文章编号:1001-1986(2007)06-0044-03

地基沉降预测模型和方法研究

章广成[1],艾传井[2]
(1. 中国地质大学工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 中南电力设计院,湖北 武汉 430071)

摘要:地基沉降预测是岩土体稳定性研究的一项重要任务。基于邓英尔和 Gompertz 等已有预测模型的特点,提出一种新的地基沉降预测模型——邓英尔—Gompertz 曲线模型,并提出了求解此类模型的新方法——规划求解法,解决多变量非线性方程的极值问题;同时探讨了测量点数目及其所处阶段对预测精度的影响,即:测量点越多预测效果越好。测量点处于发生阶段时预测结果一般偏小;测量点达到发展阶段时预测结果一般偏大;测量点达到成熟阶段时预测结果与预测模型、工程沉降特点有关;测量点达到极限阶段时预测结果符合实际情况。实例分析结果表明:与邓英尔、Gompertz 等模型相比,新模型预测的结果更准确。

关 键 词:沉降预测;Gompertz 曲线;残差;规划求解
中图分类号:TU433 **文献标识码**:A

Foundation settlement prediction model and method

ZHANG Guang-cheng[1], AI Chuan-jing[2]
(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*;
2. *Central-South Electric Power Design Institute, Wuhan* 430071, *China*)

Abstract: Foundation settlement prediction is a significant task of rock and soil stability study. Based on the existed models of settlement prediction, a new foundation settlement model and its solution method—constrained optimization are put forward. This method is simple, rapid and accurate. The effect of measured point number and its stage to prediction accuracy is discussed. The more the measured point number is, the better the result predicted is. The result predicted is generally less when the measured point is at initial stage while it is larger at developing stage. The result is related with the characteristic of the model and project. As soon as the point reaches the terminal stage, the result predicted accords with the actual condition. Results show that the prediction result of the new model is more accurate than that of Deng Ying—er model and Gompertz model.

Key words: settlement prediction; Gompertz curve; remainder; constrained optimization

地面或地基沉降是影响建筑物设计、施工和正常使用的主要因素。沉降问题已成为很多城市面临的主要地质灾害之一。早在 20 世纪初,K. Terzaghi 等人就建立了经典的地基沉降分析法,此后又有很多人为该方法的改进和完善做出了贡献。20 世纪 70 年代,随着计算机技术的发展,采用有限元分析法计算地基沉降成为可能。但始终没有一种令人满意的方法。至今,地基沉降课题仍然一直困扰着工程技术人员。总结前人提出的各种预测方法,可以归纳为两大类:其一,根据观测数据进行数理分析,预测沉降量的变化规律,如泊松曲线法[1]、Verhulst 模型[2]、Asaoka 法[3]、Gompertz 法[4]、双曲线法[5]、指数曲线法、新野法、三点法、灰色理论、人工神经网络法和遗传算法等等;其二,基于各种土的固结理论和本构关系,采用多种数学方法求近似解析解或数值解,进行模拟分析,如蒋明镜(1998)研究了饱和软土的弹塑性大变形有限元平面固结问题,并编制了相应程序[6],白世伟(2003)对软土蠕变—固结特性及计算模型进行了研究[7]等等。

由于土体沉降固结受基础形式、上部荷载、场地工程地质与水文地质条件、基础施工质量及加荷速率等诸多因素影响,其固结理论和本构模型难以全面考虑各种影响因素,导致计算结果和实测数据往往会有一些差异,完全依赖理论计算有时是不可能或不精确的。因此,在具体工程设计中基于固结理论和本构模型的有限元法难以推广。从而,利用前期实测沉降资料预测后期沉降就显得非常重要而有意义。本文基于前人预测模型,提出了一种邓英尔—Gompertz 曲线模型。

收稿日期:2007-03-05
作者简介:章广成(1980—),男,湖北监利人,博士研究生,主要研究方向为岩土体稳定性评价与治理.

1　新模型的提出

前人已提出了很多预测模型，每种模型都有各自的优缺点。如文献[5]提出的双曲线模型和文献[8]提出的抛物线模型，收敛速度慢，容易导致最终沉降量预测值偏大；文献[1]提出泊松曲线模型，该模型收敛性较好，但正如作者所述，文中所用的“三段计算法”受时间序列中数据项数应是 3 的倍数、时间间隔应相等和前后连续等限制。

邓英尔在文献[9]中提出了一种改进的泊松曲线模型，其表达式如下：

$$S=\frac{b_1}{1+b_2\exp(-b_3 t^{b_4})} \quad , \tag{1}$$

式中　S 为沉降量，mm；t 为相应的沉降时间，d；b_1、b_2、b_3、b_4 为待求参数。文献[9]同时提出新的求解方法，实例说明改进的模型收敛性好，而且提高了预测精度。

文献[4]提出 Gompertz 曲线模型，其表达式如下：

$$S=a\cdot\exp(-\exp(b-ct)) \quad , \tag{2}$$

式中　a、b、c 为待求参数。该模型适应性好，能很好的拟合反“S”型曲线，不足之处在于收敛较慢。

针对各种模型的特点，本文提出邓英尔－Gompertz 曲线模型，即：

$$S=a_1\cdot\exp(-\exp(a_2-a_3 t)+\frac{a_4}{1+a_5\exp(-a_6 t^{a_7})}, \tag{3}$$

式中　a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6、a_7 均为待求参数。本模型的特点：一是具有多个参数，增加了模型的灵活性；二是具备拟合反“S”型曲线的能力。

2　新模型的求解技术[10]

2.1　求解方法

根据不同时刻实测的沉降量，建立时间 t_i－实测沉降量 S_i 的数据序列，其中 $i=1,2,3,\cdots,n$ 为已知观测数据的点数；同时赋予参数向量 $\bar{a}=(a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6、a_7)$ 初值，根据曲线模型预测沉降量，并建立时间 t_i 与预测沉降量 $S(\bar{a},t_i)$ 的数据序列。如果模型参数 $\bar{a}$ 选择正确，预测沉降曲线（$t_i-S(\bar{a},t_i)$）对实测沉降曲线（t_i-S_i）的拟合将达最佳效果。本文采用模型预测值与实测值的残差平方和来评价拟合效果，残差平方和越小，拟和效果越好，此时由参数 a 构成的预测模型亦即为所求。由此建立以 $\bar{a}$ 为未知参数，时间 t 为自变量，残差平方和 E 为因变量的函数关系，并以因变量为目标函数，求其最小值。即目标函数：

$$\min E=E(\bar{a})=\sum_{i=1}^{n}(S(\bar{a},t_i)-S_i)^2 \quad 。 \tag{4}$$

EXCEL 提供的规划求解法能快速求解多变量非线性方程的极值问题。根据上述要求在 EXCEL 表中建立相应的函数关系，如图 1。然后在菜单栏“工具(T)”中选择“规划求解(V)”，并按图 2 进行相应设置，以待求参数 $\bar{a}$ 为可变单元格，残差平方和为目标单元格，并设置目标单元格为最小值，然后求解，计算结果即为所求。

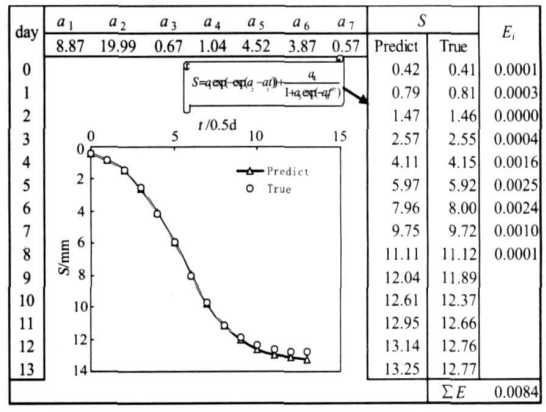

图 1　邓英尔－Gompertz 预测模型及方法

Fig. 1　The Deng Ying-er-Gompertz prediction model and method

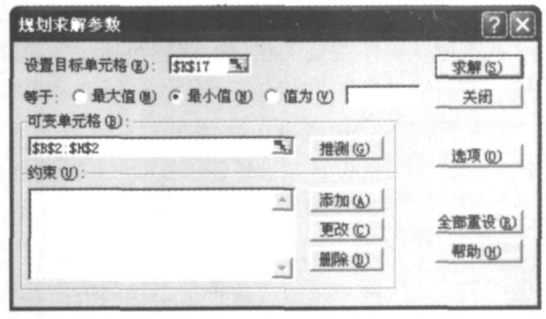

图 2　规划求解界面

Fig. 2　The interface of constrained optimization

2.2　测量点对预测精度的影响

以美国休斯顿贝壳广场大厦为例[1]，检验测量点对邓英尔－Gompertz 模型预测精度的影响。该大厦地上 52 层，高达 217.6 m，采用框筒结构，轻质混凝土，基础采用箱形基础，埋深 18.3 m，与多层地下车库相连。筒体基底的某点实测沉降量及不同点数预测的沉降量与时间的关系如图 3 所示。

各种预测模型对测量点均有一定要求，只是不同模型要求程度不同。可以从两个方面讨论：

a.　测量点数目的影响　随着测量点数的增加，预测结果会愈来愈接近真实值。

b. 测量点所处阶段的影响 沉降曲线一般为“S”型，大致可分为 4 个阶段：发生阶段、发展阶段、成熟阶段、极限阶段。测量点处于发生阶段，沉降速率基本保持不变，预测结果偏小；测量点达到发展阶段，沉降速率递增，预测结果一般偏大(如图 3 中“9 点预测”)；测量点达到成熟阶段，沉降速率递减，预测结果与预测模型、工程特点有关，可以接近或符合实际沉降曲线(如图 3 中“10 点预测”)；测量点达到极限阶段，沉降速率为零，预测结果基本与实际情况相符。

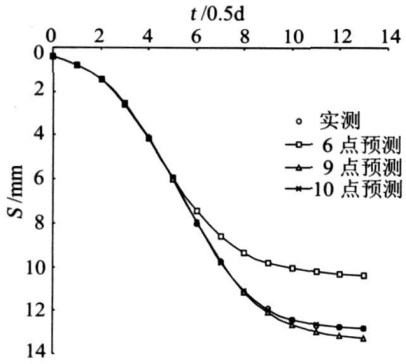

图 3 沉降量 S 与时间 t 的关系曲线

Fig. 3 Settlement-time curve

3 工程实例分析

3.1 武汉阳逻电厂[11]

武汉阳逻电厂主要的建(构)筑物包括主厂房、冷却塔、烟囱、锅炉等生产设施及附属建筑物。本次研究主要是预测主厂房基础沉降情况。主厂房采用天然地基、独立基础，设计基础埋深 5.0～7.5 m，设计标高为 28.5 m。个别浅埋基础难以达到持力层，在实际施工中按设计要求采用了素混凝土换填。表 1 为阳逻电厂主厂房沉降观测值与各种模型预测值对比表，图 4 是实测及不同模型时沉降量 S 与时间 t 的关系曲线。其中 $a_1=51.870$, $a_2=1.209$, $a_3=0.020$, $a_4=0.000$, $a_5=0.000$, $a_6=0.000$, $a_7=0.000$。

从图 4 中不同模型预测曲线与实测数据对比可知：**a**. Gompertz 模型对沉降过程拟合效果较差，收敛速度也比实测慢，从而导致预测的最终沉降量51.88 mm 比实测值 49.1 mm 偏大；**b**. 邓英尔模型对沉降过程拟合效果略好，预测的最终沉降量 48.62 mm，小于实际最终沉降量；**c**. 本文模型对过程及最终沉降量预测结果均较好，不足之处是此处预测最终沉降量为 48.67 mm，比实测的 49.1 mm 略小

3.2 青山电厂烟囱[11]

烟囱是青山电厂主要的建(构)筑物之一。该烟囱高 210 m，烟囱体为钢筋混凝土结构，底部最大外径为 20.44 m。基础为天然地基环形基础，外径 28m，内径 15 m，设计埋深 5 m，烟囱地基局部填土较厚采用素混凝土换填。图 5 是实测结果及本文模型的沉降量 S 与时间 t 的关系曲线。

其中 $a_1=10.044$, $a_2=1.706$, $a_3=7.837\times10^{-3}$, $a_4=1.956$, $a_5=1.435\times10^{-3}$, $a_6=0.000$, $a_7=0.000$。青山电厂烟囱实测最终沉降量为 11.7 mm，采用本文模型预测的最终沉降量为 12.0 m，预测结果比较符合实际。

表 1 阳逻电厂沉降观测值与预测值的比较 mm

Table 1 Comparison of measurement and prediction of settlement on Yangluo power station

时间序列	时间/d	实测数据	本文模型	邓英尔模型	Gompetz 模型
1	9	3.7	4.63	6.88	3.18
2	16	7.1	5.80	7.39	4.61
3	23	8.1	7.26	8.09	6.35
4	38	12.6	11.12	10.32	11.03
5	51	15.8	14.87	13.19	15.80
6	66	18.2	19.30	17.80	21.59
7	87	25.6	25.89	26.35	29.27
8	99	28.1	30.42	31.69	33.13
9	114	37.4	37.05	37.78	37.27
10	121	41.2	40.10	40.15	38.94
11	129	44.3	43.03	42.40	40.66
12	136	44.9	44.91	43.98	41.99
13	143	46.3	46.18	45.22	43.18
14	154	46.9	47.27	46.61	44.80
15	169	46.9	47.89	47.69	46.56
16	182	47.3	48.14	48.16	47.74
17	205	47.5	48.39	48.50	49.25
18	234	48.3	48.54	48.60	50.40
19	252	49.1	48.59	48.62	50.85

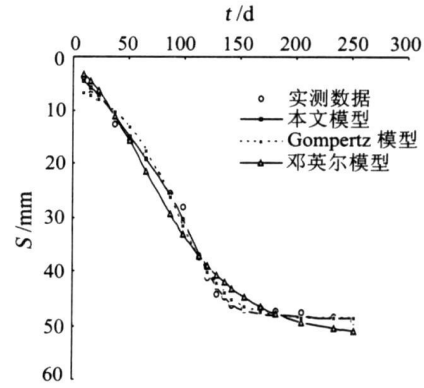

图 4 阳逻电厂某点的沉降量 S 与时间 t 的关系曲线

Fig. 4 Settlement—time curve of Yangluo power station

4 结论

a. 结合 Gompertz 模型和邓英尔模型提出的新模型—邓英尔—Gomertz 使预测精度得以提高。

(下转第 50 页)

由表 4,可得如下矩阵:

$$A=\begin{bmatrix} 4.39 & 1.09 & 3.13 & 3.49 & 3.88 & 3.03 & 3.37 \\ 1.36 & 2.16 & 1.99 & 1.95 & 1.78 & 1.74 & 1.73 \\ 1.35 & 1.29 & 1.46 & 1.56 & 1.76 & 1.41 & 1.99 \\ 0.05 & 0.95 & 1.58 & 1.16 & 0.96 & 1.98 & 1.06 \end{bmatrix}。$$

由此矩阵,可得各因素的权系数 a_i,从而得到黄土边坡各个因素关于稳定性分级的关联度,由物元关联度得到的边坡稳定性状态见表 5。

表 5 物元关联度 $K_i(p)$ 计算结果及对比

Table 5 Results of material element dependent degree $K_i(p)$ assessment and its contrast

工程实例	$K_1(p)$	$K_2(p)$	$K_3(p)$
道南隧道边坡(Ⅰ)	0.106 9	6.213 927	−1.235 93
燕麦沟边坡(Ⅱ)	−0.043 56	−0.201 88	3.835 386
工程实例	$K_4(p)$	裂隙法	圆弧法
道南隧道边坡(Ⅰ)	0.038 3	1.69	1.73
燕麦沟边坡(Ⅱ)	0.045 151	1.20	1.25

由表 5 可知,道南隧道边坡物元关联度在 $j=2$ 时获得最大,说明待评边坡的稳定性等级属于较稳定,裂隙法和圆弧法计算的结果分别为 1.69 和 1.73;燕麦沟边坡物元关联度在 $j=3$ 时获得最大,说明待评边坡的稳定性等级属于一般稳定,裂隙法和圆弧法计算的结果分别为1.20和 1.25。

3 结语

利用可拓论评判思想,通过参数正交试验分析确定权重,建立了改进可拓工程法的边坡稳定性评价模型与方法。通过参数影响敏感性正交实验确定权系数,使权系数的确定更具有客观性和科学性。实例应用表明,该方法能较真实地反映实际边坡稳定性等级水平,且便于计算机进行规范化评价,排除了主观因素对分析、评定结果的干扰,具有较强的识别评判能力和简便、定量严密的特点,该方法对其他综合评价工作也有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 崔政权,李宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[2] 叶万军,折学森,陈志新,等. 基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2):82−85.

[3] 彭小云,高德彬,毕选生,等. 高陡边坡稳定性的概率分析[J]. 长安大学学报:地球科学版,2003,25(3):67−70.

[4] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.

[5] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报,1999,44(7):673−682.

[6] 谢全敏,夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(3):438−441.

[7] 贾超,肖树芳,刘宁. 可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2003, 22(5):751−756.

[8] 汪明武,金菊良,李丽. 可拓学在膨胀土胀缩等级评判中的应用[J]. 岩土工程学报,2003, 25(6):754−757.

[9] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,2000.

[10] 王贵荣. 黄延高速公路 K207+690−830 段边坡稳定性分析[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(6):40−43.

[11] 李萍,杨社强,李同录,等. 强度折减法在滑坡稳定性分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2005,33(5):45−47.

(上接第 46 页)

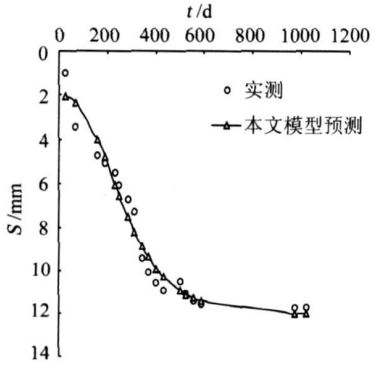

图 5 青山电厂烟囱的沉降量 S 与时间 t 的关系曲线

Fig.5 Settlement−time curve of Qingshan power station

b. 拟合模型对测量点有一定要求,测量点越多预测效果越好。测量点处于发生阶段时预测结果一般偏小;测量点达到发展阶段时预测结果一般偏大,测量点达到成熟阶段时预测结果与预测模型、工程沉降特点有关,测量点达到极限阶段时预测结果符合实际情况。

c. 本文提出采用规划求解方法解决多变量非线性方程的极值问题,取得较好成效,为类似工程问题提供了一种求解手段。

参考文献

[1] 宰金珉,梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学,2000,21(4):322−325.

[2] 宋彦辉,聂德新. 基础沉降预测的 Verhulst 模型[J]. 岩土力学,2003,21(4):123−126.

[3] ASAOKO A. Observational procedure of settlement prediction [J]. Soils & Foundations, 1978,18(4): 87−101.

[4] 余闯,刘松玉. 路堤沉降预测的 Gompertz 模型应用研究[J]. 岩土力学,2005,26(1):82−86.

[5] 朱胜利. 由实测沉降曲线推算地基最终沉降量的双曲线法[J]. 港口工程,1998,8(4):31−33.

[6] 蒋明镜,沈珠江. 饱和软土的弹塑性大变形有限元平面固结分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),1998,26(1):73−77.

[7] 陈晓平,白世伟. 软土蠕变−固结特性及计算模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):728−734.

[8] 许永明,许折忠. 堤岸沉降预测新方法[J]. 河海大学学报,2000,28(5):111−113.

[9] 邓英尔,谢和平. 全过程沉降预测的新模型与方法[J]. 岩土力学, 2005,26(1):1−4.

[10] LOW B K, WILSON H T. Reliability analysis using object−oriented constrained optimization [J]. Structural Safety, 2000, 26(1): 69−89.

[11] 艾传井. 武汉阳逻−青山地区地基土体沉降特征研究[D]. 武汉:中国地质大学,2006.