

# 静压桩桩端扩张压力分析

朱 宁 施建勇

( 河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098 )

摘要 :为分析桩端扩张压力 ,对现有计算方法进行了改进 ,根据静压桩贯入机理 ,分析了静压桩的贯桩过程 ,在模拟桩体贯入过程的基础上 ,建立了基于半无限圆孔扩张的压桩静力平衡方程 ,并求得了弹性条件下桩端扩张压力的理论解答 ,同时进一步分析了桩端扩张压力与压入深度的关系 .

关键词 静压桩 桩端扩张压力 贯桩模拟

中图分类号 :TU473.1 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X( 2006 )01-0079-04

静压桩是近年来在软土地区得到广泛应用的一种新桩型 .静压桩具有振动小和噪音低等优点 ,但贯入过程中对土体的扰动会对周围环境产生较大影响 .由于桩体对土体的挤压作用主要发生在桩端 ,因而桩体贯入对土体影响的大小很大程度上取决于桩端扩张应力的大小 .Vesic 等<sup>[1-2]</sup>应用圆孔扩张法求解桩端扩张应力 .但圆孔扩张法采用了无限土体或平面应变假定 ,并不能反映贯桩问题的空间性 .静压桩贯入问题实质上是半无限土体中的空间轴对称问题 ,因此 ,在半无限条件下 ,确定桩端的扩张压力对于研究静压桩的贯入机理有着重要的意义 .本文从分析静压桩的贯入过程入手 ,考虑半无限条件下的球孔扩张 ,从而得到了桩端扩张压力的解答 .

## 1 静压桩挤土过程分析

静压桩的贯入通过位于桩顶的压桩机械将压桩力作用于桩体 .在垂直静压过程中 ,桩尖使土体产生冲剪变形 ,桩身使土体产生直剪变形<sup>[3-4]</sup> .因此 ,桩体对土体的作用可分为 2 部分 :桩尖( 桩端 )冲剪产生的挤压和扩张作用 ;桩侧( 桩身 )对土体的摩擦作用 .桩端作用可通过半无限土体内的球孔扩张作用来模拟 ,桩侧作用可通过摩擦作用来模拟 .如图 1 所示 ,假定桩的总长为  $H$  ,入土深度为  $h$  ,桩体直径为  $D$  .根据上述分析 ,桩端对土体的扩张可以模拟为半径为  $r_u$  的球孔的扩张 ,球孔球心位于桩体圆锥段底面圆心处 .

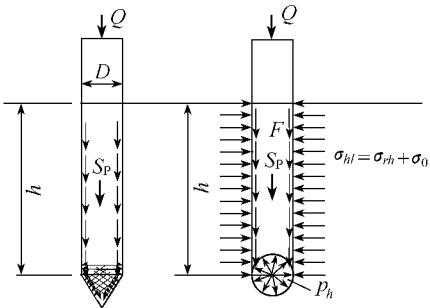


图 1 静压桩挤土过程示意图

在静压桩的施工过程中 ,压桩速率基本保持不变 ,因此在静压桩贯桩过程分析中 ,一般采用准静态的平衡方程来描述土体的受力情况 .假定桩顶压桩力为  $Q$  ,桩体自重为  $S_p$  ,仅考虑弹性状态时 ,桩体的平衡关系满足

Fig.1 Sketch of soil compaction during pile jacking

$$Q + S_p = 4\pi r_u^2 p_h + F_h \tag{1}$$

$$F_h = \int_0^h f ds = \int_0^h f \pi D dz \tag{2}$$

式中 : $p_h$ ——球心深度为  $h$  时的桩端球孔的扩张力 ,假定在圆球边界上均匀分布 ; $F_h$ ——入土深度为  $h$  时桩体对土体的总摩擦力 ; $f$ ——单位面积上的摩擦力 ; $r_u$ ——桩体半径 .

假定  $Q_t = Q + S_p$  ,则扩张力  $p_h$  可表示为

$$p_h = \frac{Q_t - F_h}{4\pi r_u^2} \tag{3}$$



离  $\nu_s$ ——土体泊松比.

当  $r = r_u$  时, 利用式 (7) 就可以得到桩周土体由于桩端扩张而在桩身产生的水平压力增量  $\Delta\sigma_{rh}$ .

### 3 桩端扩张压力的弹性解答

将  $\Delta\sigma_{rh}$  和式 (6) 代入式 (5), 可得桩土界面上的水平向土压力  $\sigma_{hl}$ . 将  $\sigma_{hl}$  代入式 (4), 可得桩土界面上单位面积的摩擦力  $f$ . 将  $f$  代入式 (2) 和式 (3), 就可得到考虑半无限圆孔扩张作用的桩端扩张力的表达式

$$4\pi r_u^2 p_h = Q_1 - \int_0^h \mu \left\{ k_0 \rho'_s g z + r_u^3 p_h \left[ \frac{1}{R_1'^3} - \frac{3(z-h)^2}{2R_1'^5} - \frac{3(z+h)^2}{2R_2'^5} - 2\nu_s \frac{1}{R_2'^3} + \frac{3r^2}{R_2'^5} + z \left( \frac{3(z+h)}{R_2'^5} - \frac{15r^2(z+h)}{R_2'^7} \right) \right] \right\} \pi D dz \tag{8}$$

化简后得

$$p_h = \frac{Q_1 - \frac{1}{2} \mu k_0 \rho'_s h^2 \pi D}{4\pi r_u^2 + \frac{\mu r_u^3 \pi D}{2} \left[ \frac{2(1-4\nu_s)h}{r_u^2 \sqrt{4h^2 + r_u^2}} + \frac{4\nu_s h}{r_u^2 \sqrt{h^2 + r_u^2}} + \frac{6r_u^2 h}{\sqrt{(4h^2 + r_u^2)^3}} \right]} \tag{9}$$

式中:  $R_1' = \sqrt{r_u^2 + (z-h)^2}$ ;  $R_2' = \sqrt{r_u^2 + (z+h)^2}$ .

### 4 计算实例

利用式 (9) 计算桩端扩张应力并假定土体饱和. 计算参数为: 土体泊松比  $\nu_s = 0.5$ ; 土体密度  $\rho_s = 2.0 \text{ kg/cm}^3$ ; 桩长  $H = 15 \text{ m}$ ; 桩体密度  $\rho_p = 2.45 \text{ kg/cm}^3$ ; 桩土间滑动摩擦系数  $\mu = 0.1$ ; 压桩力  $Q = 100 \text{ kN}$ .

为了便于比较分析, 引入量纲一的量  $M$ ,  $M = \frac{4\pi r_u^2 p_h}{Q_1}$ .  $M$  反映了桩端扩张应力和桩顶压桩力的关系:  $M$  越大, 桩端的扩张作用越强;  $M$  越小, 桩端扩张作用越弱. 分别取桩径为  $D = 0.6 \text{ m}$ ,  $D = 0.5 \text{ m}$ ,  $D = 0.4 \text{ m}$  进行计算分析. 从图 3 可以看出, 在一定的压桩力下, 桩端扩张压力会随着深度的减小而降低, 降低速率随着深度的增加而增大. 因此, 在一定的压桩力下, 桩体的贯入深度是有限的. 从不同桩径的桩端扩张压力的比较可以看出, 桩径越大, 桩端扩张压力衰减得越快. 因为桩径越大, 桩土接触面积就越大, 接触面积越大, 桩土间的摩擦力就越大, 从而传递到桩端的扩张压力减少得就越快.

取桩径为  $0.5 \text{ m}$ , 土体弹模  $E_s = 3.0 \text{ MPa}$ , 土体不排水强度  $C_u = 10 \text{ kPa}$ , 将圆孔扩张法<sup>[5]</sup>与本文方法进行比较, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 传统的圆孔扩张法无法反映贯入深度和扩张压力的关系. 实际上, 由于贯桩过程中桩侧摩阻力的存在, 压桩力传递到桩端的能量不会是常量, 桩端扩张压力会随深度而变. 本文所得到的解可以反映桩端扩张压力随深度变化的规律.

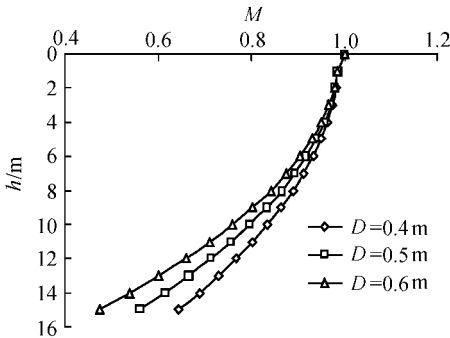


图 3  $M$  与  $h$  的关系  
Fig.3 Relationship between  $M$  and  $h$

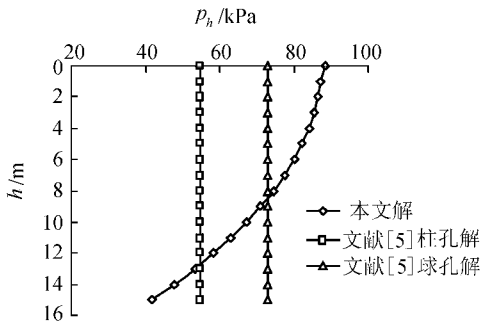


图 4  $p_h$  计算结果的比较  
Fig.4 Comparison of calculated results of  $p_h$

## 5 结 语

本文根据静压桩挤土作用机理,提出了基于修正圆孔扩张法的桩端扩张压力的计算方法,得到了桩端扩张压力与压入深度关系的解析表达式.在弹性范围内和一定压桩力下,桩端扩张压力会随着深度的减小而降低,而且桩体半径越大,桩端扩张压力降低速率越快.

### 参考文献:

[1] VESIC A C. Expansion of cavity in infinite soil mass[J]. J Soil Mech Found Div ,ASCE ,1972 ,98(3) :265-289.  
[2] YU H S ,CARTER J P. Rigorous similarity solution for cavity expansion in cohesive-frictional soil[J]. The International Journal of Geomechanics ,2002 ,2(2) :233-258.  
[3] 韩选江.静压桩的压桩力和承载力的试验研究[J]. 建筑结构学报 ,1996 ,17(6) :71-77.  
[4] 张明义.静力压入桩的研究与应用[M].北京:中国建材工业出版社,2004:20-22.  
[5] 龚晓南.土塑性力学[M].1版.杭州:浙江大学出版社,1990:203-205.  
[6] KEER L M ,XU Yong-lin ,LUK V K. Boundary effects in penetration of perforation[J]. Journal of Applied Mechanics ,1998 ,65 :489-496.  
[7] 李月健,陈云敏.黏性土地基中群桩施工产生土体内的位移场[J]. 建筑结构学报 ,2001 ,22(3) :88-91.  
[8] KASSIR M K ,SIH G C. Mechanics of fracture[M]. Dordrecht :Noordhoff International Publishing ,1975 :1-4.

## Analysis of expansion pressure at tip of jacked piles

ZHU Ning , SHI Jian-yong

( *Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China* )

**Abstract** :The effect of pile jacking on soil around is closely related to the expansion stress at the tip of piles. Based on the current research on pile jacking , the calculation method currently used for analysis of the expansion pressure at the tip of piles was improved , and the process of pile jacking was simulated and analyzed. A static mechanical equilibrium equation for pile jacking in semi-infinite space was established , and the solution to expansion pressure at the tip of piles was obtained under elastic condition. Moreover , the relationship between the expansion pressure and the depth of pile packing was discussed.

**Key words** :static pressure pile ; expansion pressure at tip of pile ; simulation of pile jacking