

预测单桩极限荷载的实用方法

董清华

(五邑大学 土木工程系, 江门 529020)

[摘 要]用非线性最小二乘法求解指数方程中的有关参数,从而简化了指数方程法预测基桩极限荷载的计算过程。结合工程实例,分析了双曲线法,灰色系统理论方法及指数方程法在基桩极限荷载预测中的应用效果。

[关键词]指数方程法 预测 单桩极限荷载

[中图分类号]TU473.1 [文献标识码]A [文章编号]10495-5331(2002)02-0082-03

0 引言

桩基础设计中,确定单桩承载力是一项重要工作。单桩承载力的确定方法有静载试验法,规范经验参数法,静力触探法,动力法等^[1]。一般认为:静载试验与实际最为符合。实际工程中,由于种种原因,静载试验未做至极限荷载,如何根据有限的静载试验数据,预测出基桩极限荷载,就显得十分重要。常用的预测方法有双曲线法^[2],灰色系统理论方法^[3],指数方程法^[4]及抛物线法等。本文用非线性最小二乘法求解指数方程中的有关参数,简化了指数方程法的计算过程,使其更便于应用。并结合工程实例,分析了双曲线法,灰色系统理论方法及指数方程法的预测效果。

1 方法原理

指数方程法认为静载试验所加荷载 P 与实测沉降 s 符合如下指数方程^[4]

$$P = P_f(1 - e^{-\alpha s}) \quad (1)$$

式中 P_f (kN) 为桩破坏荷载; α (1/mm) 为衰减因子。由(1)式可得

$$s = -\frac{1}{\alpha} \ln(1 - \frac{P}{P_f}) \quad (2)$$

(2) 式中如已知 α 与 P_f ,则由静载试验所加荷载序列 $P = (P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m)$,可算得一沉降序列 $S = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m)$ 。设静载试验中实测沉降序列为 $S' = (S_1', S_2', \dots, S_i', \dots,$

$S_m')$, 定义如下向量 $x = (\alpha, P_f)^T$, 将 S_i' 在 $x^{(k)}$ 处展开为泰勒级数并取其线性项可得

$$S_i' \approx S_i(x^{(k)}) + \nabla S_i(x^{(k)})(x - x^{(k)})$$

则有

$$\Delta S \approx A \Delta x \quad (3)$$

式中 S 为静载试验实测沉降数据序列 S' 与 (2) 式计算数据序列 S 之差; A 为 m 行 2 列 Jacobi 矩阵

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial S_1}{\partial P_f} \\ \frac{\partial S_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial S_2}{\partial P_f} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial S_m}{\partial \alpha} & \frac{\partial S_m}{\partial P_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} \ln(1 - \frac{P_1}{P_f}) - \frac{P_1}{P_f(P_f - P_1)\alpha} \\ \frac{1}{\alpha^2} \ln(1 - \frac{P_2}{P_f}) - \frac{P_2}{P_f(P_f - P_2)\alpha} \\ \dots & \dots \\ \frac{1}{\alpha^2} \ln(1 - \frac{P_m}{P_f}) - \frac{P_m}{P_f(P_f - P_m)\alpha} \end{bmatrix}$$

x 为初始参数修改量

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta P_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

就本文来讲,(3) 式多为超定方程,没有通常意义下的解,可求其最小二乘解。为此,定义如下目标函数

$$\phi(x) = \Delta S - A \Delta x \quad (5)$$

求该目标函数极小值,将 $\phi(x)$ 对 x 求一阶导数并令其为 0,可得:

$$A^T A \Delta x = A^T \Delta S \quad (6)$$

式中 A^T 为 A 的转置矩阵。矩阵 $A^T A$ 往往是严重病态的,本文用 Marquardt 方法求解,即

$$\Delta x = (A^T A + \beta I)^{-1} A^T \Delta S \quad (7)$$

[收稿日期]2001-04-26;[修订日期]2001-10-25;[责任编辑]李石梦。

[作者简介]董清华(1956年-),男,1982年毕业于河北地质学院勘查地球物理专业,1996年于成都理工大学获博士学位,现为五邑大学土木工程系副教授,研究生导师,主要从事岩土工程与工程物探的教学与科学研究。

式中 I 为单位矩阵; β 为阻尼因子。

由 (7) 式求得 x 后,代入下式

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x \tag{8}$$

式中 k 为迭代次数。开始计算时,令 $k = 0$,得初始模型参数 $x^{(0)}$ 。在 $P \sim S$ 曲线尾段取三点 $M_1 = (P_1, S_1), M_2 = (P_2, S_2), M_3 = (P_3, S_3)$,由下式可得

$$\alpha^{(0)} = \frac{1}{S_3 - S_2} \ln \frac{(S_3 - S_2)(P_2 - P_1)}{(P_3 - P_2)(S_2 - S_1)} \tag{9}$$

将 $\alpha^{(0)}$ 代入 (1) 式,并取点 M_2 或 M_3 值,可求得 $P_f^{(0)}$,从而得 $x^{(0)} = (\alpha^{(0)}, P_f^{(0)})^T$ 。由 (7)、(8) 两式进行迭代计算,直到满足给定的停止迭代条件为止,最终得解

$$x' = x^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \alpha \\ P_f \end{bmatrix} \tag{10}$$

取 $P \sim S$ 曲线斜率 $9S_i/9P_i \geq 0.1 \text{ mm/kN}$ 时的前一级荷载值 P_{i-1} 为其极限荷载值^[5],为此,将 (1) 式求导并使其等于 10 kN/mm ,从中解得 S 后再代入 (1) 式,得极限荷载表达式

$$P_u = P_f - \frac{10}{\alpha} \tag{11}$$

将 (10) 式计算结果代入上式可得基桩极限荷载值 P_u 。

2 预测实例分析

实例一

实例一为广州市珠光路珠光小区 C5 栋 A4 号试桩,该桩为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 钢筋混凝土预制桩,桩入土深度 6.1 m ,桩周土层自上而下为:第一层杂填土,厚 3.6 m ;第二层淤泥质土,厚 1.9 m ;第三层细砂,下部含有粗、砾砂,厚 6.2 m ;其下为粉质粘土。桩尖位于第三层细砂,且进入该层 0.6 m 。静载试验成果如图 1 所示。

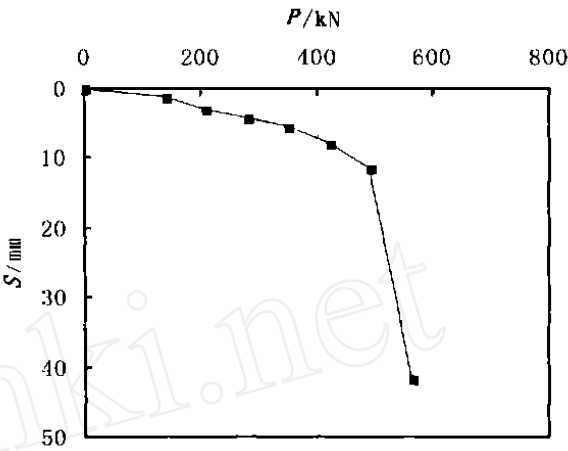


图 1 A4 号桩静载试验 $P \sim S$ 曲线

由 $P \sim S$ 曲线斜率法可得该桩极限荷载为 490 kN 。现假设静载试验未做至极限荷载,对不同的最大加载,用三种方法预测桩的极限荷载,其结果如表 1 所示。

表 1 三种方法预测结果随最大加载的变化

最大加载 / kN	双曲线法		灰色系统理论方法		指数方程法		实际极限 荷载/ kN
	预测值	相对误差/ %	预测值	相对误差/ %	预测值	相对误差/ %	
490	490	0.0	560	14.29	505	3.06	490
420	420	- 14.29	560	14.29	506	3.26	490
350	420	- 14.29	490	0.0	480	- 2.04	490
280	350	- 28.57	420	- 14.29	360	- 26.53	490
平均相对误差		14.3		10.7		8.7	

表 1 中三种预测方法所用的极限荷载判定方法均为 $P \sim S$ 曲线斜率法,不同之处在于本文所用的双曲线法及灰色系统理论法均首先对 $P \sim S$ 曲线的趋势进行预测,然后再用 $P \sim S$ 曲线斜率法得到基桩极限荷载预测值;指数方程法则将 $P \sim S$ 曲线斜率法直接用于 (11) 式的推导过程中,最终的极限荷载是由 (11) 式直接算出的。从预测结果来看,指数方程法与实际符合最好,其误差也最小;双曲线法虽误差较大,但预测结果是偏于安全的,其值可以采用;灰色系统理论方法预测结果偏大,比实际值高出一级,这在工程上应引起注意。由表 1 还可看出,随着最大加载的增大,三种方法预测值均有向实际值

逼近的趋势。当然,用于预测的 $P \sim S$ 曲线至少应做出第一拐点。

实例二

本例与实例一为同一工地, C5 栋 A3 号试桩。桩型及截面同实例一,桩入土深度为 6.8 m ,地层与上例相同,桩尖进入第三层细砂 1.3 m 。其静载试验曲线如图 2 所示。由图 2 可知,该桩未做至极限荷载,但已出现第一拐点,其极限荷载预测结果见表 2。

由表 2 可知,双曲线法与指数方程法预测结果非常接近,均比原工程取值高了一级,灰色系统理论方法预测结果偏大,这一点与实例一相同。结合 A4

号试桩资料分析,本文认为取前两种方法预测结果较为合理。

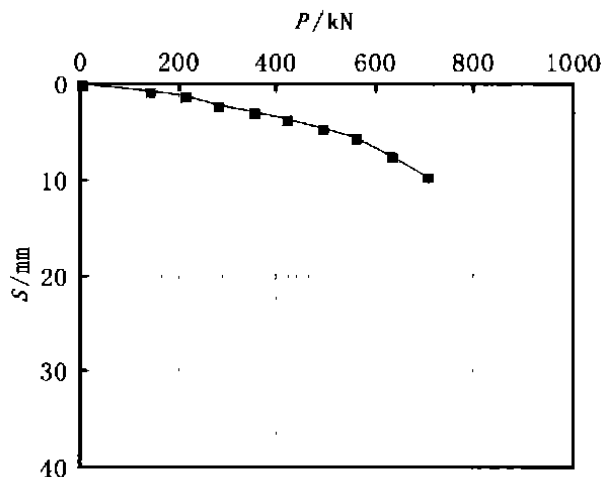


图2 A3号桩静载试验 $P-S$ 曲线

表2 A3号桩极限荷载预测值

预测方法	双曲线法	指数方程法	灰色系统方法	原工程取值
预测值/kN	770	766	980	700

实例三

实例三为广东省五邑大学伟伦大厦工程 117 号试桩,该桩为 $\phi 400$ mm 预制钢筋混凝土管状,桩入土深度 28.5 m,桩周土:第一层杂填土,厚 1.95 m;第二层淤泥质土,厚 16.3 m;第三层砾砂,厚 1.5 m;第四层为强风化片岩,厚 18.55 m。桩尖位于第四层强风化层,且进入该层 8.75 m。静载试验曲线如图 3 所示。由图 3 可知,该桩未做到极限荷载,已做出第一拐点,用三种方法预测结果如表 3 所示。

表3 117号桩极限荷载预测值

预测方法	双曲线法	指数方程法	灰色系统方法	原工程取值
预测值/kN	4200	3359	4760	2800

由表 3 可知,预测结果较为分散,结合当地工程经验,本文认为:取三者中小值,即指数方程法预测

值 3359 kN 作为该桩极限荷载较为合理。本例也表明:在实际工程中,应用多种方法进行预测,如用单一方法,很可能得出与实际相差甚远的结果。

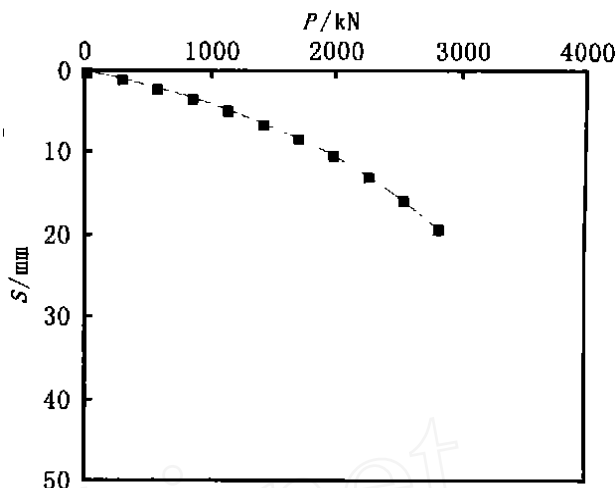


图3 117号桩静载试验 $P-S$ 曲线

3 结论

本文用非线性最小二乘法求解指数方程中的参数,从而使指数方程法预测基桩极限荷载的计算过程得到了简化,使其更便于应用。结合工程实例,对三种方法预测结果作了分析,认为指数方程法适用性强,预测结果可靠,具有明显的优势。应说明的是:在实际工程中,应采用多种方法进行预测,并结合当地工程经验,才能得到较为合理的预测结果。

[参考文献]

- [1] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 赵明华. 桥梁桩基计算与检测[M]. 北京:人民交通出版社, 2000,127~130.
- [3] 包 华. 运用灰色模型推测桩极限承载力[M]. 建筑结构, 1997,(9):11~12.
- [4] 修朝英,李大展. 单桩垂直静载试验 $P-S$ 曲线的数学描述和极限荷载的预测[J]. 岩土工程学报,1988,10(6):64~73.
- [5] 建筑地基基础设计规范(GBJ 7-89).

A PRACTICAL PREDICTING METHOD OF ULTIMATE LOAD OF SINGLE PILE

DONG Qing - hua

(Department of Civil Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020)

Abstract :Non - linear Least Squares Algorithm is used to solve the parameters in the exponent equation , and the calculation procedure of predicting ultimate pile load by means of the exponent equation is simplified. Predicting effects of hyperbola method , grey theory method and exponent equation method are studied through predicting the field measured data.

Key words :exponent equation method , prediction , ultimate load of single pile