

文章编号: 1000-7598-(2006) 09-1567-04

考虑软土流变特性的沉降预测模型研究

王志亮¹, 黄景忠², 杨夏红³

(1. 中国科学技术大学 力学与机械工程系, 合肥 230027; 2. 郑州大学 环境与水利学院, 郑州 450002;
3. 安徽水安建设发展股份有限公司, 合肥 230022)

摘 要: 增长曲线模型自身的特点决定了其能很好地预测地基沉降的发展趋势。先将该模型推广到多级填土荷载下的路堤沉降预测中, 接着基于绝对时间坐标系下的软土次压缩计算式, 提出了带软土流变项的新型增长曲线模型, 并采用数学中的最优化技术, 结合前期沉降实测资料对模型中待定参数进行反演。实例计算表明: 该模型对沉降预测精度高, 能合理地反映出土颗粒骨架的蠕变过程, 且能较准确地给出不同时刻的次压缩量, 具有一定的工程参考价值。

关 键 词: 软土; 流变特性; 沉降预测; 增长曲线模型; 0.618 法

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Study on settlement prediction model considering rheological properties of soft soils

WANG Zhi-liang¹, HUANG Jing-zhong², YANG Xia-hong³

(1. Department of Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 23009, China; 2. College of Environmental and hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. Anhui Shui-an Construction & Development Share Co.Ltd, Hefei 230022, China)

Abstract: The logistic model can well predict the developing trend of foundation settlement with its own virtues. Firstly, it is extended to settlement predication of embankment subjected to multistage loadings due to filled soil, and then one new type logistic model coupled with rheological term of soft soil is put forward based on the secondary compression calculation formula under the absolute time coordinates. The relevant parameters are back-analyzed with the optimizing technology of mathematics according to filed measured settlements. It is seen that this new model has higher predicted accuracy and can reasonably reflect the creeping course of soft soil grain skeleton. Besides, the quantity of secondary compression at different times can also be accurately given. The results obtained in this paper may be useful in engineering.

Key words: soft soil; rheological property; settlement prediction; logistic model; 0.618 method

1 引 言

关于地基沉降已形成多种计算法, 大致可分 3 类: 第 1 类是基于太沙基固结理论的一维计算法; 第 2 类是基于 Biot 固结理论的数值方法; 第 3 类是基于实测的沉降时间数据的各种经验推算法。这几种方法各有利弊, 但可相互补充, 成为当前计算沉降的主要方法。分层总和法由于不能考虑土体侧向变形等, 计算结果与实测值有相当大的差异; 有限元法虽然其优点很多, 但也存在计算工作量大、参数确定困难, 要做三轴排水试验等不足之处等^[1-3]。因此, 对于软基上高速公路沉降而言, 在施工过程中掌握沉降观测资料, 据其发展趋势来推测未来的

沉降值就显得十分重要, 而现有的经验公式都不能合理地反映出软土颗粒骨架的蠕变过程, 也无法给出不同时刻软土流变的大小。本文针对此点展开研究, 提出了带流变项的增长曲线模型, 具有一定的工程应用价值。

2 增长曲线模型及其推广

2.1 模型介绍

地基沉降过程可从机理分析: 在建筑物施工初期, 随着上覆荷载的施加, 土颗粒孔隙中的水慢慢排出, 沉降变形开始发生, 当荷载增大到一定程度, 孔隙中水排出速度加快, 从而沉降速率也在增大。随着时间的推移, 土体中渗流路径加长以及附加应

力向下扩散, 沉降速率逐渐缓和并达到稳定。宰金珉等^[2]曾基于这个沉降机理提出了一个预测沉降的经验公式——增长曲线模型, 对一级加载下的地基沉降情形作了研究, 并通过实例加以验证。所谓增长曲线, 又名逻辑斯蒂克曲线 (Logistic curve), 其一般形式如下:

$$S_t = \frac{b_1}{1 + b_2 \exp(-b_3 t)} \quad (1)$$

式中 b_1 , b_2 , b_3 为待定参数。

由于该模型可反映实际事物产生、发展、成熟并达到一定极限的过程, 这与地基沉降随上覆荷载施加而逐渐发生的过程是一致的, 而且它具有沉降-时间曲线所具有的特点 (不通过原点、单调性、有界性等)。图 1 为一典型的增长曲线模型, 可见呈反“S”形。

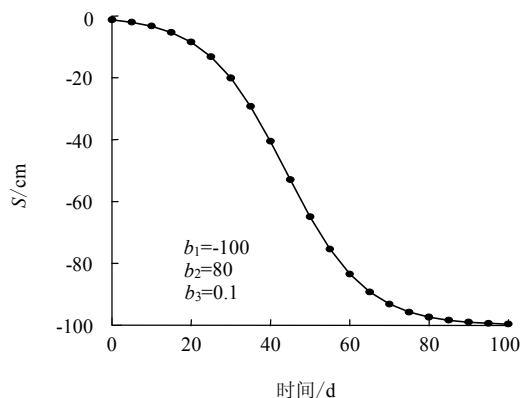


图1 一个典型的增长模型曲线

Fig.1 One typical curve of logistic model

2.2 多级荷载下的扩展

笔者在计算分析中发现, 式 (1) 对一级荷载下沉降预测的精度较高, 能很好地反映出沉降随时间的发展过程和规律, 而且, 只要式中参数选择合理, 它具有良好的适应性, 可适用的沉降-时间关系很广, 但其只能适用于荷载一次突然施加或前后两级之间相差不大的多级荷载下的沉降预测, 因为此时沉降-时间曲线基本呈稳定发展, “台阶现象”不明显。若前后两级填土荷载之间相差较大, 沉降有一定的“突变”, 则用式 (1) 来预测路堤沉降就不太适合, 此时累积沉降曲线会随上覆荷载的变化呈现出明显的“台阶状” (图2), 这样的沉降过程很难用一根曲线来整体拟合。

对于多级加荷的、路堤沉降曲线“台阶状”发展的情况, 增长曲线模型可扩展^[3,4]如下:

$$S_t = \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 + A \exp(-B t_k')} C \Delta p_k \quad (2)$$

式中 m 为加荷的总级数; t_k' 为沉降预测时刻 t_i 到第 k 级荷载施加时刻 t_k 的时间间隔; S_k 为第 k 级荷载增量 Δp_k 所引起的最终沉降量, 当加荷速率与土层状况不变时, 可近似认为 S_k 与 Δp_k 之间成正比关系, 即 $S_k = C \Delta p_k$ 。参数 A , B , C 与反应土体固结性质有关, 假设其与荷载的施加无关, 并视为常量。

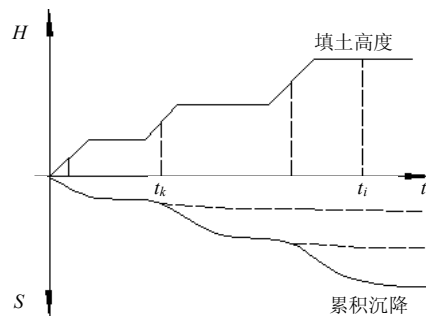


图2 多级荷载下沉降发展曲线

Fig.2 Settlement developing curve under multistage loadings

2.3 模型中软土流变的计入

许多室内实验和现场观测数据均表明: 次压缩量的大小与时间关系在半对数纸上接近于直线。对于厚度为 H 的软土地基次固结沉降量的常见计算公式为

$$S_s = \frac{H}{1 + e_0} C_a \lg \frac{t_2}{t_1} \quad (3)$$

式中 e_0 为软土的初始孔隙比; C_a 为软土的次固结系数或次固结曲线斜率。

目前关于主、次固结的划分争论颇多。由于土体中存在某种结构黏性, 次固结自始至终存在, 不可能等到主固结完成后次压缩才开始。事实上, 瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降都是在土体受力后同时发生的, 只是某一阶段以一种沉降变形为主。殷宗泽等^[5]曾基于 Bjerrum $L^{[6]}$ 的二维等时 e - $\lg p$ 曲线提出了软土次固结计算的修正式, 其中 t_1 就近似地取为 1.0 d (0.003 年)。基于此点认识^[5, 6]和次压缩量和对数的对数成正比关系, 为了提高软基高速公路沉降的预测精度, 以指导高速公路地基的设计和施工, 本文提出了可考虑软土流变的指数曲线模型^[4]:

$$S_t = \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 + A \exp(-B t_k')} C \Delta p_k + D \lg t_i \quad (4)$$

式中 $t'_k = t_i - t_k$, 其中 t_i 为沉降的计算时刻, t_k 为第 k 级填土荷载的施加时刻 (图 2); $A \sim D$ 均为待定参数, 前 3 个参数以及 S_k 的含义同式 (2)。

3 参数反演与计算步骤

在对式 (4) 的参数进行优化并利用其进行沉降预测中, 必须假定: ①路基中沉降计算深度在整个加荷过程中是不变的; ②各级荷载下的沉降可以叠加; ③加荷量与最终沉降量关系唯一, 不考虑加荷速率对最终沉降的影响等。

以沉降计算值和实测值的绝对误差采用最小二乘法原理建立的目标函数为

$$J = \sum_{i=1}^N (S_{t_i} - \hat{S}_{t_i})^2 \quad (5)$$

式中 J 为目标函数; N 为沉降观测值总数; S_{t_i} , $\hat{S}_{t_i}$ 分别为第 t_i 时刻的沉降计算值与实测值。 S_{t_i} 为待定参数 $A \sim D$ 的函数, 则目标函数 J 也为待定参数 $A \sim D$ 的函数。对目标函数求极小, 即是对 $A \sim D$ 的寻优过程, 可采用数学规划中的 0.618 法^[7]对这几个参数进行优化。该法属于直接优化法, 效率较高、适应性较强、也易于实现编程。

计算中, 首先假定各参数的变化上、下限, 再根据已有的沉降观测信息, 通过不断地试算和比较, 记录下每组的最佳 $A \sim D$ 组合及相应的误差值, 当整个试算结束后, 从各组组合中选取误差最小的一组作为 $A \sim D$ 值带入相应经验公式中, 就可求得 t_i 时刻的沉降量。值得一提的是参数 D , 其值一般为正数, 如下例中的 k19+920 剖面反演出的 D 值约为 8.78。

沉降预测主要步骤: ①确定填土荷载级数、路堤底宽、坡比以及沉降计算深度等; ②确定各级荷载的加荷时刻及其对应的沉降记录; ③根据沉降实测值, 采用试算法确定式 (4) 中的参数 $A \sim D$; ④将已确定出的参数带回上述经验公式中, 分别计算各级荷载在时刻 t_i 所引起的固结沉降量; ⑤将各级荷载在 t_i 时刻所引起主、次固结沉降量进行叠加, 即得 t_i 时刻总沉降量。

4 实例验证与分析

汕一汾高速公路^[4, 8]中 k19+920 (中) 剖面的地质结构为: 0~2.2 m 为灰色粉质黏土; 2.2~25.8 m 为淤泥夹少许粉土、朽木等; 25.8~29.4 m 为灰白色粉质黏土。路堤的填筑是从 1999 年 12 月底开始, 2000 年 6 月份结束。该断面共有 382 d 的沉降实测数据。根据前 136 d (即第 11 级填土施工结束) 沉

降观测值, 利用 0.618 法反分析出上述增长曲线模型式 (4) 中参数 $A \sim D$, 再由所得到的参数代入式中求后期不同填土高度下的沉降, 主要结果见图 3~5。

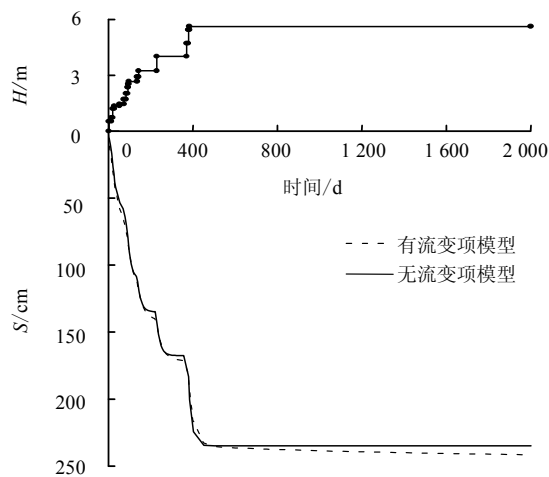


图3 k19+920断面加荷与沉降曲线
Fig.3 Curves of loading and settlement at section k19+920

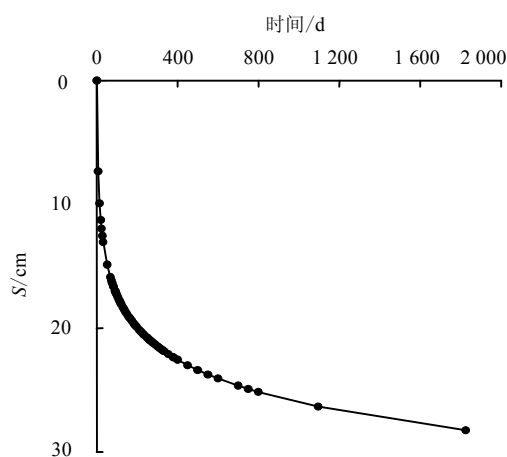


图4 k19+920 断面流变曲线
Fig.4 Rheological curve at section k19+920

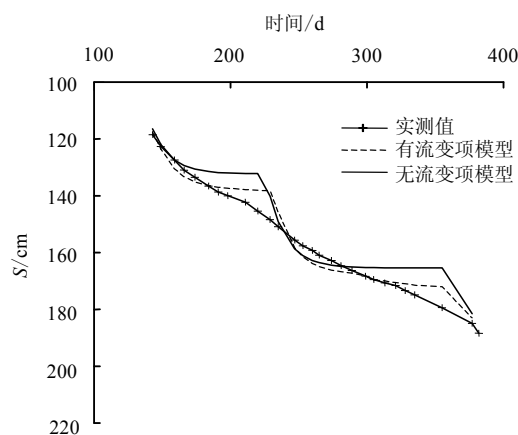


图5 k19+920断面部分沉降曲线
Fig.5 Part curves of settlement at section k19+920

图 3 的 k19+920 断面的沉降预测曲线, 为分别采用了有流变项与无流变项的增长曲线模型式 (4) 和式 (2) 进行的沉降预测。从图中可见, 在无软土流变项的经验公式预测曲线上, 某级荷载下沉降曲线呈现明显“台阶”状, 台阶的拐点附近沉降突变较大, 且各级填土荷载下沉降很快稳定于一个值上, 而工程地质资料显示该断面的地基中有较厚的淤泥质土层 (10.0~20.0 m), 故流变是肯定存在的, 可见传统的式 (2) 对沉降预测结果具有不合理的一面; 而在有流变项的新型经验公式 (4) 的沉降预测曲线上, 台阶拐点附近的沉降曲线明显变缓, 有一个渐变的过程, 且各级荷载下沉降随时间的延长均呈现出缓慢的发展趋势, 能很好地模拟软土颗粒骨架的蠕变过程。传统的、无流变项经验公式是不能给出不同时刻的软土次压缩量及其具体的蠕变过程。

依据反馈出的参数 $A \sim D$, 可以求出不同时刻的主、次固结沉降, 通过分离得出该断面次固结发展过程, 见图 4。据此, 可见 15 年后的总次压缩量在 30 cm 左右, 约占总沉降的 10%。

该断面沉降观测记录到第 382 d, 在对式 (4) 中参数 $A \sim D$ 反分析时, 是基于前 136 d 资料的, 所以这里主要比较第 136~382 d 的沉降预测曲线和实测曲线。由图 5 可见, 带流变项的沉降预测曲线要明显地接近实测曲线, 相对误差也较小, 而无流变的公式预测结果偏差较大。同时, 清楚看出考虑软土流变的沉降预测曲线在拐点附近坡度较缓, 且预测结果基本上要比不考虑流变项的大。

5 结 语

本文把增长曲线模型引入到多级荷载下的路堤沉降预测中, 基于绝对时间坐标下的次压缩计算式提出了新型沉降预测模型, 其优点明显, 比较适用于软土分布广泛地区的路堤沉降预测, 可合理地反映出软土蠕变这一过程, 在路堤沉降计算、预测中具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 岳红宇, 王良国. 软土地基沉降预估的实用计算方法[J]. 华东公路, 2002, (2): 23—25.
YUE Hong-yu, WANG Liang-guo. Practical calculation method of settlement forecast of soft foundation[J]. *East China Highway*, 2002, (2): 23—25.
- [2] 宰金珉, 梅国雄. 全过程沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 322—325.
ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Forecast method of settlement during the complete process of construction and operateion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(4): 322—325.
- [3] 王志亮, 郑明新, 吴勇, 等. 增长曲线模型在多级荷载下的路基沉降预测中应用研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 901—905.
WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin, WU Yong, et al. Research on application of logistic model in settlement prediction of roadbed[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 901—905.
- [4] 王志亮. 软基路堤沉降预测和计算[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [5] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521—526.
YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao. Secondary consolidation of soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(5): 521—526.
- [6] Bjerrum L. Embankments on soft ground[A]. *Proceedings Special Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structure*[C]. [s.l.]: ASCE, 1972. 1—54.
- [7] 韦鹤平. 最优化技术应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.
- [8] 林代锐, 李国维. 汕—汾高速公路软基超载预压卸载控制[J]. 河海大学学报, 2002, 30(4): 78—81.
LIN Dai-rui, LI Guo-wei. Surcharge pre-compression and unload control to soft ground of the Shan—fen expressway[J]. *Journal of Hohai University*, 2002, 30(4): 78—81.