

DOI: 10.11779/CJGE20211503

# 砂土中桩循环打入过程大变形数值模拟

黄中原<sup>1,2</sup>, 杨仲轩<sup>\*1,2</sup>, 郭宁<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学岩土工程计算中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 深入认识桩打入过程引起的桩周土体应力场变化对准确计算打入桩的竖向承载力十分重要。在有限元分析软件 ABAQUS 中采用大变形任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法以及状态相关莫尔-库仑砂土本构模型, 模拟了室内标准模型槽试验, 得到了桩循环打入过程中桩周砂土全阶段的应力变化规律, 并重点分析了径向应力, 验证了桩侧砂土应力水平的  $h/R$  效应 ( $h$  为测点与桩尖竖向距离, 向上为正;  $R$  为桩半径), 获得了应力与桩尖和桩中心线相对位置的分布规律。数值模拟结果与室内模型试验实测结果较一致, 验证了数值模拟方法的可靠性; 有效补充了试验中难以测量的近桩侧区域的应力分布数据, 可为打入桩的承载力设计理论和设计方法研究提供依据。

**关键词:** 砂土; 打入桩; 数值模拟; 循环打入; 应力场; 大变形

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)02-0411-08

**作者简介:** 黄中原(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事打入桩数值模拟方面的研究工作。E-mail: 21912014@zju.edu.cn。

## Numerical simulation of large deformation of piles in sand during cyclic penetration

HUANG Zhongyuan<sup>1,2</sup>, YANG Zhongxuan<sup>\*1,2</sup>, GUO Ning<sup>1,2</sup>

(1. Computing Center for Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou

310058, China; 2. Engineering Research Center of Urban Underground Space Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** It is extremely important to understand the stress conditions around the pile shaft during pile installation for accurately predicting its bearing capacity. The large-deformation arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) finite element method in ABAQUS with the state-dependent Mohr-Coulomb sand model is employed to simulate the highly instrumented calibration chamber tests. The stress regimes developed at different penetration stages are obtained with a focus placed on the radial stress. The  $h/R$  effects of the stress in the surrounding soil are validated, along with the stress distribution varying with the relative distance with respect to the pile tip and pile centerline. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental ones, indicating the robustness of the numerical model. The stress distribution obtained from the numerical analysis fills the blank of the stress data near pile shaft in experiments and is considered to be useful for improving the design methods for driven piles.

**Key words:** sand; driven pile; numerical simulation; cyclic penetration; stress field; large deformation

## 0 引言

近年来,随着中国加大对海洋资源的开发和利用,桩基础被大量用于大型跨海桥梁、海洋油气平台以及海上风电场等工程。循环打入是桩基础的主要成桩方式,打入桩的承载特性是工程分析和设计的关键。揭示桩打入过程中桩土相互作用机理,深入认识桩打入引起的桩周土体应力场分布,为准确预测其承载特性提供依据,并对实际工程分析和设计具有重要意义。

过去几十年中,为了探究桩打入过程中的桩土作用机理,许多学者进行了大量的现场试验和室内标准模型槽试验,为建立更可靠的桩基础设计方法提供了关键依据。Lehane 等<sup>[1]</sup>在闭口桩桩身布置传感器,开

展了系列的打入桩现场试验,发现桩身应力与距桩尖的相对位置有关(即  $h/R$  效应,其中  $h$  为测点与桩尖的竖向距离,向上为正,  $R$  为桩半径)。Chow<sup>[2]</sup>利用相同的试验桩进行了现场试验,并利用预先打入土中的试验桩桩身上的传感器,测量了砂土中应力的变化规律,发现其同样具有显著的  $h/R$  效应。张明义等<sup>[3]</sup>将预制桩静压入层状地基中,发现压桩力与锥尖阻力密切相关。Gavin 等<sup>[4]</sup>进行了开口桩的室内模型槽试验,并利用砂土中预埋的 2 个应力传感器,在室内试

基金项目: 国家自然科学基金国际合作重点项目 (52020105003); 国家杰出青年基金项目 (51825803)

收稿日期: 2021-12-20

\*通信作者 (E-mail: zxyang@zju.edu.cn)

验中验证了应力的  $h/R$  效应。王浩等<sup>[5]</sup>和周健等<sup>[6]</sup>在室内模型槽中研究了静压桩的沉桩过程,并对桩端周围土体的位移场、应力场和孔隙率变化等进行了分析研究。Yang 等<sup>[7]</sup>在室内模型槽试验中对桩打入之后桩端与桩侧土的性状进行了研究,在桩侧发现了非常明显的颗粒破碎现象。Jardine 等<sup>[8-9]</sup>同样进行了标准模型槽试验,通过在桩身与砂土中安置大量的应力传感器,获得了闭口模型桩打入过程中桩身的应力变化规律与砂土中的三向(径向、环向和竖向)应力场,再次验证了  $h/R$  效应,同时提供了非常宝贵的桩侧砂土应力场数据。

然而实际的场地试验和室内标准试验涉及到土体的大变形以及桩土接触的界面滑移和颗粒破碎等众多复杂的物理现象,难以全面且准确地测量数据以及构建精准的理论,因此采用数值模拟研究砂土中桩打入过程十分必要,合理的数值模拟可以呈现土体变形的全过程,揭示现象发生的机理,为建立更合理的桩基础设计方法提供参考依据。许多学者已成功采用有限元法、离散元法和物质点法等数值模拟技术研究了桩的打入过程。Henke 等<sup>[10]</sup>使用 CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian, 耦合欧拉-拉格朗日) 有限元方法模拟了闭口桩的打入过程,得到了桩侧应力与砂土孔隙比的变化趋势。王腾等<sup>[11]</sup>同样使用 CEL 方法模拟了钢管桩的大变形沉桩过程,分析了土塞的演变和形成机制。Zhang 等<sup>[12,13]</sup>使用 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, 任意拉格朗日-欧拉) 有限元方法与颗粒破碎砂土本构模型模拟了 Jardine 等<sup>[8-9]</sup>的室内模型槽试验,得到了砂土的颗粒破碎分布与桩侧的应力场。Yang 等<sup>[14]</sup>使用 ALE 方法与基于砂土平均正应力、塑性剪切应变和孔隙比的修正莫尔-库仑模型模拟了 Jardine 等<sup>[8-9]</sup>的室内模型槽试验,得到了更为合理的桩侧应力场。周健等<sup>[15]</sup>和詹永祥等<sup>[16]</sup>基于颗粒流理论,采用离散元方法从微观角度研究了砂土中土塞的形成和发展。Wang 等<sup>[17]</sup>和 Liu 等<sup>[18]</sup>使用二维离散元方法分别研究了桩打入过程中砂土的颗粒破碎分布与桩侧应力分布情况,模拟结果与试验结果较为一致。Lorenzo 等<sup>[19]</sup>使用物质点方法和改进的修正剑桥模型模拟了 Jardine 等<sup>[8-9]</sup>的模型槽试验,获得了合理的应力模拟结果。

上述的数值模拟研究中,桩的打入过程被简化为单调压入,与实际的循环打入过程存在差异,因此具有一定的局限性。Ciantia 等<sup>[20]</sup>使用三维离散元模拟了模型桩的循环打入过程,采用将桩缓慢提升至桩顶力为零模拟稳态阶段,通过该方法成功获得了稳态阶段的砂土应力,模拟结果与试验结果较为一致。

然而离散元法计算量巨大,在实际工程应用中存

在困难,适合小尺度问题的定性分析。有限元法等基于连续介质力学的方法依然是工程问题分析中的主流方法,其在分析计算时需要选取合适的土体本构模型。莫尔-库仑模型由于简单易用,被广泛用于砂土的有限元计算分析。如 Yang 等<sup>[14]</sup>使用修正莫尔-库仑模型模拟了桩的单调打入过程,其中模型参数随打桩过程变化,需通过迭代确定不断更新,在模拟应力变化频繁的循环打入过程时较为不便。本文为了兼顾数值计算的稳定性与合理性,在莫尔-库仑本构模型的基础上开发了状态相关莫尔-库仑模型,形式简单且可自动反映应力状态及密实度对土体力学特性的影响。

本文考虑砂土中的桩循环打入过程,参照 Jardine 等<sup>[8-9]</sup>的室内模型槽试验进行数值模拟研究。模拟采用大变形有限元 ALE 法,网格和材料相互分离且可通过频繁网格重划分在计算过程中始终保持高质量的网格,很好地解决了传统有限元计算中由于大变形而产生的网格畸变问题;同时使用状态相关莫尔-库仑模型,可较好地反映应力状态及密实度对砂土强度与变形特性的影响。模拟分析得到桩循环打入过程中全阶段的应力场分布规律,并与模型槽试验结果进行对比验证。

## 1 ICL-INPG 模型槽试验与有限元模型

ICL (英国帝国理工学院)-INPG (法国格勒诺布尔理工学院) 模型桩试验槽布置如图 1 所示,槽直径 1.2 m,高 1.5 m,模型桩尺寸与标准 CPT (静力触探试验) 保持一致,锥尖角度为  $60^\circ$ ,直径  $D$  为 36 mm ( $R = 18$  mm),采用不锈钢材质制造;模型槽中的砂土为中密实度 ( $e_0 = 0.62$ ,  $D_r = 72\%$ ) 的枫丹白露干砂 (Fontainebleau NE34 Sand)。为了测量桩打入过程中砂土内部的应力变化,落砂制样过程中及时布置大量微型土应力传感器,用于获得距桩轴线径向距离为  $2R \sim 20R$  范围内砂土的径向应力  $\sigma_r'$ 、环向应力  $\sigma_\theta'$  和竖向应力  $\sigma_z'$ 。

ICL-INPG 模型槽试验中,砂土首先在 150 kPa 的超载下进行了一段时间的预压。为了提高数值计算效率,在有限元分析平台 ABAQUS 中采用二维轴对称的 ALE 方法,对桩的打入过程进行模拟。桩与砂土都采用对称边界条件进行模拟,其中桩模拟为拉格朗日刚体,尺寸与模型桩相同,锥尖  $60^\circ$ ,直径  $D = 2R = 36$  mm,桩长  $L$  设为 1.5 m,最终的打入深度  $L_p = 1$  m ( $L_p/R \approx 56$ );砂土为可变形体,尺寸与模型槽相同,高度  $H$  为 1.5 m,宽度  $w = 0.6$  m ( $w/R \approx 33.3$ ),土体重度  $\gamma = 16$  kN/m<sup>3</sup>。砂土整体均为 ALE 的网格重划分区域,划分参数使用 ABAQUS 中 ALE 方法的默

认值。桩-土间接触选用面-面接触, 刚性桩外表面设为主面, 可变形砂土设为从面, 摩擦系数为 0.49, 与模型试验一致。

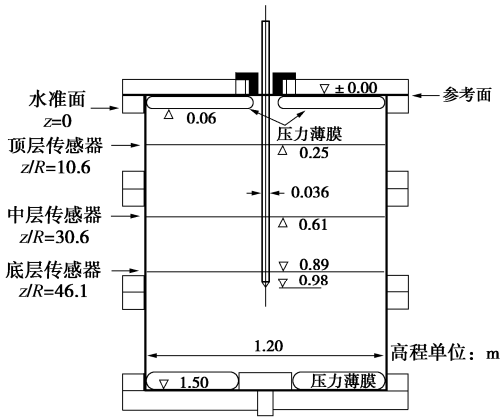


图 1 模型槽试验布置图 (改自 Jardine 等<sup>[9]</sup>)

Fig. 1 Schematic diagram of calibration chamber tests (after Jardine et al<sup>[9]</sup>)

## 2 状态相关莫尔-库仑模型与参数选取

由于砂土力学行为的状态相关性, 在桩打入过程中, 桩周砂土状态 (应力、孔隙比等) 经历了较大变化, 位于桩尖、桩侧附近砂土的摩擦角和剪胀角等参数与初始状态相比有较大差异, 采用相同的参数无法准确模拟桩打入过程中土体的力学响应。为了考虑这一特性, 本文将 Been 等<sup>[21]</sup>提出的砂土状态参数  $\psi = e - e_c$  引入莫尔-库仑模型中, 采用改进后的状态相关莫尔-库仑模型模拟桩的循环打入过程。

砂土的临界状态孔隙比计算公式采用 Li 等<sup>[22]</sup>提出的线性形式:

$$e_c = e_r - \lambda_c \left( \frac{p'}{p_a} \right)^\xi, \quad (1)$$

式中,  $e_r$ ,  $\lambda_c$ ,  $\xi$  为砂土的临界状态相关参数, 可通过常规三轴试验获得,  $p_a$  为大气压, 取 101.33 kPa。

建立状态相关莫尔-库仑模型的关键在于确认砂土的状态相关剪胀角以及状态相关内摩擦角, 为了合理反映土体的状态相关剪胀性, Li 等<sup>[23]</sup>提出了以下剪胀方程:

$$D = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} = d_0 \left[ \exp(m\psi) - \frac{\eta}{M} \right]. \quad (2)$$

式中:  $d_0$  和  $m$  为土体的模型参数;  $\eta$  和  $M$  分别为应力比和临界状态应力比。在莫尔-库仑模型中, 土体只有在应力比达到临界状态应力比并进入屈服状态后才会发生塑性剪胀。因此可将  $\eta = M$  代入式 (2), 将其退化为

$$D = d_0 [\exp(m\psi) - 1] \approx d_0 m\psi = n_d \psi. \quad (3)$$

因此, 考虑状态相关的剪胀角  $\varphi_d$  为

$$\varphi_d = \arctan(-D) = \arctan(-n_d \psi). \quad (4)$$

同时密砂在排水状态下会出现显著的应变软化现象。在剪切过程中, 密砂的应力-应变曲线会在达到峰值后下降并逐渐稳定, 砂土的内摩擦角可能会超过临界状态摩擦角  $\varphi_c$ , 而常规的莫尔-库仑模型则无法模拟上述现象。因此采用类似的方法考虑状态相关内摩擦角  $\varphi_f$ :

$$M_b = M \exp(-n_b \psi), \quad (5)$$

$$\varphi_f = \arctan(M^b) = \arctan[\tan(\varphi_c) \exp(-n_b \psi)], \quad (6)$$

式中,  $M_b$  为土的峰值应力比 (Li 等<sup>[23]</sup>), 而  $n_b$  和  $n_d$  同样是土的模型参数, 它们分别反映了内摩擦角以及剪胀角与状态参数之间的关系。采用式 (4), (6) 对剪胀角和内摩擦角进行修正, 可以采用同一套参数模拟砂土的硬化/软化, 剪胀/剪缩现象。

根据 Aghakouchak<sup>[24]</sup>的室内试验标定结果, 以及 Dano 等<sup>[25]</sup>、Gaudin 等<sup>[26]</sup>、Andria-Ntoanina 等<sup>[27]</sup>和 Altuhafi 等<sup>[28]</sup>的枫丹白露干砂三轴排水试验结果拟合, 可以确认状态相关莫尔-库仑本构模型参数如表 1 所示, 其中  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比。

表 1 状态相关莫尔-库仑模型参数

Table 1 Sand parameters adopted for state-dependent Mohr-Coulomb model		
弹性参数	临界状态参数	状态相关参数
$E = 60 \text{ MPa}$	$\varphi_c = 30^\circ$	$n_d = 1.70$
$\nu = 0.3$	$e_r = 0.9$	$n_b = 2.30$
	$\lambda_c = 0.019$	
	$\xi = 0.23$	

## 3 结果与分析

### 3.1 锥尖阻力 $q_c$

在打入桩问题研究中, 锥尖阻力  $q_c$  与桩的承载力密切相关, 是重要的研究指标, 通过对比模拟得到的  $q_c$  值与试验值, 可验证模型的可靠性与所用本构模型及其参数选取的合理性。图 2 为本文模拟所得到的锥尖阻力与试验数据的对比。

可以发现数值模拟结果与试验数据吻合较好, 在归一化打入深度  $L_p/R > 20$  时达到稳定值 19 MPa, 略低于模型槽试验值 21 MPa。从图 2 中还可以发现数值模拟得到的  $q_c$  数据波动整体控制在  $\pm 0.5 \text{ MPa}$  范围内, 表明了该方法在模拟桩打入过程大变形问题上有较好的数值稳定性。为了减少模型结果与试验结果的差异, 本文的应力分析均采用锥尖阻力  $q_c$  进行归一化处理。

### 3.2 桩周砂土状态

在桩打入过程中, 随着砂土状态 (应力、孔隙比)

的改变,砂土的力学行为也会相应变化。图3~5分别给出了桩完成打入后砂土的平均有效正应力、体积应变和状态参数等值线图,其中砂土在桩打入前由于自重与超载导致其初始状态参数约为-0.16。

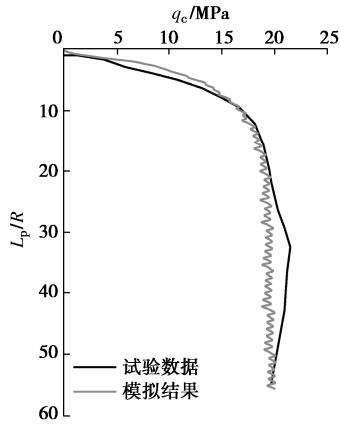


图2 锥尖阻力  $q_c$  结果对比

Fig. 2 Comparison of  $q_c$

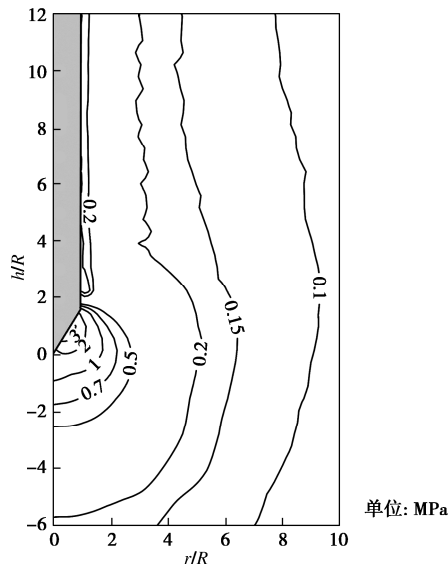


图3 桩打入完成后砂土平均有效正应力等值线图

Fig. 3 Contours of mean normal stress of sand after pile penetration

由图3可知,桩在打入过程中,桩端附近砂土的平均有效正应力非常大 ( $>3$  MPa),但其桩端砂土的体积应变很小,甚至在一定区域内接近零,呈现剪缩趋势。如图4所示,由于桩端附近砂土处于高应力状态,导致该区域内的砂土达到了临界状态 ( $\psi = 0$ )。当随着桩尖继续刺入,桩端附近砂土会发生向下流动,并停留在桩侧,导致桩侧砂土出现非常显著的应力松弛现象 ( $\approx 0.2$  MPa)。由于受到持续剪切作用,桩侧砂土发生了比较大的体积膨胀而仍然处于临界状态。同时由于体积应变在桩侧的变化梯度较大,从而导致  $2 < r/R < 3$  范围内的桩侧砂土在平均有效正应力几乎不变的情况下,状态参数也发生了显著变化。而在  $r/R > 8$  的区域,砂土的平均有效正应力与体积应变都

非常低,砂土的状态参数接近于初始值,表明该区域的砂土力学行为几乎不受桩打入影响。

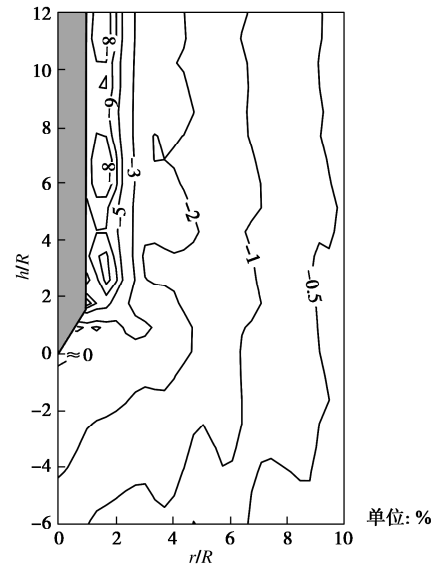


图4 桩打入完成后砂土体积应变等值线图

Fig. 4 Contours of volumetric strain of sand after pile penetration

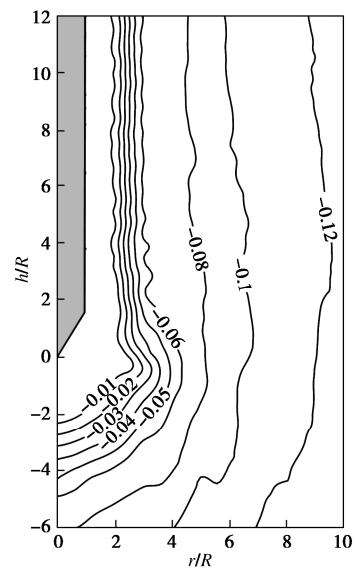


图5 桩打入完成后砂土状态参数等值线图

Fig. 5 Contours of state parameter of sand after pile penetration

本文模拟得到的平均有效正应力与体积应变的分布规律与 Yang 等<sup>[14]</sup>和 Arshad<sup>[29]</sup>等的结果基本一致。但本文的模拟中桩侧砂土始终处于剪胀状态,无法模拟 Yang 等<sup>[7]</sup>在试验中发现的桩侧砂土颗粒破碎形成剪切带导致砂土变密的现象,采用考虑砂土颗粒破碎本构模型可以得到更符合试验的模拟结果。

### 3.3 径向应力 $\sigma'_r$

Jardine 等<sup>[8-9]</sup>的统计结果显示砂土径向应力的测量结果要明显优于另外两个方向,因此本文重点分析砂土中的径向应力分布。与以往研究不同,本文模拟考虑了桩的循环打入过程,在每个打入段后将桩顶荷载撤为 0,使桩达到稳态后才继续下一步打入操作,



因此本文分别考虑打入过程中的径向应力  $\sigma'_{rm}$  及稳态阶段的径向应力  $\sigma'_{rs}$ 。图 6 给出了桩打入过程中距离桩中心轴径向距离为  $r/R=2$  位置处, 3 个不同的深度(顶层:  $z/R=10.6$ , 中层:  $z/R=30.6$  和底层:  $z/R=46.1$ ) 的归一化  $\sigma'_{rm}$  结果对比。3 个深度处的结果均显示出与打入深度  $L_p$  明显的高度依赖性, 可发现  $\sigma'_{rm}/q_c$  随  $L_p$  变化而剧烈变化。取某一固定深度分析, 在桩刚打入时, 桩尖离该深度的距离还较远, 土体的应力水平较低; 随着桩尖逐渐靠近,  $\sigma'_{rm}/q_c$  急剧增大, 并在桩尖抵达该深度时达到峰值; 随着桩的继续打入, 土体的应力水平迅速下降, 最终稳定在某一略高于土体初始应力的值。从峰值结果看, 有限元的模拟结果略低于试验结果, 但总体上两者曲线的变化趋势基本一致。

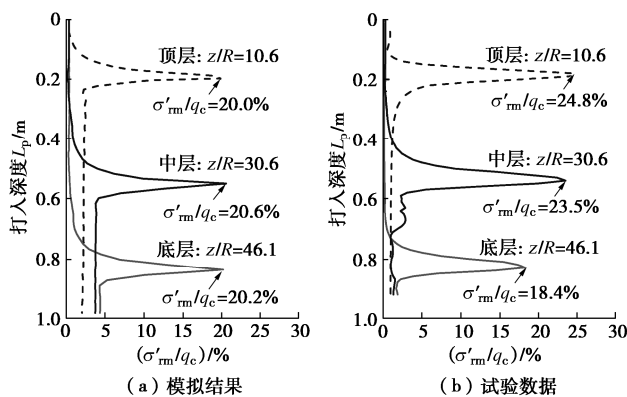


图 6 桩打入过程中距桩轴  $r/R=2$  处归一化径向应力  $\sigma'_{rm}/q_c$  结果对比

Fig. 6 Comparison of  $\sigma'_{rm}/q_c$  at  $r/R=2$  at driving stage

图 7 展示了 3 个位置处砂土归一化径向稳态应力  $\sigma'_{rs}/q_c$  的结果。可以发现稳态应力的变化趋势与打入应力的变化趋势基本相同,  $\sigma'_{rs}/q_c$  随桩尖的靠近而逐渐增大到最大值, 在桩尖经过之后衰减到某一较小的平台值。曲线的变化趋势也基本相符, 但有限元的模拟结果略高于试验结果。

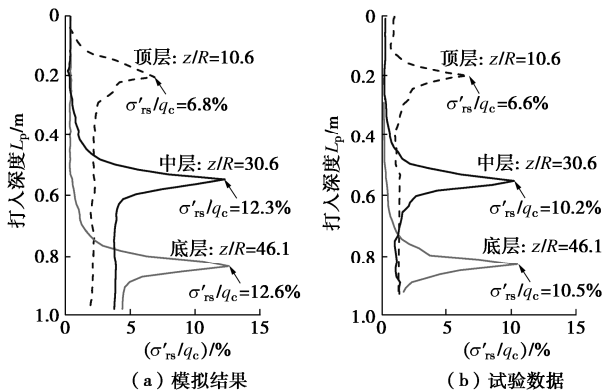
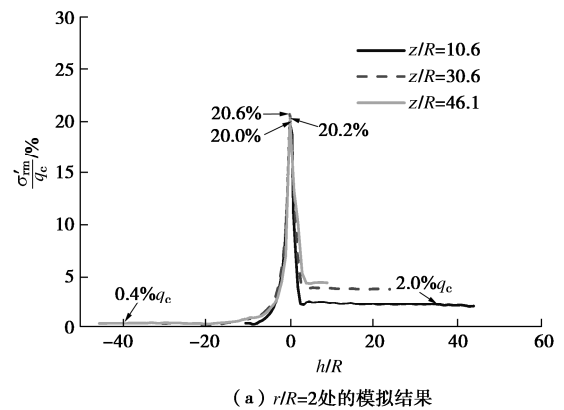


图 7 桩打入过程中距桩轴  $r/R=2$  处归一化径向稳态应力  $\sigma'_{rs}/q_c$  结果对比

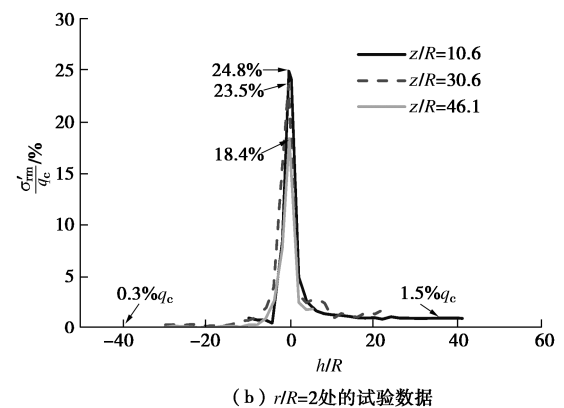
Fig. 7 Comparison of  $\sigma'_{rs}/q_c$  at  $r/R=2$  at pause stage

图 8 绘制了砂土的径向应力随着  $h/R$  变化的趋势曲线。其中图 8 (a), (c) 分别给出离桩轴径向距离

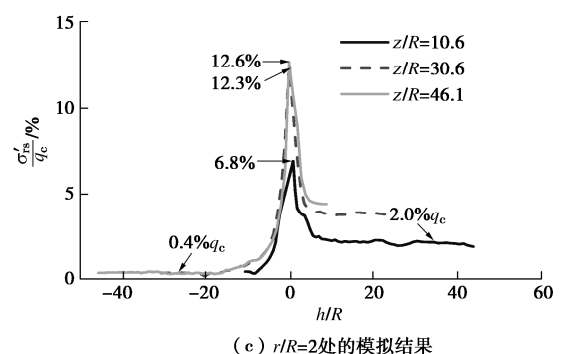
$r/R=2$  处  $\sigma'_{rm}/q_c$  与稳态应力  $\sigma'_{rs}/q_c$  的模拟结果随  $h/R$  变化的曲线, 图 8 (b), (d) 则分别展示了对应的试验结果。图 8 (e), (f) 分别给出了离桩轴径向距离  $r/R=3$  位置处, 砂土归一化稳态应力  $\sigma'_{rs}/q_c$  的模拟与试验结果。从上述组图中可以发现, 应力的变化趋势均较为相似: 当桩打入深度在测点之上时 ( $h/R$  为负值), 砂土的打入应力与稳态应力均维持在比较低的初始水平 ( $0.3\%q_c \sim 0.4\%q_c$ ); 随着桩的继续打入, 砂土的应力水平不断提高, 并在  $h/R=0$  (即桩尖抵达测点深度) 附近达到峰值; 当桩尖超过测点深度时 ( $h/R$  变为正数), 此时应力又会迅速减小, 直到稳定到某一平台值 ( $1.0\%q_c \sim 2.0\%q_c$ )。结果对比可以发现径向打入应力与稳态应力存在显著差别, 且稳态应力模拟结果的数值稳定性比打入应力差, 与 Jardine 等<sup>[9]</sup>统计的试验中稳态应力的变异系数显著大于打入应力的趋势一致。图 8 结果同时证明了径向稳态应力  $\sigma'_{rs}/q_c$  在空间上也是  $h/R$  以及  $r/R$  的函数。



(a)  $r/R=2$  处的模拟结果



(b)  $r/R=2$  处的试验数据



(c)  $r/R=2$  处的模拟结果

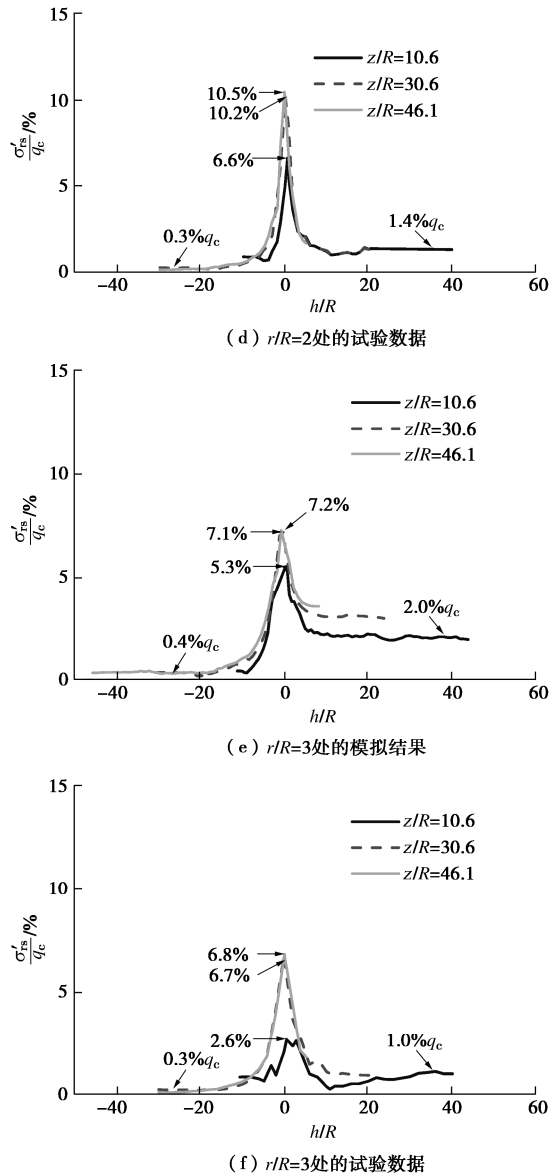


图8 桩打入过程中距桩轴  $r/R = 2$  和 3 处归一化径向应力随  $h/R$  变化结果对比

Fig. 8 Comparison of normalized radial stresses at  $h/R = 2$  or 3

图9为桩打入完成之后,桩尖上方区域( $5 < h/R < 41$ )砂土的径向稳态应力随  $r/R$  变化的模拟与试验结果。结果显示,径向稳态应力的模拟结果虽然偏大,但其整体变化趋势与试验结果基本一致,应力的最大值并不是出现在桩侧( $r/R = 1$ ),而是在土体内部。以图9(a)模拟结果为例,径向稳态应力在桩侧( $r/R = 1$ )位置处还相对较小,仅为  $1.8\%q_c \sim 2.8\%q_c$ ;而在  $r/R = 3 \sim 4$  范围内,径向稳态应力达到峰值( $2.8\%q_c \sim 4.4\%q_c$ ),约为桩侧值的  $1.5 \sim 2.0$  倍;之后随着  $r/R$  的继续增大,径向稳态应力逐渐减小,直到  $r/R > 30$  后,应力水平稳定在  $0.8\%q_c$  左右。同时从模拟与试验结果对比中可以发现,距桩轴相同水平距离( $r/R$ )的砂土,其径向稳态应力会随  $h/R$  的增大而减小,验证了径向

稳态应力的  $h/R$  效应。

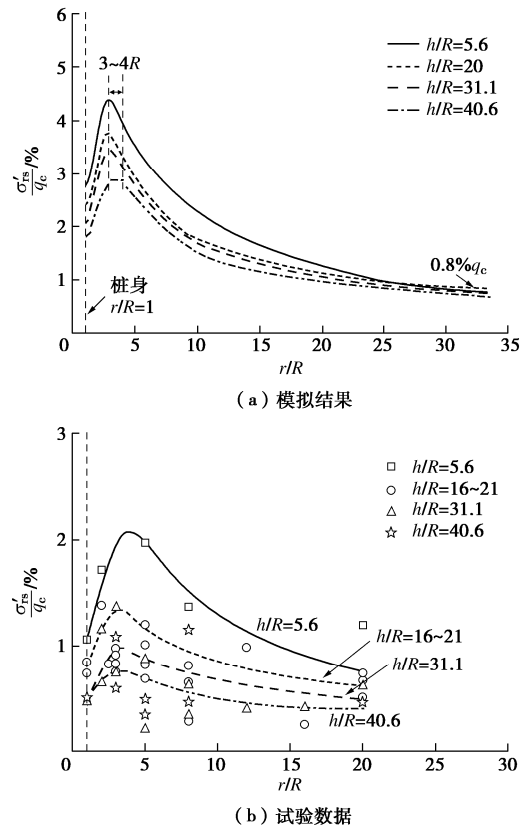


图9 桩打入完成后桩尖上方区域归一化径向稳态应力随  $r/R$  变化结果对比

Fig. 9 Comparison of normalized radial stresses at pause stage with  $r/R$  after pile penetration

## 4 结 论

本文使用大变形有限元 ALE 方法,结合状态相关莫尔-库仑模型,模拟了砂土中桩的循环打入过程,与 ICL-INPG 室内模型桩试验结果对比,获得了一致的桩打入全过程应力演化与分布结果。

(1) 所采用大变形有限元 ALE 方法,可以较好地模拟桩在打入过程中的土体大变形,并获得相应的桩身和桩侧砂土中应力随桩打入过程的变化规律。

(2) 桩打入过程中打入应力与稳态应力的数值模拟结果变化趋势均与模型槽试验结果较为一致,证明了 ALE 方法结合状态相关莫尔-库仑模型模拟桩打入过程的可靠性和准确性。

(3) 数值模拟结果验证了当桩处于不同的循环阶段(打入阶段与稳态阶段)时,砂土的应力水平会有较大的差异,且稳态应力与打入应力一样,在空间上均与桩尖的相对位置( $h/R, r/R$ )密切相关。

(4) 由于高应力、大位移等原因,试验中距桩较近的区域( $r/R < 2$ )应力无法准确测量,本文数值模拟可以较好地补充靠近桩身区域的应力结果,建立完

整的打入桩桩周应力场分布,为打入桩的承载力计算分析和设计提供依据。

### 参考文献:

- [1] LEHANE B M, JARDINE R J, BOND A J, et al. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **119**(1): 19-35.
- [2] CHOW F C M. Investigations into Displacement Pile Behaviour for Offshore Foundations[D]. London, UK: University of London, 1997.
- [3] 张明义, 邓安福. 预制桩静力贯入层状地基的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(4): 490-492. (ZHANG Mingyi, DENG Anfu. Experimental study on static penetration of precast pile into layered foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(4): 490-492. (in Chinese))
- [4] GAVIN K G, LEHANE B M. The shaft capacity of pipe piles in sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, **40**(1): 36-45.
- [5] 王浩, 周健, 邓志辉. 砂土中桩端阻力随位移发挥的内在机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(5): 587-593. (WANG Hao, ZHOU Jian, DENG Zhihui. Mobilization of toe resistance of piles with local displacement in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(5): 587-593. (in Chinese))
- [6] 周健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(4): 501-507. (ZHOU Jian, DENG Yibing, YE Jianzhong, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(4): 501-507. (in Chinese))
- [7] YANG Z X, JARDINE R J, ZHU B T, et al. Sand grain crushing and interface shearing during displacement pile installation in sand[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(6): 469-482.
- [8] JARDINE R J, ZHU B T, FORAY P, et al. Measurement of stresses around closed-ended displacement piles in sand[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(1): 1-17.
- [9] JARDINE R J, ZHU B T, FORAY P, et al. Interpretation of stress measurements made around closed-ended displacement piles in sand[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(8): 613-627.
- [10] HENKE S, QIU G, GRABE J. A Coupled Eulerian-Lagrangian Approach to Solve Geotechnical Problems Involving Large Deformations[M]// *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2010: 233-238.
- [11] 王腾, 薛浩, 吴瑞. 黏土中静压管桩土塞机制研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(12): 4335-4341, 4350. (WANG Teng, XUE Hao, WU Rui. Mechanism of soil plug for jacked pipe pile in clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(12): 4335-4341, 4350. (in Chinese))
- [12] ZHANG C, NGUYEN G D, EINAV I. The end-bearing capacity of piles penetrating into crushable soils[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(5): 341-354.
- [13] ZHANG C, YANG Z X, NGUYEN G D, et al. Theoretical breakage mechanics and experimental assessment of stresses surrounding piles penetrating into dense silica sand[J]. *Géotechnique Letters*, 2014, **4**(1): 11-16.
- [14] YANG Z X, GAO Y Y, JARDINE R J, et al. Large deformation finite-element simulation of displacement-pile installation experiments in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, **146**(6): 04020044.
- [15] 周健, 陈小亮, 周凯敏, 等. 静压开口管桩沉桩过程模型试验及数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 2): 3839-3846. (ZHOU Jian, CHEN Xiaoliang, ZHOU Kaimin, et al. Model test and numerical simulation of driving process of open-ended jacked pipe piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S2): 3839-3846. (in Chinese))
- [16] 詹永祥, 姚海林, 董启朋, 等. 砂土中开口管桩沉桩过程的颗粒流模拟研究[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(1): 283-289. (ZHAN Yongxiang, YAO Hailin, DONG Qipeng, et al. Study of process of open-ended pipe pile driven into sand soil by particle flow simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(1): 283-289. (in Chinese))
- [17] WANG J F, ZHAO B D. Discrete-continuum analysis of monotonic pile penetration in crushable sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(10): 1095-1110.
- [18] LIU S, WANG J F. Depth-independent cone penetration mechanism by a discrete element method (DEM)-based stress normalization approach[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(5): 871-883.
- [19] LORENZO R, DA CUNHA R P, CORDÃO NETO M P, et al. Numerical simulation of installation of jacked piles in sand using material point method[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, **55**(1): 131-146.
- [20] CIANTIA M, O'SULLIVAN C, JARDINE R J. Pile penetration in crushable soils: Insights from micromechanical modelling[C]// *Proceedings of 17th European Conf on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE-2019)*. Alexandria, 2019.
- [21] BEEN K, JEFFERIES M G. A state parameter for sands[J]. *Géotechnique*, 1985, **35**(2): 99-112.

- [22] LI X S, WANG Y. Linear representation of steady-state line for sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(12): 1215-1217.
- [23] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 449-460.
- [24] AGHAKOUCHAK A. Advanced Laboratory Studies to Explore the Axial Cyclic Behaviour of Driven Piles[D]. London: Imperial College London, 2015.
- [25] DANO C, HICHER P Y, TAILLIEZ S. Engineering properties of grouted sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(3): 328-338.
- [26] GAUDIN C, SCHNAID F, GARNIER J. Sand characterization by combined centrifuge and laboratory tests[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2005, **5**(1): 42-56.
- [27] ANDRIA-NTONINA J, CANOU J, DUPLA J C. Caractérisation Mécanique Du Sable De Fontainebleau NE34 À L'Appareil Triaxial Sous Cisaillement Monotone[R]. Paris: Laboratoire Navier-Géotechnique (CERMES, ENPC/LCPC), 2010. (ANDRIA-NTONINA J, CANOU J, DUPLA J C. Mechanical Characterization of the Fontainebleau NE34 Sand in Monotonic Triaxial Shear Tests[R]. Paris: Navier Laboratoire-Geotechnical Engineering, 2010. (in French))
- [28] ALTUHAFFI F N, JARDINE R J, GEORGIANNOU V N, et al. Effects of particle breakage and stress reversal on the behaviour of sand around displacement piles[J]. Géotechnique, 2018, **68**(6): 546-555.
- [29] ARSHAD M I. Experimental Study of the Displacements Caused by Cone Penetration in Sand[D]. West Lafayette: Purdue University, 2014.

## 第二届冰冻圈科学青年论坛（四号通知）

2023 年 4 月 1—2 日·北京西郊宾馆

**会议简介：**冰冻圈是地球五大圈层之一，是指地球表层具有一定厚度的负温圈层，其中冰川、冻土、积雪等陆地冰冻圈覆盖了全球陆地面积的 52~55%，储存了全球约 70% 以上的淡水资源，对区域乃至全球气候、水文水资源、植被、生态环境及工程服役等具有重要影响。冰冻圈对全球变暖极度敏感，是气候变化的“指示器”和“放大器”。当今世界全球性生态环境保护问题突出、区域水资源开发与利用面临挑战、北极航道安全保障亟需提高，在此背景下冰冻圈科学研究也被赋予了新的历史使命和责任。

我国“十四五”规划中明确提出实施“川藏铁路”、“西部陆海新通道”等重大工程建设，以及“加强全球气候变暖对我国承受力脆弱地区影响的观测”、“极地立体观测监测平台研制”等，这些战略规划为我国的冰冻圈科学研究带来了诸多新的机遇和挑战。

为进一步加强冰冻圈科学及相关学科之间的交叉融合，促进冰冻圈科学研究领域青年科研工作者的合作交流，为冰冻圈科学的全面发展奉献智慧，经论坛组织委员会决定，拟于 2023 年 4 月 1—2 日在北京市召开“第二届冰冻圈科学青年论坛”。该论坛由中国冰冻圈科学学会青年工作委员会主办，北京交通大学、中国科学院青藏高原研究所和中国气象科学研究院承

办，中国科学院西北生态环境资源研究院、青海省公路学会、中国科学院地理科学与资源研究所、东北林业大学、青海大学、清华大学、北京科技大学等单位协办。

**会议议题：**①冰冻圈气候环境记录；②冰冻圈过程、机理和模拟；③冰冻圈与其他圈层相互作用；④冰冻圈与可持续发展；⑤冰冻圈工程与技术；⑥冰冻圈灾害与影响。

现热忱邀请从事冰冻圈科学研究和工程实践的地球科学、寒区工程建设、寒区地理和环境、寒区资源开发等领域的青年学者参会交流。本次大会的主题是：“面向国家重大战略需求的冰冻圈科学研究和工程实践”，大会设置以下议题（每个主题设召集人 3~7 名，联系人 1 名）：

本次论坛热忱欢迎中外学者专家朋友参会，境内学者建议线下参会，境外学者或者受疫情影响无法参会的可线上参会。

另外，本次会议还将组织博士后专场报告，并为优秀的博士后报告颁发获奖证书，以资鼓励。欢迎青年博士后报名参加专场活动。

**主办单位：**冰冻圈科学学会（筹）青年工作委员会

**承办单位：**北京交通大学、中国科学院青藏高原研究所、中国气象科学研究院

（会议组委会）