



真空-堆载联合预压法处理吹填淤泥试验研究

龚永康, 蔡建

(中交上海航道勘察设计院有限公司, 上海 200120)

摘要: 真空-堆载联合预压法的实质是将真空预压法的负压固结理论与堆载预压法的正压固结理论进行联合, 使得土体固结达到最大化。通过理论分析, 论述了真空-堆载联合预压下基于孔隙水压力和沉降的平均固结度计算方法。结合大面积吹填淤泥软基处理的工程实际, 通过对孔隙水压力、沉降等进行观测, 提出了有效地控制加载速率与加载周期的方法; 研究了孔隙水压力变化规律, 并结合工程实际进行了平均固结度的验算分析, 表明该计算方法存在一定的合理性。

关键词: 真空-堆载联合预压法; 吹填淤泥; 软基处理

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0238-04

Experimental study on blown filled muck treatment with vacuum combined surcharge preloading method

GONG Yong-kang, CAI Jian

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The essence of vacuum combined surcharge preloading method is to combine negative pressure consolidation theory of vacuum preloading method with positive pressure consolidation theory of surcharge preloading method, and to make the soil's consolidation maximization. The average degree of consolidation calculation method based on pore water pressure and settlement is put forward by theoretical analysis under surcharge preloading condition. Combining with large-area blown filled muck soft foundation treatment engineering practice, loading rate and loading cycle are put forward by observing the pore water pressure and settlement. The pore water pressure change law is studied, and checking calculation of the average degree of consolidation is analyzed combining with engineering practice, and it is proved that the method is reasonable.

Key words: vacuum combined surcharge preloading method; blown filled muck; soft foundation treatment

目前我国吹填成陆工程在不断增多, 许多工程常采用吹填淤泥成陆, 吹填淤泥被吹填在天然淤泥层上, 一般采用排水固结法进行加固。吹填淤泥和天然淤泥均有高含水量、高压缩性、低渗透性、低强度的特性, 对软土地基进行加固是必须的。一种比较经济、有效、合理的地基处理方法是采用抽真空-堆载联合预压法, 在加固区内产生压力差, 使得加固区内的水迅速排出从而达到加固软土的目的。本文对真空-堆载预压加固软基的机理进行探讨, 并结合工程实际观测资料进行

地基平均固结度的推算分析, 提出较为合理的计算方法^[1]。

1 基本原理

真空预压法与堆载预压法都是排水固结法^[2-6], 前者的负压排水固结与后者的正压排水固结的过程与目标是相似的, 两者的本质都是通过控制土体中的孔隙水压力 u 的变化来影响土骨架间的有效应力 σ' 的大小, 将荷载传递给土骨架承担, 增大土体的承载能力。真空-堆载联合预压法将两者相

收稿日期: 2012-10-10

作者简介: 龚永康(1983—), 男, 工程师, 从事岩土工程检测和监测。

结合, 具有双重处理效果, 真空预压将土体和外界形成一个压力差 Δp , 形成负压空间, 使得孔隙水向排水通道渗流; 堆载预压将荷载传递给孔隙水压力 u , 形成超静孔压, 也使得孔隙水向排水通道渗流, 两者联合作用, 使得孔隙水压力 u 加速消散, 孔隙水加速向排水通道渗流, 有效应力 σ' 加速增长, 土体加速固结。

2 理论推导

2.1 基于沉降观测推算土体固结度

对于土体沉降量的计算, 土力学中一般采用分层总和法。单向压缩情况下分层压缩量可以用下列3式表示:

$$s_i = \frac{a_i \bar{\sigma}_i}{1 + e_{0i}} h_i \quad (1)$$

$$s_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{E_{si}} h_i \quad (2)$$

$$s_i = \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (3)$$

式中: a_i 为某层土的压缩系数; $\bar{\sigma}_i$ 为某层土的平均附加应力; e_{0i} 为某层土初始孔隙比; E_{si} 为某层土压缩模量; e_{1i} 为某层土某一时刻孔隙比; h_i 为某层土厚度。

总沉降量为: $S = \sum s_i$ 。计算结果通常会乘以一个修正系数 m_s 。

工程实际中, 需要通过实际观测的沉降推算某一时刻的固结度。首先要确定最终沉降量 S_∞ , 最终沉降量的确定有以下方法:

2.1.1 三点法推算最终沉降量 S_∞

$$S_\infty = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)} \quad (4)$$

式中: S_1, S_2, S_3 满载后, 实测沉降曲线中对应于 t_1, t_2, t_3 时刻的沉降量, t_1, t_2, t_3 满足 $t_1 - t_2 = t_2 - t_3 = \Delta t$ 。

2.1.2 经验双曲线法推算最终沉降量 S_∞

$$S_\infty = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (6)$$

式中: S_0 为满载开始时沉降量; S_t 为满载后某一时刻沉降量; t 为满载时间; α, β 为待定系数, 由图1所示的分析曲线进行计算。

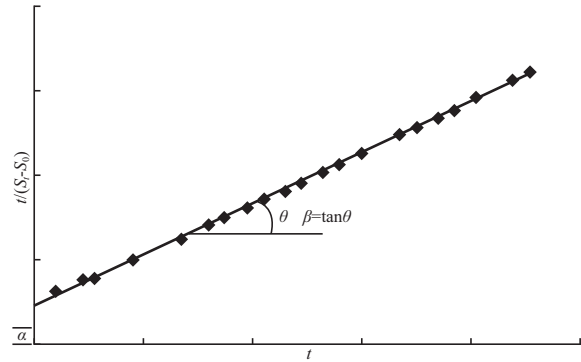


图1 图解法求解 α, β 值

最终沉降量推算完成后, 土体任一时刻固结度 U_t 的计算为:

$$U_t = \frac{S_t}{S_\infty} \quad (7)$$

2.1.3 拟合公式

根据各种方法, 也有拟合公式:

$$U_t = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (8)$$

一般地, $\alpha = 1, \beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2}$ 。

2.2 基于孔压观测推算土体固结度

真空预压中, 如果以孔隙水压力 u 的消散来定义固结度, 土体的固结度 U 可以定义为有效应力 σ' 与总应力 σ 的比值:

$$U = \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (9)$$

真空预压中, 有效应力即为消散的孔隙水压力, 则:

$$U = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{\Delta u}{\sigma} \quad (10)$$

式中: σ 为附加总应力; σ' 为有效应力; Δu 为消散的孔隙水压力。

根据孔压推算固结度的拟合公式为 $U_t = 1 - \alpha e^{-\beta t}$,

其中: $\alpha = 1, \beta = \frac{\ln \frac{u_1}{u_2}}{t_2 - t_1}$ 。

真空预压的同时, 有堆载预压, 堆载压力为 p , 堆载压力 p 引起的孔隙水压力的增量即超静孔压为 Δu_1 , 附加总应力的增量即为 p , 真空预压引起的 Δu 为负的超静孔压, 将两者结合, 固结度 U 为:

$$U = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{\Delta u + \Delta u_1}{\sigma + p} \quad (11)$$

3 现场试验

3.1 工程概况

3.1.1 试验区地质条件

江苏连云港某吹填淤泥软基处理工程，加固区浅层为吹填作用形成的吹填淤泥层，厚约5 m，

其下为原状海相淤泥层，厚度约10 m。表1和表2为吹填淤泥层和海相淤泥层的物理力学参数。从表1可以看出，吹填淤泥土的含水率在100 %左右，孔隙比大于2，无法测定压缩系数、压缩模量等力学指标，属于典型的超软高含水量软土。

表1 吹填淤泥层土体物理指标

| 含水率 W /% | 比重 G_s | 湿密度 ρ / ($g \cdot cm^{-3}$) | 孔隙比 e | 液限 I_L /% | 塑限 I_P /% | 颗粒分析(粒径含量)/% | | |
|------------|-------------|---------------------------------------|-----------|-------------|-------------|--------------|------------------|-----------|
| | | | | | | >0.075 mm | 0.075 ~ 0.005 mm | <0.005 mm |
| 90 ~ 100 | 2.73 ~ 2.74 | 1.49 ~ 1.60 | 1.9 ~ 2.6 | 46 ~ 49 | 25 ~ 27 | 1 | 55.5 | 43.5 |

表2 海相淤泥层土体物理指标

| 层号 | 岩土名称 | 含水量 W /% | 天然密度 ρ / ($g \cdot cm^{-3}$) | 孔隙比 e | 液性指数 I_L | 压缩系数 a / MPa^{-1} | 压缩模量 E_s / MPa | 标贯击数 N / 击 | 直剪快剪 | |
|-----------------|------|------------|--|---------|------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|
| | | | | | | | | | 内聚力 C / kPa | 内摩擦角 ϕ / $^\circ$ |
| ① ₋₁ | 淤泥 | 68.0 | 1.59 | 1.906 | 2.12 | 1.61 | 1.84 | | 6 | 0.0 |
| ① ₋₂ | 淤泥 | 81.6 | 1.54 | 2.218 | 1.60 | 2.96 | 1.16 | | 14 | 0.4 |

3.1.2 试验区加固方案

设计要求处理后的地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 80$ kPa。为达到承载力要求，采用真空-堆载联合预压法对吹填淤泥层和海相淤泥层进行地基加固，施工方案为：铺设编织布、土工格栅，铺设竹架，铺设中粗砂垫层，插设塑料排水板，布设抽真空管路，铺设两层密封膜，真空预压，堆载，卸载。

3.1.3 现场观测方案

根据试验需要，同时为了揭示真空-堆载联合预压过程中吹填淤泥和海相淤泥的固结特征，选择长300 m，宽50 m的区域进行现场试验，布置表层沉降板、孔隙水压力计等设备。

表层沉降板布置4个，均布于区域各处；孔隙水压力计埋设深度位于地表以下，每3 m布置1只，1组布置6只，一共布置4组。

3.2 现场观测成果

3.2.1 沉降观测

自抽真空开始，对表层沉降进行观测，典型曲线见图2，抽真空开始后，沉降速率稳步增长，

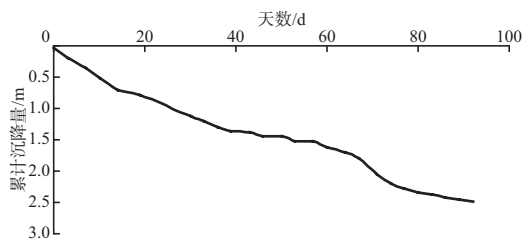


图2 表层沉降实测曲线

当达到相对缓和趋势后，70 d时进行堆载预压，砂的堆载高度约1.5 m，表层沉降量随之加速增长，加载稳定后沉降速率减缓，而后趋于稳定。

3.2.2 孔隙水压力观测

自抽真空开始，对孔隙水压力进行观测。对3.0 m，9.0 m，15.0 m处的超静孔隙水压力消散状况进行分析，如图3所示，超静孔压自抽真空开始一直是负增长，孔压消散转化为有效应力；70 d时随着堆载的施加，产生了正的超静孔压，随着堆载的结束，超静孔压逐步消散。

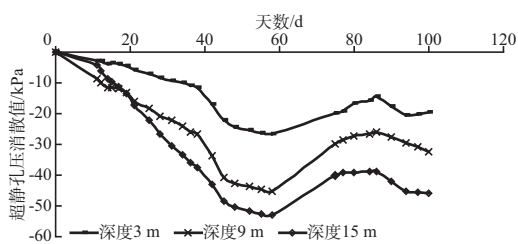


图3 超静孔隙水压力实测曲线

3.3 计算分析

3.3.1 结合实测沉降与孔压的计算

采用不同方法并结合实测沉降与孔压的计算结果见表3。

根据预压时间及实测沉降量，进行最终沉降量 S_{∞} 及平均固结度的计算，经过比较，三点法和拟合公式的误差较大，仅作参考使用；经验双曲线法计算的最终沉降量 S_{∞} 约为2.86 m，加载后固

表3 计算分析

| 计算方案 | 所用方法 | 实测值沉降量/m | 边界条件 | 每次荷载下最终沉降量 S_{∞} 推算/m | 平均固结度 U_t 推算/% | 工后沉降量推算/m |
|--------|--------------|------------------|--|------------------------------|------------------|-----------|
| 基于实测沉降 | 三点法: 式(4) | 2.48 (加载92 d) | 真空预压 | 2.01 | 76.1 | 0.48 |
| | 经验双曲线法: 式(5) | | $\alpha=19.9, \beta=0.4$ | 2.86 | 86.7 | 0.38 |
| | 拟合公式: 式(8) | | $\alpha=1, \beta=7.6 \times 10^{-7}$ | 2.61 | 95.0 | 0.13 |
| 基于实测孔压 | 拟合公式: 式(11) | | $\Delta u=26\text{kPa}, \Delta u_1=12\text{kPa}$ | | 81.0 | |

结度平均值约在86.7%，处于固结过程中；根据预压时间及实测孔隙水压力值，进行固结度的计算，推算平均固结度在81%左右，与根据实测沉降推算的平均固结度基本一致。

3.3.2 加卸载控制标准的建议

堆载施加后，表层沉降急剧增长，日沉降速率最大值超过3 cm/d；超静孔压增长，日增长速率超过2.0 kPa/d。从试验中发现，加载速率过快对区域外未进行抽真空的区域有影响，导致相邻区域软土隆起，搭设好的排水板头与滤管脱离，影响其他区域的正常施工；同时，本区域局部软弱位置也会出现隆起等现象，导致排水通道阻塞，影响加固效果。因此，加载速率严格按照规范要求，结合工程实际测量，日沉降速率最大值必须小于3 cm/d；超静孔压日增长速率必须小于2.0 kPa/d，待两个观测速率均远小于上述值且趋于稳定时进行下一级加载，开始新的加载周期。对于卸载，按规范日沉降速率平均值小于0.2 mm/d。

4 结语

真空预压和堆载预压处理软土地基的固结度计算目前已经有比较成熟的理论基础。而真空-堆载联合预压法处理软土地基，不是真空预压和堆载预压的简单叠加，所以，根据实测沉降和孔隙水压力推算地基土平均固结度的许多经验公式不一定适用。这里通过工程实际的计算与分析，发现实测沉降计算固结度的三点法和拟合公式对单一加载过程较为适用，且误差较大；经验双曲线法对真空-堆载联合预压的整体加载过程也能适用，且误差较小。基于实测孔压推算固结度有时也能够得到与基于实测沉降基本一致的结论，但

孔压观测影响因素太大；基于实测孔压推算土体平均固结度有待进一步的研究。

1) 对真空-堆载预压加固机理进行了阐述，认为真空-堆载联合预压加固软基的本质是负压排水固结和正压排水固结的结合加速孔隙水压力转化为有效应力。

2) 论述了真空-堆载联合预压下基于实测沉降和实测孔隙水压力的平均固结度计算方法。

3) 结合大面积吹填淤泥软基处理的工程实际，通过对沉降、孔隙水压力等进行观测，用各方法进行了平均固结度的计算分析和比较；并结合工程实际提出了有效地控制加载速率与加载周期的方法。

参考文献:

- [1] 娄炎, 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [2] 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.
- [3] 张功新, 莫海鸿, 董志良, 等. 真空预压中真空度与孔隙水压力的关系分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 949-1 952.
- [4] 曹宁, 彭劼, 彭如海, 等. 真空-堆载联合预压法加固高速公路路基: 表面沉降测试和数值分析[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2001, 2(15): 81-85.
- [5] 刘汉龙, 陈永辉, 彭吉力. 真空-堆载联合预压法的研究现状及其在高速公路软基加固中的应用[J]. 河海大学学报, 2001, 29(S1): 21-26.
- [6] 彭劼, 刘汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报, 2003, 31(5): 560-563.

(本文编辑 武亚庆)