



基于蠕变特性的吹填砂性土长期沉降计算

何晓玲^{1,2}, 杨录³, 梅涛涛^{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;
 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 中东地区的港口码头一般通过吹填砂土造陆。受限于施工工艺, 细粒易在吹填过程中形成淤积, 从而导致沉降过大。当前的设计计算方法对于高细粒含量砂性土工后沉降的计算均未考虑细粒含量、矿物类型等因素, 难以评估细粒含量对工后沉降的影响。为解决该工程问题, 提出一种基于蠕变特性的吹填砂性土长期沉降计算方法, 并与传统及基于原位试验的计算方法进行对比分析, 验证了计算方法的可行性。

关键词: 蠕变特性; 砂性土; 长期沉降

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0159-05

Calculation of long-term settlement for hydraulic-fill sandy soil based on creep characteristics

HE Xiao-ling^{1,2}, YANG Lu³, MEI Tao-tao^{1,2}

- (1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
 2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;
 3. China Harbor Engineering Company Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Ports and terminals in the Middle East are generally built by hydraulic fill. Due to the limitation of construction technology, fine grains are easy to form siltation in hydraulic reclamation, which results in excessive settlement. The current design calculation methods do not consider the fine-grain content, mineral type, and other factors in the calculation of post-construction settlement of sandy soil with a high content of fine grains. Thus, it is difficult to evaluate the influence of the fine-grain content on post-construction settlement. To solve this engineering problem, this study proposes a calculation method for the long-term settlement of hydraulic-fill sandy soil based on creep characteristics and compares it with traditional and in-situ test methods to verify the feasibility of the proposed method.

Keywords: creep characteristics; sandy soil; long-term settlement

目前, 中东地区的港口码头一般通过吹填砂土造陆, 虽然均按严格的细粒含量要求设计和施工, 但是吹填施工中难免形成淤积, 导致沉降过大。当前的设计计算方法中, 砂性土长期蠕变计算公式没有考虑复杂的三维地质情况, 且对于细粒含量高的砂性土工后沉降的计算, 均未考虑细

粒含量、矿物类型等因素, 因此难以评估细粒含量对工后沉降的影响程度并合理确定施工中的处理方法。

吹填砂土地基的长期沉降主要由3部分组成: 1)吹填层在设计荷载作用下的压缩和蠕变; 2)吹填层在自重力作用下的蠕变沉降; 3)下卧层在吹

填层作用下的压缩和蠕变。由此可知,砂土蠕变是吹填砂土地基长期沉降的重要组成部分,特别是对于机场、液化天然气码头、进港高速等工后沉降要求严格项目。

目前已有许多学者对于砂性土蠕变沉降进行研究,但多为理论研究,缺乏足够的现场数据的对比分析且计算方法复杂。王艳芳等^[1]通过三轴蠕变试验对砂土蠕变规律进行研究,结果表明:在应力水平 S 不超过 0.8 的情况下, Merchant 和 Burgers 两个蠕变模型对砂土蠕变规律拟合效果较好。施小清等^[2]通过原状砂土样的一维蠕变试验,对比了 Burgers 和 Merchant 模型的适用性。张云等^[3]通过压缩试验研究发现,上海砂土具有明显的非线性蠕变特征。梅涛涛等^[4]通过砂性土蠕变试验和室内试验得出不同细粒含量和类型的流变元件相关参数,提出利用数值模拟和双曲线相结合的方法,计算砂性土的长期沉降。

本文通过截取砂性土纯蠕变数据,分析适用于砂性土长期沉降计算的方法,并与传统及基于原位试验的计算方法进行对比分析,验证计算方法的可行性。

1 蠕变试验数据处理

配置细粒含量分别为 0%、15%、25%、35% 且相对密实度 D_r 为 80%、60% 的试样,采用单向高压固结仪开展蠕变试验,细粒含量分别为小于 0.075 mm 的含黏土矿物细粒(细粒以淤泥配置,配置土样以 YN 表示)和非黏土矿物系数(细粒以石英

粉配置,配置土样以 SY 表示)。试样直径 61.8 mm、高 20.0 mm,各级荷载稳定标准为竖向变形量小于 0.005 mm/d。砂性土基本性质及蠕变试验数据参考文献[4]。

研究发现^[5],砂性土的应变速率-应变关系曲线呈现 2 个明显的转折点,见图 1。通过转折点的发生时间分离试样的蠕变变形,将砂性土的蠕变分为 3 个阶段:瞬时+固结阶段、固结+蠕变阶段、蠕变变形阶段。

以相对密实度 $D_r = 80\%$ 、含 25% 淤泥细粒的配置土样(25%-YN)、压缩试验荷载 100 kPa 为例,计算数据截取曲线各阶段见图 1。可以看出,应变速率可以明显区分为快速减小段、过渡段和直线段,最后的直线段即为蠕变稳定阶段,计算长期蠕变即采用此阶段数据。

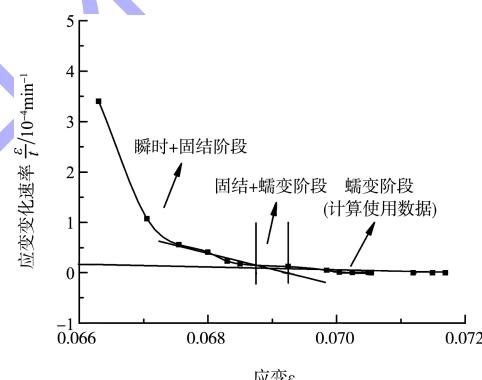


图 1 计算数据截取曲线各阶段

根据上述方法截取不同细粒含量、不同矿物类型以及不同相对密实度的砂性土纯蠕变阶段的数据,结果见表 1。

表 1 砂性土纯蠕变数据

细粒类型	荷载 50 kPa		荷载 100 kPa		荷载 200 kPa		荷载 400 kPa	
	时间/min	应变/ 10^{-5}	时间/min	应变/ 10^{-5}	时间/min	应变/ 10^{-5}	时间/min	应变/ 10^{-5}
80% 相对密实度-纯砂	0	0	0	0	120	20	120	40
	120	15	120	15	240	50	360	70
	240	30	360	25	480	70	720	105
	480	35	720	40	840	105	1 200	145
	840	40	1 200	50	1 320	130	2 640	195
	1 320	40	2 640	100	2 760	200	4 080	225
	2 760	55	4 080	110	4 200	215	5 520	235

续表1

细粒类型	荷载 50 kPa		荷载 100 kPa		荷载 200 kPa		荷载 400 kPa	
	时间/min	应变/ 10^{-5}	时间/min	应变/ 10^{-5}	时间/min	应变/ 10^{-5}	时间/min	应变/ 10^{-5}
80% 相对密实度-15% YN	0	0	0	0	0	0	0	0
	120	5	120	15	240	20	240	30
	360	15	360	40	600	35	600	50
	720	25	720	60	1 080	80	1 080	90
	1 200	35	1 200	100	2 520	170	2 520	190
	2 640	65	2 640	150	3 960	230	3 960	290
	4 080	85	4 080	190	5 400	275	5 400	345
	-	-	5 520	205	6 840	295	6 840	372
80% 相对密实度-25% YN	-	-	-	-	-	-	8 280	383
	0	0	0	0	0	0	0	0
	120	15	120	60	240	40	480	135
	360	35	240	80	600	90	1 920	235
	720	55	480	100	1 080	120	3 360	300
	1 200	60	840	125	2 520	190	4 800	365
	2 640	90	1 320	130	3 960	245	6 240	425
	4 080	120	2 760	195	5 400	280	7 680	485
80% 相对密实度-35% YN	5 520	135	4 200	225	6 840	310	9 120	525
	-	-	5 640	245	8 280	330	10 560	545
	0	0	0	0	0	0	0	0
	120	10	360	25	360	50	240	45
	240	25	840	65	840	130	600	95
	480	35	2 280	155	2 280	235	1 080	170
	840	40	3 720	255	3 720	330	2 520	290
	1 320	40	5 160	315	5 160	405	3 960	375
	2 760	75	6 600	370	6 600	460	5 400	445
	4 200	105	8 040	390	8 040	505	6 840	510
	5 640	135	-	-	9 480	527	8 280	565
	7 080	150	-	-	-	-	9 720	595
	-	-	-	-	-	-	11 160	611

2 基于广义开尔文的蠕变沉降计算模型

大面积砂土地基吹填项目一般按一维压缩工况考虑, 按经典的一维应力模型仅能得出一维蠕变参数, 为应用于三维地质模型建立, 首先需要将一维状态下的蠕变参数转换为三维应力状态下的蠕变参数^[6]。FLAC 3D 中提供了多种模型用来分析岩土体蠕变沉降, 其中广义 Kelvin 模型由 1 个 HOOK 体和 1 个 Kelvin 体串联而成, FLAC 3D 中三维状态下 Kelvin 蠕变本构关系拟合公式为:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{P}{K}b [c(1-ce^{-at})+1] \quad (1)$$

$$\sigma_{zz} = -P \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{K}{2} \left(3\varepsilon_{zz} + \frac{P}{K} \right) \quad (3)$$

式中: $K = \frac{E_0}{2(1+\mu)}$; $a = \frac{G_k/G+b}{\eta/G}$; $b = \frac{K}{K+4G/3}$; $c = \frac{1-b}{G_k/G+b}$; E_0 为弹性模量, 取压缩模量的 2 倍; μ 为泊松比, 取 0.35; K 为体积模量; G 为 HOOK 体的剪切系数; G_k 、 η 分别为 Kelvin 体的剪切系数和黏滞系数; P 为荷载; ε_{zz} 为轴向应变; σ_{zz} 为轴向应力; σ_{xx} 和 σ_{yy} 为侧向应力。

广义开尔文模型参数意义明确, 初步拟合时未出现参数拟合值不合理的情况, 参数获取过程:

1) 利用公式拟合砂性土室内蠕变试验数据,

拟合公式为：

$$y = A_1 e^{-x/t_1} + y_0 \quad (4)$$

式中： y 为应变； x 为时间； A_1 、 t_1 和 y_0 为参数。

2) 通过最小二乘法拟合出参数 A_1 、 t_1 和 y_0 ，结合体积模量 K 、泊松比 μ ，根据式(5)反算出参数 a 、 b 和 c 。

$$\begin{cases} a = \frac{1}{t_1} \\ b = \frac{y_0 + A_1 \cdot K}{P} \\ c = \frac{A_1 K}{Pb} \end{cases} \quad (5)$$

3) 根据参数 a 、 b 和 c 的定义反算出 G 、 G_K 和 η ，即得出数值分析软件中广义开尔文模型参数。

3 模型验证

为保证蠕变模型参数的正确性和深入分析其敏感性，首先对固结蠕变三维数值模型进行验证。试验条件与实际室内试验一致，模型尺寸 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，底部采用固定约束，侧面采用法向约束，在顶部施加相应的荷载，模型见图 2。

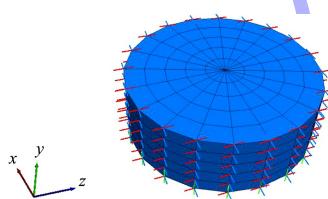


图 2 Flac 3D 数值模型

以 35%-YN、 $D_r=80\%$ 为例，模型参数见表 2，绘制模型计算结果见图 3。

表 2 模型参数

荷载/MPa	K/MPa	G/MPa	G_K/MPa	$\eta/(\text{MPa} \cdot \text{d})$
0.05	1.65	339.67	13.03	91.20
0.10	5.94	745.54	9.50	60.44
0.20	6.58	1 495.06	19.96	81.71
0.40	12.97	1 990.27	35.06	151.83

根据图 3 可知，数值计算结果和室内蠕变试验实测值吻合度相当好，因此通过数值分析软件

FLAC 3D、基于广义开尔文蠕变模型及拟合的参数分析计算砂性土地基的蠕变是可行的。

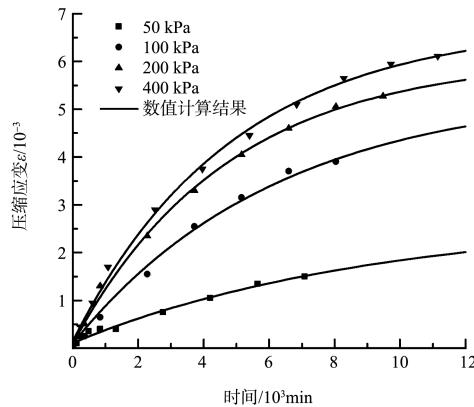


图 3 蠕变数据与数值计算结果对比

4 与传统计算方法对比分析

砂土地基的沉降计算方法主要有经验法、半经验半理论法以及纯理论计算方法，其中在工程中广泛使用的是半经验半理论法和经验法。欧标 1997^[7] 中推荐采用基于静力触探法 (CPT) 和标准贯入试验法 (SPT) 的沉降计算方法，其中广泛使用的是 Schmertmann 法。另外，工程中常用的计算砂土地基沉降的半经验方法为 De Beer 法。以下将基于广义开尔文的砂性土长期沉降计算方法与 2 种计算方法进行对比。

4.1 Schmertmann 法

欧美地基处理设计中常用基于 CPT 原位试验的经验计算方法，比较常见的可参考 BS EN 1997-2 附录 D.3 推荐的基于 CPT 的 Schmertmann 经验公式法。

对于粗颗粒土，当基础承受荷载 q 时，对应的沉降 s 可采用 Schmertmann (1970, 1978) 沉降计算法：

$$s = C_1 C_2 (q - \sigma'_{v0}) \int_0^{z_1} I_z / (C_3 E') dz \quad (6)$$

式中： C_1 为基于上覆地层应力修正的因子， $C_1 = 1 - 0.5 \times (\sigma'_{v0}/q - \sigma'_{v0})$ ； C_2 为时间修正因子， $C_2 = 1.2 + 0.2 \lg t$ ， t 为时间； C_3 为基于基础形状的修正因子，方形基础取 1.25，条形基础 ($L > 10B$) 取 1.75； σ'_{v0} 为地基底部的初始上覆地层应力； I_z 为应变影响因子； E' 为杨氏模量。

上述基于 CPT 的沉降计算公式中的 C_2 为长期

沉降修正系数, 通过该系数考虑长期的蠕变沉降, 但从该系数的计算公式可以看出, 长期沉降只与时间有关, 与细粒含量以及相对密实度均无关, 因此, 该计算公式并不合理。王德咏等^[8]提出根据大型载荷板反算长期沉降因子以修正基于 CPT 的砂土长期沉降。

4.2 De Beer 法

De Beer 法常用来计算砂性土沉降, 其形式与传统的次固结计算公式相近, 区别主要在于系数的选取不同, De Beer 计算公式的系数通过原位试验 CPT 获取, 其中原始公式中的 C 值采用 1.5, 后 Meyerhof^[9]推荐系数采用 1.9, 见式(7)。

$$s = \frac{2.3}{C} H \lg \left(\frac{p' + \Delta p}{p'} \right) \quad (7)$$

式中: s 为砂性土沉降; H 为土层厚度; p' 为有效上覆应力; Δp 为荷载增量; C 为计算系数, $C = 1.5 \frac{q_c}{p'}$, q_c 为 CPT 锥尖阻力。

4.3 工程案例对比分析

中东某吹填造陆工程现场开展了 2 次大型载荷板试验(简称 ZLT), 根据 ZLT 曲线推算的工后长期沉降值为 3.50、3.45 mm, 利用 ZLT 试验修正 CPT 沉降计算公式后, 得出的长期沉降值分别为 6.61、6.00 mm。

该工程采用 De Beer 法计算工后沉降, 计算结果为 6.70~8.50 mm, 而基于广义开尔文的砂土长期沉降计算方法得出的工后沉降为 9.70 mm。

表 3 沉降计算结果

阶段	计算依据	10 a 蠕变沉降-指型型	
		方法类型	沉降值/mm
ZLT-1 试验	Briaud and Garland	3.50	
验收 CPT 试验(基于 ZLT-1 修正)	Schmertmann	6.61	
ZLT-2 试验	Briaud and Garland	3.45	
CPT 试验(基于 ZLT-2 修正)	Schmertmann	6.00	
设计 次固结/Debeer	设计计算书	6.70~8.50	
广义开尔文计算方法	-	9.70	

本文提出的计算方法和传统次固结计算方法的计算值较接近, 均大于根据 ZLT 和 CPT 试验计算的沉降值。同样是根据原位试验推算工后沉降的方法, Briaud and Garland 法计算结果比 Schmertmann

法的数值更小, 原因是 Schmertmann 法提出的蠕变沉降估算公式适用于各种不同密实度砂土, 倾向于蠕变沉降的上限值, 而 Briaud and Garland 法的蠕变指数则是基于现场载荷试验沉降曲线拟合, 计算得到的蠕变沉降相对更可靠。本文提出的计算方法与传统次固结计算方法均用于设计阶段工后长期沉降预测, 相对而言偏保守, 计算中地基相对密实度按设计值考虑, 而现场实际土层相对密实度一般大于设计值。两者能够进行相互验证, 可分别服务于工程不同阶段, 满足不同阶段的需求。

4.4 不同细粒含量砂性土地基工后沉降计算分析

假定基础尺寸为 3 m×3 m, 回填砂性土厚度为 10 m, 基础荷载取为 250 kPa, 计算时间均为 10 a。基于广义开尔文的砂性土长期沉降计算方法和传统的 De Beer 方法计算结果的对比见图 4。

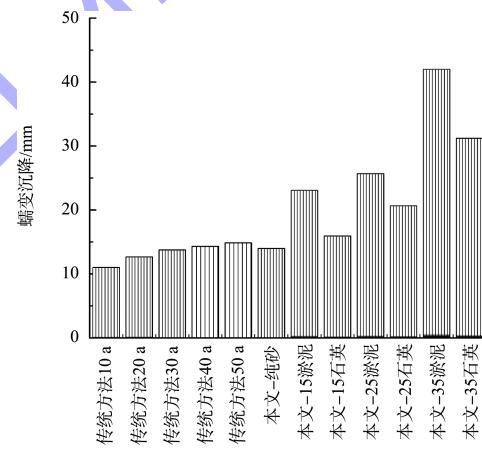


图 4 基础工况沉降计算结果对比

从图 4 可以看出, 本文-纯砂计算方法和传统计算方法 30 a 计算的蠕变沉降接近, 从侧面验证了本文计算方法的正确性和可行性。

5 结论

1) 通过截取砂性土蠕变试验数据, 获得了不同细粒含量、不同细粒类型以及不同相对密实度的砂性土的纯蠕变阶段数据, 通过数据拟合转换为广义开尔文蠕变参数模型, 进而提出基于广义开尔文模型的砂性土长期沉降计算方法。

2) 利用 FLAC 3D, 对广义开尔文蠕变模型进行验证, 数值计算结果和室内蠕变试验实测值吻合度相当好, 说明计算方法可行。(下转第 170 页)