

文章编号:1674-599X(2011)02-0001-05

指数曲线法在软土地基沉降预测中的优化与应用

高燕希, 莫志兵, 魏金胜

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 从“确保沉降预测精度、简化沉降观测工作”的角度出发, 根据软土地基固结沉降特性, 分析了指数曲线法现行计算方法的应用特点, 对指数曲线法的计算过程进行了优化. 以湖南省岳阳市城陵矶(松阳湖)进港道路 K2+850 断面为例, 分析了沉降预测结果的精度变化规律. 研究结果表明, 正确应用指数曲线法, 不仅可使软土地的沉降预测精度高, 还能大大降低沉降观测频率, 节省沉降观测投入, 具有积极的应用价值.

关键词: 指数曲线法; 软土地基; 沉降预测

中图分类号: U416.12 文献标识码: A

Optimization and application of exponential curve method in soft soil foundation settlement prediction

GAO Yan-xi, MO Zhi-bing, WEI Jin-sheng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: According to the consolidation settlement characteristics of soft soil foundation, the application characteristics of current calculation methods about exponential curve method were analyzed to ensure the settlement prediction accuracy and simplify the settlement observation work. A method to optimize the calculation process of exponential curve was introduced. In the settlement prediction of the K2+850 cross-section of the road to Cheng Lingji Port (Song Yong Lake) at Yueyang City in Hunan province, the change rule of the settlement prediction accuracy was analyzed. The results indicate that using exponential curve method correctly can not only obtain a reliable settlement prediction results, but also greatly reduce the frequency and investment of settlement observation, which has positive application value.

Key words: exponential curve method; soft soil foundation; settlement prediction

软土地基具有沉降量大、沉降持续时间长的特点. 在公路路堤施工过程中, 软土地基强度随排水固结发展而缓慢增加, 过快的填土堆载速度极易导致路基失稳破坏, 如: 路基开裂、边坡滑塌^[1-2]等. 而过慢的填土堆载速度, 虽可确保路基稳定, 但由于工期过长, 从而增加了工程投入的经济和管理风险, 如: 工料机单价上涨、施工机械设备闲

置等, 同时也延迟了工程运营时间, 降低了工程效益. 因此, 研究软土地基的沉降规律, 改进施工阶段地基沉降预测方法, 对于制定合理的填土计划, 确保公路工程质量, 提高施工管理水平, 降低施工成本, 都具有重要意义.

目前, 地基沉降计算方法有理论计算法和基于实测数据的沉降预测方法两类. 应用理论计算

收稿日期: 2011-03-14

作者简介: 高燕希(1957-), 女, 长沙理工大学教授.

方法(如:太沙基固结理论^[3]),在施工前,通过压缩等试验获取相关物理力学参数,对地基沉降进行分析.由于土体具有灵敏性,不同扰动情况下土的力学参数往往不一致^[4],从而使理论计算结果与实际情况存在一定偏差.基于实测数据的预测方法有曲线拟合法^[5-6]、灰色理论法^[7-8]及神经网络法^[9]等,该类方法直接分析施工过程中沉降数据的变化趋势,进而推算出未来时刻地基的沉降发展情况;与理论计算方法相比,该类方法更为直接和优越,但分析过程需较多预压阶段的沉降观测数据,增加了沉降观测工作,耗时相对较长,因而制约了该类方法的应用与推广.

本研究拟从“确保沉降预测精度、简化沉降观测工作”的角度出发,对指数曲线法的计算方法进行优化,结合工程实例,对其应用特点进行分析,以探讨其应用规律.

1 指数曲线法的现行计算方法

1.1 模型建立

根据太沙基的固结理论,超孔隙水压力随时间变化过程呈指数曲线关系.地基固结度 U 的计算式^[10]为:

$$U = 1 - \alpha e^{-\beta t}. \quad (1)$$

式中: α, β 均为参数,可根据地基固结排水条件求得,取 $\alpha = 1$.

同时, t 时刻的固结度还可以表示为:

$$U = \frac{S_t - S_d}{S_\infty - S_d}. \quad (2)$$

式中: S_t 为地基在荷载作用下 t 时的沉降量; S_d 为地基在荷载作用下的瞬时沉降量; S_∞ 为地基在荷载作用下的最终沉降量.

结合式(1)和(2),经变换,得沉降与时间的关系表达式为:

$$S_t = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta t}] + S_d. \quad (3)$$

式(3)为荷载是一次瞬间加足的理想化模型.然而,在实际工程中,为确保路堤稳定,荷载总是分级逐渐施加,因此计算过程中需修正时间 t .地基沉降与时间的关系曲线如图1所示,实线和虚线分别表示分级加载和等效一次加载条件下地基沉降增长情况,两曲线自 t'_0 时刻起重合.

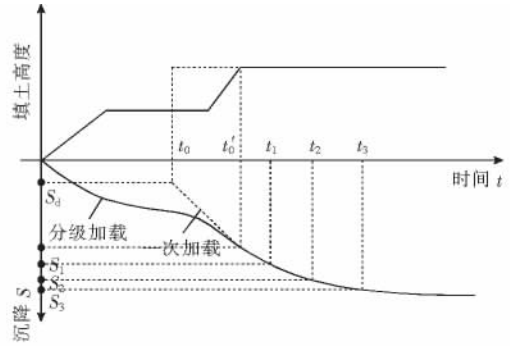


图1 沉降与时间的关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between the settlement and time

从图1可以看出,分级加载软土路堤进入预压期后,地基固结度可用等效一次加载条件下的固结度代替,其计算式为:

$$U = 1 - \alpha e^{-\beta(t-t'_0)}. \quad (4)$$

式中: t'_0 为等效一次加载预压时间起点; t 为所求固结度的时间, $t > t'_0$ (t'_0 为分级加载达到预压高度的时间).

联立式(2),(4),经变换,得分级加载条件下沉降与时间指数关系曲线模型为:

$$S_t = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta(t-t'_0)}] + S_d. \quad (5)$$

1.2 模型求解

指数曲线法又称三点法,即选取3点实测沉降数据(S, t),代入指数曲线模型,解方程组,确定各待定参数,从而得到沉降预测表达式.

现行指数曲线模型求解方法有两种:①选取时距相等的3点,代入式(5)求解待定参数^[11].由于该方法在数据选取时,引入了等时距的附加条件,使求解过程得以简化,计算结果明确唯一,但同时等时距的附加条件亦限制了其应用.首先,沉降数据必须是等时距,尽管可通过各种插值方法使观测数据转换为等时距数据,但沉降预测结果本身具有一定的推测性,若采用转换数据,由于转换数据与实际情况的误差总是存在,会进一步影响预测结果精度,这就要求沉降观测工作必须严格守时.其次,根据软土的固结沉降特性,式(5)中各待定参数均有一定的取值范围,往往仅通过一组数据求解参数,其结果难以满足预定要求,需进行多次组合计算,经对比分析后,方可确定最佳的预测表达式,而等时距恰恰制约了这种组合,不利于沉降预测结果精度的提高.②在沉降一时间曲

线上,任意选取 3 点,代入式(5)求解待定参数.该方法无沉降观测时间限制,简化了沉降观测工作,但求解参数过程较前种方法复杂,其结果也并不唯一,需根据软土特性进行判别.目前,杜海伟^[12]等人对该方法进行了研究,但并未指出各参数之间的内在联系,其求解过程亦欠严密,没有得出有效结果.

2 优化的指数曲线法

针对两种模型求解方法的优、缺点,将指数曲线法的参数求解过程优化为:

1) 参数 β

从实测的沉降—时间曲线上,任意选取 3 点 $(S_1, t_1), (S_2, t_2), (S_3, t_3)$ (如图 1 所示),代入式(5),得方程组为:

$$\begin{cases} S_1 = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta(t_1 - t_0)}] + S_d, \\ S_2 = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta(t_2 - t_0)}] + S_d, \\ S_3 = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta(t_3 - t_0)}] + S_d. \end{cases} \quad (6)$$

经变换,可得:

$$\begin{aligned} (S_1 - S_2)e^{-\beta t_3} + (S_2 - S_3)e^{-\beta t_1} + \\ (S_3 - S_1)e^{-\beta t_2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, β 的取值与 S_∞, S_d, t_0 无关,式中参数 β 可用牛顿迭代法求出,其迭代式为:

$$\beta_{k+1} = \beta_k - \frac{f(\beta_k)}{f'(\beta_k)}, (k = 0, 1, 2, \dots).$$

其中:

$$\begin{aligned} f(\beta_k) &= (S_1 - S_2)e^{-\beta_k t_3} + (S_2 - S_3)e^{-\beta_k t_1} + \\ & (S_3 - S_1)e^{-\beta_k t_2}; \\ f'(\beta_k) &= (S_2 - S_1)t_3 e^{-\beta_k t_3} + \\ & (S_3 - S_2)t_1 e^{-\beta_k t_1} + (S_1 - S_3)t_2 e^{-\beta_k t_2}. \end{aligned}$$

用牛顿迭代法求解 β 时,在不同的解区间选取初值 β_0 ,会得到不同的解,因此需判断 β 是否有效.通常情况下,软土地基固结度要达到 90% 所需的时间为数月数年.基于此,根据式(1),可得 β 的取值范围为 0.001~0.05(时间按天计算).

2) 参数 S_d

计算出 β 后,记其值为 β^* .将 β^* 代入式(6),经变换,可得:

$$\begin{cases} S_1 - S_d = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta^*(t_1 - t_0)}] \\ S_2 - S_d = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta^*(t_2 - t_0)}] \\ S_3 - S_d = (S_\infty - S_d)[1 - \alpha e^{-\beta^*(t_3 - t_0)}] \end{cases} \quad (8)$$

再经变换,可得:

$$\frac{S_1 - S_d}{S_2 - S_d} = \frac{1 - \alpha e^{-\beta^*(t_1 - t_0)}}{1 - \alpha e^{-\beta^*(t_2 - t_0)}}.$$

可见,参数 S_d 和 t_0 存在一一对应的关系,其中 S_d 可近似用弹性力学公式进行计算^[3]:

$$S_d = C_d q B \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right).$$

式中: q 为均布荷载; B 为荷载面积的直径或宽度; C_d 为考虑荷载面积形状和沉降计算点位置的系数; E 为土的弹性模量; μ 为土的泊松比.

3) 参数 t_0, S_∞

由于 S_d 和 t_0 的对应关系,假定任意 S_d 为近似值 S_d^* ,对模型的计算结果无影响,则:

$$t_0 = \frac{1}{\beta^*} \ln \left[\frac{S_1 - S_2}{\alpha e^{-\beta^* t_2} (S_1 - S_d^*) - \alpha e^{-\beta^* t_1} (S_2 - S_d^*)} \right].$$

记 t_0 为 t_0^* ,则:

$$S_\infty = \frac{S_1 - S_d^*}{1 - \alpha e^{-\beta^*(t_1 - t_0^*)}} + S_d^*.$$

4) 模型的建立

记 S_∞ 为 S_∞^* ,将 β^*, S_d^*, t_0^* 和 S_∞^* 都代入式(5),则可建立指数曲线法的地基沉降预测模型为:

$$S_t = (S_\infty^* - S_d^*)[1 - \alpha e^{-\beta^*(t - t_0^*)}] + S_d^*. \quad (9)$$

3 工程应用

3.1 工程概况

湖南省岳阳市城陵矶(松阳湖)进港道路工程位于洞庭湖区,路线 K2+780—终点,系新路,该段属平原堆积地貌,多为藕塘、鱼塘、水田,有溪流和水渠,为淤泥质粘土分布区.淤泥质土呈软塑状,局部呈流塑状,承载力低. K2+850 处淤泥质深达 5.1 m,路基设计填土高度为 5.50 m,采用了抛石挤淤、反压护道及堆载预压等方法进行了软基处理.于 2008 年 10 月 15 日路基土方工程开工,历时半年,分 4 级填土堆载,于 2009 年 4 月 8 日填至设计高度.其断面实测沉降曲线如图 2 所示.

3.2 沉降预测及分析

用前述优化的指数曲线法,编制计算程序,从 K2+850 断面沉降与时间关系曲线中,任意选取

多组3点组合进行沉降预测,各组合计算结果为:

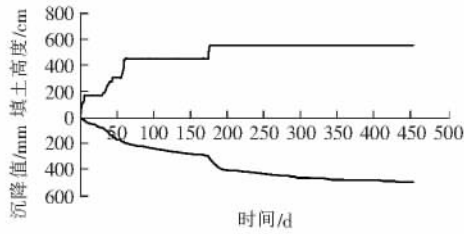


图2 K2+850断面沉降与时间曲线

Fig. 2 Relationship curves between cross-section and time in K2+850

1) 选取(177, 332.19), (192, 392.39), (220, 410.85)3点, 参数 β 无有效解, 即用指数曲线法无解。

2) 选取(220, 410.85), (250, 429.67), (280, 446.68)3点, 得表达式为:

$$S_t = 606.54 - 410.78e^{-0.00337t} \quad (10)$$

3) 选取(250, 429.67), (280, 446.68), (287, 450.48)3点, 得表达式为:

$$S_t = 680.42 - 450.27e^{-0.00234t} \quad (11)$$

4) 选取(257, 433.80), (287, 450.48), (310, 459.04)3点, 得表达式为:

$$S_t = 479.79 - 2181.16e^{-0.01502t} \quad (12)$$

5) 选取(300, 455.25), (330, 465.46), (360, 473.89)3点, 得表达式为:

$$S_t = 513.81 - 397.75e^{-0.006386t} \quad (13)$$

6) 选取(220, 410.85), (280, 446.68), (360, 473.89)3点, 得表达式为:

$$S_t = 503.48 - 556.63e^{-0.008151t} \quad (14)$$

将各组合计算所得表达式, 绘制成沉降与时间的关系曲线如图3所示。

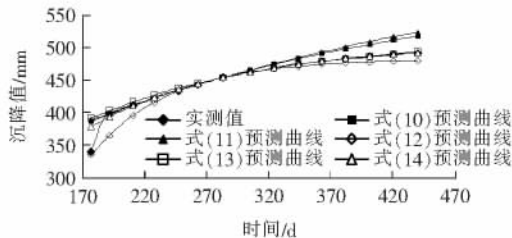


图3 指数曲线法预测的曲线

Fig. 3 Prediction curve using exponential curve method

通过图3中预测曲线与实测曲线对比, 各表达式中, 式(13), (14)准确度最高, 式(12)次之, 式

(10), (11)最差. 这说明选取3点的时间越晚, 时间跨度越大, 预测准确度越高, 计算效果越好. 结合现场施工记录, 这种现象主要是由于前期较频繁的施工机械通行对路堤反复碾压造成的. 尽管机械通行对路堤的作用时间短暂, 但其自重对软土地基产生附加应力^[3]不容忽视, 特别是大吨位施工机械(如:压路机、满载自卸货车等)的碾压是造成预压期前期沉降的主要原因. 此时, 软土地基预压期的沉降增长规律被掩盖, 以致前期预测结果明显低于后期结果精度, 甚至指数曲线法无解(如:组合1)。

按式(13), (14)预测的软土地基548d沉降值分别为501.79, 497.09 mm, 与548d实测沉降值497.46 mm吻合, 这表明指数曲线法在软土地基沉降预测中精度良好, 满足应用要求。

4 结语

1) 指数曲线法在软土地基沉降预测中, 其预测精度良好, 满足应用要求。

2) 指数曲线法预测软土地基沉降的准确程度与所选3点有关, 应根据现场情况, 合理选取沉降数据, 避免采用受外界因素影响较大时的实测数据进行计算. 从本工程实例来看, 选取3点的时间越晚, 时间跨度越大, 拟合精度越高, 预测结果越准确。

3) 指数曲线法在应用过程中仅需3点的沉降数据, 在正确把握该方法预测结果精度规律的情况下, 不仅可以得到较为可靠的沉降计算结果, 还能大大降低沉降观测频率, 节省沉降观测投入。

参考文献 (References):

- [1] 张明星, 熊磊, 雷美清. 汉洪高速公路软土路基滑移分析及处理[J]. 土工基础, 2008, 22(4): 40-41. (ZHANG Ming-xing, XIONG Lei, LEI Mei-qing. The analysis and settlement to soft soil foundation of Hanhong expressway[J]. Soil Engineering and Foundation, 2008, 22(4): 40-41. (in Chinese))
- [2] 季鹏, 刘松玉, 黄卫. 软土地基路滑移分析与对策[J]. 公路交通科技, 2003, 20(2): 12-15. (JI Peng, LIU Song-yu, HUANG Wei. Analysis and treatment of embank sliding on soft ground[J]. Journal of

- Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(2): 12-15. (in Chinese))
- [3] 刘颖. 土力学与地基基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2010. (LIU Ying. Soil mechanics and foundation [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 邓永锋, 刘松玉. 扰动对软土强度影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1940-1944. (DENG Yong-feng, LIU Song-yu. Effect of sample disturbance on soft soil strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1940-1944. (in Chinese))
- [5] 尹利华, 王晓谋, 张留俊. 费尔哈斯曲线在软土地基路堤沉降预测中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(3): 19-23. (YIN Li-hua, WANG Xiao-mou, ZHANG Liu-jun. Settlement prediction of embankment on soft clay ground using Verhulst curve[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 19-23. (in Chinese))
- [6] 赵建三, 唐利民, 唐平英. 正则化多项式回归模型及其在路基变形分析中的应用[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(4): 6-10. (ZHAO Jian-san, TANG Li-min, TANG Ping-ying. Regularized polynomial regression model and application in subgrade deformation analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(4): 6-10. (in Chinese))
- [7] 赵俊明, 石名磊, 张宏. 灰色理论在高速公路软土地基沉降预测中的应用[J]. 公路交通科技, 2005, 22(5): 56-58. (ZHAO Jun-ming, SHI Ming-lei, ZHANG Hong. Application of grey theory in soft clay ground settlement prediction for expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(5): 56-58. (in Chinese))
- [8] 秦亚琼, 魏丽敏. 不等时距 GM(1,1) 模型预测地基沉降研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(1): 134-137. (QIN Ya-qiong, WEI Li-min. Application of BP neural networks in unequal time interval model of GM(1,1)[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(1): 134-137. (in Chinese))
- [9] 徐晓宇, 王桂尧, 匡希龙, 等. 基于遗传算法和神经网络的高路堤沉降预测研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(3): 30-33. (XU Xiao-yu, WANG Gui-yao, KUANG Xi-long, et al. Research of the settlement prediction of high embankment based on the genetic algorithm and neural network[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 31(3): 30-33. (in Chinese))
- [10] 曾国熙. 砂井地基沉陷分析[J]. 浙江大学学报, 1959(3): 34-72. (ZENG Guo-xi. Analysis of sand wells foundation subsidence[J]. Journal of Zhejiang University, 1959(3): 34-72. (in Chinese))
- [11] 黄晓明, 杨军. 路基设计原理与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (HUANG Xiao-ming, YANG Jun. Principle and method of roadbed design[M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [12] 杜海伟, 张建军, 李新生, 等. 地基沉降计算指数曲线配合法及其应用[J]. 土工基础, 2005, 19(1): 54-56. (DU Hai-wei, ZHANG Jian-jun, LI Xin-sheng, et al. The exponential curve fitting of the calculation of the subsoil settlement method and its application [J]. Soil Engineering and Foundation, 2005, 19(1): 54-56. (in Chinese))