

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.02.029

# 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

曹文贵, 印 鹏, 贺 敏, 刘 涛

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘 要:** 工后沉降预测是建筑物地基或路基的安全性评价及其加固维护方案决策的重要依据。为此, 引入组合预测思想, 首先通过探讨实测沉降数据新旧程度对工后沉降预测效果的影响规律, 引入新鲜度函数, 建立出考虑实测沉降数据新旧程度对沉降预测影响的分析模型; 其次, 通过研究沉降组合预测可能取值的变化规律, 引进平行修正的思路, 建立出有利于提高沉降组合预测精度的组合预测可能取值区间的调整方法; 然后, 在此研究基础上, 提出了同时考虑实测沉降数据新旧程度和组合预测可能取值区间调整, 对沉降预测效果影响的改进工后沉降组合预测新方法。最后, 通过工程实例计算与比较分析, 表明了改进的工后沉降组合预测方法的合理性与可行性。

**关 键 词:** 工后沉降; 沉降预测; 组合预测; 新鲜度函数; 组合预测取值区间调整; 平行修正

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 02-0534-07

## A combination method for predicting settlement based on new or old degree of data and adjustment of value interval of prediction

CAO Wen-gui, YIN Peng, HE Min, LIU Tao

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

**Abstract:** The prediction for post-construction settlement of building foundation or roadbed is an important basis for its safety assessment and the determination of maintenance strategy. Therefore, firstly, a methodology of combination prediction is introduced in this paper. By considering the effect of new or old degree of the measured settlement data on the prediction of post-construction settlement, an analytical model is developed by introducing a fresh-degree function, which can reflect the effect of the new or old degree of measured settlement data on prediction. Secondly, using parallel-modification, a method of the adjustment of value interval for combination prediction is proposed through analyzing the variations of the possible combination prediction, to improve the precision of the prediction. And then, on the basis, an improved model for combination prediction of post-construction settlement is established, which can simultaneously describe the effect of new or old degree of the measured data and the effect of adjustment of value interval for combination prediction on settlement prediction. Finally, the proposed method is used to analyze the practical engineering examples, which demonstrates that the method is feasible and reasonable.

**Keywords:** post-construction settlement; settlement prediction; combination prediction; a fresh degree function; adjustment of value interval for combination prediction; parallel-modification

## 1 引 言

由于地基或路基土的固结效应或其他因素变化的影响, 竣工后的建筑物地基或路基沉降即工后沉降会进一步产生, 即工后沉降具有时间效应, 这对建筑物地基或路基在运营过程中的安全性和维护

都将产生重要的影响, 所以, 建筑物地基或路基沉降的预测对其安全性评价和加固维护方案决策具有重要的工程实际意义。因此, 有必要探讨建筑物地基或路基工后沉降的预测方法, 这正是本文研究的出发点。

国内外大量学者<sup>[1-6]</sup>对建筑物地基或路基工后

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51378198); 高等学校博士学科点专项科研基金 (No.20130161110017)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378198) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130161110017).

第一作者简介: 曹文贵, 男, 1963年生, 博士 (后), 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与研究工作。E-mail: cwglyp@21cn.com

沉降预测方法已进行了广泛而深入的研究，并取得了卓有成效的研究成果，目前已获得的沉降预测方法主要有单项模型<sup>[1-3]</sup>与组合模型<sup>[4-6]</sup>预测两类方法。

对于单项模型的沉降预测方法，其基本预测思路是通过对已有沉降观测数据变化规律进行研究，选取单一较合理的沉降与时间关系的模型（如 Logistic 曲线模型<sup>[7]</sup>和 Gompertz 曲线模型<sup>[8]</sup>等），基于实测曲线进行拟合获得模型参数，进而利用拟合曲线实现对沉降进行预测。采用该方法预测建筑物地基或路基沉降的合理性与可靠性取决于实测沉降数据量及所选单项模型的合理性，因此，选择合理的单项模型成为该预测方法的关键。可是，由于人们对事物发展规律认识的局限性，通过人为选择的方法很难甚至无法确定出最为合理的单项预测模型，至多能做到的是通过试算反复选择模型，并使其最大限度地在实测数据段与实测曲线吻合，而这也未必与预测段沉降客观变化规律相吻合。因此，工后沉降的单项模型预测方法存在明显的缺陷或局限性，于是，沉降的组合模型预测方法应运而生<sup>[9]</sup>。

沉降的组合模型预测的基本思路是通过选择多个单项预测模型，并根据单项预测模型计算值与实测值的误差赋予各单项预测模型的权重，并将所选所有的单项模型按不同权重进行组合而获得组合模型，进而实现对沉降的组合模型预测。该方法预测的效果虽然也与单项模型的选择存在紧密关系，但由于该方法选择了多个单项预测模型，各单项模型之间具有互补性，因此，它有效地避免了单项模型预测方法的缺陷与局限性，应用于工程实践取得了更好的预测效果，但也仍然存在不足，主要表现在如下两方面：

其一，忽视了实测数据新旧程度对沉降预测有效性的影响<sup>[10-12]</sup>。众所周知，实测沉降数据是在不同时刻由实测获得的，利用这些不同时刻的沉降数据对未来某时刻沉降进行预测时，它们的有效性是不同的。一般来讲，在离预测时刻的时间距离越短的时刻获得的实测数据对预测的有效性越强，故其应赋予更高的权重，因此，在进行沉降预测时有必要探讨实测沉降数据的新旧程度对沉降预测效果的影响。这正是本文研究的核心内容之一。

其二，忽视了组合预测取值区间大小对沉降预测的影响。依据组合预测原理可知，在利用组合模型对沉降进行预测时，预测值只能在由所有单项预测模型所获得预测值的最大值与最小值所组成的区间内取值，以这样的预测值代表客观实际沉降值存

在一定的不合理性。因为客观实际沉降值可能位于上述预测取值区间之外，当然，也可能位于预测取值区间之中。如果客观实际沉降值位于预测取值区间之外，则无论怎样改变单项预测模型的权重，利用现有组合模型预测方法都不可能获得符合实际的预测值，究其原因，在于组合预测的取值区间偏小。如果能适当而合理地扩大组合预测的取值区间，即便使单项预测模型拟合的效果变差或精度降低，也能使组合模型预测方法的预测精度得到有效提高。因此，探讨组合预测的取值区间大小及其修正调整方法对提高组合模型预测方法的精度具有明显的理论与工程实际意义。这也正是本文研究的另一核心内容。

综上所述，尽管工后沉降的组合模型预测方法存在上述缺陷，但无论如何它还是目前建筑物地基或路基工后沉降预测的最为有效的方法之一，如果能妥善解决上述两方面的问题，则有望使组合模型预测方法取得更好的预测效果。因此，本文将基于组合预测原理，深入探讨考虑上述两方面因素对建筑物地基或路基工后沉降预测的影响及其合理处理方法，以期建立出更为合理的沉降预测新方法，完善建筑物地基或路基工后沉降预测的理论与方法。

## 2 工后沉降组合预测方法的改进

本文对建筑物地基或路基沉降组合预测方法的改进主要针对本文引言所述的两个方面进行，而且，其基本预测方法仍然是组合预测方法。因此，为了建立出考虑实测沉降数据新旧程度及组合预测取值区间对组合预测沉降影响的组合预测方法，将仍然从组合预测的基本方法与原理入手，下面将介绍其相关内容。

对于某沉降预测问题，采用组合模型预测方法预测沉降。设采用  $n$  种单项预测模型进行组合预测，而且， $t$  时刻的单项预测模型的预测沉降为  $\hat{S}_i(t)$  ( $i=1,2,\dots,n$ )，其可通过已测沉降曲线拟合得到的单项预测模型的计算得到，则组合预测沉降  $\hat{S}(t)$  可采用下式计算：

$$\hat{S}(t) = \sum_{i=1}^n w_i(t) \hat{S}_i(t) \quad (1)$$

式中： $w_i(t)$  为第  $i$  种单项预测模型在  $t$  预测时刻的权重，其应满足如下条件：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n w_i(t) &= 1 \\ w_i(t) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这就是目前最普遍采用的沉降组合预测方法。由此可以看出,利用式(1)进行沉降组合预测的关键在于各单项预测模型权重 $w_i(t)$ 的确定方法。目前已有大量学者<sup>[4-6]</sup>对此进行了广泛而深入的研究,其确定单项预测模型权重的方法与过程如下:

(1) 依据已测沉降曲线拟合得到的各单项预测模型,采用式(1)计算出在各观测点 $t_j$ 的组合预测沉降 $\hat{S}_i(t_j)$  ( $j=1,2,\dots,N$ ,  $N$ 为沉降观测点总数),其实际为 $w_i(t_j)$ 的函数。

(2) 计算各已测点误差 $e_i(t_j)$ ,如果设各实测沉降为 $S_i(t_j)$ ,则 $e_i(t_j)$ 可表示为

$$e_i(t_j) = S_i(t_j) - w_i(t_j)\hat{S}_i(t_j) \quad (3)$$

(3) 建立误差函数 $f[w_i(t_j)]$ ,可表示为

$$f[w_i(t_j)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N [e_i(t_j)]^2 \quad (4)$$

(4) 使误差函数 $f[w_i(t_j)]$ 取最小值,即使

$$\frac{\partial f[w_i(t_j)]}{\partial w_i(t_j)} = 0 \quad (5)$$

由此可得到一组以 $w_i(t_j)$ 为变量的方程组,从而可求出 $w_i(t_j)$ 。

(5) 由 $w_i(t_j)$ 可确定出各单项预测模型在时刻 $t$ 的权重 $w_i(t)$ ,即

$$w_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w_i(t_j) \quad (6)$$

上述即为目前组合预测各单项预测模型权重的确定方法。由此可以看出,该权重确定方法未考虑观测数据新旧程度对权重的影响,而且,利用式(1)进行沉降组合预测时也未考虑预测取值区间对组合预测沉降的影响,故存在一定的缺陷与局限性,为此,下面将在上述组合预测方法的基础上,就这两方面的问题进行研究。

## 2.1 实测沉降数据新旧程度对组合预测的影响

众所周知,实测沉降曲线是沉降预测的基础,而实测沉降数据点距离预测点的时间长短是不同的。距离预测点时间越短的实测点对预测沉降的影响越大,反之亦然。因此,对距离预测点时间距离越短的实测沉降应该提高它对组合预测影响的重要程度。为此,下面对此进行研究,具体内容如下。

如果设第 $i$ 种单项预测模型在 $t_j$ 实测时刻预测的相对误差为 $E_i(t_j)$ ,可表示为

$$E_i(t_j) = \left| \frac{S_i(t_j) - \hat{S}_i(t_j)}{S_i(t_j)} \right| \times 100\% \quad (7)$$

则第 $i$ 种单项预测模型在 $t_j$ 时刻观测点计算值与实测值的吻合程度可用吻合度 $c_i(t_j)$ 来描述,本文将其定义为

$$c_i(t_j) = [1 - E_i(t_j)] \times 100\% \quad (8)$$

由此可以看出,如果 $c_i(t_j)$ 越大,则表明预测值与实测值吻合程度越高,反之亦然。如果以此为依据确定第 $i$ 种单项预测模型的权重,虽具有合理性与可行性,但这还不能反映实测数据新旧程度对组合预测的影响,为此,采用文献[12]的研究思路,引入一个新鲜度函数 $F(t)$ ,它具有随时间 $t$ 呈现单调递增的特性,如 $F(t) = t$ 或 $t^2$ 等。将其与 $c_i(t_j)$ 相乘得到一个新的量,本文称之为改进吻合度 $c'_i(t_j)$ ,可表示为

$$c'_i(t_j) = F(t_j)c_i(t_j) = F(t_j)[1 - E_i(t_j)] \times 100\% \quad (9)$$

于是, $c'_i(t_j)$ 不仅描述了单项预测模型的吻合度,还反映了随实测沉降数据的实测时间增长加大吻合度对单项预测模型权重的影响,因此,在此基础上,可建立出反映实测沉降数据新旧程度对组合预测影响的组合预测权重确定方法:

$$w_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^N c'_i(t_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N c'_i(t_j)} \quad (10)$$

显然,新鲜度函数 $F(t)$ 虽然须满足单调增大的特性,但满足单调增大特性的 $F(t)$ 形式有很多,呈现不同单调增长特性的 $F(t)$ 函数形式对预测的效果是不同的,这是一个值得研究的问题,留待以后再做深入研究。本文参照文献[12]选取 $F(t)$ 的函数表达式为

$$F(t) = t^2 \quad (11)$$

于是,根据式(9)~(11)即可建立出本文考虑实测沉降数据新旧程度对组合预测效果影响的组合预测权重确定新方法。

## 2.2 组合预测取值区间的调整方法

在利用式(1)、(10)进行组合沉降预测时,如果确定了所有单项预测模型的函数形式,对于确定的实测沉降数据量及其数值大小,各单项预测模型在 $t$ 时刻的预测值就已经确定,而且,各单项预测模型的组合预测权重 $w_i(t)$ 也已确定,此时,组合预测精度取决于所有单项预测模型预测值所确定的组合预测可能取值区间的大小。如果沉降实际值不在该区间内,则无论怎样改变单项模型的权重,所获得的组合预测值都不能与实际值更吻合,究其原因在于按上述确定的组合预测可能取值区间没有覆

盖沉降实际值。因此，如果能适当扩大上述组合预测的取值区间，就可能提高预测取值区间覆盖沉降实际值的可能性，从而提高组合预测的精度。为此，本文将在下面讨论组合预测取值区间扩大调整的合理方法。

扩大组合预测可能取值区间可通过调整单项预测模型在预测时刻  $t$  的预测值大小来实现。例如，把大于预测时刻  $t$  实际沉降的单项预测模型预测值增大，而把小于预测时刻  $t$  实际沉降的单项预测模型预测值减小，这样就自然使组合预测的可能取值区间增大了。但这种组合预测取值区间的扩大调整也非随意而无限制的，否则，不仅不能提高组合预测的精度，反而可能使组合预测的精度降低，因此，组合预测可能取值区间的扩大调整须满足如下条件：

(1) 调整后的单项预测模型预测曲线需与根据实测沉降曲线拟合得到的单项预测模型分析曲线具有最大程度的相似性。因为单项预测模型是根据实测沉降曲线拟合得到的，它在最大程度上已刻画了沉降变化的客观规律，由该单项预测模型预测  $t$  时刻的沉降时，必须遵循这一规律，换句话说讲，调整后的单项预测模型的预测曲线必须与由实测曲线按单项预测模型拟合得到的曲线具有相似性。因此，为了扩大组合预测的可能取值区间，可采用文献[13]的思路，采用“平行修正法”进行分析，亦即定义一个大于或小于 1.0 的常系数，并将其与由实测曲线按单项预测模型拟合得到的预测模型相乘来调整  $t$  时刻的单项预测模型的预测值，以增大或减小单项预测模型的预测值。

(2) 按上述方法调整单项预测模型取值以扩大组合预测的可能取值区间，必须使其控制在可能的范围内。按由实测曲线拟合得到的单项预测模型预测  $t$  时刻预测值的可能取值应该分布在以拟合曲线为中心线的窄条带范围内，这个条带的宽窄只能由实测数据偏离拟合曲线的最大幅度来决定。

(3) 按照上述方法调整单项预测模型在  $t$  时刻的预测值，可能是变大了，也可能是变小了。此时由调整后的各单项预测模型预测取值决定的组合预测的可能取值区间就不一定会变大，如果其变小了，就不利于提高组合预测的精度，因此，为了保证组合预测的可能取值区间变大，就必须控制单项预测模型在  $t$  时刻预测取值的调整方向。一般根据单项预测模型在  $t$  时刻的预测值与沉降实际值的大小关系来确定该单项预测模型预测值的调整方向。如果前者大于后者，则将单项预测模型的预测值向增大

的方向调整，反之，如果前者小于后者，则将单项预测模型的预测值向减小的方向调整。可是，由于此时沉降实际值是未知的，完全按此方法确定单项预测模型预测值调整方向是没有可操作性的，为此，这里的沉降实际值采用由各单项预测模型获得的  $t$  时刻预测值的算术平均值代替。

根据上述分析，为了调整出合理而扩大的组合预测可能取值区间，本文经深入研究，提出了合理的组合预测可能取值区间的调整方法，其调整的基本思路是，首先依据实测数据点偏离，由实测曲线拟合得到的单项预测模型分析计算值的平均幅度，调整单项预测模型在  $t$  时刻的预测值，其可能变大或变小，然后，为保证组合预测的可能取值区间变大，将单项拟合模型在  $t$  时刻的预测值大于沉降实际值的单项预测模型分析值向该值增大的方向调整，得到调整后的单项预测模型在  $t$  时刻的预测值，而将单项拟合模型在  $t$  时刻的预测值小于沉降实际值的单项预测模型分析值，向该值减小的方向调整，得到调整后的单项预测模型在  $t$  时刻的预测值。其具体的组合预测可能取值区间的调整方法与过程如下：

(1) 分析由实测曲线拟合得到的各单项预测模型在各实测点  $t_j (j=1, 2, \dots, N)$  的计算值与该点实测值的相对误差  $c_i''(t_j)$ ，即

$$c_i''(t_j) = \frac{\hat{S}_i(t_j) - S_i(t_j)}{S_i(t_j)} \quad (12)$$

式中： $i$  为单项预测模型编号， $i=1, 2, \dots, n$ 。显然，对于不同的单项预测模型和不同的实测值， $c_i''(t_j)$  的取值可能为负，也可能为正。对于第  $i$  种单项预测模型，将  $c_i''(t_j) > 0$  的所有实际观测点对应的  $c_i''(t_j)$  取算术平均值，并设其为  $\alpha_i$ ；将  $c_i''(t_j) < 0$  的所有实际观测点对应的  $c_i''(t_j)$  取算术平均值，并设其为  $\beta_i$ 。

(2) 调整第  $i$  种单项预测模型在  $t$  时刻的预测值。设由实测曲线拟合得到的单项预测模型在  $t$  时刻的预测值为  $\hat{S}_i(t)$ ，而所有各单项预测模型在  $t$  时刻的沉降预测值  $\hat{S}_i(t)$  的算术平均值为  $\bar{S}(t)$ ，如果  $\hat{S}_i(t) > \bar{S}(t)$ ，则将第  $i$  种单项预测模型在  $t$  时刻的预测值调整为

$$\hat{S}_i'(t) = [1 + \alpha_i] \hat{S}_i(t) \quad (13)$$

如果  $\hat{S}_i(t) < \bar{S}(t)$ ，则将第  $i$  种单项预测模型在  $t$  时刻的预测值调整为

$$\hat{S}_i'(t) = [1 + \beta_i] \hat{S}_i(t) \quad (14)$$

上述即为本文提出的组合预测之单项预测模型在  $t$

时刻预测值的调整方法。由此可以看出,按上述方法对单项预测模型的预测值进行调整,调整后的单项预测模型在  $t$  时刻预测值决定的组合预测可能取值区间变大了,因而具有较强的合理性,必将提高组合预测的精度。

至此已解决实测数据新旧程度和组合预测取值区间调整对组合预测效果影响的处理方法问题。于是,将式(10)代入式(1),并将  $\hat{S}'_i(t)$  即式(13)或式(14)代替式(1)中  $\hat{S}_i(t)$ ,即可获得本文考虑实测沉降数据新旧程度和组合预测可能取值区间调整影响的工后沉降组合预测新方法。当然,利用该方法预测工后沉降仍需解决其求解方法问题,下面将介绍相关内容。

### 3 工后沉降预测的求解方法

上述已经介绍了建筑物地基或路基工后沉降预测分析新模型,为了获得  $t$  时刻预测沉降,就必须解决利用上述模型进行分析与求解的方法问题。为此,本文经深入研究,总结出了如下求解方法及分析过程:

(1) 选择合理的单项预测模型。这是工后沉降预测的关键中的关键,几乎决定工后沉降预测的成败,必须依据实测沉降曲线进行综合分析,选择足够多而合理的单项预测分析模型。

(2) 依据实测沉降曲线和所选择的各单项预测模型,采用拟合分析方法,获得各单项预测模型的参数。

(3) 依据所选择各单项预测模型及根据实测沉降曲线拟合得到的相应模型参数,计算各单项预测模型在  $t$  时刻的预测值  $\hat{S}_i(t)$ ,并考虑它对组合预测可能取值区间的影响,对  $\hat{S}_i(t)$  作进一步调整,获得调整后的各单项模型在  $t$  时刻的预测值  $\hat{S}'_i(t)$  即式(13)或式(14)。

(4) 利用式(10)计算考虑实测沉降数据新旧程度影响的各单项预测模型在  $t$  预测时刻的权重  $w_i(t)$ 。

(5) 令  $\hat{S}_2(t) = \hat{S}'_i(t)$ ,并将其与  $w_i(t)$  代入式(1),即可得到工后沉降在  $t$  时刻的预测值  $\hat{S}(t)$ 。

### 4 工程实例分析与验证

上述已建立出考虑实测沉降数据新旧程度和组合预测可能取值区间影响的工后沉降组合预测分析模型及方法,其合理性与可行性必须进行验证,下面将结合工程实例分析介绍相关内容。

本文拟采用两个实际工程工后沉降观测资料

进行分析,其中,工程实例1为杭浦高速公路<sup>[14]</sup> K90+769~K111+419段;工程实例2则为深圳滨海大道<sup>[4, 15]</sup>,两个工程实测沉降数据见表1。为了进行本文沉降预测方法验证分析,将它们的所有沉降观测数据都分为两部分,前一部分实测沉降资料作为预测建模部分所需要的数据资料,剩下部分实测沉降资料作为方法验证部分所需资料。因此,对于工程实例1,前11组实测数据作为预测建模所需沉降资料,故  $N = 11$ ;而对于工程实例2,前16组实测数据作为预测建模所需资料,故  $N = 16$ 。

为了采用本文方法进行沉降预测,首先须确定单项预测模型。通过对两个工程实例沉降曲线变化规律分析,均选定两个单项预测模型,即 Weibull 模型<sup>[16]</sup>和 MMF 模型<sup>[17]</sup>,因此,  $n = 2$ 。Weibull 模型可表示为

$$\hat{S}_1(t) = a_1 - (a_1 - b_1) \exp[-k_1 t^{c_1}] \quad (15)$$

表1 工后沉降实测数据  
Table 1 Measured post-construction settlement

工程实例 1			工程实例 2		
序号	时间 / d	沉降值 / mm	序号	时间 / d	沉降值 / 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
			20	450	840.2
			21	480	842.3

而 MMF 模型可表示为

$$\hat{S}_2(t) = (a_2 b_2 + c_2 t^{d_2}) / (b_2 + t^{d_2}) \quad (16)$$

分别采用两个工程实例沉降的前一部分资料组成的沉降曲线进行拟合可得两个模型的参数,见表2。

上述已获得利用本文方法进行沉降组合预测的所有原始计算参数, 下面开始沉降预测与分析, 具体考虑如下4种分析方案:

(1) 仅考虑实测沉降数据新旧程度的影响, 称为分析方案①。为此, 按本文方法进行分析, 只需使式(13)、(14)中的 $\alpha_i$ 与 $\beta_i$ 恒定取值为0(即 $\alpha_i = 0$ 及 $\beta_i = 0$ ), 即可实现。

(2) 仅考虑组合预测可能取值区间调整的影响,

称为分析方案②。为此, 按上述分析, 只需使式(9)中的 $F(t_j)$ 恒定取值为1(即 $F(t_j) = 1$ ), 即可实现。

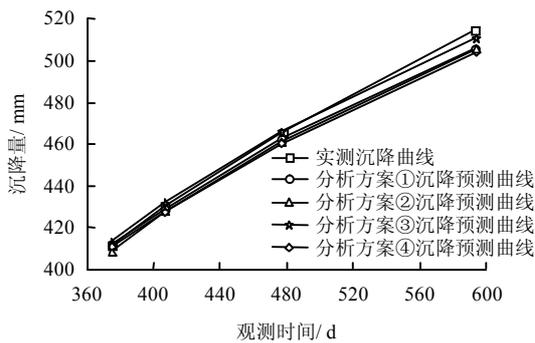
(3) 同时考虑上述两方面的影响, 称为分析方案③。为此, 按本文方法进行分析, 即可实现。

(4) 同时不考虑实测沉降数据新旧程度和组合预测可能取值区间调整的影响, 称为分析方案④。为此, 按本文方法进行分析, 只需同时使 $\alpha_i = 0$ ,  $\beta_i = 0$ 和 $F(t_j) = 1$ , 即可实现。

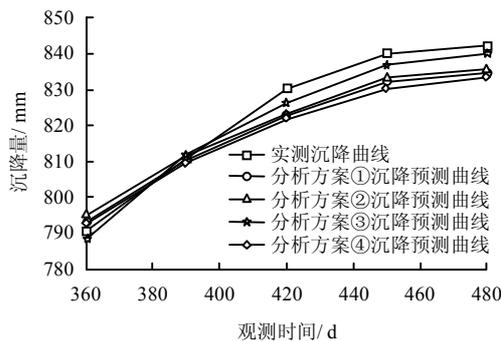
表2 单项预测模型的拟合参数  
Table 2 Fitting parameters of single prediction models

工程实例	Weibull 模型参数				MMF 模型参数			
	$a_1$	$b_1$	$k_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$d_2$
1	616.20	0.00	$5.86 \times 10^{-3}$	0.883 25	0.00	$2.869 \times 10^2$	866.6	0.937 3
2	794.75	46.55	$7.57 \times 10^{-6}$	2.228 00	50.07	$6.291 \times 10^5$	977.0	2.526 4

根据上面4种分析方案, 可得不同分析方案的预测曲线, 并将其与实测曲线进行比较, 如图1所示, 由此可以看出:



(a) 工程实例 1



(b) 工程实例 2

图1 沉降量预测曲线与实测曲线比较

Fig.1 Comparisons between predicted and measured settlements

(1) 仅考虑实测沉降数据新旧程度或组合预测可能取值区间调整对沉降预测效果影响的预测曲线均较传统组合预测的预测曲线更接近于实测曲线, 说明考虑实测沉降数据新旧程度或组合预测可能取

值区间调整对沉降组合预测的影响是必要的。

(2) 同时考虑实测沉降数据新旧程度和组合预测可能取值区间调整对沉降预测效果影响的预测曲线均较考虑单一因素影响的预测曲线更接近实测曲线, 表明同时考虑两种因素对沉降预测影响的预测方法优于仅考虑单一因素对沉降预测影响的预测方法, 说明同时考虑两种因素对沉降预测是必要的。

(3) 本文方法获得的沉降预测曲线较传统组合预测方法获得的沉降预测曲线更接近于实测沉降曲线, 表明了本文方法的合理性与可行性, 可有效提高沉降预测的精度。

## 5 结 论

(1) 通过探讨实测沉降数据新旧程度对预测的影响, 引入新鲜度函数建立了考虑实测数据新旧程度对预测影响的分析模型。

(2) 通过对组合预测可能预测取值变化规律的分析, 引进平行修正的思路, 建立出了有利于提高组合预测精度的组合预测可能取值区间调整方法。

(3) 基于上述两方面研究, 提出了同时考虑实测沉降数据新旧程度和组合预测可能取值区间调整对预测效果影响的改进工后沉降组合预测新方法。

(4) 通过工程实例计算与比较分析, 表明了本文方法的合理性与可行性。

## 参 考 文 献

- [1] 陈远洪, 陈占, 周革. 软基路堤工后沉降的幂多项式预测与分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 112—116.  
CHEN Yuan-hong, CHEN Zhan, ZHOU Ge. Power-polynomial prediction and analysis of post-construction settlement of embankment on soft ground[J]. China Civil

- Engineering Journal**, 2009, 42(5): 112—116.
- [2] 刘宏, 李攀峰, 张倬元. 九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 90—93.  
LIU Hong, LI Pan-feng, ZHANG Zhuo-yuan. Prediction of the post-construction settlement of the high embankment of Jiuzhai-Huanglong airport[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(1): 90—93.
- [3] 吕秀杰. 软土地基工后沉降预测模型的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2091—2095.  
LÜ Xiu-jie. Research on estimation model of post construction settlement for soft ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2091—2095.
- [4] 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 Ming-hua, LIU Yu, CAO Wen-gui. 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.
- [5] 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 Wu-ming, YANG Qi, NIE Ru-song, 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.
- [6] 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 Qing-hai, LI Hui-fang. Application of the changeable weight combination model in building settlement predicting[J]. **Journal of Geomatics Science and Technology**, 2009, 26(2): 118—124.
- [7] 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 Hong-zhong, SHI Bin, LI Xue-hong. Logistic growth model and its applicability for predicting settlement during the whole process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 387—391.
- [8] 余闯, 刘松玉. 路堤沉降预测的 Gompertz 模型应用研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 82—86.  
YU Chuang, LIU Song-yu. A Study on prediction of embankment settlement with the Gompertz model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 82—86.
- [9] BATES J M, GRANGER C W J. The combination of forecasts[J]. **Operations Research Quarterly**, 1969, 20(4): 451—468.
- [10] 殷春武. 组合预测中新旧历史数据对组合权重影响仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(27): 6960—6978.  
YIN Chun-wu. The impact simulation analysis to the combination weight of new and historical data in combination forecasting[J]. **Science Technology and Engineering**, 2012, 12(27): 6960—6978.
- [11] 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 Wen-gui, YIN Peng, HE Min, 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.
- [12] 马永驰, 刘志斌. 基于新鲜度函数的油气产量组合预测方法[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 87—90.  
MA Yong-chi, LIU Zhi-bin. Combination forecasting petroleum production based on function of fresh degree[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2005, 26(1): 87—90.
- [13] 张帆宇, 刘高, 邵宗平, 等. 提升路基沉降预测能力的方法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 1): 88—92.  
ZHANG Fan-yu, LIU Gao, SHAO Zong-ping, et al. Methods of enhancing forecasting capacity of subgrade settlement[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(Supp.1): 88—92.
- [14] 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 Jian-wu, HE Liang-de, LI Lin-qing. Applicability of post-construction settlement prediction model based on velocity-settlement relationship[J]. **Transportation Science & Technology**, 2012, (2): 85—88.
- [15] 上海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: 上海市政工程设计研究院, 1998.  
Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute. The analysis report for soft ground treatment of costal road of Shenzhen municipal engineering[R]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute, 1998.
- [16] 王伟, 卢廷浩. 基于 Weibull 曲线的软基沉降预测模型分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 803—806.  
WANG Wei, LU Ting-hao. Study on prediction model of soft foundation settlement based on Weibull curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 803—806.
- [17] 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 Wei-hong, WANG Jun-bao. Study on application of MMF model to prediction of foundation settlement[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(4): 807—811.