



# 孟加拉滨海相复杂互层地基 真空预压加固特性研究

胡小波<sup>1</sup>, 王海燕<sup>1</sup>, 康湘龙<sup>2</sup>, 贾涛<sup>1</sup>

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对孟加拉国某港口工程真空预压加固中遇到的透水性较差的黏土层和透水性较好的砂土层反复交互出现, 可能存在边界透水透气、地基固结规律复杂难以预测、地基加固效果难以预测等问题。依托工程的试验区块及典型施工区块, 研究黏土搅拌桩的密封墙密封效果、透水层对固结速度理论计算的影响、复杂互层场地加固后的物理力学特性改变等。主要采用试验检测和试验实测数据与理论计算数据对比分析的方法, 对表层沉降-时程曲线、孔隙水压力消散曲线、加固前后的 SPT 指标、压缩性指标等比较研究。结果表明: 黏土密封墙在粉砂地层具有良好的适应性, 透水性砂层的存在对于实际场地固结的影响远小于理论或者理想边界条件下的试验, 真空预压对于复杂互层地基具有较好的加固效果等。对于在复杂互层地基上的真空预压法加固设计具有一定的参考意义。

**关键词:** 复杂互层地基; 真空预压加固; 黏土密封墙

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0207-08

## Characteristics of vacuum preloading reinforcement for complex interlayered foundations in coastal area of Bangladesh

HU Xiaobo<sup>1</sup>, WANG Haiyan<sup>1</sup>, KANG Xianglong<sup>2</sup>, JIA Tao<sup>1</sup>

(1. CCCC Third Harbor Scientific Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** To the repeated interaction between the clay layer with poor permeability and the sand layer with good permeability encountered in the vacuum preloading reinforcement of a port project in Bangladesh, there may be problems such as boundary permeability, complex and difficult to predict foundation consolidation laws, and difficult to predict foundation reinforcement effects. Based on the experimental and typical construction blocks of the project, this article focuses on the sealing effect of clay mixing piles on the sealing wall. The influence of permeable layers on the theoretical calculation of consolidation velocity, as well as the changes in physical and mechanical properties of complex interlayered sites after reinforcement are studied. This article mainly uses experimental detection and comparative analysis of experimental measured data and theoretical calculation data to compare and study the surface settlement time history curve, pore water pressure dissipation curve, SPT index before and after reinforcement, compressibility index, etc. The results show that clay sealing walls have good adaptability in silty sand formations, and the presence of permeable sand layers has a much smaller impact on actual site consolidation than experiments under theoretical or ideal boundary conditions. Vacuum preloading has a good reinforcement effect on complex interlayer foundations. It has certain reference significance for guiding the design of vacuum preloading reinforcement on complex interlayer foundations.

**Keywords:** complex interlayer foundation; vacuum preloading reinforcement; clay sealing wall

收稿日期: 2023-09-12

作者简介: 胡小波 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水运工程地基处理, 深基坑等岩土工程。

孟加拉国位于南亚次大陆东北部的恒河和布拉马普特拉河冲击而成的三角洲<sup>[1]</sup>，该国主要港口、航道区域的土层为松散-稍密状态的粉细砂或淤泥质黏土、粉质黏土<sup>[2]</sup>。当地典型的地层分布为软黏土、粉砂、黏土夹粉砂、粉砂夹黏土，透水性好的粉细砂和透水性差的黏土呈交互状出现。根据经典的土体二维渗透固结理论，下部透水性较好的粉细砂层可视为排水层，其存在可缩短土体的竖向排水路径，加快孔隙消散，促进排水固结。双面排水情况下，竖向排水固结的时间理论上可以缩短至单面排水时的 1/4。然而，该结论是通过室内试验和理论推导得出的。在实际地质条件下，由于透水性夹层不如室内试验理想，对于透水性夹层的存在能在多大程度上发挥作用，目前没有清晰的认识或界定。严红霞等<sup>[3]</sup>在真空预压加固夹薄层透水层软土固结特性中，通过试验分析夹层对排水效果的影响，认为当透水层的渗透系数与其厚度的乘积跟软

土层渗透系数与其厚度乘积的比值为 0.1~100 时，透水层对于加固土体的固结效果显著，当比值大于 100 时，透水层接近完全排水边界条件。

1 工程及地质概况

本项目主要包括防波堤、码头、港池以及陆域形成工程，其中陆域场地面积约 120 万 m<sup>2</sup>，场地原始高程 3.3~3.6 m，回填高程 6.2~6.9 m，回填料为港池干挖土或者吹填粉细砂。其中，一期工程场地面积约 33 万 m<sup>2</sup>。本场地主要为第 4 系全新统海相与海陆交互相沉积层，自上而下主要为：①素填土(黏土)，②黏土，③<sub>1</sub> 淤泥、③<sub>2</sub> 淤泥质黏土，④<sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土夹粉砂，⑤<sub>1</sub> 粉砂夹粉质黏土、⑤<sub>2</sub> 粉砂夹粉质黏土、⑤<sub>3</sub> 粉砂、⑤<sub>4</sub> 粉砂、⑤<sub>5</sub> 粉砂夹粉质黏土，⑥<sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土夹粉砂、⑥<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土夹粉砂，其下为粉砂层。部分典型土层的渗透系数见表 1，典型地层剖面见图 1。

表 1 部分典型土层渗透与固结参数

土层编号	土层名称	竖向固结系数 $C_v/$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	水平固结系数 $C_H/$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	垂直渗透系数/ ( $\times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水平渗透系数/ ( $\times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
②	黏土	0.81	0.95	0.481	1.02
③ <sub>1</sub>	淤泥	1.90	1.55	2.550	5.75
③ <sub>2</sub>	淤泥质土	2.15	2.33	1.880	8.58
④ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	4.88	6.01	13.360	73.15
⑥ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	4.28	5.96	12.030	85.12
⑦ <sub>4</sub>	粉质黏土夹粉砂	1.59	4.79	2.880	137.03

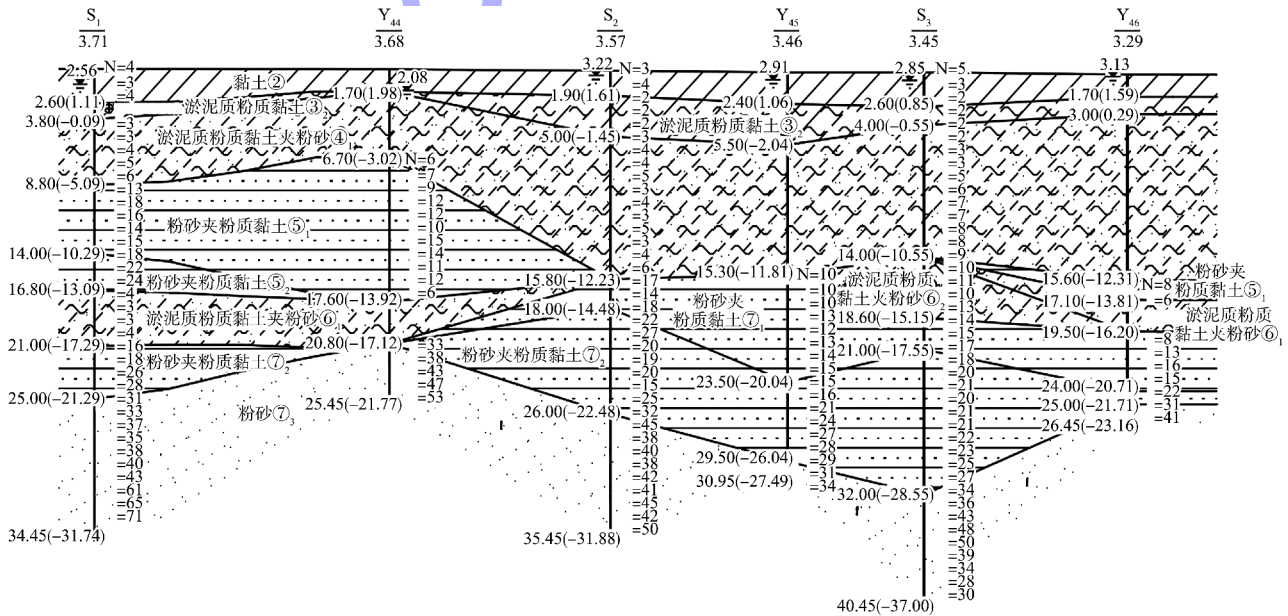


图 1 场地典型地层分布 (单位: m)

由图1可知,该场地地层分布主要表现两个特征:1)透水性差的黏土、淤泥质黏土或淤泥质黏土夹粉砂与透水性较好的粉砂、粉砂夹黏土反复交替出现,反映了地层形成过程中复杂的沉积特性;2)在空间上同一土层的厚度在场地不同的位置厚度起伏较大,土层在空间上的分布具有高度的复杂性。

根据场地的地质条件、场地使用荷载、工后沉降和表层承载力要求,一期场地经地基加固工艺适应性研究和理论计算,采用真空预压法加固,需重点解决地层中透水性较大粉砂层对边界的影响。真空预压加固的主要技术指标为:1)膜下真空度不小于80 kPa;2)抽真空时间一般不小于90 d,最终以现场满足验收标准为依据,可适当调整;3)卸载标准为根据实测沉降曲线推算的固结度(双曲线法)大于85%,且地面沉降速率连续10 d的平均沉降量不大于3 mm/d;4)满足表层承载力检测要求。

## 2 砂土地基密封墙成墙施工工艺适应性

场地原状地基土为黏土和透水性较好的粉砂、粉砂夹粉质黏土互层,采用真空预压进行地基加固时,其密封效果直接关系到加固的成败。在海陆交互相沉积地层中,夹砂互层普遍存在。目前常见的做法是采用密封墙将透水性较大的砂层进行隔断处理<sup>[4]</sup>。考虑到施工场地地质复杂多变,本项目在初步设计和施工阶段采用了双排 $\phi 700$  mm水泥搅拌桩,要求加固后的渗透系数低于 $1 \times 10^{-5}$  cm/s,通过钻芯取样的方法进行试验测定。由于项目场地面积较大,当地水泥供应相对紧张,而场地附近黏土易于获取,因此在真空预压试验区进行黏土密封墙密封效果验证性试验。黏土密封墙单根桩黏土掺量不低于25%,泥浆密度为 $1.3 \text{ g/cm}^3$ ,采用双搅头深层搅拌机,刀头为2个直径70 cm的搅刀,搭接宽度20 cm。施工采用两喷两搅工艺,即贯入输浆拌合→提升输浆拌合→贯入输浆拌合→提升输浆拌合。贯入速度0.8 m/min、提升速度0.5 m/min,钻头每转1圈

的提升或下沉量宜为10~15 mm,额定浆量在桩身长度范围应均匀分布,当钻头预搅下沉至预定高程、水泥浆液到达出浆口时,应在水泥浆液与桩端土充分搅拌30 s后再提升钻杆。

在搅拌施工完成后,进行钻芯采样检测,并在标准条件下对不同深度的试样进行水平和竖向的渗透试验,本次试验钻孔采样深度至23.3 m,共采取23个试样。从检测结果看,经黏土双轴搅拌后,垂直渗透系数达到 $10^{-6}$ 、 $10^{-7}$ 、 $10^{-8}$ 的共22个,占比约96%,全部达到 $10^{-5}$ 量级;水平向渗透系数达到 $10^{-6}$ 、 $10^{-7}$ 、 $10^{-8}$ 的共19个,占比约83%,只有1个测点为 $10^{-4}$ ,不合格率约3.5%。水平向渗透系数较大的层位深度17~20 m,为⑤<sub>2</sub>层粉砂夹粉质黏土层。总体来说,经黏土搅拌后形成的双轴黏土密封墙渗透系数较小,可以满足设计要求的密封要求,为真空预压提供一个较有利的边界条件。

## 3 软硬互层地基真空预压加固固结特性

滨海相交互沉积反映了在地层形成过程中海洋环境交替变化的历史,该类型沉积表现为明显的互层特性。互层土从渗透特性分析,其水平等效渗透系数 $k_h$ 和竖向等效渗透系数 $k_v$ 分别为:

$$k_h = \frac{1}{H} \sum k_j H_j \quad (1)$$

$$k_v = H / \left( \sum \frac{H_j}{k_j} \right) \quad (2)$$

式中: $k_j$ 为各分层土层渗透系数,cm/s; $H_j$ 为各分层土厚度,m; $H$ 为土层总厚度,m。

由式(1)、(2)可知,互层地基的水平渗透系数主要由渗透系数较大的砂层起主导作用,而竖向等效渗透系数主要受渗透系数较小的黏性土层起控制作用。以一期工程中地层分布较为代表性的 $A_2$ 、 $A_4$ 、 $A_{13}$ 区块进行研究分析,其中 $A_2$ 区块塑料排水板长度17 m,塑料排水板至⑤<sub>1</sub>层; $A_4$ 区块塑料排水板长度15 m,塑料排水板至⑤<sub>4</sub>层; $A_{13}$ 区块塑料排水板长度23 m,塑料排水板至⑥<sub>1</sub>层。上述区块典型钻孔土层分布见表2。

表 2 A<sub>2</sub>、A<sub>4</sub>、A<sub>13</sub> 区块典型钻孔土层分布

土层 编号	土层名称	A <sub>2</sub> 区 S <sub>13</sub>	A <sub>4</sub> 区 S <sub>28</sub>	A <sub>13</sub> 区 S <sub>45</sub>
		钻孔土层 分布/m	钻孔土层 分布/m	钻孔土层 分布/m
②	黏土	1.7	1.5	1.5
③ <sub>2</sub>	淤泥质黏土	2.3	0.7	1.5
④ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	3.6	—	4.5
⑤ <sub>1</sub>	粉砂夹粉质黏土	10.2	1.3	4.5
⑤ <sub>4</sub>	粉砂	—	9.5	—
⑤ <sub>5</sub>	粉砂夹粉质黏土	—	1.1	—
⑥ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	5.0	5.9	6.7
⑦ <sub>2</sub>	粉砂夹粉质黏土	2.2	2.5	11.1
⑦ <sub>3</sub>	粉砂	—	3.5	5.6

由表 2 可知，在 A<sub>2</sub> 区塑料排水板打设范围内，粉砂或粉砂夹黏土层等渗透性较好的土层厚

度占打设深度的比例约为 58%，A<sub>4</sub> 区比例约为 80%，A<sub>13</sub> 区为 47%。可见在 3 个区块中 A<sub>4</sub> 区渗透性较好的土层占比较高，而 A<sub>13</sub> 区占比最低。A<sub>2</sub> 区于 2020-010-26 开始抽真空，于 2020-11-07 满载，实际真空预压时间取 96 d；A<sub>4</sub> 区于 2022-01-17 开始抽真空，于 2022-01-23 满载，实际真空预压时间取 54 d；A<sub>13</sub> 区于 2021-07-15 开始抽真空，于 2021-07-20 满载，实际真空预压时间取 103 d。分析可知，在该复杂互层场地，塑料排水板打设范围内的透水性土层在固结速度上起到了决定性作用，即复杂软硬互层场地，打设塑料排水板后，径向固结起到了决定性的作用。仅以 A<sub>13</sub> 区块为代表分析其沉降-时间曲线的沉降规律，见图 2。

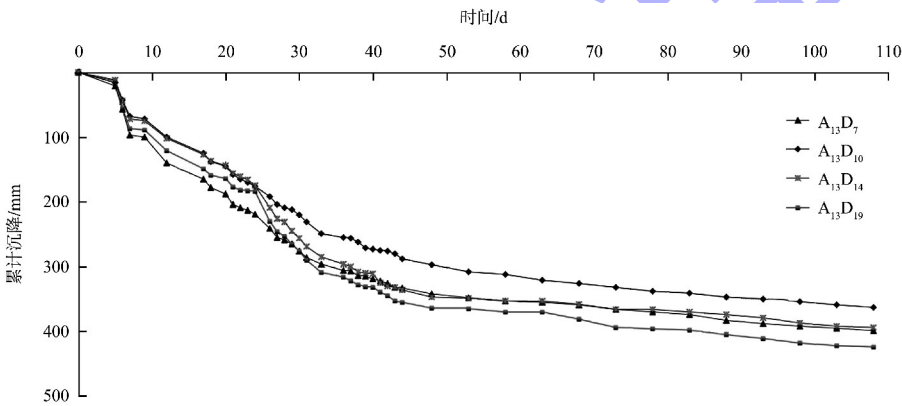


图 2 A<sub>13</sub> 区累计沉降量-时间变化曲线

由图 2 可知，场地沉降量主要发生在真空预压初期，在 A<sub>13</sub> 区抽真空前期 40 d 内，基本可达到总沉降量的 75%，而在抽真空后期的沉降曲线较平缓。上述沉降值不包含场地回填时在回填荷

载作用下的沉降值，场地总沉降值根据前期监测结果，并结合抽真空期间的沉降监测数据进行合并计算。各区块根据监测数据推算的固结度和理论计算的固结度对比见表 3。

表 3 真空预压监测数据与理论计算对比

区块	实际抽 气数/d	总沉降		固结度	
		施工期监测值/m	按实际施工时间计算的沉降/m	按监测值推算的固结度	按实际施工时间推算的理论固结度
A <sub>2</sub>	96	0.836	0.863	93.5%	90.9%
A <sub>4</sub>	54	0.613	0.506	86.2%	88.0%
A <sub>13</sub>	110	0.820	0.993	87.2%	94.5%

根据表 3 可知，在 A<sub>2</sub>、A<sub>4</sub>、A<sub>13</sub> 区块分别抽真空 96、54、110 d 后，按照现场表层沉降监测数据推算的固结度分别为 93.5%、86.2%、87.2%，均达到了按照实测沉降推算固结度不低于 85% 的设计要求。上述固结度与理论固结度(按照单面排

水条件下的砂井处理地基二维固结理论计算)相对接近。按照砂井地基固结理论，在瞬时加载条件下的地基总应力平均固结度  $U_{tz}$  与竖向固结度  $U_z$  和径向(水平)固结度  $U_r$  相关<sup>[4-5]</sup>：

$$U_{tz} = 1 - (1 - U_z)(1 - U_r) \quad (3)$$



$$U_r = 1 - \exp\left(1 - \frac{8C_h t}{F(n)d_e^2}\right) \quad (4)$$

$$U_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\right) T_v \quad (5)$$

$$\text{其中:} \quad T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (6)$$

式中:  $C_h$  为水平向固结系数;  $d_e$  为砂井等效间距, m;  $T_v$  为时间因子,  $C_v$  为竖向固结系数,  $H$  为土层排水距离, m。

根据该理论, 地基水平向固结速度主要由水平向固结系数、井径比因子、塑料排水板等效直径、时间等因素决定。竖向固结速度主要由时间因子决定, 时间因子与加固时间、竖向固结系数和排水距离相关。其中排水距离与时间因子是平方的倒数关系, 影响更加明显。表3中理论固结度计算时  $H$  取值是基于单面排水考虑, 即不考虑加固范围内及层底粉砂层对排水距离  $H$  的影响, 在经典理论中, 若为双面排水, 排水距离则按  $H/2$  考虑, 时间因子放大4倍; 若为多面排水, 则距离更短, 时间因子更大。在研究区块中, 如果考虑其中⑤<sub>4</sub>、⑤<sub>5</sub>、⑦<sub>2</sub>、⑦<sub>3</sub>等粉砂层对竖向排水距

离的影响, 则按照砂井二维固结理论计算的地基平均总固结度明显大于实测数据推算的固结度。这可能是因为在实际地基条件下, 砂层的排水条件与试验中理想的条件不同, 其边界条件没有试验条件下的理想。因此, 在进行实际工程设计时, 对于加固范围内存在砂层等排水层的地基固结度计算, 应谨慎采用双面或者多面排水固结参数。

#### 4 软硬互层地基真空预压处理效果

以试验区块  $S_1$  为例对复杂互层地基真空预压加固效果进行分析<sup>[5]</sup>,  $S_1$  区块原泥面高程 3.5 m, 陆域形成时回填至 6.2 m, 回填料为黏土, 初始水位 4.0 m。试验区在预压过程中对表层沉降、分层沉降、水位、真空压力、孔压等进行监测, 并在加固前后进行详细的对比勘察取样检测。为了更好地了解其沉降规律, 进行超过设计要求的抽真空试验, 总共抽真空时间长达 142 d。试验区采用分级加真空的措施, 减轻抽真空初期泥浆对于塑料排水板的淤堵, 在抽真空半个月后达到满载 80 kPa。  $S_1$  区孔压-时间变化曲线见图3。

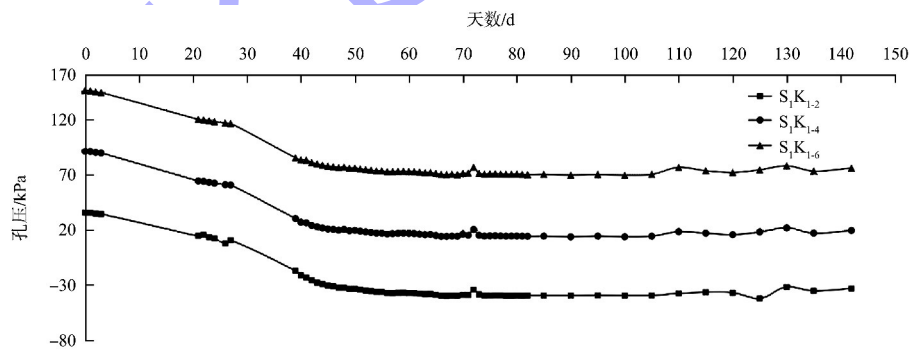


图3  $S_1$  区块孔压-时间变化曲线

仅对  $S_1K_{1-2}$ 、 $S_1K_{1-4}$ 、 $S_1K_{1-6}$  3 个不同埋置深度的孔压-时间曲线进行分析, 3 个孔压计埋置高程分别为 0.5、-5.0、-10.5 m, 在初始水位以下 3.5、9.0、14.5 m, 分别埋置于③<sub>2</sub> 层淤泥质黏土层、⑤<sub>1</sub> 层粉砂夹粉质黏土层, 孔压计初始数值与水位相关性良好。由图3可知, 在抽真空的前40 d, 孔压消散速度较快; 第40 d时, 孔压消散值约达到

62 kPa, 平均消散速度约为 1.5 kPa/d, 该速度与沉降曲线基本一致, 可以较好地相互印证; 至第 65 d 时, 孔压消散基本稳定, 最大达到约 75 kPa。从  $S_1$  区域孔压初始值可以看出, 由于孔压计埋设于土体中的不同深度, 初始值相差较大, 但其消散曲线高度重叠, 说明真空压力在不同深度处传递良好, 孔压测量值真实可靠, 孔压消散的最大

值与抽真空压力较为接近, 同样说明真空压力在  
试验区不同深度部位传递情况良好。本区块土体

分层沉降-时间曲线见图 4( 仅选取部分代表性的  
测点)。

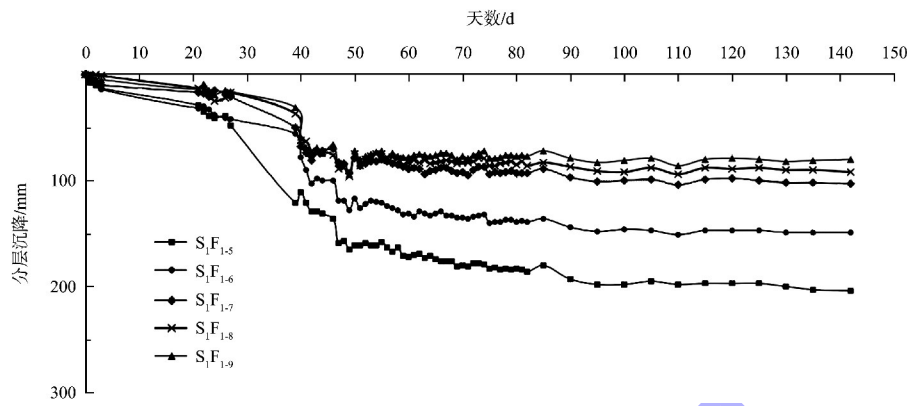


图 4 S<sub>1</sub> 区试验区块分层沉降-时间变化曲线

依据分层沉降观测值计算得到的各分层层位的  
压缩量见图 5, 除了前期由于测量误差带来的  
差异外, 读数约 40 d 时, 各分层压缩量与表层沉  
降的时间相关性良好, 逐渐趋于稳定。由于本场地  
前期进行过填土, 在填土期间发生了较大的预压沉  
降, 经过地形测量, S<sub>1</sub> 区真空预压前平均累计沉降  
量(包括堆载期间沉降和插板期沉降)为 334 mm,  
该区真空预压期间共设置沉降标 6 个, 起止时间  
为 2020-10-28—2021-03-19, 平均累计沉降量为  
407 mm, 最后 12 d 平均沉降速率为 0.3 mm/d, 远

低于设计要求的最后 10 d 小于 3 mm/d 的要求, 施  
工期间累计总沉降量为 74.1 cm。在设计荷载下,  
该区块的沉降理论计算结果见表 4。

表 4 S<sub>1</sub> 区块沉降计算成果

阶段	沉降计算值/cm		
	回填层	加固层	下部未加固层
施工期	20.0	63.1	1.9
使用期	6.7	41.3	7.5
工后沉降	0	0	5.6
工后总沉降		5.6	

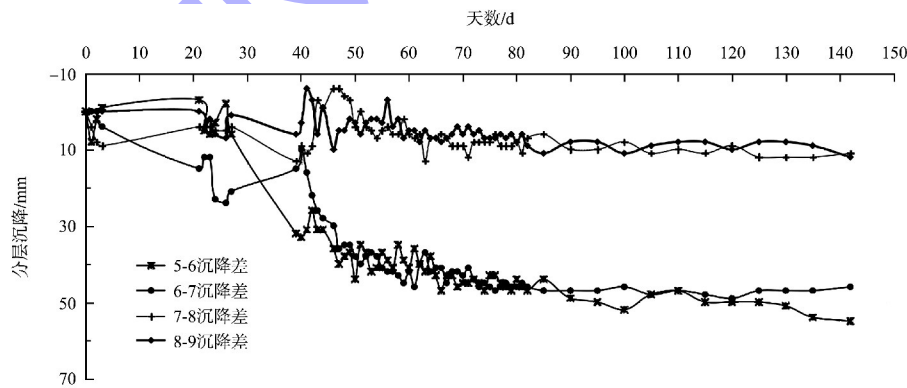


图 5 各分层沉降测点之间的沉降差值分布

由表 4 可知, 该区块的理论计算沉降量为  
85.0 cm, 与监测沉降量相差 11.0 cm, 约减小  
13%, 基本达到设计预期值。抽真空结束后, 对  
试验区块进行了表层载荷板试验, 根据 *P-S* 曲线

推算的表层承载力特征值不小于 80 kPa。此外,  
在试验区真空预压前后, 进行了原状钻孔取样室  
内试验、标准贯入试验和静力触探试验, 加固前  
后其室内试验指标对比结果见表 5。

表 5 地基加固前后物理力学指标对比结果

土层编号	土层名称	阶段	含水率 $W/\%$	孔隙比 $e_0$	液性指数 $I_L$	无侧限抗压强度 $Q_u/\text{kPa}$	压缩模量 $E_{s_{0.1-0.2}}/\text{MPa}$
②	黏土	加固前	36.6	1.068	0.52	37.60	3.29
		加固后	35.7	1.016	0.45	75.90	3.34
		差异	-0.9	-0.053	-0.06	38.35	0.05
③ <sub>2</sub>	淤泥质黏土	加固前	36.5	1.002	1.07	22.20	3.29
		加固后	35.0	0.975	0.86	29.10	4.07
		差异	-1.5	-0.027	-0.22	6.90	0.78
④ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	加固前	38.2	1.069	1.15	19.20	3.19
		加固后	35.9	1.021	0.98	27.10	3.73
		差异	-2.3	-0.047	-0.17	7.80	0.54
⑤ <sub>1</sub>	粉砂夹粉质黏土	加固前	39.0	—	1.21	—	—
		加固后	39.2	1.113	1.06	41.70	3.17
		差异	0.2	—	-0.15	—	—

由表 5 可知, 经真空预压加固后, 土体的含水量、孔隙比、液性指数等物理指标均有不同程度的下降, 以③<sub>2</sub>、④<sub>1</sub> 层为例, 加固前为流塑状态, 液性指数分别为 1.07、1.15, 加固后为可塑

状态, 液性指数下降至 0.86、0.98。相应的, 其无侧限抗压强度、压缩模量都有不同程度的提高。该区原位标准贯入试验成果见表 6。

表 6 S<sub>1</sub> 试验区标准贯入试验成果

土层编号	土层名称	时期	测试次数/次	最大值/击	最小值/击	平均值/击	增长率/%
① <sub>2</sub>	黏土	加固前	3	6	5	5.7	22.8
		加固后	4	8	6	7.0	
②	黏土	加固前	5	6	2	3.6	58.3
		加固后	6	7	4	5.7	
③ <sub>2</sub>	淤泥质黏土	加固前	6	4	3	3.8	26.3
		加固后	6	5	4	4.8	
		加固后	19	10	4	6.1	
⑤ <sub>1</sub>	粉砂夹粉质黏土	加固前	6	10	5	8.3	20.5
		加固后	4	12	6	10.0	
⑤ <sub>2</sub>	粉砂夹粉质黏土	加固前	8	28	12	20.0	21.5
⑥ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	加固前	4	6	5	5.8	46.6
		加固后	6	12	6	8.5	

根据表 6 可知, ①<sub>2</sub> 层提高幅度为 22.8%, ②层提高幅度为 58.3%, ③<sub>2</sub> 层提高幅度为 26.3%, ⑤<sub>1</sub> 层提高幅度为 20.5%, ⑥<sub>1</sub> 层提高幅度为 46.6%。可知经过真空预压处理后, 各层位的土层物理力学指标均有较明显的提高。

5 结论

1) 通过现场黏土密封墙试验钻芯检测, 结果表明对于复杂中等以上透水性与弱透水性交替出现的土层, 双轴黏土搅拌桩密封墙选择合适的工艺, 可有效起到密封边界的作用, 密封效果良好。

2) 通过对真空预压区块的实际固结度进行推算, 发现该场地土的固结速度与不考虑透水层多面排水时的理论固结度基本一致, 说明虽然在室内理想条件和理论上, 砂层的存在能够缩短竖向排水距离, 加快竖向固结, 但在实际场地条件下, 由于边界条件为非理想条件, 在此类复杂互层地基加固项目的设计中, 应谨慎采用多面排水模型进行固结度计算。

3) 根据对加固前后土体的物理力学指标对比, 表明加固后各土层的含水量、孔隙率均明显下降, 其压缩性和抗剪强度指标明显增长, 涨幅

为 20%~55% (除表层砂土外)。说明对此复杂互层地基,经真空预压加固后,其浅层、深层各项土体物理力学指标均有较大幅度的改善,加固效果良好。

#### 参考文献:

- [1] 孙长帅,秦秀娟,黄香林.孟加拉国 Patuakhali 地区基本地质条件及岩土工程问题初探[J].山西建筑,2019,45(4):64-66.
- [2] 郑晓晶,张世殊,冉从彦,等.孟加拉国达卡软黏土的工

程特性及地基处理方法探讨[C]//2015 年全国工程地质学术年会.长春:中国地质学会,2015:194-198.

- [3] 严红霞,韩文君,吕伟华.真空预压加固夹薄弱透土层软土固结特性分析[J].林业工程学报,2020,5(6):155-161.
- [4] 李军,胡继业,邓元广.大面积吹填陆域真空预压密封墙处理技术的应用[J].水运工程,2004(2):44-48.
- [5] 何洪涛,焦淑贤,何汉艺,等.真空预压新技术加固吹填超软土的现场试验研究[J].水运工程,2019(9):265-272.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 172 页)

#### 参考文献:

- [1] 刘舒,白纪军,万莎.靠港船舶接用岸电信息管理与监控系统设计研究[C]//中国电力科学研究院.2016 智能电网发展研讨会论文集.北京:中国电力科学研究院,2016:352-358.
- [2] 中国电器科学研究院股份有限公司,江苏健龙电器有限公司,交通运输部水运科学研究院,等.工业用插头插座和耦合器 第 5 部分:低压岸电连接系统(LVSC 系统)用插头、插座、船用连接器和船用输入插座的尺寸兼容性和互换性要求:GB/T 11918.5—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [3] 中国船舶重工集团公司第七〇四研究所.船用电缆同轴软电缆的选择和敷设:GB/T 13029.2—2010[S].

北京:中国标准出版社,2010.

- [4] 唐跃中,刘舒,白纪军,等.船舶接用岸电技术的系统集成与工程应用[J].电力与能源,2018,39(2):215-220.
- [5] 陈彦奎,刘玉振,王翼,等.内河流域趸船式游轮码头船舶岸电连接模式的研究[J].中国设备工程,2020(18):207-208.
- [6] 邱方方.岸电上船自动控制系统的设计与实现[D].大连:大连海事大学,2017.
- [7] 陈明,石磊,侯锦福,等.船用岸电电缆快速连接及自动换相技术研究[J].广东造船,2015,34(5):60-61.
- [8] 杨庆生,许健波.船舶接用岸电系统的技术方案[J].电气时代,2022(6):42-44.

(本文编辑 王璁)

(上接第 206 页)

- [4] XU Y, LI D L, PENG L, et al. The mechanical mechanism analysis for mortar arch framework slope protection structure [J]. Advanced materials research, 2014, 859: 143-148.
- [5] 申文军.铁路废旧轨枕护坡骨架力学特性及稳定性分析[J].铁道建筑,2021,61(7):99-102.
- [6] 陈超.炳坑水库护坡人字形骨架技术的应用[J].河南水利与南水北调,2021,50(10):35-37.
- [7] LEE D H, YANG Y E, LIN H M. Assessing slope protection methods for weak rock slopes in Southwestern Taiwan[J]. Engineering geology, 2007, 91(2/4): 100-116.
- [8] CHEHLAFI A, KCHIKACH A, DERRADJI A, et al. Highway cutting slopes with high rainfall erosion in

Morocco: Evaluation of soil losses and erosion control using concrete arches [J]. Engineering geology, 2019, 260: 105200.

- [9] 夏微,曹洋.航道护坡拱圈施工温度约束应力分析[J].珠江水运,2021(3):84-86.
- [10] 唐赛乾.路基小型预制块骨架护坡结构与材料选型[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
- [11] 重庆市设计院,中国建筑技术集团有限公司.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [12] 张建国.浆砌片石拱形骨架护坡[J].路基工程,2000(2):42-43.

(本文编辑 赵娟)