

· 地基与基础 ·

真空预压施工影响范围预估和既有道路保护



殷瑞林, 张更生, 张勇, 程瑾, 任会康

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

摘要: 在既有道路周边使用真空预压工艺处理软土地基时, 需要考虑真空预压施工对既有路基的影响, 并保障既有道路的安全运行。以实际工程为例, 通过类似工程总结修正经验公式, 计算结果表明: 既有道路位于真空预压影响范围内, 为了既保障东堤路的安全运行, 又保证地基处理的效果, 采用在既有道路靠真空预压处理区一侧设置 15 m 宽度的保护区, 采用长短板的方式, 从远离道路的一侧向东堤路方向的塑料排水板长度由 8.0 m 递减至 3.0 m, 采用堆载预压的方式处理, 堆载高度 3.0 m。针对东堤路的保护, 施工期设置水平和垂直位移、沉降等监测, 在前期方案设计和施工期监测的双重保障下, 最终顺利完成地基处理施工。

关键词: 真空预压; 影响范围预估; 既有道路; 保护措施

中图分类号: TV 223; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0131-05

Estimation of influence range of vacuum preloading construction and protection of existing roads

YIN Rui-lin, ZHANG Geng-sheng, ZHANG Yong, CHENG Jin, REN Hui-kang

(CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

Abstract: When using vacuum preloading technology to treat soft soil foundations around existing roads, we should consider the influence of vacuum preloading construction on existing roadbed and ensure the safe operation of existing roads. Taking an actual project as an example, this paper summarizes and corrects the empirical formula through similar projects, and the calculation results reveal that the existing road is within the influence range of vacuum preloading. To ensure the safe operation of Dongdi Road and the effect of foundation treatment, we set a protection zone with a width of 15 m on the side of the existing road near the vacuum preloading treatment area, use long and short plates with the length of the plastic drainage plate reduced from 8.0 m to 3.0 m from the side far of the road to Dongdi Road, and adopt the stacking preloading method with the stacking height of 3.0 m. For the protection of Dongdi Road, we monitor the horizontal and vertical displacement and settlement during the construction period. Finally, under the double guarantee of the earlier scheme design and monitoring during the construction period, the foundation treatment construction has been smoothly completed.

Keywords: vacuum preloading; existing road; estimation of influence range; protective measure

中国沿海地区普遍分布有深厚软土, 它是一种强度低、压缩量高、含较多有机物质、分布不均匀的软弱土层。真空预压地基处理可以减少软土地基土体沉降、不均匀沉降和持续长时间较大的工后沉降, 满足工程设计的要求。但在软土地

基处理的过程中, 不仅处理区会产生沉降变形, 也会对预压区外一定范围内的土体造成影响。真空预压区抽真空过程中, 加固区内孔隙水压力降低, 土体发生沉降, 对周边土体的约束作用降低, 从而产生向真空预压区水平位移的趋势, 并且真

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 殷瑞林(1983—), 男, 高级工程师, 从事软土地基处理及岩土工程勘察工作。

空预压区外土体的沉降也会对周边环境造成影响。针对上述问题,研究主要集中在以下几个方面:

1)影响机理:熊志福^[1]提出真空预压土体侧向变形的主要影响因素为土体性质和加固条件(加固面积、工艺参数等);焦华丽^[2]提出加固区土体的收缩变形导致影响区土体的变形。2)数值模拟计算:魏红庆^[3]通过有限元计算分析真空预压对加固区周围土体的影响,得出20~25 m的影响范围。3)工程实例:姜海青^[4]以软基处理实际工程为基础,通过对加固区内、外的现场实际监测数据的采集和分析,得出真空预压加固大面积软基的影响范围。由于各真空预压地基处理项目的场地条件、地质条件和处理工艺参数不同,其影响范围和程度也不固定^[5]。因此,如何根据场地条件、地质条件和处理工艺参数对影响范围进行预测并采取对应的防护措施是在进行类似项目设计前要解决的问题。

本文以某工程东堤路西侧地基处理工程为例,通过对周边类似工程现场实测数据和计算数据的比对,对经验公式进行修正,并根据修正后的经验公式计算影响范围。根据真空预压和堆载预压加固原理不同导致对加固区外土体影响方式的不同,采用真空预压+堆载预压的综合处理工艺,达到了预期处理效果,更重要的是保障了东堤路的安全运行。

1 工程概况

某工程待加固的软土地基区域为围海造陆形

成,吹填后场地现状高程为2.7~3.2 m,总面积约77.74万m²。按照地基处理设计要求,待加固区采用无砂垫层真空预压法进行加固,膜下真空度不小于85 kPa,处理软土厚度17.0 m,塑料排水板按正方形布置,间距0.9 m,连续抽真空120 d以上,当土体固结度超过85%,连续10 d平均沉降量不大于2.5 mm/d时,可停止抽真空。拟加固区域的东侧为已交付使用的东堤路,沿线场地是围海造陆的吹填区,且未经过真空预压。吹填土最大厚度约7.6 m,其下有约8.0 m厚的浅海相沉积层(淤泥质黏土),东堤路路基采用吹填土原位固化路基处理方案,在冲填土中添加由水泥、矿粉、石灰、激发剂等材料按一定比制成的固化剂,进行搅拌混合,制成固化土。机动车道下现状冲填土原位固化深度 $H_1=1.5$ m(掺入量9%,7 d无侧限抗压强度大于0.4 MPa)形成承托层,然后填筑石灰土6%(或者冲填土固化土,掺入量4%)至路面结构底面以下40 cm,最后施用40 cm(2层,每层厚20 cm)石灰土(8%)。西侧绿化带及东侧机动车道以外10 m范围内现状冲填土原位固化深度 $H_2=1$ m(掺入量6%,7 d无侧限抗压强度大于0.3 MPa),然后分层回填素土至设计高程以下1.5 m,压实度大于90%,最后填筑1.5 m种植土;同时在西侧设置冲填土固化土包边,防止地表水冲刷路基,顶面高程为4.5 m。拟处理区软土层物理力学指标见表1。上述土层天然孔隙比大,天然含水量高,压缩系数大,均为流塑状态,地基承载力较低,属于典型的软土。

表1 拟处理区软土层物理力学指标

岩土名称	层厚/m	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	压缩模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
吹填土	7.6	42.7	1.76	3.07	12.5	16.0
淤泥质黏土	8.0	46.1	1.75	2.73	11.8	13.4

2 真空预压对周边土体的影响范围预估

2.1 影响机理

真空预压加固过程中,首先,由于持续的抽真空引起加固区外地下水位的降低,原地下水位以下土体由浮重度变为湿重度,下部土体所受土压力增加,导致加固区外土的固结沉降发生;其次,由于加固区内地下水位降低,区外地下水向

加固区进行补给,在渗流力的作用下,区外土体产生向加固区的水平位移;最后,由于加固区土体的收缩变形,使得区外一定范围内的土体发生向加固区的变形,该部分土体受区外土的黏聚力影响,影响范围一般不大。

2.2 影响范围

目前,对真空预压地基处理技术的加固机制、

影响机理等研究较多, 很多学者对真空预压影响范围进行了理论、实测和数值模拟的研究, 范须顺^[6]以井点降水的渗透影响半径为基础提出的预估真空预压影响范围的经验公式为:

$$R = \frac{2(h_0 - h_s)\sqrt{kh_0}}{a} \quad (1)$$

式中: R 为真空预压影响范围(距离); h_0 为塑料板打设深度; h_s 为地下水位; k 为承压下土体渗透系数(m/d); a 为综合地表系数, 加固区外围相邻场地具有道路或人工杂填土等复杂地表性质时, a 取 0.8, 若与施工区特征一致时, a 取 1。计算所得影响范围一般偏小, 收集多个类似工程进行计算并与实测数据进行比对(表 2), 在原有经验公式的基础乘以 1.95 进行修正, 即可得到天津滨海新区真空预压影响范围的经验公式。

表 2 真空预压影响范围对比

工程名称	塑料板打设深度 h_0 /m	地下水位 h_s /m	影响距离 R /m	实测距离/m
1	16.5	1.2	8.2	16.2
2	17.5	0.8	9.2	18.0

根据经验公式计算, 本工程计算结果见表 3, 初步可得出该真空预压方案对保障东堤路安全可行。

表 3 按经验公式计算结果

塑料板打设深度 h_0 /m	地下水位 h_s /m	渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	影响距离 R /m
14	0.9	0.002 8	16.4
8	0.9	0.018 0	13.1
3	0.9	0.018 0	2.4

3 地基处理设计方案调整

综合以上计算及类似工程的经验, 原地基处理设计方案对东堤路的运行存在安全隐患。为保护东堤路的安全稳定, 及时调整设计方案, 紧邻东堤路的 15 m 宽度范围设置缓冲区, 采用长短板的方式, 从远离道路的一侧向东堤路方向的塑料排水板长度由 8.0 m 递减至 3.0 m, 采用堆载预压的方式进行处理, 堆载高度 3.0 m。同时针对东堤路设置保护性监测, 切实保障东堤路在施工期间的安全运行。地基处理横断面见图 1。

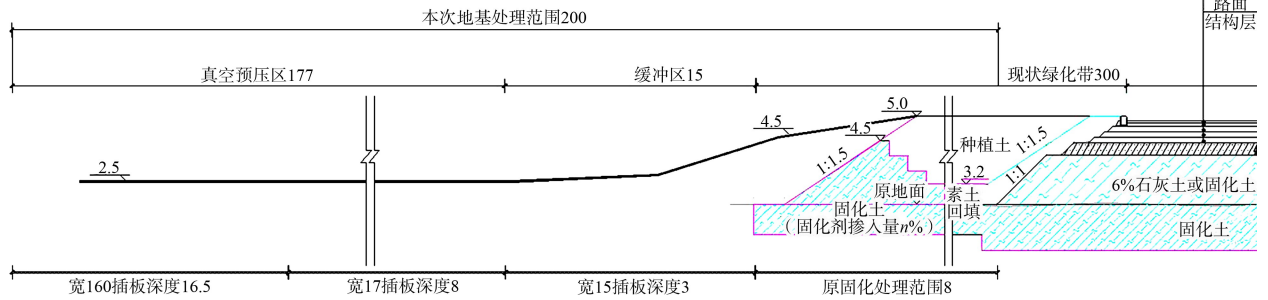


图 1 地基处理断面 (单位: m)

4 现场施工及监测情况

除常规软基处理监测外, 为了保证东堤路的安全稳定, 在堆载预压区中 3 m 排水板位置区沿东堤路布置 6 组土体水平位移监测点, 4、5 区各布置 2 组, 6、7 区各布置 1 组, 每组水平位移监测垂直于东堤路布置 3 个监测点, 间距 5.0 m, 监测 20 m 深度范围内的土体水平位移。在每个土体水平位移监测点断面附近布置深部土层沉降监测点和地下水位观测点, 同时在东堤路上对应 6 个深层土体水平位移监测断面设置位移观测点, 监测施工过程中东堤路的位移情况。监测点位典型断面见图 2。

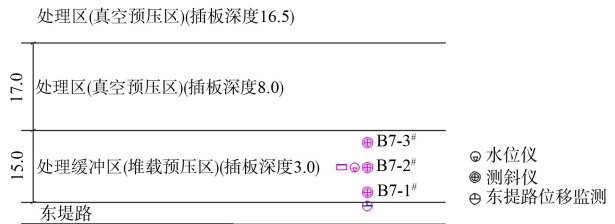
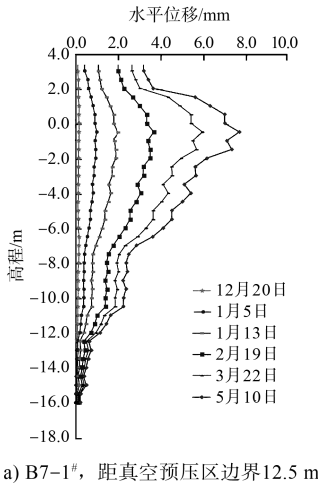


图 2 监测典型断面 (单位: m)

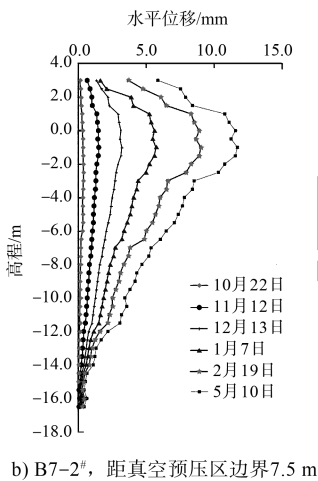
4.1 深层土体水平位移监测数据分析

总体上, 水平位移均呈现上部位移量较大、随着深度的增加位移量逐渐减小, 距真空预压区距离越远水平位移越小的规律。距真空预压区 5.0 m 处水平位移最大值 28 mm, 10 m 处水平位移最大值 12 mm, 15 m 处水平位移最大值 7.8 mm。

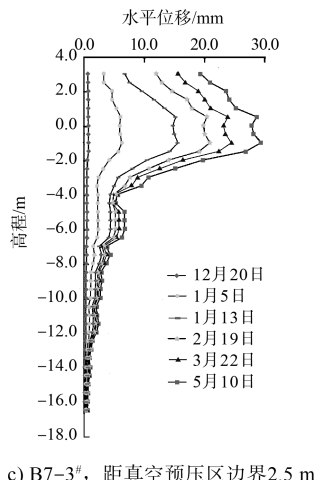
监测期间，最大位移速率发生在 B7-3# 监测点 4.5 m 深度位置处，时间为 2020 年 2 月 19 日—2 月 22 日，位移量为 1.15 mm，位移速率 0.38 mm/d，总体上看，深层水平位移变化量不大，远小于预警值 4 mm/d。深层土体水平位移监测结果见图 3。



a) B7-1#，距真空预压区边界12.5 m



b) B7-2#，距真空预压区边界7.5 m



c) B7-3#，距真空预压区边界2.5 m

图3 东堤路深层水平位移

4.2 东堤路路面沉降数据分析

监测结果表明，抽真空初期阶段东堤路路面沉降变化速率较大，随着施工的进行，变化速率逐渐减小，同时由于各真空预压施工分区真空度传递、土质不同等原因，造成路面沉降变化略有差异，但差异性不大。纵观整个监测周期，路面沉降大致可分为 3 个阶段：

1) 沉降缓慢增大期：本阶段出现在排水板插板施工期间，东堤路路面平均沉降量约 2.75 mm，平均沉降速率 0.044 mm/d。

2) 沉降迅速增大期：本阶段出现在真空预压施工初期，随着真空预压区真空度的增加，区内发生迅速沉降，沉降速率明显增大，平均沉降量约 5.00 mm，平均沉降速率 0.059 mm/d。

3) 沉降逐渐减缓期：本阶段出现在真空预压施工后期，区内真空预压区土体沉降逐渐减缓，对周围土体的影响逐渐减小，路面沉降虽有增加趋势，但变化速率逐渐减小，平均沉降量 1.77 mm，平均沉降速率 0.032 mm/d。

由于东堤路路基下深部土体未经预压处理，通过分析 3 个阶段路面沉降数据，并对比现状和建成后路面高程，可认为东堤路自建成以来一直在缓慢沉降，沉降速率为沉降逐渐减缓期的平均沉降速率 0.032 mm/d。排水板插板施工期间，由于插板造成东堤路路基外侧土体瞬时沉降，平均沉降速率增至 0.044 mm/d。抽真空期间，受真空预压施工的影响，平均沉降速率增至 0.059 mm/d。

4.3 深部土层沉降监测数据分析

监测结果表明，东堤路西侧土体沉降主要集中在 10 m 以上部分土层中，说明真空预压施工对路基的影响深度在 10 m 左右。从分层沉降量随时间变化曲线(图 4)来看，越是浅层的土体受真空预压施工影响越大，压缩越明显，10 m 以下土体几乎没有发生沉降。而上部土体分层沉降大致可分为 3 个阶段：

1) 沉降缓慢增大期：此阶段出现在排水板插板施工期间，靠近东堤路路基西侧的上部土体开始逐渐发生沉降，平均沉降量约 6.75 mm，平均

沉降速率 0.107 mm/d。

2) 沉降迅速增大期: 此阶段出现在真空预压施工初期, 随着真空预压区真空度的增加, 区内发生迅速沉降, 造成周围土体的滑动和沉降, 从分层沉降随时间变化的曲线可以看出沉降速率明显增大, 此阶段平均沉降量约 16.83 mm, 平均沉降速率 0.366 mm/d。

3) 沉降逐渐减缓期: 此阶段出现在真空预压施工后期, 此时区内真空预压区土体沉降逐渐减缓, 对周围土体的影响逐渐减小, 此时靠近真空预压施工区一侧东堤路路堤周边土体的沉降虽然有增加趋势, 但变化逐渐趋于稳定, 沉降量较小, 沉降曲线接近水平, 此阶段平均沉降量 10.66 mm, 平均沉降速率 0.111 mm/d。

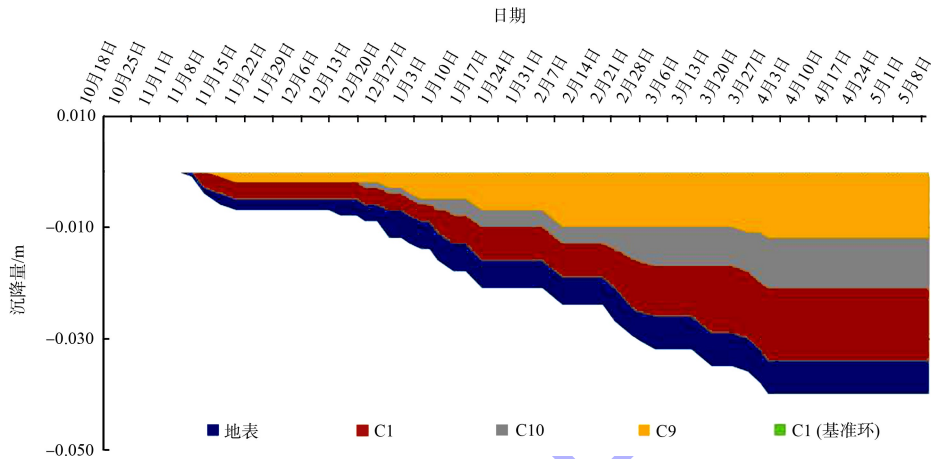


图 4 深部土体分层沉降曲线

4.4 地下水水位监测数据分析

监测结果表明, 东堤路路基地下水位变化受到真空预压施工的影响, 6 个监测点地下水位均出现不同程度的下降。其中, 第 6 区水平位移监测点中间位置水位变化最大, 2019-10-18—2020-05-10 水位下降 1.671 m, 期间水位下降最大值为 2.726 m。勘察资料显示, 在该监测点附近, 3~6 m 土层存在透水性较大的粉土层, 在真空预压施工期间, 极有可能在真空预压区与缓冲区之间形成了排水通道, 从而造成地下水位下降。

3) 东堤路建成通车后, 由于下部存在深厚的软土, 路基沉降未停止。

4) 真空预压施工时, 由于抽真空的过程会引起加固区外地下水向加固区内渗流, 进而造成加固区外土体向加固区一侧位移变形。为了降低对加固区外的影响, 可采用部分堆载预压的方式抵消位移变形。

5 结论

1) 真空预压对加固区外土体的影响不光是因为地下水位降低, 还由于加固区土体收缩变形后对加固区外土体侧向约束不足导致土体向加固区蠕动。

2) 目前, 预估真空预压影响范围的经验公式是以井点降水的渗透影响半径为基础提出的, 在施工经验丰富的地区, 可对经验公式总结并修正后用于预估影响范围。

参考文献:

- [1] 熊志福. 软土区真空预压法施工对周围构筑物的影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [2] 焦华丽. 真空预压对加固区周围土体的影响范围研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [3] 魏红庆. 真空预压法对加固区周围土体的影响以及防护措施分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [4] 姜海青. 真空预压法加固大面积软基的影响范围[J]. 水运工程, 2013(3): 195-198, 203.
- [5] 李龙. 真空预压侧向位移预估及控制效果分析[J]. 港口技术, 2021, 58(1): 106-109.
- [6] 范须顺. 真空预压法软基加固施工中若干问题的概述[J]. 港口工程, 1995(4): 17-20. (本文编辑 王传瑜)