

最优组合预测模型在预压处理地基沉降中的应用研究

仲锋祥¹, 何忠意¹, 朱佩宁^{1,2}, 周亚东³

(1. 广东天信电力工程检测有限公司, 广州 510663; 2. 中国能建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;
3. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要: [目的] 为了提高预压地基处理沉降预测及固结度推算精度, 提出了以原始累积沉降量时间序列为基础建立最优组合预测模型以及模型的精度评价方法。[方法] 基于传统单一预测模型 Compertz 模型、灰色 G(1, 1) 模型、Pearl 模型, 构建最优组合模型, 以某天然气热电冷联产项目地基沉降监测时间序列, 分别检验各单一模型以及最优组合预测模型(OCP 模型)的可靠性与精度, 并将三点法, 图解法(Asaoka 法)及经验双曲线拟合法的预测结果与最优组合预测模型(OCP 模型)的计算结果进行了对比分析。[结果] 研究表明: 单一预测模型 Compertz 模型、灰色 G(1, 1) 模型、Pearl 模型以及最优组合预测模型(OCP 模型)均满足“好”的精度等级要求; 与常用的三点法, 图解法(Asaoka 法), 经验双曲线法计算结果相比, 最优组合预测模型(OCP 模型)计算值更接近实际值; [结论] 在进行预压处理地基的沉降预测以及预压后地基土固结度计算和分析时, 采用不同方法, 能得出合理的评价指标值; 最优组合预测模型(OCP 模型)可为在预压处理地基施工控制提供一定的指导作用。

关键词: 最优组合模型; Compertz 模型; 灰色 G(1, 1)模型; Pearl 模型; 最终沉降量; 固结度

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0140-07

Application of Optimal Combined Prediction Model for Settlement of Foundation Under Preloading Treatment

ZHONG Fengxiang¹, HE Zhongyi¹, ZHU Peining^{1,2}, ZHOU Yadong³

(1. Guangdong Tianxin Electric Power Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: [Introduction] In order to predict settlement and calculate consolidation degree of preloading foundation treatment more accurately, this paper puts forward an Optimal Combined Prediction model on the basis of time series of original cumulative settlement and a method of evaluating the accuracy of the model. [Method] Based on the traditional prediction model, such as Compertz model, grey G(1, 1) model and Pearl model, an Optimal Combined Prediction model (OCP model) was established and the accuracy of all single models and the Optimal Combined Prediction (OCP model) were tested with the monitoring data of foundation settlement at heat-power-cold energy generation system by using natural gas; Meanwhile, the result of the Optimal Combined Prediction model (OCP model) was compared with three-point method, Asaoka method, hyperbolic curves fitting method. [Result] That shows: the accuracy of all single models and optimal combination model reaches the good precision level; Compared with three-point method, Asaoka method and hyperbolic curves fitting method, the calculated value of the Optimal Combined Prediction (OCP model) is closer to the real value. [Conclusion] While predicting settlement and calculating the consolidation degree of preloading foundation treatment, different methods are used, reasonable value of evaluation index about foundation treatment can be obtained. The optimal combination prediction model (OCP model) can provide guidance for preloading foundation treatment construction and controlling process.

Key words: optimal combination prediction model; compertz model; grey g(1, 1)model; pearl model; final settlement; consolidation degree

收稿日期: 2018-07-30 修回日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目“考虑饱和度变化的电渗固结模型与吹填软土快速固结试验研究”(51608351)

在预压处理软弱地基工程中, 处理后地基土固结度及残余沉降通常被用来作为检验和评价预压处理效果的重要指标, 而在工程应用中计算地基土的

固结度及残余沉降的前提条件是必须先求得预压处理地基的最终沉降量。岩土参数反演法以及类似模型虽然能更好地符合实际情况, 但普遍需要通过现场试验或者计算获取大量的岩土地基参数, 实际计算或者试验工作量相对较大, 且在反演分析过程中不一定出现唯一简单的迭代点, 因而岩土参数反演法在实际预压处理地基工程中的应用极为不方便^[1-5]。由于预压处理地基土固结及沉降的问题较为复杂, 再者加上软弱地基岩土力学参数离异性相对大、施工预加荷载施加相对均匀等导致的计算参数不确定性高, 采用特定模型或者按照其他规范经验公式计算得到的最终沉降值与实测值往往差距较大。为此, 通常获取最终沉降量的主要方法仍为: 在施工期放置沉降标志, 对地基预压过程中的地基沉降进行观测, 采用观测值模拟预测后期的沉降随时间的变化。事实上, 沉降的预测方法很多, 比如, 经验双曲线拟合法、人工神经网络法(ANN模型)、图解算法(Asaoka法)、灰色G(1, 1)模型、指数拟合法、龚帕兹曲线模型(Compertz模型)、三点预测法、遗传算法等^[6-9], 这些方法各有其优点及适用范围, 预测精度问题一直是研究的热点。

“组合预测”思想, 就是以不同的预测方法模型为基模型, 予以一定固定或者可变权重进行适当组合, 综合利用各基模型所提供的信息。这样形成的组合预测模型比单一预测模型考虑问题更加系统和全面, 并且能有效地减少或者削弱单一预测模型受随机因素干扰的影响, 进一步提高预测的可靠性与精度。以两种或两种以上的无偏单项模型为基模型可以组合得到优于各单一预测模型及更合理的预测结果^[10-12]。我国自上世纪90年代“组合预测”模型在生态环境工程、资源工程、建筑工程等实际工程中得到了广泛应用和研究, 并取得了大量的成果^[11-15]。

本文为了提高预压地基处理工程中沉降预测及固结度推算精度, 基于国内外学者在地基处理过程中常研究的三种常用预测模型 Compertz 模型、灰色 G(1, 1) 模型、Pearl 模型构建最优组合预测模型(简称 OCP 模型)。结合对珠三角地区某天然气热电冷联产项目地基处理施工监测沉降时间数据序列中的实测数据进行拟合和预测计算, 将实测值与模型预测值进行对比, 并基于后验差法对文中所构

建 OCP 模型的预测精度进行检验分析, 同时将 OCP 模型与通用预测与计算方法(如经验双曲线拟合法、图解算法、三点预测法)的预测值及推算地基土固结度、固结沉降等指标进行了对比分析研究。

1 最优组合预测模型

最优组合预测模型(OCP模型)也叫最优加权法模型^[10-11], 其基本思想是基于某种准则, 以无偏单项模型为基模型, 并在特定约束条件下极小化目标函数 S , 获取目标函数 S 的基模型的加权权重系数, 依此得到特定 S 组合模型, 进行最优组合计算。

设 $y(t)$ 为第 t 期的地基沉降观测值, 设对于该实际观测值的预测问题, 可以构造了 m 个单模型 $\hat{y}_j(t)$ ($j=1, 2, \dots, m$) 进行预测分析, 为了弥补单一模型的局限性, 上述 m 个预测模型可构成以下组合:

$$Y_q(t) = \varphi(\hat{y}_1(t), \hat{y}_2(t), \dots, \hat{y}_m(t)) \quad (1)$$

式中: q 为 m 个模型的组合数; $Y_q(t)$ 为组合模型, 假定其中各单一模型的权重向量 W :

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T, \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (2)$$

式中: w_1, w_2, \dots, w_m 为各预测模型的加权值。

记 $Y(t)$ 为组合模型在 t 时刻的预测值, 组合模型的形式可定义为:

$$\begin{aligned} Y(t) &= w_1 \hat{y}_1(t) + w_2 \hat{y}_2(t) + \dots + w_m \hat{y}_m(t) \\ &= \sum_{j=1}^m w_j \hat{y}_j(t) \end{aligned} \quad (3)$$

设某个单一模型的拟合残差为:

$$\begin{aligned} e_j(t) &= e_{ji} = \hat{y}_j(t) - y(t) = \hat{y}_{ji} - y_i \\ (j &= 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: t, n 分别表示第 t, n 期。

若记 $e(t)$ 为 t 时刻组合模型的预测误差, 则有:

$$\begin{aligned} e(t) &= Y(t) - y(t) = \sum_{j=1}^m w_j e_j(t) \\ &= \sum_{j=1}^m w_j e_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

本文定义预测误差平方和 S :

$$S = \sum_{t=1}^n e(t)^2$$

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^m w_j e_{ji} \right) \left(\sum_{j=1}^m w_j e_{ji} \right) \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{j=1}^m w_i w_j e_{ii} e_{ji} \quad (6)$$

再设 e_i 为第 i 种单个预测模型的预测误差向量, $e_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{im})^T$, 那么有:

$$E_{ij} = \sum_{i=1}^n e_{ii} e_{ji} (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

构造残差矩阵 $E = [\sum_{i=1}^n e_{ii} e_{ji}]$, 则:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_i w_j e_{ii} e_{ji} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (w_i w_j \left(\sum_{i=1}^n e_{ii} e_{ji} \right)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (w_i w_j E_{ij}) = W^T E W \quad (8)$$

本文采用误差平方和在最小二乘原理进行求解数学规划, 对组合模型的最优权重求解。构造目标函数及其约束条件为:

$$\begin{cases} \min S = \sum_{i=1}^n e(t)^2 \\ \text{s. t } \sum_j w_j = 1 \end{cases} \quad (9)$$

若令 $R = [1, 1, \dots, 1]^T$, 显然有:

$$\begin{cases} \min S = \sum_{i=1}^n e(t)^2 = W^T E W \\ \text{s. t } R^T W = 1 \end{cases} \quad (10)$$

对上式用拉格朗日乘子法求解^[10], 得:

$$W = \lambda E^{-1} R, \lambda = \frac{1}{R^T E^{-1} R} \quad (11)$$

不难得出最优权重向量为:

$$W_0 = \frac{E^{-1} R}{R^T E^{-1} R} \quad (12)$$

将(12)代入(8)目标函数最小值:

$$S_0 = W_0^T E W_0 = \frac{1}{R^T E^{-1} R} \quad (13)$$

2 三种常用预测模型

1) Compertz 模型

Compertz 模型(龚帕兹曲线模型)是由英国统计学家、数学家 B. Gompertz 提出的, 它是一种成

长曲线, 其基本数学表达式如下^[17]:

$$y(t) = L e^{-ae^{-bt}} \quad (14)$$

式中: a, b 和 L 为待定参数; $y(t)$ 为对应时间的预测值。该模型曾被文献^[4]用来预测高填方路基工后沉降预测。

2) Pearl 模型(泊松曲线)^[2]

泊松曲线表达式为:

$$y(t) = \frac{L}{1 + ae^{-bt}} \quad (15)$$

式中: $y(t)$ 为 t 时刻对应的预测值, t 为时间; a, b 和 k 为待定参数且为正, a 无量纲, b 的单位为时间的倒数, k 的单位为与 $y(t)$ 相对应的长度单位。可利用时间序列对上述三个未知参数进行求解, 即可建立 Pearl 模型, 进而可预测后期的 $y(t)$ 值。

3) 灰色模型 GM(1, 1) 模型^[7,18]

GM(1, 1) 以(Gray Mode1)为核心, 以灰色模块为基础, 以微分拟合法建立模型。设原始累计沉降量-时间序列向量 $Y = \{y(0), y(1), \dots, y(n)\}$, 对以上累计沉降量-时间序列向量 Y , 参考文献^[18]采用(1-AGO)法对 Y 做一次累减生成, 得到的沉降增量-时间序列向量 $Y^{(0)}, Y^{(0)} = \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(n)\}$, 其中:

$$y^{(0)}(j) = y^{(1)}(j) - y^{(1)}(j-1) \quad (16)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$ 。

对上述沉降增量-时间序列 $Y^{(0)}$ 再采用一次(1-AGO)累加计算, 生成得到 $Y^{(1)}$ 时间序列 $Y^{(1)} = \{y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n)\}$, 则有:

$$y^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k y^{(0)}(j) \quad (17)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n$ 。

建立 $Y^{(1)}$ 的灰色 GM(1, 1) 模型的白化微分方程:

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + ay^{(1)} = b \quad (18)$$

式中: a, b 为待定常数。

对 $Y^{(1)}$ 按下式(19)做一次紧邻均值法^[6,18]计算, 得到均值背景值序列向量 $Z^{(1)}, Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\}$, 则有:

$$z^{(1)}(k) = 0.5y^{(1)}(k) + 0.5y^{(1)}(k-1) \quad (19)$$

按最小二乘法求解方程(17)中 a, b ; 则:

$$[a \ b]^T = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (20)$$

式(19)中有:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}; \quad y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}。$$

因此, 白化形式微分方程的解为:

$$y^{(1)}(k+1) = (y^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (21)$$

对得到的 $y^{(1)}(k+1)$ 作累减可得到预测数据:

$$y^{(0)}(k+1) = y^{(1)}(k+1) - y^{(1)}(k) \quad (22)$$

由上述预测结果可以计算得到沉降预测值:

$$y(m+k) = y(m) + y^{(0)}(m+1) + y^{(0)}(m+2) + \dots + y^{(0)}(m+k) \quad (23)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n$ 。

3 预测精度检验

对于在统计方法中, 后验差分析法, 多因素关联度分析法等^[19]常被众多学者用来评价和检验预测模型的计算精度, 本文拟采用后验差分析法对 OCP 模型预测精度进行检验。

设 $e(t_i)$ 为实测数据 $y(t_i)$ 和预测数据 $\hat{y}(t_i)$ 的残差, 即:

$$e(t_i) = y(t_i) - \hat{y}(t_i) \quad (24)$$

后验差比 C :

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (25)$$

式中: S_1, S_2 分别为原始数据和模型预测结果残差的均方差, 其中:

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y(t_i) - \hat{y}(t_i)]^2}{n-1}} \quad (26)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [e(t_i) - \bar{e}]^2}{n-1}} \quad (27)$$

本文通过计算后验差比值 C , 结合表 1 中精度标准^[19]对模型预测值的精度进行判定与分析。

表 1 预测精度等级标准^[19]

Tab. 1 Standard for precision of prediction model^[19]

序号	精度评价等级	后残差比值 $C(10^{-2})$
1	不合格	>65
2	勉强合格	50~65
3	合格	35~50
4	好	<35

根据表 1 可知, 后验差比值 C 越小, 模型预测精度越高。

4 工程实例分析

珠三角地区某天然气热电冷联产项目(简称热电冷联供项目, 下同)全厂区场内标高较低且淤泥及淤泥质土层深厚, 场内软弱土层厚度介于 15.0 ~ 25.0 m, 软弱土层淤泥及淤泥质土层呈灰、深灰色, 为饱和状态, 呈流塑-软塑, 含一定有机质成分, 土层中局部夹有薄层粉细砂, 且混少量的贝壳碎片。含水量介于 48.9% ~ 79.0%, 垂直渗透系数 k_v 达到 10^{-7} cm/s 级, 水平渗透系数 k_h 达到 10^{-6} cm/s ~ 10^{-7} cm/s, 土层灵敏度介于 4.6 ~ 6.9 之间。由于土层形成过程中, 沉积时间短, 组成颗粒较细, 土体结构相对疏松, 岩土强度较低, 土层具有高压缩性特征。为了消除厂区内的软土层的沉降, 减小后期的工后沉降; 另考虑到后期上部建(构)筑物较大部分桩基为 PHC 管桩, 为降低后期桩基所受负摩阻力; 基于上述原因, 有必要对厂区内的地基软弱土层进行加固处理, 经分析较为经济合理的方式为抽真空+堆载联合预压法处理。据设计资料, 全区处理范围为分 A1 ~ A6 共 6 个区, 处理面积约 27.94 hm²。其中 A4 区在 2014 年 1 月 16 日开始进行施工试抽真空, 并于 2014 年 3 月 23 日该场地真空膜内的平均真空度达到 85 kPa, 随后开始进行上部堆载施工。至 2014 年 4 月 16 日(累计抽真空 100 d), 上部堆载施工完毕, 随后进入预压处理恒载期。表 2 列出的为热电冷联供项目工程 A 区沉降监测数据。

4.1 预测结果及模型精度

本文利用 Compertz 模型、Pearl 模型、GM(1, 1)模型对文中工程 A 区沉降监测数据(如表 2 所示)建立最优组合模型:

$$Y(t) = w_1 \hat{y}_1(t) + w_2 \hat{y}_2(t) + w_3 \hat{y}_3(t) \quad (28)$$

基于表 2 的实测数据, 利用式(14)-(27), 使用 Matlab7.5 软件计算得到 Compertz 模型、Pearl 模型和 GM(1, 1)模型, 其中有:

Compertz 模型:

$$y_1(t) = 2488.868e^{-0.1742e^{(-0.02517(t-100))}} \quad (29)$$

Pearl 模型:

$$y_2(t) = \frac{2476.187}{1 + 0.1842e^{-0.02793(t-100)}} \quad (30)$$

表2 A区地基处理过程中沉降观测值以及各模型的预测值

Tab. 2 Settlement data of zone A by measured and predicted in foundation treatment process

日期	观测值 /mm	Compertz 模型		Pearl 模型		G(1, 1)模型		最优组合模型	
		预测值 /mm	误差 /mm	预测值 /mm	误差 /mm	预测值 /mm	误差 /mm	预测值 /mm	误差 /mm
4月16日	2 076.0 *	2 091.0	15.0	2 091.0	15.0	2 064.3	-11.7	2 082.6	6.6
4月19日	2 107.0 *	2 117.6	10.6	2 117.5	10.5	2 096.9	-10.1	2 114.7	7.7
4月22日	2 137.0 *	2 142.7	5.7	2 142.4	5.4	2 126.6	-10.4	2 142.6	5.6
4月25日	2 173.0 *	2 166.1	-6.9	2 165.9	-7.1	2 153.8	-19.2	2 167.2	-5.8
4月28日	2 202.0 *	2 188.1	-13.9	2 187.9	-14.1	2 178.6	-23.4	2 189.0	-13.0
5月1日	2 220.0 *	2 208.7	-11.3	2 208.6	-11.4	2 201.2	-18.8	2 208.7	-11.3
5月4日	2 235.0 *	2 228.0	-7.0	2 228.0	-7.0	2 221.9	-13.1	2 226.7	-8.3
5月7日	2 247.0 *	2 246.0	-1.0	2 246.1	-0.9	2 240.8	-6.2	2 243.3	-3.7
5月11日	2 264.0 *	2 268.2	4.2	2 268.3	4.3	2 263.5	-0.5	2 263.9	-0.1
5月14日	2 279.0 *	2 283.6	4.6	2 283.7	4.7	2 278.8	-0.2	2 278.5	-0.5
5月17日	2 295.0 *	2 297.9	2.9	2 298.1	3.1	2 292.8	-2.2	2 292.5	-2.5
5月20日	2 309.0 *	2 311.3	2.3	2 311.5	2.5	2 305.5	-3.5	2 306.1	-2.9
5月23日	2 321.0 *	2 323.8	2.8	2 323.9	2.9	2 317.2	-3.8	2 319.4	-1.6
5月26日	2 334.0 *	2 335.4	1.4	2 335.4	1.4	2 327.8	-6.2	2 332.4	-1.6
5月29日	2 349.0 *	2 346.2	-2.8	2 346.2	-2.8	2 337.6	-11.4	2 345.3	-3.7
5月31日	2 359.0 *	2 353.0	-6.0	2 352.9	-6.1	2 343.6	-15.4	2 353.8	-5.2
6月4日	2367.0 *	2 365.7	-1.3	2 365.3	-1.7	2 354.6	-12.4	2 370.6	3.6
6月7日	2 385.0	2 374.5	-10.5	2 373.9	-11.1	2 362.0	-23.0	2 383.1	-1.9
6月10日	2 391.0	2 382.6	-8.4	2 381.8	-9.2	2 368.8	-22.2	2 395.5	4.5
6月13日	2 407.0	2 390.2	-16.8	2 389.1	-17.9	2 374.9	-32.1	2 407.7	0.7
6月16日	2 422.0	2 397.2	-24.8	2 395.9	-26.1	2 380.6	-41.4	2 419.8	-2.2
6月19日	2 434.0	2 403.8	-30.2	2 402.1	-31.9	2 385.8	-48.2	2 431.7	-2.3
6月22日	2 441.0	2 409.9	-31.1	2 407.9	-33.1	2 390.5	-50.5	2 443.5	2.5

注：“*”标识观测值为参与模型拟合的观测值，未标识观测值为模型其他检验数据。

GM(1, 1)模型:

$$y_3(t) = 2440.1516 - 364.67.69e^{-0.0302(t-101)} \quad (31)$$

若考虑 w_1, w_2, w_3 为最优权重, 根据式(1) - (13) 利用 Matlab7.5 对模型进行求解, 求得:

$$W = [20.7655, -20.0395, 0.274]$$

则最优组合模型(OPC模型)为:

$$y(t) = 51682.59e^{-0.1742 * e^{(-0.02517(t-100))}} - \frac{49621.5}{1 + 0.1842e^{-0.02793(t-100)}} + 668.6015 - 99.9215e^{-0.0302(t-101)} \quad (32)$$

基于式(28) - (32), 对各表2中所列日期相应地基沉降量通过基模型与 OPC 模型预测, 计算出了热电冷联供项目 A4 区恒载期前期以及后期的沉降, 同时作差值计算得出各模型预测值和实际观

测值的相对误差, 列于表2。

参照式(25) - (27), 利用表2中所列基模型与 OPC 模型的预测值、实际观测值以及相对误差, 计算后验差比值 C , 得出 $G(1, 1)$ 模型、Pearl 模型、Compertz 模型、OPC 模型的后验差比值 C 分别为 0.086、0.087、0.075、0.066, 按表1中精度标准, 若后验差比值 $C < 35 \times 10^{-2}$, 则满足精度“好”的标准, 显然各单一模型及 OPC 模型均达到了“好”的标准。从后验差比值 C 的值来看, OPC 模型预测精度优于单一的 $G(1, 1)$ 模型、Pearl 模型、Compertz 模型。

另外为更好的突出 OPC 模型的预测精度, 本文结合文中工程实测数据, 对三点法、经验双曲线法的预测精度进行计算, 如表3所示。

表 3 几种常见方法预测精度等级

Tab. 3 Precision of several prediction models

序号	后残差比值 $C(10^{-2})$	精度评价等级
OPC 模型	6.6	好
三点法	56.1	勉强合格
经验双曲线法	61.8	勉强合格
图解法	16.2	合格

从后验差比值 C 的值来看, OPC 模型预测精度优于三点法模型、经验双曲线法和图解法。

4.2 最终沉降量及固结度推算

基于表 2 中热电冷联供项目预压地基处理阶段的实测沉降数据, 结合文献资料^[2,19]中关于图解法(Asaoka 法)、三点法及经验双曲线法计算得到的预压处理地基的最终固结沉降量, 147 d 和 169 d 时的预测沉降量、残余沉降量及 147 d 和 169 d 的地基土固结度。表 4 列出的是上述三种方法以及文中 OPC 模型对预压处理地基的最终沉降量、147 d 和 169 d 时的预测沉降量、残余沉降量及 147 d 和 169 d 的预压地基土固结度的计算结果。分析表 4 可知, 相对于图解法、三点法及经验双曲线法, 本文建立的 OPC 模型计算得到的预压处理地基最终固结沉降量、预测沉降量和残余沉降量小于经验双曲线法计算值, 而大于三点法和图解法的计算结果; 另外, 通过 OPC 模型间接计算得到的特定时间 147 d 和 169 d 时的预压地基土的固结度满足以下关系: 经验双曲线法 \leq OPC 模型 \leq 三点法和图解法。

而众多实践和研究工作证明^[2,7,19]: 采用经验双曲线预测计算预压地基的最终固结沉降量, 结果在一定程度会偏大, 而采用三点算法、图解法预测则结果会偏小。因此, 可以认为从理论上说预压处理地基最终固结沉降量、残余沉降量和预压地基土的固结度的实际值应介于经验双曲线和三点法、

图解法推算结果之间, 由此不难得出本文中最优组合模型(OPC 模型)计算出预压处理地基土的固结度、地基最终固结沉降量和残余沉降量更贴近实际值。

5 结论

1) $G(1, 1)$ 模型、Pearl 模型、Compertz 模型以及最优组合模型均满足“好”的精度等级要求, 且最优组合模型(OPC 模型)预测精度优于单一预测模型。

2) 本文构建的最优组合预测模型(OPC 模型), 与众多学者所研究的经验双曲线法、图解法(Asaoka 法)、三点算法的预测与计算结果保持较强的一致性。相比后面三种常用方法, OPC 模型预测沉降量、推算预压地基土的固结度和最终固结沉降量以及残余沉降量更接近实际值。OPC 模型可作为预压处理地基最终沉降量、残余沉降量及预压处理地基土的固结度指标的计算方法, OPC 模型的建立为分析和计算预压处理地基过程相关评价指标, 给出了一种新的思路和方法。

3) 在预压处理地基工程实际应用中, 不论是理论计算, 或是反演分析, 还是各类预测方法均有其优点、适用范围, 计算结果也在一定程度各有其片面性和局限性, 笔者建议在建立预压地基处理沉降与固结度评价指标值时, 针对不同情况, 采用不同的方法进行分析与研究, 分别进行地基沉降预测和固结度计算, 能得出合理的评价指标值; 或者也可采用文中的最优组合预测模型构建方法, 在以上基础上, 利用不同基模型构建不同基模型下的 OPC 模型, 得出较优评价指标值。本文研究的 OPC 模型及模型构建方法可为在预压处理地基施工控制提供一定的指导作用。

参考文献:

[1] 常方强, 涂帆, 贾永刚. Verhulst 模型在预测软基路堤沉降

表 4 各方法对沉降、残余沉降及固结度计算结果

Tab. 4 The settlement, remained sedimentation and consolidation degree calculated with each methods

计算模型及方法	最终沉降量 /mm	实测沉降量/mm		预测沉降量/mm		残余沉降量/mm		推算固结度	
		149 d	167 d	149 d	167 d	149 d	167 d	149 d	167 d
OPC 模型	2 729.6	2 367	2 441	2 365.7	2 409.9	362.6	288.6	86.7%	89.4%
三点法	2 652.8	2 367	2 441	2 348.7	2 408.1	285.8	211.8	89.2%	92.0%
Asaoka 法	2 686.0	2 367	2 441	2 309.7	2 375.9	319.0	245.0	88.1%	90.9%
双曲线法	3 068.2	2 367	2 441	2 419.5	2 530.5	701.2	627.2	77.1%	79.6%

- 中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 3122-3126.
- CHANG F Q, TU F, JIA Y G. Application of verhulst model to prediction of roadbed settlement on soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (Supp. 1): 3122-3126.
- [2] 沈建军. 软土地基沉降组合预测研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [3] 闫飞亚, 陈志波. 两种软基沉降预测方法的应用及对比分析 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33(1): 106-110.
- YAN F Y, CHEN Z B. Application and comparison of two methods of settlement prediction for foundation in soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33 (1): 106-110.
- [4] 匡希龙, 邹德强. 基于龚帕斯曲线法的高填方路基工后沉降预测新思路 [J]. 公路工程, 2008, 33(1): 127-129+134.
- [5] 胡晓阳, 王连俊, 张光宗. Logistic 及 Verhulst 预测模型在路基沉降预测中的拟合研究 [J]. 铁道标准设计, 2013(9): 1-4.
- HU X Y, WANG L J, ZHANG G Z. Research on the fitting of logistic model and verhulst model for sub-grade settlement prediction [J]. Railway Standard Design, 2013(9): 1-4.
- [6] 姚宇, 黄德权. 气压劈裂真空法加固软土地基设计方法及工程应用 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 141-146.
- YAO Y, HUANG D Q. Design method and its engineering application on a combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2): 141-146.
- [7] 梁剑晖, 郭海庆, 何忠意, 等. 灰色模型预测在真空预压工程中的应用研究 [J]. 河南科学, 2014, 32(8): 1506-1510.
- LIANG J H, GUO H Q, HE Z Y, et al. Application of gray model forecast on final settlement in vacuum preloading engineering [J]. Henan Science, 2014, 32(8): 1506-1600.
- [8] LI B, WU S F, CHU J, et al. Evaluation of two vacuum preloading techniques using model test [C]//HAN J and ALZAMORA D E. Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering, Reston, Va., 2011. American Society of Civil Engineers, 2011: 636-645.
- [9] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [10] 鄢小彬. 组合预测技术及其应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [11] 周传世, 罗国民. 加权几何平均组合预测模型及其应用 [J]. 数理统计与管理, 1995(3): 17-19.
- ZHOU C S, LOU G M. Weight geometric average combination forecast model and its application [J]. Journal of Applied Statistic and Management, 1995(3): 17-19.
- [12] 李秀珍, 孔纪名, 王成华. 最优加权组合模型在滑坡变形预测中的应用 [J]. 自然灾害学报, 2008, 2(2): 53-57.
- LI X Z, KONG J M, WANG C H. Application of combined model with optimum weight in prediction of landslide deformation [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 2(2): 53-57.
- [13] 何习平, 华锡生, 何秀凤. 加权多点灰色模型在高边坡变形预测中的应用 [J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1187-1192.
- HE X P, HUA X S, HE X F. Weighted multi-point grey model and its application to high rock slope deformation forecast [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1187-1192.
- [14] 何芳, 陶涛, 陆国胜, 等. 组合灰色预测模型在水量预测中的应用 [J]. 市政技术, 2007, 25(2): 105-107.
- HE F, TAO T, LU G S, et al. Application of combination grey model in water consumption forecasting [J]. Municipal Engineering Technology, 2007, 25(2): 105-107.
- [15] 李志涛, 张宇峰, 姚藩照, 等. 变权重组合预测模型在生活垃圾产量预测计算中的应用 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 97-101.
- LI Z T, ZHANG Y F, YAO F Z, et al. Combined forecasting model with variable weights for predicting output of municipal solid waste [J]. Journal of NanJin University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 31(2): 97-101.
- [16] 吴亚雄, 谢敏. 基于 BP 神经网络灰色回归组合模型的最大负荷预测 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 46-50+57.
- WU Y X, XIE M. Annual peak load forecasting based on combination model of back propagation neural network and grey regression [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2): 46-50+57.
- [17] 陈忠, 钱宝源. 高层建筑桩基沉降监测及长期变形预测研究 [J]. 工程勘察, 2017, 45(5): 1-6+27.
- CHEN Z, QIAN B Y. Settlement monitoring and long-term deformation prediction for pile foundation of high-rise building [J]. Geotechnical Investigation&Surveying, 2017, 45(5): 1-6+27.
- [18] 王东. GM(1, 1) 灰色模型在真空预压沉降预测中的应用 [J]. 安全与环境工程, 2012, 19(4): 145-147+156.
- [19] 何忠意, 何志刚, 周亚东. 灰色 Verhulst 模型在预压法处理地基中的应用研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊): 195-199+245.

作者简介:



ZHONG F X

仲锋祥 (通信作者)

1978-, 男, 青海互助土族自治县人, 工程师, 水文地质与工程地质专业, 学士, 主要从事地基加固、土工测试研究 (e-mail) zhongfengxiang@gdtxet.com。

(责任编辑 李辉)