

路基沉降预测的拓展指数曲线模型

秦尚林, 陈善雄, 许锡昌

(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)

摘要: 路基的工后沉降是高速铁路建设中的主要问题之一, 通过实测沉降资料, 采用曲线拟合的方法估算工后沉降是工程中最常用的方法。指数曲线法作为曲线拟合法的一种, 一般不适用沉降量级小、数据相对波动大的高速铁路路基沉降预测。针对常规指数曲线法的缺陷, 对其进行了改进, 提出了拓展指数曲线模型, 介绍其求解过程。结合武广铁路客运专线部分实测资料, 运用双曲线模型和三点法分别进行了对比分析预测, 研究表明: 拓展指数曲线模型的预测结果相关系数高, 误差较小, 与实测数据基本吻合, 可为今后类似条件下的路基沉降预测分析提供参考。

关键词: 武广铁路客运专线; 路基; 拓展指数曲线模型; 指数曲线法; 沉降预测

中图分类号: U238 U213.1+57 文献标识码: A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0028-03

1 概述

随着国民经济的快速发展, 高速铁路在经济发展中将具有非常重要的战略意义, 我国高速铁路建设目前已全面展开, 为保证其运行过程中的快速、舒适和安全, 路基工后沉降量控制是一个关键的环节, 因此, 科学、准确地预估线下结构物沉降变形成为高速铁路路基工程中非常重要的一个课题^[1~3]。

目前沉降预测方法主要有三类, 一是经典的分层总和法, 二是基于 Bjö 固结理论的数值计算方法, 三是通过现场实测沉降资料, 采用曲线拟合的方法进行估算。前两种方法由于假定条件和确定计算指标的试验技术上的问题, 常常导致计算的沉降量与实测值相差甚远, 因此, 第三种方法成为工程中最常用的方法^[4]。指数曲线法作为一种常用的曲线拟合法, 具有简单实用的优点, 但是其前提是假定荷载是一次施加, 这与实际情况不符^[5], 因此, 该模型往往后期沉降拟合较好, 而前期沉降拟合不够稳定, 与实际测量值相差较大^[6]; 另外, 高速铁路路基沉降变形量级较小, 且相对波动较大, 指数曲线法对沉降变形观测数据的单调性有着严格的要求, 局部数据的小幅度起伏变化都可能导致无法进行预测计算, 在武广铁路客运专线沉降评估实践过程中, 也发现大部分沉降观测断面直接

用指数曲线法无法计算^[7]。

本文主要针对常规的指数曲线模型的不足, 进行适当的改进, 以期达到不仅可以预测小变形情形, 而且可以有效改善其初期阶段预测误差大的缺点。

2 指数曲线法的改进

2.1 常规指数曲线法

根据工程实践经验, 从沉降曲线的“拐点”B开始, 路基沉降量与时间的关系规律可近似表示为指数曲线模型(图1)。在不考虑次固结沉降的情况下, 其方程可由式(1)表示

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

式中, s_0 为 t_0 时刻的沉降量; s 为 t 时刻的沉降量; s_{∞} 为最终沉降量; η 为待定常数。

对式(1)求导可得, $\frac{ds}{dt} = \frac{s_{\infty} - s_0}{\eta} e^{-\frac{t-t_0}{\eta}}$, 把沉降速率 $\frac{ds}{dt}$ 用其近似值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 代替可得

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_{\infty} - s_0}{\eta} e^{-\frac{t-t_0}{\eta}} \quad (2)$$

对式(2)取对数得

$$\ln \frac{\Delta s}{\Delta t} = -\frac{1}{\eta} (t - t_0) + \ln \left(\frac{s_{\infty} - s_0}{\eta} \right) \quad (3)$$

取 $t = t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$ (t_m 为与 Δ 相对应的中点时间), $\frac{\Delta s}{\Delta t}$

$= \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$, 这样, 由实测的 $\ln \frac{\Delta s}{\Delta t}$ 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 $-\frac{1}{\eta}$, 联立解得 η 和最终沉降量 s_{∞} , 再代入式(1)即可求得任意时间的沉降量 s 。

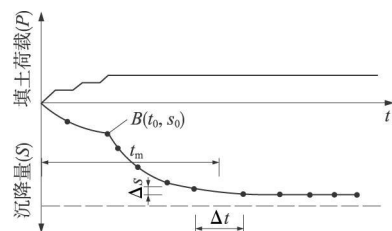


图1 指数曲线法推算沉降示意

2.2 拓展指数曲线模型

前面已经指出, 指数曲线法的主要缺点: 一是填筑

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (SKL08032)。

作者简介: 秦尚林 (1973-) 男, 副研究员。

阶段预测误差大, 二是对小变形情况不适用。为改善其预测性能, 并能将填筑期观测数据纳入分析时间段以内, 为此, 在常规的指数曲线法基础上引入荷载系数的概念, 对模型进行必要的修正, 以期克服上述缺点, 并且适用于沉降量小、数据起伏波动大的高速铁路路基沉降的预测分析。

假定荷载增量、加载速率变化不大的情况下, 沉降变形的增量与荷载增量成正比, 从而引入荷载系数 ξ 将指数曲线模型式 (1) 修正为

$$s_t = s_{\infty} (1 - e^{-\xi t}) \quad (4)$$

式中, $\xi = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$, 其中 σ 为时刻的荷载, kPa; σ_{\max} 为设计最大荷载, kPa。

3 拓展指数曲线模型求解方法

由于受仪器、天气等因素的影响, 观测数据往往会出现少许波动, 特别是小变形情况下尤甚, 这是正常现象, 但沉降反弹会使 $\Delta s < 0$ 导致 $\ln \frac{\Delta s}{\Delta t}$ 无意义, 因此指数曲线法无法进行计算。在武广铁路客运专线沉降评估过程中, 对大量的观测断面计算过程中发现, 三点法由于仅用了 3 个点的观测数据, 所选观测点的时间间距可以尽可能的长, 因而总体上可反映沉降的发展趋势, 有效回避了其数据波动, 预测效果较好。为此, 将三点法的基本思想导入拓展指数曲线模型求解过程中, 具体如下。

在实测数据中取两点: (t_1, s_1) , (t_2, s_2) 要求 $t_1 < t_2$, 然后把这两点代入式 (4) 可得到

$$s_1 = s_{\infty} (1 - e^{-\xi t_1}) \quad (5)$$

$$s_2 = s_{\infty} (1 - e^{-\xi t_2}) \quad (6)$$

式 (5) 除以式 (6) 可得

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{1 - e^{-\xi t_1}}{1 - e^{-\xi t_2}} \quad (7)$$

其中 $u = \frac{\xi}{\eta}$ 。

式 (7) 中只有 u 一个未知数, 通过 Excel 可求得 u 的值, 然后将其代入式 (4) 得

$$s_t = s_{\infty} (1 - e^{-ut}) \quad (8)$$

由式 (8) 可知, s_t 与 $1 - e^{-ut}$ 成线性关系, 由此经过拟合可求得 s_{∞} 。将求得的 u 与 s_{∞} 代入式 (4) 即可求得任意时刻的沉降量。

4 拓展指数曲线模型适用性探讨

改进后的指数曲线法究竟能否达到预期要求, 适用于高速铁路沉降预测, 下面以武广铁路客运专线 DK1 524+140.46 ~ DK1 524+481.57 段路基沉降板

观测断面为例来进行说明。

本段路基全长 341.11 m 位于丘谷区, 地势平坦开阔, 丘坡表层为粉质黏土, 下伏呈砂土状的全风化花岗岩、强风化花岗岩和弱风化花岗岩。采用了换填、搅拌桩、CFG 桩等多种方式进行地基加固处理。填筑于 2007 年 11 月 7 日完成, 填土层厚 2.1 ~ 2.7 m 共设置了 10 个沉降板观测断面, 沉降观测从 2007 年 7 月 10 日开始, 至 2008 年 5 月 24 日为止, 沉降观测 312 d 由沉降板测得的总沉降量在 5.40 ~ 11.30 mm。

限于篇幅, 仅以断面 DK1 524+300 沉降板观测数据为例进行计算分析, 而直接列出其他断面的计算结果。DK1 524+300 断面沉降板的填土高度-时间-沉降 (H-t-s) 曲线见图 2。

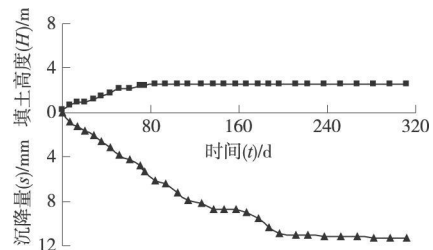


图 2 DK1 524+300 断面沉降板 H-t-s 曲线

在沉降曲线上选取两点 $(t_1, s_1) = (61, 4.30)$, $(t_2, s_2) = (312, 11.30)$, 代入式 (7) 可得

$$\frac{1 - e^{-61u}}{1 - e^{-312u}} = \frac{4.3}{11.3} \quad (9)$$

运用 Excel 可求得 $u = 0.00663$ 将其代入式 (8) 可得

$$s_t = s_{\infty} (1 - e^{-0.00663t})$$

该式通过直线拟合可得 $s_{\infty} = 13.878 \text{ mm}$ 。

将 u 及 s_{∞} 的值代入式 (4) 可得

$$s_t = 13.878 (1 - e^{-0.00663t}) \quad (10)$$

根据式 (10) 新模型预测曲线如图 3 所示。

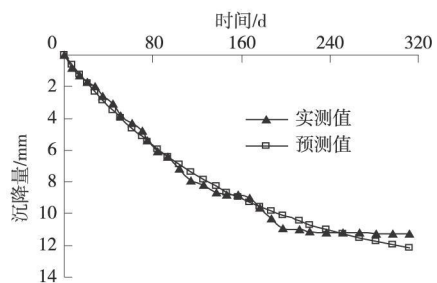


图 3 DK1 524+300 断面实测值与模型预测曲线

拓展指数曲线模型计算结果见表 1。

表 1 拓展指数曲线模型与常规指数曲线预测结果对比

预测模型	相关系数 (R)	误差平方和 /mm ²	最终沉降量 /mm
拓展指数曲线模型	0.995 1	4.18	13.878

常规的指数曲线法不能对该断面进行预测, 而拓

。线路 路基。

展指数曲线模型可进行预测。拓展指数曲线模型拟合曲线与实测曲线吻合程度很好, 相关系数高。

该区段 10 个断面计算结果见表 2

表 2 拓展指数曲线模型沉降预测结果汇总

断面号	当前观测时间 /d	当前观测沉降量 /mm	相关系数 (R)	误差平方和 /mm ²	s_{∞} /mm
DK1 524+175	317	10.00	0.993 6	4.79	12.424
DK1 524+204	284	8.30	0.992 5	4.35	9.384
DK1 524+224	312	9.70	0.996 2	2.92	10.760
DK1 524+250	312	10.30	0.991 8	7.42	12.739
DK1 524+300	312	11.30	0.995 1	4.18	13.878
DK1 524+350	312	11.40	0.996 1	2.62	12.194
DK1 524+370	312	10.30	0.994 5	4.17	11.767
DK1 524+400	312	7.40	0.995 1	1.62	7.937 5
DK1 524+466.11	334	5.50	0.996 7	1.00	5.828
DK1 524+472.75	334	5.40	0.995 9	1.09	5.663 7

从表 2 可以看出: 拓展指数曲线模型能够计算

表 3 实测结果与预测结果汇总

断面号	当前沉降量 /mm	预测最终沉降量 /mm			相关系数			误差平方和 /mm ²		
		拓展指数曲线模型	双曲线法	三点法	拓展指数曲线模型	双曲线法	三点法	拓展指数曲线模型	双曲线法	三点法
DK1 524+175	10.00	12.424	12.693	10.036	0.993 6	0.999 9	0.974 2	4.79	0.18	5.41
DK1 524+204	8.30	9.384	11.517	8.311	0.992 5	0.999 9	0.922 6	4.35	0.06	9.44
DK1 524+224	9.70	10.760	12.600	9.792	0.996 2	0.999 9	0.962 6	2.92	0.18	6.75
DK1 524+250	10.30	12.739	13.063	10.324	0.991 8	0.999 9	0.945 7	7.42	0.10	9.06
DK1 524+300	11.30	13.878	14.351	11.396	0.995 1	0.999 9	0.977 4	4.18	0.29	6.20
DK1 524+350	11.40	12.194	16.337	11.779	0.996 1	0.999 9	0.989 3	2.62	0.12	3.62
DK1 524+370	10.30	11.767	17.070	10.515	0.994 5	0.999 9	0.973 5	4.17	0.10	8.138
DK1 524+400	7.40	7.937 5	9.318	7.455	0.995 1	0.999 9	0.988 8	1.62	0.09	1.438
DK1 524+466.11	5.50	5.828	7.152	5.827	0.996 7	0.999 9	0.998 3	1.00	0.03	0.086
DK1 524+472.75	5.40	5.663 7	6.791	5.750	0.995 9	0.999 9	0.995 7	1.09	0.04	0.205

由表 3 可以看出, 3 种方法对该段 10 个观测断面的预测结果相差不是很大, 都可以较好地进行沉降预测分析。相比较而言, 拓展指数曲线模型与双曲线模型拟合的相关系数非常接近, 均优于三点法的相关系数; 而拓展指数曲线模型计算的误差平方和大部分介于其他两种方法之间, 优于三点法而比双曲线法略大; 用拓展指数曲线模型计算的最终沉降量也基本上介于双曲线法和三点法之间, 比三点法大而比双曲线法小, 可见拓展指数曲线模型拟合精度是比较高的, 能够得到很好的预测效果。

6 结论

(1) 高速铁路路基沉降量级小、相对波动大, 实际测量过程中往往会出现 $\Delta \leq 0$ 的情况, 这是很正常的, 但运用传统的指数曲线法进行沉降预测时, 却无法进行计算。拓展指数曲线模型则对此无过多要求, 而且具有参数少、计算过程简便、精确度高的优点。

(2) 通过对比相关系数、最终沉降量以及误差平方和可知, 改进的指数曲线法预测结果的精度要略高于三点法的预测精度, 预测值与实测值基本吻合。

DK1 524+140.46~DK1 524+481.57 段的 10 个路基断面的数据, 并且计算所得的相关系数高, 均在 0.99 以上, 拟合数据与实测数据的误差平方和范围为 5.828~13.878 mm², 吻合程度很好; 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。

5 拓展指数曲线模型与传统方法对比

为进一步考察改进指数曲线方法的预测效果, 针对上述 10 个断面, 采用双曲线法、三点法计算结果与之进行对比。双曲线法、三点法的具体分析方法参见文献 [5]。

运用双曲线法及三点法对 DK1 524+140.46~DK1 524+481.57 区段 10 个沉降板观测断面工后沉降进行了拟合分析与预测, 分析结果汇总见表 3。

(3) 通过拓展指数曲线模型, 利用实测数据对路基沉降进行预测分析, 可以得到工后沉降量、最终沉降量及某一时刻沉降量等结果, 为合理确定高速铁路铺轨时间提供依据。

(4) 拓展指数曲线模型可运用于武广铁路客运专线及相似条件下的路基沉降评估, 是否适用于其他范围, 还需得到更多的验证。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 甘友文, 王志亮, 郑华. 地基沉降预测中的双曲线模型修正 [J]. 水文地质工程地质, 2004(1): 98-100
- [3] 王丽琴, 靳宝成, 杨有海. 黄土路堤工后沉降预测新模型与方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2370-2376
- [4] 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
- [5] 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].
- [6] 康洪, 彭振斌. 软土地基沉降预测模型分析与研究 [J]. 矿冶工程, 2009, 29(2): 9-12
- [7] 王星云. 铁路客运专线路基沉降预测方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (中国科学院武汉岩土力学研究所), 2009.