

高速公路路基沉降预测方法综述及应用

徐丛山

(江苏交通工程投资咨询有限公司 南京 210096)

摘 要 本文综述了根据实测资料预测高速公路路基沉降量的方法,并结合宁启高速公路通海段的实测沉降资料,采用泊松曲线模型和灰色模型进行了预测,并与实测结果进行了对比和分析,得出一些结论和建议。

关键词 沉降量 预测 泊松曲线 灰色模型

在软土地基上修建高速公路,如何控制路基土的固结度、路基的沉降速率和工后沉降量是影响建成后路面质量、行车舒适度、使用寿命等的关键性问题。而如何通过实测沉降资料来准确计算和预测最终沉降量是我们现在亟待解决的问题。近几十年来,国内外学者提出了很多计算沉降量与时间关系的方法。第一类为根据固结理论,结合各种土的本构模型,计算地基沉降量的各种有限元法;第二类为根据实测资料推算沉降量与时间关系的预测法。本文重点介绍了几种采用实测资料推算沉降量的预测方法。

1 指数型函数预测地基后期沉降(三点法)

从实测曲线上,取荷载恒定后的三点,使得三点的时间间隔相等,即 $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$,三点对应的沉降量分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 ,则由固结计算的通式可得到:

$$U_t = 1 - Ae^{-\beta t} \quad (1)$$

式中, U_t —— t 时刻地基平均固结度;

A 、 β ——由不同地基条件确定的参数。

通过 3 点的固结度的具体表达式,求解出:

$$S_\infty = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)} \quad (2)$$

$$\text{和 } \beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \quad (3)$$

由于上述方法中采用了实测的 3 点时间和对应沉降值,该方法又称为 3 点法。3 点的选择以沉降曲线趋于稳定的阶段,且 3 点间隔尽可能大最为有利,此时所推算的沉降值最准确。

2 泊松曲线预测地基沉降

泊松曲线亦称 Logistic 曲线或皮尔曲线。在时间序列预测中,泊松曲线的表达式为:

$$s_t = \frac{s}{1 + ae^{-bt}} \text{ 或 } \frac{s - s_t}{s_t} = ae^{-bt} \quad (4)$$

公式中, s_t 为 t 时刻的沉降量,为最终沉降量, a , b 为待定系数。

从实测曲线上选取 3 点 (t_1, s_1) , (t_2, s_2) , (t_3, s_3) , 并使 $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$ 。将上述三组数据分别代入式(4)可得 s , a , b 的值。

$$\frac{\ln \frac{s_2 - (s - s_1)}{s_1(s - s_2)}}{(t_2 - t_1)} = b_1, \quad \frac{\ln \frac{s_3(s - s_2)}{s_2(s - s_3)}}{(t_3 - t_2)} = b_2, \\ \frac{(s_1 + s_3)s_2^2 - 2s_1s_2s_3}{s_2^2 - s_1s_3} = s \quad (5)$$

取 $b = (b_1 + b_2)/2$, 并取 $a = (a_1 + a_2 + a_3)/3$; 最后将 s , a , b 的值代入式(4)建立拟合方程。

3 Asaoka 法预测地基沉降

该方法根据 Mikass 一维固结方程推导出沉降预测的一阶微分方程:

$$s + c \frac{ds}{dt} = d \quad (6)$$

式中: s 为沉降量。

由于方程只取一阶,沉降中不宜包括固结沉降,当数据取自加荷结束以后,瞬时沉降已完成,所以沉降 s 中可以包括瞬时沉降, t 为时间; c , d 为常数。将式(6)写成差分格式,时间步长取单位 1,得:

$$s_{j-1} = \beta_0 + \beta_1 s_j \quad (7)$$

$$\text{式中: } s_j \text{ 为 } s(t_j) \quad \beta_0 = -\frac{d}{c} \quad \beta_1 = \frac{c+1}{c} \quad (8)$$

式(7)是线性直线方程,可用图解法确定方程系数,也可用最小二乘法来确定。设有 $N+1$ 个等时间间隔的沉降观测数据 $(s_0, s_1, s_2, \dots, s_N)$, 可以组成 N 组数据 $(s_j, s_{j-1}) (j=1, 2, 3, \dots, N)$, N 组数据在直角坐标系中可用直线拟合, 该直线的系数根据最小二乘法来确定, 则式(7)的方程系数按下式计算:

$$\beta_0 = \frac{\sum s_j^2 \sum s_{j-1} - \sum s_j \sum s_j s_{j-1}}{N \sum s_j^2 - (\sum s_j)^2},$$

$$\beta_1 = \frac{N \sum s_j s_{j-1} - \sum s_j \sum s_{j-1}}{N \sum s_j^2 - (\sum s_j)^2}$$

式中, “ \sum ”表示“ $\sum_{j=1}^N$ ”

4 灰色模型 GM(1,1) 预测沉降

灰色系统理论的关联度分析方法, 是根据因素发展态势的相似或相异程度来衡量因素间关联程度的方法。由于关联度分析法是按发展趋势作分析, 因此对样本量的多少没有太多要求, 也不需要典型的分布规律, 且不致出现关联度的量化结果与定性分析不一致的情况。灰色模型理论的一阶微分方程 GM(1,1) 表示如下:

$$\frac{ds}{dt} + as = b \quad (9)$$

设有 $N+1$ 个等时间间隔的沉降增量观测数据 $(\Delta s_0, \Delta s_1, \dots, \Delta s_N)$, 作一次累加后得各时刻得总沉降量 (s_0, s_1, \dots, s_N) , 根据灰色建模理论, 方程系数按下式确定:

$$[a, b]^T = [B^T B]^{-1} \times B^T \times y_N \quad (10)$$

$$\text{公式中, } B = \begin{bmatrix} -s_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -s_N & 1 \end{bmatrix}, y_N = [\Delta s_0, \Delta s_1, \dots, \Delta s_N]^T$$

GM(1,1) 模型预测精度如何可采用后验差法进行检验, 其检验的指标: 后验差比值 $C = \alpha_2 / \alpha_1$, 和小误差概率 $P = \{|\varepsilon^{(0)}(i) - \varepsilon| < 0.6475\alpha_1\}$, 其中 α_1 , α_2 分别为原始数据序列和残差 (实测值 s_i , 预测值 s_i') 序列的标准差。

$$\alpha_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^N [s_i - s'']^2 / (N-1)},$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\varepsilon^{(0)}(i) - \varepsilon'']^2 / (N-1)} \quad (11)$$

公式中, $s'' = (\sum_{i=1}^N s_i) / N$, $\varepsilon^{(0)}(i) = s_i - s'_i$,

$$\varepsilon'' = (\sum_{i=1}^N \varepsilon^{(0)}(i)) / N$$

检验标准表 (如表 1):

表 1 检验判定标准

模型精度等级	P	C
I级(好)	$0.95 \leq P$	$C \leq 0.35$
II级(合格)	$0.80 \leq P < 0.95$	$0.35 < C \leq 0.5$
III级(勉强)	$0.70 \leq P < 0.80$	$0.5 < C \leq 0.65$
IV(不合格)	$P < 0.70$	$0.65 < C$

除了上述的几种方法外, 还有修正双曲线法、曲线拟合法、星野法、沉降速率法、一维固结反演与预测法、遗传算法等等, 这些方法在本文中不再细述。

5 工程实例

5.1 工程概况

江苏省省道主干线南京至启东高速公路——南通 (九华) (海门段位于长江入海口, 东临黄海, 南依长江, 为辽阔的长江三角洲平原的一部分。通海段全线长 63.98km, 路基宽度 28m。沿线结构物的数量和工程量较大, 对地基变形稳定的要求相对较高。

南通 ~ 海门段项目区的软弱地基的区域特征主要表现为, 影响高速公路建设的土层为全新统和上更新统, 分上、下两层分布; 地基土层构造上, 以透水性良好细粉砂层和透水性较差亚粘土层交互为其基本特征; 粘性土层中, 夹砂或互砂现象普遍, 透水性相对一般粘性土层更好一些; 软 (弱) 土层分上、下两层, 上层软土厚度薄、区域小, 多呈透镜体状零星分部; 下层软 (弱) 土的埋深大, 一般有夹砂或互砂、粉粒含量高的组成特征, 且有物理性指标偏低, 而强度指标偏高的基本性质特点。由此可见, 该段软土与一般软土地基特征有显著区别。这就需要对沉降、最终沉降量进行预测。

5.2 泊松曲线法和灰色模型 GM(1,1) 法预测

用两种方法预测各桩号的最终沉降 (表 2、3), 并根据 ZIK143+576.5 和 MRK137+534 的实测数据, 做了预压期 120d 内的实测曲线、灰色模型和泊松曲线推算的预测曲线 (图 1)。

6 结束语

通过图 1 中实测曲线和预测曲线的对比和分析, 可以得出如下结论:

(1) 非常短的时间内, 路基沉降就趋于稳定, 说明该地段具有非常好的排水通道, 这就为加快固结提供了条件, 同时也减少了地基处理措施, 降低了工

表2 灰色模型参数和计算结果

埋设桩号	地基处理方法	预压高度 /m	实测最终 沉降量 S/mm	预测最终 沉降量 S/mm	相对误差 %	灰色模型参数	
						a	b
ZIK143+576.5	排水板+砂垫层	6.88	285.0	299.5	5.0877	0.038415	11.50621
ZIK145+491.5	排水板+砂垫层	6.45	224.0	235.3	5.0446	0.043422	10.21765
CK1+204.5	排水板+砂垫层	4.70	116.0	119.2	2.7586	0.045977	5.479058
FK0+284.5	排水板+砂垫层	6.72	109.0	112.6	3.3027	0.052839	5.947330
FK0+333.5	排水板+砂垫层	6.82	107.0	110.4	3.1775	0.057186	6.314790
MRK137+534	碎石桩	6.14	191.0	208.7	9.2670	0.033317	6.951647

表3 泊松曲线模型参数和计算结果

埋设桩号	地基处理方法	预压高度 /m	实测最终 沉降量 S/mm	预测最终 沉降量 S/mm	相对误差 %	泊松曲线参数	
						a	b
ZIK143+576.5	排水板+砂垫层	6.88	285.0	283	0.701754	7.52	0.0995
ZIK145+491.5	排水板+砂垫层	6.45	224.0	224.27	0.120536	8.32	0.11
CK1+204.5	排水板+砂垫层	4.70	116.0	116.13	0.112096	1.9563	0.066196
FK0+284.5	排水板+砂垫层	6.72	109.0	108.28	0.66055	2.65	1.001
FK0+333.5	排水板+砂垫层	6.82	107.0	108.41	1.317757	1.37757	0.08145
MRK137+534	碎石桩	6.14	191.0	190.26	0.387435	18.4709	0.12663

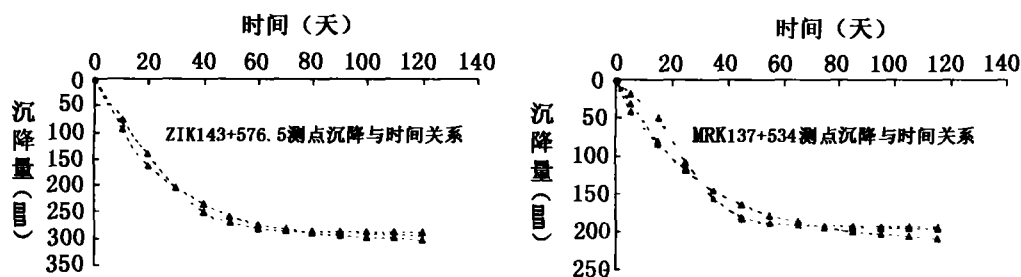


图1 塑料排水板+砂垫层软基沉降

程费用。

(2) 从图中可以看到两种预测方法的曲线与实测曲线非常接近, 说明了这两种方法在高填路基预测沉降上具有很好的实用性。

参考文献

- [1] 宰金珉, 梅国雄. 成长曲线在地基沉降预测中的应用. 南京建筑工程学院学报, 2002, 2
- [2] 冯文凯, 刘汉超. 修正双曲线法在路基沉降变形初期阶

段的应用探讨. 地质灾害与环境保护, 2001, 3

- [3] 李建国, 李新生, 李军伟, 赵金辉. 预测地基沉降量的新方法. 土工基础, 2002, 3
- [4] 张仪萍, 俞亚南, 张土乔, 高文明. 沉降预测中的灰色模型理论与Asaoka法. 系统工程理论与实践, 2002, 9
- [5] 张仪萍, 张土乔, 龚晓南. 沉降的灰色预测. 工业建筑, 1999, 4
- [6] 李素艳. 高填路堤沉降的神经网络动态预测. 桂林工学院学报, 2002, 3