

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0927-04

考虑桩侧双线性土抗力时长桩临界荷载计算

刘礼标, 王 成

(重庆交通大学 隧道及岩土工程系, 重庆 400074)

摘 要: 为了探讨目前工程中广泛使用的超长桩的临界荷载计算, 考虑了桩侧土壤的弹性抗力, 将桩侧土体的弹性抗力假定为由两部分组成, 通过选择合适的桩柱挠曲变形函数, 用瑞利-里兹法求解其临界荷载, 分析桩周土抗力模式对超长桩的临界荷载及计算长度的影响关系。结果表明, 桩的临界荷载主要取决于桩的入土深度、折减系数等系统参数。

关 键 词: 超长桩; 双线性抗力模式; 瑞利-里兹法; 临界荷载

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Calculation of critical loads for long pile with lateral soil resistance

LIU Li-biao, WANG Cheng

(Department of Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To investigate the calculation of critical load for super-long pile widely used in engineering, elastical resistance of soil on the side of pile is taken into account. The soil resistance on the side of long pile is assumed to consist of two parts. By choosing suitable wrapping function of pile, the critical load is solved by Rayleigh-Ritz method, and then the relations between resistance model and the critical load and calculated length of super-long pile are analyzed. The result shows that the critical load of pile depends on the length of pile in the soil, reduction coefficient and other pile-soil system parameters.

key words: super-long pile; double-linear resistance model; Rayleigh-ritz method; critical load

1 引 言

随着我国基础设施建设的飞速发展, 特别是近年来在软土层深厚的沿海经济发达地区, 建造了许多高层建筑及特大桥梁, 超长桩已大量采用, 桩身如同细长杆件可能产生屈曲破坏, 但计算理论还有待研究^[1-6]。超长桩的临界荷载的主要影响因素是桩侧土抗力的模式。若不考虑桩侧土抗力, 则计算的临界荷载与实际相差太大, 文献[7]考虑桩侧土抗力按计算推力桩的 m 法土抗力模式, 则深部的抗力太大, 而文献[8]将桩侧土抗力分成两部分, 分别按弹性地基反力法中的 m 法和常数法进行计算, 则深部的抗力太小, 都不符合实际情况。因此, 本文考虑桩侧土抗力为一种双线性组合模式, 研究桩的临界荷载计算问题。

2 基本假设

建立如图1坐标系, 桩 OC 的顶部和底部为固

定支承, 桩顶受轴向压力 P 的作用, 桩侧承受土体的弹性抗力, 土体的弹性抗力分布上段 ($h-H$) 依据弹性地基反力法中的 m 法进行考虑, 即地基系数随深度呈线性增加; 下段 H 依据弹性地基反力法中的 m 法相应乘以一个折减系数 α 进行考虑。图1中 L 为桩柱长度; h 为桩的入土深度; x 为桩底至地基土层中某一高度; H 为土体的弹性抗力分布依据弹性地基反力法中的 m 法相应乘以一个折减系数 α 进行考虑的范围; m 为土体的弹性抗力为线性分布时地基土比例系数。

3 用瑞利-里兹法求解临界荷载

选取桩柱的挠曲变形函数为

$$y = c_1 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right) + c_2 \left(1 - \cos \frac{6\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

式中: c_1 , c_2 均为待定参数, 挠曲函数的一阶和二阶导数分别为

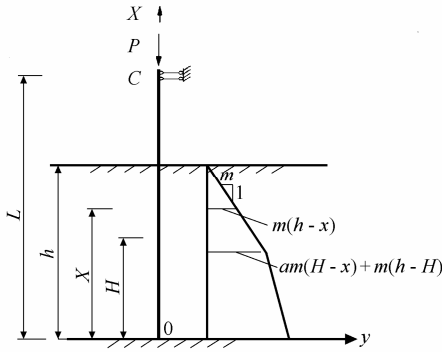


图 1 桩的临界荷载计算模型

Fig.1 Computation model of critical load of pile

$$y' = \frac{2c_1\pi}{L} \sin \frac{2\pi x}{L} + \frac{6c_2\pi}{L} \sin \frac{6\pi x}{L} \quad (2)$$

$$y'' = \frac{4c_1\pi^2}{L^2} \cos \frac{2\pi x}{L} + \frac{36c_2\pi^2}{L^2} \cos \frac{6\pi x}{L} \quad (3)$$

3.1 桩的弯曲应变能 U_1

$$U_1 = \frac{EI}{2} \int_0^L (y'')^2 dx = \frac{EI\pi^4}{L^3} (4c_1^2 + 324c_2^2) \quad (4)$$

3.2 桩周土体的弹性变形能 U_2

$$U_2 = \frac{b_1}{2} \int_0^H K_h y^2 dx + \frac{mb_1}{2} \int_H^L (h-x)y^2 dx \quad (5)$$

将 $K_h = \alpha m(H-x) + m(h-H)$ 代入式 (5) 整理得:

$$U_2 = \frac{mb_1}{2} \left\{ \int_0^h hy^2 dx - \int_0^H Hy^2 dx - \int_H^L xy^2 dx + \alpha \left(\int_0^H Hy^2 dx - \int_0^L xy^2 dx \right) \right\} = \frac{mb_1 L^2}{2} (c_1^2 G_1 + c_2^2 G_2 + c_1 c_2 H_{12}) \quad (6)$$

式中:

$$G_1 = \frac{3[h^2 - (1-\alpha)H^2]}{4L^2} - \frac{15\alpha}{32\pi^2} - \frac{(1-\alpha) \cos 2\pi \frac{H}{L} - \cos 2\pi \frac{h}{L}}{2\pi^2} + \frac{(1-\alpha) \cos 4\pi \frac{H}{L} - \cos 4\pi \frac{h}{L}}{32\pi^2} \quad (7)$$

$$G_2 = \frac{3[h^2 - (1-\alpha)H^2]}{4L^2} - \frac{15\alpha}{288\pi^2} - \frac{(1-\alpha) \cos 6\pi \frac{H}{L} - \cos 6\pi \frac{h}{L}}{18\pi^2} + \frac{(1-\alpha) \cos 12\pi \frac{H}{L} - \cos 12\pi \frac{h}{L}}{288\pi^2} \quad (8)$$

$$H_{12} = \frac{h^2 - (1-\alpha)H^2}{L^2} - \frac{275\alpha}{576\pi^2} - \frac{(1-\alpha) \cos 2\pi \frac{H}{L} - \cos 2\pi \frac{h}{L}}{2\pi^2} + \frac{(1-\alpha) \cos 4\pi \frac{H}{L} - \cos 4\pi \frac{h}{L}}{16\pi^2} - \frac{(1-\alpha) \cos 6\pi \frac{H}{L} - \cos 6\pi \frac{h}{L}}{18\pi^2} + \frac{(1-\alpha) \cos 8\pi \frac{H}{L} - \cos 8\pi \frac{h}{L}}{64\pi^2} \quad (9)$$

3.3 外荷载势能 V 为

$$V = \frac{P}{2} \int_0^L (y')^2 dx = \frac{\pi^2 P}{L} (c_1^2 + 9c_2^2) \quad (10)$$

3.4 势能 Π

$$\Pi = U_1 + U_2 - V = \frac{EI\pi^4}{L^3} (4c_1^2 + 324c_2^2) + \frac{mb_1 L^2}{2} (c_1^2 G_1 + c_2^2 G_2 + c_1 c_2 H_{12}) - \frac{\pi^2 P}{L} (c_1^2 + 9c_2^2) \quad (11)$$

3.5 临界荷载 P_{cr}

由势能驻值原理得方程组:

$$\begin{cases} (R_1 - M_1 P_{cr}) c_1 + N_{12} c_2 = 0 \\ N_{21} c_1 + (R_2 - M_2 P_{cr}) c_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

解得

$$P_{cr} = [R_1 M_2 + R_2 M_1 \pm \sqrt{(R_1 M_2 - R_2 M_1)^2 + 4M_1 M_2 N_{12}^2}] / (2M_1 M_2) \quad (13)$$

P_{cr} 取两根中的小值, 其中:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{8EI\pi^4}{L^3} + mb_1 L^2 G_1 \\ R_2 &= \frac{648EI\pi^4}{L^3} + mb_1 L^2 G_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{2\pi^2}{L} \\ M_2 &= \frac{18\pi^2}{L} \\ N_{12} &= \frac{mb_1 L^2 H_{12}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

相应桩的计算长度系数为

$$\mu = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}} \quad (16)$$

4 算例分析

某桩嵌于岩层内, 桩身材料为 C25 混凝土, 弹性模量 $E_h = 2.9 \times 10^4$ MPa, 桩长为 21 m, 桩底嵌岩深度为 1 m, 桩径为 1.0 m, 覆盖层为淤泥质塑性黏土, 地基土比例系数 $m = 9\,800$ kN/m⁴, 计算: (1) $P_{cr} - h/L$ 曲线; (2) $\mu - h/L$ 曲线。

桩身抗弯刚度为

$$EI = 0.8E_h I = 1.136 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

桩的计算宽度 b_1 按文献[10]中规定计算:

$$b_1 = 0.9 \times (1 + 1/d) \times 1 = 1.8 \text{ m}$$

通过编程计算 $P_{cr} - h/L$ 曲线和 $\mu - h/L$ 曲线分别见图 2 和图 3。

本文方法与文献[7]和文献[8]方法比较: 当 $H = 0$, $\alpha = 1$ 时, 本文计算结果和文献[8]都为 $P_{cr} = 1.092 \times 10^6$ kN, 与文献[7]方法计算结果 $P_{cr} = 1.093 \times 10^6$ kN 一致。

当桩长 $L = 50$ m, $h/L = 0.8$, $H/h = 0.6$ 时, 文献[7, 8]和本文计算结果如表 1。

表 1 不同模型下临界荷载结果比较

Table 1 Comparison of critical loads for different models

模型	折减系数 α	临界荷载 $P_{cr}/10^6$ kN	与文献[7]相对总值/%
本文模型	0	1.938	-41.2
	0.5	2.580	-21.7
	1	3.220	-2.3
文献[7]模型	1	3.295	0
文献[8]模型	0	1.938	-41.2

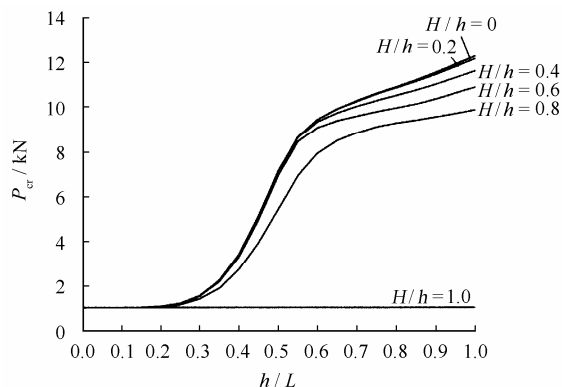
注: “-” 表示减小。

从图 2 可知, 随着桩侧土抗力模式的控制值 H 的增加, 临界荷载值有所降低, 例如当 $h/L = 0.8$ 时, $H/h = 0.6$ 比 $H/h = 0$ 时降低了 8.71%, 相应地, 图 3 表示的桩的长度系数则增大。

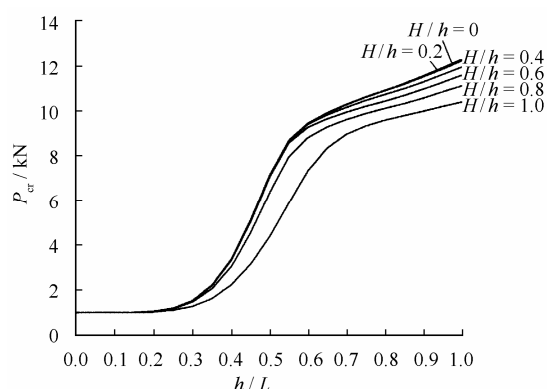
5 结 论

本文针对超长桩承载性能研究还不成熟的现状, 考虑到影响桩临界荷载最重要的因素是桩侧土抗力的形式, 提出了桩侧双线性土抗力的一种新模式, 计算超长桩的临界荷载, 结果表明:

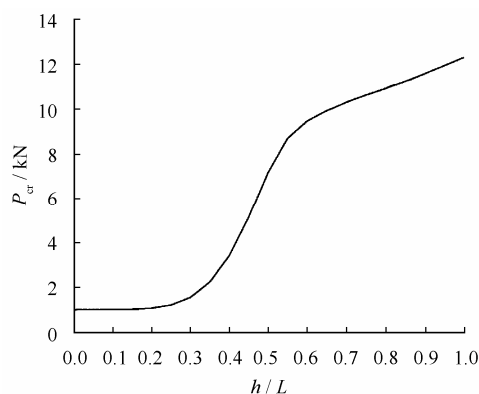
(1) 当 $\alpha = 0$ 时, 该模型与文献[8]一致; 当 $\alpha = 1$ 时, 该模型与文献[7]一致。



(a) $\alpha = 0$



(b) $\alpha = 0.5$



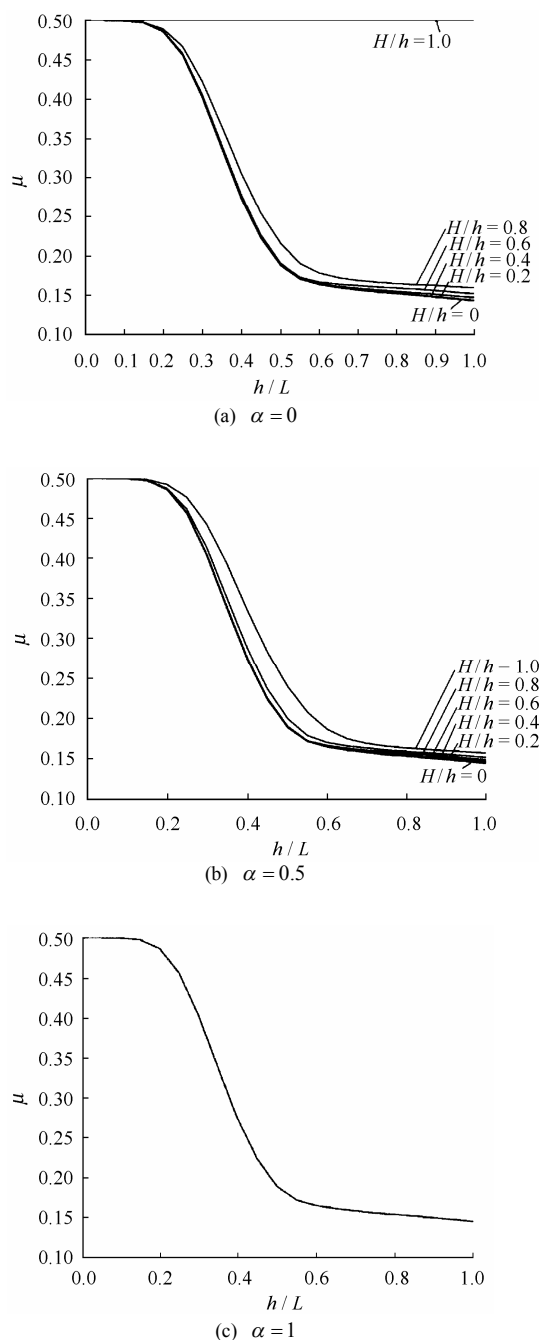
(c) $\alpha = 1$

图 2 $P_{cr} - h/L$ 曲线图
Fig.2 Curves of $P_{cr} - h/L$

(2) 采用本文提出的桩侧土抗力双线性新模式计算超长桩的临界荷载比文献[7]计算为小, 解决了临界荷载偏大的问题, 比文献[8]计算为大, 解决了临界荷载偏小的问题。

(3) 桩的入土深度大于桩柱长的 60% 后, 临界荷载增加突然减缓, 减缓程度也与桩周土抗力模式相应。

(4) 本文提出的土抗力双线性新模式中折减系数 α 的取值主要取决于桩长和桩周土的特性等。

图3 $\mu-h/L$ 曲线图Fig.3 Curves of $\mu-h/L$

参考文献

- [1] 阳吉宝. 超长桩的荷载传递机理[J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (6): 108—112.
YANG Ji-bao. Research on load transfer mechanism of super-long pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(6): 108—112.
- [2] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代. 深厚软土非嵌岩超长桩受力性状试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37 (4): 64—69.
ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, XIA Tang-dai. Research on unrock-socketed super-long pile in deep soft soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(4): 64—69.
- [3] Poulos H G. Pile behavior-theory and application[J]. *Geotechnique*, 1989, 39(3): 365—415.
- [4] 朱向荣, 方鹏飞, 李刚. 软土地基中超长桩工程性状试验分析[C]. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上), 2003: 589—592.
ZHOU Xiang-rong, FANG Peng-fei, LI Gang. Research on super-long pile in soft clay[A]. *Proceedings on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of the Ninth China Civil Engineering Society*, 2003: 589—592.
- [5] 赵明华, 邹新军, 刘光栋. 基于 m 法的高承台嵌岩灌注桩初始后屈曲性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (22): 4 115—4 119.
ZHAO Ming-hua, ZOU Xin-jun, LIU Guang-dong. Behavior analysis of initial post-buckling of socketed filling piles with highrise pile cap by m method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22): 4 115—4 119.
- [6] 邹新军, 赵明华, 刘光栋. 嵌岩灌注桩初始后屈曲性状分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33 (3): 22—26.
ZOU Xin-jun, ZHAO Ming-hua, LIU Guang-dong. Analysis of the behavior of initial post-buckling of cast-in-situ rock-socketed piles[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2006, 33(3): 22—26.
- [7] 彭锡鼎. 考虑桩侧土壤弹性抗力时桩的临界荷载计算[J]. 土木工程学报, 1996, 29 (5): 43—48.
PENG Xi-ding. Calculation of Critical Load of Pile Considering Resistance of Soil on the Side of Pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1996, 29(5): 43—48.
- [8] 周淑芬, 李晓红, 王成. 考虑桩侧土抗力时超长桩的临界荷载计算[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 (6): 882—884.
ZHOU Shu-fen, LI Xiao-hong, WANG Cheng. Calculation of critical load of pile considering elastic resistance of soil on the side of pile[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(6): 882—884.
- [9] 李存权. 结构稳定和稳定内力[M]. 北京: 人民交通出版社. 1999.
- [10] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1995.