



## 吹填淤泥排水加固沉降计算的新方法

郑新亮<sup>1</sup>, 武霄<sup>2</sup>, 陈允进<sup>3</sup>

(1. 中交四航工程研究院, 广东 广州 510230; 2. 中交天津港湾工程研究院, 天津 300222;  
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 在大面积围填海造地工程中, 随着施工技术的发展, 利用吹填淤泥作为填料得到了大量的应用, 而相应的沉降计算还无法满足实际需要, 沉降量只能凭借经验预估。利用饱和土的水土二项性进行分析, 通过计算土体加固前后含水率的变化, 从而进一步计算土体的沉降量, 得到沉降计算公式, 并利用实际工程验证了计算公式的正确性。

**关键词:** 真空预压; 浅表层; 含水率; 淤泥; 沉降计算

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0159-04

### New method of settlement calculation for drainage reinforcement of dredged sludge

ZHENG Xin-liang<sup>1</sup>, WU Xiao<sup>2</sup>, CHEN Yun-jin<sup>3</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Tianjin Port Engineering Institute Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300222, China;

3. CCCC Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** In the large area enclosed land reclamation project, with the development of construction technology, the use of dredged sludge as filler gets a lot of applications. But the corresponding settlement calculation can not meet the actual needs, and the estimated settlement amount only by virtue of experience. Using the two-phase of saturated soil's water and soil properties, we calculate further the amount of soil subsidence and obtain the settlement formula by calculating the change in the moisture content of the soil before and after reinforcement, which is validated by actual project's settlement monitoring data.

**Key words:** vacuum preloading; surface-layer improvement; water content; sludge; settlement calculation

在中国沿海地区进行着大规模的围填海造地工程, 常规填筑材料如砂、石、土等面临日益紧缺的状态。随着施工技术的发展, 利用吹填淤泥作为填筑材料得到了大量的应用, 解决了清淤工程的淤泥沉积和堆填场地问题, 又解决了围海造陆工程的吹填材料困难。

吹填淤泥的加固方法主要包括化学加固和排水加固两种, 基于成本和工艺的考虑, 化学加固方法在大面积围海填筑工程中并没有得到应用。我国早期的吹填淤泥主要加固方法是利用自然晾晒后形成的硬壳层作为施工作业平台, 进行真空

预压或堆载预压加固, 这种方法需要长期的晾晒, 受天气因素制约严重, 质量和成本也没有优势。

近年来浅表层加固技术得到很大的发展, 浅表层加固方法是在新近吹填的淤泥表面上进行真空预压处理, 加固深度通常在 4~6 m, 优点是不需要长期晾晒、加固后形成硬壳层可作为后续施工平台、成本可控等。由于新近吹填淤泥的含水率很高, 通常大于 100%, 处于流动状态, 无法进行现场力学试验或取土室内试验, 常规的设计计算方法如固结度计算、沉降计算、土体强度和承载力计算等都存在很大的困难, 只能利用经验预

收稿日期: 2013-12-13

作者简介: 郑新亮 (1970—), 硕士, 高级工程师, 从事软土地基的科研、设计和施工管理。

估, 本文通过分析土体加固前后含水率的变化, 利用饱和土水二项性分析得到沉降计算公式, 并利用实际工程实测数据进行验证。

### 1 常规沉降计算方法

根据现行《港口工程地基规范》<sup>[1]</sup>, 沉降计算采用分层总和法, 最终沉降量计算公式如下:

$$S_{d\infty} = m_s \sum \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \quad (1)$$

式中:  $S_{d\infty}$  为地基最终沉降量设计值 (cm);  $m_s$  为修正系数, 按经验选取或由现场试验确定;  $e_{1i}/e_{2i}$  分别为第  $i$  层土受平均自重应力设计值 ( $\sigma_{cdi}$ ) 和平均最终应力设计值 ( $\sigma_{cdi} + \sigma_{zdi}$ ) 压缩稳定时的孔隙比设计值, 可取均值;  $\sigma_{cdi}$  为第  $i$  层土顶面与底面的地基自重应力平均值的设计值,  $\sigma_{zdi}$  为第  $i$  层土顶面与底面的地基垂直附加应力平均值的设计值;  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度 (cm)。

在原始地基处于超固结的情况下, 自重应力至先期固结压力区段应按回弹再压缩的压缩曲线计算沉降量; 原始地基处于欠固结的情况下, 应将先期固结压力位置作为沉降计算的起点。欠固结应力应分层计算, 分层应力应按下列式计算:

$$p_i = \sum \rho_i g h_i - p_{ci} \quad (2)$$

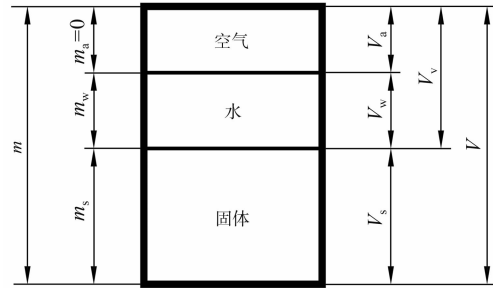
式中:  $p_i$  为由于欠固结作用, 在第  $i$  层土产生的欠固结应力 (kPa);  $\rho_i$  为第  $i$  土层的密度, 地下水位以下用浮密度 ( $t/m^3$ );  $h_i$  为第  $i$  土层的厚度 (m);  $p_{ci}$  为第  $i$  土层的先期固结压力。

分析规范公式可知,  $e-p$  曲线以及前期固结压力  $P_c$  是计算沉降的关键。而对于新吹填淤泥土, 由于无法取样进行力学试验, 得不到  $e-p$  曲线, 无法应用上述公式进行沉降计算, 这时就需要有新的计算模型和计算公式了。

## 2 利用加固前后土体含水率的变化计算沉降

### 2.1 土的三相组成

土是由固体颗粒、水和气体 3 部分所组成的三相体系 (图 1)<sup>[2]</sup>。



注:  $V$  为土的总体积,  $V_a$  为气体体积,  $V_w$  为水的体积,  $V_s$  为土的固体颗粒实体部分体积,  $V_v$  为土的孔隙部分体积,  $m$  为土的总质量,  $m_w$  为水的质量,  $m_s$  为固体颗粒质量。

图 1 土的三相体系

对于新近吹填的淤泥来说, 含水率很高, 不考虑表面经过晾晒开裂的土层, 绝大部分土体中的气体体积可以假定为 0, 这样土体就由水、土二相组成。

### 2.2 与本文沉降计算有关的土体参数定义

土粒比重定义为土粒质量与同体积蒸馏水在  $4^\circ\text{C}$  时的质量之比, 即

$$G_s = \frac{M_s}{V_s(\rho_w^{4^\circ\text{C}})} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$  为土粒密度;  $\rho_w^{4^\circ\text{C}}$  为  $4^\circ\text{C}$  时纯蒸馏水的密度。

土的含水率定义为土中水的质量与土粒质量之比:

$$\omega = \frac{m - m_s}{m_s} = \frac{m_w}{m_s} \quad (4)$$

### 2.3 沉降计算公式推导

假定土的质量为  $m_s$ , 则水的质量为  $m_w = m_s \omega$ , 总体积为

$$V = V_s + V_w = \frac{m_s}{G_s \rho_w} + \frac{m_s \omega}{\rho_w} \quad (5)$$

假设加固前的土的状态定义为 1, 加固后土的状态定义为 2, 加固前后土的体积变化为

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_{w1} - V_{w2} = \frac{m_s(\omega_1 - \omega_2)}{\rho_w} \quad (6)$$

体积变化率为

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{\frac{m_s(\omega_1 - \omega_2)}{\rho_w}}{\frac{m_s}{G_s \rho_w} + \frac{m_s \omega_1}{\rho_w}} = \frac{(\omega_1 - \omega_2) G_s}{1 + \omega_1 G_s} \quad (7)$$

假定土单元底面积不变, 则体积变化率等于沉降率, 即

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta h}{h} \quad (8)$$

利用分层总和法计算沉降量

$$s_d = m_s \sum \frac{(\omega_{1i} - \omega_{2i}) G_s}{1 + \omega_{1i} G_s} h_i \quad (9)$$

式中:  $s_d$  为地基沉降量设计值, 如果  $\omega_2$  使用的是加固后的最终数值, 则  $s_d$  就是最终沉降量;  $m_s$  为沉降修正系数;  $\omega_{1i}$ ,  $\omega_{2i}$  为第  $i$  层土的加固前后的含水率;  $h_i$  为第  $i$  层土厚度。

式(9)即为根据含水率的变化计算沉降量的公式,  $m_s$  为沉降修正系数, 影响  $m_s$  数值的因素包括土体的侧向位移、瞬间沉降、次固结沉降等, 根据地区经验和工程经验取值, 需要注意的是本公式中的含水率是土中水的质量与土粒质量之比, 没有用百分比表示, 所以计算时要注意试验数据中含水率的表示方法。

#### 2.4 参数的来源和选择

式(9)中涉及的参数有加固前后含水率  $\omega_1/\omega_2$ , 土粒比重  $G_s$  以及经验修正系数  $m_s$ 。其中  $m_s$  的取值由于没有统计数据, 要逐步积累经验; 含水率  $\omega_1$  和土粒比重  $G_s$  可以在常规土工室内试验中得到; 目前常规勘察无法得到的是加固后的含水率  $\omega_2$ , 有3种方法可以确定  $\omega_2$  数值:

1) 土体室内压缩试验得到  $\omega-p$  曲线 (图2), 该曲线类似于  $e-p$ , 查图可得到  $\omega_2$ 。

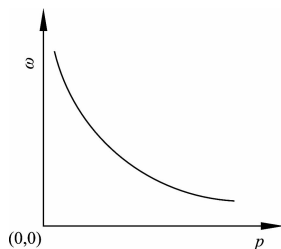


图2  $\omega-p$  示意曲线

$\omega-p$  曲线与  $e-p$  曲线是有区别的, 理论上  $e$  和  $\omega$  可以互换, 但实际上  $e-p$  曲线是力学试验, 对取土要求比较严格, 土体不能受到破坏或扰动, 对

新近吹填的淤泥来说, 无法得到原状土样,  $e-p$  曲线也同样无法得到; 而  $\omega-p$  曲线对土样要求不同, 扰动土同样可以使用, 而且室内试验时不需要过程资料, 只需要某一压力下的最终含水量, 所以试验手段可以实现。

由于  $\omega-p$  曲线要求的某一压力下的最终含水量试验已经对土体造成了破坏, 所以就需很多土样储备, 才能得到相对完整的  $\omega-p$  曲线, 当然具体试验方法可以探讨。

2) 在没有  $\omega-p$  曲线的情况下, 可根据地区经验取值。

3) 根据文献[3], 液限与加固后土体的液性指数成正比关系, 室内试验可得到相应土体液限, 进一步得到加固后的液性指数, 反算含水率。

### 3 实际工程验证

#### 3.1 工程概况

温州丁山垦区某吹填及软基处理工程<sup>[4]</sup>在海堤内侧, 场址区所属地貌单元为浙东南滨海区河口相冲海积平原。场地原为围垦淤积形成, 场地地形相对平坦, 区内沟汊、养殖塘密布。区间道路高程一般为 2.8 ~ 3.5 m, 沟汊、养殖塘深度一般为 0.5 ~ 1.5 m。吹填淤泥高程为 4.9 m, 吹填淤泥层平均厚度约 3.0 m。地块区设计要求加固后地表 0 ~ 1.5 m 范围内地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 50$  kPa, 加固后地面高程为 4.0 m。

新吹填淤泥含水率很高, 处于流动状态, 淤泥的主要指标见表1。

表1 吹填淤泥主要指标

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e_0$	液性指数 $I_L$
108.2 ~ 129.7	1.36 ~ 1.47	100	2.99 ~ 3.58	4.28 ~ 5.30

#### 3.2 实测沉降数据

地表沉降随时间变化见图3, 该区沉降最大值为 117.5 cm, 最小值为 85.8 cm, 不均匀沉降达 31.7 cm, 原因是该区内有数道田埂, 其上的

吹填淤泥层较薄,因此沉降量较小,该部分数据本文验证时需要剔除。加固完成时该区累计沉降量平均值为104.1 cm,整个吹填泥层厚度压缩了约1/3。

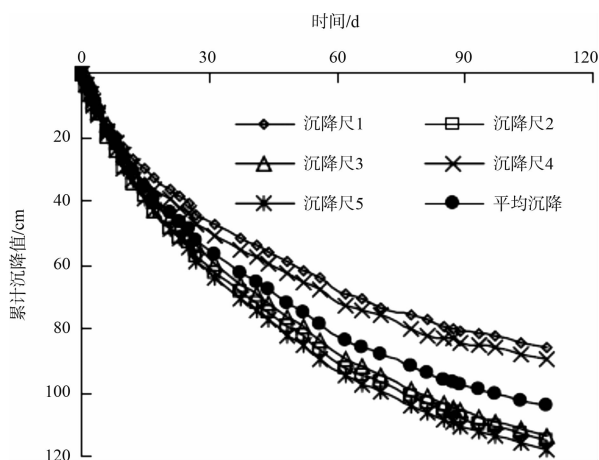


图3 沉降-时间变化曲线

### 3.3 加固后取土试验结果

取土方式是在同一孔内沿深度每0.5 m取1个土样,取至2 m深,整个加固区取土数据统计后平均值见表2。

表2 加固后土体主要物理指标

含水率 $\omega$ /%	土粒比重 $G_s$	液限 $W_L$ /%	液性指数 $I_L$
54.90	2.75	46.76	1.41

### 3.4 沉降计算验证

根据沉降计算公式(9),打设排水板深度3.0 m,在计算沉降深度3.0 m范围内都是新吹填淤泥,材料均一,所以计算沉降不需要分层,则最终沉降量为1.103 m。

由于代入公式计算的 $\omega_2$ 是加固后的实测数值,该数值反映了当前状态下的加固效果,已包含了未完全固结的因素,计算结果符合现场实测数据,证明了公式的准确性。

## 4 结论

软土排水加固的作用机理是利用内外压差形

成渗流,降低土体孔隙水含水率,达到强度增长的目的。而对饱和软土来说,在不考虑瞬间沉降和工后蠕变变形的因素下,根据体积守恒,水分排出体积就等于土体的体积压缩量,本文利用该原理推导出沉降计算公式,并经工程实例验证有效。

在沉降计算公式中,参数 $\omega_1$ 和 $G_s$ 可在勘察阶段得到,参数 $\omega_2$ 需要根据 $\omega-p$ 曲线得到,如果没有 $\omega-p$ 曲线,则根据周边土体或地区经验取值,或根据液限与液性指数的关系取值。与利用 $e-p$ 曲线计算最终沉降不同,公式(9)中 $\omega_2$ 的数值定义决定了沉降量的定义,如果 $\omega_2$ 是在一定压力下的最终含水率,则 $s_d$ 就是最终沉降量;如果 $\omega_2$ 是完工时的值,则 $s_d$ 就是完工时的沉降量。参数 $m_s$ 根据地区经验取值,因 $m_s$ 与规范中的意义并不完全一致,目前还没有适当经验数值,可暂定0.9~1.2,留待将来工程实践中完善。

本文针对新吹填淤泥进行分析计算,但公式的原理说明该公式同样适用于其他饱和软土,并且并不区分正常固结、超固结、欠固结等情况,适用范围广,特别在超固结或欠固结情况下,计算的结果比规范公式更准确,过程更简单,值得推广使用。

### 参考文献:

- [1] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [2] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [3] 郑新亮,董志良,武霄.排水加固法加固软土液性指数变化规律的研究[J].水运工程,2014(7):145-147.
- [4] 丁明武,陈平山,林涌潮.浅表层加固技术在新吹填淤泥地基处理中的应用[J].水运工程,2011(10):132-136.

(本文编辑 武亚庆)