

## 考虑数据异常及新旧程度影响有界性的地基沉降预测方法

曹文贵<sup>†</sup>, 谭涛

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**在现有沉降组合模型预测方法研究基础上,通过考虑实测沉降数据新旧程度及其影响的有界性特点,提出了度量实测沉降数据新旧程度的新鲜度函数分析模型,它能同时反映实测点与预测点之间的时间距离和实测误差以及实测数据新旧程度影响有界性对沉降预测的影响.基于统计学理论提出了排除异常实测数据引起沉降预测不合理的实测数据样本处理方法.利用上述模型与方法,提出了可反映实测沉降数据异常和新旧程度及其影响程度有界性的地基或路基沉降组合预测新方法.通过工程实例计算以及本文与现有同类方法预测与实测结果的分析,表明了本文地基或路基预测模型与方法的合理性与优越性.

**关键词:**地基或路基;沉降预测;组合模型;新鲜度函数;实测数据异常;实测数据新旧程度影响有界性

中图分类号:TU470

文献标志码:A

## A Prediction Method of Foundation Settlement Considering Anomaly and Newness-Oldness Degree Influence Boundedness of Measured Data

CAO Wengui<sup>†</sup>, TAN Tao

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:**Based on the research of prediction methods for foundation or subgrade settlement by existing combination model, firstly, an analytical model of freshness function is proposed to measure the newness-Oldness degree of measured settlement data, considering the features of newness-Oldness degree and its influence boundedness of measured settlement data. The proposed method can also reflect the effect of time distance between the measured and predicted point, measured error and boundedness of newness-Oldness as well as its influence degree of the measured data on the settlement prediction. Secondly, based on statistical theory, a disposal method of measured data sample is developed which can exclude the unreasonable settlement prediction caused by some abnormal measured data. Then, using the above-mentioned model and method, a new method for combined prediction of foundation or subgrade settlement is put forward, which can reflect the influence of abnormality of measured settlement data, their oldness and newness degree and boundedness of its influence degree on settlement prediction of foundation or subgrade. Finally, it

\* 收稿日期:2019-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879104), National Natural Science Foundation of China(51879104); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130161110017), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20130161110017)

作者简介:曹文贵(1963—),男,湖南南县人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: cwglyp@21cn.com

shows the rationality and superiority of the proposed model and method by calculation of actual engineering examples and comparison and analysis among the prediction results by the proposed and the existing similar methods as well as the measured results.

**Key words:** foundation or subgrade; settlement prediction; combination model; freshness function; measured data anomaly; newness-oldness degree influence boundedness of measure data

众所周知, 实测沉降数据是地基或路基沉降预测的基础, 地基沉降预测的合理性除了取决于预测模型或方法与实测数据量的大小之外, 还取决于实测数据的可靠程度及其新旧程度即实测数据点与预测点之间的时间距离, 而且, 实测数据新旧程度的影响并非无止境即存在有界性, 也就是说, 虽然实测与预测点之间的时间距离越小时, 该实测点的数据应占有更高的权重, 但是, 这种影响并非随时间距离减小而无限增大, 或者说, 随时间距离增大而无限减小, 因此, 在进行地基或路基沉降合理预测时须对实测数据的可靠性与新旧程度影响的有界性予以充分重视, 这正是本文研究的出发点。

目前, 地基或路基沉降预测方法研究主要存在两条基本途径. 其一就是单项模型预测方法, 例如, 双曲线模型、指数曲线模型、Asaoka法、Logistic模型、Weibull模型、MMF模型等<sup>[1-7]</sup>, 其基本思路是依据地基或路基沉降发展变化规律, 利用已有实测沉降数据或曲线, 采用单一函数模型进行拟合以获得沉降与时间之间经验关系, 进而实现对地基或路基沉降的预测. 该方法的突出优越性表现在分析计算简单, 但其缺陷也是明显的, 例如, 预测精度或效果往往不尽如人意, 而且, 普遍适应性差. 究其根本原因, 由于地基或路基沉降发展变化的影响因素非常多且沉降机理复杂, 难以找到具有普遍适用性的单项模型描述地基或路基沉降发展变化规律. 其二就是组合模型预测方法, 例如, 组合预测法、最优组合预测模型、非线性组合预测、变权重组合预测法等<sup>[8-15]</sup>, 该方法的基本思路是考虑地基或路基沉降发展变化规律的复杂多样性, 利用可描述不同沉降发展变化规律的多个单项模型, 并依据各单项模型预测误差确定权重, 实现对地基或路基沉降预测. 该方法的突出优越性表现在其沉降预测精度或效果明显优于单项模型预测方法, 其原因在于组合预测模型能反映地基或路基沉降发展变化规律和沉降力学机理的多样性, 弥补了采用单项模型描述地基或路基

沉降发展变化规律的片面性. 因此, 组合模型预测已成为目前地基或路基沉降的主流预测方法.

尽管如此, 上述沉降组合模型预测方法并未考虑实测数据新旧程度对地基或路基沉降预测效果的影响, 因此, 曹文贵等<sup>[16-17]</sup>首次引进实测沉降数据新鲜度的概念, 并采用诸如 $f(t) = t$ 的新鲜度函数描述实测沉降数据的新旧程度, 提出了考虑实测数据新旧程度影响的地基或路基沉降预测新方法, 这在一定程度上改善了沉降预测效果, 但仍然存在明显不足. 一方面, 由于其采用的新鲜度函数是无界的, 故无法反映实测数据新旧程度影响的客观有界性, 也不能反映实测误差对新鲜度函数构建的影响, 另一方面, 没有考虑实测数据异常的影响. 由于人为因素和沉降监测设备与方法可能引起的沉降监测系统误差, 使不同实测沉降数据的可靠程度差别很大, 明显不合理的实测数据参与沉降预测必然严重影响预测精度或效果, 甚至引起沉降预测的谬误, 故在进行地基或路基沉降预测之前, 必须首先剔除这些不合理的异常数据.

综合上面所述, 现有地基或路基沉降预测方法仍然存在较明显的不足与局限性, 为此, 本文将在地基或路基沉降组合模型预测方法研究基础上, 重点考虑实测数据异常和新旧程度影响有界性对沉降组合预测的影响, 对地基或路基沉降组合模型预测方法进行研究, 以期完善地基或路基沉降预测的理论与方法.

## 1 沉降组合预测新方法

设已获得地基或路基实测沉降数据样本 $S(t_i)$ , 它表示 $t_i$ 时刻对应的某点实测沉降(其中, $i$ 为该实测点序号, $i = 1, 2, \dots, N_1$ ;  $N_1$ 为实测点总数). 如果选取某单项预测模型 $j$ , 可表示为

$$S_j(t) = F(a_{jk}, t) \quad (1)$$

式中: $S_j(t)$ 为 $t$ 时刻某单项预测模型 $j$ 的沉降计算

值; $a_{jk}$  对应于某单项预测模型  $j$  的第  $k$  个模型参数,  $k = 1, 2, \dots, N_2$ ;  $N_2$  为单项预测模型参数的个数, 并设由单项预测模型  $j$  计算实测样本对应时刻沉降的误差平方和为  $Q_j$ , 可表示为

$$Q_j = \sum_{i=1}^{N_1} [S_j(t_i) - S(t_i)]^2 \quad (2)$$

于是, 依据最小二乘法原理<sup>[18]</sup>可得到

$$\partial Q_j / \partial a_{jk} = 0 \quad (3)$$

因此, 由式(3)可得到  $N_2$  个方程, 将其联立求解即可确定出各单项预测模型  $j$  的全部模型参数  $a_{jk}$ , 从而实现采用单项预测模型对  $t$  时刻沉降进行预测。

考虑到沉降实测与预测点之间的时间距离不同对地基或路基沉降预测的影响不同以及不同单项预测模型对时间距离影响的依赖性不同, 如果对应于单项预测模型  $j$  选取不同的反映时间距离即实测数据新旧程度影响的新鲜度函数  $f_j(t)$ , 则依据式(2)可获得反映实测数据新旧程度影响的地基或路基沉降预测的沉降误差平方和新函数  $Q_j'$ , 可表示为

$$Q_j' = \sum_{i=1}^{N_1} \{f_j(t_i)[S_j(t_i) - S(t_i)]\}^2 \quad (4)$$

于是, 依据式(4)按前述方法可确定出各单项模型  $j$  参数  $a_{jk}$ , 进而可获得考虑实测数据新旧程度影响的地基或路基沉降预测方法, 可表述为

$$S'(t) = \sum_{j=1}^{N_2} \omega_j(t) S_j(t) \quad (5)$$

式中:  $S'(t)$ 、 $S_j(t)$  和  $\omega_j(t)$  分别为  $t$  时刻地基或路基沉降组合预测模型与单项预测模型  $j$  的预测值以及单项模型  $j$  的权重, 而且, 各单项预测模型权重须满足

$$\sum_{j=1}^{N_2} \omega_j(t) = 1 \quad (6)$$

由此可以看出, 为了利用式(5)预测  $t$  时刻地基或路基沉降  $S'(t)$ , 尚需解决各单项预测模型权重  $\omega_j(t)$  的计算方法问题。为此, 设  $t_i$  时刻采用单项预测模型  $j$  计算各实测点沉降的相对误差为  $E_{ji}$ , 可表示为

$$E_{ji} = |[S(t_i) - S_j(t_i)]/S(t_i)| \quad (7)$$

如果采用吻合度描述  $t_i$  时刻由单项模型  $j$  计算实测点  $i$  沉降的吻合程度, 并设其为  $c_{ji}$ , 且其可表示为

$$c_{ji} = |1 - E_{ji}| \quad (8)$$

于是, 采用单项模型  $j$  计算所有各测点沉降引起的总吻合度  $C_j$  可采用  $c_{ji}$  之和来度量, 可表示为

$$C_j = \sum_{i=1}^{N_1} c_{ji} \quad (9)$$

很显然,  $C_j$  越大表示采用单项模型  $j$  预测  $t$  时刻沉降的准确度越高, 则预测  $t$  时刻沉降时, 单项模型

$j$  应该占有更高的权重, 反之亦然。因此, 预测  $t$  时刻地基或路基沉降时, 单项预测模型  $j$  的权重  $\omega_j(t)$  可采用下式计算

$$\omega_j(t) = C_j / \sum_{j=1}^{N_2} C_j \quad (10)$$

至此已建立出考虑实测数据新旧程度影响的地基或路基沉降的组合预测模型即式(5)。值得注意, 利用上述模型预测地基或路基沉降能否反映实测数据新旧程度及其影响程度有界性以及实测数据异常的影响, 还须探讨实测数据新鲜度函数分析模型的构建方法及实测沉降数据异常的处理方法。

## 2 实测数据新鲜度函数模型构建方法

曹文贵等<sup>[16-17]</sup>提出了不同单项预测模型采用相同新鲜度函数  $f(t)=t$  来描述实测数据新旧程度对沉降预测的影响, 其虽然改善了地基或路基沉降预测效果, 但明显存在不足, 一方面, 对于不同单项预测模型, 采用相同新鲜度函数模型不能反映不同单项预测模型对实测数据新旧程度影响的差异性, 另一方面, 不能反映实测数据新旧程度影响的有界性; 另一方面, 不能反映不同时刻实测沉降与其客观沉降之间的差异对新鲜度函数模型的影响, 因此, 有必要重新探讨实测数据新鲜度函数分析模型的构建方法。为此, 须首先掌握实测数据新鲜度函数分析模型具有的特性, 因此, 下面将进一步对此进行探讨。

1) 反映时间距离即预测时刻  $t$  与实测时刻  $t_j$  之差的影响, 而且, 时间距离越大, 则该实测沉降数据对沉降预测的重要性越低, 反之亦然, 也就是说, 时间距离对地基或路基沉降预测的影响呈现单调变化规律;

2) 反映  $t_j$  时刻实测沉降误差的影响, 而且, 误差越大, 该实测点沉降数据对沉降预测的重要性越大, 反之亦然, 也就是说, 实测沉降误差对地基或路基沉降预测的影响也呈现单调变化规律;

3) 不同时刻实测沉降数据对地基或路基沉降预测的影响程度是不同的, 也就是说, 不同实测点实测沉降数据的新鲜度是不同的;

4) 实测沉降数据新鲜度对单项预测模型具有依赖性, 也就是说, 对于不同单项预测模型, 相同时刻实测数据新鲜度是不同的;

5) 实测沉降数据新旧程度对地基或路基沉降预测的影响并非无止境, 也就是说, 实测数据新鲜度函数分析模型是一个有界函数。

于是,考虑上述实测数据新鲜度函数分析模型的基本特性,经深入研究,本文构建出了新型实测数据新鲜度函数模型,可表示为

$$f_j(t_i) = e^{-(t_i-t)/t_i} / E_{ji} \quad (11)$$

上述实测数据新鲜度函数分析模型具有如下特点:

1) 由于  $E_{ji}$  是根据单项模型  $j$  计算出的  $t_i$  时刻实测点的沉降误差,故反映了新鲜度对单项模型的依赖性,也反映了不同测点沉降误差对新鲜度影响的差异性,同时还反映了新鲜度随沉降误差增大而减小的内在规律。

2) 由于  $t$  和  $t_i$  分别为预测点和实测点时间,故  $(t_i - t)/t$  体现了实测点与预测点之间的时间长度大小即实测点沉降数据的新旧程度,而且,也由于  $(t_i - t)/t$  必然为负值,  $e^{-(t_i-t)/t}$  必然随  $t_i$  增大而增大,故也反映了越新的实测点沉降数据对沉降预测的影响越大的合理客观现象。

3) 由于  $0 \leq t_i < t$ , 因此,  $e^{-(t_i-t)/t}$  必然是一个有界函数,因此,  $f_j(t_i)$  也必然是一个有界函数,故本文建立的新鲜度函数反映了实测沉降数据新旧程度对沉降预测影响的有界性。

由此可以看出,本文实测数据新鲜度函数分析模型明显较曹文贵等<sup>[16-17]</sup>提出的仅能反映时间距离影响的新鲜度函数分析模型更具合理性。

### 3 实测沉降数据异常的处理方法

在进行地基或路基沉降监测时,由于人为因素或监测设备操作与测量方法不当,难以避免实测沉降数据的异常或不真实,如果不作处理直接将全部实测数据参与地基或路基沉降预测,必然会导致地基或路基沉降预测结果的不合理甚至谬误。因此,在预测出某时刻  $t$  地基或路基沉降之前须剔除这些异常实测沉降数据。为此,下面将依据统计学理论探讨实测沉降数据异常的处理方法。

如果设由  $t$  时刻组合预测模型计算得到的实测时刻  $t_k$  的沉降为  $S''(t_k)$ , 则  $t_k$  时刻沉降实测相对误差  $E''(t_k)$  可表示为

$$E''(t_k) = |(S''(t_k) - S(t_k))/S(t_k)| \times 100\% \quad (12)$$

而  $E''(t_k)$  的标准差  $\sigma$  可表示为

$$\sigma = \sqrt{\left( \sum_{k=1}^{N_1} [E''(t_k) - \mu]^2 \right) / (N_1 - 1)} \quad (13)$$

式中:  $\mu$  为  $t$  时刻沉降组合预测的相对误差  $E''(t_k)$  的

平均值,可表示为

$$\mu = \sum_{k=1}^{N_1} E''(t_k) / N_1 \quad (14)$$

于是,依据统计学理论的“ $3\sigma$ ”原则<sup>[19]</sup>,当  $E''(t_k) \in [\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  时,  $t_k$  时刻实测沉降数据合理,应参与  $t$  时刻沉降组合预测,否则应将其剔除即不参与沉降预测,也就是说,  $t$  时刻沉降预测的实测沉降数据样本大小应为  $N_1 - 1$ 。

值得注意,由于  $\sigma$  和  $\mu$  与参与  $t$  时刻沉降组合预测的实测沉降数据样本直接相关,因此,必须采用迭代分析方法进行反复迭代计算,直至完全满足上述条件为止,此时依据异常实测沉降数据处理后的实测沉降数据样本进行沉降预测,方可获得最终地基或路基沉降的合理预测结果。另外还须注意,利用“ $3\sigma$ ”原则剔除异常数据时,需要有足够大的数据样本,这也是合理沉降预测的基本前提条件,否则,无法进行沉降预测。

### 4 工程实例分析与验证

上述已建立出考虑实测数据异常与新旧程度影响有界性的地基沉降预测新方法,但其可行性与合理性仍需验证。为此,本文将采用两个工程的实测沉降资料进行分析。

工程实例一为杭浦高速公路 K90+769~K111+419 段<sup>[20]</sup>,工程实例二为深圳滨海大道 K1+800 测试段沉降板 T11 沉降实测结果<sup>[21]</sup>,其实测沉降数据如表 1 所示。由于要验证本文方法的合理性,只能由理论预测与实测结果进行比较分析,因此,须将两个工程的实测数据分为两部分,第一部分作为沉降预测的原始数据样本,第二部分作为预测与实测的比较数据,因此,对于工程实例一和二,分别取前 11 和 15 组数据作为原始数据,即对应  $N_1$  分别为 11 和 15。

为了进行沉降预测,首先要选定若干单项预测模型,于是,通过对两个工程实测沉降曲线变化规律进行分析,选定 Logistic 模型<sup>[4]</sup>、Weibull 模型<sup>[5]</sup>、MMF 模型<sup>[6]</sup> 3 个单项沉降预测模型进行组合模型预测(即  $N_2 = 3$ ),其中,Logistic 模型<sup>[4]</sup>可表示为

$$S_1(t) = a_{11} / (1 + a_{12} e^{-a_{13}t}) \quad (15)$$

Weibull 模型<sup>[5]</sup>可表示为

$$S_2(t) = a_{21} - (a_{21} - a_{22}) e^{-a_{23}t^{a_{24}}} \quad (16)$$

MMF 模型<sup>[6]</sup>可表示为

$$S_3(t) = (a_{31}a_{32} + a_{33}t^{a_{34}}) / (a_{32} + t^{a_{34}}) \quad (17)$$

表1 工后沉降实测数据<sup>[20-21]</sup>  
Tab.1 Measured post-construction settlement

工程实例一			工程实例二		
序号	时间/d	沉降/mm	序号	时间/d	沉降/mm
1	16	35.7	1	10	30.2
2	36	76.8	2	20	40.3
3	62	123.2	3*	30	70.3
4	121	209.5	4	40	80.4
5	160	252.9	5	50	90.2
6	191	281.7	6	70	120.4
7	219	305.0	7	90	160.5
8	241	322.5	8	110	200.1
9	271	344.5	9	130	300.3
10	305	368.1	10	170	420.5
11	344	393.2	11	190	500.7
12	375	411.6	12	210	540.8
13	407	430.4	13	240	640.6
14	477	465.8	14	270	690.5
15	593	514.9	15	300	730.3
			16	330	760.3
			17	360	790.7
			18	390	810.8
			19	420	830.4

注:\*表示被剔除异常数据.

针对这两个工程实例的各预测时刻  $t_k$ , 采用本文模型与方法进行迭代计算可获得最终各单项模型参数与沉降组合预测结果, 如表2所示. 并与现有相关预测模型的预测结果进行比较分析, 如图1和图2所示. 由此可以看出, 本文方法较现有同类方法的沉降预测精度或效果更好, 表明了本文方法的合理性与优越性.

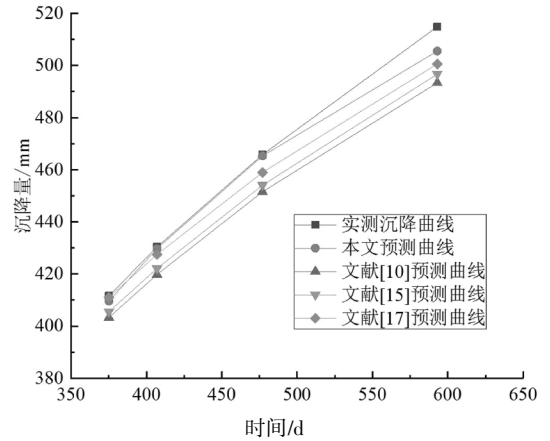


图1 工程实例一理论预测曲线与实测沉降曲线比较  
Fig.1 Comparison between predicted and measured settlement curves in Project No.1

表2 模型参数与沉降预测结果  
Tab.2 Model parameters and settlement prediction results

工程编号	工程实例一				工程实例二			
	375	407	477	593	330	360	390	420
预测时刻 $t_k$ /d	375	407	477	593	330	360	390	420
Logistic 参数 $a_{ik}$	$5.29 \times 10^2$	$2.16 \times 10^2$	$1.12 \times 10^{-2}$	—	$9.01 \times 10^2$	$0.22 \times 10^2$	$1.48 \times 10^{-2}$	—
Weibull 参数 $a_{2k}$	$6.16 \times 10^2$	$8.53 \times 10^{-3}$	$5.50 \times 10^{-3}$	0.90	$7.98 \times 10^2$	$0.47 \times 10^2$	$7.66 \times 10^{-6}$	2.22
MMF 参数 $a_{3k}$	-0.81	$2.86 \times 10^2$	$8.68 \times 10^2$	0.94	$1.06 \times 10^{-4}$	$6.00 \times 10^5$	$9.86 \times 10^2$	2.47
Logistic 权重 $\omega_1(t)$	0.24	0.24	0.24	0.24	0.35	0.35	0.35	0.35
Weibull 权重 $\omega_2(t)$	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
MMF 权重 $\omega_3(t)$	0.38	0.38	0.38	0.38	0.27	0.27	0.27	0.27
实测沉降 $S(t_k)$ /mm	411.6	430.4	465.8	514.9	760.3	790.7	810.8	830.4
本文预测沉降 $S'(t_k)$ /mm	409.6	429.8	465.3	505.5	756.3	788.0	810.5	826.4
本文预测相对误差/%	0.49	0.14	0.11	1.83	0.53	0.34	0.04	0.48
文献[10]预测沉降 $S'(t_k)$ /mm	403.3	419.8	451.5	493.4	766.9	791.8	809.6	822.2
文献[10]预测相对误差/%	2.02	2.46	3.07	4.18	0.87	0.14	0.15	0.99
文献[15]预测沉降 $S'(t_k)$ /mm	405.5	422.1	454.1	496.7	765.6	792.8	806.6	818.5
文献[15]预测相对误差/%	1.48	1.93	2.51	3.53	0.70	0.27	0.52	1.43
文献[17]预测沉降 $S'(t_k)$ /mm	411.1	427.5	459.0	500.6	769.5	793.7	811.1	823.9
文献[17]预测相对误差/%	0.12	0.67	1.46	2.78	1.21	0.38	0.04	0.78

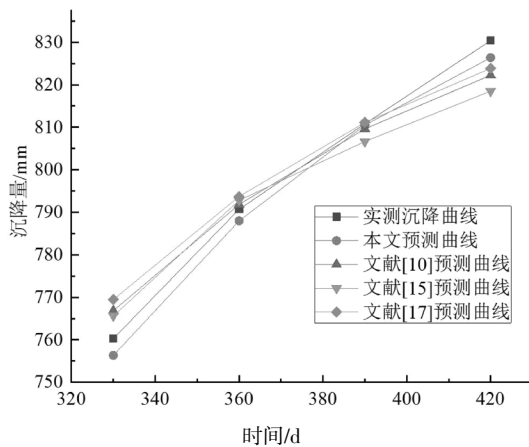


图2 工程实例二理论预测与实测沉降曲线比较

Fig.2 Comparison between predicted and measured settlement curves in Project No.2

## 5 结论

本文在现有组合模型沉降预测方法研究基础上,重点考虑实测沉降数据异常与新旧程度及其影响程度有界性对地基或路基沉降预测精度和效果的影响,进一步深入探讨了地基或路基沉降预测的模型与方法.由此可得如下结论:

1)构建了新型沉降实测数据的新鲜度函数分析模型,它不仅可反映实测沉降数据的时间距离与误差对单项预测模型的依赖性的影响,还可体现不同实测点数据的新鲜度函数不同以及新鲜度的影响程度有界性的特点.

2)基于统计学理论,提出了实测沉降数据样本的数据处理方法,避免了异常实测沉降数据导致地基或路基沉降预测精度下降甚至谬误的不合理现象.

3)在上述模型与方法研究中,引进组合预测理论,建立了新型地基或路基沉降预测新方法,并通过工程实例计算以及本文与现有同类方法预测和实测结果的比较分析,表明了本文模型与方法的合理性与优越性.

4)值得注意,本文模型与方法的沉降预测精度和效果与所选择单项预测模型的种类和数量直接相关,在实际工程应用中,应予以高度重视.

## 参考文献

[1] TAN S A. Hyperbolic method for settlements in clays with vertical

drains [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31 (31): 125—131.

[2] 李涛,张仪萍,张土乔. 软土路基沉降的优越性组合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3282—3286.

LI T, ZHANG Y P, ZHANG T Q. Superior combination forecasting settlement of soft clay embankments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3282—3286. (In Chinese)

[3] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction [J]. Soils and Foundations, 1978, 18(4): 30—34.

[4] 徐洪钟,施斌,李雪红. 全过程沉降量预测的 Logistic 生长模型及其适用性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 387—391.

XU H Z, SHI B, LI X H. Logistic growth model and its applicability for predicting settlement during the whole process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 387—391. (In Chinese)

[5] MURALEEDHARAN G, NAIR N U, KURUP P G. Application of Weibull model for redefined significant wave height distributions [J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences—Earth and Planetary Sciences, 1999, 108(3): 149—153.

[6] 廖卫红, 王军保. MMF 模型在地基沉降预测中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 807—811.

LIAO W H, WANG J B. Study on application of MMF model to prediction of foundation settlement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 807—811. (In Chinese)

[7] 路志英,任一墨,葛路琨. 基于样条估计分位数回归的光伏功率回归模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(10): 96—103.

LU Z Y, REN Y M, GE L K. Photovoltaic power regression model based on spline estimation and quantile regression [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(10): 96—103. (In Chinese)

[8] 冷伍明,杨奇,聂如松,等. 高速铁路桥梁桩基工后沉降组合预测研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3341—3348.

LENG W M, YANG Q, NIE R S, et al. Study of post-construction settlement combination forecast method of high-speed railway bridge pile foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3341—3348. (In Chinese)

[9] 冯震,王娜,王连俊. 沉降组合预测模型研究及其应用[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 29—31.

FENG Z, WANG N, WANG L J. Research of settlement combination forecasting model and its application [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(1): 29—31. (In Chinese)

[10] BATES J M, GRANGER C W J. The combination of forecasts [J]. Operational Research Quarterly, 1969, 20(4): 451—468.

[11] 李猛,谢正文,付艳. 最优沉降组合预测模型及应用[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(8): 216—219.

LI M, XIE Z W, FU Y. Optimization settlement combined forecasting model and its application [J]. West-China Exploration Engineering,

- 2008, 20(8):216—219. (In Chinese)
- [12] 赵明华, 龙照, 邹新军. 基于 Logistic 曲线和 Gompertz 曲线的最优组合沉降预测模型及其应用 [J]. 公路交通科技, 2007, 24(12):1—4.  
ZHAO M H, LONG Z, ZOU X J. Optimal combinational predictive model of settlement based on Logistic curve and Gompertz curve and its application [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(12):1—4. (In Chinese)
- [13] 欧阳炼. GM (1, 1)-Logistic 路基沉降组合预测模型研究与应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(4):56—60.  
OU Y L. Research and application of GM(1, 1) and Logistic combination forecasting model for subgrade settlement [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(4):56—60. (In Chinese)
- [14] 吴清海, 李慧芳. 变权重组合模型在沉降预测中的应用 [J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(2):118—124.  
WU Q H, LI H F. Application of the changeable weight combination model in building settlement predicting [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(2):118—124. (In Chinese)
- [15] 赵明华, 刘煜, 曹文贵. 软土路基沉降变权重组合 S 型曲线预测方法研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26(9):1443—1447.  
ZHAO M H, LIU Y, CAO W G. Study on variable-weight combination forecasting method of S-type curves for soft clay embankment settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9):1443—1447. (In Chinese)
- [16] 曹文贵, 印鹏, 贺敏, 等. 考虑实测数据新旧程度的工后沉降单项模型预测方法 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6):65—70.  
CAO W G, YIN P, HE M, *et al.* A prediction method for post-construction settlement of a single model with the consideration of the new or old degree of the measured data [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6):65—70. (In Chinese)
- [17] 曹文贵, 印鹏, 贺敏, 等. 基于数据新旧程度和预测取值区间调整的沉降组合预测方法 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2):534—540.  
CAO W G, YIN P, HE M, *et al.* A combination method for predicting settlement based on new or old degree of data and adjustment of value interval of prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2):534—540. (In Chinese)
- [18] 卿启湘, 王永和, 李光耀. 标准击实试验的一种数据处理方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, 31(2):48—51.  
QING Q X, WANG Y H, LI G Y. A numerical method for analysis of the result to indoor standard compaction test [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2004, 31(2):48—51. (In Chinese)
- [19] 周建普, 李献民, 王永和. 粘土边坡可靠性分析方法研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(5):92—97.  
ZHOU J P, LI X M, WANG Y H. Research for method of reliability analysis for clayey soil slope [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2002, 29(5):92—97. (In Chinese)
- [20] 顾建武, 何良德, 李林青. 基于速率-沉降特征分析工后沉降预测方法的适用性 [J]. 交通科技, 2012(2):85—88.  
GU J W, HE L D, LI L Q. Applicability of post-construction settlement prediction model based on velocity-settlement relationship [J]. Transportation Science & Technology, 2012(2):85—88. (In Chinese)
- [21] 上海市市政工程设计研究院. 深圳市滨海大道市政工程软基处理分析报告 [R]. 上海: 上海市市政工程设计研究院, 1998:16—38.  
Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute. The analysis report for soft ground treatment of coastal road of Shenzhen municipal engineering [R]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute, 1998:16—38. (In Chinese)