

基于耦合欧拉-拉格朗日方法的砂土中静压桩挤土效应数值模拟

韩超¹,王彤²,陈德文¹,孙恩赐³,李平¹,吴则祥⁴,周冲⁵,庄培芝^{3*}

(1.山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250013; 2.济南大学土木建筑学院,山东 济南 250022; 3.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 4.温州大学建筑工程学院,浙江 温州 325035; 5.山东建筑大学交通工程学院,山东 济南 250101)

摘要:为探讨砂土地基中静压桩沉桩过程的挤土效应,引入 Simsand 砂土临界状态本构模型,采用耦合欧拉-拉格朗日(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)方法,模拟分析了砂土中静压沉桩过程的挤土效应。基于相关试验数据校定本构模型参数,利用模拟离心机沉桩试验,验证数值模型的准确性。结果表明,挤土效应的影响区域直径随着桩尖角度和砂土相对密度的增大而增大,压入过程中,平底桩的挤土效应倾向于竖向向前,增大了土体阻力。桩基压入引起近地表土层发生隆起,密砂地层的隆起较松散砂地层显著。随着深度增加,桩周土体的竖向位移由隆起变为向下移动,且趋于稳定,密砂中发生的侧向位移大于松散砂地层。挤土效应的影响区域直径随桩端竖向向下方向迅速衰减,随桩端竖向向上方向发生小幅度减小,在密砂中沿径向方向呈现先增大后减小的趋势。

关键词:静压桩;数值模拟;耦合欧拉-拉格朗日方法;挤土效应;砂土

中图分类号:TU473

文献标志码:A

引用格式:韩超,王彤,陈德文,等.基于耦合欧拉-拉格朗日方法的砂土中静压桩挤土效应数值模拟[J].山东大学学报(工学版),2024,54(2):143-152.

HAN Chao, WANG Tong, CHEN Dewen, et al. Numerical simulation of compaction effect during pile jacking in sand based on the coupled Eulerian-Lagrangian method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2):143-152.

Numerical simulation of compaction effect during pile jacking in sand based on the coupled Eulerian-Lagrangian method

HAN Chao¹, WANG Tong², CHEN Dewen¹, SUN Enci³, LI Ping¹, WU Zexiang⁴, ZHOU Chong⁵, ZHUANG Peizhi^{3*}

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325000, Zhejiang, China; 5. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to explore the soil squeezing effect of the hydrostatic pile sinking process in sandy soil foundation, the Simsand critical state constitutive model of sand was introduced, and the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method was used to simulate and analyze the hydrostatic pile sinking process in sandy soil. The Sand parameters of the Simsand model were calibrated based on published laboratory test data, which were used in the simulation of centrifuge model tests of pile penetration in sand. The numerical model was verified by comparing the simulation results and the model test data. Overall, the influence range of pile jacking became larger with increases of the tip angle of a pile and the relative density of sand, the soil squeezing effect of the flat-bottom pile was more inclined to vertical forward in the process of pressing, thus mobilizing more soil resistance. Pile-foundation compression caused uplift in the near-surface soil layer, and the uplift of dense sand stratum was more significant than that of loose sand stratum. With the increase of depth, the vertical displacement of soil around the pile changed from uplift to downward movement and tended to be stable, and the lateral displacement in dense sand was greater than that in loose sand. The diameter of the area affected by the soil

收稿日期:2023-03-14

基金项目:山东省自然科学基金青年资助项目(ZR2021QE186)

第一作者简介:韩超(1983—),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为冷却塔结构及地基处理设计。E-mail:hanchao@sdepci.com

***通信作者简介:**庄培芝(1988—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为岩土力学及岩土工程。

E-mail:zhuangpeizhi@sdu.edu.cn

squeezing effect decrease drapidly with the vertical downward direction of the pile end, decreased slightly with the vertical upward direction of the pile end, and increased first and then decreased along the radial direction in dense sand. The influence range of pile jacking decreased repeatedly and moderately along the downward and upward direction from the pile tip, repectively, and increased first and then decreased along the radial direction.

Keywords: jacking pile; numerical simulation; Coupled Eulerian-Lagrangian method; compaction effect; sand

0 引言

高层建筑、电塔、桥梁和海上平台的基础结构中广泛采用管桩等预制桩^[1],其中静压法是预制桩基最为常用的施工方法之一,具有压桩速度快、沉桩过程安静无污染、对桩体破坏小等优点^[2]。静压沉桩过程会对桩周土体产生巨大的侧向和竖向挤压作用(即挤土效应),常导致显著的土体隆起、侧移和下沉变形,易对近邻结构物(如埋地管道、基础结构)产生不利影响^[3]。因此,静压沉桩过程的挤土效应分析具有重要意义。

静压桩挤土效应分析的常用手段包括理论模型^[4-5]、模型试验^[6]和数值模拟^[7]等。与其他方法相比,数值模拟方法具有可模拟计算复杂工况、工况设计灵活易控、经济和时间成本低等优点,近年来发展迅速、应用广泛。常用的沉桩数值模拟方法有有限单元法^[8]、离散单元法^[9]和物质点法^[10]等,其中有限单元法的应用最为普遍。桩基贯入引起的土体大变形是有限元模拟计算的主要难点之一,国内外学者陆续提出了多种解决办法^[7,10-11],其中以任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法^[12]和耦合欧拉-拉格朗日(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)方法^[13]两类方法最为常用;Tolooiyan等^[14]采用ALE方法解决静力触探贯入过程锥尖土体的大变形问题,所得预测的端部阻力 q_c 与实测端部阻力取得了较高的吻合度;Yang等^[15]采用ALE方法成功模拟砂土中静压桩沉桩过程;吴则祥等^[16]考虑颗粒破碎采用CEL方法模拟研究了砂土中平底桩贯入问题;Staubach等^[17]采用CEL方法模拟研究了砂土中振动沉桩效应对单桩长期承载能力的影响。大量研究证明ALE方法和CEL方法对于土与结构物相互作用过程中大变形问题的模拟各有优势,且均具有较高的计算精度和稳定性^[18-19]。另外,压桩挤土效应数值模拟的精细化水平与土体本构模型的准确程度密切相关^[20]。

本研究采用CEL方法,结合Simsand临界状态本构模型模拟分析了砂土中静压沉桩挤土效应问题。利用ABAQUS有限元分析软件提供的

VUMAT接口,将Simsand本构模型作为用户自定义材料导入到ABAQUS的分析模块中。根据Ticino砂和Toyoura砂的三轴试验结果确定本构模型的材料参数,采用CEL方法模拟2种标准砂中的压桩过程,并通过与试验数据对比验证了数值模型的可靠性。采用验证后的数值模型,对多种典型工况下的单桩挤土效应进行了量化分析。

1 ABAQUS/CEL方法与砂土本构模型

1.1 CEL方法

CEL方法最早由Noh^[21]在分析二维流体力学问题时提出,后被推广应用于三维大变形问题分析。CEL结合了拉格朗日方法和欧拉方法的优点,采用欧拉网格点固定不动而材料在网格内部流动的方式建模,通过拉格朗日网格和欧拉网格接触耦合算法,利用拉格朗日方法得到准确的结构应力-应变响应,可有效解决网格变形过大引起的收敛性问题。因此,土(采用欧拉网格)与结构物(采用拉格朗日网格)发生相互作用问题常采用CEL方法^[22-24]。欧拉体积分数(Eulerian volume fraction, EVF)表示材料在单元中的填充程度,EVF为1时欧拉单元完全被材料填充,EVF为0时欧拉单元中无材料填充。

CEL方法通过显式时间积分方案实现,采用中心差分求解非线性微分方程组,引入临界积分步长保证数值稳定,临界时间步长

$$\Delta t_{\text{crit}} = L_e / C_d,$$

式中 L_e 为单元长度。

剪胀波速

$$C_d = \sqrt{E/\rho},$$

式中, E 为弹性模量, ρ 为材料密度^[25]。

故临界时间步长与最小单元长度成正比,与材料弹性刚度成反比,即增大网格长度尺寸和质量(通过改变模型的尺寸和密度来调整模型的质量,本文增大密度)利于提高计算效率,但需要综合考虑网格密度和相关速率等因素对收敛性的影响,进而获得模拟精度和计算效率之间的平衡^[26]。

1.2 Simsand 砂土本构模型

本研究选用 Wu 等^[27]提出的 Simsand 砂土临界状态本构模型来描述桩-土相互作用过程中砂土复杂的力学行为。模型中土体总应变增量

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad (1)$$

式中, ε_{ij}^e 为弹性应变增量, ε_{ij}^p 为塑性应变增量。弹性体应变 ε_v^e , $\varepsilon_v^e = \frac{p'}{K}$; 弹性偏应变 ε_d^e , $\varepsilon_d^e = \frac{q}{3G}$, 其中 K 为体积模量, G 为剪切模量,

$$K = K_0 p_{at} \frac{(2.97-e)^2}{(1+e)} \left(\frac{p'}{p_{at}}\right)^n, \quad (2)$$

$$G = G_0 p_{at} \frac{(2.97-e)^2}{(1+e)} \left(\frac{p'}{p_{at}}\right)^n, \quad (3)$$

式中, K_0 为体积模量系数, G_0 为剪切模量系数, $G_0 = 3K_0(1-2\nu)/2(1+\nu)$, p_{at} 为大气压强, e 为孔隙比, n 为弹性参数, ν 为泊松比。

模型用临界孔隙比来描述临界状态线, 临界孔隙比

$$e_c = e_{c0} - \lambda \left(\frac{p'}{p_{at}}\right)^\xi, \quad (4)$$

式中: e_{c0} 为参考孔隙比, 为 $p' = 0$ 时对应的孔隙比; λ , ξ 为控制临界状态线斜率的常数, 其中 λ 控制临界状态线拐点的位置, ξ 控制拐点后临界状态线的斜率。

模型剪切屈服面函数为:

$$f = \frac{q}{p'} \frac{M_p \varepsilon_d^p}{k_p + \varepsilon_d^p}, \quad (5)$$

式中: f 为屈服函数; q 为偏应力; ε_d^p 为塑性偏应变; M_p 为 p' - q 空间的峰值强度应力比 (见图 1), $M_p = M \exp[-n_p(e-e_c)]$, 其中 M 为 p' - q 空间中临界状态线的斜率, $M = 6 \sin \phi_c / (3 - \sin \phi_c)$, n_p 控制偏应力的峰值点; k_p 为 $q/p' - \varepsilon_d^p$ 空间控制曲线初始斜率的参数。

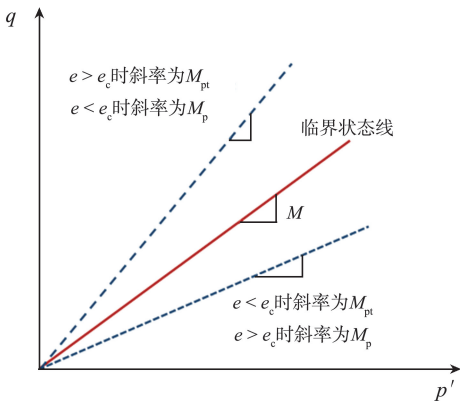


图 1 p' - q 空间参数定义

Fig.1 Parameter definition of p' - q space

模型采用非相关性流动法则, 其塑性势为:

$$\frac{\varepsilon_v^p}{\varepsilon_d^p} = A_d \left(M_{pt} - \frac{q}{p'} \right), \quad (6)$$

式中: ε_v^p 为塑性体应变, A_d 为剪胀参数, M_{pt} 为 p' - q 空间相变线的斜率。根据 Been 等^[28]提出的颗粒间咬合效应, M_{pt} 可表示为:

$$M_{pt} = M \exp[n_d(e-e_c)], \quad (7)$$

式中: n_d 为颗粒间咬合效应参数, 控制剪胀后体应变的变化速率。如图 1 所示, e_c 为当前应力状态下的临界孔隙比, 对于松砂, $e > e_c$ 时, $M_{pt} > M > M_p$; 对于密砂, $e < e_c$ 时, $M_p > M > M_{pt}$ 。

综上所述, Simsand 本构模型参数可分为 3 类:

- (1) 弹性相关参数 K_0 、 G_0 、 n ;
- (2) 临界状态参数 e_{c0} 、 λ 、 ξ 、 ϕ_c ;
- (3) 塑性相关参数 k_p 、 A_d 、 n_p 、 n_d 。

利用 ABAQUS 所提供的 VUMAT 用户子程序接口, 将 Simsand 本构模型作为用户自定义材料导入到 ABAQUS 的分析模块中^[29-31]。采用图 2 所示流程, ABAQUS/Explicit 调用 VUMAT 子程序, 显示积分算法获得当前增量步的应变增量 $\Delta\varepsilon$, VUMAT 子程序根据 ABAQUS 提供的应变增量, 计算出新的应力增量。计算结束后 VUMAT 会将更新后的应力返回 ABAQUS/Explicit, 供其进行下一增量步的应变增量计算, 如此反复进行循环直至加载结束。

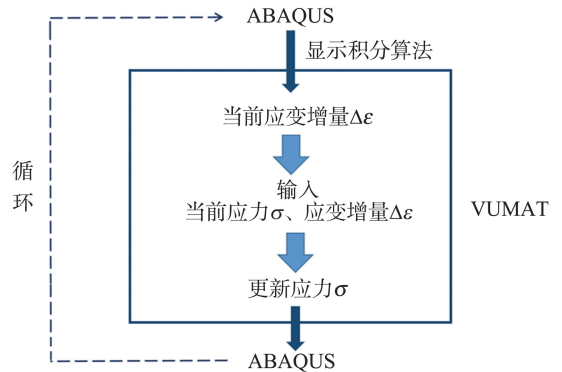


图 2 ABAQUS 二次开发流程图

Fig.2 Flow chart of ABAQUS secondary development

2 数值方法验证分析

2.1 验证试验简介

基于桩基贯入模型试验数据对上述数值方法的准确性进行验证分析。文献[32]采用两种常用的标准砂 (Toyoura 砂和 Ticino 砂, 相关物理指标如表 1 所示) 在土工离心机上开展了一系列桩基贯入模型试验。试验模型桩 (或微型静力触探仪) 直径 D 为 11.3 mm, 锥形桩尖角度为 60° 。试验模型为圆柱形模型, 其内径为 400 mm (约 $35.4D$, 可有效减小侧边界效应), 高度为 630 mm, 侧向及底部为固定位移边界。试验中采用雨淋法制备了 3 种不同初始密度的砂样, 砂样高度为 315~445 mm。为减小底部边界效应影响, 最大贯入深度时, 桩端距底部

边界距离不小于 $20D$, 沉桩速率约为 2 mm/s 。

表1 Toyoura 砂和 Ticino 砂基本物理指标
Table 1 Properties of Toyoura sand and Ticino sand

砂	平均粒径 d_{50}/mm	比重 G_s	最大孔隙比 e_{\max}	最小孔隙比 e_{\min}
Toyoura 砂	0.22	2.65	0.986	0.612
Ticino 砂	0.53	2.68	0.923	0.574

表2 Simsand 本构模型参数

Table 2 Parameters of Simsand constitutive model

砂	K_0	G_0	n	e_{c0}	λ	ξ	ϕ_c	k_p	A_d	n_p	n_d
Toyoura 砂	130	78	0.51	0.977	0.059 6	0.365	31.5	0.004 4	0.7	2.4	2.9
Ticino 砂	78	59	0.56	0.911	0.054 7	0.410	35.0	0.003 4	0.7	2.6	5.9

图 3、4 为三轴排水剪切条件下 Simsand 模型(采用表 2 参数)预测应力-应变预测值与试验实测数据的对比结果, 含应力-应变曲线和孔隙比变化规律。Toyoura 砂的三组三轴试验围压为 100 kPa , 孔隙比分别为 0.996 、 0.917 、 0.831 ; Ticino 砂的三组

2.2 本构模型参数

基于相关单轴压缩和三轴剪切等试验数据校定本构模型参数。Toyoura 砂相关试验数据参考文献[33], Ticino 砂相关试验数据参考文献[34], 采用文献[35]的模型参数校正方法, 最终得两种标准砂的 Simsand 模型参数如表 2 所示。

三轴试验(排水)围压分别为 300 、 124 、 120 kPa , 孔隙比对应为 0.756 、 0.796 、 0.760 。由图 3、4 可知, 弹性变形峰值(整体误差 $< 5\%$)、临界状态特征、体积变化及应变硬化/软化特性等具有较高的预测精度。

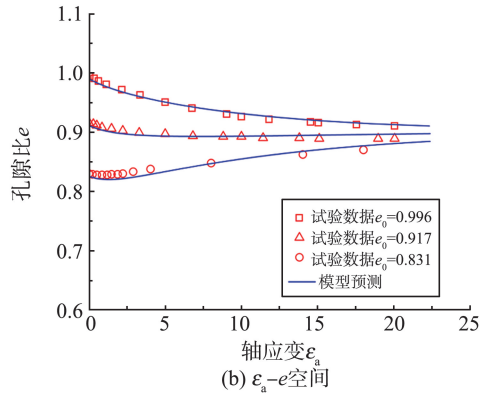
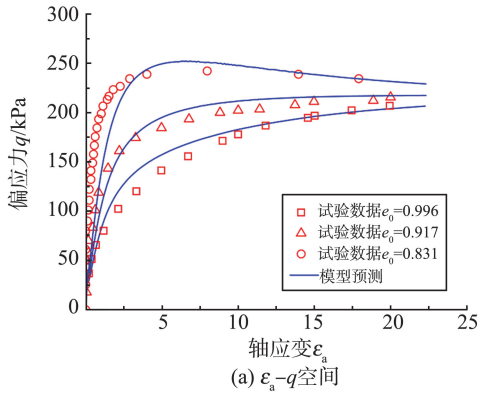


图 3 Toyoura 砂单元体模拟与试验对比^[33]

Fig.3 Comparison between experiments and simulations for drained triaxial tests on Toyoura sand

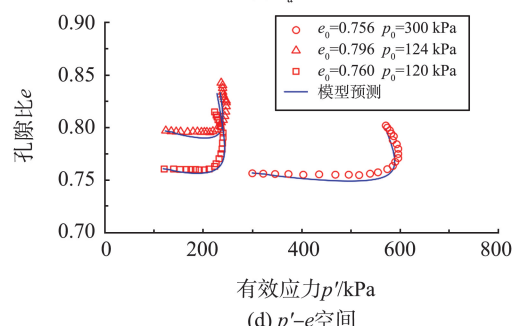
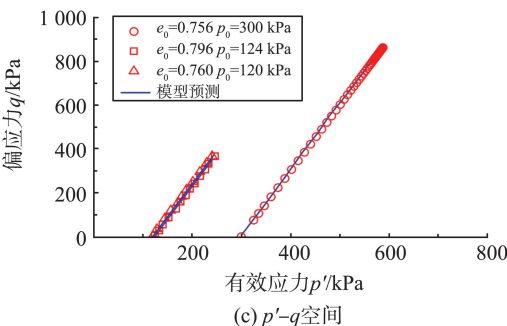
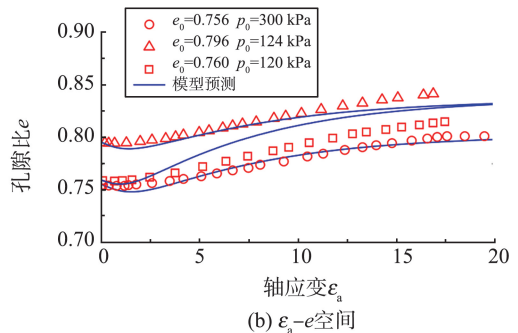
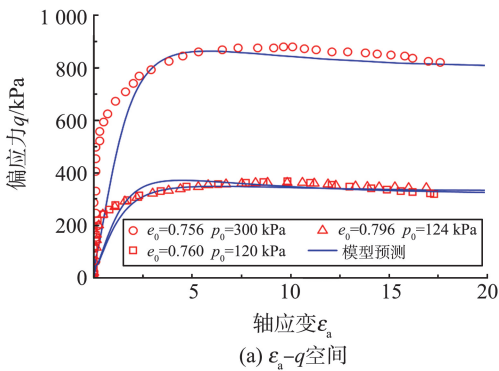


图 4 Ticino 砂单元体模拟与试验对比^[34]

Fig.4 Comparison between experiments and simulations for drained triaxial tests on Ticino sand

2.3 桩基贯入数值模拟与对比分析

采用 ABAQUS/CEL 方法模拟分析了文献 [32] 中加速为 $80g$ ($g=9.81 \text{ m/s}^2$) 的试验工况。按照相似比尺确定对应等效足尺工况 (加速度为 $1g$) 的数值模型 (即等比例放大 80 倍)。几何尺寸如图 5 所示,土体外半径 16 m,深 50 m,桩长 35 m,桩径 $D=0.9 \text{ m}$,与模型桩一致,桩端为锥形,锥角为 60° 。在地表线之上定义一个空层 (欧拉网格),以允许桩基贯入过程地表隆起变形引起的土体流入。考虑稳定性和计算时长,采用放射性网格划分,距圆心 $3D$ (即 2.7 m) 采用均匀的细网格,最小网格结点相距约为 $D/4$ [36] (即 0.25 m)。模型底部边界固定 x 、 y 、 z 方向的自由度,模型的侧向边界固定 x 、 y 轴的自由度,在土体的轴对称面固定法向自由度,其他方向土体可自由移动。

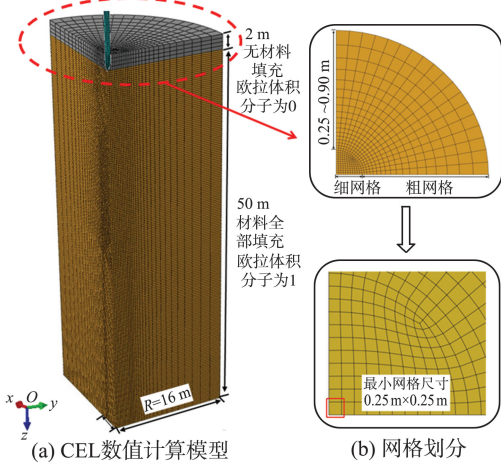


图5 CEL数值计算模型及网格划分

Fig.5 Numerical model and grid division of CEL method

根据文献 [32] 确定数值模型参数, Toyoura 砂中相关试验 (初始孔隙比分别为 0.78 、 0.72 、 0.65) 初始侧向应力系数 $K_0 = 0.485$, 界面摩擦系数 $\mu = \tan(\varphi_c/2) = 0.28$; Ticino 砂中相关试验 (初始孔隙比分别为 0.82 、 0.73 、 0.63) 初始侧向应力系数为 0.44 , 界面摩擦系数 $\tan(\varphi_c/2) = 0.3$ 。桩体密度为 9900 kg/m^3 , 弹性模量为 900 GPa , 泊松比为 0.25 [37]。相关砂土本构模型参数采用表 2 数值,并适当提高桩的贯入速度以提高计算效率 [36,38-40], 本模拟压桩速度为 0.05 m/s 。

采用如上模型对文献 [32] 中的模型试验工况进行模拟计算,计算结果与试验数据对比如图 6 所示,其中 q_c 为桩端阻力 (桩尖总阻力除以桩底投影面积), p' 代表土体平均有效应力。从图 6 可以看出,计算所得两种标准砂中桩基贯入过程所遇土体阻力与试验实测数据较为吻合,图中试验数据点处模拟计算的平均误差小于 10% (偏高估),其中对于

密砂工况的预测精度高于松砂工况。以上验证显示本文所用 CEL 技术结合 Simsand 本构模型可以很好地模拟砂土中静压沉桩过程桩-土相互作用水平。

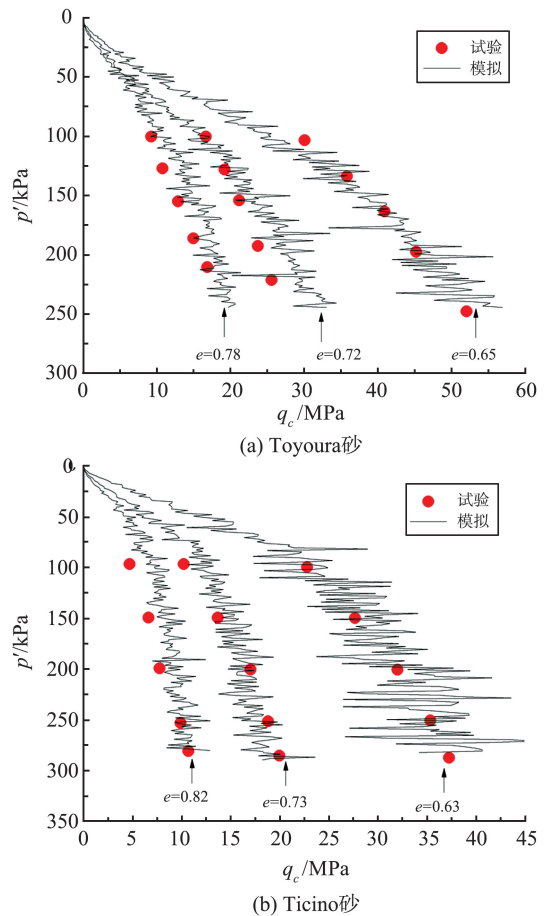


图6 数值计算结果与模型试验数据对比

Fig.6 Comparison of numerical and experimental

3 静压沉桩挤土效应分析

采用上述模型和表 2 中 Ticino 标准砂参数,模拟分析了桩尖形状、砂土相对密度和桩基贯入深度等因素对静压沉桩挤土效应的影响规律。

3.1 桩尖形状的影响与分析

选取 60° 、 120° 和 180° (即平底桩) 3 种典型的桩尖角度进行静压桩模拟计算,砂土相对密度 $D_r = 85\%$ 。桩端阻力 q_c 随压入深度的变化曲线如图 7 所示。平底桩压入遇到的土体阻力要明显大于锥形桩,但桩端阻力的差值随着压入深度的增加而减小的趋势; 120° 锥形桩所遇土体阻力略大于 60° 锥形桩,桩端阻力的差值差别不大。综上可知,桩端阻力随着锥尖角度的减小而减小,该规律与文献 [41] 中变锥尖角度静力压入试验中的桩端阻力差值随着压入深度的增加而减小一致。

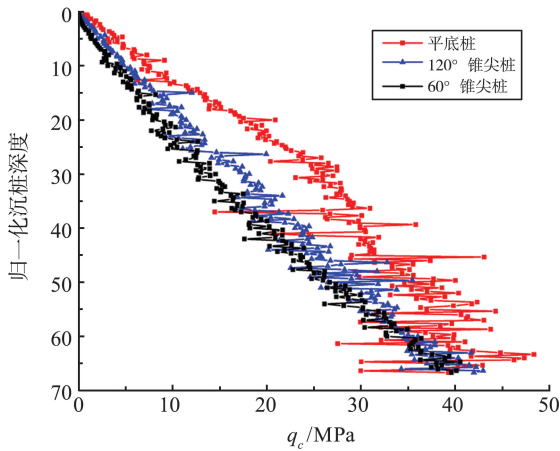


图7 不同形状桩尖压入时沉桩阻力位移图
Fig.7 Displacement and total load of different shapes

桩端阻力与桩-土相互作用密切相关,图8描述了桩基不同压入深度时的桩周土体累积位移,进

一步分析图7桩端阻力随桩端角度的变化规律。图8分别提取了沉桩深度 $z_1 = 20R = 9\text{ m}$ 、 $z_2 = 30R = 13.5\text{ m}$ 、 $z_3 = 40R = 18\text{ m}$ 和 $z_4 = 50R = 22.5\text{ m}$ (R 为桩身半径)时,距桩轴线径向距离为 $2R$ 处的径向和竖向位移。 ΔX 为径向位移, ΔY 为竖向位移,为了与径向位移 $\Delta X/R$ 区分,竖向位移 $\Delta Y/R$ 显示为负值。相同压入深度时,平底桩引起的竖向挤压位移(约为 $1R$)显著大于锥形桩(约为 $0.7R$),但3种桩型的侧向(径向)挤压位移相差较小(均约为 $0.3R \sim 0.4R$)。这说明压入过程平底桩的挤土效应更倾向于竖向向前,增大了土体阻力。同时,120°锥形桩与60°锥形桩的挤土影响区域直径相差不大。此处挤土影响区域直径随桩尖角度的变化规律与图7所示承载力的变化规律一致。

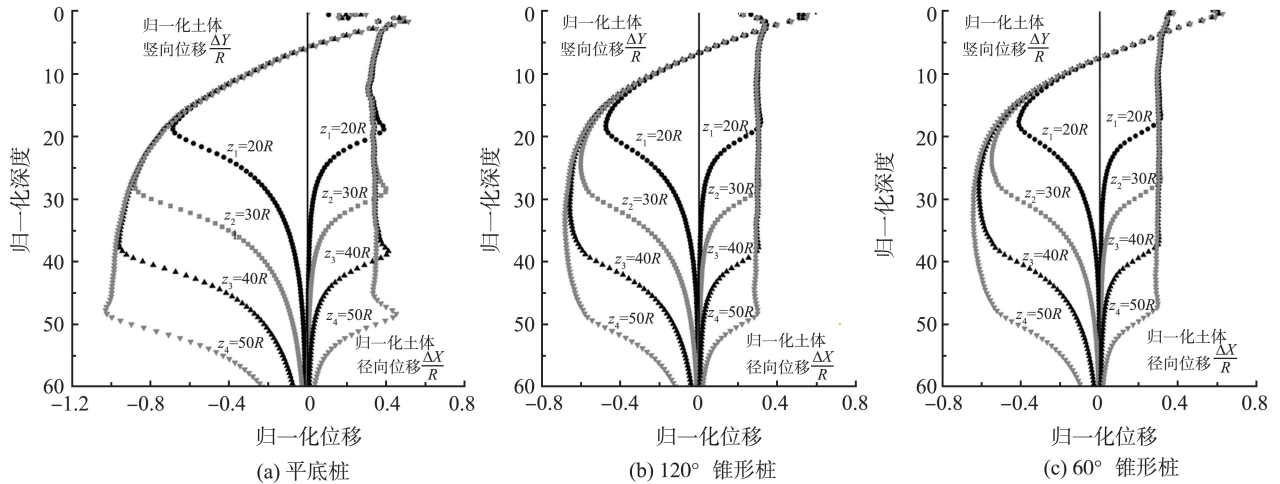


图8 不同桩尖压入时土体累计位移图
Fig.8 Cumulative displacement of soil under different pile tips

3.2 砂土初始密度的影响与分析

选取两种典型的砂土相对密度 ($D_r = 85\%$ 和 $D_r = 50\%$) 对比分析砂土初始密度对挤土区域直径的影

响。桩体(以60°锥形桩为例)压入深度 $z = 25\text{ m}$ 时距桩体不同径向距离 $d_1 = 2R$ 、 $d_2 = 3R$ 、 $d_3 = 4R$ 、 $d_4 = 5R$ 和 $d_5 = 6R$ 处的土体累计位移图如图9所示。

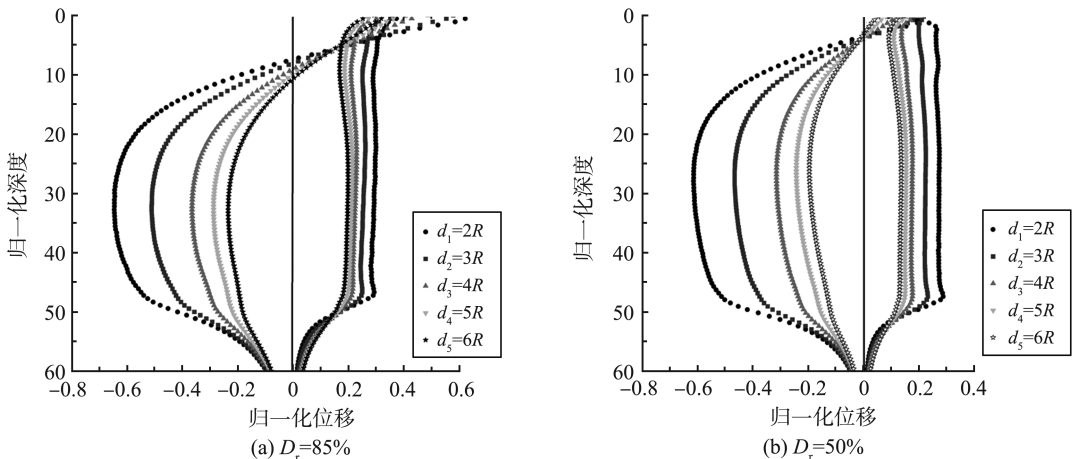


图9 不同径向位置处土体累计位移
Fig.9 Cumulative displacement of soil at different radial positions

图9可以看出,桩基压入引起近地表土层隆起,密砂地层的隆起较松砂地层显著($d/R=2$ 时密砂和松砂地表隆起高度分别约为 $0.6R$ 和 $0.2R$)。随着深度的增加,桩周土体的竖向位移由隆起变为向下移动,且趋于稳定,该现象与Mo等^[42]的试验观测规律一致。桩周土体的侧向位移受压入深度影响较小(除桩端附近),但随着离桩径向距离的增大而逐渐减小。相同径向距离处,密砂中发生的侧向位移大于松砂地层。桩端下方土体受沉桩影响产生挤压变形,并随着桩端距离的增大,桩侧土体的径向和竖向变形迅速减小,并且桩基的挤土效应受砂土的剪胀特性影响较大。

3.3 压桩深度的影响与分析

随着土层深度的增加,自重引起的地层平衡应力水平不断增大。因此,桩端桩-土相互作用的有效应力随着压桩深度的增大而逐渐增大,如图10所示。压桩深度对于桩侧径向约束力 σ_r 具有显著影响。采用桩端阻力对 σ_r 无量纲化处理,即 σ_r/q_c 。以 $D_r=85\%$ 和 60° 锥形桩工况为例,压桩深度为 $10R$ 、 $30R$ 、 $50R$ 时,距桩轴线径向距离 $2R$ 处土体内 σ_r/q_c 沿深度的变化曲线如图11所示。由浅及深, σ_r/q_c 在桩尖处出现突增,远离桩尖后迅速衰减至地应力水平。 σ_r/q_c 的峰值随着压桩深度的增大而趋于变小($z/R=10$ 、 30 和 50 时, σ_r 峰值分别为 $0.221q_c$ 、 $0.191q_c$ 和 $0.175q_c$),这与Jardine等^[43]的试验所得规律一致。

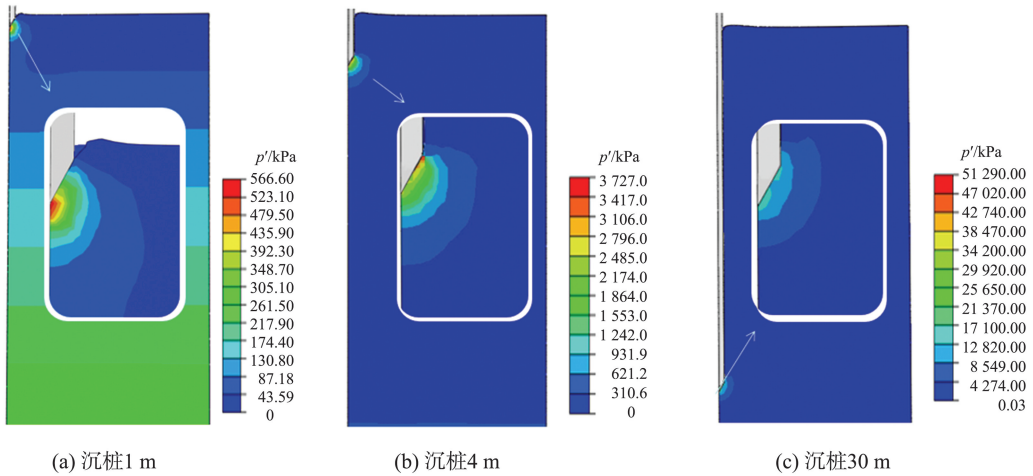


图10 不同压桩深度的有效应力云图

Fig.10 Effective stress nephogram of different pile driving depth

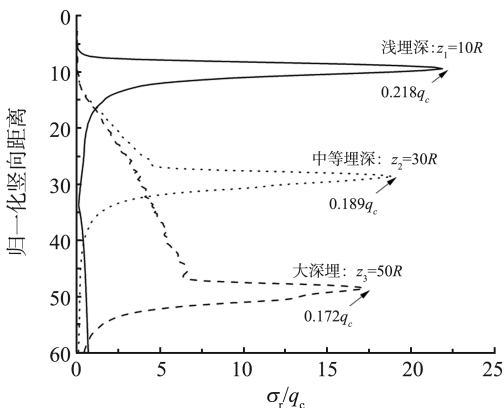


图11 不同压桩深度时土体径向应力图

Fig.11 Radial stress of soil under different pile depth

60° 锥形桩沉桩完成后($D_r=85\%$),距桩端不同位置处桩侧土中径向应力的变化曲线(h 为桩身某截面距桩端的竖向距离)如图12所示。由图12可知随 h/R 的增大(远离桩端), σ_r/q_c 逐渐越小,这就是Lehane等^[44]所提出的“摩擦疲劳效应”。沿径向,径向应力先增大(在径向距离为 $2R\sim 3R$ 处出现

极大值,约为 $6\%\sim 7\%q_c$,后呈指数形式迅速衰减至极小的水平(如 $d/R=30$, $\sigma_r=0.0085q_c$)。上述 h/R 效应和近桩侧径向应力的局部降低与持续接触荷载作用下桩侧土体内部应力旋转、桩侧剪切带内部颗粒重排布及破碎等密切相关^[43,45-46]。

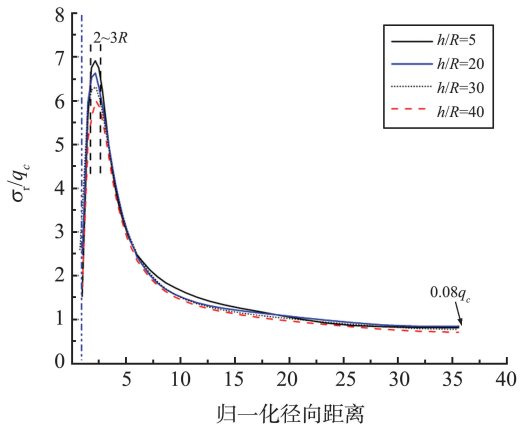


图12 距桩端不同位置的土体径向应力图

Fig.12 Radial stress diagram of soil at different positions from pile tip

4 结论

使用 CEL 方法结合 Simsand 本构模型实现了砂土中静压单桩挤土效应的精细化数值模拟分析。静压桩沉桩过程中,桩尖形状、砂土相对密度和桩基压入深度等因素都会对挤土效应产生影响。挤土效应的影响区域直径随着桩尖角度和砂土相对密度的增大而增大,区域直径随桩端竖向向下方向衰减,随桩端竖向向上方向区域直径小幅度减小。在计算的密砂($D_r = 85\%$)工况中,由于桩-土界面复杂的应力及应变局部化现象,随着离桩径向距离的增大,沉桩引起的土体内部应力及变形呈现先增大($<2R$)后减小的趋势,距离 $10R \sim 15R$ 范围外土体基本可以认为不受沉桩挤土效应的影响。

参考文献:

- [1] FAN S, BIENEN B, RANDOLPH M F. Effects of mono-pile installation on subsequent lateral response in sand. I: pile installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(5): 04021021.
- [2] 李雨浓, 张亚伟, 刘亚辉, 等. 层状地基静压开口管桩的挤土效应研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(15): 115-123.
LI Yunong, ZHANG Yawei, LIU Yahui, et al. Study on soil squeezing effect of open-ended jacked pipe pile in layered ground [J]. Building Structure, 2021, 51(15): 115-123.
- [3] 张海洋, 刘润, 贾沼霖. 自升式平台插桩对邻近平台桩基础的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 867-876.
ZHANG Haiyang, LIU Run, JIA Zhaolin. Investigation of effect of spudcan penetration on adjacent platform piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 867-876.
- [4] 刘雪颖, 王永洪, 张明义, 等. 静压桩沉桩过程中贯入机理理论研究进展[J]. 工程地质学报, 2020, 30(2): 1-13.
LIU Xueying, WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, et al. Advances in the theoretical research on the penetration characteristics of jacked piles [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 30(2): 1-13.
- [5] SAGASETA C, WHITTLE A J. Prediction of ground movements due to Pile driving in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 55-66.
- [6] KLUGER M O, KREITER S, STÄHLER F T, et al. Cone penetration tests in dry and saturated Ticino sand [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 4079-4088.
- [7] WANG D, BIENEN B, NAZEM M, et al. Large deformation finite element analyses in geotechnical engineering [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 104-114.
- [8] 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 Zhanyou, GONG Xiaonan, WANG Jianliang, et al. Numerical simulation and factor analysis of jacked pile compacting effects [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(7): 992-996.
- [9] 顾美湘. 筋箍碎石桩复合地基承载变形特性的三维离散元和模型试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
GU Meixiang. Three-dimensional DEM analysis and model tests on geosynthetic encased stone columns [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [10] LORENZO R, DA CUNHA R, CORDÃO NETO M, et al. Numerical simulation of installation of jacked piles in sand using material point method [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(1): 131-146.
- [11] 秦伟. 海上风电大直径开口钢管桩锤击贯入过程研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
QIN Wei. Impacted penetration progress researches of large-diameter open-ended steel pipe pile applied in oddshore wind faem [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [12] 吴亚军, 雷胜友. 静压桩挤土效应数值模拟 [J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(1): 33-40.
WU Yajun, LEI Shengyou. Numerical simulation of compaction effects of jacked pile [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2019, 28(1): 33-40.
- [13] QIU G, GRABE J. Numerical investigation of bearing capacity due to spudcan penetration in sand overlying clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(12): 1393-1407.
- [14] TOLOOYAN A, GAVIN K. Modelling the cone penetration test in sand using cavity expansion and arbitrary Lagrangian eulerian finite element methods [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(4): 482-890.
- [15] 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.
- [16] 吴则祥, 金银富, 季慧, 等. 易破碎砂土地基中“平底桩”贯入数值模拟分析 [J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊2): 330-336.
WU Zexiang, JIN Yinfu, JI Hui, et al. Numerical simulation analysis of flat bottom pile driven into foundation

- of easily crushable sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suppl.2): 330-336.
- [17] STAUBACH P, MACHACEK J, MOSCOSO M C, et al. Impact of the installation on the long-term cyclic behaviour of piles in sand: a numerical study [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138: 106223.
- [18] 孙肖菲, 王树青, 陈旭光, 等. 基于 ALE、CEL 法的管土垂向相互作用数值模拟对比分析 [J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(2): 1-8.
SUN Xiaofei, WANG Shuqing, CHEN Xuguang, et al. Comparison of numerical simulations of the vertical pipe-soil interaction based on CEL and ALE algorithms [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 33(2): 1-8.
- [19] 张兆德, 张心, 李俊来. 基于 CEL 和 ALE 方法的自升式平台桩基贯入过程瞬态研究 [J]. *船海工程*, 2015, 44(2): 149-153.
ZHANG Zhaode, ZHANG Xin, LI Junlai. Transient study of jack-up pile foundation penetration process based on CEL and ALE methods [J]. *Ship and Ocean Engineering*, 2015, 44(2): 149-153.
- [20] STAUBACH P, MACHACEK J, WICHTMANN T. Large-deformation analysis of pile installation with subsequent lateral loading: Sanisand vs. Hypoplasticity [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 151: 106964.
- [21] NOH W F. CEL: A time-dependent, two-space-dimensional, coupled eulerian-lagrange code [C] // *Methods in Computational Physics* 3. New York, USA: Academic Press, 1964.
- [22] SYSTEMES D. ABAQUS analysis user's manual [M]. version 2016. Maastricht, the Netherlands: AOSS, 2016.
- [23] 闫澍旺, 霍知亮. 岩土工程下沉贯入数值模拟方法研究进展 [J]. *力学与实践*, 2016, 38(3): 237-49.
YAN Shuwang, HUO Zhiliang. Advance in numerical simulation methods for penetration in geotechnical engineering [J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(3): 237-49.
- [24] 魏丽敏, 李双龙, 杜猛, 等. 基于 CEL 法的静压管桩挤土效应数值分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 28-38.
WEI Limin, LI Shuanglong, DU Meng, et al. Numerical analysis of soil squeezing effect of static pressure pipe pile based on CEL method [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(4): 28-38.
- [25] OSTHOFF D, GRABE J. Deformational behaviour of steel sheet piles during jacking [J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 101: 1-10.
- [26] QIU G, HENKE S, GRABE J. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 38(1): 30-39.
- [27] WU Z X, YIN Z Y, JIN Y F, et al. A straightforward procedure of parameters determination for sand: a bridge from critical state based constitutive modelling to finite element analysis [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(12): 1444-1466.
- [28] BEEN K, JEFFERIES M G. A state parameter for sands [J]. *Géotechnique*, 1985, 35(2): 99-112.
- [29] 彭芳乐, CHATTONJAI P, 华针. 基于 Abaqus 软件的砂土弹塑性本构实现及验证 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3): 370-376.
PENG Fangle, CHATTONJAI P, HUA Zhen. Implementation and validation of elasto-plastic constitutive of sands by Abaqus tool [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(3): 370-376.
- [30] 陈洲泉, 陈湘生, 庞小朝. 砂土临界状态模型的隐式积分算法在有限元分析中实现 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2279-2286.
CHEN Zhouquan, CHEN Xiangsheng, PANG Xiaochao. An implicit integration algorithm for implementing the critical-state sand model into the finite element analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2279-2286.
- [31] 王子珺, 赵伯明. 砂土统一本构模型研究及其三维数值实现 [J]. *工程力学*, 2021, 38(10): 181-187.
WANG Zijun, ZHAO Boming. The Unified sand model and 3D numerical implementation [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(10): 181-187.
- [32] FIORAVANTE V, GIRETTI D. Unidirectional cyclic resistance of Ticino and Toyoura sands from centrifuge cone penetration tests [J]. *Charles University*, 2016, 11(4): 953-968.
- [33] NORIHIKO M, HIDEKAZU M, NORIYUKI Y. Stress-strain characteristics of sand in a particle-crushing region [J]. *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 1984, 24(1): 77-89.
- [34] GHAFGHAZI M, SHUTTLE D. Interpretation of sand state from cone penetration resistance [J]. *Géotechnique*, 2008, 58(8): 623-634.
- [35] 吴则祥, 陈佳莹, 尹振宇. 考虑各向异性及循环效应的 SIMSAND 模型及应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 2113-2123.
WU Zexiang, CHEN Jiaying, YIN Zhenyu. A SIMSAND model considering anisotropy and dynamic effects and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 2113-2123.

- [36] 戴笑如, 王建华, 范怡飞. 钻井船插桩 CEL 数值模拟中的若干问题分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2278-2286.
DAI Xiaoru, WANG Jianhua, FAN Yifei. Issues of numerical simulation of the spudcan penetration based on CEL method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2278-2286.
- [37] 王海刚, 白晓宇, 张明义, 等. 静压桩沉桩阻力现场试验与数值模拟分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(1): 91-97.
WANG Haigang, BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, et al. Field test and numerical simulation analysis on the penetration resistance of jacked pile[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2021, 52(1): 91-97.
- [38] 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(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(2): 3839-3846.
- [39] QIU G, HENKE S, GRABE J. Applications of coupled eulerian-lagrangian method to geotechnical problems with large deformations [C]// SIMULIA Customer Conference. London, UK: IEEE, 2009.
- [40] WUZexiang. Mechanical modelling of sand considering simple shear condition and its application to pile foundation [D]. Nantes, USA: Ecole Centrale de Nantes, 2017.
- [41] DURGUNOGLU H T, MITCHELL J K. Static penetration resistance of soils [R]. Washington, USA: Research Report for NASA Headquarters, 1973.
- [42] MO Pinqiang. Centrifuge modelling and analytical solutions for the cone penetration test in layered soils[D]. Nottingham, England: University of Nottingham, 2014.
- [43] 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.
- [44] LEHANE B M, WHITE D J. Friction fatigue on displacement piles in sand [J]. Geotechnique, 2004, 54(10): 645-658.
- [45] YANG Z, JARDINE R, ZHU B, et al. Sand grain crushing and interface shearing during displacement pile installation in sand[J]. Géotechnique, 2010, 60(6): 469-482.
- [46] WHITE D J, LEHANE B M. Friction fatigue on displacement piles in sand [J]. Geotechnique, 2004, 54(10): 645-658.

(编辑: 陈丽萍)

(上接第 142 页)

- [14] 方强, 邱洪兴, 孙建, 等. 有限滑动螺栓连接装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 559-565.
FANG Qiang, QIU Hongxing, SUN Jian, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete shear walls with limited slip bolted connectors [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 559-565.
- [15] 樊禹江, 黄欢欢, 廖凯, 等. 新型装配式剪力墙抗震性能数值模拟与起滑荷载分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 41-50.
FAN Yujiang, HUANG Huanhuan, LIAO Kai, et al. Numerical simulation on seismic performance and slip load analysis of new prefabricated shear walls[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(3): 41-50.
- [16] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [17] 严涛. 不同连接方式对装配式剪力墙抗震性能的影响 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
YAN Tao. The influence of seismic behavior of precast shear wall with different connection modes [D]. Changsha: Hunan University, 2017.

(编辑: 孙亚彤)