

# 直排式真空预压法加固吹填土地基的固结沉降分析

孙佳锐<sup>1</sup> 王常明<sup>1</sup> 吴长江<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林长春 130012; 2. 北京中兵岩土工程有限公司, 北京 100053)

**【摘要】** 直排式真空预压法可以很好缩短工期、效果明显,是近年来在我国沿海地区广泛应用的软土地基处理方法。如何判别地基加固的程度,除了理论分析外,常常以地基处理过程中的沉降、孔隙水压力等指标的实时监测资料作为依据。以杭州湾地区吹填土加固工程为例,采用地表沉降和孔隙水压力的监测资料,分析加固地基固结沉降程度。结果表明,以沉降和孔隙水压力实时监测数据可准确判别吹填土地基固结程度,可为类似工程提供参考。

**【关键词】** 直排式真空预压法;孔隙水压力;地表沉降;固结

**【中图分类号】** TU 433

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2019.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Consolidation Settlement Analysis of Reclaimed Soil Foundation Reinforced by Directly Vacuum Preloading Method

Sun Jiarui<sup>1</sup> Wang Changming<sup>1</sup> Wu Changjiang<sup>2</sup>

(1. Construction Engineering Of Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

2. Beijing Zhongbing Geotechnical Engineering Co. Ltd., Beijing 100053, China)

**【Abstract】** The directly vacuum preloading method can shorten the construction period and has obvious effects. It is a soft ground treatment method widely used in coastal areas of China in recent years. In addition to theoretical analysis, real-time monitoring data of settlement, pore water pressure and other indicators are often used as the basis for judging the degree of foundation consolidation in the process of foundation treatment. In this paper, the consolidation degree of the foundation is analyzed by the project of blow-filled soil consolidation in hangzhou bay area. The result shows that the real-time monitoring data of subsidence and pore water pressure can be used to accurately determine the consolidation degree of the foundation, It can provide references for similar projects.

**【Key words】** directly vacuum preloading; pore water pressure; settlement; consolidation

### 0 引言

吹填土一般具有含水量高、重度较小、孔隙比大、强度低等特点,因此吹填土地基需经地基处理<sup>[1]</sup>。常规的真空预压法与直排式真空预压法工艺的不同之处主要在于,直排式真空预压法不需要铺设砂垫层,通过将主管和次管与排水板和真空泵相连。真空压力受滤管、滤膜、砂垫层的阻尼作用,所受能量损失很大,直排式真空预压法可以相应减少真空压力的沿程损失,相应地节省了中粗砂材料,从而也可以减少工程造价<sup>[2-3]</sup>。陈环用一维负压固

结仪进行的试验中表明,在相同的压差下正压与负压的加固效果相同<sup>[4]</sup>。关于沉降预测的研究,由于大多数沉降计算方法中都对计算模型、地层剖面以及加压条件等做了简化,所以往往所计算出的沉降结果与现场实测结果有不同程度的偏差,为此提出了根据实测沉降数据来推算沉降过程和最终沉降量的经验方法<sup>[5-6]</sup>。朱建才等对真空预压中孔隙水压力消散规律进行了研究<sup>[7]</sup>,张功新等研究了真空度与孔隙水压力的关系分析,结合广州南沙一真空预压工程,针对孔压计所测孔隙水压力得出负压与孔

压并不相同,并建议真空预压监测中负压仅是指负的超静孔隙水压力<sup>[8-9]</sup>。刘华强等<sup>[10]</sup>就某软土加固工程的固结度与地基承载力进行研究,分析真空预压法的应用价值。本文就直排式真空预压法处理杭州湾地区吹填土地基为工程案例,通过对现场地面沉降和孔隙水压力监测,运用经验方法预测吹填土地基的沉降量及固结度,对直排式真空预压法地基固结的合理性及适用性进行分析。

1 场地工程地质条件

拟建场地地势较平坦,地貌单元属于钱塘江河口冲海积平原,所揭露地层为全新世(Q<sub>4</sub>)、晚更新世(Q<sub>3</sub>)近代海沉积层与海陆交互相沉积层,该区域第四系松散沉积层的厚度大于100 m。真空预压地基处理试验区F为120 m×90 m。

根据野外钻探记录及室内土工资料分析,依据经过试验区剖面所揭示地层,各土层厚度及埋深如图1所示,按物理力学性质特征、成因类型、土性特征分为以下土层:①-2a层吹填土,灰色、黄灰色,湿—很湿,松散,摇振反应迅速,无光泽反应,干强度低,韧性低。该层为围垦区新近冲填土,以细砂、粉砂为主,夹黏性土,含贝壳碎屑及腐殖质,成分不均;①-2b层吹填土,黄灰色、灰色,软塑—流塑,摇振反应无一缓慢,稍有光泽反应,干强度低,韧性低。该层底部为钱塘江表层新近淤积土,上部为原围垦区表层促淤沉积土及冲填土,主要以软塑—流塑状黏性土夹少量粉土及粉砂为主,含腐殖质,搁置年限约7~10年。③-1淤泥质黏土,灰色,软塑—流塑,饱和,无摇振反应,有光泽反应,干强度高,韧性高,含腐殖质,部分深度处相变为粉质黏土或淤泥质土,局

部夹少量薄层粉土;③-3层淤泥质粉质黏土,灰色,软塑—流塑,饱和,无摇振反应,有光泽反应,干强度中等,韧性中等,含腐殖质及云母碎屑,层状构造,层间夹薄层状粉土;⑤-1层粉土夹粉质黏土,青灰色、灰黄色,稍密—中密,摇振反应迅速,无光泽反应,干强度低,韧性低,含云母碎屑及腐殖质,局部为粉砂,层状构造,夹粉质黏土;⑥-1层黏土,灰绿色、灰黄色,可塑—硬塑,饱和,无摇振反应,有光泽反应,干强度高,韧性高,含铁锰质氧化物;⑥-3层粉土,青灰色、灰黄色,中密,湿—稍湿,摇振反应迅速,有光泽反应,干强度低,韧性低,含云母碎屑,局部为粉砂。土层其主要物理力学性质见表1。

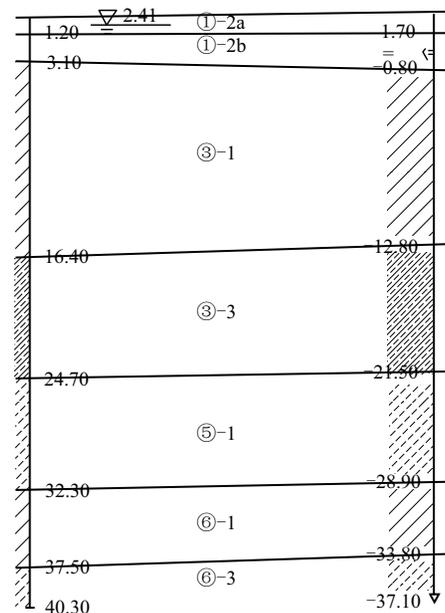


图1 地层剖面图

表1 土层主要物理力学参数

层号	土名	含水量 w/%	天然重度 γ/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	压缩系数 a <sub>0.1-0.2</sub> /MPa <sup>-1</sup>	压缩模量 E <sub>s0.1-0.2</sub> /MPa	固结快剪(峰值强度)	
							黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
①-2a	吹填土	30.2	17.7	0.944	0.40	5.0	8.0	14.0
①-2b	吹填土	33.0	18.9	0.879	0.50	4.2	15.0	12.0
③-1	淤泥质黏土	39.5	18.16	1.055	0.72	2.9	16.4	11.9
③-3	淤泥质粉质黏土	39.3	17.74	1.099	0.69	3.1	16.3	12.4
⑤-1	粉土夹粉质黏土	31.1	18.91	0.848	0.38	4.8	15.5	22.0
⑥-1	黏土	28.3	19.21	0.780	0.24	7.4	33.5	21.5
⑥-3	粉土	34.1	18.72	0.917	0.48	3.9	14.5	22.0

2 地基处理方案及结果分析

2.1 地基处理方案

真空预压处理场地排水板插打方式均呈正方形

布置,插打深度为24~28.5 m不等,间距1.2 m×1.2 m,如图2所示,所采用塑料排水板型号SPB100-C型。采用双排黏土搅拌桩作为四周密封

墙,采用 $\phi 700$ 双头搅拌桩机进行施工,搅拌桩直径700 mm,搭接宽度200 mm,各个分区搅拌桩长度4~7 m不等。本工程双排黏土搅拌桩采用淤泥、泥浆、黏土等配制,黏粒含量应大于15%。泥浆搅拌桩的渗透系数要求小于 $1 \times 10^{-5}$  cm/s。在连续抽真空短一段时间后,预压荷载保持在80 kPa以上,保证地基处理效果良好,要求经真空预压处理后的地基固结度达到85%以上。

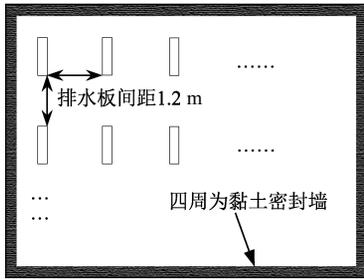
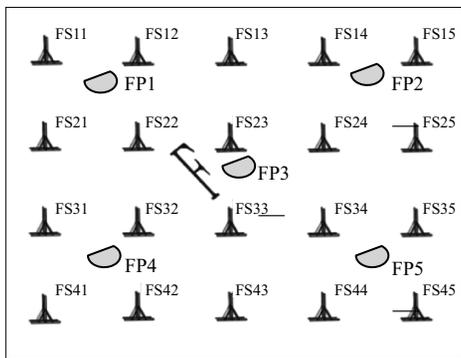


图2 排水板插打形式及密封墙示意图

2.2 监测方案

真空预压试验场地做了全面的地面沉降监测和孔隙水压力监测装置布置,监测装置平面布置图如图3所示(以F试验场地120 m $\times$ 90 m为例)。沉降监测装置每隔30 m放置一个,每天定时测量及统计场地地面沉降数据,所测数据为预压荷载作用下产生的平均沉降量。孔隙水压力监测装置每个测点分别在深度2、5、8、11、14、17、20 m处设置测头,并每天观测各测点不同深度测头所测孔隙水压力,历时真空预压81天。



— 孔隙水监测装置    — 地面沉降监测装置

图3 监测装置平面布置图

2.3 结果分析

本文中地面沉降量不包括真空预压之前施工期间的沉降,仅为真空预压期间抽真空之后产生的地面平均沉降量的总和。将F区块FS12、FS32、

FS33、FS25、FS35五个地面沉降监测点监测产生的平均沉降量绘制图4,可以看出,不同的监测点监测到的地面沉降差异较大,体现出沉降的不均匀性,但整体沉降趋势一致,其中监测到的最大沉降值为672.8 mm,平均值为516.1 mm,可以看出中心位置沉降量较边缘位置沉降量大。对孔隙水压力结果进行分析可以看出,各测头孔隙水压力变化规律一致,随着加固时间的增加,地基中孔隙水压力的消散趋势逐渐的变缓,深层测头监测的孔隙水压力消散值变化较浅层较缓,其中2、5、8 m深度测头孔隙水压力由真空预压加载前初始正孔隙水压力变为负孔隙水压力,如图5所示。

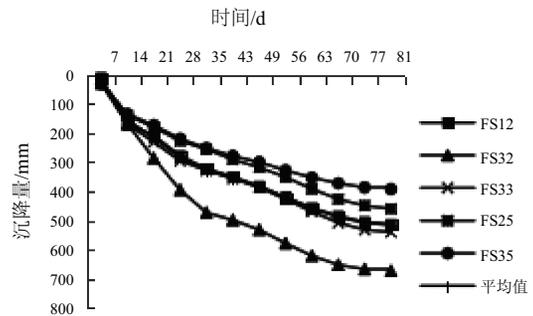


图4 地面沉降-时间关系曲线

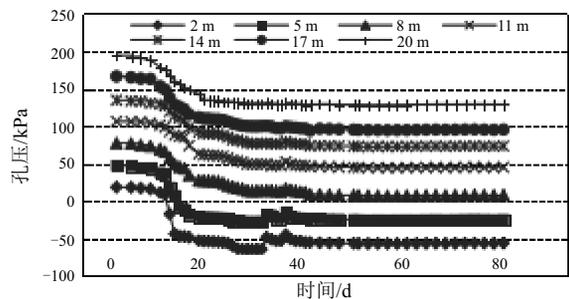


图5 FP1 孔隙水压力变化图

2.3.1 经验法预测地基沉降

基于实测沉降数据来预测真空预压软土地基最终沉降量,就双曲线法和指数曲线法分别预测最终沉降量,并结合两种方法进行固结度计算比较和分析,验证地基处理效果。

双曲线可用式(1)来表示:

$$s_t = s_\alpha + \frac{t - t_\alpha}{\alpha + \beta(t - t_\alpha)} \quad (1)$$

式中: $s_t$ —— $t$ 时刻的沉降量;

$t_\alpha$ ——双曲线起点或拐点处时间;

$s_\alpha$ —— $t_\alpha$ 时刻的沉降量;

$\alpha, \beta$ ——待定系数。

$\alpha, \beta$  为  $\frac{t-t_a}{s_t-s_a} - (t-t_a)$  中的截距和斜率。取前 75 天实测沉降数据作为拟合样本,最后 6 天实测数据作为预留样本检测曲线拟合效果。如图 6 所示,通过实测数据线性回归求得线性回归方程:  $y = 0.0027x + 0.0828$ , 相关系数为 0.9864。

$$\text{对式(1)取极值, } s_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} s_t = s_a + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

根据实测数据取  $s_a = 202.1 \text{ mm} (t = 20 \text{ 天})$ 。

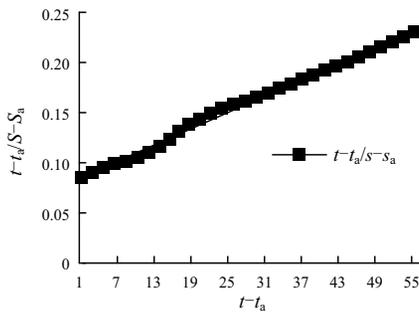


图 6 实测沉降算得的线性图

推算得出该地基处理后最终沉降量:  $s_t = 572.4 \text{ mm}$ , 根据实测资料,停止抽真空后地基沉降量总计为  $504.1 \text{ mm}$ 。经计算,固结度  $U_1 = 504.1/572.4 \times 100\% = 88.07\%$ 。

指数曲线法是指将土体沉降与时间形成的关系曲线用指数曲线来进行拟合,在恒载曲线段上取三点  $(s_1, t_1), (s_2, t_2), (s_3, t_3)$ , 且要满足  $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = \Delta t$ , 计算公式如式(2)所示。

$$s_{\infty} = \frac{s_3(s_2 - s_1) - s_2(s_3 - s_2)}{(s_2 - s_1) - (s_3 - s_2)} \quad (3)$$

式中:  $s_{\infty}$ ——最终沉降量;

$s_1, s_2, s_3$ ——实际监测沉降数据。

$s_1 = 109.4 \text{ mm}$  (2017 年 10 月 19 日地面沉降监测数据);

$s_2 = 406.1 \text{ mm}$  (2017 年 11 月 19 日地面沉降监测数据);

$s_3 = 504.1 \text{ mm}$  (2017 年 12 月 18 日地面沉降监测数据);

经计算,固结度  $U_2 = 90.1\%$ 。

通过指数曲线法与双曲线法算得固结度分别为  $88.07\%$  和  $90.1\%$ , 可以看出真空预压处理效果较好。经双曲线法和指数曲线法推算出真空预压期间各天的沉降量,与实测沉降量相比较,如图 7 所示,可以看出双曲线法更接近实测沉降值,指数曲线法次之。

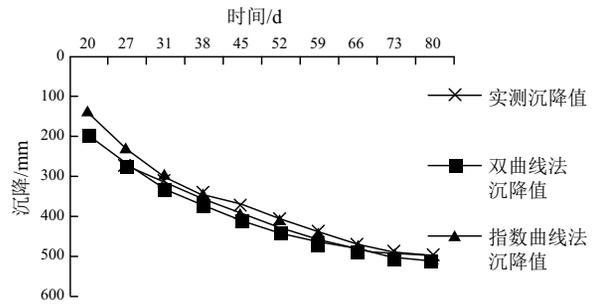


图 7 沉降值对比曲线图

### 2.3.2 孔隙水压力推算固结度

由孔隙水压力压力消散值来求解固结度为:

$$U_t = \frac{\Delta u_t}{P + u_c} \quad (4)$$

式中:  $U_t$ ——计算点某时刻固结度;

$\Delta u_t$ ——计算点某时刻的孔隙水压力实际消散值, kPa;

$P$ ——预压荷载, kPa;

$u_c$ ——预压前超静水压力, kPa。

根据现场试验结果分析,据真空预压孔隙水压力监测数据,所得 FP1、FP2、FP3、FP4、FP5 五个孔隙水压力监测装置各测头土体的固结度,算得各自算术平均值得到综合固结度为, FP1-89.6%, FP2-81.3%, FP3-80.1%, FP4-86.5%, FP5-88.7%, 综合五个监测装置得地基固结度为 85.2%, 在监测过程中,孔隙水压力计不一定能处理得很好,以沉降数据计算固结度较为稳定。根据行业标准及地基处理规范<sup>[11]</sup>, 可以看出地基固结度均满足要求,地基处理效果良好。结合地面实测沉降与实测孔隙水压力所算得地基固结度如表 2 所示。

表 2 地基固结度

方法	双曲线法	指数曲线法	孔隙水压力推算法
固结度 $U$	88.07%	90.1%	85.2%

### 3 结论

根据现场实测沉降和孔隙水压力资料推算地基最大沉降量及固结度,分析得出以下结论:

(1)通过双曲线法和指数曲线法两种方法推算加固地基的最终沉降量,双曲线法的沉降预测值为  $572.4 \text{ mm}$ ,固结度达到  $88.07\%$ ;指数曲线法所推算沉降值为  $559.5 \text{ mm}$ ,固结度达到  $90.1\%$ 。

(2)同一测点不同深度测头的孔隙水压力消散规律具有较好的一致性,由孔隙水压力数据计算的地基固结度为  $85.2\%$ 。

(3)沉降与孔隙水压力监测资料可以很好进行

真空预压加固吹填土地基的效果分析,上述直排式真空预压法达到地基处理要求,是一种高效的吹填土地基处理方法,可为类似工程提供经验。

#### 参 考 文 献

- [1] 朱超,张季超,刘晨.真空预压处理广州南沙区软基的加固深度探讨[J].岩土工程学报,2010(S2):422-425.
- [2] 赵维炳,陈永辉,龚友平.平面应变有限元分析中砂井的处理方法[J].水利学报,1998(6):53-57.
- [3] 夏玉斌,陈允进.直排式真空预压法加固软土地基的试验与研究[J].工程地质学报,2010(3):376-384.
- [4] 陈环.真空预压法机理研究十年[J].港口工程,1991(4):17-25.
- [5] 许胜,王媛.真空预压法加固软土地基理论研究现状及展望[J].岩土力学,2006(10):943-947.
- [6] 潘林有,谢新宇,用曲线拟合的方法预测软土地基沉

降[J].岩土力学,2004(7):1053-1058.

- [7] 朱建才,温晓贵,龚晓南.真空排水预压加固软基中的孔隙水压力消散规律[J].水利学报,2004(8):123-128.
- [8] 张功新,莫海鸿,董志良,等.真空预压中真空度与孔隙水压力关系分析[J].岩土力学,2005,26(12):1949-1952.
- [9] 张功新,莫海鸿,董志良.孔隙水压力测试和分析中存在的问题及对策[J].岩石力学与工程学报,2006,25(s2):3535-3538.
- [10] 刘华强,周金山,陆明志.真空预压法在连云港潮间带软基加固工程中的应用[J].岩土工程技术,2011,25(3):158-161.
- [11] 中华人民共和国行业标准. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

收稿日期:2018-11-21

(上接第91页)

明其组分百分比,大直径筛分网一般在市场上无法统一购置,可自制。其密度试验可采用灌砂法或灌水法在现场完成。

#### 2.5 汲取地区经验

勘察最终是要为设计和施工服务,提供的成果资料除满足现行规范要求外,还应满足施工的可行性要求;填石层对基础施工、土方开挖、地基处理等施工均存在不同程度地影响;故了解地区常用桩型、土方开挖方法、地基处理手段、施工设备、行业习惯、行业认知等因素就尤为重要。如深圳地区,早期很多单位将填石层或包含于填土中的填石亚层(实际上是非层状分布)统一定名为“素填土”层,在报告文字“特殊性岩土”章节中有专门的内容叙述,同时在钻孔柱状图中有亦有专门描述,但很多工程在设计施工过程中还是疏忽填石的存在,导致设计变更和费用增加;现在,区域勘察单位利用“填石”或“素填土(填石)”这种醒目的名字命名,在勘察成果资料中并加以特别强调,在设计伊始就起到了提醒各参建单位的作用,后期施工阶段的“填石纠纷”明显减少,起到了良好的效果。

### 3 结论

填石属于特殊性岩土地层,对工程设计、施工、投资均存在不同程度地影响;为了确保项目的顺利开展,不因填石的存在影响项目正常进行,充分、准确的认知是前提和关键。勘察单位采用合理的勘察手段、针对性的措施,准确地查明填石层的物理特性、力学特性,提出合理、可行的意见和建议能够较大地帮助设计和施工;重视填石对工程建设不利影响的问题前置到勘察阶段,有利于针对性的设计、施工准备和投资预算,对项目顺利开展起到较大的推进作用。

#### 参 考 文 献

- [1] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 张国栋,全国统一建筑工程基础定额应用手册[M].北京:中国建材工业出版社,2002.

收稿日期:2019-01-17