

深水防波堤软土地基变形稳定性监测研究

肖天驰¹, 王建平², 李 玟¹, 顾琳琳¹, 张效晗³, 杨晓宁³, 王 振³, 方 斌²

(1. 南京理工大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 海军研究院, 北京市 102202;

3. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 在深水防波堤的建设中, 经常需要面对水下存在软弱土层的问题, 而软土的变形问题与防波堤的稳定性息息相关。实时监测软土地基变形和孔隙水压力的变化, 对控制抛填施工速度和防波堤地基稳定具有重大意义。以某海军基地防波堤为例, 利用一套自动化水下测量和实时数据传输系统, 分别对防波堤软土地基进行沉降、孔隙水压力、水平位移监测并分析其变化规律。监测结果表明: 随着抛填层数的增加, 软土地基的沉降变形特征发生改变, 达到一定抛填层数后, 基本不再发生瞬时沉降。抛填加载作用导致地基土体中产生超静孔隙水压力, 需要控制抛石速度, 防止出现超静孔隙水压力累积。地基土体的水平位移主要发生在抛填层以上的软土部分, 并随土体深度的增加而不断减小, 各监测断面中最大水平位移速率均低于 10 mm/d, 且基本不受台风天气影响。

关键词: 深水防波堤; 软土地基; 沉降; 孔隙水压力; 水平位移

中图分类号: TU413

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0147-07

Study on Deformation Stability Monitoring of Soft Soil Foundation of Deepwater Breakwater

XIAO Tianchi¹, WANG Jianping², LI Wen¹, GU Linlin¹, ZHANG Xiaohan³, YANG Xiaoning³,
WANG Zhen³, FANG Bin²

(1. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Academy of Naval Research, Beijing 102202, China; 3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the construction of deepwater breakwater, we are often faced with the problem of weak soil layers under water, and the deformation of soft soil is closely related to the stability of breakwater. The real-time monitoring of the deformation of soft soil foundation and the variation of pore water pressure is of great significance to control the construction speed of riprap and the stability of breakwater foundation. Taking a breakwater of naval base as an example, a set of automatic underwater measurement and real-time data transmission system are used to monitor the settlement, pore water pressure and horizontal displacement of the soft soil foundation of breakwater, and to analyze its variable law respectively. The monitoring results show that the settlement and deformation characteristics of soft soil foundation change with the increase of the number of riprap layers. The instantaneous settlement no longer occurs when the number of riprap layers reaches a certain level. The riprap loading induces the excess pore water pressure in the foundation soil, thus it is necessary to control the riprap rate to prevent the accumulation of excess pore water pressure. The horizontal displacement of the foundation soil mainly occurs in the soft soil above the riprap layer, and decreases with the increase of soil depth. The maximum horizontal displacement rate of each monitored section is less than 10 mm/d, while basically unaffected by typhoon weather.

Keywords: deepwater breakwater; soft soil foundation; settlement; pore water pressure; horizontal displacement

收稿日期: 2024-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3106502)

作者简介: 肖天驰(1998—), 男, 硕士研究生, 从事岩土力学及土体固化研究工作。

通信作者: 王建平(1964—), 男, 博士, 研究员, 全国工程勘察设计师, 从事岛礁岩土体力学特性研究工作。电子邮箱: wangjianping@163.com

0 引言

随着我国对外经济贸易交流需求的增长和航运技术的进步, 港口建设的规模和标准不断提高, 朝向大型化、深水化格局发展, 对防波堤的修筑要求不断提高^[1-2]。防波堤是港口建设的重要组成部分, 主要用于阻挡激流、波浪、泥沙, 保护港口和港内船舶, 维

持港内水面平稳^[3-6]。防波堤作为水工建筑物,在建设过程中难以避免地需要面对水下软土地基变形问题,应采取一定的监测措施,为工程提供风险预警。但防波堤在建设过程中易受到波浪、恶劣天气和泥沙运动等因素的影响,这对防波堤地基监测工作造成不同程度的阻碍,使得监测研究进展相对迟缓^[7]。

在港口工程建设过程中,软土强度演化、软土地基长期变形对软土地基上结构物的稳定性存在重大影响。本文研究的防波堤所处位置建设条件极不理想,水域水深超过20 m,浪高超过10 m,海底淤泥软土厚度达30 m,淤泥含水量高达60%,呈流塑状。若地基处理方式不当、对地基变形或孔隙水压力变化的监测不及时,将难以保证防波堤的长期安全稳定^[8-11]。例如,高雄港第二口门圆沉箱结构防波堤曾发生9°倾斜和1.5 m沉降;上海洋山深水码头于2009年在使用期间发生滑坡破坏。为此,需要对软土地基采取一定的加固措施,并进行详细、实时监测,及时为工程提供安全预警,以防出现因软土地基变形等问题导致的水工建筑物破坏现象。

目前,由于深水防波堤工程的监测研究较少,监测时长有限,监测技术不完善,而针对深水与软土地基耦合作用下的防波堤地基变形稳定性监测研究更加少见,并且室内试验和模型试验与实际工程之间存在差异,导致对深水防波堤软土地基变形发展规律的认识还不够全面、准确^[12-14]。本文以某海军基地防波堤建设项目为依托,设计了一套完整的自动化测量和实时数据传输系统,对水下软土地基开展了地基沉降监测、孔隙水压力监测和水平位移监测,分析了软土地基在抛填阶段和竣工后一段时间的稳定性,以期提高对深水防波堤软土地基变形发展规律的认识。

1 工程概况

某岛式深水防波堤工程采用斜坡式结构(见图1),岛堤全长2 160 m,水深19~26 m。防波堤堤头段的波浪作用较为复杂,按照《防波堤设计与施工规范》^[15]分别对南北堤头进行了加强处理。2-2断面位于岛堤北堤头段,堤顶设计高程为7.5 m;22-22断面位于南堤头段,堤顶设计高程为7.7 m;其余断面的堤顶设计高程与断面10-10基本相同,均为7 m。防波堤北堤头段外坡-7.0 m以上采用25 t扭王字块体护面,-15.0~-7.0 m采用10 t扭王字块体护面;内坡-7.0 m以上采用25 t扭王字块体护面,-15~-7.0 m

采用10 t扭王字块体护面。南堤头段内、外坡-20 m以上全部采用30 t扭王字块体护面,-20 m以下为抛石棱体。中间段外坡-7.0 m以上采用15 t扭王字块体护面,-15.0~-7.0 m采用6 t扭王字块体护面,-15.0 m以下为抛石棱体;内坡-4.0 m以上采用15 t扭王字块体护面,-15.0~-4.0 m采用500~800 kg块石护面,-15.0 m以下为抛石棱体。

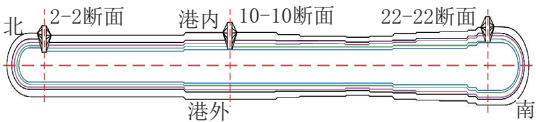


图1 防波堤示意图

根据地质勘察报告,港区内土层分布大致相同,在勘察范围内自上而下主要有:①₁层淤泥质粉质黏土,厚度约12 m;①₃层淤泥,厚度约10.3 m;①₄粉细砂,厚度约1.5 m;①₅层淤泥质黏土,厚度约9.3 m;②₁层粉质黏土。各土层的主要物理力学参数见表1,可以看出,该区域土体的天然含水率高、孔隙比大、抗压与抗剪强度低,其中①₁层、①₃层和①₅层均为淤泥质的软土,总厚度超30 m,如不进行处理,必然会发生整体滑移和过大的地基沉降。针对水深超过20 m,厚度达30 m的软弱土层,常规的软基处理方法如换填法、堆载预压法、振冲置换法、水下深层水泥拌和法等都难以实现。为此,通过对地基整体稳定性计算与模型试验结果的综合分析,最终采用部分开挖换填法处理软土地基,即各断面基本按照保留1/3软土厚度的原则确定开挖深度,仅挖除部分淤泥而余下部分不再进行处理,并预留1.5 m的工后地基沉降补偿。

表1 各土层的主要物理力学参数

土层	天然 密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然含 水率 $\omega/\%$	饱和 重度 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙 比 e	内摩 擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚 力 $c/$ kPa	无侧限 抗压 强度 q_u/kPa
① ₁	1.63	58.1	16.3	1.64	4.5	7.0	19
① ₃	1.62	58.4	16.2	1.66	5	9.5	33
① ₄	2.05	—	—	—	30	—	—
① ₅	1.78	40.8	17.8	1.15	9	20	40
② ₁	1.93	27.7	1.96	0.82	13	45	151
② ₂	1.90	—	—	—	45	—	—

2 水下地基监测测试方案

2.1 水下地基监测系统与原理

在防波堤施工过程中,地基土体会在上部荷载的作用下不断发生变形,主要表现为地基沉降和坡脚水平位移。当土体变形速率过大时,地基将进入

危险状态,严重时将导致地基土体破坏、地基结构失稳等后果^[9]。地基监测可以及时了解软土地基的变形情况,为施工现场提供安全预警,本次监测项目包括软土地基沉降监测、水平位移监测和孔隙水压力监测,其中孔隙水压力用于反映土体固结情况。

为保证实时、快捷地对深水防波堤软土地基进行监测,本次监测采用中交天津港湾工程研究院的水下地基原位自动监测成套技术方法^[16],并结合水下无线传输技术,搭建出一套完整的自动化测量和实时数据传输系统,见图2。

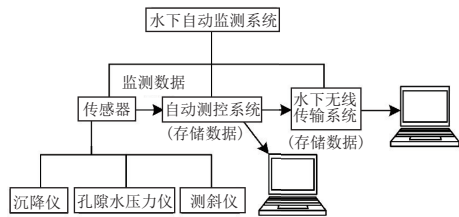


图2 水下自动监测系统

软土地基沉降监测系统中采用的是美国 GK-4600 液体压差式沉降仪,沉降仪由储液罐、传感器和液体转递管路三部分组成,通过系统内部储液罐和传感器的相对距离的变化进行沉降测量。水平位移监测系统中采用的是南京 MI600 多段式测斜仪,在土体发生侧向位移时,多段式测斜仪中的传感器产生倾斜,通过相关公式换算得到土体水平位移量。地基孔隙水压力监测系统中采用的是美国 GK-4500 孔隙水压力仪,通过监测加载前后孔隙水压力的变化,反映地基土体的密实程度和固结情况。

2.2 监测设备的布置

防波堤工程共设置3个水下监测断面,每个监测断面设置5个沉降监测点($S_1\sim S_5$)、1组水平位移监测点($H_1\sim H_5$)和1组孔隙水压力监测点($EPWP_1\sim EPWP_5$)。孔隙水压力监测点设置在堤顶对应的下部土体中;水平位移监测点设置在防波堤抛填区之外的土体中;沉降监测点分别设置在中轴线(S_1)、堤顶和肩台间斜坡的中点(S_2)、肩台中点(S_3)、肩台与护底平台间斜坡的中点(S_4)、护底平台中点(S_5)对应的下部土体中。各断面监测点布置情况见图3。

为了降低对防波堤施工的影响,避免涌浪运动导致船舶走锚现象,按照设计要求将测控系统等所有监测组件全部放置于海底。首先,将自动测控系统、无线传输系统水下机主机固定在大密封罐内,将自动测控系统的配置端和蓄电池安放在小密封罐内,并采用大、小法兰盘和灌胶等措施进行密封防水,见图4。然后,将密封罐与导线框固定在混凝土

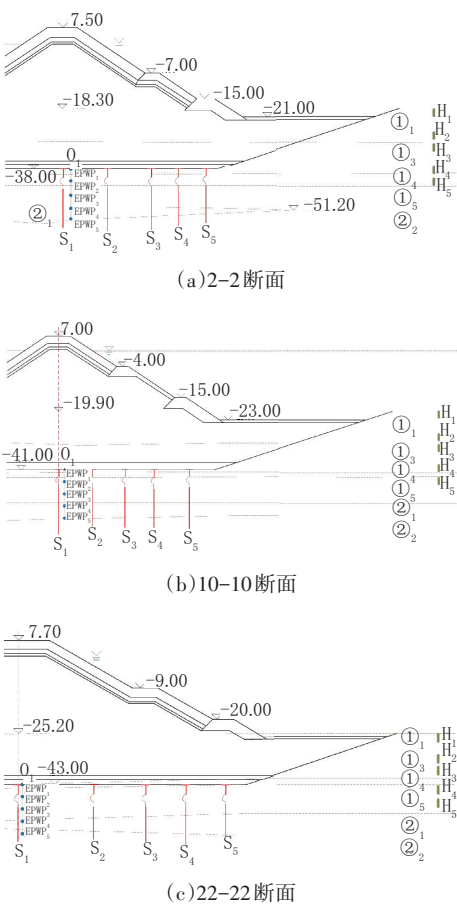


图3 监测点布置示意图(单位:m)

底座上以防位移或倾覆,并将发射换能器固定在导线框顶端以保证信号传输。最后,利用横鸡趸等工作船将大小密封罐吊放至水下防波堤堤脚外50处的泥面上,见图5。

2.3 监测工作情况

由于受现场施工、波浪以及海底复杂条件等不利因素的影响,自2010年12月10日开始,至2011年3月1日完成3个断面检测仪器的埋设工作,所以各断面地基监测的起始时间与结束时间不一致。2-2断面工作时间为2010年12月29日—2012年3月23日,历时450 d,期间报损三次,两次数据中断。10-10断面工作时间为2011年1月26日—2014年7月9日,历时1 260 d,期间报损一次,一次数据中断。22-22断面工作时间为2011年2月27日—2012年3月19日,历时386 d,期间报损两次,一次数据中断。

3 监测成果与分析

3.1 沉降监测成果分析

通过整理2-2断面、10-10断面、22-22断面的地基沉降监测结果,以石渣垫层抛填日期为起始时间,绘制地基沉降量历时曲线,见图6。从图6可以看



(a)密封罐盖板



(b)密封防水

图4 密封与防水

出,各监测断面地基沉降的趋势大致相同,即靠近断面中轴线处的地基沉降量较大,位于断面边缘处的地基沉降量相对较小。

防波堤各抛填层的加载作用与地基沉降增量密切相关,随着抛填层数增加,各断面的地基沉降变形特征发生改变。早期抛填加载过程中,地基沉降曲线存在显著的突变现象;中后期抛填加载过程中,如2-2断面地基累计沉降曲线所示,在第六次抛填加载时地基沉降曲线已不再产生明显突变现象,10-10断面从第七次抛填加载直至监测结束,其地基累计沉降量与沉降时间呈平滑曲线关系。原因在于该防波堤工程采用的是部分开挖回填法,地基开挖过程中没有将淤泥软土全部清除,早期的抛石回填会造成挤淤现象。同时基槽开挖卸载后,开挖面下方的土体会产生回弹变形,导致土体密实度减小、压实度降低,再次施加荷载后将产生较大的瞬时沉降。随着堤心石抛填厚度的增加,挤淤现象基本消除,地基土体在荷载作用下开始进行缓慢的固结沉降,沉降速率趋于稳定。

3.2 孔隙水压力监测成果分析

复杂的海洋波浪与潮汐作用会对地基土体的孔隙水压力监测工作产生干扰,为此将孔隙水压力传感器 O_1 设置在砂垫层中,并假定堤心石抛填加载引起的超静孔隙水压力($EPWP_1$)始终为零,此时 O_1 测



(a)安放大罐



(b)安放小罐

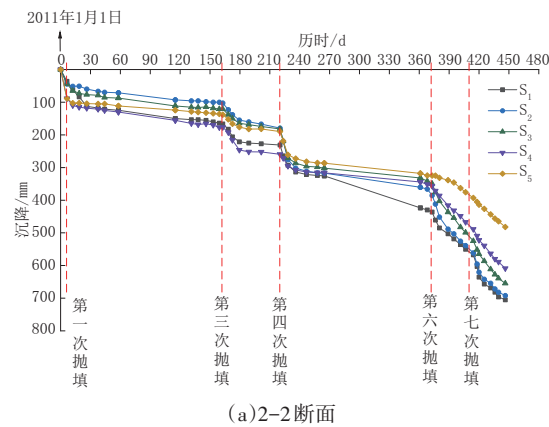


(c)安放于水下的密封罐

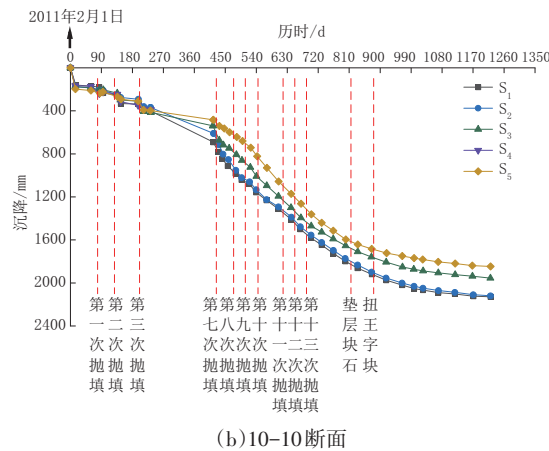
图5 安放监测设备

得的孔压同时包括了静水压力与波浪和潮汐引起的变化水压力,最后使其余传感器测得的孔隙水压力减去 O_1 的孔隙水压力,即可得到抛填加载所引起的超静孔隙水压力。随着堤心石抛填工作的进行,各监测断面孔隙水压力的实测变化情况如图7所示,由于海洋环境极为复杂,在监测过程中出现设备损毁现象,但监测结果中已展现出了较为典型的地基土体孔隙水压力变化情况。

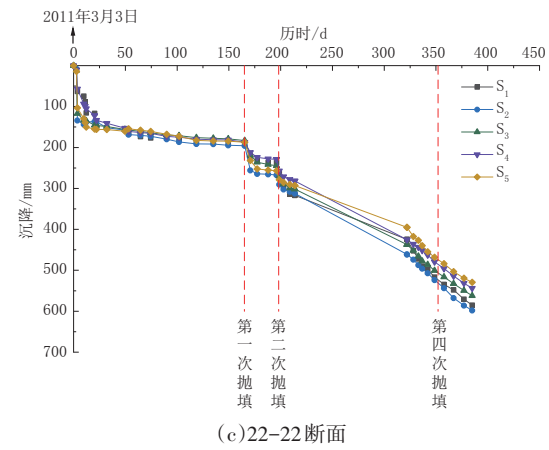
从图7中可以看出,10-10与22-22断面的孔隙水压力变化趋势相似,且消散及时;2-2断面的孔隙水压力出现异常,需延长堤心石抛填后的间歇期,以防因超静孔隙水压力未及时消散而导致地基滑动。结合图8与各断面的抛填加载时间,发现早期抛填



(a)2-2断面



(b)10-10断面



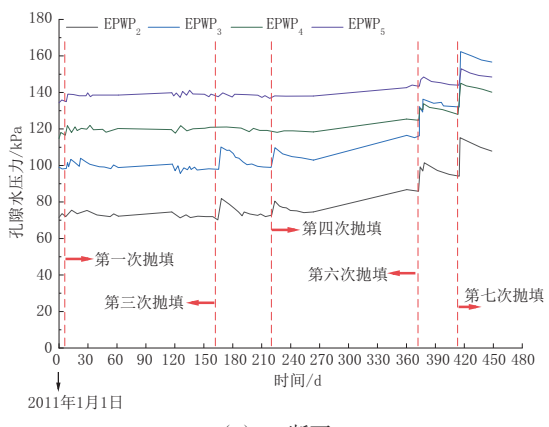
(c)22-22断面

图6 软土地基累计沉降量历时曲线

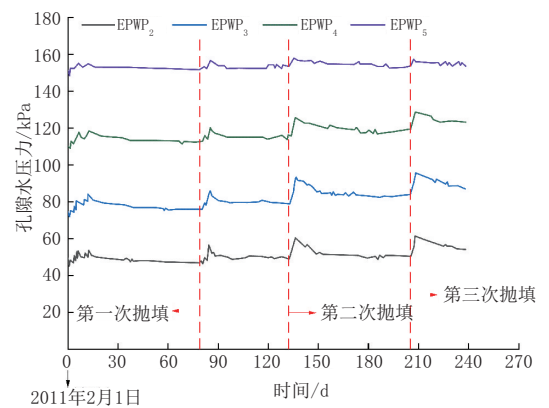
加载作用对深部地基土体的孔隙水压力影响较小。一方面是因为早期的抛填荷载较小,经应力扩散后,没有引起明显的孔隙水压力变化;另一方面是深部的粉质黏土靠近中砂层,存在相对较好的排水条件,使得超静孔隙水压力消散较快^[17]。随着抛填层数的增加,地基土体承受的上部荷载增大,导致深部土体中的孔隙水承担的附加应力增加,地基土体中出现超静孔隙水压力增长、消散和土体固结沉降现象。

3.3 土体水平位移监测成果分析

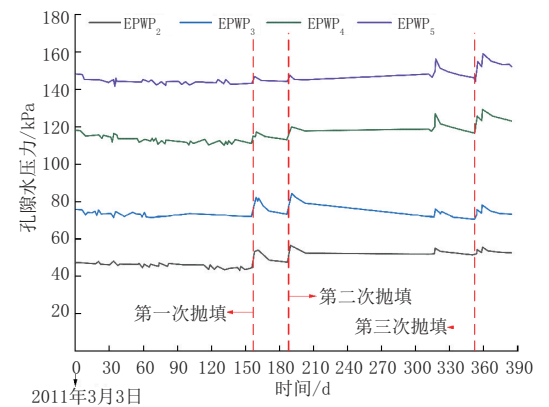
图8为2-2断面、10-10断面、22-22断面地基土



(a)2-2断面



(b)10-10断面



(c)22-22断面

图7 孔隙水压力变化曲线

体累计水平位移情况,计算水平位移时,以H₅测点的初始位置为起始点,通过测斜仪倾斜角度与高程差来得到各测点的水平位移。从图8中可以看出,三个断面的水平位移总量均随土体深度的增加而减小,水平位移主要发生在砂垫层以上的土体中,由抛填加载引起的深部地基土体水平位移并不明显。由于22-22断面的监测设备在第4次抛填工作后损毁,导致测得的水平位移总量小于另外两个断面。

仅依靠累计水平位移不足以断定土体是否处于稳定状态,且土体的水平位移主要发生在抛填加载

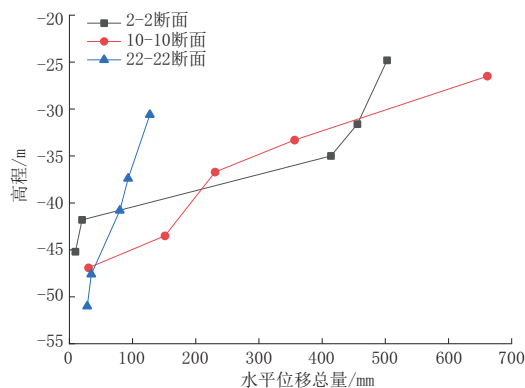


图8 水平位移总量(单位:mm)

阶段。为了研究地基土体在抛填加载过程中的稳定性,绘制出了堤心石抛填过程中产生的水平位移速率峰值曲线,见图9,位移速率为负值时代表土体向轴线方向偏移。可以看出,早期抛填加载过程中,三个断面不同深度土体的位移速率存在明显波动,随着堤心石厚度增加,水平位移速率峰值逐渐稳定。主要是因为部分开挖回填的施工方法,使地基表层出现明显的挤淤现象,堤心石抛填过程中产生的侧向压力将土体向外推开,导致抛石区域外产生隆起。最大水平位移速率出现在2-2断面第一次抛填加载过程中,最大水平位移速率为7.8 mm/d,处于安全范围内,说明地基土体比较稳定^[18-19]。

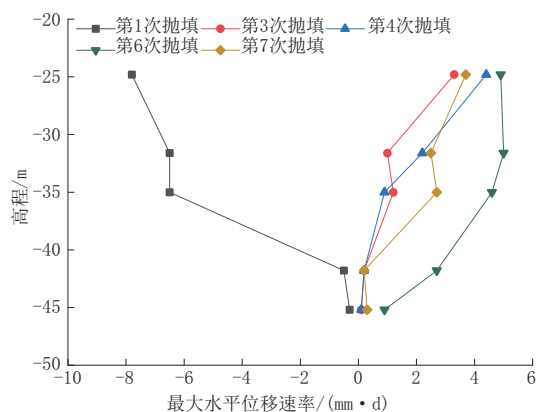
3.4 台风对软土地基的影响分析

沿海台风季节常存在台风、天文大潮、暴雨叠加现象,将形成海上波浪并对防波堤产生冲击^[20]。通常,台风的影响范围为高程-7 m以上部分,统计出对防波堤所处海域产生影响的台风,绘制10-10断面抛填至-7 m高程后的地基沉降曲线与水平位移曲线,并在曲线上标注台风的登录时间,见图10、图11。由图10、图11可知,在台风期间,软土地基监测数据的变化趋势与正常天气基本一致,在台风比较密集的时期也没有出现异常或突变,表明经过部分换填后的软土地基基本不受台风天气影响,具有良好的稳定性。

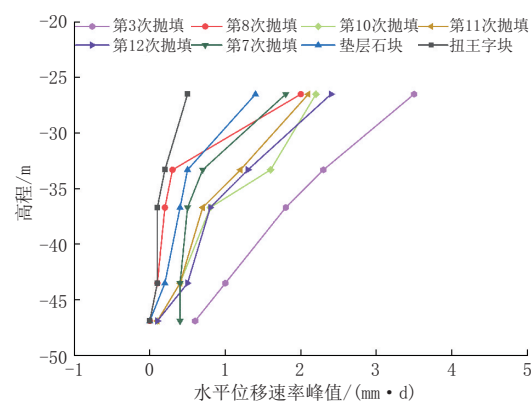
4 结 语

本文基于某深水防波堤建设工程,对防波堤软土地基进行了实时监测,得到了海底软土地基的累计沉降量、水平位移量和孔隙水压力变化趋势,分析了软土地基变形的发展规律,得到以下结论。

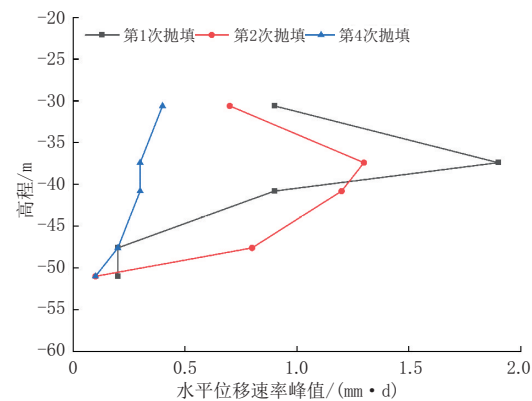
(1)防波堤最大沉降量发生在断面轴线正下方,在抛填加载时孔隙水压力将出现峰值。早期的抛石回填会造成挤淤现象,随着堤心石厚度的增加,地基



(a) 2-2断面



(b) 10-10断面



(c) 22-22断面

图9 最大水平位移速率曲线

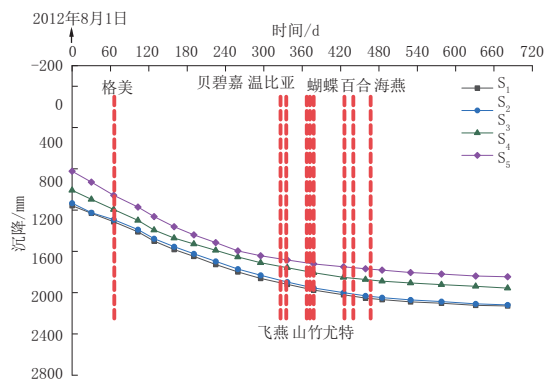


图10 台风期间 10-10断面地基沉降曲线

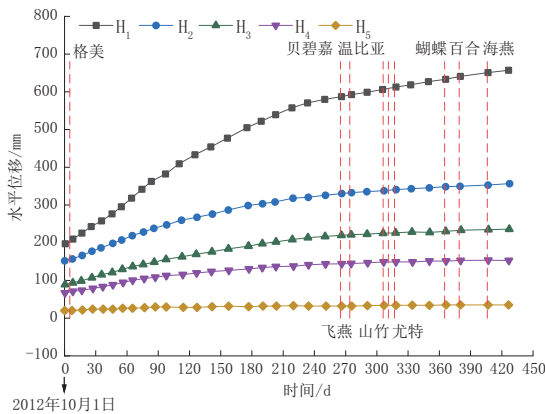


图 11 台风期间 10-10 断面水平位移曲线

土体开始进行缓慢的固结沉降,沉降速率趋于稳定。

(2)防波堤地基的水平位移主要发生在抛填层以上的土体中,其中在前 3~4 层堤心石抛填过程中,地基土体的水平位移速率波动较大,最大水平位移速率较高。

(3)台风期间的监测数据未出现异常,说明台风对本文软土地基影响不明显。施工期和竣工后 1 a 的地基监测数据表明,沉降和水平位移的速率逐渐趋于稳定,超静孔隙水压力值消散及时,防波堤软土地基土体总体处于稳定状态。

参考文献:

[1] 吴永强,李炎保,刘颖辉.防波堤损坏研究进展及损坏原因浅析[J].港工技术,2008(2):8-11.

[2] 何宁,沈雪松,周彦章,等.大型疏浚土充填袋筑堤技术研究[J].岩土工程学报,2015,37(3):440-445.

[3] 陈勇.爆破挤淤法处理某防波堤工程的长期沉降规律分析[J].港工技术,2013,50(2):58-60.

[4] 蔡正银,杨立功,何勇,等.新型桶式基础防波堤下沉分析及其对

稳定性的影响[J].岩土工程学报,2016,38(12):2287-2294.

[5] 曹青坡.长短桩组合式防波堤堤身结构的应用研究[J].中国水运(下半月),2020,20(6):251-253.

[6] 戴鹏,李鑫.斜坡式防波堤中抛石施工工艺及质量控制[J].中国水运(下半月),2014,14(7):314-315,318.

[7] 黄其欢,王青青,何宁,等.PSI 技术应用于防波堤沉降监测研究[J].岩土工程学报,2019,41(4):761-768.

[8] 亢戈霖,陈汉宝,刘海源,等.板桩防波堤设计参数试验验证与规范对比研究[J].中国港湾建设,2024,44(6):28-33.

[9] 王禹迟.软土地上重力式防波堤动力稳定性及长期变形特性研究[D].天津:天津大学,2017.

[10] 闫澍旺,侯晋芳,刘润,等.长江口导堤在波浪荷载作用下的稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):3245-3249.

[11] 范期锦,李乃扬.长江口二期工程北导堤局部破坏的原因及对策[J].中国港湾建设,2004(2):1-8.

[12] 谭芳,白力源,魏焕卫,等.大面积堆载作用下软土地基变形实测与理论分析[J/OL].建筑结构,2024:1-11(2024-07-29)[2024-08-04].<https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20222300>.

[13] 李贺青,葛栋林,潘良鸽.深水防波堤软土地基离心模型试验[J].水运工程,2018(3):14-20.

[14] 葛栋林,徐宾宾,解林博,等.深水防波堤软土地基数值模拟[J].水运工程,2020(9):167-172,195.

[15] JTS 154-1—2011,防波堤设计与施工规范[S].

[16] 张敬,苗中海,高志义,等.水下地基原位自动监测成套技术方法:中国,CN200610013275.4[P].2009-12-02.

[17] 符洪涛,王晓峰,温作佳,等.含粉砂层软土地基真空预压密封性及现场试验研究[J/OL].岩石力学与工程学报,1-10:(2024-07-02)[2024-08-21].<https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.1247>.

[18] 王伟,徐锴,王海龙,等.施工阶段斜坡堤地基沉降实时监测技术的开发应用[J].岩土工程学报,2017,39(增刊1):85-90.

[19] 郭超,张秀勇.山东东营港北区防波堤水平位移分析[J].港工技术,2020,57(4):46-50.

[20] 施斌,施腾源,马庆滨.广东沿海斜坡式防波堤台风破坏特征及其应对措施[J].广东水利水电,2020(1):1-4.

(上接第 142 页)

[4] 刘纲,罗钧,秦阳,等.基于改进 MCMC 方法的有限元模型修正研究[J].工程力学,2016,33(6):138-145.

[5] 宗周红,褚福鹏,牛杰.基于响应面模型修正的桥梁结构损伤识别方法[J].土木工程学报,2013,46(2):115-122.

[6] 付波,余毅,王建凯.基于响应面法的混凝土连续刚构桥模型修正[J].中外公路,2019,39(6):136-140.

[7] 郭力,李兆霞,高效伟.基于复域灵敏度分析的静力模型修正方法研究[J].工程力学,2010,27(8):100-106.

[8] 宋彦朋,陈辉,黄斌.基于静位移和多指标的贝叶斯模型修正方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2024(6):1-9.

[9] 陈东.基于响应面法的桥梁结构有限元模型修正与应用[D].西安:长安大学,2017.