

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1331-04

锚杆荷载-位移曲线的指数函数模型研究

应志民, 张 洁, 尚岳全

(浙江大学 建筑工程学院防灾工程所, 杭州 310027)

摘 要: 利用现场抗拔试验测取锚杆荷载与锚杆位移的关系曲线(P - S 曲线), 确定锚杆的极限荷载标准值, 必须进行破坏性试验。结合锚杆抗拔试验数据, 开展锚杆 P - S 曲线的数学模型研究, 探讨了双曲线模型和指数模型模拟锚杆 P - S 曲线的效果。结果表明, 指数模型能较好地模拟锚杆 P - S 曲线, 其对极限承载力的预测也符合实际。

关 键 词: 锚杆; 极限承载力; 双曲线模型; 指数模型

中图分类号: TU 323; TB 115

文献标识码: A

Exponential model for simulating load-displacement curve of anchor rod

YING Zhi-min, ZHANG Jie, SHANG Yue-quan

(Institute of Disaster Prevention, College of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Making use of the load and displacement curve of anchor rod (shorted for P - S curve) acquired in the field pull-out tests, we can make sure the ultimate bearing capacity of anchor rod; but we must proceed destructiveness experiment. By developing the mathematical model research of the P - S curve of anchor rod, the hyperbolic model and exponential model that predict the ultimate bearing capacity of anchor rod have been contrasted and analyzed referring to the data of pull-out tests of anchor rod; it is shown that the exponential model is better suited for simulating the P - S curve of anchor rod and predicting ultimate bearing capacity of anchor rod.

Key words: anchor rod; ultimate bearing capacity; hyperbolic model; exponential model

1 引 言

在基坑维护、边坡加固、地下结构抗浮等领域, 大量使用土层锚杆。但由于岩土结构的复杂性, 许多锚杆技术问题仍未得到很好地解决。在进行土锚设计时往往带有经验性, 一般是进行锚杆做抗拔试验确定锚杆的极限承载力, 在实际工程施工中, 每个工程的现场抗拔试验锚杆不应少于 3 根^[1]。通过现场抗拔试验测取锚杆静荷载与锚杆端部位移的关系曲线(P - S 曲线)来确定锚杆的极限荷载标准值, 这方法无疑是直观和可靠的, 但为测得完整的 P - S 曲线必须进行破坏性试验, 要花费很多的时间和经费。因此, 获得准确的极限承载力的抗拔试验检测面小, 影响了试验结果的代表性^[2]。在实际应用和理论分析中, 可以对锚杆的 P - S 曲线进行数学描述。如果能通过理论分析找到 P - S 曲线的数学描述方法, 就可以利用 P - S 曲线的数学描述公式预测锚杆的极限承载力。因此, 研究锚杆的数学模型, 对锚

固工程的进一步研究具有重要意义。

2 锚杆和桩的 P - S 曲线的比较

典型的锚杆抗拔试验 P - S 曲线如图 1(a)所示^[3]。由图可知, 该曲线由 3 段组成: 第 1 阶段(OA 段)为弹性变形段, 基本上为一直线; 第 2 阶段(AB 段)为弹塑性混合变形阶段, 其关系为曲线段, 随着荷载的增大, 锚杆长度方向上部分区段内砂浆与孔壁周边的剪应力达到极限平衡而开始产生塑性变形, 形成局部塑性区, 而其余区段仍为弹性变形工作阶段, 随着荷载的进一步增大, 塑性区逐步扩展; 第 3 阶段(BC 段)为破坏段, 此时砂浆与孔壁周边的剪切破坏面沿锚杆全长贯通, 锚杆抗拔力仅由砂浆与孔壁周边的摩阻力提供, 每增加较小的拉力就产生很大的位移, 甚至有的试验锚杆抗拔力还有所降低。

桩的极限承载力可通过载荷试验确定, 典型的单桩荷载与沉降关系的 P - S 曲线如图 1(b)所示^[4]。

由图可知, P - S 曲线也可分为 3 个阶段: 第 1 阶段 (OA 段) 为弹性变形阶段, 呈直线形态, 桩土体系呈弹性状态; 第 2 阶段 (AB 段) 为弹塑性变形阶段, 随荷载增加, 桩土体系进入弹塑性状态; 第 3 阶段 (BC 段) 为破坏阶段, P - S 关系表现出与 S 轴近于平行的直线段, 达到破坏荷载, 桩土体系完全丧失承载能力, 桩身出现连续下沉。

比较锚杆抗拔和桩的抗压 P - S 曲线可见, 二者曲线具有相似性, 都由 OA , AB 和与 S 轴基本平行的 BC 段组成。

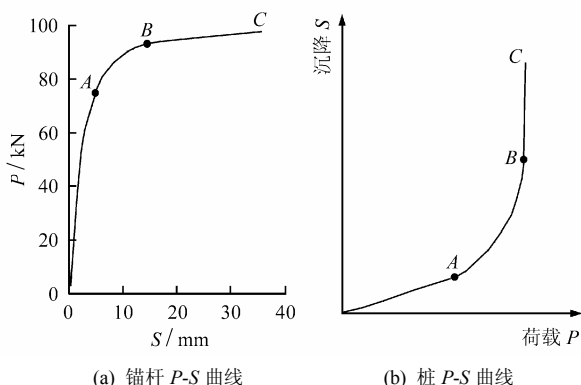


图 1 P - S 曲线
Fig.1 P - S curve

3 数学模型的选择

目前还没有关于锚杆 P - S 曲线的数学模型的研究报道, 而描述桩 P - S 曲线的数学模型的研究比较多。由于锚杆和桩的 P - S 曲线比较相似, 而描述桩 P - S 曲线常用的非线性数学模型有双曲线模型^[5~7]和指数模型^[5, 6], 因此一般采用双曲线模型和指数模型描述锚杆 P - S 曲线。本文根据实测资料, 讨论了双曲线模型和指数模型对锚杆 P - S 曲线模拟的适用性。

3.1 双曲线模型

假设 P - S 曲线符合双曲线方程:

$$P = \frac{S}{aS+b} \quad (1)$$

式中 P 为锚杆荷载(kN); S 为锚杆位移(mm); a , b 为拟合参数。

极限承载力为

$$P_u = \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{S}{aS+b} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

令 $y=S/P$, $x=S$, 经变换得线性方程:

$$y=ax+b \quad (3)$$

用最小二乘法拟合, 可以求出参数 a , b 。

3.2 指数模型

假设 P - S 曲线符合指数方程:

$$P=P_u(1-e^{-aS}) \quad (4)$$

式中 P_u 为待求锚杆的极限承载力(kN); a 为沉降衰减因子(mm^{-1})。未知参数 P_u 和 a 可通过抗拔试验实测数据, 利用 MATLAB 中的 `lsqcurvefit` 优化函数, 编写相应的程序, 由计算机进行分析确定。 P_u 和 a 确定后, 代入指数方程可得拟合的 P - S 曲线方程式。

4 模型与实测资料的比较

为检验这两种模型的适用性, 根据文献[8, 9]中报道的抗拔试验实测数据, 分别拟合上述双曲线模型、指数模型, 由此对极限承载力进行预测。图 2 给出了一些现场抗拔试验曲线、双曲线模型拟合曲线、指数模型拟合曲线的对比图。从图 2 中可以看出, 在双曲线模型、指数模型在 P - S 曲线的前部, 拟合效果相差不大, 但在曲线后部, 双曲线模型与指数模型的预测曲线普遍位于实测曲线之上。双曲线模型预测的极限承载力高于指数曲线模型的预测值。

表 1 列出了曲线(a)~(d) (图 2) 的实测极限承载力^[8, 9]与模型预测极限承载力的比较结果。由表可以看出, 双曲线模型预测值普遍高于指数模型预测值, 证实了前面提到观点的正确性。

表 1 两种模型预测极限承载力的比较
Table 1 Comparison of predicting ultimate bearing capacity of two models

P - S 曲线	实测 P_u/kN	指数模型 P_u/kN	误差 /%	双曲线模型 P_u/kN	误差 /%
图 2(a)	336.1	347.7	3.4	428.8	27.5
图 2(b)	316.8	330.4	4.3	441.2	39.3
图 2(c)	648.9	649.2	0.1	787.8	21.4
图 2(d)	678.6	699.2	3.0	876.3	29.1

注: 参考文献中未列出图 2(e)及图 2(f)的数据, 故表中没有比较数据。

由于双曲线模型的极限承载力是假设锚杆位移 $S \rightarrow \infty$ 时取得的, 工程实际中并不可能出现此情况, 正是无限位移的假设极大的影响了双曲线的拟合精度, 但限制锚杆位移 S 的取值又十分困难。因此, 采用双曲线模型来预测锚杆极限承载力是不理想的。

相比之下, 利用指数模型所得的拟合曲线精度较高, 所得的预测极限承载力与实测值之间误差很小。指数模型所得的拟合曲线特别逼真, 预测极限值稳定。表 1 中, 指数模型极限承载力预测误差在 5% 以内。

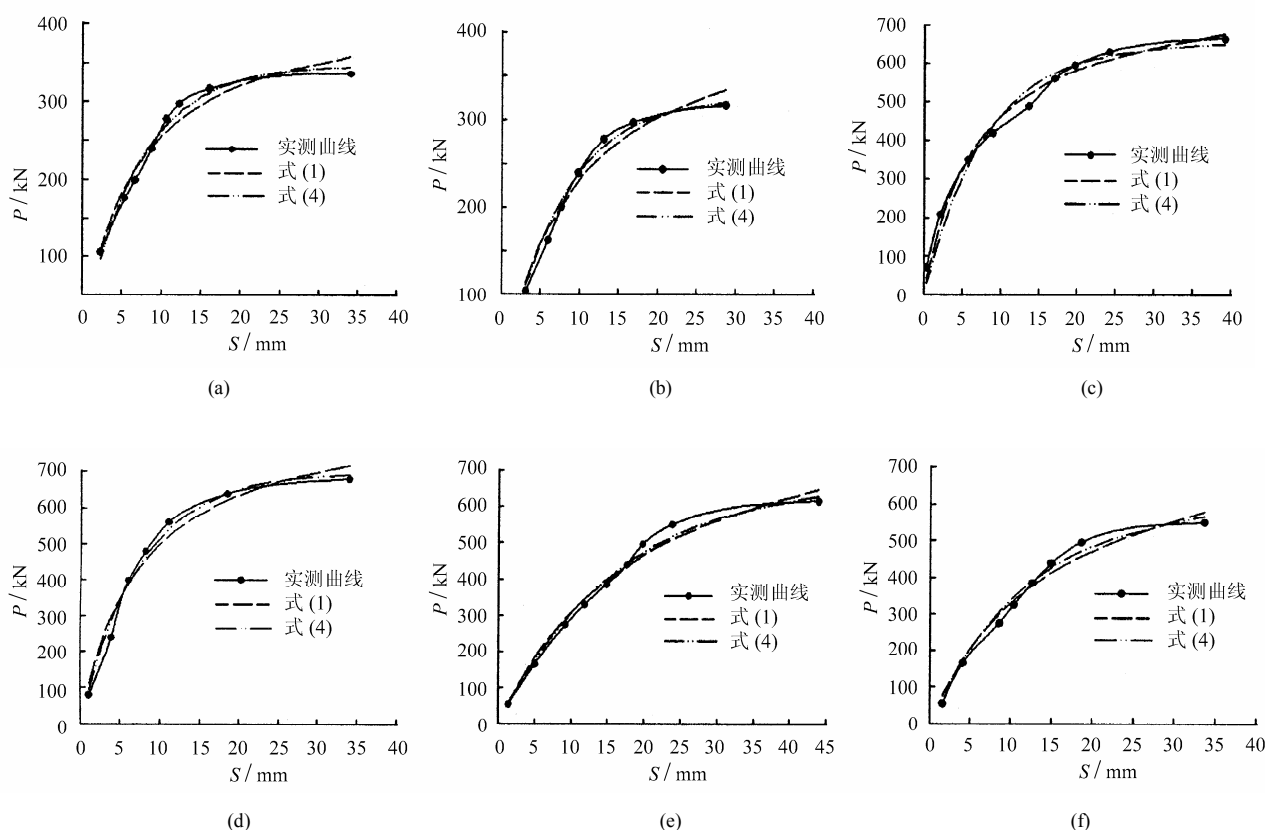


图2 两种模型拟合效果比较

Fig.2 Comparison of simulative effects with two models

5 实例分析

根据深圳市某游泳馆抗浮锚杆抗拔试验数据^[9], 锚固体直径为 180 mm, 锚杆长度为 12.0 m, 锚筋为 2 ϕ 32 mm 螺纹钢筋, 其抗拔试验 P - S 曲线见图 3。用指数函数模型对试验曲线进行拟合, 结果也见图 3。由图可以看出, 用指数函数模型描述的拟合曲线与实测曲线的比较误差较小。用笔者编制好的程序, 预测所得的极限承载力为 623.6 kN, 实测极限承载力^[9]为 631.8 kN, 二者的相对误差为 1.3 %。

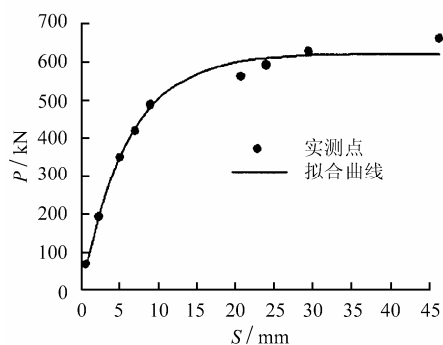


图3 试验曲线与指数模型拟合曲线比较

Fig.3 Test curve and fitting curve with exponential model

6 结 论

由以上分析可见, 用数学模型描述的 P - S 曲线与抗拔试验实测 P - S 曲线基本吻合, 方法简单可行, 仅需编写一小段计算机程序就可完成。在 P - S 曲线的前部, 双曲线模型和指数模型都能较好地拟合锚杆的 P - S 曲线; 而在曲线的后部, 双曲线模型拟合的锚杆误差较大, 而指数模型拟合的锚杆误差较小。因而, 相比于双曲线模型, 指数模型能更好地拟合锚杆的 P - S 曲线。在预测锚杆极限承载力时, 宜采用指数函数模型, 其预测精度相对较高, 能满足一般工程精度的要求。同时, 锚杆 P - S 曲线符合指数函数模型, 这一结论的提出也为锚杆进一步研究带来了方便。

参 考 文 献

- [1] CESC 22:90, 土层锚杆设计与施工规范[S].
- [2] 许明, 张永兴, 阴可. 锚杆极限承载力的人工神经网络预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 755—758.
XU Ming, ZHANG Yong-xing, YIN Ke. Prediction of limit bearing capacity of bolt using artificial neural networks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 755—758.

- [3] 李成, 葛钦存, 杨有海. 膨胀软岩地层灌浆锚杆拉拔试验研究及抗拔力的可靠度分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1994, 13(5): 19—25.
LI Cheng, GE Qin-cun, YANG You-hai. Expansive rock anchor pull-out test and research[J]. **Journal of Lanzhou Railway Institute**, 1994, 13(5): 19—25.
- [4] 吴永红, 刘树林, 张景恒, 等. 钢筋混凝土预制桩 $P-S$ 曲线及极限承载力[J]. 工程勘察, 2000, (3): 44—46.
WU Yong-hong, LIU Shu-lin, ZHANG Jing-heng, et al. $P-S$ curve and bearing capacity of precast RC pile[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2000, (3): 44—46.
- [5] 许宏发, 钱七虎, 金丰年. 描述抗拔桩荷载-位移曲线的幂函数模型[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 622—624.
XU Hong-fa, QIAN Qi-hu, JIN Feng-nian. Power function model to describe load-displacement curve of tension pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 622—624.
- [6] 邓志勇, 陆培毅. 几种单桩竖向极限承载力预测模型的对比分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 428—431, 464.
DENG Zhi-yong, LU Pei-yi. Comparison and analysis of several predicting models of ultimate bearing capacity of single pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 428—431, 464.
- [7] Ilamparuthi K, dickin E A. Predictions of the uplift response of model belled piles in geogrid-cell-reinforced sand[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2001, 19(2): 89—109.
- [8] 尹道清. 韶关市西河污水处理厂生化池水泥砂浆钢筋锚杆抗拔实验[J]. 岩土工程界, 2002, 5(6): 62—64.
YI Dao-qing. The cement mortar anchor rod pull-out experiment of biochemical pool of Xihe wastewater treatment plant in Shaoguan city[J]. **Geotechnical Engineering Field**, 2002, 5(6): 62—64.
- [9] 王贤能, 叶蓉, 周逢君. 土层抗浮锚杆试验破坏标准选取的建议[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 73—78.
WANG Xian-neng, YE Rong, ZHOU Feng-jun. Proposals for the selection of failure criteria in soil float-resisting anchor rod test[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2001, 12(3): 73—78.

上接第 1330 页

5 结 论

(1) 有机质对于淤泥的固化效果有着显著的影响, 不同有机质含量的淤泥固化后强度相差很大, 对有机质相差 4.4 % 的两种淤泥, 固化土的 28 d 强度会相差 2.3~4.4 倍。

(2) 有机质含量对淤泥固化效果的影响存在一个强度影响极限含量 O_c , 当淤泥中有机质含量低于极限含量时, 固化土强度会随着有机质含量的增大而急剧降低; 当淤泥中有机质含量超过极限含量时, 有机质含量的增加对固化土强度增长影响不大, 本研究中此极限含量为 4.3 % 左右。

(3) 对有机质含量较高的淤泥进行固化处理时, 采用水泥-石膏复合型固化材料的固化效果要明显高于采用单一水泥的固化效果, 并且有机质含量越高, 石膏的作用越显著。

参 考 文 献

- [1] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 疏浚泥处理再生资源技术

的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39—41.

ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. The status of dredged spoils utilization[J]. **Environmental Science & Technology**, 2002, 25(4): 39—41.

- [2] 张春雷, 朱伟. 淤泥再生资源利用技术中的岩土工程问题[A]. 第六届全国土动力学学术会议论文集[C]. 南京: 中国建筑工业出版社, 2002. 833—838.

- [3] 张春雷. 淤泥固化土力学性质及固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.

- [4] 范昭平. 有机质对淤泥固化的影响机理及对策研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.

- [5] 熊田恭一. 土壤有机质化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

- [6] 黄新, 胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, (5): 72—76.

HUANG Xin, HU Tong-gan. On stabilization of soft soil with waste gypsum and cement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, (5): 72—76.