

· 地基与基础 ·



# 参数变化对流泥地层浅层加固 沉降与固结的影响

刘吉福<sup>1,2</sup>, 蒋永春<sup>3</sup>

(1. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519070; 2. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442;  
3. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对流泥地层浅层加固的沉降和固结度特点, 根据已有研究成果, 推导得到压缩模量、渗透系数、固结系数、排水路径与固结应力的关系式, 使沉降和固结分析可以考虑沉降和固结参数随固结应力的变化, 利用涂抹效应考虑了土柱效应对固结的影响, 并考虑了排水板弯曲对固结的影响。工程算例表明, 流泥地层固结系数随有效固结压力增大而增大, 土柱可以加快排水固结, 应变固结度大于应力固结度。对于浅层加固, 可以不考虑排水板弯曲、加固层厚度减少对固结的影响。

**关键词:** 流泥地层; 浅层加固; 固结系数; 土柱; 排水板弯曲

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0143-06

## Influence of parameters change on settlement and consolidation of slurry stratum treated by shallow improvement

LIU Ji-fu<sup>1,2</sup>, JIANG Yong-chun<sup>3</sup>

(1. CRCC Harbor & Channel Engineering Group Co., Ltd., Zhuhai 519070, China;

2. CRCC Harbor & Channel Engineering Bureau Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511442, China;

3. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Equations between compression modulus, osmotic coefficient, consolidation coefficient, seepage distance and effective consolidation stress are derived based on present results of research and considering characteristics of consolidation and settlement of shallow improvement of slurry stratum. Then change of consolidation and settlement parameters due to effective consolidation stress can be taken into account. The effect of soil column to consolidation is taken into account referring to the smear effect. The influence of bending drainage on consolidation is also analyzed. It is shown that the consolidation coefficient increases along with effective consolidation stress, the soil column is beneficial to consolidation, and the strain degree of consolidation is bigger than the stress degree of consolidation. The influence of bending drainage and decrease of thickness on consolidation can be neglected.

**Keywords:** slurry stratum; shallow improvement; consolidation coefficient; soil column; bending drainage

围海造陆不但是沿海滩涂治理的一种常用措施, 也是增加土地资源的有效途径。围海造陆吹填土含水率通常为 110% ~ 130%, 为流泥。流泥地层常采用浅层加固<sup>[1-4]</sup>。浅层加固沉降和固结分析存在以下难点:

1) 流泥压缩性很大, 其渗透系数、压缩模

量、固结系数、排水路径等均随有效应力发生较大变化<sup>[5-6]</sup>, 采用普通地基沉降和固结分析方法误差较大。

2) 虽然流泥的  $e-\ln\sigma_c$  仍然接近直线 (图 1 是根据文献 [6] 试验数据绘制的)<sup>[5-7]</sup>, 但是初始孔隙比对应的应力难以确定, 难以采用  $e-\ln\sigma_c$  法。

收稿日期: 2014-03-31

作者简介: 刘吉福 (1971—), 男, 博士, 教授级工程师, 主要从事港口与航道工程的施工、勘察设计、科研等工作。

3) 浅层加固时土柱效应明显<sup>[8-9]</sup>。如何考虑土柱对固结的影响是个难题。

针对浅层加固沉降和固结分析存在的难点, 推导得到渗透系数、压缩模量、固结系数与有效固结应力的关系式, 提出浅层加固沉降和固结分析方法。

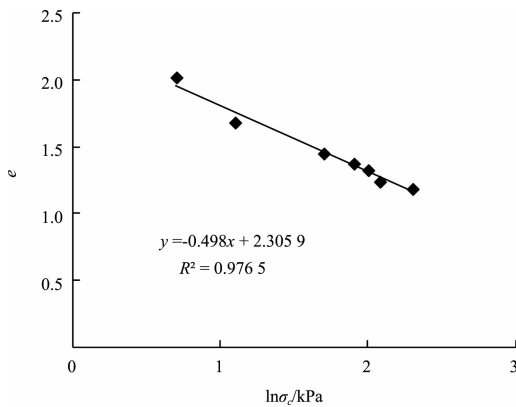


图1 流泥  $e-\ln\sigma_c$  曲线

## 1 沉降分析

### 1.1 前期固结压力

压缩试验表明流泥的  $e-\ln\sigma_c$  曲线基本为直线<sup>[5-7]</sup>, 即

$$e = e_0 - C_c \ln \frac{\sigma_c}{p_c} \quad (1)$$

式中:  $e_0$  是初始孔隙比;  $C_c$  是对应  $e-\ln\sigma_c$  曲线的压缩指数;  $\sigma_c$  是有效固结压力;  $p_c$  是前期固结压力。

$e_0$  可通过钻探或浮泥提取器取样测试得到<sup>[10-11]</sup>。流泥含水量很大时, 压缩试验难度和误差都较大, 通常采取措施使其含水量小于 100% 后进行压缩试验, 因此流泥的  $p_c$  很难测试, 可利用下式得到:

$$p_c = \sigma_{c1} \exp\left(-\frac{e_0 - e_1}{C_c}\right) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{c1}$  和  $e_1$  是压缩曲线上的一点。

### 1.2 压缩模量

浅层加固时, 加固层厚度变化较大, 为方便计算, 沉降计算时采用初始厚度, 因此采用对应  $e_0$  的压缩模量, 即

$$E_s = \frac{(1 + e_0) d\sigma_c}{de} = \frac{\sigma_c(1 + e_0)}{C_c} \quad (3)$$

式中:  $E_s$  是对应  $\sigma_c$  的压缩模量。可见,  $E_s$  与  $\sigma_c$  成正比。

## 1.3 沉降

沉降计算采用分层总和法, 并考虑压缩模量随压力的变化。t 时的沉降为:

$$S_t = m_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i C_{ci}}{1 + e_{0i}} \ln \frac{p_i}{p_{ci}} \quad (4)$$

$$p_i = p_v U_{vi} + U_{wi} \sum_{j=1}^i \rho'_j g \Delta z_j \quad (5)$$

式中:  $m_s$  是沉降修正系数;  $\Delta z_i$  是第  $i$  层土的厚度;  $p_i$  是第  $i$  层土处的有效应力;  $p_v$  是真空度;  $U_{vi}$  是第  $i$  层土对应  $p_v$  的固结度;  $U_{wi}$  是第  $i$  层土对应土体自重的固结度;  $\rho'_j$  第  $j$  层土的浮密度。

$e-\sigma_c$  曲线法是适用性最强的沉降计算方法, 浅层加固也可采用  $e-\sigma_c$  法计算沉降:

$$S = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} \Delta z_i \quad (6)$$

式中:  $e_{1i}$  为第  $i$  层土对应  $p_i$  的孔隙比。

## 2 固结分析

### 2.1 渗透系数

研究表明, 土体渗透系数与孔隙比的关系为<sup>[7,12]</sup>,

$$e = e_0 + C_k \ln \frac{k}{k_0} \quad (7)$$

式中:  $C_k$  是渗透指数;  $k$  是对应  $e$  的渗透系数;  $k_0$  是对应  $e_0$  的渗透系数。

结合式(1)和式(7)可得

$$k = k_0 \left(\frac{p_c}{\sigma_c}\right)^{\frac{C_c}{C_k}} \quad (8)$$

相对其他区域的土体, 排水体周围的土柱孔隙比小、渗透系数小、压缩模量大, 与插板涂抹区类似。固结分析时可将土柱看作涂抹区。试验表明土柱直径  $d_s$  大约为 30 ~ 50 cm, 其不排水抗剪强度与其他区域强度的比值  $R_c$  约为 1.5 ~ 2.5<sup>[2,8-9]</sup>。结合软黏土不排水抗剪强度与固结有效应力的关系<sup>[13]</sup>, 可得:

$$R_k = R_c^{\frac{C_c}{C_k}} \quad (9)$$

式中:  $R_k$  为其他区域与土柱渗透系数的比值;

$R_c$  为土柱与其他区域不排水抗剪强度的比值。

可先对各层土的  $C_c$  和  $C_k$  平均后再计算  $R_c$ 。

浅层加固后排水板典型形状见图 2, 根据董志良等<sup>[14]</sup> 的试验成果可得图 3。



图 2 地基处理后的排水板形状

由图 3 可见, 排水板纵向通水量与弯曲率近似为线性关系。弯曲最严重处决定了排水板的纵向通水量, 排水板实际的纵向通水量可采用下式估计:

$$q_w = q_{w0} (1 - ab\varepsilon_{\max}) \quad (10)$$

式中:  $q_w$  为纵向通水量;  $q_{w0}$  为未弯曲时纵向通水量;  $a$  为考虑排水板现场褶皱与测试时弯曲的区别、现场褶皱不均匀等因素的系数;  $b$  为排水板弯曲率-纵向通水量试验拟合参数;  $\varepsilon_{\max}$  为加固深度内土体最大应变。由  $q_w$  可得到排水板的纵向渗透系数  $k_w$ 。

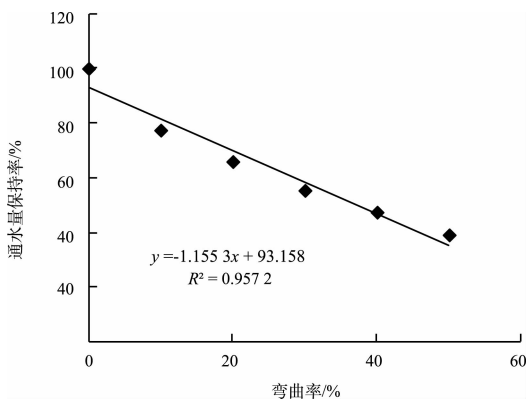


图 3 排水板弯曲率与纵向通水量保持率的关系

## 2.2 固结系数

淤泥压缩量很大, 土单元尺寸发生较大变化, 固结分析时采用对应  $e$  的压缩模量, 即切线模量

$$E_t = \frac{(1+e)d\bar{\sigma}_c}{de} = \frac{\sigma_c \left( 1 + e_0 - C_c \ln \frac{\sigma_c}{p_c} \right)}{C_c} \quad (11)$$

由式(11)可得

$$R_E = R_c \cdot \frac{1 + e_0 - C_c \ln \frac{R_c \sigma_c}{p_c}}{1 + e_0 - C_c \ln \frac{\sigma_c}{p_c}} \quad (12)$$

式中:  $R_E$  为土柱与其他区域压缩模量的比值。

可先对各层土的指标平均后再计算  $R_E$ 。

结合式(8)和式(11)可得

$$C_v = \sigma_c^{1 - \frac{C_c}{C_k}} \frac{p_c^{\frac{C_c}{C_k}} k_0 \left( 1 + e_0 - C_c \ln \frac{\sigma_c}{p_c} \right)}{C_c \rho_w g} \quad (13)$$

试验表明,  $C_k \approx 0.5e_0^{[11]}$ 。

## 2.3 加固层厚度

浅层加固厚度为 4 m 左右, 沉降约 1 m, 应考虑竖向排水距离变化对固结的影响, 竖向排水距离为:

$$H = H_0 - S_t \quad (14)$$

式中:  $H$  为对应  $\sigma_c$  的厚度;  $H_0$  为初始厚度。

加固层厚度变小过程中, 排水板发生褶皱, 与土体接触的长度并没有减少, 计算井阻时仍采用  $H_0$ 。为计算方便, 计算不同深度的固结度时, 仍采用  $H_0$  和相应的  $z$ 。

## 2.4 固结度分析

谢康和<sup>[15]</sup> 提出考虑涂抹、井阻的固结度公式:

$$U_{rz} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{M}{H_0} z\right) e^{-\beta_m t} \quad (15)$$

其中: 
$$M = \frac{(2m-1)\pi}{2} \quad (16)$$

$$\beta_m = \left[ \frac{M^2 C_v}{H^2} + \frac{8C_v}{(F_a + D)d_e^2} \right] \alpha_E \quad (17)$$

$$F_a = \left( \ln \frac{n}{s} + R_k \ln s - \frac{3}{4} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} + \frac{s^2}{n^2 - 1} (1 - R_k) \cdot \left( 1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \frac{1}{n^2 - 1} \left( 1 - \frac{1}{4n^2} \right) R_k \quad (18)$$

$$D = \frac{8G(n^2 - 1)}{M^2 n^2} \quad (19)$$

$$G = \frac{k}{k_w} \left( \frac{H_0}{d_w} \right)^2 \quad (20)$$

$$\alpha_E = \frac{n^2 - s^2}{n^2 - 1} + \frac{s^2 - 1}{n^2 - 1} \cdot R_E \quad (21)$$

$$s = \frac{d_s}{d_w} \quad (22)$$

式中： $d_e$  为竖向排水体影响直径； $d_w$  为竖向排水体直径； $R_E$  为涂抹区与其他区域土的压缩模量比值； $d_s$  为竖向排水体涂抹区直径。

为考虑固结和压缩参数变化的影响，根据一个时间段初期的有效固结应力确定固结和压缩参数，然后计算下个时间段初期的有效固结应力，如此循环得到不同时间的固结度和沉降，计算流程为：

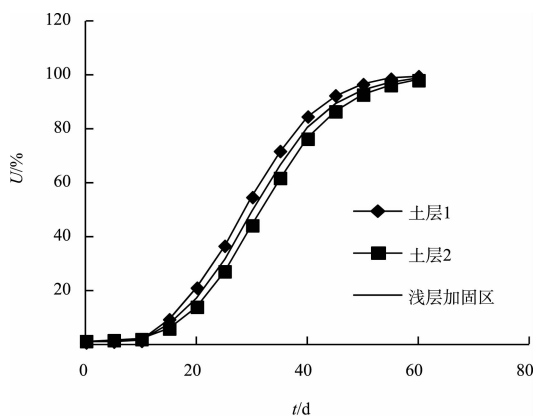
$p_c \rightarrow k_{w0}、C_{v0}、H_0 \rightarrow \Delta U_0 \rightarrow \Delta \sigma_{c0} \rightarrow \sigma_{c1}、S_1 \rightarrow k_{w1}、C_{v1}、H_1 \rightarrow \Delta U_1 \rightarrow \Delta \sigma_{c1} \rightarrow \sigma_{c2}、S_2 \rightarrow k_{w2}、C_{v2}、H_2 \rightarrow \Delta U_2 \rightarrow \Delta \sigma_{c2} \rightarrow \sigma_{c3}、S_3 \rightarrow \dots \rightarrow \sigma_{ci}、S_i \rightarrow k_{wi}、C_{vi}、H_i \rightarrow \Delta U_i \rightarrow \Delta \sigma_{ci} \rightarrow \sigma_{ci+1}、S_{i+1} \rightarrow \dots$

### 3 工程算例

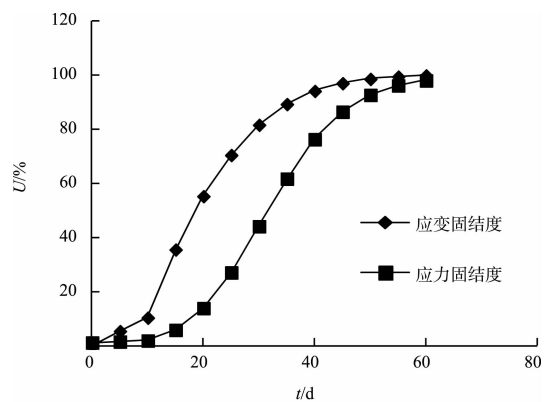
某吹填造陆工程流泥地层采用浅层加固，加固深度为 4 m，表 1 中前 8 个参数由试验得到，后 5 个由前 8 个参数计算得到。排水板纵向通水率为  $25 \text{ cm}^3/\text{s}$ ， $a = 2$ ， $b = 1.16$ 。排水板间距为 0.7 m，正方形布置。插板与抽真空时间间隔约 10 d，真空度为 80 kPa，真空预压时间为 50 d。固结和沉降计算结果见图 4~8。

表 1 计算取值

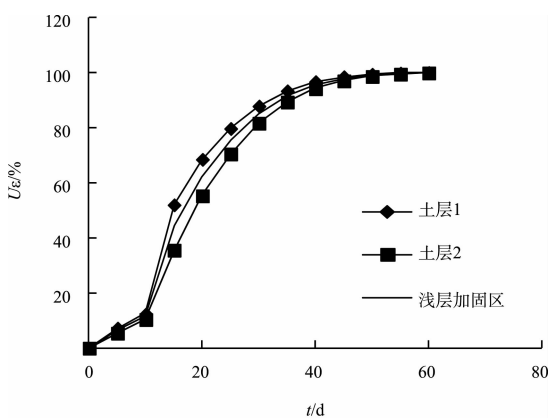
位置	w/%	$G_s$	$C_c$	$\sigma_{c1}/\text{kPa}$	$e_1$	$k_0/(10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$R_c$	$d_s/\text{cm}$	$e_0$	$C_k$	$\rho'/(t \cdot \text{m}^{-3})$	$p_c/\text{kPa}$	$R_k$
上部 2 m	130	2.68	0.31	50	2.115	5.6			3.484	1.742	0.379	0.60	
下部 2 m	120	2.70	0.30	50	2.106	4.8	2.0	40	3.240	1.620	0.401	1.14	1.134



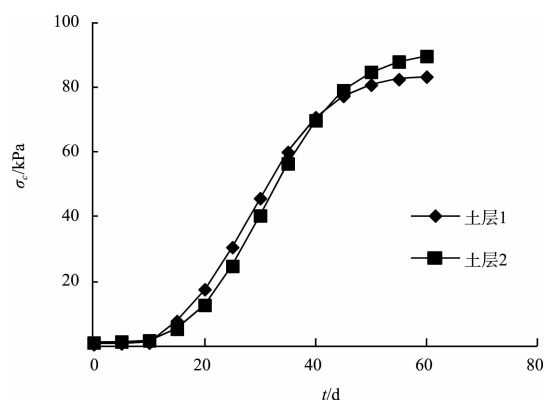
a) 时间-应力固结度曲线



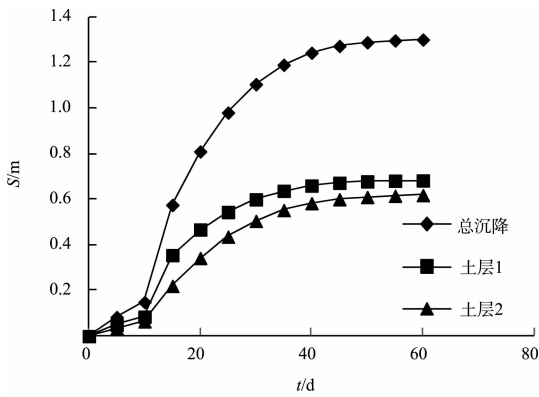
c) 土层2应力固结度与应变固结度对比



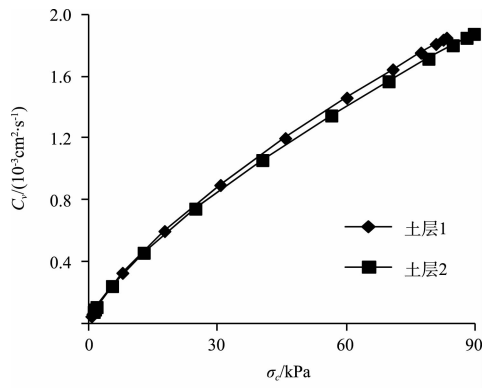
b) 时间-应变固结度曲线



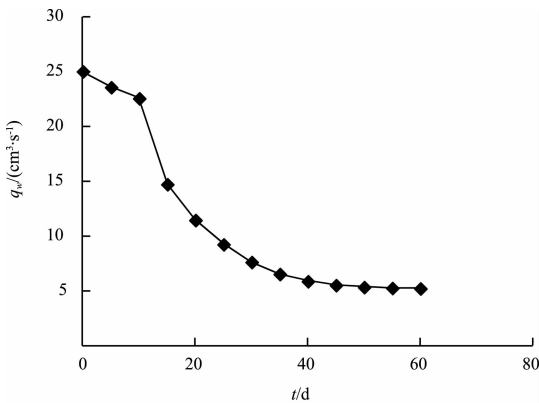
d) 时间-有效固结应力曲线



e) 时间-沉降曲线

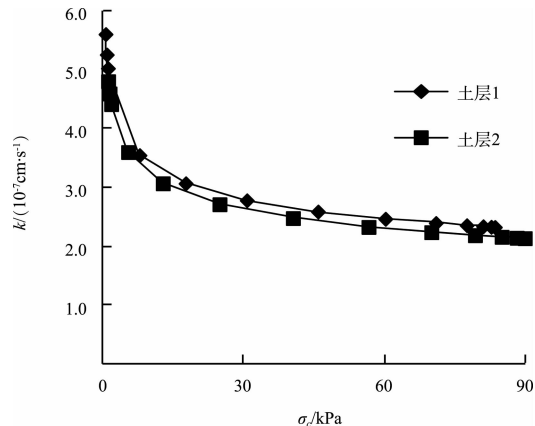


c) 有效固结应力-固结系数曲线

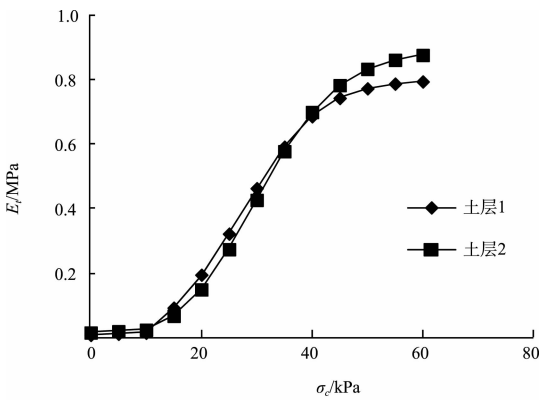


f) 时间-排水板纵向通水量曲线

图 4 沉降和固结参数与时间的关系



a) 有效固结应力-渗透系数曲线



b) 有效固结应力-切线模量曲线

图 5 固结和压缩参数与有效固结应力的关系

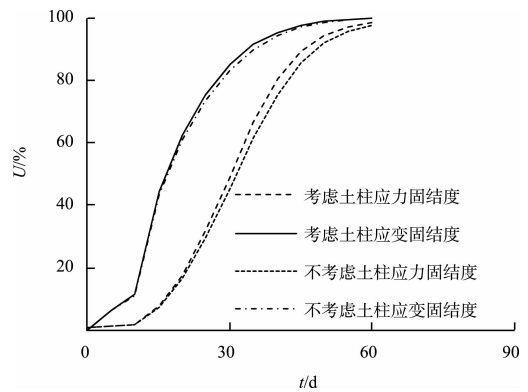


图 6 土柱对固结的影响

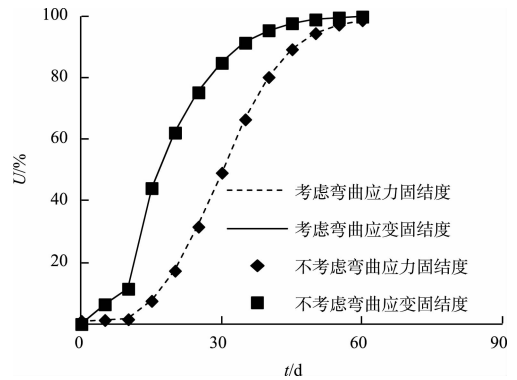


图 7 排水板弯曲对固结的影响

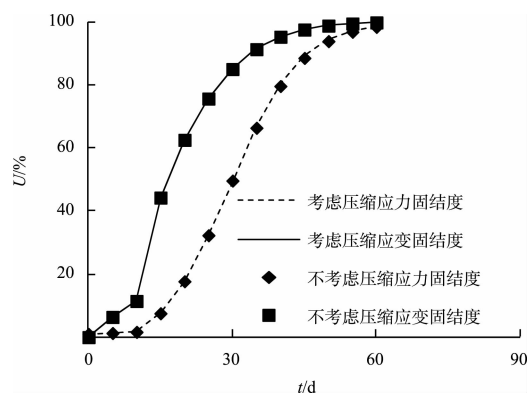


图 8 排水板加固层压缩对固结的影响

由于前 10 d 只在土体自重下固结, 所以曲线出现明显拐点。可见, 沉降和固结度随时间的发展规律与工程实践相符<sup>[2,4]</sup>; 应变固结度大于应力固结度, 在固结前期和中期两者相差较大, 不宜相互代替; 浅层加固沉降引起的排水板弯曲会导致排水板纵向通水量降低约 80%。

可见, 渗透系数随着有效固结应力增大而减小, 切线模量随着有效固结应力增大而增大, 固结系数随着有效固结应力的增大而增大, 与实测规律相同<sup>[6]</sup>。

考虑土柱影响时的固结度大于不考虑土桩影响时的固结度, 特别是应力固结度。土柱对固结度的影响与竖向排水体涂抹区对固结度的影响不同的主要原因是涂抹区土体与其他区域土体的压缩模量比值小于渗透系数比值的倒数, 导致涂抹区土体的固结系数小于其他区域土体的固结系数; 而土柱土体与其他区域土体的强度比值(强度比值等于压缩模量比值)大于渗透系数比值的倒数, 导致土柱土体的固结系数大于其他区域土体的固结系数。可见, 土柱的存在更有利于排水固结。

如图 4f) 所示, 地基加固过程中排水板纵向通水量衰减严重, 但是图 7 表明排水板弯曲对浅层加固没有影响。主要原因是加固深度较小, 而排水板初始纵向通水量较大, 导致井阻可以忽略不计。结论的前提是排水板呈曲线弯曲, 而不是折线形弯折(此时可能导致下部排水板失效)。

考虑加固厚度压缩(即竖向排水路径减少)对固结度影响不大, 考虑压缩时固结度稍大, 其主要原因是浅层加固以径向固结为主。

#### 4 结语

1) 流泥固结系数随有效固结压力增大而增大, 固结分析应考虑固结系数、渗透系数的变化; 浅层加固的土柱可以加快排水固结; 沉降计算与固结分析不宜采用相同的压缩模量。

2) 浅层加固的应变固结度大于应力固结度, 且差别较大, 不宜相互代替; 浅层加固可以不考虑排水板弯曲、加固层厚度减少对固结的影响。

#### 参考文献:

- [1] 曹永华, 李卫, 刘天韵. 浅层快速超软基处理技术[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集. 天津: 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 2010: 49-56.
- [2] 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): 120-124.
- [3] 林涌潮. 浅层加固技术处理新吹填淤泥的施工质量控制[J]. 水运工程, 2010(10): 105-108.
- [4] 张文彬, 许忠发, 苏波等. 无砂垫层真空预压法加固大面积软土地基的实例研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 52-57.
- [5] 邱长林, 闫澍旺, 孙立强, 等. 孔隙变化对吹填土地基真空预压固结的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 631-638.
- [6] 于志强, 熊明. 深圳前海湾新吹填超软淤泥土地基加固[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集. 天津: 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 2010: 79-85.
- [7] 江辉煌, 赵有明, 刘国楠. 深圳湾海底淤泥大变形固结试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 18-22.
- [8] 陈平山, 董志良, 张功新. 新吹填淤泥浅层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程, 2012(1): 158-163.
- [9] 董志良, 周琦, 张功新, 等. 天津滨海新区浅表层超软土加固技术现场对比试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1306-1312.
- [10] 刘吉福. 水下基槽回淤沉积物厚度检测方法探讨[J]. 水运工程, 2013(6): 29-34.
- [11] 熊明, 林本义. 关于吹填淤泥的松方系数[C]//第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 36-42.
- [12] 牛飞, 邱长林, 闫澍旺, 等. 真空预压下考虑渗透系数变化的吹填土地基固结分析[J]. 中国港湾建设, 2013(2): 29-34.
- [13] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].
- [14] 董志良, 邱青长. 疏浚土地基固结与塑料排水板弯曲排水性能分析[C]//上海: 第七届中国土工合成材料学术会议论文集, 2008: 226-231.
- [15] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 133-136.

(本文编辑 武亚庆)