

井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究

刘嘉¹, 罗彦^{1,2}, 张功新¹, 董志良¹, 王友元¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要: 针对传统强夯法不适用于高地下水位条件下加固饱和淤泥质黏土地基的不足, 提出井点降水联合强夯新型静-动力排水固结技术与施工工艺, 并结合广州港南沙港区粮食及通用码头工程软基处理试验区科研项目, 通过对地下水位、孔隙水压力和表层沉降等实施现场监测及室内土工试验, 分析其加固机制, 进而验证施工参数。地基处理后, 经静力触探试验、十字板剪切试验、标准贯入试验和静载荷板试验检测, 证明加固效果显著, 比贯入阻力提高 200~300 kPa, 标贯击数增加 2 击, 地基承载力达 130 kPa。研究工作为今后软基处理工程提供一种新的方法和思路。

关键词: 地基处理; 降水; 强夯; 淤泥质黏土; 塑料排水板

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)11-2222-06

EXPERIMENTAL RESEARCH ON SATURATED MUCKY FOUNDATION TREATMENT WITH WELL-POINT DEWATERING COMBINED WITH DYNAMIC COMPACTION METHOD

LIU Jia¹, LUO Yan^{1,2}, ZHANG Gongxin¹, DONG Zhiliang¹, WANG Youyuan¹

(1. Engineering Technology Research Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: Aiming at the insufficiency of traditional dynamic compaction method to saturated mucky with a high groundwater level, a new static-dynamic drainage consolidation technique, well-point dewatering combined with dynamic compaction method(WDDC) is developed. WDDC has been applied to Guangzhou Nansha harbor grain and universal terminal project soft foundation improvement test area research project where the in-situ monitoring (groundwater level, pore water pressure and settlement) and geotechnical laboratory tests are conducted to investigate the mechanism and qualification of WDDC. The ground treatment effect is confirmed by static cone penetration test, vane shear test, standard penetration test and static loading test. The specific penetration resistance can increase 200 to 300 kPa while the standard penetration test can be added 2 blows. The bearing capacity of foundation can reach 130 kPa. WDDC is an efficient soft foundation treatment method and the tests provide a new way for future industrial applications.

Key words: foundation treatment; dewatering; dynamic compaction; mucky clay; plastic drainage

1 引言

传统强夯法被广泛应用于碎石土、砂土、低饱

和度的粉土、黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基处理中, 但对地下水位较高的饱和软黏土地基, 尤其是淤泥或淤泥质土并不适用^[1]。主要原因在于这类软弱黏土含水量高、孔隙比大、渗透性

收稿日期: 2009-07-01; **修回日期:** 2009-08-13

作者简介: 刘嘉(1981-), 男, 硕士, 2004年毕业于长安大学工程地质专业, 现为工程师, 主要从事软基处理和数值计算等方面的研究。E-mail: yangtse.lau@163.com

差、强度低, 在夯击动力作用下, 土中形成的超静孔隙水压力难以及时消散, 使土体抗剪强度丧失。为充分利用该法设备简单和加固快速的优点, 通过改进施工工艺、增设竖向排水体^[2~6]或与其他加固方式相结合的办法, 大大拓宽了应用范围。周 健等^[7~11]利用轻型井点(又称真空井点)降水技术来加速夯后超静孔隙水压力的消散和软土固结, 但受工艺限制仅能降低地下水位约 3 m, 难于对深部软土起到预压的作用, 其处理深度不超过 7 m, 且施工中需要插拔井管配合强夯, 过程繁琐。张丽娟等^[12]借助钢筋笼构筑的集水井、塑料排水板及砂垫层为强夯形成良好的排水系统以加固软黏土地基。F. G. Chen 等^[13, 14]提出“隔离及预降水”技术以增加强夯法的效果, 包括在强夯前进行预降水, 然后在停止降水后开始强夯。因此, 现有试验研究未能完全发挥降水作为一种预压固结手段的重要作用, 对强夯加固深度的改善不大。本文结合广州港南沙港区粮食及通用码头工程软基处理试验区现场试验研究, 提出井点降水联合强夯(WDDC)软基加固技术, 其土质适用范围较之强夯法更广, 加固深度更深, 基本思想是: 铺设水平砂垫层和插设塑料排水板改善软土渗透性和排水路径, 并在加固区周边打设泥浆搅拌墙阻断外界水源补给, 然后通过井点抽水降低地下水位, 减小新地下水位面以上浅层软土中的含水量和饱和度, 使其转换为非饱和土或临界状态, 同时增加原地下水位面以下软土层有效应力, 对深部软土形成预压固结。当地下水位降低 5 m 后联合强夯法, 并继续保持抽水。冲击荷载对浅部软土进行压密加固, 其孔隙水压力易于消散, 孔隙水不断排出, 土体强度随之增加, 与降水预压共同形成一套“上一下”双层加固模式, 能有效消除残余沉降、不均匀沉降, 提高加固深度, 从而取得良好的处理效果。

2 工程地质条件

试验区加固面积为 22 500 m²(125 m×180 m), 地下水位离地表 0.5 m。根据地质勘察资料揭示, 原场地自上而下可分为: (1) 淤泥混砂为主的近期人工回填土, 平均厚度为 2.0 m; (2) 淤泥或淤泥质黏土, 层(1)+(2)平均厚度为 6.0 m, 为第一个软土层; (3) 混砂层, 平均厚度为 2.0 m; (4) 淤泥或淤泥质黏土, 平均厚度为 5.0 m, 为第二个软土层; (5) 中粗或中细砂层, 平均厚度为 2.0 m; (6) 分布不均匀的粉质黏土、黏土、砂层及硬黏土混合层。各土层物理力学指标如表 1 所示, 定名依据相关规范^[15]。

3 工艺研究及试验设计

如图 1 所示, WDDC 主要工序分为砂垫层施工、塑料排水板插设、泥浆搅拌墙施工、降水井点打设、深水潜水泵安装、抽水预压及维护、强夯施工和场地整平。塑料排水板和井点需穿透软弱黏土层 0.5 m, 根据试验区地质条件确定为 20.5 m。井点间距为 30.0 m×30.0 m。泥浆搅拌墙沿加固区边界施工, 采用双排桩, 桩直径为 0.7 m, 间距为 0.5 m, 搭接为 0.2 m(见图 2)。当地下水位降深不低于 5.0 m, 即形成约 5 t 的预压应力后再联合强夯加固, 并继续保持井点降水直至施工完毕。如图 3 所示, 强夯夯点按正方形跳夯布置, 夯锤直径为 2.0 m, 夯点间距为 5.0 m, 且应按“低能、少击、多遍”的原则进行: 点夯 4 遍, 每点夯 4~6 击, 第 1 遍强夯能量为 1 000 kN·m, 第 2 遍为 1 500 kN·m, 第 3 和 4 遍为 2 000 kN·m, 即随着遍数的增多能量逐渐增加; 满夯 1 遍, 每点夯 1 击, 能量为 500~800 kN·m, 间距为 0.7 倍夯锤直径。每遍强夯时间间隔由孔隙水压力监测数据确定, 当浅部淤泥质黏土层孔隙

表 1 试验区土层物理力学指标
Table1 Physico-mechanical indices of soils in test area

土层名称	状态	深度/m	含水量 w/%	饱和度 S _r /%	孔隙比 e	液限 w _L /%	塑限 w _p /%	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)
淤泥	流塑	2.0~2.2	60.2	100.0	1.609	48.2	32.1	16.1	1.75	3.4	0.1
淤泥质粉质黏土	流塑	4.0~4.2	40.5	100.0	1.033	31.7	21.1	10.6	1.83	4.3	24.0
淤泥质黏土	流塑	5.9~6.1	51.4	100.0	1.367	44.3	28.5	15.8	1.45	9.6	6.6
淤泥	流塑	8.4~8.6	60.6	96.2	1.713	47.9	30.3	17.6	1.73	2.5	6.3
淤泥	流塑	11.3~11.5	58.7	100.0	1.585	44.9	29.8	15.1	1.92	2.3	11.1
黏土	可塑	15.9~18.7	30.0	84.6	0.964	33.3	18.6	14.7	0.78	27.9	8.4

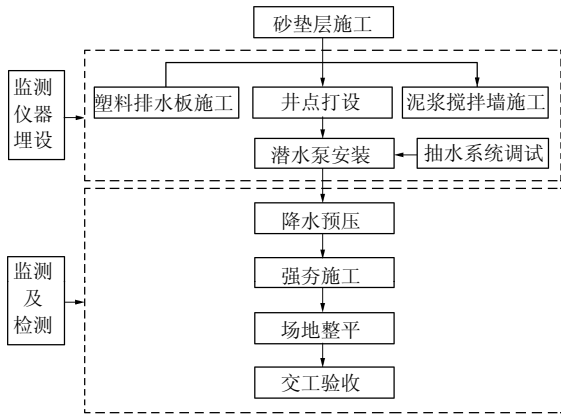


图1 WDDC 施工工序

Fig.1 WDDC construction process

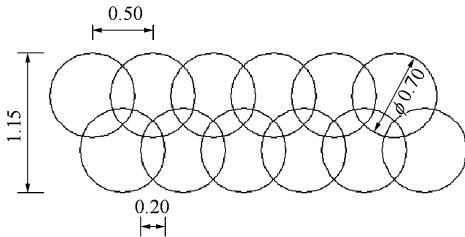


图2 搅拌桩搭接图(单位: m)

Fig.2 Overlap of mixing piles(unit: m)

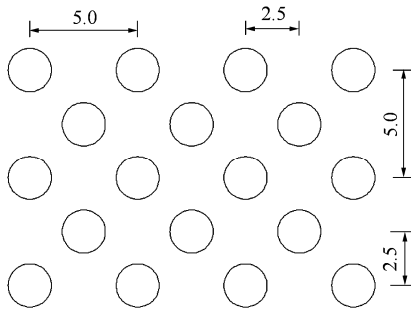


图3 点夯平面布置图(单位: m)

Fig.3 Layout of interleaving point tamping(unit: m)

水压力消散 75% 以上时, 方可进行下一遍夯击。

施工过程中在试验区内及其周边埋设了地表沉降板、水位管、孔隙水压力计及分层沉降管等监测仪器(见图 4, 其中, 试验区共布设 34 个沉降板, 沉降标长度为 1.5 m, 露出地面 0.1 m), 所用监测仪器分别为 WILD 水准仪、SWJ-15 水位计、DataTaker 自动采集仪和 MZ5-2 分层沉降仪。其中, 水位管 OWZX1, OWZX2 和分层的 LS1, LS2 位于 2 个中心点, 表层沉降在降水预压期采用沉降板(S1~S24)监测, 当联合强夯施工后, 为避免沉降板被夯坏, 在每遍强夯后进行场地整平, 以场地平均标高计算沉降。P1~P3 为孔隙水压力测试区, 按不同深度埋设了孔隙水压力计。监测工作从抽水之日开始, 计抽水时间为 t 。地基处理完成后, 进行静力触探、十字板、标贯和室内土工试验及静载荷试验检测加

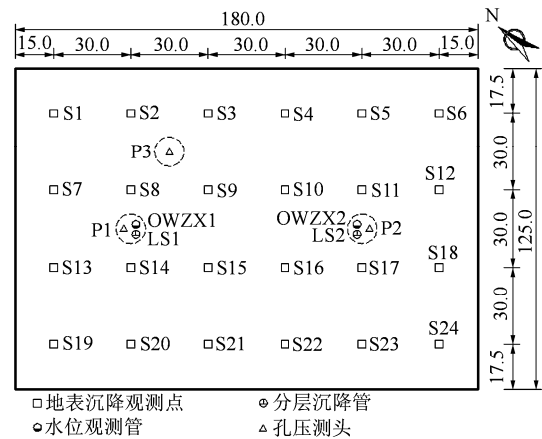


图4 试验区监测仪器平面布置图(单位: m)

Fig.4 Layout of monitoring instruments in testing area(unit: m)

固效果。

4 监测及监测结果分析

地下水位降深反映了预压应力的作用和作用时间, 决定了何时联合强夯施工。孔隙水压力的累积与消散给出了点夯的时间间隔及强夯作用的影响深度。抽水前 25 d 为降水预压阶段, 26~72 d 为降水联合强夯阶段并完成施工。通过对地基处理中水位、孔隙水压力和沉降的观测, 能够有效控制施工进度和保证加固效果。

4.1 地下水位观测

图 5 给出了自降水预压以来, 包括强夯各阶段(编号①~④为点夯遍数, 下同)地下水位降深 s 随抽水时间 t 的变化规律。经过 25 d 抽水, 水位降低 5.3 m, 开始进入强夯施工阶段。可见, 泥浆搅拌墙较好地阻隔了加固区外的水源补给, 加之长度达 20.5 m 的深井井管能使地下水位迅速降低, 与轻型井点相比优势明显。 $t = 45$ d 时, 降深达到最大值 6.1 m, 之后水位基本稳定在 5.0~6.0 m, 且每遍夯击后地下水位会突然升高, 而后逐步降低, 点夯峰值最大增量为 1.2 m。因此, 夯击作用会引起地下水位的骤然升降。

4.2 孔隙水压力观测

图 6(a)~(c)分别给出了浅部和深部软土孔隙水压力变化历程。从实测曲线来看, 前 25 d 为单一的降水预压期, 由于地下水位降低, 孔隙水压力曲线仅随抽水时间下降, 并未激发峰值以及发生消散, 而之后的强夯施工期, 浅层软土出现明显的孔隙水压力激发和消散过程(见表 2)。塑料排水板对软黏土渗透性改善效果明显, 各遍点夯及满夯平均消散时间仅为 6.8 d。在第 2, 4 遍点夯期间, 由于孔隙

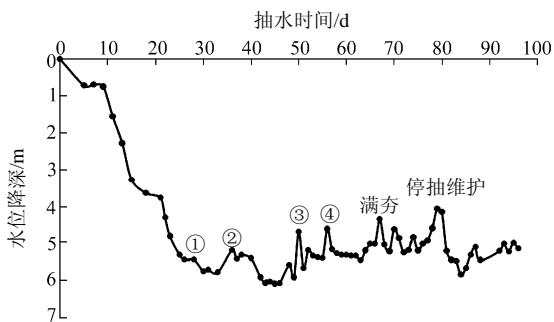
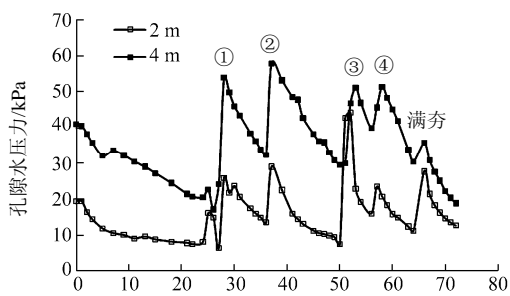
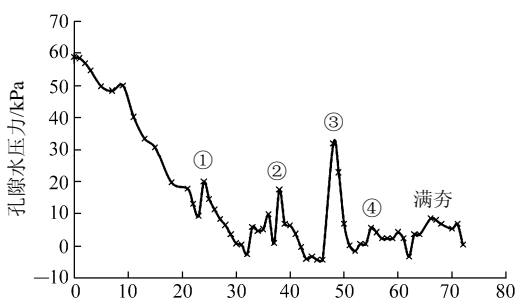


图 5 地下水位降深变化规律

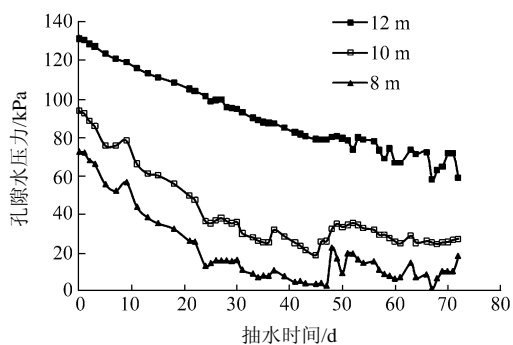
Fig.5 Variations of drawdown of groundwater level with pumping time



(a) 深度分别为 2, 4 m



(b) 深度为 6 m



(c) 深度分别为 8, 10, 12 m

图 6 孔隙水压力变化规律

Fig.6 Variations of pore water pressure with pumping time

水压力消散时间充分加之降水作用, 孔隙水压力的消散量大于增量。影响深度为 6 m 时土层孔隙水压力增量最大值为 28 kPa, 较之影响深度为 4 m, 各遍夯击产生的孔隙水压力峰值出现较大的不均等。但对 8 m 及以下深度土层, 孔隙水压力未有明显峰

表 2 2 m 深软土孔隙水压力消散情况

Table 2 Dissipation of pore water pressure of soft soil at depth of 2 m

工序	增量/kPa	消散量/kPa	消散比例/%
第 1 遍点夯	28.54	21.42	75.1
第 2 遍点夯	15.50	21.48	138.6
第 3 遍点夯	36.72	28.23	76.9
第 4 遍点夯	7.41	12.17	164.2
满夯	16.47	15.08	91.6

值, 受强夯影响较小。因此试验区场地若采用传统强夯加固, 影响深度约 6 m。

4.3 沉降观测

表层沉降如图 7 所示, 塑料排水板插设期间沉降达 0.559 m, 为施工期沉降量最大阶段, 沉降速率为 22.36 mm/d。降水预压阶段和强夯第 1, 2 遍期间表层沉降速率基本一致, 平均为 14.03 mm/d, 从第 3 遍强夯开始沉降趋于平缓, 平均速率仅为 4.13 mm/d, 施工期总沉降量为 1.328 m。

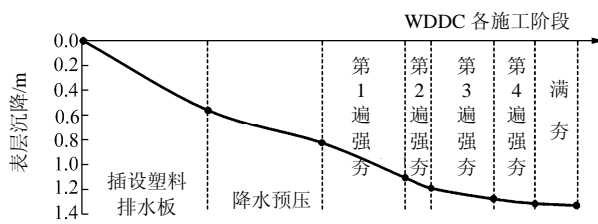


图 7 表层沉降变化规律

Fig.7 Variation of surface settlement along pump time

4.4 室内土工试验

加固前后 6.0 m 以上浅部黏土层土性参数出现明显变化(见表 3), 含水量由 51% 降低至 42%, 液性指数则由 1.68 降低至 0.65, 即加固后土体从流塑状态转换为可塑状态。但压缩系数在加固前后均大于 0.50 MPa⁻¹, 表明地基处理并未改变软土的高压缩性。

表 3 加固前后土性参数对比

Table 3 Comparison of physico-mechanical properties of soil before and after WDDC

工况	含水量 w/%	液性指数 I _L	压缩系数 a ₁₋₂ /MPa ⁻¹
加固前	51	1.68	>0.5
加固后	42	0.65	>0.5

4.5 静力触探试验

图 8 为加固区内典型静力触探试验结果。强夯

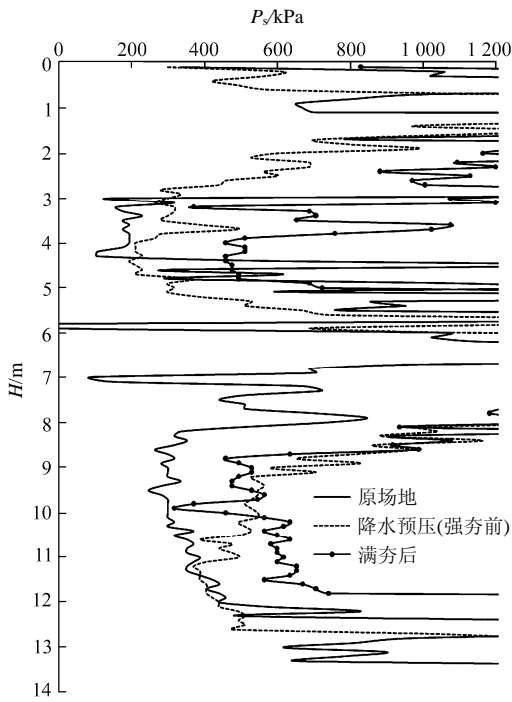


图 8 典型 P_s-H 曲线
Fig.8 Typical P_s-H curves

前的降水预压阶段使深部软土得到加强，但对浅层改善不大；当联合强夯作用后，浅部淤泥层比贯入阻力 P_s 由原场地 195.8 kPa 提高至 400.0 kPa 以上，并且随着预压时间的增加，深层软土继续固结，加固深度 H 已达 12.0 m， P_s 增加至 600.0 kPa 以上。可见，降水预压作用完全弥补了低能量强夯加固深度不足的优点，而强夯又对处理浅层地基起到了较好的效果。

4.6 十字板剪切试验

通过加固前后十字板剪切试验分析土体抗剪强度特性。6~8 m 的混砂层采用钻探引孔的方式将十字板头放入其下淤泥层中，避免板头损坏。如图 9 所示，原场地淤泥层十字板抗剪强度 c_u 处于 10 kPa 以下，经加固后提高至 27 kPa 以上，强度得到显著增强。

4.7 标准贯入试验

加固前后标贯击数 $N_{63.5}$ 如表 4 所示，淤泥层由原场地 1~2 击增加至 2~4 击，承载力得到较大提高。

4.8 静载荷试验

静载荷试验压板面积为 $1\text{ m}^2(1\text{ m}\times 1\text{ m})$ ，根据检测结果(见图 10)，加至最大荷载 260 kPa，地基并未出现破坏，其承载力特征值不低于 130 kPa，完全满足设计要求。因此，浅层淤泥质地基经降水预压处理后再联合低能量强夯法可得到有效加固，并且有利于消除工后沉降和不均匀沉降。

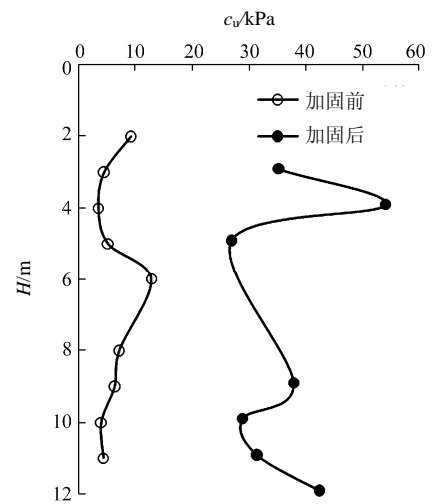


图 9 典型 c_u-H 曲线
Fig.9 Typical c_u-H curves

表 4 标准贯入试验结果

Table 4 Results of standard penetration test

深度/m	击数/击		深度/m	击数/击	
	加固前	加固后		加固前	加固后
1.5	1	2	8.5	1	2
3.0	1	2	10.0	1	2
4.5	1	3	11.5	2	5
6.0	2	4			

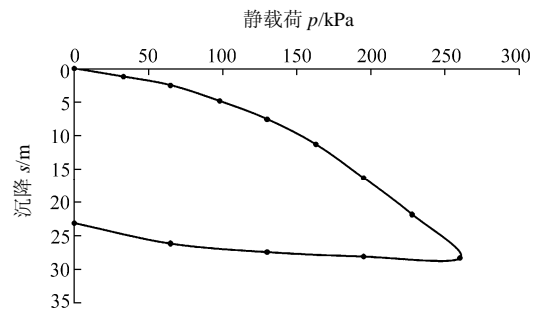


图 10 典型 $p-s$ 曲线
Fig.10 Typical $p-s$ curve

5 结 论

基于广州港南沙港区粮食及通用码头工程软基处理试验区现场试验结果，得出如下结论：

(1) 在利用砂垫层、塑料排水板等常规排水措施的基础上，运用深井井点降水和打设泥浆搅拌墙的技术手段，不仅有效地解决了饱和淤泥质软黏土中超静孔隙水压力消散及孔隙水排出的问题，更能在短期内大大降低地下水位。6 m 的水位降深，对深部软土产生约 60 kN 的预压应力，使低能量强夯加固深度由现有不足 7 m 提升至 12 m，足可适用深

厚淤泥层的加固。

(2) 给出了施工期不同深度土层孔隙水压力消散规律, 每遍夯击累积形成的孔隙水压力平均能在 6.8 d 内消散 75% 以上, 并可以此作为每遍强夯之间的时间间隔。

(3) 井点降水联合强夯法从根本上改变了饱和淤泥或淤泥质土稠度状态, 土体从加固前的流塑状态转变为加固后的可塑状态, 但其高压缩性并未得到改善。

(4) 从工程地质条件来看, 试验区深度 6~8 m 范围内含有一较为均匀的混砂层, 若加固区内富含夹砂层、混砂层, 通过塑料排水板联通, 对于改善淤泥、淤泥质软黏土的渗透性大有裨益, 这也是降水成功的重要因素。同时, 平均约 200 kPa 的初始比贯入阻力和 51% 的初始含水量, 可作为类似工程应用的参考条件。

(5) 井点降水联合强夯的软基处理工艺, 通过降低地下水位的形式, 提高深部地基土的有效应力, 工艺简单, 造价低廉, 维护简便, 与传统排水固结法相比优势突出, 并且充分发挥了井点降水和强夯法各自的优点, 地基处理效果良好, 具有明显的经济、社会效益。

参考文献(References):

- [1] MITCHELL J K. Soil improvement state of the art report[C]// The 10th ICSMFE Proceedings. Stockholm: A. A. Balkem, 1981: 509 - 565.
- [2] 张雅丽, 王志权. 塑料排水板预压法加固软基效果分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 654 - 660.(ZHANG Yali, WANG Zhiquan. Analysis of effect of consolidation of soft ground with plastic wick drain and preloading method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 654 - 660.(in Chinese))
- [3] 姜 弘, 沈水龙, 斜逢光, 等. 塑料排水板处理的软土地基的分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 437 - 440.(JIANG Hong, SHEN Shuilong, DOU fengguang, et al. Analytical method of PVD-improved subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 437 - 440.(in Chinese))
- [4] 李富强, 王 钊, 刘华清. 塑料排水带地基处理研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2 056 - 2 060.(LI Fuqiang, WANG Zhao, LIU Huaqing. Study on foundation treatment with prefabricated strip drains[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2 056 - 2 060.(in Chinese))
- [5] 郑颖人, 陆 新, 李学志, 等. 强夯加固软黏土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18 - 22.(ZHENG Yingren, LU Xin, LI Xuezhi, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 18 - 22.(in Chinese))
- [6] 陈 晨. 塑料排水板 - 强夯法在吹填土地基加固中的应用[硕士学位论文论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2007.(CHEN Chen. The application of plastic-board drain and dynamic consolidation method for filled foundation[M. S. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [7] 周 健, 曹 宇, 贾敏才, 等. 强夯 - 降水联合加固饱和软黏土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 376 - 380.(ZHOU Jian, CAO Yu, JIA Mincai, et al. In-situ test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 376 - 380.(in Chinese))
- [8] 周 健, 张 健, 姚 浩. 真空降水联合强夯法在软弱路基处理中的应用研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增 1): 198 - 200.(ZHOU Jian, ZHANG Jian, YAO Hao. Study on technique of low-energy dynamic consolidation method combined with dewatering used to treat soft roadbed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.1): 198 - 200.(in Chinese))
- [9] 周 健, 姚 浩, 贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1 685 - 1 688.(ZHOU Jian, YAO Hao, JIA Mincai. Research on technology for shallow treatment of large-area soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1 685 - 1 688.(in Chinese))
- [10] SHI D D, ZHOU J, LIU W B, et al. In-situ test research on vacuum dynamic consolidation method to improve double-layered soft ground[C]// Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2008: 791 - 796.
- [11] 周 健, 崔积弘, 贾敏才, 等. 吹填细砂软弱地基处理试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 859 - 864.(ZHOU Jian, CUI Jihong, JIA Mincai, et al. In-situ test study on ground treatment of hydraulic fine soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 859 - 864.(in Chinese))
- [12] 张丽娟, 李黎明, 韩 江. 动静力排水固结法在淤泥质地基处理工程中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 567 - 571.(ZHANG Lijuan, LI Zhangming, HAN Jiang. The application of dynamic-static drainage consolidation method to a silt ground disposal project of Guangzhou[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 567 - 571.(in Chinese))
- [13] CHEN F G, TSENG T J, CHEN J W. A case study and new concept of soil improvement techniques on reclaimed land[C]// Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2007: 1 282 - 1 286.
- [14] CHEN J W, CHEN F C, LU C W. The experimental study on effectiveness of water levels for dynamic impacts on reclaimed soils[C]// Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2008: 625 - 630.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ 240 - 97 港口工程地质勘察规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ 240 - 97 Code for geologic investigation in port engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1997.(in Chinese))