

下卧碎石层对静压管桩挤土效应的影响

王仕传^{1,2}, 张 衍², 凌建明¹, 邵 艳²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 利用通用有限元软件 ABAQUS 分析软土地基下卧碎石层对静压管桩挤土效应和承载力的影响, 并探讨管桩不同贯入深度时地表竖向隆起、地基土体水平位移、桩周土体和桩身应力的变化规律。结果表明: 静压管桩施工导致桩周附近地表隆起, 随着离开桩周的距离增大, 地表隆起效应迅速减弱; 静压管桩使桩周土体产生显著的水平挤压效应, 静压管桩施工至下卧碎石层时, 碎石区域中的位移效应明显小于桩周土体为软土时的位移效应; 以碎石层为持力层, 可显著提高管桩的承载力。

关键词: 静压管桩; 碎石层; 数值分析; 位移贯入法; 挤土效应
中图分类号: TU473 **文献标志码:** A

Influence of Underlying Crushed Rock Layer on Compacting Effect of Jacked Pipe Pile

WANG Shichuan^{1,2}, ZHANG Yan², LING Jianming¹, SHAO Yan²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Influence of underlying crushed rock on compacting effects and bearing capacity of jacked pipe pile was analyzed by general finite element method ABAQUS. Change rules of ground upwarping, ground horizontal displacement, compressive stress of pipe pile and foundation around it were discussed under the condition of different penetration depth of pile. Results show that installation of jacked pipe pile will result in ground upwarping around piles, and as the distance to the pile side is increasing, ground upwarping effect is weakening quickly. Installation of jacked pile will cause remarkable horizontal soil-compacting effect around it. When jacked pipe pile is penetrated into underlying crushed rock, deformation effect of it around pipe pile is obviously weaker than that of soft foundation because stiffness of crushed rock is larger than that of soft foundation. The bearing capacity of pipe pile can be significantly increased, when the crushed rock

layer is as bearing layer.

Key words: jacked pipe pile; crushed rock layer; numerical analysis; displacement penetration method; compacting effects

静压桩在施工过程中具有噪音小、无泥浆污染、沉桩速度快等优点, 在软土地基城市建设中得到广泛应用。静压桩在压入饱和软土地基过程中所产生的挤土效应对工程环境的影响主要表现为: 桩周土层被压密和挤开, 桩周土体产生垂直隆起和水平移动, 进而使邻近已压入的静压桩产生上浮、桩位偏移、桩身翘曲; 静压桩使桩周土体中的应力状态发生改变; 压桩后桩周土体中孔隙水压力缓慢消散, 导致桩周土体再固结^[1-2]。

国内外许多学者对静压桩的沉桩挤土特性展开了研究。周火垚等^[3]通过现场足尺试验研究饱和软黏土地基静压桩贯入过程中桩周土体侧向位移、孔隙压力、地面隆起量的变化规律。鹿群等^[4]利用 ANSYS 软件对静压桩的连续贯入进行数值模拟, 分析了桩-土模量比、桩-土间摩擦系数、土体泊松比等参数对土体变形的影响。雷华阳等^[5]对静压桩挤土效应进行现场试验和数值模拟, 得到了静压桩引起的桩周土体位移随深度和距桩心距离的变化规律, 认为桩-土界面摩擦特性和桩径对土体位移场的影响较大。文献[3-5]主要针对软土地基, 对桩侧土体水平位移和地面隆起变形等随静压桩贯入深度的变化规律进行分析。Cao 等^[6]基于土体非线性修正剑桥模型, 用数值积分方法分析了不排水条件下大变形球孔扩张和圆柱孔扩张问题。李镜培等^[7]采用室内模型试验研究了成层地基中静压桩沉桩过程, 对于成层地基, 最大径向、竖向位移均出现在软硬土层交界面处。

巢湖市滨湖新区大量兴建的住宅项目桩基础多采用带桩头的预应力空心管桩,桩径 400 mm,采用静压法施工。勘察报告表明,该地区地下水位较高,地表下广泛分布着饱和软黏土,属高压缩性土,工程地质性能差;软黏土层下常分布较厚(6~17 m)的中密实碎石层,属低压缩性土,工程地质性能良好;下卧碎石层适宜作为拟建住宅项目持力层。

针对巢湖市滨湖新区的地质特点和建设现状,本文采用通用有限元软件 ABAQUS 分析软土地基下卧碎石层对静压管桩贯入过程挤土作用的影响及承载力的意义。

1 有限元计算模型

(1) 几何模型

为了方便分析,数值计算时地基土层简化为两层:地面下 5 m 为软土层,5 m 以下为碎石层。通过有限元计算,对软土地基下卧碎石层状况下静压管桩贯入过程进行数值模拟,分析下卧碎石层对管桩贯入过程挤土效应和管桩承载力的影响。作为对比,同时对均质软土地基状况下静压管桩贯入过程进行数值计算。本文数值计算分两种工况:①软土地基下卧碎石层,碎石层位于地面下 5 m;②均质软土地基。由于下卧碎石层刚度大、挤压效应强,因此主要对比分析静压管桩贯入过程中两种工况下桩周土体受到的侧压力及桩身应力。

根据对称性,本文数值计算按轴对称问题进行分析。图 1 为有限元几何模型,水平方向取 15 m,竖直方向取 20 m,桩长 10 m,桩径 0.4 m,考虑桩头。有限元模型中,桩周土体和桩身均采用轴对称二维六节点三角形单元 CAX6。模型左边界为对称轴,右边施加水平约束,下边界施加铰支约束。

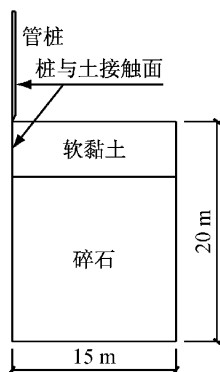


图1 有限元几何模型

Fig.1 Geometrical model

(2) 材料模型

有限元计算中,管桩采用线弹性材料模型,弹性模量 $E=3.6 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\mu=0.2$ 。桩周软土地基和下卧碎石层采用摩尔-库伦弹塑性模型和非关联流动法则(剪胀角 $\Psi=0^\circ$)。材料参数:①软黏土地基,压缩模量 $E_s=3$ MPa,黏聚力 $c=10$ kPa,内摩擦角 $\phi=12^\circ$;②碎石土地基,压缩模量 $E_s=20$ MPa,黏聚力 $c=120$ kPa,内摩擦角 $\phi=22^\circ$ 。

静压管桩贯入过程桩-土之间是相互挤压和滑移的,数值模拟通过桩-土界面接触来考虑桩-土之间的实际相互作用。本文计算中,管桩和桩周土体之间设置面面接触连接,接触面的摩擦类型为库仑摩擦,摩擦系数 $f=0.15$ 。

(3) 加载方式

模拟管桩贯入过程的方式有三种:孔扩张法、位移贯入法、力贯入法^[8-9]。位移贯入法通过在管桩顶施加位移边界条件来实现静压桩贯入过程,这能反映按照一定速率控制静压桩贯入过程的实际情况,且计算时间短,因此本文采用位移贯入法模拟管桩的贯入过程。

随着静压管桩施工过程的不断进行,管桩周围地基产生显著的挤压变形,进而表现出明显的挤土效应。根据应力云图和位移云图可以评价挤土效应的发展程度。

2 静压管桩施工对桩周土体位移影响

图 2 为有下卧碎石层时,静压管桩施工至不同入土深度时地表隆起位移曲线。管桩入土深度分别为 3, 6, 10 m, 竖向隆起位移量差别不大,主要发生在距桩侧 0.6 m 范围内。从图 2 可以看出,仅在管桩刚入土初期导致地表隆起,随着施工至一定深度后,由于上覆压力的增加,静压管桩引起的地表隆起效应逐步趋于稳定。

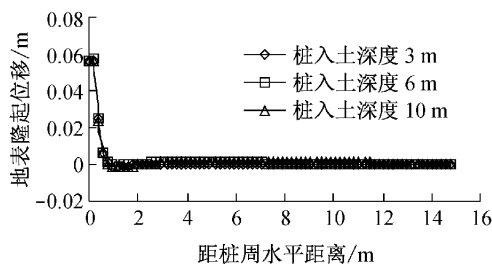


图2 有下卧碎石层时地表隆起位移曲线

Fig.2 Ground upwarping displacement curves with underlying crushed rock

图3为有下卧碎石层时,静压管桩施工至不同入土深度桩周地基水平方向位移云图。管桩入土深度3 m时,静压管桩贯入过程中挤土效应引起的桩周地基水平方面位移云图和均质软土地基时的状况基本一致。当管桩入土深度至6 m时,由于地面5 m以下部分下卧刚度更大的碎石层,阻碍软土地基向下的位移,紧邻碎石层部分的软土地基水平方向挤压位移效应有加剧倾向。碎石层以下部分,由于碎石层刚度大于软土层,挤土效应的影响范围(位移效应)要明显小于均质软土地基的挤土效应。由碎石层部分的水平方向位移云图可以看出,入土深度至10 m时,和均质软土地基的计算结果比较,碎石层抑制挤土引起位移效应的能力表现得更为明显。

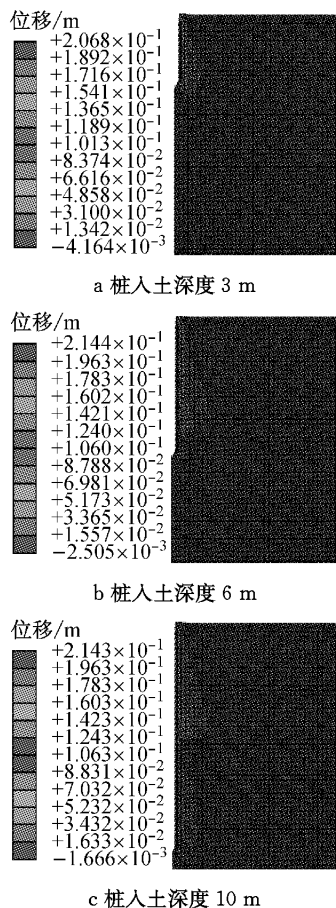


图3 有下卧碎石层时地基水平方向位移云图

Fig.3 Ground horizontal displacement nephograms with underlying crushed rocks(unit:m)

图4为有下卧碎石层、静压管桩施工至不同入土深度时,地面下4 m和8 m位置处,桩周地基水平位移曲线。图中曲线表明,水平方向在距桩周0.8 m范围内位移影响最显著。随着离开桩周距离的增大,水平位移影响显著下降,距桩周3.2 m以外的地基土体受管桩施工导致的挤土效应的影响较小。由于

碎石层刚度较大,静压管桩施工引起的位移效应影响范围要小于上覆软土层;相对于均质软土地基,碎石区域的挤土位移更小,碎石区域管桩施工引起的挤土效应对邻近管桩的影响小于软土区域。因此,从静压管桩施工引起位移效应的角度可以看出,桩周软土地基下卧碎石层适宜作为管桩的持力层。

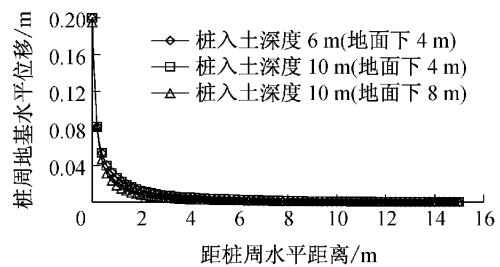


图4 有下卧碎石层时地基水平位移曲线

Fig.4 Ground horizontal displacement curves with underlying crushed rocks

3 静压管桩施工对桩周土体和桩身应力影响

图5为有下卧碎石层,静压管桩施工至不同入土深度时桩周地基土体水平方向受到的侧压力曲线。结果表明,碎石层部分受到管桩的挤压应力远大于软土层部分受到管桩的挤压应力。桩侧地基受到的挤压应力增大相应地提高管桩侧阻力,进而提高管桩总的承载力,即碎石层对提高管桩的承载力具有显著影响。桩周地基受到的挤压应力随着离开桩周水平距离的增大,迅速衰减,离桩周5 m范围内的地基受静压管桩挤压影响较显著。

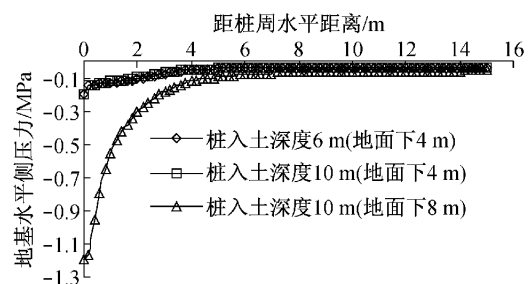


图5 有下卧碎石层时地基水平侧压力曲线

Fig.5 Ground horizontal lateral pressure curves with underlying crushed rocks

桩周地基为均质软土地基,静压管桩施工至不同入土深度时桩周地基土体水平方向受到的侧压力曲线如图6所示。桩侧附近地基土体水平位移最大,相应受到的挤压应力也最大。随着离开桩周水平距离的增大,挤压应力迅速衰减,说明静压管桩施工引

起的挤土效应迅速减弱。地面下 4 m 深度处桩侧地基受到的最大挤压应力和自重应力之比和地面下 8 m 深度处桩侧地基受到的最大挤压应力和自重应力之比比较接近,说明对于均质地基,桩侧地基受到的挤压应力随埋深线性增加。当软土地基下卧碎石层,由于碎石层刚度显著增加,静压管桩至碎石层时,桩侧土体受到的挤压应力显著提高,而不是随埋深线性增加。图 5 和 6 对比表明,软土地基下卧碎石层刚度大、强度高,相对于均质软土地基,碎石层作为持力层有利于提高管桩的承载力。

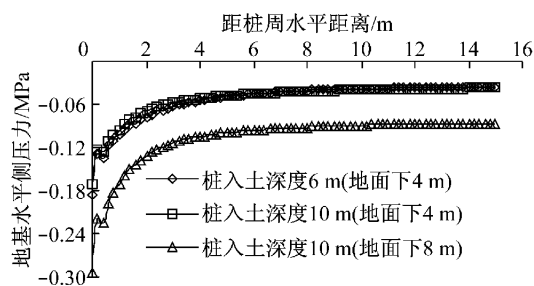


图 6 均质软土地基水平侧压力曲线

Fig. 6 Ground horizontal lateral pressure curves of uniform soft foundation

图 7 为有下卧碎石层时静压管桩施工至不同入土深度时,管桩竖向应力云图。可以看出,由于软土地基下卧碎石层,静压管桩施工至不同入土深度时,桩身应力显著提高,主要是因为下卧碎石层对管桩端部的阻力明显提高;管桩顶部、中部、底部压应力明显大于均质软土地基时相应位置的压应力值。这同样说明了,以下卧碎石层为持力层,有利于提高管桩的承载力。

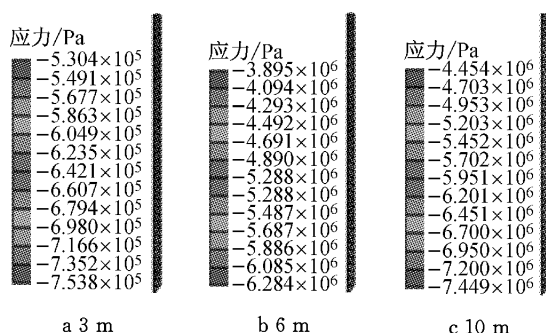


图 7 有下卧碎石层时管桩不同入土深度竖向应力云图

Fig. 7 Vertical stress nephograms of pipe pile with different penetration depths

图 8 和 9 为静压管桩施工过程桩顶压应力时程曲线。图中时间 t 是数值计算荷载步,表示静压管桩施工过程,是相对时间。图 8 为均质软土地基静压管桩施工过程桩顶压应力时程曲线。随着入土深度的

不断增加,桩顶压应力不断增加。桩顶压应力随加载时间总的趋势是不断增加的,其波动性主要与静压管桩贯入过程中管桩端部土的屈服有关。压应力随时间变化的时程曲线说明数值模拟静压管桩施工加载过程不宜采用力贯入法。

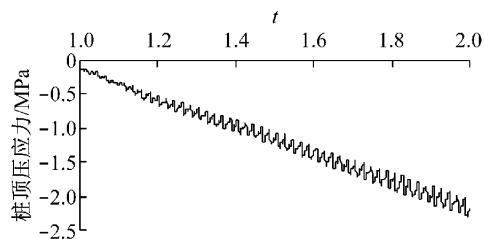


图 8 均质软土地基管桩桩顶压应力时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of compressive stress on the top of pipe pile of uniform soft foundation

图 9 为软土地基下卧碎石层时静压管桩施工过程桩顶压应力时程曲线。可以看出,在软土层部分,桩顶压应力时程曲线和图 8 中变化规律基本一致。当静压管桩施工至碎石层时,桩顶压应力迅速增大,有突变,主要是由于碎石层刚度大、强度高,端阻力迅速提高的原因。图中数据也说明软土地基下卧碎石层作为持力层,管桩承载力大大提高,管桩端阻力占管桩总承载力的比例也相应大大提高。

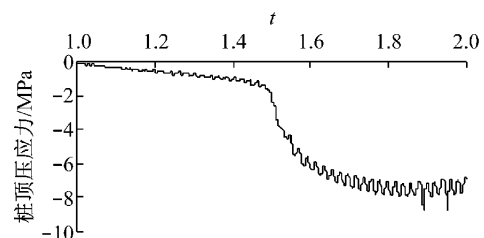


图 9 有下卧碎石层时管桩桩顶压应力时程曲线

Fig. 9 Time-history curve of compressive stress on the top of pipe pile with underlying crushed rock

4 结论

(1) 静压管桩施工导致地表隆起,地表隆起的影响范围主要在桩周 0.6 m 范围内。随着离开桩周距离的增大,静压管桩引起的地表隆起效应迅速减弱。当静压管桩施工至一定深度以后,由于上覆压力的增大,管桩挤土引起的地表隆起效应逐步趋于稳定。

(2) 静压管桩施工至下卧碎石层时,由于碎石层刚度大于软土层,碎石区域中静压管桩施工引起的挤土效应中的位移效应,要明显小于桩周土体为均

(下转第 1466 页)