

大直径钢管桩打桩振动对粘土土阻力的影响

李 飒¹, 蒋衍洋¹, 周扬锐², 蒋宝凡²

(1. 天津大学 建工学院, 天津 300072; 2. 中海油服油田 技术事业部勘察服务中心, 天津 300451)

摘 要:随着海洋平台上部结构的增大,大直径超长的钢管桩越来越多的被应用于实际工程中。要想对桩的可打入性进行准确预测,首先要对打桩冲击振动对周围土体所造成的影响有准确的评价。为了对打桩过程中的土阻力作出准确分析,根据渤海海域 36 根桩的打桩记录,对其中粘性土土层的打桩记录进行了反分析,总结了打桩过程中粘土层中土阻力的变化特点,分析了这些特点产生的原因。同时利用实测数据回归得到粘土层强度衰减的规律,提出了进行打桩分析时粘土层计算参数选取的方法,并通过一个实际工程对此进行了验证。分析结果显示,粘土层在打桩过程受动力效应的影响较大,其土性参数会随着捶击数的增加而降低,采用回归结果对打桩预测可以取得较好的结果。

关键词:打桩;粘土;反分析;侧摩阻力;动力分析

中图分类号:473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)02-0046-06

Influence of Pile Driving on Soil Resistance in Clay

LI Sa¹, JIANG Yan-yang¹, ZHOU Yang-rui², JIANG Bao-fan²

(1. The Civil Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China

2. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, P. R. China)

Abstract: With the increase of platform size, pipe piles with super large diameter and deep penetration are increasingly used in practice. In order to make accurate prediction of pile drivability, it is essential to evaluate the change of the soil properties under pile driving exactly, and it is the premise to predict the pile bearing capacity after pile driving. In order to learn more about the change of clay properties during pile driving, analysis on the pile driving record of 36 piles in Bohai area is conducted. According to the analysis, the soil resistance in the clay layers decreases as the depth increases, and it is very different from that in the sand layer. The FEM method is used to discuss the mechanism of this decrease. The back analysis is carried out to get more information. The results show that the clay properties are affected by the dynamic effect. The undrained shear strength of clay approximately decreases with the increase of thickness of the layer linearly. At the same time, a prediction is conducted based on results, and the result is closer to the pile driving record than that calculated by method normally used today.

Key words: pile driving; clay; back analysis; shaft friction; dynamic analysis

以桩基础为主体的导管架平台是开发海洋石油资源最主要的基础设施之一。在安装时,钢桩穿过导管架的导管插入土中,然后用液压锤进行打桩。近年来,海上工程的规模越来越大,桩基设计常采用大直径、大长度的钢管桩。以渤海海洋平台建造为

例,目前的一些桩基设计长度达到 90 m 以上,桩径也增大到 2 m 以上。随着基础结构中大直径超长的频繁出现,桩的可打入性成为人们普遍关注的问题^[1]。

在海上打桩过程中,由于各种原因可能会造成

收稿日期:2011-09-20

作者简介:李飒(1970-),女,副教授,主要从事海洋土的工程性质及土与结构物相互作用研究,(E-mail)lisa@tju.edu.cn.

停锤。而停锤后经常会出现无法将桩体继续打入的现象。后续打桩无法进行的主要原因目前没有确切的回答。由于桩体能否打入设计深度是打桩成败的关键,因此对桩的可打入性的准确预测就成为打桩施工中的关键问题。大量的工程实践显示,打入桩在安装以及其后承载过程中周围土性会发生较为明显的变化。这种变化在打桩过程中主要表现为,在桩体周围会产生很大的超静孔隙水压力,从而使有效应力降低。有研究显示,超静孔隙水压力在一倍桩径范围内可以超过土体的上覆有效压力^[2-3]。打桩停止以后,孔压会发生消散,而孔压消散所需要的时间和距桩的水平距离的平方成比例^[4]。随着孔压的消散,土体强度的恢复将导致桩体的承载力提高,桩体承载力的提高主要来自于侧摩阻力的提高^[5-8]。但也有研究认为承载力的提高是由于土体的硬化而不是侧摩阻力的提高^[9]。目前,对于这一问题的研究更多的是集中在打入桩承载力的时间效应问题上,很多学者通过室内或现场试验的方法力图建立起承载力与时间因数之间的关系^[9-13]。而对打桩过程对土体性质的影响的研究则相对较少。打桩过程为一振动过程,打桩产生的振动不同于地震产生的地面振动,也不同于由地面振源产生以面波为主的地面振动。打桩产生的振动波源,主要集中在桩端处一定范围。打桩过程中,随着桩尖入土深度的不同,振源的深度也同时发生变化,同时引起振源的频率及振动衰减特性也发生变化^[14]。这种振动效应对土体性质的影响不能简单地忽略不计。

为了对打桩过程中粘土的土性变化进行研究,本文根据渤海海域36根桩的打桩记录,对其中的粘性土土层的打桩记录进行了反分析,总结了打桩过程中粘土层中土阻力的变化特点,分析了这些特点产生的原因。同时利用实测数据回归得到粘土层强度衰减的规律,提出了进行打桩分析时粘土层计算参数选取的方法,并通过一个实际工程对此进行了验证。

1 打桩过程中粘土层中土阻力的变化特点

根据36根桩的实测打桩记录,发现在打桩过程中土阻力的变化特点在砂土和粘土中存在着较大的差别,反映在打桩记录上,就是打桩所需能量的变化各具特点。图1为某实际打桩记录。通过图1可以看到,在砂土中,特别是密实的砂土中,随着深度的增加所需能量是不断增加的,如图中的3、11层。而粘土中,随着深度的增加,打桩能量不但不增加,反而有减小的趋势,其中第7层表现得尤为突出。在

其他土层,比如砂土与粘土交叠层,情况比较复杂,如图中2、5层。还有一些土层打桩记录有突变存在,如第6和9层,第6层的突变根据现场记录是由于停锤接桩造成的,而第9层的原因则不好判断,有可能是因为地质勘查分层和实际有一定出入造成的。由此可见,虽然打桩所消耗的能量总的趋势是随着深度的增加而逐渐增大的,但是在不同的土层的当中,其能量的变化存在着较大的差别。

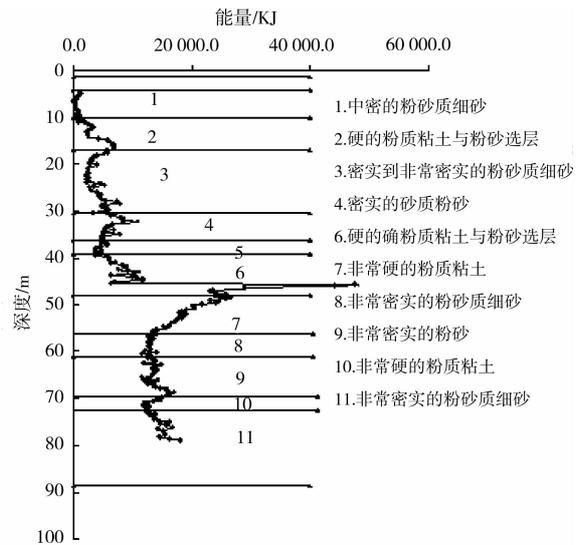


图1 某实测打桩记录

将36根桩的打桩记录进行综合分析,在进行分析时,剔除情况不明的纪录,如砂土与粘土交叠层和存在突变的土层。交叠层由于土性比较复杂,不具有代表性。还有一些存在突变的记录由于不能确定其产生原因,也需要剔除,但是可以判断原因的则予以保留。根据以上原则,以图1为例,可用的土层记录为1、3、4、6、7、8、10、11层。其中粘土层2个,其余为砂土层,他们分别位于土体的不同深度。在此地点共打入6根桩,而勘察资料唯一,因此所有6根桩在对应土层形成一组数据。按照此方法,36根桩共得到35组砂土中的打桩记录和22组粘土中的打桩记录。

图2和图3为根据打桩记录得到的典型的砂土和粘土中打桩能量随深度的变化情况(图中显示的是同一地点6根桩在砂土和粘土中的打桩能量)。

根据对所有记录的分析发现,上述各种现象在打桩中普遍存在,重点讨论粘土层的情况。粘性土土层共计22组,其中18组打桩能量不但不随深度的增加而增加,反而出现了减小的趋势;3组数据不完整,趋势不明显;1组打桩能量随深度增加而增大。这与在砂土层中,打桩能量随深度增加而普遍有所增加有明显的不同。

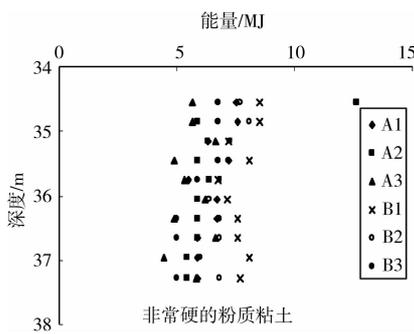


图 2 粘土中的打桩记录

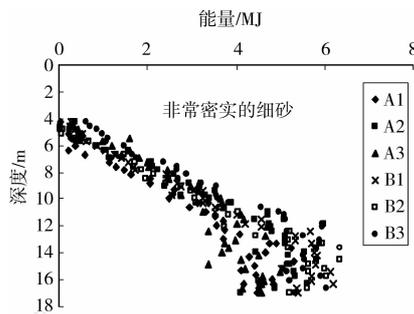


图 3 砂土中的打桩记录

2 实测数据与预测数据的区别及其原因分析

2.1 土阻力的实测值和预测值

打桩记录不能直接提供土阻力,而只是提供打桩时所用的锤击数(能量),一般为每 0.3 m 或 0.5 m 的锤击数。据此可以利用波动方程反算土阻力,将此值作为回归分析当中土阻力的实测值。在分析中采用了 GRLWEAP 程序对打桩过程中的土阻力进行了计算。

同时,采用目前常用的预测土阻力的方法,根据室内试验结果对土阻力进行了预测。打桩过程中的土阻力的计算方法和计算桩的竖向静承载力的方法相似。打桩过程中土阻力是侧摩阻力和桩端阻力之和,总侧摩阻力为单位侧摩阻力与桩入土侧表面积之积。桩端阻力为单位桩端阻力与桩端承载面积之积。与计算桩的承载力不同的是,桩端阻力不受桩端阻力不能大于土塞所产生的内摩阻力的限制,同时计算参数的选取也有所不同。

对于砂土,在打桩分析中,单位侧摩阻力和单位桩端阻力的数值和计算静承载力时的数值相同。

当桩打入到粘土中时,在连续打桩过程中的单位侧摩阻力和单位桩端阻力按下式进行计算。

$$F_{dr} = F_p \times p \quad (1)$$

式中: F_{dr} 为打桩过程中的单位侧摩阻力或单位桩

端阻力; F_p 为经验折减系数; p 为静承载力的单位侧摩阻力或单位桩端阻力,其中,

$$F_p = 0.5 \cdot OCR^{0.3} \quad (2)$$

式中 OCR 为超固结比。

图 4 为一组粘土土阻力的实测值与预测值,其中直线为根据实测数据拟合得到的。从图中可以看到根据现有方法得到的预测值和根据打桩记录得到的实测值在变化趋势上不一致。按照现有的计算方法,土阻力是随着深度的增加而逐渐增加的,无法准确反应打桩过程中粘土层的土阻力减小的事实。由于在打桩预测中各层的预测误差是逐渐叠加的,因此如果采用现有的计算方法,在粘土层比较深厚的地点进行打桩预测就有可能带来较大误差。

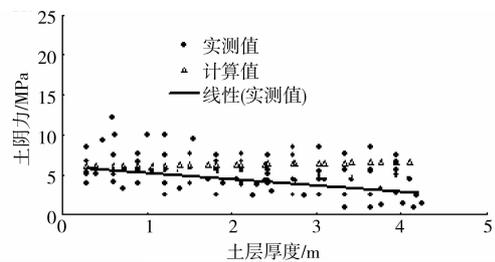


图 4 粘土中打桩阻力计算值与实测值

2.2 土阻力的实测值和预测值差异产生的原因分析

根据上述采用的打桩过程中土阻力的计算方法可以看出,在打桩过程土体中进入某一土层的土阻力(用 F 表示),应有以下几部分组成,

$$F = F_{up} + F_{end} + F_{c1} \quad (3)$$

其中, F_{up} 为此土层的上部所有土层的土阻力, F_{end} 为此土层的桩端阻力, F_{c1} 为此土层的桩侧摩阻力。随着桩体在这一土层的深入,如果假定在打桩过程中上部土层的土阻力和桩端阻力保持不变(目前计算打桩阻力普遍采用的假定条件),则在这一层土体当中,

$$F = F_{up} + F_{end} + F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + \dots \quad (4)$$

如果按照这一模式考虑土阻力,土阻力必定是沿深度不断递增的。

根据打桩过程中土阻力的组成(式(3)),如果打桩过程中土阻力出现递减的趋势,则存在以下几种可能,1)上部土层的土阻力或桩端阻力逐渐减小,侧摩阻力不断增加;对于上述情况还同时要求侧摩阻力增加趋势要小于上述两者的减小趋势。2)上部土层以及桩端阻力保持不变或减少较小,侧摩阻力没有增加或增加很小,甚至降低。此外,还有一种可能,就是出现了较大的负摩阻力。而打桩过程中,一般在卸荷和桩身回弹时才会 在桩身上部引起负应

力^[15]。因此在此不予考虑。

对于第1)种可能,随着打桩地进行,在动力的持续作用下,上部土层所提供的土阻力会发生一定的减小,但综合分析各场地的打桩记录可以发现,不论位于地层的何种深度,打桩阻力随深度减小的现象仅普遍出现在粘土层,而其余土层均极少观察到这种现象。因此认为这种现象的产生主要取决于粘土层本身而非外部土层。而对与开口管桩而言,当不形成土塞时,桩端阻力所提供的土阻力相比于侧摩阻力很小,基本上不存在其降低值大于侧摩阻力的增加值的可能。而对于大直径管桩(此次分析管桩直径均大于1.5 m)连续打桩情况下一般不会形成土塞。

因此,如果打桩过程中土阻力随着深度的增加而减小,说明打桩过程中粘土层中的侧摩阻力增加量很小或基本保持不变,甚至有减小的趋势。为了反映实际打桩的土阻力的特点,粘土中土阻力的计算模式可表示为下式,

$$F = F_{up} + F_{end} \quad (5)$$

即在粘土中打桩时,侧摩阻力所提供的土阻力很小,可以忽略不计。土阻力主要来自于上部土层和本层的桩端阻力。

根据 API 规范,粘土中的桩端阻力为,

$$F_{end} = 9S_u \quad (6)$$

S_u 为粘土的不排水强度。

根据此模式进行计算时,关键要确定 F_{up} 、 F_{end} 的数值。对于 F_{up} 仍沿用现在的常规方法,即上部土层的土阻力在本层打桩过程中保持不变。对于 F_{end} ,考虑到打桩的动力效应,此时,式(6)可以写作,

$$F_{end} = 9(S_u)_{cy} \quad (7)$$

$(S_u)_{cy}$ 为考虑动力衰减后的土体的不排水强度值。

3 打桩过程中的土阻力的计算参数

确定计算模式后,准确预测打桩中粘土中的土阻力就需要确定相应的计算参数。在这里关键是确定不排水强度 $(S_u)_{cy}$ 的数值。根据上述计算模式的分析,不排水强度的数值不能直接选用室内试验的数值 S_u 。 S_u 会发生一定程度的衰减,其衰减程度可以采用式(2)进行计算。

式(2)确定的折减系数为一常量,无法很好的描述实测结果。为此对 22 组粘土数据进行了回归分析。根据打桩记录我们可以得到相应土层的土阻力,而在粘土层中,土阻力由 F_{up} 、 F_{end} 两部分组成,其中 F_{up} ,由于假定该土层的上部土体所产生的土

阻力在本层的打桩过程中保持不变,因此可根据土阻力随深度变化在记录中直接获得;而同时粘土层中的土阻力 F 也是已知的,由此也就得到了 F_{end} 的数值,并进一步得到 $(S_u)_{cy}$ 的数值。

由于这些土层位于地基的不同深度,因此采用实验室得到的该土层土体的不排水强度值进行归一化处理,即可得到图 5。需要说明的是,图中纵坐标为 $\Delta S_u/S_u$,其中 $\Delta S_u = (S_u)_{cy} - S_u$ 。

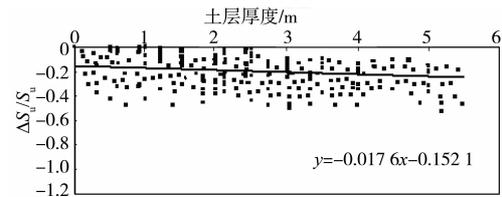


图 5 粘土的 $\Delta S_u/S_u$ 随土层厚度的变化

根据回归结果可以得到,

$$\frac{(S_u)_{cy} - S_u}{S_u} = -0.0176z - 0.1521 \quad (8)$$

通过上式可以看到,粘土层中不排水强度的衰减程度不大,根据上式,当土层厚度达到 10 m 时, $(S_u)_{cy} = 0.68 S_u$,其衰减程度小于常用方法衰减程度(对正常固结土,常用方法衰减系数为 0.5)。利用上式可以得到打桩过程中粘土层中 $(S_u)_{cy}$ 的数值,并将其带入式(7),对打桩时粘土层中的土阻力进行预测。

由此可以看到,在打桩过程中粘土的不排水强度存在着逐渐降低的趋势,它是打桩过程的动力效应的直接反应。为了对动力效应对粘土不排水强度的影响作出评价,研究了粘土的不排水强度 $(S_u)_{cy}$ 与捶击数之间的关系。

将打桩过程看作是土体承受循环荷载的过程,捶击数相当于振动次数,采用土动力学理论来探讨粘性土在打桩过程中的变化。对于正常固结饱和粘土,其在不排水循环应力作用下会产生超孔隙,使固结应力减小,其结果类似土体卸荷回弹产生超固结。将循环荷载作用后土样有效应力的减少称为等效超固结,应力比称为等效超固结比 OCR_{eq} ,其定义式为式(9)。所不同的是,孔隙比没有发生变化^[16]。

$$OCR_{eq} = \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0} - u} \quad (9)$$

在循环荷载作用下,粘土的强度会发生相应的变化,循环荷载作用下的 $(S_u)_{cy}$ 和 S_u 的关系可以用下式表示^[17],

$$\frac{(S_u)_{cy}}{(S_u)_{NC}} = [OCR_{eq}]^{\frac{A_0}{1-C_s/C_c}} \quad (10)$$

其中,

$$\frac{\Lambda_0}{1 - \frac{C_s}{C_c}} = 0.939 - 0.002I_p$$

式中: OCR_{eq} 为等效超固结比。 C_s, C_c 为土的再压缩和压缩指数, Λ_0 为经验系数, I_p 为土的塑性指数。根据等效超固结比的定义

$$\frac{(S_u)_{cy}}{(S_u)_{NC}} = \left[\frac{1}{1 - \frac{u}{\sigma'_{v0}}} \right]^{\frac{\Lambda_0}{1 - C_s/C_c - 1}} \quad (11)$$

其中 u 为孔隙水压力, σ'_{v0} 为有效上覆压力, $\frac{u}{\sigma'_{v0}}$ 为孔压比, 而循环荷载作用下的孔压比是振次 N 的函数, 即^[18],

$$\frac{u}{\sigma'_{v0}} = f(N)$$

式中: N 为振次。因此式(10)可以写为如下形式,

$$\frac{(S_u)_{cy}}{(S_u)_{NC}} = \left[\frac{1}{1 - f(N)} \right]^{\frac{\Lambda_0}{1 - C_s/C_c - 1}} \quad (12)$$

根据上述推导可见, $(S_u)_{cy}$ 和振次 N , 土的静抗剪强度 S_u , 土的塑性指数 I_p 有关。其中 S_u 和 I_p 由粘土自身性质决定。因此, $(S_u)_{cy}$ 和振次 N (在这里锤击数即为振动次数) 存在唯一对应关系。

根据打桩记录可以得到 $\Delta S_u/S_u$ 随锤击数的变化, 见图 6。

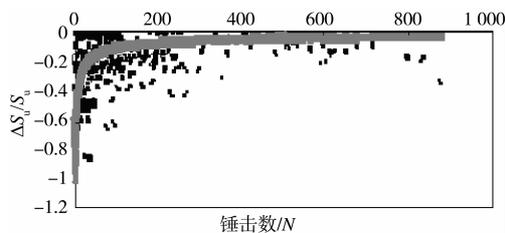


图 6 粘土的 $\Delta S_u/S_u$ 随锤击数的变化

根据数据, 通过拟和得到如下公式,

$$\frac{(S_u)_{cy} - S_u}{S_u} = -1.2N^{-0.5} \quad (13)$$

上式为渤海海域打桩记录的拟和结果, 根据上述关系, 如果掌握实测的打桩记录, 可以预估打桩完成时的粘土的土体强度。这一关系反应了打桩的动力效应对粘土性质的影响。

4 工程验证

通过上述分析, 建立了粘土中土阻力的计算模式和参数选取方法, 为了评价这种方法的可靠性, 利用一个工程实例进行了验证。

选择渤海某实际工程进行了计算。某导管架平

台位于渤海海域, 工作水深 14 m。平台基础设计为 6 根桩基础, 每根桩由 4 段桩体组成。第 1 段桩桩长 50 m, 壁厚 32 mm; 第 2 段桩桩长 35 m, 壁厚 32 mm; 第 3 段桩桩长 26 m, 壁厚 60 mm; 第 4 段桩桩长 14 m, 壁厚 50 mm。桩径均为 1.524 m。

工程所在地的土体情况见表 1。

表 1 土层状况

深度/m	土层描述
3.0	非常软到软的中塑性粉质粘土组成
3.0~17.1	中密实的含粉砂的细砂和非常密实的细砂组成
17.1~37.4	交替出现的粘性土和砂性土。粘性土主要为稍硬到硬的高塑性粘土, 非常硬的高、中塑性粘土和粉质粘土, 砂性土主要为中密实到密实的含砂的粉砂。
37.4~43.6	密实的粉砂和非常密实的含粉砂的细砂
43.6~57.0	非常硬到硬的低塑性粉质粘土
57.0~88.6	非常密实的含粉砂的细砂和细砂。其中, 66 m 至 68.5 m 夹有一层非常硬的粉质粘土
88.6 以下	粘性土主要为非常硬到坚硬的低塑性粉质粘土, 砂性土主要为非常密实的含粉砂的细砂和含砂的粉砂。

此工程所在地粘土层较多, 粘土的总厚度达到桩入土深度的 40% 左右。分别采用现有的常规方法(见 3.1)和本文提出的方法, 即忽略粘土的侧摩阻力, 不排水强度按式(8)取值, 分别计算打桩的土阻力并与实测值进行比较, 见图 7。

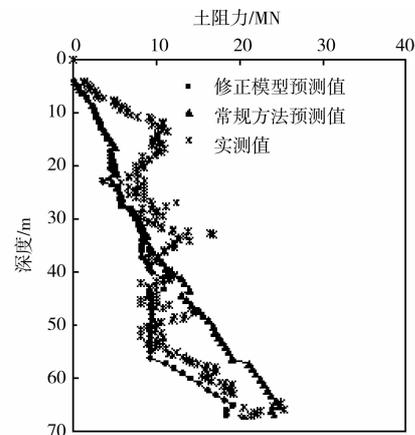


图 7 打桩实测记录与不同方法的计算值

从图中可以看出, 在 20 m 以上由于是砂土, 方法的修正对计算结果没有影响。20 m 以下粘土层的存在计算修正的影响开始显现。采用原有的计算方法得到的结果与实测结果相差最大的地方出现在 40~55 m 左右。此处为一较厚的粘土层(43~57 m), 对于现行方法, 自此计算误差开始加大。而利用本文提出的修正方法在此粘土层得到的预测值和实际的打桩记录更加接近, 取得了较好的效果。而此后由于粘土层误差的降低, 计算值和实测值吻合较好。由此可见, 利用波动方程对打桩过程进行

预测,由于计算过程中,各个土层计算所造成的误差将产生累加。如果在土层中粘土层所占的比例较小,这种误差也会比较小,但是,如果粘土层较多,所产生的误差就会对最终结果带来比较大的影响。

5 结 论

通过上述分析可以得到如下结论:

1)在打桩过程,由于振动的影响,土阻力随着土层的不同会发生明显的变化。虽然打桩所消耗的能量总的趋势是随着深度的增加而逐渐增大的,但是在不同的土层的当中,其能量的变化存在着很大的差别。

2)在粘土层进行打桩时,打桩阻力不但不随深度的增加而增加,反而出现了减小的趋势;这与在砂土层中,打桩阻力随深度增加而普遍有所增加有明显的不同。

3)在连续打桩过程中,粘土层中其侧摩阻力可以忽略不计,同时,粘土层的强度在打桩过程中持续降低,这一特点反映了打桩动力效应的影响。

4)将打桩过程看作是循环荷载作用时,粘土的不排水强度和捶击数存在一一对应的关系,它们之间可以用指数形式进行拟合。

参考文献:

- [1] 樊之夏. 海上打桩拒锤风险分析 [J]. 中国造船, 2006, 47(11): 411-414.
FAN ZHI-XIA. Risk analysis for the driven pile refusal [J]. Shipbuilding of China, 2006, 47(11): 411-414.
- [2] PESTANA J M, CHRISTOPHER E H, JONATHAN D B. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128, (1): 1-12.
- [3] RANDOLPH M F, CARTER J P, WROTH C P. Driven piles in clay-the effects of installation and subsequent consolidation [J]. Géotechnique, 1979, 29 (4): 361-393.
- [4] HOLLOWAY D M, BEDDARD D L. Dynamic testing results, indicator pile test program-I-880, oakland, california [C]//Proceedings 20th Annual Members Conference and Meeting, Charleston, south Carolina: DFI, 1995:105-126.
- [5] AXELSSON G. A conceptual model of pile set-up for driven piles in non-cohesive soil [M]. Deep foundations 2002, [S. L.]: AS CE, 2002, 1(116): 64-79.
- [6] LUKAS R G, BUSHELL T D. Contribution of soil freeze to pile capacity [C]// Foundation Engineering: Current Principles and Practices, Geotechnical Special Publication, 1989:991-1001.
- [7] BULLOCK P J. Pile friction freeze: A field and laboratory study [D]. Florida: University of Florida, 1999.
- [8] CHOWM F C, JARDINE R J, BRUCY F, et al. Effects of time on capacity of pipe pile in dense marine sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(3): 254-264
- [9] FELLENIUS, BENGT H, BRUSEY, et al. Soil set-up, variable concrete modulus, and residual load for tapered instrumented piles in sand [C]// Specialty Conference on Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities, Geotechnical Special Publication, 2000:1-17.
- [10] LADANIY B. Expansion of a cavity in a saturated clay medium [J]. ASCE, 1963, 89(4): 127-161.
- [11] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass [J]. ASCE, 1972, 98(3): 265-290.
- [12] 王育兴, 孙钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 153-158.
WANG YU-XING, SUN JUN. Influence of pile driving on properties of soils around pile and pore water pressure [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 153-158.
- [13] 谢世波, 陆林强. 大口径开口钢管桩打桩过程对周围土体的影响分析 [J]. 上海铁道大学学报: 自然科学版, 1997, 18(2): 67-72.
XIE SHI-BO, LU LIN-QIANG. An analysis of the influence of big aperture opening steel tube pile during driven on surrounding soil [J]. Journal of Shanghai Tiedao University: Natural Science, 1997, 18(2): 67-72.
- [14] 高彦斌, 费涵昌. 打桩引起的地面振动的测试与分析 [J]. 地下空间, 2004, 24(2): 190-193.
GAO YAN-BIN, FEI HAN-CHANG. Measurement and analysis of the caused by pile driving [J]. Underground Space, 2004, 24(2): 190-193.
- [15] 波勒斯. 基础工程分析与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [16] 高广运, 顾中华, 杨宏明. 循环荷载下饱和粘土不排水强度计算方法 [J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 379-382.
GAO GUANG-YUN, GU ZHONG-HUA, YANG HONG-MING. A calculation method for undrained strength of saturated clay under cyclic loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 379-382.
- [17] YASUHARA K, HIRAO K, HYDE A FL. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 100-116.
- [18] 白冰, 肖宏彬. 软土工程若干理论与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.