

降水强夯工艺处理淤泥质黏土地基的试验研究

兰明清

Experiment of precipitation-driven dynamic compaction technology in the treatment of silty clay sites: A case study of Yangluo project in Wuhan

LAN Mingqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究

An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area

张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 罗玉磊, 郭幔 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 117-125

砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme

董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94

高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116-124

基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析

Influence of foundation pit dewatering on sonar seepage detection accuracy

江杰, 魏丽, 钟有信, 胡盛斌, 杨杉楠 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 73-80

云母影响水泥软黏土强度的试验研究

Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay

张亚玲, 赵晓彦, 严群 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 101-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403046

兰明清. 降水强夯工艺处理淤泥质黏土地基的试验研究——以武汉阳逻项目为例[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 134-143.

LAN Mingqing. Experiment of precipitation-driven dynamic compaction technology in the treatment of silty clay sites: A case study of Yangluo project in Wuhan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 134-143.

降水强夯工艺处理淤泥质黏土地基的试验研究 ——以武汉阳逻项目为例

兰明清

(中铁十一局集团有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘要: 针对传统软基处理方法在淤泥质黏土地基应用中效果不佳的问题, 以武汉阳逻项目为实例, 探讨了新型降水强夯工艺在软土地基处理中的加固机制及其施工工艺参数。研究将强夯技术和井点降水法相结合, 充分利用井点具备的较大排气量和较大真空度特性, 减小强夯技术产生的超静孔隙水压力并排除孔隙水。阳逻项目第一遍点夯前地下水位降到地面以下 3 m 需要约 2 d, 第二遍点夯前地下水位降到地面以下 5 m 需要约 3 d, 满夯前地下水位降到地面以下 5 m 需要约 6 d, 整个降水周期所需时间约为 11 d。第一遍点夯之后超静孔隙水压力消散 70% 需要约 7 d。试验结果显示, 降水强夯法可以在短时间内显著提高软黏土的固结度, 减少“橡皮土”现象的发生, 有效处理深度达到 6.0 m, 并能显著提高软土地基的承载力至 150 kPa 以上。通过对比分析现场监测和室内试验数据, 进一步证明了降水强夯工艺处理淤泥质黏土地基的有效性。研究结果可为中国沿海地区广为分布的软土地基处理工程提供理论基础和施工工艺参数。

关键词: 地基处理; 降水; 强夯; 淤泥质黏土; 施工参数

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0134-10

Experiment of precipitation-driven dynamic compaction technology in the treatment of silty clay sites: A case study of Yangluo project in Wuhan

LAN Mingqing

(China Railway 11th Bureau Group Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430064, China)

Abstract: Traditional soft foundation treatment methods often prove ineffective for muck clay soil foundations. This study investigated the reinforcement mechanism and construction process parameters of a novel dewatering-intensive tamping technique using the Yangluo project as a case study. The method integrated dynamic compaction with well-point dewatering, leveraging well-points to reduce excess pore water pressure generated by tamping while facilitating pore water discharge. During the Yangluo project, the groundwater level was lowered to 3 m below the ground surface within about 2 d before the first round of tamping, to 5 m within about 3 d before the second round of tamping, and to 5 m within about 6 d before the tamping, with the entire dewatering cycle of approximately 11 d. After the first round of tamping, the excess pore water pressure dissipated by 70% in about

收稿日期: 2024-03-22; 修订日期: 2024-07-16

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中铁十一局集团有限公司科技项目(23-AII-15)

作者简介: 兰明清(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事土木工程、建筑工程方面的研究。E-mail: 3282639354@qq.com

7 d. The test results show that the dewatering-intensive tamping method can improve the consolidation of soft clay significantly in a short time, mitigates the “rubber soil” phenomenon, effectively treat the soil to a depth of 6.0 meters, and enhances the bearing capacity of the soft soil foundation (>150 kPa). This study establishes a theoretical foundation and practical construction parameters for the treatment of soft soil foundations, particularly in China’s coastal regions, where such conditions are prevalent.

Keywords: foundation treatment; dewatering; dynamic compaction; silty clay; construction parameters

随着中国东部沿海和沿江地区城市化、基础设施建设的快速推进,淤泥质黏土地基的处理问题日益凸显^[1-3]。淤泥质黏土具有含水率高、压缩性大、结构性强、抗剪强度低、渗透性差等特点,在工程建设前需要对其进行加固处理^[4-6]。因此,深入研究和探讨新型高效地基处理技术对于提高工程质量、缩短工期和降低成本具有重要意义。

地基处理是地质工程中的关键技术之一,旨在改善土壤的工程性质,提高地基承载力和降低地基沉降^[7-8]。在过去的几十年里,专家学者们已经开发了许多地基处理方法,以满足不同土体条件和工程需求。传统的地基处理方法如软土固化技术,在一定程度上提高了软土的力学性能^[9-12]。但传统固化剂如水泥和石灰在生产和应用过程中存在高能耗、高污染等缺陷,限制了其应用范围^[13-14]。此外,复合材料桩和环保型地基加固技术的研究和应用取得了显著的发展,主要是通过水泥土搅拌桩、深层次碎石桩、高压喷射桩等方法对地基进行加固^[15-16]。这些方法通过在土体中形成混凝土或碎石柱,增加地基的承载力,减小地基沉降。但是这些方法对施工设备要求较高,可能导致土体固结和收缩,需要严格的质量控制。真空预压法是一种将上部淤泥质土体在真空负压下压缩固结稳定的方法。然而,分层分阶段的真空负压作用于土体,导致土体的渗流路径变得宽且长,容易形成淤堵现象^[17-18]。

综上所述,传统软基处理方法存在一些亟待解决的问题。首先,在某些特殊情况下,如高度饱和的软土地基,这些方法的处理效果并不理想,可能导致地基在施工过程中或使用期内出现不稳定、沉降过大等问题^[19]。其次,这些传统方法需要较长的施工时间,影响整个建筑工程的进度,增加工程风险^[20]。最后,这些方法需要投入大量的材料和人力资源,特别是在大型基础设施建设项目中,将显著增加工程成本,增加项目投资的压力。因此,亟需开发出更加绿色低碳、经济高效的新型地基处理技术,以应对当前复杂多样的地基问题。

强夯法是一种地基振动处理技术,通过对地基重复施加高能量的冲击载荷,使土体发生重排、碎裂和密实,从而提高地基的承载力和降低沉降^[21-25]。强夯法广泛地应用于道路、港口和填筑工程等领域,尤其在处理松散的粗颗粒土、粉土和淤泥质黏土等问题土壤时具有良好的成效。近年来,学术界在强夯法的理论分析、数值模拟、试验研究和工程应用等方面取得了显著的进展^[26-28]。其中,降水强夯法作为一种新型地基处理方法受到了广泛关注。该方法充分利用井点产生较大排气量和较大真空度的特点,加速超静孔隙水压力消散和孔隙水排出,能够快速提高软黏土的固结度,避免强夯过程中“橡皮土”的出现,在大面积场地的预处理工程中使用的越来越多^[29]。

新型降水强夯工艺在软土地基处理中具有明显优势^[30-31]。(1)处理效果优:新型降水强夯工艺结合了强夯和降水排水两种方法,既能加速地基的固结,又能有效减小土体的水分含量。这种方法可以显著提高软土地基的承载力和稳定性,降低沉降,使地基达到设计要求。(2)工期短:新型降水强夯工艺利用高能冲击波对地基进行夯实,加快了地基固结速度,从而缩短了工程周期。这有助于提高工程效率,降低工程风险。(3)成本低:相较于传统方法,新型降水强夯工艺需要较少的材料和人力资源投入,降低了工程成本。同时,由于工期缩短,间接降低了项目的管理和维护成本。综上所述,新型降水强夯工艺不仅可以提高地基的承载力和稳定性,还能缩短工程周期,降低工程成本。这为解决传统软基处理方法存在的问题提供了有效途径,具有重要的研究意义和应用价值。

尽管降水强夯法在理论和实践上取得了一定的成果,但其在不同地质条件下的适用性和最佳施工参数仍需深入研究。本文旨在对强夯技术联合井点降水法在中国东部沿海、沿江地区广泛分布的淤泥质黏土地基处理中的应用进行深入研究。选取具有代表性的武汉阳逻项目进行大面积含淤泥质黏土地基的现场试验研究,通过现场标准贯入试验、静力触探试验、十字板剪切试验、地下水位监测、孔隙水压力监

测和地基承载力监测结果,分析降水强夯法在不同地质条件下的适用性以及可能存在的问题;通过对比分析,提出针对不同地质条件的优化处理方案,以期为沿海地区大面积软土地基加固处理提供参考。

1 工程背景

本次降水强夯法试验是基于阳逻国际港集装箱铁水联运二期 A 标段一分部工程地基的处理项目,试验内容为对 $16.6\times 10^4\text{ m}^2$ 的码头陆域堆场 3—14 区进行降水强夯实验。该工程位于武汉市新洲区阳逻经济开发区,拟改造的码头工程位于武汉市天兴洲洲尾水口河上游的长江北岸。码头陆域位于码头后方长江大堤以北至已建江北快速路,上距武汉关约 27 km,下距吴淞口约 1 016 km,具体位置见图 1。

1.1 工程地质条件

施工区属长江一级阶地地貌单元,地处长江大堤背水面一侧。场区地势平坦开阔,高程一般在 20.0~23.0 m 之间,前期施工堆积的填土无规则堆放,由于人工挖填等形成局部起伏,部分地区排水条件不畅,积水超过 1 m。

根据现场勘察钻孔,场地揭露地层情况及特征如

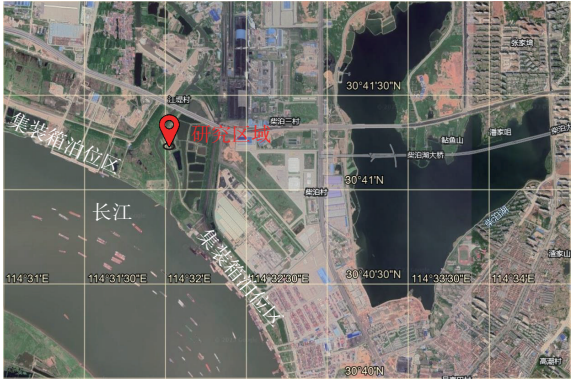


图 1 项目位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of project location

下:上部覆盖层主要由杂填土、素填土、粉质黏土和淤泥质粉质黏土组成;中部地层由第四系河流冲积的粉质黏土夹砂或粉砂夹黏性土组成,多呈互层状;中下部地层由河床相的粉细砂组成,由上往下砂的密实度从稍密到中密再到密实,粗颗粒亦逐渐增多,层底多有薄层的卵石;下部地层为古近系~白垩系公安寨组的紫红色砂质泥岩,地层参数详见表 1,地层剖面详见图 2。“降水+强夯”处理的地层主要为:①-1 杂填土(Qp^{ml})/①-2 素填土(Qp^{ml}),②粉质黏土(Qp^{al}),③淤泥质粉质黏土(Qp^{al})。

表 1 码头区地层主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical indicators of stratum in dock area

单元土体编号	单元土体名称	天然含水率/%	天然孔隙比	土粒比重	湿密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	无侧限抗压强度(原状)/kPa	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模量/MPa	静力触探比贯入阻力/MPa	标准贯入击数
②	粉质黏土	31.9	0.886	2.72	1.89	1.42	37.1	21.6	15.3	0.63	61.38	0.37	4.4	0.91	4.5
③	淤泥质粉质黏土	39.1	1.077	2.72	1.82	1.30	37.4	21.6	15.7	1.10	27.57	0.56	3.2	0.51	2.9
③-1	粉质黏土	33.1	0.915	2.72	1.88	1.40	32.8	20.1	12.6	1.00	37.95	0.42	4.0	0.89	3.7
④	粉砂夹黏性土												8.0	4.42	11.3
④-1	淤泥质粉质黏土	38.9	1.080	2.73	1.82	1.31	37.7	21.3	16.4	1.08	28.90	0.56	3.4		3.0
④-2	粉质黏土夹砂	31.0	0.873	2.72	1.88	1.42	32.2	19.4	12.3	0.87	47.52	0.35	4.0	1.26	4.1
⑤	粉细砂												10.0	8.78	20.7
⑥	粉细砂												12.0	16.15	32.1

施工区内的特殊土主要为软土和填土。软土主要包括③、④-1 淤泥质粉质黏土,③-1 粉质黏土,④-2 粉质黏土夹砂,呈软塑~流塑状态,具有含水率较高、孔隙比大等特征,容易产生侧向滑移、不均匀沉降及蠕变等工程地质病害,对本工程堆场的不均匀沉降影响较大。填土主要包括素填土、杂填土,具有层厚不均、结构较松散等特点,对场区的预制桩施工有较大影响。

1.2 水文地质条件

阳逻项目场区地下水主要分为上层滞水、孔隙水、

碎屑岩裂隙水。上层滞水主要分布在表层人工填土、黏性土层中,接受地表排水与大气降水的补给,水位埋深 0.5~3.5 m。孔隙水呈条带状分布,含水层厚度约 10 m。裂隙水主要存在于白垩系~古近系的公安寨组紫红色砂质泥岩中,因节理、裂隙多被泥质充填,水量较少。地下水主要补给来源为大气降水和长江水,排泄方式主要为向河沟等低洼处排泄及自然蒸发。

2 施工工艺及参数

本研究试验区面积为 $10\ 000\text{ m}^2$,场区内最大软土

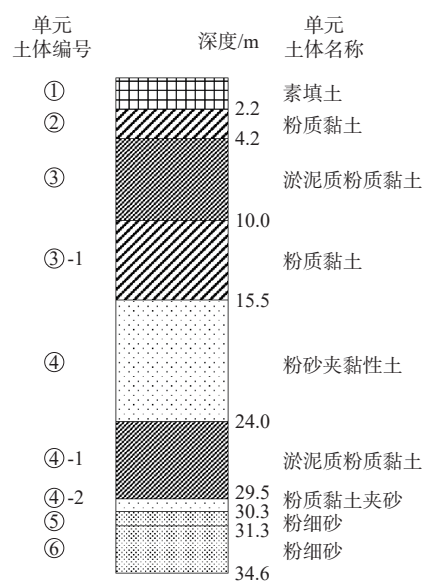


图 2 码头区地层剖面图
Fig. 2 Stratigraphic profile of project

深度约为 16.0 m, 最小软土深度约为 6.0 m, 试验区域软土平均深度 13.0 m。根据研究区域的地基承载力使用要求和后期的区域功能, 采用轻型井点降水、强夯法的施工工艺。强夯法的设计涉及夯击能量、夯击次数、夯击间距和夯击深度等参数, 以及施工质量的检测和控制^[32]。本研究的施工参数见表 2, 夯机设备如图 3 所示。

表 2 施工参数
Table 2 Construction parameters

工序	真空管排距/m×点距/m	夯击能/kJ	夯点间距/m	每点击数
第一遍	4×4/4×2	1 500 ~ 1 800	4×10	4 ~ 6
第二遍	4×4/4×2	2 200 ~ 2 500	4×10	6 ~ 8
第三遍	满夯	1 000	搭接1/4锤径	2



图 3 振动碾压施工
Fig. 3 Vibration rolling construction

降水强夯工艺的施工流程如图 4 所示。首先, 夯锤的重量大于 18 t, 直径大于 2.4 m。第一遍降水地下

水位满足条件后, 进行第一遍点夯。点夯开始前, 拆除夯机道内占用的降水管, 并确保其他未占道的降水管继续不间断地进行降水。第一遍点夯的能量控制在 1 500 ~ 1 800 kJ 之间, 每个点位进行 4 ~ 6 次夯击。第一遍点夯完成后, 回填夯坑并进行碾压密实。之后进行第二遍降水, 等待水位降到距地面以下 5 m (约 3 ~ 7 d), 且第一遍点夯击密产生的超孔隙水压力至少消散 70% ~ 80% 后, 开始第二遍点夯。第二遍点夯的能量比第一遍大, 控制在 2 200 ~ 2 500 kJ 之间, 每个点位进行 6 ~ 8 次夯击。第二遍点夯结束后进行第三遍降水, 水位达到设计要求 (距地面以下 5 m) 后撤掉降水系统, 推平夯坑。最后一遍满夯能量应为 1 000 kJ, 每个点位进行 2 次夯击, 并且需要搭接 1/4 锤径。在收锤的过程中, 最后 2 次夯击的平均沉降量不超过 5 cm, 夯坑周围不得出现过大大隆起, 且夯坑深度不超过 1.7 m。

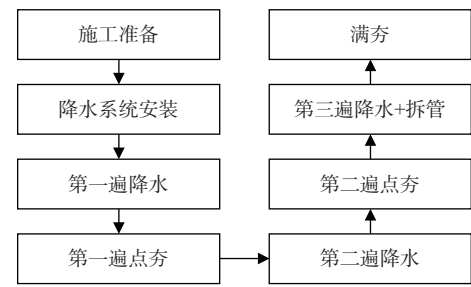


图 4 降水强夯工艺施工流程图
Fig. 4 Flow chart of precipitation-driven dynamic compaction construction process

点夯收锤需要满足如下标准: 当出现 (b) (c) (d) 描述的一种或多种情况, 且不满足 (a) 条件时, 应暂时收锤, 加强此区域的排水, 增加点夯遍数。

- (a) 最后 2 击平均夯沉量 ≤ 5 cm;
- (b) 达到设计要求的最大夯击次数;
- (c) 夯坑周围出现过大大隆起;
- (d) 夯坑深度超过 1.7 m。

本研究使用机械设备铺设竖管, 竖管的布置间距为 4 m×4 m, 选用 $\Phi 32$ mm 的 PVC 管, 并采用深浅管结合的分层降水方式以增强降水效果。竖管分为上下两个部分, 竖管上部分顶端应不超出整平后场地标高 20 cm。竖管下部以梅花形分布打设孔径 6 ~ 10 mm 的小孔, 并在插入前缠上白色滤网以防止堵管。完成竖管插设后, 使用 4 m 横管和 $\Phi 32$ mm 的钢丝软管与竖管连接, 直至真空泵。此外, 研究区的降水管道及夯点具体布置如图 5 所示。

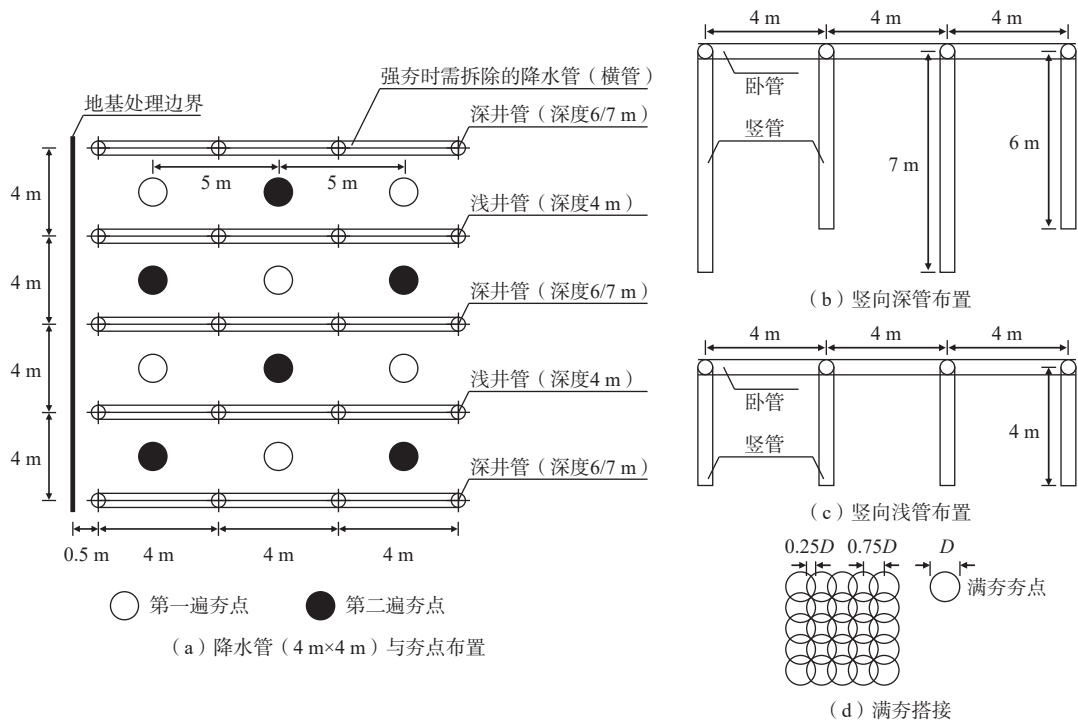


图 5 降水管道及夯点具体布置示意图

Fig. 5 Layout of precipitation pipes (4 m×4 m) and compaction points

3 施工效果试验分析

3.1 室内土工试验

在码头试验区现场钻取土样,进行室内土工试验后,对所有钻孔中两层力学指标进行统计平均,并以平均值为分析对象(表 3)。对比结果显示,淤泥层处

理后无侧限抗压强度有所增大,而黏聚力有所降低。这一现象的原因在于淤泥渗透性差,尽管存在排水管道,但其自身渗透固结速度较慢。同时,强夯作业对原位土体造成扰动,因此导致黏聚力降低。另一方面,黏土层处理后无侧限抗压强度显著增大,同时黏聚力也有明显提高。

表 3 土工试验数据统计分析表

Table 3 Statistical analysis of geotechnical test data

土层		无侧限抗压强度/kPa			黏聚力/kPa		
		最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
淤泥、淤泥质土	处理前	3.8	14.8	8.7	21.9	38.6	29.0
	处理后	7.5	26.6	17.0	7.5	23.2	15.4
黏土	处理前	6.2	18.5	12.7	30.9	65.8	43.8
	处理后	23.8	111.9	67.9	27.5	89.1	58.3

3.2 标准贯入试验

施工处理后进行钻孔取土标贯检测,标贯结果统计如表 4 所示。淤泥质黏土处理后的标贯击数小于处理前,这表明淤泥质黏土的结构性因强夯施工遭到破坏,从而导致淤泥质黏土层的承载能力降低。随着时间的增加,这种降低的趋势会进一步加剧。另一方面,粉质黏土处理后的标贯击数大于处理前,这表明粉质黏土层的承载能力显著提高。

3.3 静力触探试验

本试验区在处理前(2020 年 11 月),监测单位进行过静力触探试验。为方便比较,施工完成后(2020 年 12 月)在原试验点进行了静力触探试验。统计静力触探资料如表 5 所示。粉质黏土层作为本次处理的目标地层,完成施工处理后,锥尖阻力(q_c)平均值较处理前显著提升,说明现场处理工法加固粉质淤泥层效果明显,其力学性能得到改善。处理工法对软基

表 4 3 组检测孔标贯试验结果统计表

Table 4 Standard penetration test results of 3 sets of detection holes

土层	统计项目	标贯击数			
		处理前	处理后		
			1	2	3
淤泥质黏土	最小值	2.0	0.0	1.0	0.0
	最大值	4.0	2.0	4.0	3.0
	均值	3.0	1.0	2.5	1.5
粉质黏土、黏土	最小值	3.0	7.0	5.0	4.0
	最大值	6.0	15.0	16.0	13.0
	均值	4.5	11.0	10.5	8.5

表 5 4 组静力触探试验数据统计分析表

Table 5 Statistical analysis of 4 sets of static cone penetration test data

组号	锥尖阻力平均值/MPa		增长百分比/%
	施工前	施工后	
1	0.897	1.066	15.85
2	0.880	1.030	14.56
3	0.889	1.048	15.17
4	0.886	1.052	15.78

承载力的提高有一定的处理效果,基本上满足了设计要求。

3.4 十字板剪切试验

在码头试验段处理前(2020 年 11 月)、施工完成后(2020 年 12 月),分别在软土层中进行十字板试验。为了便于比较分析,处理前后十字板试验在处理前点位的原位置进行。分别统计处理前后软土层中十字板抗剪强度指标,具体数据如表 6 所示。表中所列数据为各点次十字板剪切强度的平均值。

表 6 3 组十字板试验数据统计分析表

Table 6 Statistical analysis of 3 sets of cross plate tests

组号	剪切强度/MPa		增长百分比/%
	施工前	施工后	
1	19.62	30.12	53.52
2	25.10	31.30	24.70
3	23.44	36.27	35.37

注:表中所列数据为现场十字板剪切试验各点次原状土剪切强度的平均值。

由表 6 可以看出,完成了所有施工工序后,软土层的十字板剪切强度有明显提高。淤泥层(组 1)十字板平均剪切强度从 19.62 kPa 提高至 30.12 kPa,提高幅度为 53.52%;黏土层(组 2)十字板平均剪切强度从 25.1 kPa 提高至 31.3 kPa,提高幅度为 24.7%;淤泥质黏土层(组 3)十字板平均剪切强度从 23.44 kPa 提高

至 36.27 kPa,提高幅度为 35.37%。

根据室内土工试验统计分析,强夯作业后,淤泥层无侧限抗压强度有所增大,而黏聚力有所降低。黏土层处理后无侧限抗压强度显著增大,同时黏聚力也有明显提高。根据标准贯入检测,淤泥质黏土处理后的标贯击数小于处理前,承载能力降低。而粉质黏土处理后的标贯击数大于处理前,承载能力显著提高。根据静力触探试验统计分析,粉质黏土层的锥尖阻力平均值较未处理前平均值提升幅度明显,说明现场处理工法加固粉质淤泥层效果明显,其力学性质得到改善。

4 监测数据对比分析

根据质量要求,地基处理区的地基承载力特征值应不低于 150 kPa,设计使用年限内地基沉降值不应超过 30 cm,地基顶面回弹模量应不低于 60 MPa。在进行质量检验时,需要观测地下水位,以确定降水效果并了解试验周边地下水位情况。同时,需要观测试验区表层沉降量,并测定试验点地基的沉降随荷载的变化情况,以确定地基土的承载能力和变形特征。因此,本研究委托广西交通科学研究院在试夯区进行了监测和检测,监测和检测项目的布置如图 6 所示。

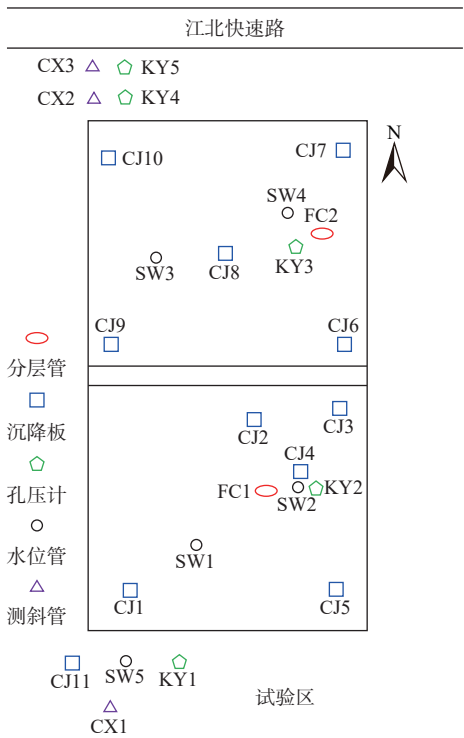


图 6 试验区监测与检测点位布置平面图

Fig. 6 Layout of monitoring and detection points in the test area

4.1 地下水位监测

根据试验区内的布置情况,从 2020 年 11 月 19 日至 2020 年 12 月 16 日对 5 个水位点进行了监测,以评估试验区的降水效果以及周边地下水位变化情况(图 7)。监测数据显示,在进行第一遍点夯处理后,地下水位在 3 d 后可以下降到地面以下 3 m;而进行第二遍点夯的降水处理后,地下水位在 3 d 可以下降到地面以下 5 m;满夯前降水 6 d 可以实现地下水位降到地面以下 5 m。以上结果满足设计要求,并且证明了强夯作用会引起地下水的下降。

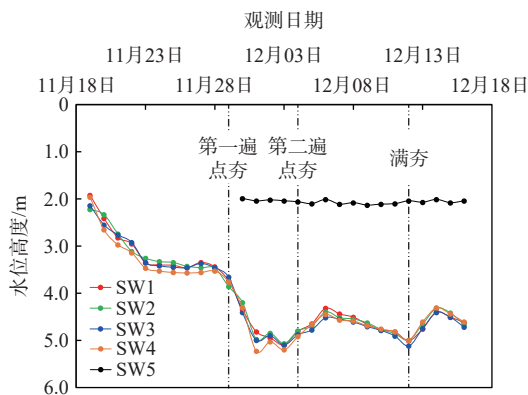


图 7 地下水位变化曲线

Fig. 7 Groundwater level change

4.2 孔隙水压力监测

根据孔隙水压力数据绘制孔隙水压力曲线图如图 8 所示。由图 8(a)可知,距离夯区越远,相应位置的孔隙水压力越大,而夯区外孔隙水压力受强夯施工影响较小。

由图 8(b)可知,在强夯施工区域内,相应位置的孔隙水压力受强夯施工影响较大。第二遍点夯施工形成的超孔隙水压力为 24.4~29.6 kPa, 2, 4, 6 m 位置处超孔隙水压力均值分别为 25.3, 26.7, 28.5 kPa。继续降水 6 d 后,孔隙水压力为 30.8~33.3 kPa, 2, 4, 6 m 位置处超孔隙水压力均值为 31.8, 32.6, 34.2 kPa, 分别消散了 28.6%、27.6%、42.2%。满夯完成后超孔隙水压力为 27.0~29.3 kPa, 2, 4, 6 m 位置处超孔隙水压力均值为 27.8, 28.9, 30.5 kPa。继续降水 4 d 后,孔隙水压力为 31.1~33.4 kPa, 2, 4, 6 m 位置处超孔隙水压力均值为 32.2, 33.4, 34.6 kPa, 分别消散了 42.7%、44.5%、43.1%。

4.3 地基承载力检测

阳逻项目设计要求处理之后地基承载力特征值不小于 150 kPa, 载荷试验最大加载设置为 300 kPa, 载荷试验采用慢速维持荷载法, 承压板面积为 1.0 m, 分

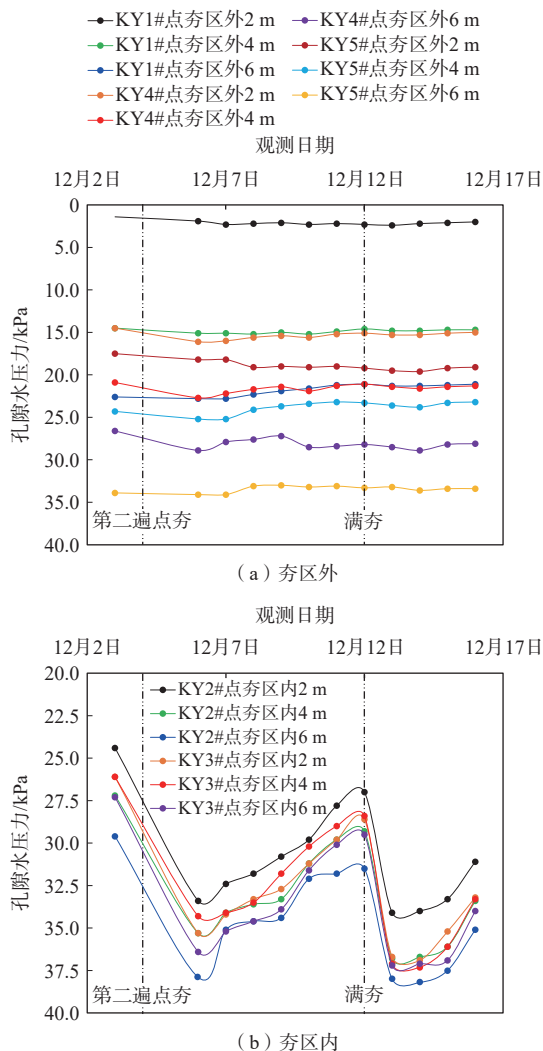


图 8 孔隙水压力随时间变化曲线图

Fig. 8 Changes of pore water pressure with time

60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 kPa 这 9 级加载。现场载荷试验如图 9 所示。CJ1、CJ2 和 CJ3 三处载荷试验的荷载(P)-沉降(S)曲线见图 10。三处加载得到的 P - S 曲线均为缓变光滑曲线, 不存在明显的比例极限; 加载到 300 kPa 时, 承压板周围土无明显的侧向挤出, 沉降分别为 21.11, 23.19, 29.53 mm, 均未超过承压板边长的 6%(60 mm)。

由图 11 可知, S - $\lg t$ (t 为加载时间) 曲线随着加载时间无明显的陡降趋势。地基处理之后地基极限承载力不小于 300 kPa, 复合地基承载力特征值不小于 150 kPa。基于以上监测结果, 可判定地基承载满足设计要求。

5 结论

(1) 在夯击的同时采用井点排水法能够降低地下



图9 现场载荷试验

Fig. 9 Field load test

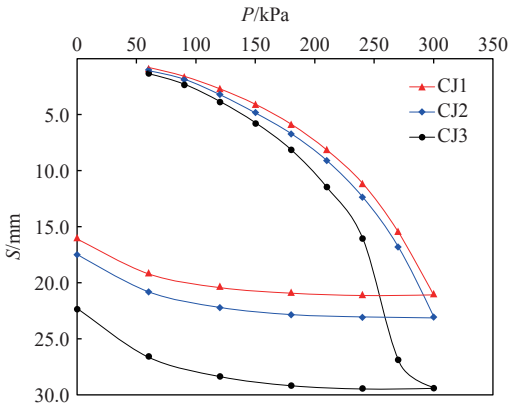


图10 平板载荷试验 $P-S$ 曲线 (承载板面积 1 m^2)

Fig. 10 $P-S$ curve of flat plate load test (Bearing plate area 1 m^2)

水位, 土体的含水率和饱和度相应降低, 因此土质地基在受到夯击之后, 地下水位以上的土体会产生较大的压缩和变形, 地下水位以下土体超孔隙水压力也会减小。

(2) 根据室内土工试验、标准贯入试验、静力触探

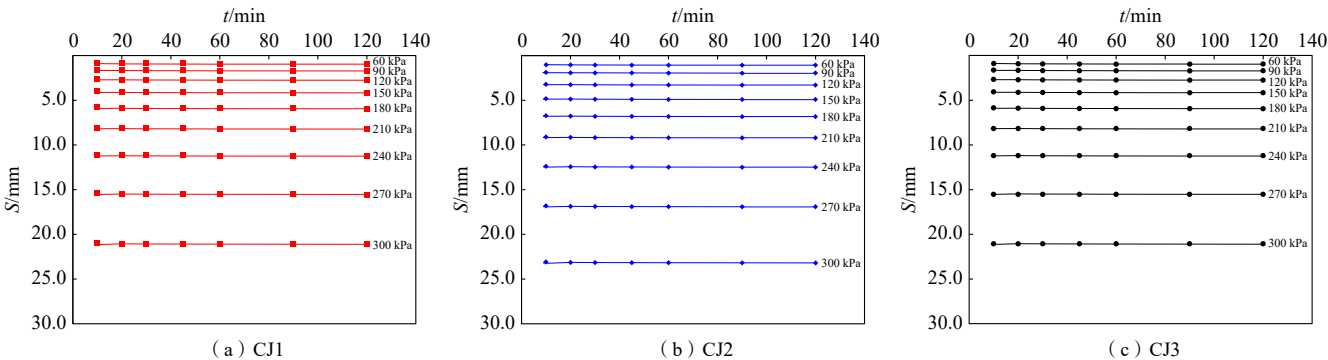


图11 CJ1—CJ3 的 $S-lgt$ 曲线

Fig. 11 $S-lgt$ curve of CJ1-CJ3

试验、十字板剪切试验结果, 证明降水强夯工艺能够实现大面积浅层“淤泥质粉质黏土”场地的快速处理, 有效提高地基承载力。

(3) 影响“降水+强夯”施工工期的主要因素为孔隙水压力的消散时间, 实际施工中可以通过长管和短管相结合、局部加长排水管等措施快速降低地下水位并减少施工成本。

(4) 试验区现场载荷板试验结果表明, 经降水强夯法施工处理后的软土地基, 表层软土承载能力有所提高, 表层地基承载满足设计要求, 复合地基承载力特征值不小于 150 kPa , 本试验区降水强夯法施工处理软土地基的有效处理深度达到 6.0 m 。

参考文献 (References) :

[1] 杨云玫. 深圳机场换填地基拦淤堤沉底技术研究 [J].

人民长江, 1990, (9): 24 - 29. [YANG Yunmei. Research on bottom-settling technology of subgrade filling embankment to stop silt in Shenzhen Airport [J]. Yangtze River, 1990, (9): 24 - 29. (in Chinese)]

[2] 么玉鹏, 姚坚毅, 唐世雄. 珠江口地区岩土层工程地质特征及物理力学性质研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 64 - 70. [YAO Yupeng, YAO Jianyi, TANG Shixiong. Study on engineering geological characteristics and physical and mechanical properties of rock and soil layers in the the Pearl River Estuary area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 64 - 70. (in Chinese with English abstract)]

[3] 加瑞, 赵栋, 雷华阳. 黏土结构性对孔压静力触探结果的影响分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 80 - 88. [JIA Rui, ZHAO Dong, LEI Huayang. Analysis of the influence of clay structure on the results of pore

- pressure static penetration test[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 80 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨爱武, 杨少朋, 杨少坤, 等. 冻融循环作用下城市污泥固化土动强度特性研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 30(4): 1044 – 1058. [YANG Aiwu, YANG Shaopeng, YANG Shaokun, et al. Dynamic performance of municipal sludge solidified soil under freeze thaw cycle[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 30(4): 1044 – 1058. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 金胜赫, 王修山, 吴越鹏. 矿渣-脱硫石膏-电石渣固化剂固化黏土的研究 [J]. *工程地质学报*, 2023, 31(2): 397 – 408. [JIN Shenghe, WANG Xiushan, WU Yuepeng. Study on modification of marine clay treated with new GDC soil stabilizer[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(2): 397 – 408. (in Chinese with English abstract)]
- [6] WANG Dongxing, YANG Duo, YUAN Yong. Strength improvement and micromechanism of inorganic/organic additive-modified magnesium oxychloride cement solidified sludge[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130 – 159.
- [7] ARULRAJAH A, ABDULLAH A, BO M W, et al. Ground improvement techniques for railway embankments[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2009, 162(1): 3 – 14.
- [8] 周灵刚, 胡奕挺, 陈欣蔚, 等. 基于神经网络的板墙组合式固化土地基承载力计算方法与优化设计 [J]. *地质科技通报*, 2024, 43(6): 102 – 113. [ZHOU Linggang, HU Yiting, CHEN Xinwei, et al. Calculation of capacity and optimization design-composite slab wall soil solidification foundation based on neural network[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(6): 102 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [9] CONSOLI N C, DA SILVA A B, FESTUGATO L. Parameters controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(6): 628 – 632.
- [10] ZUBER S Z S, KAMARUDIN H, ABDULLAH M, et al. Review on soil stabilization techniques[J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2013, 7(5): 258 – 265.
- [11] 陈锐, 郝若愚, 李笛, 等. 碱激发材料固化低液限粉黏土路用性能及抗冻融特性研究 [J]. *工程地质学报*, 2022, 30(2): 327 – 337. [CHEN Rui, HAO Ruoyu, LI Di, et al. Study on road performance and freeze thaw resistance of alkali activated material stabilized low liquid limit silty clay[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(2): 327 – 337. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李丽华, 韩琦培, 杨星, 等. 稻壳灰-水泥固化淤泥土力学特性及微观机理研究 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56(12): 166 – 176. [LI Lihua, HAN Qiwei, YANG Xing, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of RHA-cement solidified sludge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(12): 166 – 176. (in Chinese with English abstract)].
- [13] AIKEN T A, KWASNY J, RUSSELL M, et al. Effect of partial MgO replacement on the properties of magnesium oxychloride cement[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 134: 104791.
- [14] 牛鹏尧, 庄建琦, 贾珂程, 等. 聚丙烯酸钠混合剂固化黄土特性研究 [J]. *工程地质学报*, 2022, 30(4): 1028 – 1035. [NIU Pengyao, ZHUANG Jianqi, JIA Kecheng, et al. Study on properties of loess solidified by polyacrylate sodium[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(4): 1028 – 1035. (in Chinese with English abstract)]
- [15] Han J. Principles and practice of ground improvement[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [16] 姚宝宽, 刘聪, 李全军, 等. 真空井点降水, 挤密砂桩联合浅层强夯在软基处理中的应用 [J]. *地基处理*, 2021, 3(2): 118 – 125. [YAO Baokuan, LIU Cong, LI Quanjun, et al. Application of vacuum well point dewatering and sand compaction pile combined with dynamic compaction method in soft foundation treatment[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(2): 118 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 雷鸣, 王星华, 唐依民. 基于孔压实测资料的真空预压机理及沉降计算探讨 [J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(6): 81 – 85. [LEI Ming, WANG Xinghua, TANG Yimin. Discussion of the mechanism of vacuum preloading and settlement calculation based on measured values of pore water pressure[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(6): 81 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘景锦, 雷华阳, 卢海滨, 等. 真空预压法淤堵泥层形成机理及预测模型研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 61 – 71. [LIU Jingjin, LEI Huayang, LU Haibin, et al. A study of siltation mud formation mechanism and prediction model of vacuum preloading method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 61 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨爱武, 杨少朋, 齐杰杰. 吹填软土 UU 三轴剪切应力松弛特性试验研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10):

- 76 – 84. [YANG Aiwu, YANG Shaopeng, QI Jiejie. Experimental study on stress relaxation characteristics of soft dredger fill under UU triaxial shear[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 76 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 袁帅, 王君, 吴朝峰, 等. 虹吸排水法处理软土地基的水位与沉降计算模型 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 208 – 218. [YUAN Shuai, WANG Jun, WU Zhao Feng, et al. Calculation model for water level and settlement of soft foundation treated by siphon drainage[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 208 – 218. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李富春, 张璟泓, 周红星, 等. 粉粒及黏粒含量对强夯加固粉细砂土层效果的影响 [J]. 人民长江, 2022, 53(8): 186 – 191. [LI Fuchun, ZHANG Jinghong, ZHOU Hongxing, et al. Study on influence of silt particle and clay particle on dynamic compaction effect of silty fine sand[J]. Yangtze River, 2022, 53(8): 186 – 191. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘强, 高立群, 赵民, 等. 强夯置换对软土基坑边坡开挖稳定性的影响研究 [J]. 人民长江, 2024, 55(3): 226 – 233. [LIU Qiang, GAO Liqun, ZHAO Min, et al. Influence of dynamic compaction replacement on excavation stability of soft soil foundation pit[J]. Yangtze River, 2024, 55(3): 226 – 233. (in Chinese with English abstract)]
- [23] GHORBANI J, NAZEM M, CARTER J P. Dynamic compaction of clays: Numerical study based on the mechanics of unsaturated soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(10): 1943 – 5622.
- [24] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新 [J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1 – 16. [DONG Bingyin, SHUI Weihou, QIN Shaojie, et al. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 1 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 刘嘉, 罗彦, 张功新, 等. 井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11), 2222 – 2227. [LIU Jia, LUO Yan, ZHANG Gongxin, et al. Experimental research on saturated mucky foundation treatment with well-point dewatering combined with dynamic compaction method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2009, 28(11), 2222 – 2227. (in Chinese with English abstract)]
- [26] GHASSEMI A, PAK A, SHAHIR H. Numerical study of the coupled hydro-mechanical effects in dynamic compaction of saturated granular soils[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1/2): 10 – 24.
- [27] 孙文怀, 杨志刚, 杜小川. 增湿高能级强夯法处理湿陷性黄土地基的研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 74 – 78. [SUN Wenhui, YANG Zhigang, DU Xiaochuan. Research on the treatment of collapsible loess foundation using high-energy level dynamic compaction method with increased humidity[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 74 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 黄涛, 张西华, 曹江英, 等. 强夯法控制高填方变形的离心模型试验 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 121 – 125. [HUANG Tao, ZHANG Xihua, CAO Jiangying, et al. Centrifugal model test for controlling high fill deformation using dynamic compaction method[J]. Hydrogeological & Engineering Geology, 2007, 34(4): 121 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 周健, 曹宇, 贾敏才, 等. 强夯-降水联合加固饱和软粘土地基试验研究 [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 with English abstract)]
- [30] 张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 117 – 125. [ZHANG Junjian, LI Peng, YIN Kunyu, et al. An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 117 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 杜健, 刘红玫, 张豫川. 夯扩挤密法室内模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 81 – 86. [DU Jian, LIU Hongmei, ZHANG Yuchuan. 2016. Model tests on down hole deep compaction pile [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 43(5): 81 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [32] MAYNE P W, JONES JR J S, DUMAS J C. Ground response to dynamic compaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(6): 757 – 774.

编辑: 刘真真