



# 软土路基沉降的优性组合预测

李 涛, 张仪萍, 张土乔

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 通过分析实测数据来预测沉降是实际工程中较多采用的方法。单一的预测方法各有其适用性, 同时也存在着不足, 据此提出既能综合利用多种预测方法提供的信息又能提高预测精度的组合预测。不同机理的沉降预测方法组合时, 以误差的平方和或离差绝对值之和最小为准则的组合预测不一定能如实地反映其有效性。因此, 采用以有效度最大为准则的优性组合预测, 并通过具体工程实例分析, 说明优性组合预测的有效性及其加权系数的时变特性。

**关键词:** 土力学; 沉降; 优性组合预测; 加权系数

**中图分类号:** TU 471.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)18 - 3282 - 05

## SUPERIOR COMBINATION FORECASTING SETTLEMENT OF SOFT CLAY EMBANKMENTS

LI Tao, ZHANG Yi-ping, ZHANG Tu-qiao

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The settlement prediction is an important problem in soft clay roadbed design and construction. For the normal prediction methods based on observation data have different applicabilities and disadvantages, the combination forecasting can synthetically utilize the information provided by different methods to improve the precision of prediction. To compare the validity of settlement prediction with different principia, superior combination forecasting based on forecasting effective measure is much better than the traditional combination forecasting, which modeled on the minimal value of error sum of squares or the deviation absolute sum. A case study is carried out to illustrate the validity of superior combination forecasting and the time-variant character of weight coefficient.

**Key words:** soil mechanics; settlement; superior combination forecasting; weight coefficient

## 1 引 言

软土在我国沿海、沿湖、沿河地带有着广泛分布, 且普遍具有孔隙比及天然含水量大、压缩性高、渗透性小和灵敏度高等特点。因此, 沉降分析是软土路基设计和施工中的一个主要问题。通过分析现场实测沉降资料反演确定物理力学模型参数, 再对后期响应进行预测的方法是实际运用较多的一类方

法<sup>[1]</sup>。该类方法大致可以归纳为以下3类:

(1) 简单曲线配合法, 比如指数曲线法、双曲线配合法等<sup>[2]</sup>。Asaoka法<sup>[3]</sup>、沉降速率分析法<sup>[4]</sup>和剩余沉降对数法<sup>[5]</sup>基于一定的土体本构模型, 从形式上看可归于指数曲线法。这类方法根据最优化拟合的原则拟合参数, 得到沉降曲线。但这类方法函数参数不一定有明确的物理意义, 一般也只适用于简单的加载条件。

(2) 反演分析法。这类方法基于土体本构模型、

**收稿日期:** 2004 - 04 - 23; **修回日期:** 2004 - 11 - 02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50278089); 浙江省自然科学基金项目(501163)

**作者简介:** 李 涛(1977 - ), 男, 2000年毕业于浙江大学建筑工程学院市政工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地基沉降反演预测方面的研究工作。  
E-mail: byk\_lt@163.com。

数值方法(有限元法等)和优化技术,通过前期数据反演土体本构模型参数,再由此预测后期参数。基于 Terzaghi 固结理论得到的预测模型虽然参数简单求解方便,但只适用于一维排水固结,而对土体的非线性和多维固结的情况适用性就比较差,很难准确描述软土路基沉降的发展情况。有学者根据一维非线性固结模型、粘塑性模型以及二维和三维固结理论等建立数学模型,如软粘土地基非线性一维固结理论的研究<sup>[6]</sup>、基于修正剑桥模型的分层总和法<sup>[7]</sup>、基于 Biot 多维固结理论的沉降反演预测<sup>[8]</sup>等。这些模型虽然能更好地符合实际情况,但普遍需要计算大量的地基参数,计算量大,且反演不一定有唯一简单迭代点,在实际工程中应用不方便。

(3) 把一些系统分析和控制理论引入到土体沉降预测中,如时间序列法<sup>[9]</sup>、模糊系统<sup>[10]</sup>、灰色理论<sup>[11]</sup>、神经网络<sup>[12]</sup>等。系统论的分析方法虽然有成熟的算法用于求解,但模型参数一般也没有实际物理意义。

上述各种沉降预测方法有各自适用性,也都存在着一定的不足。本文基于简单常用的预测模型,提出组合预测沉降的方法。所谓组合预测,就是将不同的预测方法进行适当的组合,综合利用各种方法所提供的信息,从而尽可能地提高预测精度。组合预测可以对数种预测模型进行综合分析,弥补单种预测方法的不足,提高预测的精度。Bates 和 Granger 已经证明了2种或者2种以上无偏单项预测可以组合出优于每个单项的预测结果<sup>[13, 14]</sup>。本文综合考虑了简单曲线配合法中的双曲线配合法和剩余沉降对数法,以有效度最大为准则建立优性的组合预测模型。通过工程实例分析,说明了本文方法推算沉降的可行性和有效性,并探讨组合预测中单一预测方法的加权系数时变特性

## 2 由实测数据预测沉降的方法

### 2.1 双曲线配合法

简单曲线拟合法中的双曲线配合法由于其计算简单,便于计算机实现,在实际工程中常被采用。双曲线配合法认为实测沉降曲线可表示为

$$S_{\text{hf}} - S = \frac{a_h}{t + b_h} \quad (1)$$

式中:  $S_{\text{hf}}$  为最终沉降量,  $S$  为  $t$  时刻沉降量,  $a_h$  为与土体参数和边界条件相关的待定参数,  $t$  为时间,  $b_h$  为待定参数。式(1)可化为如下线性方程:

$$\frac{1}{S_{\text{hf}} - S} = \frac{1}{a_h} t + \frac{b_h}{a_h} \quad (2)$$

根据实测数据,按最小二乘原则进行拟合,即可求得待定参数  $a_h$ ,  $b_h$ 。由于线性相关系数是  $S_{\text{hf}}$  的函数,因此可使线性相关系数取最大值求得  $S_{\text{hf}}$ 。

### 2.2 剩余沉降对数法

由 Terzaghi 一维固结微分方程可得

$$\frac{S_{\text{IF}} - S}{S_{\text{IF}} - S_d} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 C_v t}{H^2}} \quad (3)$$

式中:  $S_{\text{IF}}$  为主固结完成时对应的总沉降量,  $S_d$  为初始沉降量,  $C_v$  固结系数,  $H$  为排水距离。

对式(3)两边取对数,整理后可得

$$\ln(S_{\text{IF}} - S) = a_1 t + b_1 \quad (4)$$

其中,

$$a_1 = -\frac{\pi^2}{4H^2} C_v$$

$$b_1 = \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} (S_{\text{IF}} - S_d) \right]$$

由式(4)可以看出,  $\ln(S_{\text{IF}} - S)$  与时间  $t$  呈线性关系,和双曲线法同样的处理方法,由1组实测数据  $(S_i, t_i) (i = 1, 2, \dots, N)$  根据最小二乘原理即可确定出式(4)中的待定参数  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $S_{\text{IF}}$  同样也由使线性相关系数取最大值得到。

## 3 沉降的优性组合预测

所谓组合预测就是把不同的预测方法进行组合,以恰当的加权平均形式得到组合预测模型,从而达到综合利用各种方法所提供的信息,尽可能地提高预测精度的目的。可见组合预测方法比单一的预测方法更为科学,因为对于同一预测问题,不同的预测方法所提供的有用信息是不同的,如果简单地把预测相对误差大的方法视为不可信而舍弃,将会丢失一些有用的信息。以路基沉降预测为例,双曲线配合法是一种经验方法,而大量工程实践表明,根据早期实测沉降数据来预测时,该法计算沉降量往往偏大。剩余沉降对数法以 Terzaghi 一维固结理论为基础,反映的是土体的主固结沉降,由于没有考虑次固结沉降等因素,其最终沉降的预测量一般都是偏小的。这2种方法建立的基础和考虑的因素都不尽相同,有着各自的适用性和不足之处。采用组合预测的分析方法能有效地利用2种方法所提供的信息,从而提高预测精度。

组合预测的核心问题就是如何求出加权系数,使得组合预测模型更为有效。普遍的组合预测模型都以误差的平方和或离差绝对值之和达到最小为准则建立起来的。事实上这样的准则不一定能如实地反映预测方法的有效性。对于不同坐标系或不同时间序列,由于其量纲不同,误差的平方和或离差绝对值之和不具有可比性;即使量纲相同,等量的误差的平方和或离差绝对值之和并不代表不同的预测方法具有相同的等效性<sup>[15]</sup>。双曲线配合法与剩余沉降对数法得到不同的线性关系式,因此并不适合用误差的平方和或离差绝对值之和最小为准则建立模型。为了克服这个缺陷,可建立以相对误差平方和达到最小即有效度达到最大为准则的优性组合预测模型。

对于实测数据 $(S_i, t_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ ,若采用双曲线配合法和剩余沉降对数法分别分析,则可定义双曲线配合法和剩余沉降对数法有效度分别为

$$\begin{aligned} m_h &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ 1 - \left( \frac{S_i - S_{hi}}{S_i} \right)^2 \right] \\ m_l &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ 1 - \left( \frac{S_i - S_{li}}{S_i} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $m_h$ ,  $m_l$  分别为双曲线配合法和剩余沉降对数法的有效度;  $S_{hi}$ ,  $S_{li}$  分别为按双曲线配合法和剩余沉降对数法得到的在  $t_i$  时的沉降计算值;  $N$  为实测数据的个数。

定义组合预测的有效度为

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ 1 - l_i \left( \frac{S_i - S_{hi}}{S_i} \right)^2 - (1 - l_i) \left( \frac{S_i - S_{li}}{S_i} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中:  $l_i$  为  $t_i$  时刻组合预测中的加权系数,且应满足  $0 \leq l_i \leq 1$ 。

要使组合预测最有效,其有效度应取到极大值,即寻求  $[l_i, S_{hi}, S_{li}]$ , 使

$$\max m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ 1 - l_i \left( \frac{S_i - S_{hi}}{S_i} \right)^2 - (1 - l_i) \left( \frac{S_i - S_{li}}{S_i} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$m$  在  $t_i$  时刻的分量可记为

$$m_i = 1 - l_i \left( \frac{S_i - S_{hi}}{S_i} \right)^2 - (1 - l_i) \left( \frac{S_i - S_{li}}{S_i} \right)^2$$

若将  $m_i$  中所有的参数看为待定参数,则问题的

设计变量数目太多,求解相当困难。为了解决这一问题,可在组合预测中将  $S_{hi}$ ,  $S_{li}$  视为已知量,即将单一预测模型中计算得到的  $S_{hi}$ ,  $S_{li}$  代入组合预测模型中。这样组合预测模型的待定参数只有加权系数  $l_i$ , 则不同  $t_i$  时刻  $m_i$  的取值仅与此时的加权系数  $l_i$  相关。不同  $t_i$  时刻的  $l_i$  取值并无相关性,所以不同  $t_i$  时刻的  $m_i$  也是相互独立的。

显然所有的  $m_i$  均大于等于 0。因此有效度  $m$  取到最大值的问题等价于所有的  $m_i$  也取最大值。原优化问题即可以转化为  $N$  个不相关的有约束 ( $0 \leq l_i \leq 1$ ) 一维优化问题,即寻求  $t_i$ , 使

$$\begin{aligned} \max m_i &= 1 - l_i \left( \frac{S_i - S_{hi}}{S_i} \right)^2 - (1 - l_i) \left( \frac{S_i - S_{li}}{S_i} \right)^2 \\ (0 \leq l_i \leq 1; i &= 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (8)$$

对这  $N$  个优化问题分别求解后即可得到  $N$  个  $l_i$ , 定义:  $l_h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i$ ,  $l_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - l_i) = 1 - l_h$  分别为双曲线配合法和剩余沉降对数法的平均加权系数。则组合预测的沉降公式为

$$S = l_h \left( S_{hf} - \frac{a_h}{t + b_h} \right) + l_l (S_{lf} - e^{a_l t + b_l}) \quad (9)$$

## 4 工程实例分析

图 1 为某试验路段荷载与沉降的时间序列曲线,该试验路段软土含水量较高,渗透性低,属于高压缩性土。荷载近似的可看成分两级施加,取第 2 级荷载结束后的数据进行分析。同时,为了研究实测数据量的大小对于不同预测方法的影响,将观测数据分为 3 组。第 1 组为第 2 级加载结束后 70 d 内的实测数据,第 2 组为加载结束后 215 d 内的实

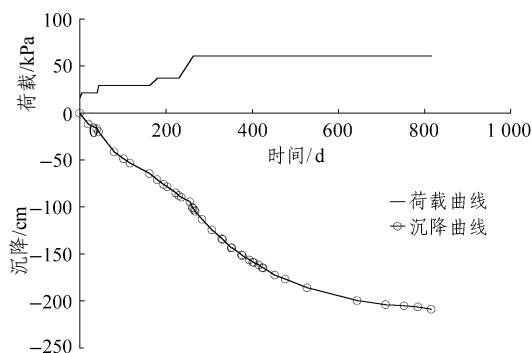


图 1 荷载与沉降的时间序列曲线

Fig.1 Relation curves of load and settlement with time

测数据, 第 3 组为加载结束后 448 d 内的实测数据。

由第 1~3 组数据分别采用双曲线配合法、剩余沉降对数法和优性组合预测法拟合得到的沉降发展曲线如图 2~4 所示。

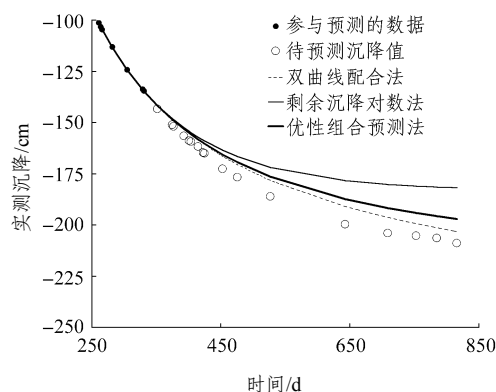


图 2 第 1 组数据拟合的沉降曲线

Fig.2 Fitting curves of settlement for the data of group No.1

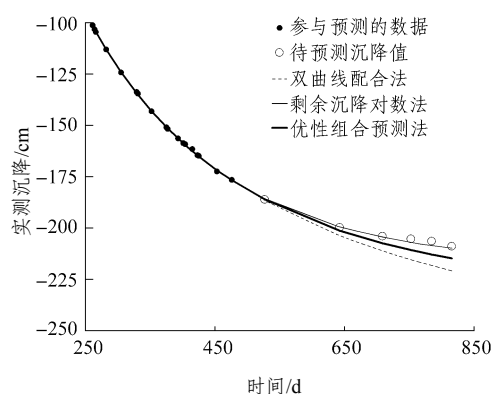


图 3 第 2 组数据拟合的沉降曲线

Fig.3 Fitting curves of settlement for the data of group No.2

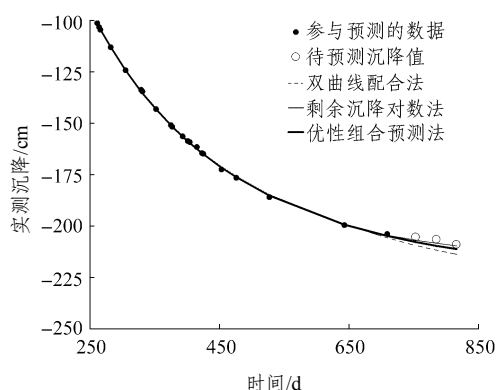


图 4 第 3 组数据拟合的沉降曲线

Fig.4 Fitting curves of settlement for the data of group No.3

从图 2~4 中可以看出:

(1) 由 3 组数据按双曲线配合法拟合得到最终沉降量值都大于剩余沉降对数法或者优性组合预测法, 这也和实际工程经验相符。

(2) 剩余沉降对数法对第 1 组数据的拟合比较差, 应该是数据量太少的缘故, 在第 2 和 3 组数据中, 只要数据量足够多时, 剩余沉降对数法对于实际沉降曲线的拟合都要优于双曲线配合法。

(3) 总体来看, 无论是双曲线配合法还是剩余沉降法, 抑或组合预测法, 拟合的效果都是随着数据量的增多而更优。

(4) 组合预测综合利用多种单一预测方法所提供的信息, 根据有效度最大原则确定平均加权系数, 从而达到尽可能提高预测精度的目的。由 3 组数据得到双曲线配合法的有效度分别为: 0.987, 0.989 和 0.998; 剩余沉降对数法的有效度分别为: 0.912, 0.999 和 0.999; 优性组合预测法的有效度分别为: 0.974, 0.997 和 0.999。由于优性组合预测法综合了 2 种方法的优点, 虽然不一定就是最精确的预测算法, 但在 3 组数据的预测中效果都比较理想, 而单一预测方法则表现出时好时坏的缺点。

(5) 3 组数据中, 双曲线配合法的平均加权系数分别为 0.714, 0.444 和 0.381; 剩余沉降法的平均加权系数分别为 0.286, 0.556 和 0.619。加权系数的变化基本和单一预测方法的有效度一致。因此, 实际工程中, 不但可以用组合预测来更早得到可信的预测结果, 而且也可用加权系数评价单一预测方法的优劣。

## 5 结 语

总结本文以上工作, 可得到如下结论:

(1) 本文综合考虑了简单曲线配合法中的双曲线配合法和剩余沉降对数法, 提出了优性组合预测法。针对误差平方和或离差绝对值之和最小为准则不一定能如实反映实际情况这一问题, 提出以有效度最大为准则的优性组合预测法。

(2) 优性组合预测法吸收了不同单一方法的优点, 因而总能取得较好的预测结果, 从而避免了单一预测方法效果时好时坏的缺点。

(3) 优性组合预测法中的加权系数可用于评价单一预测方法的有效性, 加权系数越大表明该方法越适合应用。

## 参考文献(References):

- [1] 交通部第二公路勘察设计院. 路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.(Institute of the Second Highway Survey and Design. Roadbed[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.(in Chinese))
- [2] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.(Gong Xiaonan. Advanced Soil Mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996.(in Chinese))
- [3] Asaoka A O. Observational procedure for settlement prediction[J]. Soils and Foundations, 1978, (4): 87 - 101.
- [4] 曹国强, 张仪萍, 张士乔, 等. 地基沉降速率与沉降的关系及其应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 467 - 470.(Cao Guoqiang, Zhang Yiping, Zhang Tuqiao, et al. Relationship between settlement-velocity and settlement of ground and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 467 - 470.(in Chinese))
- [5] 李涛, 张仪萍, 曹国强, 等. 推算室内固结系数的剩余沉降对数法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 724 - 726.(Li Tao, Zhang Yiping, Cao Guoqiang, et al. Study on evaluation of consolidation coefficient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 724 - 726.(in Chinese))
- [6] 李冰河, 谢康和, 应宏伟, 等. 变荷载下软粘土非线性一维固结半解析解[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 288 - 293.(Li Binghe, Xie Kanghe, Ying Hongwei, et al. Semi-analytical solution of one dimensional nonlinear consolidation of soft clay under time-dependent loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 288 - 293.(in Chinese))
- [7] 何思明. 基于弹塑性理论的修正分层总和法[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 81 - 92.(He Siming. Modified layer-summation based on elastoplastic theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 81 - 92.(in Chinese))
- [8] 谭昌明, 黄绍彬. 软土地基沉降的二维非线性粘弹性反演与预测[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 67 - 71.(Tan Changming, Huang Shaobing. Back-analysis and prediction for settlement of two-dimensional nonlinear viscoelastic soft clay ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 67 - 71.(in Chinese))
- [9] 吕培印, 杨锦军, 陈伟. 时间序列分析法预报建筑物地基沉降量[J]. 辽宁工学院学报, 1996, 16(4): 27 - 30.(Lu Peiyin, Yang Jinjun, Chen Wei. Time series-analyzing method for prediction of the sedimentation amount happened to a building base[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 1996, 16(4): 27 - 30.(in Chinese))
- [10] 唐彤芝, 李泽崇. 大坝运行期沉降变形的模糊信息分析[J]. 水利水运科学研究, 2002, (2): 21 - 25.(Tang Tongzhi, Li Zechong. Fuzzy information analysis of settlement in dam runtime operation period[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2002, (2): 21 - 25.(in Chinese))
- [11] 张仪萍, 俞亚南, 张士乔, 等. 沉降预测中的灰色模型理论与Asaoka法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (9): 141 - 144.(Zhang Yiping, Yu Yanan, Zhang Tuqiao, et al. Grey theory and Asaoka method in settlement prediction[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2002, (9): 141 - 144.(in Chinese))
- [12] 李守巨, 刘迎曦, 刘玉静. 基于进化神经网络混凝土大坝变形预测[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 634 - 638.(Li Shouju, Liu Yingxi, Liu Yujing. Dam deformation forecasting by evolving artificial neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 634 - 638.(in Chinese))
- [13] 孙林岩. 组合预测方法及应用[J]. 预测, 1990, 9(4): 31 - 35.(Sun Linyan. Combination forecasting theory and practice[J]. Forecasting, 1990, 9(4): 31 - 35.(in Chinese))
- [14] 王郁. 组合预测何以兴起[J]. 预测, 1989, 8(4): 1 - 2, 13.(Wang Yu. Rising of combination forecasting[J]. Forecasting, 1989, 8(4): 1 - 2, 13.(in Chinese))
- [15] 陈华友, 侯定丕. 基于预测有效度的优越组合预测模型研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(2): 172 - 180.(Chen Huayou, Hou Dingpi. Research on superior combination forecasting model based on forecasting effective measure[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2002, 32(2): 172 - 180.(in Chinese))