

嵌岩抗拔桩承载性状研究

李 森¹ 唐孟雄²

(1. 中山大学工学院, 广东广州 510275; 2. 广州市建筑科学研究院, 广东广州 510440)

【摘 要】 嵌岩桩抗拔承载性状的研究目前仍较缺乏。运用灰色系统理论和非线性有限元方法, 探讨了桩径、桩长、嵌岩深度对嵌岩桩抗拔承载性状的影响规律。结果表明: 桩径对嵌岩桩抗拔承载力的影响最大, 嵌岩深度次之, 桩长最小; 桩径和嵌岩深度在一定范围内与桩抗拔割线刚度呈非线性递增关系, 桩长则与之呈非线性递减关系。

【关键词】 嵌岩抗拔桩; 承载性状; 灰色关联分析; 轴向抗拔刚度; 有限元分析

【中图分类号】 TU 473.11

Study on Anti-draw Bearing Properties of Rock-socketed Pile

Li Sen¹ Tang Mengxiong²

(1. College of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510275;

2. Guangzhou Institute of Building Science, Guangzhou Guangdong 510440 China)

【Abstract】 There has been not enough study on anti-draw bearing properties of rock-socketed pile. The influence of pile diameter, pile length and socketed length on uplift bearing properties of rock-socketed pile is analyzed by using methods of grey system theory and non-linear finite element analysis. The results indicate that pile diameter has the strongest influence on uplift bearing capacity of rock-socketed pile, on which socketed length has much lesser influence while pile length has the weakest influence. And pile diameter and rock-socketed length shows a non-linear positive relationship with axial uplift secant stiffness of pile in certain extent, and pile length shows a non-linear negative relationship.

【Key Words】 anti-draw rock-socketed pile; bearing property; grey correlation analysis; axial anti-draw stiffness; finite element analysis

0 引言

随着建筑业的发展, 许多需承受上拔力的建筑物和构筑物如电视塔、石油钻井平台、斜拉桥和索拉桥等日益增多, 抗拔桩基础的应用日趋广泛。嵌岩桩因具备单桩承载力高、抗震性能好、群桩效应小等优点, 逐渐应用于抗拔桩基础^[1,2]。现行规范对嵌岩桩抗拔承载力的计算仍以经验估算为主, 对其荷载传递机理和抗拔承载性状的研究仍较缺乏^[3]。本文依据实测资料, 运用灰色系统理论对影响嵌岩桩抗拔承载力的设计参数桩长、桩径和嵌岩深度进行灰色关联分析, 并建立三维非线性有限元模型, 探讨了上述参数对嵌岩桩抗拔承载能力的影响。

1 灰色关联分析的原理

1.1 基本原理

灰色关联分析是通过对系统中有限数据列的分

析, 寻求系统内部各因素间的关系, 找出影响目标值的主要因素, 从而从总体上把握系统的动态运动规律^[4]。通常用来描述系统诸要素间相互关系的参数主要有关联系数和关联度, 关联度越大, 表明数据列对参考数据列的影响越大, 两者关系越紧密。

1.2 灰色关联度的计算方法^[4-6]

设某系统有参考序列 X_0 和比较序列 $X_i (i=1, 2, \dots)$:

$$\begin{aligned} X_0 &= \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k), \dots, x_0(n)\} \\ X_i &= \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(n)\} \end{aligned}$$

对上述原始序列进行归一化处理得

$$Y_0 = \{y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(k), \dots, y_0(n)\} = \left\{ \frac{x_0(1)}{x_0(1)}, \frac{x_0(2)}{x_0(1)}, \dots, \frac{x_0(k)}{x_0(1)}, \dots, \frac{x_0(n)}{x_0(1)} \right\} \quad (1)$$

$$Y_i = \{y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(k), \dots, y_i(n)\} = \left\{ \frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(n)}{x_i(1)} \right\} \quad (2)$$

基金项目: 广东省科技基金资助项目(2004B36001028)

作者简介: 李 森, 1982 年生, 男, 汉族, 湖北黄冈人, 中山大学工程力学专业硕士研究生, 主要从事桩基工程研究工作。

E-mail: kcke4187@yahoo.com.cn

记最小绝对差 Δ_{\min} 和最大绝对差 Δ_{\max} 为

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)|$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|$$

则序列各点关联系数如下式计算

$$\zeta(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|y_0(k) - y_i(k)| + \rho \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: ρ 为分辨系数, 作用在于减少极值时的计算影响, 提高分辨率, 一般取 $\rho=0.5$ 。因关联系数数量多, 信息分散, 取其平均值得关联度:

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad (4)$$

2 嵌岩抗拔桩灰色关联分析

大量试验资料和众多学者的研究结果均表明^[7-10], 影响嵌岩桩抗拔极限承载能力的主要因素有岩基强度、嵌岩深度、桩岩模量比、桩长、桩径、岩基风化程度、岩基初始应力、岩基裂隙和风化程度、桩岩接触面刚度等。本文主要分析桩径、桩长、嵌岩深度对桩抗拔承载性状的影响, 为嵌岩桩的抗拔设计作参考。

现将嵌岩桩的抗拔极限承载力及其影响因素桩径、桩长、嵌岩深度视为一灰色系统, 各桩的极限承载力 Q_u 值组成系统参考序列 $X_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$, 以桩径 D 、桩长 L 、嵌岩深度 h 组成系统比较序列 $X_i = \{x_i(k) | i=1, 2, 3; k=1, 2, \dots, n\}$ 。取广州地区有代表性的 5 根嵌岩抗拔桩基本资料见表 1。桩型均为灌注桩, 桩端岩层为中、强风化碳质泥岩, 桩极限承载力值按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94) 相关规定确定^[11]。

表 1 试验桩基本资料

桩号	X_0 Q_u/kN	X_1 D/mm	X_2 L/m	X_3 h/m
1	484	300	0.5	0.5
2	2150	800	12	5.0
3	4170	1000	17.5	8.4
4	1824	1200	8.95	8.95
5	1753	1200	6.85	6.85

对原始序列初始化处理结果见表 2, 求得各点关联系数见表 3。

表 2 原始数据初始化结果

桩号	X_0/Q_u	X_1/D	X_2/L	X_3/h
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	4.4421	2.6667	24.0000	10.0000
3	8.6157	3.3333	35.0000	16.8000
4	3.7686	4.0000	17.9000	17.9000
5	3.6219	4.0000	13.7000	13.7000

表 3 灰色关联系数

关联系数	$i=1$	$i=2$	$i=3$
$\zeta_i(1)$	1.0000	1.0000	1.0000
$\zeta_i(2)$	0.8814	0.4028	0.7036
$\zeta_i(3)$	0.7141	0.3333	0.6171
$\zeta_i(4)$	0.9828	0.4828	0.4828
$\zeta_i(5)$	0.9721	0.5669	0.5669

由表 3 及 (4) 式可得, $\gamma(X_0, X_1) = 0.9101$, $\gamma(X_0, X_2) = 0.5572$, $\gamma(X_0, X_3) = 0.6621$, 则有: $\gamma(X_0, X_1) > \gamma(X_0, X_3) > \gamma(X_0, X_2)$, 说明在影响嵌岩桩抗拔极限承载力诸参数中, 桩径最大, 嵌岩深度次之, 桩长最小。在设计嵌岩桩时, 可优先考虑通过增大桩径提高抗拔承载力。

3 嵌岩桩承载性状有限元分析

3.1 有限元计算方案

为进一步探讨桩径、嵌岩深度、桩长对嵌岩桩抗拔承载能力的作用规律, 采用 ANSYS 软件建立了三维非线性有限元模型, 通过求解分析不同参数时桩轴向抗拔刚度反映桩承载能力的变化。桩的轴向抗拔刚度是指, 使桩顶产生一单位竖向上拔位移 s 所需的竖向荷载 $Q^{[12]}$, 记为 K , 即:

$$K = dQ/ds \quad (5)$$

当 s 很小时, 为初始刚度, 记作 K_0 ; 当 s 不是很小时, 为割线刚度, 记作 K_s 。一般说来, 桩的轴向刚度与承载能力成正比关系, 桩的轴向刚度越大, 承载能力越强, 反之越弱。本文主要计算桩在固定上拔荷载作用下不同参数时的割线抗拔刚度, 分析各参数的变化对嵌岩桩承载能力的影响。

3.2 计算模型及边界条件

计算参数的选取主要依据上述实测资料。采用六面体 8 节点 SOLID45 实体单元, 桩身、基岩均视为线弹性体, 桩体弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.25$, 基岩弹性模量 $E = 6.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.20$ 。土体采用 Drucker-Prager 材料, 服从 Mohr-Coulomb 破坏准则, 弹性模量 $E = 4.5 \text{ MPa}$, 粘聚力 $c = 3.0 \times 10^4 \text{ Pa}$, 内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$, 膨胀角 $\theta = 5^\circ$ 。桩体和基岩、土体间均设置面-面接触对, 并分别以 TARGE170 单元和 CONTA174 单元模拟桩界面和基岩、土界面, 接触面摩擦系数按文献[13]取值, 桩体和基岩间取 0.917, 桩体和土体间取 0.304。土体、基岩的计算半径均取 $10D$, 其外表面设置 x, y, z 方向位移全约束。依对称性取 $1/4$ 模型见图 1。

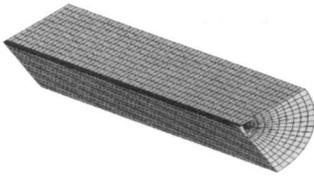


图1 有限元模型

3.3 桩径影响效应分析

嵌岩深度 $h=0.5\text{ m}$ 、 1.0 m 、 1.5 m ，桩长 $L=20\text{ m}$ ，桩径在 $(0.3\sim 1.4)h$ 间，桩体在固定荷载 $Q=2000\text{ kN}$ 作用下割线抗拔刚度的变化曲线见图2。由图2可见，桩径 $D\leq h$ 时，割线刚度与桩径呈线性增长关系，在 $h\leq D\leq 1.2h$ 间增速减缓， $D\geq 1.2h$ 后，趋于平稳，甚至出现负增长。随着嵌岩深度的增大，线性段的斜率增大，割线刚度随桩径增速加快， $D\geq 1.2h$ 后，增速减小， $h\geq 1.5\text{ m}$ 后，出现负增长。

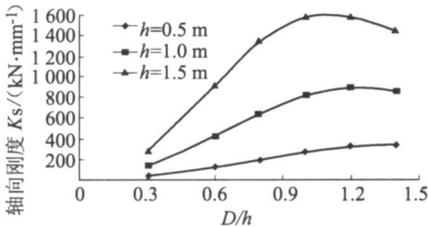


图2 桩径与轴向刚度的关系

3.4 嵌岩深度影响效应分析

桩径 $D=600\text{ mm}$ 、 900 mm 、 1200 mm ，桩长 $L=20\text{ m}$ ，嵌岩深度 h 在 $(0.83\sim 6)D$ 间，嵌岩桩在固定荷载 $Q=2000\text{ kN}$ 作用下割线抗拔刚度的变化曲线见图3。图3表明，嵌岩深度与割线刚度呈非线性递增关系，在 $h\leq 2D$ 时，增速较快，此后增速减缓。随着桩径的增大，曲线斜率增大，割线刚度随嵌岩深度增速加快。

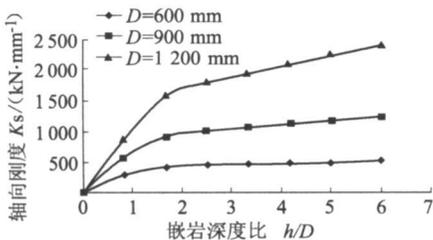


图3 嵌岩深度与轴向刚度的关系

3.5 桩长影响效应分析

桩径 $D=600\text{ mm}$ 、 900 mm ，嵌岩深度 $h=1.0\text{ m}$ ，桩长在 $6\sim 40\text{ m}$ 间，桩在固定荷载 $Q=2000\text{ kN}$ 作用下割线抗拔刚度的变化曲线见图4。图4显示，

桩长与轴向刚度呈非线性递减关系，桩长 $L\geq 25\text{ m}$ 后，影响趋缓。同等荷载作用下，增大非嵌岩段桩长会导致桩身位移量加大，从而加大桩顶位移，降低桩的轴向刚度，影响桩的承载能力。

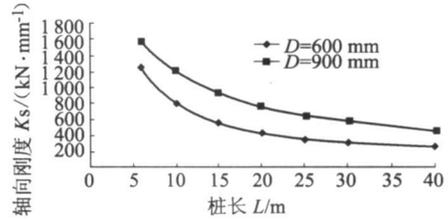


图4 桩长与轴向刚度的关系

4 结论

1) 桩径对嵌岩桩抗拔承载力的影响最大，嵌岩深度次之，桩长相对较小。同等条件下，可优先通过增大桩径提高桩的抗拔承载能力。

2) 桩径 $D\leq h$ 时，增大桩径对提高桩的抗拔承载能力，作用是显著的，但在 $D\geq 1.2h$ 后，效果欠佳。

3) $h\leq 2D$ 时，嵌岩深度的增大能有效提高桩的上拔割线刚度，增强桩的抗拔承载能力。 $h\geq 2D$ 后，效果减弱。结合式(2)知， $D\leq h\leq 2D$ 间，增大桩径或嵌岩深度均能有效提高桩的上拔承载能力，最优嵌岩深度可取 $2D$ 左右。

4) 桩长 $L\leq 25\text{ m}$ 时，桩长的增大不利于桩割线抗拔刚度的提高。此后，影响趋缓。

5) 本文研究的嵌岩桩，桩径 D 在 $300\sim 2400\text{ mm}$ 间，桩长在 $0.5\sim 40\text{ m}$ 间，对大直径桩(桩径 $D\geq 3000\text{ mm}$)、超长桩(桩长 $L\geq 50\text{ m}$)等，文中规律是否适用尚需进一步研究。另外，本文的结论也应在工程实际中接受进一步检验。

参考文献

- [1] 刘利民, 舒翔, 熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002.
- [2] 方崇, 张信贵, 闭历平. 挤扩支盘桩在地下建筑抗浮设计中的应用[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(6): 281-283.
- [3] 何剑. 嵌岩灌注桩抗拔承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 315-319.
- [4] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 开封: 河南大学出版社, 1991.
- [5] 黄生根, 龚维明, 张晓炜, 等. 钻孔灌注桩压浆后的承载性能研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1315-1319.
- [6] Xie Songyun, Dong Daqun, Wang Penggang. A new approach to target recognition based on gray correla-

- tion analysis[J]. *Journal of system simulation*, 2002, 14(2): 257-261.
- [7] 张建新, 吴东云, 张淑朝. 嵌岩桩尺寸效应的有限元分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1221-1224.
- [8] 刘兴远, 郑颖人. 影响嵌岩桩嵌岩段特性的特征参数分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 383-386.
- [9] R K Rowe. Theoretical solutions for axial deformation of drilled shafts in rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 24: 114-125.
- [10] Michael W O'Neil. Side resistance in piles and drilled shafts[J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2001, 1: 3-16.
- [11] JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]
- [12] 潘时声, 侯学渊. 桩的刚度计算[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(1): 1-6.
- [13] 许宏发, 吴华杰, 郭少平, 等. 桩土接触面单元参数分析[J]. *探矿工程*, 2002(5): 10-12.

收稿日期: 2008-01-11

(上接第 83 页)

- [37] 邢怀海, 顾晓卉, 徐 波. 流变模型在格栅加盘堤坝稳定分析中的应用[J]. *盐城工学院学报*, 2002, 15(2): 21-24.
- [38] Andrawes K Z, Mcgown A, Wilson-Famhmy R F, et al. The finite element method of analysis of applied to soil-geotextile systems [C]// *Proceeding of the 2nd International Conference of Geotextiles, Las Vegas, USA, 1982*: 695-700.
- [39] Karpurapu R, Bathurst R J. Behaviour of geosynthetic reinforced soil retaining walls using the finite element method [J]. *Computers and Geotechnics*, 1995, 17: 279-299.
- [40] 刘华北, Ling H I. 土工格栅加筋挡土墙设计参数的弹塑性有限元研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(5): 668-673.
- [41] 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 614-616.
- [42] Sawicki A. Rheological Model of Geosynthetic-Reinforced Soil [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1999, 17(2): 33-49.
- [43] 肖成志, 栾茂田, 杨 庆. 考虑格栅流变性的加筋挡土墙格栅等效应力计算[J]. *岩土工程技术*. 2004, 18(1): 23-27.
- [44] Helwany M B, Wu J T H. A numerical model for analyzing long-term performance of geosynthetic reinforced soil structures[J]. *Geosynthetic International, Journal of the International Geosynthetic Society*, 1995, 2(2): 429-453.
- [45] 栾茂田, 肖成志, 杨 庆, 等. 考虑蠕变性的土工格栅加筋挡土墙应力与变形有限元分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(6): 857-864.
- [46] 周世良, 刘占芳, 何光春. 饱水格栅加筋土挡墙结构特性数值分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 1015-1021.
- [47] 周志刚, 郑健龙, 宋蔚涛. 土工格栅加筋柔性桥台的机理分析[J]. *中国公路学报*, 2000, 13(1): 18-21.
- [48] Bray, et al. Seismic stability procedures for solid waste landfills [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1995, 121(2): 131-151.
- [49] Kavazanjian, Matasovic, et al. Seismic analysis of solid waste landfills [M]// *Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication, New York*, 1995.
- [50] Muthucumarasamy Y, Richard J, et al. Dynamic response analysis of reinforced retaining wall[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1992(8): 1158-1167.
- [51] Yegian M K, Harb J N, Kadakal U. Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liners [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1998: 1027-1033.

收稿日期: 2008-01-23