

真空预压法加固软土地基的工程实例分析

陈立伟¹, 范毅², 王风波³, 孙博⁴, 杜晓宁⁵

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116; 3. 天津市北洋水运水利勘察设计院有限公司, 天津 300456; 4. 天津海滨工程勘察设计院有限公司, 天津 300384; 5. 中国中建设计集团有限公司, 北京 100037)

摘要:以黄骅港四期筒仓地基处理工程为例,详细阐述了真空预压加固软土地基施工过程中的仪器设备的布设、施工与监测方法;对工程实际的观测结果进行了分析。实践证明,真空预压加固法不仅加固时间短,施工成本低,而且对地基的加固效果明显。

关键词:软土地区;地基加固;真空预压;孔隙水压力;沉降;固结

中图分类号:U472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)11-0063-04

Case Study on Consolidation of Soft Foundation with Vacuum Preloading/CHEN Li-wei¹, FAN Yi², WANG Feng-bo³, SUN Bo⁴, DU Xiao-ning⁵ (1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China; 2. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha Hunan 410116, China; 3. Tianjin Beiyang Survey and Design Institute of Water Transport and Conservancy Co., Ltd., Tianjin 300456, China; 4. Tianjin Haibin Engineering Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300384, China; 5. China Construction Engineering Design Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Take the case of Huanghua 4th silo foundation treatment project, the paper discusses in detail the layout of instrument and equipment for soft ground consolidation with vacuum preloading construction and monitoring methods; and analyzes the observation results of the engineering practice. The practice has proved that by the vacuum preloading method, the consolidation time and cost can be shortened and lowered with obvious effect of reinforcement foundation.

Key words: soft soil area; foundation consolidation; vacuum preloading; pore water pressure; settlement; consolidation

真空预压加固地基时,在地基上施加的不是重物,而是对加固地基通过密封膜密封后抽真空,从而在膜里外形成气压差,使软土层产生固结沉降。即是在总应力不变的情况下,通过减小孔隙水压力的方法来增加有效应力,从而达到土体固结。与常规堆载预压加固法相比,真空预压加固法具有很大的优点,首先无需搬运堆载材料,节省大量的人力、物力,而且真空预压下土体不会产生剪应力,施工时无须控制加荷速率也不会引起地基失稳,缩减了施工工期^[1-5]。因此真空预压加固法适用于加固软土及超软土地基,特别是加固面积大,工期要求紧的工程具有明显的优势。近年来真空预压法已被广泛应用于软土地区的地基加固工程,并取得了良好的加固效果。

本文以河北黄骅港四期筒仓地基处理工程为例,通过对其加固方案、施工方法及监测过程的描述,对现场取得的监测数据进行了分析和比较,对地基土体的固结度及加固效果进行了评价。观测数据结果表明,土体的抗剪强度、含水率等物理力学指标

都有了明显的变化。

1 工程地质条件

根据地质勘察报告揭露地层,该工程场地自上而下分布土层为:第一层为水力吹填形成,以淤泥质土为主;第二层为海相沉积淤泥质粘土,高压缩性的欠固结土层;第三层为海相沉积淤泥质粉质粘土,高压缩性的欠固结土层;第四层为夹粉土薄层的粉质粘土层。

2 地基加固过程

根据设计要求,经过真空预压法加固后的地基,应达到以下指标:(1)地基承载力 ≤ 80 kPa(2)在 ≤ 85 kPa的真空压力下,地基土的平均固结度 $\leq 85\%$ 。

该工程真空预压法的施工过程如下:在现有泥面上先铺设土工布,再铺0.4 m厚中粗砂作为水平排水垫层,打设B型塑料排水板作为竖向排水通道,间距1.0 m,正方形布置,打设深度至标高-12.5 m。在砂

收稿日期:2014-02-28; 修回日期:2014-07-09

作者简介:陈立伟(1985-),男(汉族),山东潍坊人,交通运输部天津水运工程科学研究所助理工程师,岩土工程专业,从事岩土工程勘察及监测工作,天津市滨海新区厦门路1199号,chlw1227@163.com。

垫层中铺设带有小孔的滤管,滤管将塑料排水板与真空加压设备相连。然后在砂垫层上铺设一层土工布、三层塑料膜,并将塑料膜踩入压膜沟中一定深度的粘土层中,确保密封性。最后采用射流泵施加真空压力。在施工中,真空压力应始终保持在 85 kPa 以上,通常有效抽气时间 ≤ 90 天。

3 监测过程

笔者对真空预压的整个过程进行了跟踪监测,根据设计要求分别在每个加固区布设了如下的监测仪器(见图1):

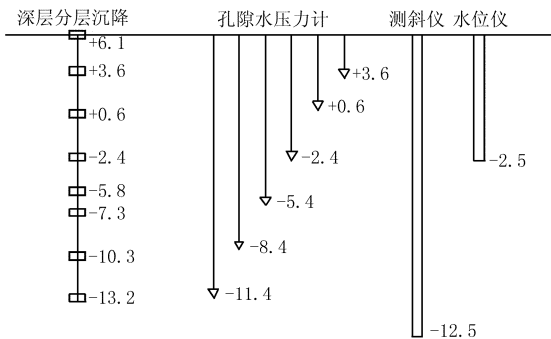


图1 监测仪器布置图(单位:m)

一组孔隙水压力计,用于测量孔隙水压力消散情况;

一组深层分层沉降,用于测量地基土在不同深度、不同土层的沉降变化,以推算不同土层的固结度;

一组测斜仪,用于测量不同深度、不同土层土体侧向变形,防止周围建筑物位移过大;

一组水位仪,用于施工区内侧地下水位变化的量测;

若干表层沉降盘,用于地基土沉降变化和施工速率控制及建筑物倾斜与施工对周边环境影响的测量等,推算土体的固结度。

同时对加固前后的土体进行了现场十字板试验和室内土工试验以进行加固前后对比。本文仅以其中2个代表性分区作为分析对象。

3.1 沉降量观测

由于土体处于欠固结状态,塑料排水板的打设为土体提供了竖向排水通道,土体在自重作用下产生固结,因此产生了一定的沉降。现场观测这两个加固区在打设塑料排水板的施工过程中,平均沉降量分别为 149、210 mm。

在真空压力的施加过程中,地表沉降随着真空压力的施加而逐渐变化,整体表现为试抽气开始后,沉降速率缓慢增加,当真空压力到达设计要求 85

kPa 伊始(即开始正式计时),沉降速率很大,可达到 50 mm/d,而后沉降速率逐渐变小并趋于稳定。图2给出了地面以下不同深度处的沉降量随时间的变化曲线,从图中可看出从上到下的磁环沉降逐渐减小,符合土层沉降机理^[6]。同时水准仪观测到的真空预压期间地表沉降量分别为 814、831 mm。

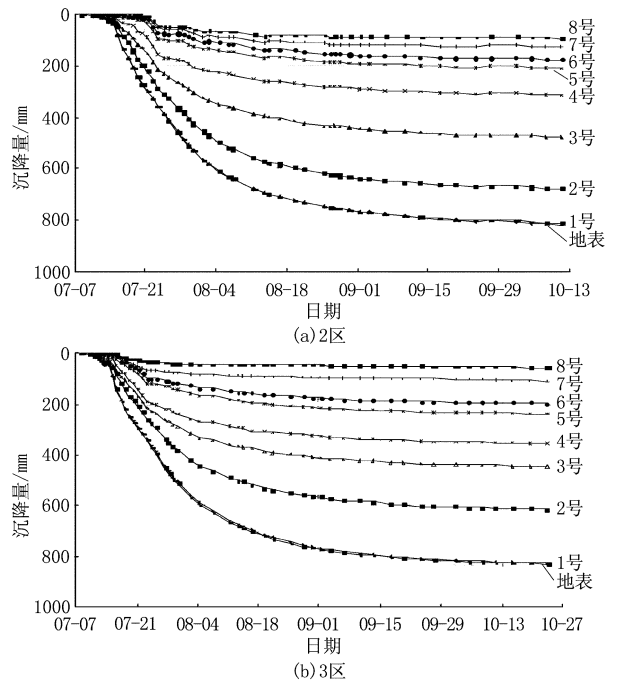


图2 分层沉降各磁环沉降量与时间关系曲线

3.2 孔隙水压力观测

图3给出了不同深度处孔隙水压力随时间的变化曲线。从图中可以看出,真空预压达到设计要求

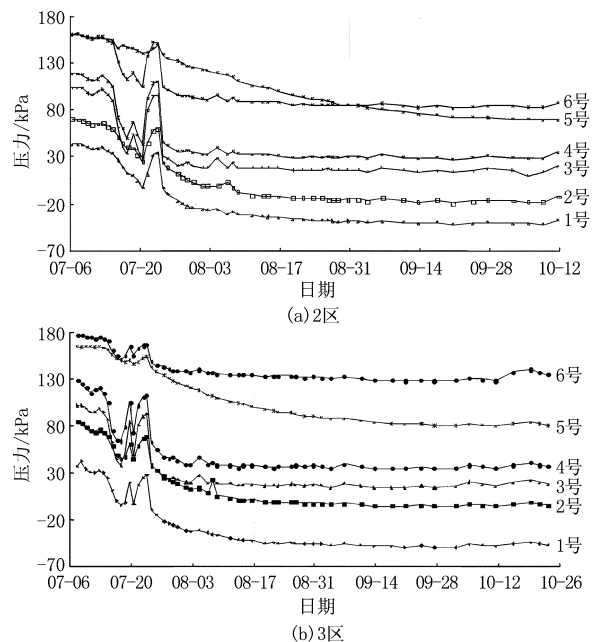


图3 孔隙水压力与时间关系曲线

85 kPa 后,不同深度的孔隙水压力消散很快,加荷 2 个月左右的时间后逐渐趋于平缓,变化不大。从曲线上可以看出,由于土质等条件的差异造成渗流速度不同,各测头的消散速率不一,消散值也有差异^[6,7]。现场实测资料与土工试验资料分析可知,渗透性强的土层,孔隙水压力消散快,且对真空度反应敏感。粘性土中的孔隙水压力消散则相对较慢,对真空度的反应相对滞后。

本文中涉及到的 2 个预压区于 7 月 8 日开始试抽气,7 月 18 日正式计时,正式计时初期由于现场电缆损坏以及密封膜漏气等原因出现孔压反弹,之后大约 2 个半月的恒载时间内,真空压力基本正常,孔压逐渐消散。

3.3 深层水平位移观测

在真空压力的作用下,土体发生向加固区内侧的水平位移。图 4 为 2 组深层水平位移沿深度变化曲线,从图中可看出,土体位移呈现上部大、下部小的特点。加固区外的土体在地表分布有长度及宽度不一的裂缝,由于该工程周边建有临时性生活区,水

平向的位移导致生活区多处临时建筑发生开裂及倾斜现象,业主及监理单位定期排查危险源,施工期间并未造成人员受伤及财产损失。

3.4 加固深度

按照设计要求,该工程塑料排水板打设底标高为 -12.5 m,加固前该区域标高约 6.0 m,排水板打设深度约为 18.5 m。而通过分层沉降曲线与深层水平位移曲线可知,-12.5 m 以下土体也有一定的沉降及侧向位移,说明真空预压加固的深度影响范围可达到竖向排水通道及塑料排水板以下至少 2 m 的深度^[8]。

3.5 观测结果分析

3.5.1 土体的固结度

土体的固结度 U_t 可通过现场观测沉降值或孔隙水压力消散情况计算得到。通过沉降量计算固结度时,必须得到土体的最终沉降量。最终的沉降量可由已经观测到的沉降量与时间的关系曲线求得。

$$S_t = S_0 + t / (\alpha + \beta t)$$

当 $t \rightarrow +\infty$ 时:

$$S_\infty = S_0 + 1/\beta$$

式中: S_t ——满载 t 时间的实测沉降量; S_0 ——满载开始时的实测沉降量; t ——满载预压时间,从满载时刻算起; S_∞ ——最终沉降量; α 、 β ——计算参数,可根据实测资料确定。

地基的固结度根据实测沉降资料按下式推算:

$$U_s = (S_t / S_\infty) \times 100\%$$

式中: U_s —— t 时间地基(应变)固结度, %。

固结度同样可以通过孔隙水压力求得:

$$U_s = 1 - \int_v \mu_t dV / \int_v \mu_0 dV$$

式中: μ_0 ——初始孔隙水压力; μ_t —— t 时刻孔隙水压力; V ——计算区域面积。

经计算得到:2 区平均固结度为 86.9%,3 区平均固结度为 85.6%。均达到了设计要求的卸载标准。

3.5.2 真空预压前后十字板抗剪强度的变化

通过对场地内的土体进行加固前后的十字板剪切试验,如图 5 各个观测点的加固前后十字板强度随深度变化曲线所示,加固前后十字板曲线相比较呈现上部土体强度增长大,随着土体深度增加强度增长逐渐变小的特点,而研究表明,真空度在塑料排水板中沿深度衰减很小^[9,10],强度增加多少主要与土体本身的强度有关,根据现场实测沉降曲线以及土工试验,都能说明上部土质软、下部土质较硬的特点。

3.5.3 真空预压前后土体物理力学指标的变化

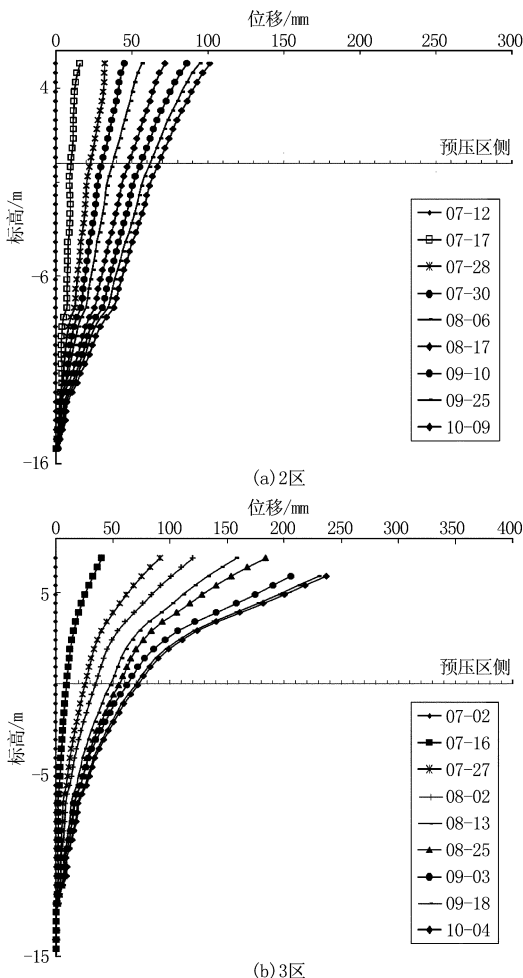


图 4 深层水平位移随深度变化曲线

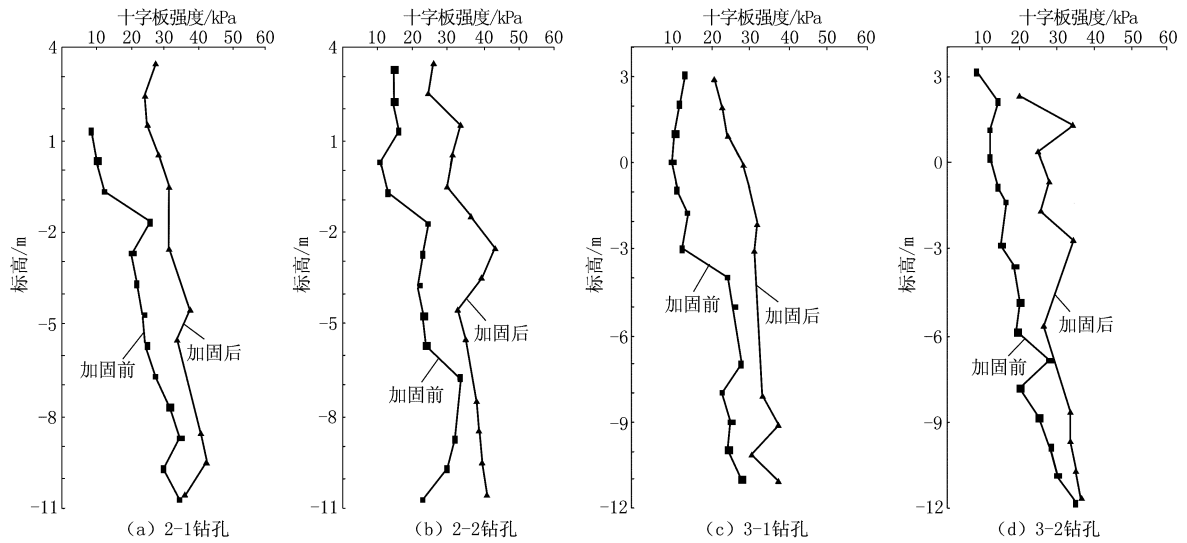


图5 加固前后十字板强度曲线

真空预压前后在场地同一坐标处钻探取土并进行室内试验,得到表1所示物理力学指标统计表,通过对加固前后指标对比可知,加固后土体的含水率、孔隙比等物理指标有了较为明显的改善,同时液性

指数、压缩系数相比加固前明显减小,并且表现为上部土体变化比下部大,说明加固后土体的压缩性减小,土体得到了加固,真空预压对不同深度尤其是地基上部较软土体的加固效果显著。

表1 加固前后土体主要物理力学指标统计表

层号	土层名称	天然含水量 $w/\%$			天然孔隙比 e			塑性指数 I_p			液性指数 I_L			压缩试验					
		加固前	加固后	变化/ $\%$	加固前	加固后	变化/ $\%$	加固前	加固后	变化/ $\%$	加固前	加固后	变化/ $\%$	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}		压缩模量 E_s/MPa			
①	吹填土	49.22	42.75	-13.14	1.37	1.20	-12.24	18.38	17.34	-5.65	1.55	1.32	-14.71	1.16	0.89	-23.61	2.14	2.49	16.55
②	淤泥质粘土	45.16	40.73	-9.80	1.26	1.14	-9.61	18.50	16.55	-10.54	1.35	1.32	-2.26	1.00	0.86	-13.60	2.30	2.49	8.26
③	淤泥质粉质粘土	39.95	39.18	-1.93	1.12	1.10	-1.97	15.91	15.58	-2.06	1.35	1.32	-1.98	0.87	0.84	-3.64	2.44	2.51	2.76
④	粉质粘土	28.16	26.74	-5.06	0.85	0.81	-4.87	13.44	13.29	-1.14	0.64	0.63	-1.52	0.59	0.50	-14.76	3.53	3.96	12.30

4 结语

实际工程证明,沿海地区超软土地基采用真空预压法具有堆载预压不可比拟的优势,同时加固后土体的抗剪强度有了明显改善,达到了设计要求,说明了真空预压加固法是一种行之有效的方法。

目前,天津港及其周边沿海地区很多地基处理工程采用直排式真空预压法,这是对传统的真空预压进行了改进,不需要铺设砂垫层,打设完塑料排水板后,将塑料排水板露出部分直接绑扎到滤管上,然后将滤管设在事先挖好的槽中并用黄砂填埋,简单来说就是将传统真空预压的砂垫层作水平排水通道改为滤管代替。这种方法既节省了铺设砂垫层时大量人力、物力的投入,且真空度传递效果较传统方法更直接有效,目前这种方法也已得到广泛认可^[11]。

参考文献:

- [1] 陈环,等.天津软土地基[M].天津:天津科技出版社,1987.
- [2] 陈环,鲍秀清.在负压作用下土体固结机理分析[A].第8届欧洲土力学和基础工程会议[C].Helsinki:1983.
- [3] Holtz R D. Preloading by Vacuum: Current Prospects[J]. Transportation Research Record, 1975, 548: 26-79.
- [4] JTS 147-1-2010,港口工程地基规范[S].
- [5] Kjellman W. Consolidation of Clayey Soils by Atmospheric[A]. Proceedings of a Conference on Soil Stabilization[C]. Boston: MIT, 1952. 258-263.
- [6] 闫澍旺,等.真空预压法加固软土地基的效果观测分析[J].水力学报,2004,(3):87-93.
- [7] 龚晓南,岑仰润.真空预压加固软土地基机理探讨[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,35(2):7-10.
- [8] 闫澍旺,等.真空预压有效加固深度的探讨[J].水力学报,2007,38(7):774-778.
- [9] 陈环.真空预压法机理研究十年[J].港口工程,1991,(4):17-26.
- [10] 李时亮.真空预压加固软土地基作用机理分析[J].岩土力学,2008,(2):479-482.
- [11] 陈伟,张宏力,等.新型“直排式”真空预压技术在软土地基处理工程中的应用[A].全国超软土地基排水固结与加固技术专题研讨会论文集[C].天津:2010.111-118.