



惠州荃湾吹填淤泥地基浅表层真空预压处理

胡继业¹, 王 波¹, 刘宏伟², 张鹏飞¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 天津临港工业区建设开发有限责任公司, 天津 300450)

摘要: 浅表层快速加固技术是基于真空预压原理针对新吹填淤泥等超软弱土快速加固的一种新技术。依托惠州港荃湾港区软基处理工程, 通过现场试验研究不同排水板间距对浅表层快速加固效果的影响, 研究加固过程中膜下真空度、地表沉降和孔隙水压力的变化规律, 对惠州荃湾吹填淤泥加固前、后土体的物理力学性质、强度及地基承载力进行分析。

关键词: 吹填淤泥; 超软土; 真空预压; 浅表层加固

中图分类号: U 655.54⁺4.4 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)09-0152-06

Shallow surface treatment by vacuum preloading technology for newly-dredged sludge foundation in Huizhou Quanwan

HU Ji-ye¹, WANG Bo¹, LIU Hong-wei², ZHANG Peng-fei¹

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Tianjin Lingang Industrial Area Construction Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: The shallow rapid reinforcement technology based on the vacuum preloading principle is a new technology of rapid reinforcement technique for the new reclamation silt. Relying on Huizhou Quanwan port soft foundation treatment engineering, we study the influence of different drainage plate spacings on the shallow rapid reinforcement effect by the field test. We also study the rules of the process of strengthening about the vacuity under the membrane and the surface settlement and pore water pressure, and analyze the soil physical and mechanical properties, strength and bearing capacity of foundation before and after the reinforcement.

Keywords: reclaimed silt; super-soft ground; vacuum preloading; shallow treatment

大面积围海造陆是解决土地日趋紧张的有效途径之一。但由于砂石料资源短缺, 同时海洋环保要求日益严格, 所以港池疏浚的废弃泥处置费用越来越高, 导致围海造陆直接使用水力吹填疏浚淤泥作为主材料形成陆域场地的情况逐渐常见。新吹填的场地一般含水率高、孔隙比大、基本无承载力, 工程上常称之为超软地基^[1-2]。在工程实践中, 真空预压法已被证明为处理此类超软地基的有效方法, 但由于新吹填淤泥地基承载力近为 0, 因此提出对工期较紧的工程采用浅表层快速加固技术, 并对此技术进行了一系列试验研究与推广应用^[3-7]。

浅表层快速加固技术一般以水平向的软式滤

管配合无纺土工布或三维土工排水网来代替传统真空预压法中的砂垫层 (作为水平排水垫层), 具有施工间歇短、施工周期快、加固效果好、工程造价低等特点。

本文依托惠州港荃湾港区软基处理工程, 通过现场试验研究不同排水板间距对浅表层快速加固效果的影响, 得出的结论可为后续类似工程的施工提供指导。

1 浅表层加固试验方案

1.1 工程概况

本工程位于惠州市大亚湾西侧的澳头湾内,

新近吹填的港池疏浚淤泥厚度在 8 ~ 9 m, 浅层土体的含水率在 177% ~ 220%, 黏粒含量 52% 左右, 胶粒含量 30% ~ 32%, 表层呈流泥状态, 无任何承载力, 强度近为 0 (表 1)。与一般淤泥相比, 本工程的吹填淤泥含水率更高、孔隙比更大, 为典型的超软弱土。

需要进行浅表层预处理的面积为 27.6 万 m², 共分为 9 个大区 (W₁ ~ W₉ 块), 选择 W₁ 块作为试验区, 其面积为 2.9 万 m² (图 1)。于 2012 年 4 月 19 日开始试抽真空, 6 月 27 日真空卸载, 历时约 70 d, 其中试抽真空 10 d, 真空恒载约 60 d。

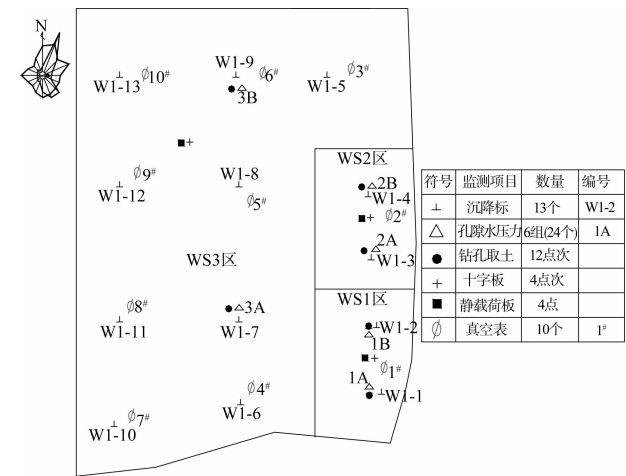


图 1 现场试验平面布置

表 1 惠州港新吹填淤泥主要物理性质指标

含水率 W/%	饱和度 S/%	湿密度 ρ/(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	液限 W _L /%	塑限 W _p /%	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	颗粒组成/%		
216	99.8	1.25	6.05	58.4	29.7	28.7	7.5	>0.075 1.8	0.075 ~ 0.005 45.7	<0.005 52.5

1.2 试验方案

在施工工艺方面, 针对性质极差的超软土, 对浅表层施工技术进行了若干改进: 1) 铺设 1 层编织布后, 在人工插板前再加铺 1 层针刺无纺布, 以加强织物的隔泥效果, 减小无纺布排水板头及滤管被淤堵的可能性; 2) 管与排水板的布置, 改为单排排水板配 1 根滤管, 即滤管间距由 2 倍排水板间距变为与排水板间距相同, 同时将排水板间距由原设计的 100 cm 加密至 80 cm 左右 (图 2)。

为了对比分析不同排水板间距对浅层预处理加固效果的影响, 将 W₁ 块划分成 3 分区进行试验, 分别为 WS₁ 区、WS₂ 区和 WS₃ 区, 面积分别为

2 000、2 000 和 24 838 m², 拟定为 3 试验方案, 排水板间距分别为 0.9、0.7 和 0.8 m, 呈正方形布置, 插板深度均为 4.5 m (图 2)。施工过程先搭设浮桥便道, 然后在吹填淤泥面上铺设 1 层编织布和 1 层无纺布, 之后人工插板、布设滤管、将滤管与每根排水板用无纺布绑扎相连。3 分区的滤管间距分别对应排水板间距, 因此分别布设滤管; 接着在 3 分区统一平铺 1 层无纺布及 2 层真空膜 (均直接满铺 3 试验小分区, 在 W₁ 块外边界踩膜密封); 最后进行布泵抽真空处理, 按每 1 000 ~ 1 100 m² 布置 1 台真空泵进行布置, 3 分区依次布置了 2 台、2 台及 24 台真空泵。

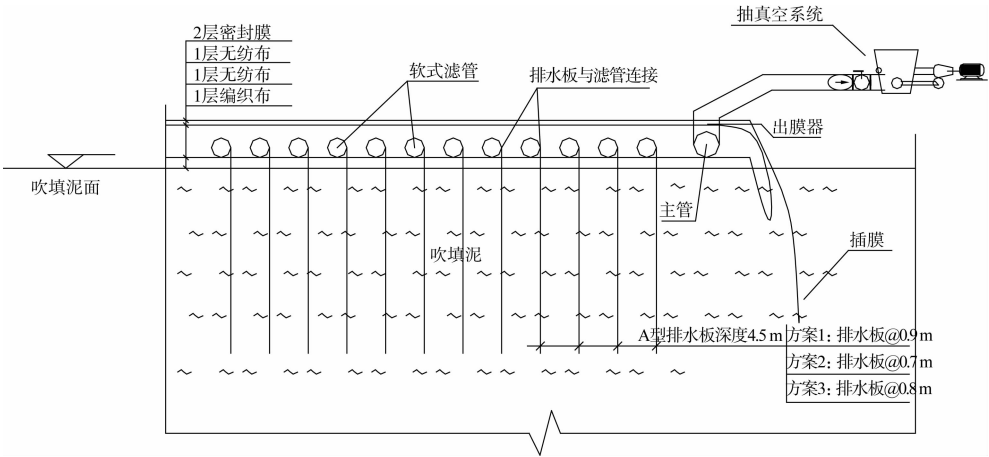


图 2 浅表层软基处理试验区断面

1.3 监测、检测方案

试验过程对 3 个试验分区的膜下真空度（指布设在 2 层无纺布间的真空表测量值，下同）、地表沉降量和孔隙水压力进行监测，加固后进行了十字板剪切试验和载荷板试验（图 1）。其中每组孔压计在平面上布置于相邻 4 排水板的正中间，每组孔压计的埋设深度分别为 0.5、1.5、2.5 和 4 m。

2 浅表层加固效果

2.1 膜下真空度

试验区抽真空初始阶段，为检查密封效果，同时防止负压增长过快导致排水系统被淤堵，严格控制抽真空加载速率，先进行试抽气施工，所有真空泵分 3 批在 10 d 内依次开启，每批只开启 1/3 的真空泵数量（前 3 d 开启 9 台，第 4 到第 7 d 逐渐开启至 19 台，第 8 d 到第 10 d 逐渐全部开启）。第 10 d 经检修无漏气现象后，开启了所有真空泵，膜下真空度很快提高到 70 kPa 以上。

监测结果表明，前 3 d 内开泵率为 35% 左右，滤管内真空度达到了 60 ~ 70 kPa，而膜下真空度则逐渐升至 40 kPa 左右。此后 7 d 随着剩余真空泵的逐步开启，滤管内真空度快速上升，并维持在 80 kPa 以上，而膜下真空度的增长相对缓慢，在抽真空约 13 d，膜下真空度开始趋于 70 kPa 左右并保持稳定，低于滤管内真空度约 10 kPa，总体上看真空度传递效果良好。上述测试结果表明，以软式滤管配合上、下 2 层无纺土工布代替砂垫层作为真空预压水平排水垫层的措施，可以满足该工程浅表层快速预处理真空度水平向传递的要求。

2.2 地表沉降

1) 沉降量。

各个分区地表平均沉降量随时间的变化关系曲线如图 3 所示，实测沉降数据如表 2 所示。

由表 2 见，排水板间距越小，短期内沉降量越大；各区沉降曲线仍未有收敛的趋势，表明淤泥固结仍未完成，但平均超过 1 m 以上的沉降量证明 70 d 速加固仍然取得明显效果。

表 2 地表沉降数据

分区	排水板 间距/m	浅表层处理 沉降量/cm	加固淤泥近似压缩比 (按加固 4.5 m 估算)/%
WS ₁	0.9	99.6	22
WS ₂	0.7	121.7	27
WS ₃	0.8	103.6	23

注：压缩比 = 沉降量/加固前软土厚度 × 100%，本表计算数据未考虑加固软土层下方土层的沉降及平面上挤淤等效应。

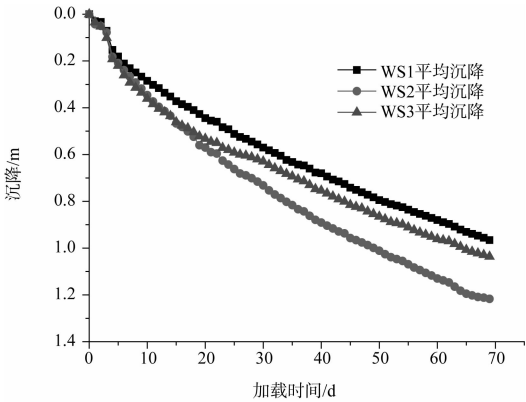
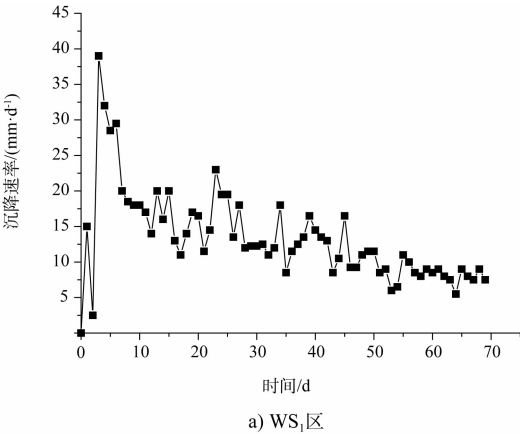


图 3 地表沉降-时间关系曲线

2) 沉降速率。

图 4 反映的是 WS₁、WS₂、WS₃ 区地表沉降速率随时间的变化关系曲线。WS₁ 与 WS₃ 区沉降速率变化规律较为类似，抽真空开始 15 d 地表沉降发展迅速，沉降速率维持在 20 mm/d 左右，衰减的趋势较缓；WS₂ 区沉降速率在抽真空开始 25 d 基本维持在 20 mm/d 以上，在抽真空开始 55 d，沉降速率才趋于平稳，但衰减较快，具有前期沉降速率大、中后期衰减相对较快的特点，这与 WS₂ 区排水板布置间距最小有直接关系。说明在浅层预处理过程中，相同时间内，排水板间距越小，其前期沉降速率越大，快速加固的效果越明显。



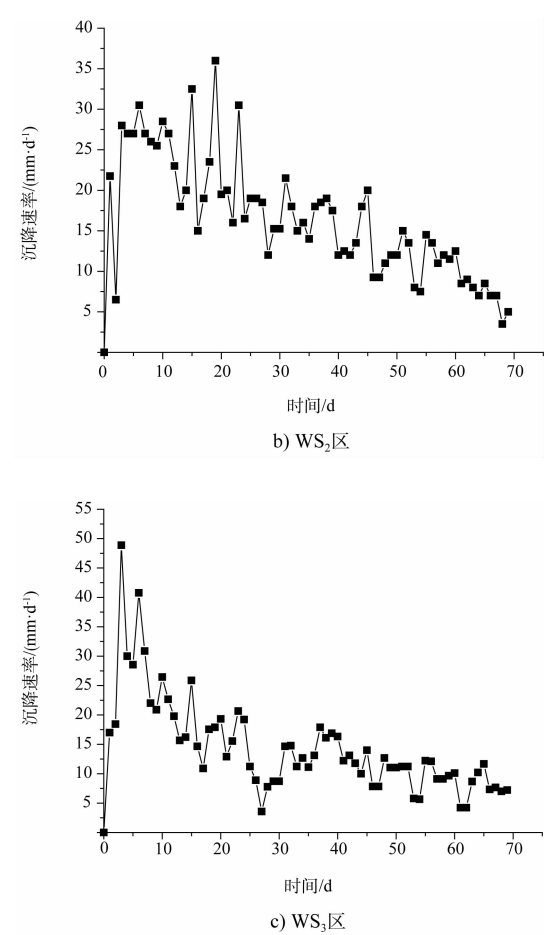


图 4 地表沉降速率-时间关系曲线

2.3 孔隙水压力

图 5 表示的是试验区孔压差随时间变化曲线。本文中的孔压差指抽真空期间实测孔压值与初始孔压值之差，有关文献也称为孔压消散值^[7]或负超静孔隙水压力^[8]。从图 5 可见，3 个区的孔压差变化曲线基本类似，浅表层预处理插板深度 4.5 m，但抽真空 70 d 内吹填淤泥的孔压差的绝对值却较小，最大的发生在 WS₃ 区的 2.5 m 深度处及 WS₂ 区的 4.0 m 深度处，约 -16 kPa，而在更浅层处的 0.5 ~ 1.5 m 深度的孔压差值只有 -10 kPa 左右，这与本工程吹填淤泥较差的工程特性有关。由于黏粒含量高达 52% 以上，吹填淤泥的渗透性极低，完成固结所需的时间较长，因而在仅有 70 d 的浅表层快速加固过程中孔压差值会较小；随着抽真空的进行，负的超静孔隙水压力逐步消散，土体开始压缩固结，孔压消散速率逐步加快，抽真空后期孔压差消散速率有所提高。

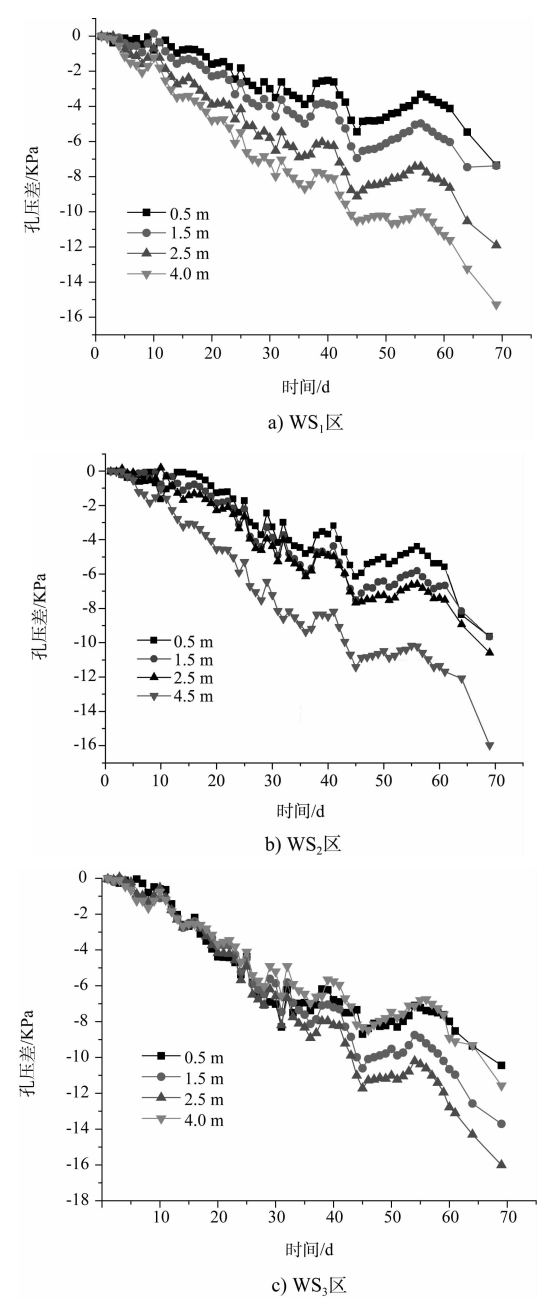


图 5 不同深度处孔压差-时间变化关系曲线

同时，与常规真空预压相比，浅表层真空预压插板深度范围内上部孔压差值小于下部孔压差值，这也与常规真空预压孔压的消散规律似乎有所不同。其原因主要在于：新吹填淤泥在吹填形成过程中因水力作用致使上部淤泥处于悬浮状态，黏粒含量较大，流动性较好，在抽真空负压作用下，细小颗粒向排水板聚集形成“土柱”，造成排水板被包裹，而下部淤泥已完成部分沉淀，结构相对稳定，细微颗粒相对较少，更有利于真空度的传递和孔隙水压力的消散^[5]；同时，抽真空过

程中的静水压力下降，也会造成浅表层真空预压插板深度范围内下部孔压差值大于上部孔压差值。其中 WS₃区 4.0 m 深度处与上述描述规律不同，可认为是个例，与传感器透水石淤堵较严重或埋设时未充分将气泡消除有关。

2.4 加固后吹填淤泥物理力学性质

试验区卸载后进行了人工薄壁取样器取样，

经室内试验得到吹填淤泥加固后的物理力学性质，典型数据见表 3。比较表 1 和表 3 可知，加固深度范围内吹填淤泥的各项物理力学指标均得到明显改善，含水率和孔隙比均明显降低，含水率减小量超过了 100%，表层土孔隙比降低超过 50%，说明吹填淤泥浅表层加固取得了明显效果。

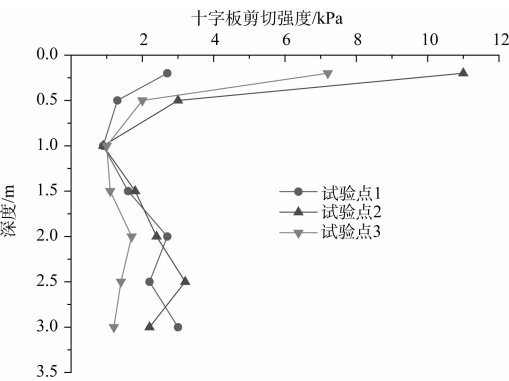
表 3 浅表层真空预压加固后吹填淤泥的物理力学指标

取土深度/m	含水率/%	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa ⁻¹
0.0~0.5	83.6	2.020	59.7	33.6	29.3	1.71	2.86	0.90
0.5~1.0	128.1	3.621	68.7	37.7	31.0	2.92	2.48	1.05

由于施工现场场地存在一定的差异性，即使同一个小区，土工试验数据也有较大差距，加之取样点数较少，难以对各分区进行有效比较，因此，本文仅选取代表性的数据作分析。

2.5 加固后吹填淤泥十字板剪切强度

浅层加固前吹填淤泥强度为 0，加固后，分别在 WS₁区、WS₂区及 WS₃区各选取 1 个点位进行了十字板剪切试验（图 6）。



注：试验点 1、2 和 3 分别对应 WS₁区、WS₂区和 WS₃区。

图 6 加固后十字板抗剪强度沿深度变化曲线

由图 6 可见：1）排水板间距越小，浅表层加固后的强度越大，表面的抗剪强度在 3 ~ 11 kPa；2）加固后靠近表层处强度增长较大，说明表层处真空度传递最好，所受的真空压力大，加固效果最为明显；3）在 1.0 m 深度处的强度最低，在 1.0 m 深度下淤泥强度又有所增长。导致此种现象

的原因是：表层靠近无纺布排水层，易形成了一个硬壳层，而新吹填淤泥在硬壳层下的部分因固结稍慢，其流动性导致细颗粒在硬壳层下积聚较多，其工程性质更差，形成相对软弱层。相对软弱层以下的土体则随着正常预压加固的进行，强度逐渐提高。

2.6 吹填淤泥加固后地基承载力

为了更直观地检验吹填淤泥浅层加固后的效果，根据现场情况，在 WS₁区、WS₂区及 WS₃区各选取 1 个点位进行表层平板载荷试验，选择的承压板尺寸为 0.707 m × 0.707 m，面积为 0.5 m²。考虑到吹填淤泥的土质特性，采用了沉降非稳定法。图 7 为 3 个试验点的 P-S 曲线。

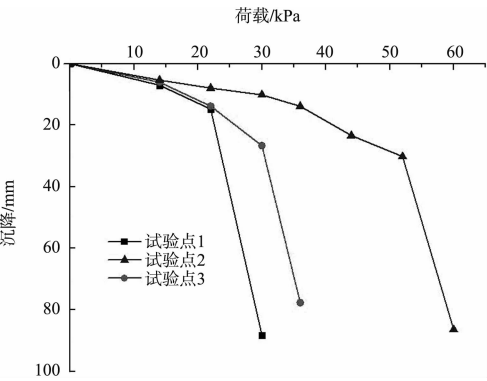


图 7 P-S 曲线

分析如下：1）根据广东省标准 DBJ 15-60—2008《建筑地基基础检测规范》中“平板载荷试验”规定，可以判断出 3 个试验点的极限承载力

值分别为 22、30 和 52 kPa, 因极限荷载值小于比例界限荷载值的 2 倍, 故取极限荷载值的一半作为承载力特征值, 即 3 个试验点的地基承载力特征值分别为 11、15 和 26 kPa; 2) 试验结果表明, 排水板间距仍然决定了浅表层加固后的地表承载力, 即间距越小, 加固后承载力越大; 3) 总体来看, 试验点 2 的试验过程和结果具有代表性, 表明本工程浅表层真空预压卸载后承载力特征值可达 15 kPa 左右; 4) 根据试验点 2 承载力 15 kPa 特征数据, 经计算, 浅层处理后如铺设 1 层编织布 40 kN/m 型及 1 层单向土工格栅 TGDG220 型, 可满足后续的深层处理承载要求, 例如回填中粗砂的正常铺设施工及填砂后插板机能正常施工。因此, 后续大面积浅表层真空预压处理均采用 0.8 m 的排水板间距。后续深层软基处理施工过程证明, 施工技术方案完全可行, 目前项目已经竣工验收。因此, 认为采用排水板间距 0.8 m 是最具有技术经济效益的。

实践证明, 填砂施工、插板机设备均能安全地在浅表层加固后的地表面顺利进行施工, 达到了承载施工设备的要求, 表明浅表层快速加固施工方案可行, 加固效果达到了预期目的。

3 结论

1) 本工程新吹填淤泥试验区浅表层加固后沉降量超过了 1 m, 为处理厚度 4.5 m 的 22% ~ 27%; 排水板间距越小, 前期沉降速率越大, 快速加固的沉降量也就越大, 加固效果越好。

2) 惠州新吹填淤泥黏粒含量高、渗透性低, 加固期孔压差绝对值最大的仅为 -16 kPa; 浅表层真空预压插板深度范围内上部孔压差绝对值小于下部孔压差绝对值, 与新吹填淤泥黏粒含量大及上部悬浮颗粒较多、渗透性更低有关。

3) 新吹填淤泥加固后表层的强度提高到 3 ~ 11 kPa, 但其在 1.0 m 深度处淤泥的抗剪强度曲线

产生“低拐点”, 与新吹填淤泥的上部黏粒更多的分布规律有关。

4) 新吹填淤泥经浅表层加固处理后各项物理力学指标明显提高, 含水率和孔隙比明显降低, 地基承载力特征值达到约 15 kPa, 加固效果明显。

5) 排水板间距越小, 浅表层处理后的地基承载力强度就越大, 其特征值范围约在 11 ~ 26 kPa; 采用 0.8 m 间距时, 处理后地表承载力特征值可达 15 kPa, 计算结果和实践均证明, 能够满足后续的深层处理相关设备承载要求。

综合考虑 3 种不同排水板间距 (0.7、0.8、0.9 m) 加固后的沉降量、强度、承载力及技术经济条件等因素影响, 排水板间距采用 0.8 m 较适合本工程后续吹填淤泥的浅表层加固要求。

参考文献:

[1] 沈珠江. 软土地基真空排水应用的固结变形分析[J]. 岩土工程学报, 1998(3): 7-15.

[2] 叶柏荣, 张敬, 张欣. 超软地基加固技术[J]. 港工技术, 1986(5): 1-7.

[3] 董志良, 张功新, 郑新亮, 等. 一种超软弱土浅表层快速加固系统: 中国, 200720050339. 8[P]. 2006-09-27.

[4] 董志良, 张功新, 莫海鸿, 等. 超软弱土浅表层快速加固方法及成套技术: 中国, 200810026168. 4[P]. 2008-07-23.

[5] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1 073-1 080.

[6] 陈运涛. 浅层真空预压技术在中心渔港吹填地基中的应用与研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.

[7] 关云飞, 唐彤芝, 陈海军, 等. 超软地基真空预压浅层加固现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 97-101.

[8] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术. [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(本文编辑 郭雪珍)