

# 新型多筒桩靴基础贯入过程有限元分析

赵 德, 谢立全

同济大学, 土木工程学院, 上海

收稿日期: 2022年2月23日; 录用日期: 2022年3月15日; 发布日期: 2022年3月22日

## 摘 要

为探究自升式海洋钻井平台安装中新型的桩靴基础形式的结构影响, 本文用CEL模拟方法对3种不同形式桩靴基础在贯入海底地基的过程进行模拟, 结果表明: 在桩靴基础的竖向贯入阻力上, 贯入2倍桩靴直径深度时单筒型桩靴为传统型桩靴的1.89倍, 新型多筒桩靴基础的承载力略高于传统型且更稳定。贯入过程中单筒型桩靴和新型多筒桩靴的下方筒型结构产生了更多土塞区域, 从而形成大于传统型桩靴的土体位移竖向集中, 有更优的工程理论表现。等效塑性应变云图表明3种桩靴基础在水平方向上的土体影响范围约为桩靴直径1.86倍, 在竖直方向上新型多筒桩靴和单筒型桩靴较传统型桩靴挤压效应更明显; 最大塑性应变处均在桩靴四周边缘, 新型多筒桩靴和传统型桩靴有相似的挤压土体方向角度。

## 关键词

桩靴基础, CEL, 贯入阻力, 大变形分析, 塑性应变

# Numerical Analysis of Penetration of Novel Multi-Buckets Spudcan

De Zhao, Liquan Xie

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Mar. 15<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2022

## Abstract

In order to explore the structural influence of the form of novel spudcans in jack up rigs installation, the CEL method is used to simulate the process of three spudcans penetrating into the subsea foundation. On the vertical bearing capacity of spudcan, single-bucket spudcan is 1.89 times of

general spudcan when penetration depth is 2 times of spudcan diameter, and the bearing capacity of novel multi-buckets spudcan is slightly higher and more stable than general spudcan. The bucket structures of single-bucket spudcan and novel multi-buckets spudcan generate more soil plug areas during penetration, which results in vertical concentration of displacement of soil body larger than general spudcan, and has better engineering theoretical performance. The equivalent plastic contours indicate that the soil affected by the three types of pile shoe foundations in the horizontal direction is about 1.86 times the diameter of the pile shoe, and the new multi-buckets spudcan and single-bucket spudcan in the vertical direction are more obvious than the general spudcan squeezing effect. The maximum plastic strain is around the edge of spudcan, and the novel multi-buckets spudcan and general spudcan have similar compression direction angles.

## Keywords

Spudcan, CEL, Penetration, Large Deformation Analyses, PEEQ

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自升式钻井平台是海洋工程领域最重要的设备机械之一, 因其有着安装便利性和经济效益高的特点而被广泛应用于近海勘探油气资源等重大海洋项目。海洋里的海床地基常有上硬下软的土层结构, 桩靴基础易发生突然穿透上层硬土层进入下卧软弱层的穿刺破坏, 严重时会造成整个上层平台的倒塌或者倾覆失稳[1]。传统型桩靴基础截面形状为纺锤型, 筒型桩靴由于承载力强, 在穿刺破坏上有更优的表现, 近年来受到了更多的关注和研究。同时一些新型的桩靴基础形式被设计出来去解决工程安装的问题, 所以对于不同新型的桩靴基础在贯入过程中的影响情况进行研究有重要意义[2]。

吴曲楠等[3]采用 CEL 方法建立有限元模型, 对比模型试验和数值模拟数据, 研究了筒型桩靴在贯入过程的速度和阻力影响; Hossain 等[4]通过一系列离心机试验, 并和大变形有限元分析模拟对比, 表明筒型桩靴减少了有效砂层的厚度, 显著减轻了穿刺破坏风险; 周龙等[5]用 CEL 模拟分析桩靴在连续贯入时的速度响应和临近桩影响。陈昌哲等[6]对 3 种桩靴原型在不同水深下的水动力影响情况进行数值分析。本文研究内容可为自升式钻进平台的桩靴桩腿安装工程提供新的参考方案。

## 2. 筒型桩靴基础贯入过程的仿真模拟

### 2.1. CEL 模拟方法

对于基础贯入问题的研究, 实际工程中贯入桩靴基础是一个动态连续过程, 海底的地基在自升式钻井平台连续的荷载作用下产生塑性破坏。桩靴基础的贯入模拟是大变形过程, 因此本文采用耦合欧拉-拉格朗日方法 CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) 进行三维有限元分析[7]。在 CEL 方法中, 土体为欧拉体, 欧拉法认为空间和材料是离散的, 计算过程中网格单元的形状、大小位置保持不变, 允许材料在其中流动通过[8]。桩靴基础结构为拉格朗日体, 拉格朗日法认为材料和网格呈绑定状态, 这样能准确的得到桩靴结构应力应变的反馈响应。因此 CEL 方法适用于流固耦合和大变形的仿真, 可以很好地拟合本试验桩靴基础贯入的过程。欧拉材料体积分数 EVF (Eulerian Volume Fraction) 可以用来控制计算欧拉材料被填充的程度,  $EVF = 1$  表示材料完全填充,  $EVF = 0$  表示网格内无材料填充。

## 2.2. 桩靴基础及土体模型

本试验中, 地基区域和多种桩靴基础的有限元模型见图 1 所示。地基土体为深蓝色的长方体区域, 划分为两部分, 图 1 中上层为预留空腔, 允许土体材料流动被挤出到上层,  $EVF = 0$ , 下层为土体区域,  $EVF = 1$ 。为消除边界效应影响, 地基长、宽的尺寸为 6 倍桩靴直径, 深度为 6 倍桩靴高度。

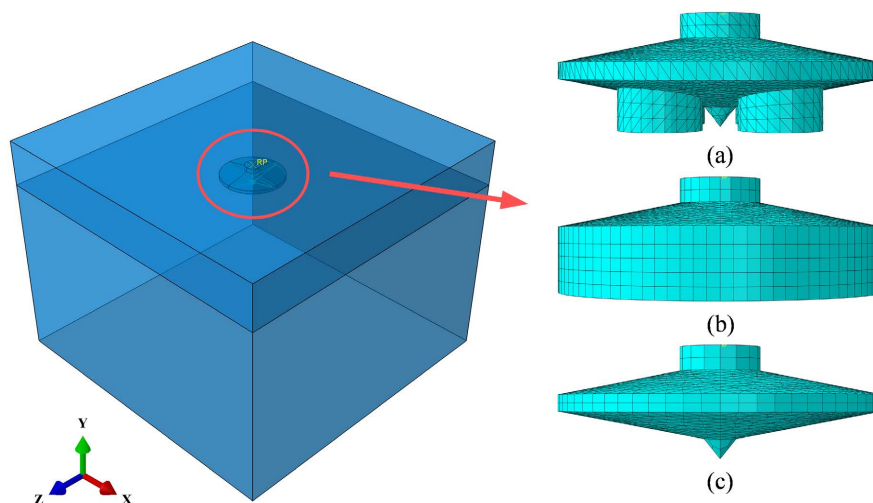


Figure 1. Foundation soils and three spudcan finite element models  
图 1. 地基土体和 3 种桩靴基础有限元模型

图 1 中展示了 3 种桩靴基础形式的网格划分图, 其中图 1(a)为新型多筒桩靴、图 1(b)为单筒型桩靴、图 1(c)为传统型桩靴, 每个桩靴模型设置参考点 RP (Reference Point)在顶部连接桩腿的圆柱体圆心处, 通过创建约束使桩靴基础整体被视为刚体, 桩靴基础被放置在两层土体欧拉体的中心位置, 初始位置为桩靴基础圆盘底面刚好接触下层土体, 同时通过对参考点 RP 施加位移来模拟贯入过程, 贯入总深度为 2 倍桩靴直径。

## 2.3. 数值合理性验证

本次有限元模拟试验的工况主要对于 3 种形式的桩靴基础在贯入过程中的表现进行横向对比, 为验证数值参数准确性, 选取模型与实际尺寸比 1:500 的多筒型桩靴基础, 进行竖直贯入砂土试验, 将模型试验与数值模拟的贯入阻力结果对比, 在其他加载条件相同的情况下, 在贯入深度为 0~1 倍桩靴直径时, 贯入阻力平均偏差值为 13%, 无量纲化数据结果吻合较好。此时土体模型参数类型为砂质粉土, 具体的参数取值见表 1。

Table 1. Parameters of soil  
表 1. 土体参数表

土的名称	有效重度 $\gamma'$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\varphi$ /°	黏聚力 $c$ /kPa
砂质粉土	9.1	10	0.23	21	8

## 2.4. 模拟桩靴贯入过程

本有限元分析的 3 种形式桩靴基础模型主体尺寸大致相同, 尺寸标注见图 2。需要指出, 贯入深度  $d$

统一位置在最大直径底端, 3 种形式有着相同的桩靴最大直径  $D$ 、最大直径底部至桩靴底端距离  $h$ 。新型多筒桩靴基础的小筒结构有 4 个, 小筒直径为  $D_0$ 。

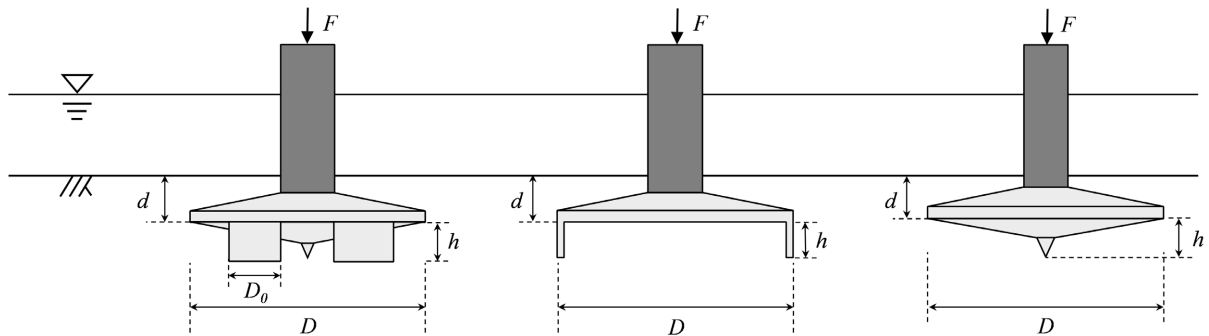


Figure 2. Three spudcan penetration schematics

图 2. 3 种桩靴基础贯入示意图

### 3. 数值模拟计算分析

#### 3.1. 贯入阻力分析

自升式钻井平台需要通过贯入桩靴至海底来提供所需承载力且在寿命期间经常需要重新变更地址, 因此插桩过程中桩靴基础收到土体传导的竖向贯入阻力是关键工程因素[9]。在分析不同形式桩靴基础贯入过程时, 计算相同工况下插桩的竖向贯入阻力, 所得新型多筒桩靴、单筒桩靴和传统型桩靴的竖向贯入阻力  $V$  随贯入深度  $d/D$  的变化情况如图 3。

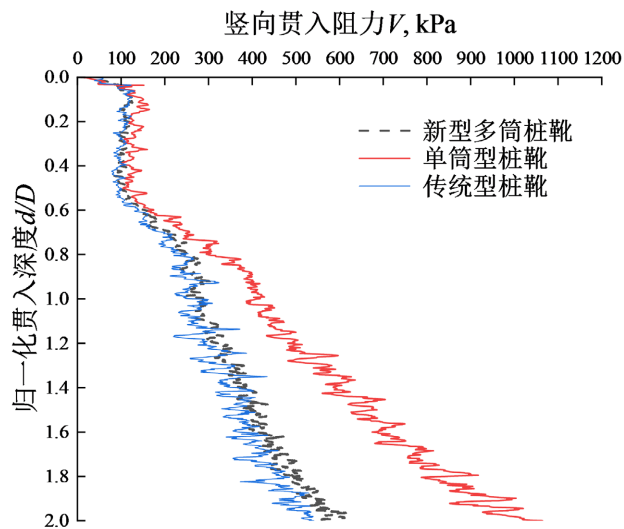


Figure 3. Spudcan penetration resistance curve

图 3. 桩靴基础贯入阻力曲线

从图 3 可看出, 3 种不同形式桩靴基础的竖向贯入阻力  $V$  均随相对贯入深度呈增加趋势, 3 种桩靴基础在贯入深度为 0.6 倍桩靴直径时的竖向贯入阻力相差不多, 其中单筒型桩靴在贯入更深深度时承载力大大超过传统型桩靴基础, 新型多筒桩靴略高于传统型桩靴, 在 2 倍桩靴直径贯入深度时, 单筒型桩靴的竖向贯入阻力  $V$  为传统型桩靴的 1.89 倍, 意味着单筒型桩靴的承载力有很大优势。同时可以看出, 新

型多筒桩靴的承载力变化平均浮动情况要小于传统型桩靴和单筒型桩靴, 表明新型多筒桩靴在贯入时传导的承载力有更加稳定的特点。

### 3.2. 土体变形位移矢量

工程中海洋地质较复杂, 对贯入时的桩靴附近土体位移变形情况的研究有很高重要性, 选取贯入过程中贯入深度为 1 倍桩靴直径时的中心纵剖面土体位移情况进行分析, 土体位移矢量图见图 3。

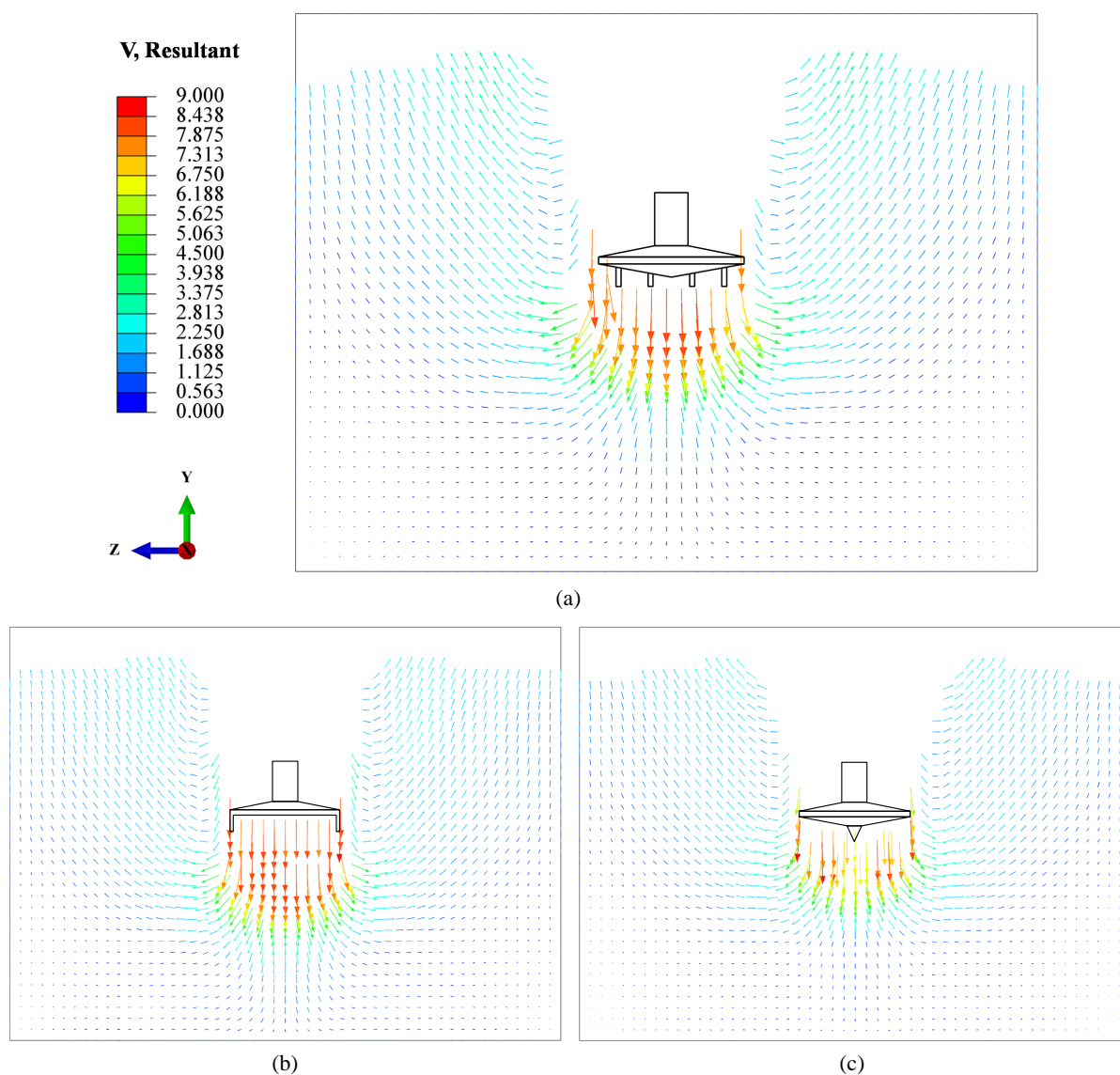


Figure 4. Vector map of soil position displacement during spudcan penetration

图 4. 桩靴基础贯入过程土体位移矢量图

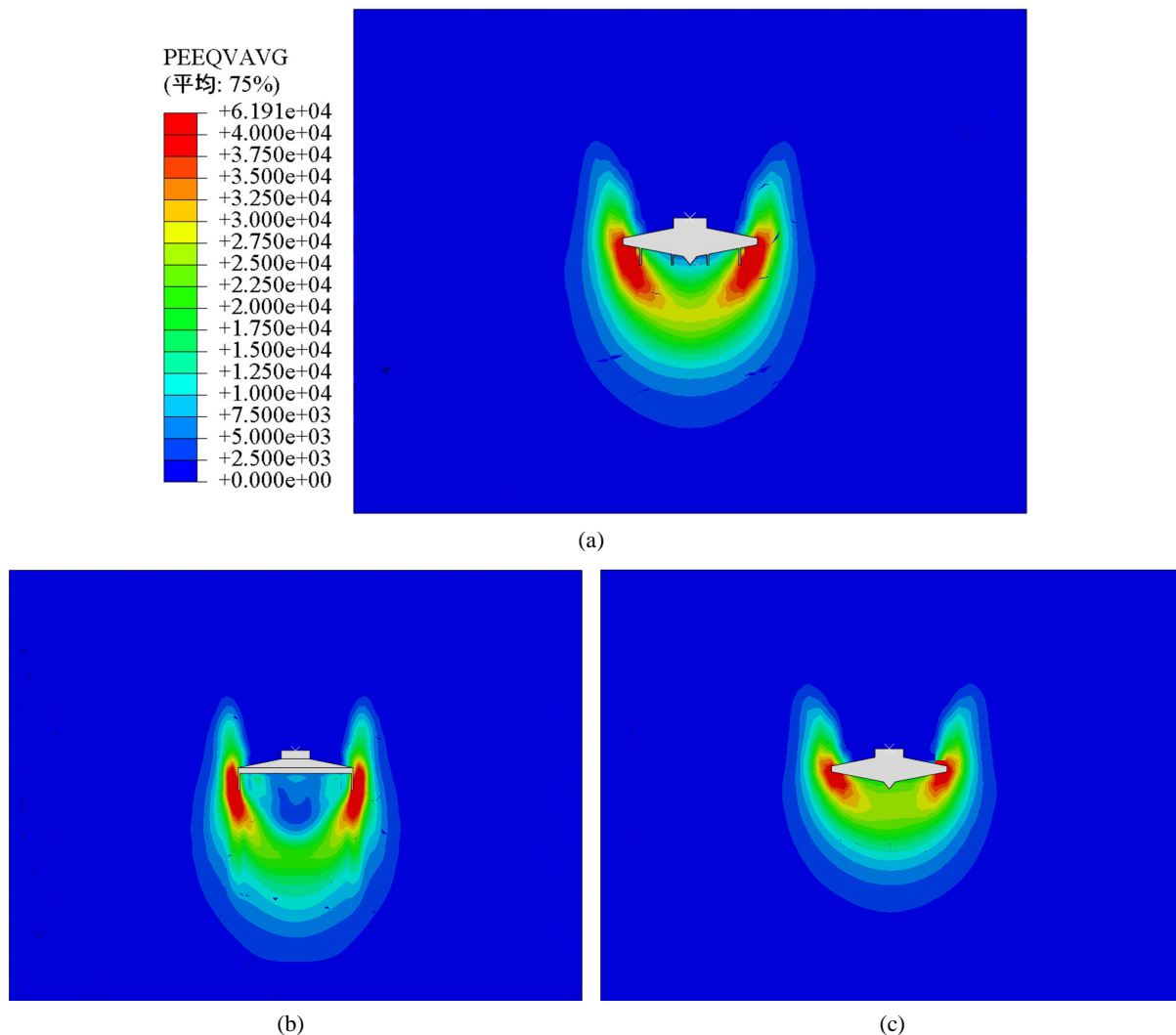
从图 4 中可看出桩靴基础下方土体位移均有集中, 并向下方和两侧传递, 甚至形成部分环形流动回到土体上层。关注桩靴基础下方位移速度大小, 可发现土体位移聚集程度单筒型桩靴和新型多筒桩靴要大于传统型桩靴。其中单筒型和新型多筒由于下方的筒型结构形成了更多土塞区域, 土塞随着桩靴基础一同向下运动, 因而产生了土体位移的集中。而传统型桩靴则主要将土体向下方的两侧排开, 使土体位

移的速度聚集更快的消散且没有形成规模的土塞效应。

根据桩靴贯入时的破坏理论, 常规破坏模式主要指桩靴将下方土体排开到两侧, 而土塞破坏模式是指砂土层直接发生垂直剪切破坏, 未排向两侧。两种模式的贯入阻力变化不同, 土塞破坏会在同一深度下有更高的阻力和承载力表现。在贯入时的土体位移矢量图结果来看, 新型多筒桩靴和单筒桩靴在贯入过程中有明显的土塞破坏倾向, 且能提供更高的承载力。

### 3.3. 等效塑性应变

海底地基在贯入的连续荷载作用下产生塑性破坏, 有限元模拟中 PEEQ 是表示土体内部已经产生的等效塑性应变, 用来判断桩靴贯入过程中产生的土体扰动和破坏范围。图 5 为本文 3 个研究桩靴模型对象在相同贯入深度时周围土体的等效塑性云图[10]。



**Figure 5.** The equivalent plastic contours of soil  
**图 5.** 等效塑性应变云图

图 5(a)新型多筒桩靴和图 5(b)单筒型桩靴的土体扰动范围要略大于图 5(c)的传统型桩靴。由图可知在桩靴周围水平方向上, 3 种桩靴基础的土体影响范围相差不大, 贯入 1 倍桩靴直径深度时, 影响宽度均



约为桩靴最大直径的 1.86 倍;但是在竖直方向上挤压效应明显,新型多筒桩靴和单筒型桩靴要大于传统型桩靴,新型多筒桩靴影响深度约为传统型的 1.43 倍,单筒型桩靴约为传统型的 1.85 倍。同时最大塑性应变(深红颜色)处均在桩靴四周边缘,新型多筒桩靴和传统型桩靴挤压土体方向与水平面呈一定角度,与桩靴基础水平面形成较稳定三角形,而单筒型桩靴则沿单筒筒壁垂直向下,所以新型多筒桩靴在增大影响土体范围基础上保留了部分传统型桩靴基础的特点。

#### 4. 结论

为探究自升式海洋钻井平台安装时的桩靴基础结构形式的影响,本文用 CEL 动态模拟方法对 3 种不同形式的桩靴基础在贯入海底地基的过程进行模拟,结果表明:

1) 3 种形式桩靴基础的竖向贯入阻力  $V$  均随相对贯入深度呈增加趋势,2 倍桩靴直径深度时单筒型桩靴的承载力为传统型桩靴的 1.89 倍,新型多筒桩靴基础的承载力略高于传统型且更稳定。

2) 贯入过程中桩靴基础周围土体位移下方和两侧传递,其中单筒型和新型多筒由于下方的筒型结构形成了更多土塞区域产生了大于传统型桩靴的土体位移竖向集中,有更优的工程理论表现。

3) 等效塑性应变云图表明 3 种桩靴基础在水平方向上的土体影响范围相似,均约为桩靴直径 1.86 倍,但在竖直方向上新型多筒桩靴和单筒型桩靴挤压效应明显;同时最大塑性应变处均在桩靴四周边缘,新型多筒桩靴在增大影响土体范围基础上有与传统型桩靴基础相似的挤压土体方向角度。

#### 参考文献

- [1] 杨波, 邓欣, 崔泽昊, 等. 基于 CEL 分析方法的移动式平台插桩阻力[J]. 船舶工程, 2021, 43(S1): 453-456.
- [2] 张浦阳, 丁红岩. 海上自升式钻井平台新型筒型桩靴承载力[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 237-242.
- [3] 吴曲楠, 刘润, 张海洋, 等. 筒型桩靴在饱和砂土中的贯入阻力研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1183-1190.
- [4] Hossain, M.-S., Hu, Y. and Ekaputra, D. (2014) Skirted Foundation to Mitigate Spudcan Punch-Through on Sand-Over-Clay. *Géotechnique*, **64**, 333-340. <https://doi.org/10.1680/geot.13.T.027>
- [5] 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.
- [6] 陈昌哲, 吴静萍, 陶开友. 浅水与桩靴对海上平台水动力影响的数值模拟[J]. 船海工程, 2019, 48(4): 117-121.
- [7] 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.
- [8] 张浦阳. 海上自升式钻井平台插/拔桩机理及新型桩靴静/动承载力研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2009.
- [9] 付丽娜. 自升式钻井船桩靴承载能力研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2008.
- [10] 潘启洋. 非均质成层粘土中自升式平台桩靴基础的贯入研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.