

# 增加曲线模型在路基沉降预测中的应用研究

王志亮<sup>1</sup>, 郑明新<sup>2</sup>, 吴 勇<sup>3</sup>, 殷宗泽<sup>1</sup>

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 华东交通大学 道桥与岩土工程研究所, 江西 南昌 330013;  
3. 北京路桥通工程监理咨询有限公司, 北京 100088)

**摘 要:** 增加曲线模型自身的特点, 决定了它能很好地拟合一级荷载下的地基沉降-时间曲线, 这已得到了验证。将其引入到多级填土荷载下的软土路基沉降的预测中, 提出了相应的预测数学模型, 并通过工程实例予以验证。其结果表明: 与传统的针对多级荷载的指数曲线模型以及双曲线模型相比, 该模型的理论更为充分, 其预测结果也更接近实际, 具有一定的工程实用价值。

**关 键 词:** 增加曲线模型; 0.618 法; 软土路基; 沉降; 预测  
**中图分类号:** TU433 **文献标识码:** A

## Study on application of logistic curve model to settlement prediction of roadbed subjected to multilevel loadings

WANG Zhi-liang<sup>1</sup>, ZHENG Ming-xin<sup>2</sup>, WU Yong<sup>3</sup>, YIN Zong-ze<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Beijing Road & Bridge Engineering Supervision & Consultant Co. Ltd, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The logistic curve model can well simulate the settlement-time curve of foundation under uni-level loading with its own virtues, which has been validated by others. Here, it is also applied to the settlement prediction of roadbed on soft ground subjected multi-level loadings, and the corresponding mathematical model is put forward. At the same time, compared with the conventional exponential curve model and hyperbolic model aimed at multi-level loadings, we find that this new model is not only more complete and rounded in theory, but also causes more accurate results. Thus, it has definitely using value during practical engineering.

**Key words:** logistic curve model; 0.618 method; roadbed on soft ground; settlement; prediction

## 1 引言

对于软基高速公路而言, 位移监测在施工和设计中都起着极其重要的作用, 所得到的沉降-时间数列中蕴含着系统演化的信息。若我们从监测所得的数据中找到规律, 据此便可以预测沉降的未来发展趋势, 及时指导施工, 甚至调整方案。

宰金珉等<sup>[1-2]</sup>通过分析认为: 地基沉降-时间曲线具有两个主要特点: (1) 形状上呈“S”形; (2) 由于瞬时沉降存在, 沉降-时间曲线不通过坐标原点, 并分别从土体的本构关系以及一维固结理论上对此两点予以了证明, 同时, 在分析了现有沉降预测经验公式理论不充分的基础上, 提出了增加曲线模型<sup>[1-3]</sup>, 并在一级线性或近似线性加载下的地基沉

降预测中得到成功地应用, 效果良好。本文对该法在多级荷载下的路基沉降预测中的应用进行了研究, 提出相应的沉降预测模型, 并与传统的多级荷载下的预测模型进行了对比与分析, 验证了该模型的可行性与准确性。

## 2 基础知识

工程实践表明, 要准确计算软土路基沉降, 特别是预测工后沉降, 仍是工程建设中的关键问题, 而沉降实测资料又是检验计算结果的标准, 因此, 对沉降实测资料进行分析具有重要意义。如何利用施工前期观测得到的沉降资料, 找出沉降规律, 据此对后期施工中以及竣工后发生的沉降进行预测, 具有很大的工程价值。目前, 预测沉降的方法都以

下式为基础<sup>[3, 4]</sup>:

$$S_t = S_d + f(x)(S_\infty - S_d) \quad (1)$$

式中  $S_t$  为  $t$  时刻的沉降量;  $S_d$  为瞬时沉降量;  $S_\infty$  为最终沉降量;  $f(x)$  为待定函数式。

根据  $f(x)$  的函数形式不同, 现有的预测沉降方法有指数曲线模型、双曲线模型等, 这两个模型的主要不足之处在于, 它们均认为瞬时沉降为零<sup>[1]</sup>。

文献[1, 2]所谓增加曲线又名逻辑斯蒂曲线(Logistic curve), 其一般形式如下:

$$S_t = \frac{K}{1 + Ae^{-Bt}} \quad (2)$$

式中  $A, B, K$  为待定参数。

该式具有沉降-时间曲线所具有的特点<sup>[3]</sup> (不通过原点、单调性、有界性等), 笔者在计算中发现, 它在一级线性加载的沉降预测中, 精度确实较高, 甚至能比指数曲线模型、双曲线模型更好地反映沉降随时间的发展过程和规律。

### 3 模型的建立

本文所提到的几个经验公式模型主要是就一级线性或近似线性加载情形而言的, 对于多级荷载, 特别是路堤各级填土荷载之间相差较大的道路工程, 预测路基沉降就不太适合, 因为此时累积沉降曲线会随路堤荷载的变化呈现出“台阶”状变化, 这样的沉降过程就很难用一条曲线来整体拟合了(见图 1)。

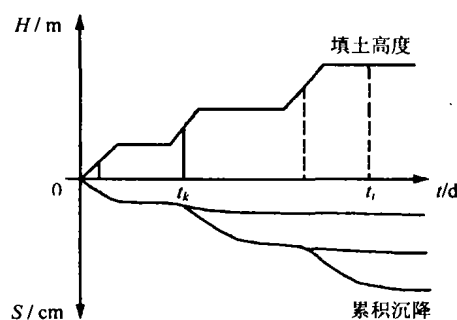


图1 多级荷载下荷载-沉降曲线

Fig. 1 Curve of settlement-time under multi-level loadings

我们知道, 基于特定经验公式的沉降反分析法能综合考虑诸多影响因素(如土的非线性、土层的复杂分布、加荷速率等), 预测出的沉降要比用分层总和法与一维固结理论相结合的方法准确, 甚至比以室内试验参数为依据的有限元等数值分析法得到的结果更接近实际<sup>[5]</sup>。由前期实测资料预估路基后

期沉降, 对于多级线性或近似线性加荷的情况, 目前, 常用的公式有指数式和双曲线式模型:

$$S_t = \sum_{k=1}^m (1 - Ae^{-Bt}) S_k \quad (3)$$

$$S_t = \sum_{k=1}^m \frac{t}{a+t} S_k \quad (4)$$

式中  $m$  为加荷的总级数;  $t$  为沉降待预测的时刻  $t_i$  到第  $k$  级荷载施加的时刻  $t_k$  之间的时间间隔;  $S_k$  为第  $k$  级荷载增量所引起的最终沉降量。若设  $\Delta p_k$  为第  $k$  级荷载增量, 当加荷速率与土层状况变化不大时,  $S_k$  与  $\Delta p_k$  比值基本上为定值, 设  $C$  为比例常数, 则有  $S_k = C \Delta p_k$ 。式(4)所含的参数  $A, B, a$  是反映土体固结性质的, 与荷载的施加无关, 可视为常量。另外, 还必须假定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; 且各级荷载下的最终沉降量可以叠加。

为了能把增加曲线模型应用到高速公路软基沉降预测中, 且能考虑路堤的“薄层轮加”施工过程, 参照式(3), (4)做类似处理, 构造出如下的预测公式:

$$S_t = \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 + Ae^{-Bt}} C \Delta p_k \quad (5)$$

式(5)就是本文建立的针对多级线性加载下的路基沉降预测模型。对于式中的  $A, B, C$  参数, 此处将采用黄金分割法<sup>[6]</sup>, 并结合前期沉降观测资料对其进行优化。

### 4 工程实例

汕一汾高速公路<sup>[7]</sup>起于广东省汕头市, 止于福建省与广东省交界处的汾水关。其中 k19+500~k20+000 路段位于广东省潮汕地区的韩江三角洲的冲积平原上, 为第四纪海相沉积环境, 软土层分布普遍, 是全线工程地质条件最差的路段。选取该路段的 k19+920 (中) 剖面作为研究对象, 其地质结构为: 0~2.2 m 为灰色粉质粘土; 2.2~25.8 m 是淤泥夹少许粉土、朽木等; 25.8~29.4 m 为灰白色粉质粘土。路堤的填筑是从 1999 年 12 月底开始, 2000 年 6 月份结束的。

该断面共有 382 d 的沉降实测数据, 现根据前 136 d (即第 11 级填土施工结束) 沉降观测值, 利用 0.618 法反分析出上述式(5)中参数  $A, B, C$ , 再根据所得到的参数代入式中, 求后期不同填土高度下的沉降, 结果见图 2~4。为了进行对比, 图中同时提供了指数曲线模型(式(3))和双曲线模型(式(4))的预测结果。

图 2 给出了上述三种方法的沉降预测值的发展历程曲线。可见, 它们预测结果都与实测值存在不同程度的吻合, 其中双曲线模型对沉降的预测偏大, 增加曲线模型预测结果和指数曲线模型较一致。

图 3 给出了 143~382 d 内的三种方法的沉降预测结果与实测值的相对误差发展曲线, 通过分析可得出, 双曲线模型的误差确实最大, 与实测值的相对误差达到 16.0%, 指数曲线和增加曲线模型预测结果精度较高, 与实测值的相对误差基本上在 10% 以内, 而增加曲线模型相对误差要比指数曲线模型还要小。由此可见, 增加曲线模型预测结果的可靠性在三个模型中最高。

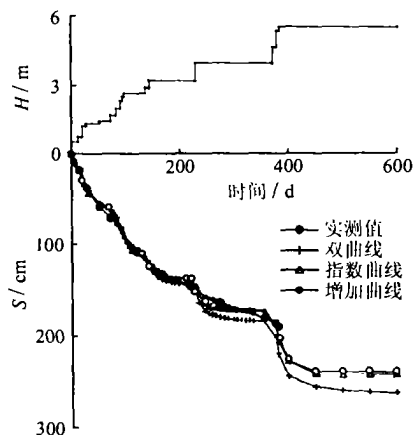


图 2 三种方法预测结果比较

Fig. 2 Comparison among results of three methods

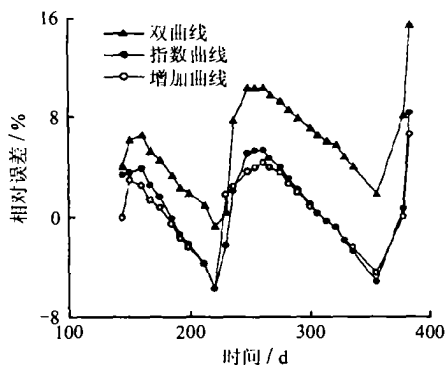


图 3 相对误差曲线

Fig. 3 Relative error curves

图 4 显示了上述三种经验公式模型在沉降预测中的累积误差平方和随填土高度增加的累计曲线, 由此可见: 随路堤填土高度的增大, 增加曲线模型的累积误差平方增加较慢, 特别是在后期明显的偏低, 说明预测结果的精度较高。而双曲线模型、指数曲线模型误差平方和增加较快, 其中双曲线模型

最快, 这是它们的预测结果与实测值之间误差较大的缘故。

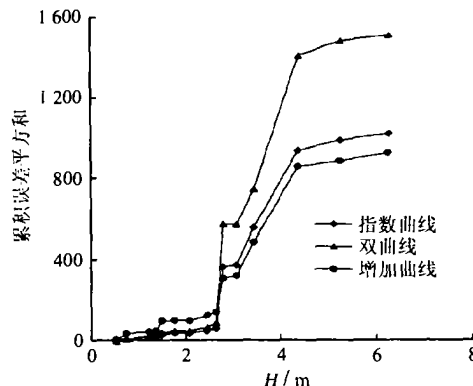


图 4 三种方法的累积误差平方和曲线

Fig. 4 Cumulative sum-squared error curves of three methods

下面将继续采用本文提出的多级荷载下的增长曲线模型, 对汕一汾高速公路的 k19+820 断面(共有 528 d 实测资料) 的沉降进行预测和验证。该断面的地层结构与 k19+920 断面类似, 沉降预测值和实测值对比曲线见图 5 所示。在计算中, 由于我们利用了前 241 d 沉降观测资料反分析式(5)中参数, 故这里主要对比 241~528 d 的沉降预测曲线和实测值曲线吻合度。由此可见, 增加曲线模型的预测曲线和实测曲线也是非常一致的。

综上所述, 增加曲线模型能很好地对多级线性加载下的路基沉降进行预测, 具有误差小、精度高的优点, 能作为多级加载下软土路基沉降预测的一种新的模型。

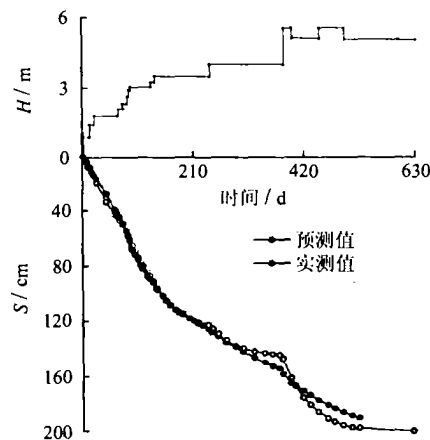


图 5 k19+820 断面的沉降曲线

Fig. 5 Curves of settlement at section k19+820

表 4 考题的材料性质

Table 4 Material parameters of slope showed in Fig.5

	$c / \text{kPa}$	$\phi / (^{\circ})$	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$E / 10^4 \text{kPa}$	$\nu$	$K_0$
堆石	0.0	45	20.4	5.0	0.30	0.65
过滤层	0.0	45	20.4	5.0	0.30	0.65
反滤层	0.0	45	20.4	4.0	0.30	0.65
心墙	85	23	18.1	1.0	0.44	0.65

表 5 考题的圆弧滑裂面信息

Table 5 Sliding circular surface information of slope showed in Fig.5

$X / \text{m}$	$Y / \text{m}$	半径 / m
100.3	290.0	278.8

表 6 考题安全系数答案汇总

Table 6 Comparison of analyzing results of slope showed in Fig.5 using different methods

推荐的裁判答案	SSA+ (Baker)	STAB+ (Chen)	GWEDGEM (Donald)	EMU	Fredlund	最小势能
2.29	2.35	2.224	2.29	2.29	2.206	2.29

## 5 结 语

本文提出了一种分析边坡稳定性的新方法,该方法不需要进行条块划分,通过分析边坡整体的势能变化进行求解。安全系数可以直接求解,不需要迭代,计算过程简单,不存在数值分析问题。标准考核题和大量算例表明:此方法的结果准确,与严格条分的 Spencer 法的误差在 2%~3% 内。

## 参 考 文 献

- [1] Fredlund D G, Krahu J. Comparison for slope stability methods of analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 104(3): 1977, 14(3): 429—439.
- [2] Mauldon M, Ureta J. Stability analysis of rock wedges with multiple sliding surfaces[J]. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 1999, 14(1): 51—66.
- [3] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

上接第903页

## 5 结 论

增加曲线的自身特点, 决定了其能很好的拟合一级荷载下的沉降-时间曲线, 其预测精度较高。本文将它引入到路堤多级加载下的软土路基的沉降预测中, 提出了相应的沉降预测模型, 并通过实例计算、比较和分析, 得出了令人满意的结果。该模型的沉降预测值误差小, 精度甚至超过指数曲线模型以及双曲线模型, 可以成为软土路基沉降预测中的又一新的经验公式, 具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 宰金珉, 梅国雄. 成长曲线在地基沉降预测中应用[J]. 南京建筑工程学院学报, 2000, (2): 8—13.
- [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.
- [3] 梅国雄. 固结有限层理论及其应用[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [4] 胡中雄. 土力学和环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. 44—90.
- [5] 叙泽中, 殷宗泽, 赵维炳. 软土路基综合处理设计程序研制[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992. 120—400.
- [6] 韦鹤平. 最优化技术应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. 12—51.
- [7] 王志亮. 软基高速公路沉降预测和数值计算方法研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2003.