

# 公路软基蠕变-固结耦合有限元分析

朱鸿鹄<sup>1</sup>, 陈晓平<sup>2</sup>, 殷建华<sup>1</sup>

(1. 香港理工大学土木及结构工程学系, 香港; 2. 暨南大学力学与土木工程系, 广州 510632)

**摘要:** 软土的蠕变特性常常导致路堤出现沉降过大、甚至失稳等现象。本文采用同时考虑蠕变和固结效应的修正的广义 Kelvin 蠕变-固结模型, 对公路软基的时效性变形进行了有限元分析。在某软基上路堤填筑工程的变形分析中, 该方法的计算结果和监测数据基本吻合, 由此验证了该模型的有效性。本文针对该工程进行了一系列的参数分析, 讨论了软土的蠕变效应、塑料排水板布置方式和堆载速率等因素对该路堤变形发展和路堤稳定性的影响。

**关键词:** 公路路堤; 软基; 蠕变; 固结; 有限元; 塑料排水板

中图分类号: TU447

文献标识码: A

## Creep-consolidation coupled finite element analysis of a highway embankment on soft ground

Zhu Honghu<sup>1</sup>, Chen Xiaoping<sup>2</sup>, Yin Jianhua<sup>1</sup>

(1. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

2. Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** The creeping of soft soils frequently results in excessive settlements or even failure of highway embankments. A modified generalized Kelvin creep-consolidation model, which takes the coupling effect of creep and consolidation into account, is used to perform the finite element analysis of highway embankments on soft ground. For an embankment construction project on soft ground, this model is used to analyze the deformation of the embankment. The validity of this model is verified by comparing the computed data with the monitoring results. The influence of the creep effect of soft soil, the installation of prefabricated vertical drains and the loading rates on the time-dependent deformation and stability condition of the embankment are studied by using a series of parametric analysis.

**Key words:** highway embankment; soft ground; creep; consolidation; finite element analysis; prefabricated vertical drain (PVD)

## 0 引言

软土的变形具有明显的时间效应, 因而常常导致在软土地基上兴建的路堤出现沉降过大、甚至失稳等问题, 影响公路的安全运营。为了加速路堤施工期间的固结沉降, 尽量降低公路运营期的工后沉降, 一般采用排水预压或真空预压等方式进行处理。研究表明, 在地基排水固结过程中蠕变已经开始发挥作用, 软土的时效性变形是蠕变和固结两种效应相互耦合的结果<sup>[1~3]</sup>。传统的路堤设计与施工只考虑到软土地基的排水固结效应, 忽略了蠕变效应, 容易低估路堤变形的长期发展趋势。近年来, 国内外一些学者对软基排水固结处理方法进行了深入的理论研究与数值分析<sup>[4~10]</sup>, 但是大部分研究均

未对软土蠕变、固结的耦合效应作进一步的研究。

本文结合流变模型理论和 Biot 固结理论, 建立了一个修正的广义 Kelvin 蠕变-固结模型, 并编制了考虑到软土固结和蠕变之间相互作用的完全耦合的有限元程序。针对某个软土地基上填筑路堤的工程实例, 采用该程序进行了有限元分析, 分析结果和监测数据基本吻合。本文进行了一系列的参数分析, 研究了软土蠕变效应、塑料排水板布置方式及路堤堆载速率等因素对该路堤时效性变形发展和稳定性的影响。在此基础上, 提出了减小路堤长期变形这一危害的工程对策和优化设计方案。

收稿日期: 2009-01-07; 修订日期: 2009-02-25

作者简介: 朱鸿鹄 (1979-), 男 (汉族), 江苏苏州人, 博士, 副研究员。

# 1 修正的广义 Kelvin 蠕变-固结模型

## 1.1 蠕变模型的基本形式

室内试验研究表明<sup>[3]</sup>, 软土在恒定荷载下表现出来的衰减型蠕变可用五元件的广义 Kelvin 流变模型来近似描述。为了建立软土的非线性本构关系, 可将该模型修正为具有非线性弹性-粘弹性模量的修正广义 Kelvin 模型。由于软土的瞬时应力应变关系一般呈明显的双曲线型, 所以该模型的弹性部分可采用 Duncan-Chang 模型来描述, 而与时间有关的粘弹性部分则保留不变。图 1 为修正的广义 Kelvin 模型的示意图。

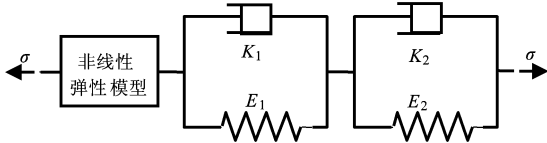


图 1 修正的广义 Kelvin 模型 (五元件)

## 1.2 蠕变模型的数学表达

由五元件广义 Kelvin 模型和 Duncan-Chang 模型的应力应变关系, 可推导出修正的广义 Kelvin 模型的蠕变方程。该方程采用矩阵形式表示为<sup>[11]</sup>:

$$\{\mathbf{d}\epsilon\} = [\mathbf{D}_{ne}]^{-1} \{\mathbf{d}\sigma\} + \left[ \frac{[\mathbf{A}]}{E_1} (1 - e^{-\eta_1 t}) + \frac{[\mathbf{A}]}{E_2} (1 - e^{-\eta_2 t}) \right] \{\mathbf{d}\sigma\} \quad (1)$$

式中:  $[\mathbf{D}_{ne}]$  为非线性弹性刚度矩阵;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为与应力无关的粘弹性参数;  $E_1$ 、 $E_2$  为与应力有关的粘弹性参数, 可分别表示为<sup>[11]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= k_1 p_a \left\{ \frac{p}{p_a} \right\}^{n_1} \\ E_2 &= k_2 p_a \left\{ \frac{p}{p_a} \right\}^{n_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $k_1$ 、 $n_1$ 、 $k_2$ 、 $n_2$  均为蠕变参数;  $p_a$  为大气压力。

式 (1) 为五元件修正广义 Kelvin 模型的应力应变关系。该模型包含了 Duncan-Chang 模型的 8 个参数  $\varphi'$ 、 $c'$ 、 $R_f$ 、 $k$ 、 $n$ 、 $G$ 、 $F$  和  $D$ , 以及 6 个粘弹性参数  $k_1$ 、 $n_1$ 、 $k_2$ 、 $n_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 。这些参数均可通过室内常规三轴剪切试验和三轴排水蠕变试验确定。

土性参数和 Duncan-Chang 模型参数

土层	$\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\varphi'$ ( $^\circ$ )	$c'$ ( $\text{kPa}$ )	$R_f$	$K$	$n$	$G$	$F$	$D$	$K_{ur}$	$m$	$k_h \times 10^{-4}$ ( $\text{m}^\circ \cdot \text{d}^{-1}$ )	$k_v \times 10^{-4}$ ( $\text{m}^\circ \cdot \text{d}^{-1}$ )
路堤填土	20	27.1	23	0.915	222	0.422	0.3	0	0.789	666	0.422	7.26	3.61
粉质粘土	19	27.5	7.5	0.8	20	0.55	0.3	0	0	60	0.55	7.26	3.61
淤泥质粉质粘土	17.5	13	14.5	0.76	18	0.68	0.36	0	0	54	0.68	4.84	2.41

表 1

## 1.3 修正广义 Kelvin 蠕变-固结模型及有限元解

将式 (1) 代入 Biot 固结理论中的平衡方程, 即可得到修正广义 Kelvin 蠕变-固结模型。此时, 式 (1) 中的应力  $\sigma$  为土中的有效应力  $\sigma'$ 。相应地, 修正广义 Kelvin 蠕变-固结模型的有限元解为:

$$\begin{bmatrix} K & K^T \\ K^{T^T} & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta w \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R - R_t + R_{crep} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\{R_{crep}\}$  为软土蠕变产生的附加结点荷载项。当  $\{R_{crep}\} = 0$  时, 式 (3) 即退化为 Biot 固结理论的有限元解。

## 2 公路软基实例的有限元分析

### 2.1 工程概况

某高速公路路堤建于深厚软土层上<sup>[12]</sup>, 路堤的稳定性及长期变形问题相当突出。地基土沿深度方向从上至下依次为 2m 厚的粉质粘土、8m 厚的淤泥质粉质粘土以及下卧粉砂层和硬粘土。在软土地基中插设了塑料排水板, 排水板按梅花形布置, 间距 1m, 深 10m, 钻穿软土层。为了提供足够的排水固结时间和减缓施工期过快的沉降速率, 路堤填筑分 2 期进行。第一期为 16d, 填筑至 2.3m 处, 预压 40d; 第二期为 27d, 填筑至 4.3m 处。

### 2.2 有限元分析网格和计算参数

图 2 为计算断面的网格划分。表 1 为有限元分析中所用到的土性参数和 Duncan-Chang 模型参数, 其取值均根据文献 [12, 13]。为了实现该问题从三维到二维的等效, 采用不考虑井阻效应的砂井地基平面问题的转化公式<sup>[13]</sup>, 将排水板设置区土体的水平向渗透系数进行了放大。对于非线性粘弹性参数, 由于该工程缺乏蠕变试验资料, 所以参照同类型土取值, 详见表 2。

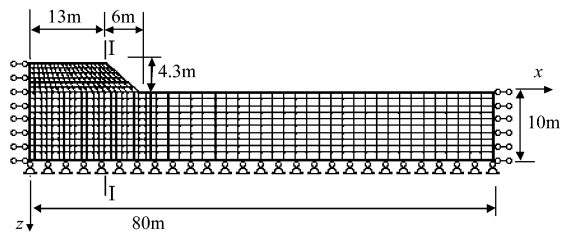


图 2 有限元网格划分

非线性粘弹性参数

表 2

土层	$k_1$	$n_1$	$\eta_1$	$k_2$	$n_2$	$\eta_2$
路堤填土	5200	1.4	0.94	5200	1.4	0.94
粉质粘土	5200	1.4	0.94	5200	1.4	0.94
淤泥质粉质粘土	480	3.78	1.02	400	5.53	30

### 2.3 有限元计算方案及结果

作为对比, 采用了 2 种方案对该工程进行了有限元分析。方案 1 为非线性弹性-粘弹性固结有限元分析, 即考虑土体的蠕变-固结耦合特性, 采用修正的广义 Kelvin 蠕变-固结模型进行有限元分析。方案 2 为非线性弹性固结有限元分析, 即忽略地基土的蠕变特性, 土体的应力-应变关系采用 Duncan-Chang 模型, 根据 Biot 固结理论进行有限元计算, 相应的模型参数均保持不变。

图 3 为路堤中心及路肩附近两点的沉降量随时间发展的曲线。从图中可以看到, 方案 1 由于考虑了蠕变效应, 使得路堤填筑完成后相当长时间内沉降仍有所发展; 而方案 2 所得沉降在 180d 左右停止发展, 在图 3 中表现为水平线。

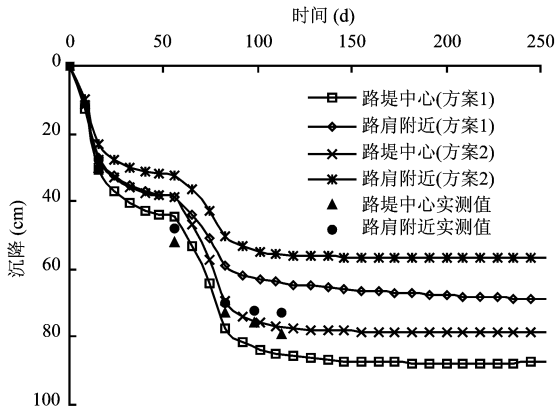


图 3 地表沉降随时间发展曲线

与实测值相比, 采用非线性弹性-粘弹性固结有限元计算 (方案 1) 所得路堤中心和路肩附近沉降值与之基本吻合, 尤其是沉降速率几乎相同, 表明修正的广义 Kelvin 蠕变-固结模型在该工程应用中的合理性。图 3 亦显示, 与实测值相比, 路堤填筑后的沉降计算值在路堤中心处偏大, 在路肩附近偏小, 该误差产生的原因可能是由于有限元计算忽略了塑料排水板的阻滑作用。在非线性弹性固结有限元分析中 (方案 2), 沉降计算值与实测值相比普遍偏小, 尤其在路肩处。这同时也说明蠕变的存在对于路肩附近区域的沉降影响较大。

从图 4 结果可以看到, 在路肩以下的 I-I 剖面 (剖面位置见图 2) 中, 侧向位移沿深度变化呈抛物线型, 其最大值出现在地表下某一深度处, 并具有

随时间增长逐渐向浅层发展的趋势。不考虑土体的蠕变特性 (方案 2) 时, 算得的侧向变形在数值上比非线性弹性-粘弹性模型 (方案 1) 计算结果偏小较多。从位移值减小的相对量来看, 水平位移比竖向位移减小得更多, 这说明软土地基的蠕变对土体侧向变形的影响大于对竖向变形的影响。

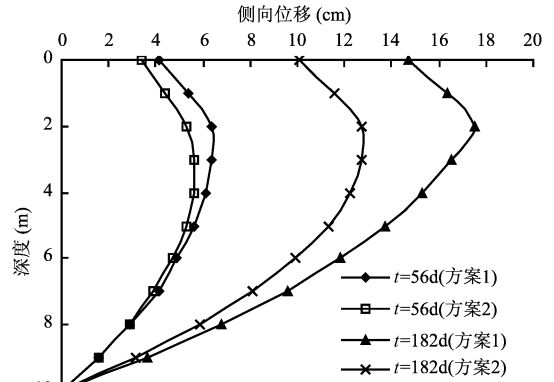


图 4 I-I 剖面侧向位移沿深度分布曲线

### 3 公路软基变形的影响因素分析

#### 3.1 软土蠕变效应的影响

一般认为, 软土的蠕变效应主要会导致路堤工后沉降过大, 但一般不会造成路堤稳定状态的改变。但是通过有限元分析发现, 软基蠕变长期发展对路堤稳定性的影响绝对不可轻估。例如, 在保持其他参数不变的情况下, 将表 2 中淤泥质土的蠕变相关参数  $k_1$ 、 $k_2$  分别减小为 380 和 300, 观察此时路堤的变形。从图 5 中可以看到, 在  $t=119d$  时, 由于坡脚以外的土体隆起过大, 该处突然发生侧向挤出, 表明软土蠕变导致了路堤的破坏。这说明, 对路堤的稳定性而言, 是否考虑到软土的蠕变效应并采取相应的工程措施, 是一个至关重要的工程问题。

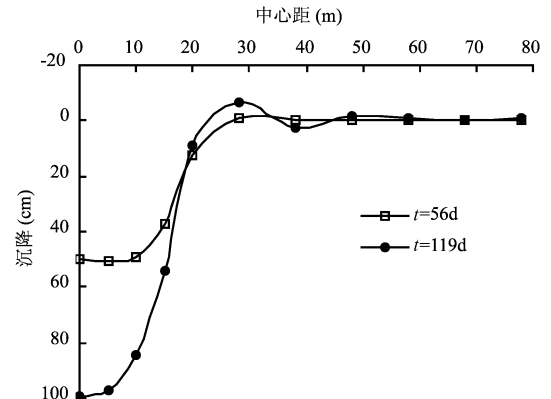


图 5 地表沉降分布曲线

#### 3.2 塑料排水板布置方式的影响

在软土地基中是否设置塑料排水板以及选取何种布置方式,直接关系到路堤的变形性状和稳定性。一般认为,在软基中打设塑料排水板,增加了竖向排水通道,可加速地基排水固结的过程。排水板间距越小,在堆载期间完成的沉降所占比例越大,剩余沉降量越小,软基处理效果越明显。而选择较大的排水板间距则可能导致工期的延长。

如果对该软基不设置任何竖向排水体,只铺设水平砂垫层,路堤沉降的非线性弹性——粘弹性固结有限元计算结果见图6(a)。由于天然土层排水性能很差,堆载时路堤沉降缓慢,固结时间长,因而难以消除工后沉降。在第二级加荷完成后,沉降速率呈非衰减蠕变特征。当变形积累到一定程度,导致路堤发生破坏,而且破坏首先是从坡脚外侧开始。

图6(b)是将排水板间距设为2m后的计算结果。与图3中排水板间距1m的工况(见方案1)相比,由于软基排水性能的削弱,加荷引起的沉降发展缓慢,180d后仍保持着较大的沉降速率。地基蠕变持续发展会增大路堤失稳破坏的概率。

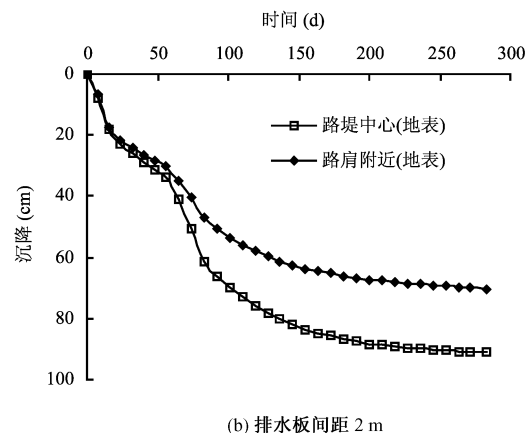
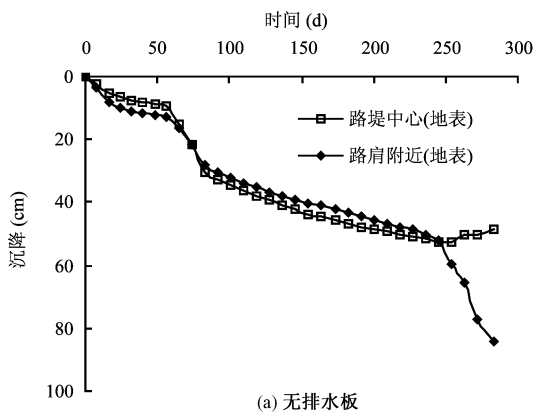


图6 地表沉降随时间发展曲线

此外,还进一步增大排水板间距为4m、6m,进行了多组数值模拟,限于篇幅此处不一一列出。计算结果表明,在其他条件均不改变的情况下,增大塑料排水板的间距,使得软基排水性能变差,固结速率明显减缓,软基的蠕变作用相对增强。

由上述分析可以得出这样的结论:在排水不畅的情况下,软基的变形中蠕变变形所占比例较大,出现蠕变破坏的可能性较高;而在排水通畅的条件下,土体的变形主要是排水固结造成的,蠕变作用的考虑与否只是对计算结果的有限修正。这说明,改善软基的排水条件可以有效地降低蠕变作用对工程的不利影响。同时要指出的是,蠕变特性本身是软土的一种客观的属性,它不会因为排水条件的改善而完全消失。

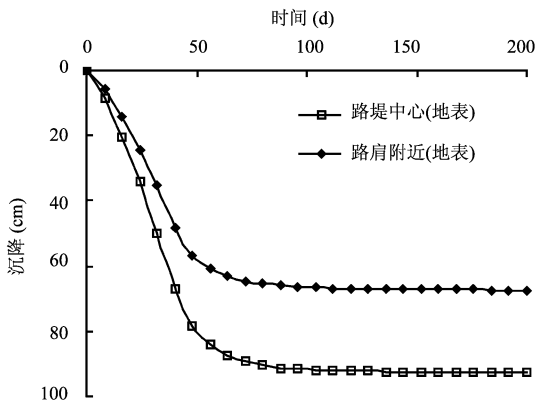
### 3.3 堆载速率的影响

在进行排水固结设计时,不仅需要合理确定竖向排水体的布置方式,还需要在分析软基固结、强度增长和沉降发展的基础上,拟定合理的逐级加载进程,控制加荷速率,保证路堤始终在稳定条件下施工。在其他条件不变的情况下,对本工程实例进行了以下2种填土方案的数值模拟。在填土方案1中,路堤在43d内一次填筑完成;在填土方案2中,路堤填筑分2期进行,第一期为16d,填筑至2.3m处,预压20d,第二期27d,填筑至4.3m处。

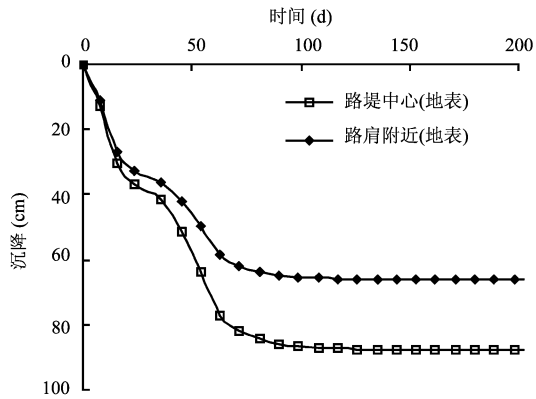
计算结果表明(见图7),若采用填土方案1,沉降在加载过程中发展速率过快,地表最大平均沉降速率超过20mm/d。根据工程经验,过快的加载速率可能会导致软基局部剪切破坏,所以是不安全的。而方案2分两级加载,不仅减小了加载期的沉降速率,有效控制了残余沉降量,而且间歇期比原方案缩短了20d。通过多次这样的方案比选,即可获得既保证排水预压处理效果又缩短施工工期的最优方案。

## 4 结语

本文所建的修正广义 Kelvin 蠕变—固结模型,可考虑软土的蠕变—固结耦合效应,是一种更为合理的软基变形计算方法。有限元分析表明,软基的蠕变—固结耦合特性对于路堤的变形和稳定性有着重要的影响。特别是在地基排水不良的条件下,蠕变作用将是路堤稳定性的控制因素之一。



(a) 填土方案 1



(b) 填土方案 2

7

[ 1 ] Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings [ J ]. *Geotechnique*, 1967, 17 (2): 81 ~ 118.

[ 2 ] , . — [ J ] . , 2003, 22 (5): 728 ~ 734.

[ 3 ] , , . [ J ] . , 2005, 24 (12): 2142 ~ 2148.

[ 4 ] Hird C C, Pyrah I C, Russell D. Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground [ J ]. *Geotechnique*, 1992, 42 (3): 499 ~ 511.

[ 5 ] Zhu G F, Yin J H. Finite element consolidation analysis of soils with vertical drain [ J ]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2000, 24 (4): 337 ~ 366.

[ 6 ] Indraratna B, Banunawita C, Redana I W, McIntosh G. Modelling of prefabricated vertical drains in soft clay and evaluation of their effectiveness in practice [ J ]. *Ground Improvement*, 2003, 7 (3): 127 ~ 137.

[ 7 ] Zhu G F, Yin J H. Consolidation analysis of soil with vertical and horizontal drainage under ramp loading considering shear effects [ J ]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2004, 22 (1): 63 ~ 74.

[ 8 ] Borges J L. Three-dimensional analysis of embankments on soft soils incorporating vertical drains by finite element method [ J ]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31 (8): 665 ~ 676.

[ 9 ] Huang W X, Fityus S, Bishop D, Smith D, Sherg D C. Finite-element parametric study of the consolidation behavior of a trial embankment on soft clay [ J ]. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2006, 6 (5): 328 ~ 341.

[ 10 ] , . [ J ] . , 2005, 13 (1): 135 ~ 139.

[ 11 ] , , . Kelvin 蠕变固结模型研究 [ J ] . , 2006, 25 (S2): 3428 ~ 3434.

[ 12 ] , , . [ J ] . , 2001, 1: 23 ~ 26.

[ 13 ] , . [ J ] . ( ), 2003, 31 (4): 470 ~ 473.

( 22 页 )

[ 1 ] . [ M ] . : , 1997.

[ 2 ] , , . [ M ] . : , 2005.

[ 3 ] , , . [ J ] . , 2003, 24 ( ): 418 ~ 422.

[ 4 ] . [ J ] . , 2006, 20 (4): 106 ~ 107.