

· 地基与基础 ·



# 有含水量控制要求的 围海造陆工程吹填高程预测

王兴博, 秦咸中, 孙永奎, 张志国, 李磊

(中交天航港湾建设工程有限公司, 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300450)

**摘要:**以南港工业区造陆五区工程为依托, 根据现场试验取得的数据, 总结分析了含水量随深度的变化规律、各层含水量随时间的变化规律以及含水量与高程之间的对应关系, 计算得出南港区域淤泥质吹填土由高含水量的淤泥状态到表层1 m范围内的土体含水量都小于85%, 需要经过2 a左右的晾晒时间, 初始吹填高程为6.91 m以上, 才能满足验收要求。从工程实施结果看具有良好的效果, 也为今后类似工程提供了一定的借鉴。

**关键词:** 围海造陆; 含水量; 吹填高程; 固结时间

中图分类号: U 651<sup>+</sup>.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0149-05

## Land reclamation elevation forecast for areas with requirement of moisture content

WANG Xing-bo, QIN Xian-zhong, SUN Yong-kui, ZHANG Zhi-guo, LI Lei

(Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, CCCC Tianhang Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Based on the Nan'gang industrial zone land reclamation area V project and according to the site test data, we analyze the variation law of the moisture content with the depth, the variation law of each layer's moisture content with the time, as well as the relationship between the moisture content and elevation, and get to know that the moisture content of the silty reclaimed soil is less than 85% and 2 years of drying time is needed, and the initial reclamation elevation shall be above 6.91 m to meet the requirement of the check and acceptance. The project has a good effect, so it may serve as reference for similar projects.

**Keywords:** land reclamation; moisture content; reclamation elevation; consolidation time

南港工业区造陆五区工程(简称五区)造陆面积为611.2万m<sup>2</sup>、吹填量为4373万m<sup>3</sup>、吹填高程为5.7 m, 对于吹填这一技术环节, 新的验收标准要求达到验收高程时表层1 m范围内含水量不高于85%。这种新的验收标准打破以往以强度来检验土体的常规, 需要用新的研究方法来分析吹填土固结问题, 找出含水量与高程之间的对应关系。

通过对吹填土含水量与高程变化的研究, 可以掌握吹填土在自然条件下的变化规律, 总结变

化规律的同时分析土体的固结状况, 研究吹填土的固结性质, 结合项目工期, 分析出最有经济价值的吹填高程及施工方法, 从材料、能源和人力等方面为工程节约成本。

### 1 吹填高程的理论计算方法

#### 1.1 吹填土沉降量分析

吹填土沉降量可以分为上下两部分<sup>[1]</sup>。上部分包括表层至1 m深度范围的土体在满足交地标准时产生的沉降, 这部分沉降可以根据土力学中

收稿日期: 2015-12-15

作者简介: 王兴博(1981—), 硕士, 工程师, 从事水运工程技术管理工作。

孔隙比与含水量之间的转换关系来计算,同时与小比尺的分层沉降试验结果进行对比,验证计算方法的合理性。下部分包括1 m 以下的所有吹填土,这部分土体不受蒸发影响,仅受重力的自然沉积,含水量变化不大,沉降可以利用一维太沙基固结理论来进行计算,其中计算时所需的固结时间由现场试验得到。得到这两部分土体的沉降,再根据吹填土的交地高程可以反算出吹填高程。

### 1.1.1 上部土体沉降计算方法

吹填土在自重固结之前,土颗粒下沉、表层浮出清水的这一过程称之为水土分离<sup>[2]</sup>,这个过程会产生一部分沉降。上部吹填土的含水量极高,土体一直处于饱和状态,空隙中全部填充为水,根据土力学中土体的三相关系,沉降其实是土体固结后孔隙水的损失。

通过现场对吹填土的检测可知水土分离前的吹填土含水量 $\omega_0$ 、比重 $G$ 、水土分离后的吹填土含水量 $\omega_1$ ,设吹填高程为 $H_0$ 、水土分离后高程为 $H_1$ ,推算出土体分离的理论压缩率为 $\mu_1$ 。

水土分离后土体开始自重固结,土体含水量沿深度方向变得不均匀,表层由于日照和风力影响,含水量较低,变化明显,且可以监测,所以将其细分为5层,每层20 cm,根据试验测得的含水量进行沉降计算,每层土体的沉降为 $\Delta h_i$ ,上部分总沉降为 $S_2$ ,则计算出土体的沉降压缩率为 $\mu_2$ 。

### 1.1.2 下部土体沉降计算方法

下部分土体基本不受蒸发作用影响,在自身重力作用下进行固结<sup>[3-4]</sup>,固结过程将水排至表面,孔隙水压力消散,但自重固结缓慢,要想靠自重完全固结需要几年甚至几十年的时间,但本次研究只考虑1 m 范围内含水量达到85%,不需要完全固结,通过现场试验的方法,掌握上层土体达到85%所需时间,然后根据这个时间,求出下层土体的固结度,进一步求出下部土体的沉降量。

根据太沙基固结理论、达西定律等推导出总压缩量 $S$ 为:

$$S(t) = m_v \int_0^H (u_0 - u) dz = m_v u_0 H \left( 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \right) \quad (1)$$

式中: $u$ 为孔隙水压力; $m_v$ 为体积压缩系数; $e$ 为孔隙比; $u_0$ 为初始孔隙水应力; $H$ 为压缩层厚度; $M$ 为孔隙水质量; $T_v$ 为时间因素。

可以根据含水量达到85%时试验获得的固结时间,进而求出土体达到的固结度,并计算下部分沉降量 $S_3$ 、下层理论压缩率 $\mu_3$ 。

## 1.2 吹填高程的计算方法

假设沉降后交地高程为 $H'$ 、吹填高程为 $H_0$ ,天然地基距基准线1.3 m。则水土分离沉降:

$$\Delta h_1 = \mu_1 \times 1 \quad (2)$$

由含水量控制的上部土体沉降:

$$\Delta h_2 = \frac{\mu_2}{1 - \mu_2} \times 1 \quad (3)$$

由自重固结控制的下部土体沉降:

$$\Delta h_3 = \frac{\mu_3}{1 - \mu_3} \times (H' + 1.3 - 1) \quad (4)$$

初始吹填高程:

$$H_0 = H' + \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 \quad (5)$$

## 2 含水量随时间变化规律的现场试验

单纯的理论计算不能合理准确地计算出土体的含水量变化趋势和随之变化的沉降量<sup>[5]</sup>。所以为了准确得到达到交地标准时的固结时间和计算自重固结的沉降量,需要进行现场试验得到含水量随时间的变化规律。试验中,一共进行了5次现场取样,将取样数据汇总,分析含水量变化规律。

表1 现场试验含水量 %

土层/cm	11月6日	11月20日	12月4日	3月18日	5月17日
表层	81.88	80.32	76.06	66.36	46.98
0~0	109.35	106.00	102.44	94.96	89.82
20~40	115.35	113.92	110.17	105.34	105.22
40~60	119.78	117.90	114.16	105.80	103.34
60~80	123.24	120.43	116.03	106.87	104.52
80~100	124.99	121.79	106.91	101.78	95.74

通过现场试验可知,含水量沿深度的分布可以分为4个部分,地表、地表~20 cm、20~40 cm和40~100 cm。根据以上数据进行拟合,总结出各层含水量随时间的拟合方程(图1)。

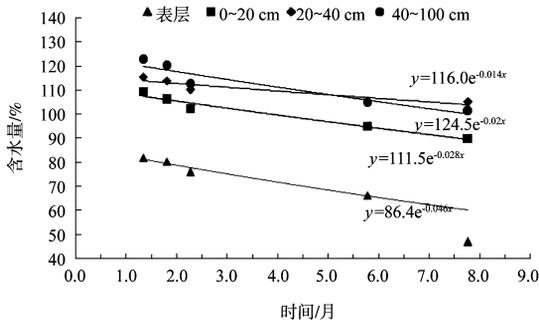


图 1 含水量随时间变化的拟合方程

根据上述公式, 可以求出任意时间各层土体的含水量, 绘制出 2 a 内含水量随时间变化的曲线 (图 2)。

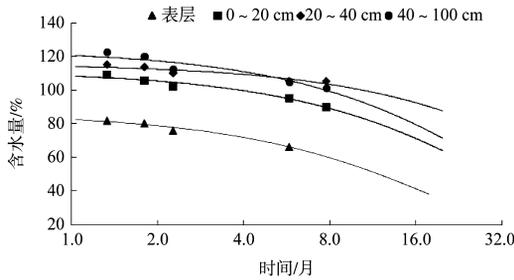


图 2 各层含水量随时间变化趋势

通过上述分析, 可以计算 1 m 范围内每层土体的含水量降至 85% 需要的总时间 (表 2)。结合实测数据和拟合含水量公式, 绘制出含水量变化趋势 (图 3)。由图 3 可预测, 吹填后 24 个月, 1 m 范围内的土体含水量均小于 85%, 满足交地标准。

表 2 各层土体达到含水量为 85% 所需的时间

土层	地表	0~20 cm	20~40 cm	40~100 cm
达标时间	30 d	10 月	23 月	19 月

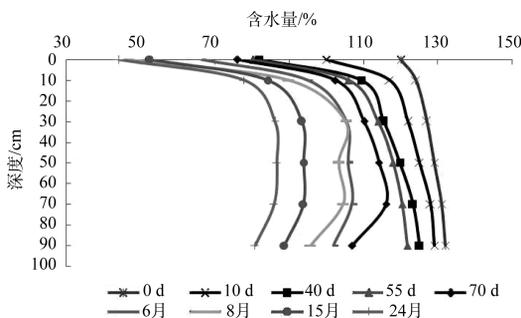


图 3 含水量变化规律预测

### 3 吹填土自然沉积的小比尺试验

为了分析土体压缩沉降随时间的变化关系, 需要实时监测现场高程, 但是现场不确定因素较

多、测量误差较大, 不能有效分析沉降的微小变化, 所以采用小比尺的室内试验来分析土体的压缩量随时间的变化。可以通过小比尺试验频繁地准确测量土体高程, 大大提高了分析的准确性, 减小了误差。小比尺试验包括水土分离试验和自重固结模型试验。其中水土分离试验为计算水土分离期间的沉降量提供数据。自重固结模型试验可以人工配出含水量为 100% 的土样, 分析不同深度的含水量和沉降的变化趋势, 为计算上部土体的沉降量提供试验数据。

### 3.1 试验结果

试验结束后将分层土样的含水量数据进行整理, 根据土力学三相性质, 可以依据土体的沉降量和分层厚度反算出各层土体含水量的变化规律<sup>[6]</sup> (图 4)。

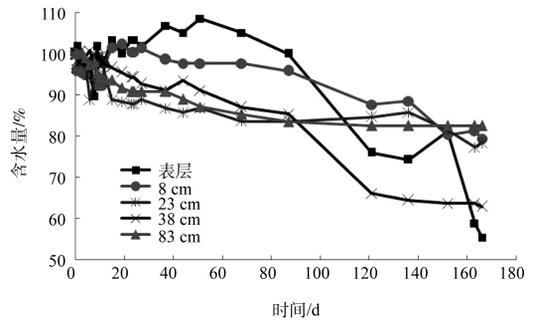


图 4 表层与深层含水量随时间变化规律

再将计算的平均含水量和高程变化整理到图 5, 可以发现, 平均含水量下降呈线性, 与高程变化规律一致。

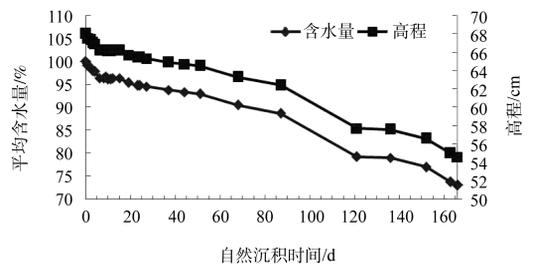


图 5 含水量与高程随时间变化规律

从自重固结模型试验可以看出, 120 d 时平均含水量达到 85%, 高程由原来的 68 cm 降到 60 cm; 166 d 时, 平均含水量达到 73%, 高程降为 54 cm。

最终试验压缩率为  $\mu_2' = \frac{h_1 - h_2}{h_1} = 0.206$ 。

166 d 小比尺试验结束后，将试验筒内的土样取出，测量各层的准确含水量，其分布规律见图 6。

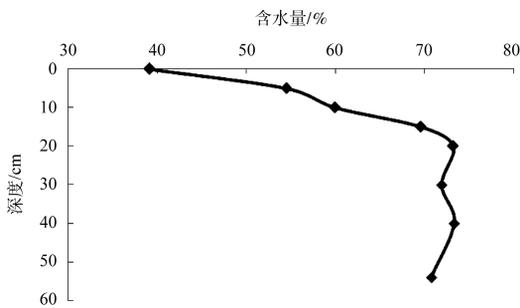


图 6 自重固结模型试验含水量随深度的变化规律

分析得知：含水量明显下降的区域只在表层 20 cm，含水量沿直线下降，最表层含水量为 40%，在 20 cm 深处为 72%，这与现场试验相吻合。说明在自然晾晒的情况下，只有表层 20 cm 范围内含水量下降明显，形成硬壳；20 cm 以下，含水量下降缓慢，基本保持不变。

### 3.2 理论压缩率与试验压缩率量的对比

为了对比理论压缩率与试验压缩率的误差，将初始 68 cm 土层分为 3 层，表层 20 cm 为第 1 层，20~40 cm 为第 2 层，40~68 cm 为第 3 层，它们的初始含水量都为 100%；自重固结后第 1 层的平均含水量为 55%，第 2 层为 70%，第 3 层为 73%。根据这些条件计算理论压缩率为 0.242，试验压缩率为 0.206，误差为 14.9%，计算偏于安全。说明可以使用这种方法计算上部土体沉降量。

## 4 吹填高程预测

### 4.1 上部土体沉降结果

根据前面的计算方法，结合小比尺试验结果可以计算吹填土上部土体沉降结果。其中水土分离前后，土体的含水量由 120% 降到 115%，土体的比重为 2.72，通过水土分离试验得到试验压缩率为 0.029 4，理论计算的压缩率为 0.031 7。水土分离沉降  $\Delta h_1 = \mu_1 \times 1 \text{ m} = 0.032 \text{ m}$ 。

通过自重固结模型试验的含水量纵向分布可以推测出，将来的五区现场，经过水土分离后，表层 1 m 范围内的土体的平均含水量为 120%，经过一段漫长的自然晾晒和自重固结后，达到交地标准。1 m 范围内的土体含水量分布也将大致如此。1 m 范围内的理论压缩率为  $\mu_2 = \frac{\Delta h_{\text{上}}}{h_1} = 0.274$ ，

上部土体沉降  $\Delta h_2 = \frac{\mu_2}{1 - \mu_2} \times 1 \text{ m} = 0.377 \text{ m}$ 。

### 4.2 下部土体沉降计算结果

1 m 以下范围内的土体沉降根据土体的自重固结来计算。通过现场试验可知，达到交地标准要经过 2 a 时间。影响固结快慢的主要因素为土体的固结系数，通过取现场原状土做压缩试验和固结试验。压缩试验取样的初始含水量为 90%，这近似代表了 1 m 以下土体的压缩性质。根据一系列试验数据和参数结合分层太沙基一维固结理论求出总沉降量(表 3)。

表 3 太沙基法分层土体固结计算

深度/m	土层厚度 H/m	时间因素 $T_v$	竖向固结度 $U_v$	平均附加应力 P/kPa	分层沉降 $S_i$ /mm	总沉降 S/mm
1.0~1.5	0.50	4.26	1.00	5.0	28	828
1.5~2.0	0.50	1.89	0.99	7.5	42	
2.0~2.5	0.50	1.06	0.94	10.0	53	
2.5~3.0	0.50	0.68	0.85	12.5	59	
3.0~3.5	0.50	0.47	0.75	15.0	63	
3.5~4.0	0.50	0.35	0.66	17.5	64	
4.0~4.5	0.50	0.27	0.58	20.0	65	
4.5~5.0	0.50	0.21	0.52	22.5	65	
5.0~5.5	0.50	0.17	0.47	25.0	65	
5.5~6.0	0.50	0.14	0.42	27.5	65	
6.0~6.5	0.50	0.12	0.39	30.0	65	
6.5~7.0	0.50	0.10	0.36	32.5	65	
7.0~7.5	0.50	0.09	0.33	35.0	65	
7.5~8.0	0.50	0.08	0.31	37.5	65	

下层土体总沉降量  $\Delta h_{\text{下}} = 0.828 \text{ m}$ , 对应的压

缩率为  $\mu_3 = \frac{\Delta h_{\text{下}}}{h_3} = 0.118$ , 由自重固结控制的下部

土体沉降  $\Delta h_3 = \frac{\mu_3}{1-\mu_3} \times (H'+1.3 \text{ m}-1 \text{ m}) = 0.8 \text{ m}$ ,

初始吹填高程  $H_0 = H' + \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = 6.909 \text{ m}$ 。

## 5 结论

1) 根据现场试验的数据,总结了含水量随深度的变化规律和各层含水量随时间的变化规律,根据数据的拟合方程可以得出南港区域淤泥质吹填土由高含水量的淤泥状态到表层 1 m 范围内的土体含水量都小于 85%,需要经过 2 a 左右的晾晒时间。

2) 利用土力学中土的三相性质理论,经过理论计算确定分层并进行小比尺水土分离试验和分层试验,结合分析可知,南港地区淤泥质吹填土表层土体含水量从 120% 降到 85%,分层沉降率为 0.22。

3) 利用一维自重固结理论,与小比尺自重固结试验结合,计算深层土体沉降,经计算,本研究项目的深层土体在 2 a 时间里的沉降量为 0.83 m。

4) 根据表层和深层土体的沉降量反算吹填土的初始高程,经计算,理论吹填高程应达到 6.91 m。

## 参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [3] 谢康和,周开茂.未打穿竖向排水井地基固结理论[J].岩土工程学报,2006,28(6):679-684.
- [4] 朱耀庭,梁爱华.软黏土、流泥和浮泥工程特性的试验研究[R].天津:天津港湾工程研究所,2006.
- [5] 朱耀庭,郑爱荣,李卫.吹填超软土固结特性的试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35(11):120-123.
- [6] 文家海,张永兴.超软土的排水固结机理分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2002,25(9):82-85

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 134 页)

## 4 结论

1) 岸坡内水位与长江水位变化关系密切,水位过程线呈现较好的规律性:在岸坡范围内,当长江水位上涨时,江水向岸坡土体补给;而在江水位下降时,地下水改变为由岸坡向长江排泄。

2) 岸坡排水是高滩守护工程的关键,直接影响岸坡工程结构的稳定:岸坡浅层排水措施存在很大的局限性,威胁岸坡的整体稳定;而岸坡深层排水可以有效地降低地下水位和水力坡度,提高岸坡整体稳定性。

3) 水平排水管作为岸坡深层排水技术的一种措施首次在长江航道整治工程中运用,并取得了

较好的工程效果,可为未来荆江河段航道整治工程二期工程设计等其它类似工程提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 长江航道局.航道工程手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 刘吉福,刘启党,杨春林.深层排水管在边坡加固中的应用[J].工程勘察,2002(4):28-31.
- [3] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].
- [4] 长江航道规划设计研究院.长江中游荆江河段航道整治工程昌门溪至熊家洲段工程 2014 年度斗湖堤水道施工图设计报告[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2014.

(本文编辑 郭雪珍)