

真空降水联合强夯置换软基处理 新技术与应用

祝思明¹, 伍翔飞¹, 曾华健¹, 嵇汉卿², 郑海波²

(1. 江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210018; 2. 深圳市苏勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要: 针对传统软基处理方法在仓储物流园、工业厂房等大面积深厚软基处理工程应用中存在工期、成本及环保等方面的局限性, 提出采用真空降水联合强夯置换软基处理技术, 即通过真空井点降低地下水位及减小土体含水率, 随后进行强夯置换施工, 其中降水与强夯置换交叉进行, 通过两遍强夯置换与三次降水, 最终达到软基处理目的。阐述了该技术工艺原理、工艺特点、工艺流程及施工工艺参数等; 随后以具体工程实例为背景, 详细介绍了该技术在具体工程中的应用情况, 并依据原位试验及工后沉降监测对处理效果进行了反馈验证。

关键词: 真空降水; 强夯置换; 软土地基; 沉降监测; 施工工艺

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0034-06

New technology and application of vacuum dewatering combined with dynamic compaction replacement for soft ground improvement

ZHU Si-ming¹, WU Xiang-fei¹, ZENG Hua-jian¹, JI Han-qing², ZHENG Hai-bo²

(1. Jiangsu Geotechnical Engineering Company, Nanjing 210018, Jiangsu, China;

2. Shenzhen Sukan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518100, Guangdong, China)

Abstract: In light of the limitations encountered with conventional methods for treating soft foundations, specifically pertaining to construction duration, costs, and environmental considerations when applied in extensive and deep soft foundation treatment projects like warehousing and logistics parks and industrial plants, the technology of soft foundation treatment by combining vacuum dewatering with dynamic compaction replacement was introduced in this paper. This innovative approach involves the sequential reduction of underground water levels and soil moisture content through vacuum dewatering, followed by the implementation of dynamic compaction replacement construction. The dewatering and dynamic compaction replacement procedures are executed alternately, culminating in a comprehensive soft foundation treatment achieved through two cycles of dynamic compaction replacement and three rounds of dewatering. The principles, characteristics, procedural flow, and construction process parameters of this technology are expounded upon. Subsequently, leveraging a specific project as a case study backdrop, we provide an exhaustive account of the practical application of this technology and validate its treatment efficacy through in-situ testing and post-construction settlement monitoring.

Key words: vacuum dewatering; dynamic compaction replacement; soft soil foundation; settlement monitoring; construction technology

0 引言

当前, 随着大型产业园区、仓储物流园及工业厂房类基础设施建设需求增大, 特别是东南沿海地区, 受土地供应限制, 一些产业园不得不建设在软

土地基上, 这类软土以高含水率的淤泥、淤泥质土、填土及饱和软黏土为主, 且兼具压缩性高、承载力低等特点, 在不经处理或处理不到位情况下, 难以满足项目建设对地基承载力和工后沉降的要求, 且极易引起岩土工程灾害及事故的发生, 故需要采取

特定的地基加固处理方式对软土地基进行处理, 使其满足设计承载力及工后不均匀沉降的控制要求^[1-3]。

为解决软土地基承载力不足及工后沉降变形过大的问题, 传统的软基处理方式主要包括强夯(置换)法、刚性桩(预制桩、CFG 桩)及半刚性桩(搅拌桩、旋喷桩)复合地基、挖土换填、真空(堆载)预压等方法或上述方法的组合等地基处理加固方法, 以上地基处理方法虽已广泛使用, 并能够达到预加固目的, 但在具体施工及后期使用过程中, 仍然存在造价成本、工期、环保及处理效果与适用性上的缺陷或局限性^[4-6]。

针对软土高含水率、高压缩性等特征, 提出真空降水联合强夯置换地基处理新技术, 以解决软基沉降、承载力不足以及工后不均匀沉降等问题。本文阐述了该新技术的工艺原理与特点、施工工艺流程及操作要点, 并结合工程实例对该技术的应用效果进行了评价, 可为类似软基处理工程提供借鉴^[7-8]。

1 工艺原理与特点

首先从施工工艺原理、适用范围、工艺流程及操作要点等方面对真空降水联合强夯置换软基处理技术进行详细阐述。

1.1 工艺原理

真空降水联合强夯置换软基处理原理是基于真空井点等方法对如饱和软黏土、淤泥质土及高水位填土等高含水率软土地基进行预降水, 降低地下水的同时减小土体含水量及饱和度等, 并使软土产生一定的固结, 增加密实度, 为后续强夯置换提供施工环境, 通过按特定间距间隔布点进行强夯, 软土地层在强夯能冲击传递、置换料挤密作用下, 产生超孔隙水压力, 并向周边扩散至降水井点范围, 在此过程中, 土体密实度和强度逐渐增长, 同时产生压缩与动力固结。随后以抽真空方法将井点周边的自由水排出, 加快超孔隙水压力的消散, 降水与强夯交叉进行, 重复以上步骤多遍, 并在最后一遍强夯置换施工完毕后, 再进行一次降水, 最后拆除降水设备, 进行全场满夯。

真空降水联合强夯置换法是一种软基处理的新技术、新工艺。置换实施前, 先进行降水井施工, 再真空降水, 降低需处理的场地地下水位, 确保强夯过程中不易发生陷锤及形成“橡皮土”等问题, 然后通过柱锤夯击, 再进行二次降水, 重复多遍,

最后满夯加固表层, 通过强夯置换对软土进行置换与挤密, 置换形成的碎石散体墩也可作为竖向排水通道, 加快超孔隙水压力的消散, 缩短软基固结时间, 提高软土的物理力学指标, 改善排水通道, 提高地基承载力, 减少处理场地工后沉降。

1.2 工艺特点

(1) 造价低、节材环保

采用传统刚(柔)性桩的软基加固方法需使用钢筋、混凝土、水泥等建筑材料, 造价成本相对较高。与传统工法相比, 该工艺无需采用水泥、钢筋混凝土等材料, 仅需采用碎石、混凝土块及砖渣等建筑废料, 不产生建筑垃圾, 因此造价相对较低, 对环境影响小。

(2) 处理工期短

在兼顾造价成本及处理效果上, 传统方法需采用大量的混凝土桩对软基进行加固处理, 处理周期长, 影响后续工期。该工艺通过降水与强夯置换联合交替进行, 一方面通过对软土地基进行预降水处理, 为强夯置换提供施工环境, 同时使软土预先得部分固结、提高承载力; 另一方面通过置换墩柱作为软土地基中的竖向排水通道, 加速软基固结, 缩短工期。

(3) 处理效果好

通过降水与强夯置换的联合, 有效改善了强夯置换法在高含水率软土地基中的适用性, 并进一步通过强夯置换与降水的穿插结合, 实现对软基的置换、挤密及加速固结目的, 有效提高地基承载力及减小工后沉降。

1.3 适用范围

真空降水联合强夯置换法适用于大面积软土地基, 尤其适用于各种物流仓库、工业厂房、产业园等项目上具高含水率、高地下水位的填土、淤泥、淤泥质土及饱和软黏土等尚未自重固结的高压缩性地基土的处理。

对于此类软土地基, 采用降水联合强夯置换施工工艺的适用范围主要集中在:

(1) 适用于各种表层土为软土的地基, 包括高含水率、高地下水位的近填土及淤泥质土地基。

(2) 软土层厚度不大于 8 m 均可适用。

2 施工技术

2.1 工艺流程

真空降水联合强夯置换软基处理新工艺的操作流程如图 1 所示:

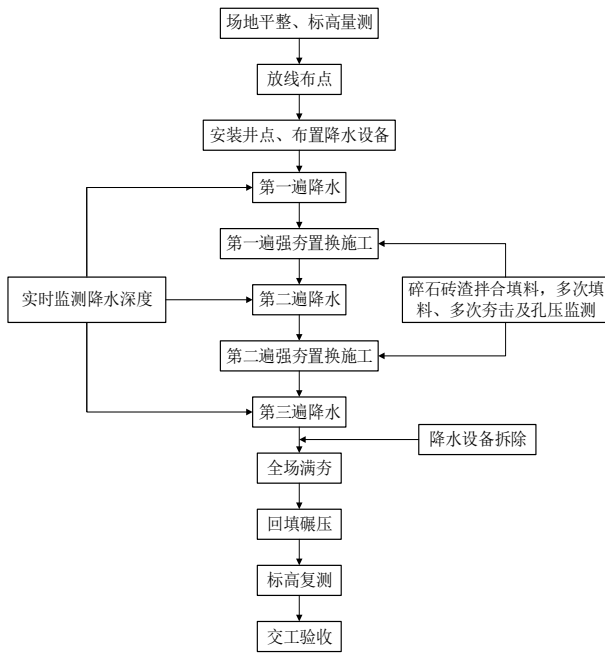


图1 施工工艺流程图

Fig. 1 Construction process flowchart

2.2 工艺操作要点

(1) 场地平整与标高测量

首先,对场地进行清表,清除障碍物、杂草、树木等;然后进行土方平整,开挖排水沟、防震沟等;再对平整后的场地进行标高测量。

(2) 试夯

真空降水联合强夯置换软基施工之前,需先进行试夯施工。在处理区域各选取一块面积不小于 400 m^2 的试夯区,先按设计给定的击数、填料量进行试打,通过多次试打,及时调整施工参数,并绘制夯沉量关系曲线,综合分析后,确定合理击数、布点间距、强夯收锤标准,并给出强夯施工作业面标高,以及回填碎石料的数量等。

(3) 设置降水井

按场地放样点位布置井点,3~5 m等间距正方形布置,深度4~10 m,外露0.5 m接集水管,桩端需穿过软土层不小于1 m,孔壁与管壁之间填细石料。降水井布置完毕后,进行试降水,检验无误后,开始第一遍降水施工,降水过程中实时监测软土层水位及孔压变化。

(4) 强夯置换施工

按设计点位进行第一遍强夯置换施工,夯锤采用置换柱锤,直径1 200~1 500 mm,夯击能量为2 000~4 000 kN·m,填料采用碎石、混凝土块及砖渣,随后进行第二遍井点降水及第二遍强夯置换,置换过程中分层填碎石料或废弃砖渣。

(5)依次按(3)、(4)进行第二遍降水、第二遍强夯置换施工及第三遍降水施工。

(6) 满夯

置换施工结束后,拆除降水设备,再次场地平整,必要时可先行振动碾压一次。然后采用强夯平锤进行满夯1遍,夯锤底面直径2.5~3.0 m,单点击数2击,强夯能量为1 000~1 500 kN·m,锤印搭接不小于1/4。

(7) 回填碾压

采用22 t振动压路机碾压压实,至少3~5遍;最后分层回填碾压至交工面。

3 工程应用

3.1 项目简述

某大面积物流仓储产业园项目位于湖州市德清县乾元镇,场地东侧及南侧为虹桥路,西侧为规划九曲路,北侧为宝山路,道路外为在建晋熙物流园,南侧道路外是现状物流园。该场地属于长三角入海口冲积平原区域。项目规划用地 $84\,298\text{ m}^2$,包括3栋库房、1栋宿舍楼及相关配电间与门卫共6个单体建筑组成。1、2、3号物流仓库为框架结构,宿舍楼地上5层,地下1层。该场地原始地貌有河涌、池塘等,下部有厚度不均的软土,场地存在地基承载力不足、沉降严重不均、沉降量较大等不利问题,会影响物流仓库和道路正常使用,需要对场地进行处理。

3.2 地质条件

根据详勘资料,该场地普遍存在以下地层:

①填土,松散,含水量大,成分以近期回填的黏性土为主。

②粉质黏土,塑-软可塑,以软塑为主,属中偏高压缩性土。

③淤泥质粉质黏土,层厚0.80~12.0 m,厚度不均,呈流塑、局部渐变淤泥,含少量腐殖质、有机质,属于高压压缩性土。

④粉质黏土,硬可塑为主。局部硬塑,软可塑,属中压缩性土,层厚2.10~20.00 m。

⑤₁全风化凝灰岩,力学强度及状态均相对较好,抗变形能力稍高,标准贯入试验(N)实击数为16~26击/30 cm,层厚为0.50~11.40 m。

勘察期间测得混合静止水位埋深在0.7~1.2 m,平均静止水位埋深0.95 m。

土层物理力学参数如表1所示。

表 1 土层物理力学参数表
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	承载力特征值 f_{ak}/kPa
①填土	17.0	—	—	3.0	60
②粉质黏土	17.9	9.4	32.2	4.8	80
③淤泥质粉质黏土	16.6	6.4	7.9	2.2	60
④ ₁ 粉质黏土	18.6	6.7	17.1	6.3	180
④ ₂ 粉质黏土	18.1	6.7	17.1	4.9	100
⑤ ₁ 全风化凝灰岩	19.0	25.0	28.0	12.0	310

3.3 地基处理设计要求

工程要求的地基处理技术参数为:

(1) 库房区域处理后 $f_{spk} \geq 80 \text{ kPa}$, $E_0 \geq 7 \text{ MPa}$; 地面消防车道、货车通道及后期需要停车的绿化部位处理后 $f_{spk} \geq 100 \text{ kPa}$, $E_0 \geq 10 \text{ MPa}$ 。

(2) 解决填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土的沉降变形问题, 工后沉降要求控制在 50 mm, 并根据规范^[9] 规定, 沉降差控制在 3/1 000 内。

3.4 软基处理方案

根据场地周边环境、软土情况、项目特点以及仓库地坪使用功能要求, 场地软土地基在降水基础上, 结合多种处理方法, 如普夯、强夯置换、孔内强夯及 CFG 桩网复合地基处理。其中强夯置换需保证置换碎石墩体穿透淤泥质黏土层进入底部硬土层, 以保证处理效果, 根据设计标高要求, 库内地坪标高需比库外高 1.3 m, 库区处理后进行分层回填振动碾压处理。

地基处理共划分为 4 个区域, 处理面积约 80 218.2 m², 其中, 1 号库房中部、2 号库房东侧、中间装卸平台北侧及局部库外道路区域采用真空降水+强夯置换+满夯工艺, 总计处理面积达 32 403.8 m², 分区处理布置如图 2 所示。

3.5 施工工艺参数

根据场地地层情况、周边施工环境以及库区内使用功能划分强夯置换区。置换夯点与降水布置如图 3 所示:

降水设计: 在场地上布置真空井点降水井, 间距为 4 m×4 m, 深度为 4~8 m, 将水位控制在淤泥质粉质黏土层底。

置换设计: 2 遍强夯置换与 1 遍满夯。

(1) 考虑平整标高及回填土情况, 置换施工标高为 2.6~2.8 m。

(2) 第 1 遍强夯置换: 软土厚度 2~7 m, 处理深度 4~8 m, 夯点间距为 4 m×4 m, 正方形布置, 夯击能 2 200~3 000 kN·m, 每个置换点 10~12 击。置换洞分批填入碎石料(可以用碎石、块石、混

凝土块比土为 7:3), 石料直径 100~500 mm。采用直径 1 200~1 400 mm 平底锤, 夯后为直径 1 600 mm 以上的碎石桩体或墩体。

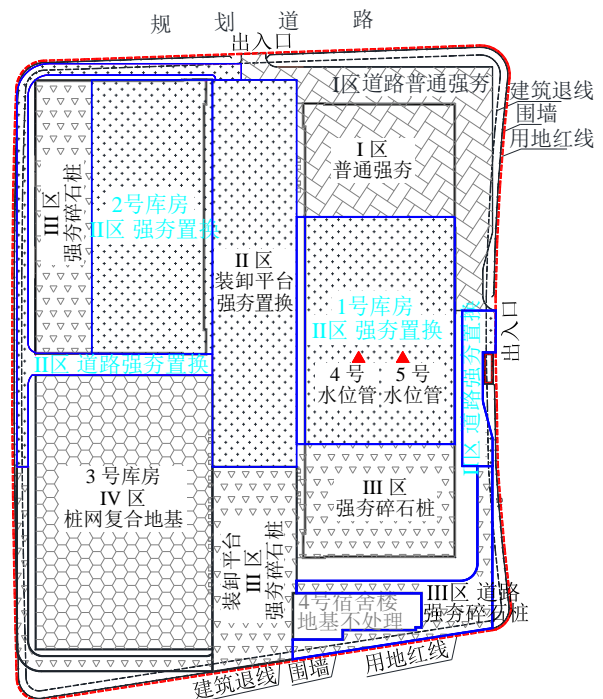


图 2 分区处理布置图

Fig. 2 Layout of treatment division

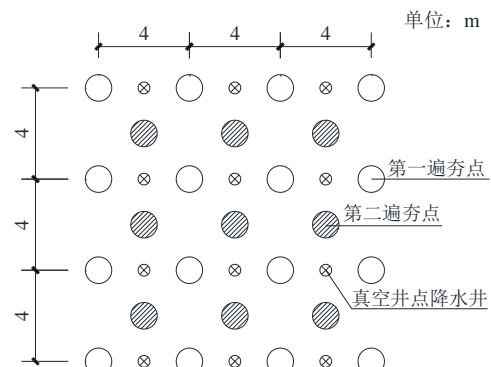


图 3 置换夯点与降水布置图

Fig. 3 Layout of replacement tamp spots and precipitation

(3) 第 2 遍强夯置换: 置换夯点在第 1 遍点之间插入, 间距一样, 每个置换点 8~10 击, 夯击能 2 400~3 000 kN·m。

(4) 满夯与碾压: 第 2 遍施工后进行满夯, 夯锤直径 2.5~3.0 m, 夯击能 1 000~1 500 kN·m, 每点 2 击, 相互搭接 1/4。分层回填碾压到交工面, 每层 300~500 mm。

采用 3 遍真空降水和 2 遍强夯置换, 真空降水与强夯置换施工交叉进行。需要注意的是, 实际施工过程中, 由于井点管布置在夯点之间, 在第 1、2 遍强夯置换过程中, 由于夯击过程中对土体的侧向挤压作用, 轻型井点存在部分损坏, 故在第 1、2 遍置换间隙期间, 需及时对损坏的井点管进行替换, 在 2 遍强夯置换结束后, 拆除降水井、排水管等设备。

4 效果分析

4.1 水位与孔压监测分析

依据设计方案进行施工, 为分析评价地基处理效果, 分别在施工期间、施工后及使用后开展了场地孔压与水位变化监测、原位载荷试验及工后沉降观测。

在强夯置换施工区地表下 2 m、4 m 处埋设孔压计, 并选取 2 处不同位置埋设水位管 (水位管位置如图 2 所示), 监测夯击过程中土体水位与超孔隙水压力变化如图 4 所示。

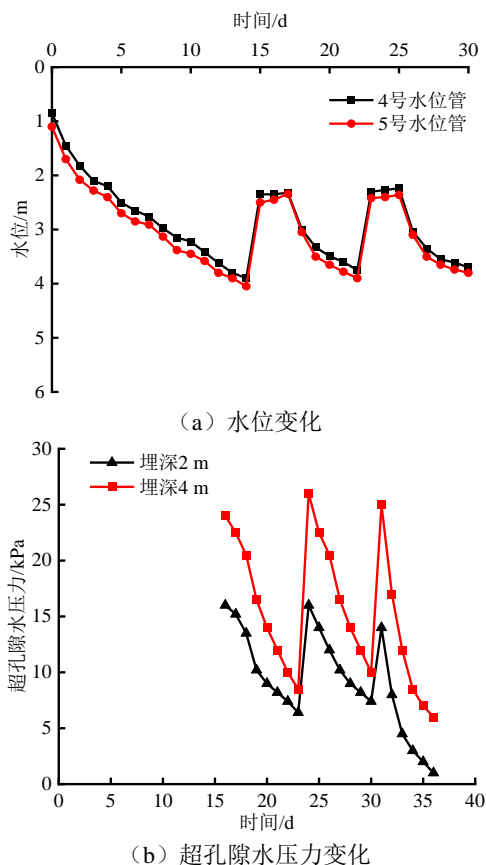


图 4 夯击过程中土体水位与超孔隙水压力变化

Fig. 4 Variation of water level and excess pore water pressure during compaction

由图 4 可知, 地基土在动力夯击过程中将引起超孔隙水压力的迅速增加, 超孔隙水压力的增加与消散的变化曲线反映了强夯置换软基处理的有效深度和处理效果的程度。通过超孔隙水压力的消散情况, 可以得出 2 遍强夯置换的最佳时间间隔, 避免因超孔隙水压力未完全消散影响强夯处理效果, 甚至形成“弹簧土”。从图 4 (b) 可以看出, 由夯击导致超孔压的迅速上升, 而在夯击后的四五天内, 超孔压消散 80% 以上, 降水可以有效地加快超孔隙水压力的消散和降低地下水位, 此外在碎石墩体形成的竖向排水通道作用下, 会进一步加快挤密后桩间土的超孔压消散, 加快土体夯后固结, 反映出了真空降水联合强夯置换施工工艺的可行性和有效性。

4.2 复合地基检测分析

施工完毕交工前对处理地基开展原位平板载荷试验, 检测复合地基承载力, 通过现场载荷试验记录及数据统计反馈结果, 载荷试验沉降曲线比较平稳, 地面未见异常变化, 地层未出现剪切破坏。按照规范要求^[10], 取 s/b 等于 0.01 时对应的压力, 且其值不大于最大加载压力的一半作为地基承载力特征值, 本批次载荷试验地基承载力特征值均不小于 80 kPa, 仓库内不小于 100 kPa, 沉降变形也较小, 满足设计要求。

4.3 沉降监测分析

该工程对 2 号库共进行了 25 次监测, 总持续监测时间约 3.5 年, 场地地基处理竣工后开展上部主体结构施工, 施工期及运营期间对应 2 号库区地坪进行工后沉降监测, 共设置 20 个监测点, 取其中强夯置换区 10 个监测点的监测结果, 绘制 2 号库区地坪沉降曲线如图 5 所示。

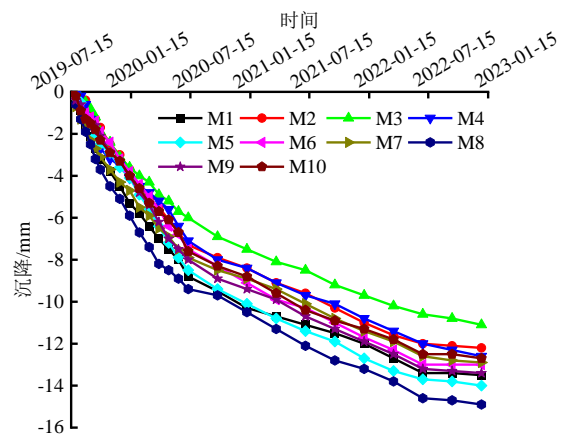


图 5 2 号库区地坪沉降曲线

Fig. 5 Ground settlement curves of No. 2 reservoir area

从沉降监测图可以看出, 地坪沉降量随使用时间逐渐增大, 截至目前为止, 地坪沉降量在 12~18 mm,

平均沉降量约 15 mm。主体二层结构施工时,施工荷载产生的地坪沉降约 5 mm,仓库验收移交使用后,地坪沉降平均约 10 mm。从上述沉降曲线变化来看,近期变化趋缓,沉降有进一步减小趋势,呈收敛。在使用荷载不增加的情况下,后期地坪沉降量越来越小,甚至稳定、不变化;仓库地坪平整度满足仓库使用要求;此外现场观测结果显示,仓库运营使用至今,基础与地坪沉降差异较小,墙边与柱脚均未发现明显裂缝与脱开现象,地基处理效果良好。

5 结 论

(1) 针对高含水率软土地基,采用真空降水可以有效地加快超孔隙水压力的消散和降低地下水位,结合强夯置换碎石墩体所形成的竖向排水通道,进一步加快挤密后桩间土的超孔压消散,加快土体夯后固结,表明真空降水联合强夯置换软基处理施工技术的可行性和有效性。

(2) 真空降水联合强夯置换软基处理技术可充分利用强夯置换与真空降水的优点,对高含水率的填土、黏土等软土地基均具有很好的加固效果,复合地基检测及沉降监测结果表明,处理效果达到了设计使用要求。该方法在保证工程质量和工期的前提下具有较好的经济性,可在今后类似工程的地基加固中借鉴使用。

参考文献

- [1] 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. Handbook of Foundation Treatment[M]. Third Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [2] 苏文生. 淤泥质软土地基处理的相关问题[J]. 土工基础, 2013, 27(6): 78-80.
SU Wen-sheng. Review of the soil improvement methods for peaty soft soils[J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(6): 78-80.
- [3] 乔胜利, 刘博学, 石晨俊, 等. 强夯及强夯置换在软土地基中的联合应用浅析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1629-1633.
QIAO Sheng-li, LIU Bo-xue, SHI Chen-jun, et al. Brief analysis on joint application of dynamic compaction and dynamic compaction replacement in soil foundation[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1629-1633.
- [4] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.
LIU Song-yu, ZHOU Jian, ZHANG Ding-wen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.
- [5] 穆永亮, 沈云如, 姜建伟. 某机场跑道真空联合堆载预压法地基处理试验研究[J]. 地基处理, 2021, 3(5): 382-387.
MU Yong-liang, SHEN Yun-ru, JIANG Jian-wei. Experimental study on foundation treatment by vacuum and surcharge preloading method for runway of an airport[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(5): 382-387.
- [6] 高建中, 黄玮, 梁永辉, 等. 强夯置换法在高填方工程淤积土处理中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊 1): 329-334.
GAO Jian-zhong, HUANG Wei, LIANG Yong-hui, et al. Dynamic replacement method applied on the alluvial soils treatment of high fill field-leveling project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 329-334.
- [7] 曾华健, 李军, 梅军, 等. 真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 64-70.
ZENG Hua-jian, LI Jun, MEI Jun, et al. Application of vacuum dewatering combined with different dynamic compaction process in soft soil foundation treatment storage[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 64-70.
- [8] 段军. 高真空井点降水联合强夯法在吹填土软基处理中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2017(10): 118-122.
DUAN Jun. Application of high vacuum well point dewatering combined with dynamic compaction method for treating soft foundation of dredger fill[J]. Railway Construction Technology, 2017(10): 118-122.
- [9] 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