



吹填砂性土长期沉降计算

梅涛涛^{1,2}, 王德咏^{1,2}, 梁小丛^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 港口码头工程中的堆场一般通过回填堆载而成。受限于吹填工艺, 易导致吹填口局部细粒含量偏高。由于土体非水平层状, 无法直接用分层总和法和经验公式计算长期沉降。为解决该工程问题, 首先通过砂性土蠕变试验, 得到不同细粒含量、不同细粒类型的流变元件相关参数; 然后利用流变元件参数在 Flac 3D 中进行分析计算; 最后利用常用的经验计算方法拟合长期工后沉降。把 Flac 3D 结果与试验数据和经验计算方法计算值进行对比, 表明砂土的长期沉降可采用数值模拟和双曲线法结合的方法。

关键词: 长期沉降; 数值模拟; 砂性土

中图分类号: U 652.7

文献标志号: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0182-05

Calculation of long-term settlement for hydraulic fill sandy soil

MEI Tao-tao^{1,2}, WANG De-yong^{1,2}, LIANG Xiao-cong^{1,2}

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

2.Key Laboratory of Environmental Protection & Safety of Communication Foundation Engineering, CCCC , Guangzhou 510230, China)

Abstract: Harbor yard is often reclaimed through dredging and filling. Limited by the filling process, it is easy to cause the fine particle content around the outlet to be high. Since the soil is not horizontally layered, it is impossible to directly use the layer wise summation method and empirical formula to calculate long-term settlement. In order to solve this engineering problem, firstly, through the creep test of sandy soil, the relevant parameters of rheological elements with different fine particle content and different types of fine particles are obtained; then the rheological element parameters are used for analysis and calculation in Flac 3D; and finally, the commonly used empirical calculation method is adopted to fit the long-term post-construction settlement. The comparison of Flac 3D results with experimental data and empirical calculation methods shows that the long-term settlement of sandy soil can be calculated by combining numerical simulation and hyperbolic method.

Keywords: long-term settlement; numerical simulation; sandy soil

近年来开展的一些中东地区的石油码头项目, 工后沉降要求为 10 a 小于 25 mm。如此高的标准对地基处理施工提出了严峻的挑战, 同时也带来了砂性土地基长期沉降计算问题。

砂土地基的工后沉降主要为含细粒砂性土的蠕变沉降, 目前对于纯砂的蠕变试验研究较多, 而对于不同细粒含量甚至不同细粒种类的含细粒

砂土的蠕变沉降研究较少。施小清等^[1]选取常州含水层系统原状砂土样进行一维蠕变试验, 分析了砂土蠕变曲线, 并且对比 Burgers 模型和 Merchan 模型的适用性; 孙晓涵^[2]用自行研制的高压固结仪, 对西安含水层中细砂进行一维蠕变试验研究, 研究地下水位变化与砂土蠕变的关系, 用激光粒度和电镜扫描探究砂土蠕变微观机

制, 观测到蠕变过程中存在砂土颗粒滑移和破碎, 并用五元件的广义 Kelvin 模型对蠕变行为进行了模拟。砂土地基长期沉降计算方面, 数值模拟的应用随着计算机计算能力的提高越来越广泛, 处理复杂地质情况下的沉降问题尤为适用^[3-4]。高文华^[5]基于 FLAC^{3D}建立了粉砂岩单轴压缩蠕变数值试验模型, 计算结果和试验结果十分相近。

通过开展不同细粒类型、不同细粒含量的砂性土蠕变试验, 研究含细粒砂性土的蠕变沉降, 结合 FLAC^{3D}数值模拟软件和经验计算方法, 提供局部区

域含较高细粒土体的沉降计算方法。

1 室内试验

试验土样的粗粒为海砂, 细粒分别为粉粒(不同目石英粉配置)和黏粒(淤泥烘干配置)。将粗颗粒和细粒按比例进行混合, 配置细粒含量分别为 0%、15%、25% 和 35% 且相对密实度为 80% 的试样。具体颗粒级配见表 1。表 2 为试验土样的物理力学参数。蠕变试验仪器采用单向高压固结仪, 试样直径 61.8 mm、高 20.0 mm。试验各级荷载稳定标准为竖向变形量小于 0.005 mm/d。

表 1 土样颗粒级配

细粒种类	细粒含量/%	小于粒径范围内含量/%						
		粒径 10 mm	粒径 5 mm	粒径 2 mm	粒径 1 mm	粒径 0.5 mm	粒径 0.25 mm	粒径 0.075 mm
粉粒	0	99.4	96.3	71.3	43.8	22.1	1.8	0.1
	15	99.5	96.8	75.5	52.2	33.8	16.4	15.0
	25	99.5	97.2	78.4	57.8	41.5	26.3	25.0
	35	99.6	97.5	81.3	63.4	49.3	36.1	35.0
黏粒	15	99.5	96.8	75.5	52.2	33.8	16.4	15.0
	25	99.5	97.2	78.4	57.8	41.5	26.3	25.0
	35	99.6	97.5	81.3	63.4	49.3	36.1	35.0

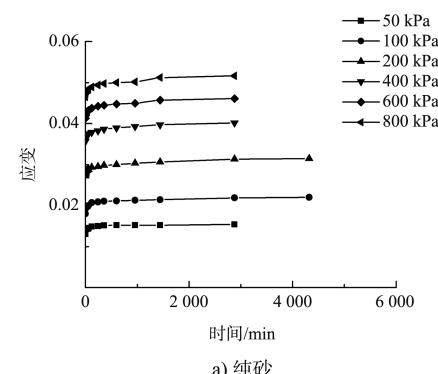
表 2 基本物理力学性质

细粒含量/%	细粒类型	最小干密度 $\rho_{d\min}$ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最大干密度 $\rho_{d\max}$ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	初始孔隙比 e
0	无	1.60	1.90	0.454
15	粉粒	1.66	2.11	0.341
25	粉粒	1.56	2.14	0.353
35	粉粒	1.40	2.09	0.417
15	黏粒	1.66	1.97	0.413
25	黏粒	1.56	1.92	0.469
35	黏粒	1.40	1.96	0.488

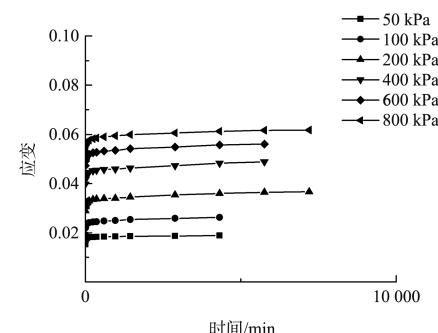
从表 2 可以看出, 随着粉粒含量的逐渐增大, 孔隙比先减小, 在粉粒含量 15% 左右最小, 后随着粉粒含量增加而逐渐增大。而黏粒含量越高, 除在黏粒含量 15% 时其孔隙比有所减小, 更高含量的黏粒反而导致孔隙比较纯砂即无细粒时大。

2 蠕变试验结果

试验数据处理采用 Boltzmann 法。应变-时间曲线见图 1, 试验结果表明各细粒含量的曲线形态相似。



a) 纯砂



b) 15% 黏粒砂性土

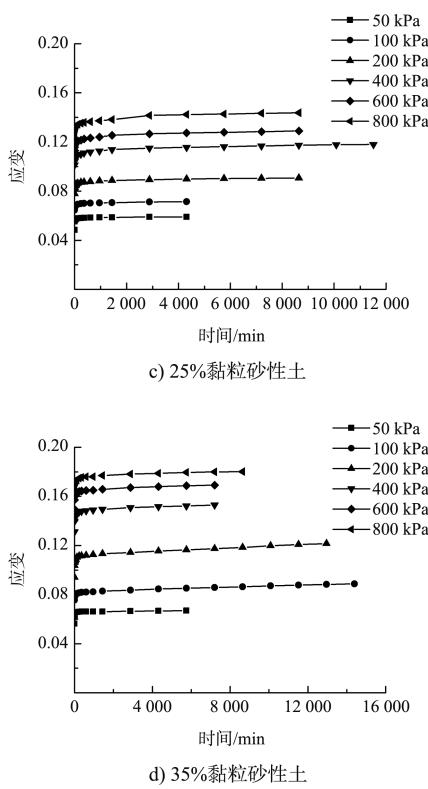


图 1 不同荷载下的蠕变试验曲线

3 长期沉降计算

工后长期沉降的计算方法可以分为 3 类：

- 1) 以双曲线法、三点法、ASAOKA 法等为代表的预测法；
- 2) 基于蠕变性质的经验公式法；
- 3) 基于蠕变本构模型的理论分析法。

3.1 蠕变本构计算模型及参数

将室内蠕变试验结果拟合成所需的伯格斯模型参数，由于各土样参数繁杂，仅给出即将验证计算的 35% 黏粒砂性土 Burgers 参数：体积模量 7.4 MPa ，法向应力 800 kPa ，Maxwell 体的刚度 $E_m = 4.85 \text{ MPa}$ ，Kelvin 体的刚度 $E_k = 80.56 \text{ MPa}$ ，Maxwell 体的黏滞系数 $\eta_m = 1116.77 \text{ GPa} \cdot \text{min}$ ，Kelvin 体的黏滞系数 $\eta_k = 2.58 \text{ GPa} \cdot \text{min}$ 。

3.2 经验计算方法

3.2.1 非线性蠕变模型

根据目前的研究^[6-7]，在双对数坐标上，饱和砂土变形-时间关系曲线和应力-应变关系曲线近似为直线，因此可以得出饱和砂土的非线性应变模型：

$$\varepsilon(\sigma, t) = A \left(\frac{t}{t_0} \right)^{k_1} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{k_2} \quad (1)$$

式中： ε 为应变； σ 为应力； k_1 、 k_2 为系数； t 为应变计算时刻； t_0 、 σ_0 分别为初始计算时间和荷载； A 为系数。

在双对数坐标上，应变-时间关系和应力-应变关系见图 2、3，由此可得斜率 k_1 和 k_2 。

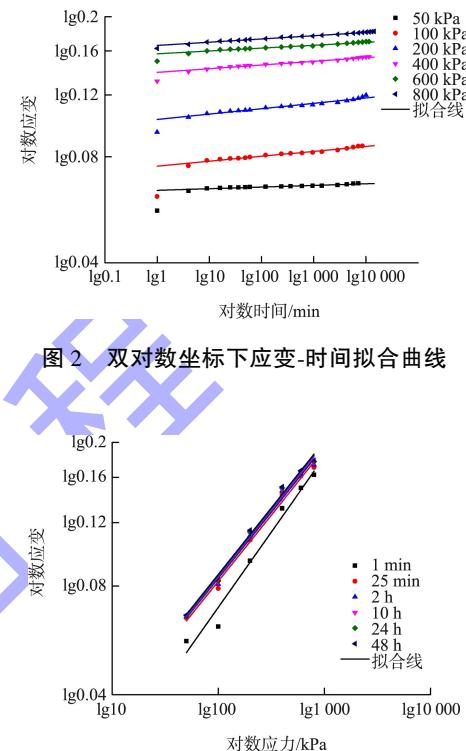


图 2 双对数坐标下应变-时间拟合曲线

图 3 双对数坐标下应力-应变曲线拟合

根据荷载 800 kPa 、含 35% 黏粒的砂性土应变-时间曲线，拟合参数见表 3。

表 3 非线性蠕变模型参数

试样	A	k_1	k_2
纯砂	0.019 25	0.016 373 3	0.436 996 7
YN-35%	0.075 50	0.014 186 7	0.376 518 3

3.2.2 双曲线法

双曲线法又称为经验双曲线法^[8]或双曲线配合法^[9]，是港口工程规范中推荐的最终沉降 s 的推算方法之一。其公式为：

$$s = s_0 + \frac{t - t_0}{\alpha - \beta(t - t_0)} \quad (2)$$

式中： t_0 、 s_0 分别为双曲线的拐点及其对应的沉降值； α 、 β 分别为计算参数；取 $t_0 = 0$ ， $s_0 = 0$ ，拟合 t/s 与 t 的曲线，拟合直线的截距和斜率分别为 $\alpha = 43.836 74$ 和 $\beta = 5.556 34$ 。见图 4。

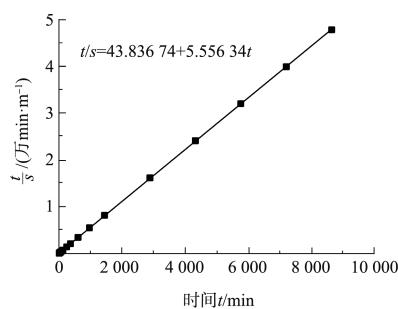


图 4 双曲线法拟合曲线

3.2.3 蠕变实用计算法

蠕变实用算法是姚仰平^[10]参考一维蠕变沉降计算公式在半对数坐标系下建立的蠕变沉降与时间的关系:

$$\frac{s}{s_0} = C_t \lg\left(\frac{t}{t_0} + A\right) - h_t \quad (3)$$

式中: s 为土体蠕变沉降量; t 为历时; C_t 为反映蠕变速率的无量纲参数; h_t 为反映土体总体蠕变刚度的无量纲参数; A 为反映土体蠕变对超固结程度影响的中间量; t_0 、 s_0 为消除量纲的单位常量, 值为 1。 $t_1 = 0$ min, $s_1 = 0$, $t_2 = 4320$ min, $s_2 = 0.17885$, $t_3 = 8640$ min, $s_3 = 0.1802$ 。

联立方程组

$$s_i = C_t \lg(t_i + A) - h_t \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

代入 t_1 、 t_2 、 t_3 、 s_1 、 s_2 和 s_3 , 然后通过迭代法解出 A 。再由式(5)、(6)解出 C_t 和 h_t 。

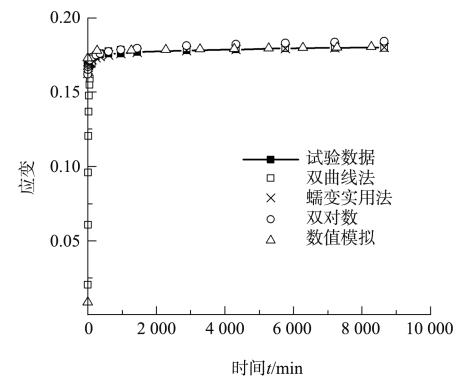
$$s_3 = C_t \lg\left(\frac{t_3}{A} + 1\right) \quad (5)$$

$$h_t = C_t \lg A \quad (6)$$

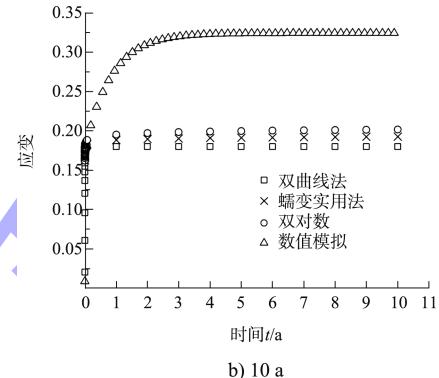
根据 35% 黏粒砂性土蠕变曲线解得参数分别为: $A = 5.83 \times 10^{-37}$, $C_t = 0.0045$, $h_t = -0.1625$ 。

3.3 对比

图 5 为 4 种方法计算结果。从图 5a) 可以看出, 初期的瞬时变形和第二阶段的稳定蠕变阶段, 4 种计算方法的拟合效果均很好。图 5b) 表明, 数值模拟计算结果明显较其他 3 种方法的计算值偏大, 稳定时间跨度更大, 10 a 应变是其他 3 种方法的 1.6~1.8 倍。



a) 8640 min



b) 10 a

图 5 计算结果对比

3.4 数值模拟和经验法结合

由上述分析可知, 数值分析短期计算结果准确。因此针对复杂地质情况, 利用流变元件模型和 Flac^{3D} 计算复杂地质条件下短期沉降, 然后利用双曲线法拟合推算最终沉降。

根据土样应变-时间曲线拟合伯格斯参数, 在 Flac^{3D} 中计算 8640 min 沉降, 并转换为应变曲线, 然后利用双曲线进行拟合, 预测 38880 min 的应变。预测曲线与实测的曲线对比结果见图 6, 8640~38880 min 的预测值和试验值基本重合, 说明该方法可行。

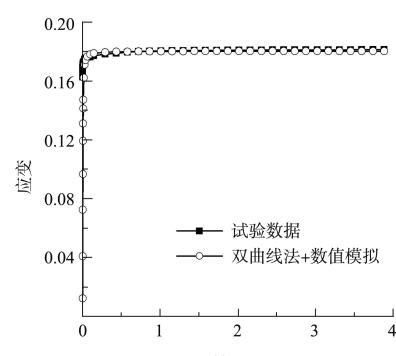


图 6 本文计算方法和试验数据对比

4 工程实例

东非某工程设计采用强夯和振冲法地基处理。在设计荷载 50 kPa 铁路区开展了 20 m×20 m 大型堆载试验，分 3 层堆载，每层通过灌砂法测量回填料密度，荷载为 50.08 kPa。堆载试验历时 37 d，推算最终沉降为 67.6 mm。

该试验区地质情况：1)回填层厚度约 7 m，主要为中密-密实中细砂，由于位于吹填口，表层覆盖厚度约 30 cm 的黏土球；2)原地层表层为松散中细砂，以下为中密砂土层；3)地下水位位于地表以下 1.8 m 左右。

根据室内试验及现场地质分布，建立三维计算模型，数值模拟计算中采用的参数见表 4。数值模型如图 7 所示，模型底部固定，侧面采用法相约束。

表 4 数值模型计算参数

土层	法向应力/kPa	$E_m/$ MPa	$\eta_m/$ (MPa·min)	$E_k/$ MPa	$\eta_k/$ (MPa·min)
1	52.7	0.3565	65328.6650	1.0077	1.7895
2	68.9	1.4260	124753.0420	13.5890	768.6380
3	84.4	1.6020	123725.6140	14.2990	811.7680
4	105.2	1.8110	123768.7500	15.9080	914.4080

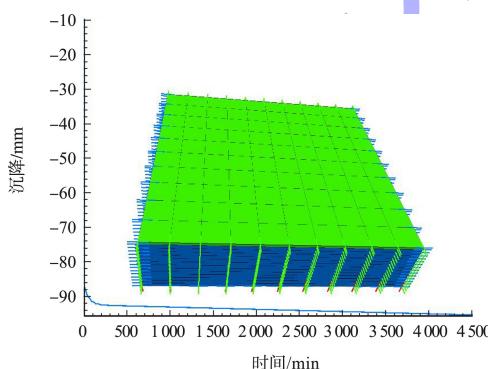


图 7 计算模型及结果

利用双曲线拟合上述数值分析结果并推算最终沉降，双曲线拟合参数为 $\alpha = 0.5054$ 和 $\beta = 0.0103$ ，则最终沉降为 $s_\infty = 1/\beta = 97.1 \text{ mm}$ 。

计算结果和现场堆载试验结果分别为 97.1 mm 和 67.6 mm，计算值为试验值的 1.4 倍。这主要是由于样品是重塑样，颗粒级配以及土样与现场不完全一致。此外，室内试验的尺寸效应以及时间效应均会对沉降计算有一定的影响，有待继续研究。

5 结论

1) 通过室内蠕变试验，得到不同细粒含量和不同细粒类型的砂性土应变-时间曲线，可为砂性土长期沉降计算提供基础参数；基于 Burgers 的 Flac^{3D}数值模拟结果，非线性蠕变模型、蠕变实用法以及双曲线法均能很好地模拟砂性土短期变形。

2) Flac^{3D}和双曲线法相结合可以解决以往经验计算公式不能直接解决的局部细粒含量偏高的复杂地质条件下的砂性土长期沉降计算问题。通过比较试验值，说明方法可行。

3) 通过工程实例的对比分析，本文计算方法为原位试验结果的 1.4 倍，这与室内试验的时间、尺寸效应以及试验土样为重塑土有关。

参考文献：

- [1] 施小清,薛禹群,吴吉春,等.饱和砂性土流变模型的试验研究[J].工程地质学报,2007,15(2):212-216.
- [2] 孙晓涵,崔向美.高应力下西安含水层砂土蠕变特性的试验研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(6):1133-1137.
- [3] 张豫川,高飞,吕国顺,等.基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J].科学技术与工程,2018,18(30):220-227.
- [4] 葛苗苗,李宁,郑建国,等.基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律数值研究[J].西安理工大学学报,2015,31(3):295-300,305.
- [5] 高文华,刘正,张志敏.基于 FLAC^{3D}的粉砂岩压缩蠕变试验数值模拟研究[J].土木工程学报,2015,48(3):96-102.
- [6] 张云,薛禹群,施小清,等.饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J].岩土力学,2005(12):1869-1873.
- [7] 蔡国军,陈世豪,赵大安,等.饱和砂土蠕变特性及其影响因素试验研究[J].工程地质学报,2019,27(5):1048-1055.
- [8] 中交天津港湾研究院有限公司.港口工程地基规范:JTS 147-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
- [9] PRAKASH K , MURTHY N S , SRIDHARAN A . Rectangular hyperbola method of consolidation analysis[J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 355-368.
- [10] 姚仰平,祁生钧,车力文.高填方地基工后沉降计算[J].水力发电学报,2016,35(3):1-10.