

文章编号: 1001-1986(2010)02-0036-03

基于二次抛物线型强度包络线的管桩挤土效应分析

刘伟平, 扶名福, 胡小荣

(南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 假定管桩在沉桩时的挤土过程是一个圆柱形孔扩张过程。基于具有抛物线型强度包络线和圆孔扩张理论对管桩的挤土效应进行分析研究。分析了桩周土体周围土体的弹塑性力学行为, 得到应力场和位移场等的表达式, 并求得其塑性区半径、孔内最终压力。其结果可以为管桩工程问题提供理论依据。

关键词: 管桩; 挤土效应; 二次抛物线型强度包络线; 弹塑性分析

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.009

Analysis of driving effect of tubular pile based on two-parameter parabolic failure envelope

LIU Weiping, FU Mingfu, HU Xiaorong

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Based on the hypothesis that the pile driving process is regarded as cavity expansion, according to two-parameter parabolic failure envelope and the cavity expansion theory, the driving effect of the tubular pile is studied. The elasto-plastic analysis solution of the stress field and displacement field of the soil around the pile are given. The radius of plastic zone and the limit expansion pressure are obtained. It can provide theoretical supports for some tubular pile engineering practices.

Key words: tubular pile; effect of pile driving; two-parameter parabolic failure envelope; elasto-plastic analysis

管桩在各种建筑基础中已得到广泛应用。但其在沉桩过程中会产生挤土效应, 导致桩周土体侧向变形和隆起, 该问题已得到业界的广泛关注^[1-4]。在分析岩土材料问题时, 通常采用的强度包络线是直线型^[3], 而实际上, 大多数岩土材料的强度包络线应该是非线性的, 如抛物线型、双曲线型等^[5]。本文基于非线性的强度包络线, 即抛物线型强度包络线, 应用圆孔扩张理论^[6]对管桩的挤土效应进行分析。

1 二次抛物线型强度包络线

二次抛物线包络线的一般表达式为^[5]:

$$|\tau|^2 = \lambda(\sigma + \sigma_t), \quad (1)$$

式中 σ_t 为材料的单轴抗拉强度; λ 为待定正常数, 由实验求出, 若采用单向压缩实验确定时, 其值表达式为:

$$\lambda \approx \frac{\sigma_c^2}{2(\sigma_c + 2\sigma_t)}, \quad (2)$$

式中 σ_c 为材料的单轴抗压强度。

其主应力表达式为:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 = \lambda \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) + B, \quad (3)$$

$$\text{式中 } B = \lambda\sigma_t - \frac{\lambda^2}{4}。$$

土木工程材料中常用到摩擦角 φ 和粘聚力 c , 两者与 σ_t 、 σ_c 之间关系为^[7]:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (5)$$

式中 α 为材料的拉压强度比。

2 管桩的挤土效应分析

采用柱孔扩张法对管桩进行挤土效应理论分析, 分别假定初始小孔和终孔形状为圆柱形。在挤土作用的分析过程中, 假设: 土体为均匀的理想弹

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(10862004); 江西省自然科学基金项目(2007GZC2073); 教育部博士点基金项目(20050403002)

作者简介: 刘伟平(1981—), 男, 江西兴国人, 博士研究生, 主要从事岩土工程科研与教学工作。

塑性体;土体极限曲线采用二次抛物线型强度包络线;将管桩沉桩时的挤土过程,看作是一个有初始孔径的圆柱形孔扩张过程,初始孔径等于管桩的内径,最终孔径等于管桩外径,将问题简化为平面轴对称问题^[2]。

2.1 基本方程

土单元计算模型见图1。

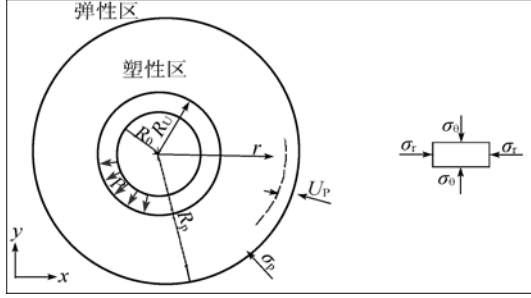


图1 土单元计算模型

Fig. 1 Soil element calculation model

平衡方程为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (6)$$

几何方程为:

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (7)$$

式中 σ_r 为径向应力; σ_θ 为切向应力; ε_r 为径向应变; ε_θ 为切向应变; u_r 为径向位移; r 为半径。

a. 弹性区

弹性本构方程为:

$$\varepsilon_r = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_r - \frac{1-\mu}{\mu} \sigma_\theta \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_\theta - \frac{1-\mu}{\mu} \sigma_r \right) \quad (9)$$

式中 E 为弹性模量; μ 为泊松比。

在弹塑性交界处 $r=R_p$, $\sigma_r = \sigma_p$, σ_p 为弹塑性交界处径向应力, R_p 为塑性区半径。根据弹性理论,可得弹性状态下的应力:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_p R_p^2}{r^2} \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_p R_p^2}{r^2} = -\sigma_r \quad (11)$$

轴对称条件下的径向位移:

$$u_r = \frac{1+\mu}{E} r \sigma_r \quad (12)$$

b. 塑性区

对于柱形孔,孔洞处于轴对称平面应变状态,塑性区径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 、材料满足二次抛物线型强度包络线的极限平衡条件式(3):

$$\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \right)^2 = \lambda \left(\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \right) + B \quad (13)$$

令 $\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = s$, 则:

$$\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} = (\lambda s + B)^{1/2} \quad (14)$$

因此得:

$$\sigma_r = s + (\lambda s + B)^{1/2} \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = s - (\lambda s + B)^{1/2} \quad (16)$$

2.2 塑性区半径和径向位移

考虑体积平衡条件,即孔的体积变化等于弹性区的体积加上塑性区的体积变化。

$$\pi R_u^2 - \pi R_0^2 = \pi R_p^2 - \pi (R_p - u_p)^2 + \pi (R_p^2 - R_u^2) \Delta \quad (17)$$

式中 R_u 为圆柱最终孔半径; R_0 为圆柱初始孔半径; u_p 为塑性区外侧边界处径向位移, Δ 为塑性区平均体积应变。

略去 u_p 高次项,并展开得:

$$1 - \frac{R_0^2}{R_u^2} = 2u_p \frac{R_p}{R_u^2} + \frac{R_p^2}{R_u^2} \Delta - \Delta \quad (18)$$

在弹塑性交界处 $r=R_p$, $\sigma_r = \sigma_p$, 代入二次抛物线型强度包络线的极限平衡条件,则得:

$$\left(\frac{\sigma_p - \sigma_\theta}{2} \right)^2 = \lambda \left(\frac{\sigma_p + \sigma_\theta}{2} \right) + B \quad (19)$$

且在 $r=R_p$ 处有 $\sigma_\theta = -\sigma_p$, 即得:

$$\sigma_p = \sqrt{B} \quad (20)$$

由弹性区域位移解式(12)可知,在 $r=R_p$ 处,有:

$$u_p = \frac{1+\mu}{E} R_p \sigma_p = \frac{1+\mu}{E} R_p \sqrt{B} \quad (21)$$

代入式(18):

$$1 - \frac{R_0^2}{R_u^2} = 2 \frac{1+\mu}{E} \frac{R_p^2}{R_u^2} \sqrt{B} + \frac{R_p^2}{R_u^2} \Delta - \Delta \quad (22)$$

由此可得塑性区半径:

$$R_p = R_u \sqrt{\frac{G \left(1 + \Delta - \left(\frac{R_0}{R_u} \right)^2 \right)}{\sqrt{B} + G\Delta}} \quad (23)$$

式中 $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 。将式(23)代入式(21),即得:

$$u_p = \frac{1}{2G} R_u \sqrt{B} \sqrt{\frac{G \left(1 + \Delta - \left(\frac{R_0}{R_u} \right)^2 \right)}{\sqrt{B} + G\Delta}} \quad (24)$$

2.3 塑性区应力

将式(15)和(16)代入平衡方程可得:

$$\left[1 + \frac{\lambda}{2}(\lambda s + B)^{-1/2}\right] \frac{ds}{dr} + \frac{2(\lambda s + B)^{1/2}}{r} = 0, \quad (25)$$

解得：

$$r = (\lambda s + B)^{-1/4} \exp \left[\frac{C}{2} - \frac{(\lambda s + B)^{1/2}}{\lambda} \right], \quad (26)$$

式中 C 为积分常数。

在 $r=R_p$ 处时, 有 $\sigma_\theta = -\sigma_r$, 即得 $s = s_0 = 0$, 代入式(26), 有:

$$\exp \left(\frac{C}{2} \right) = R_p B^{1/4} \exp \left(\frac{B^{1/2}}{\lambda} \right), \quad (27)$$

从而得:

$$r = \frac{R_p B^{1/4}}{(\lambda s + B)^{1/4}} \exp \left[\frac{B^{1/2}}{\lambda} - \frac{(\lambda s + B)^{1/2}}{\lambda} \right]. \quad (28)$$

由式(15)、式(16)、式(28)即可求出塑性区的应力分布, 给一个 s 值即可求得 r 的一个对应值, 再结合式(28)可确定 r 与 σ_r 、 σ_θ 的对应关系。在管桩外半径处, 即 $r=R_u$ 时, 有 $\sigma_r=P_u$, P_u 为孔内最终压力。

3 算例分析

采用某粘性土参数: 当 $c=25.2$ kPa, $\varphi=20.2^\circ$ 时, $\sigma_i=35$ kPa, $\sigma_c=72$ kPa; 假设平均体积应变 $\Delta=0.02$, 泊松比 $\mu=0.35$, 弹性模量 $E=5.0$ MPa, 管桩内半径 $R_0=0.3$ m, 管桩外半径 $R_u=0.5$ m。表 1 给出了桩周土体的位移场及应力场计算结果, 径向位移 14.3 mm, 孔内最终压力 125.8 kPa, 塑性区半径为 7.5 倍的管桩内半径。图 2 给出了桩周土体应力沿径向分布图。

表 1 桩周土体的位移场及应力场计算结果
Table 1 The stress field and displacement field of the soil around the pile

R_0/m	R_u/m	R_p/m	u_p/mm	p_u/kPa	σ_p/kPa
0.3	0.5	2.25	14.3	125.8	23.6

4 结 语

大多数岩土材料的强度包络线应该是非线性

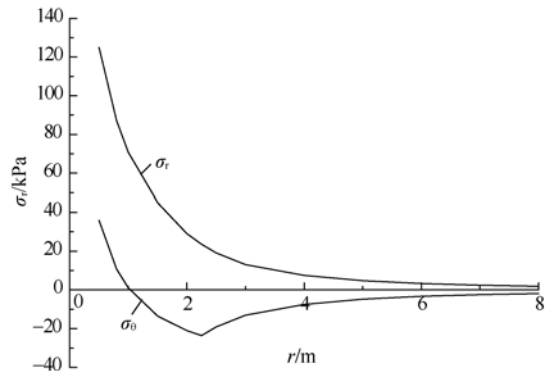


图 2 桩周土体应力分布图

Fig.2 The distribution of stresses with the distance around the pile

的, 本文基于非线性强度包络线, 即抛物线型强度包络线, 利用圆孔扩张理论对管桩的挤土效应进行分析研究, 得到了桩周土体的应力场和位移场, 并推导出了塑性区半径、孔内最终压力等。通过分析, 选取抛物线作为强度包络线是合理的。管桩的挤土效应问题较为复杂, 选取合适的强度准则有利于更好地分析管桩周围土体的弹塑性力学行为, 以便正确指导工程实践。

参考文献

- [1] 徐建平, 周健, 许朝阳, 等. 沉桩挤土效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 235-238.
- [2] 汪鹏程, 朱向荣. 沉管灌注筒桩施工挤土效应分析与比较[J]. 科技通报, 2005, 21(2): 185-188.
- [3] 刘裕华, 陈征宙, 彭志军, 等. 应用圆孔柱扩张理论对预制管桩的挤土效应分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2167-2172.
- [4] 郑俊杰, 聂重军, 鲁燕儿. 基于土塞效应的柱形孔扩张问题解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增): 4004-4008.
- [5] 赵彭年. 松散介质力学[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [6] VISIC A S. Expansion of cavity in infinite soil mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(3): 265-290.
- [7] 范文, 白晓宇, 俞茂宏, 等. 基于统一强度理论的地基极限承载力公式[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1617-1622.