

桩尖附近应力场研究

叶元芬, 王 成

(重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘 要: 在分析桩侧极限摩阻力与桩长规律的基础上, 通过桩侧摩阻力在桩尖平面应力分布的合理假设, 推导了桩尖附近应力场公式, 得出了桩尖附近最大地基应力与桩长、桩径、桩周土内摩擦角和桩顶荷载的规律以及影响桩尖应力的敏感因素, 为桩尖附近其他地下结构的验算提供依据。

关 键 词: 桩尖附近; 侧阻力分布; 最大桩尖应力

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Study on stress fields near pile tip

YE Yuan-fen, WANG Cheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on analyzing the regularity of relation between side ultimate friction resistance and pile length, under reasonable assumptions of stress fields near pile tip caused by side friction resistance, formulae for foundation stress fields near pile tip have been derived. The relations between the maximum stress and some sensitive factors such as pile length, pile diameter, internal friction angle of soil and load of pile top are deduced. The study provides useful references to the analysis of other underground structures near pile tip.

Key words: vicinity pile tip; side friction resistance distribution; maximum stress near pile tip

1 引 言

在基础设施建设中, 不可避免地会遇到交通隧道结构、纵横交错的人防洞室结构、地下商场与仓库以及各种管网等, 而在这些地面上建造大型结构物或城市高架桥等, 常需要向地下设置桩基础。因此, 计算桩尖附近应力场显得非常重要。本文将在分析桩侧极限摩阻力与桩长规律基础上, 研究桩尖附近应力场分布。

2 桩侧极限摩阻力与桩长关系分析

桩侧摩阻力与桩端摩阻力之比例, 以及与桩长的关系是土木工程中最为复杂和最难确定的问题之一, 来自工程试桩资料的分析是有效的途径。从文献^[1]选取若干桩侧极限摩阻力及桩长径比数据, 采用二次曲线进行拟合, 得到桩侧极限摩阻力与桩长

径比的关系为

$$kP = 1\,583.86 + 2.03\left(\frac{l}{d}\right) + 0.35\left(\frac{l}{d}\right)^2 \quad (1)$$

式中: P 为作用于桩顶荷载; k 为桩侧摩阻力比例系数; kP 为桩侧极限摩阻力; l 为桩长; d 为桩径; l/d 为桩的长径比。

针对桩侧摩阻力的分布, 土木界有很多假定, 本文以桩侧摩阻力呈抛物线及桩侧摩阻力呈折线分布的典型情况分析桩尖附近最大地基应力, 推导相应计算公式, 并对影响桩尖附近最大地基应力的各因素进行敏感性分析。

3 桩尖附近应力场公式推导

3.1 基本假定

(1) 桩侧摩阻力以土的内摩擦角 ϕ 向下扩散, 在桩尖平面上呈抛物线分布^[2], 如图 1 所示。

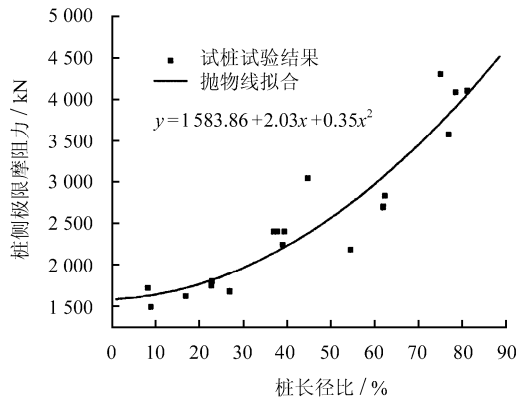


图1 桩侧极限摩阻力与桩长径比关系图

Fig.1 Relation between side ultimate friction resistance and length-diameter ratio of pile

(2) 桩尖平面土应力所围体积近似为外包圆柱体积的一半^[2], 即

$$V = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{d}{2} + x \tan \phi \right)^2 d\sigma'_{\max} \quad (2)$$

式中: V 为图 2 中阴影部分所围体积; $d\sigma'_{\max}$ 为 dx 微段桩侧摩阻力引起的在桩尖平面上桩轴线处的最大地基应力; ϕ 为桩周土的内摩擦角。

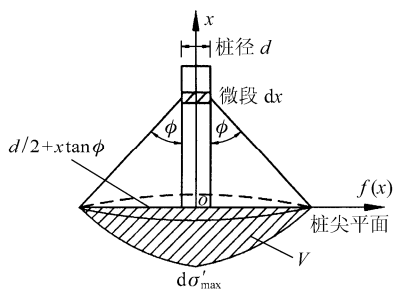
(3) 桩端阻力引起地基应力在桩尖平面均匀分布, 为

$$\sigma''_{\max} = \frac{4(1-k)P}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中: P 为桩顶荷载; $(1-k)P$ 为桩端阻力。

3.2 桩尖附近最大地基应力分析

以桩尖为原点, 建立基本坐标系, 如图 2 所示。

图2 dx 桩段受力图Fig. 2 Force analysis of pile segment- dx

取桩身微段 dx 分析, 桩侧摩阻力为 $f(x)dx$, 由假定 (2) 得

$$f(x)dx = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{d}{2} + x \tan \phi \right)^2 d\sigma'_{\max} \quad (4)$$

移项并考虑假定 (1) 得

$$d\sigma'_{\max} = \frac{2f(x)}{\pi \left(\frac{d}{2} + x \tan \phi \right)^2} dx \quad (5)$$

3.2.1 桩侧摩阻力抛物线分布时桩尖附近应力场

桩侧摩阻力服从抛物线^[3]分布, 如图 3 所示。

$$f(x) = ax^2(x-l) \quad (a \text{ 为待定系数}) \quad (6)$$

由 $\int_0^l f(x) dx = kP$ 条件, 可得

$$a = -\frac{12kP}{l^4} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 可得

$$f(x) = -\frac{12kP}{l^4} x(x-l)^2 \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (5), 并积分可得由桩侧摩阻力扩散产生的地基应力场, 叠加上由桩端阻力所产生的地基应力 (式 (3)), 即可得到桩尖附近最大地基应力:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} = & - \int_0^l \frac{24kPx^2(x-l)}{\pi l^4 \left(\frac{d}{2} + x \tan \phi \right)^2} dx + \frac{4(1-k)P}{\pi d^2} = \\ & - \frac{24kP \cot^2 \phi}{\pi l^4} \left[\frac{\left(l + \frac{d}{2} \cot \phi \right)^2}{2} - \frac{d^2 \cot^2 \phi}{8} - \right. \\ & \left. l^2 - \frac{3ld}{2} \cot \phi - \frac{ld}{2} \right] + \left(\frac{3}{4} d^2 \cot^2 \phi + dl \cot \phi \right) \cdot \\ & \left. \ln \frac{l + \frac{d}{2} \cot \phi}{\frac{d}{2} \cot \phi} \right] + \frac{4(1-k)P}{\pi d^2} \end{aligned} \quad (9)$$

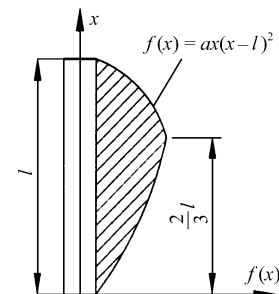


图3 桩侧摩阻力抛物线分布图

Fig.3 Parabolic distribution of pile side friction resistance

3.2.2 桩侧摩阻力折线分布时桩尖附近应力场

桩侧摩阻力服从折线分布, 如图 4 所示 (图中

$f(2l/3)$ 为待定系数); 由 $\int_0^l f(x) dx = kP$ 条件, 可得

$$f\left(\frac{2l}{3}\right) = \frac{6kP}{5l} \quad (10)$$

将式(10)代入, 得

$$f(x) = \begin{cases} \frac{6kP}{5l} & 0 \leq x \leq \frac{2l}{3} \\ \frac{18kP}{5l^2}(l-x) & \frac{2l}{3} < x \leq l \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5), 并积分可得由桩侧摩阻力扩散的最大地基应力, 叠加上桩端应力(式(3)), 即可得到桩尖附近最大地基应力:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} = & \int_0^{\frac{2l}{3}} \frac{12kP}{5\pi l \left(\frac{d}{2} + x \tan \phi\right)^2} dx + \\ & \int_{\frac{2l}{3}}^l \frac{36kP(l-x)}{5\pi l^2 \left(\frac{d}{2} + x \tan \phi\right)^2} dx + \frac{4(1-k)P}{\pi d^2} = \\ & -\frac{36kP}{5\pi l^2 \tan^2 \phi} \left(\ln \frac{\frac{d}{2} + l \tan \phi}{\frac{d}{2} + \frac{2}{3} l \tan \phi} - \frac{2l \tan \phi}{3d} \right) + \\ & \frac{4(1-k)P}{\pi d^2} \end{aligned} \quad (10)$$

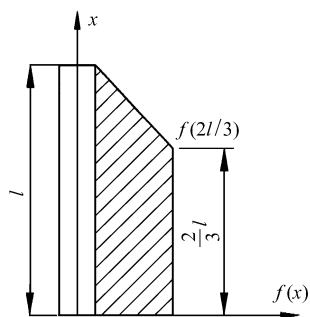


图4 桩侧摩阻力折线分布图

Fig.4 Broken-line distribution of pile side friction resistance

4 桩尖附近应力场与各参数的敏感性分析

根据桩基础荷载传递机理, 对长径比较大的桩基础, 其传递至桩端的荷载较小, 桩尖最大地基应力一般较小。对于长径比较小的桩基础, 其桩端仍承担一定比例的荷载, 对桩尖附近最大地基应力必须进行验算。尤其在错综复杂的地下空间结构物及纵横交错的管网通道中布设桩基础时, 验算更显得尤为重要。

对计算桩尖附近最大地基应力的式(9)和式(12)进行分析: (1) 在定值 d 、 ϕ 、 P 时, $\sigma_{\max}$ - l 关系图, 见图5; (2) 在定值 l 、 ϕ 、 P 时, $\sigma_{\max}$ - d 关系图, 见图6; (3) 在定值 d 、 l 、 P 时, $\sigma_{\max}$ - ϕ 关系图, 见图7; (4) 在定值 d 、 l 、 ϕ 时, $\sigma_{\max}$ - P 关系图, 见图8。

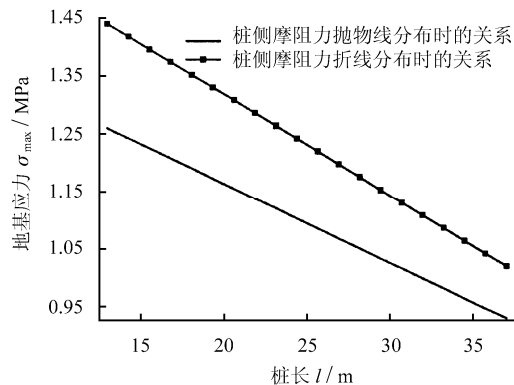


图5 桩尖附近最大地基应力与桩长关系图

Fig.5 Relations between maximum foundation stress near pile tip and pile length

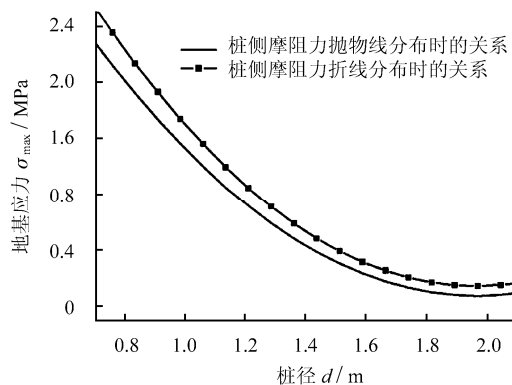


图6 桩尖附近最大地基应力与桩径关系图

Fig.6 Relations between maximum foundation stress near pile tip and pile diameter

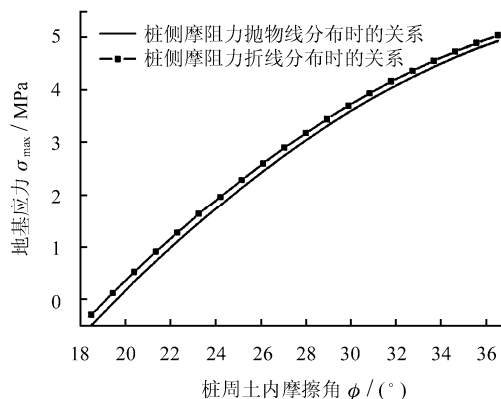


图7 桩尖附近最大地基应力与桩周土内摩擦角关系图

Fig.7 Relations between maximum foundation stress near pile tip and soil internal friction angle

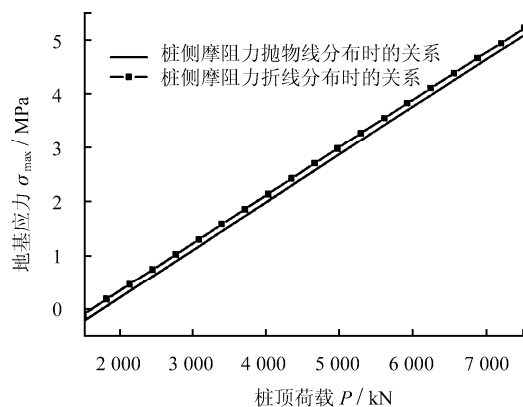


图8 桩尖附近最大地基应力与桩顶荷载关系图

Fig.8 Relations between maximum foundation stress near pile tip and load on top of pile

由图5~8可知,当桩侧摩阻力呈折线分布时,桩尖附近最大地基应力较大。这亦可由荷载传递机理解释。

当 $l \ll d$ 时,式(9)可简化为

$$\sigma_{\max} = \frac{12kP}{\pi l^2} + \frac{4(1-k)P}{\pi d^2} \quad (13)$$

当 $l/d > 100$ 时,其桩端土承担的荷载可忽略不计^[4],且将式(1)代入,式(13)可进一步简化:

$$\sigma_{\max} = \frac{12 \left[1583.86 + 2.03 \left(\frac{l}{d} \right) + 0.35 \left(\frac{l}{d} \right)^2 \right]}{\pi l^2} \quad (14)$$

当桩长径比很大时,桩尖附近最大地基应力趋于0。

5 结 论

本文通过分析桩侧极限摩阻力与桩长的关系,合理假定桩尖平面应力分布,研究了桩尖附近地基

应力场,并对其进行各参数的敏感性分析,得出以下结论:

(1) 在桩侧摩阻力分布变化时,桩长和桩径是影响桩尖附近应力场的敏感因素。

(2) 在桩侧摩阻力分布变化时,桩尖应力场与各参数的关系是:桩尖附近最大地基应力随桩长、桩径的增大而减小,随桩周土内摩擦角及桩顶荷载的增大而增大。

(3) 对于不同的桩侧摩阻力分布,各参数与桩尖附近应力场的关系基本一致。

(4) 桩长及桩顶荷载与桩尖附近最大地基应力基本呈线性变化,桩径与桩尖附近最大地基应力呈抛物线变化,桩周土内摩擦角与桩尖附近最大地基应力呈近似指数变化。

(5) 设计中可根据桩长、桩长径比、桩周土及桩顶设计荷载等因素综合考虑,选择合适的桩侧摩阻力分布,计算桩尖附近最大应力。

(6) 桩尖附近最大应力可为其附近地下结构物的验算提供依据。

参 考 文 献

- [1] 徐新跃. 软土地基钻孔灌注桩竖向承载力试验分析[J]. 岩土工程界, 2002, 5(2): 47-49.
XU Xin-yue. Vertical bearing capacity test analysis of bored pile in soft ground[J]. *Journal of Geotechnical Engineering World*, 2002, 5(2): 47-49.
- [2] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004, 26-27.
- [3] 黄绍铭, 高大钊主编. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 桩基工程手册编委会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995, 26-27.