

# 静压有孔管桩超孔隙水压力消散的影响因素分析\*

万梦华<sup>1,2</sup>, 雷金波<sup>1</sup>, 柳俊<sup>3</sup>

(1.南昌航空大学 土木建筑学院,南昌 330063;2.华东交通大学理工学院,  
南昌 330100;3.上海建工二建集团有限公司,上海 200080)

**摘要:**静压管桩因其质量可靠和施工过程中具有无噪声、无振动、应力小等诸多优点被广泛用于工程中。但静压管桩属于部分挤土桩,在沉桩过程中,桩周土体不仅会产生较大位移,而且会在短时间内形成较高的水压力。有孔管桩通过在桩身开孔能使土中自由水流入管腔,从而减小局部土体位移,加速超孔隙水压力的消散并降低其最大值。本文利用圆孔扩张理论,通过理论公式和工程算例的对比分析,得出有孔管桩沉桩超孔隙水压力随径向距离的增大呈对数衰减,随沉桩速率的加快不断增大,随深度的加深呈递增趋势,随开孔孔径的加大逐渐减小。可对控制管桩挤土效应提供可靠的理论依据。

**关键词:**有孔管桩;超孔隙水压力;影响因素;圆孔扩张理论

中图分类号:TU473

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0465-08

## Influencing Factors Analysis on the Dissipation of Excess Pore Water Pressure of Static Perforated Pipe-pile

Wan Menghua<sup>1,2</sup>, Lei Jinbo<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 33006, P.R. China; 2. Institute of Technology East China Jiaotong University, Nanchang 330100, P. R. China; 3. Shanghai Construction No.2 (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, P.R. China)

**Abstract:** Static pressure pipe-pile is widely used because of its reliable quality, noiseless and vibration-less characteristics, less construction stress and so on. But static pressure pipe pile belongs to partial squeezing soil pile, and the squeezing effect produced during pile sinking will not only produce huge disturbance to the soil around the pile, but also produce huge excess pore water pressure in a short time. The pipe-pile with holes can make the free water flow into the inner cavity of the pipe to reduce the displacement of soil, thus reducing the maximum value of excess pore water pressure and accelerating the dissipation of excess pore water pressure. In this paper, using the theory of cavity expansion, through the comparison of theoretical formula and an example, it shows that the excess pore water pressure decreases with the increase of radial distance; the excess pore water pressure increases with the increase of the velocity; the excess pore water pressure increases with depth deepening; the excess pore water pressure decreases with the increase of pore size. Thereby it can provide a reliable theoretical basis for controlling the soil compaction effects.

**Keywords:** pipe-pile with holes; excess pore water pressure; influence factors; theory of cavity expansion

\* 收稿日期:218-08-01(修改稿)

作者简介:万梦华(1993-),女,江西南昌人,硕士,助教,主要从事桩土相互作用方面的研究。

E-mail:1057875247@qq.com

通讯作者:雷金波(1973-),男,江西丰城人,博士,教授,主要从事岩土力学的教学与科研工作。

E-mail:18979103608@189.cn

基金项目:国家自然科学基金(51268048,51768047);江西省自然科学基金(20171BAB206059);江西省教育厅科研基金(GJJ170601)

## 0 引言

静压管桩属于部分挤土桩,在沉桩过程中土体受到了沉桩的挤压,土体原有应力在一定范围内增大,同时会形成较大的超孔隙水压力。这就可能会导致超孔隙水压力的值大于上覆土的自重,使得土粒与土粒之间的有效应力完全丧失,土粒处于悬浮状态,继而土体会产生喷水、冒砂的情况,严重降低了土体的承载力<sup>[1-3]</sup>。有孔管桩<sup>[4]</sup>能使孔隙水流入管腔,从而减小超孔隙水压力的最大值,加速其消散。

目前分析无孔管桩沉桩超孔隙水压力的主要方法是通过理论公式进行估算。本文基于圆孔扩张理论,对静压有孔管桩沉桩过程产生的超孔隙水压力的影响因素进行分析,得到有孔管桩超孔隙水压力与径向距离、沉桩速率、深度、开孔孔径和时间之间的关系式,为静压有孔管桩技术开发及工程应

用研究提供可靠的理论基础。

## 1 静压有孔管桩超孔隙水压力基本公式

### 1.1 基本假定

现做如下假定<sup>[5]</sup>:

(1) 土体是均匀且不可压缩的,土体服从 Mohr-Coulomb 准则。

(2) 土体只包含孔隙水与土颗粒。

(3) 土体圆孔扩张的初始孔径为零。

(4) 土体中的扩张速率与沉桩速率成一定比例关系。

### 1.2 超孔隙水压力的 Henkel 公式

当前计算超静孔隙水压力主要采用 Vesic 提出的 Henkel 公式,表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$\Delta u = \beta \sigma_{\text{oct}} + \alpha_f \tau_{\text{oct}} \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} (\Delta \sigma_r + \Delta \sigma_\theta + \Delta \sigma_z) \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta \sigma_r - \Delta \sigma_\theta)^2 + (\Delta \sigma_z - \Delta \sigma_\theta)^2 + (\Delta \sigma_r - \Delta \sigma_z)^2} \quad (3)$$

式中: $\beta, \alpha_f$  为 Henkel 孔隙水压力参数,对于不同的土体参数是不一样的,对于饱和土有  $\beta = 1$ ;  $\Delta \sigma_{\text{oct}}$ 、 $\Delta \tau_{\text{oct}}$  分别为八面体正应力增量和剪应力增量; $A_f$  为 Skempton 孔隙水压力参数。

$$\alpha_f = 0.707(3A_f - 1) \quad (4)$$

$$A_f = \frac{q}{C_u} + \frac{1 - \sin \varphi'}{2 \sin \varphi'} \quad (5)$$

式中: $A_f$  的取值与土体有关; $\varphi'$  为有效应力摩擦角; $q$  为土的有效应力; $C_u$  为土的不排水抗剪强度。

## 2 有孔管桩超孔隙水压力消散的影响因素

### 2.1 超孔隙水压力与径向距离之间的关系

管桩开孔引起的径向应力增量  $|\Delta \sigma_k|$ , 是有孔管桩能加快超孔隙水压力消散速率的主要原因。考虑  $|\Delta \sigma_k|$  的影响,根据无孔管桩圆孔扩张理论的弹、塑性阶段的应力解<sup>[6]</sup>,推导出静压有孔管桩的应力增量解如下:

塑性区 ( $R_u < r \leq R_p$ ):

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left[ 4(\mu + 1) C_{u1} \ln \left( \frac{R_p}{r} \right) + (2\mu - 1)q - 2(\mu + 1) |\Delta \sigma_k| \right] + \frac{\alpha_f}{3} \sqrt{6C_{u1}^2 + (2\mu - 1)^2 \left[ 8C_{u1}^2 \ln^2 \left( \frac{R_p}{r} \right) + 2(q - |\Delta \sigma_k|)^2 + 8C_{u1} \ln \left( \frac{R_p}{r} \right) (q - |\Delta \sigma_k|) \right]} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_r &= 2C_{u1} \ln(R_p/r) + C_{u1} - |\Delta \sigma_k| \\ \Delta \sigma_\theta &= 2C_{u1} \ln(R_p/r) - C_{u1} - |\Delta \sigma_k| \\ \Delta \sigma_z &= 2\mu[2C_{u1} \ln(R_p/r)] + (2\mu - 1)q - 2\mu |\Delta \sigma_k| \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

弹性区 ( $r > R_p$ ):

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_r &= C_{u1} (R_p/r)^2 \\ \Delta \sigma_\theta &= -C_{u1} (R_p/r)^2 \\ \Delta \sigma_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $R_p$  为有孔管桩沉桩塑性区最大半径; $\mu$  为泊松比; $r$  为计算点到桩心的距离; $|\Delta \sigma_k|$  是一个恒不小于 0 的数; $C_{u1}$  为有孔管桩土体的不完全排水抗剪强度,此时  $0 < \mu \leq 0.5$ 。根据胡克定律可以知道  $C_u > C_d$ ,  $C_d$  为土体的固结排水抗剪强度,故  $C_{u1}$  是一个介于  $C_u$  和  $C_d$  之间的值。

将式(6)、(7)分别代入式(1)可以得到有孔管桩塑性区和弹性区超孔隙水压力与径向距离的关系式如下:

塑性区 ( $R_u < r \leq R_p$ ):

弹性区( $r > R_p$ ):

$$\Delta u = \frac{\sqrt{6}}{3} \alpha_f \cdot C_{ul} \left( \frac{R_p}{r} \right)^3 \quad (9)$$

根据式(8)、式(9)得,若其他参数恒定,则  $\Delta u \propto \frac{1}{r}$ 。

## 2.2 超孔隙水压力与沉桩速率之间的关系

相关试验<sup>[5]</sup>表明,其实超孔隙水压力的存在不仅与径向距离有关,还与沉桩时的速率有关。沉桩速率如果过快,超孔隙水压力不易排出,将会产生更大的超孔隙水压力,拖延施工进度;沉桩速率过慢,则在沉桩过程中就会发生土体再固结,导致桩的下沉难度加大,同样也拖延了施工进度。所以对静压沉桩而言,适当的沉桩速率就显得非常重要了。因此,必须考虑沉桩速率对超孔隙水压力大小

$$\Delta u = \left\{ \frac{1}{3} [4(\mu + 1)C_{ul} \ln(R_p/r) + (2\mu - 1)q - 2(\mu + 1)|\Delta\sigma_k|] + \frac{\alpha_f}{3\sqrt{6C_{ul}^2 + (2\mu - 1)^2}} \left[ 8C_{ul}^2 \ln^2\left(\frac{R_p}{r}\right) + 2(q - |\Delta\sigma_k|)^2 + 8C_{ul} \ln\left(\frac{R_p}{r}\right)(q - |\Delta\sigma_k|) \right] \right\} \frac{1}{\ln\left(\frac{R}{R_u}\right)} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (11)$$

式中: $R$ 为影响范围的半径。

将式(10)代入式(11),得到超孔隙水压力与沉桩速率之间的关系:

$$\Delta u = \left\{ \frac{1}{3} \left[ \frac{4(\mu + 1) \ln(R_p/r) \cdot G_0 \sqrt[3]{v_z^2}}{3^{\frac{5}{6}}} + (2\mu - 1)q - 2(\mu + 1)|\Delta\sigma_k| \right] + \frac{\alpha_f}{3\sqrt{\frac{6G_0^2 \sqrt[3]{v_z^8}}{3^{\frac{5}{3}}} + (2\mu - 1)^2}} \left[ \frac{8 \ln^2\left(\frac{R_p}{r}\right) \cdot G_0^2 \sqrt[3]{v_z^8}}{3^{\frac{5}{3}}} + 2(q - |\Delta\sigma_k|)^2 + \frac{8 \ln(R_p/r)(q - |\Delta\sigma_k|) \cdot G_0 \sqrt[3]{v_z^2}}{3^{\frac{5}{6}}} \right] \right\} \frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R}{R_u}\right)} \quad (12)$$

根据式(12)得:若其他参数恒定,则  $\Delta u \propto v_z$ 。

## 2.3 超孔隙水压力与深度之间的关系

众所周知,沉桩过程中土中应力和桩侧摩阻力都会随着深度增加而增大,因此应考虑深度 $z$ 对超孔隙水压力的影响。

考虑开孔产生的应力减少量 $|\Delta\sigma_k|$ ,土体满足Mohr-Coulomb屈服准则,解一阶微分方程可得有孔管桩沉桩过程中弹性区产生的应力增量为:

$$\Delta\sigma_r = \frac{2A \cdot z}{r^2} + \frac{B}{r^2} - |\Delta\sigma_k| \quad (13)$$

$$\Delta\sigma_\theta = - \left( \frac{2A \cdot z}{r^2} + \frac{B}{r^2} \right) - |\Delta\sigma_k| \quad (14)$$

的影响。

假定用 $v_z$ 来表示沉桩速率, $q_0$ 表示弹性区与塑性区交界面处的偏应力, $G_0$ 表示弹性区与塑性区交界面处的剪切模量。假设桩靴角度为 $60^\circ$ ,则竖向沉桩速率可由扩张速率表示为 $v_z = \sqrt{3}v_0$ 。而根据扩张速率 $v^2 = \frac{q_0^3}{8G_0^3}$ ,则有 $v_z^2 = \frac{3q_0^3}{8G_0^3}$ 。

假定服从修正剑桥本构模型理论, $q_0$ 可表示为:

$$q_0 = 2\sqrt{3}C_{ul} \quad (10)$$

式(8)与式(9)分别表示弹性区与塑性区超孔隙水压力的计算公式,但在交界处存在不连续,故从式(8)可以得到弹性区与塑性区的连续性公式如下:

$$\Delta\sigma_z = 0 \quad (15)$$

在弹塑性区交界处应力连续,且同时满足M-C屈服准则,解得:

$$A = \frac{k_0 \gamma \sin\varphi}{2} R_p^2 \quad (16)$$

$$B = (c \cos\varphi - |\Delta\sigma_k| \sin\varphi) R_p^2 \quad (17)$$

式中: $k_0$ 为静止土压力系数; $\gamma$ 为土的重度; $c$ 为土的粘聚力; $\varphi$ 为土的内摩擦角。将式(13)~(17)代入式(1),可得有孔管桩弹性区沉桩超孔隙水压力为:

$$\Delta u = -\frac{2}{3} |\Delta \sigma_k| + \frac{\alpha_f}{3} \sqrt{6 \left[ \frac{(k_0 \gamma z \sin \varphi + c \cos \varphi - |\Delta \sigma_k| \sin \varphi) R_p^2}{r^2} \right]^2 + 2 |\Delta \sigma_k|^2} \quad (18)$$

塑性区应力产生的应力增量为:

$$\Delta \sigma_r = \frac{P_L - P_0}{L} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z + \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \frac{1 + \sin \varphi}{2 \sin \varphi} - c \cot \varphi - |\Delta \sigma_k| - q_0 \quad (19)$$

$$\Delta \sigma_\theta = \frac{P_L - P_0}{L} \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z + \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi} - c \cot \varphi - |\Delta \sigma_k| - q_0 \quad (20)$$

$$\Delta \sigma_z = \frac{\tau_0}{r} z \quad (21)$$

$$\Delta \sigma_r = \frac{P_L - P_0}{L} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z - |\Delta \sigma_k| \quad (22)$$

$$\Delta \sigma_\theta = \frac{P_L - P_0}{L} \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z - \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u - |\Delta \sigma_k| \quad (23)$$

$$\Delta \sigma_z = \frac{\tau_0}{r} z \quad (24)$$

式中:  $P_0$  为桩侧顶部侧向压力;  $\tau_0$  为桩侧顶部摩擦力;  $P_L$  为桩侧端部侧向压力;  $\tau_L$  为桩侧端部摩擦力;  $c_a$  为桩土界面粘聚力,  $\varphi_a$  为桩土界面摩擦角;  $R_u$  为管桩桩径。

桩顶填土可看作是无限均布荷载作用, 桩侧顶部侧向压力  $P_0$  即为土体的初始应力  $q_0$ , 即

$$q_0 = P_0 = \frac{\tau_L - \tau_0}{L} \cdot R_u \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{2 \sin \varphi} - c \cot \varphi$$

则式(19)~(21)可简化为:

代入式(1)可以得到在考虑深度  $z$  的影响下, 基于圆孔扩张理论的有孔管桩沉桩塑性区超孔隙水压力为:

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left[ \frac{P_L - P_0}{L} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z \frac{2}{1 + \sin \varphi} - \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u - 2 |\Delta \sigma_k| + \frac{\tau_0 z}{r} \right] + \frac{\sqrt{2} \alpha_f}{3} \left\{ \left[ \frac{P_L - P_0}{L} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z \right]^2 \frac{3 \sin^2 \varphi + 1}{(1 + \sin \varphi)^2} + \left( \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \right)^2 + \left( |\Delta \sigma_k| + \frac{\tau_0 z}{r} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{P_L - P_0}{L} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \frac{3 \sin \varphi - 1}{1 + \sin \varphi} + \left( |\Delta \sigma_k| + \frac{\tau_0 z}{r} \right) \cdot \left[ \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u - \frac{P_L - P_0}{L} \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} z \frac{2}{1 + \sin \varphi} \right] \quad (25)$$

从式(18)、式(25)可以看出超孔隙水压力值与径向距离、深度均有关系, 与最初的设想一致。

## 2.4 超孔隙水压力与开孔孔径之间的关系

开孔处的应力增量是有孔管桩能有效减小超孔隙水压力最大值、加速超孔隙水压力的消散的本质所在。不同的开孔直径  $d_1$  产生的应力增量大小是变化的, 因此对超孔隙水压力的影响程度也不尽相同。开孔处径向应力增量可以看作是土体应力增量沿径向的减小量, 综合考虑其影响因素, 根据试验分析建立  $|\Delta \sigma_k|$  与  $\Delta \sigma_r$  之间的关系式:

$$|\Delta \sigma_k| = \frac{(h' D_1^2 + 2 N \eta \delta d_1^2) (k_0 \gamma z \sin \varphi + c \cos \varphi) R_p^2}{h' D_1^2 r^2 + (N \eta) \cdot \delta d_1^2 r^2} \left\{ \frac{h' D_1^2 (N \eta) \cdot \delta d_1^2 \sin \varphi R_p^2}{[h' D_1^2 (r^2 + \sin \varphi R_p^2)] [h' D_1^2 r^2 + (N \eta) \cdot \delta d_1^2]} - 1 \right\} \quad (26)$$

$$|\Delta \sigma_k| = \frac{(N \cdot \eta) \delta \cdot d_1^2}{h' \cdot D_1^2} \Delta \sigma_r \quad (26)$$

式中:  $D_1$  为管桩桩径;  $d_1$  为小孔孔径;  $\delta$  为管桩壁厚;  $h'$  为小孔竖向间距;  $N$  为开孔数量;  $\eta$  为小孔的布置方式。

将式(26)代入式(13)、式(14)可得有孔管桩沉桩过程中弹性区产生的应力增量为:

$$\Delta \sigma_{r1} = \frac{h' D_1^2 (k_0 \gamma z \sin \varphi + c \cos \varphi) R_p^2}{h' D_1^2 r^2 + (N \eta) \cdot \delta d_1^2 (r^2 + \sin \varphi R_p^2)} \quad (27)$$

$$\Delta \sigma_{\theta 1} = \frac{(h' D_1^2 + 2 N \eta \delta d_1^2) (k_0 \gamma z \sin \varphi + c \cos \varphi) R_p^2}{h' D_1^2 r^2 + (N \eta) \cdot \delta d_1^2 r^2} \left\{ \frac{h' D_1^2 (N \eta) \cdot \delta d_1^2 \sin \varphi R_p^2}{[h' D_1^2 (r^2 + \sin \varphi R_p^2)] [h' D_1^2 r^2 + (N \eta) \cdot \delta d_1^2]} - 1 \right\} \quad (28)$$

$$\Delta\sigma_z = 0 \quad (29)$$

取  $N=0$  时:

$$\Delta\sigma_r = \frac{(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{r^2} \quad (30)$$

$$\Delta\sigma_\theta = -\frac{(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{r^2} \quad (31)$$

$$\Delta\sigma_z = 0 \quad (32)$$

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left\{ \frac{h'D_1^2(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2(r^2 + \sin\varphi R_p^2)} + \frac{(h'D_1^2 + 2N\eta\delta d_1^2)(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2 r^2} \right.$$

$$\left. \left[ \frac{N\eta\delta d_1^2 \sin\varphi R_p^2}{(r^2 + \sin\varphi R_p^2)(h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2)} - 1 \right] \right\} + \sqrt{\left\{ \frac{h'D_1^2(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2(r^2 + \sin\varphi R_p^2)} - \frac{(h'D_1^2 + 2N\eta\delta d_1^2)(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2 r^2} \right.}$$

$$\left. \left[ \frac{N\eta\delta d_1^2 \sin\varphi R_p^2}{(r^2 + \sin\varphi R_p^2)(h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2)} - 1 \right] \right\}^2 + \left[ \frac{h'D_1^2(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2(r^2 + \sin\varphi R_p^2)} \right]^2} \quad (33)$$

$$+ \left\{ \frac{(h'D_1^2 + 2N\eta\delta d_1^2)(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2 r^2} \left[ \frac{N\eta\delta d_1^2 \sin\varphi R_p^2}{(r^2 + \sin\varphi R_p^2)(h'D_1^2 r^2 + N\eta\delta d_1^2)} - 1 \right] \right\}^2$$

当  $d_1=0$  时,开孔孔径为零,此时有孔管桩即为无孔管桩,则此超孔压解析式为无孔管桩弹性区超孔压的解析式,即:

$$\Delta u = \frac{\sqrt{6}\alpha_f}{3} \frac{(k_0\gamma z \sin\varphi + c \cos\varphi) R_p^2}{r^2} \quad (34)$$

同理,将式(26)代入式(22)、式(23),可得到塑性区产生的应力增量为:

$$\Delta\sigma_r = \frac{h'D_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z \quad (35)$$

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left[ \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z \left( \frac{2}{1+\sin\varphi} - \frac{2N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} \right) - \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u + \frac{\tau_0 z}{r} \right] +$$

$$\frac{\sqrt{2}\alpha_f}{3} \left\{ \left[ \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z \right]^2 \frac{3\sin^2\varphi + 1}{(1+\sin\varphi)^2} + \left( \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \right)^2 + \right.$$

$$\left. \left[ \frac{N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z + \frac{\tau_0 z}{r} \right]^2 + \left[ \frac{N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z + \frac{\tau_0 z}{r} \right] \cdot \right.$$

$$\left. \left[ \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u - \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z \frac{2}{1+\sin\varphi} \right] + \frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \frac{3\sin\varphi - 1}{1+\sin\varphi} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

根据极限平衡理论,地下水位以下取土的有效重度  $\gamma'$ ,  $K_p$  为被动土压力系数,可知<sup>[8]</sup>:

$$P_z = P_0 + \frac{P_L - P_0}{L} z = P_0 + K_p \gamma' z \quad (39)$$

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left[ K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \left( \frac{2}{1+\sin\varphi} - \frac{2N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} \right) + K_p \gamma' \tan\varphi_a R_u - \frac{C_a z}{r} \right] + \frac{\sqrt{2}\alpha_f}{3} \cdot$$

式(30)—(32)即为无孔管桩的空间应力增量解,与韩同春、豆红强推导的应力增量解析式<sup>[7]</sup>一致,但式(27)—(29)具有一般性。

将式(27)—(29)代入式(1),可以得到弹性区超孔隙水压力消散规律与开孔孔径  $d_1$  之间的关系式:

$$\Delta\sigma_\theta = \left( \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} - \frac{N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} \right) \cdot$$

$$\frac{P_L - P_0 \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}}{L} z - \frac{\tau_L - \tau_0}{L} R_u \quad (36)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{\tau_0 z}{r} \quad (37)$$

将式(35)—(37)代入式(1),可以得到在考虑开孔孔径  $d_1$  的影响下,有孔管桩沉桩过程中桩周塑性区土体的超孔隙水压力解析式为:

$$\tau_z = -\tau_0 - \frac{\tau_L - \tau_0}{L} z = C_a + K_p \gamma' z \tan\varphi_a \quad (40)$$

将式(39)、式(40)代入式(38)中,可得:



$$\left[ \left( K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \right)^2 \frac{3\sin^2\varphi + 1}{(1 + \sin\varphi)^2} + (K_p \gamma' \tan\varphi_a R_u)^2 + \left[ \frac{N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - \frac{C_a z}{r} \right]^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{N\eta\delta d_1^2}{h'D_1^2 + N\eta\delta d_1^2} K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - \frac{C_a z}{r} \right) \left[ -K_p \gamma' \tan\varphi_a R_u - K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \frac{2}{1 + \sin\varphi} \right] - \right. \\ \left. (K_p \gamma') 2z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \tan\varphi_a R_u \frac{3\sin\varphi - 1}{1 + \sin\varphi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

当  $d_1=0$  时(即开孔孔径为零)式(41)可化为无孔管桩沉桩过程中塑性区土体超孔隙水压力的解析式:

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left[ K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \left( \frac{2}{1 + \sin\varphi} \right) + K_p \gamma' \tan\varphi_a R_u - \frac{C_a z}{r} \right] + \\ \frac{\sqrt{2}\alpha_f}{3} \left\{ \left[ K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \right]^2 \frac{3\sin^2\varphi + 1}{(1 + \sin\varphi)^2} + (K_p \gamma' \tan\varphi_a R_u)^2 + \frac{C_a z}{r} [K_p \gamma' \tan\varphi_a R_u + \right. \\ \left. K_p \gamma' z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \frac{2}{1 + \sin\varphi}] + \left( \frac{C_a z}{r} \right)^2 - (K_p \gamma')^2 z \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \tan\varphi_a R_u \frac{3\sin\varphi - 1}{1 + \sin\varphi} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

为了验证解析式的准确性,将引入算例来进一步分析超孔隙水压力与径向距离、沉桩速率、深度以及开孔孔径之间的关系。

## 2.5 超孔隙水压力与时间之间的关系

探讨了超孔隙水压力大小与径向距离  $r$ 、沉桩速率  $v_z$ 、深度  $z$  及开孔直径  $d_1$  之间的关系,这为本节讨论超孔隙水压力的时间效应提供了相关的依

据。1990 年,唐世栋等<sup>[9]</sup>就以 Biot 固结理论为基础,把桩侧土的固结问题做了相应的简化(简化为轴对称的平面应变问题)。再通过考虑相应的边界条件,得出了基于 Biot 固结理论的超孔隙水压力消散解析式(此解析式为超孔隙水压力消散的一般表达式)。下式中包括零阶贝塞尔函数与一阶贝塞尔函数,如下所示<sup>[10]</sup>:

$$\Delta u = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2bsj_0\left(\frac{\lambda_i \rho}{a}\right)}{a^2 bsj_1^2(\lambda_i)} \left[ \int_0^a \Delta u_0 \rho bsj_0\left(\frac{\lambda_i \rho}{a}\right) d\rho \right] \exp \left[ -\frac{3(1-\mu)}{(1+\mu)} \left( \frac{\lambda_i}{a} \right)^2 \left( \frac{c_v t}{r^2} \right) \right] \quad (43)$$

式中: $\Delta u$  为任意位置且任意时刻的超孔隙水压力的值; $bsj_0$  表示为零阶贝塞尔函数; $bsj_1$  为一阶贝塞尔函数; $a=R/R_u$ ; $\rho=r/R_u$ , $\Delta u_0$  为初始超孔隙水压力; $c_v$  为土的固结系数; $\lambda_i$  为零阶贝塞尔函数的第  $i$  个零解。

将式(41)代入式(43)就可以得出超孔隙水压力  $\Delta u$  随时间  $t$  消散的三维解析解。有了式(43),只要知道实际建设的工程中的相关参数,就可以预测成桩后任意时刻的超孔隙水压力的大小值。这是一个可以为工程提供实际指导意义的理论依据。

## 2.6 算例分析

工程土体为淤泥质粉质黏土,进行预应力有孔管桩的压桩。在管桩相同高度平面内等角度开 3 个小孔,现取管桩半径  $R$  为 0.2 m,桩长为 8 m,管桩壁厚为 0.03 m,开孔竖向间距为 1.0 m,参数选取如下:土的不完全排水抗剪强度  $C_{ul}=15.6$  kPa,土的压缩模量  $E=3.0$  MPa, $\mu=0.45$ ,土的有效重度为  $\gamma'=8.1$  kN/m<sup>3</sup>,土的内摩擦角  $\varphi=16.1^\circ$ , $\varphi_a=20^\circ$ , $R_u=0.3$  m,土的粘聚力  $c=10$  kPa, $C_a=12$  kPa,取

$\alpha_f=0.87$ ,未单独考虑开孔孔径时,孔径取  $d_1=0.08$  m,此时 $|\Delta\sigma_k|=0.13$  kPa。

### 2.6.1 超孔隙水压力与径向距离之间的变化规律

绘制超孔隙水压力与径向距离之间的关系曲线,如图 1 所示。

根据图 1 可得:平面状态下,超孔隙水压力随着径向距离的增大在逐渐减小;离桩中心越近,超孔隙水压力越大,反之越小;塑性区的超孔隙水压力远大于弹性区的超孔隙水压力。且有孔管桩静压沉桩产生的超孔隙水压力的主要影响范围为 6 倍桩径,超过这个范围,桩周土体内的水压力变化不明显。这与理论分析所得的超孔压随径向距离增大而减小的结论吻合。

### 2.6.2 超孔隙水压力与沉桩速率之间的变化规律

绘制超孔隙水压力与沉桩速率之间的关系曲线,如图 2 所示。

根据图 2 可得:相同的沉桩速率下,超孔隙水压力随着径向距离的增大而逐渐减小;相同的径向距离下,超孔隙水压力在一定范围内随着沉桩速率

的加快而增大,这与理论分析结果一致。

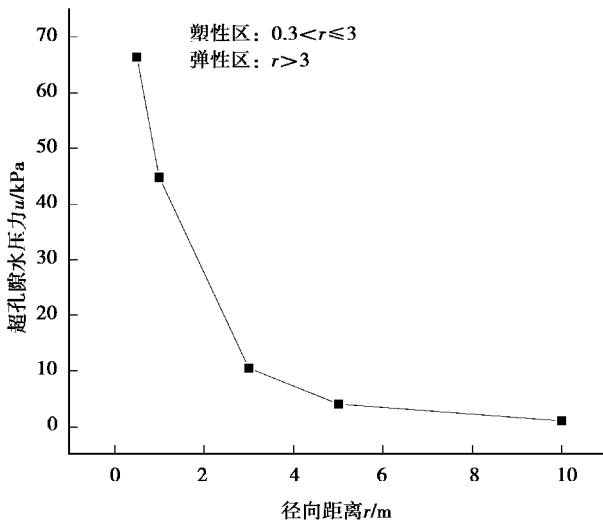


图1 超孔隙水压力与径向距离的关系

Fig. 1 Relationship between excess pore water pressure and radial distance

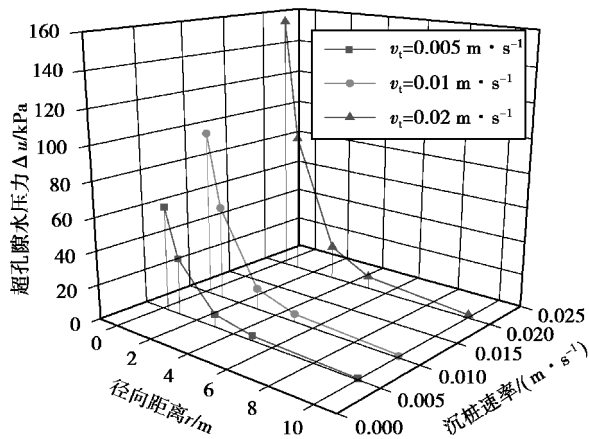


图2 不同沉桩速率下超孔隙水压力与径向距离的关系

Fig. 2 Relationship between excess pore water pressure and radial distance under different pile driving speeds

### 2.6.3 超孔隙水压力与深度之间的变化规律

绘制超孔隙水压力与深度之间的关系曲线,如图3所示。

根据图3可得:相同的径向距离下,超孔隙水压力在一定范围内随着深度的加深而增大;相同的深度下,超孔隙水压力随着径向距离的增大而逐渐减小;位于塑性区内的超孔隙水压力值远大于弹性区范围内的值,且弹性区范围内的超孔压随沉桩速率的增大递增趋势更趋于平缓。

### 2.6.4 超孔隙水压力与开孔孔径之间的变化规律

绘制超孔隙水压力与开孔孔径之间的关系曲线,如图4所示。

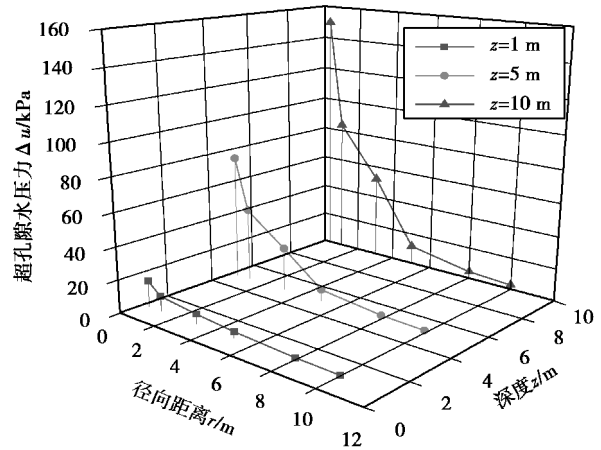


图3 不同深度下超孔隙水压力与径向距离的关系

Fig. 3 Relationship between excess pore water pressure and radial distance under different depths

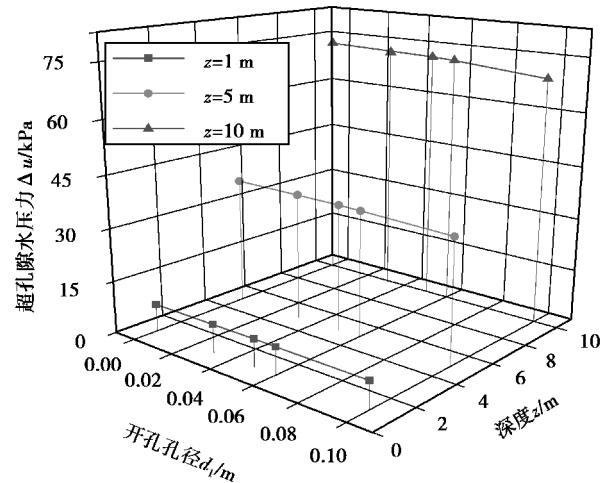


图4  $r=3$  m 时不同深度下超孔隙水压力与开孔孔径的关系

Fig. 4 Relationship between excess pore water pressure and aperture under different depths with 3 m radial distance

根据图4可得:当径向距离不变时,相同的深度下,超孔隙水压力在一定范围内随开孔孔径的增大而减小。任意深度处,  $d_i=0$  时,超孔隙水压力皆最大,说明有孔管桩能减小超孔隙水压力,且开孔孔径越大对超孔隙水压力的消散越有利。若开孔孔径过大,不仅会在开孔处产生较大的应力集中现象,而且会减小桩身的刚度,因此需要结合桩体本身合理的选择一个开孔孔径。在相同的开孔孔径下,超孔隙水压力随着深度的增加而加大,但超孔隙水压力随开孔孔径的变化比较平缓,说明开孔孔径对超孔隙水压力的影响不是很明显。

### 3 结论

(1)通过理论推导与工程算例对比,得到了径静压有孔管桩沉桩超孔隙水压力与向距离、沉桩速率、深度、开孔孔径及时间之间的消散关系,结果较为吻合,不仅为超孔隙水压力的消散规律提供了理论公式支撑,也为工程提供具有实际指导意义的理论依据。

(2)对超孔隙水压力的影响因素进行了分析得到:超孔隙水压力的大小随着径向距离的增大而递减的;若径向距离恒定,沉桩速率越大,超孔隙水压力的值也越大;假定深度不变,超孔隙水压力的大小随着径向距离的增大而衰减的,保持径向距离不变,超孔压随深度的增大而增大;当径向距离不变时,相同的深度下,超孔隙水压力在一定范围内随开孔孔径的增大而减小,但是减小的幅度很平缓。

(3)超孔隙水压力  $\Delta u$  随时间  $t$  消散的解析解涉及无穷级的运算,这给计算带来了一定的麻烦。因此,计算时可以假定数量级为一个特定值,只要它满足工程计算精度即可,这样就可以避免繁琐的计算过程。

(4)由于假定存在缺陷,推导出的静压有孔管桩超孔隙水压力最大值比实际的超孔隙水压力小,需要进一步考虑相关系数以修正其表达式。

#### 参考文献 (References)

- [1] 丁金海,李继涛. 挤土桩施工过程中的挤土效应及其机理分析[J]. 地质学刊, 2011, 35(3): 317-321. (Ding Jinhai, Li Jitao. Analysis of soil squeezing effect and its mechanism in the construction of soil compaction pile[J]. Journal of Geology, 2011, 35(3): 317-321. (in Chinese))
- [2] 王恒. 预应力管桩及挤土效应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. (Wang Heng. Study on the effect of prestressed pipe pile and soil compaction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese))
- [3] 张海霞. 静压沉桩挤土效应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (Zhang Haixia. Analysis of the squeezing effect of the static pile with static pressure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [4] 雷金波,陈超群,章学俊. 一种用于深厚软基处理的PTC型带孔管桩[P]. 中国专利: CN201620410U, 2010-11-03. (Lei Jinbo, Chen Chaoqun, Zhang Xuejun. One for the deep soft foundation treatment of PTC type perforated pipe pile [P]. China Patent: CN201620410U, 2010-11-03. (in Chinese))
- [5] 马林,鲁子爱,李家华. 沉桩过程土体超静孔隙水压力变化规律研究[J]. 科学技术与工程. 2014, 14(11): 276-281. (Ma Lin, Lu Ziai, Li Jiahua. Pile soil pore water pressure variation of [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(11): 276-281. (in Chinese))
- [6] 易飞. 基于圆孔扩张理论的静压有孔管桩挤土效应分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015. (Yi Fei. Analysis of the effect of static pressure pipe pile with hole expansion based on the round hole expansion [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015. (in Chinese))
- [7] 韩同春,豆红强. 柱孔扩张理论的空间轴对称解在沉桩挤土效应中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 5(增1): 3209-3215. (Han Tongchun, Dou Hongqiang. Application of space axisymmetric solutions of cavity expansion to soil squeezing of pipe driving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 5(Supp.1): 3209-3215. (in Chinese))
- [8] 姚笑青,胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力估算[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 30-35. (Yao Xiaqing, Hu Zhongxiong. Estimating method for excess pore water pressure developed during pile driving[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(4): 30-35. (in Chinese))
- [9] 唐世栋,何连生,傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725-729, 732. (Tang Shidong, He Liansheng, Fu Zong. The super pore water pressure caused by single pile construction in soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-729, 732. (in Chinese))
- [10] 王旭东,王伟,宰金珉. 沉桩引起的超孔隙水压力及其消散的三维解析解[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(6): 16-19. (Wang Xudong, Wang Wei, Zai Jinmin. Three dimensional analysis of excess pore water pressure caused by pile [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2002, 24(6): 16-19. (in Chinese))