

# 考虑蠕变特性的软土路堤沉降有限元分析\*

朱 强<sup>1,2</sup>, 张惠明<sup>2</sup>

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098 2. 珠海铁科岩土工程技术开发有限公司, 广东 珠海 519000)

摘 要: 高速公路软土地基的工后沉降很大部分来自软土的次固结沉降, 因此采用有限元计算工后沉降有必要考虑软土的蠕变特性。利用 Plaxis 软件对揭普高速某断面软土地基路堤填土施工进行数值模拟, 通过等效渗透系数将砂井地基简化为天然地基进行计算, 考虑软土蠕变特性, 采用软土蠕变(SSC)模型, 结合 Biot 固结有限元, 计算施工期沉降和工后沉降, 得到与实际较相符的结果。

关键词: 软土地基; 有限元分析; 揭普软土; 蠕变; 工后沉降

中图分类号: U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-5322(2007)01-0064-04

堆载预压法是高速公路软基处理中常用的方法, 在采用堆载预压处理软土地基时, 由于软土的高压缩性、低渗透性和低强度, 修建在软土地基上的路堤经常要遇到沉降和稳定问题。软基的沉降问题主要是工后沉降问题, 即竣工后软基仍然发生较大的沉降变形从而影响道路正常使用。因此如何准确计算软土地基的沉降和工后沉降是值得研究的问题。

软土的工后沉降很大部分来自次固结沉降, 因此在采用有限元计算软土路堤沉降和工后沉降时, 有必要考虑软土的蠕变特性。本文采用软土蠕变模型<sup>[1-2]</sup>, 结合 Biot 固结理论, 对揭普高速某断面的软土地基路堤填土施工进行数值模拟, 研究路堤的沉降变形特性和工后沉降。

## 1 软土蠕变模型

Plaxis 中的软土蠕变模型能较好的反映软土蠕变特性, 该模型是修正剑桥模型<sup>[3-4]</sup>的扩展, 两者的主要区别有两点: 一是软土蠕变模型采用 Mohr-Coulomb(MC)准则来描述破坏, 二是软土蠕变模型考虑了次压缩。SSC 模型中总的体应变定义为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^{cr} = \varepsilon_v^e + \varepsilon_{vc}^{cr} + \varepsilon_{vac}^{cr} =$$

$$k^* \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) + (\lambda^* - k^*) \ln\left(\frac{p'_{pc}}{p'_{p0}}\right) + \mu^* \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_v$  为在  $t_c + t'$  时间内平均有效应力由  $p'_0$  增加到  $p'$  所产生的总体积应变。总的体应变分为弹性和粘塑性两部分, 分别用上标  $e$  和  $cr$  表示。粘塑性部分又可分为主固结部分和主固结结束后部分。分别用下标  $c$  和  $ac$  表示, 之间关系见图 1。上式中参数  $k^*$ ,  $\lambda^*$  和  $\mu^*$  分别为修正膨胀指数, 修正压缩指数和修正蠕变指数, 三者均可通过等向压缩试验和固结试验得到。其微分表达式为:

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_v^e + \dot{\varepsilon}_v^{cr} = k^* \frac{\dot{p}'}{p'} + \frac{u^*}{\tau} \left(\frac{p'}{p'_p}\right)^{\frac{\lambda^* - k^*}{u^*}} \quad (2)$$

为了将 SSC 模型扩展到任意应力条件, 引入等效应力  $p^{ep}$ , 定义为:

$$p^{ep} = p' + \frac{q^2}{M^2(p' + c' \cot \varphi')} + (p' + c' \cot \varphi') \quad (3)$$

同时引入了等效的前期固结压力  $p_p^{ep}$ , 为体积蠕变的函数

$$p_p^{ep} = p_{p0}^{ep} \exp\left(\frac{\Delta \varepsilon_v^{cr}}{\lambda^* - k^*}\right) \quad (4)$$

SSC 模型在  $p' - q$  的屈服轨迹见图 2, 在修正剑桥

\* 收稿日期 2006-11-27

作者简介: 朱 强(1979-)男, 湖南岳阳人, 硕士, 主要研究方向为软基处理及边坡稳定性。

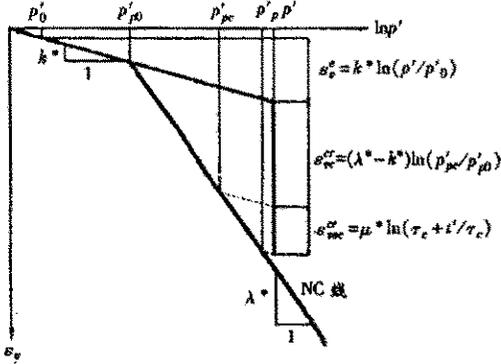


图 1 体应变和平均应力的对数关系

Fig. 1 Logarithmic relationship between volumetric strain and mean stress including creep

模型中  $M^*$  线代表临界状态线,而 SSC 模型中采用 MC 屈服准则,由图 2 可以看到  $M^*$  线和 MC 线距原点有相同的偏移量  $c' \cot \varphi'$ ,公式 (3) 也表明了这一点。图 2 中 MC 线是固定的,但“帽子”

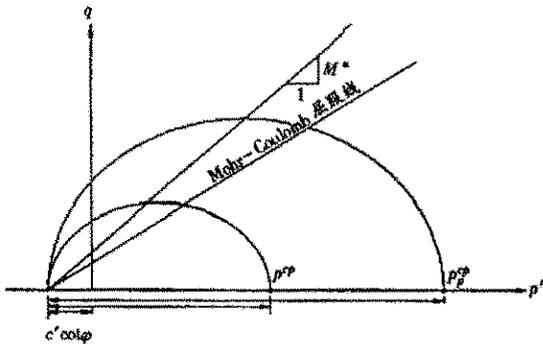


图 2 SSC 模型在平面上的屈服面

Fig. 2 Yield surfaces of the SSC-model in  $p'-q$  plane (椭圆上的  $p_p^{ep}$ ) 会由于体积蠕变而产生变化。将公式 (4) 中的  $p'$  和  $p'_p$  用相应的等效应力替代,应变率于是可以写为:

$$\dot{\varepsilon} = \underline{D}^{-1} \dot{\underline{\sigma}}' + \frac{1}{\alpha} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{ep}}{p_p^{ep}} \right)^{\frac{\lambda^* - k^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{ep}}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (5)$$

其中

$$p_p^{ep} = p_{p0}^{ep} \exp\left(\frac{\Delta \varepsilon_v^{cr}}{\lambda^* - k^*}\right) \quad \alpha \text{ 定义为 } \alpha = \frac{\partial p^{ep}}{\partial p'}$$

由此可以将 SSC 模型看作将蠕变效应考虑在内的修正剑桥模型的扩展。

## 2 砂井地基等效竖向渗透系数

通过打设砂井(或塑料排水板)加固软基,其原理是缩短了土体排水距离,在荷载作用下加速排水,从而达到加速土体固结的目的。从宏观上说相当于增加了土体的竖向渗透性。现有的有限

元计算大多通过等效转换将轴对称问题转换为平面问题,将砂井地基转换为砂墙地基来处理,以便于简化计算,但仍然较为复杂,不易在工程中推广应用。本计算采用文献 [5] 提出的等效竖向渗透系数,将砂井地基等效转化成渗透系数较大的天然地基进行计算。砂井(或塑料排水板)加固地基等效竖向渗透系数可用下式表示:

$$k_{ve} \left( 1 + \frac{k_h}{k_v} \frac{2.5l^2}{\mu D_e^2} \right) k_v \quad (6)$$

式中  $l$  为排水长度; $D_e$  为砂井排水有效的直径; $k_h$ 、 $k_v$  为土层水平与竖向渗透系数,参数  $\mu$  用下式计算:

$$u = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_n}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} + \pi \frac{2l^2 k_h}{3q_w} \quad (7)$$

式中  $n = D_e/d_w$ ,  $d_w$  为砂井直径,  $s = d_s/d_w$ ,  $d_s$  为涂抹区直径,取  $d_s = 2d_m^{[6-7]}$ ,  $d_m$  为芯棒等效直径,可以取 2 倍砂井直径  $d_w$ ;  $k_s$  为涂抹区的水平渗透系数; $q_w$  为砂井或塑料排水板的排水能力。固结过程中土体水平渗透系数和等效竖向渗透系数随孔隙比按 Taylor 公式变化:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{e - e_0}{C_k}\right) \quad (8)$$

式中  $k_0$  和  $e_0$  分别为初始渗透系数和初始孔隙比,  $C_k$  为渗透系数改变指数,可以取  $C_k = 0.5e_0^{[8-9]}$ 。

## 3 软土路堤固结有限元计算及结果分析

### 3.1 工程概况

揭普高速公路是广东“十五”期间的重点建设项目,是粤东山区通往经济发达地区的主干道。该线路软土地基分布广泛,软土主要分布于平原区和山间洼地,软土具有物理力学性质差,上覆硬壳层厚度薄(一般小于 1.0 m)、强度低、孔隙比大、压缩性高的特点。k7+570 段软基处理采用堆载预压排水固结法,袋装砂井打设间距 1.0 m,直径 70 mm,梅花形布置,打设深度 10 m。各土层的物理力学性质指标如表 1:

### 3.2 路堤施工过程的有限元模拟及计算结果分析

有限元计算中,由于路堤是对称结构,取路堤的一半建立有限元模型,计算范围为地表下 29 m 的深度和距离路堤中心线 47 m 的水平范围。淤泥软土层分别采用 M-C 模型和 SSC 模型进行计算,SSC 模型中参数分别取 0.130、0.022、0.006 7,

表 1 各土层物理力学性质指标及计算参数

Table 1 Parameters of subsoil and model paramters for FEM

土层	厚度 /m	$\gamma$ /kN $\text{m}^{-3}$	$E_s$ /MPa	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$e_0$	$v$	$k_h$ / $\text{ms}^{-1}$	$k_v$ / $\text{ms}^{-1}$	$k_{ce}$ / $\text{ms}^{-1}$
粉质粘土	0.5	18.6	4.0	34.0	5.0	0.807	0.20	$9.62 \times 10^{-8}$	$9.62 \times 10^{-8}$	$7.37 \times 10^{-7}$
淤泥	8.2	15.0	1.12	11.7	11.4	2.393	0.35	$3.30 \times 10^{-9}$	$4.90 \times 10^{-9}$	$6.83 \times 10^{-8}$
中粗砂	2.3	19.2	10.2	2.0	28.0	0.57	0.30	$1.16 \times 10^{-5}$	$1.16 \times 10^{-5}$	-
粉质粘土	13	18.8	6.68	26.6	13.4	0.807	0.30	$6.37 \times 10^{-9}$	$6.37 \times 10^{-9}$	-

其它土层均采用采用 M - C 模型。填土施工结束后路堤整体竖向沉降如图 4 :

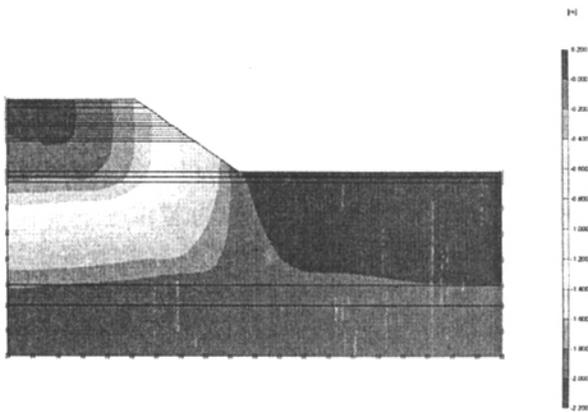


图 3 路堤竖向沉降云图

Fig. 3 Vertical displacement of embankment

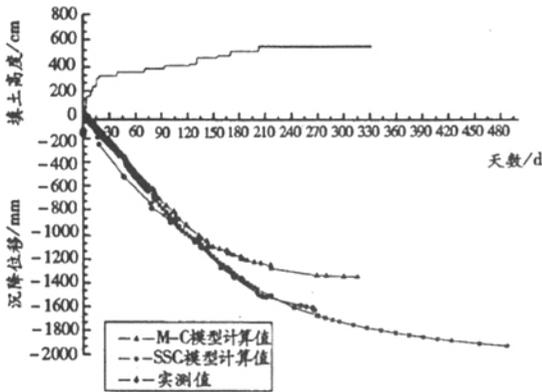


图 4 路基中心地面沉降 - 时间曲线

Fig. 4 Settlement curver on the center of ground surface

从图 3 可以看到路堤中心沉降量最大,朝两边逐渐减小,沉降等值线呈 U 形分布,坡角处略微隆起,与实际情况相符。

路堤中心地面沉降 - 时间曲线见图 4。由图 4 可以看出,分别采用 M - C 模型和 SSC 模型计算的沉降量在加载初期的差别不大,随着时间的增长,采用 M - C 模型计算的曲线下降速率减慢,逐渐趋于稳定,最后不再变化,曲线基本上呈水平

线,表明固结已经完成。而采用软土蠕变模型计算结果,沉降尚未稳定,表现较明显的次压缩沉降,这与实测数据吻合。因此在软土地基沉降计算中,有必要考虑软土的蠕变特性。同时还可以计算工后沉降,有限元计算工后沉降量为 73 mm,工后 3 年实际观测沉降量约 40 mm,计算值与实测值非常相符。图 5 为软基中心点的距地表 2.9 m 深处孔隙水压力随时间变化曲线。计算值和实测值变化规律上表现出一致。

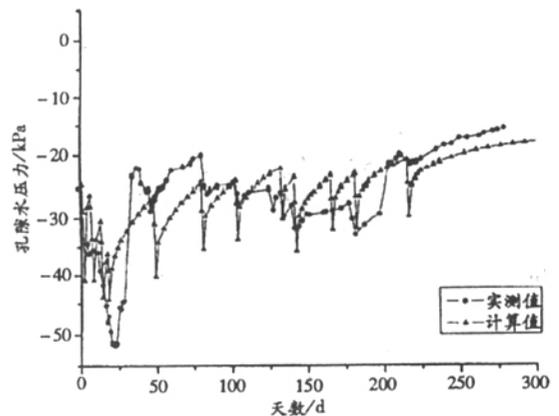


图 5 孔压 - 时间变化曲线

Fig. 5 The relation curves of pore water pressure - timeat the center of ground surface in depth of 2.9 m

### 4 结语

(1)软土地基工后沉降计算需要考虑软土的次压缩量,因此限元计算工后沉降时需要采用能反映软土蠕变特性的弹粘塑模型。

(2)SSC 模型较好的考虑了软土的蠕变特性,采用该模型计算得到了与实际较相符的结果。

(3)通过等效渗透系数将砂井地基简化为无砂井天然地基进行有限元计算,无需设置排水单元,大大简化了有限元建模和网格划分,而且参数简单,意义明确。

## 参考文献:

- [ 1 ] 陈晓平,白世伟. 软土蠕变 - 固结特性及计算模型研究 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22( 5 ): 728 - 734.
- [ 2 ] 殷宗泽,张海波. 软土的次固结 [ J ]. 岩土工程学报, 2003, 25( 5 ): 521 - 526.
- [ 3 ] 张惠明,徐玉胜,曾巧玲. 深圳软土变形特性与工后沉降 [ J ]. 岩土工程学报, 2002, 24( 4 ): 509 - 514.
- [ 4 ] 汤斌,陈晓平. 考虑流变性状的软土地基固结有限元分析 [ J ]. 岩土力学, 2004, 25( 4 ): 583 - 585.
- [ 5 ] Chai J C, Shen S L, Miurra N et al. A simple method of modeling PVD improved subsoil [ J ]. J. Geotech. and Geoenviron. Engng. ASCE, 2001, 127( 11 ): 965 - 972.
- [ 6 ] Hird C C, Pyrah I C. Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground [ J ]. Geotechnique, 1992, 42( 3 ): 499 - 511.
- [ 7 ] Yin J - H, Graham J. Elastic viscoplastic modelling of the time - dependent stress - strain behaviour of soils [ J ]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 736 - 745.
- [ 8 ] Zhou C, Yin J - H. Consolidation analyses of soils underneath haarajoki test embankment using elastic - plastic and elastic visco - plastic models [ J ]. Journal of the southeast asian geotechnical society, 2004, 4: 29 - 38.
- [ 9 ] Hird c c, Pyrah I C, Cinicioglu F. Modelling the effect of vertical drains in two - dimensional finite element analyses of embankment on soft ground [ J ]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 795 - 807.

## Finite Element Analysis of Soft Clay Road Embankment Settlement Considering its Creep Nature

ZHU Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui - ming<sup>1</sup>

( 1. College of civil engineering, Hohai university, Jiangsu Nanjing 210098, China ;  
2. Zhuhai Tieke Geotechnical Engineering Company, Guangdong Zhuhai 519000, China )

**Abstract** Secondary compression occupies a significant part of post - construction settlement. Soft soil creep behavior shall be taken into account when estimate the post - construction settlement. This paper presents results of consolidation analyse of the soft clay layers underneath embankment in Jiepu expressway using a soft soil creep mode( SSC ) in the FE Plaxis program. The sand drains improved ground can be converted into homogeneous subsoil with equivalent consolidation coefficient. Numerical results from the FE analyse are in good agreement with field measured values.

**Keywords** soft ground ; finite element analysis ; Jiepu soft soil ; creep ; post - construction settlement