

建筑技术

双曲线法在高速公路软基沉降预测中的应用

钟国坤 赵小芹

(华南理工大学土木与交通学院,广州 510640)

摘要 路基沉降预测与控制是软土地基建设中的一个主要问题。由于各种理论计算方法本身的局限性,以及工程地质条件的复杂性,地基沉降完全依靠理论计算是不可能或不精确的。因此,实际工程中经常采用根据软基沉降监测结果来预测工后沉降的方法。结合广东省某高速公路软基现场监测结果,介绍双曲线法原理,由实测数据得到拟合曲线,并进行预测分析。研究结果表明:双曲线法具有较高的预测精度,可以为软基路段的养护提供决策依据。

关键词 高速公路 软基 双曲线法 监测 沉降预测

中图法分类号 TU433; **文献标志码** A

对运营期软基段的沉降监测是验证设计与指导施工的重要手段,监测资料不仅可以用来控制软土地基的稳定性,更重要的是进行沉降预测,推算路基最终沉降量。通过对软基沉降的监测和预测,能够判断路基变形是否达到稳定状态,从而掌握沉降发展规律,为路面的养护和维修提供依据,因此,路基沉降监测与预测是软土地基建设中的一个主要问题^[1]。自从太沙基创立一维固结理论^[2]以来,对于地基沉降预测的研究取得了长足的发展。从简单的半经验公式图表法到应用计算机的数值分析方法,可谓种类繁多。尽管地基沉降问题已形成多种计算方法,但根据其应用原理,大致可分为两大类:一类是基于土体固结压缩原理的纯理论计算方法;另一类是根据实测资料推算沉降量与时间关系的预测方法,包括确定性预测方法和不确定性预测方法^[3]。确定性预测方法包括双曲线法^[4]、对数曲线法、指数曲线法^[5]、星野法、Asaoka 法、幂函数多项式法^[6]等。不确定性预测方法包括灰色预测法及人工神经网络法。其中双曲线法是广东省内工程常用的推算方法,本文结合广东某高速公路软基沉降实测数据,介绍双曲线法在沉降预测中的应用。

2010年6月30日收到

第一作者简介:钟国坤,广东人,硕士,研究方向:结构地基处理。

1 工程概况

广东省某高速公路全长 48 km,设计采用封闭四车道,行车速度 120 km/h。区域地貌主要为冲积平原及平原微丘,沿线不连续分布有大量软土,软土路段约 22 km,约占全线的 46%,其特点是既具有典型的珠江三角洲地区软土高含水量、高压缩性、低强度的共性,又具有有机质含量高的特性。在空间分布上,软土具有不连续性、厚度差异大等特点。软土层的这些特点决定了该高速公路软基路段的次固结沉降相对较大,部分路段沉降差异明显,其直接体现为部分路段的工后沉降较大。

1.1 工程地质条件

该高速公路软基段的软土由深灰或黑色流塑状淤泥或泥炭土组成,多含大量植物根茎等腐殖质,除了具有常规软土高含水量、高压缩性、低强度、低渗透性的共性外,与西部沿海高速公路和其它珠江三角洲高速公路软基相比,还具有高有机质的特性。

该高速公路软土在空间分布具有明显的不均匀性,其厚度变化范围在 2~16 m 之间,呈深灰或黑色,流塑,有些为泥炭土,部分含有大量植物根茎和根须,十字板强度为 5 kPa 左右,比贯入阻力平均值为 0.39 MPa。软土具有以下几个特性:

(1) 软土厚度总体不大,空间分布差异大

该高速公路对沉降其主导影响层次的淤泥层,其厚度主要集中在5 m和10 m左右,最深处也仅为19 m;另一方面,受地形地貌的影响,软土分布差异较大,特别是在山前谷地,软土纵横分布均有较大差异。

(2) 含水量高

平均含水量68%,最高达195%,含水量高的路段主要分布在山前谷地的软基段上。另外X衍射实验还发现有极强亲水性,吸水后体积会发生膨胀的蒙脱石存在,且含量高达14%~19.8%。不仅造成软基的含水量大,而且呈现出高塑性、高压缩性、低强度、低透水性。

(3) 孔隙比大

通过对软土微结构特性的初步研究和分析发现,该高速公路软土的孔隙体积占整体体积最高达5/6,实测最大孔隙比也达4.9,平均1.9,是典型的空架结构土。在荷重作用下,软土排水固结产生压缩时,由空架式结构向片架式结构转变的过程尤为明显。

(4) 有机质含量多

与广珠东线、西部沿海高速公路等其它公路软基相比,该高速公路软土既具有珠江三角洲软土“三高二低”的共性,又具有有机质含量高的特性。有机质含量是其他高速公路的2~3倍。有机质土不仅带来了较低的强度,还具有流变性和蠕变性的特点,极易产生大量的次固结沉降,并持续很长一段时间才能完成。

以上这些特征决定了该高速公路软基沉降及工后沉降的特殊性,如大部分路堤总沉降量在1 m左右,但次固结沉降时间长,占总沉降的比例高,工后沉降大。

1.2 软基处理方式

全线软基处理方式设计主要采用了排水固结法,具体处理方式详见表2,以袋装砂井或少量塑料排水板作为竖向排水体、砂垫层为横向排水体,利用“薄层轮加法”进行路堤填筑,部分路段辅以土工织物或反压护道等加固措施,全部软基路段均进行超载预压,预压时间不少于6个月,结构物两端超载

1.5 m 其他路段超载0.8 m。

全线软基处理施工于1999年9月份基本完成,路堤超载土方填筑大部分于2000年6月份完工,局部路段于2000年3~4月份完成。路堤经过一段时间的预压,软基沉降显示出总沉降量小、沉降差异大、沉降速率衰减缓慢。对连续3个月沉降速率 ≤ 5 mm或连续3个月 $5 \text{ mm} < \text{月沉降速率} \leq 10 \text{ mm}$ 且工后沉降 $\leq 10 \text{ cm}$ 的路段尽快卸载;沉降速率 $> 10 \text{ mm}$ 且工后沉降 $\geq 20 \text{ cm}$ 的路段进行二次超载,并加强观测,直到满足要求后再进行卸载;对于卸载时仍达不到要求的部分路段,则采用铺设过渡性路面、抛高路面等方法进行补救。

1.3 软基沉降监测

为了进一步了解运营期沉降发展规律,为判断路基变形是否达到稳定,为路面的养护维修提供依据,从2009年6月开始至2010年5月对该高速公路的软基段进行运营期路基沉降的监测。在软基深厚的典型路段埋设沉降观测点,用精密钢尺和LEICA NA2精密水准仪,并配GPM3测微器,采用二等水准测量精度进行观测。标称精度为^[7]: $\pm 0.3 \text{ mm/km}$,数字读至0.01 mm,基辅差为3.015 5 m。观测时严格保证前后视距差 $\leq \pm 1.0 \text{ m}$,前后视距差累积值 $\leq \pm 3.0 \text{ m}$,达到高差闭合差 $\leq \pm 4/\sqrt{L}$ 或 \sqrt{n} mm的要求。监测频率为30 d左右一次。典型断面K18+400的沉降监测数据如表1所示。

表1 K18+400监测点沉降实测数据

监测日期	累积天数	本期沉降量/mm	累积沉降量/mm
2009:06:24	0	0	0
2009:07:29	35	2.35	2.35
2009:08:26	63	0.80	3.15
2009:09:19	87	1.20	4.35
2009:10:24	122	2.26	6.61
2009:11:21	150	0.87	7.48
2009:12:26	185	0.72	8.20
2010:01:17	207	1.03	9.23
2010:03:24	273	0.83	10.06
2010:04:18	298	0.06	10.12
2010:05:14	324	0.05	10.17

2 双曲线法简介及预测结果

2.1 双曲线法原理

双曲线法是广东省内工程常用的推算方法。该法近似认为地基的沉降变形量与时间成双曲线函数的关系。这是一种纯经验的曲线配合方法,利用实测沉降量 - 时间曲线,确定某拐点 t_0 (起点,通常取恒载下的某个时刻),将实测 $S_t - t$ 曲线的起点放在 t_0 处,则沉降曲线将接近于双曲线,可近似地用双曲线方程表示,即:

$$S(t) = S_0 + \frac{t - t_0}{a + b(t - t_0)} \quad (1)$$

式(1)中: $S(t)$ —推算的 t 时刻的沉降值; t_0 —拐点处的时间或时间零点; S_0 —对应于 t_0 时刻的沉降量; a 、 b —曲线方程待拟合的参数。

下面给出已测实测数据组 $\{(t_0, S_0), (t_1, S_1), \dots, (t_n, S_n)\}$ 用最小二乘法求解方程待定参数:

令 $S'(t) = S(t) - S_0$, $t' = t - t_0$, $S'_\infty = S_\infty - S_0$, 则式(1)转化为:

$$S'(t) = \frac{t'}{a + bt'}.$$

再对上式取倒数有 $\frac{1}{S'(t)} = \frac{a}{t'} + b$ 。

再令 $y = \frac{1}{S'(t)}$, $x = \frac{1}{t'}$, 则上式就转化为一个线性方程:

$$y = ax + b.$$

建立计算值 y 于变换后的实测值之间的离差平方和

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2.$$

对上式分别对 a , b 求偏导:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)x_i \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b). \end{cases}$$

$$\text{又 } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$L_{xx} = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2,$$

$$L_{xy} = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i.$$

得到 a , b 的估计值:

$$\begin{cases} a = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} \\ b = \bar{y} - a\bar{x} \end{cases} \quad (2)$$

求得 a , b 后,代回式(1)即可求得任意时刻的沉降量 $S(t)$,当 $t \rightarrow \infty$ 时,可以得到: $S_\infty = S_0 + \frac{1}{b}$ 。

$\frac{t - t_0}{S(t) - S_0}$ 和 $(t - t_0)$ 的关系图如图 1 所示。由图 1 可知,该直线的于纵轴的交点和斜率即分别是 a 和 b 。

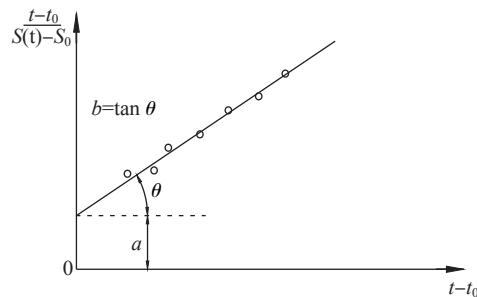


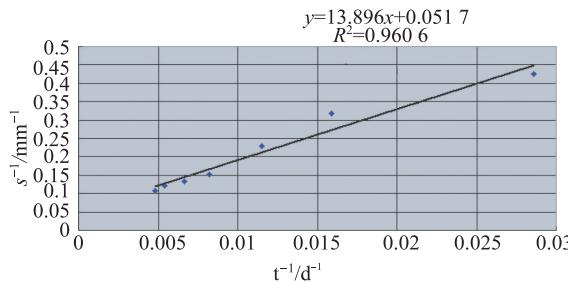
图 1 $\frac{t - t_0}{S(t) - S_0} \sim (t - t_0)$ 关系图

在选取点时,需把一些明显不合理的点剔除,可算出相应的相关系数 R 和剩余标准差 σ 。对于比如 $S_\infty < S_i$ 或者 $S_\infty <$ 最后观测值 S_i 的、或者 S_∞ 大得很不合理的,先予以删除,再将剩下的按相关系数 R 和剩余标准偏差 σ 的大小进行分析,一般取相关系数比较大的和标准偏差小的作为最后去定 a , b 的标准。

2.2 双曲线拟合沉降曲线

对表 1 中从 2009 年 6 月 24 日至 2010 年 1 月 17 日的数据进行双曲线拟合,由于沉降取的是相对第一次测量的沉降量,因此视 2009 年 6 月 24 日观测的沉降值为初始值,即: $t_0 = 0$, $S(0) = 0$, 则双曲线的表达式 $S(t) = S_0 + \frac{t - t_0}{a + b(t - t_0)}$ 可以简化为 $S(t) =$

$\frac{t}{a+bt}$,然后再对自变量和因变量进行转换,令 $y = s(t)^{-1}$, $x = t^{-1}$,则双曲线的表达式 $S(t) = \frac{t}{a+bt}$ 可转换为 $y = ax + b$,将非线性(双曲线)拟合转换为线性(直线)的拟合。采用最小二乘法拟合出 x 与 y 的关系曲线如图 2 所示。

图 2 $s^{-1} \sim t^{-1}$ 关系曲线图

采用双曲线法拟合的关系曲线为:

$$y = 13.896x + 0.0517$$

其拟合参数 a 为 13.896, b 为 0.0517, 其相关系数 R^2 为 0.9606, 沉降表达式为:

$$S(t) = \frac{t}{13.896 + 0.0517t}$$

2.3 预测分析

用双曲线法对 2009 年 6 月 24 日至 2010 年 1 月 17 日的数据进行数理统计,并拟合反求所需参数,得到如图 2 所示的 $s^{-1} \sim t^{-1}$ 关系曲线图,根据该曲线,预测接下来三期的沉降并与实测结果进行对比分析,分析结果见表 2 所示,实测沉降值与预测沉降值见图 3。

表 2 K18+400 断面沉降预测分析表

累积天数/d	实测沉降/mm	预测值/mm	差值/mm
35	2.35	2.23	-0.12
63	3.15	3.67	0.52
87	4.35	4.73	0.38
122	6.61	6.04	-0.57
150	7.48	6.93	-0.55
185	8.20	7.89	-0.31
207	9.23	8.42	-0.81
273	10.06	9.75	-0.31
298	10.12	10.17	0.05
324	10.17	10.57	0.40

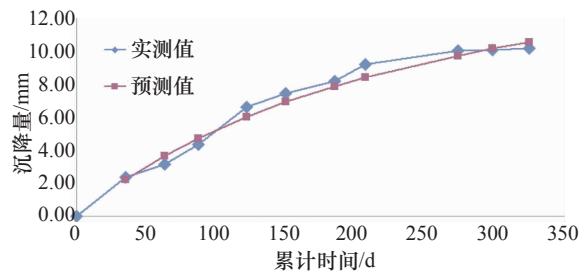


图 3 K18+400 监测点实测沉降值与拟合 - 预测值曲线

由表 2 及图 3 可知,K18+400 断面沉降实测值与双曲线模型预测值比较基本吻合,最大差值仅为 0.81 mm,能很好地满足工程精度的要求。

3 结论

(1) 双曲线法能根据观测样本确定待定参数,从而更准确地预测和反映软土地基的工后沉降规律,对实测数据没有过多的要求,参数计算过程简便。

(2) 通过实测值与各预测模型对比分析,双曲线模型预测值与实测值吻合得很好,从而能够更好地满足工程精度要求。

(3) 双曲线法可较为方便地根据已有现场实测数据预测得到任意时刻工后沉降,从而判断路基变形是否达到稳定,为运营期路面的维修与养护提供决策依据。

参 考 文 献

- 柳治国,陈善雄,徐海滨. 沉降预测的非等步长灰色时变参数模型. 岩土力学,2004;25(12):1919—1922
- JTG D30—2004 公路路基设计规范. 北京:人民交通出版社,2005
- 唐利民,陈志良,贺春宁. 高填路基沉降灰色预测模型的新方法与应用. 中外公路,2010;30(1):60—65
- 钱玉林,丁毅. 路基沉降预测及其工程应用. 扬州大学学报(自然科学版),2001;4(2):75—78
- 龚晓南. 高等土力学. 杭州:浙江大学出版社,1996
- 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. 土木工程学报,2009;42(5):112—116
- 王劲松,陈正阳,廖建春. 运营期高速公路软土路基沉降观测与预测. 路基工程,2008;(2):24—25

Application of Hyperbolic Method in Soft Soil Ground Settlement Prediction for Expressway

ZHONG Guo-kun, ZHAO Xiao-qin

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

[Abstract] Settlement prediction and control is one of the main issues for expressway construction in soft soil areas. Though there are various theoretical calculations methods, as their own limitations and the complexity of engineering geological conditions, ground settlement can't be precised if fully rely on theoretical calculations, so in practical engineering frequently use the method that according the monitoring results to predict the post-construction settlement. With the field monitored settlement at a expressway in Guangdong, introduced the principle of the hyperbolic method, obtained the fitting curve from in-situ data, and the predictions are analyzed. The results show that the hyperbolic method has high precision, and can be provide advise for making decision on expressway's maintenance.

[Key words] expressway soft soil ground hyperbolic method monitor settlement prediction

~~~~~  
(上接第 6803 页)

## Association of Attacks Factors Based on Fuzzy Information Fusion

SUN Ning, FU Xiang-dong, ZHANG Sheng-cai

(Modern Educational Technology Center, Gansu Institute of Political Science and Law, Lanzhou 730070, P. R. China)

**[Abstract]** Facing the current increasingly serious network scrutiny situation, model of networked system security situation evaluation and definition of attack factors is presented based on the problems. Then attack frequency, attack difficult degree and attack compromise degree are quantized by dynamic method. Because the attack information are uncertain, incomplete, intangible, changeful, a method of fuzzy information fusion-ased on Mamdani fuzzy reasoning method is put forward, applied on association of attack factors. Through using Matlab7.0 tools, the simulations about this system are done based on the methods. The experiment proves the method feasible and rational.

**[Key words]** network security situation evaluation    fuzzy information fusion    attack factors    association