

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3355-06

# 路基沉降预测的三点修正指数曲线法

陈善雄<sup>1</sup>, 王星运<sup>2</sup>, 许锡昌<sup>1</sup>, 余 飞<sup>1</sup>, 秦尚林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 湖北省电力勘测设计院, 武汉 430024)

**摘 要:** 科学、合理地预测路基工后沉降量是高速铁路建设的关键环节。针对武广高速铁路路基沉降量级小、数据相对波动较大的实测数据, 探讨了指数曲线法对无砟轨道路基沉降预测的适用性, 发现指数曲线法不能直接应用于量级小、数据相对波动较大的沉降预测。把三点法的基本思想引入指数曲线模型, 对指数曲线法进行了改进, 提出了路基沉降预测的三点修正指数曲线模型。结合武广高速铁路路基沉降观测数据, 分析了三点修正指数曲线模型的特性。分析表明, 在整个沉降曲线上选取 3 个关键点作为预测样本, 很好地回避了数据波动带来的影响; 沉降曲线上“拐点”以后的沉降规律更符合指数曲线模型, 因此, 应取沉降曲线上“拐点”以后的数据作为样本值, 所取三点应能尽量反映沉降发展的趋势。三点修正指数曲线法预测结果稳定、相关系数高, 具有一定的工程应用价值。

**关 键 词:** 三点修正指数曲线法; 沉降预测; 三点法; 路基; 高速铁路

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

## Three-point modified exponential curve method for predicting subgrade settlements

CHEN Shan-xiong<sup>1</sup>, WANG Xing-yun<sup>2</sup>, XU Xi-chang<sup>1</sup>, YU Fei<sup>1</sup>, QIN Shang-lin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Hubei Provincial Electric Power Survey &amp; Design Institute, Wuhan 430024 China)

**Abstract:** Scientific and rational prediction of post-construction settlement is a key link of high-speed railway construction. Based on the field observation data of subgrade settlement of Wuhan-Guangzhou high-speed railway, aiming at measured settlement data being characteristic of small in magnitude, but large relative fluctuation, the suitability of exponential curve method for predicting settlements of subgrade under ballastless track has been studied synthetically. It was found that exponential curve method can't be directly used for predicting subgrade settlements in high-speed railway. The basic idea of three-point method is introduced into exponential curve model, a three-point modified exponential curve method for predicting subgrade settlements has been proposed. Combining the measured settlement data of subgrade in Wuhan-Guangzhou high-speed railway, the characteristics of three-point modified exponential curve model have been analyzed. The analysis shows that selecting three points as forecast sample on settlement-time curve of subgrade can commendably evade the influence brought by data fluctuation; and the settlement regularity after inflection point on settlement-time curve of subgrade more tally with exponential curve, therefore, the samples must be selected after inflection point on settlement-time curve of subgrade; and three samples should reflect the settlement development tendency as far as possible. The prediction results of three point modified exponential curve method are stable with high correlation coefficient. The new prediction method has engineering value.

**Key words:** three-point modified exponential curve method; settlement prediction; three-point method; subgrade; high-speed railway

## 1 引 言

无砟轨道以其稳定性好、耐久性强、刚度均匀、维修工作量少等综合优势在德国、日本等一些发达国家的高速铁路中得到了广泛的应用, 近年来在我

国高速铁路建设中也得到了大力的推广和应用, 国内新建的铁路客运专线大多采用无砟轨道型式。

相对于有砟轨道, 无砟轨道对结构的刚度、基础的沉降更加敏感。无砟轨道无法进行起道作业, 轨道路基一旦发生沉降, 只能通过调整扣件才能恢

收稿日期: 2010-03-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(No. kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No. SKLZ08032)。

第一作者简介: 陈善雄, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土工程特性与灾害防治技术方面的研究工作。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

复轨道的几何形状,但扣件的调整量非常有限,只能靠严格限制线下工程的沉降量来解决。因此,高速铁路对路基、桥涵、隧道等线下工程工后沉降提出了严格要求,一般要求工后沉降不超过 15 mm<sup>[1]</sup>,因此,有效预测高速铁路线下工程沉降量是无砟轨道铺设的关键<sup>[2-4]</sup>。

国内外已提出不少沉降预测方法<sup>[5-9]</sup>,如双曲线法、指数曲线法、三点法、Asaoka法、泊松曲线法、灰色理论和人工神经网络法等,但这些方法多是针对量值较大的沉降,而关于量级小、相对波动大的沉降预测方法研究甚少。因此,需要结合高速铁路线下工程的结构特征、地质特征以及沉降量级小、数据相对波动大等特点,对沉降预测方法进行系统分析和优化比选,得到稳定性好、精度高、操作方便的预测方法。

本文将结合武广高速铁路大量实测数据,针对工程上广泛应用的指数曲线法进行研究,分析其对武广高速铁路路基沉降预测的适用性,然后基于三点法的基本思想,对指数曲线法进行改进,建立三点修正指数曲线模型,并分析其特性,进而探讨其合理选点。

## 2 高速铁路线下工程沉降特点

为了满足工后沉降小于无砟轨道调整限值 15 mm 的要求,武广高速铁路采用了 CFG 桩、强夯、注浆、旋喷桩等多种措施对原地基进行加固处理,这就决定了线下工程沉降的量级很小。

从武广高速铁路路基沉降观测数据来看,除部分软土路基堆载预压段的地基沉降达到 40~50 mm 以外,大部分路基基底沉降小于 15 mm,桥涵和隧道的沉降小于 5 mm。可见,武广高速铁路线下工程的沉降量级较小。

由于总体沉降量级小,停载后沉降增量更小。由现场技术条件的限制所造成的系统误差与沉降增量几乎处于同一量级上,较小的测量误差都会引起观测数据出现较大的波动。因此,相对于小量级的沉降增量而言,武广高速铁路路基沉降观测数据的波动较大,增加了沉降预测分析评估工作的难度。武广高速铁路的观测数据表明,观测数据出现跳跃(包括跌落和上升)或连续几个沉降观测数据变化趋势与常规相反(沉降加速或发生隆起)的情况较多,反映了沉降量级小的观测数据的相对波动较大的特点。

## 3 指数曲线法的适用性

### 3.1 指数曲线法

如图 1 所示,实测沉降曲线自“拐点” $B(t_0, s_0)$  点开始,近似按指数曲线延伸。

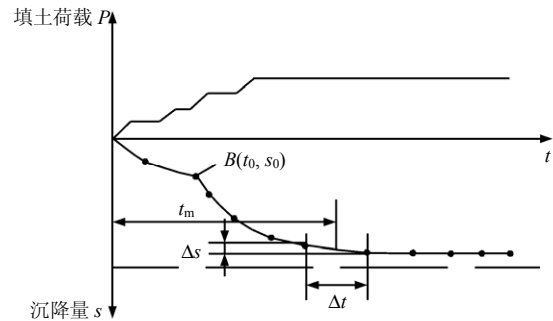


图 1 指数曲线法预测沉降示意图

Fig.1 Sketch of subgrade settlement prediction by exponential curve method

指数曲线法的基本方程为

$$s_t = s_\infty - (s_\infty - s_0)e^{-\frac{t-t_0}{\eta}} \quad (1)$$

式中:  $s_0$  为  $t_0$  时刻的沉降量;  $s_t$  为  $t$  时刻的沉降量;  $s_\infty$  为最终沉降量;  $\eta$  为待定常数。

对式 (1) 进行变换后,可得

$$\ln \frac{\Delta s}{\Delta t} = -\frac{1}{\eta} t_m + \left( \ln \frac{s_\infty - s_0}{\eta} + \frac{t_0}{\eta} \right) \quad (2)$$

式中:  $\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_i - s_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ ;  $t_m$  为与  $\Delta t$  相对应的中点时间。

由实测数据的  $\ln \frac{\Delta s}{\Delta t}$  和  $t_m$  的拟合直线,求得直

线的截距  $\left( \ln \frac{s_\infty - s_0}{\eta} + \frac{t_0}{\eta} \right)$  和斜率  $-\frac{1}{\eta}$ , 联立求得  $\eta$  和最终沉降量  $s_\infty$ , 并可用式 (1) 求任意时刻的沉降量。

对于软土路基等沉降量较大的情形,指数曲线法已经得到较为广泛的应用<sup>[6-7]</sup>,但对于高速铁路沉降量级小、相对波动较大的情形是否适用目前尚需研究。

### 3.2 指数曲线法对高速铁路适用性

选取武广高速铁路路基段断面 DK1683+540.5 沉降板观测数据进行计算分析。该断面地层主要由淤泥质土夹砂、粉质黏土以及全风化花岗岩等组成,采用深层搅拌桩进行地基加固,2007年8月20日开始填土,同年10月8日填土完毕,填土层厚为 3.7 m,沉降观测从 2007 年 8 月 20 日开始,至 2008 年 5 月 29 日为止,共观测 284 d,沉降板测得的总

沉降量为 6.59 mm, 断面 DK1683+540.5 沉降板  $h-t-s$  曲线图见图 2。

高速铁路对沉降观测频次要求较高, 由于沉降观测数据的起伏波动, 不少时段出现  $\Delta s < 0$  的情况, 从而导致  $\ln \frac{\Delta s}{\Delta t}$  无意义, 无法继续计算, 因此, 指数曲线法不能直接运用于沉降量级小、相对波动大的情形。对武广高速铁路大量类似观测数据进行计算分析, 其结论类似。

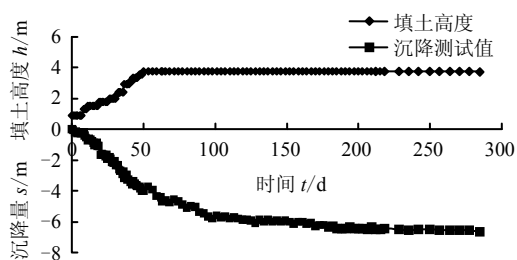


图 2 断面 DK1683+540.5 沉降板的  $h-t-s$  曲线图  
Fig.2  $h-t-s$  curves of settlement plate of section DK1683+540.5

### 4 三点修正指数曲线法

#### 4.1 三点修正指数曲线模型的提出

大量工程实际表明, 地基沉降随时间的发展符合指数曲线趋势, 但指数曲线法对沉降观测数据的单调性的要求过于严格, 不能直接用于沉降量小、数据起伏波动大的高速铁路沉降的预测分析。三点法仅用了恒载期 3 个点的观测数据, 所选观测点的时间间距长, 大体上反映了沉降的发展趋势, 而回避了其数据波动, 反而预测效果较好。因此, 可将三点法的基本思想引入指数曲线法, 对指数曲线法进行改进, 建立一种三点修正指数曲线模型, 以适用于沉降量小、数据起伏波动大的路基沉降预测。

在实测曲线 (见图 3) 上取  $(t_1, s_1)$ ,  $(t_2, s_2)$ ,  $(t_3, s_3)$  三点, 要求  $s_1 < s_2 < s_3$ ,  $s_2 - s_1 > s_3 - s_2$ ,  $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$ , 假定  $t_1 = t_0$ , 然后把这三点代入式 (1) 可得

$$\left. \begin{aligned} s_2 &= s_\infty - (s_\infty - s_1)e^{-\frac{t_2 - t_1}{\eta}} \\ s_3 &= s_\infty - (s_\infty - s_1)e^{-\frac{t_3 - t_1}{\eta}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

进而可以求得

$$s_\infty = \frac{s_2^2 - s_1 s_3}{2s_2 - s_1 - s_3} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\Delta t}{\ln \frac{s_\infty - s_1}{s_\infty - s_2}} \quad (5)$$

将求得的  $s_\infty$  和  $\eta$  的值代入式 (1) 可以求得任意时刻的沉降量。

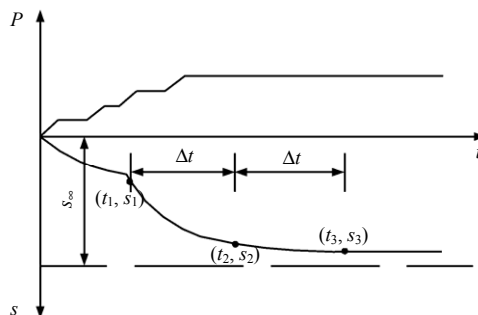


图 3 三点修正指数曲线模型的取点示意图  
Fig.3 Sketch of taking points for three-points modified exponential curve model

《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》<sup>[1]</sup>规定曲线回归的相关系数不得小于 0.92, 因此, 本文也以相关系数是否达到 0.92 作为评价预测方法适用性的主要标准。相关系数采用数理统计中的定义计算:

$$R = \frac{Cov(\bar{X}, \bar{Y})}{\sqrt{D(\bar{X})} \sqrt{D(\bar{Y})}} \quad (6)$$

式中:  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别是两组数列的样本平均值;  $Cov(\bar{X}, \bar{Y})$  为两组数列的协方差;  $D(\bar{X})$ 、 $D(\bar{Y})$  为两组数列的方差。

首先利用观测数据拟合求得沉降曲线的表达式, 然后计算出对应时间点的拟合数据, 再利用 Excel 中的函数 Correl 计算预测值与实测值两组数据的相关系数。

#### 4.2 三点修正指数曲线模型的验证

改进后的指数曲线法究竟能否适用于高速铁路路基沉降量小、相对波动较大的沉降情形, 仍需要具体的实例验证。

以前述路基段断面 DK1683+540.5 沉降板观测数据为例进行计算分析。在沉降曲线上依次选取  $(t_1, s_1)$  为 (50, 3.99)、 $(t_2, s_2)$  为 (167, 6.04)、 $(t_3, s_3)$  为 (284, 6.59) 三点, 代入式 (4) 可得  $s_\infty = 6.79$  mm; 然后, 把  $s_\infty$  代入式 (5) 可得  $\eta = 88.93$ ; 最后, 把  $s_\infty$  和  $\eta$  的值代入式 (1) 可得三点修正指数曲线模型的表达式:

$$s_t = 6.79 - 2.8e^{-\frac{t-50}{88.93}} \quad (7)$$

于是可以求得任意时刻的沉降量，及相关系数、误差平方和，详见表 1，其拟合曲线见图 4。由表、图可知：

- (1) 指数曲线法不能进行预测，而三点修正指数曲线法能够进行预测。
- (2) 三点修正指数曲线法拟合曲线与实测曲线基本吻合，相关系数高。

表 1 指数曲线法与本文方法预测结果对比  
Table 1 Settlement prediction results comparison by exponential curve method and suggested method

预测模型	相关系数 <i>R</i>	误差平方和 /mm <sup>2</sup>	最终沉降量 /mm
指数曲线法			不能预测
本文方法	0.983	93.13	6.79

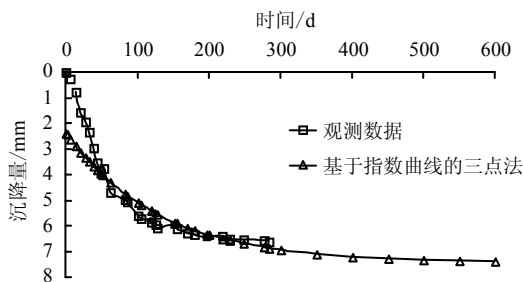


图 4 三点修正指数曲线法的拟合曲线  
Fig.4 Fitting curves of three-point modified exponential curve method

为了进一步验证改进指数曲线法的适用性，另选取武广高速铁路路基段 DK1230+310~DK1238+710 段的 30 个路基断面沉降观测数据，对改进指数曲线法进行验证。限于篇幅，在此仅简要介绍计算结果。30 个路基断面的计算结果表明：改进指数曲线法能够计算 DK1230+310~DK1238+710 段的 30 个路基断面的数据，并且计算所得的相关系数较高，全部大于 0.9，拟合数据与实测数据的误差平方和范围为 0.45~127.31 mm<sup>2</sup>，25 个断面的误差平方和在 30 mm<sup>2</sup> 以内，只有 5 个断面在 36.66~127.31 mm<sup>2</sup> 范围内，这是由于沉降曲线上“拐点”以前的数据与拟合曲线偏差较大所致；改进前指数曲线法不能直接计算这些断面，改进后全部能够计算，而且能够得到很好的预测效果，由此可知，改进指数曲线法具有一定的工程应用价值。

上述验证表明：三点修正指数曲线模型只取沉降观测曲线上的三点作为预测样本，能够很好地回避数据波动带来的影响，但选点会受人为因素的影

响，因此，应注意合理选择时间起点和时间间隔，以获得合理的预测结果。

## 5 三点修正指数曲线法的特性探讨

### 5.1 时间起点对预测结果的影响

当时间间隔相同时（取  $\Delta t = 60$  d），取不同的时间起点  $t_1$ ，运用三点修正指数曲线法进行计算，探讨不同时间起点对预测结果的影响，计算结果详见表 2 及图 5。

表 2 时间起点对预测结果的影响  
Table 2 Comparison of forecasting results by suggested method of different starting points

$t_1$ /d	相关系数	误差平方和/mm <sup>2</sup>	最终沉降量/mm
50	0.994	27.28	6.45
80	0.988	95.24	6.76
110	0.986	118.24	6.73
140	0.995	25.62	6.66
164	0.984	136.03	6.73

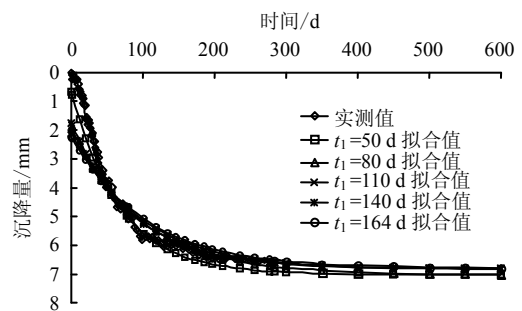


图 5 不同时间起点的拟合曲线比较  
Fig.5 Comparison of forecasting curves of different starting points

由表 2 及图 5 可知：

(1) 时间起点对预测结果的影响不大。从图 5 可以看出，当时间起点变化时，预测曲线的变化很小，最终沉降量的变化范围为 6.45~6.76 mm，沉降差在 1 mm 以内，可以认为，三点修正指数曲线法的预测结果稳定。

(2) 当时间起点变化时，三点修正指数曲线法计算所得相关系数高、误差平方和较小，预测值与实测值较接近，预测效果较好。

### 5.2 时间间隔对预测结果的影响

当时间起点相同时（取  $t_1 = 50$  d），选取不同的时间间隔  $\Delta t$ ，运用三点修正指数曲线法进行计算，计算结果见表 3 和图 6。由表、图可知：

(1) 时间间隔对三点修正指数曲线法预测结果的影响不大。从图 6 可以看出，不同时间间隔的预测曲线的沉降趋势基本一致，最终沉降量变化范围为 6.47~7.46 mm。由此可知，三点修正指数曲

线法沉降预测的结果稳定。

表 3 时间间隔对预测结果的影响  
Table 3 Comparison of forecasting results by suggested method of different time intervals

时间间隔 $\Delta t/d$	相关系数	误差平方和 /mm <sup>2</sup>	最终沉降量 /mm
39	0.988	14.07	6.20
54	0.968	141.24	6.07
69	0.996	17.32	6.64
81	0.990	57.24	6.77
103	0.987	76.46	6.76
117	0.983	93.01	6.79

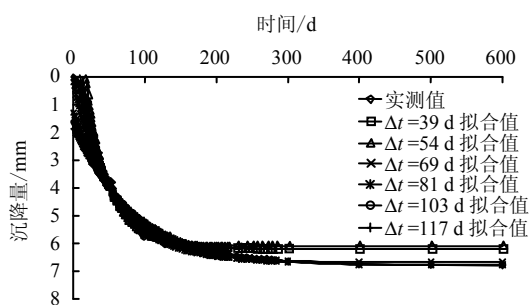


图 6 不同时间间隔的拟合曲线比较  
Fig.6 Comparison of forecasting curves of different time intervals

(2) 时间间隔不同时，三点修正指数曲线法计算的相关系数均较高、误差平方和小；对于  $\Delta t = 54 d$  和  $\Delta t = 117 d$  时，误差平方和稍大的原因是拐点以前的预测曲线与指数曲线模型的预测曲线偏差较大；故而选点时，建议选取拐点以后的数据作为样本值进行预测。一般情况下，沉降曲线上的拐点出现在加载完成前后，所取三点应能够反映沉降发展的趋势，可根据实际情况选取。

### 6 三点修正指数曲线法的取点建议

上述分析表明，三点修正指数曲线法能较好地对象级小、相对波动大的路基沉降进行预测，时间起点和时间间隔对预测结果影响较小，利于工程技术人员把握。但高速铁路路基沉降毕竟相对波动大，选点不同也会在一定程度上影响预测结果，因此，应注意合理选择预测样本。下面予以简单讨论。

#### (1) 时间起点选取

研究表明，路基沉降发展基本经历了发生—发展—稳定—极限 4 个阶段，全过程的沉降量与时间的关系曲线呈“S”型<sup>[10-12]</sup>。刚加载时，土体处于弹性状态，土中孔隙水来不及排除，由于土体的侧向变形使土体发生瞬时剪切变形，在荷载增加的最初阶段，沉降呈线性增加。随着荷载的不断加大和时

间的延长，地基土中孔隙水被逐渐排出，超静孔隙水压力逐步减小，土体逐渐压密产生体积压缩变形，进入弹塑性状态。随着塑性区的不断开展，测点的沉降速率快速增大。因此，在  $s-t$  曲线的初期存在一个拐点（图 1 中 B 点），也就是路基沉降发展的第 1 阶段与第 2 阶段的转折点。指数法仅适合瞬时施工加载情况下的沉降预测，难以反映全过程的沉降量与时间的关系，因此，时间起点应取沉降曲线上拐点以后的数据，而拐点大多出现在填土完成前后，因此，一般可取填土完成的日期作为时间起点，也可结合  $s-t$  曲线的形态进行适当调整。

#### (2) 应尽量避免沉降曲线上的跳跃点

由于现有观测技术水平的限制，加之现场条件的限制，现场观测不可避免地会造成各类误差，而会引起观测数据出现较大的波动。选点时，应尽量避免选取沉降曲线上连续或跳跃幅度较大的观测点，所取三点应尽量能够反映沉降曲线的整体趋势。

在恒载作用下，地基土体沉降量随时间发展逐渐增加，直到达到变形稳定，而沉降速率随着时间发展逐渐减小，直到变形稳定时沉降速率变为 0，这是恒载作用下地基沉降变形的一般规律；由于受外界诸多因素的干扰，观测值不可避免地存在着误差，但沉降曲线上波动均在一定的范围内，即是观测沉降曲线在两条包络线之间<sup>[13]</sup>，见图 7。

为保证沉降预测的合理性，预测样本宜选在上下包络线中间。

工程实践证明，按照上述原则选点时，三点修正指数曲线法能够得到较好的预测结果。

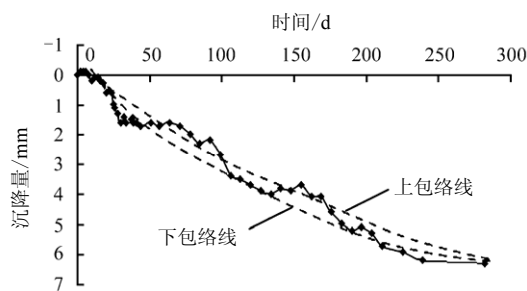


图 7 沉降曲线的包络线示意图  
Fig.7 Sketch of envelope curves for settlement-time curves

## 7 结 论

(1) 运用指数曲线法对高速铁路路基沉降量级小、相对波动较大的情形进行沉降预测时，由于相邻观测点数据的沉降起伏波动而引起  $\Delta s < 0$ ，导致无法进行计算；三点修正指数曲线法只取沉降曲线上

的三点,较好地回避了数据波动带来的影响,能运用于高速铁路的沉降预测。

(2) 当时间起点和时间间隔变化时,三点修正指数曲线法计算相关系数高、最终沉降量相差不大、误差平方和较小,且预测曲线与实测曲线基本吻合。

(3) 运用三点修正指数曲线法进行沉降预测时,时间起点最好选在填土完成日期前后,时间间隔应足够长;所取三点应尽量能够反映沉降曲线的整体趋势,并同时避免选取沉降曲线上连续跳跃或跳跃幅度较大的观测点。

(4) 基于三点修正指数曲线法,利用实测数据对最终沉降量进行分析预测,可以得到精度较高的预测结果,为确定合适的铺轨时间提供了科学依据,并为类似的工程提供了参考。

三点修正指数曲线法仅在武广高速铁路进行了验证,对其他高速铁路的适用性还有待研究。

### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁建设[2006]158号. 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [2] 吴民友. 客运专线无砟轨道铁路工程测量和铺设条件评估关键技术[J]. 中国铁路, 2006, (10): 28—32.  
WU Min-you. PDL ballastless track engineering survey and key technology evaluation of laying condition[J]. **Chinese Railways**, 2006, (10): 28—32.
- [3] 尤昌龙. 无砟轨道工后沉降变形观测、评估的集成理念[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 102(3): 25—28.  
YOU Chang-long. The integration concept on observation and evaluation of ballastless track[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2007, 102(3): 25—28.
- [4] 许兴旺, 李肖伦. 湿陷性黄土地区客运专线路基沉降观测分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 233—236.  
XU Xing-wang, LI Xiao-lun. An observation and analysis of passenger dedicated line subgrade in collapsible loess zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 233—236.
- [5] 王丽琴, 靳宝成, 杨有海, 等. 黄土路基工后沉降预测模型对比研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(1): 43—47.  
WANG Li-qin, JIN Bao-cheng, YANG You-hai, et al. Contrast study on prediction models of settlement of loess-fill subgrade after construction[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2008, 30(1): 43—47.
- [6] 周全能. 软土路基后期沉降推算方法及误差分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 512—516.  
ZHOU Quan-neng. On prediction method and accuracy of post-construction settlement for soft soil embankment in highway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 512—516.
- [7] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1053—1058.  
PAN Lin-you, XIE Xin-yu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1053—1058.
- [8] 王登浩. 武广高速铁路沉降观测与预测技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 3(5): 60—64.  
WANG Deng-hao. Technologies for Wuhan-Guangzhou railway passenger dedicated line settlement observation and prediction of settlement deformation[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2008, 3(5): 60—64.
- [9] 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—2096.  
LÜ Xiu-jie. Research on estimation model of post construction settlement for soft ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2091—2096.
- [10] 宰金珉, 梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 322—325.  
ZAI Jin-in, MEI Guo-xiong. Forecast method of settlement during complete process of construction and operation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 322—325.
- [11] 梅国雄, 宰金珉, 殷宗泽, 等. 沉降时间曲线呈“S”型的证明[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 20—22.  
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, et al. Proof of *s-t* curve appearing “S” shape based on one dimensional consolidation theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 20—22.
- [12] 赵明华, 刘煜, 曹文贵. 软土路基沉降发展规律及其预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(1): 157—161.  
ZHAO Ming-hua, LIU Yu, CAO Wen-gui. The developing regularity and forecasting of settlement in soft clay roadbed[J]. **Journal of Central South University (Nature Science)**, 2004, 35(1): 157—161.
- [13] 王星运. 铁路客运专线路基沉降预测方法研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.