

文章编号:1001-7372(2014)04-0024-07

基于圆孔扩张理论的静压楔形桩 沉桩挤土效应研究

周 航^{1,2}, 孔纲强^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对扩底楔形桩沉桩挤土效应特性方面的研究相对较少的状况,基于圆孔扩张理论,考虑扩底楔形桩的楔形角和扩大头等截面尺寸变化,建立扩底楔形桩施工中静压沉桩过程中沉桩阻力、桩周土体位移场以及超静孔隙水压力的理论计算方法。通过对楔形桩沉桩模型试验与理论分析的对比,分析了楔形角、沉桩深度、土体参数等因素对沉桩阻力、桩周挤土效应的影响规律。研究结果表明:所建立的理论计算方法能够较好的模拟楔形桩沉桩过程;沉桩完毕后侧摩阻力和桩端阻力之比在 2~4 之间,土体径向位移在距桩中心距离约为 10 倍桩径处递减为 0。

关键词:道路工程;扩底楔形桩;圆孔扩张理论;沉桩阻力;挤土位移;超静孔隙水压

中图分类号:416.1 **文献标志码:**A

Study on Pile Sinking Compaction Effect of Hydrostatic Wedge Pile Using Cavity Expansion Theory

ZHOU Hang^{1,2}, KONG Gang-qiang^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: For the researches focusing on pile sinking effect of belled wedge pile are relatively few, base on cavity expansion theory, with the cross section of belled wedge pile (such as wedge angle and enlarged pile base etc.) considered, theoretical calculation methods during wedge pile driving for pile sinking resistance, soil compaction displacement and excess pore water pressure were set up. Pile sinking effect model tests and theoretical analysis were performed for comparative analysis. The influences of wedge angle, pile sinking depth, and soil parameters on pile sinking resistance and soil compaction displacement were analyzed. The results show that the theoretical calculation methods established in this paper can simulate wedge pile driving effectively; the ratio of the side resistance and tip resistance is approximately 2 to 4 times and the soil radial displacement decreases to zero at the distance of 10 times of pile radius from the pile center.

Key words: road engineering; belled wedge pile; cavity expansion theory; pile sinking resistance; soil compaction displacement; excess pore water pressure

收稿日期:2013-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51008116,51278170);高速铁路基础研究联合基金项目(U1134207);

江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_02)

作者简介:周 航(1987-),男,江苏高邮人,工学博士研究生,E-mail:zh4412517@163.com。

0 引言

挤土桩在饱和粘性土中沉桩时容易造成桩体上浮,从而导致基桩沉降增大、承载力下降;而且沉桩过程中挤土效应产生的土体竖向和径向位移会造成周边建筑物的损害等不良现象。楔形桩是一种通过改变桩身横截面尺寸,以提高桩侧摩擦阻力的变截面桩。该桩型可以用于市政道路地基的加固,能够很好的控制道路的工后沉降。

为此,各国研究人员对挤土桩的沉桩挤土效应,以及楔形桩的承载力特性进行了系列研究,并取得了一定的成果。在现场试验方面,Liu 等^[1-3]分别结合 PCC 桩、预应力管桩进行了现场沉桩挤土效应试验,重点测试得到了土体的径向位移;Rybnikov^[4]针对不同形式钻孔灌注桩进行了现场静载荷试验,研究表明同体积混凝土楔形桩竖向承载力较等截面桩提高了 20%~30%;Zil'berberg 等^[5]进行了砂质土中预制桩现场静载荷试验,研究表明同体积混凝土楔形桩竖向承载力较等截面桩提高了 200%~250%。在模型试验方面,周火焜等^[6-7]针对楔形桩沉桩挤土效应进行模型试验研究,分析不同楔形角情况下沉桩对桩周土体的竖向与径向位移,以及沉桩阻力等的影响规律;Spronken^[8]针对有、无桩顶荷载以及有、无桩周围压荷载作用下楔形桩的力学性状进行了模型试验研究,分析了楔形角、楔形率以及围压大小等因素对承载力的影响。在数值分析方面,周健等^[9]基于工程实例,对群桩沉桩过程中地表隆起、桩侧土体侧移与应力等进行分析;罗战友等^[10-12]对楔形桩竖向承载力特性进行了研究,分析了桩-土接触面特性以及楔形角等因素对承载力特性的影响规律。在理论分析方面,Kodikara 等^[13]基于等截面桩计算理论,建立了一个适用于小楔形角情况下的楔形桩承载力理论计算公式,并对实际工程进行了预测。扩底楔形桩是一种可以充分发挥桩侧摩擦阻力和桩端阻力,并有效提高单位材料承载力的新型变截面桩^[14];孔纲强等^[15-17]基于数值软件对该新型桩的受力机理进行了初步分析,研究其竖向、水平向承载力特性,然而针对该变截面桩沉桩挤土效应特性方面的研究相对较少,限制了其在工程中的广泛应用。

综上所述,目前沉桩挤土效应的研究仍主要集中在传统的等截面桩,而针对纵向变截面桩的研究相对较少,尚未开展针对楔形桩沉桩挤土效应的理论计算方法研究。因此,本文中基于圆孔扩张理论,

考虑扩底楔形桩的楔形角截面尺寸变化,建立楔形桩静压沉桩过程中沉桩阻力、桩周土体位移场以及超静孔隙水压力的理论计算方法。通过针对楔形桩沉桩模型试验的对比分析,验证本文理论计算模型的准确性和可靠性。继而开展楔形角、沉桩深度、土体参数等因素对沉桩阻力、桩周挤土效应的影响规律分析。

1 理论计算模型的建立

1.1 基本假定

本文理论计算模型作如下基本假定:

(1)把楔形桩压入土体的过程看作半径为 R_0 (即为楔形桩端部半径)的初始圆孔在均匀内压 P 的作用下扩张到半径为 R_1 (即为楔形桩任意深度处桩身半径)的平面应变轴对称力学模型,如图 1 所示。图 1 中: R_p 为塑性区半径; u_d 为弹塑性交界处的径向位移; σ_0 为沉桩施工之前桩周土体的初始应力; σ_r 为土体的径向应力; σ_θ 为土体的切向应力; r 为半径。

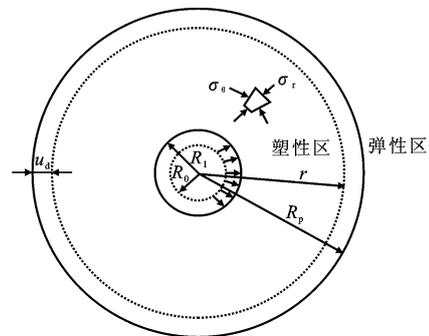


图 1 楔形桩圆孔扩张力学模型

Fig. 1 Mechanics Model of Cavity Expansion for Wedge Pile

(2)楔形桩在压入土体的过程中,桩体附近土体由弹性状态进入塑性状态,压桩完毕后桩周土体分为 2 块区域:弹性区和塑性区,远离桩孔区的为弹性区,靠近桩孔区的为塑性区。

(3)弹性区土体应力-应变关系服从胡克定律,塑性区服从摩尔-库伦弹塑性模型。

(4)沉桩过程可视为不排水条件。

1.2 弹性分析

根据弹性理论,可得弹性状态下土体应力和位移解,即

$$\sigma_r^e = \sigma_0 + (P - \sigma_0) \left(\frac{R_1}{r}\right)^2 \quad (1)$$

$$\sigma_\theta^e = \sigma_0 - (P - \sigma_0) \left(\frac{R_1}{r}\right)^2 \quad (2)$$

$$u_r^e = \frac{(P - \sigma_0)}{2G} \left(\frac{R_1}{r} \right)^2 r \quad (3)$$

式中: G 为土体的剪切模量; P 为孔内均匀压力; σ_r^e 为弹性状态下的径向应力; σ_θ^e 为弹性状态下的切向应力; u_r^e 为弹性状态下的径向位移。

根据式(1)~(3)可得弹性状态下圆孔内压与圆孔半径之间的关系,即

$$P = \sigma_0 + 2G \left(1 - \frac{R_0}{R_1} \right) \quad (4)$$

根据楔形桩桩身几何关系可知,桩身任意深度处弹性状态下孔压与半径的关系可以表示为

$$P_h = \sigma_0 + 2G \left[1 - \frac{R_0}{R_1 - (R_1 - R_0)h/L} \right] \quad (5)$$

式中: P_h 为桩身任意深度处桩孔内压; L 为楔形桩桩长; h 为桩身某一位置处深度。

随着圆孔内压的增大,孔周土体由弹性状态进入塑性状态,因此有必要研究土体进入塑性状态时圆孔扩张的力学特性。

1.3 弹塑性分析

1.3.1 塑性区半径与桩孔内压

土体进入塑性状态时,服从摩尔-库伦弹塑性模型,即

$$\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1 - \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} - 2c \frac{\cos(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} \quad (6)$$

式中: c 为土体粘聚力; φ 为土体内摩擦角。

在塑性区土体仍然满足平衡方程,将式(6)代入平衡方程并且结合圆孔边界条件:当 $r = R_1$ 时, $\sigma_r = P$,可得塑性区应力表达式,即

$$\sigma_r^p = [P + c \cos(\varphi)] \left(\frac{R_1}{r} \right)^{\frac{2 \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}} - c \cot(\varphi) \quad (7)$$

$$\sigma_\theta^p = \left\{ [P + c \cos(\varphi)] \left(\frac{R_1}{r} \right)^{\frac{2 \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}} - c \cot(\varphi) \right\} \cdot$$

$$\frac{1 - \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} - 2c \frac{\cos(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} \quad (8)$$

式中: σ_r^p 为塑性区径向应力; σ_θ^p 为塑性区切向应力。

由于在圆孔扩张过程中,圆孔体积的变化表现为弹性区和塑性区体积的变化,因此有

$$\pi(R_1^2 - R_0^2) = \pi R_p^2 - \pi(R_p - u_d)^2 + \pi(R_p^2 - R_1^2)\Delta \quad (9)$$

式中: Δ 为塑性区平均应变,本文中取 0.015^[18]。

展开式(9),并且忽略 u_d^2 项,则有

$$R_1^2 - R_0^2 = 2R_p u_d + (R_p^2 - R_1^2)\Delta \quad (10)$$

弹塑性交界处的位移可以表示为

$$u_d = \frac{1 + \nu}{E} R_p \sigma_{rd} \quad (11)$$

式中: σ_{rd} 为弹塑性交界处的径向应力; ν 为土体的泊松比; E 为土体的弹性模量。

由式(1),(2)可知在弹塑性交界处有

$$\sigma_{rd} + \sigma_{\theta d} = 2\sigma_0 \quad (12)$$

式中: $\sigma_{\theta d}$ 为弹塑性交界处的切向应力。

将式(12)代入式(6)可得

$$\sigma_{rd} = \sigma_0 [1 + \sin(\varphi)] + c \cos(\varphi) \quad (13)$$

结合式(10),(11),(13)可得 R_p 的表达式为

$$R_p = \sqrt{\frac{R_1^2(1+\Delta) - R_0^2}{\{\sigma_0[1 + \sin(\varphi)] + c \cos(\varphi)\}/G + \Delta}} \quad (14)$$

将式(14)代入式(7)可得圆孔内压为

$$P = \left\{ \sigma_0 [1 + \sin(\varphi)] + c \cos(\varphi) + c \cot(\varphi) \right\} \cdot \left\{ \frac{1 + \Delta - R_0^2/R_1^2}{[\sigma_0(1 + \sin(\varphi)) + c \cos(\varphi)]/G + \Delta} \right\}^{\frac{2 \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}} - c \cos(\varphi) \quad (15)$$

根据楔形桩桩身几何关系并且结合式(14),(15)可以得到沉桩完毕后桩身任意深度处塑性半径 r_{ph} 以及桩孔内压 P_h 的表达式,即

$$r_{ph} = \sqrt{\frac{[R_1 - (R_1 - R_0)h/L]^2(1+\Delta) - R_0^2}{\{k\gamma h[1 + \sin(\varphi)] + c \cos(\varphi)\}/G + \Delta}} \quad (16)$$

$$P_h = \left\{ k\gamma h[1 + \sin(\varphi)] + c[\cos(\varphi) + \cot(\varphi)] \right\} \cdot \left\{ [1 + \Delta - R_0^2/(R_1 - (R_1 - R_0)h/L)^2] \cdot [(k\gamma h(1 + \sin(\varphi)) + c \cos(\varphi))/G + \Delta] \right\}^{\frac{\sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}} - c \cos(\varphi) \quad (17)$$

式中: γ 为土体的重度; k 为侧向土压力系数。

1.3.2 考虑弹性区应力重分布的应力与位移

桩周土体进入塑性之后,弹性区的应力发生改变,可在式(1),(2)中引入应力调整系数 λ ,即

$$\sigma_{r1}^e = \sigma_0 + \frac{\lambda}{r^2} \quad (18)$$

$$\sigma_{\theta 1}^e = \sigma_0 - \frac{\lambda}{r^2} \quad (19)$$

式中: σ_{r1}^e , $\sigma_{\theta 1}^e$ 分别为考虑应力重分布的弹性区的径向应力和切向应力。

由于在弹塑性交界处,应力具有连续性,因此根据式(13),(19)可得

$$\lambda = (\sigma_0 \sin(\varphi) + c \cos(\varphi)) R_p^2 \quad (20)$$

其中, R_p 的表达式已由式(14)给出,从而式(18),(19)可以改写成

$$\sigma_{r1}^e = \sigma_0 + \frac{1}{r^2} [\sigma_0 \sin(\varphi) + c \cos(\varphi)] \cdot \frac{R_1^2(1+\Delta) - R_0^2}{\{\sigma_0[1 + \sin(\varphi)] + c \cos(\varphi)\}/G + \Delta} \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta 1}^e = \sigma_0 - \frac{1}{r^2} [\sigma_0 \sin(\varphi) + c \cos(\varphi)] \cdot \frac{R_1^2(1+\Delta) - R_0^2}{\{\sigma_0[1 + \sin(\varphi)] + c \cos(\varphi)\}/G + \Delta} \quad (22)$$

弹性区的位移表达式可表示为

$$u_{ri}^e = \frac{1+\nu}{E} r \sigma_{ri}^e = \frac{1+\nu}{E} r \left\{ \sigma_0 + \frac{1}{r^2} [\sigma_0 \sin(\varphi) + c \cos(\varphi)] \left[\frac{R_1^2(1+\Delta) - R_0^2}{\sigma_0(1+\sin(\varphi)) + c \cos(\varphi)} \right] / G + \Delta \right\} \quad (23)$$

根据楔形桩桩身几何关系可以得到桩身任意深度处弹性区的位移 u_{rih}^e 表达式,即

$$u_{rih}^e = \frac{1+\nu}{E} r \sigma_{ri}^e = \frac{1+\nu}{E} r \left\{ k \gamma h + \frac{1}{r^2} [\gamma h \sin(\varphi) + c \cos(\varphi)] \left[(R_1 - \frac{R_1 - R_0}{L} h)^2 (1+\Delta) - R_0^2 \right] / \left[\frac{\gamma h (1 + \sin(\varphi)) + c \cos(\varphi)}{G} + \Delta \right] \right\} \quad (24)$$

1.3.3 沉桩阻力的估算表达式

由图 2 所示的计算模型可以得到估算沉桩阻力的表达式,即

$$Q = \int_0^{h_0} 2\pi r_h \tau_h dh + q_b A_b \quad (25)$$

式中: Q 为沉桩阻力; h_0 为沉桩深度; r_h 为桩身任意深度处半径; τ_h 为桩身任意深度处竖向剪应力; q_b 为桩端极限端阻力; A_b 为桩端截面积。

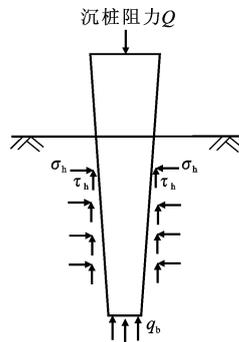


图 2 沉桩阻力计算模型
Fig. 2 Calculation Model for Pile Sinking Resistance

桩身任意深度处的竖向剪应力 τ_h ^[13] 可由式(26)得出,即

$$\tau_h = \sigma_h \tan(\varphi_i - \theta) + \frac{c_i \sec(\theta)}{1 + \tan(\theta) \tan(\varphi_i)} \quad (26)$$

式中: σ_h 为桩孔径向压力(即为 P_h); θ 为楔形桩桩楔角; c_i 为桩土接触面粘聚力; φ_i 为桩土接触面内摩擦角。

1.3.4 桩周土体超静孔隙水压的分布

从弹性区的应力表达式中可以看出弹性区的球应力为 0,因此弹性区的超静孔隙水压力为 0。对于塑性区的超静孔隙水压,从塑性区的应力表达式中可以得到,即

$$\Delta u^p = \frac{\Delta \sigma_r^p + \Delta \sigma_\theta^p}{2} = \frac{1}{1 + \sin(\varphi)} \{ [P + c \cos(\varphi)] \cdot \left(\frac{R_1}{r} \right)^{\frac{2 \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}} - c \cot(\varphi) \} - c \frac{\cos(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} - \sigma_0 \quad (27)$$

式中: Δu^p 为塑性区的超静孔隙水压力分布。

将桩 P_h 的表达式代入式(27),可得桩周土体

塑性区内任意一点位置处的超静孔隙水压力。

2 理论模型的验证与分析

为了验证本文理论计算模型的准确性和可靠性,针对张可能等^[7]开展的楔形桩沉桩模型试验的模型进行计算,并与其试验结果进行对比分析。楔形模型桩桩顶直径 D_b 为 7.1 cm,桩端直径 D_t 为 5 cm,桩长 L 为 120 cm。桩周土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 模型试验土体物理力学参数

Tab. 1 Physical-mechanical Parameters of Model Test Soil

E_s /MPa	w /%	γ /($N \cdot m^{-3}$)	I_p	I_L	c /kPa	φ ($^\circ$)
3.4	35	18.04	21.7	0.42	9.43	8.22

注: E_s 为压缩模量; w 为含水量; I_p, I_L 分别为塑性指数和液限指数。

不同沉桩深度下地表径向位移与距桩中心距离的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知:沉桩深度 h_0 分别为 0.2, 0.6 m 时的地表径向位移理论计算值与模型试验实测值的变化规律基本一致;在距桩中心距离 15 cm 处有一定差异,这主要是由于在距离桩心小于 15 cm 时土体处于强塑性区并存在一定的扰动,采用弹性区的径向位移表达式计算的径向位移与实际值存在一定差别。本文理论模型对于弹性区范围内的位移预测相对较好;由此表明,圆孔扩张理论能够较好地反映楔形桩沉桩过程中径向位移的变化规律,从而验证本理论计算模型的正确性。

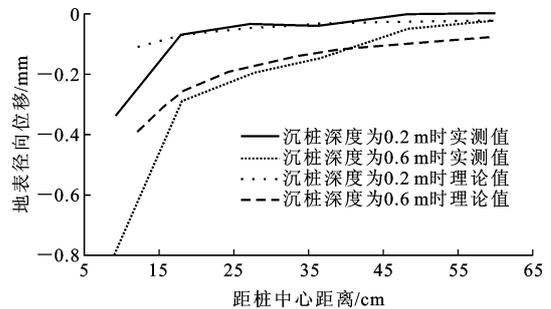


图 3 地表径向位移曲线

Fig. 3 Curves of Radial Displacements on Ground

3 影响因素分析

为系统了解楔形桩沉桩过程中挤土特性,基于沉桩深度、桩楔角、桩端直径等影响因素分析了沉桩阻力、土体径向位移的变化规律。桩土摩擦角 φ_i 和凝聚力 c_i 均取土体内摩擦角和凝聚力的 80% 的理想模型,进行系统的参数分析。

3.1 沉桩深度对沉桩阻力、土体径向位移的影响

根据《建筑桩基技术规范》可得沉桩深度分别为5,10,15,20 m时对应的桩端极限端阻力分别为1 900,2 400,3 000,3 100 kPa。土体参数 $E_s = 5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $c = 5 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$; 桩参数为 $D_t = 1.6 \text{ m}$, $D_b = 0.8 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$ 。

沉桩(桩侧、桩端)阻力与沉桩深度的关系如图4所示。由图4可知:沉桩(桩侧、桩端)阻力随着沉桩深度的增加而不断增大,当沉桩深度小于12 m时桩侧阻力小于桩端阻力;当沉桩深度大于12 m时,桩侧阻力大于桩端阻力。当桩体完全压入土体时,桩端阻力约占总阻力的30%,桩侧阻力约占总阻力的70%。

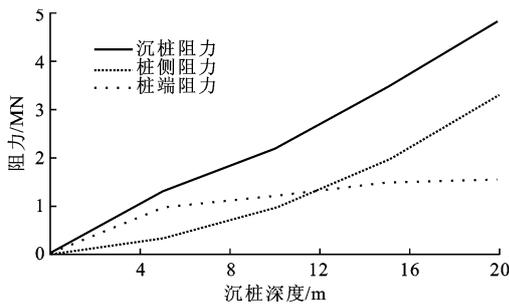


图4 沉桩(桩侧、桩端)阻力与沉桩深度的关系
Fig.4 Relationship of Pile Sinking (Pile Shaft and Pile Tip) Resistance and Pile Sinking Depth

地表径向位移与沉桩深度的关系如图5所示,由图5可知,随着距桩中心距离的不断增大,径向位移不断减小,在距桩中心距离约为5 m时,径向位移递减为0。当距桩中心距离约为1 m时,径向位移变得很小,约为最大径向位移的10%,这表明楔形桩的挤土范围相对较小。另外,随着沉桩深度的不断增大,地表径向位移不断增大。

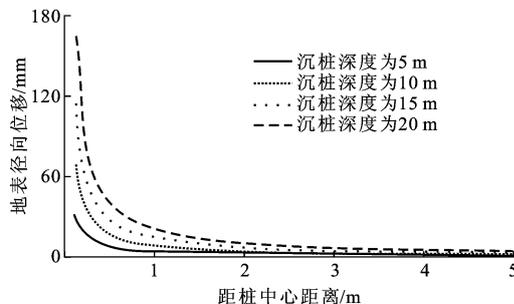


图5 地表径向位移与沉桩深度的关系
Fig.5 Relationship of Radial Displacement on Ground and Pile Sinking Depth

3.2 楔形角对沉桩阻力、土体径向位移的影响

土体参数及桩长保持不变,沉桩深度 $h_0 = 20 \text{ m}$

时,沉桩(桩侧、桩端)阻力与桩楔角的关系如图6所示。由图6可知:随着桩楔角的不断增大,沉桩阻力和桩端阻力不断减小,而桩侧阻力变化不大,这表明沉桩阻力的减小主要是由于桩端截面面积减小带来的桩端阻力减小造成的;通过增大桩楔角可以使得沉桩阻力迅速减小,每增加 1° ,沉桩阻力减小0.8 kN。地表径向位移与桩楔角的关系如图7所示。由图7可知:随着桩楔角不断增大,土体径向位移不断增大;地表径向位移对楔形角比较敏感,很小的楔形角的变化会造成地表位移较大变化;楔形角变化范围为 $0.4^\circ \sim 2.7^\circ$ 时,地表的最大径向位移变化范围为100~600 mm。

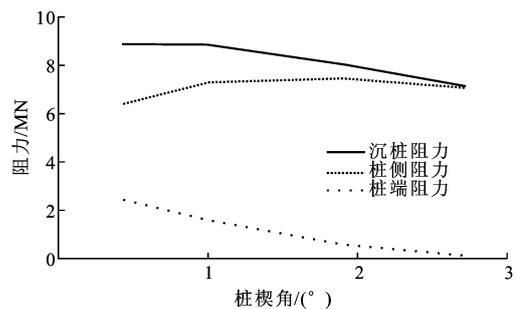


图6 沉桩(桩侧、桩端)阻力与桩楔角的关系
Fig.6 Relationship of Pile Sinking (Pile Shaft and Pile Tip) Resistance and Pile Wedge Angle

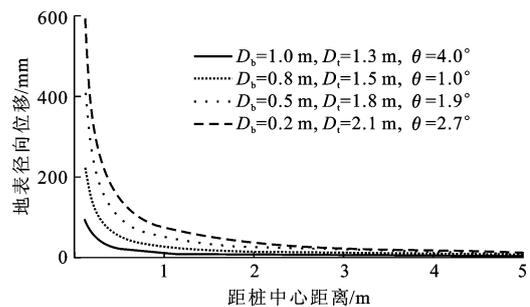


图7 地表径向位移与桩楔角的关系
Fig.7 Relationship of Radial Displacement on Ground and Pile Wedge Angle

3.3 桩端直径对沉桩阻力、土体径向位移的影响

土体参数及桩长保持不变, $D_t = 1.3 \text{ m}$, 沉桩深度 $h_0 = 20 \text{ m}$ 时,沉桩(桩侧、桩端)阻力与桩端直径的关系如图8所示。由图8可知,随着桩端直径的不断增大,沉桩(桩侧、桩端)阻力不断增大,桩侧阻力和桩端阻力的分担比不断减小。图9为地表径向位移与桩端直径的关系。由图9可知,随着桩端直径的不断增大,土体径向位移不断减小,这与桩楔角增大时土体径向位移增大的规律一致。

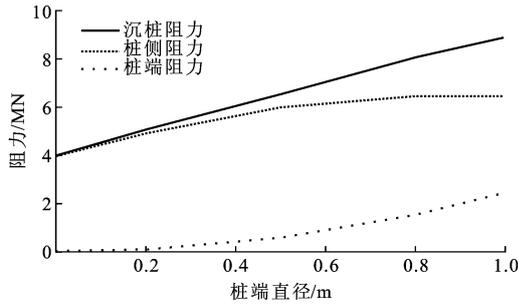


图 8 沉桩(桩侧、桩端)阻力与桩端直径的关系
Fig. 8 Relationship of Pile Sinking (Pile Shaft and Pile Tip) Resistance and Pile Tip Diameter

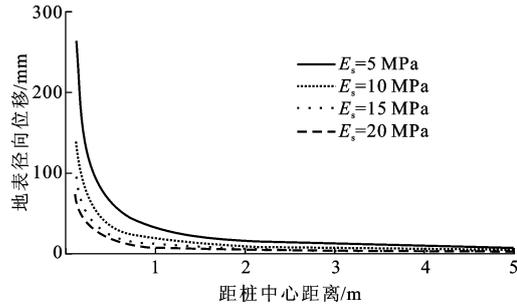


图 11 地表径向位移与土体压缩模量的关系
Fig. 11 Relationship of Radial Displacement on Ground and Soil Compression Modulus

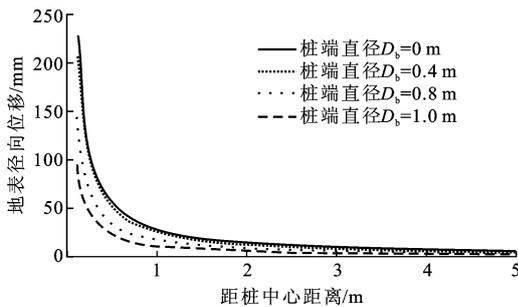


图 9 地表径向位移与桩端直径的关系
Fig. 9 Relationship of Radial Displacement on Ground and Pile Tip Diameter

3.4 土体参数对沉桩阻力、土体径向位移的影响

桩长、桩端、桩顶直径保持不变,沉桩深度 $h_0 = 20\text{ m}$ 时,沉桩(桩侧、桩端)阻力与土体粘聚力的关系如图 10 所示。

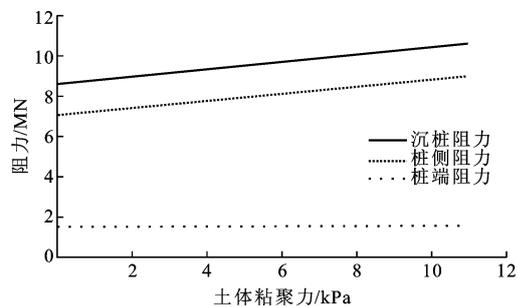


图 10 沉桩(桩侧、桩端)阻力与土体粘聚力的关系
Fig. 10 Relationship of Pile Sinking (Pile Shaft and Pile Tip) Resistance and Cohesion

由图 10 可知,随着粘聚力的不断增大沉桩阻力不断增大,沉桩阻力的增大主要表现在桩侧阻力的增大,而桩端阻力的变化不大,桩侧阻力与桩端阻力之比约为 4。地表径向位移与土体压缩模量的关系如图 11 所示。由图 11 可知:随着土体压缩模量的不断增大土体径向位移不断减小;随着距桩中心距离的不断增大,土体径向位移不断减小,在距桩中心

5 m 处土体径向位移递减为 0。

4 结 语

(1)通过与现有楔形桩沉桩模型试验对比,表明本文理论计算方法能较好地模拟楔形桩沉桩过程。

(2)楔形桩沉桩阻力随着楔形角的增大、桩端直径的减小、土体粘聚力的减小而减小;沉桩完毕后侧摩阻力和桩端阻力之比为 2~4。土体径向位移随着楔形角的增大、桩端直径的减小、土体粘聚力的减小而减小;土体径向位移在距桩中心距离 5 m(约为 10 倍桩径)处递减为 0。

(3)本文中给出了楔形桩沉桩过程中桩周土体超静孔隙水压力分布的闭合解,根据这一解可以方便地求得桩周土体任意位置处的超静孔隙水压力。

(4)本文中主要讨论扩底楔形桩施工过程中的楔形桩沉桩产生的沉桩阻力、土体的径向位移以及超静孔隙水压力分布,并未提出计算土体竖向位移的方法,因此提出一种既能考虑土体径向位移又能计算竖向位移的计算方法是下一步工作的重点。

参考文献:

References:

[1] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a Geogrid-reinforced and Pile-supported Highway Embankment over Soft Clay: Case Study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1483-1493.
[2] LIU H L, CHU J, DENG A. Use of Large-diameter, Cast-in Situ Concrete Pipe Piles for Embankment over Soft Clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 915-927.
[3] 雷华阳, 李 肖, 陆培毅, 等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1006-1012.

- LEI Hua-yang, LI Xiao, LU Pei-yi, et al. Field Test and Numerical Simulation of Squeezing Effect of Pipe Pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1006-1012.
- [4] RYBNIKOV A M. Experimental Investigation of Bearing Capacity of Bored-cast-in-place Tapered Piles [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1990, 27(2): 48-52.
- [5] ZIL'BERBERG S D, SHERSTNEV A D. Construction of Compaction Tapered Pile Foundation[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1990, 27(3): 96-101.
- [6] 周火垚, 施建勇. 饱和软黏土中足尺静压桩挤土效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3291-3296.
ZHOU Huo-yao, SHI Jian-yong. Test Research on Soil Compacting Effect of Full Scale Jacked-in Pile in Saturated Soft Clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3291-3296.
- [7] 张可能, 何杰, 刘杰, 等. 静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(2): 638-643.
ZHANG Ke-neng, HE Jie, LIU Jie, et al. Model Experimental Research on Piling Effects of Static Piling in Soft Clay Ground with Tapered Pile [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(2): 638-643.
- [8] SPRONKEN J T. Bearing Capacity of Tapered Piles [D]. Alberta: University of Calgary, 1998.
- [9] 周健, 徐建平, 许朝阳. 群桩挤土效应的数值模拟[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2000, 28(6): 721-725.
ZHOU Jian, XU Jian-ping, XU Zhao-yang. Numerical Analysis of Heave and Lateral Movement Due to Pile Driving [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2000, 28(6): 721-725.
- [10] 罗战友, 龚晓南, 王建良, 等. 静压桩挤土效应数值模拟及影响因素分析[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2005, 39(7): 992-996.
LUO Zhan-you, GONG Xiao-nan, WANG Jian-liang, et al. Numerical Simulation and Factor Analysis of Jacked Pile Compacting Effects [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2005, 39(7): 992-996.
- [11] 李莲秀, 吴盛伟, 苏英平. 桩端后压浆灌注桩承载力的可靠性研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2013, 30(1): 70-72.
- LI Lian-xiu, WU Sheng-wei, SU Ying-ping. Study on Reliability of Bearing Capacity of Pile-end Post-grouting Bored Pile [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2013, 30(1): 70-72.
- [12] 宋金刚. 公路桥梁钻孔灌注桩的施工质量控制[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2012, 29(6): 63-64.
SONG Jin-gang. Quality Control of Construction of Bored Pile for Highway Bridge [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2012, 29(6): 63-64.
- [13] KODIKARA J K, MOORE I D. Axial Response of Tapered Piles in Cohesive Frictional Ground [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(4): 675-693.
- [14] 孔纲强, 杨庆. 一种扩底预应力锥形管桩及其施工方法: 中国, 200810011854. 4 [P]. 2010-06-23.
KONG Gang-qiang, YANG Qing. A Prestressed Belled Tapered Pipe Pile and Construction Method: China, 200810011854. 4 [P]. 2010-06-23.
- [15] 孔纲强, 杨庆, 年廷凯, 等. 扩底楔形桩竖向抗压和负摩阻力特性研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 503-509.
KONG Gang-qiang, YANG Qing, NIAN Ting-kai, et al. Study of Characteristics of Compression Capacity and Negative Skin Friction for Belled Wedge Pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 503-509.
- [16] 孔纲强. 堆载条件下现浇扩底楔形群桩负摩阻力特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(增1): 364-368.
KONG Gang-qiang. Performances of Negative Skin Friction of Belled Wedge Pile Group Under Surcharge Load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S1): 364-368.
- [17] 孔纲强, 周航. 扩底楔形桩沉桩挤土效应理论分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(2): 9-16.
KONG Gang-qiang, ZHOU Hang. Theoretical Analysis of Soil Compaction Effect of Belled Wedge Pile [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(2): 9-16.
- [18] 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.
LIU Yu-hua, CHEN Zheng-zhou, PENG Zhi-jun, et al. Analysis of Pile Driving Effect of Precast Tubular Pile Using Cylindrical Cavity Expansion Theory [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2167-2172.