

DOI: 10.11779/CJGE2023S20029

桩靴插桩动力过程的数值模拟方法研究

沈晓鹏¹, 李书兆¹, 李 伟¹, 梁文州¹, 曹添铭^{*2}, 刘 润²

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 基于耦合的欧拉-拉格朗日方法 (CEL), 模拟黏土中自升式钻井船桩靴插桩过程, 并对计算中的参数进行敏感性分析。结果表明: CEL 方法中选取合理参数可有效模拟离心模型试验下压阻力结果; 模型中最小网格尺寸较大将使计算结果产生震荡, 建议取 0.05 倍桩靴直径; 桩靴插桩速率 v 速度较慢时对下压阻力影响较小, 建议取为 1 m/s; 桩靴与土摩擦系数 f 对桩靴下压阻力影响较小, 黏土中建议设置为 0 即光滑接触; 地应力步中侧压力系数 K_0 应与其他土体参数协调, 黏土中建议取值为 1。

关键词: 桩靴插桩; CEL 方法; 网格尺寸; 插桩速率; 侧压力系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0208-06

作者简介: 沈晓鹏(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋工程技术研究设计工作。E-mail: shenxp2@cnooc.com.cn。

Numerical simulation method for dynamic process of spudcan penetration

SHEN Xiaopeng¹, LI Shuzhao¹, LI Wei¹, LIANG Wenzhou¹, CAO Tianming², LIU Run²

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent

Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the coupled Euler-Lagrange (CEL) method, the process of spudcan penetration is simulated, and several parameters affecting the calculated results are analyzed. The results show that the reasonable parameters in the CEL method can effectively simulate the penetration resistance results of centrifugal model tests. The large mesh size in the model will cause the calculated results to shake, so it is recommended to take 0.05 times the diameter of spudcan. Slow spudcan penetration speed v , has small influences on the lower penetration resistance, and it is recommended to be 1 m/s. The friction coefficient f between spudcan and soil has small influences on the penetration resistance, and smooth contact is recommended in clay. The lateral pressure coefficient K_0 of the geostress step should be coordinated with other soil parameters, and it is recommended to be 1 for clay.

Key words: spudcan penetration; coupled Eulerian-Lagrangian method; mesh size; penetration rate; lateral pressure coefficient

0 引 言

自升式钻井船广泛应用于近海油气开发, 自升式钻井船在作业过程中, 会将大直径桩靴插入海底泥面以下一定深度, 以使桩靴基础承载力达到设计荷载(一般为正常工作荷载的 2 倍), 预压完成后平台继续升舱至作业高度并排出压载水进行正常作业。为确保钻井船作业过程中安全性, 需要对桩靴插桩阻力进行计算和评估。

对于桩靴插桩问题研究方法通常为模型试验研究和数值仿真研究。针对桩靴问题的离心模型试验是目前广泛接受的研究方法, Siciliano 等^[1]、Craig 等^[2]、Hossain 等^[3]和 Xie^[4]进行了桩靴插桩的离心模型试验, 研究了桩靴插桩过程、桩靴承载力等问题, 并得到了桩靴邻近土体和桩基等影响的研究结果。以上学者的研究结果得到广泛认可并用于数值模型和理论分析的

严格验证中。

针对桩靴插桩的数值模拟研究中, RITSS 法、CEL 法、ALE 法等大变形有限元技术 (LDFE) 是解决该问题的主要数值手段。Qiu 等^[5-8]建议采用耦合的欧拉-拉格朗日方法 (coupled Eulerian-Lagrangian method, CEL) 分析求解岩土大变形问题。针对桩靴插桩问题, Tho 等^[9]、Hu 等^[10]、Lee^[11]、周龙等^[12]、王建华等^[13]、Zhang 等^[14]均采用 CEL 方法研究桩靴插桩问题及邻近桩基础影响等问题。但不同学者研究中对于桩靴插桩速度, 网格精度等参数取值不尽相同, 且都通过了相关离心模型试验验证。同时有诸多参数不能直接由实

基金项目: 渤海油气田水下生产系统国产化研究与示范项目 (CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 07 ZY)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者 (E-mail: zncyx123456@126.com)

际工程数据或离心模型中取得, 需要依据一定的经验进行调整并确定。

结合实际工程, 建立经离心模型验证的有限元数值模型, 并分析模型中主要参数对计算结果的影响, 为后续研究提供参考。

1 CEL 分析模型建立与验证

1.1 CEL 方法

钻井船插桩过程引起土体大变形的问题, 而常规的有限元算法, 基于单元节点的小变形假设, 在计算过程中有限元网格会发生严重畸变, 导致计算中断, 无法模拟整个连续插桩过程累积的挤土效应对钢圆筒的影响。CEL 方法是欧拉有限元方法与拉格朗日有限元方法互相耦合的有限元算法, 结合欧拉网格中网格固定而材料可以在网格中自由运动的方式建立模型, 欧拉材料与拉格朗日材料之间的接触采用基于罚函数法的通用接触算法离散。这种方法基于加强的侵入边界方法, 使拉格朗日结构融入欧拉体中的空单元, 拉格朗日体和欧拉体之间的分界面会被自动计算和跟踪^[15-16], 能够很好地解决涉及大变形的高度非线性的接触问题。

1.2 数值模型

根据某工程项目, 钻井船桩靴模型为六边形, 如图 1 所示。等效圆直径 $D=16$ m。桩靴采用拉格朗日实体单元模拟, 由于桩靴的刚度远大于地基土刚度, 故将桩靴结构设定为刚体, 网格属性为 C3D4。桩靴的贯入过程采用恒定速率 v 控制。

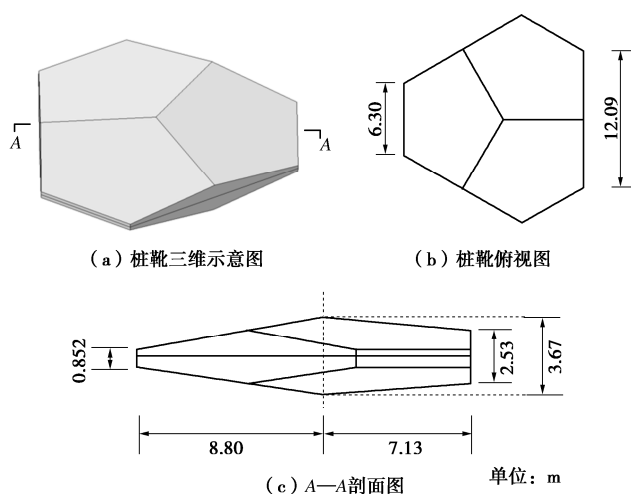


图 1 桩靴模型

Fig. 1 Spudcan model

土体设置为欧拉实体, 土体部件为圆柱形, 土体采用六面体欧拉实体单元 EC3D8R, 土体本构关系选

用莫尔-库仑弹塑性模型。土体直径为 150 m, 深度为 60 m。建模分析所用单层黏土的参数: 变形模量 $E=10$ MPa, 密度 $=700 \text{ kg/m}^3$, 黏聚力 $=30 \text{ kPa}$, 泊松比 $=0.49$ 。

将整个模型上部 10 m 内设置为空腔, 为桩靴插桩过程中土体向上隆起变形提供空间, 整体模型如图 2 所示 (土体展示 1/4 圆柱部分), 模型网格在竖直方向, 对靠近土体表面进行加密, 在水平面方向, 对桩靴周围的土体网格进行加密。在土体四周及底部设置为固定约束并添加无反射欧拉边界条件。

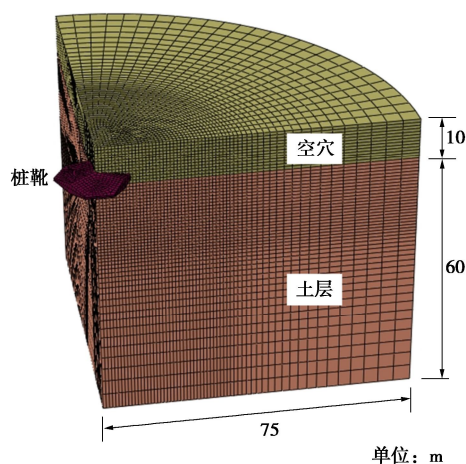


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.3 CEL 模型与离心模型试验对比

离心模型试验在模型土体上施加高倍离心力场, 可以还原为原型土体的重力场, 能够反映真实工况土体应力情况, 因此其结果可以作为数值模拟方法正确性验证的依据。

按照 1:100 比尺开展离心模型试验^[17], 根据 1.2 节实际桩靴制作桩靴模型, 试验用土为高岭土, 经压载固结及离心场固结, 测得土体强度为 30 kPa。试验中桩靴插桩过程采用伺服液压控制系统完成, 加载速率为 0.5 mm/s, 桩靴模型贯入深度为 9 cm, 对应原型插深 H 为 9 m。桩靴的入土深度由上方的竖向激光位移计监测, 桩靴贯入阻力由加载杆和液压缸之间的压力传感器测量。具体的试验布置如图 3 所示。

离心模型试验的结果换算为原形给出, 图 4 为离心模型试验下压阻力 q_u 随插深 H 变化的曲线, 并与数值模拟结果对比。图中数值模拟下压阻力在插深较浅时增长较快, 略大于离心模型试验结果, 而随着桩靴插深的增加, 数值模拟结果与离心模型试验结果逐渐趋于一致, 当插深为 9 m 时, 下压阻力约为 60 MN。以上证明 CEL 方法在模拟桩靴贯入问题上具有可靠性。

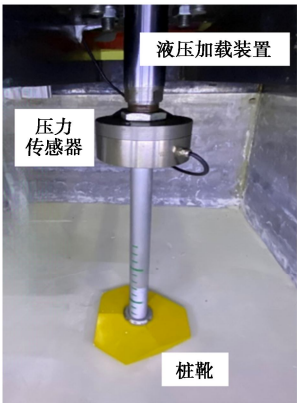


图 3 离心模型

Fig. 3 Centrifuge model

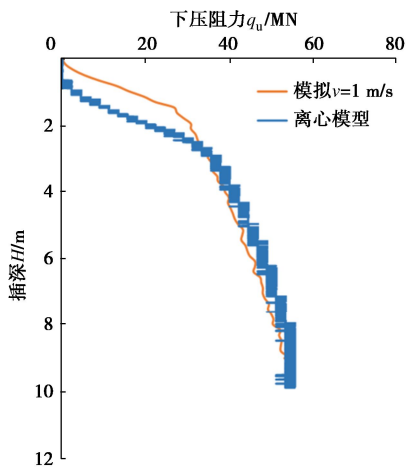


图 4 桩靴下压阻力与插深关系图

Fig. 4 Relationship between penetration resistance and depth

2 计算结果分析

建立 CEL 方法的数值分析模型, 针对各参数敏感性分析, 得到各参数对计算结果的影响规律。

2.1 网格尺寸对结果的影响

有限元模型中, 通常来说网格尺寸越小仿真的精度越高, 但计算时间越长。为研究不同网格尺寸对计算结果的影响, 分别计算了最小网格尺寸相对桩靴直径的比例 (以下简称网格尺寸) 为 $0.03D$, $0.05D$, $0.08D$, $0.1D$ 等 4 种情况的桩靴下压阻力结果。计算模型的网格尺寸和单元数量如表 1 所示。

表 1 网格尺寸和单元数量

Table 1 Mesh size and number of cells

相对桩靴直径 D 的网格尺寸	单元边长/m	土单元数量
$0.1D$	1.60	245290
$0.08D$	1.28	366700
$0.05D$	0.80	751830
$0.03D$	0.50	1898290

不同网格尺寸时桩靴下压阻力-下压深度的结果如图 5 所示。由图 5 可知, 网格尺寸为 $0.1D$ 时下压阻力振荡明显很难读取相应下压阻力数值。随着网格尺

寸减小, 下压阻力的振荡情况也随之减小, 当网格尺寸减小为 $0.05D$, $0.03D$ 时, 已无明显振荡。若进一步减小网格尺寸, 对减小振荡的效果已不明显, 不会进一步提高计算精度, 反而由于网格数量增大会影响计算效率。

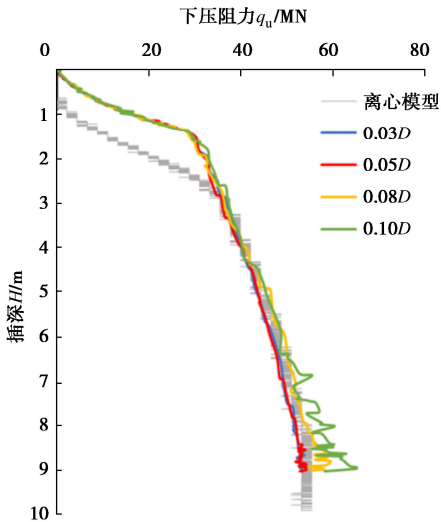


图 5 不同网格尺寸对桩靴下压阻力影响

Fig. 5 Effects of mesh size on penetration resistance

2.2 插桩速率 v 对结果的影响

通常在实际工程中, 因为钻井船下压过程并不是定速下压, 而是以调整压载水重量方式改变船体重量及桩腿载荷, 逐步下压桩靴至预定土层。此时的实际下压速率与土层性质和压载重量的改变率相关, 另外钻井船通常是由 3~4 条桩腿支撑, 下压过程也是各腿轮流下压, 因此钻井船插桩很难给出一个准确的插桩速率。在 CEL 模拟中可根据模拟需求选取合适的下压速率, 以能够满足分析精度要求。分别取插桩速率为 v 为 0.2, 0.5, 1, 2 m/s, 研究不同插桩速率下压阻力的变化, 如图 6 所示。

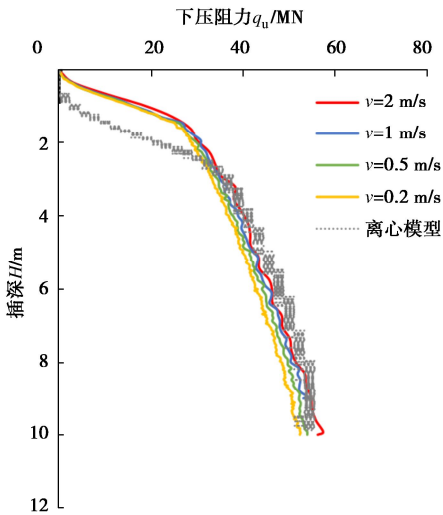


图 6 插桩速率对下压阻力影响

Fig. 6 Effects of penetration rate on penetration resistance

由图 6 可知, 随插桩速率增大, 桩靴下压阻力略有增加, 但与离心机模型试验结果对比, 均相差不大。插桩速率较大时, 下压阻力的曲线出现波动。这是由于插桩速率较大时, 桩靴周围土体具有一定的惯性效应^[18], 与实际插桩过程中准静态过程不符。若进一步减小贯入速率, 对下压阻力结果影响很小, 但会增加计算时间。

2.3 摩擦系数 f 对结果的影响

实际工程中桩靴与土体摩擦系数难以确定, 对于 CEL 方法模型, 桩靴与土接触通常采用基于罚函数的通用接触, 针对于黏性土中, 桩靴与黏土间的界面接触一般采用完全光滑或完全粗糙^[19-21]。为研究摩擦系数对下压阻力的影响, 将桩靴与土法向接触设置为硬接触, 切向设置摩擦系数 f 为 0 (光滑), 0.2, 0.45 的模型进行计算。下压阻力与摩擦系数关系结果见图 7。

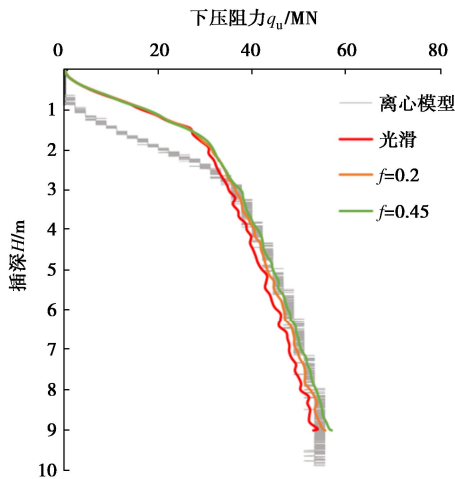


图 7 不同摩擦系数对下压阻力影响

Fig. 7 Effects of friction coefficient on penetration resistance

由图 7 可知, 桩靴下压阻力随摩擦系数增大, 但变化不明显。现有研究也表明^[22]桩靴-土间的摩擦系数对桩靴在黏土中的贯入阻力无明显影响, Qiu 等^[7]的研究也发现完全光滑和完全粗糙的计算结果相差仅为 5%。文献^[23]指出桩靴与土接触面摩擦系数主要影响桩靴周围土体的机动场形状, 进而影响土体塑性区大小和能量的耗散率。

2.4 侧压力系数 K_0 对结果的影响

模拟土体的有限元模型中, 需要在加载设置施加地应力分析步, 以平衡模型中地应力, 达到初始稳定状态, 避免对加载分析步中土体应力和位移结果的影响。CEL 方法中采用预定义场方式施加地应力, 即根据土体深度和重度, 计算得出竖向应力的数值, 直接赋予土体各单元, 同时要指定土体侧压力系数。其中土体侧压力系数 K_0 定义为侧向有效应力与竖向有效应力的比值 $K_0 = \sigma_x / \sigma_z$, 取值方法较多尚无明确标准,

可通过土体内摩擦角得到 $K_0 = 1 - \sin \phi$, 或依据土体超固结比 OCR 或塑性指数 I_p 确定。分别计算了 K_0 为 0.8, 0.9, 1.0 情况下的下压阻力。结果如图 8 所示。

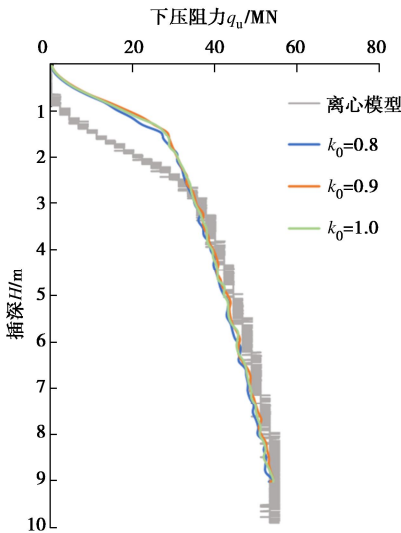


图 8 不同侧压力系数对下压阻力影响

Fig. 8 Effects of lateral pressure coefficient on penetration resistance

由图 8 可知, K_0 的值对下压阻力的结果影几乎无影响。因为在地应力分析步, 土体由于施加预应力场而产生的位移和应力变化较小, 与桩靴加载过程中的大位移和塑性变形相比可以忽略。

但本文在计算中 K_0 为 0.9 或 1.0 时地应力则较为稳定如图 9 所示, 而当 $K_0=0.8$ 时, 如图 10 所示 (半模型图), 地应力步加载约在 0.75 s 之后土体出现波动情况地应力步内土体应力始终无法达到平衡, 存在明显波动情况。

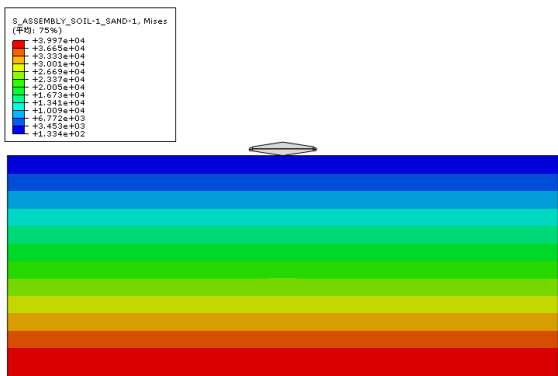


图 9 侧压力系数 $K_0=0.9$ 时地应力

Fig. 9 Geostresses when lateral pressure coefficient $K_0=0.9$

该波动情况无法通过加长地应力分析时间的方式消散, 若地应力步时间极短, 该波动情况也会在后续计算中出现。由于 CEL 方法中计算黏土时, 为了便于研究选取的是较为理想化的参数, 在莫尔-库仑本构中, 取内摩擦角 ϕ 为 0, 或者采用 Tresca 弹塑性本构

泊松比 μ 为0.49。因此可按照 $K_0=1-\sin\varphi$ 或中 $K_0=\mu/(1-\mu)$ 取值,否则 K_0 取值偏小,会造成地应力步中水平向的变形和应力不协调,计算求解过程中形成累计误差并无法消除。虽然该波动对桩靴插桩阻力结果影响不大,但若开展桩靴相关邻近土体和结构研究,该水平向波动则不可忽略。在理想化参数条件下建议黏土中取 $K_0=1$ [24]。

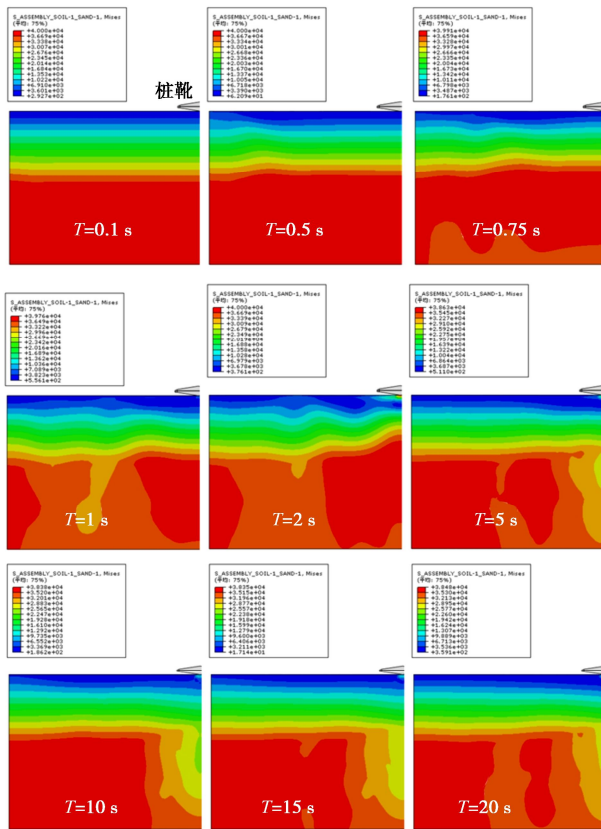


图 10 不同时间地应力的波动

Fig. 10 Vibration of geostress at different time

3 结 论

基于通过离心模型验证过的 CEL 方法,针对黏土中桩靴插桩问题进行数值模拟研究。并分析了网格尺寸,桩靴插桩速率 v ,筒土摩擦系数 μ ,侧压力系数 K_0 4 个在实际工程中不易取得的参数对计算结果的影响。

(1) 建立 CEL 方法的有限元模型,调整合适参数,可对离心模型试验较好模拟。

(2) 模型中最小网格尺寸越大,桩靴下压阻力结果容易出现振荡。网格尺寸较小时可提高计算精度。建议网格尺寸取为 0.05 倍桩靴直径。

(3) 桩靴插桩阻力随桩靴插桩速率增加,插桩速率增大会引起数值结果波动。建议取 0.5~1.0 m/s。

(4) 筒土摩擦系数 f 对计算结果影响较小,黏土

中可设置为光滑。

(5) 侧压力系数 K_0 对桩靴下压阻力影响较小。但应与其他土体参数协调,否则土体内发生应力波动,理想化的黏土中建议取 $K_0=1$ 。

参考文献:

- [1] SICILIANO R J, HAMILTON J M, MURFF J D, et al. Effect of jackup spud cans on piles[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, 1990.
- [2] CRAIG W H. Spud-can foundations: installation with deep penetration and subsequent removal[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 1998, 131(3): 146-151.
- [3] HOSSAIN M S, HU Y, RANDOLPH M F. Bearing behaviour of spudcan foundation on uniform clay during deep penetration[C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver, 2004.
- [4] XIE Y. Centrifuge Model Study on Spudcan-pile Interaction[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [5] QIU G, GRABE J. Numerical simulation of the deep penetration process of spudcans into sand overlying caly using the extended hypoplastic models[C]// International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, 2012.
- [6] QIU G, HENKE S, GRABE J. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(1): 30-39.
- [7] QIU G, HENKE S. Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay[J]. Marine Structures, 2011, 24(4): 528-550.
- [8] QIU G, GRABE J. Explicit modeling of cone and strip footing penetration under drained and undrained conditions using a visco-hypoplastic model[J]. geotechnik, 2011, 34(3): 205-217.
- [9] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6): 595-608.
- [10] HU P, WANG D, CASSIDY M J, et al. Predicting the resistance profile of a spudcan penetrating sand overlying clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(10): 1151-1164.
- [11] LEE K K. Investigation of Potential Spudcan Punch Through Failure on Sand Overlying Clay Soils[D]. Perth: The University of Western Australia, 2009.

- [12] 周 龙, 刘 润, 郭绍曾, 等. 桩靴连续贯入过程的动态模拟方法研究[J]. 地震工程学报, 2015, **37**(2): 460-466. (ZHOU Long, LIU Run, GUO Shaozeng, et al. A dynamic simulation method for continuous spudcan penetration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, **37**(2): 460-466. (in Chinese))
- [13] 王建华, 兰 斐. 钻井船插桩对邻近桩影响的耦合欧拉-拉格朗日有限元方法研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(4): 1127-1136. (WANG Jianhua, LAN Fei. A coupled Eulerian-Lagrange FEM method for analyzing the effects of spudcan penetration on an adjacent pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(4): 1127-1136. (in Chinese))
- [14] ZHANG H, LIU R, YUAN Y. et al. Numerical analysis of lateral behaviour of large-diameter monopile in saturated clay[C]// The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. Hawaii, 2019.
- [15] 冯加伟, 周立臣, 梁思颖. 钻井船插桩对海洋平台桩基影响的数值研究[J]. 中国海洋平台, 2022, **37**(1): 43-47, 83. (FENG Jiawei, ZHOU Lichen, LIANG Siying. Numerical study on influence of drilling ship piling on offshore platform pile foundation[J]. China Offshore Platform, 2022, **37**(1): 43-47, 83. (in Chinese))
- [16] 闫澍旺, 林 澍, 霍知亮, 等. 桶形基础液压下沉过程的耦合欧拉-拉格朗日有限元法分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 247-252. (YAN Shuwang, LIN Shu, HUO Zhiliang, et al. Coupled Eulerian-Lagrangian finite element analysis of suction caisson penetration processes under hydraulic pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(1): 247-252. (in Chinese))
- [17] 郝心童, 李书兆, 李 伟, 等. 黏土中大直径钢圆筒在桩靴贯入时的稳定性研究 [J/OL]. 工程力学, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0428. 1-10. (HAO Xintong, LI Shuzhao, LI Wei, et al. Study on Stability of Large-Diameter Steel Cylinder During Spudcan Penetration[J/OL]. Engineering Mechanics, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0428. (in Chinese))
- [18] 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. (in Chinese))
- [19] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F, HU Y, et al. Cavity stability and bearing capacity of spudcan foundations on clay[C]// Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA. Offshore Technology Conference, 2006: OTC-17770.
- [20] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, **12**(1): 64-73.
- [21] YI J T, HUANG L Y, LI D Q, et al. A large-deformation random finite-element study: failure mechanism and bearing capacity of spudcan in a spatially varying clayey seabed[J]. Géotechnique, 2020, **70**(5): 392-405.
- [22] ZHENG J B, HOSSAIN M S, WANG D. Estimating spudcan penetration resistance in stiff-soft-stiff clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(3): 04018001.
- [23] 李大勇, 王召龙, 吴宇旗. 均质黏土中桩靴基础贯入阻力系数 N_c 的解析解 [J/OL]. 工程力学, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.11.0930. (LI Dayong, WANG Zhaolong, WU Yuqi. Analytical solution of resistance factor n_c for spudcan foundation penetrating into uniform undrained Clay[J/OL]. Engineering Mechanics, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.11.0930. (in Chinese))
- [24] 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. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)