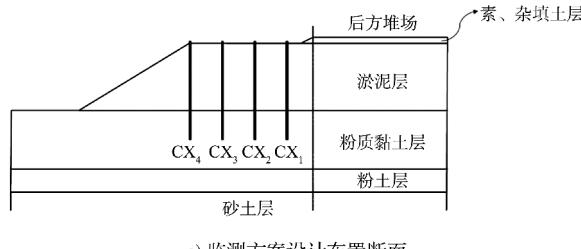
1.2 水文地质条件

天津地处我国渤海湾西岸, 沿海区域所处的地质年代为第四纪全新世新鲜层, 岸坡表层的数十米土层属于海相沉积和河口三角洲相冲积层^[7]。根据现场工程地质勘察报告显示, 从上至下的土层分布为: ①素填土、②淤泥或淤泥质黏土、③粉质黏土、④粉土、⑤粉砂。其中素填土、淤泥质黏土和粉质黏土主要分布在-30~0 m, 粉土和粉砂主要分布在软黏土层之下, 地质分层见图1b)。从水文地质条件可看出, 此码头岸坡-结构体系所处场地主要以软黏土为主, 其流变特性^[8]对于体系的影响需要十分关注。

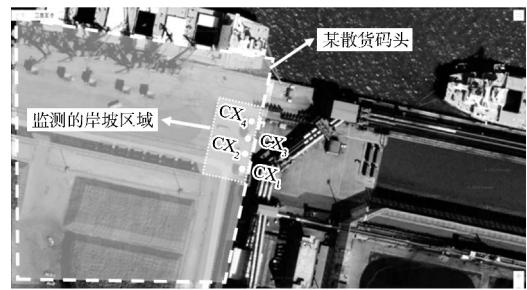
2 侧向变形监测方案及结果分析

2.1 土体深部位移监测布置

经过现场调查和研究, 此码头东侧连接段后方承台与散货码头发生肉眼可见的相互挤压情况, 在码头东侧连接段处, 设置4个测斜孔, 每个测斜孔间隔为11 m, 每个测斜孔有10个 x 方向角度传感器, 间隔为3 m, 测斜仪的监测精度为0.25 mm/3 m, 每日进行监测, 总监测时间为5年, 并记录数据; 依据JTS/T 312—2023《港口水工建筑物结构健康监测技术规范》^[9]和JTS 237—2017《水运工程地基基础试验检测技术规程》^[10], 本文对部分所得监测数据进行研究和分析, 获得一定的土体侧向变形规律。监测方案设计布置见图2。



a) 监测方案设计布置断面

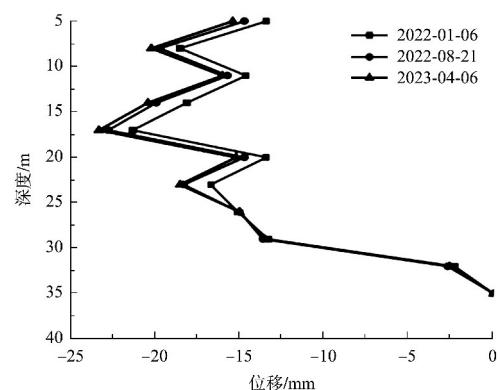


b) 测斜孔布置

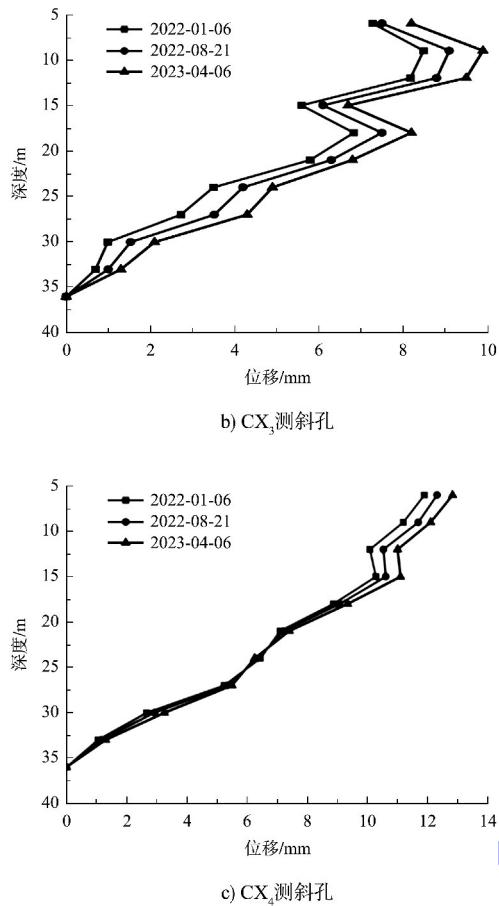
图2 监测方案设计及测斜孔布置

2.2 监测结果

CX_1 测斜孔在实际港口工程中遭到破坏, 获取的数据无法使用, 所以本文选取其余3个测斜孔 $CX_2\sim CX_4$ 的监测数据进行分析, 各测斜孔深度与侧向位移关系曲线见图3。可以看出, 岸坡土体在后方堆载等影响下发生了蠕变变形, 并且随着时间持续增大, 蠕变速率随着时间而不断减小; 土层深度为5~25 m的土体变形较大, 并且随时间推移, 蠕变变形速率也较其他范围土层大, 该范围内主要以淤泥质黏土(即软黏土)为主, 这体现了软黏土的“流变”特性, 土体的侧向变形才会随着时间而增大; 各深度土体的水平位移分布与实际桩身的水平位移分布类似, 这体现了高桩码头岸坡-结构体系整体分析的必要性; CX_2 与 CX_3 、 CX_4 的侧向位移方向不同, CX_2 处土体朝远离散货码头方向发生位移, CX_3 和 CX_4 则朝散货码头方向发生位移, 说明码头后承台正向旁边散货码头靠近, 这与实际工程情况连续段变形相吻合。



a) CX_2 测斜孔

图 3 CX₂~CX₄ 测斜孔深度与侧向位移关系曲线

总结上述监测数据可得出,长期服役的高桩码头岸坡-结构体系侧向变形主要是由土体蠕变变形导致的,且岸坡土体和结构的侧向变形还在持续,虽然速率在持续减少,但不可轻视,应该对长期服役高桩码头岸坡-结构体系进行加固或改造,加固和改造的方向重点应该放在如何减少土体蠕变变形对体系的影响或结构更能抵抗土体蠕变变形的影响。

3 数值模拟计算及分析

3.1 数值计算模型

根据地质勘察报告和工程设计图纸,本文基于有限差分软件 FLAC3D 建立高桩码头岸坡-结构段的三维数值分析模型,主要针对连续段处变形情况,选取此段进行分析,见图 4。

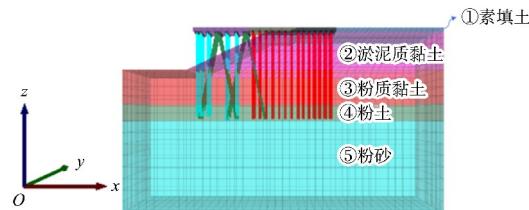


图 4 岸坡-结构体系有限差分模型

模型总长 188 m、宽 60 m、高 108.8 m, 码头结构段长 90 m、宽 18.4 m, 处于整体模型的中间位置; 码头结构模型分为前、后承台两部分, 前、后承台分别长 35、55 m, 结构共有 3 组排架, 每个排架设置 19 根直桩、2 对 3:1 斜桩, 每组排架码头结构中前、后承台和桩帽及岸坡土体采用三维实体单元(zone 单元)模拟, 码头桩基使用 FLAC3D 中结构单元(pile 桩单元)进行模拟。模型的边界条件设置为顶部不进行约束, 侧面 4 个方向以及底部都采用法向约束。

为了模拟土体的黏弹塑性特征, 土体的弹塑性变形阶段本构模型选用 Drucker-Prager 本构模型^[11], 其应力屈服轨迹采用下式计算:

$$f^s = \tau + q_\varphi \sigma - k_\varphi = 0 \quad (1)$$

其中:

$$q_\varphi = \frac{6 \sqrt{3}}{\sqrt{2 \sqrt{3} \pi (9 - \sin^2 \varphi)}} \sin \varphi \quad (2)$$

$$k_\varphi = \frac{6 \sqrt{3}}{\sqrt{2 \sqrt{3} \pi (9 - \sin^2 \varphi)}} c \cos \varphi \quad (3)$$

式中: σ 为法向应力; τ 为切向应力; q_φ 、 k_φ 为材料参数, 相当于 Drucker-Prager 模型中的摩擦角、黏聚力, 取值可以通过莫尔-库仑准则中相关参数调整计算得出; c 为莫尔-库仑准则中的黏聚力。

蠕变计算时使用的是 WIPP-Drucker 黏弹塑性模型, 这个模型可较为准确地表述沿海黏质土的黏弹塑特性; 其中 Drucker-Prager 与 WIPP-Drucker 本构模型的结合, 更能贴近土体实际的应力-应变-时间三者关系, 便于数值分析和模拟, 且结果较为科学和准确^[12]。

3.2 模型参数选取

结构尺寸参照工程设计图纸, 前后承台梁板、桩帽和桩基混凝土材料参数参照 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[13]取值。根据现场地质勘察报告, 模型土层可以粗略地划分为 5 层, 码头的表层土主要为素填土层和淤泥质黏土层, 深层主要为黏土层和砂土层。数值模型中各土层分布见图 4, 各土层的材料参数取值见表 1。

表 1 各土层物理力学参数指标

编号	土层	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)
①	素填土	1 800	25	0.25	26	22
②	淤泥质黏土	1 700	15	0.30	23	16
③	粉质黏土	2 000	58	0.25	21	20
④	粉土	1 400	10	0.35	10	25
⑤	粉砂	1 650	16	0.30	0	32

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[14]和实际情况, 码头上工作荷载, 例如机械荷载、车辆荷载和人行荷载等进行换算, 并且考虑到这些可变荷载的时空效应, 将准永久值系数定为 0.6。换算后的荷载组合为前承台部分 20 kPa 的均布荷载, 后承台部分为 50 kPa 的均布荷载; 后方堆载为 50 kPa 的均布荷载, 加载方式为逐级加载, 工况荷载设置见图 5; 计算时间为初始地应力平衡后的 365 d, 进行蠕变过程模拟计算。

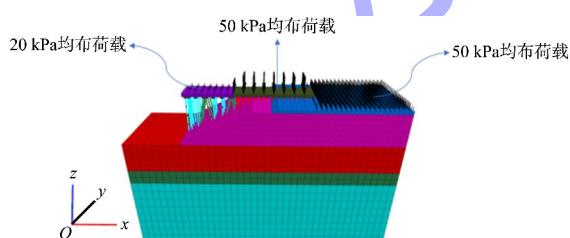


图 5 模型工况荷载布置

3.3 计算与监测结果对比与验证

岸坡土体水平位移计算值与监测值对比见图 6。可以看出, 因实际工程受人为、码头机械、车辆、时空效应等影响, 虽然岸坡土体水平位移计算结果与其监测值有一定的偏差, 但监测与计算结果的变化趋势基本一致。以上对比的结果说明, 在研究长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形时

考虑土体蠕变特性十分必要, 进而也说明模型建立、参数选取以及计算方法这些关键步骤合理, 计算结果可以较为准确地反映长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形的一般规律, 可以通过数值计算继续挖掘和分析现场实测数据不能反映的问题。

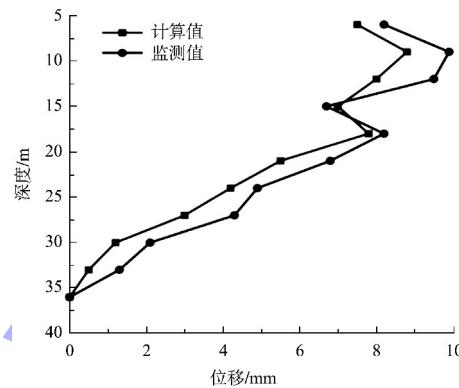
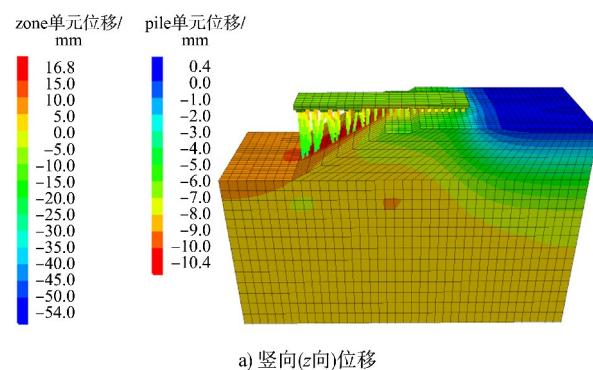


图 6 岸坡土体水平位移计算值与监测值对比

3.4 数值模拟结果分析

3.4.1 岸坡变形分析

蠕变作用下高桩码头岸坡-结构体系整体的竖向及侧向位移云图见图 7。可以看出, 后方堆场的竖向沉降和坡面向海侧水平位移为岸坡-结构体系在蠕变影响下的主要位移情况, 岸坡坡顶土体的竖向位移最大值达 54 mm, 侧向位移的最大值则为 60 mm。图 7b) 中岸坡土体表层的侧向位移较大, 流动趋势的起点在岸坡坡顶处, 向靠海侧方向的表层黏土层逐渐发展, 坡面的水平位移较大, 最大的侧向位移值达到了 150 mm, 岸坡表层土的“流变性”导致土体变形较大的情况, 体现出土体蠕变是长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形的一个重要影响因素。



a) 竖向(z向)位移

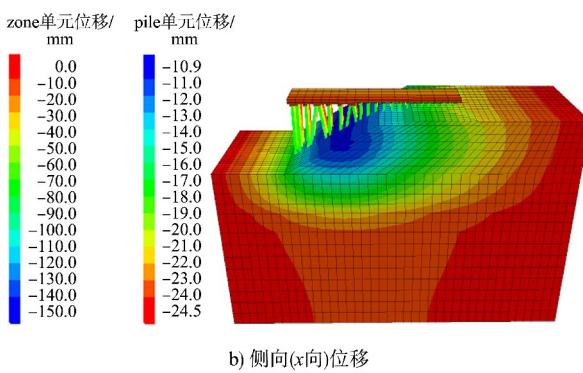


图 7 岸坡-结构体系竖向和侧向位移云图

从岸坡土体的竖向和侧向位移云图可以分析得出,在蠕变影响下,后方堆场处主要以竖向位移(变形)为主,岸坡整体呈斜向下的发展趋势,侧向位移主要发生在坡面和坡肩处的表面淤泥质黏土层。

具体分析岸坡土体在蠕变影响下侧向位移与时间之间的关系,岸坡土体侧向位移最大值处的水平位移-时间关系曲线见图 8。可以看出,在前期的 0~25 d,岸坡土体的侧向变形随着时间变化呈现出“指数型增长”的特征,随后侧向变形的增大趋势逐渐平缓,与本文采用的 WIPP-Drucker 黏弹塑性模型走势基本吻合,前期土体变形的速率较大,随着时间的增大,速率逐渐减小,但变形量一直呈现增长的趋势。

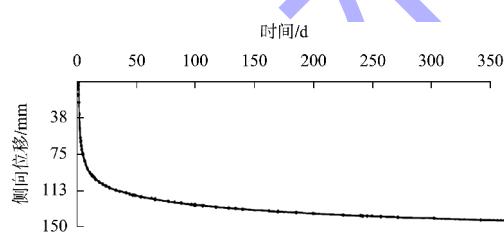


图 8 岸坡土体侧向位移最大值处的水平位移-时间关系曲线

3.4.2 桩基变形分析

岸坡土体蠕变变形对于高桩码头结构的影响,主要体现在桩基的受力和变形。本节主要分析蠕变影响下长期服役高桩码头桩基的具体变形情况及规律。

整体桩基的竖向位移云图见图 9a)。可以看出,不同排架桩顶的竖向位移有较大差异,内侧排架桩顶的竖向位移最大值达到 10 mm,大于外

侧排架的竖向位移最大值 7 mm;3 组排架桩顶的竖向位移最大值从内向外梯度下降,导致高桩码头两排桩之间横梁两端发生不均匀位移,进而影响码头的承载能力。

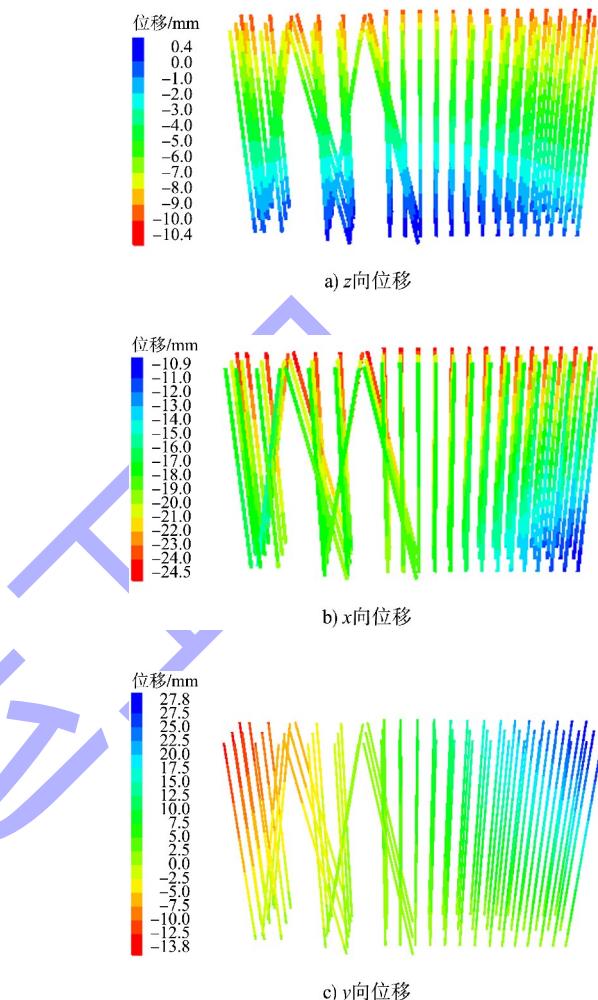


图 9 整体桩基位移云图

随着码头的服役时间不断增加(即蠕变影响时间不断增大),桩基的侧向位移也在不断增大。整体桩基的 x、y 向位移云图见图 9b)、c),与图 9a)进行对比分析,桩基的位移主要以水平和侧向位移为主,前承台各桩基整体 x 向位移较后承台大,主要区别在桩底位置,前承台桩底比后承台桩底多 15 mm,高桩码头前承台单桩水平位移从下往上逐渐增大,桩顶位移达到 25 mm;可以分析出因后承台后侧桩基埋入深度大,自由长度短,刚度较前承台桩基大,因此侧向位移小,但承受的弯矩较大;前承台桩基自由长度大,刚度较小,因此位移较大。岸坡-结构体系 y 向位移云图见图 10。由

图9c)和图10可以看出,后承台朝y轴正方向移动,前承台朝y轴负方向移动,这个情况也符合现场监测中本码头后承台部分向右侧向位移,在连接段处发生挤压和变形的工程状况,出现这种状况的原因是土体不同深度的侧向位移不同,且斜桩相同的扭转方向导致码头整体呈现朝一个方向旋转移动。

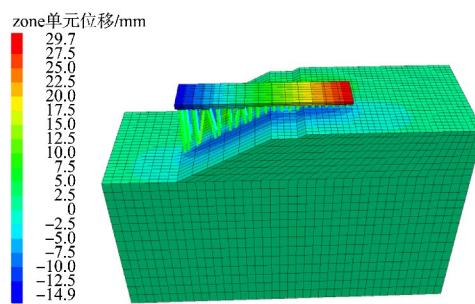


图10 岸坡-结构体系y向位移云图

由图9b)、c)可知,桩顶侧向位移大于桩身下部和桩底位移,这是由于桩身在软黏土层处(即土体蠕变变形较大处)发生弯曲,桩顶处为连接处,必定出现较大弯矩和应力集中现象,这表明在岸坡土体发生蠕变过程中,码头结构变形最大处出现在桩顶位置,而桩基的最不利位置处于淤泥层附近,该结果与高桩码头实际工程结构的破坏情况较为吻合,在以后码头结构改造研究时应充分考虑。

3.5 不同填土厚度对长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形的影响

在后方堆场的建设中,往往需要通过覆盖填土层来满足设计高程,但使用的填土性质和承载力与软黏土无异,其“流变特性”也会对高桩码头岸坡结构体系的侧向变形造成影响。因此,有必要对不同的填土厚度下长期服役高桩码头岸坡结构体系侧向变形影响进行分析。

本文设置3种工况进行对比分析不同的填土厚度下对长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形的影响,3种工况的素填土层厚度分别为0、2、4 m,蠕变时间为365 d。

前承台面板在不同填土厚度下侧向位移对比曲线见图11。可以看出,随着填土厚度的不断增大,高桩码头前沿面板的侧向位移逐渐变大,但

高桩码头岸坡-结构体系的侧向变形随时间变化的趋势几乎没有发生改变,还是一直增大,且速率不断减小。出现这样的情况主要原因是填土不断变厚,填土的性质与软黏土基本一致,一旦发生蠕变变形后,导致桩基受到更大的土压力,进而发生更大的侧向变形。因蠕变影响下的高桩码头岸坡-结构体系侧向变形不断增大,导致码头结构由于自身变形的内力积累不断增大,进而危害码头的正常使用。

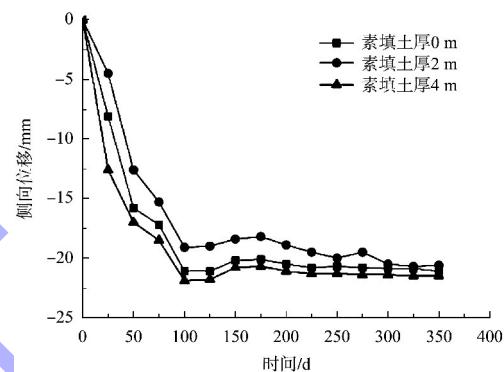


图11 前承台面板在不同填土厚度下侧向位移对比曲线

因此,虽然在码头规划设计中,表层使用填土满足设计高程不可避免,但从上述研究来看,根据实际需求尽量减小填土厚度,从而减小高桩码头岸坡-结构体系的侧向变形、减小高桩码头的累积应力;若无法在设计中减少其厚度,可以通过真空预压方法或者改变其填土性质等方法提高其承载能力,减少其蠕变变形对高桩码头岸坡-结构体系侧向变形的影响和危害。

4 结论

1) 通过监测数据结果分析可知,高桩码头岸坡-结构体系侧向变形随着时间逐渐增大,但速率逐渐减小,说明长期服役高桩码头岸坡-结构体系侧向变形主要是由土体蠕变变形导致的,应对土体蠕变特性重点关注。

2) 使用FLAC3D有限差分软件对在岸坡土体蠕变影响下长期服役高桩码头岸坡-结构体系的侧向变形进行数值模拟,将计算结果与监测数据进行了对比,结果表明:岸坡-结构体系侧向变形监测和计算结果的变化趋势基本一致。模型建立和

参数选取合理，通过数模计算进行深入分析、研究和预测可信且可靠。

3) 土体变形主要集中在后方堆场的竖向沉降、坡面表层淤泥质黏土水平位移和岸坡陡坡处侧向位移, 岸坡土体侧向变形随着时间不断推进呈现出类似“指数型”增大趋势, 变形速率随着时间增大不断减小。

4) 各排架桩基竖向位移(沉降)差异较大,且水平位移越靠内侧排架的桩基越大。在土体蠕变变形影响下,前后承台桩基侧向位移方向完全相反,土体不同深度的侧向位移不同,码头整体向斜杆的扭转方向旋转和移动。

5) 随着填土厚度不断增大, 岸坡结构体系侧向变形不断增大。应尽量减小其厚度, 或可以通过真空预压或者改变其填土性质等方法提高其承载能力, 进而提高码头岸坡-结构体系抗侧向变形能力。

参考文献：

参数选取合理,通过数模计算进行深入分析、研究和预测可信且可靠。

3) 土体变形主要集中在后方堆场的竖向沉降、坡面表层淤泥质黏土水平位移和岸坡陡坡处侧向位移,岸坡土体侧向变形随着时间不断推进呈现出类似“指数型”增大趋势,变形速率随着时间增大不断减小。

4) 各排架桩基竖向位移(沉降)差异较大,且水平位移越靠内侧排架的桩基越大。在土体蠕变变形影响下,前后承台桩基侧向位移方向完全相反,土体不同深度的侧向位移不同,码头整体向斜桩的扭转方向旋转和移动。

5) 随着填土厚度不断增大,岸坡结构体系侧向变形不断增大。应尽量减小其厚度,或可以通过真空预压或者改变其填土性质等方法提高其承载能力,进而提高码头岸坡-结构体系抗侧向变形能力。

参考文献:

- [1] 魏汝龙,王年香,杨守华.桩基码头与岸坡的相互作用[J].岩土工程学报,1992(6):38-49.
- [2] 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(3):180-184.
- [3] 刘现鹏,韩阳.软基上高桩码头结构节点破坏机理及演化研究[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2015.
- [4] 黄小刚.长期负荷载重的情况下岸坡的变形对高桩码头的撞击和安全性产生影响的研究[J].时代农机,2019,46(10):82,84.
- [5] 董焱赫.长期循环荷载下饱和软粘土蠕变特性研究[D].天津:天津大学,2014.
- [6] 罗海程.长期荷载作用下岸坡变形对高桩码头桩基安全性影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [7] 张恒,朱志航,肖远航,等.天津滨海软土工程地质特征及分区研究[J].四川建材,2018,44(11):110-111.
- [8] 安淑红,朱俊高.土体的流变性研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2012,43(1):155-158.
- [9] 中交四航工程研究院有限公司.港口水工建筑物结构健康监测技术规范:JTS/T 312—2023[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2023.
- [10] 中交天津港湾工程研究院有限公司,中交四航工程研究院有限公司.水运工程地基基础试验检测技术规程:JTS 237—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [11] 谭儒蛟,焦宇杰,徐文杰.天津滨海软土蠕变参数及路基沉降效应分析[J].水文地质工程地质,2015,42(4):67-73.
- [12] HOFER D, KAMLAH M. Drucker-Prager-cap creep modelling of pebble beds in fusion blankets [J]. Fusion engineering and design, 2005, 73(2/4): 105-117.
- [13] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [14] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第三航务工程勘察设计院有限公司,中交第四航务工程局有限公司.码头结构设计规范:JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

(本文编辑 王璁)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部