

DOI:10.11918/201901026

无黏性土中钻孔径向卸荷收缩理论解

赵春风^{1,2}, 费逸^{1,2}, 赵程^{1,2}, 吴悦^{1,2}, 王有宝^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘要: 在钻孔灌注桩成孔过程中会引起钻孔周边土体径向应力卸载和钻孔收缩变形, 为此, 基于 SMP 屈服准则和非相关联流动法则, 推导在无黏性土中竖向钻孔径向卸荷孔周应力场位移场解析解, 并结合 Berezhantsev 和夹心墙两种土压力公式, 得出孔周孔壁位移沿钻孔深度方向的变化曲线, 并与忽略塑性区弹性变形的结果进行对比。参数分析的结果表明, 卸荷因子 n 和钻孔半径 a_0 及内摩擦角 ϕ 对孔壁位移均有明显影响, 其中 n 和 ϕ 的影响存在着临界点, n 和 ϕ 小于该值, 孔壁位移则显著增大; 而剪胀角 ψ 的影响有限, 可忽略不计。卸荷因子 n 是一个只与内摩擦角 ϕ 有关的函数; 而 r_p/a 是一个只与 ϕ 、 n 有关的定值, 与深度方向无关, 故无黏性土中竖向钻孔的自立深度为 0。忽略塑性区弹性变形的柱孔收缩位移解相对偏小, 而塑性区半径解相对偏大, 故忽略塑性区弹性变形的解答在工程应用中不保守。另外, 选取不同土压力沿深度方向的孔壁位移值存在较大差别, 在竖向钻孔时的土压力选取还需与现场实测相结合。

关键词: 竖向钻孔; SMP 屈服准则; 无黏性土; 径向卸荷; 理论解

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)04-0135-07

Analytical solution for borehole contraction caused by radial unloading in cohesiveless soil

ZHAO Chunfeng^{1,2}, FEI Yi^{1,2}, ZHAO Cheng^{1,2}, WU Yue^{1,2}, WANG Youbao^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: The drilling process of a bored pile can cause radial unloading-induced borehole contraction. In this study, the stress-displacement solution for a borehole under radial unloading in cohesiveless soil was derived based on the SMP yield criterion and the non-associated flow rule. By combining with earth pressure formulas derived from cavity wall formula and Berezhantsev's formula, the variation curves of borehole wall displacement with borehole depth were obtained, which were compared the results of the case with elastic deformation ignored in plastic zone. Parameters study shows that the unloading factor n , borehole radius a_0 , and internal friction angle ϕ had obvious influences on borehole wall displacement, and the effects of n and ϕ had a critical value where the borehole wall displacement was significantly increased when n and ϕ were less than the value. However, the influence of dilatancy angle ψ on borehole wall displacement was limited and could be ignored. In addition, n was a function only related to ϕ , while r_p/a was a constant value only related to n and ϕ and had no relation with depth, which suggests that the self-supported depth of vertical drilling in cohesiveless soil was zero. Moreover, it can be found that the wall displacement was smaller and the plastic zone radius was larger when elastic deformation was ignored in plastic zone, which indicates that the solution of ignoring elastic deformation in plastic zone is not conservative in engineering applications. Lastly, the value of borehole wall displacement with different earth pressures along depth was quite different, which shows that the selection of earth pressure in vertical drilling should be combined with real field measurement.

Keywords: vertical drilling; SMP yield criterion; cohesiveless soil; radial unloading; analytical solution

钻孔灌注桩在竖向成孔过程中所形成的钻孔孔壁自由面, 会使孔周地层径向应力得到释放, 往往导致钻孔孔壁收缩和产生塌孔、断桩等现象, 影响桩身

质量。考虑土体径向应力的卸荷效应在钻孔灌注桩桩基工程中不可忽视。径向卸荷引起的柱孔收缩与不同深度的径向土压力有密切关系, 很多学者对土压力进行了研究。Tatiana 等^[1]综合比较了柱孔孔周土压力分布的理论公式及实验进展。马英明^[2]总结了如下 3 个土压力计算理论: 平面挡土墙主动土压力理论, 如似液地压公式, 但该公式不能反映孔径的影响; 拱效应理论, 如夹心墙土压力公式, 该理论表

收稿日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(41672265, 41272295); 上海市启明星计划项目(17QC1400600)

作者简介: 赵春风(1964—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 费逸, feiyi11@126.com

明水平土压力随深度呈指数函数变化,到一定深度趋于一定值;空间轴对称极限平衡理论,该理论考虑了土体圆环效应,如 Berezantsev 土压力公式. 郑榕明等^[3]在 Berezantsev 土压力公式的基础上对 Haar-Von Karman 假定进行了修正,引入了变量的土压力系数,最后求解出主动土压力的通解. Cheng 等^[4-5]在计算挡土墙土压力时考虑了墙土壁面摩擦、边坡角度、超荷载和土体黏聚等因素,得到了主动土压力特征方程的数值解. Liu 等^[6]假定侧压力系数为线性变化,采用切向应力系数的滑移线方法,得到了轴对称条件下的单桩桩周主动土压力表达式. Prater^[7]采用轴对称条件下的库伦楔形理论,假定孔周土体呈圆锥形破坏面,求解了土体径向和切向的土压力值. 赵春风等^[8]采用弹性徐变理论来描述混凝土变形特性,得到钻孔灌注桩深部桩周径向土压力随时间变化的解析式. 陈志坚等^[9]通过桩身混凝土对桩周土挤密作用的模型试验研究,给出了钻孔灌注桩桩侧压力的分布和变化规律. 另一方面,对于小孔扩张理论的研究虽已较多^[10-11],但对于钻孔收缩的研究并不多见. Yu 等^[12-13]考虑土体的剪胀性,推导了柱(球)孔收缩的孔周应力位移场的大应变解,解释了砂土中的旁压卸载实验. 温世游等^[14]考虑了土体的应变软化特性,推导出孔周存在弹性区、软化区和塑性区的柱(球)孔收缩理论解. 温世游等^[15]忽略了塑性区的弹性变形,得到了排水条件下球形空腔收缩问题的弹塑性解答. 以上研究多集中于桩身土压力的确定或某一断面问题的解答,未对钻孔过程中径向应力松弛导致的孔壁收缩形成的沿深度方向塑性区范围及孔壁位移变化情况进行研究.

Zhao 等^[16]采用弹脆塑性软化模型对黏性土中钻孔径向卸荷沿深度方向变化的问题进行了理论推导,但该文只探讨了黏性土体情况. 文献[17]考虑了土体静止侧压力系数 K_0 的影响,采用相关联流动法则,对钻孔收缩过程中孔周存在两种应力状态而产生两个塑性区的情况进行了分析,但该工况局限于摩尔库伦屈服准则中.

基于此,采用平面应变条件下的 SMP 屈服准则,考虑塑性变形的非相关联流动法则,结合 Berezantsev 土压力公式和夹心墙土压力公式,推导了无黏性土钻孔卸荷收缩过程中的孔周应力场位移场的解析解,得到了孔周塑性区半径和孔壁位移沿钻孔深度方向的理论表达式,分析了不同参数对其的影响,对比了忽略塑性区弹性变形的结果. 所得结论有助于对实际工程中钻孔灌注桩成孔卸荷的机理认识.

1 水平土压力的确定

土压力公式采用 Berezantsev 土压力公式^[18](别氏公式)以及夹心墙土压力公式,在无黏性土中别氏公式为

$$p_0 = \gamma a_0 \frac{\tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}{\alpha - 1} \left[1 - \left(\frac{a_0}{r_b} \right)^{(\alpha-1)} \right]. \quad (1)$$

其中: $r_b = a_0 + z \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$; $\alpha = 2 \tan \phi \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$.

对于不含水或者弱含水的无黏性土层,夹心墙土压力公式为^[2]

$$p_0 = \frac{\gamma r_u}{\tan \phi} \left(1 - \exp\left(-\frac{\lambda z \tan \phi}{r_u}\right) \right). \quad (2)$$

式中: λ 为侧压力系数, $\lambda = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$; ϕ 为内摩擦角; γ 为土体重度; r_u 为钻孔的初始半径.

2 问题描述及力学模型

无限半空间土体中轴对称的柱孔收缩问题,可视为平面应变问题,计算模型见图 1. 土体中初始水平地应力为 p_0 ,柱形孔初始半径为 a_0 . 在钻孔卸荷过程中随着孔内压力 p 的减小,钻孔半径由 a_0 变为 a ,孔周区域的土体先产生弹性变形,当 p 减小到临界压力时,土体进入塑性状态,从原来的整体弹性状态转变为弹塑性状态,此时定义塑性区半径为 r_p ,弹性与塑性区交界面位移为 u_{rp} ,对应的径向应力为临塑压力 p_y . 且规定应力、应变以压为正.

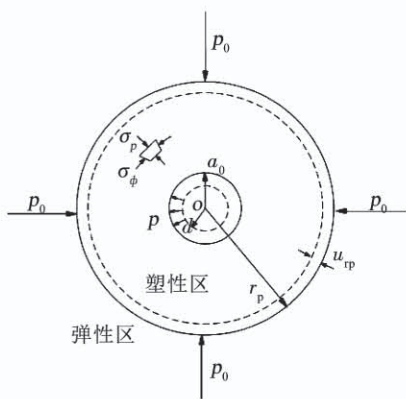


图 1 柱孔收缩力学模型平面图

Fig. 1 Mechanical model of cylindrical borehole contraction

平衡方程、几何方程和物理方程分别为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial \rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{\rho} = 0. \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_\rho = -\frac{du_\rho}{d\rho}, \\ \varepsilon_\phi = -\frac{u_\rho}{\rho}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_\rho = \frac{1-\nu^2}{E} \left(\sigma_\rho - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\phi \right), \\ \varepsilon_\phi = \frac{1-\nu^2}{E} \left(\sigma_\phi - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\rho \right). \end{cases} \quad (5)$$

平面应变条件下无黏性土的 SMP 准则^[19]为

$$\frac{\sigma_\phi}{\sigma_\rho} = R_{ps} = \frac{1}{4} \left\{ \sqrt{8 \tan^2 \phi + 9} + \sqrt{8 \tan^2 \phi + 6 - 2 \sqrt{8 \tan^2 \phi + 9} - 1} \right\}^2. \quad (6)$$

式中: σ_ρ 为土体径向应力, σ_ϕ 为土体环向应力; 在缩孔问题中 σ_ρ 为小主应力, σ_ϕ 为大主应力, 即 R_{ps} 为大小主应力之比. ϕ 为土体内摩擦角, 由三轴压缩试验测得.

应力边界条件为

$$\begin{cases} \sigma_{\rho(\rho=a)} = p, \\ \sigma_{\rho(\rho=\infty)} = p_0. \end{cases} \quad (7a)$$

$$(7b)$$

3 弹塑性解答

3.1 弹性区应力、位移场解答

结合式(3)~(5)及式(7b), 易求解出弹性区的应力位移场如下:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = p_0 + (p_y - p_0) \left(\frac{r_p}{\rho} \right)^2, \\ \sigma_\phi = p_0 - (p_y - p_0) \left(\frac{r_p}{\rho} \right)^2, \end{cases} \quad (8)$$

$$u_\rho = \frac{p_y - p_0}{2G} \left(\frac{r_p}{\rho} \right)^2 \rho. \quad (9)$$

将式(8)代入 SMP 屈服准则式(6), 得弹塑性界面径向应力为

$$p_y = \sigma_{\rho(\rho=r_p)} = \frac{2p_0}{1 + R_{ps}}. \quad (10)$$

3.2 塑性区应力、位移场解答

塑性区应力同时满足应力平衡微分方程和 SMP 屈服准则, 将式(6)代入式(3)得

$$\sigma_\rho = K \rho^{(R_{ps}-1)}, \quad (11)$$

式中 K 为积分常数.

将应力边界条件式(7a)和式(10)代入式(11), 可得积分常数为

$$K = p_y r_p^{(1-R_{ps})} = p a^{(1-R_{ps})}. \quad (12)$$

则塑性区径向、环向应力为

$$\begin{cases} \sigma_\rho = K \rho^{(R_{ps}-1)} = p \left(\frac{\rho}{a} \right)^{(R_{ps}-1)}, \\ \sigma_\phi = R_{ps} K \rho^{(R_{ps}-1)} = R_{ps} p \left(\frac{\rho}{a} \right)^{(R_{ps}-1)}. \end{cases} \quad (13)$$

塑性区采用非相关联流动法则

$$\begin{cases} F = \sigma_\phi - \beta \sigma_\rho = 0, \\ \beta = \frac{1}{4} \left\{ \sqrt{8 \tan^2 \psi + 9} + \sqrt{8 \tan^2 \psi + 6 - 2 \sqrt{8 \tan^2 \psi + 9} - 1} \right\}^2, \end{cases} \quad (14)$$

其中 ψ 为土体剪胀角.

则有

$$d\varepsilon_\rho^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_\rho} = -\beta d\lambda, \quad (15a)$$

$$d\varepsilon_\phi^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_\phi} = d\lambda, \quad (15b)$$

$$d\varepsilon_z^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} = 0. \quad (15c)$$

由式(15c), 结合弹塑性边界的初始时刻塑性应变为 0 的条件可得竖向塑性应变为 0, 即 $\varepsilon_z^p = 0$. 根据平面假定, 无论孔周土体为何种状态, 其应变值均应等于地基初始竖向应变值, 即 $\varepsilon_z^p + \varepsilon_z^e = \varepsilon_{z0}$, 其中 ε_{z0} 为未钻孔时地基土初始竖向应变. 根据弹性物理方程, ε_{z0} 的表达式为 $\varepsilon_{z0} = [\sigma_{z0} - \mu(\sigma_{\rho0} + \sigma_{\phi0})]/E$, 其中 $\sigma_{\rho0} = \sigma_{\phi0} = p_0 = K_0 \sigma_{z0}$, K_0 为土体静止侧压力系数, 故可得 $\varepsilon_z^e = \varepsilon_{z0}$.

联立塑性区弹性物理方程得竖向应力为

$$\sigma_z = \left(\frac{1}{K_0} - 2\mu \right) p_0 + \mu(\sigma_\rho + \sigma_\phi). \quad (16)$$

将上式代入塑性区弹性物理方程, 且结合应力分量公式(13), 可得

$$\begin{cases} \varepsilon_\phi^e = \frac{1}{E} \left[(R_{ps} - R_{ps}\mu^2 - \mu - \mu^2) K r^{(R_{ps}-1)} - \left(\frac{1}{K_0} - 2\mu \right) \mu p_0 \right], \\ \varepsilon_\rho^e = \frac{1}{E} \left[(1 - \mu^2 - R_{ps}\mu - R_{ps}\mu^2) K r^{(R_{ps}-1)} - \left(\frac{1}{K_0} - 2\mu \right) \mu p_0 \right]. \end{cases} \quad (17)$$

由式(15a)、(15b), 且根据初始屈服时各向塑性应变为 0 的条件可得

$$\varepsilon_\rho^p + \beta \varepsilon_\phi^p = 0. \quad (18)$$

根据塑性区的应变关系式及上式(18)得

$$\varepsilon_\rho + \beta \varepsilon_\phi = \varepsilon_\rho^e + \beta \varepsilon_\phi^e. \quad (19)$$

将几何方程(4)以及式(17)代入上式得

$$\frac{du_\rho}{d\rho} + \beta \frac{u_\rho}{\rho} = -\rho^{(R_{ps}-1)} - h. \quad (20)$$

其中

$$\begin{cases} t = -\frac{1}{E}(1 - \mu^2 - \mu R_{ps} - \mu^2 R_{ps} + \beta R_{ps} - \beta R_{ps} \mu^2 - \\ \beta \mu - \beta \mu^2) K, \\ h = \frac{1}{E}(1 + \beta) \left(\frac{1}{K_0} - 2\mu \right) \mu p_0, \end{cases}$$

解之得

$$u_\rho = C \rho^{-R_{ps}} - \frac{t}{2\beta} \rho^{R_{ps}} - \frac{h}{\beta + 1} \rho, \quad (21)$$

上式为塑性区位移公式,其中 C 为待解参数.

在弹塑性界面 $\rho = r_p$ 处,由径向位移相等的条件,结合式(9)可得

$$C = \left(\frac{p_y - p_0}{2G} + \frac{h}{\beta + 1} \right) r_p^{(1+R_{ps})} + \frac{t}{2\beta} r_p^{2R_{ps}}, \quad (22)$$

则塑性区位移为

$$u_\rho = \left(\frac{p_y - p_0}{2G} + \frac{h}{\beta + 1} \right) r_p^{(1+R_{ps})} \rho^{-R_{ps}} + \frac{t}{2\beta} r_p^{2R_{ps}} \rho^{-R_{ps}} - \frac{t}{2\beta} \rho^{R_{ps}} - \frac{h}{\beta + 1} \rho. \quad (23)$$

对于柱孔收缩而言,孔壁位移满足条件

$$u(a) = a - a_0. \quad (24)$$

式中: a_0 和 a 分别为柱形孔壁的初始和当前半径; $u(a)$ 为柱形孔壁位移,其在文中是相对位移,为钻孔初始半径和当前半径的差值.结合式(12)、(23)和(24)可解得 a .

3.3 忽略塑性区弹性变形的位移解答

文献[15]提到,在柱孔收缩过程产生塑性区的回弹模量数量级通常在 $10^6 \sim 10^7$,可忽略弹性变形的影响.为了对比本文的解答,当忽略塑性区中的弹性变形时,式(19)变为

$$\varepsilon_\rho + \beta \varepsilon_\phi = 0. \quad (25)$$

将几何方程式(4)代入上式,根据弹塑性交界处位移相等的条件,可得塑性区位移为

$$u_\rho = \frac{p_0(1 - R_{ps})}{2G(1 + R_{ps})} \left(\frac{r_p}{\rho} \right)^{(1+\beta)} \rho, \quad (26)$$

则孔壁的位移为

$$u(a) = \frac{p_0(1 - R_{ps})}{2G(1 + R_{ps})} \left(\frac{r_p}{a} \right)^{(1+\beta)} a = \frac{p_0(1 - R_{ps})}{2G(1 + R_{ps})} \left(p \frac{1 + R_{ps}}{2p_0} \right)^{\frac{1+\beta}{1-R_{ps}}} a. \quad (27)$$

结合式(24)可解得 a .

$$1 - \frac{a_0}{a} = \frac{p_0(1 - R_{ps})}{2G(1 + R_{ps})} \left(p \frac{1 + R_{ps}}{2p_0} \right)^{\frac{1+\beta}{1-R_{ps}}}. \quad (28)$$

根据解出的 a 值,结合式(12)可得出塑性区半径 r_p 值.

4 分析与讨论

4.1 卸荷因子的确定

当钻孔内压力 p 小于临塑压力 p_y 时,孔周才开始出现塑性区,即 $p \leq p_y$,结合式(10)得

$$p \leq 2p_0 / (1 + R_{ps}). \quad (29)$$

上式即钻孔卸荷孔周产生塑性变形的条件.

令 $p = np_0$, 则

$$n \leq \frac{2}{1 + R_{ps}}, \quad (30)$$

式中 n 为正数,定义为卸荷因子.结合屈服准则式(6)以及式(30),可得内摩擦角 ϕ 与卸荷因子 n 的关系如图 2 所示,可以看出,卸荷因子 n 是一个只与内摩擦角 ϕ 呈反比例关系的函数,且 n 随 ϕ 的增大非线性减小.

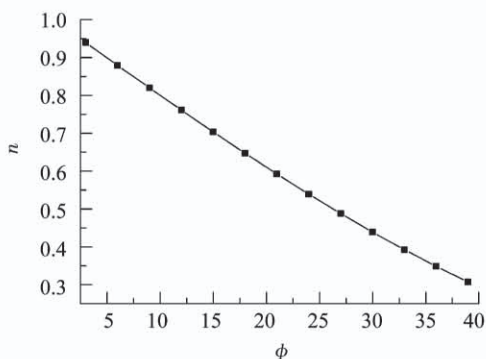


图 2 内摩擦角 ϕ 与卸荷因子 n 的关系

Fig. 2 Relation between internal friction angle ϕ and unloading factor n

4.2 r_p 与 a 的关系

联立式(10)、(12)可得 r_p 与 a 的关系式如下:

$$\frac{r_p}{a} = \left(\frac{p}{p_y} \right)^{\frac{1}{1-R_{ps}}} = \left(p \frac{1 + R_{ps}}{2p_0} \right)^{\frac{1}{1-R_{ps}}} = \left(\frac{n(1 + R_{ps})}{2} \right)^{\frac{1}{1-R_{ps}}}. \quad (31)$$

由式(31)可知,在无黏性土中钻孔形成弹塑性变形时,塑性区半径 r_p 与孔壁缩孔后当前半径 a 的比值是一个与内摩擦角 ϕ 、卸荷因子 n 有关的定值,其与深度方向无关,可见在无黏性土中竖向成孔,自立深度为零,须采取护壁措施.三者的关系如图 3 所示,在相同内摩擦角情况下, r_p/a 随着卸荷因子 n 的增大而增大;相同卸荷因子情况下, r_p/a 值随内摩擦角减小而增大.特别地,当 n 和 ϕ 很小时, r_p/a 值急剧变化. $\phi = 10^\circ$ 情况下, r_p/a 值在 $n = 0.1$ 和 0.3 时分别为 64.29 和 7.13; $\phi = 15^\circ$ 时 r_p/a 值则为 10.1 ($n = 0.1$) 和 2.75 ($n = 0.3$).可见卸荷因子和内摩擦角对塑性区半径有很大影响, ϕ 、 n 值越小,其对 r_p/a 值的影响越明显.

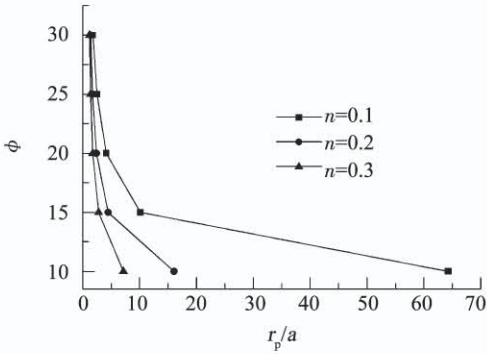


图 3 r_p/a 与内摩擦角 ϕ 、卸荷因子 n 的关系

Fig. 3 Relation between internal friction ϕ and r_p/a with different values of unloading factor n

5 算例分析

5.1 与忽略塑性区弹性变形结果的对比

本节对比了忽略塑性区弹性变形的解答,孔壁位移和塑性区半径沿深度方向的关系见图 4. 采用上海某高架工程静载试桩处⑤₂层砂土的力学参数为^[20]:内摩擦角 $\phi = 26^\circ$,土体重量 $\gamma = 19.6 \text{ kN/m}^3$,压缩模量 $E = 12.43 \text{ MPa}$,泊松比 0.3,剪胀角 $\psi = 5^\circ$. 钻孔深度 $z = 20 \text{ m}$,钻孔初始半径 $a_0 = 0.5 \text{ m}$. 土压力 p_0 采用别列赞采夫土压力公式(别氏公式),令卸荷因子 $n = 0.5$. 取静止侧压力系数 $K_0 = 1 - \sin \phi$ ^[21].

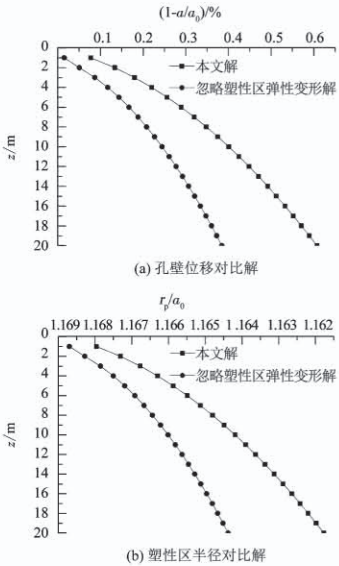


图 4 忽略塑性区弹性变形的孔壁位移及孔周塑性区半径对比解

Fig. 4 Comparison between the present solution and the solution of ignoring the elastic deformation in plastic zone with regard to borehole wall displacement and plastic zone radius

由图 4 可知,无黏性土钻孔卸荷过程中,孔壁位移沿深度逐渐增加,而孔周塑性区半径沿深度呈减小趋势,且塑性区半径值十分小,这与黏性土的结果^[16]有较大差距,可见在无黏性土中钻孔产生的孔

壁塑性区沿深度变化不明显. 另外,忽略塑性区弹性变形的沿深度方向孔壁位移解小于本文解答;塑性区半径解则略大于本文解答,在 $z = 20 \text{ m}$ 处, $1 - a/a_0$ 的本文解及忽略塑性区弹性变形解分别为 0.607% 和 0.385%; r_p/a_0 值为 1.161 和 1.164. 由此可知,在砂土等无黏性土中忽略塑性区弹性变形的解答相对不保守,需谨慎应用于工程实际中.

5.2 参数分析

为了研究参数的影响,取别氏公式和夹心墙土压力公式获得钻孔沿深度方向的孔壁位移. 令 $p = 0.4 p_0$,考虑如下 4 种因素:卸荷过程、钻孔半径、剪胀性及内摩擦角. 取基本参数如上算例相同. 由于塑性区半径沿深度方向的变化很小,变化值几乎为 0,在此不作特别分析.

5.2.1 卸荷程度的影响

为了研究钻孔过程卸荷效应的影响,取卸荷因子 n 分别为 0.2, 0.4, 0.6,孔壁位移随钻孔深度 z 的变化如图 5 所示.

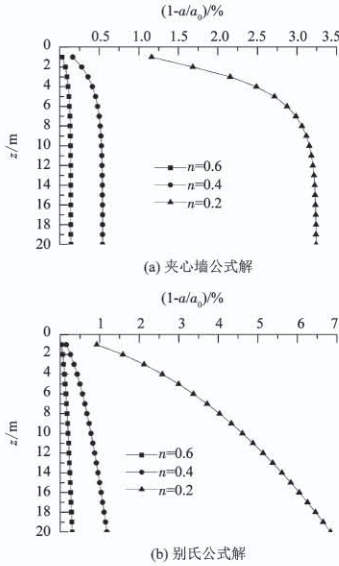


图 5 卸荷程度对孔壁位移的影响

Fig. 5 Effect of unloading on borehole wall displacement

由图 5 可以看出,孔壁位移受卸荷过程影响明显,在同一深度下,随着卸荷的增加,孔壁径向位移也随之增大;在同一卸荷条件下,别氏公式解中孔壁位移随钻孔深度 z 呈非线性增大;夹心墙公式解中则趋于收敛,且沿深度方向的孔壁位移数值大体上小于别氏公式解,在 $z = 20 \text{ m}$ 处, $n = 0.6$ 时的孔壁位移值为 0.139% (夹心墙公式) 和 0.304% (别氏公式);当卸荷到 $n = 0.2$ 时,孔壁位移值为 3.243% (夹心墙公式) 和 6.842% (别氏公式),可见土压力公式的选择对钻孔卸荷缩孔问题有很大的影响. 特别地,当卸荷程度相同时,孔壁位移的增大幅度不一样,当 n 由 0.4 变为 0.2 时孔壁位移的增大幅度大

于 n 由 0.6 卸荷至 0.4 时的孔壁位移增大幅度. 夹心墙公式中, n 由 0.6 卸荷至 0.4 时的孔壁位移增大幅度为 $(0.542 - 0.139)/0.139 = 2.9$, $n = 0.4$ 变为 $n = 0.2$ 卸荷时孔壁位移的增大幅度为 $(3.243 - 0.542)/0.542 = 4.98$; 别氏公式中, $n = 0.6$ 变为 $n = 0.4$ 卸荷时孔壁位移的增大幅度为 $(1.181 - 0.304)/0.304 = 2.88$, $n = 0.4$ 变为 $n = 0.2$ 卸荷时孔壁位移的增大幅度为 $(6.842 - 1.181)/1.181 = 4.79$. 别氏公式的孔壁位移增大幅度较夹心墙公式解略小.

5.2.2 钻孔半径的影响

将钻孔半径分别取为 $a_0 = 0.5, 0.7$ 和 0.9 m, 孔壁位移沿深度方向的变化曲线如图 6 所示. 可以看出, 孔壁位移在同一深度下随着钻孔半径的增大而增大, 且均随着钻孔深度的增加而增加. 在钻孔孔底处, 0.9 m 钻孔半径的孔壁位移与钻孔初始半径比值较 0.5 m 钻孔半径增大 0.412% (夹心墙公式) 和 0.308% (别氏公式). 在同一钻孔半径下, 别氏公式的孔壁位移沿深度方向的增大幅度要大于夹心墙公式, 当 $a_0 = 0.9$ m 时, 别氏公式中 $1 - a/a_0$ 为 1.488% ($z = 20$ m), 夹心墙公式则为 0.954% ($z = 20$ m).

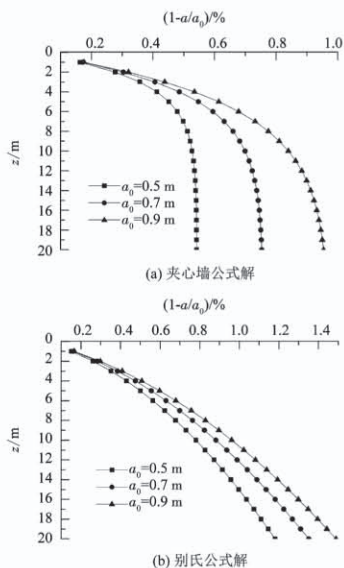


图 6 钻孔半径对孔壁位移的影响

Fig. 6 Effect of borehole radius on borehole wall displacement

5.2.3 剪胀角的影响

为了研究剪胀角对钻孔过程中孔壁位移的影响, 取 ψ 分别为 $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$, 孔壁位移与初始孔径比值沿深度方向的关系如图 7 所示. 可以看出, 不同剪胀角的孔壁位移沿深度方向的曲线几乎重合. 在夹心墙公式中, 当 $\psi = 25^\circ$ 时钻孔孔底位置的 $1 - a/a_0$ 为 0.539% ; 当 $\psi = 5^\circ$ 时, $1 - a/a_0$ 为 0.542% . 在别氏公式中, 当 $\psi = 25^\circ$ 时钻孔孔底位置的 $1 - a/a_0$

为 1.177% ; 当 $\psi = 5^\circ$ 时, $1 - a/a_0$ 为 1.181% . 可知随着剪胀角的增大, 孔壁位移值减小, 但变化很小, 甚至到了可忽略不计的地步. 可知剪胀角对钻孔孔壁位移的影响很小, 可忽略不计. 另外, 可知 $1 - a/a_0$ 沿深度增大而增大.

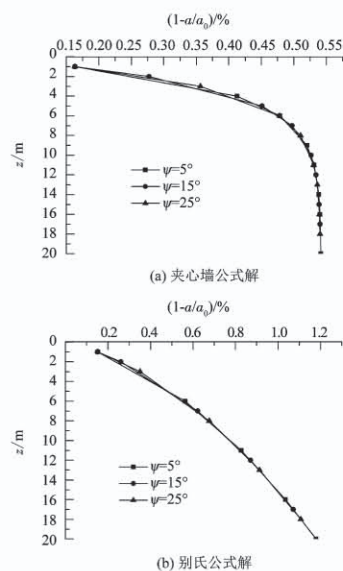


图 7 剪胀角对孔壁位移的影响

Fig. 7 Effect of dilation angle on borehole wall displacement

5.2.4 内摩擦角的影响

将内摩擦角分别取 $\phi = 10^\circ, 20^\circ$ 和 30° , 孔壁位移随钻孔深度 z 的变化值如图 8 所示.

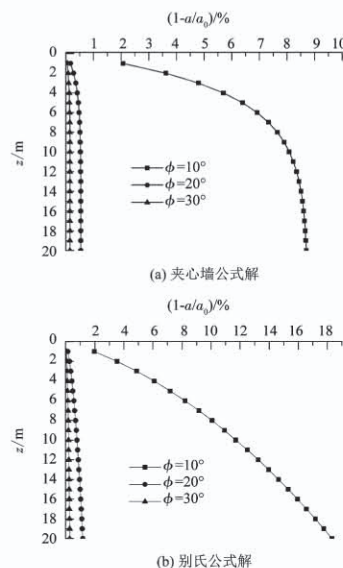


图 8 内摩擦角对孔壁位移的影响

Fig. 8 Effect of internal friction angle on borehole wall displacement

由图 8 可以看出, 在同一深度下孔壁径向位移随内摩擦角的减小而增大, 特别地, 当 $\phi = 10^\circ$ 时, 孔壁位移较 $\phi = 20^\circ$ 大大增大. 在 $z = 20$ m 处, $\phi = 10^\circ$ 时的孔壁位移值为 8.704% (夹心墙公式) 和 18.318% (别氏公式); $\phi = 20^\circ$ 时的孔壁位移值为

0.542% (夹心墙公式) 和 1.181% (别氏公式); 当 $\phi = 30^\circ$ 时, 孔壁位移值为 0.148% (夹心墙公式) 和 0.280% (别氏公式), 可知无黏性土的内摩擦角对径向卸荷钻孔缩孔解影响很大, 内摩擦角越小, 对孔壁位移的影响程度越明显。

6 结 论

1) 基于 SMP 屈服准则和非相关联流动法则, 推导了在无黏性土中竖向钻孔径向卸荷引起的孔周应力场位移场解析式(8)、(13)、(9)、(23)。

2) 卸荷因子 n 只与内摩擦角 ϕ 有关, 且随着 ϕ 的增大而减小; r_p/a 是只与 ϕ 和 n 有关的定值, 与深度方向无关, 故在无黏性土中竖向钻孔的自立深度为 0。

3) 忽略塑性区弹性变形的柱孔收缩位移解相对偏小, 而塑性区半径解相对偏大, 故忽略塑性区弹性变形的解答在工程应用中不保守。

4) 参数 n 、 a_0 和 ϕ 对孔壁位移值有明显影响。其中 n 和 ϕ 存在临界值, 本文的算例取 $n = 0.4$, $\phi = 20^\circ$, n 和 ϕ 超过该值, 孔壁位移显著增大; ψ 对孔壁位移的影响十分有限, 可忽略不计。

5) 两种土压力下的孔壁位移沿深度方向相差较大, 夹心墙土压力所得位移解在孔口浅表位置较快收敛, Berezzantsev 土压力以抛物曲线趋向孔端。故钻孔中的土压力选取还需与现场实测值相结合。

参考文献

- [1] TATIANA T, MOHAMED A M. Comparative evaluation of methods to determine the earth pressure distribution on cylindrical shafts: A review[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(2): 188
- [2] 马英明. 立井厚表土层地压的理论与实践[J]. 中国矿业学院学报, 1979(1): 45
MA Yingming. Theory and practice of ground pressure on shaft due to thick overburden[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1979(1): 45
- [3] 郑榕明, 胡亚元. 竖井衬砌主动土压力在一般环向压应力系数下的简化滑移线解[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 110
ZHENG Rongming, HU Yayuan. Active earth pressure on circular shaft lining obtained by simplified slip line solution with general tangential stress coefficient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 110
- [4] CHENG Yunmin, HU Yayuan, WEI Weibin. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics: Theory and numerical formulation[J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7(1): 1
- [5] LIU Faqian, WANG Jianhua. A generalized slip line solution to the active earth pressure on circular retaining walls[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(2): 155
- [6] LIU Faqian, WANG Jianhua. Axi-symmetric active earth pressure obtained by the slip line method with a general tangential stress coefficient[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1): 352
- [7] PRATER E G. Examination of some theories of earth pressure on shaft linings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14(1): 91
- [8] 赵春风, 王学知, 赵洪平, 等. 考虑混凝土性质变化灌注桩深部土压力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 878
ZHAO Chunfeng, WANG Xuezhong, ZHAO Hongping, et al. Analysis of deep earth pressure around cast-in-place pile considering concrete property variation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(7): 878
- [9] 陈志坚, 刘艳军. 超长灌注桩对桩周土挤密作用的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3277
CHEN Zhijian, LIU Yanjun. Model experimental research on compacting effect of concreting for overlength and large-diameter bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3277
- [10] ZHAO Chunfeng, FEI Yi, ZHAO Cheng, et al. Analysis of expanded radius and internal expanding pressure for undrained cylindrical cavity expansion [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(2): 04017139
- [11] 綦春明, 莫斌, 聂春龙, 等. 饱和土体柱形扩孔时大变形不排水统一解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 28(4): 827
QI Chunming, MO Bin, NIE Chunlong, et al. Unified analytical solutions for cylindrical expansion in saturated soil under large deformation and undrained conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 28(4): 827
- [12] YU Haisui, HOUSLBY G T. A large strain analytical solution for cavity contraction in dilatant soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19(7): 793
- [13] YU Haisui. Interpretation of pressuremeter unloading tests in sands [J]. Geotechnique, 1996, 46(1): 17
- [14] 温世游, 陈云敏, 李夕兵. 考虑应变软化特性的缩孔解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(21): 2432
WEN Shiyu, CHEN Yunmin, LI Xibing. Analytical solutions for contracting cavities with strain softening considered[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(21): 2432
- [15] 温世游, 陈云敏, 唐晓武, 等. 排水条件下球形空腔收缩问题的弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2251
WEN Shiyu, CHEN Yunmin, TANG Xiaowu, et al. Elastoplastic analysis on contraction of spherical cavity under drainage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2251
- [16] ZHAO Chunfeng, YANG Yanzong, ZHAO Cheng, et al. Analytical solution for borehole contraction caused by radial unloading [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(1): 60
- [17] ZHAO Chunfeng, FEI Yi, ZHAO Cheng, et al. Mohr-Coulomb criterion-based theoretical solutions for borehole contraction in the anisotropic initial stress condition [C]//Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Fundamentals of Soil Behaviours. Singapore: Springer, 2018: 442
- [18] BEREZANTSEV V G. Earth pressure on the cylindrical retaining wall [J]. Proceedings of Brussels Conference on Earth Pressure Problems, 1958(2): 21
- [19] 罗汀, 姚仰平, 松冈元. 基于 SMP 准则的土的平面应变强度公式[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 390
LUO Ting, YAO Yangping, MATSUOKA H. Soil strength equation in plane strain based on SMP[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 390
- [20] 杨砚宗. 砂土考虑卸荷效应的钻孔灌注桩试验与理论研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011
YANG Yanzong. Study on the test and method of bored pile in sand with unloading [D]. Shanghai: Tongji University, 2011
- [21] OKOCHI Y, TATSUOKA F. Some factors affecting K_0 -values of sand measured in tri-axial cell[J]. Soils Found, 1984, 24(3): 52