

大面积吹填工程滩涂地基与护岸的监测分析

唐彤芝¹, 郑智富², 徐杨¹, 张添烨³

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 宁德市漳湾临港工业区开发建设有限公司, 福建 宁德 352000;
3. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 在大面积滨海滩涂场地进行吹填形成陆域, 需要重点关注淤泥地基与围挡结构的变形稳定。通过某填海造地工程的现场监测, 分析了大面积吹填砂荷载作用过程中滩涂地基的表面沉降、单侧临空的狭长土质护岸的深层水平位移的变化过程及特性。结果表明, 陆域形成后淤泥表面沉降速率为 0~3 mm/d, 护岸深层水平位移速率为 0~2 mm/d, 淤泥地基与护岸处于稳定状态。大面积场地内淤泥表面沉降量的差异较大, 标准差为 297 mm, 变异系数达到 0.37。初期沉降量的占比达到 30%~60%, 平均为 47.8%。填土预压期间护岸的深层水平位移量超过吹填施工期间, 两者的比值达到 1.1~2.6, 反映了两个阶段的荷载性质、作用方式与施加过程的影响以及土体变形的累积特性。验证了预留吹填边界距离, 实施分块超高快速吹填、逐步推进的施工方案是合理的。

关键词: 吹填; 淤泥地基; 护岸; 沉降; 水平位移

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2023)03-0221-07

Monitoring and analysis of tidal flat foundation and revetment in large area reclamation project

TANG Tong-zhi¹, ZHENG Zhi-fu², XU Yang¹, ZHANG Tian-ye³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China;
2. Ningde Zhangwan Lingang Industrial Zone Development and Construction Co., Ltd., Ningde 352000, Fujian, China;
3. Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: It is necessary to pay more attention to the deformation stability of the silt foundation and retaining structure in the large area of coastal tidal land. Through the field monitoring of a reclamation project, the change process and characteristics of the surface settlement of the tidal flat foundation and the deep horizontal displacement of the one-sided narrow soil revetment under the large area sand dredging process are analyzed. The results show that after the formation of the land area, the sedimentation rate of the silt surface and the horizontal displacement rate of the deep layer of the revetment are 0-3 mm/d and 0-2 mm/d, respectively. The silt foundation and revetment are in a stable state. The surface settlement of silt in large-area sites varies greatly, with a standard deviation of 297 mm and a variation coefficient of 0.37. The initial settlement accounted for 30%-60% of the entire settlement, with an average of 47.8%. The deep horizontal displacement of revetment during soil filling preloading is higher than that during soil filling construction, and the ratio is 1.1-2.6, which reflects the load nature, action mode and application process of the two stages, as well as the cumulative characteristics of soil deformation. It has been verified that it is reasonable to reserve the distance of filling boundary, implement the block construction and step by step scheme of ultra-high speed filling.

Key words: reclamation; silt foundation; revetment; settlement; horizontal displacement

0 引言

吹填造陆是航道疏浚土资源化利用的重要方式, 可以有效解决部分地区土地资源紧缺状况, 对于促进国民经济社会的深入发展具有十分重要的

积极作用^[1-3]。在天津、山东、江浙一带, 吹填土主要为细颗粒的淤泥质土。吹填造陆工程往往采用吹填淤泥+地基处理一体化的方式, 形成具有一定强度和承载力的地基土进行用地移交和后续的开发建设, 相关的研究比较多, 主要集中在吹填土性质、

吹填土沉降变形与排水固结性质、地基处理工艺技术与效果等方面,在吹填结束进入地基处理阶段后才开展施工监测,通过监测分析吹填土的排水固结状态、强度与承载力的增长情况^[4-9],而对大面积、大体积、快速吹填施工推进全过程中场地泥面以及周围隔堤/围堰的变形与稳定方面的研究则较少涉及。

福建沿海地区的吹填造陆工程建设不同于天津、山东、江浙一带,一是吹填土主要为粗颗粒的海砂,流动性大、排水快、落淤沉积快、自重荷载大;二是建设方式有所差异,比较重视快速造陆,建设单位往往只负责吹填形成陆域,吹填前下卧深厚软基一般不打设竖向排水板,达到标高后直接移交用地单位进行后续地基处理和开发建设,故吹填施工速度快;三是利用周围的自然环境条件来构建闭合的吹填施工区域,如山体、既有塘埂等。沿海区域往往多台风暴雨,气候条件比较恶劣,在此类滨海滩涂进行大面积吹填砂施工,表层稀泥的挤出流动、超软泥面上竖向荷载的快速施工与水平推进等都将对地基及围挡结构的安全稳定造成影响,故地基变形与围挡结构的安全稳定显得比较重要和突出,需要开展吹填过程中的施工监测,用以科学指导施工和有效保障安全。

本文以福建宁德某填海造地工程为依托,通过现场施工监测对大面积吹填砂快速推进形成陆域过程中的泥面沉降变形、单侧临空的护岸侧向水平位移特性以及荷载与变形的相互影响等问题进行了分析和探讨。

1 项目概述

1.1 工程概况

宁德某项目场地南侧临岛,东侧临海,采用外购海砂吹填形成陆域,吹砂设计标高为+4.5 m。吹砂区陆域形成前不进行地基处理。主要的建设工程量包括吹砂施工和护岸构筑。吹填砂工序为:清除地表面层含植物根系土后,吹填海砂至标高+4.5 m,排水后再对场地进行整平。

1.2 场地地质条件

拟建场地位于内海港湾-潮间带,属滨海沉积地貌,地势平缓。原大部分区域经人工围垦形成养殖鱼塘。现场区域地面标高约 1.05~2.13 m,潮沟处原地面标高约-2.5~-0.2 m。

根据勘察资料,自上而下地层分布为^[10]:(1)第四系人工堆填素填土,分布于道路塘埂表层。(2)第四系全新统海积成因淤泥,主要分布于鱼塘及滩

涂区上部。②淤泥:深灰色,流塑,饱和,主要由黏粉粒组成,干强度高,韧性高,无摇震反应,海积成因,分布广泛,层厚 3.80~26.30 m。(3)第四系上更新统冲洪积细砂、粉质黏土、含卵石粉质黏土及卵石,主要分布于滨海沉积地层下部。④粉质黏土:灰白色、灰黄色,硬塑,湿,主要由黏粉粒及砂粒组成,黏性较强,干强度中等,韧性中等,无摇震反应,冲洪积成因,层厚 9.20~18.60 m。(4)下伏基岩为燕山晚期花岗岩及其风化层。软土层主要物理性质指标见表 1。

表 1 软土主要物理性质指标

土层名称	w/%	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e_0	I_p	$a_{(1-2)}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{s(1-2)}/\text{MPa}$
②淤泥	63.0	16.0	1.716	25.5	1.71	1.60
④粉质黏土	32.3	18.9	0.869	13.5	0.23	7.35

1.3 工程特点分析

该吹填工程地理环境条件特殊,东侧临海,南侧为天然山体,西侧为鱼塘塘埂,北侧为一条长约 1 km、顶宽约 1.5 m、高度约 4 m 的既有塘埂,是该工程重要的护岸结构。该护岸狭长,单侧临空,内侧为吹砂区(原养殖鱼塘),外侧坡脚为深度约 3 m、宽度约 5 m 左右的港池。吹填施工由东侧临海向内部区域推进,受南侧山体的阻挡,吹填砂荷载及其相关效应将逐渐推移并作用于北侧的护岸,施工过程中护岸将长期处于单侧大临空、内外侧受力不均衡状态,结构稳定性问题比较突出。一旦护岸失稳,将引起吹填区内的吹填砂和下卧淤泥快速滑塌,对航道、附近村民养殖和农作物以及吹填区的开发建设等造成严重的破坏和损失。因此,快速吹填施工推进过程中淤泥地基沉降变形以及护岸的安全稳定是需要关注的关键问题。

1.4 吹填及施工监测设计

吹填场地面积大,施工速度快,为保障北侧塘埂护岸的安全稳定,采用的吹填施工方式为:分块超高快速吹填,保持吹填砂边界距离塘埂 30 m 左右,吹填方量基本完成后再向塘埂逐步推进,整平至设计标高。

为科学指导吹填施工,控制吹砂加荷速率,保障施工过程中地基与护岸的安全稳定,开展场地泥面沉降监测和护岸深层土体水平位移监测^[11],如图 1 所示。(1)泥面沉降监测:利用吹砂区域内鱼塘之间的土质隔埂进行自然分区,依次划分为 20 个监测分区,根据每个分区的面积大小合理布置沉降板,共埋设 59 个沉降板。沉降板布设与现场吹填施

工进度保持一致。(2) 护岸深层土体水平位移监测: 沿北侧塘埂中心的纵轴线按基本相等的间距埋设 12 根测斜管用于监测土体深层水平位移, 测斜管管底深入下卧硬实土层 1 m 左右。

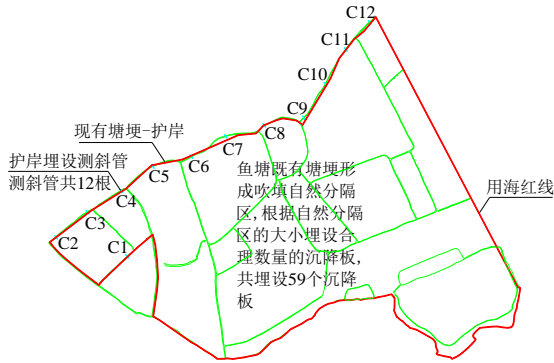


图 1 施工监测布置平面图

Fig. 1 Construction monitoring layout plan

2 大面积吹填砂荷载作用下淤泥表面沉降分析

2.1 淤泥表面沉降过程的实测分析

因工期紧张, 施工进度加快, 实际吹填施工从

2017 年 10 月 11 日开始至 2018 年 1 月 22 日截止, 实际吹填工期为 100 d, 比计划缩短约 2 个月。根据吹填砂施工过程中的泥面沉降监测数据 (截至 2018 年 3 月 20 日吹砂施工结束), 绘制各测点的累计沉降量变化曲线如图 2 所示。

各测点沉降板的埋设跟随不同分区吹填施工的进度及时安排, 虽然有早有晚, 但实测沉降量的变化呈现出比较一致的规律性。整个沉降过程可以划分为迅速发展的初期阶段和快速趋于稳定的中后期阶段。吹填砂为砂水混合物, 因吹填速度比较快, 沉降板被砂水混合物快速包裹覆盖, 而沉降板下部的泥面十分稀软, 在竖向快速加载和泥面稀泥的侧向快速流动的双重作用下很快产生较大沉降。当测点所在区域的吹砂达到恒载后, 泥面稀泥的侧向挤出流动已经基本完成, 因原泥面未插设竖向排水板, 而吹填砂排水落淤速度快, 下卧淤泥地基的固结沉降非常缓慢, 故各测点沉降快速趋于稳定 (2018 年 2 月份春节期间停测了一周左右的时间, 对比节前节后的数据可以看出, 沉降量基本没变化), 停测时 (2018 年 3 月 20 日) 实测沉降速率最大值为 3.11 mm/d。

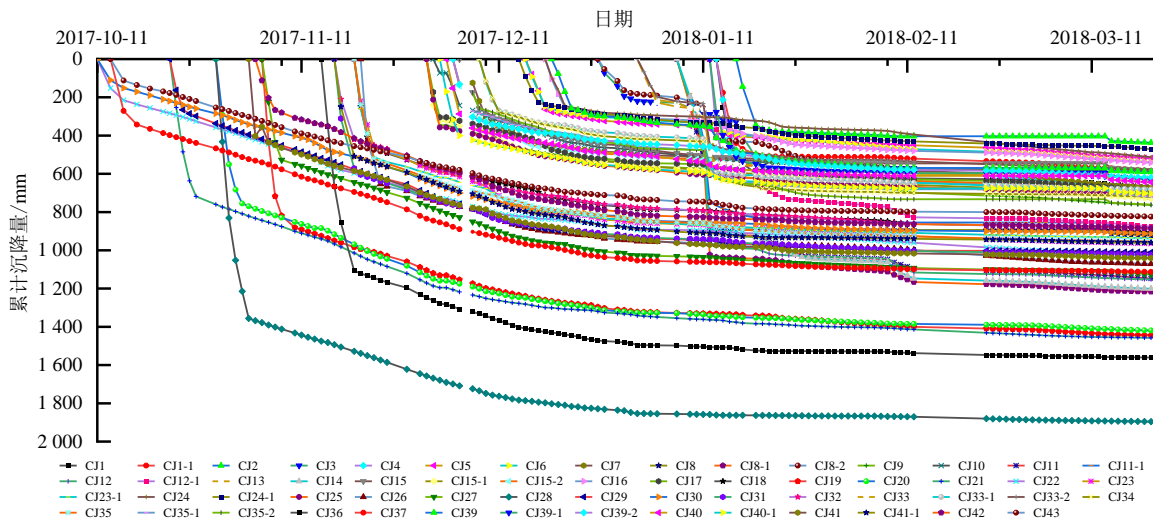


图 2 各测点实测沉降量变化曲线

Fig. 2 Measured settlement curves at different measuring points

2.2 淤泥表面沉降特性的统计分析

(1) 沉降数据的差异性

场地面积大, 沉降板的间距分布较大, 受不同区域下卧泥面土质、淤泥厚度和分块吹填厚度的影响, 各测点沉降量的差异性较大。对 59 个实测累计沉降量进行统计分析, 实测累计沉降量最大值为 1 896 mm, 最小值为 437 mm, 平均值为 856 mm, 标准差为 297 mm, 变异系数为 0.37, 变异性评价为“大”。

(2) 最终沉降量的平均值

基于分层总和法计算地基在荷载作用下的最终平均沉降量约为 3.2 m, 由于地基未打设塑料排水板等竖向排水通道, 按照太沙基一维固结理论计算吹填施工期间的地基固结度 U 约为 25%, 则陆域形成施工期预估地基平均沉降量约为 0.8 m。截止 2018 年 3 月 20 日, 实测平均沉降量为 856 mm, 与设计预估的平均沉降量基本一致。

(3) 初期沉降的成因与特性

各测点初期沉降量在总沉降量里的占比较大, 经

统计大多数测点集中在30%~60%，平均值为47.8%，少数测点达到了70%~80%，见图3。天然软基在荷载作用下快速产生的沉降可视为瞬时沉降，其成因是加荷后饱和淤泥土内的孔隙水不能马上排出，土体不能产生体积收缩，但由于各向应力不等，土体产生侧向变形，引起竖向瞬时沉降。在滨海滩涂进行大面积快速吹填砂施工，初期沉降主要是因沉降板下面的稀泥侧向流动挤出而产生，与板下厚度不一的流动稀泥及快速施工的方式有密切的关系。

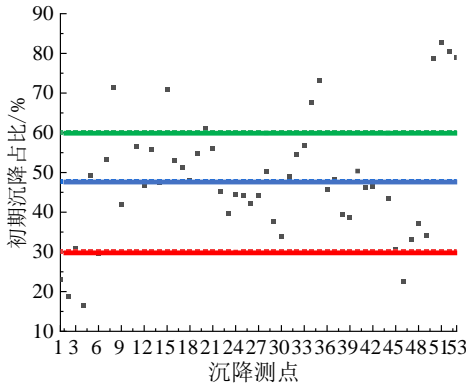


图3 各测点初期沉降的占比分布图

Fig. 3 Rate distribution diagram of the initial settlement

(4) 竖向压缩比及影响因素分析

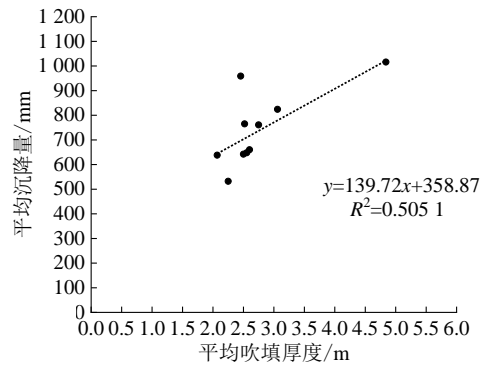
统计各分区（埋设的沉降板数量≥3的分区）的泥面沉降量，见表2，计算得到因吹填砂竖向荷载作用下地基产生的沉降变形压缩比基本在2%~6%。

表2 分区泥面沉降量统计表
Table 2 Statistic surface settlement

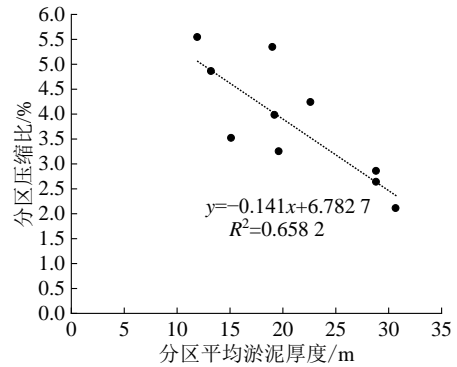
分区	平均沉降量/mm	平均淤泥厚度/mm	平均吹填厚度/mm	平均压缩比/%
A	638	19.60	2.07	3.26
B	959	22.60	2.46	4.24
C	648	30.65	2.56	2.11
H	765	19.20	2.52	3.98
J	824	28.80	3.06	2.86
M	1 101	17.80	1.60	6.19
N	660	11.90	2.60	5.54
O	761	28.80	2.75	2.64
Q	1 016	19.00	4.84	5.35
S	642	13.20	2.50	4.86
T	532	15.10	2.25	3.52

为探讨分析各分区的平均沉降量、平均淤泥厚度、平均吹填厚度及压缩比之间的相互关系，绘制相应的散点图见图4。从统计结果来看，各分区的平均沉降量与平均吹填厚度呈现一定的正相关性，

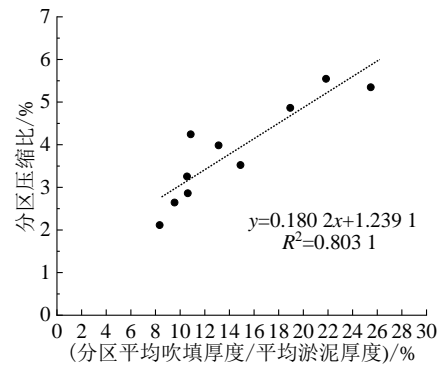
压缩比与平均淤泥厚度呈现一定的负相关性，压缩比与平均吹填厚度/平均淤泥厚度呈现较好的正相关性。这样的特点和规律基本符合该工程的地质条件和施工建设特点。



(a)



(b)



(c)

图4 分区沉降量与压缩比及相关性分布图

Fig. 4 Scatter plot of settlement and compression ratio and their correlation

3 大面积吹填及堆载作用下单侧临空护岸深层土体水平位移分析

3.1 大面积吹砂成陆过程单侧临空护岸深层土体水平位移实测统计与稳定性评价

依据实测数据（截止2018年3月20日）绘制施工过程中护岸深层土体水平位移量较大的两个代表性测点的变化曲线，见图5，各测斜管实测水平位移量统计结果见表3。

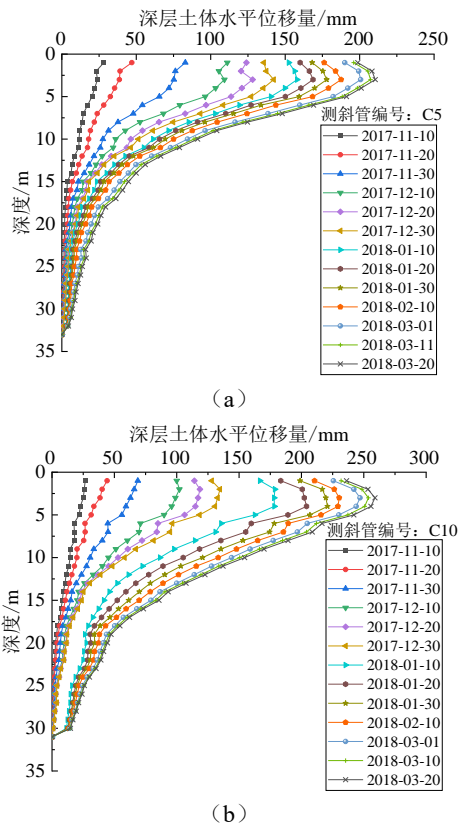


图 5 护岸 C5、C10 测斜管深层土体水平位移曲线
Fig. 5 Horizontal displacement curves of deep soil in C5 and C10

表 3 护岸测斜管深层土体水平位移值统计表

Table 3 Statistic horizontal displacement values of deep soil in inclinometer tube of revetment

测点编号	埋设深度/m	最大水平位移量/深度位置	水平位移速率/(mm/d)
C1	25	119 mm/深度 3 m	0.82
C2	30	125 mm/深度 3 m	0.84
C3	25	131 mm/深度 3 m	0.89
C4	20	185 mm/深度 2 m	1.27
C5	33	211 mm/深度 3 m	1.48
C6	32	126 mm/深度 3 m	0.88
C7	33	171 mm/深度 2 m	1.22
C8	32	130 mm/深度 3 m	0.93
C9	30	223 mm/深度 3 m	1.59
C10	31	259 mm/深度 3 m	1.85
C11	36	178 mm/深度 2 m	1.30
C12	36	167 mm/深度 3 m	1.22

受吹填加载引起的侧向挤压和下卧淤泥的侧向流动共同作用, 护岸深层土体水平位移随吹填施工的范围、吹填砂往护岸方向推进的过程而变化, 具有明显的时程特性。吹填施工结束进行现场整平时测值增大, 整平完成后又趋于稳定。各测点深层

土体水平位移变化体现出与吹填施工方式、吹填砂加载引起的侧向挤压作用和狭长护岸单侧临空的结构特点等基本一致的规律性: 随着吹砂施工的逐步推进, 砂层厚度逐渐增大, 在吹填砂荷载作用下, 下卧未经处理的深厚淤泥将产生较大的竖向沉降变形和侧向挤出变形, 砂面逐渐靠近护岸, 其受到的吹填区淤泥侧向挤压的作用则增大。当吹填施工结束, 吹填区砂面达到设计标高时, 吹填砂厚度将达到最大, 此时护岸内侧受到的侧向挤压作用最大。

吹砂施工期间各测点深层土体水平位移累计值在 120~260 mm, 与测点所在的位置、吹填推进的范围与距离等有关。护岸深层土体水平位移主要发生在 0~15 m 深度范围内, 沿深度逐渐递减, 最大值发生在地面下 2~3 m 处, 与吹填整平后的陆域面基本一致, 符合一般性变形规律和实际施工状况。深层土体水平位移速率未超出预警值 (5 mm/d), 2018 年 3 月 20 日实测水平位移速率为 0~2 mm/d, 护岸处于稳定状态。

3.2 大面积不同荷载作用下单侧临空护岸深层土体水平位移特性统计分析

护岸的深层土体水平位移监测涵盖了自陆域形成到用地移交开发地基处理的全过程, 可分为两个阶段或过程, 先是大面积吹填砂的陆域形成过程, 接着是陆域场地采用插设排水板联合填土堆载预压进行地基处理的过程。两个阶段是连续的, 但作用于护岸的荷载性质与方式是有所差异的, 吹填砂荷载是流动、变化的, 水平逐步推进, 竖向逐步增大, 而填土堆载是逐层的土方实体荷载。故护岸深层土体水平位移特性也不同, 既具有施工先后的阶段性, 又体现荷载作用的累积特性。

图 6 绘制了吹填施工和填土堆载两个不同阶段结束时护岸深层土体水平位移曲线, 图 6 (a) 为吹填施工阶段, 图 6 (b) 为填土堆载预压阶段。图 6 (a) 曲线整体比较平滑, 处于护岸纵轴线不同位置的测斜管水平位移量具有一定的差异, 一部分测点的曲线比较集中, 另一部分测点的曲线分散性明显。而图 6 (b) 曲线的平滑感明显减少, 曲折度明显。所有测点的曲线都比较集中, 整体性、汇集性明显。

图 6 反映了两个不同阶段荷载性质、施加过程与方式的不同对护岸深层土体水平位移的影响。吹填施工阶段的荷载是吹填砂, 砂水混合物, 流动性大, 自由水排出速度快, 由无结构性混合物经快速排水落淤形成粗颗粒砂荷载, 荷载在施工过程中是流动变化的, 并逐步通过竖向和侧向作用于护岸, 土体水平位移是缓慢发展的, 分布曲线比较平滑。吹填施工结束后, 经过振动碾压平整达到设计标高, 用地开发建设时进行竖向排水板插设, 逐层填筑 3~4 m 的

外运土方进行堆载预压,荷载是压实的土体,填筑过程是持续累加的,下卧地基采用了竖向排水板,土颗粒密实性增强,传递荷载的能力和速度快。

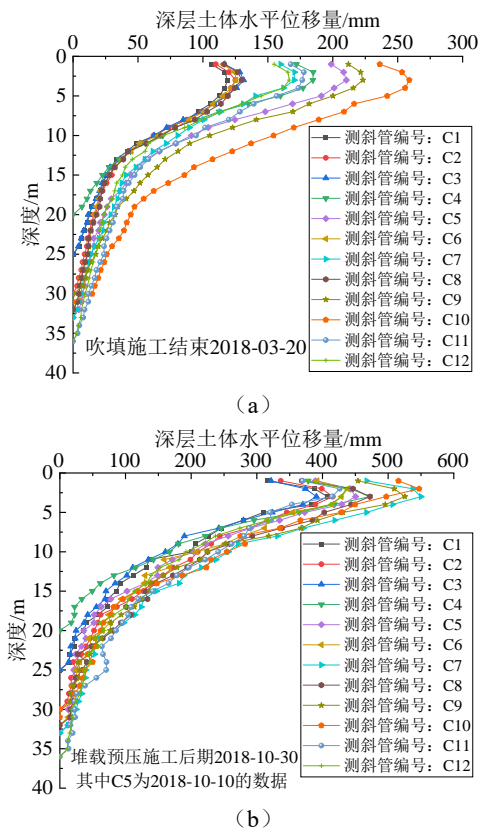


图6 吹填与填土预压阶段护岸深层土体水平位移曲线
Fig. 6 Horizontal displacement curves of deep soil of the revetment in filling construction and preloading

图7将吹填结束时与填土满载时护岸各测斜管的实测最大水平位移量进行了对比,图7(a)为吹填结束时各测斜管实测最大水平位移量柱状图,各测斜管实测最大水平位移基本发生在深度3m左右,与陆域表面标高基本一致。不同的测斜管位置,最大水平位移量有一定的差别,反映出吹填施工分区推进过程的影响。图7(b)同时列出了吹填结束和填土满载时各测斜管实测最大水平位移量柱状图,图7(c)为吹填结束和填土满载时各测斜管实测最大水平位移量比值的柱状图。填土预压期间产生的水平位移量大大超过吹填施工期间,两者的比值达到1.1~2.6。同样反映了两个阶段荷载性质与施加过程的影响。吹填施工过程长,荷载为砂水混合物,水平推进过程中预留了安全距离,填土预压阶段荷载为逐层压实土体,下卧淤泥地基通过竖向排水板进行排水固结,填土荷载作用于下卧地基所产生的对护岸的侧向挤压作用增大。护岸不同位置区域受到的侧向挤压作用不一样,水平位移量也不同。

图8绘制了从吹填施工到填土满载时护岸各测斜

管水平位移最大值的全过程散点分布图,吹填施工期间实测最大水平位移量的增长斜率小于填土预压阶段,反映出吹填施工期间的水平位移量小于填土预压期间,护岸不同位置区域各测点变形量不同且随荷载增大而增加,当填土满载时护岸深层土体水平位移量达到最大。

图9综合统计了护岸各测斜管实测最大水平位移量与邻近吹填区沉降量的散点分布情况,给出了其相关性,可见吹填施工期间,护岸深层土体水平位移量与邻近吹填区的沉降量具有较为明显的相关性。

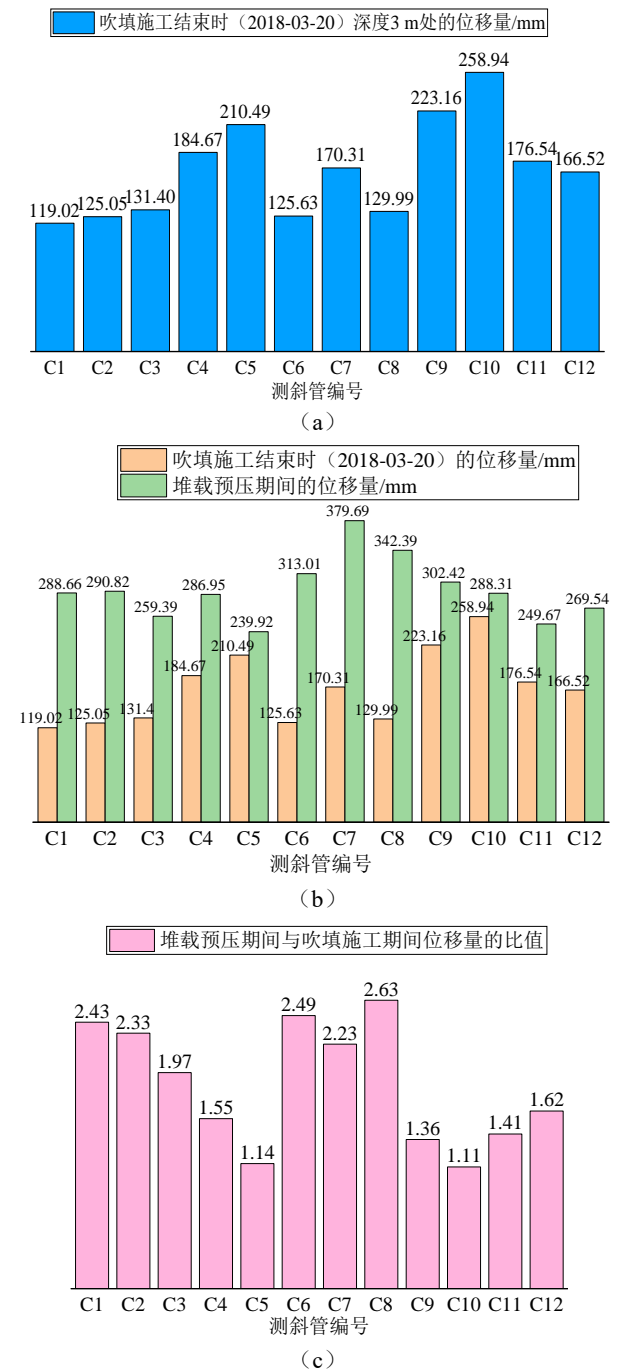


图7 吹填与填土预压阶段护岸深层土体水平位移量柱状图
Fig. 7 Histogram of distribution of horizontal displacement of deep soil of the revetment in filling construction and preloading

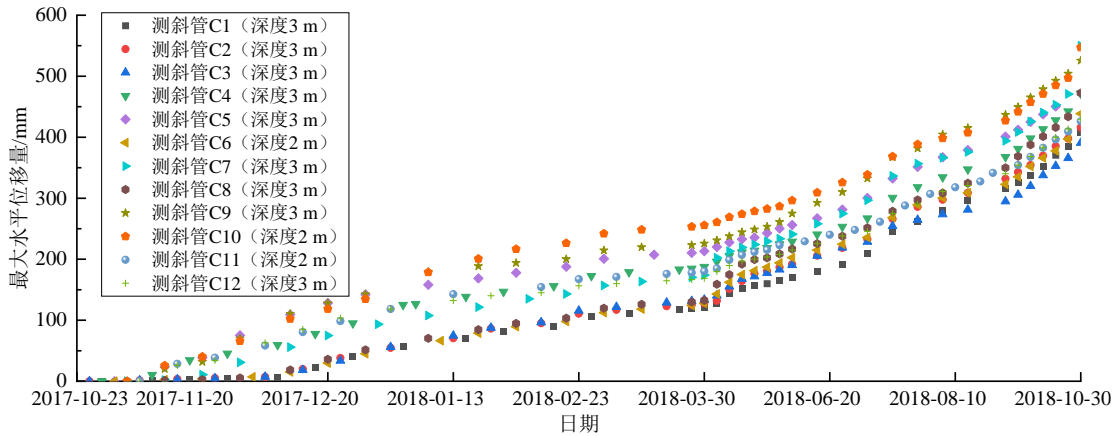


图 8 护岸深层土体最大水平位移量全过程散点图

Fig. 8 Scatter plot of the maximum horizontal displacement of the deep soil layer in the revetment throughout the entire process

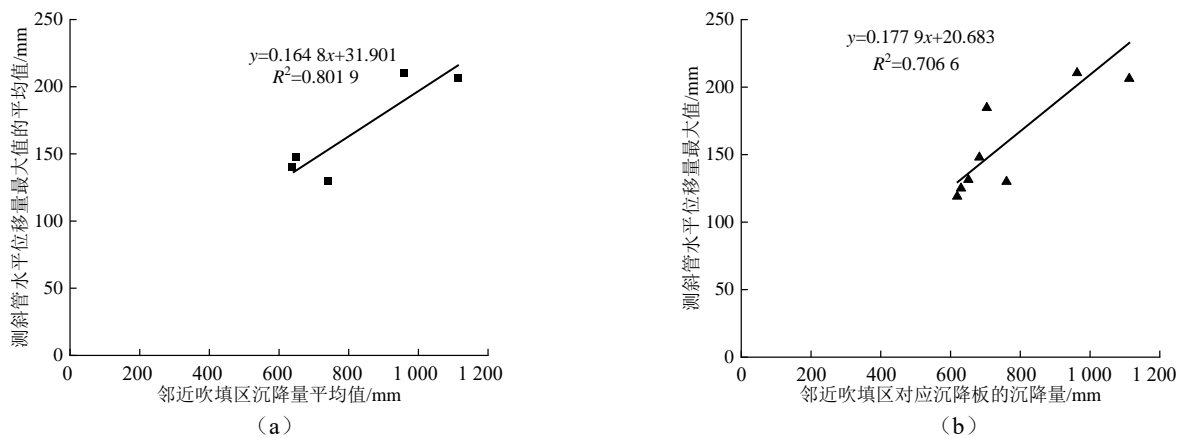


图 9 护岸深层土体最大水平位移量与邻近吹填区沉降量的散点相关图

Fig. 9 Scatter correlation diagram between the maximum horizontal displacement of deep soil in the revetment and the settlement of adjacent reclamation areas

4 结 论

(1) 截至 2018 年 3 月 20 日吹填施工结束时, 实测泥面沉降量最大值为 1 896 mm, 最小值为 437 mm, 平均值为 856 mm, 停测时各测点沉降速率为 0~3 mm/d, 沉降稳定。护岸深层土体水平位移量为 120~260 mm, 主要发生在 0~15 m 深度范围内, 最大值发生在地面下 2~3 m 处, 水平位移速率为 0~2 mm/d, 护岸稳定。采用预留吹填边界距离, 实施分块超高快速吹填、逐步推进的设计方案是合理的。

(2) 泥面沉降的差异性较大, 沉降量标准差为 297 mm, 变异系数达到 0.37。初期沉降占总沉降量的比值较大, 大多集中在 30%~60%, 平均值为 47.8%, 少数达到了 70%~80%。初期沉降与板下稀泥流动及快速施工的方式有关。各分区的平均沉降量与平均吹填厚度呈现一定的正相关性, 压缩比与平均淤泥厚度呈现一定的负相关性, 压缩比与平均吹填厚度/平均淤泥厚度呈现较好的正相关性。沉降监测数据反映的规律性符合该工程的地质条件和施工建设特点。

(3) 护岸深层土体水平位移监测涵盖了大面积吹填砂过程和填土堆载预压过程。两个过程是前后连续的, 但作用于护岸的荷载性质与方式有所差异, 故护岸深层土体水平位移变化特性也不同, 既具有施工先后的阶段性, 又体现荷载作用的累积特性。吹填施工期间, 受吹填加载引起的侧向挤压和下卧淤泥的侧向流动共同作用, 护岸深层土体水平位移随施工范围、吹填砂推进的过程而变化, 具有明显的时程特性。护岸深层土体水平位移量与邻近吹填区的沉降量具有较为明显的相关性。

参考文献

[1] 唐彤芝, 赵维炳, 关云飞, 等. 大面积吹填淤泥土表层快速硬化处理技术[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009. TANG Tong-zhi, ZHAO Wei-bing, GUAN Yun-fei, et al. The research report of the surface-layer improvement technology on the large area of dredger fill sludge[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009.