

单桩承载力预测的 PSO-Logistic 模型

吕锡岭

(浙江省大成建设集团有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 分析了桩的荷载传递规律, 指出在桩顶静荷载作用下, 单桩承载力的变化经历了发生、发展、成熟并趋于饱和的过程。运用生物生长观点, 将 Logistic 函数模型用于单桩极限荷载的预测中, 给出了模型参数估计的粒子群优化 (PSO) 方法, 并通过实例分析将 PSO-Logistic 模型与常用预测模型进行了对比。结果表明: 桩的荷载-沉降曲线可用 Logistic 函数描述, 且 PSO-Logistic 模型的预测精度更高。

关键词: 管桩; 极限承载力; 预测; Logistic 粒子群优化

中图分类号: TU473.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)06-0066-05

The PSO-Logistic Model for Single Pile Capacity Prediction

Lü Xiling

(Zhejiang Dacheng Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: After analyzing the load transfer law of pile, points out the bearing capacity of single pile has undergone the process of occurrence, development, maturity and saturation under the pile top static loading. Using the biological growth views, applies the Logistic function models to predict the ultimate load of single pile, and gives the particle swarm optimization (PSO) method for its parameter estimation. Through a case analysis, compares the PSO-Logistic prediction model with common used models. The results show that: the curve of pile load-settlement can be decrypting by Logistic function and it has high prediction accuracy.

Keywords: tubular pile; ultimate bearing capacity; forecast; Logistic particle swarm optimization

0 引言

近年来, 随着国民经济建设快速发展, 各地交通流量迅速增加, 在沿海地区, 许多高速公路的通行能力已不能满足经济发展的需求, 急需对已有高速公路进行拓宽扩容^[1]。自 1997 年以来, 我国先后有广佛、沪杭甬、沪宁等多条高速公路进行了拓宽改造。由于沿海地区地质条件差, 多为深厚软土地基, 其强度低、压缩性大, 易造成新老路基差异沉降大, 给拓宽工程带来大量危害, 因此, 沿海地区拓宽工程的地基处理是拓宽成败的关键因素之一。

目前, 拓宽工程中软土地基的处理方法有多种, 其中预应力管桩以地基处理效果好、新老路基差异沉降小、施工快捷等优点得到了广泛应用^[2]。确定管桩的极限承载力是拓宽工程中路基设计的重要内容, 由于影响桩基承载力的因素众多, 现有桩基理论还无法获得可靠的计算结果, 一般需要进行试验研究。试验确定桩基极限承载力的方法有静载试桩法和动力试桩法, 动力试桩存在一些很难避免的隐患, 且人为因素影响较大, 静荷载试验被认为是较准确、直观的方法^[3-4]。静荷载试验是通过在桩顶分级施加轴向静载, 记录桩顶荷载(Q)-位移(s)曲线, 进而确

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 浙江省交通建设行业协会科研基金资助项目 (2010A06)

作者简介: 吕锡岭 (1965-), 男, 浙江杭州人, 浙江省大成建设集团有限公司高级工程师, 主要从事高速公路施工技术与质量控制研究, E-mail: dcxiling@163.com

定桩的极限承载力。但由于实践中很多被检测的桩本身就是工程桩,不能进行破坏性试验,所获得的是一条不完整的 $Q-s$ 曲线,因此,根据已有信息对桩基的极限承载力进行预测是很有必要的,且目前已有多种预测方法。

本文参考自然界生物生长过程,分析静荷载作用下桩的 $Q-s$ 曲线,将 Logistic 模型应用到单桩极限承载力的预测中,并在实例分析的基础上与常用预测模型进行了对比,验证了 Logistic 模型的合理性与预测精度。

1 单桩承载力的发展过程

在桩顶荷载作用下,桩的承载力包括桩侧阻力和桩端阻力 2 部分,如图 1 所示。在加载初期,荷载先由桩侧摩擦阻力支撑,随着荷载增加时,发生侧摩擦阻力的桩身长度逐渐增大,桩顶荷载基本上仍由桩侧摩擦阻力支撑,而桩端支撑的阻力较小。当桩侧摩擦阻力在整个桩身上全部发挥达到极限后,继续增大的荷载则由桩端阻力来承担。随着桩端持力层的压缩和塑性挤出,桩顶位移增长速率逐渐增大,直至桩端阻力达到极限,位移急剧增大而破坏,此时桩所承受的荷载即为桩的极限承载力。

在静荷载作用下,典型的桩顶 $Q-s$ 曲线见图 2。

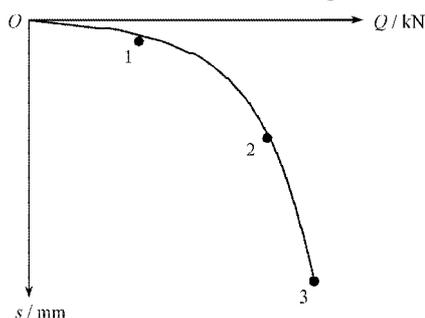


图 1 桩的荷载传递
Fig. 1 The load transfer of pile

图 2 静荷载作用下桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 The $Q-s$ curve of piles under static load

根据桩顶的 $Q-s$ 曲线,可将桩的承载力变化分为 3 个阶段^[5]:

1) 0~1 段,承载力变化的弹性阶段,桩身各点的侧摩擦阻力都小于极限侧摩擦阻力。

2) 1~2 段,承载力变化的弹塑性阶段,当桩侧摩擦阻力达极限时(点 1),桩侧土达到塑性状态,失去抗变形能力,随着桩顶荷载增大,塑性范围不断扩大,桩顶的抗变形刚度不断下降, $Q-s$ 呈非线性关

系,直到桩长范围的桩侧土均达到塑性状态(点 2)。

3) 2~3 段,新增加的荷载全部由桩端承担,直到持力层破坏,桩的承载力达最大值。

可见,静荷载作用下单桩的承载力变化是一个动态发展过程,经历了事物发生(开始加载)、发展(弹性、弹塑阶段)、成熟并趋于饱和(达到极限承载力)的过程,这一过程与生物的生长过程具有一定的相似性。

2 单桩承载力预测的 Logistic 模型

2.1 Logistic 函数模型

Logistic 函数模型为一条 S 形曲线,可以反映事物的生长发展过程,在生态学、人口学等领域得到了广泛应用,其具体函数形式为^[6]:

$$y_i = Y / (1 + ae^{-bt_i}), \quad (1)$$

式中: Y 为 y_i 的极限参数,即饱和值;

a 为未知参数;

b 为速度增长因子;

t_i 为不含误差的确定性时间变量。

Logistic 曲线存在一个拐点,曲线过此点由下凹变成上凸,表明在拐点前曲线增长率逐渐变大,拐点后增长率逐渐变小,最后达到饱和状态。

Logistic 是一种时间函数模型,但该时间是广义的,对于非时间物理量同样适用。将该模型用于桩基承载力研究时,可将式(1)表示为:

$$s_i = S / (1 + ae^{-bt_i}), \quad (2)$$

式中: s_i 为桩顶位移,单位为 mm;

S 为最终沉降量,单位为 mm;

a 和 b 为待求参数;

p_i 为荷载,单位为 kN。

2.2 Logistic 模型参数估计的 PSO 算法

当 Logistic 模型用于单桩极限承载力预测时,其关键是参数 S 、 a 、 b 的估计。目前,可用于参数估计的方法较多,如最小二乘法、神经网络法、支持向量机(support vector machine, SVM)、遗传算法等,文献[7]提出了参数估计时计算初始值的三段法。本文采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[8]进行参数估计。

PSO 算法源于对鸟群捕食行为的研究,通过群体中个体之间的协作和信息共享寻求最优解。PSO 算法是一种进化算法,一般从随机解出发,通过迭代寻找最优解,根据适应度评价解的品质,追随当前搜索的最优值寻找全局最优。

PSO算法的进化方程为:

$$\begin{cases} v_m^k = v_m^{k-1} + c_1 R_1 (p_{best_i} - Z_{in}^{k-1}) + c_2 R_2 (g_{best_i} - Z_{in}^{k-1}), \\ p_{best_i} = \max [F(Z_i^k)] \rightarrow Z_i^p, \\ Z_i^k = (Z_{i1}^k, Z_{i2}^k, \dots, Z_{in}^k), \\ V_i^k = (V_{i1}^k, V_{i2}^k, \dots, V_{in}^k), \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 为粒子数, $i=1, 2, \dots, m$;

k 为迭代次数;

n 为空间维数;

c_1 和 c_2 为加速常数;

R_1 和 R_2 为介于 $[0, 1]$ 间的随机数;

v_m^k 为粒子 i 当前飞行速度;

g_{best_i} 为整体粒子群在历代搜索过程中最佳适应度值所对应的解;

p_{best_i} 为第 i 个粒子的个体最优解, 即为第 i 个粒子最佳适应度值所对应的解。

PSO算法在各类优化问题中得到了广泛的应用, 并且许多计算软件中都提供其算法单元, 可以直接调用。如 1stopt 不仅提供了粒子算法, 而且采用全局优化法, 计算时不用提供参数的初始值, 可以自由设置迭代次数。

3 实例分析

3.1 工程概况

本文分析工程为上三高速SK1+260~SK4+494段, 为上虞枢纽互通区被交路主线。由于上虞枢纽匝道接入上三线主线, 该段需对主线进行拓宽为6车道或8车道。

地质勘察表明, 该路段表层为耕植土, 厚度为0.3~0.6 m, 应清除, 下部为淤泥质粉土, 厚约7.4~28.2 m, 分布不连续。软土层强度低, 应进行地基处理, 原上三线本路段采用了超载预压、塑板加超载预压、水泥搅拌桩的处理方式。自通车以来, 已产生沉降7~20 cm不等, 在桥台锥坡等处可见明显的沉降痕迹。为了提高地基承载力, 使新老地基性质基本相同, 避免或尽可能减小拓宽工程的差异, 在SK1+260~SK1+340段两侧各80 m, 采用管桩处理, 管桩打穿软土层, 桩径为400 mm, 桩长为34 m。

3.2 单桩极限承载力静荷载试验

管桩施工结束后, 按设计要求对SK1+260~SK1+340段抽选的3根管桩进行了极限承载力静荷载试验。图3为1#试验桩的荷载-位移($Q-s$)曲线。在最大荷载550 kN作用下, 桩顶沉降量为23.27 mm, 荷载-位移曲线为缓变型。根据规范可确定该桩的极限承载力为550 kN, 满足设计要求。

由于该桩为工程桩, 不能进行破坏性试验, 所以试验并没能获得完整的荷载-位移曲线, 最大荷载作用下的位移也没有达到40 mm, 这使得按最大荷载确定桩的极限承载力是很保守的, 有必要对桩的极限承载力作进一步分析。

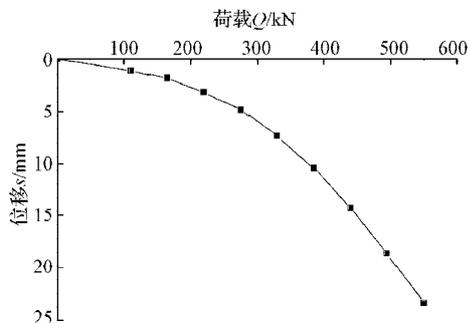


图3 1#管桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 3 The $Q-s$ curve of Pile 1

3.3 基于 PSO-Logistic 模型的单桩承载力预测

按照上文提出的 Logistic 预测模型, 在 1stopt 中编写计算代码, 并调用 PSO 算法, 将种群数设为 20, c_1 和 c_2 均设为 2.05。经过 3 000 次迭代后获得模型的 3 个参数分别为: $S=38.416$ mm, $a=72.406$, $b=0.0085$ 。各级荷载作用下的位移预测值见表 1。

表 1 1#管桩承载力的预测值

Table 1 The predicted value of bearing capacity for pile 1

加载级数	荷载 / kN	实测位移 / mm	预测位移 / mm	误差 / %
1	110	1.12	1.31	17.11
2	165	1.92	2.06	7.13
3	220	3.24	3.19	-1.57
4	275	4.85	4.86	0.24
5	330	7.42	7.23	-2.55
6	385	10.45	10.40	-0.50
7	440	14.25	14.32	0.46
8	495	18.59	18.72	0.72
9	550	23.27	23.19	-0.36

从表 1 可看出, 第 1 级荷载作用下预测值与实测值间差异较大, 但随着荷载增大, 预测值的精度越来越高, 当荷载加载到 550 kN 时 (第 9 级), 预测值和实测值间的误差仅为 -0.36%, 预测值的精度较高。

3.4 与常用预测模型对比

由单桩静荷载试验获取的 $Q-s$ 曲线分析桩的极限承载力, 一直以来都是桩基研究的热点, 研究人员先后提出了多种预测模型, 如双曲线模型、指数模型、幂函数模型等。也有些学者将灰色理论 (GM (1, 1))、人工神经网络 (ANN)、支持向量机等方法应用到桩基承载力的预测中。

常用双曲线函数模型为

$$Q = s / \left(\frac{1}{K_1} + \frac{s}{Q_m} \right), \quad (4)$$

式中： Q 为桩顶荷载，单位为 kN；
 s 为桩顶位移，单位为 mm；
 K_1 为初始抗拔刚度，单位为 kN/mm；
 Q_m 为极限抗拔力渐进值，单位为 kN。
 指数函数模型为

$$Q = Q_m [1 - \exp(-K_1 s / Q_m)] \quad (5)$$

图4为基于 Logistic 模型、双曲线模型和指数模型的预测值与实测值的 $Q-s$ 曲线对比图。

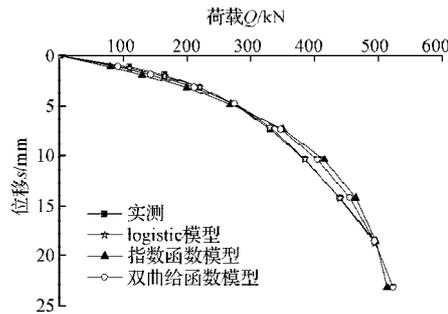


图4 不同预测模式的 $Q-s$ 曲线对比

Fig. 4 Comparison of $Q-s$ curves for different Prediction models

据图4可知，由双曲线模型和指数模型得到的预测 $Q-s$ 曲线与实测曲线有明显差异，特别是随着荷载增大，差异越明显，用于桩的极限承载力预测时，其结果明显会偏小，而 Logistic 模型的预测曲线与实测曲线的吻合度较高，可见，Logistic 模型更适合用于单桩极限承载力的预测。

3.5 其它工程的验证

文献[10]对2根型号分别为 PHC-500(125)AB-C80-10,10,11(81#)和PC-500(100)A-C60-9,7(105#)的工程桩进行了静载试验，试验结果见表2。为了分析 PSO-Logistic 模型应用于其它工程中的推广能力，进一步以表2中的数据进行分析，将 PSO-Logistic 模型的预测结果也列于表2中。分析可知，第1级荷载下的预测误差较大，但随着荷载增大，预测精度越来越高，第9级荷载下的误差仅为 -1.37% 和 -1.36%。

图5为2根测试桩的预测曲线与实测曲线对比。从图中可见，2根桩的预测曲线都与实测曲线有较好的吻合度。

表2 预测值与实测值对比

Table 2 Comparison of predicted values and measured values

加载级数	测试与分析项目							
	81#				105#			
	荷载/kN	实测位移/mm	预测位移/mm	误差/%	荷载/kN	实测位移/mm	预测位移/mm	误差/%
1	560	0.60	0.89	48.55	225	0.64	1.01	58.20
2	884	1.33	1.48	10.99	425	1.33	1.42	6.92
3	1 164	2.24	2.24	0.17	625	2.08	1.98	-4.80
4	1 444	3.47	3.33	-3.99	825	2.91	2.73	-6.35
5	1 724	4.97	4.79	-3.65	1 025	3.86	3.69	-4.31
6	2 004	6.70	6.60	-1.47	1 225	4.95	4.91	-0.82
7	2 284	8.53	8.66	1.50	1 425	6.25	6.37	1.92
8	2 564	10.52	10.76	2.32	1 625	7.84	8.04	2.49
9	2 844	12.88	12.70	-1.37	1 825	9.96	9.83	-1.36

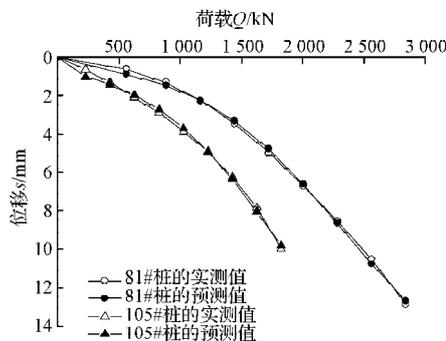


图5 预测曲线与实测曲线的对比

Fig. 5 Comparison of predicted curves and measured curves

文献[11]对1根桩长为88.64 m，直径为1 100 mm的超长直径钻孔灌注桩进行了静载试验，并建立了单桩的极限承载力预测 GM(1,1)模型，其具有较高的预测精度（平均相对误差为1.54%）。为了对比，现

调用本文建立的 PSO-Logistic 模型进行分析，将实测值、GM(1,1)模型预测值和本文方法的预测值绘制在同一坐标内，如图6所示。

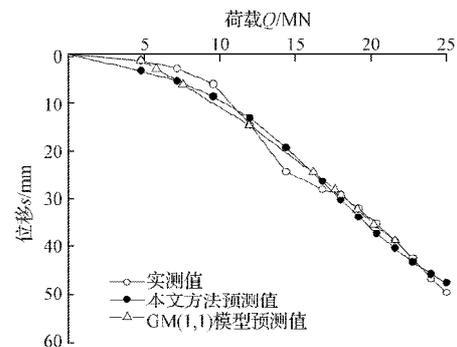


图6 超长桩的实测与预测曲线

Fig. 6 The predicted and measured curves of a super-long pile

由图6可知, GM(1,1)模型和PSO-Logistic模型的预测和实测曲线吻合都较好, 可见, 本文提出的PSO-Logistic模型具有较大的推广价值。

4 结论

1) 桩的承载力变化规律是一个渐进的发展过程, 同生物生长过程一样, 经历了事物发生、发展、成熟并趋于饱和(极限)的过程。

2) 静荷载作用下桩的荷载-沉降曲线可用Logistic模型描述。

3) Logistic模型的参数估计有多种方法, 采用粒子群优化(PSO)算法可有效获得全局最优解。

4) 实例分析表明, PSO-Logistic模型用于单桩承载力预测时, 预测精度随荷载增大而提高。PSO-Logistic模型比双曲线模型和指数模型更适合用于单桩极限承载力的预测, 模型具有较大推广价值。

参考文献:

- [1] 李茂英, 曾庆军, 莫海鸿, 等. 高速公路拓宽工程沉降控制复合地基优化设计[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 535-540.
Li Maoying, Zeng Qingjun, Mo Haihong, et al. Optimum Design of Composite Foundation According to Settlement Control for Extension Project of Expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 535-540.
- [2] 刘观仕, 孔令伟, 李雄威, 等. 高速公路软土路基拓宽粉喷桩处治方案分析与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 309-315.
Liu Guanshi, Kong Lingwei, Li Xiongwei, et al. Analysis of Treatment Scheme for Soft Foundation in Expressway Widening Project and Its Verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 309-315.
- [3] 陈进光, 冷伍明. 粉喷桩单桩竖向抗压极限承载力预测方法[J]. 勘察科学技术, 2004(4): 13-16.
Chen Jinguang, Leng Wuming. Study on Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Cement-Soil Mixed Pile[J]. Site Investigation Science and Technology, 2004(4): 13-16.
- [4] 王之军, 刘建平, 袁加贝. 用函数模型外推法预测抗拔桩极限承载力[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2005(9): 12-14.
Wang Zhijun, Liu Jianping, Yuan Jiabei. Forecast of Extreme Limit of Anti-lifting Pile's Bearing Capacity Function Model of Extrapolation[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2005(9): 12-14.
- [5] 李亮, 魏丽敏. 基础工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 217-222.
Li Liang, Wei Liming. Foundation Engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 217-222.
- [6] 程毛林. 逻辑斯蒂曲线的几个推广模型与应用[J]. 运筹与管理, 2003, 12(3): 85-88.
Cheng Maolin. Several Promote Model of Logistic Curve and Its Application[J]. Operations Research and Management Science, 2003, 12(3): 85-88.
- [7] 莫云, 岳昊, 胡斌, 等. 基于Logistic预测模型的地铁隧道地表沉降预测研究[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(1): 115-119.
Mo Yun, Yue Hao, Hu Bin, et al. A Study of Logistic Equation Applied to Predicting Ground Settlement Induced by Subway Tunneling Work[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(1): 115-119.
- [8] 高尚, 杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 3-5.
Gao Shang, Yang Jingyu. Swarm Intelligence Algorithm and Its Application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 3-5.
- [9] 李森, 唐孟雄. 抗拔桩荷载-位移曲线拟合模型的比较分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 735-739.
Li Sen, Tang Mengxiong. Contrast Analysis on Prediction Models for Load-Displacement Curve of Uplift Pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 735-739.
- [10] 周晓杰. 基于灰色预测理论的单桩极限承载力预测分析[J]. 芜湖职业技术学院学报, 2010, 12(2): 31-34.
Zhou Xiaojie. Prediction and Analysis on Ultimate Bearing Capacity of Single Pile Based on Gray Forecasting[J]. Journal of Wuhu Vocational Institute of Technology, 2010, 12(2): 31-34.
- [11] 张树传. 灰色系统参数识别方法对桩承载力预测的影响[J]. 福建建筑, 2010(11): 64-67.
Zhang Shuchuan. Affection of Parameter Identification Method of Gray Theory in Predicting Overlength Pile Bearing Capacity[J]. Fujian Architecture & Construction, 2010(11): 64-67.

(责任编辑: 李玉珍)