

砂土地基含水率对静压开口管桩沉桩特性的影响

王伟丞¹, 远航², 丁钰星¹, 王育林¹, 刘俊伟^{1,*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛港建设管理中心有限公司, 青岛 266409)

摘要: 砂土地基含水率的不同对管桩的沉桩特性有着较大影响。通过室内模型试验的方式, 控制砂土地基含水率, 对双壁开口管桩进行静压沉桩试验。沉桩过程中采集沉桩阻力、桩身应变与土塞变化。研究发现非饱和砂土地基的沉桩阻力较小, 约为干砂与饱和砂土地基沉桩阻力的 66.88% 和 80.78%; 随着沉桩贯入, 外管单位侧摩阻力沿桩身不断增大, 同一深度处出现衰退现象, 非饱和砂土地基的衰退现象更明显, 含水率的不同对单位侧摩阻力的影响较大; 非饱和砂土由于其含水率所导致的流动性, 更容易形成土塞, 土塞高度高、形成快, 并且沉桩入土较深时土塞增长趋势要高于干砂与饱和砂土地基。

关键词: 开口管桩; 含水率; 静压沉桩; 贯入特性; 土塞效应

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)06-0037-10

The influence of water content in sandy soil foundation on the pile driving characteristics of static pressure open-ended pipe pile

WANG Weicheng¹, YUAN Hang², DING Yuxing¹, WANG Yulin¹, LIU Junwei^{1,*}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Port Construction Management Center Co., Ltd., Qingdao 266409, China)

Abstract: The water content of the sandy soil foundation has a significant impact on the pile driving characteristics of pipe piles. Through laboratory model tests, this study controlled the water content of the sandy soil foundation and conducted static pressure pile driving tests on double-walled open-ended pipe piles. During the pile driving process, the resistance, strain on the pile shaft and soil plugging were measured. It was found that the resistance to pile driving in unsaturated sand soil foundation is relatively low, approximately 66.88% and 80.78% of that in dry sand and saturated sandy soil foundation. As the pile is driven into the foundation, the lateral friction resistance per unit area along the outer pile shaft increases continuously, but a decay phenomenon occurs at the same depth, which is more pronounced in unsaturated sandy soil foundation. The difference in water content has a significant effect on lateral friction resistance per unit area. Due to the fluidity imparted by the water content of unsaturated sandy soil foundation, soil plugs are more easily formed, resulting in higher and faster-forming plugs. Additionally, the trend of soil plug growth is faster in deeper pile

收稿日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(42277135); 山东省优秀青年基金(ZR2021YQ31)

作者简介: 王伟丞(1999—), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为开口管桩沉桩特性研究。E-mail: 296749886@qq.com。

* 通信作者: 刘俊伟(1983—), 男, 山东青州人。博士, 教授, 博士生导师, 主要从事滨海岩土防灾减灾等方面的研究。

E-mail: liujunwei@qut.edu.cn。

driving conditions than that in dry sand and saturated sandy soil foundation.

Key words: open-ended pipe pile; water content; static pressure pile driving; penetration characteristic; soil plug effect

桩基础是一种广泛应用的深基础形式,按照开口状态,可分为开口管桩和闭口管桩两种类型,其中,开口管桩具有强度高、施工快、性能好等优势,广泛应用在各种工程领域。根据沉桩工艺,开口管桩可分为静压桩、锤击桩和振动沉桩,其中,静压桩通过静力压桩机的压桩机构将桩压入土中,属于无冲击、无噪音、无振动的环保施工方法。

杨校辉等^[1]开展了现场试验,研究了静压桩贯入过程桩侧摩阻力的变化规律及承载特性;刘俊伟等^[2]开展了大尺度静压桩模型试验,研究了砂土地层土塞效应,探讨不同工况下土塞高度、内外侧摩阻力的演化规律;王永洪等^[3-4]基于光纤光栅传感器研究了静压沉桩过程中沉桩阻力、桩身轴力及桩周侧摩阻力的变化规律,发现了基于桩侧摩阻力的静压桩沉桩效应;王跃等^[5]研究了静压开口管桩在层状地基贯入过程中桩内外侧摩阻力和桩端阻力的发展变化规律,分析了内外侧摩阻力在沉桩阻力中的占比;肖昭然等^[6]研究了桩长以及沉桩速率对静压桩沉桩阻力、沉桩端阻力、桩周侧压应力和桩身极限承载力的影响;BRUCY等^[7]通过试验研究了土塞的形成过程,并发现随着管桩贯入深度的增加,土塞的高度逐渐减小,逐渐小于管桩的入土深度;张思峰等^[8]结合静力触探与静载试验结果,根据锤击总数、沉桩速率、土塞高度以及入土深度等关键指标,研究了土塞率与各因素之间的关联;李立辰等^[9]开展了基于离散元的开口管桩沉桩与承载全过程分析,揭示了土塞的形成演化过程与承载机制;管金萍等^[10]通过在桩身安装 FBG 传感器、在桩顶安装温度自补偿传感器的方法,深入研究了双壁开口管桩在黏土地基中的静压贯入特性与承载特性;李雨浓等^[11]开展了室内模型试验,系统研究了分层软黏土地基中静压桩的贯入机理;曹兆虎等^[12]通过使用透明土的方式,对开口管桩和闭口管桩的贯入特性进行了研究;于洪川等^[13]开展了开口与闭口管桩连续贯入模型试验,基于可视化模型研究了管桩贯入机理。

在不同含水率条件下的地基中,开口管桩在贯入过程中会产生不同的受力情况和土塞效应。为了减小沉桩过程因地质不同对邻桩和周围建筑的影响,需明确沉桩过程中地基含水率对管桩贯入机制的影响。传统设计理论通常将桩基础沉贯的末端视为单相土或饱和土,但在工程建设中,常常遇到非饱和状态的土体,如过度开采地下水的土体。目前大多数研究受传统工程实践与理论框架约束,将沉桩过程土体简化为饱和状态。黄院雄等^[14]对饱和土中打桩引起的桩周土任意深度的水平位移与隆起进行推导并通过实际工程进行验证。但目前对于非饱和土地基的沉贯特性研究相对较少。本文通过室内模型试验开展开口管桩在不同含水率条件下的静压沉桩研究,研究沉桩过程中桩身力学响应和土塞效应,为实际工程中不同含水率地基的桩基础设计提供参考。

1 模型试验设计

1.1 模型试验装置与材料

室内模型试验所采用的试验装置为自主研发的大尺寸岩土模型试验系统,试验加载所用静压装置可实现定速静压、定力静压 2 种方式加载。模型箱的尺寸为 3 m×3 m×2 m(长×宽×高),采用 10 cm 厚的方钢框架焊接而成,模型箱与加载装置如图 1 所示。

地基土体采用青岛当地河砂,试验材料准备完毕后用四分法取砂样 300 g,采用 GZS-1 高频振筛机对砂样进行筛分,筛孔孔径由大到小分别为 10、5、2、1、0.5、0.25、0.1、0.075 mm,用电子天平(精度 0.001 g)称重。筛分法测定土样颗粒级配如图 2 所示,所用土体物理参数如表 1 所示。

本次试验选用的开口双壁管桩^[15-16]尺寸与参数如表 2 所示,分别在管桩内管外部和外管开槽部位粘贴应变片用于数据采集,并涂刷环氧树脂进行保护,内管底部与底座分离。桩身应变片粘贴位置如图 3 所示。在模型桩顶侧壁预留孔安装滑轮导向系统,模型桩内设重锤并与外部拉线位移传感器连接,通过桩内重锤高度变化实时采集土塞高度变化。

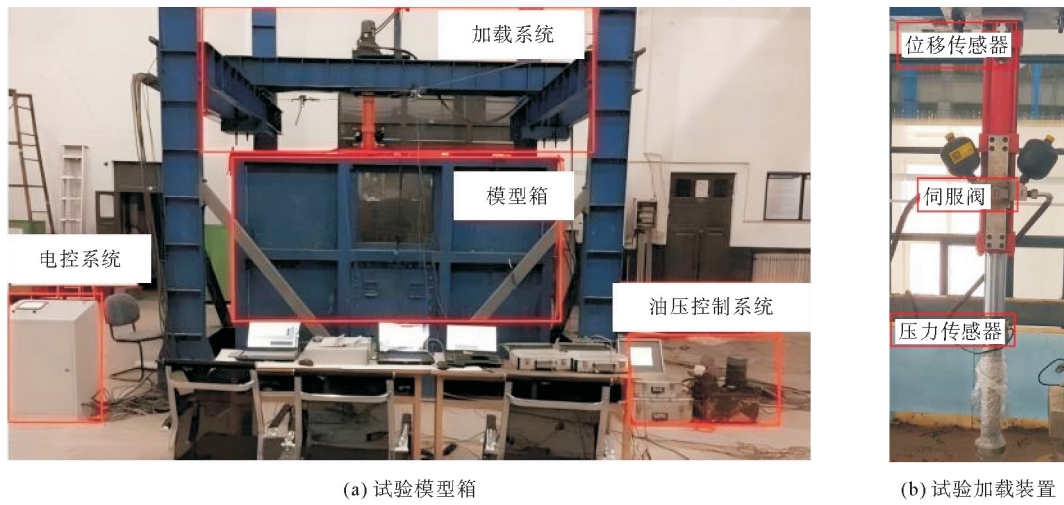


图 1 模型试验装置

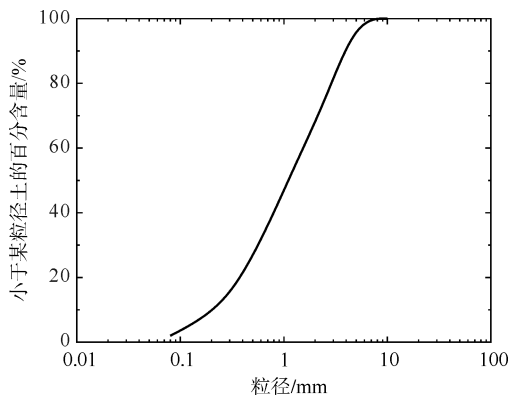


图 2 砂土颗粒级配曲线

表 1 土体物理力学参数

土质	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	内摩擦角/ $(^\circ)$
砂土	17.9	0.72	32

表 2 开口管桩尺寸与参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	外管直径/mm	外管壁厚/mm	内管直径/mm	内管壁厚/mm
6061 铝合金	70	0.33	70	2.5	47	2

试验要求控制砂土地基的含水率不同。中间含水率(10%)的砂土制备通过准确控制干砂和水的质量,采用搅拌机均匀搅拌。饱和砂土的制备通过模型箱底部布设的水管注水饱和。土体填筑完成待其自然固结沉降 7 d 后进行试验,本试验沉桩位置位于模型箱正中间,沉桩位置及尺寸如图 4 所示。

不同含水率砂土的强度采用英国 GDS 正负温静动三轴仪测定。GDS 三轴仪主要组成部分为:加载系统、围压反压控制系统、数据采集系统,构造如图 5 所示。

1.2 试验方案

1.2.1 三轴试验方案

将砂土土样碾碎,取足量土样放入烘箱内 105°C 烘干 24 h。由于试验所用砂土的含水率大于 18% 后会存在大量的自由水,通过击实法^[17]的方式无法制样,因此按含水率相

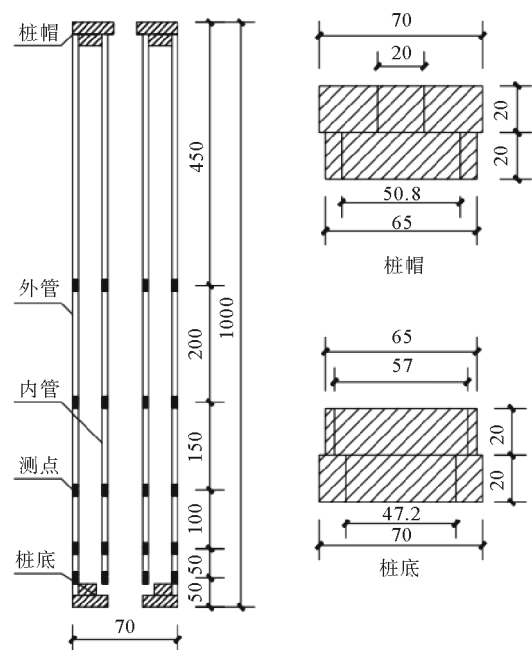


图 3 桩身应变测点示意(单位:mm)

差2%的区间预配8%、10%、12%、14%、16% 5组土样。将配好的土样放入养护箱内养护24 h,养护完成后通过击实法制成规格为140 mm×70 mm的标准三轴试验土样,每个含水率制备2个土样,取其均值作为强度参考依据,共计10个土样。对砂土土体三轴试样进行剪切速率为1 mm/min的不固结不排水三轴剪切试验。

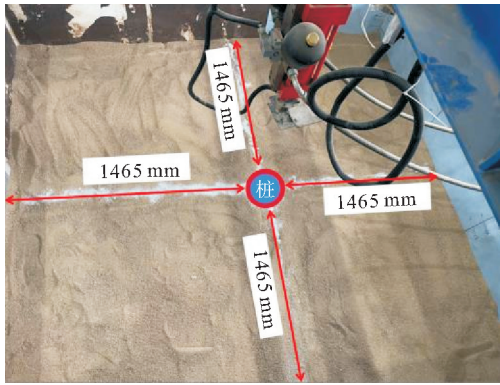


图4 沉桩位置确定示意

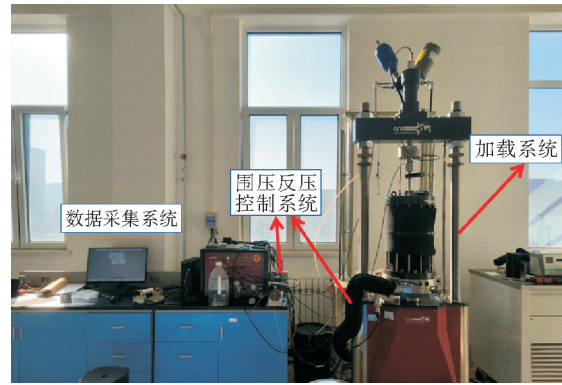


图5 GDS正负温静动三轴仪

1.2.2 模型试验沉桩方案

室内模型试验采用1 mm/min的沉桩速度贯入650 mm,分别在干砂地基、非饱和砂土地基与饱和砂土地基3种不同地基条件下完成沉桩试验。朱斌等^[18]通过试验研究表明桩体沉桩过程侧壁影响范围在7倍桩径以内,桩底影响范围在4倍桩径以内。本试验模型箱尺寸为3 m×3 m×2 m,模型桩外径70 mm,桩身到模型箱水平距离为1465 mm,大于7倍桩径,沉桩完成时桩底到箱底竖向距离为750 mm,大于4倍桩径,因此模型试验可忽略边界效应的影响。

2 试验结果及分析

2.1 三轴试验结果及分析

通过三轴试验测得同围压不同含水率试样的三轴试验偏应力-应变关系曲线,见图6。对试样结果进行分析,发现对于无自由水的砂土试样,加载初期偏应力-应变关系曲线整体呈线性增长趋势,增长十分迅速且很快达到峰值偏应力,随着轴向应变的不断增高,偏应力有所下降,最后逐渐趋于平稳。10%含水率试样的峰值偏应力最大,8%含水率试样的峰值偏应力次之。本试验所用土样在相同制样条件下制备,保证压实度情况相同。根据三轴试验结果,本次模型试验非饱和砂土地基含水率选择10%。

2.2 沉桩试验结果及分析

2.2.1 沉桩阻力分析

试验沉桩阻力随贯入深度变化关系曲线如图7所示。在砂土地基中,沉桩阻力随贯入深度的增大而增大,贯入初期沉桩阻力呈线性上升趋势,随着桩身不断贯入,沉桩阻力的增速减缓。这是因为在桩身贯入过程中随着桩身入土深度的增加,土压力不断增加,桩身与桩周土接触面逐渐增大,侧摩阻力逐渐增大。贯入深度较浅时饱和砂土地基的沉桩阻力增速最快,干砂地基次之;在贯入400 mm时干砂地基的沉桩阻

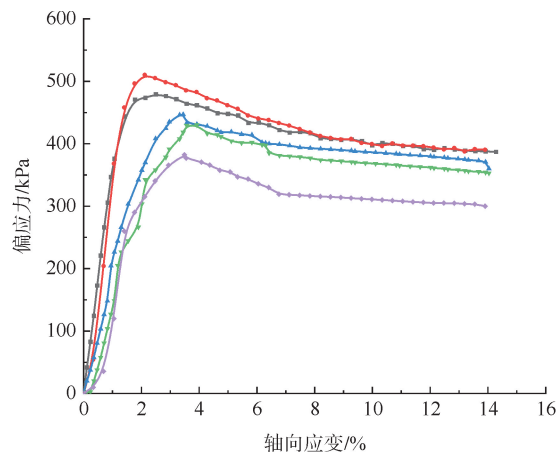


图6 不同含水率砂土三轴试验偏应力-应变关系曲线

— 8%; — 10%; — 12%; — 14%; — 16%

力涨幅较大,贯入难度提升。非饱和砂土地基的沉桩阻力始终低于二者。贯入 650 mm 时,在干砂地基、非饱和砂土地基、饱和砂土地基条件下,静压桩的沉桩阻力为 7.79、5.21、6.45 kN;在非饱和砂土中所受的沉桩阻力分别为干砂与饱和砂土地基沉桩阻力的 66.88%、80.78%。可见地基含水率对于沉桩阻力影响较大。

2.2.2 桩身轴力及荷载传递分析

由图 8 可知,在不同含水率地基条件下,桩身贯入的同一时刻,试验桩的外管桩身轴力沿着深度的增加而减小,并且整体呈现减小速率升高的特征,其产生的原因是桩-土相互作用。随着沉桩过程的不断持续,桩与桩周土体之间出现相对剪切位移。随着相对剪切位移不断增大,土体与桩周表面产生侧摩阻力,阻碍桩体的贯入。桩侧土体在贯入过程中,会产生土体软化的现象,该现象会导致桩侧摩阻力随桩土间相对位移增大而减小,桩体外表面所受到的单位侧摩阻力增大,所以轴力与深度为负相关的关系。

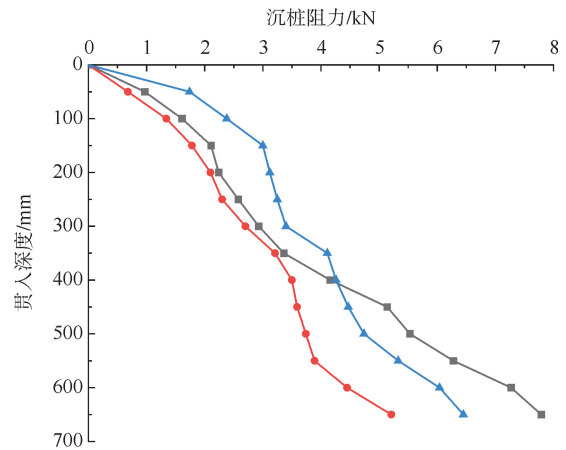


图 7 沉桩阻力随贯入深度的变化曲线

—■— 干砂地基; —●— 非饱和砂土地基; —▲— 饱和砂土地基

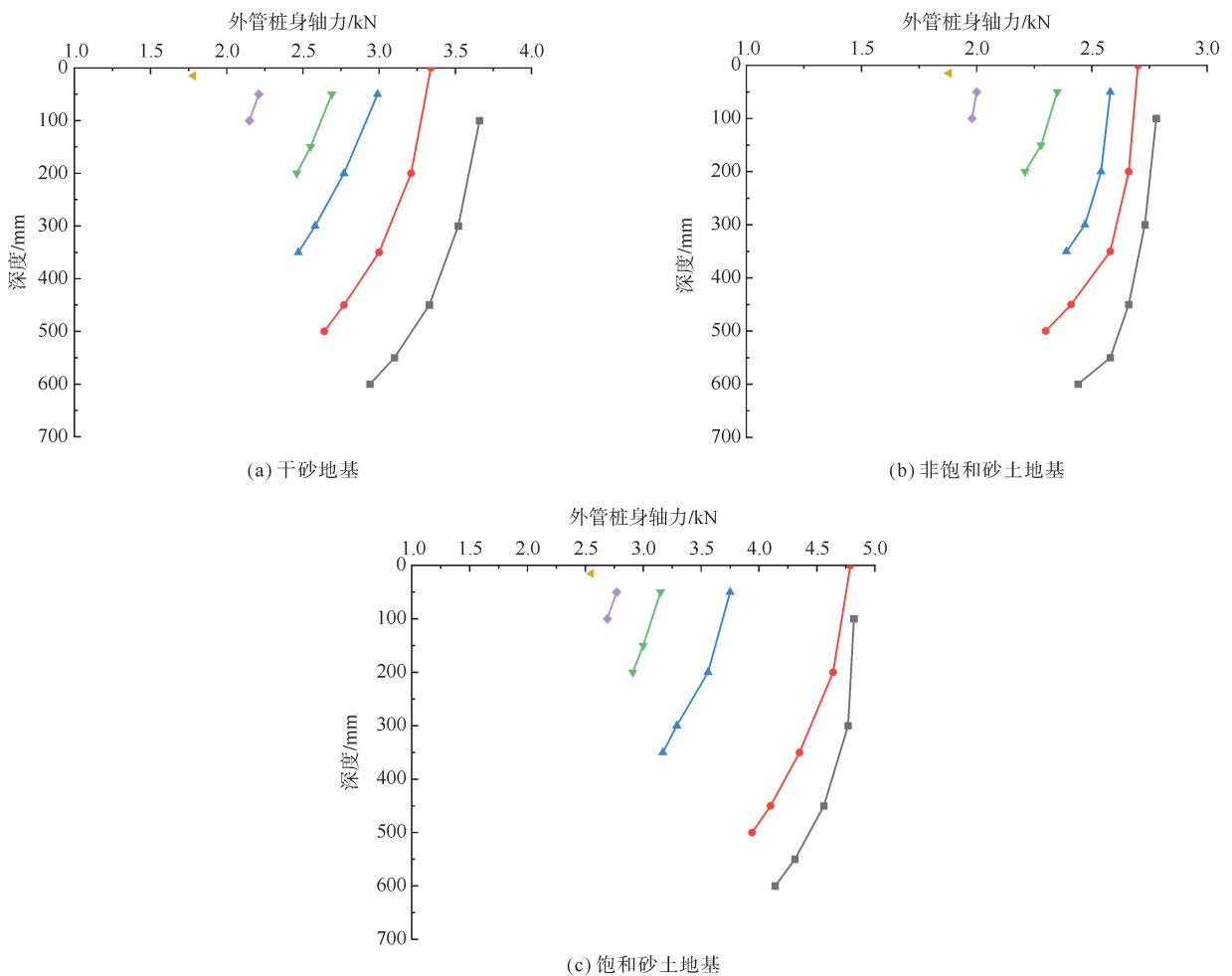


图 8 不同地基条件下外管桩身轴力沿深度分布曲线

—■— 贯入 650 mm; —●— 贯入 550 mm; —▲— 贯入 400 mm; —▼— 贯入 250 mm; —◆— 贯入 150 mm; —◀— 贯入 50 mm

试验桩在干砂与饱和砂土地基条件下,外管桩身轴力沿深度分布情况较为接近。在桩体贯入 400 与 550 mm 时,深度为 350 mm 处外管桩身轴力产生了较大的变化,干砂地基中桩身轴力增长了 16.3%,饱和砂土地基轴力增长了 37%,而在非饱和砂土地基中该数值仅为 7.9%。非饱和砂土地基的外管桩身轴力较干砂地基与饱和砂土地基而言有着明显的减弱。

由图 9 可知,在不同含水率地基条件下内管桩身轴力与深度也呈负相关的关系,随着深度的增加而减小。对于开口管桩而言,内管不直接与土体接触,内管桩身轴力的产生完全由沉桩过程产生的土塞与内管摩擦提供,沉桩过程中管桩不断挤压、剪切土体,在土体内部形成土塞,土塞进入内管并与内管内壁有相对位移,形成剪切状态。在管桩不断贯入的过程中,土塞不断地被地基中的土体挤压密实,相同位置处的内管桩身轴力随内管土塞高度的增加而升高,即随着贯入深度的增加,同一位置的内管桩身轴力不断升高。这一规律在不同地基条件下均有体现,但不同地基条件下的具体变化情况不同。

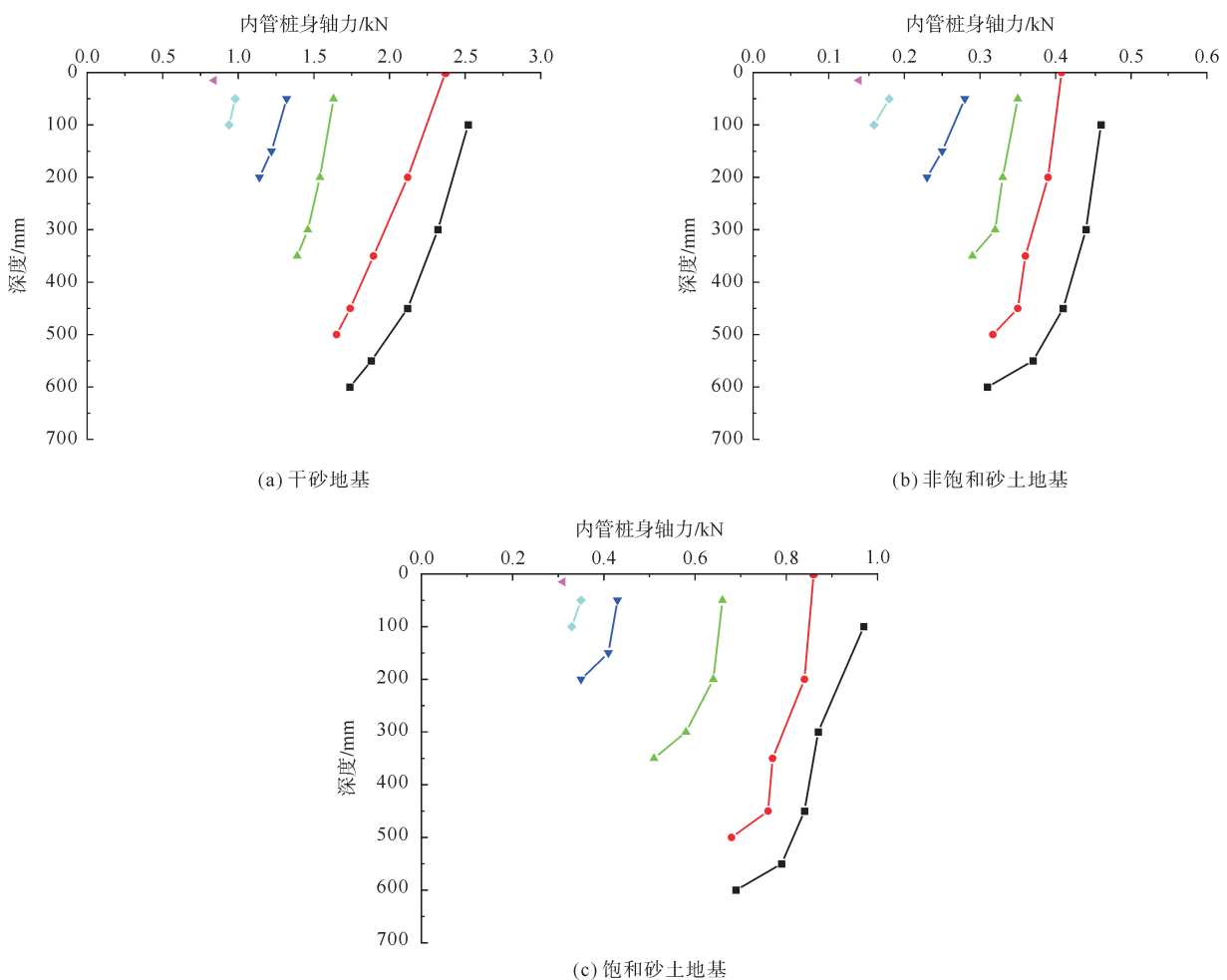


图 9 不同地基条件下的内管桩身轴力沿深度分布曲线

—■— 贯入 650 mm; —●— 贯入 550 mm; —▲— 贯入 400 mm; —▼— 贯入 250 mm; —◆— 贯入 150 mm; —◀— 贯入 50 mm

由试验结果可知在干砂地基中内管桩身轴力值较大,随沉桩过程减小的速率较快,在贯入深度较大时呈线性减小趋势,在贯入深度较浅时变化幅值不大,并且干砂地基内管桩身轴力的大小较其他地基情况而言相对较大,这是由于干砂的性质导致的。干砂土体无水分,颗粒之间的摩擦力较大,流动性较低,摩擦系数较高,导致内管桩身轴力较大。在饱和砂土与非饱和砂土中内管桩身轴力值较小,同一位置处内管桩身轴力的大小仅为外管桩身轴力的 1/6 左右,这与管金萍等^[10]的试验结果较为吻合。说明水分的参与提高了砂土的流动性,土体更容易产生变形,与干砂相比更容易形成土塞,在贯入过程中土塞会随着桩体的沉贯而向上移动,这也是随着沉桩深度增加内管的单位侧摩阻力不断升高的原因。

2.2.3 管桩内外管侧摩阻力变化规律分析

不同地基条件下的管桩外管单位侧摩阻力分布曲线如图 10 所示,3 种地基条件下管桩外管侧摩阻力变化规律大致相同,在同一沉桩时刻,单位侧摩阻力随着深度增大而增大,原因是土压力随深度的增大而增大,管桩外管外壁所受单位侧摩阻力增大,不同沉桩时刻桩身同一位置处单位侧摩阻力变大;在贯入一定深度以后,管桩外管单位侧摩阻力出现衰退现象,主要是因为随着在桩端入土达到一定深度后,挤土效应明显,侧摩阻力达到最大值,随着桩身持续贯入,土颗粒发生破碎、迁移,桩-土界面的土体密实度降低,摩擦系数降低。试验结果与朱娜^[19]的试验结果一致,沉桩过程中在贯入一定深度后,管桩外管单位侧摩阻力出现明显的衰退现象。试验中发现干砂地基与饱和砂土地基的衰退程度近似,非饱和砂土的衰退程度较大。

贯入完成时,桩端位置处管桩外管单位侧摩阻力在 3 种地基条件下表现出饱和砂土地基略大于干砂地基,干砂地基大于非饱和砂土地基的情况,这说明干砂的性质与饱和砂土性质差别不大,非饱和砂土中的水分在一定程度上减少了砂土颗粒间的摩擦,同时颗粒间的接触状态相对较为松散,导致侧摩阻力较小。

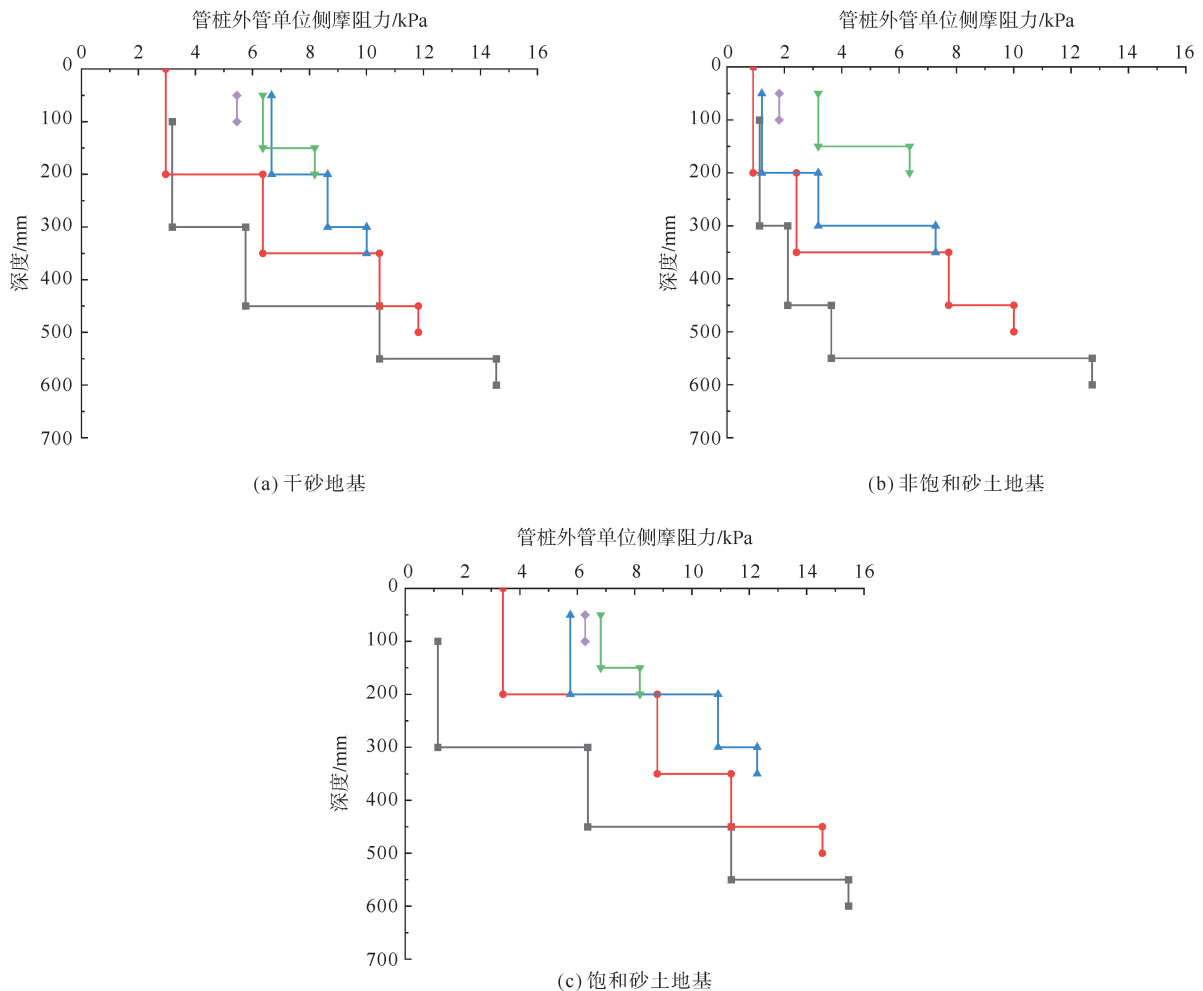


图 10 不同地基条件下管桩外管单位侧摩阻力分布曲线

—■— 贯入 650 mm; —●— 贯入 550 mm; —▲— 贯入 400 mm; —▼— 贯入 250 mm; —◆— 贯入 150 mm

如图 11 所示,对 3 组管桩内管单位侧摩阻力进行分析,发现贯入完成时干砂地基的管桩内管单位侧摩阻力最大,非饱和砂土地基最小,饱和砂土地基介于两者之间。分析其原因是干砂中内管形成的土塞没有水分,砂土颗粒摩擦角大,摩擦系数较高,会紧密挤压在管桩内管表面,产生较大侧摩阻力;非

饱和砂土中水分含量不高,因贯入而产生的水膜十分有限,不能起到较强的润滑作用;饱和砂土中的高水分含量导致砂土颗粒间的水膜增厚,使得颗粒间直接接触减少,桩体贯入时砂土颗粒更容易重新排列,加大固结度。

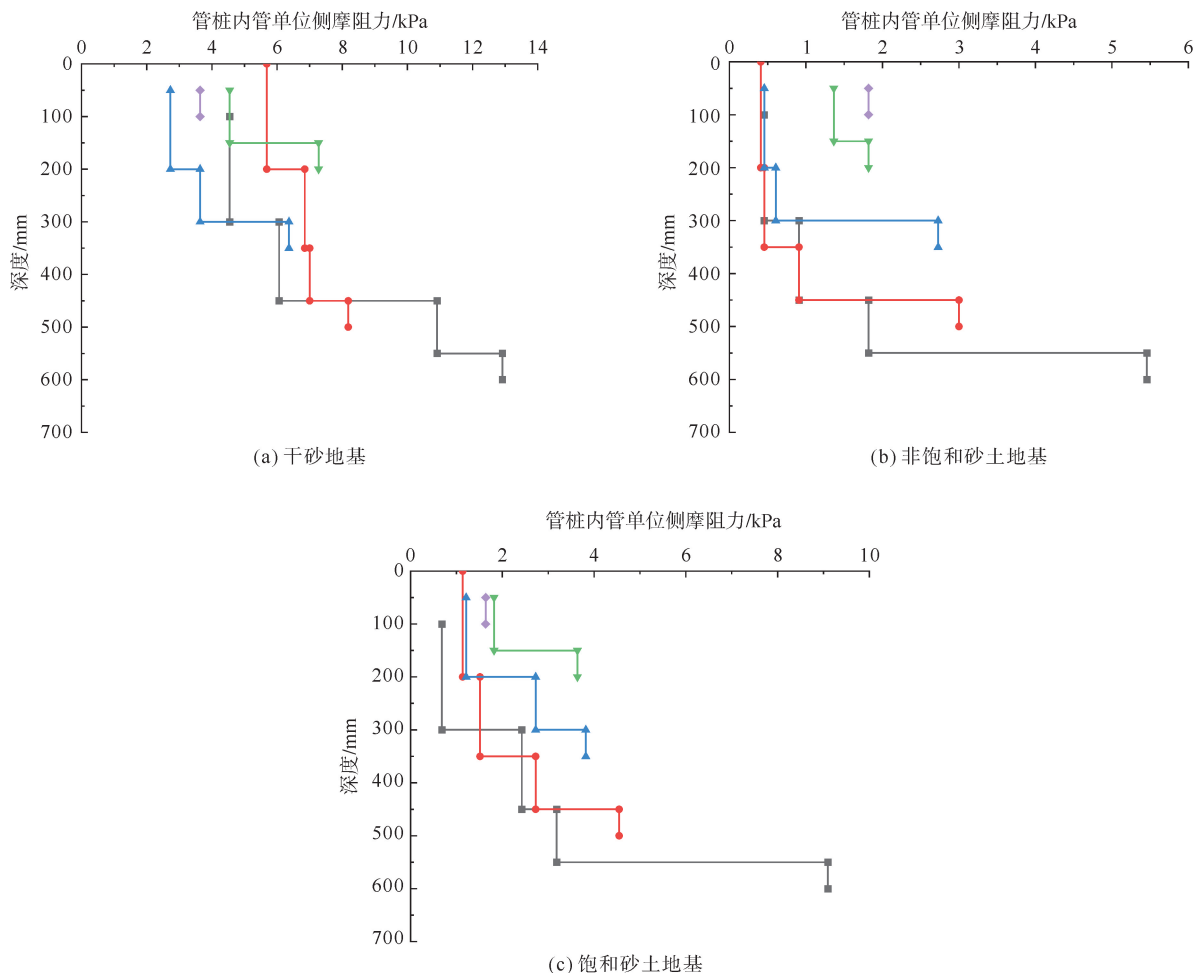


图 11 不同地基条件下的管桩内管单位侧摩阻力分布曲线

—■— 贯入650 mm; —●— 贯入550 mm; —▲— 贯入400 mm; —▼— 贯入250 mm; —◆— 贯入150 mm

2.3 土塞发展规律

不同地基条件下土塞高度随贯入深度变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知,随着桩身的贯入,土塞高度不断增加。在贯入初期土塞高度增长较快,随后增速逐渐降低,由于桩身所处的地基条件情况不同,形成土塞的过程和最终形成土塞的程度也不同。在非饱和砂土地基条件下土塞最高,饱和砂土地基条件下土塞最低。干砂颗粒间没有水分润滑,底部砂土受到挤压流入桩身内部形成较高的土塞;非饱和砂土存在流动性,当桩身贯入时,由于土体含水率而导致砂土的流动性增强,从而更容易快速形成土塞;饱和砂土处于较强流动状态,使得桩底接触的土体不能完全贯入而向四

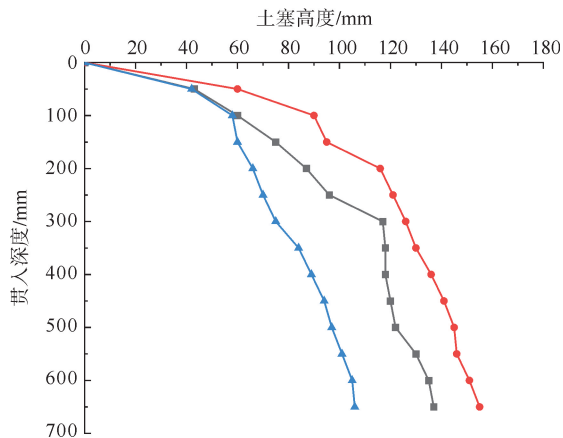


图 12 土塞高度分布曲线

—■— 干砂地基; —●— 非饱和砂土地基; —▲— 饱和砂土地基

周流动,导致土塞较低。土塞率分布曲线如图 13 所示,沉桩过程中土塞率呈现随贯入深度增加逐渐减小的趋势,这是因为桩底部土体不断进入桩体,土塞不断增高且土塞中土体更加密实、土塞更坚固。土塞增长率分布曲线如图 14 所示,在不同地基条件下曲线的变化趋势大体相似,贯入初期波动较大,随着贯入深度增加,整体不断降低,贯入完成时干砂地基、非饱和砂土地基、饱和砂土地基的土塞增长率依次为 4%、8%、2%,表明非饱和砂土地基的土塞增长趋势仍然强于干砂地基与饱和砂土地基。

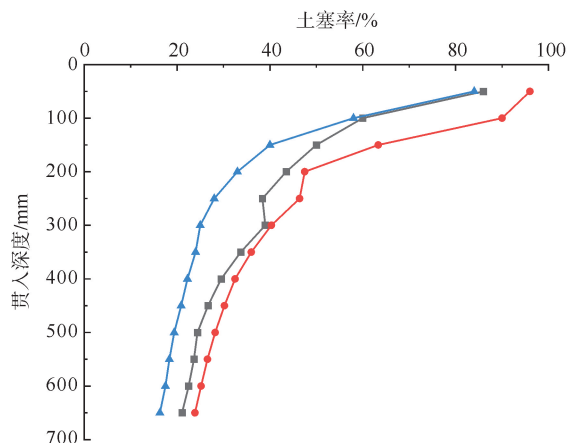


图 13 土塞率分布曲线

—■— 干砂地基; —●— 非饱和砂土地基; —▲— 饱和砂土地基

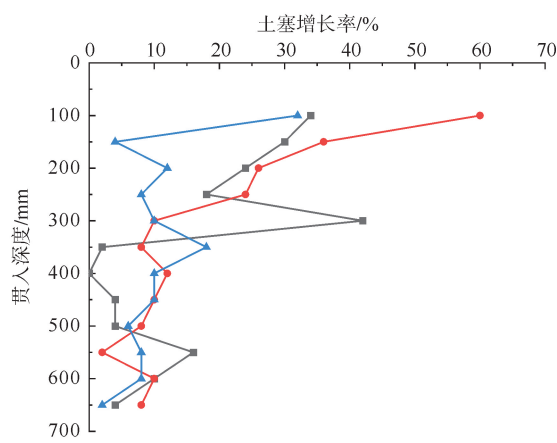


图 14 土塞增长率分布曲线

—■— 干砂地基; —●— 非饱和砂土地基; —▲— 饱和砂土地基

3 结论

结合模型试验所得结果,通过数据处理,对桩身阻力的变化、管桩各阶段受力情况及干砂、非饱和砂土、饱和砂土地基条件下的土塞发展规律进行分析,主要得出了以下结论:

1) 地基含水率的不同,对管桩沉桩特性有着较为显著的影响,贯入较浅时饱和砂土地基的沉桩阻力增速最快,干砂地基次之;在贯入 400 mm 时干砂的沉桩阻力涨幅较大,在贯入难度提升。在贯入 650 mm 时,非饱和砂土的沉桩阻力较小,约为干砂与饱和砂土地基沉桩阻力的 66.88%、80.78%。

2) 随着沉桩贯入,贯桩内外侧单位侧摩阻力沿桩身不断增大,达到一定深度后,挤土效应明显,侧摩阻力达到最大值,随着桩身持续贯入,土颗粒发生破碎、迁移,桩-土界面的土体密实度降低,摩擦系数降低。不同含水率地基在同一深度处出现衰退现象,非饱和砂土地基的衰退现象更明显,说明含水率的不同对侧摩阻力的影响较大。

3) 非饱和砂土由于其含水率导致的流动性,当桩身贯入时,非饱和砂土的流动性增强,更容易形成土塞,土塞更高,形成更快,并且沉桩入土较深时的土塞要高于干砂与饱和砂土地基。

参考文献 (References):

- [1] 杨校辉,朱彦鹏,黄雪峰. 静压桩荷载传递与承载性状试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(1):139-143.
YANG Xiaohui, ZHU Yanpeng, HUANG Xuefeng. Experimental research on loading transfer and bearing characteristics of a jacked pile[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 139-143.
- [2] 刘俊伟,王立忠,朱娜,等. 开口管桩贯入特性的大尺度模型试验[J]. 工程科学学报,2019,41(2):269-277.
LIU Junwei, WANG Lizhong, ZHU Na, et al. Large-scale model test on installation characteristics of open-ended pipe pile[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 269-277.
- [3] 王永洪,张明义,白晓宇,等. 基于光纤光栅传感技术的静压沉桩贯入特性及影响因素研究[J]. 岩土力学,2019,40(12):4801-4812.
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, et al. Study of penetration characteristics and influence factor of jacked pile based on fiber bragg grating sensing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4801-4812.
- [4] 王永洪,金珈民,袁继奎,等. 基于桩侧摩阻力退化静压沉桩效应室内试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1021-1028.
WANG Yonghong, Jin Jiamin, YUAN Jikui, et al. Experimental study of pile jacking effect based on pile side friction resistance degra-

- dation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2024, 40(6): 1021-1028.
- [5] 王跃, 孙艺宁, 张延新, 等. 考虑土塞效应的静压沉桩力学分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1684-1690.
WANG Yue, SUN Yining, ZHANG Yanxin, et al. Mechanical analysis of static pressure pile driving considering soil plug effect[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1684-1690.
- [6] 肖昭然, 王艳林, 赵宪强, 等. 砂土地基中静压桩沉桩及其承载特性室内试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 294-302.
XIAO Zhaoran, WANG Yanlin, ZHAO Xianqiang, et al. Experimental investigation on resistance and response of jacked model piles in sand[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 294-302.
- [7] BRUCY F, MEUNIER J, NAUROY J F. Behavior of pile plug in sandy soils during and after driving[C]//23rd Annual Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1991: 145-154.
- [8] 张思峰, 任国彰, 刘乾, 等. 管桩土塞效应影响因素及承载性能试验研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 75-82.
ZHANG Sifeng, REN Guozhang, LIU Qian, et al. Research on influence factors of soil plug effect and bearing capacity of pipe pile[J]. Highway, 2022, 67(10): 75-82.
- [9] 李立辰, 刘卓, 刘浩, 等. 考虑土塞效应的开口管桩沉桩与承载全过程离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1471-1480.
LI Lichen, LIU Zhuo, LIU Hao, et al. DEM analysis of installation and bearing process of open-ended piles considering plugging effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1471-1480.
- [10] 管金萍, 张明义, 王永洪, 等. 双壁静压开口管桩贯入及承载特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4838-4845.
GUAN Jinping, ZHANG Mingyi, WANG Yonghong, et al. Experimental study on penetration and bearing characteristics of double-walled static pressure open tubular pile[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4838-4845.
- [11] 李雨浓, 李镜培, 赵仲芳, 等. 层状地基静压桩贯入过程机理试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1409-1414.
LI Yunong, LI Jingpei, ZHAO Zhongfang, et al. Model test research on penetration process of jacked pile in layered soil[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1409-1414.
- [12] 曹兆虎, 孔翔强, 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 Zhaohu, 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.
- [13] 于洪川, 代楠, 陈逸飞, 等. 开口与闭口管桩连续贯入机理的可视化模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6573-6580.
YU Hongchuan, DAI Nan, CHEN Yifei, et al. Visual model experimental study on penetration behaviour of open-ended and closed-ended pipe piles[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6573-6580.
- [14] 黄院雄, 许清侠, 胡中雄. 饱和土中打桩引起桩周围土体的位移[J]. 工业建筑, 2000(7): 15-19.
HUANG Yuanxiong, XU Qingxia, HU Zhongxiong. Soil's displacement due to driving pile in saturated clay[J]. Industrial Construction, 2000(7): 15-19.
- [15] FINLAY T C R, WHITE D J, BOLTON M D, et al. Press-in-piling: The installation of instrumented steel tubular piles with and without driving shoes[C]//5th International Conference on Deep Foundation Practice. Singapore: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009: 199-208.
- [16] IGOE D, GAVIN K G, O'KELLY B C. Shaft capacity of open-ended piles in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(10): 903-913.
- [17] GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019, Standard for geotechnical testing method[S].
- [18] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1807-1815.
ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1807-1815.
- [19] 朱娜. 开口管桩贯入特性大尺度模型试验与离散元模拟[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
ZHU Na. Large scale model test of open pipe pile penetration characteristics and discrete element simulation[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)