

· 地基与基础 ·



超细颗粒悬浮状疏浚土真空预压加固特性研究

胡小波

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 浙江省乐清湾地区疏浚土具有高孔隙比、高黏粒含量、高含水率、高触变性、抗剪强度低及排水缓慢的特性, 工程性质差, 加固困难。依托乐清湾北港区吹填区真空预压工程, 设置4个3 000 m²的真空预压试验区, 研究相同真空度下不同塑料排水板间距、型号加固效果的差异, 通过膜下真空度、表层沉降、孔隙水压力等监测数据以及土体含水率、十字板抗剪强度的检测结果对加固效果进行分析, 同时结合含水率、十字板抗剪强度等检测数据, 对无结构疏浚土的物理力学指标离散性进行分析。结果表明, 采用真空预压加固超细颗粒无结构疏浚土时, 对于浅层加固, A与B型排水板没有明显差别, 塑料排水板间距小于100 cm时加固效果提升不明显; 无结构疏浚土加固后力学指标较离散而含水率指标较稳定, 建议采用含水率作为验收指标; 建议无结构疏浚土采用土的三相组成推算其压缩比和沉降量。

关键词: 高含水率; 强度变异; 疏浚土; 真空预压

中图分类号: U616+26; TU472.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0204-07

Characteristics of vacuum preloading reinforcement of ultrafine particle suspended dredgedsoil

HU Xiaobo

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

Abstract: Dredged soil in the Leqing Bay area of Zhejiang Province has the characteristics of high pore ratio, high clay content, high moisture content, high thixotropy, low shear strength, and slow drainage. Its engineering properties are poor, and reinforcement is difficult. Combining with a vacuum preloading project in the north port area of Leqing Bay reclamation area, we set up four 3 000 m² vacuum preloading test areas to study the differences in reinforcement effects of different plastic drainage plate spacing and models under the same vacuum degree, and analyze the reinforcement effect through monitoring data such as membrane vacuum degree, surface settlement, pore water pressure, as well as detection results of soil moisture content and vane shear strength. Then we analyze the dispersion of physical and mechanical indicators of unstructured dredged soil based on a large amount of testing data on moisture content and vane shear strength in the test area, and provide suggestions for reasonable acceptance indicators after reinforcement. The results show that when using vacuum preloading to reinforce ultrafine particle unstructured dredged soil, there is no significant difference between A-type and B-type plates for shallow reinforcement, and the improvement of reinforcement effect is not significant when the spacing between plastic drainage plates is less than 100 cm. After the reinforcement of unstructured dredged soil, the mechanical indicators are relatively discrete while the moisture content indicator is relatively stable. It is recommended to use the moisture content as the acceptance indicator. It is recommended to use the three-phase composition of the soil to calculate the compression ratio and settlement of unstructured dredged soil.

Keywords: high moisture content; strength variation; dredged soil; vacuum preloading

收稿日期: 2023-10-17

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、深基坑工程等。

真空预压法自 1952 年由瑞典皇家地质学院杰尔曼教授提出后, 受到了世界各国学术界和工程界的关注, 我国于 20 世纪 50—60 年代进行初步的技术原理探索, 并于 20 世纪 80 年代实现了工程化应用^[1]。目前真空预压法在我国已大面积应用于填海造陆工程吹填地基加固、公路软土地基加固等工程领域, 几代学者^[2-8]进行了不断的探索和深化, 目前已经从 20 世纪 80 年代初步实现工程应用, 发展出无砂法真空预压、直排式真空预压、真空联合堆载预压法、真空联合电渗预压法、药剂真空预压法、增压式真空预压法等, 真空预压的设备和手段越来越丰富。

我国乐清湾地区航道附近的土质与渤海、东海、黄海、南海等海域相比, 具有超细颗粒含量高、液性指数高、渗透系数低等特点, 由于细颗粒对塑料排水板具有淤堵效应, 因此乐清湾地区

的软土地基加固一直是工程界的难题。本文依托乐清湾北港区吹填陆域真空预压加固工程, 针对不同的塑料排水板间距、真空加载梯度、塑料排水板型号, 对该地区超细颗粒软土地基加固效果的影响进行较全面的分析和研究, 以指导工程实践找到更优的工艺参数。

1 疏浚土工程特性分析

本工程采用港池航道处疏浚土进行围堤内吹填, 根据地质勘察报告, 在勘察深度范围的岩土层为第四系海积淤泥层, 根据野外钻探、室内土工试验结果, 将钻探深度范围内揭露地层划分为 2 层: ①层为流塑状淤泥, 层厚 1.5~2.5 m; ②层同样为流塑状淤泥, 最大揭露厚度 10.7 m。土的主要物理力学指标见表 1。

表 1 土的物理力学指标

土层名称	含水率/%	密度/(kg·m ⁻³)	孔隙比	塑限	液性指数	压缩系数/MPa ⁻¹	水平固结系数/(10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)
①淤泥	66.3	1 620	1.824	19.0	2.12	1.42	2.48
②淤泥	74.0	1 560	2.076	22.9	1.97	2.37	1.43

根据表 1 的土体物理力学指标进行分析, ①和②层淤泥具有高孔隙率、高含水量、高灵敏度、高触变性、低抗剪强度及排水固结缓慢等特性, 工程性质很差, 是受荷后主要压缩层。经水力吹填后, 吹填土经长时间落淤后的的含水率往往超过 100%, 使得加固土处于一种无结构的悬浮状态。在工程场地采取土试样, 进行室内颗粒分析试验。试验采用密度计法, 测得拟加固吹填土试样的粒径分布曲线见图 1。

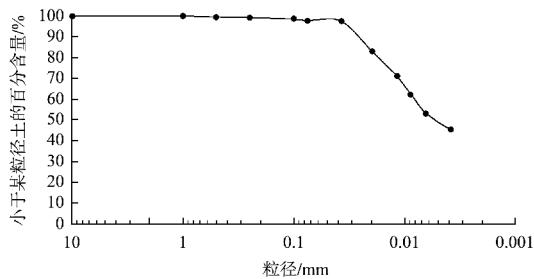


图 1 乐清湾北部吹填土粒径分布

由图 1 可知, 工程场地吹填土试样粒径小于 0.075 mm 的含量达到了 97.86%, 小于 0.005 mm 的含量达到了 49.04%, 属于非常典型的黏性土

质。由于吹填土属于无结构的泥水混合物, 在抽真空作用下, 极细的黏性颗粒随着真空负压极易向排水板聚积, 形成密实的土柱。再加上真空预压过程中吹填土的大变形导致排水板弯折等因素, 使真空度在此类吹填土中的传递非常困难, 影响了处理效果。本吹填工程采用 4 500 m³/h 的 IHC8527 型绞吸式挖泥船, 吹填时泥浆浓度为 60%~75%, 落淤 3 个月后泥浆浓度为 170%~180%, 经过长时间静置, 真空预压加固前的含水率为 95%~110%。

从微观角度看, 在软黏土颗粒细小、比表面积大、黏性强、黏聚力很大的性质条件下, 真空预压的效果会大幅降低, 较多结合水的存在也会导致排水效果差。因此研究工程场地吹填土的颗粒组成及矿物成分, 从宏观角度判断真空预压法的有效性具有很强的预见性和实用价值。在工程场地选取 2 份土试样, 采用 HX041 型 X 射线衍射仪, 在温度 25 °C、湿度 42% 环境下进行矿物成分检测, 结果见表 2。

表 2 矿物成分检测结果

试样分组	矿物成分占比/%				
	石英	蒙皂石	水云母	绿泥石	方解石
试样 1	10~15	15~25	20~30	30~35	<5
试样 2	10~15	15~25	35~40	25~30	<5

分析结果显示, 甬台温地区悬浮状疏浚土矿物成分以绿泥石为主, 占 30% 左右, 其次为水云母、蒙皂石、石英、方解石等。试样的主要矿物组成绿泥石、水云母、蒙皂石均属于黏土矿物, 使得该吹填土具有较高的塑性、较大的压缩性和较低的渗透性。同时, 拟加固土的结合水比例较大, 采用真空预压法处理相对较困难。

2 试验方案及主要过程

现场试验分 A~D 共 4 个试验区, 各试验区长、宽都为 100、30 m, 采用竖向排水板无砂真空预压试验对疏浚土进行加固。试验区域吹填淤泥厚度约为 5 m, 试验方案见表 3。

表 3 试验方案

试验区	塑料排水板间距/cm	真空施加梯度/kPa	板型	面积/m ²	加固深度/m
A	60, 80, 100	20, 40, 60, 80	B	3 000	5
B	60, 80, 100	30, 50, 80	B	3 000	5
C	60, 80, 100	40, 80	B	3 000	5
D	80	30, 50, 80	A, B	各 1 500	5

其中 A~C 试验区为不同排水板间距和不同真空梯度增长方案的比较, 在同一个试验区内分别设置间距为 60、80、100 cm 的竖向排水板加固区, 各小区面积均为 999 m² (长 33.3 m、宽 30 m), 同一个试验区采用同一张真空膜确保在同等真空度下进行试验。D 试验区为 A 与 B 型板的比较, 在 D 试验区分别插设 A 和 B 型排水板, 插设面积均为 1 500 m² (长 50 m、宽 30 m)。每个试验区均布置 3 台 7.7 kW 的射流泵, 采用人工开关泵的方式控制真空梯度。试验区于 2013-07-17 正式开始抽真空, 各试验区按照设计的真空梯度增长方案, 通过开关真空泵及控制开泵数量控制真空度的增长, 并于 2013-08-06 各区真空度全部达到 80 kPa,

于 2013-12-19 卸载, 中间在 8、10 月由于台风的影响分别停抽 6、5 d。真空度-时间曲线见图 2。

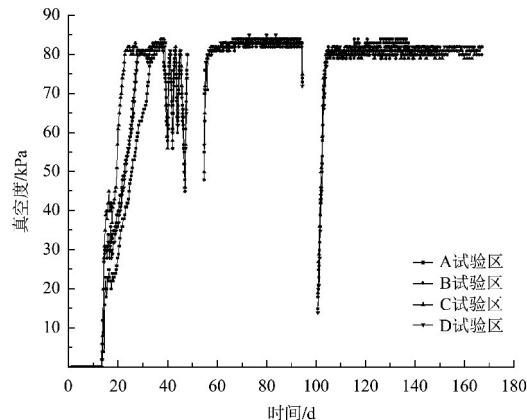


图 2 各试验区真空度-时程曲线

除去由于台风等客观因素的影响, 试验区真空度基本稳定在 80 kPa 以上, 试验区 80 kPa 满载时间为 115 d, 试验对表层沉降、孔隙水压力、地下水位、膜下真空度等进行全过程监测, 并在卸载后进行土体含水率、十字板强度等物理力学指标检测。

3 试验结果分析

3.1 插板间距对加固效果的影响

按照泰沙基土体固结理论, 砂井地基的平均总固结度与竖向、径向固结度均相关, 塑料排水板加固地基以径向固结为主, 而径向固结度主要与水平固结系数、井径比 n 以及预压时间 t 相关。其中井径比 $n = d_e/d_w$, 其中 d_w 为竖井直径, d_e 为砂井等效加固范围, 由砂井间距决定, 对于超细颗粒软黏土, 缩小塑料排水板间距能多大程度上改善其固结性能, 需要通过试验研究。A~C 试验区按照不同真空加载梯度下均分别设置 3 个不同间距插板区, 比较相同试验区内不同插板间距的加固效果, 以 A 试验区为例进行分析, 其中的 3 个区域的 CJA-1、CJA-3、CJA-5 测点 (对应排水板间距 60、80、100 cm) 观测的表层沉降见图 3。

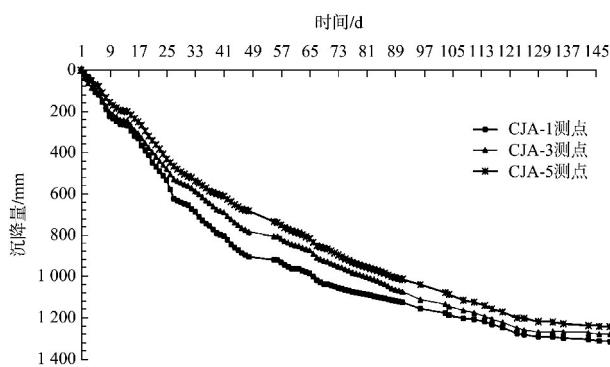


图3 A试验区不同间距表面沉降-时间曲线

根据各试验区表层沉降实测数据统计得到的沉降平均值见表4。

表4 各试验区沉降平均值

塑料排水板 间距/cm	沉降平均值/mm		
	A试验区	B试验区	C试验区
60	1 312	1 478	1 379
80	1 278	1 308	1 363
100	1 249	1 316	1 255

由图3、表4可看出,对于采用不同真空加载方式的A~C试验区,插板间距越小,表层沉降越大,特别在真空预压前期,间距越小,在表层沉降-时间曲线上其斜率越大,对应的固结速度越快。以C试验区为例,对不同插板间距的孔压消散情况进行分析,KYC-1、KYC-3、KYC-5分别为排水板间距60、80、100 cm加固区的孔压传感器,埋设深度均为2.5 m,其孔压消散-时间曲线见图4。

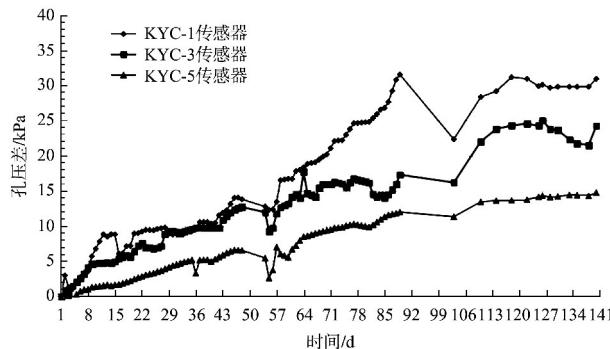


图4 C试验区不同插板间距加固区孔压消散曲线

由图4可看出,插板间距越小,孔压消散的速度越快且最终卸载时的孔压消散最大值越大。不过对于乐清湾地区超细颗粒饱和软黏土,孔压

消散最大值仅为32 kPa,与理论消散值80 kPa有较大的差距,说明对于此类土,井阻较大,传递到土体中间的有效真空度较小,土体的有效固结应力增量比堆载预压80 kPa低得多,这也印证本地区的疏浚土加固后无侧限抗压强度和十字板抗剪强度较低的事实。试验加固深度约为5 m,经真空预压后,压缩后的疏浚土厚度约为3.7 m,因此检测最大深度为3.5 m,分别采取C试验区0.5、1.5、2.5、3.5 m 4个不同深度的试样进行含水率检测,结果见表5。

表5 各深度不同排水板间距的疏浚土含水率

深度/m	疏浚土含水率/%		
	60 cm 塑料 排水板间距	80 cm 塑料 排水板间距	100 cm 塑料 排水板间距
0.5	55.44	60.25	65.39
1.5	55.18	60.48	72.94
2.5	52.75	64.48	68.69
3.5	55.46	62.46	70.96

由表5可看出,对不同加固深度的疏浚土含水率进行检测的结果表明,插板间距越小,土体中间的含水率越低。综合上述可得,在不同的真空梯度下,缩小塑排板间距均有利于加快土体固结,降低土体含水率,间距60 cm的加固效果总体优于间距80 cm,间距80 cm的加固效果总体优于间距100 cm。A~C试验区在间距60、80、100 cm时的平均沉降值分别为1 389、1 316、1 273 mm,间距60、80 cm的沉降分别比间距100 cm时的沉降大9.1%、3.3%。根据塑料排水板等效面积计算公式,计算在正方形插板条件下,间距60、80、100 cm的等效面积,从而计算其塑料排水板用量的比例,以间距100 cm时为标准用量1,则间距80 cm时用量为1.56,间距60 cm为2.78,上述通过缩小塑排板间距的方式,以间距100 cm时的用量作为基准,其沉降值提高3.3%、9.1%,相应的塑排板用量为原来的1.56倍、2.78倍。根据上述分析对于超细颗粒疏浚土加固,可以通过缩小塑料排水板间距的方式加快固结速度,提高加固效果,但是在塑料排水板间距小于100 cm后,通过缩小间距方式带来的效果提升需要通

过增加大量的材料和插板工作量实现, 从效费比的角度看, 并不划算, 因此真空预压法加固超软土地基应该有一个塑料排水板间距的最佳值。

3.2 塑料排水板型号对加固效果的影响

井径比 $n=d_e/d_w$, 对于塑料排水板, 竖井直径 $d_w=2(a+b)/\pi$, 其中 a 、 b 分别为塑料排水板宽度、厚度。由于塑料排水板 B 型板厚度大于 A 型板, 故其等效直径大于 A 型板, 井径比小于 A 型板, 理论固结速度大于 A 型板。D 试验区采用在同一张真空膜、相同插板间距条件下的 A 和 B 型板的加固效果进行实际对比试验, 对其表层沉降、加固后含水率、十字板抗剪强度等指标进行分析, D 试验区 A、B 型板加固区表层沉降见图 5。

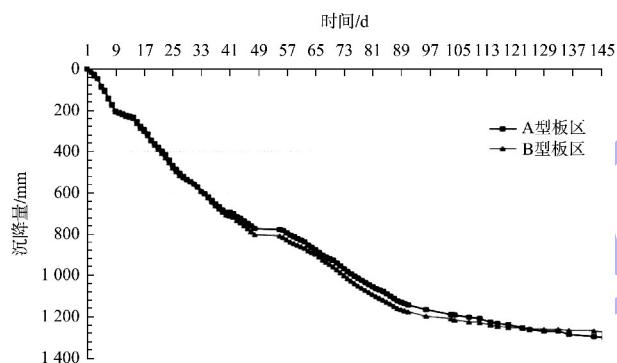


图 5 D 试验区 A、B 板插板区表层沉降-时间曲线

由图 5 可知, A 型板区表层沉降值为 1 326 mm, B 型板区为 1 294 mm, A 和 B 型板区沉降发展的趋势总体相似, 从曲线形态上看, 大概可以分 3 个阶段: 第 1 阶段为 1~48 d, 平均累计沉降约占总沉降的 63% 左右, 日均沉降为 16.4 mm/d; 第 2 阶段为 55~90 d (49~54 d 因台风天气停止抽真空), 平均累计沉降约占总沉降的 88%, 日均沉降为 10 mm/d; 第 3 阶段为 91~145 d, 该阶段时间占比约为总持续时间的 40%, 但是沉降占总沉降的 12%, 说明抽真空后期的加固效果不再明显。在 90 d 之前, B 型板区的沉降发展速率大于 A 型板区, 90 d 后 A 型板区的沉降速率大于 B 型板区, 120 d 后 A 型板区总沉降大于 B 型板区。加固后各区疏浚土含水率及十字板抗剪强度检测结果见表 6。

表 6 不同板型加固后疏浚土含水率和十字板强度对比

深度/ m	A 型板加固区		B 型板加固区	
	含水率/ %	十字板抗剪 强度/kPa	含水率/ %	十字板抗剪 强度/kPa
0.5	58.7	4.5	55.7	5.8
1.5	59.5	2.8	58.1	1.7
2.5	59.7	1.2	58.7	1.4
3.5	59.7	3.7	58.8	2.0
平均值	59.4	3.0	57.8	2.7

由表 5 可知, A 型板区加固后的疏浚土含水率总体略高于 B 型板区。这个结果似乎与图 5 的表层沉降数据矛盾, 考虑到它们的差值幅度较小, 这种差异可能是因为吹填的不均匀性、取样位置的差异引起的。从真空预压结束后, 现场的开挖情况看, 塑料排水板的四周存在很多土柱, 土柱周围的土体较硬, 而越靠近塑排板中间位置的土体越软。又可看出, A 型板区各个深度的平均十字板抗剪强度略高于 B 型板区, 总体来说, 本地区疏浚土加固后各个深度的十字板抗剪强度都较低。

根据上述结果分析, 对于加固深度较浅的超软土地基, 根据塑料排水板的理论出水量计算和 A、B 型板加固效果的现场试验对比, B 型板的加固效果并不明显优于 A 型板, A 型板完全可以满足真空预压加固的需求。以依托工程二期加固为例, A、B 型板的成本对比见表 7 (按平均加固深度 5 m 计算)。

表 7 A 和 B 型板成本对比

塑料排水板型号	单价/(元·m ⁻¹)	总量/万 m	总价/万元
A	1.35	1 371.093 7	1 851
B	1.50	1 371.093 7	2 057

将 A 型板应用于乐清湾北区二期工程, 直接节省材料费用 206 万元, 取得了明显的经济效益。

3.3 无结构土压缩性预测及验收标准探讨

试验区平均吹填厚度约为 5 m, 经过长时间落淤静置排水后, 真空预压加固前的含水率为 95%~110%, 以试验区间距 80 cm 的加固区为例, 平均沉降量约为 1 363 mm, 加固后平均含水率约为 63%, 根据表层沉降量推算的压缩比为 27.3%。对于高水率饱和无结构吹填软土, 很难在加固前通过现

场试验或者室内试验测得其压缩模量、压缩系数等指标。通过土体的三相组成原理,根据加固前后含水率的变化,对其压缩性进行推导,原理见图6。

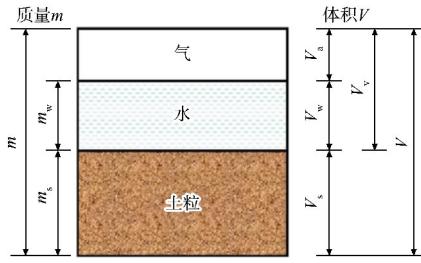


图6 土体固液气三相组成原理

因吹填土为饱和土,忽略其中空气所占的体积,则单位质量吹填土的体积可表示为:

$$V = V_s + V_w = \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_w}{\rho_w} \quad (1)$$

式中: m_s 为土颗粒质量, m_w 为水的质量, ρ_s 为土粒密度; ρ_w 为4℃蒸馏水密度。将土体含水率 $w = \frac{m_w}{m_s}$ 、土颗粒相对密度 $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ 代入式(1)可得:

$$V = \frac{m_s}{G_s \rho_w} + \frac{m_s w}{\rho_w} \quad (2)$$

据此可得体积变化率为^[9]:

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{(w_1 - w_2) G_s}{1 + w_1 G_s} \quad (3)$$

式中: ΔV 为加固前后变化的体积, V_1 为加固前土和水的总体积, w_1 、 w_2 分别为加固前、后的含水率。已知土体颗粒的相对密度和土的密度,根据加固前、后的含水率可计算得体积压缩比为27.3%~31.8%。这个数据与上述按照表层沉降推算的压缩比例基本一致,说明监测数据相关性良好。对于悬浮状高液性指数的疏浚土,在地基加固前的沉降预测时,由于很难用室内压缩试验得到其压缩系数、压缩模量等参数,因此预测其沉降值一直有较大难度。根据上述结论,对于此类超高含水率的软土,采用加固前、后的含水率根据土体三相组成原理进行推测为沉降预测提供了可能。对试验区深度0~1.5 m疏浚土含水率和十字板抗剪强度进行统计,结果见图7。

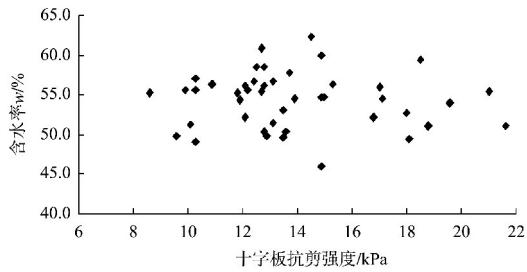


图7 试验区深度0~1.5 m疏浚土含水率-十字板抗剪强度关系散点图

从试验区以及现场大面积施工区域的十字板抗剪强度以及含水率检测数据分析,在相同的加固深度,不同区的含水率指标相对来说比较均匀、离散性较小,而十字板抗剪强度差异很大,在含水率接近的情况下,十字板抗剪强度最低只有1.2 kPa,最高约22 kPa,而且对于相同的区域,其沿深度方向上的十字板抗剪强度也没表现出较大的离散性。根据对图7的数据进行数理统计分析,在同一深度,含水率的变异系数为6.3%,十字板抗剪强度的变异系数为22%,远大于含水率的变异系数。从宏观的表层承载力荷载板试验看,地基承载力并不会因为局部点的十字板抗剪强度偏高而提高。因此,对于超细颗粒含量较高、十字板抗剪强度较低、容易受局部不均匀性物质(如贝壳屑等)影响的疏浚土,采用含水率作为加固效果的总体评价指标比十字板抗剪强度更为合适。

4 结论

1) 乐清湾超细颗粒、高含水率、流动状态高压缩性的疏浚土,经真空预压加固后,从流动状态变成具备一定承载力的状态,能够让机械设备在上面行走进行二次加固作业,实现了加固的目标。

2) 乐清湾地区疏浚土加固后,总体含水率较高、抗剪强度较低、工程特性较差、加固困难,通过对不同塑排板间距加固效果的比较分析和不同塑料排水板型号的对比分析得出,适当缩小塑排板间距不但能加快固结,还可降低加固后的含水率、提高抗剪强度,有利于提高效果,但应该注意效费比,间距小于100 cm后的材料用量显著

增加,但加固效果提高幅度有限。根据 A、B 型板加固效果对比分析可知,在此类土浅层加固中,A 和 B 型板加固效果相当,可优先采用 A 型板节约材料用量。

3) 无结构的疏浚土加固后,其含水率数据相对较稳定,十字板抗剪强度受吹填料中杂质如贝壳之类的影响较大,数据变异性较大,很难确定合理的验收标准,建议可采用含水率数据结合宏观的力学指标如荷载板试验构建地区经验作为验收标准。

4) 疏浚土的压缩性由于很难用压缩试验测定,根据含水率和压缩性的相关性,可以根据土体三相组成原理,根据经验类比法测定加固前含水率,并估计加固后的含水率,通过三相组成基本原理推算沉降量。

参考文献:

[1] 叶柏荣.综述真空预压法在我国的发展[J].地基处理,2000,11(3):49-57.

(上接第 196 页)

6 结语

1) 自动化码头堆场作业量大、调度逻辑复杂、无人化作业过程不易被监控和感知,是码头运营的核心和关键,提升自动化码头堆场作业效率是进一步提升自动化码头核心竞争力的有力途径。

2) 综合考虑效率、服务、能耗等码头运营因素,研究和分析堆场作业各工况实际生产需求,确定堆场调度基本原则,优化堆场调度规则,可以有效解决堆场调度规则不合理、具体工况作业顺序不合理问题,改进自动化码头堆场调度逻辑。

3) 针对自动化码头堆场调度模式单一和机械化问题,调度规则中增加重进重出模式,通过增加轨道吊重载率,可以有效提升自动化码头堆场作业效率,降低外集卡周转时间,提高码头生产能力和服务水平。

参考文献:

[1] 丁一,田亮,林国龙.约束规划求解自动化集装箱码头

[2] 娄炎.真空排水预压法的加固机理及其特征的应力路径分析[J].水利水运科学研究,1990(1):99-106.

[3] 鲍树峰,董志良,娄炎,等.高黏粒含量新近吹填淤泥加固新技术室内研发Ⅱ[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(9):1707-1715.

[4] 叶国良,郭述军,朱耀庭.超软土的工程性质分析[J].中国港湾建设,2010,170(5):1-9.

[5] 程瑾,曹凯,吴玉涛,等.基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(4):125-134.

[6] 王思刘,张冬琪,陈纪胜,等.真空预压下软土地基的固结特性和沉降计算方法[J].铁道科学与工程学报,2022,19(3):674-682.

[7] 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.

[8] 武亚军,顾赛帅,强小兵,等.基于骨架构建药剂真空预压法加固超软土试验[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(4):735-742.

[9] 郑新亮,武霄,陈允进.吹填淤泥排水加固沉降计算的新方法[J].水运工程,2014(8):159-162.

(本文编辑 王璁)

轨道吊调度

[1] 林燕,孙小明.新型集装箱码头堆场混合装卸计划方法研究[J].工业工程与管理,2011,16(5):97-101.

[2] 唐国磊,甄中函,赵卓瑶.双场桥集装箱堆场效能仿真研究[J].水运工程,2023(7):60-66.

[3] HAN X L, WANG Q Q, HUANG J W. Scheduling cooperative twin automated stacking cranes in automated container terminals [J]. Computers & industrial engineering, 2019, 128: 553-558.

[4] 黄子钊,庄子龙,滕浩,等.自动化码头出口箱箱位分配优化超启发式算法[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2619-2632.

[5] 郭大伟,王伟,李强,等.自动化集装箱码头集卡周转效率影响因素研究[J].水运工程,2023(2):65-68,79.

[6] 顾志华.自动化码头提箱归并策略[J].港口装卸,2019(1):45-49.

[7] 张连钢,杨杰敏,李波,等.自动化集装箱码头总平面布局设计[J].水运工程,2019(10):14-20.

(本文编辑 王璁)