

强夯法处理双层软弱地基试验区 监测与检测浅析

雷胜全¹, 梅广冬¹, 王鑫², 李彪²

(1. 海安市建设工程施工图审查室, 江苏 南通 226600; 2. 中铁十四局第五工程有限公司, 山东 济宁 272100)

摘要: “双层软弱地基”地层结构常见于江海湖湾地区, 一般地表为3~5 m厚的水力冲填土, 以松散、不均匀的粉土、粉砂为主, 其下为孔隙比大、压缩性高、强度低的淤泥质土。大面积处理“双层软弱地基”常采用降水联合低能级强夯法, 本文以江苏南通通州湾江海联动开发示范区建设制造基地项目为例, 详细介绍了强夯法试验概况, 对监测与检测成果进行了分析, 结合工程实践提出了几种新的地基处理思路, 可供同类项目参考。

关键词: 监测与检测; 试验区; 强夯法; 双层软弱地基; 冲填土; 淤泥质土

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0062-07

Analysis of monitoring and testing in the test area of double-layer soft ground treatment with dynamic compaction

LEI Sheng-quan¹, MEI Guang-dong¹, WANG Xin², LI Biao²

(1. Hai'an Construction Engineering Construction Drawing Review Office, Nantong 226600, Jiangsu, China;

2. China Railway 14th Bureau Fifth Engineering Co., Ltd., Jining 272100, Shandong, China)

Abstract: The stratigraphic structure of “double-layer soft ground” is commonly encountered in the riverside, lakeside or gulf area. Typically, there exists a 3-5 m thick layer of hydraulic dredger fill on the surface, comprising primarily loose and uneven silt and silty sand. Beneath this layer, there is a layer of mucky soil characterized by a significant void ratio, high compressibility and low strength. Large-scale treatments for “double-layer soft ground” often employ a combination of dewatering and low-energy dynamic compaction. This work utilizes the construction and manufacturing base project in the Tongzhou Bay River-Sea Linkage Development Demonstration Zone, located in Nantong, Jiangsu, as a case study. This work provides a comprehensive analysis of dynamic compaction testing and the subsequent evaluation of monitoring and testing results. Additionally, the work introduces innovative foundation treatment strategies derived from engineering practice. These strategies offer valuable guidance for similar projects.

Key words: monitoring and testing; test area; dynamic compaction; double-layer soft ground; dredger fill; mucky soil

0 引言

南通濒江临海, 大多数冲填土场地具有“双层软弱地基”的构造特征, 常采用强夯进行大面积地基处理。

强夯分为强夯法与强夯置换法两类。强夯法适用于碎石土、砂土、低饱和度(小于60%)的粉土与黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基。强夯置换法适用于高饱和度的粉土与软塑-流塑的黏性土等地基上对变形控制要求不严的工程^[1-3]。

强夯置换法无疑是“双层软弱地基”场地有效、可靠的地基处理方法, 但置换所需的碎石、砂土材料匮乏, 造成建设成本过高, 制约了该方案的运用。采用辅助措施、原位加固的强夯法应运而生。

本文工程实例采用强夯法处理南通冲填土场地, 具有一定的代表性。通过介绍建设场地工程地质与水文地质条件、设计要求、试验区参数及通过试验成果所确定的大面积施工参数, 应用土力学原理分析评价监测与检测成果, 为综合评定地基处理效果、优化施工参数提供依据。

如何提高饱和淤泥质黏性土处理效果一直是个工程难题。国内外文献及工程实践表明,堆载法、真空预压法、电渗法塑料排水板或砂井联合堆载预压法、固化法、换填法、强夯置换法等都是常用的地基处理方法^[1-4],但工期长、造价高,常令建设单位望而却步。顾宝和所著《岩土工程典型案例述评》^[5]中“墨西哥 Texcoco 抽水造湖与现场试验”一文中的项目也耗时 5 年之久,虽然施工绿色环保、造价低,但过长的工期很难适合国情。成功的案例也不少,浦东国际机场第二跑道工程就是采用堆载预压法处理软弱地基的典范。

在分析试验区监测与检测结果的基础上,结合类似工程经验,本文提出了“降水条件下就地取材强夯挤密与置换法”、“降水条件下就地取材振动挤密与置换联合强夯法”、“抽水增荷固结法”等 3 种地基处理工法,可以有效地提高饱和淤泥质黏性土的地基处理效果,希望有一定的工程意义。

地基监测与检测一般采用岩土工程勘测手段,有一套成熟的理论与方法。结合工程实践,本文提出了监测与检测的不足与建议。强夯作用机理简单,但由于处理对象的巨大差异,至今没有统一的计算模型、公式及成熟的计算方法^[2],地区经验显得特别重要。抛砖引玉、积累经验、共同探讨也是本文的主要目的之一。

1 试验概况

强夯法在工程中广泛应用,但没有成熟的计算方法,所以规定强夯施工前,应在施工现场有代表性的场地上进行试夯或试验性施工^[1-3,6-7]。

1.1 工程地质与水文地质条件

江苏南通通州湾江海联动开发示范区建设制造基地项目的前期规划用地约 10 万 m^2 ,拟建建(构)筑物主要是厂房、道路、堆场及办公设施等。

场区地表以下 10 m 范围内的土层结构简单,具“双层软弱地基”的结构特征,上部为冲填土,以砂质粉土为主,局部混粉砂或夹淤泥、淤泥质土,构成杂乱、松散、不均匀;下部为海积相流塑状淤泥质粉质黏土,低强度、高压缩性,土性软弱。两层土厚均为 5 m 左右。场地地下水类型为潜水,地下水位年变化幅度为自然地面下 0.50~2.50 m。

1.2 施工参数

施工前设置两个试验区,每个区按边长为 28 m 的正方形布置。强夯夯锤直径为 2.52 m,底面积为

5 m^2 ,重为 10~15 t。

(1) 试验区一

根据设计参数及《强夯地基处理技术规程》(CECS 279:2010)^[1],试验区一采用“降水联合低能级强夯法”施工工艺,主要施工参数如下:

a)降水采用真空井点降水,真空度为 75~90 kPa。井管直径为 38 mm,井深 8 m 与 5 m 相间布置,井距 2 m,排距 4 m,距离施工区边线 2 m、4 m 设 2 排封井,井距 1.4 m。地下水降至夯击面以下不小于 3.5 m 且超孔隙水压力消散不少于 80%时,方可进行强夯。强夯过程中降水不停,满夯前拔管,降水结束。

b)强夯采用三遍点夯一遍满夯。单击夯击能及每遍夯击数分别为:①第一遍点夯 1 200 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;②第二遍点夯 2 000 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;③第三遍点夯 2 500 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;④满夯 1 000 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、2~4 击。

c)第一遍点夯与第二遍点夯夯点间距均为 4 m,梅花形布置夯点。第三遍点夯在一夯、二夯位置交叉进行。满夯夯点间距搭接 1/4 锤径。

(2) 试验区二

试验区二采用“降水与塑料排水板联合低能级强夯法”^[1]工艺施工,主要施工参数如下:

a)施工区域内塑料排水板采用 1 m×1 m 正方形布置,板长 9 m,穿越淤泥质土进入下层土约 1.0 m。塑料排水板采用 C 型,滤膜等效孔径 ≥ 0.075 mm、截面宽度 ≥ 100 mm、厚度 ≥ 4 mm。

b)降水井布置采用试验区一方案,强夯时将施工区域内降水井拔除,外围封井正常降水。强夯时施工区域内排水采用水平砂垫层、排水盲沟、集水井完成。

c)强夯采用四遍点夯一遍满夯。单击夯击能及每遍夯击数分别为:①第一遍点夯 1 000 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;②第二遍点夯 1 500 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;③第三遍点夯 2 000 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;④第四遍点夯 2 500 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、4~8 击;⑤满夯 1 000 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、2~4 击。

d)第一遍点夯与第二遍点夯夯点间距均为 4 m,梅花形布置夯点。第三遍与第四遍点夯在一夯、二夯位置交叉进行。满夯夯点间距搭接 1/4 锤径。

(3) 地基处理参数

经过地基处理后,拟建厂房、道路、清洗区、堆场地基土承载力特征值不小于 100 kPa,压实系数不小于 0.97,有效加固深度范围内地基土压缩模量不小于 10 MPa;其余地段地基土承载力特征值不小于 80 kPa,压实系数不小于 0.95,有效加固深度

范围内地基土压缩模量不小于 8 MPa。

1.3 监测与检测布置

施工过程中地基监测项目为地下水位、孔隙水压力及土体分层沉降 3 项。地基检测采用室内土工试验、标准贯入试验、静力触探试验及载荷板试验等 4 种方法,前 3 种方法在施工前、施工后各进行一次,进行对比试验。处理后地基承载力特征值由载荷板试验最终确定。

(1) 监测布置

a) 地下水位监测孔单孔深度 10 m。在施工区内距离边线 2 m 各布置 1 个,距离第一个强夯点径向 2 m、6 m、10 m、14 m、18 m、22 m 布置一条地下水监测断面。每区设 10 孔。

b) 孔隙水压力围绕第一个强夯点径向距离每间隔 2 m、4 m、6 m 各设 3 个测孔,每个测孔间隔 1~2 m 布置一个孔隙水压力传感器,测试深度 9 m。每区设 9 组 27 只孔隙水压力计。

c) 土体分层沉降设 4 孔,每孔按埋深 1.5 m、3.0 m、4.0 m、5.0 m、6.0 m、7.0 m 各埋设 1 只沉降磁环,共计 6 只,每个试验区 24 只,在夯点间随机布设。

(2) 检测布置

钻孔取土与标准贯入试验在施工前、施工后每个区各完成 1 只孔,静力触探试验每个区施工前、施工中、施工后 3 个阶段各完成 3 只孔,平板载荷试验每个区满夯后各完成 3 个点。试验区面积小,检测点随机布置。

1.4 监测与检测成果

(1) 监测成果

a) 地下水位

夯前场地内地下水埋深 1.50 m 左右,强夯施工过程中通过降、排、截水措施,地下水埋藏深度控制在地表 3.5 m 以下。

b) 孔隙水压力

施工过程中①层砂质粉土(简称①层土)和②层淤泥质粉质黏土(简称②层土)的超孔隙水压力达到最大值和超孔隙水压力消散幅度大于 80%所需时间分述如下:

试验区一①层土在 3 遍强夯后所产生的超孔隙水压力分别为 22.6 kPa、27.7 kPa、27.8 kPa,极值基本相当,消散时间分别为 2 d、3 d、6 d。试验区二①层土在 4 遍强夯后所产生的超孔隙水压力分别为 29.6 kPa、24.6 kPa、13.1 kPa、28.0 kPa,消散时间分别为 5 d、3 d、4 d、5 d。

试验区一②层土在 3 遍强夯后所产生的超孔隙

水压力分别为 54.4 kPa、54.8 kPa、28.2 kPa,消散时间为 7~9 d。试验区二②层土在 4 遍强夯后所产生的超孔隙水压力分别为 67.8 kPa、67.9 kPa、28.5 kPa、66.5 kPa,消散时间为 6~7 d。

c) 土体分层沉降

强夯过程中动荷载对沉降管产生挤压破坏,测试数据失真。施工前、后分别对地表高程进行量测,试验区一、二分别较施工前下沉 55 cm、53 cm。

(2) 检测成果

a) 室内土工试验

以①层土和②层土的含水量、孔隙比、黏聚力、内摩擦角指标均值为分析对象,夯前和夯后成果对比如表 1~2 所示。

表 1 试验区一地基土物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of test area 1

土层	施工节点	含水量 w/%	孔隙比 e	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
①	夯前	25.2	0.811	9.7	20.3
	夯后	21.4	0.755	12.5	26.2
	增幅/%	-15.1	-6.9	28.9	29.1
②	夯前	39.9	1.213	8.3	6.4
	夯后	36.0	1.084	8.6	6.1
	增幅/%	-9.8	-10.6	3.6	-4.7

表 2 试验区二地基土物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of test area 2

土层	施工节点	含水量 w/%	孔隙比 e	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
①	夯前	25.4	0.863	5.9	17.3
	夯后	20.5	0.733	13.0	27.0
	增幅/%	-19.3	-15.1	120.3	56.1
②	夯前	38.4	1.181	10.3	8.2
	夯后	36.4	1.110	9.5	7.4
	增幅/%	-5.2	-6.0	-7.8	-9.8

表 1 中①层土、②层土含水量较施工处理前分别降低了 15.1%、9.8%,①层土降幅明显高于②层土,这是在施工控水(降排水)条件下,①层土渗透性远大于②层土的原因。强夯前、后土层孔隙比随着含水量降低而降低,①层土、②层土孔隙比较施工处理前分别降低了 6.9%、10.6%。

室内土工试验中,①层土夯后的直接快剪试验指标提高幅度约 30%;②层土未见明显提高。压缩固结试验数据中,①层土 E_s 值夯前为 7.5 MPa、夯后为 8.9 MPa,提高 18.2%;②层土 E_s 值夯前为 3.0 MPa、

夯后为 3.3 MPa, 基本未见提高。

表 2 中①层土、②层土含水量较施工前分别降低了 19.3%、5.2%; 孔隙比较施工前分别降低了 15.1%、6.0%。①层土物理指标改善明显。

室内土工试验中, ①层土夯后的直接快剪试验指标提高幅度较大, 黏聚力提高 120.3%, 内摩擦角提高 56.1%; ②层土未见增长。压缩固结试验数据中, ①层土 E_s 值夯前为 5.5 MPa、夯后为 11.0 MPa, 提高 100.0%; ②层土 E_s 值夯前为 3.2 MPa、夯后为 3.3 MPa, 基本未见提高。

b) 标准贯入试验

标准贯入试验夯前、夯后每个试验区仅完成 1 个孔, 样本数较少, 试验结果大体如下:

试验区一①层土、②层土夯前标准贯入锤击数 N 值分别为 11 击、2.5 击, 夯后分别为 17 击、3 击, 提升幅度分别为 55%、20%。①层土锤击数提升明显, ②层土一般。

试验区二①层土、②层土夯前标准贯入锤击数 N 值分别为 14 击、0 击, 夯后分别为 22 击、2 击, ①层土夯后提升幅度为 57%, ②层土夯后仅为 2 击, 锤击数较小。

借鉴地区建设经验、《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)^[8]、《工程地质手册》^[9], 利用标准贯入试验成果判定强夯后①层土呈中密状, ②层土呈流塑状。

c) 静力触探试验

试验区一①层土夯前、夯中、夯后双桥锥尖阻力均值分别为 2.22 MPa、3.99 MPa、5.94 MPa, 夯中、夯后较夯前分别增长 79.7%、167.6%; ②层土夯前、夯中、夯后双桥锥尖阻力均值分别为 0.27 MPa、0.37 MPa、0.62 MPa, 夯中、夯后较夯前分别增长 37.0%、133.3%。

试验区二①层土夯前、夯中、夯后双桥锥尖阻力均值分别为 2.47 MPa、5.23 MPa、9.00 MPa, 夯中、夯后较夯前分别增长 111.7%、264.4%; ②层土夯前、夯中、夯后双桥锥尖阻力均值分别为 0.30 MPa、0.30 MPa、0.42 MPa, 夯中、夯后较夯前分别增长 0.0%、40.0%。

静力触探试验具有数据连续性、曲线直观性, 是软土地区地基主要的勘察与检测手段。选取夯前、夯后各 2 个孔测试曲线对比如图 1 所示。

利用静力触探试验成果判定强夯后试验区①层土呈中密状, ②层土呈流塑状。判定结果同标准贯入试验^[8-9]。

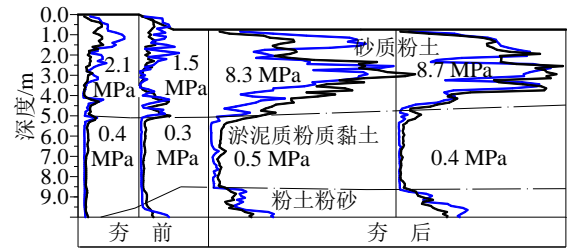


图 1 静力触探试验夯前夯后对比图

Fig. 1 Comparison of cone penetration test before and after dynamic compaction

d) 载荷试验

夯后每个试验区完成载荷试验 3 个。采用边长 1.5 m 正方形钢制载荷板, 按规范及设计要求最大加载量 200 kPa。每个载荷试验加载至 200 kPa 时, 承载板沉降稳定, 累计沉降量 8.40~14.48 mm, 荷载-沉降 ($p-s$) 曲线未出现拐点, 土体未发生局部剪切破坏, 判定地基承载力特征值不小于 100 kPa, 达到了设计要求。另外, 依据载荷试验成果确定地基土变形模量 E_0 为 40 MPa 左右^[6,8]。

2 试验成果分析与应用

2.1 监测

(1) 强夯过程中地基土监测是动态、信息化施工的必然要求, 是工程建设强制性标准内容之一^[2,7]。

(2) 本次监测孔隙水压力消散时间明显少于规范经验数据, 分析原因有三: a) 试验区在强夯施工期与间歇期均进行降、排水作业; 试验区二设竖向塑料排水板与水平向排水措施, 均有利于孔隙水压力消散。b) 有限夯击能影响。如②层土埋藏深度为 5 m, 强夯夯击能受影响明显减小, 因此测得的孔隙水压力偏小。c) 现场测试采用固定时间段量测, 错过超孔隙水压力峰值。

(3) 监测手段改进。在强夯夯击能作用下, “双层软弱地基” 发生水平向与垂直向挤压, 地下水位管与分层沉降管易发生堵塞、变形、损坏。强夯地基监测的地下水位管宜采用抗冲击、抗折断的管材。建议采用高强度 ABS 管或钢管, 内径不小于 80 mm, 壁厚不小于 5 mm。磁环式分层沉降标不适用于强夯法地基土分层沉降观测, 可以考虑埋设深层沉降标, 采用水准测量方法进行监测。

2.2 检测

(1) 表层砂质粉土强夯处理后加固效果明显, 地基承载力、强度、变形指标及地基均匀性均能达到设计要求。

(2) 试验区采用两种施工工艺对场地内②层

淤泥质粉质黏土进行处理,土性改善有限,强度增长不明显,未能达到设计目标。分析原因有三:a)土层埋藏较深,位于地表下5 m左右,强夯夯击能影响小。b)该层土为饱和黏性土,土体中的水为自由水与结合水,受其自身渗透性低的特点,土层内自由重力水渗出时间较长,与黏土颗粒靠电分子力紧密吸引的结合水析出更是难上加难。c)试验区二采用塑料排水板辅助措施,由于加荷(强夯)不持续、时间短,降低土层含水量有限。

(3)检测工作量较少,样本代表性差。如每个试验区夯前、夯后取土试验孔、标准贯入试验孔仅为1个。建议设计方案应明确每个试验区每种检测手段不能少于3个独立检测点,每层土样本数满足数理统计要求^[10]。

2.3 大面积施工参数

考虑到工期及地基处理成本,废除试验区二施工工艺,修订试验区一施工工艺进行大面积施工。

将场地分为“三降三夯区”与“二降二夯区”。前者在试验区一的施工参数上调整了第二遍点夯夯击能(由试验区一采用的2 000 kN·m调整为1 800 kN·m)、第三遍点夯夯击能(由试验区一采用的2 500 kN·m调整为2 600 kN·m);“二降二夯区”取消了第三遍夯,提高了第二遍点夯的夯击能(由试验区一采用的2 000 kN·m调整为2 600 kN·m)。夯点间距、控水措施等与试验区一相同。

大面积施工检测表明,①层砂质粉土地基承载力均达到了设计要求,其中“三降三夯区”双桥静力触探锥尖阻力均值还略高于试验区一,数据对比如表3所示。

表3 大面积施工区与试验区一静力触探指标对比表

Table 3 Comparison of cone penetration index between large construction area and test area 1

分区	锥尖阻力/MPa	
大面积施工区	三降三夯区	6.32
	二降二夯区	5.71
试验区一	5.94	

3 结论与讨论

通过本实例,强夯地基监测与检测需要关注以下几点:(1)应考虑动荷载对仪器、设备的影响,避免变形、损坏致使监测数据不连续或失真。(2)检测方法应具针对性,如在软土层增补十字板剪切测试等。(3)检测数量要满足数理统计需要^[10]。(4)本工程试验区仅设置两处,数量偏少且强夯采用同一夯点间距,如何评价土体挤密、置换等地基处理

效果与夯击能、夯点间距关系缺少依据。

造地工程^[9]中由水力冲填形成的“双层软弱地基”场地,由于粉土、粉砂层渗透性较好,在控水条件下采用强夯法处理,松散状的土层较易达到中密-密实状,淤泥质黏性土则不然,只有降低其含水量,改变土的状态,它的强度与变形指标才能达到设计要求^[3,9]。

结合本工程实例及类似工程经验,“双层软弱地基”场地中提高饱和淤泥质黏性土地基处理效果可以考虑以下3种工法。限于篇幅,仅作概念论述。

(1)降水条件下就地取材强夯挤密与置换法

该工法与试验区一施工工艺基本类同。主要变化是加大夯点间距、提高单击夯击能且在强夯过程中将表层砂质粉土向夯坑内补充、堆填,使淤泥质土得以挤密与置换。淤泥质粉质黏土经过强夯挤密与置换后,该层土土性改变为砂质粉土夹(混)粉质黏土或粉质黏土夹(混)砂质粉土^[6]。工法示意如图2所示。

该工法在类似项目中有成功案例,值得推广。

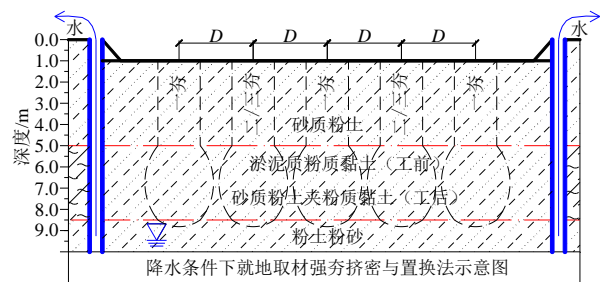


图2 “双层软弱地基”加固工法一示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reinforcement method 1 for “double-layer soft ground”

(2)降水条件下就地取材振动挤密与置换联合强夯法

施工工序如下:a)振动锤成孔;b)将表层砂质粉土向孔内填料;c)振动锤振动挤密;d)重复2~3步骤直至地表;e)降水;f)强夯。

该法主要是通过振动成孔,将表层砂质粉土充填孔内部分置换淤泥质土且形成竖向排水通道,置换过程与强夯作用的挤密改变淤泥质土土性同工法一^[6]。工法示意如图3所示。

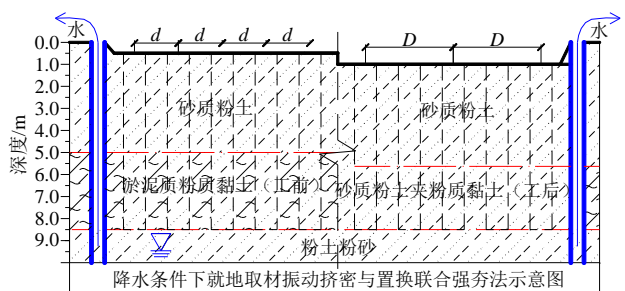


图3 “双层软弱地基”加固工法二示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reinforcement method 2 for “double-layer soft ground”

(3) 抽水增荷固结法

在淤泥质粉质黏土下层粉土粉砂中抽取地下水且存于地表,淤泥质粉质黏土在排水固结、上部砂质粉土与水荷载共同作用下完成固结,土性得以改变为粉质黏土^[6]。工法示意如图 4 所示。

该法作用机理简单,若能将地表水用于渔业养殖等,可以提高项目综合效率,弥补地基处理工期长的唯一缺点。

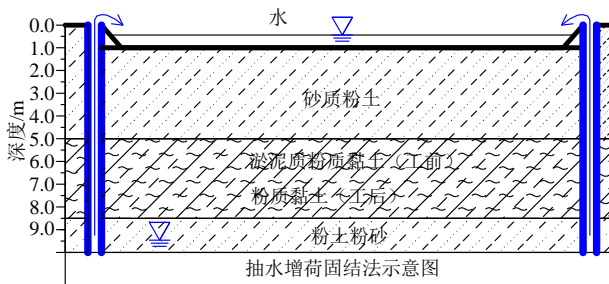


图 4 “双层软弱地基”加固工法三示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reinforcement method 3 for “double-layer soft ground”

以上 3 种工法,降水、抽水井可以采用市场成熟、经济简约的管井,井直径为 400 mm,深度依据土层特征、控水要求确定。

土体加载、缩小渗透路径、扩大渗透面积是有效降低土体含水量的 3 种方法。“降水条件下就地取材强夯挤密与置换法”和“降水条件下就地取材振动挤密与置换联合强夯法”2 种地基处理工法是上述 3 种方法的联合应用。对于“双层软弱地基”而言,它是利用表层粉土、粉砂渗透性好的特点,全部或部分置换下部淤泥质黏性土,扩大淤泥质黏性土的渗透面积、缩短渗透路径,并在强夯荷载挤密作用下,加速排水,降低土体含水率,从而达到改变土性的目的。

“抽水增荷固结法”是堆载预压法与“墨西哥 Texcoco 抽水造湖”的综合利用,无疑是最经济、环保的软弱淤泥质黏性土地基处理形式,在工期满足的条件下是个首选。

参考文献

[1] 中国工程建设标准化协会. 强夯地基处理技术规程: CECS 279 : 2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Ground Treatment by Heavy Tamping: CECS 279 : 2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技

术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79 — 2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[3] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

GONG Xiao-nan. Foundation Treatment Manual[M]. Third Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007 — 2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[5] 顾宝和. 岩土工程典型案例述评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

GU Bao-he. Review on Typical Cases of Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[6] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 2009 年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—2001[S]. 2009 Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑与市政地基基础通用规范: GB 55003—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. General Code for Foundation Engineering of Building and Municipal Projects: GB 55003—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

- 社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [9] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第五版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological Engineering Handbook[M]. Fifth Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础工程施工质量验收标准: GB 50202—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Acceptance of Construction Quality of Building Foundation: GB 50202—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.



- (上接第 61 页)
- Beijing: China Architecture & Building Press, 2023: 39-41.
- [16] 杜伟飞, 张继文, 夏娜, 等. 北斗II载波相位差分定位法在高填方变形监测中的应用[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(4): 336-341.
- DU Wei-fei, ZHANG Ji-wen, XIA Na, et al. The application of BDS II carrier phase diff-positioning technology for the deformation monitoring of high fill embankment[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(4): 336-341.
- [17] 陈琴, 谢鸿, 徐坤, 等. 高精度北斗定位滑坡灾害监测预警系统建设与应用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(4): 77-83.
- CHEN Qin, XIE Hong, XU Kun, et al. Application research of landslide disaster monitoring and early warning system based on high-precision Beidou positioning[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(4): 77-83.