



# 东人工岛软弱地基蠕变变形研究\*

王孝健, 张曦, 吴心怡

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 基于东人工岛现场实测数据, 利用双曲线法对地基土长期变形进行预测分析, 简化局部地层分界线, 选取 Burgers 本构模型, 利用有限差分法对软弱土体的主固结沉降和蠕变量进行计算, 得到了东人工岛软弱土体工后 5、10、50、120 a 的蠕变沉降量。同时, 通过有限差分法确定了蠕变计算时 Kelvin 模型与 Maxwell 模型的黏滞系数和剪切模量。通过与实测沉降数据进行对比, 软弱土体的蠕变沉降不可忽略。

**关键词:** 软弱地基; 蠕变沉降; 港珠澳大桥; 水下挤密砂桩

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0145-04

## Soft ground's creep deformation of eastern artificial island

WANG Xiao-jian, ZHANG Xi, WU Xin-yi

(CCCC Shanghai Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Based on the field test data, we predict the long-term deformation of foundation soils by the hyperbola method. Burgers constitutive model is selected by simplifying the regional stratigraphic boundary. In addition, the creep and primary consolidation settlement are calculated by the finite difference method. The creep settlement of soft soils after construction for 5, 10, 50, 120 years are obtained. Meanwhile, the viscous coefficient and shear modulus of Kelvin and Maxwell model are also achieved. By comparison between the calculated and measured data, the creep settlement of soft soils shouldn't be ignored during the engineering design and construction.

**Keywords:** soft ground; creep settlement; Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge; underwater sand compaction pile

关于岩土材料的蠕变特性国内外主要是研究材料的应力-应变状态的规律及其随时间的变化, 并根据所建立的本构规律来解决实际工程中与流变有关的工程问题<sup>[1]</sup>。土体的流变现象主要包括: 流动、应力松弛、长期强度和蠕变<sup>[2]</sup>。蠕变是土体发生流变的一种类型, 可以理解为竖向变形随时间的函数, 不同的时间段, 蠕变量的变形曲线也不同。黏性土体间的蠕变沉降可以达到总沉降量的 7%<sup>[3-4]</sup>, 工后时间越长蠕变量就会越大, 当沉降累计到一定量时, 带来的隐患也会变多, 关于深圳地区软土的长期变形主要是室内假定一些

参数进行研究<sup>[5-6]</sup>, 得到的是宏观的边界条件和变形趋势, 对土体材料的变形也是仅仅考虑在弹性变形范围以内的研究。文中依托港珠澳大桥工程结合现场实测数据, 对东人工岛挤密砂桩加固区的软弱地基开展蠕变变形研究。

## 1 工程背景及计算模型

### 1.1 工程背景

东人工岛靠近香港侧, 西侧与隧道衔接, 东侧与桥衔接, 人工岛平面基本呈椭圆形, 起止位置为 K6 + 964 至 K6 + 339, 人工岛轴线长度 625 m,

收稿日期: 2015-09-18

\*基金项目: 国家支撑计划课题项目(2011BAG07B00;2011BAG07B02)

作者简介: 王孝健(1988—), 硕士, 工程师, 从事岩土工程方面的设计与研究工作。

横向最宽处约 215 m，该区域天然水深约 -10.0 m。出露的主要地层有：①<sub>3</sub> 淤泥质黏土、②<sub>1</sub> 黏土、③<sub>1</sub> 淤泥质黏土、③<sub>1-1</sub> 淤泥质黏土、④<sub>1</sub> 粉细砂。选择 5-5 重点断面进行软土长期变形分析。

### 1.2 计算模型

根据实际地层概况，局部拉平地层分界线，简化的断面模型见图 1。

1) 地层。模型中原始地层共 5 层，分别为：①<sub>3</sub> 层，高程 -21 ~ -10 m，层厚 11 m；②<sub>1</sub> 层，高程 -25 ~ -21 m，层厚 4 m；③<sub>1</sub> 层，高程 -37 ~ -25 m，层厚 12 m；③<sub>1-1</sub> 层，高程 -50 ~ -37 m，层厚 13 m；④<sub>1</sub> 层，层厚 -70 ~ -50 m，层厚 20 m。

2) 堆载。堆载高程 5 m。

3) 岛内。插板高程 -18 ~ -46 m，上部回填中粗砂高程 -18 ~ 5 m。

4) 护岸。自下而上为：砂井高程 -39 ~ -31 m，砂桩高程 -31 ~ -18 m，抛填块石 -18 ~ 5 m。

5) 大圆筒。自下而上为：插板区高程 -42 ~ -18 m，回填中粗砂高程 -18 ~ 5 m。

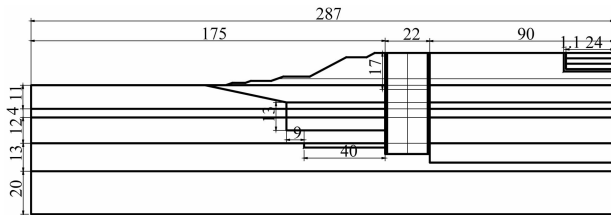


图 1 断面模型 (单位: m)

## 2 本构理论及计算参数

### 2.1 土体蠕变模型

软土长期变形涉及到渗流和超孔隙水压力，考虑渗流作用时可以将流体计算与力学计算进行耦合。从土流变的宏观角度出发建立的流变本构模型主要包括：理论模型、经验蠕变模型以及元件模型。通过收集大量文献资料以及应用于工程实践的试验材料分析发现，Burgers 模型在研究土体的蠕变特性应用较为广泛，本文选择 Burgers 模型来研究软土长期变形问题。

Burgers 模型由 Kelvin 模型与 Maxwell 模型串联而成，元件组合见图 2，模型的本构方程为：

$$\sigma + \left( \frac{\eta_M}{E_M} + \frac{\eta_M + \eta_K}{E_K} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_M \eta_K}{E_K E_M} \ddot{\sigma} = \eta_M \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_M \eta_K}{E_K} \ddot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中： $E_K$  与  $E_M$ 、 $\eta_K$  与  $\eta_M$  分别代表 Kelvin 模型与 Maxwell 模型中的弹性模量与黏滞系数。

当  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ ，求解式(1)得到蠕变方程为：

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} (1 - e^{-E_K t / \eta_K}) \right] \quad (2)$$

Burgers 模型的优点在于模型简单，能较好地反映蠕变过程中的瞬时弹性应变( $\sigma_0/E_M$ )、衰减性蠕变变形 $\left[ \frac{\sigma_0}{E_K} (1 - e^{-E_K t / \eta_K}) \right]$ 、稳定蠕变变形 $\left( \frac{\sigma_0}{\eta_K} t \right)$ 。Burgers 模型的特点说明它可以描述软土的蠕变变形规律。

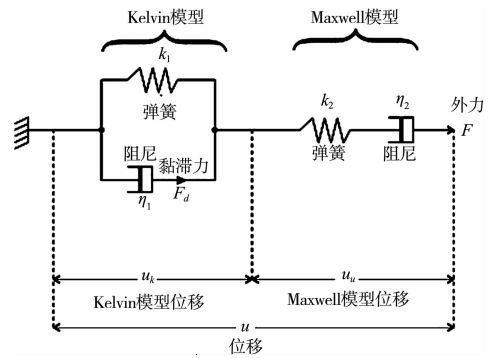


图 2 Burgers 模型元件

### 2.2 蠕变沉降主要参数

黏性土地基的沉降分为主固结沉降和次固结沉降(即蠕变沉降)，次固结沉降指的是超静孔隙水压力消散结束后，即主固结基本完成后，在有效应力不变的情况下，软弱土层仍随时间继续发生的变形。随着时间的推移，由于东人工岛主固结完成后主要发生蠕变沉降，具有一定的时效性，通过流固耦合来求解黏性土地基的总沉降。采用黏性土 Burgers 蠕变本构参数数值计算了地基的总沉降，根据东人工岛 2012-02-05—2013-03-02 实测沉降结果对数值计算参数进行反分析，确定出计算参数。以时间为主轴，计算出不同时间段的蠕变沉降。

根据图 2，Burgers 蠕变本构模型由 Kelvin 模型与 Maxwell 模型串联而成，两种模型的参数赋值结果见表 1。

土层弹性模量取值见表 2。

表 1 蠕变沉降主要参数

土层名称	体积模量/MPa	Kelvin 剪切模量 $G_K$ /MPa	Kelvin 黏性系数 $\eta_K/(10^3 \text{ MPa}\cdot\text{s})$	Maxwell 剪切模量 $G_M$ /MPa	Maxwell 黏性系数 $\eta_M/(10^6 \text{ MPa}\cdot\text{s})$
① <sub>3</sub> 淤泥质黏土	2.40	0.61	6.92	0.42	7.21
② <sub>1</sub> 黏土	7.94	0.75	8.81	0.57	6.20
③ <sub>1</sub> 淤泥质黏土	3.94	0.74	9.90	0.84	3.11
③ <sub>1,1</sub> 淤泥质黏土	7.58	0.73	10.1	0.86	2.98

表 2 土层弹性模量取值

土层名称	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E$ /MPa
① <sub>3</sub> 淤泥质黏土	0.24	3.74
② <sub>1</sub> 黏土	0.33	8.10
③ <sub>1</sub> 淤泥质黏土	0.24	6.14
③ <sub>1,1</sub> 淤泥质黏土	0.34	7.28

### 2.3 计算工况

根据东岛施工顺序, 将模型数值计算工况简化为:

1) 地应力平衡。包括开挖基床淤泥, 抛填中粗砂至 -10 m 高程, 打设砂井、挤密砂桩和钢圆筒。

2) 堆载。包括筒内回填中粗砂, 岛内外回填中粗砂至 -6 m, 筒内岛内施打塑排板, 岛内外回填至 5 m, 筒内降水 -18 m, 岛内降水 -7 m。时间 448 d。

3) 降水。岛内水位由 0.54 m 降至 -18 m, 通过分段降水来完成, 即由 0.54 m 降至 -1 m, 由 -1 m 降至 -3 m, 依次类推降至 -18 m。时间 300 d。

4) 长期变形。停止抽水, 固结时间 180 d; 土体蠕变沉降, 时间 1 110 d。

## 3 蠕变计算

### 3.1 数值分析

总沉降包括瞬时沉降 (这里忽略)、次固结沉降 (即蠕变沉降) 和主固结沉降。为了研究蠕变量, 单独计算了主固结沉降, 通过与包含蠕变的总沉降对比从而求得蠕变沉降量。

自沉降计算开始即开启蠕变计算模块, 可以看出首先是岛外护岸区竖向位移较明显, 但随着岛内插板、降水等工序的影响, 岛内位移迅速增加直至岛壁处位移达到竖向位移峰值。

分别统计主固结沉降量和总沉降量, 得出蠕

变沉降量和所占总沉降量的比例 (表 3), 土体变形阶段前期主要是主固结沉降变形, 工后 5 a 内蠕变沉降占总沉降比例为 0.74%, 随着时间增长, 工后 10 ~ 120 a, 蠕变沉降占总沉降量的比例由 1.94% 增至 4.58%, 蠕变沉降量由 5.8 cm 增至 14.6 cm, 土体长期变形过程中蠕变沉降有逐步增大趋势。

表 3 沉降量统计

时间	主固结沉降量/cm	总沉降量/cm	蠕变量/cm	蠕变占总沉降/%
工后 5 a	270.0	272.0	2.0	0.74
工后 10 a	292.7	298.5	5.8	1.94
工后 50 a	298.1	307.4	9.3	3.03
工后 120 a	304.0	318.6	14.6	4.58

蠕变是土的时效变形特性, 通过数值分析得到东人工岛的长期蠕变特性, 分析至 120 a 的沉降, 东岛土体的应变与时间关系见表 4, 应变与时间曲线见图 3。

表 4 应变-时间统计

时间/a	应变/ $10^{-6}$	说明
2	2.002 4	施工完成
3	2.527 4	工后 1 a
7	3.909 7	工后 5 a
12	5.128 5	工后 10 a
52	6.013 8	工后 50 a
122	7.911 2	工后 120 a

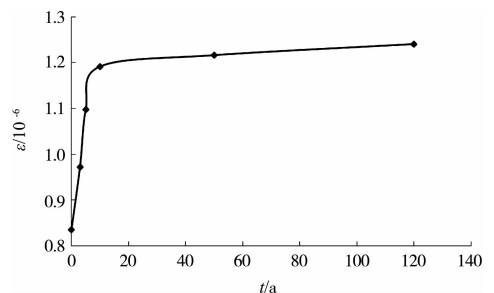


图 3  $\varepsilon$ - $t$  蠕变曲线

### 3.2 双曲线法沉降预测

以 5-5 断面建立三维数值计算模型，得到了工后 5、10、50、120 a 的沉降值，其中包括了主固结沉降和次固结沉降(蠕变值)，对东岛于 2012-02-05—2012-07-07 埋设了沉降观测点，并得到了沉降监测数据，通过经验公式根据现有实测数据对后期土体沉降变形趋势进行预测，选取监测点 K6 + 774-C2 数据与数值计算结果进行对比。

按照对数曲线预测法得到 K6 + 774-C2 点沉降预测方程：

$$s = 305.986\ 033\ 763\ 4 \ln t + 45.214\ 869\ 178\ 2$$

$$(R^2 = 99.3\%) \tag{3}$$

数值计算出的总沉降量包括主固结和蠕变沉降量(表 6)，工后 120 a 的数值计算结果为 318.6 cm，通过经验公式计算出的工后 120 a 沉降预测值为 332.5 cm，两者相差 13.9 cm，这是因为土体沉降阶段初期主固结沉降较大，蠕变沉降量所占比例较小，利用经验公式预测沉降时，其中的蠕变沉降量会有偏差，由于式(3)是采用了双曲线法进行总沉降的预测，式(3)对数方程通过数学转化可以转化为类似式(2)的衰减型指数方程，所以经验公式计算得到的总沉降与数值结果较接近。

表 6 监测点 K6 + 774-C2 实测值与数值计算值对比

t/a	预测值/cm	数值计算总沉降量/cm	说明
0	0	0	
0.5	190.6	143.8	
1	217.2	198.2	
2	226.3	271.3	施工完成
7	251.8	272.0	工后 5 a
12	265.5	298.5	工后 10 a
52	307.0	307.4	工后 50 a
122	332.5	318.6	工后 120 a

### 3.3 东岛蠕变特性

在低应力水平时土体蠕变可减速发展，速率最终趋于零，称为衰减蠕变过程；较高应力水平时可加速发展，称为非衰减蠕变过程，非衰减蠕变的变形一般包括减速蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段等 3 个阶段。这样，在小应力水平下，只出现第 1 阶段，蠕变具有衰减特征；在中应力水平下，只出现第 1、2 阶段，蠕变在不断

地发展；在较大应力水平下，会出现第 1、2、3 阶段，最后变形加速，发生破坏；在高应力水平下，可能只出现第 3 阶段，加荷后迅速破坏，总的蠕变变形可以分为瞬时变形  $\epsilon_0$ 、减速变形  $\epsilon_1$ 、等速变形  $\epsilon_2$  和加速变形  $\epsilon_3$  之和，视应力水平可以只出现其中的 1 个、2 个或 3 个部分。

通过对东人工岛土体的长期变形分析，得到淤泥质黏土的蠕变特性(图 3)，在重力作用下，黏性土的蠕变可以分为两个阶段，虽计算至 120 a，但是土体的蠕变沉降并未完成仍在继续发展，表明东人工岛处于中应力水平状态，总的蠕变变形瞬时变形  $\epsilon_0$  较大，主要发生在第 1 阶段，第 2 阶段发生蠕变减速变形  $\epsilon_1$ 。

### 4 结语

1) 根据东人工岛地基土应变与时间关系可以将其蠕变曲线分为快速增长和缓慢增长两个阶段。

2) 东岛工后 120 a 总沉降为 318.6 cm，其中蠕变量占 4.58%，表明东人工岛处于中等应力水平。

3) 采用 Burgers 蠕变本构模型，确定了 Kelvin 模型与 Maxwell 模型的黏滞系数和剪切模量值，可以计算得出东人工岛工后 5、10、50、120 a 的蠕变沉降量分别为 2.0、5.8、9.3、14.6 cm。基于数值软件选取实测参数进行蠕变沉降的计算，可以为工程后期使用和维护提供合理的数据参考。

### 参考文献：

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 谢定义, 姚仰平, 党法宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [3] O'Kelly B C. Compression and consolidation anisotropy of some soft soils [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(6): 1 715-1 728.
- [4] Pusch R, Zhang L, Adey R, et al. Rheology of an artificial smectitic clay[J]. Applied Clay Science, 2010, 47(1-2): 120-126.
- [5] 李惠, 陈金光, 乔卫国. 深圳湾海积软土的蠕变特性与本构模型研究[J]. 水运工程, 2011(10): 141-144
- [6] 张长生, 张伯友, 江辉煌. 深圳湾浅海相淤泥固结变形特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3): 35-37.