

文章编号:1007-2993(2014)03-0121-05

双曲线法、指数曲线法和 Asaoka 法在汕揭高速公路的对比分析

李 磊¹ 杨 涛² 陈尚荣¹

(1. 上海市地矿工程勘察有限公司, 上海 200072; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

【摘 要】 预测路基沉降是软土地区高速公路建设需要解决的重要问题。结合汕揭高速公路路基沉降实测数据, 对双曲线法、指数曲线法、Asaoka 法等常见的沉降预测方法在软土地区的精准度进行研究。结果表明, 双曲线法及 Asaoka 法拟合曲线与实测数据较为吻合, 适用于汕揭高速公路的沉降预测。同时分别对影响双曲线预测法和 Asaoka 预测法准确度的主要因素进行了分析, 明确如何提高其预测精准度。

【关键词】 软基地基; 沉降预测; 双曲线法; 指数曲线法; Asaoka 法

【中图分类号】 TU 311.4

【文献标识码】 B

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2014.03.004

Comparative Analysis of Hyperbola Model Exponential Curve Model and Asaoka Model on Shan-jie Expressway

Li Lei¹ Yang Tao² Chen Shangrong¹

(1. Shanghai Geological and Mineral Engineering Investigation Co., Ltd, Shanghai 200072, China; 2. College of Urban Construction and Environment Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】 Estimation of the settlement in subgrade is one of the most critical problems in expressway. By the settlement measured data of shan-jie expressway, the paper research the common method in the estimation of settlement, such as hyperbola model exponential curve model and Asaoka model. The results show that hyperbola model and Asaoka model are more consistent with the measured data, applicable estimation of the settlement in shan-jie expressway. The main factors which affect the accuracy of hyperbola model and Asaoka model were analyzed. How to improve its predictive accuracy was clear.

【Key words】 soft ground; estimation of the settlement; heperbola model; exponential curve model; Asaoka model

0 引 言

软土具有强度低、渗透性差、高压缩性、含水量高等特性, 不同地区软土特性不一样, 进而导致了同样的地基沉降预测方法得到的准确度有所不同。现如今地基沉降的预测机制分为数学分析法和地基参数法两大类。其中数学分析法是指通过对实测数据进行数学方法的处理, 分析出沉降变化规律, 从而对沉降进行预测, 如 A. Asaoka 的 Asaoka 法^[1]。地基参数法则是根据土的固结理论和本构关系建立模型, 通过实测数据反演分析出地基参数, 从而对沉降进行预测, 如双曲线法和指数曲线法^[2]。

本文将利用汕揭高速公路现场实测数据对双曲线法、指数曲线法、Asaoka 法的预测精度进行分析, 同时对影响双曲线预测法和 Asaoka 预测法的主要因素进行研究。

1 沉降理论常用的方法

1.1 双曲线法

双曲线法假定路基进入预压期后沉降按双曲线规律变化, 其沉降拟合方程如下^[3-4]:

$$s_t = s_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (1)$$

式中: s_t 为 t 时刻的沉降量; t_0 为拟合曲线的时间零点; s_0 为 t_0 时刻的实测沉降量; α, β 为待定系数。

为确定待定系数 α 和 β , 将式(1)改写成下面的形式:

$$\frac{t - t_0}{s_t - s_0} = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (2)$$

根据实测沉降点绘 $(t - t_0)/(s_t - s_0) - (t - t_0)$ 关系线从而得到关系直线, 由该直线的截距和斜率分别可确定参数 α 和 β 。将求得的 α, β 代入式(1), 则

可以预测今后任意时刻沉降量 s_t 及最终沉降量 s_∞ ，按下式计算：

$$s_\infty = s_0 + 1/\beta \quad (3)$$

1.2 指数曲线法

指数曲线法假定路基进入预压期后沉降发展按指数曲线规律变化，沉降拟合方程如下^[5]：

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0)[1 - Ae^{-B(t-t_0)}] \quad (4)$$

式中： A 、 B 、 s_∞ 为待定系数，可根据实测沉降数据由指数曲线拟合确定。

1.3 Asaoka 法

Asaoka 法认为以体积应变表示的一维固结方程可近似地用一个级数形式的微分方程来表示^[6-8]：

$$s + \alpha_1 \frac{ds}{dt} + \alpha_2 \frac{d^2s}{dt^2} + \dots + \alpha_n \frac{d^ns}{dt^n} + \Lambda = b \quad (5)$$

式中： α_1 、 α_2 、 α_3 、 Λ 和 b 是取决于固结系数和土层边界条件的常数。上式可用一阶近似的递推关系式表示：

$$s_j = \beta_0 + \beta_1 s_{j-1} \quad (6)$$

式中： β_0 、 β_1 为待定参数。选择适当的 Δt ，将沉降曲线划分成相等时间段，可得到沉降量 s 与时间 t 的关系(见图 1)。

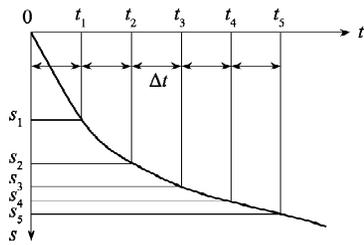


图 1 沉降曲线划分为相等的时间段

将实测沉降 s_{ij} 和 $s_{t(j-1)}$ 点绘在 s_j 和 s_{j-1} 坐标中得到一直线见图 2。

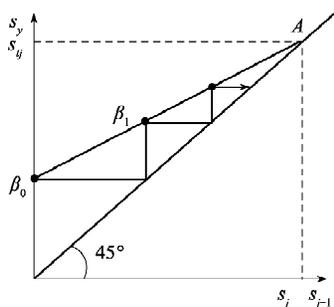


图 2 Asaoka 法示意图

由直线的截距和斜率可确定 β_0 和 β_1 ，最终沉降量则为：

$$s_\infty = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (7)$$

2 最终沉降量推算对比分析及验证

汕揭高速公路汕头至揭阳段线路全长约 55.24 km，揭阳段(K26+700~K54+446)于 2004 年 10 月开工，一期工程通车路段自 8 标云路立交 K33+800 至终点。该线路软土及可液化砂土分布广泛，软基处理长度约 8.6 km。软土路基主要分布在 7 标(K26+700~K32+400)、8 标(K32+400~K35+600)，基本呈连续分布，厚度较大，具有埋藏浅、强度低、压缩性高的特点。7 标、8 标地处榕江冲积平原为主，地形平坦，地面高程一般在 1.5~2.5 m，软土最大厚度约 12 m，天然含水量 55.9%~101.2%，孔隙比 1.5~2.9，工程地质条件较差。

下面将以 K27+030 断面为例进行沉降分析，K27+030 断面属于 7 标段，土性参数见表 1。

表 1 K27+030 土性参数

土层名称	含水量 /%	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	压缩系数 / MPa^{-1}
淤泥	94.6	1.5	2.467	26	14.7	3.13
粉质粘土	15.9	2.25	0.375	14	8.1	0.17
淤泥夹砂	33.4	1.94	0.836	10	5.5	0.54
中粗砂	37.3	1.88	0.957	21	5.8	0.56
粉质粘土	35.3	1.89	0.906	12	7.7	0.64

K27+030 断面实测荷载-沉降-时间曲线如图 3 所示，累计观测时间为 671 d，在第 265 d 停载，停载时填土高度为 568.5 cm。

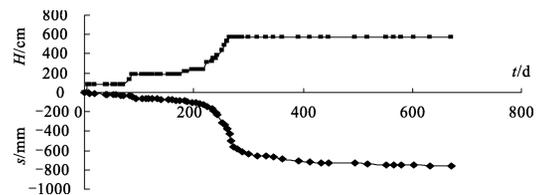


图 3 K27+030 断面沉降时程曲线

1) 双曲线拟合法

由实测数据可得 K27+030 断面预压 $(t-t_0)/(s_t-s_0)-(t-t_0)$ 关系曲线见图 4，其中 $t_0=265$ d， $s_0=426$ mm，按双曲线拟合相关系数达 0.9973，可见该断面沉降值按双曲线变化。

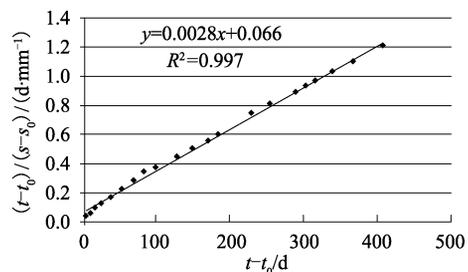


图 4 K27+030 断面双曲线法拟合

图 4 所示曲线由双曲线法拟合而成,所选预压期为 406 d,由式(1)与式(2)可得拟合方程为 $s_t = 426 + \frac{t - 265}{0.066 + 0.0029(t - 265)}$,最终沉降量由式(3)可得 $s_\infty = 770$ mm。

2)指数曲线法

根据实测数据,由式(4)经 Matlab 软件计算,可得 $s_\infty = 743$ mm, $A = 256 / (743 - 426)$, $B = -0.02047$,指数方程如下:

$$s_t = 426 + (743 - 426) \left(1 + \frac{-256}{743 - 426} \times e^{0.02047(t-t_0)} \right)$$

,可得最终沉降量 $s_\infty = 743$ mm。

3)Asaoka 法

根据实测数据由 Asaoka 法拟合而成曲线如图 5 所示,其中所选预压时间为 406 d, $\Delta t = 50$ d。

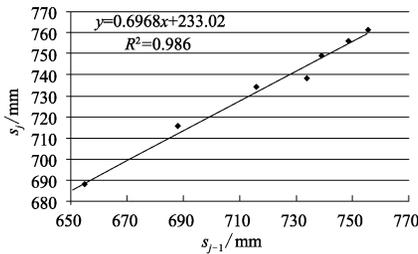


图 5 K27+030 断面 $s_j - s_{j-1}$ 关系曲线

根据式(6)可得拟合方程为 $s_j = 0.696s_{j-1} + 233.0$,最终沉降可由式(7)得出 $s_\infty = 766$ mm。

4)不同方法比较

通过上述三种预测法得到不同拟合方程,进而得到不同沉降曲线。三种所得沉降曲线与实测沉降曲线对比见图 6,同时得到最终沉降量见表 2。

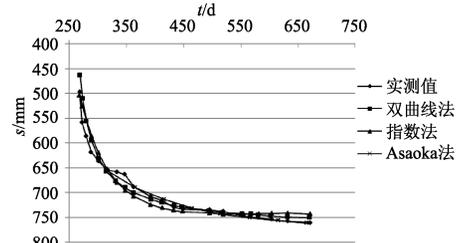


图 6 不同预测沉降线与实测值的比较

表 2 不同方法最终沉降量比较

K27+030 断面	最终沉降量 s_∞ /mm		
	双曲线法	指数法	Asaoka 法
	770	743	766

5)不同断面分析

应用上述方法另外分别对 K27+240、K27+380、K27+560、K31+120、K31+300、K31+400 断面进行分析,不同预测方法所得沉降曲线见图 7,最终沉降量见表 3。

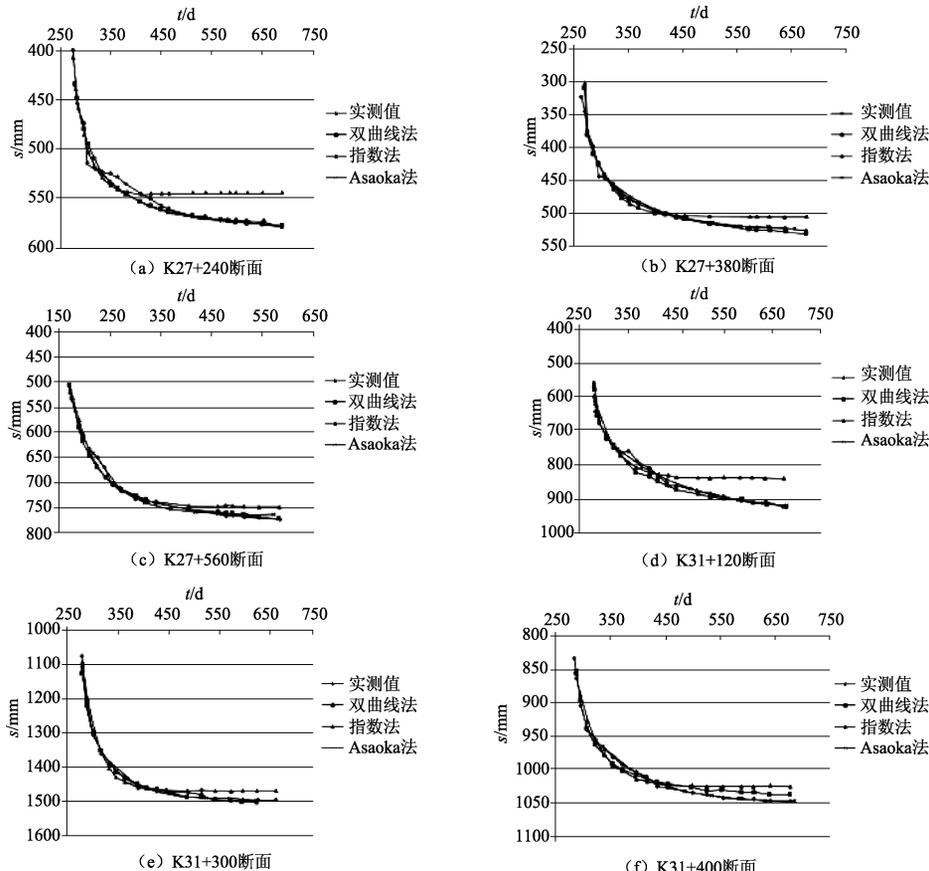


图 7 各断面不同预测沉降线与实测值的比较

表3 断面不同方法最终沉降量比较

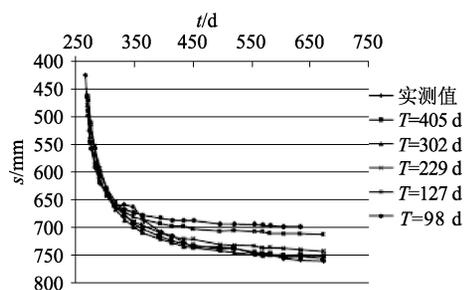
预测断面	最终沉降量 s_{∞}/mm		
	双曲线法	指数法	Asaoka 法
K27+240 断面	593	547	580
K27+380 断面	554	506	527
K27+560 断面	796	748	765
K31+120 断面	984	848	948
K31+300 断面	153	147	150
K31+400 断面	105	103	105

通过分析沉降曲线及最终沉降量规律可得:

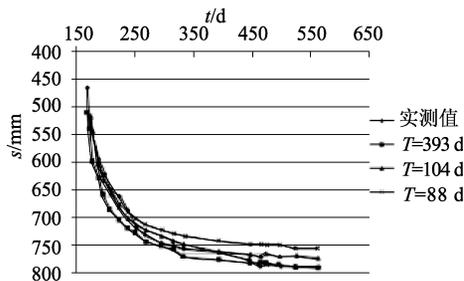
1)从最终沉降量和沉降过程图来看,双曲线和 Asaoka 法所得到的最终沉降量较为接近,指数法所得到的最终沉降量较小。

2)从沉降曲线的发展过程来看,双曲线和 Asaoka 法预测的沉降曲线几乎和实测值重合;指数法的沉降曲线前期与实测值较为接近,后期却有明显误差,趋于稳定的时间比较早。

3)从实测数据来看,由于实测值在后期沉降已经趋于缓慢,这与双曲线预测的沉降发展趋势是吻合的,所以此路段的沉降采用双曲线法进行预测较为合适。



(a) K27+030断面



(b) K27+560断面

图8 不同断面不同预压期的预测沉降曲线

2) Δt 对 Asaoka 法预测精度的影响

为确定不同时间段 Δt 对 Asaoka 法预测精度的影响,现取不同断面(K27+030 及 K27+560)实测沉降数据进行分析。其中表4及表5分别为 K27+030 断面与 K27+560 断面取不同 Δt 所得最终沉降预测值。

表4 K27+030 断面不同 Δt 下最终沉降预测值

$\Delta t/d$	β_0	β_1	相关系数 R	最终总沉降量 s_{∞}/mm
30	166.6	0.78	0.98	765.98
40	210.70	0.73	0.97	768.42
50	231.23	0.70	0.99	770.51
60	337.69	0.56	0.94	760.22
70	531.37	0.29	0.92	746.31

3 双曲线法及 Asaoka 法的进一步讨论

1) 预压期对双曲线法预测精度的影响

双曲线法作为一种重要的沉降预测方法,通过对多个断面的数据分析,已证明了其在汕揭高速中预测的精准度。沉降预测是否准确,主要取决于两个因素:一是映射函数,它应能准确反映地基土沉降发展规律;另一个就是原象空间的范围,它包括实测沉降样本数量和相应的沉降时间。本文主要讨论第二因素,即原象空间的范围。假定沉降发展符合映射函数规律,并保证适当的沉降观测频率,则沉降的正确预测取决于实测沉降时间。

如图8为 K27+030 断面和 K27+560 不同实测沉降时间 $T(T=t-t_0)$ 下预测沉降过程线与实测沉降过程线的比较。对比可得,实测沉降时间对预测精度具有重大影响。若实测沉降时间过短,尚未达到实际沉降过程线的反弯点,则无论拟合时选取多少实测沉降样本,预测所得最终沉降都会远离实际值。实测沉降时间越长,原象空间范围越大,富含未来沉降发展规律信息的实测沉降样本则越多,所得预测误差越小。

表5 K27+560 断面不同 Δt 下最终沉降预测值

$\Delta t/d$	β_0	β_1	相关系数 R	最终总沉降量 s_{∞}/mm
30	246.99	0.68	0.96	768.24
40	320.59	0.58	0.98	768.80
50	445.18	0.42	0.98	764.91
60	485.91	0.36	0.98	764.01
70	523.35	0.31	0.95	761.01

由表可以发现,当 $\Delta t=30\sim 50$ d 时相关系数 R 趋近于 1,最终沉降量较为接近。当 $\Delta t=70$ d 时,最终沉降量较小。现分别作 $\Delta t=30$ d 及 $\Delta t=70$ d 时 K27+030 断面与 K27+560 断面下 Asaoka 法拟合直线。

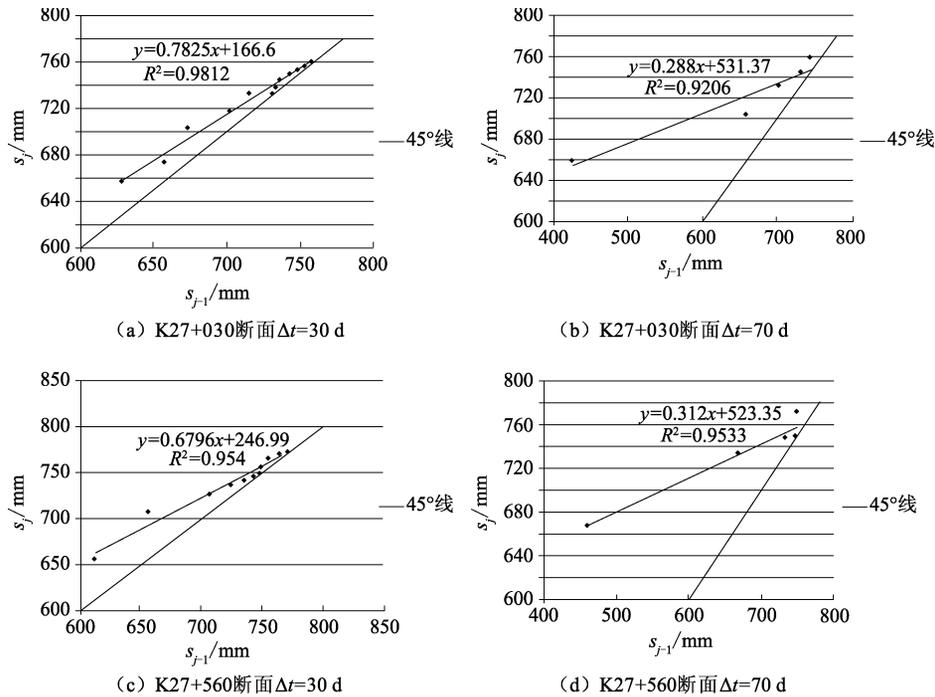


图9 Asaoka 法拟合直线

由图可见, $\Delta t=30$ d 时所得数据点 (s_{j-1}, s_j) 分布较为均匀, 且拟合直线拟合度好; $\Delta t=70$ d 时所得数据点 (s_{j-1}, s_j) 波动性或跳跃性较大, 所拟合直线相关性低。因此可得, $\Delta t=30$ d 时, 预测沉降值较为精确。

4 结 语

本文通过三种沉降预测曲线的比较得出汕揭高速公路的沉降预测采用双曲线法和 Asaoka 法较为合适。从典型断面研究来看, 采用双曲线法进行沉降预测, 选择相同的时间起点, 观测时间越长, 可以利用的资料越多, 相关系数就越高, 预测就越准确。 Δt 对 Asaoka 法预测精度没有实质的影响, 但间隔时间过长会造成拟合点偏少, 推算结果会出现较大的偏差。所以在实际运用中 $\Delta t=30\sim 50$ d 较为合适。

参 考 文 献

[1] 杨 涛, 李国维. 公路软基超载预压卸荷时间确定的沉降速率法研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11):

1942-1946.

- [2] 安宝平. 102 国道长春至德惠段路基沉降预测模型库研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [3] 欧明辉. 基于曲线拟合法的软基沉降预测研究[J]. 路基工程, 2009(2): 109-110.
- [4] 李国维, 杨 涛, 宋江波. 公路软基沉降双曲线预测法的进一步探讨[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 18-20.
- [5] 罗 浩, 马建林, 周洪燕. 沉降曲线预测方法—— t 变形过程指数法[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 374-376.
- [6] 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.
- [7] 刘吉福, 陈新华. 应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 233-235.
- [8] 刘吉福, 莫海鸿, 魏金霞. 对工后沉降法确定卸载时机的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 3519-3522.

收稿日期: 2014-02-18