

DOI: 10.11779/CJGE20230340

考虑土塞效应的开口管桩沉桩与承载全过程离散元分析

李立辰¹, 刘卓¹, 刘浩¹, 吴文兵^{*1}, 罗仑博², 蒋国盛¹, 梅国雄^{1,3}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101100; 3. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 开口管桩贯入过程中会产生复杂的土塞效应, 显著影响管桩的沉桩过程与承载特性。考虑到试验方法成本高、周期长、且难以直观反映土塞与管桩的相互作用特性, 基于离散元方法开展砂土地基中静压开口管桩沉桩与承载全过程模拟分析。基于室内试验数据对离散元模型参数进行标定, 并采用周期性单元复制法生成均质且应力沿深度线性分布的地基模型。基于土体变形特征, 揭示管桩中土塞的主动拱与被动拱分布特征。进一步地, 结合土塞参数的演化规律, 得出土塞增长率(IFR)对土塞状态变化更为敏感, 且土塞阻力的发挥趋势与IFR值变化趋势有较高的相似性。基于管桩静载试验模拟, 得出静载下开口管桩呈完全闭塞状态, 土塞的荷载-位移响应呈弹塑性, 并最终建立考虑CPT锥尖阻力、土塞效应、管桩尺寸的静压开口管桩桩端阻力经验计算公式。本文研究成果揭示了土塞的形成演化过程与承载机制, 对于考虑土塞效应的开口管桩沉桩阻力预测与承载力计算具有一定参考价值。

关键词: 开口管桩; 土塞效应; 离散元法; 桩端阻力

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)07-1471-10

作者简介: 李立辰(1994—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事桩基工程理论与技术方面的教学与科研工作。E-mail: 20121003645@cug.edu.cn。

DEM analysis of installation and bearing process of open-ended piles considering plugging effects

LI Lichen¹, LIU Zhuo¹, LIU Hao¹, WU Wenbing¹, LUO Lunbo², JIANG Guosheng¹, MEI Guoxiong^{1,3}

(1. Faculty of Engineering, Engineering Research Centre of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 101100, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: The penetration process of open-ended piles will cause complex plugging effects, which further influence the installation and bearing characteristics of piles. Considering the high cost, long period and limitations in reflecting the interaction between piles and soil plugs of the traditional experimental approach, the jacking installation and subsequent loading process of open-ended piles in sand are simulated based on the discrete element method (DEM). The periodic cell replication method is used to generate a homogeneous foundation sample with linear stress distribution. Based on the analysis of the soil deformation characteristics, the characteristics of the active arch and passive arch distribution of the soil plugs are revealed. Based on the analysis of the evolution of soil plugging parameters and plug bearing characteristics, it is found that the incremental filling ratio (IFR) is more sensitive to the plug behavior, and the development of plug resistance shows good consistency with the trend of the IFR value. Also, the open-ended piles are in the fully plugged mode under the static loads, and the load-displacement response of soil plugs is elastic-plastic. Finally, the method for calculating the end bearing capacity of open-ended jacked piles is established by considering the CPT cone resistances, plugging effects and pile size effects. The above results reveal the evolution process and bearing mechanism of soil plugs and can provide reference value for the prediction of installation resistance and calculation of bearing capacity of open-ended piles considering soil plugging effects.

Key words: open-ended pile; plugging effect; discrete element method; end bearing capacity

0 引言

管桩因其承载力高、施工便捷、运输方便等优势被广泛应用于各类构筑物基础的建设中^[1]。开口管桩

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178371, 52308383); 湖北省自然科学基金青年项目(2023AFB008); 中国博士后科学基金面上项目(2022M712964)

收稿日期: 2023-04-19

*通信作者(E-mail: zjuwub1126@163.com)

表 1 UWA 硅质砂及其等效离散砂样参数
Table 1 Properties of UWA superfine sand and its DEM analogue

参数	G_s	颗粒尺寸/mm			C_u	C_c	$\phi'_{cs}/(^{\circ})$
		d_{10}	d_{50}	d_{60}			
试验值	2.67	0.12	0.18	0.20	1.67	1.020	33
模拟值	2.67	1.80	2.70	3.00	1.67	0.975	32

注： ϕ'_{cs} 为极限状态摩擦角， C_u 、 C_c 分别为不均匀系数和曲率系数。

在沉桩过程中，桩端部分土体会被挤入桩内形成土塞。由于桩体尺寸、沉桩方式、土体性质等因素的影响，开口管桩会呈现完全闭塞，部分闭塞和完全非闭塞的状态^[2]。土塞状态的改变会对管桩沉桩阻力和承载特性产生极大影响^[3-4]。

目前，对开口管桩中土塞效应的研究主要包括理论、试验和数值模拟 3 个方面。在理论研究方面，Randolph 等^[5]基于土塞单元的静力平衡方程，求解了土塞中有效应力分布特征，建立了考虑土塞参数和加载速率的土塞承载力计算方程。郑俊杰等^[6]基于圆孔扩张理论分析了管桩沉桩过程中土塞效应和挤土效应的相互作用特性。刘润等^[7]考虑动力打桩过程中土塞所受的惯性力作用，提出了考虑惯性力影响的土塞拟静力平衡分析法。上述模型为土塞与管桩的相互作用分析提供了重要理论参考，但本质上仍是基于静力平衡方程，无法真实反映土塞与管桩的真实作用特征。试验是揭示桩土相互作用机理最可靠的手段^[8-9]。然而由于管桩特殊的结构形式与施工扰动，无法通过应变片等手段对桩身各部分阻力进行区分，因此，多是在闭口管桩阻力计算公式的基础上引入经验系数来反映开口管桩的承载特性^[9-10]。随着内外双壁管桩^[9, 11]的出现，对土塞阻力的测量成为可能，这也进一步加深了土塞效应对管桩沉桩阻力与承载特性影响的认识；此外，粒子图像测速技术（particle image velocimetry）^[12]、CT 扫描技术^[13]等新技术也被成功应用于土塞形成与演化机理的研究中。然而，上述技术手段成本高、尺寸受限，且难以模拟不同工况下，因此需要更为高效合理的手段对试验结果进行补充。近年来，考虑颗粒散体特性的离散元数值模拟方法被广泛应用于土塞效应的研究中^[14-15]。周健等^[14]基于半桩模型试验和离散元模拟，对砂土地基中静压管桩的沉桩过程进行了模拟，将土塞形成过程分为：初始阶段，主动拱形成阶段，被动拱形成阶段。Li 等^[15]基于离散元方法，分析了不同沉桩方式下土塞的演化过程，建立了桩侧土-管桩-土塞相互作用模型。上述数值模拟工作极大丰富了对管桩成塞机制的认识，但主要关注于土塞本身的形成与演化机理，土塞效应如何影响管桩的沉桩过程以及承载力发挥仍需深入研究。

本文拟采用离散元方法对砂土地基中静压开口管桩的沉桩与承载全过程进行研究。从宏观细观角度出发，基于土体变形特性、土塞参数发展规律、贯入阻力等内容的分析，明确土塞对管桩沉桩阻力和承载特性发挥的影响，建立考虑土塞效应的管桩承载特性计算方法。

1 数值模型建立

离散元方法的基本原理是将散体颗粒简化为圆盘（二维）或者球（三维），基于牛顿第二定律和接触力-相对位移关系，通过对颗粒间赋予接触参数对散体材料的宏观物理力学行为进行模拟^[16-17]。

1.1 模型参数标定

西澳大学（UWA）硅质砂是一种颗粒形状接近亚圆形到压棱角形的商业用砂，其基本物理力学性质已经过系统标定，因此在岩土工程模型试验与数值模拟研究中得到了广泛应用^[15, 18]。本文以 UWA 硅质砂为标定对象开展后续离散元模拟，其基本物理力学性质见表 1。为充分考虑计算效率与模拟准确性，依据实际砂样颗粒集配曲线放大 15 倍后生成等效的离散砂样模型。

离散元模型中，土体颗粒通常采用标准的圆形（二维）或球体（三维），难以反映实际颗粒间的咬合与胶结作用，导致颗粒产生过量转动并低估土体强度^[15]。为了反映不规则砂样间的接触特征，本文采用滚动阻力线性模型（rolling resistance linear model），通过在颗粒接触间施加扭矩来更好地模拟颗粒接触间的滚动摩擦特性^[19-20]。确定颗粒尺寸与接触模型后，开展数值砂样的柔性膜双轴压缩试验，并基于 UWA 砂样应力-应变关系进行数值模型参数选取及有效性验证，见图 1。可以看出，数值模拟结果与试验结果在峰值强度和残余强度阶段能很好地吻合，基本能反映出中密到密实砂样的剪切特性。本次数值模拟中颗粒参数见表 2。

1.2 地基模型生成

高效地生成均质且应力沿深度均匀分布的地基模型是进行管桩沉桩过程模拟的前提。本文采用周期性单元复制法（periodic cell replication method）^[15, 21]进行地基模型的生成。其基本原理是选择一定尺寸的表

表 2 离散元模型参数
Table 2 Parameters for discrete model

地基土样								墙		桩				
$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	μ	γ	μ_r	β_n	β_s	M_d	$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	μ_w	$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	μ_p	
1×10^8	2×10^7	0.5	0.1	0.45	0.1	0.1	3	1×10^{10}	1×10^{10}	0	1.5×10^9	1.5×10^9	0.5	

注: k_n , k_s 分别为法向刚度和剪切刚度; μ 为摩擦系数; γ 为阻尼比; μ_r 为滚动摩擦系数; β_n 为法向极限阻尼比; β_s 为剪切极限阻尼比; M_d 为黏壶模式; μ_w 为墙摩擦系数; μ_p 为桩摩擦系数。

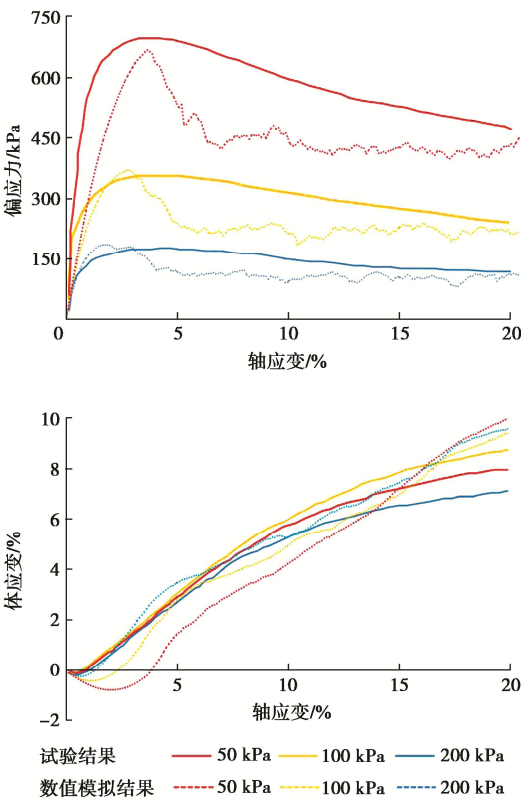


图 1 应力应变曲线标定结果
Fig. 1 Calibrated results of stress-strain response

征单元体 (REV) 作为地基的基本单元, 通过对 REV 在空间进行组合形成大尺寸的地基模型。由于 REV 已在相应围压下达到平衡, 因此, 地基模型在重力作用下能快速达到平衡。

为了提高计算效率并模拟现场情况, 本次模拟在 10 倍重力加速度下开展, 生成了如图 2 所示的地基模型, 其宽约 15.6 m, 高约 13 m, 颗粒总数为 356976。进一步地, 将达到平衡状态的地基土体颗粒接触力链分布情况进行提取并绘制于图 2 左侧, 可以看出, 土体颗粒接触力链基本呈线性分布, 且力链粗细随深度的增加而增加, 这与实际土体中应力状态分布特征基本相符。为了进一步验证数值模型的有效性, 在地基土内不同位置设置测量圆对达到平衡状态时土体参数进行提取, 见图 3。可以看出, 地基土体应力随深度基本呈线性分布, 且孔隙率随深度波动较小, 可以认为, 生成的地基土体模型分布均匀, 且应力状态稳定, 能满足后续管桩贯入过程模拟的要求。

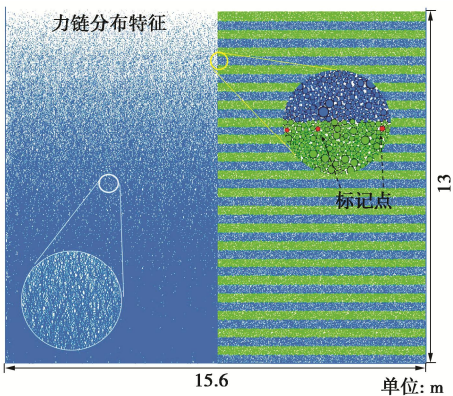


图 2 地基模型示意图
Fig. 2 Schematic view of soil foundation

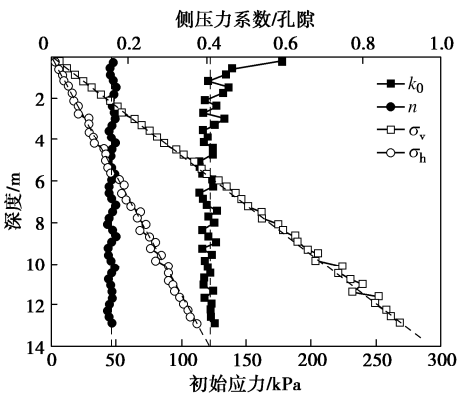


图 3 初始平衡状态下地基参数沿深度分布特征
Fig. 3 Distribution of foundation parameters at balance

1.3 数值试验安排

本次模拟采用墙单元生成 3 组模型桩 (P1, P2, P3), 外径 D 分别为 0.5, 0.7, 1.0 m, 壁厚统一设置为 10 cm。模型桩沿地基中轴线贯入, 贯入深度为 6 m。对于直径最大的 P3, 桩壁距地基模型边缘的距离约为 $7D$, 而对于直径最小的 P1, 其桩径约为 $35d_{50}$, 结合数值模型结果可以得出, 本次管桩贯入过程模拟的边界效应和尺寸效应可以忽略^[20, 22]。

本次模拟中管桩的沉桩过程采用静压的方式实现, 宏观贯入速度为 2 m/s。沉桩过程中, 离散元模型计算时步约为 8×10^{-6} s, 对应数值模型中的贯入速度约为 1.6×10^{-4} mm 每个 dt , 与 Zhang 等^[20]和 Ciantia 等^[21]离散元模型中管桩贯入速度接近。图 4 展示了 P2 桩在不同贯入速度时沉桩阻力的发展特征。可以看出,

在上述速度范围内, 沉桩阻力差异不大。但本模型中, 当以 4 m/s 速度贯入 6 m 深度时计算时间约为 36 h, 当以 1 m/s 速度贯入 6 m 深度时计算时间约为一周。因此, 基于模拟效率与准确性的要求, 模拟中管桩沉桩速度定为 2 m/s。需要指出的是, 由于孔隙水压力模拟的复杂性, 模型中并未考虑地下水的影响。

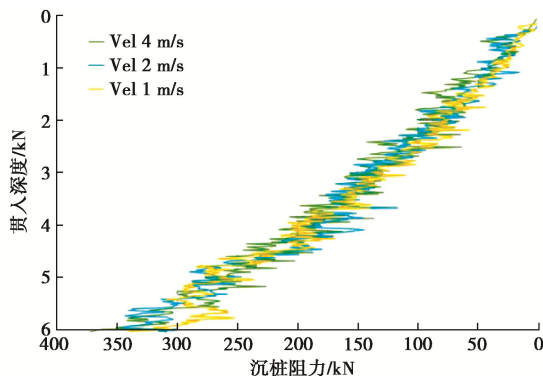


图 4 不同贯入速度下 P2 沉桩总阻力发展特征

Fig. 4 Development of installation resistance for P2 under different penetration speeds

贯入到预定深度后, 对模型桩进行卸载并对离散元模型进行循环至稳定, 随后开展管桩的承载过程模拟。考虑到管桩承载过程的准静态特性, 同样采用位移加载的方式进行管桩承载过程的模拟^[23], 贯入速度为 0.1 m/s, 贯入深度 50 cm。

2 管桩沉桩过程模拟结果

2.1 桩周土体变形特征

为了直观分析沉桩过程对桩周土体变形特征的影响, 模型桩贯入前对地基土体进行分层染色。图 5 展示了模型桩沉桩结束时桩周土体的变形特征。可以看出, 管桩沉桩过程对桩周土体产生了显著扰动, 且不同尺寸模型桩中出现了不同程度的成塞现象。对于 P1, 桩周内外侧土体产生了显著剪切, 且桩端土体产生了显著扰动, 表明 P1 产生了成塞现象。对于 P2, 桩内侧土由于桩身的摩擦, 形成了上凸的主动拱, 而桩端处出现了清晰的下凹被动拱。随着桩径的增大, 桩中土塞高度越高, 土塞效应也越弱。

为了从细观角度对土塞的形成过程进行分析, 选取桩端下部不同深度处 (2, 4, 6 m) 颗粒作为标记点, 记录管桩沉桩过程中标记点颗粒相对于桩端的位置变化, 如图 6。对于 P1, 随着管桩的贯入, 初始时在桩端下 2 m 的颗粒被挤入桩中, 且挤入后相对位置变化量显著减小。对于初始位置在桩端下 4 m 的颗粒, 随着管桩的贯入, 颗粒逐渐接近桩端, 但并未被挤入桩中, 而是在距桩端约 1 m 位置处出现靠近桩中的运

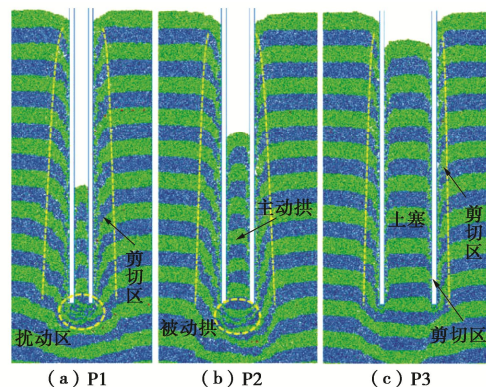
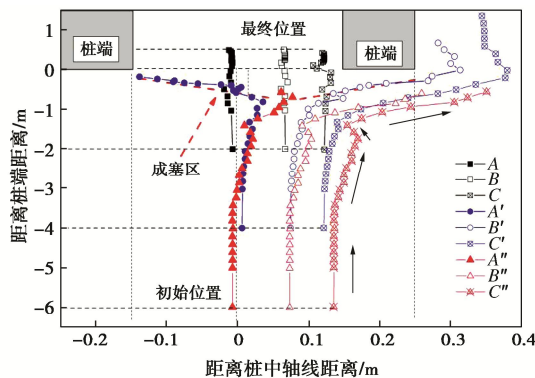
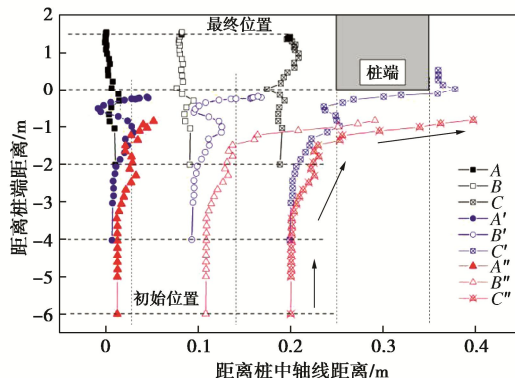


图 5 沉桩结束时桩周土体变形特征

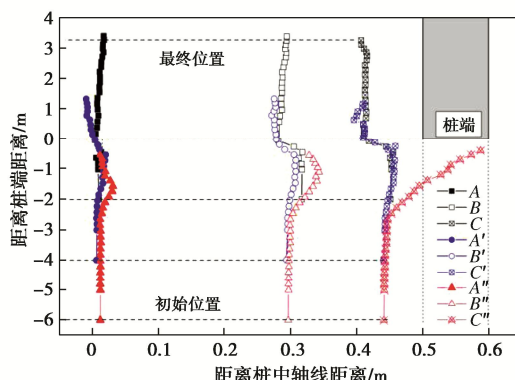
Fig. 5 Soil deformations around piles at the end of pile installation



(a) P1



(b) P2



(c) P3

图 6 沉桩过程中桩端土体运移轨迹特征

Fig. 6 Particle movements relative to pile tip during pile Installation

动趋势, 随后被挤出桩外, 这样表明土塞效应逐渐显现。对于初始位置在桩端下 4 m 的颗粒, 其初始时相对桩端无明显水平位移, 随后呈现往桩外运移的趋势。对于 P2, 颗粒总体的运移特征与 P1 中相同, 且对于初始时在桩端下 4 m 和 6 m 的颗粒, 出现了更为明显的外-内-外运动轨迹。随着桩径的进一步增大, 土塞效应逐渐减弱, 颗粒的水平位移减小, 更多的颗粒被挤入桩中。

2.2 土塞效应分析

土塞率 (plug length ratio, PLR) 和土塞增长率 (increment filling ratio, IFR) 是目前最为常用的描述土塞效应的参数^[1,2], 其定义为

$$PLR = \frac{h}{H}, \quad (1)$$

$$IFR = \frac{\Delta h}{\Delta H}。 \quad (2)$$

式中: h 为土塞高度; H 为总贯入深度; Δh 为单次贯入下土塞高度变化量, ΔH 为单次贯入深度。当 $PLR=1$ 或 $IFR=1$ 时, 管桩处于完全非闭塞状态; 当 $0 < IFR < 1$ 时, 管桩处于部分闭塞状态; 当 $IFR=0$ 时, 管桩处于完全闭塞状态。

图 7 展示了管桩沉桩过程中 PLR 和 IFR 随贯入深度的变化趋势。随着管桩的贯入, PLR 逐渐减小, 且 P1 的 PLR 值要比 P2 和 P3 要小。相比于 PLR, IFR 对贯入深度的变化更为敏感。对于 P1, 初始贯入时 IFR 迅速减小, 在贯入深度为 3.5~5 m, IFR 始终保持为 0, 表明这一阶段 P1 为完全闭塞状态, 在 5~6 m 贯入深度内, IFR 出现了一定波动, 表明 P1 发生了开塞与再闭塞。P2 的 IFR 值变化状态与 P1 相似, 初始时 IFR 快速减小, 在 5~5.5 m 贯入深度保持完全闭塞, 随后开塞。对于 P3, IFR 始终保持波动减小的趋势, 但始终未完全闭塞。

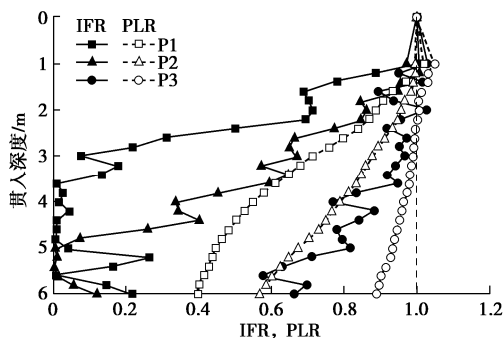


图 7 土塞参数随贯入深度变化特征

Fig. 7 Development of soil plugging parameter with penetration depth

上述分析表明, IFR 值相比于 PLR 值对土塞状态

更为敏感, 因此能更好地对土塞状态进行描述。然而实际工程中 IFR 值往往难以实时测量。因此, UWA-05 方法^[24-25]提出采用管桩贯入最后约 3 倍桩径时对应的 IFR 平均值来描述土塞状态。基于此, Liu 等^[26]与 Paik 等^[27]基于数值模拟数据与现场试验数据, 提出了 PLR-IFR 拟合公式:

$$IFR = 2.355 \cdot PLR - 1.44, \quad (3)$$

$$IFR = 1.613 \cdot PLR - 0.61。 \quad (4)$$

本文中 IFR 值与 PLR 值的拟合曲线绘制于图 8, 可以看出, 本文模拟结果与 Paik 等^[27]基于现场试验数据得出的拟合关系较为接近, 而与 Liu 等^[26]基于离散元模拟得出的拟合关系差距较大, 这可能是由于 Liu 等^[26]模型中沉桩方式与桩基尺寸与本文模型的差异导致。总的来说, 本文中 IFR 与 PLR 呈现较好的线性关系:

$$IFR = 0.841 \cdot PLR + 0.096。 \quad (5)$$

这既反映出本次数值试验的合理性, 也表明采用 PLR 进行 IFR 预测的可行性。

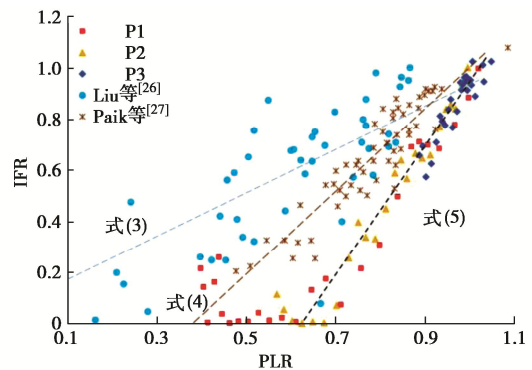


图 8 土塞增长率与土塞率经验拟合关系

Fig. 8 Relationship between IFR and PLR

2.3 沉桩阻力分析

本节将开口管桩沉桩总阻力分为桩端阻力、外摩阻力和内摩阻力, 不对管桩闭塞状态进行区分。由图 9 可知, 沉桩总阻力随着贯入深度的增加而增加。在初始约 2 m 贯入深度范围内, 沉桩阻力主要由端阻力提供。随着继续贯入, 端阻力增速减缓, 内壁摩阻力逐渐增大并超过外壁摩阻力。可以看出, 对于不同模型桩, 其端阻力与外壁摩阻力的大小与变化趋势基本相同, 主要差别在于内壁摩阻力, 且内壁摩阻力的发挥趋势与 IFR 的变化趋势类似。当 IFR 为 0 时, 即管桩处于完全闭塞状态, 内壁摩阻力基本达到稳定, 当 IFR 不为 0 时, 内壁摩阻力随 IFR 变化趋势波动。然而, 尽管 P1 中土塞效应最强, 但 P3 中土塞阻力最大。为此, 分别绘制管桩单位内壁摩阻力随贯入深度变化曲线与沉桩结束时内壁摩阻力沿桩身分布曲线。

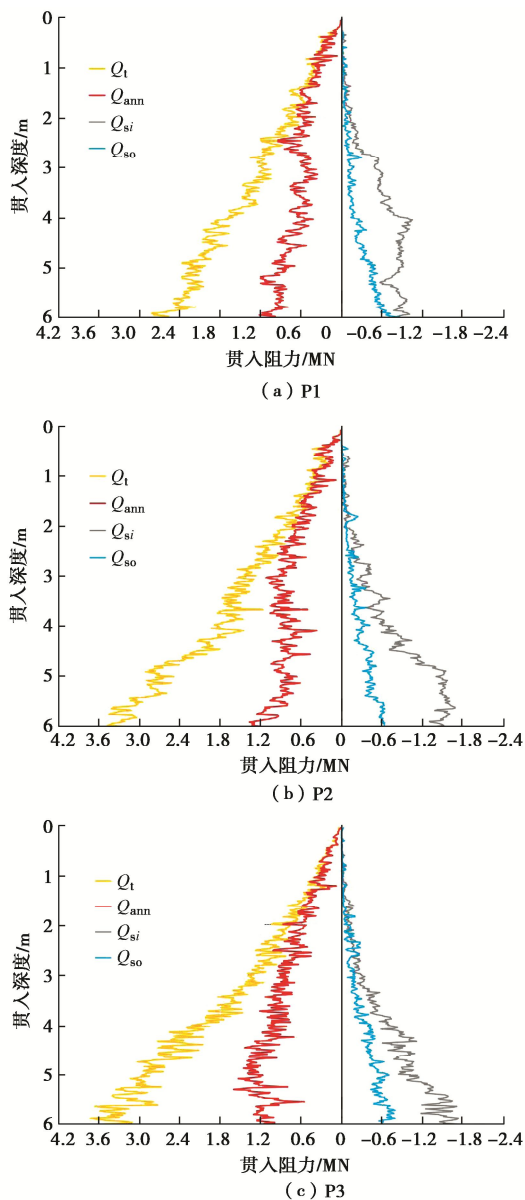


图9 沉桩阻力随贯入深度变化特征

Fig. 9 Development of pile installation resistance with penetration depth

由图 10 可以看出,单位内摩阻力沿深度的变化趋势与 IFR 值基本相同。且当管桩完全闭塞时,单位内摩阻力达到最大值,约为 3 MPa,并随着 IFR 值在最大值附近波动。结合图 11 可以进一步得出,尽管 P1 中土塞效应最强,但 P2 和 P3 中土塞尺寸更大,能调动的阻力范围更大,因此总的摩阻力更大。可以得出,土塞阻力(或管桩内壁摩阻力)的发挥不仅与土塞效应的强弱有关,还与土塞尺寸有关。

3 管桩静载过程模拟结果

3.1 土体变形特征

为了分析承载过程中桩周土体变形特征,静载模拟开始前对地基土体再次染色分层。由图 12 可以看

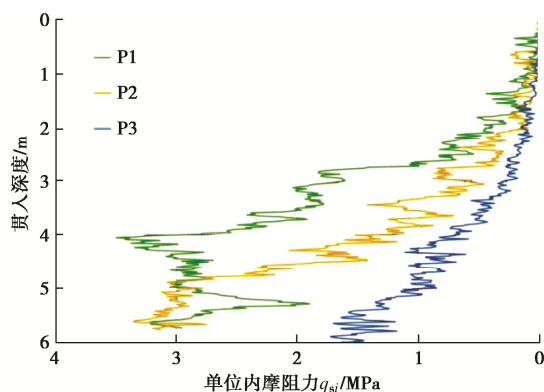


图10 单位内摩阻力随贯入深度变化特征

Fig. 10 Development of unit inner shaft resistance with penetration depth

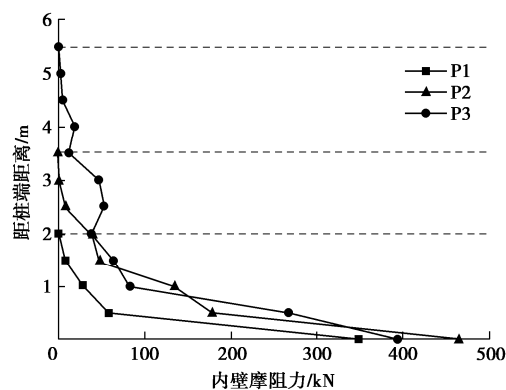


图11 内摩阻力沿桩身分布特征

Fig. 11 Distribution of inner shaft resistance

出,承载过程中土体的变形特征与沉桩过程中土体的变形特征显著不同。相对于沉桩过程,承载过程中管桩外侧土体的扰动程度显著减弱。而对于内部土塞,扰动相对较小,可以认为土塞随管桩产生整体移动,并对下部土体产生挤压。但随着桩径的增大,即沉桩结束时土塞效应的减弱,土塞对下部土体的挤压作用也逐渐减弱。大量研究表明,管桩沉桩过程中一般为部分闭塞状态,承载过程中一般为完全闭塞状态^[2-3,9]。因此,本次模拟结果与上述结论基本相符。

3.2 荷载位移曲线

图 13 展示了承载过程中管桩贯入阻力变化特征。与沉桩阻力类似,不同模型桩的外摩阻力和端阻力的大小和发展规律基本不变,不同模型桩贯入阻力的主要区别在于内壁摩阻力。可以看出,内壁摩阻力随桩顶位移基本线性增大,且桩径越大,内摩阻力越大。上述管桩内摩阻力的线性发展规律与 Han 等^[11]基于现场试验得出的规律相同。Fellenius^[28]基于桩身荷载分布情况指出,开口管桩在静载作用下,内部土塞可以看做是“柔性桩”从桩端往上加,土塞的荷载-位移响应呈近似弹塑性特征。可以看出,本次模拟中土塞的荷载-变形响应基本符合实际情况。

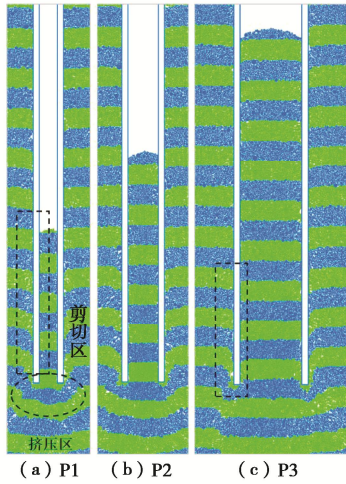


图 12 承载结束时桩周土体变形特征

Fig. 12 Soil deformations around pile at the end of static loading

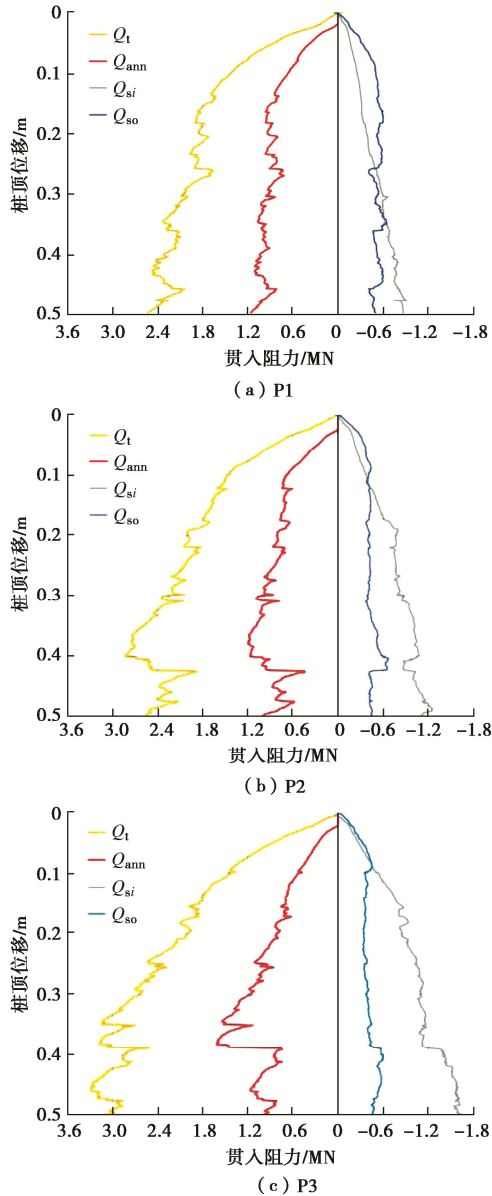


图 13 桩顶位移对贯入阻力的影响

Fig. 13 Development of penetration resistance with displacement of pile head

3.3 桩端阻力计算

考虑到静力触探试验 (CPT) 与管桩贯入过程的相似性, 基于 CPT 锥尖阻力 q_c 建立桩基承载力经验计算公式的方法得到了广泛应用^[29-31]。为了考虑开口管桩土塞效应的影响, UWA-05 方法^[24-25]引入有效面积比 $A_{rb,eff}$ 来计算开口管桩的桩端承载力:

$$q_{b0.1} / q_{c,avg} = 0.15 + 0.45 A_{rb,eff} \quad (6)$$

式中, $q_{b0.1}$ 为 $0.1D$ 位移下的单位桩端阻力; $q_{c,avg}$ 为桩端上下 $1.5D$ 处 q_c 平均值。

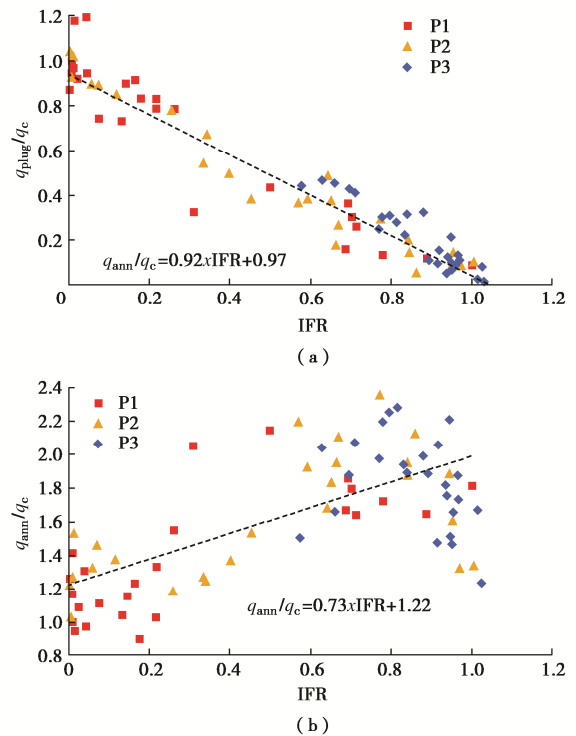
$$q_{b0.1} = q_{b,ann} A_r + q_{b,plug} (1 - A_r) \quad (7)$$

式中: $q_{b,ann}$ 为单位环壁端阻; $q_{b,plug}$ 为单位土塞端阻, 为管桩内摩擦力与土塞端面积之比; A_r 为管桩面积比。

$$A_r = 1 - (D_i / D)^2 \quad (8)$$

$$A_{rb,eff} = 1 - IFR (D_i / D)^2 \quad (9)$$

开展静力触探数值试验, 将归一化的土塞端阻和环壁端阻数据点绘制于图 14。归一化的土塞端阻 $q_{b,plug}/q_c$ 与 IFR 呈现较好的线性关系。当 IFR 为 0 时, 即管桩呈完全闭塞状态, $q_{b,plug}/q_c$ 接近 1, 表明此时开口管桩可以按照闭口桩计算桩端承载力。这与 Lehane 等^[32]基于现场试验得到的 $q_{b,plug}/q_c$ 随 IFR 变化结果相近。对于归一化的单位环壁端阻, 尽管 q_{ann}/q_c 与 IFR 能通过线性近似拟合, 但数据点较分散。这可能是由于数值模型中环壁面积仅为 d_{50} 的 4 倍, 导致环壁端阻波动较大。

图 14 q_{plug}/q_c 和 q_{ann}/q_c 与 IFR 经验拟合关系Fig. 14 Relationship between q_{plug}/q_c , q_{ann}/q_c and IFR

进一步地,将基于式(7)计算得到的管桩端阻 $q_{b0.1}$ 对锥尖阻力 q_c 进行归一化处理,并结合 UWA-05 方法中实测数据绘制于图 15。由图 15 可以看出,基于离散元模型获得的 q_b/q_c 与 $A_{rb,eff}$ 呈现很好的线性相关性。这既表明了考虑土塞效应的管桩端阻力计算方法的合理性,也从侧面验证了本次数值模拟结果的有效性。然而,UWA-05 方法中, q_b/q_c 范围为 0.15~0.6,而数值模型中 q_b/q_c 范围为 0.27~1.13,约为 UWA-05 方法 q_b/q_c 的两倍。上述差异的原因可能是数值模型中将管桩贯入过程简化为平面问题,导致单位端阻力的计算是基于单位长度而不是面积。

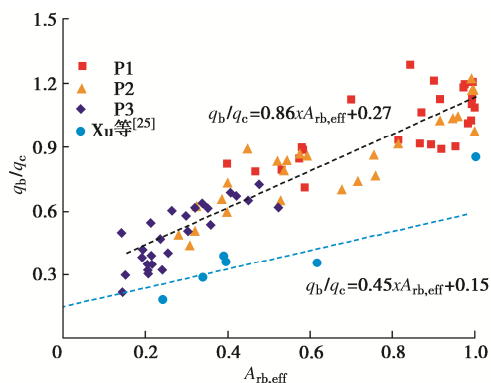


图 15 归一化桩端阻力(q_b/q_c)经验拟合关系

Fig. 15 Normalized relationship between q_b/q_c and $A_{rb,eff}$

4 结 论

本文基于离散元方法,对开口管桩沉桩与承载全过程进行了模拟,从宏观角度分析了土塞效应的发挥机制及其对管桩承载特性的影响,得到以下 4 点结论。

(1) 相较于土塞率 (PLR),土塞增长率 (IFR) 对土塞状态的变化更为敏感。在现场难以测得 IFR 的情况下,可以通过 PLR 基于线形拟合关系对 IFR 值进行预测。

(2) 土塞阻力的发挥趋势与 IFR 值变化趋势有较高的相似性,其大小同时受土塞效应和土塞尺寸的影响。

(3) 开口管桩在静载作用下,内部土塞可以看作是“柔性桩”从桩端往上加载,土塞的荷载-位移响应呈近似弹塑性特征。

(4) 基于离散元数值模拟结果,提出了考虑 CPT 锥尖阻力、土塞效应、管桩尺寸效应的静压开口管桩桩端阻力经验计算公式。

本文将开口管桩的三维贯入过程简化为平面应变问题。尽管本次二维离散元模型很好地揭示了土塞的

形成过程与开口管桩的承载机制,仍需开展基于现场沉桩试验数据的三维离散元模拟分析,从而实现对开口管桩土塞效应的量化分析与承载力的准确设计。

参考文献:

- [1] 陆昭球,高倚山,宋铭栋. 关于开口钢管桩工作性状的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 111-114. (LU Zhaoqi, GAO Yishan, SONG Mingdong. Some knowledge about working performance open-end steel pipe pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 111-114. (in Chinese))
- [2] 李立辰. 考虑土塞效应的管桩与复合单桩基础承载特性试验及数值研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021. (LI Lichen. Experimental and Numerical Research on the Bearing Characteristics of Open-ended Pile and Hybrid Pile Foundation Considering Plugging Effect[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2021. (in Chinese))
- [3] 张忠苗,刘俊伟,俞峰,等. 静压预应力混凝土管桩土塞效应试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2274-2280. (ZHANG Zhongmiao, LIU Junwei, YU Feng, et al. Research on plugging effect of jacked prestressed concrete pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2274-2280. (in Chinese))
- [4] 吴文兵,蒋国盛,王奎华,等. 土塞效应对管桩纵向动力特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1129-1141. (WU Wenbing, JIANG Guosheng, WANG Kuihua, et al. Influence of soil plug effect on vertical dynamic response of pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1129-1141. (in Chinese))
- [5] RANDOLPH M F, LEONG E C, HOULSBY G T. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles[J]. Géotechnique, 1991, 41(4): 587-598.
- [6] 郑俊杰,聂重军,鲁燕儿. 基于土塞效应的柱形孔扩张问题解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4004-4008. (ZHENG Junjie, NIE Chongjun, LU Yaner. Analytical solutions of cylindrical cavity expansion problems considering plugging effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4004-4008. (in Chinese))
- [7] 刘润,郭绍曾,周龙,等. 大直径钢管桩土塞效应的拟静力判断方法[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 20-27. (LIU Run, GUO Shaozeng, ZHOU Long, et al. Quasi-static method to evaluate the soil plug effect on a large-diameter steel pipe

- pile[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, **39**(1): 20-27. (in Chinese))
- [8] LI L C, LIU X, LIU H, et al. Experimental and numerical study on the static lateral performance of monopile and hybrid pile foundation[J]. Ocean Engineering, 2022, **255**: 111461.
- [9] 刘俊伟. 静压开口混凝土管桩施工效应试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (LIU Junwei. Experimental and Theoretical Study on Construction Effect of Static Pressure Open Concrete Pipe Pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [10] 俞 峰, 张忠苗. 混凝土开口管桩竖向承载力的经验参数法设计模型[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(7): 100-110. (YU Feng, ZHANG Zhongmiao. A design framework for evaluating the vertical bearing capacity of open-ended concrete pipe pile from empirical correlations[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(7): 100-110. (in Chinese))
- [11] HAN F, GANJU E S, PREZZI M, et al. Axial resistance of open-ended pipe pile driven in gravelly sand[J]. Géotechnique, 2020, **70**(2): 138-152.
- [12] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1564-1568. (CAO Zhaozhu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1564-1568. (in Chinese))
- [13] KIKUCHI Y, SATO T, MIZUTANI T, et al. Plugging mechanism of open - ended piles[J]. Advances in Computed Tomography for Geomaterials, 2010:406-413.
- [14] 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))
- [15] LI L C, WU W B, LIU H, et al. DEM analysis of the plugging effect of open-ended pile during the installation process[J]. Ocean Engineering, 2021, **220**: 108375.
- [16] LI L C, ZHENG M Y, LIU X, et al. Numerical analysis of the cyclic loading behavior of monopile and hybrid pile foundation[J]. Computers and Geotechnics, 2022, **144**: 104635.
- [17] Itasca Consulting Group, Inc. PFC2D User's Manual, Version 5.0.64[R]. Miunepoils: Itasca Consulting, Group, 2014.
- [18] 刘清秉, 项 伟, BMLEHANE, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(2): 400-410. (LIU Qingbing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(2): 400-410. (in Chinese))
- [19] 蒋明镜, 肖 俞, 陈双林, 等. 砂土中单桩竖向抗压承载机制的离散元分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 366-372. (JIANG Mingjing, XIAO Yu, CHEN Shuanglin, et al. Discrete element analysis of bearing mechanism of single pile in sand under vertical load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 366-372. (in Chinese))
- [20] ZHANG Z T, WANG Y H. Three-dimensional DEM simulations of monotonic jacking in sand[J]. Granul Matter, 2015, **17**: 359-376.
- [21] CIANTIA M, BOSCHI K, SHIRE T, et al. Numerical techniques for fast generation of large discrete-element models[J]. Engineering and Computational Mechanics, 2018, **171**(4): 147-161.
- [22] 郇建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩承载力的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 388-396. (LI Jianjun, HUANG Maosong, WANG Weidong, et al. Centrifugal model tests on bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 388-396. (in Chinese))
- [23] 杨济铭, 张小勇, 张福友, 等. 砂土中桩-土-承台协同作用下桩基承载特性细观研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(7): 2271-2282. (YANG Jiming, ZHANG Xiaoyong, ZHANG Fuyou, et al. Mesoscopic study on bearing characteristics of pile foundation under pile-soil-cap combined interaction in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(7): 2271-2282. (in Chinese))
- [24] LEHANE B M, SCHNEIDER J A, XU X. The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand[C]// Frontiers in Offshore Geotechnics: Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. London, 2015.
- [25] XU X T, SCHNEIDER J A, LEHANE B M. Cone penetration test (CPT) methods for end-bearing assessment of open- and closed-ended driven piles in siliceous sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(8): 1130-1141.

- [26] LIU J W, DUAN N, CUI L, et al. DEM investigation of installation responses of jacked open-ended piles[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, **14**(6): 1805-1819.
- [27] PAIK K, SALGADO R. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(1): 46-57.
- [28] FELLENIUS B H. The response of a “plug” in an open-toe pile[J]. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2015, **46**(2): 82-86.
- [29] 童立元, 李洪江, 刘松玉, 等. 基于静力触探试验的基坑开挖卸荷单桩水平承载力损失预测研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(3): 501-508. (TONG Liyuan, LI Hongjiang, LIU Songyu, et al. Prediction of lateral capacity losses of a single pile adjacent to excavation of foundation pits based on CPT tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(3): 501-508. (in Chinese))
- [30] 俞峰, 杨峻. 砂土中钢管桩承载力的静力触探设计方法[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 2): 349-354. (YU Feng, YANG Jun. Design methods for bearing capacity of steel pipe piles driven in sand by means of cone penetration tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S2): 349-354. (in Chinese))
- [31] YU F, YANG J. Base capacity of open-ended steel pipe piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **138**(9): 1116-1128.
- [32] LEHANE B M, GAVIN K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand[J]. *Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 2001, **127**(6): 473-480.

2024 年度粤港澳大湾区岩土工程青年学者论坛（第 1 号通知）

主办单位：广东省岩土力学与工程学会；广东省岩土力学与工程学会青年工作委员会

承办单位：深圳大学；南方科技大学；哈尔滨工业大学（深圳）

会议主题：本次会议以“智能·韧性岩土与地下工程”为主题，对近年来新理念、新技术在岩土与地下工程设计、施工、运维等阶段的研究和应用进展进行深入交流，为青年岩土工作者提供学习和交流平台。会议涵盖但不限于以下专题内容：①岩土与地下工程韧性设计；②岩土与地下工程智能建造；③岩土与地下工程智能监测与预警；④极端气候下岩土与地下基础设施韧性提升；⑤大湾区地下空间开发新进展与挑战。

会议议程：①2024 年 8 月 24 日 14:00-17:00 粤港澳大湾区岩土与地下工程研究生学术报告比赛，请有意参加比赛的研究生于 2024 年 7 月 10 日之前提交“附件 1：粤港澳大湾区岩土与地下工程研究生学术报告比赛报名表”到邮箱 fengwq@

sustech.edu.cn，最终入围比赛名单将根据报名情况确定。本次比赛拟设一等奖 2 名，二等奖 4 名，三等奖 6 名，优秀奖若干名，颁发证书和奖金。②2024 年 8 月 24 日 20:30-21:30 广东省岩土力学与工程学会青年工作委员会工作会议；③2024 年 8 月 25 日 9:00-15:00 邀请报告和主题报告。

拟安排主题报告 18 场，请有意参加主题报告的委员于 2024 年 7 月 10 日之前提交“附件 2：粤港澳大湾区岩土工程青年学者论坛主题报告报名表”到邮箱 wy876633@163.com，最终报告安排将根据报名情况讨论确定。

会议时间：2024 年 8 月 24 日下午，25 日全天

会议地点：深圳大学土木与交通工程学院（深圳市南山区）

会议联系人：香港联络人：周超（香港理工大学），澳门联络人：周万欢（澳门大学），广东联络人：温勇（广东省岩土力学与工程学会青年工作委员会），费建波（深圳大学），冯伟强（南方科技大学），陈锐（哈尔滨工业大学（深圳））。

（大会组委会 供稿）