

DOI:10.11918/202008101

带桩靴的管桩钢模贯入挤土效应

周小文^{1,2},李俊庆^{1,2},周密^{1,2},肖自卫³

(1. 亚热带建筑科学国家重点实验室(华南理工大学),广州 510640;2. 华南岩土研究中心(华南理工大学),广州 510640;3. 中铁南方投资有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:针对管桩钢模在贯入过程中出现的挤土效应迫使桩周土体发生变形,对施工产生不利影响的问题,基于 RITSS 大变形有限元方法建立管桩桩模贯入软土地基的数值模型,将仿真结果与现场实测数据作对比,验证有限元模型的准确性。随后开展参数分析,研究沉桩过程中管桩桩端的几何形状、土体强度因素对于桩周土体流动特性的影响。结果表明,以相对贯入深度 $L_p/R=8$ 为分界点,管桩在贯入过程中分为浅层贯入模式和深层贯入模式两种。在不同的贯入区域中,土体的流动特性有较大差异。桩周土的水平位移以及隆起量与管桩桩靴角度有较大关系。根据数值仿真研究,针对实际工程中最常使用的桩靴($\beta=60^\circ$, $w_p=0.01\text{ m}$)的桩模贯入结果,提出用于预测桩周土水平位移以及隆起量的拟合公式,与现场实测结果对比后证明该公式能够有效预测桩周土体的变形。研究结果为现浇混凝土管桩的设计和施工提供了理论指导。

关键词:管桩;挤土效应;大变形有限元分析;水平位移;土体隆起

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)02-0135-10

Soil squeezing effect of installation of pipe pile casing

ZHOU Xiaowen^{1,2}, LI Junqing^{1,2}, ZHOU Mi^{1,2}, XIAO Ziwei³

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science (South China University of Technology), Guangzhou 510640, China;
2. South China Institute of Geotechnical Engineering(South China University of Technology), Guangzhou 510640, China;
3. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: During the casing penetration process, soil squeezing effect has a negative effect on the quality of the construction, which forces the soil around the pile to deform. Based on the large deformation finite element (LDFE) analyses using remeshing and interpolation technique with small strain (RITSS), a numerical model of pipe pile penetrating in soft clay was established, and numerical results were compared with field test data to verify the accuracy of the model. Then, a parametric study was carried out to examine the influences of pipe tip geometries and soil strength on the characteristics of soil movement induced by casing penetration. Results show that by taking the penetration depth of $L_p/R=8$ as the critical point, it could be divided into shallow penetration mode and deep penetration mode during the process of pile casing penetration. The soil flow mechanism was different in different penetration areas. The horizontal displacement of the soil and the soil heave outside the pile were closely related to the angle of the spudcan. According to the numerical simulation results, based on the casing penetration results of the commonly used spudcan ($\beta=60^\circ$, $w_p=0.01\text{ m}$) in practice, formulas for predicting horizontal displacement and soil heave were proposed. Compared with field test data, the proposed formulas could effectively predict the soil deformation around the pile. The research findings provide a theoretical guidance for the design and construction of cast-in-situ concrete piles (PCCs).

Keywords: pipe pile; soil squeezing effect; large deformation finite element analysis; horizontal displacement; soil heave

现浇混凝土(PCC)管桩一般应用于软土地基的地基处理,以提高软土地基的地基承载力以及减少土体沉降量,常被用于路堤加固、公路建设以及桥墩建造工程^[1-2]。PCC管桩的工作原理类似于开口

桩,与传统的实心闭口桩的工作原理不同。管桩在贯入过程中,桩周的部分土体会流入管内,出现土塞效应。随着土塞效应的加剧,PCC管桩桩模的贯入挤土效应也会转变为类似闭口桩的特性^[3]。需要注意的是,管桩在贯入时产生的挤土效应会对相邻既有桩或其他建筑设施造成较大影响^[4-8],且PCC管桩特有的桩靴会对周围土体的流动特性产生较大影响,因此,有必要研究带桩靴的PCC管桩贯入时的沉桩特性。

收稿日期: 2020-08-24

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515010828);国家自然科学基金(42176224);广东省现代土木工程技术重点实验室资助项目(2021B1212040003)

作者简介: 周小文(1965—),男,教授,博士生导师

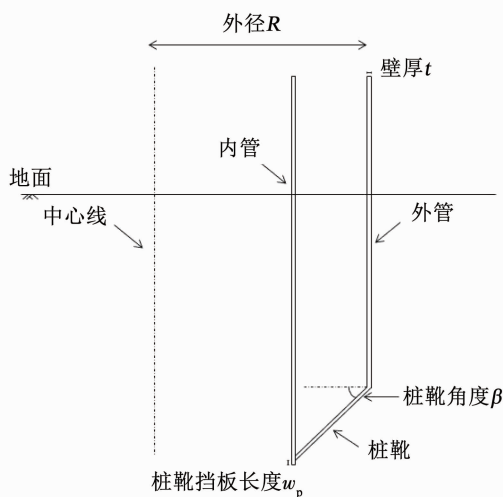
通信作者: 周密, zhoumi@scut.edu.cn

一些学者针对类似的双层管壁的管桩贯入问题开展了试验研究和理论分析工作。李镜培等^[9]开展室内模型试验研究了预制桩沉桩的挤土效应规律。雷华阳等^[10]利用数值模拟的方法研究了 PHC 管桩在沉桩过程中的桩周土体位移规律。Xu 等^[11-12]利用离心机试验以及现场试验研究了管桩贯入过程中桩周土的位移以及应力变化情况。赵春风等^[13-15]通过现场试验分析管桩挤土效应特性,结果表明,土体水平位移与距桩心距离以及所处深度有关,并提出减小沉桩挤土效应的措施。刘汉龙等^[16]利用现场试验、数值模拟等手段对 PCC 管桩的沉桩特性开展了研究。目前,现场试验所采用的管桩桩端几何形状都较为固定,桩端的其他几何形状因素以及土体材料特性的影响并没有研究,且管桩内部的土体和桩靴周围土体在贯入过程中的变化很难从试验中直接观察到。数值模拟方面,针对带桩靴的 PCC 管桩贯入时周围土体的流动情况及挤土效应的研究较少。

本研究选取了目前常用尺寸的带桩靴 PCC 管桩作为研究对象,主要由外管、内管以及带有桩靴的锥形尖端组成,其现场施工与示意如图 1 所示。



(a) PCC管桩活瓣桩靴



(b) PCC管桩桩靴示意

图 1 带桩靴的 PCC 管桩图片

Fig. 1 General view of PPC with spudcan

为解决传统有限元方法研究 PCC 管桩贯入问题时,因管桩桩靴部位存在尖角容易出现网格扭曲

而无法正常计算的问题,利用自主开发的 RITSS 有限元大变形程序对管桩桩模的贯入挤土效应进行研究,分析沉桩过程中管桩的几何特性以及土体强度对土体流动特性和挤土效应的影响。并结合计算结果,针对常用 PCC 桩模($\beta = 60^\circ$, $w_p = 0.01 \text{ m}$)拟合能够预测其土体水平位移以及桩周土隆起位移的设计公式,提出的公式对于实际工程施工具有指导意义。

1 有限元数值模型

1.1 大变形有限元分析

Hu 等^[17]提出了一种利用重构网格的多次小变形计算处理有限元大变形问题的数值计算方法(RITSS),该方法实质上隶属于 ALE 大变形有限元方法的范畴^[18],但其每次更新都会改变网格的拓扑结构,从而可适应于变形量特别大的大变形问题,保证了计算稳定性和精度^[19-20]。

这种方法的主要步骤可以分为:1)生成由 3 个高斯积分点的六节点三角形单元构成的初始网格;2)使用 AFENA 程序进行步数一定的小变形计算;3)网格的重划分与优化,得到新的单元与节点;4)对材料应力及属性进行插值运算,插值算法采用唯一单元法(UEM)和改进的 UEM 法(MUEM)^[21];5)检查位移是否达到所需条件,若不满足,打开新的有限元小变形程序重复计算以上步骤,若满足则可退出程序。

1.2 带桩靴的桩模贯入 RITSS 大变形程序开发

为了解决复杂的轴对称结构(本文指带桩靴的 PCC 桩模,桩端处存在尖角)贯入单层均质黏土中的问题,采用了动态网格以及土体特性插值技术,并基于预设准则进行结构物与土体接触与脱开的判别与处理。本研究中处理准则设置为 $d_{\text{cri}} = 0.05h_{\text{min}}$,其中 d_{cri} 为临界位移, h_{min} 为最小网格尺寸。当材料线与 PCC 桩模之间的距离小于 d_{cri} 时,认为两者相接触,自动断开材料线并进入分区动态管理;经过上一次小变形计算之后,根据上一次网格高斯积分点上的应力进行插值计算下一次新网格中各个高斯积分点位置处对应的土体应力,从而捕获土体运动追踪。

1.3 模型的建立

本研究的管桩桩模为带桩靴的大直径 PCC 空心管桩模,大直径的桩身能使桩获得更大的摩擦力,并且桩芯土会和桩身一起协同工作。管桩参数如下:直径 D 为 $1 \sim 1.5 \text{ m}$;贯入深度 L_p 一般为 $6 \sim 20 \text{ m}$;管桩厚度 t 为 $10 \sim 15 \text{ cm}$;黏性土的不排水抗剪强度 S_u 一般在 $2 \sim 40 \text{ kPa}$ 变化。

为了避免出现边界效应,有限元分析区域的长宽都取为 $30D$ 。模型底部使用固定约束,左右两侧

使用铰约束。土体所采用的有限元网格为二次精度六节点的三角形单元,每个三角形有 3 个高斯积分点,同时在管桩桩靴处附近的局部区域加密网格,其最小单元尺寸为 $h_{\min}=0.05D$,保证其精度。桩土接触面用 Herrmann^[22]提出的一种弹塑性节点约束关系进行模拟。该接触法向约束关系为“硬接触”,其两接触面法向方向不允许穿透,切线方向最大剪应力为 αS_u ,其中 α 为桩模与土摩擦因数。钢管桩表面相对比较光滑,且桩模挡板上部通常安装有喷水装置,在打桩过程中会不断往周围喷水,形成一个存在于桩土接触面的润滑层,从而降低侧摩阻力,提高沉桩可打性,因此,桩模和土之间的摩擦因数往往很低,本节所有计算均采取 $\alpha=0.1$ 模拟管桩模和土体的摩擦。单层软土中带桩靴的管桩桩模贯入的有限元网格见图 2。

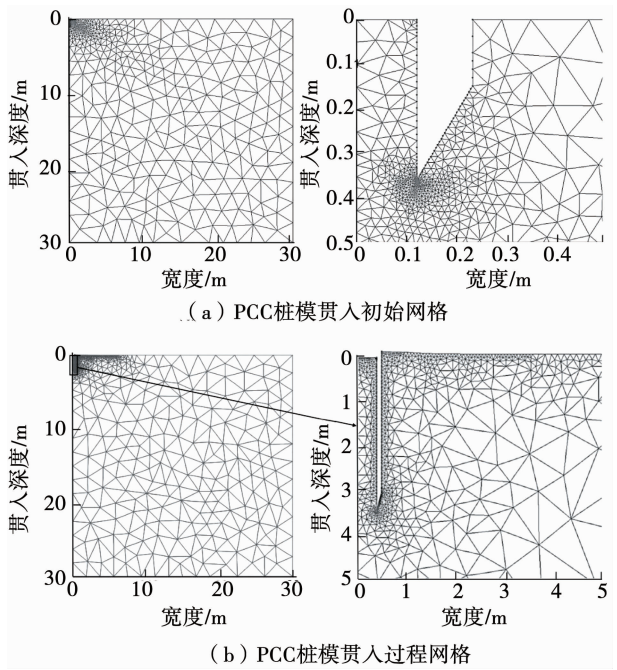


图2 PCC 桩模贯入典型网格

Fig. 2 Typical meshes of casing penetration of PCC

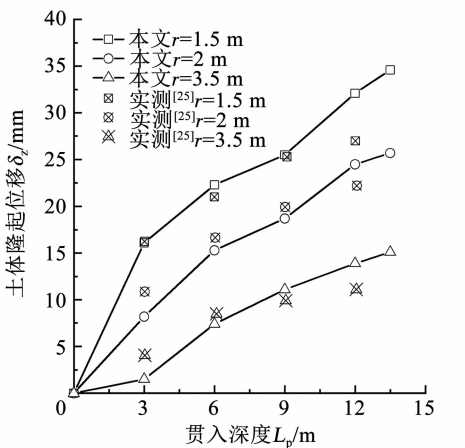
1.4 本构关系及材料属性

土体本构模型采用服从 Tresca 准则的理想线性弹塑性本构模型。Tresca 准则实质是摩尔库伦准则的一种简化,本研究采用 Tresca 模型,设置摩擦角为 0,对应于不排水不固结工况,其计算得到的结果是偏安全的,使得沉桩设计偏保守。为简化模型,不考虑土体的不均匀性,所有算例中的土体为单层软黏土。需要确定的材料参数有杨氏模量(E)、泊松比(ν), E 在 2 ~ 20 MPa 变化,侧压系数 K_0 取 1。由于考虑不排水情况,忽略沉桩贯入过程中土体固结引发的体积变形,故泊松比取 0.49,摩擦角和剪胀角都为 0° ($\phi=\psi=0$)。前期大量研究显示,对于渗透系数小的黏土地基中的沉桩贯入可忽略其体积

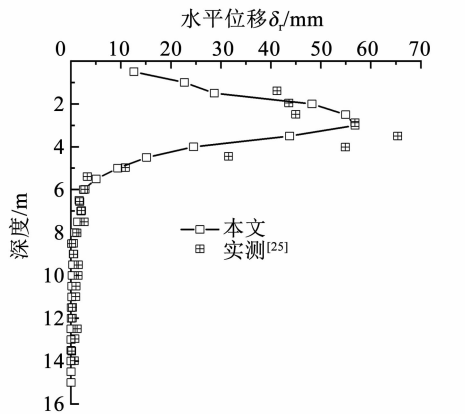
变形^[23-24]。

1.5 贯入算例验证

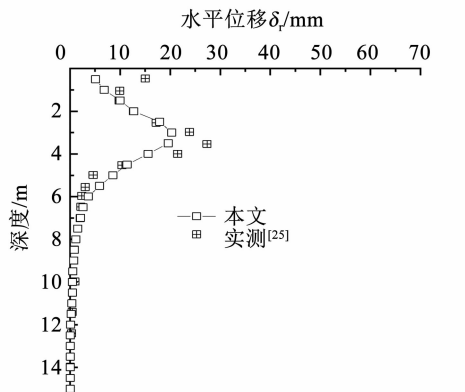
为证明本文数值模拟的准确性,将带桩靴的 PCC 桩模贯入 RITSS 大变形有限元分析模型结果与 Liu 等^[25]现场实测得到的数据进行对比验证。实测地点主要由 3 层土组成,地层参数如表 1 组 I 所示。现场所用管桩几何参数为:外径 $R=0.51$ m,归一化桩模厚 $t/R=0.28$,桩靴角度 $\beta=60^\circ$,贯入深度为 15.3 m。对比验证结果见图 3。



(a) 管桩数值模拟与现场实验土体隆起位移对比



(b) 管桩数值模拟与现场实验土体水平位移对比
($r/R=1, L_p=3$ m)



(c) 管桩数值模拟与现场实验土体水平位移对比
($r/R=2, L_p=3$ m)

图3 管桩贯入数值验证

Fig. 3 Numerical verification of casing penetration

由图 3 可以看出,现场实测得到的土体隆起位移、管桩桩周土的水平位移数据与本文所建模型计算得到的结果吻合得很好,说明本文建立的数值模型正确,结果可信。

2 桩模沉桩挤土效应参数影响分析

对管桩桩模施工过程中的贯入问题利用大变形

有限元分析展开研究。主要分析管桩的几何参数以及土体参数对贯入过程中周围土体的流动特性、挤土效应的影响。具体因素包含相对贯入深度的影响分析、桩模厚度的影响分析、桩靴角度的影响分析和土体强度的影响分析。管桩桩模贯入均质黏土大变形有限元分析算例汇总见表 1。

表 1 有限元分析算例汇总
Tab. 1 Summary of finite element analysis cases

组别	t_p/R	R/m	$\beta/(^{\circ})$	w_p/R	α	s_u/kPa	E/MPa	注释
组 I	0.276	0.51	60	0.2	0.1	$s_{u1}=18$	$E_1=5$	与管桩沉桩实验比对
						$s_{u2}=13.9$	$E_2=2.9$	
						$s_{u3}=28.6$	$E_3=10.1$	
组 II	0.24	0.5	75	0.02	0.1	10	5	研究管桩贯入深度的影响
组 III	0.24	0.5	75	0.02	0.1	10	5	研究管桩壁厚的影响
组 IV	0.24	0.5	15,30	0.02	0.1	10	5	研究管桩桩靴角度的影响
			45,60 75					
组 V	0.24	0.5	45	0.02	0.1	5, 10 15, 20	5	研究土体强度的影响
组 VI	0.24	0.5	60	0.02	0.1	5, 10 15, 20	5	常用桩模贯入土体变形预测

2.1 桩模贯入深度对挤土效应的影响

为了研究贯入深度对管桩桩模挤土效应的影响,表 1 组 II 算例被执行。贯入过程中的土体流动特性如图 4 所示,最大的土体流动位移为 40 μm。桩内未出现土塞效应时,桩芯土的流动方向是向上

的,而随着管桩的贯入,桩内形成土塞之后,桩芯土便无法继续向上运动,转为向下运动。因此,当桩芯土体出现向下运动的趋势时,可认为桩内出现了土塞效应。

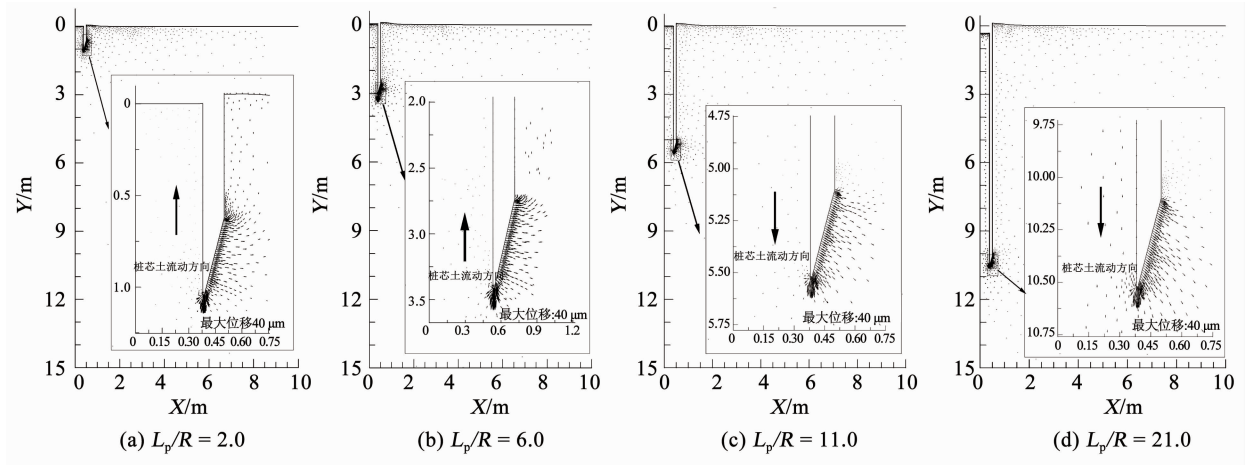


图 4 相对贯入深度对桩模周围土体流动特性的影响

Fig. 4 Effects of penetration depth on soil flow mechanism around pile

由图 4 可以看出,管桩桩模刚开始贯入时,桩靴附近的土体流动方向为向远离桩的方向和向上运

动,从而形成土体表层隆起(见图 4(a));此时虽然有少量土体流入管内,但管内并未出现土塞现象,桩

芯土一直保持向上运动。计算结果表明,随着贯入深度的增加,到相对贯入深度 $L_p/R=8$ 处(见图5),桩靴底部土体的流场方向转为与桩靴面法线方向趋于一致,桩芯土的位移方向由向上逐渐转为向下运动。管内出现土塞效应,且随着贯入深度的增加逐步加强,导致桩芯土不断向下运动,致使桩周土隆起量增加。为便于研究不同深度区域处管桩桩模挤土效应的影响,将相对贯入深度 $L_p/R=8$ 定义为浅层贯入模式与深层贯入模式的分界点,相对贯入深度 $L_p/R<8$ 的区域定义为浅层贯入模式,相对贯入深度 $L_p/R>8$ 的区域定义为深层贯入模式。

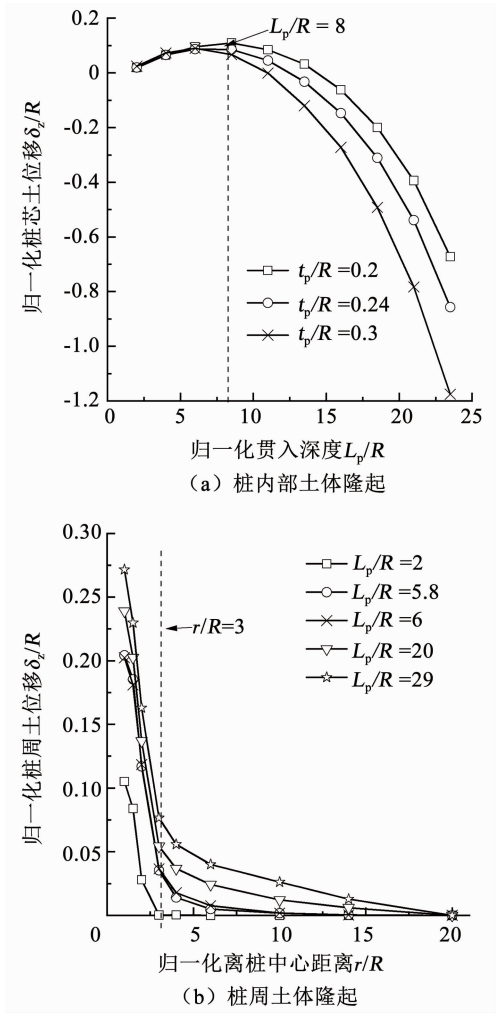


图5 贯入深度对桩内外土体隆起的影响

Fig. 5 Effects of penetration depth on soil heave inside and outside pile

图5为管桩桩模贯入时,桩周土体的隆起位移。可以看出,随着贯入深度的增加,桩周土隆起位移量在逐渐增加,隆起区域也在逐渐扩大。当桩模贯入深度处于浅层贯入区域时,由于土塞效应并未出现,挤土区域相对较小,距离桩中心 $3R$ 区域内(即图中 $r/R=3$ 左边区域)的土体表面隆起明显,远离 $3R$ 区域的土体隆起量较小。而当桩模贯入到深层贯入区

域后,土塞效应逐渐增强,排土效应也随之增强。不仅在距离桩中心 $3R$ 区域内的土体表面隆起明显,离桩中心距离大于 $3R$ 小于 $10R$ 以内区域的土体隆起量也同样明显增加。

图6为沉桩贯入时不同贯入深度处对应的水平位移,同时对比了距桩中心不同距离处的水平位移。图6(a)为 $r/R=4$ 时(距桩中心2 m处)在不同贯入深度 L_p 的水平位移。可以看出, $r/R=4$ 处的水平位移随着贯入深度的增加而增加,但是当贯入深度大于 $L_p/R=10$ 后,水平位移增幅逐渐减小。图6(b)反映了 $r/R=8$ 时(距桩中心4 m处)土体的水平位移。与图6(a)对比可知, $r/R=8$ 处的水平位移明显减小,整体约为 $r/R=4$ 处水平位移的 $1/3$ 。该结论与雷华阳等^[10]研究得到的结论类似,即土体水平位移在表层和底层较小,且距桩心距离越大,土体水平位移越小。

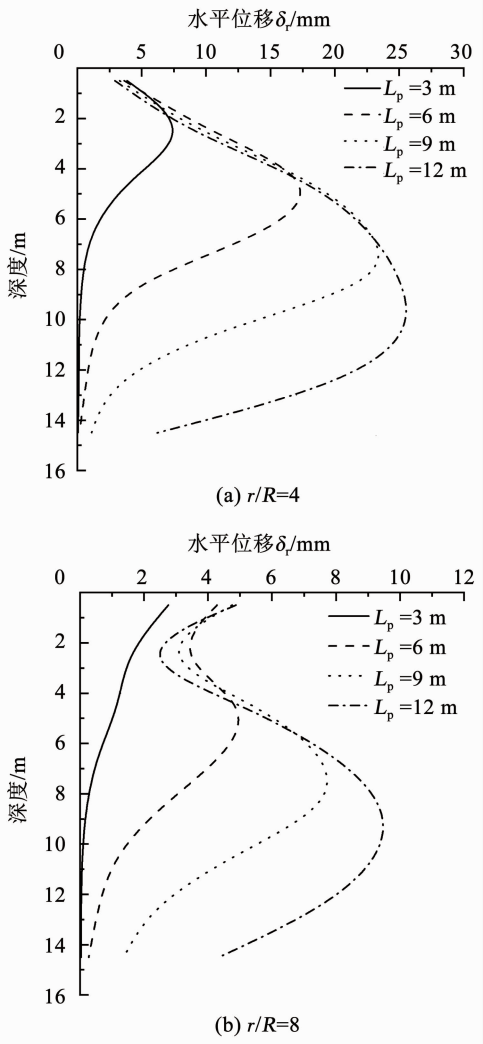


图6 贯入深度对桩周土水平位移的影响

Fig. 6 Effects of penetration depth on horizontal displacement of soil outside pile

2.2 桩模壁厚对挤土效应的影响

为了研究桩模相对壁厚对挤土效应的影响,表

1 组Ⅲ被执行。选取实际工程中常见 3 种壁厚(10、12、15 cm)的管桩展开参数影响分析,分别分析壁厚对土体流动特性以及挤土效应的影响。为了避免其他因素的干扰,其他参数保持不变,只变化管桩桩模的厚度。计算结果如图 7、8 所示。数值结果表明,桩模壁厚的改变对于土体流动模式没有明显的影响,不同深度处的土体流动特性图可参考图 4,此处不再赘述。

图 7 为不同壁厚在不同贯入深度处对桩周土隆起量的影响对比。可以看出,在不同壁厚的情况下,桩周土体的隆起量差别较小,深层贯入模式下的桩周土隆起量相比浅层贯入模式略微增加,这说明桩模壁厚对桩周土的竖向位移没有明显的影响。

图 8(a)~8(f)为相同桩径不同壁厚情况下在 $r/R=4$ (离桩中心 2 m)和 $r/R=8$ (离桩中心 4 m)处土体的水平位移对比。由图 8(a)~8(c)可知,在浅层贯入区域时,水平位移随着贯入深度的增加而增加;当贯入深度到达深层贯入区域时, $r=2$ m 处土体的水平位移呈现递减趋势。比较图 8(a)~8(c)可知,随着壁厚的增加,距离桩中心 2 m 处的水平位移呈现增长趋势。离桩中心 2 m 处的最大水平位移仅为 32 mm。离桩中心 4 m 处的最大水平位移仅为 12 mm。

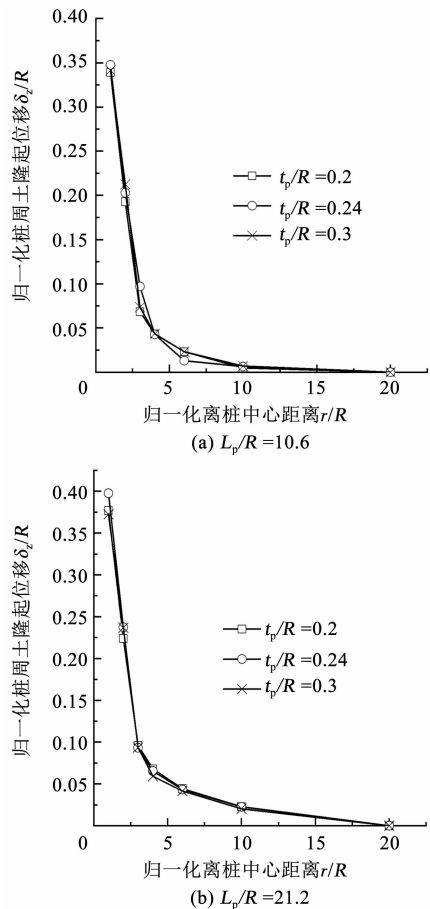


图 7 壁厚对桩周土体隆起的影响

Fig. 7 Effects of pile thickness on soil heave outside pile

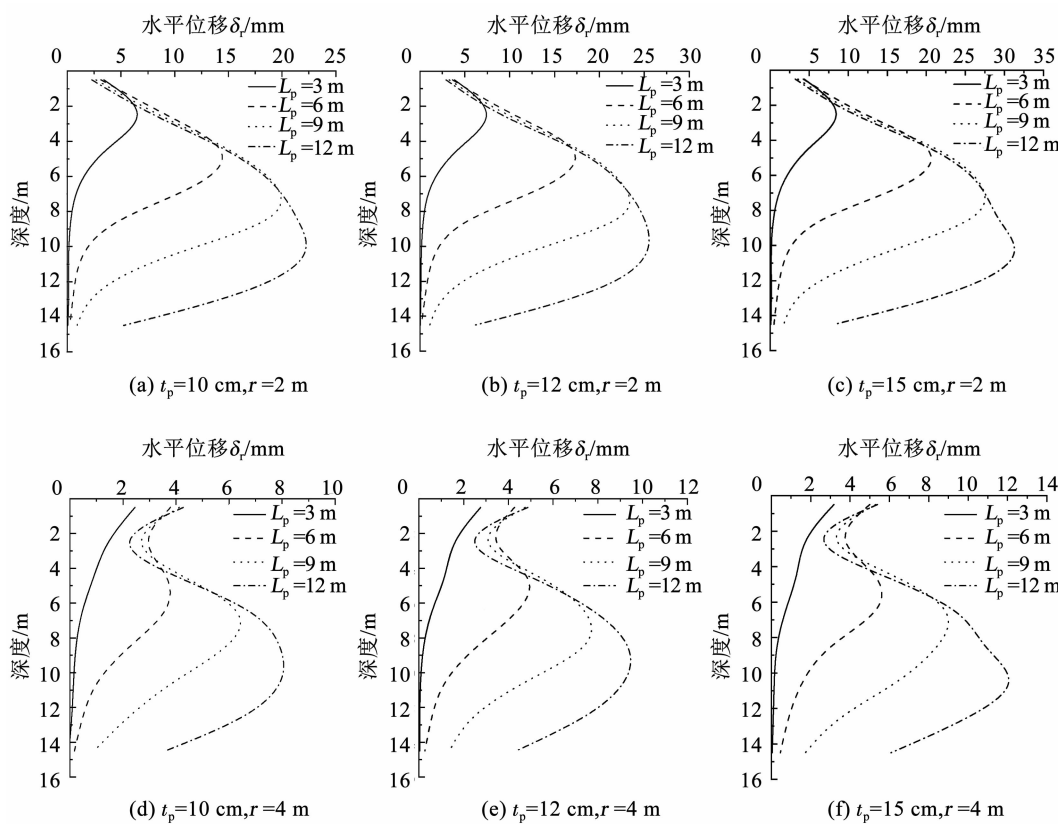


图 8 壁厚对桩周土水平位移的影响

Fig. 8 Effects of pile thickness on horizontal displacement of soil outside pile

2.3 桩模桩靴角度对挤土效应的影响

为了研究桩靴角度对桩模贯入过程中土体流动模式以及挤土效应的影响,表1组Ⅳ算例被执行。该组算例管桩桩靴角度在 $15^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 变化,为了避免其他因素的影响,保持其他参数不变。图9(a)~9(j)分别为不同桩靴角度在浅层和深层贯入区域中周围土体的流动模式。由图9(a)~9(e)可知,在浅层贯入区域,桩靴角度的变化对桩底部周围土体流动有着明显的影响。靠近桩靴斜面处,土体的流向主要表现为向远离桩中心的方向并且向上流动,角度越大,往上流动的土体越多;角度越小,向下流动的土体越多。随着贯入深度的增加,土体流动模式逐步转化为深层土体流动模式(见图9(f)~9(j)),可以看出,桩靴角度对桩靴附近土体的流动也有明显的影响。土体流动方向随着桩靴角度的改变而改变,主体方向是桩靴斜面的法线方向,同前面分析的结论一样,桩模进入深层贯入区域后,桩靴上部区域土体的竖向位移很小,土体流向与桩靴斜面法线方向一致。

图10为桩靴角度对桩周土隆起的影响。由图10(a)和10(b)可知,桩靴角度对桩周土的隆起有较大的影响。随着角度的减小,桩周土的隆起量会明显地减小,这是因为流向管内的土体比例会随着桩靴角度的减小而增加,根据体积守恒定律,流向桩周的土体量自然会减少,从而表面隆起量就会减少,这也与前面分析土体的流动特性相吻合。

图11为桩靴角度对桩周土水平位移的影响。当桩模处于浅层贯入区域时(图11(a)),由前文分

析的土体流动特性结论可知,浅层区域桩靴底部的土体一部分流向桩内使得桩芯土隆起,一部分被挤压到远离桩中心的地方,并且有明显的竖直向上的位移。在浅层区域,桩靴角度会对桩靴底部的土体流向产生影响,角度越小,流向桩内的土体越多,流向桩外的土体越少,因而角度越小,其水平位移越小。当贯入深度达到深层贯入区域时(图11(b)),桩靴底部土体的流动方向与桩靴法线方向相一致。桩靴角度越小,土体流动方向越靠近竖向方向,挤土效应的影响范围越大。挤土的水平位移与影响区域的大小成反比,故其水平位移越小(见图11(b))。由图11(b)可以明显看出,在深层和浅层区域交界处(贯入深度为 $8R$)土体的水平位移差值达到了最大,但是过了该交界线后,该差异值逐步减小,然后反向增加。水平位移规律与前面分析的土体流动特性相吻合。

2.4 土体强度对桩模挤土效应的影响

为研究不同土体强度对桩模贯入特性的影响,表1组Ⅴ的算例被执行。数值结果表明,土体强度的改变对于土体流动模式没有明显的影响,不同深度处的土体流动特性可参考图4,限于篇幅此处不再赘述。

图12为土体强度对桩周土隆起位移的影响。可以看出,土体强度对离桩中心 $3R$ 中心以内(即图中 $r/R=3$ 左边区域)的土体区域隆起位移有一定影响,土体强度越低,其隆起位移越大;而土体强度的变化对 $3R$ 之外的土体隆起位移则影响较小。

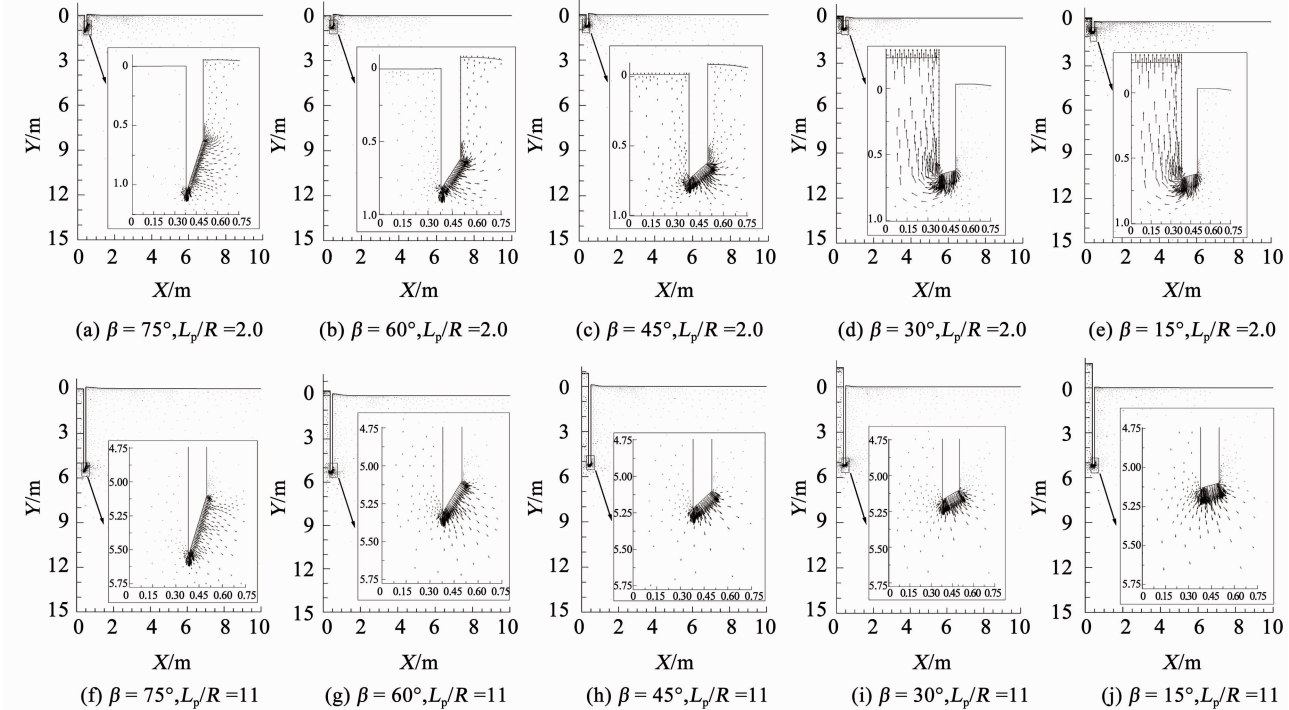


图9 桩靴角度对土体流动的影响

Fig.9 Effects of spudcan angle on soil flow mechanism

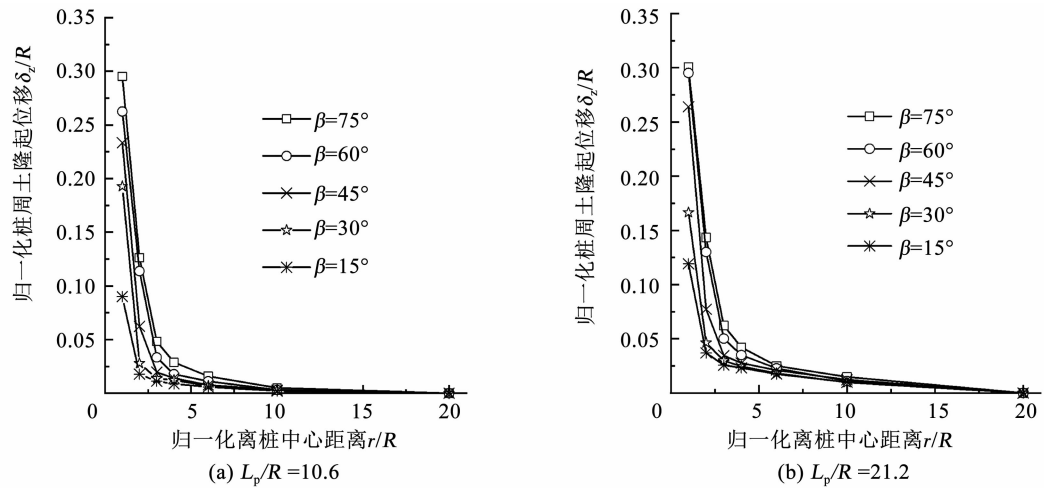


图 10 桩靴角度对桩周土体隆起的影响

Fig. 10 Effects of spudcan angle on soil heave outside pile

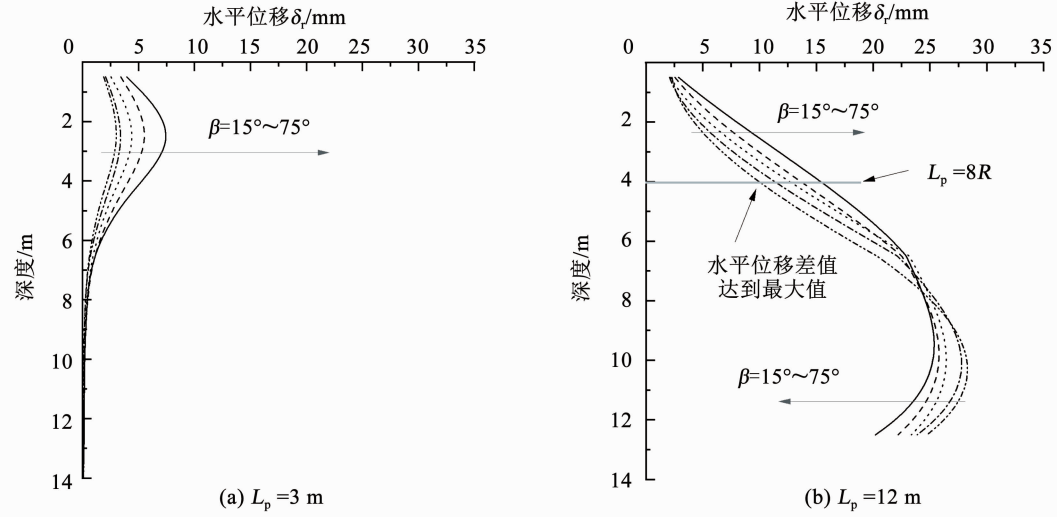


图 11 桩靴角度对桩周土水平位移的影响 ($r=2\text{ m}$)

Fig. 11 Effects of spudcan angle on horizontal displacement of soil outside pile ($r=2\text{ m}$)

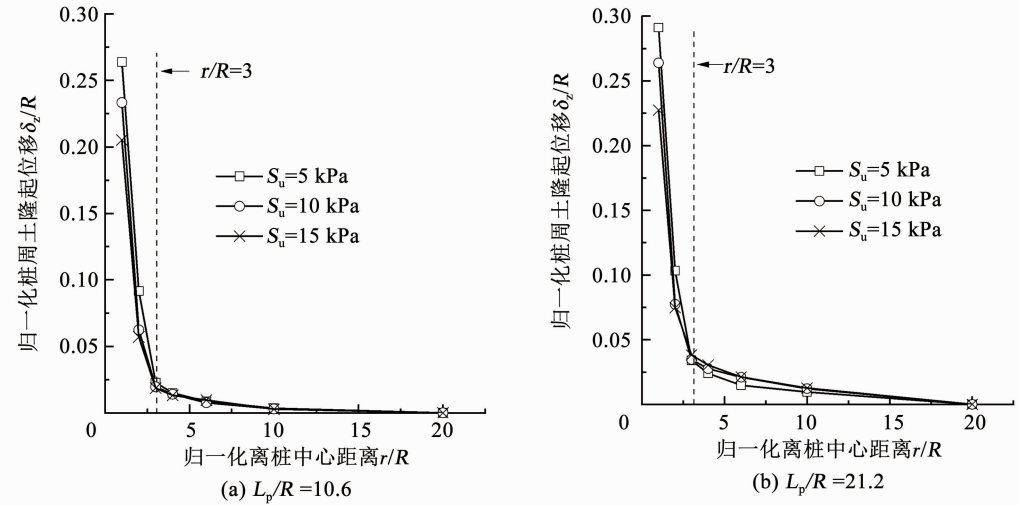


图 12 土体强度对桩周土隆起的影响

Fig. 12 Effects of soil strength on soil heave outside pile

图 13 为土体强度对管桩桩模贯入过程中土体水平位移的影响。在浅层贯入区域内,桩中心 2 m 内土体强度对水平位移的影响在浅层区域比深层区域影响要大,并且在弹性模量相同的情况下,土体不

排水强度越大,其水平位移越大,即弹性区域位移与土体的不排水强度成正比,该结论与圆孔扩张理论得到的结论一致^[26]。

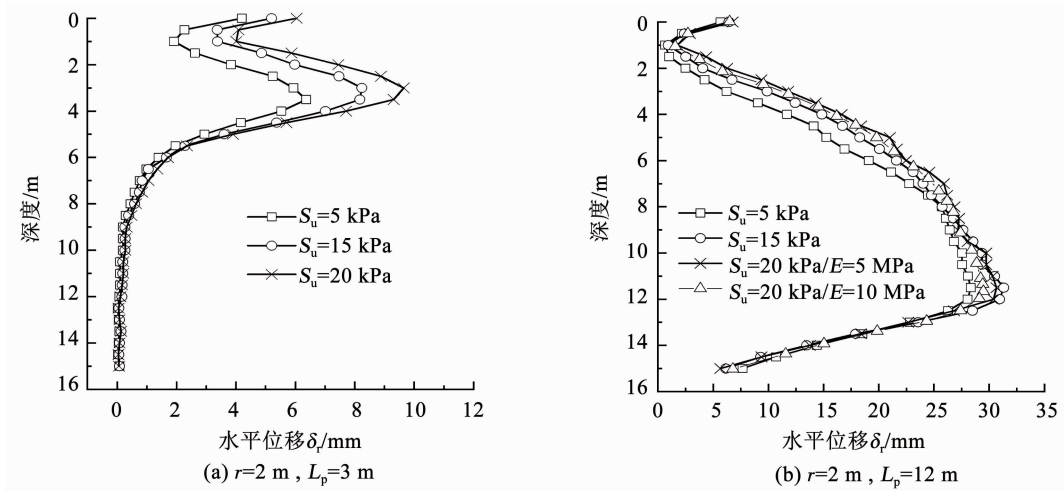


图 13 土体强度对桩周土水平位移的影响

Fig. 13 Effects of soil strength on horizontal displacement

3 PCC 管桩施工过程土体变形预测

沉桩过程中出现的挤土效应会使得桩周土体产生水平位移以及隆起位移,对邻近桩体或者建筑物造成影响,过大的土体位移甚至会造成邻近桩桩身倾斜和桩位偏移。为了解决上述问题,必须在施工之前合理设计管桩的间距以及施工次序,因此,必须考虑管桩贯入时周围土体的位移量。本节研究目前工程中常用的桩靴角($\beta=60^\circ$, $w_p=0.01\text{ m}$)时的管桩。图 14 为管桩贯入过程对土体的变形影响。为了准确预测土体水平位移以及桩周土体隆起位移,基于 LDFE 的分析结果及表 1 组 VI 计算结果,通过回归分析的方法得到式(1)和(2),相关系数 $R^2 =$

0.98。其中,式(1)研究的是土体水平位移 δ_r 与管桩贯入深度 L_p 以及管桩中心距 r 的函数关系。式(2)研究的是桩周土隆起位移 δ_z 与管桩中心距 r 的关系。贯入深度 L_p 一般取为 6 ~ 20 m,管桩中心距 r 的研究范围一般为 0.5 ~ 10 m。所以,式(1)中 L_p/R 的取值为 12 ~ 40, r/R 的取值为 1 ~ 20;式(2)中 r/L_p 的取值为 0.025 ~ 16.67。 S_u 以及 E 的变化对于土体位移影响并不大,故并未考虑在经验公式中。

$$\frac{\delta_r}{R} = -0.176\,2\left[\left(\frac{r}{R}\right)/\left(\frac{L_p}{R}\right)^{0.4}\right]^{-0.876}\tag{1}$$

$$\frac{\delta_z L_p}{R^2} = 0.138\,3 - 7.943\left(\frac{r}{L_p}\right) + 0.16\left(\frac{r}{L_p}\right)^{-1.5}\tag{2}$$

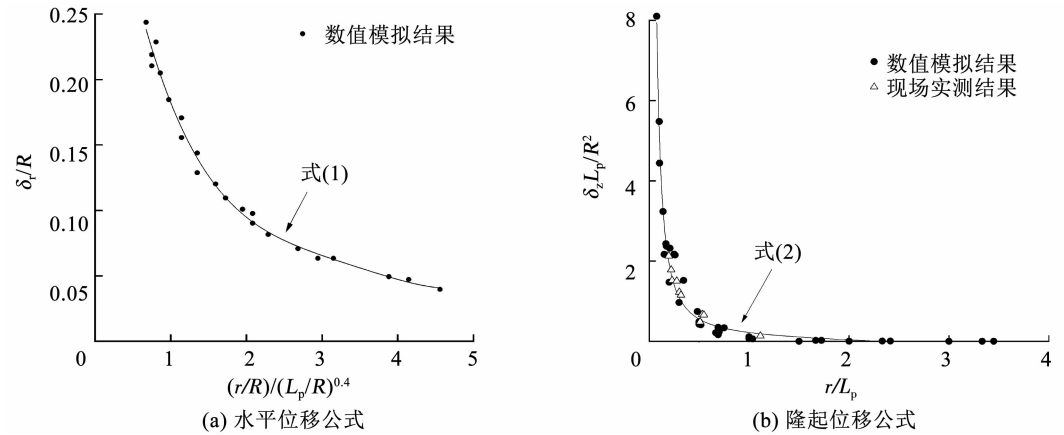


图 14 管桩贯入过程土体变形预测公式

Fig. 14 Prediction formulas for soil deformation during pipe pile penetration

4 结 论

1)以管内是否出现土塞效应为标准,将相对贯入深度 $L_p/R = 8$ 定义为浅层贯入模式与深层贯入模式的分界点。不同深度区域的土体流动特性有较大差异。在浅层贯入区域,桩靴底部的土体向远离桩中心的方向和向上流动,土体表面靠近桩中心 $3R$ 之内区域隆起明显,远离 $3R$ 区域隆起量较小。浅

层贯入区域不会出现土塞现象。桩周土保持向上的位移和远离桩中心的水平位移。在深层贯入区域,桩靴底部土体的流场方向与桩靴的法线方向一致。土体表面靠近桩中心 $3R$ 之内区域隆起也明显,但是离桩中心距离大于 $3R$ 小于 $10R$ 以内区域隆起量明显增加。深层贯入模式存在土塞效应,并且土塞程度逐步增强。桩周土一直有远离桩中心的水平位移和竖向位移。

2) 管桩桩靴角度对贯入过程中桩周土的位移有较大影响。在浅层贯入区域, 管桩桩靴角度越小, 会有更多的土体流向内管, 桩周土的土体隆起和挤土效应越小。进入深层贯入区, 规律刚好相反。

3) 土体强度对离桩中心 $3R$ 之内的桩周土隆起位移有一定影响, 土体强度对离桩中心 $3R$ 以外的桩周土隆起位移影响不大。

4) 针对实际工程常用桩模 ($\beta = 60^\circ, w_p = 0.01 \text{ m}$) 提出了设计公式 (1) 和 (2), 以此预测管桩在贯入过程中, 桩周土体的水平位移以及桩体外部土体的隆起量。土体侧向位移预测公式可以被用来设计管桩的间距以及贯入顺序, 以保证贯入质量以及控制桩周土的位移量。

参考文献

- [1] 刘汉龙. 一种新型的桩基技术——PCC 桩技术[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2003
- [2] 刘汉龙, 郝小员, 费康, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372
LIU Hanlong, HAO Xiaoyuan, FEI Kang, et al. Field pour concrete thin wall cased pile technology and its application (II): application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 372. DOI:10.16285/j. rsm. 2003. 03. 012
- [3] 费康. 现浇混凝土薄壁管桩的理论与实践[D]. 南京: 河海大学, 2004
FEI Kang. Theory and practice of thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2004
- [4] 周航, 袁井荣, 刘汉龙, 等. 矩形桩沉桩挤土效应透明土模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 307
ZHOU Hang, YUAN Jingrong, LIU Hanlong, et al. Model test of rectangular pile penetration effect in transparent soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 307. DOI:10.16285/j. rsm. 2018. 0714
- [5] 刘金波, 杨秋玲, 于东健, 等. 预制桩挤土效应对桩基础沉降变形影响案例及分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊2): 95
LIU Jinbo, YANG Qiuling, YU Dongjian, et al. Case study and analysis of the squeezing soil effect of preformed pile on the settlement and deformation of pile foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52 (S2): 95. DOI: 10.15951/j. tmgxb. 2019. s2. 014
- [6] 王幼青. 挤土桩水平向挤土位移分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(4): 472
WANG Youqing. Horizontal soil compaction displacement of driven compaction pile[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(4): 472. DOI: 10.3321/j. issn:0367-6234. 2003. 04. 023
- [7] 李镜培, 张凌翔, 李林. 饱和黏土中静压桩桩周土体强度时效性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 89
LI Jingpei, ZHANG Lingxiang, LI Lin. Time-dependent analysis on strength of soil around jacked pile in saturated clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (12): 89. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234. 2016. 12. 012
- [8] 翁效林, 孙腾, 冯莹. 桩基础承载过程对近距离地铁隧道影响机制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 138.
WENG Xiaolin, SUN Teng, FENG Ying. Influence of loading pile foundation on existing neighboring subway tunnel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (3): 138. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234. 2016. 03. 023
- [9] 李镜培, 李雨浓, 张述涛. 成层地基中静压单桩挤土效应试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 824
LI Jingpei, LI Yunong, ZHANG Shutao. Experimental analysis of compaction effect of single pile jacked in layered ground[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(6): 824. DOI: 10.3969/j. issn. 0253-374x. 2011. 06. 007
- [10] 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
LEI Huayang, LI Xiao, LU Peiyi, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile[J]. Rock and Soil, 2012, 33(4): 1006. DOI:10.3969/j. issn. 1000-7598. 2012. 04. 007
- [11] XU Xiangtao, LIU Hanlong, LEHANE B M. Pipe pile installation effects in soft clay[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2006, 159 (4): 285. DOI: 10.1680/geng. 2006. 159. 4. 285
- [12] XU Xiangtao, LEHANE B M. Centrifuge studies of single and group displacement piles in clay[J]. Physical Modeling in Geotechnics, 2006, 2: 895. DOI:10.1201/NOE0415415866. ch129
- [13] 赵春风, 杜兴华, 赵程, 等. 中掘预应力管桩挤土效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 415
ZHAO Chunfeng, DU Xinghua, ZHAO Cheng, et al. Squeezing effect of inner-digging prestressed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 415
- [14] 周火焜, 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
ZHOU Huoyao, SHI Jianyong. 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. DOI:10.3969/j. issn. 1000-7598. 2009. 11. 012
- [15] 杨生彬, 李友东. PHC 管桩挤土效应试验研究[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(3): 117
YANG Shengbin, LI Youdong. Experimental research on compacting effect of PHC piles[J]. Geotechnical Engineering Technology, 2006, 20(3): 117. DOI:10.3969/j. issn. 1007-2993. 2006. 03. 003
- [16] 刘汉龙, 张波. 现浇混凝土薄壁管桩复合地基桩土应力比影响因素分析[J]. 岩土力学, 2008(8): 2077
LIU Hanlong, ZHANG Bo. Analysis of factors influencing stress ratio between pile and soil of composite foundation with cast-in-situ concrete thin-wall piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(8): 2077. DOI:10.3969/j. issn. 1000-7598. 2008. 08. 012
- [17] HU Y, RANDOLPH M F. A practical numerical approach for large deformation problems in soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, 22 (5): 327. DOI:10.1002/(SICI)1096-9853(199805)22
- [18] GHOSH S K N. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for large deformation analysis of elastic-viscoplastic solids[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1991, 86(2): 127. DOI:10.1016/0045-7825(91)90126-Q
- [19] MA Hongliang, ZHOU M, HU Yuxia. Effects of cone tip roughness, in-situ stress anisotropy and strength inhomogeneity on CPT data interpretation in layered marine clays: numerical study[J]. Engineering Geology, 2017, 227: 12. DOI: 10.1016/j. enggeo. 2017. 06. 003
- [20] ZHOU M, HOSSAIN M S, HU Y, et al. Behaviour of ball penetrometer in uniform single- and double-layer clays[J]. Géotechnique, 2013, 63(8): 682. DOI:10.1680/geot. 12. P. 026
- [21] HU Y, RANDOLPH M F. H-adaptive FE analysis of elasto-plastic non-homogeneous soil with large deformation[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 23 (1): 61. DOI: 10.1016/S0266-352X(98)00012-3
- [22] HERRMANN L R. Finite element analysis of contact problems[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, 104 (5): 1043. DOI:10.1007/978-1-4419-1746-1_5
- [23] YIN Q, DONG S, JIANG F, et al. Spudcan penetration simulation using the coupled Eulerian-Lagrangian method with thermo-mechanical coupled analysis[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(2): 317. DOI:10.1007/s11802-019-3832-7
- [24] WANG D, BIENEN B, NAZEM M, et al. Large deformation finite element analyses in geotechnical engineering[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 104. DOI:10.1016/j. compgeo. 2014. 12. 005
- [25] LIU Hanlong, 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. DOI: 10.1139/T09-032
- [26] 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
LIU Yuhua, CHEN Zhengzhou, PENG Zhijun, 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. DOI:10.3969/j. issn. 1000-7598. 2007. 10. 031