

DOI: 10.11779/CJGE2017S2029

天津港超软土地基加固特性探讨

尹长权^{1, 2}

(1. 天津大学水利安全与仿真国家重点试验室, 天津 300072; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222)

摘要: 超软土的高压缩性、低渗透性和难固结特性决定了此类土体的地基处理十分困难, 一般方法难以达到理想的加固效果。针对天津某工程的超软土, 详细阐述了地基加固的设计方法和施工工艺过程; 通过室内试验并结合现场监测检测, 充分研究了超软土在不同加固阶段的物理特性、变形特性、固结特性和强度特性。结果表明加固后的超软土地基可以达到工程使用要求, 可供类似工程借鉴。

关键词: 超软土; 工程特性; 变形; 固结; 强度; 地基加固

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0116-04

作者简介: 尹长权(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事港口岩土工程的科研工作。E-mail: yinchangquan@126.com。

Reinforcement characteristics of ultra-soft ground in Tianjin Port

YIN Chang-quan^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Port Engineering Institute Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 30222, China)

Abstract: Due to its high compressibility, low permeability and low consolidation property, the treatment of ultra-soft soil is very difficult, and the common method is hardly effective. For the ultra-soft soil in Tianjin Port, the design method and construction technique are clarified. According to the indoor experiments and in-situ inspection, the physical, deformation, consolidation and strength properties of ultra-soft soil at different stages are analyzed. The results show that the ultra-soft ground after reinforcement can satisfy the engineering requirements, which can be referred for the similar projects.

Key words: ultra-soft soil; engineering property; deformation; consolidation; strength; ground reinforcement

0 引言

随着中国沿海地区经济的快速发展, 土地资源日益紧张, 利用港池和航道疏浚土吹填造陆后再进行地基加固已经成为缓解土地资源紧张的主要手段^[1]。吹填造陆后常常会形成大面积的超软土区域, 而对吹填造陆工程的工期要求越来越急, 常常吹填完毕即需要进行加固。天津地区的超软土的形成原因主要如下: 一方面, 随着吹填造陆工程的增多, 环境保护的日益严格, 吹填土料一般颗粒很细, 而细颗粒又禁止外抛, 很容易形成超软土; 另一方面, 对一个大的吹填池而言, 由于水力分选的原因, 吹填造陆时常常在局部形成一定厚度的超软土。超软土的高压缩性、低渗透性和难固结的特性决定了此类土体的地基处理十分困难^[2-4]。

本文针对天津某工程的超软土, 结合室内试验详细研究超软土物理特性、变形特性、固结特性和强度特性; 详细阐述地基加固的设计方法和施工工艺过程; 然后结合现场工程试验, 研究超软土不同阶段的特性变化, 分析问题并给出解决方法, 可供类似工程借鉴。

1 工程概况

本工程位于沿海滩涂区, 吹填形成陆域面积约 0.8 km², 天然泥面高程约为 -2.0 m, 天然泥面以上的吹填土层顶高程为 +4.5 m, 吹填施工期为 4 个月, 吹填过程平面示意图如图 1 所示。

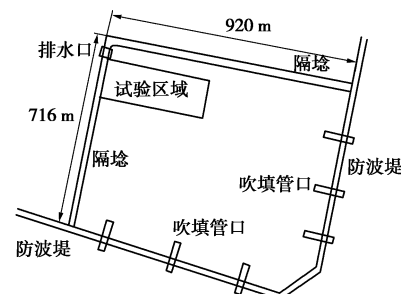


图 1 吹填过程平面示意图

Fig. 1 Sketch of dredging construction process

由于水力分选的原因, 在距离吹填口较远区域, 易形成土性较差的超软土区域。本试验区选址在吹填

池远端，共分 3 个加固区。

2 天津超软土特性

2.1 物理特性

天津超软土的物理特性统计指标如表 1 所示。

表 1 天津超软土的物理特性

Table 1 Physical properties of ultra-soft soil in Tianjin								
项目 参数	细砂 0.25~ 0.075 /%	粉粒 0.075~ 0.005 /%	黏粒 <0.005 /%	湿密度 /(g·cm ⁻³)	含水 率/%	初始 孔隙 比	塑性 指数	液性 指数
最大 值	1.8	60.6	46.1	1.47	123.0	3.319	21.1	5.34
最小 值	0.0	53.9	37.7	1.42	94.2	2.709	18.5	3.86
平均 值	1.0	58.5	40.6	1.43	110.6	3.037	19.2	4.73

从表 1 可以看出，在颗粒组成中，小于 0.005 mm 的黏粒含量约在 37.7%~46.1%之间，黏粒含量较高。含水率在 94.2%~123.0%之间，湿密度在 1.42~1.47 g/cm³之间，孔隙比在 2.709~3.319 之间，具有高含水率，低密度，高孔隙比等特点；塑性指数在 18.5~21.1 之间，液性指数在 3.9~5.3 之间，具有高液性指数。

2.2 超软土的固结特性

选取 14 组代表性土样，进行标准固结试验。利用时间平方根法求算固结系数，固结压力与固结系数的关系曲线如图 2 所示。

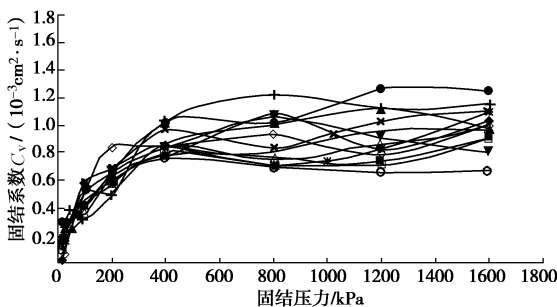


图 2 固结压力与固结系数关系曲线

Fig. 2 Relationship between consolidation pressure and consolidation coefficient

由图 2 可以看出，固结压力 400 kPa 前固结系数呈现增加的趋势，压力 400 kPa 后固结系数总体上的趋于稳定。

2.3 超软土的强度特性

典型的抗剪强度与固结压力关系曲线如图 3 所示，按抗剪强度平均值法，得到超软土固结快剪指标值为：凝聚力 $c=4.2\text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi=11.6^\circ$ ；不同固结压力下的对应抗剪强度是极限值，而实际工程中一般只能实现 80%~90%的固结度，如在 100 kPa 的固结压力下的抗剪强度为 25 kPa 左右，考虑固结过程，抗剪强度值要小于 25 kPa，因此，总体来讲采用固结

法加固超软土的强度是较低的，应根据工程需要选择固结荷载，不易直接作为工作面层，建议根据工程需求设置合理的工作垫层。

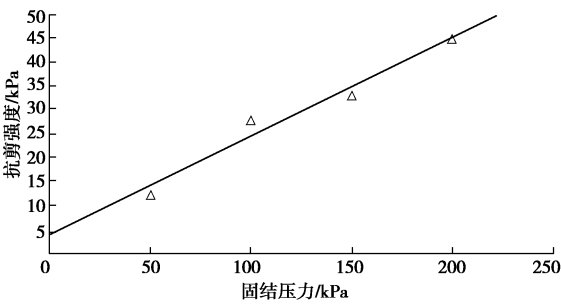


图 3 抗剪强度与固结压力关系曲线

Fig. 3 is very difficult shear strength and consolidation pressure

3 地基加固实施过程

超软土为流泥状，承载力不大于 1 kPa。超软土的加固应分两步，首先对浅层 4 m 内的超软土进行初步加固，形成一层具有一定承载力的硬壳层，满足后续砂垫层的铺设、插板等机械所需要的承载力条件。然后采用真空联合堆载预压法，对深层土体的地基进行加固。

3.1 初步加固并形成工作垫层

超软土的初步加固采用浅层真空预压的方式，目的是降低含水率，提高承载力。同时利用真空负压提高地基稳定性，形成布设工作垫层的工作条件。设计步骤如图 4 所示。施工工艺流程及要求如下：①铺设一层 400 g/m² 编织布；②铺设两层荆笆；③铺设一层 300 g/m² 无纺土工布；④塑料排水板裁剪，并进行底部封口；⑤人工插设塑料排水板，深度 4.0 m，间距 0.8 m，按正方形布置；⑥铺设水平排水滤管，并连接排水板；⑦铺设一层双向土工格栅；⑧铺设一层 200 g/m² 无纺土工布；⑨铺设 2 层厚 (0.12~0.16 mm) 的密封膜；⑩布设 7.5 kW 真空射流泵；⑪抽真空，前 7 d，分批次开启真空射流泵，逐级加载，满载后真空荷载不小于 60 kPa，满载抽气不少于 60 d；⑫满载约 25 d 后，吹填砂垫层，总厚度为 1 m，分层吹填，第一层层厚为 20~30 cm，第二层层厚为 40~50 cm，第三层剩余层厚。吹填期间，正常抽真空。

3.2 真空联合堆载预压加固

采用真空联合堆载预压加固的断面形式如图 5 所示。真空预压区要求膜下真空度稳定保持在 85 kPa 以上，有效抽真空天数约 125 d。真空预压水平排水通道采用 400 mm 厚中粗砂垫层；竖向排水通道采用塑料排水板，间距 900 mm，正方形布置；膜上吹填砂 4.7 m，作为场地补充标高和堆载荷载使用。

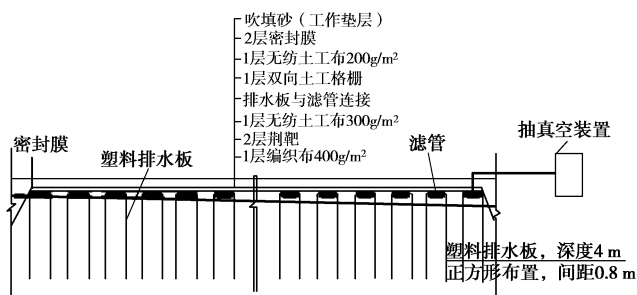


图 4 初步加固并形成工作垫层的示意图

Fig. 4 Sketch for preliminary reinforcement and forming work cushion

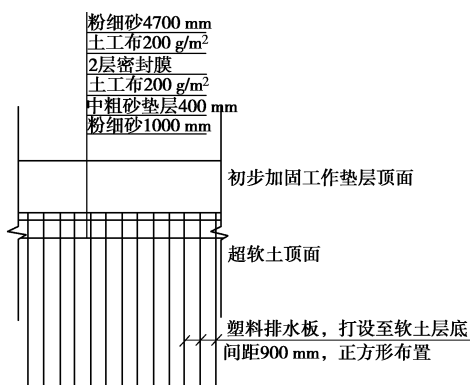


图 5 真空联合堆载预压加固断面图

Fig. 5 Section of vacuum combined with surcharge preloading

4 超软土的地基加固特性探讨

根据不同的施工阶段及现场试验结果，分析超软土地基加固特性，探讨分析成功经验和存在问题。

4.1 超软土的物理性质变化分析

从表 2 可以看出，从初始状态到形成工作垫层，再到真空联合堆载预压后，含水率变化显著，呈减小趋势；孔隙比和液性指数也明显减小；湿密度和干密度明显增大。超软土土性有了显著改善，可以达到工程使用要求。

表 2 超软土的物理性质变化统计表

Table 2 Change of physical properties of ultra-soft soil

项目参数	含水率 /%	湿密度 /(g·cm ⁻³)	干密度 /(g·cm ⁻³)	初始 孔隙比	液性指数
超软土 加固前	110.6	1.43	0.68	3.037	4.73
初步加固后	81.0	1.54	0.85	2.253	2.65
增减比值	-26.7%	7.7%	25.0%	-25.8%	-44.0%
真空联合堆 载预压	54.5	1.68	1.09	1.546	1.45
加固后					
增减比值	-32.7%	9.1%	28.2%	-31.4%	-45.3%

土体加固后的含水率为 54.5%，孔隙比为 1.546，

液性指数为 1.45，为了达到更好的加固效果，建议适当增加固结时间或者减小插板间距。

4.2 变形特性分析

通过地表沉降和分层沉降统计结果来分析超软土的变形特性，统计数据如表 3 所示。初步加固后压缩率在 2003~400 mm/m，卸载前压缩速率降至 0.53~2.0 mm/d。真空联合堆载预压加固后，每米压缩率在 2313~367 mm/m 之间，卸载前的压缩速率在 0.53~2.7 mm/d，卸载前的压缩速率仍然较高。真空联合堆载在预压加固卸载时地表平均沉降速率约为 6 mm/d，超软土层的平均压缩速率约为 4.5 mm/d，卸载时的变形仍集中在超软土层内。卸载时地表平均沉降速率大于规范中建议的沉降速率要求，但该工程区域的用途简单，已经满足项目工程需要。对于后期土体的改善可以通过延长加固时间或减小排水板间距等有效措施来实现。

表 3 超软土的变形特性统计表

Table 3 Statistical results of deformation characteristics of ultra-soft soil

项目	压缩率 /(mm·m ⁻¹)	卸载前平均每米压缩 速率(mm·m ⁻¹ ·d ⁻¹)
初步加固后	200~400	0.5~2.0
真空联合堆载预压 加固后	231~367	0.5~2.7

4.3 固结特性分析

在真空联合堆载预压试验区内布设孔隙水压力监测点，选取表层 1 m 深度处超软土的孔隙水压力典型数据，借此来分析土中有效应力的变化和土体强度增长情况，为确定卸载时间和评价加固效果提供依据。

孔隙水压力统计表如 4 所示。堆载荷载为 88 kPa，真空压力荷载为 85 kPa，总加固荷载在 173 kPa，不考虑水位的影响，总孔隙水压力消散值在 65.0~118.7 kPa，应力固结度在 37.6%~68.6%。应力固结度较小，分析主要原因有以下 3 个方面，第一，监测点在四根排水板所围区域的中心位置，排水路径最远，是土体固结最薄弱点；第二，堆载荷载施加完成后抽气加固时间约 30 d，最终有效荷载施加时间略短；第三，土体固结系数较小。

表 4 孔隙水压力统计表

Table 4 Statistical results of pore water pressure

序号	真空荷 载/kPa	堆载荷 载/kPa	实测孔隙水 压力变化值 /kPa	总孔隙水压 力消散值 /kPa	应力固 结度 /%
1	85	88	5.8	93.8	54.2
2	85	88	30.7	118.7	68.6
3	85	88	-23.0	65.0	37.6

4.4 强度特性分析

不同加固阶段十字板抗剪强度统计数据如图 6 所示, 加固前十字板抗剪强度几乎为零; 初步加固后十字板抗剪强度小于 5 kPa, 多数在 2 kPa 左右; 真空联合堆载预压加固后十字板抗剪强度在 14.3~29.4 kPa, 大多数小于 20 kPa; 可见, 随着地基加固进程, 十字板抗剪强度显著增加, 综合孔隙水压力监测结果, 在荷载条件不变的情况下, 固结将继续进行, 土体强度将会得到进一步的提高。

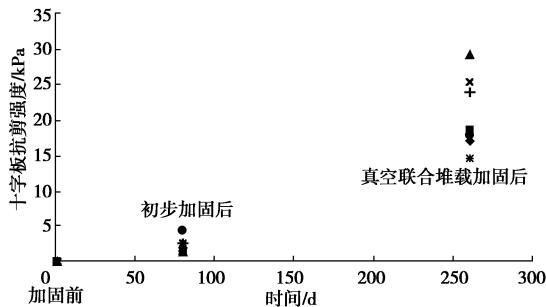


图 6 不同加固阶段十字板抗剪强度统计图

Fig. 6 Vane shear strengths of ultra-soft soil at different stages

5 结论与建议

本文结合天津某工程的超软土, 通过室内试验并结合现场监测检测, 充分研究了超软土在不同加固阶段的物理特性、变形特性、固结特性和强度特性。结果表明:

(1) 固结压力与固结系数的关系表明: 固结压力 400 kPa 前固结系数呈现增加的趋势, 压力 400 kPa 后固结系数总体上的趋于稳定。

(2) 超软土的强度特性表明: 采用排水固结法加固超软土后的强度存在局限性。预压固结后的土体, 不宜直接作为工作面层。在实际工程应用中, 应根据需求合理选择预压固结荷载。

(3) 地基加固的变形特性表明: 加固期间压缩变形较大, 卸载时的变形仍集中在超软土层。

(4) 从初始状态到形成工作垫层, 再到真空联合堆载预压, 土体的含水率、孔隙比和液性指数变化

显著, 呈减小趋势; 湿密度和干密度明显增大。超软土物理特性有了显著改善, 可以达到工程使用要求。

(5) 在真空联合堆载预压阶段, 加固后排水板中心点应力固结度不高的原因主要有以下 3 个方面, 第一, 监测点位于 4 根排水板所围区域的中心位置, 排水路径最远。第二, 堆载荷载施加完成后抽气加固时间约 30 d, 最终有效荷载施加时间略短。第三, 土体黏粒含量较高, 渗透性低, 土体固结系数较小。

(6) 超软土在不同加固阶段, 十字板抗剪强度增加显著, 加固效果明显。

参考文献:

- [1] 董志良, 张功新. 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): 1074 - 1080. (DONG Zhi-liang, ZHANG Gong-xin. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in tianjin binhai new area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1074 - 1080. (in Chinese))
- [2] 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 - 8. (YE Guo-liang, GUO Shu-jun, ZHU Yao-ting. Analysis on engineering property of ultra-soft soil[J]. China Harbour Engineering, 2010, 170(5): 1 - 8. (in Chinese))
- [3] 李卫, 曹永华. 浅层超软基真空预压加固技术研究[R]. 天津: 中交天津港湾工程研究院有限公司, 2009. (LI Wei, CAO Yong-hua. Research of reinforcement of ultra-soft ground using vacuum preloading[R]. Tianjin: Tianjin Port Engineering Institute of CCCC., 2009. (in Chinese))
- [4] 冯会芳. 新近吹填淤泥形成超软土地基的加固处理方法[J]. 港工技术, 2011, 48(5): 59 - 60. (FENG Hui-fang. Reinforcement method of ultra-soft foundation formed by fresh dredger filled mud[J]. Port Engineering Technology, 2011, 48(5): 59 - 60. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)