

# 桩基沉降量的灰色预测

陈志波<sup>1,2</sup> 简文彬<sup>1,2</sup>

(1. 福州大学环境与资源学院, 福建福州 350002; 2. 福州大学岩土工程与工程地质研究所, 福建福州 350002)

**【摘要】** 利用实测的桩基静载试验数据, 用灰色系统理论建立桩基沉降量的灰色 GM(1, 1) 预测模型, 可以模拟桩基静载试验 P-s 曲线的未知部分。研究表明, 建立的 GM(1, 1) 模型可有效预测桩基沉降量, 对进一步分析桩基的承载性能有理论与实际意义。

**【关键词】** 桩基; 沉降量; 灰色预测

**【中图分类号】** TU 47

## Gray Prediction to the Settlement of Pile Foundation

Chen Zhibo<sup>1,2</sup>

Jian Wenbin<sup>1,2</sup>

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fujian Fuzhou 350002;

2. Institute of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fujian Fuzhou 350002 China)

**【Abstract】** A GM(1, 1) model is established by Gray Theory using observation data of loading tests for pile. The model can be used to predict the unknown part of p-s curve of pile loading tests. The result of study shows that GM(1, 1) model can effectively predict the settlement of pile foundation, and be of the theoretical and actual meaning for further analysing the bearing capability of pile foundation.

**【Key Words】** pile foundation; settlement; gray prediction

### 0 引言

单桩竖向静载荷试验是确定桩基承载力的最基本的方法。现行规范明确规定了静载试验的各项技术要求, 对供设计用及试验用的静载试验均要求加载到极限破坏, 以取得极限承载力<sup>[1,2]</sup>。但是, 在实际工程中, 由于设计的多种方案及各种条件的约束, 许多工程中的试桩并未加载至真正的极限荷载, 不能准确得出单桩极限荷载。本文利用实测的桩基静载试验数据, 用灰色系统理论建立了桩基沉降量预测的灰色 GM(1, 1) 模型, 模拟桩基静载试验 P-s 曲线的未知部分, 经过验证, 达到了预期的效果。

### 1 灰色模型 GM(1, 1) 的建立

GM 模型的实质是利用原始数据列作生成后建立微分方程, 并结合最小二乘法原理求得微分方程的解<sup>[3]</sup>。灰色系统理论对 P-s 曲线的预测的基本原理是以一组单桩竖向静载荷试验的 P-s 曲线为基础, 取该曲线的前几级荷载下沉降原始数据进行分析, 进而对 P-s 曲线的发展趋势作出预测<sup>[4]</sup>。

设有加荷条件下的原始沉降数据列  $x^{(0)} =$

$\{x^{(0)}_1, x^{(0)}_2, \dots, x^{(0)}_n\}$ , 作一次累加生成(即 1-AGO),

$x^{(1)}_k = \sum_{m=1}^k x^{(0)}_m$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ), 得到数据列

$x^{(1)} = \{x^{(1)}_1, x^{(1)}_2, \dots, x^{(1)}_n\}$ , 由此建立下述白化形式的方程(即 GM(1, 1) 模型):

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (1)$$

式中:  $a, u$  为待定参数。

记参数矩阵  $\hat{a} = [a \quad u]^T$ , 按最小二乘法解, 可以得到

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (2)$$

$$\text{式中: } B = \begin{bmatrix} -[x^{(1)}_1 + x^{(1)}_2]/2 & 1 \\ -[x^{(1)}_2 + x^{(1)}_3]/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -[x^{(1)}_{n-1} + x^{(1)}_n]/2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}_2 \\ x^{(0)}_3 \\ \vdots \\ x^{(0)}_n \end{bmatrix}.$$

由式(1),可解得:

$$\hat{x}_{(k+1)}^{(1)} = \left[ x_{(1)}^{(0)} - \frac{\mu}{\alpha} \right] e^{-\alpha k} + \frac{\mu}{\alpha} \quad (3)$$

由式(3),我们就可以得到不同荷载级别下相应的桩顶总沉降量,进而也可以确定桩的竖向抗压承载力值。

### 2 预测模型的检验及其精度的提高

上述预测值是否可信,必须按一定手续与途径进行检验。对于桩基沉降的预测,可以采用后验差检验。

记  $k$  时刻实际值  $x_{(k)}^{(0)}$  与预测值  $\hat{x}_{(k)}^{(0)}$  之差为  $q_{(k)}$ ,  $q_{(k)} = x_{(k)}^{(0)} - \hat{x}_{(k)}^{(0)}$ ,  $q_{(k)}$  即称为  $k$  时刻残差。

记原始数据  $x_{(k)}^{(0)}$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 的平均值为  $\bar{x}$ , 即  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{(k)}^{(0)}$ ,

记残差  $q_{(k)}$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 的平均值为  $\bar{q}$ , 即  $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_{(k)}$ ,

记原始数据方差为  $s_1^2$ ,  $s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{(k)}^{(0)} - \bar{x})^2$ ,

记残差方差为  $s_2^2$ ,  $s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (q_{(k)} - \bar{q})^2$ ,

则下面的指标  $C$  与  $Q$  是后验差检验的两个重要数据:

$C$  称为后验差比值,  $C = \frac{s_2^2}{s_1^2}$ ;

$Q$  称为小误差频率,  $Q = Q \{ |q_{(k)} - \bar{q}| < 0.674 5_{s_1} \}$ ;

指标  $C$  越小越好。 $C$  越小,表示  $s_1$  越大而  $s_2$  越小。 $s_1$  大,表明原始数据离散程度大, $s_2$  小表明残差离散程度小。

指标  $Q$  越大越好。 $Q$  越大,表明残差与残差平均值之差小给定值  $0.674 5_{s_1}$  的点越多,预测精度越高。

按  $C$  与  $Q$  两个指标,可以综合评定预测模型的精度。具体指标见表 1<sup>[3]</sup>。

表 1 预测模型精度评价表

预测精度等级	$Q$	$C$
好	$>0.95$	$<0.35$
合格	$>0.8$	$<0.5$
勉强	$>0.7$	$<0.45$
不合格	$\leq 0.7$	$\geq 0.65$

如果 GM(1, 1)模型检验不理想或不合格,可以考虑建立残差的 GM(1, 1)模型,对原模型加以修正

以提高精度。以残差数列  $q_{(k)}^{(0)} = x_{(k)}^{(0)} - \hat{x}_{(k)}^{(0)}$  经过 1-AGO 生成建立 GM(1, 1)模型,再将残差 GM(1, 1)模型的预测值加在原来相应级的预测值上,即得到修正后的预测值。以此提高预测精度,详见文献 [3]。可反复进行残差 GM(1, 1)模型预测,使预测精度达到很高<sup>[5]</sup>。

### 3 工程应用

#### 3.1 应用实例

某工程基础采用锤击沉管灌注桩,桩设计截面为  $\phi 500$ ,桩身砼强度等级为 C25,桩端持力层为残积砂质粘土。取其中的 320#、423# 两根静压桩的原始沉降数据做预测,各取前面 5 级荷载沉降数据建立 GM(1, 1)模型,预测结果见表 2、表 3 和图 1、图 2。

表 2 320# 桩沉降预测结果

级数	桩顶荷载 $P/kN$	实测桩顶总沉降量 $s_{实}/mm$	预测桩顶总沉降量 $s_{预}/mm$	误差/%
1	192	0.56	0.56	0
2	288	0.77	0.772	0.26
3	384	1.03	1.045	1.46
4	480	1.41	1.394	-1.13
5	576	1.85	1.843	-0.38
6	672	2.41	2.418	0.33
7	768	3.24	3.156	-2.59
8	864	4.15	4.103	-1.13
9	960	5.32	5.317	-0.06
10	1 056		6.875	
11	1 152		8.873	
12	1 248		11.436	

表 3 423# 桩沉降预测结果

级数	桩顶荷载 $P/kN$	实测桩顶总沉降量 $s_{实}/mm$	预测桩顶总沉降量 $s_{预}/mm$	误差/%
1	192	0.22	0.22	0
2	288	0.38	0.377	-0.79
3	384	0.57	0.577	1.23
4	480	0.84	0.831	-1.07
5	576	1.16	1.154	-0.52
6	672	1.55	1.563	0.84
7	768	2.01	2.084	3.68
8	864	2.63	2.745	4.37
9	960	3.45	3.585	3.91
10	1 056		4.652	

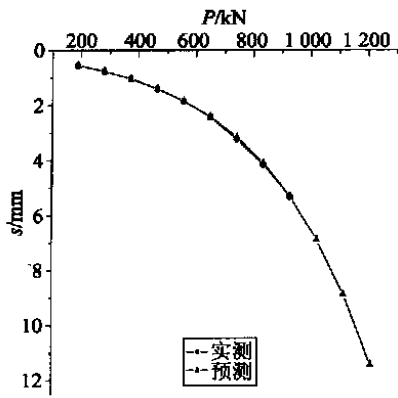


图1 320# 桩沉降曲线

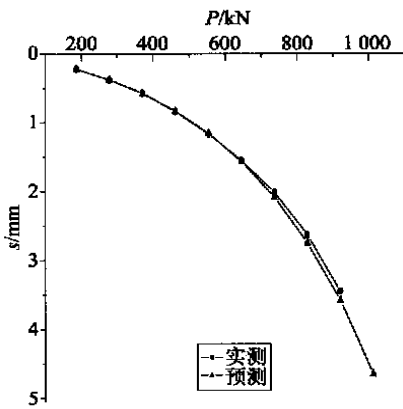


图2 423# 桩沉降曲线

由表2、表3, 预测沉降量与实测沉降量之间的误差均比较小, 最大误差分别为 $-2.59\%$ 、 $4.37\%$ , 均不超过 $5\%$ , 预测效果较好。经后验差检验, 320#、423# 桩的预测精度等级均为好。说明用GM(1, 1)模型来预测桩基沉降是可行的。

3.2 灰色预测GM(1, 1)模型在预测桩基沉降量过程中应该注意以下几点:

1) 取实测的原始沉降数据应尽量靠后取, 避免第1、2级沉降数据, 因静载试验过程中对桩预压与否, 桩顶砂垫层厚度大小等往往会使1—2级的沉降偏离真实情况, 不能反映桩真实的沉降变形特征<sup>[6]</sup>。建议可直接由第2级荷载沉降开始模拟, 可以有效地提高精度(见表4、表5)。

2) 预测尽量多用几级原始数据, 可以提高预测精度, 表2、表3的预测精度明显比表4、表5的高。

3) 预测结束应用后验差检验, 精度不够应用残差模型核准。未经残差模型校准与经过校准后的比较见表6。

4) 当只为预测极限承载力时, 尽量取靠后面的几级数据做预测, 效果更好(见表2、表3、表4、表5相比即知)。

表4 320# 桩不同取数的预测结果

级数	桩顶荷载 $P/\text{kN}$	实测桩顶总沉降量 $s_{\text{实}}/\text{mm}$	4级预测总沉降量 $s_{\text{预}}/\text{mm}$	4级预测误差 %	去首级4级预测总沉降量 $s_{\text{预}}/\text{mm}$	去首级4级预测误差 %
1	192	0.56	0.56	0		
2	288	0.77	0.758	-1.56	0.77	0
3	384	1.03	1.028	-0.19	1.046	1.55
4	480	1.41	1.397	-0.92	1.397	-0.92
5	576	1.85	1.900	2.70	1.845	-0.27
6	672	2.41	2.586	7.30	2.415	0.21
7	768	3.24	3.521	8.67	3.141	-3.06
8	864	4.15	4.797	15.59	4.066	-2.02
9	960	5.32	6.536	22.86	5.245	-1.41

表5 423# 桩不同取数的预测结果

级数	桩顶荷载 $P/\text{kN}$	实测桩顶总沉降量 $s_{\text{实}}/\text{mm}$	4级预测总沉降量 $s_{\text{预}}/\text{mm}$	4级预测误差 %	去首级4级预测总沉降量 $s_{\text{预}}/\text{mm}$	去首级4级预测误差 %
1	192	0.22	0.22	0		
2	288	0.38	0.398	4.74	0.38	0
3	384	0.57	0.605	6.14	0.579	1.58
4	480	0.84	0.878	4.52	0.831	-1.07
5	576	1.16	1.238	6.72	1.155	-0.43
6	672	1.55	1.713	10.52	1.569	1.22
7	768	2.01	2.337	16.27	2.096	4.28
8	864	2.63	3.159	20.11	2.769	5.28
9	960	3.45	4.242	22.96	3.628	5.16

表 6 1114# 桩不同取数的预测结果

级 数	桩顶荷载 P/kN	实测桩顶总沉降量 s <sub>实</sub> /mm	去首级 4 级预总沉降量 s <sub>预</sub> /mm	预测误差 %	经残差校正后总沉降量 s <sub>校</sub> /mm	校正后误差 /%
1	192	0.15				
2	288	0.20	0.20	0	0.20	0
3	384	0.43	0.423	-1.63	0.423	-1.63
4	480	0.69	0.692	2.90	0.692	2.90
5	576	1.02	1.016	-0.39	1.016	-0.39
6	672	1.42	1.407	-0.92	1.407	-0.92
7	768	1.97	1.879	-4.62	1.956	-0.71
8	864	2.57	2.450	-4.67	2.614	1.71
9	960	3.46	3.132	-9.48	3.479	0.55

5)取值应等间距,非等间距则需修正;若出现异常数据也应剔除再经局部生成<sup>[6]</sup>。

#### 4 结 论

灰色理论用于桩基沉降的预测是可行的,且具有较高的预测精度,一般采用 4~5 级原始数据建立 GM(1,1)模型即可得到较满意的结果。建模方法可推广应用于大量桩基静载荷试验中沉降量的预测,为进一步分析桩基承载性能提供依据。本文诚挚感谢福建省建筑科学研究院伊建晋工程师大力支持,在此表示衷心的感谢!

#### 参 考 文 献

1 JGJ 94-94 建筑桩基技术规范

2 GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范.  
 3 邓聚龙.灰色系统基本方法.武昌:华中工学院出版社,1987.44~118  
 4 祝龙根,刘利民,耿乃兴.地基基础测试新技术.北京:机械工业出版社,1999.126~127  
 5 张国祥,朱利香.地基极限承载力的灰色预测.工程勘察,1998(3):14~16  
 6 罗战友.单桩竖向极限承载力的灰色预测:[学位论文].西安:西安建筑科技大学,2001

收稿日期:2003-12-15

(上接第 73 页)

侧壁的外形来评价。由于侧壁主要受的是压应力,而石灰岩的抗压强度一般又较大,而且侧壁工作相对来说容易做,看得见摸得着,所以其结论比之顶板和底板来说也是比较好做的。

#### 5 结 论

论证天然洞体稳定性评价主要是抓两头带中间。天然洞体围岩的顶板、底板、侧壁三者的稳定,

顶板的稳定最重要。围岩顶板的稳定性与天然洞体的形成原因、岩石的成层条件、断面形状、裂隙情况,漏水情况,天然洞体形成和稳定的时间、山体的地质构造条件等密切相关。要结合天然洞体顶板、底板、侧壁三者的稳定性情况综合做出天然洞体稳定性结论。

收稿日期:2003-12-16