

DOI: 10.11779/CJGE2016S1026

# 真空预压在有轨电车软土地基中的应用及数值模拟研究

庄 妍<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 崔晓艳<sup>\*2</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 近年来真空预压法在软土地基处理中得到广泛应用, 基于南京某有轨电车软土地基真空预压处理工程实例进行数值模拟研究。对比加固区沉降、孔压结果可以看出: 数值模拟结果偏大于现场监测结果, 误差约为 2.4%~32.5%, 验证了数值模型的正确性。通过变化塑料排水板的通水能力、间距、打设深度影响因素, 可以看出: 塑料排水板打设深度对软土表面的沉降影响较大。通过沉降和孔隙水压力估算软土的固结度分别为 93.4% 和 88.3%, 说明了真空预压法对该软土地基的加固效果明显。

**关键词:** 真空预压; 塑料排水板; 固结度

中图分类号: TU471.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0141-06

**作者简介:** 庄 妍(1982-), 女, 江苏邳州人, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基加固等方面的教学和科研工作。  
E-mail: joanna\_zhuang@163.com.

## Application of vacuum preloading with vertical drains in soft soil foundation of rapid-transit tram and numerical simulation

ZHUANG Yan<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>, CUI Xiao-yan<sup>2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Dept. of College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Dept. of College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Due to the requirements for the rate of settlement and the increase in the undrained shear strength upon consolidation, the vacuum preloading with vertical drains has been widely used to reinforce soft ground. A field case study improved by the vacuum preloading with vertical drains in Nanjing, China is introduced. A numerical model is established based on the field case. The measurements including vertical settlement at the surface of subsoil, multi-level settlement at the centerline of the subsoil and pore water pressure at different depths are presented and compared with the numerical results. The numerical results overestimate the measurements in the field with the differences in the range of 2.4%~32.5%, which validates the accuracy of the numerical model. By conducting the comparison analysis of parameters including length, permeability coefficient and spacing of prefabricated vertical drains (PVDs), it is found that the length of PVDs is the most influential factor for the maximum surface settlement of soft soils. The degree of consolidation at the final stage of vacuum preloading is 93.4% assessed based on the settlement, and is 88.3% estimated according to the pore water pressure. It is demonstrated that the vacuum preloading with vertical drains is an effective method to reinforce soft soils.

**Key words:** vacuum preloading; prefabricated vertical drains; degree of consolidation

## 0 引言

中国东南沿海和内陆广泛分布着海相、湖相以及河相沉积的软弱却性土层。这种土的特点是含水率大, 压缩性高, 强度低, 透水性差且埋藏深厚<sup>[1]</sup>。

真空预压是指在需要加固的软土地基上布置排水板、砂垫层和密封膜, 通过抽真空使膜内外形成压力差, 由于砂垫层和竖向排水板与地基土界面存在这一压力差, 土中的孔隙水向排水板不断渗流, 使孔隙水压力不断降低, 有效应力不断提高, 从而使土体逐渐固结<sup>[2]</sup>。塑料排水板是由土工合成材料组成, 塑料排

水板的使用减小了排水路径, 因而减少了固结时间。塑料排水板结合真空预压方法用来消散真空压力和孔隙水压力已经得到了广泛的研究<sup>[3-7]</sup>。

本文将基于以上研究成果, 运用有限元分析软件 ABAQUS 建立真空预压加固有轨电车软土地基数值

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51478166); 教育部留学回国人员科研启动基金项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2015B06014, 2015B17814)

收稿日期: 2015-11-30

\*通讯作者

模型, 分析地基软土中心处沉降、孔隙水压力随深度的变化规律, 并与现场监测结果进行对比分析, 从而验证数值模型的正确性。通过改变排水板的通水能力、排水板的打设深度以及排水板的间距等参数, 进行真空预压加固效果分析。

## 1 工程简介

### 1.1 工程概况

该工程位于南京市河西新城江东南路, 地基处理方案为真空预压+筏板基础为主, 总面积为  $17 \times 104 \text{ m}^2$ 。江东南路西起红河路, 东至江山大街, 为城市主干道, 标准段宽 80 m, 道路两侧各有 20 m 绿化保护带, 道路总长约 4 km。拟建有轨电车位于江东南路中央绿化带内, 全长 7.76 km, 共设置 13 个车站和 1 个地下车辆段。有轨列车行车速度为 70 km/h, 车载储能装置供电, 车辆停靠车站时可瞬间充电。

### 1.2 工程地质条件

拟建道路场地属长江漫滩地貌单元, 沿线穿越一些村镇和农田, 场地地形平坦, 场地内河沟、水塘较多。本工程全线不良地质发育为软土, 全线均布, 稍有光泽, 干强度中等偏低, 韧性低, 无摇震反应, 属中等灵敏度软土。各土层分布如图 1 所示。

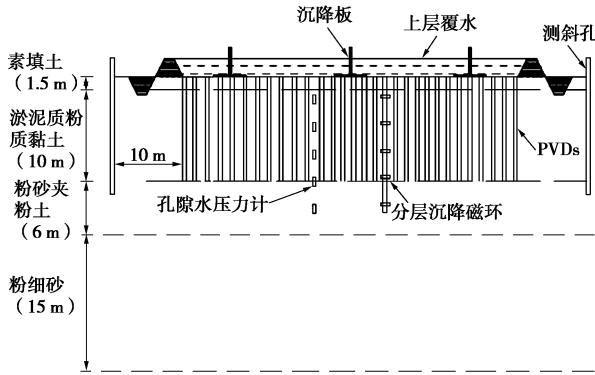


图 1 试验段土层分布横断面图

Fig. 1 Cross section of field case

### 1.3 排水体的选择及布置

塑料排水板作为新型排水材料因性能好、质量可靠、施工方便、工效高、工程费用低等优点已逐渐取代砂井, 并得到广泛应用。本工程中, 塑料排水板为 SPB-B 黏合型塑料排水带, 规格:  $100 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 正三角形布置 (如图 2 所示), 排水板间距为  $1.2 \sim 1.5 \text{ m}$ 。排水板采用高压聚丙烯新料, 纵向通水量大于  $25 \text{ cm}^3/\text{s}$ , 复合体抗拉强度为  $0.13 \text{ kN/cm}$ 。为了加快软土的排水固结, 使用了横向排水体系, 如图 3 所示。

## 2 数值模拟与影响因素分析

### 2.1 模型介绍

基于以上工程实例, 利用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟分析。以软土的中心为对称轴, 取整个地基的一半建立有限元模型: 地基的计算宽度为 80 m, 加固区为 40 m, 影响区为 40 m, 计算深度取 30 m (如图 4 所示)。软土采用莫尔-库仑模型模拟, 各土层参数如表 1 所示。塑料排水板塑料排水板渗透系数为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , 排水板打设深度 11.5 m, 塑料排水板间距  $1.2 \sim 1.5 \text{ m}$ 。数值模型的建立需要将实际的三维排水板模型转化为平面应变有限元分析砂墙地基固结进行模拟, 将排水板进行等效转换。Hansbo<sup>[8]</sup>提出了塑料排水板转化为等效砂井的直径公式:

$$d_w = \alpha \frac{2(b + \delta)}{\pi}, \quad (1)$$

式中,  $d_w$  为塑料排水板等效为砂井的直径,  $\alpha$  为换算系数, 常取值为 1,  $b$ ,  $\delta$  分别为塑料排水板的宽度与厚度。除渗透系数外, 砂井井料的物理力学参数与其所在土层参数相同<sup>[9]</sup>。砂井地基转化为砂墙地基, 实际上就是将空间问题简化为平面问题。参考文献[10, 11], 在计算时把砂井直接等效为砂墙。

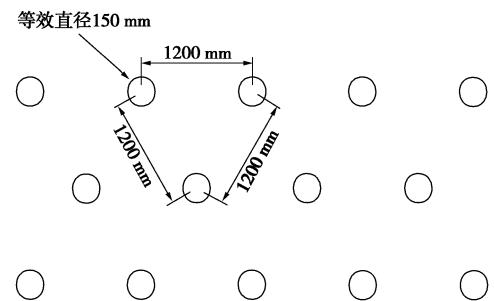


图 2 塑料排水板平面布置图

Fig. 2 Layout of prefabricated vertical drains



图 3 横向排水体系

Fig. 3 Horizontal drainage system

数值模型的边界条件为: 对模型左右两边约束  $x$  方向的位移, 模型底边约束  $x$ ,  $y$  方向位移, 模型顶面为自由边界; 模型左右两侧和底边均为不透水边界, 上部边界为透水边界; 软土表面上部堆载有 2 m 上层覆水。详细如图 4 所示。

表 1 各土层参数表

Table 1 Material parameters used in field case of Jiangdong Road

土层	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$E_0$ /MPa	$\nu$	$k_h$ /(cm·s <sup>-1</sup> )	$k_v$ /(cm·s <sup>-1</sup> )	$c$ /kPa	$\phi$ (°)	$e_0$
素填土	18.8	3.89	0.3	$8.51 \times 10^{-7}$	$7.98 \times 10^{-7}$	16	17.1	0.858
淤泥质粉质粘土	17.5	3.59	0.3	$1.05 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-6}$	12	19.8	1.173
粉砂夹粉土	18.8	10.91	0.3	$3.70 \times 10^{-4}$	$2.03 \times 10^{-4}$	28	10.0	0.776
粉细砂	19.0	12.42	0.3	$4.32 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-4}$	8	32.3	0.726

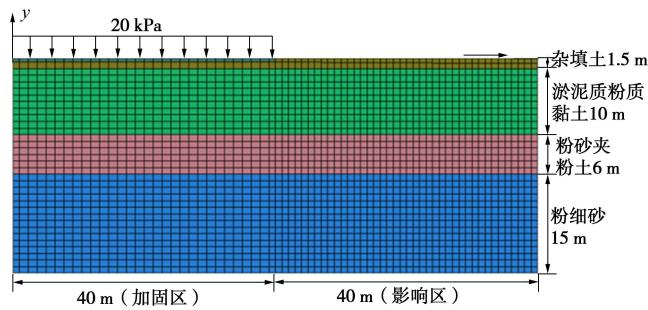


图 4 有限元模型

Fig. 4 Two-dimensional finite element model

## 2.2 模型验证

通过将软土中心处表层沉降、分层沉降、孔隙水压力数值模拟计算值与现场监测值进行对此分析, 验证数值模型的正确性。从而进一步分析塑料排水板的尺寸、布置方式等对真空预压加固效果的影响。

### (1) 软土表面中心处沉降

图 5 为软土表面中心处沉降随真空预压加载时间变化图。可以看出, 数值模拟结果与现场检测结果的变化趋势相似: 软土中心处沉降速率在真空加载 0~40 d 时较大, 而后逐渐减小。数值模拟结果偏大于实测值, 最大误差约为 15.1%, 说明该数值模型能较好地评估软土表面中心处的沉降。

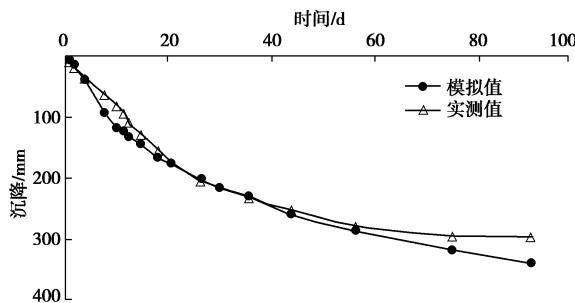


图 5 软土表面中心处沉降

Fig. 5 Settlement at surface of subsoil

### (2) 软土中心分层沉降

图 6 为软土表面中心处分层沉降在不同深度处的分布规律。数值模拟结果与现场检测结果的变化趋势相同: 分层沉降随着深度的增加逐渐减小; 在塑料排水板的长度范围内 (软土表面至 11.5 m), 每下降 1.0

m, 分层沉降减小约 24.3 mm; 但是在排水板以下 (11.5~13.0 m), 分层沉降变化不大。数值模拟结果偏大于现场监测值, 误差为 8.9%~29.6%。

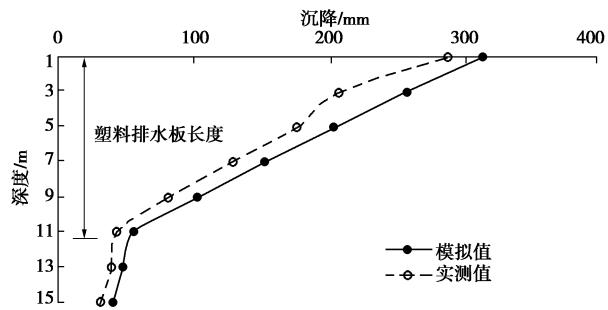


图 6 软土表面中心处分层沉降

Fig. 6 Distribution of settlement at centerline of subsoil along depth

### (3) 孔隙水压力

图 7 为加固区不同深度的孔隙水压力变化曲线图, 从图中可以看出随着深度的增加, 孔隙水压力变化值逐渐减小, 孔压传递效率逐渐降低。数值模拟结果与现场实测值在初期吻合较好, 但到了中后期现场实测值变化幅度较小, 而数值模拟值仍在下降。这主要由于在现场抽真空后期, 排水板的堵塞导致真空负压传递效率降低。因而, 数值模拟结果与现场实测值的误差会随着真空预压加载时间而增大。从软土表面至 9 m 深度处, 数值模拟结果与现场监测值的误差约为 2.4%~20.2%; 12~15 m 深度范围内, 误差约为 5.8%~32.5%。从图 7 中还可看出在加载前期 20 d 孔压有增长趋势并出现正值, 主要是由于真空预压前期有 2 m 高上层覆水压力施加所导致。

通过将软土中心处沉降、孔隙水压力的数值模拟结果与现场监测结果对比分析可知, 两者误差为 2.4%~32.5%, 验证了数值模型的正确性。

## 2.3 影响因素分析

影响真空预压加固效果的因素较多, 如膜下真空度、排水板的通水能力、排水板的打设深度、排水板的间距、加固区土体的渗透系数以及井阻影响等。本文着重考虑塑料排水板的通水能力、打设深度以及间距对软土地基加固效果的影响。

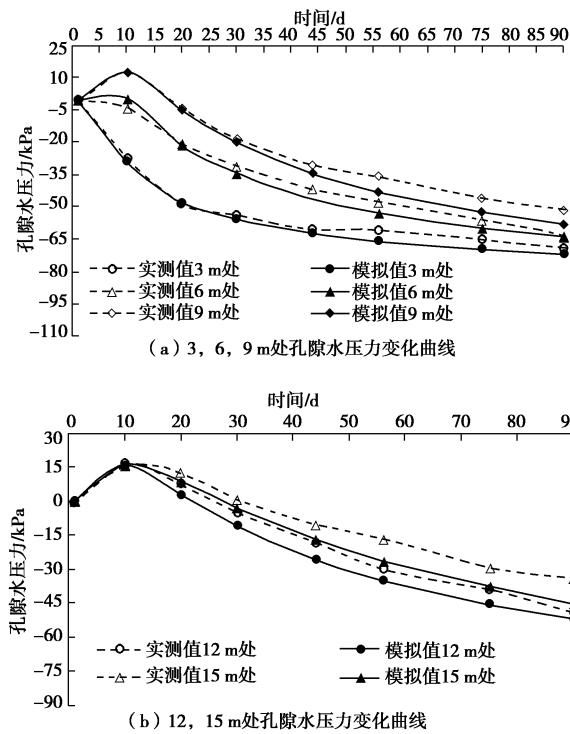


图 7 孔隙水压力随真空预压加载时间变化图

Fig. 7 Variation of pore water pressure with duration of vacuum preloading

### (1) 塑料排水板通水能力

塑料排水板的渗透系数影响排水板的通水能力, 图 8 为排水板的渗透系数  $k$  对软土表面沉降的影响。软土表面加固区与影响区的差异沉降约为 0.31~0.39 m。由图 8 可以看出, 当将排水板的渗透系数增大 50% 时, 加固区表面的最大沉降增大了约 13.2%; 当增大 150% 排水板的渗透系数时, 最大沉降增大了约 30.0%, 而影响区的沉降受排水板渗透系数变化的影响较小。

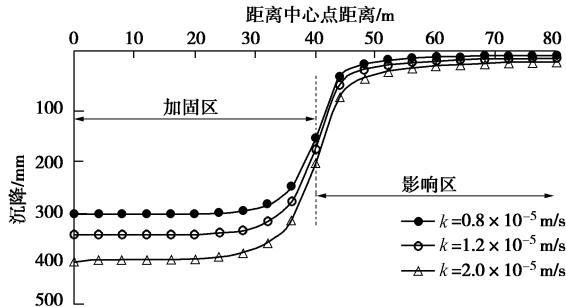


图 8 塑料排水板通水能力对软土表面沉降的影响

Fig. 8 Influence of drainage capacity of PVDs on settlement at surface of subsoil

### (2) 塑料排水板打设深度

塑料排水板的打设深度  $h$  对软土表面的沉降如图 9 所示。可以看出加固区和影响区的差异沉降约为 0.24~0.35 m。随着排水板深度的增加, 软土表面的沉降在增大, 这是由于排水板打设深度的增加增长了

排水通道。当排水板打设深度由 5 m 增大至 8 m 时(增大 60%), 加固区表面的最大沉降增加了约 30.0%; 当排水板打设深度增大 160% 时, 加固区表面的最大沉降增加约 46.8%; 可以看出, 排水板打设深度增大至某一值时(该试验断面中增大至 13 m), 软土表面的沉降几乎不再随排水板打设深度的增加而发生变化。

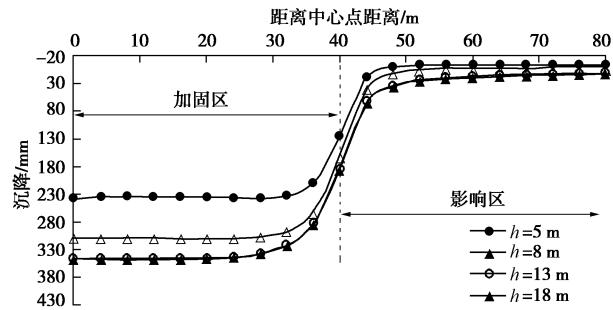


图 9 塑料排水板打设深度对软土表面沉降的影响

Fig. 9 Influence of length of PVDs on settlement at surface of subsoil

### (3) 塑料排水板间距

图 10 为改变塑料排水板的间距  $s$  对软土表面沉降的影响。可以看出: 加固区的沉降远大于影响区的沉降, 差异沉降约为 0.26~0.35 m。随着排水板间距的增大, 软土表面的沉降逐渐减小, 但是对影响区的沉降影响不大。当排水板间距由 4.0 m 减小到 2.0 m 时(减小 50%), 加固区表面的最大沉降增加了 18.6%; 当排水板间距由 4.0 m 减小到 1.3 m 时(减小 67.5%), 加固区表面的最大沉降增加 33.1%。可以看出: 软土表面最大沉降的增长速率随着排水板间距的减小而减小; 当排水板间距减小至某一值(例如, 该试验断面中排水板间距减小至 1.3 m), 软土表面最大沉降将趋于稳定。

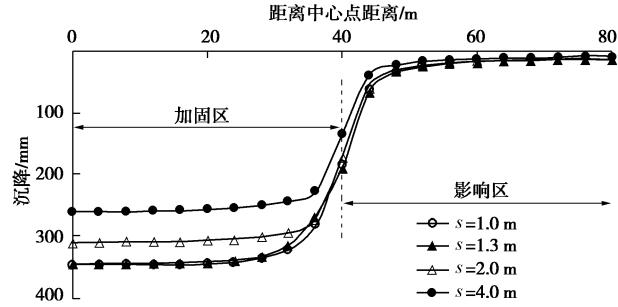


图 10 塑料排水板通水能力对软土表面沉降的影响

Fig. 10 Influence of spacing of PVDs on settlement at surface of subsoil

将图 8~10 中的结果进行对比, 可以得出: 加固区的沉降受塑料排水板的通水能力、打设深度、间距变化的影响较大, 影响区的沉降几乎不受影响。相比塑料排水板的通水能力、打设深度而言, 塑料排水板

的长度对软土表面的沉降量影响最大。

### 3 固结度计算

固结度是判断软土加固效果的重要参数, 一般通过现有的沉降与最终沉降的比值来确定。Asaoka<sup>[12]</sup>提出了一种理论方法计算软土的最终沉降从而计算软土固结度; Chu 等<sup>[13]</sup>提出可以利用孔压计算软土的平均固结度。

#### 3.1 最终沉降估算固结度

Asaoka<sup>[12]</sup>提出的理论方法计算软土最终沉降的方法为: 将等时间间隔的沉降测量值 ( $S_1, \dots, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, \dots, S_N$ ) 为横坐标, 以沉降测量值 ( $S_2, \dots, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, \dots, S_{N-1}$ ) 为纵坐标, 所得点连成的线与过原点斜率为 45° 直线的交点所对应的纵坐标即为软土最终沉降量。根据 Asaoka 理论, 本文工程实例中地基表面中心点的最终沉降约为 316 mm, 真空预压加载末期该点的沉降约为 295 mm (如图 5 所示), 由此计算可知, 真空预压加载末期地基表面中心点的固结度约为 93.4%。

#### 3.2 孔压估算固结度

Chu 等<sup>[13]</sup>指出通过测量真空预压阶段软土不同深度的孔隙水压力, 可以得到初始孔隙水压力、最终孔隙水压力沿软土深度的分布规律。据此, 软土的平均固结度可以用以下公式进行计算:

$$U_{\text{avg}} = 1 - \frac{\int [u_t(z) - u_s(z)] dz}{\int [u_0(z) - u_s(z)] dz}, \quad (2)$$

式中,  $u_0(z)$  是软土深度  $z$  处的初始孔隙水压力;  $u_t(z)$  是  $t$  时刻时, 软土深度  $z$  处的孔隙水压力;  $u_s(z)$  是吸力线, 可以通过下式求得

$$u_s(z) = \gamma_w z - s, \quad (3)$$

式中,  $\gamma_w$  是水的重度;  $s$  常取 80 kPa。

图 11 为真空预压加载末期 (90 d), 软土中心处

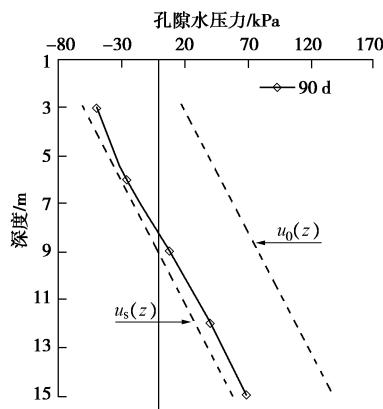


图 11 软土中心处孔隙水压力随深度的分布规律

Fig. 11 Distribution of pore water pressure against depth at different durations

孔隙水压力随深度的分布规律。根据式 (1)、(2), 可以计算出在真空预压加载 90 d 时, 该软土地基的平均固结度约为 88.3%。与利用最终沉降估算的软土固结度相比 (固结度 93.4%), 利用孔压估算的软土平均固结度偏低约 5.8%。

### 4 结 论

本文通过对南京某有轨电车软土地基真空预压处理现场实例的模拟, 从软土中心沉降、孔压方面验证了数值模型的正确性; 并通过改变排水板的通水能力、排水板的打设深度以及排水板的间距参数, 进行真空预压加固效果。得到主要结论如下所示:

(1) 通过对加固区沉降和孔压结果可以看出: 数值模拟结果偏大于现场检测结果, 误差为 2.4%~32.5%, 验证了数值模型的正确性。

(2) 加固区的沉降受塑料排水板的通水能力、打设深度、间距变化的影响较大, 影响区的沉降几乎不受影响。相比塑料排水板的通水能力、打设深度而言, 塑料排水板的长度对软土表面的沉降量影响最大。

(3) 通过沉降和孔隙水压力估算该软土地基的固结度分别为 93.4% 和 88.3%, 说明了真空预压加固该软土地基效果明显。

### 参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Foundation treatment manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 高志义. 真空预压法的机理分析 [J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 45~56. (GAO Zhi-yi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45~56. (in Chinese))
- [3] SHEN S L, CHAI J C, HONG Z C, et al. Analysis of field performance of embankments on soft clay deposit with and without PVD-improvement [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(6): 463~485.
- [4] CHAI J C, CARTER J P, HAYASHI S. Vacuum consolidation and its combination with embankment loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43: 985~996.
- [5] SAOWAPAKIBOON J, BERGADO D T, VOOTTIPRUEX P, et al. Nakakuma, K. PVD improvement combined with surcharge and vacuum preloading including simulations [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(1): 74~82.
- [6] VOOTTIPRUEX P, BERGADO D T, LAM L G, et al.

- Back-analyses of flow parameters of PVD improved soft Bangkok clay with and without vacuum preloading from settlement data and numerical simulations[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(5): 457 - 467.
- [7] LIU H L, CUI Y L, SHEN Y, et al. A new method of combination of electroosmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement[J]. China Ocean Engineering, 2014, **28**(4): 511 - 528.
- [8] HANSBO S. Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains[J]. Ground Eng, 1979, **12**(5): 16 - 25.
- [9] 周 琦. 真空预压条件下土体渗流特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (ZHOU Qi. Seepage characteristics of soil under vacuum preloading[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [10] 陈 环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(5): 39 - 47. (CHEN Huan, BAO Xiu-qing. Consolidation effective stresses in soil under the negative pressure condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **6**(5): 39 - 47. (in Chinese))
- [11] 阎澍旺, 陈 环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, **8**(2): 35 - 44. (YAN Shu-wang, CHEN Huan. Mechanism and calculation methods of vacuum stabilization of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **8**(2): 35 - 44. (in Chinese))
- [12] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction[J]. Soils Foundations, 1978, **18**(4): 87-101.
- [13] CHU J, YAN S. Estimation of degree of consolidation for vacuum preloading projects[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, **5**(2): 158 - 165.

(本文责编 孙振远)