

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.081



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



仿生牙根桩承载性能透明土模型试验研究

宗梓煦^a, 郑鹏^a, 邓泽田^a, 仇文岗^{a,b}, 王鲁琦^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 基于仿生学原理并结合哺乳动物下颌磨牙承载力高的特点, 提出一种模仿哺乳动物下颌磨牙的仿生牙根桩, 仿生牙根桩的承载性能和沉桩时的挤土效应不同于传统底部截面为圆形的锥形或平底桩。结合数值方法和模型试验研究其承载特性及沉桩过程中的桩-土作用, 采用 DEM 离散元方法进行数值模拟研究, 发现仿生牙根桩能大幅提高桩底承载力, 但易引起土体应力集中。基于数值模拟结果进行模型试验, 采用基于透明土模型试验的粒子图像测速技术(PIV), 利用沉桩加载仪和 CCD 高速工业相机连续拍摄沉桩加载过程中桩周土体在线性激光器下产生的散斑场, 得到整个土体的位移场。结果表明: 仿生牙根桩对竖向荷载的承载能力超过普通锥形桩 1 倍左右, 引发的桩身拖曳效应与桩底部竖向土体位移更加显著, 且在桩中心内凹不太大时, 其引发的土体横向位移较小。

关键词: 仿生桩; 承载性能; 透明土试验; 桩基础; 沉桩挤土

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)04-0019-10

Bearing capacity characteristics of bionic teeth root pile based on transparent soil model testing technique

ZONG Zixu^a, ZHENG Peng^a, DENG Zetian^a, ZHANG Wengang^{a,b}, WANG Luqi^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: For the first time, a bionic root pile imitating mammalian lower jaw molars is proposed, based on the principle of biomimicry and combined with the characteristics of high bearing capacity of mammalian mandibular molars. The bearing performance of bionic root piles and the extrusion effect of sinking piles differ from the conventional conical or flat bottom piles with circular bottom sections. In conjunction with a combination of numerical methods and model experiments are used to explore their bearing characteristics and the role of piles-soil in the pile sinking process. First, the discrete element method (DEM) was adopted for numerical

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(5202780029); 重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-jq0087); 矿山灾害预防控制实验室开放基金(MDPC201902)

作者简介: 宗梓煦(2001-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: zongzixu2022@163.com。

仇文岗(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn。

Received: 2022-05-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 5202780029); Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2020jcyj-jq0087); Mine Disaster Prevention and Control Laboratory Open Fund (No. MDPC201902)

Author brief: ZONG Zixu (2001-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zongzixu2022@163.com.

ZHANG Wengang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

simulation, and it was discovered that the bionic tooth root pile can significantly enhance the bearing capacity of the pile bottom, but was prone to causing soil stress concentration. As for the model test, the particle image velocimetry (PIV) technique based on the transparent soil model test was implemented, and the pile loading instrument and CCD high-speed industrial camera were used to continuously capture the scattered field generated by the pile peri-pile soil under the linear laser during the pile loading process, and the velocity and displacement field of the soil mass were obtained. Ordinary conical piles and bionic root piles were subjected to immersion tests, with the results indicating that the bearing capacity of bionic root piles on vertical loads was greater than double that of ordinary conical piles, and that the dragging effect of the pile body and the displacement of vertical soil at the bottom of the pile were more pronounced. Furthermore, when the concave at the pile's center was not excessively large, the transverse displacement of the soil was minimal.

Keywords: bionic piles; bearing performance; transparent soil test; pile foundation; pile extrusion

因沉降量小、承载力大、可以提高特殊土地基承载力等优势,桩基础得到了广泛应用,其承载力与桩周土体的变形有直接关系,且受荷过程中桩周土体的变形对邻近已有建筑物或基础会造成不利影响。对于一种新型结构桩基础的研究,需要明确其承载性能和挤土机理与传统桩基础的异同,从而更好地应用在工程实际中,降低发生工程事故的风险,所以,有必要研究新型桩的承载能力。

从生物体身上获得灵感而应用于建筑的仿生学是近年新兴的一个方向。岳喜军等^[1]从植物根系出发,提出了一种建筑仿生观点。第二届国际仿生设计与科技学术研讨会^[2]提到:仿生建筑和绿色建筑的概念是相通的,因此,仿生学很多特质满足绿色设计要求;还提到生物形态与设计之间的联系,即从形态出发引出其功能结构。例如,树木高大是由于其稳固的根系结构,将该结构运用于建筑设计中,稳固的地基使摩天大楼得以实现。如,中国台北101大厦,外观呈节状,不仅具有美感,又有环保优势;新加坡双螺旋桥利用了DNA双螺旋结构稳定的特点,建造出了兼具造型与稳定的桥梁。仿生设计兴起时间不长,仍处于发展阶段,但仿生技术能为传统建筑提供新思路,更加能顺应未来绿色的发展要求,因此,有必要从仿生学的角度研究建筑结构。

作为建筑的重要结构,基础的承载性能决定了建筑上部结构的稳固程度。近年来,传统基础的研究逐渐趋于成熟,为了顺应时代发展,需要提出创新的基础结构设计来满足更高的承载性能需求。贺茂生等^[3]提出仿生根式基础,采用沉井预留顶推孔,待沉井下沉到设计标高后,在土层中顶推预制的根键,保证固结后形成仿生基础。与常规桩基相

比,根式基础有着材料强度利用率高、工程量减少25%、施工风险低、构件预制率高、承载效果好等优势。基于螺壳独特膨胀层特性和蛋壳优异流线型结构,吴文乐^[4]设计出一种自升式平台仿生桩靴,对比现役自升式平台,有着拔桩阻力小、桩土连接刚度大等优势。目前,关于仿生技术在桩基础方面的运用较少,仍有很大的发展空间。

笔者提出的仿生牙根桩是从哺乳动物下颌磨牙结构中得到的灵感。这种桩形不是常见的圆柱对称型桩,因此,需要选用合适的方法对其承载性能进行研究。许多学者提出了研究桩基础承载性能和挤土效应的方法,包括圆孔扩张理论、应变路径法、有限元法和模型试验法等。圆孔扩张理论最初是为了解释金属压痕现象^[5],经 Vesic 改进,采用流动 M-C 屈服准则,导出了在可压缩理想弹塑性土体中圆孔扩张问题的基本解,从而可用于深基础承载力研究^[6]。应变路径法由 Baligh 提出^[7-9],经 Sagaseta 等^[10]、Gill 等^[11]修正,但该方法计算量大而复杂。随着计算机技术的高速发展,ABAQUS 等有限元软件开始被用于土体位移场分析,但岩土体具有不连续性和离散性,有限元法的网格化模拟不能完整地体现土体的位移情况。Xiang 等^[12]用 DEM 离散元模拟方法研究了隧道破坏机理,采用 PFC 三维仿真方法对不同测试条件下的隧道失效模式进行了数值检验。Zhong 等^[13]也使用 DEM 对蛇皮仿生桩的贯入特性进行研究。模型试验研究方面,开始时学者们直接使用天然土制作半圆形的半模型桩基和透明容器,对土体剖面进行直接观察,以此来总结位移场规律。后来,在观察面上布置示踪粒子,通过相机跟踪粒子位置来明确土体位移场。也有学者使用在土体内部埋入传感器的方式获知土

体内部位位移情况。但这些方法要么是对土体内离散点而不是整个位移场进行分析,要么会对土体产生扰动,使得测量结果误差较大。在21世纪初,Pincus等^[14]开始尝试用熔融石英砂与空隙液模拟土体,这种由相同折射率的固液材料构成的土体具有透明特性,这一试验技术在岩土中被广泛应用。透明土的可视性使得粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)在岩土领域有了用武之地,随后,学者们开展了大量的透明土模型试验^[15-16]。Zhang等^[17]在关于透明土试验技术的综述中提到了多种相关试验。Xiang等^[12]在隧道破坏机理的探究中使用了透明土模型试验技术。Liu等^[18]将透明土模型试验研究方法应用于平行隧道开挖引起场地沉降的研究中,成功地对整个土体的位移场进行了测量。Siemens等^[19]采用非饱和透明土对二维近地表现现象进行了高分辨饱和度时空度的测量。Ads等^[20]采用透明土模型研究了软弱土层中开挖面损失和复径比对隧道沉降的影响。Ads等^[21]基于透明土可视化技术,探究了鳍条长度对鱼雷形锚杆贯入和拔出的影响。

为了获知仿生牙根桩挤土产生的整体位移场,进而更准确地分析其承载性能,并节省试验成本,笔者先采用DEM离散元模拟方法进行数值模拟,得到并分析初步数据,确定其可能具有优于传统桩基础的承载性能后,再利用透明土模型试验技术结合数字图像处理技术对仿生牙根桩的承载性能进行深入研究。

1 数值模拟

1.1 桩模型

磨牙牙根的功能与建筑桩基相似。在进食过程中,哺乳动物的磨牙需要持续承受咀嚼带来的各方向的力与弯矩,但却可以在相当长的时间内持续工作,不会发生脱落,其结构必然有承载性能上的优势。基于该思路,笔者仿照牙根结构提出了仿生牙根桩结构。如图1所示,将圆柱形平底桩的桩底挖去一个类楔形体,使之形成如牙根般的具有两个分叉的桩底。该类桩属端承桩、预制钢筋混凝土桩。除了桩底部分的构造改变外,其余部分的尺寸均按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的要求设计,与传统桩基础相同。

首先,通过数值仿真来探究其是否具有优于传统桩基础的承载性能。数值模拟使用离散元方法,基于软件PFC2D 5.0进行。考虑到计算效率与模



图1 仿生牙根桩结构效果图

Fig. 1 Design sketch of bionic root pile structure

型对称性,将实际仿生桩结构抽象为如图2所示的二维半模型并,设置了4种桩尖角度,目的是更全面地分析牙根桩桩底内倾的可行性。这4种数值模拟模型分别为: 0° (平底桩)记为1号桩, -15° (桩中心内凹的牙根桩)记为2号桩, -30° (桩中心内凹的牙根桩)记为3号桩, 30° (锥形桩)记为4号桩。统一选择仿真模型尺寸为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 、桩径为 $1\ 000\text{ mm}$ 、贯入深度为 10 m 、贯入速度为 0.05 m/s 来进行沉桩模拟并记录数据。根据Bolton等^[22]的研究,在选取桩径和土体模型尺寸时,需要考虑到边界效应的影响,模型边界到桩基轴线的距离应大于等于桩半径的20倍。模拟选用的模型桩直径为 $1\ 000\text{ mm}$,桩基位于模型的最边缘,模型宽度为 10 m ,是半径的20倍,能满足这一要求。

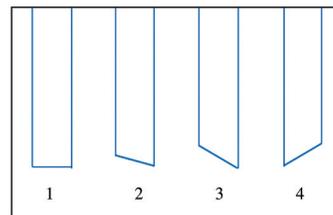


图2 数值模拟桩底示意图

Fig. 2 Schematic diagram of numerical simulation for pile bottom

1.2 土体模型

许多研究表明^[23-24],非圆形粒子可以在离散元数值模拟中提供更大的滚动摩擦力,使土体性质更接近于天然土体。因此,模拟使用的粒子由PFC2D5.0中的“Clump”命令形成,即两个相同大小的“ball”以长径比1.2重叠而成。这两个“ball”之间没有力的作用且在结构上固结,不会因受力而分散。对于 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的仿真模型,如果按照接近真实土体颗粒的粒径来进行粒子生成,如设定粒径为 1 mm ,粒子的数量级将会达到 10^8 ,进行模拟计算时将会花费极大量的时间。为节省模拟时间,合理增

大了粒子的粒径,并设定模型计算的时间步长为 10^{-4} s。根据 Zhong 等^[13]的观点:对于大量 clump 同时参与模拟的情况,应该选用适中的刚度。按照表 1 将模拟参数赋给粒子。两个“ball”之间没有力的作用且在结构上固结,不会因受力而分散。对于

10 m×10 m 的仿真模型,如果按照接近真实土体颗粒的粒径来进行粒子生成,如设定粒径为 1 mm,粒子的数量级将会达将模拟参数赋给粒子。模拟中采用的颗粒-表面接触刚度均为表 1 中粒间接触刚度的 10 倍,以确保粒子不会逃逸出容器。

表 1 数值模拟参数

Table 1 Parameters of numerical simulation

粒子密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	重力加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	粒间法相接触刚度 $K_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	粒间切向接触刚度 $K_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	粒间摩擦系数	粒-表面摩 擦系数	孔隙率	平均粒径/ cm
2 500	10	10^7	10^8	0.2	0.5	0.2	10

生成粒子时,采用 Duan 等^[25]提出的网格法,在 10 m×10 m 的模型箱中从底部开始用墙体隔开 70 个区域,每个区域的大小为 1 m×1 m,如图 3 所示。

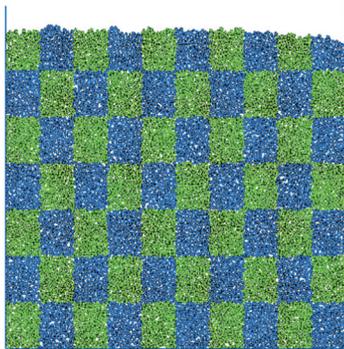


图 3 土体分组

Fig. 3 groups of the ground

Clump 构造如图 4 所示。在单个区域中按照初始孔隙率 0.2 生成直径 8~12 cm 的 ball 粒子,在最下一层粒子生成完成后,分隔区域的墙体将会被拆除,并以此类推。生成完成后,对整个土体进行超重(10g)处理,并在超重状态下达到平衡,以模拟土体从表面到深层密实度逐渐增大的变化。解除超

重后,粒子会产生一定程度的回弹。最后对随机生成的粒子粒径进行检测,得到如图 4 所示的级配曲线,该曲线不算平缓,可以用作模拟试验的土体模型。

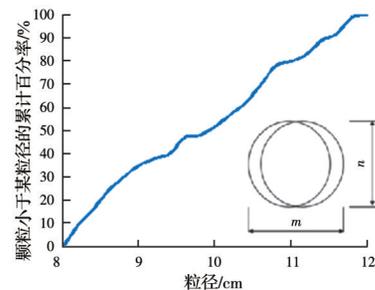
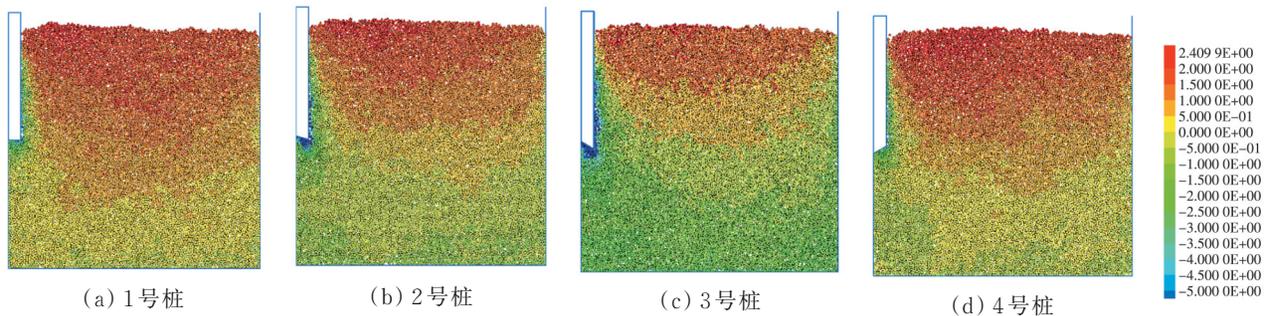


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle grading curve

1.3 数值模拟结果及讨论

1.3.1 土体位移场 图 5 是 1~4 号桩基础的土体 y 方向位移图。从图 5 可以发现,靠近桩的粒子位移较大,而距离桩较远的粒子位移较小,显然是由于桩身的拖曳效应,使得一部分土粒子随着桩的贯入被拖曳到了更深的土层中。从图 5 还可以发现,从锥形普通桩开始,即按照图 5 编号 d-a-b-c 的顺序来



注:向上为正方向。

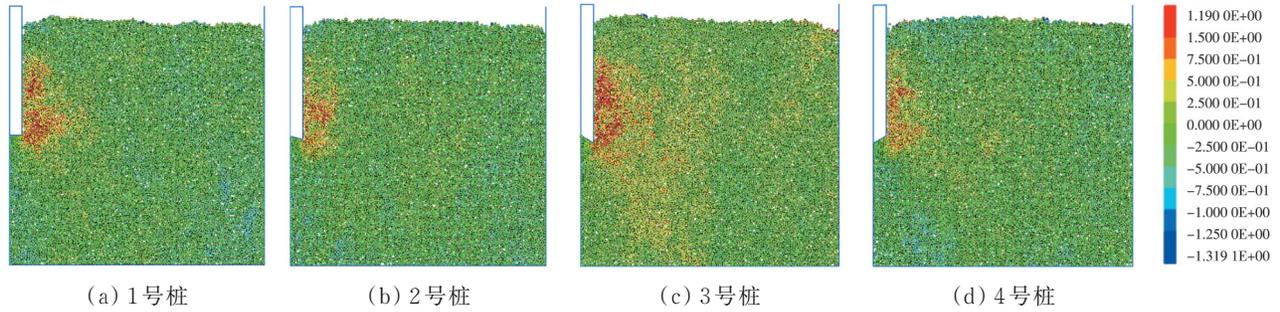
图 5 土体 y 方向的位移

Fig. 5 Displacement in the y-direction of the soil body

看,随着内倾角度的增大,桩底部开始出现蓝色的粒子,并且数目逐渐增多。这表明随着内倾角度的增大,有更多土颗粒被带入土层的更深处,产生的竖向位移也明显增大。反观平底桩和锥形桩,桩底都未出现过大的竖向位移,并且对桩周土体的扰动也更小。

图6为土体 x 方向的位移场,由图6可见,不同于 y 方向位移场的特点,从锥形桩到 15° 内倾的牙根

桩引发的土体横向位移逐渐变小,但内倾角由 15° 变化到 30° 时引发的土体横向变形又增大。结合 y 方向位移场的分析可知,内倾较大时,桩底的拖曳效应更明显,有更多土粒子被带下,分布在桩下端四周,从而引发对水平挤压的影响。可以推断,桩底内倾引发的拖曳效应也会影响水平挤压效应,随着桩侧土填量的增加,原桩侧土会进一步受到推压,导致水平方向的土扰动更大。



注:向上为正方向。

图6 土体 x 方向的位移

Fig. 6 Displacement in the x -direction of the soil body

1.3.2 荷载传递 力链网络由粒子之间的接触力组成^[26]。力链可以清楚地显示荷载传递的路径,分为强力链和弱力链,而荷载传递的主要承担者是强力链。强力链定义为其力高于平均接触力的接触点,虽然数目很少,却支撑了颗粒体系力的大部分荷载。如图7所示,接触力越大,图中显示出的线越粗。力链集中分布在桩尖以下,说明大部分桩阻力是桩底阻力。然而,对于内倾较大的仿生桩而言,在桩中心轴附近会产生更多力链,特别是在桩的底部,强力链沿着与 x 轴成 60° 的方向向更深的地层蔓延。对于平底桩,力链散布在桩底,没有明显的方向倾向。对于锥形桩,力链沿着锥面的法线方向传导至更深的地层。在基于PFC的离散元模拟中,力的传导及应力与应变的关系由颗粒的接触刚度决定。力链粗大的地方,粒子受到的力大,压缩也大。因此,可以将力链传递的主要方向看作是土体受到压缩的主要方向。观察图7中各图的力链延伸方向和粗细程度的方向分布趋势可知,仿生牙根桩引发的竖向土体压缩明显大于普通桩,而在内倾不太大的情况下,其横向压缩小于普通桩。

1.3.3 桩阻力 不同桩的桩阻力随贯入深度的变化如图8所示,图中曲线分别为1~4号桩的桩端阻力和侧摩阻力。为了更直观地展示桩阻力的区别,对桩阻力数据进行拟合处理,可以看到,在贯入初

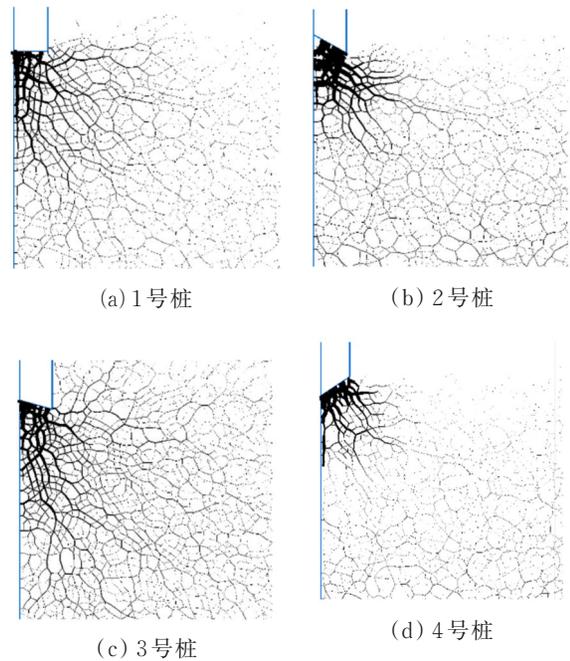


图7 土体力链分布

Fig. 7 Soil force chain distribution

期,各桩阻力随着深度的增大近似成正比地增大,贯入一定深度后,3号桩阻力增速变缓,但仍然增大。而1、2、4号桩经过增速放缓阶段后,贯入深度继续增大,桩阻力的变化却很小甚至几乎不变。比较不同的桩发现,从锥形桩到内凹的仿生牙根桩,

贯入过程中桩阻力逐渐增大。由此可知,对桩底进行与仿生牙根桩相同的内凹处理一般可以增大桩阻力,进而提升桩的承载性能。基于土体位移场和力链分布情况可以推断,相比于1号和4号普通桩,桩底内凹的仿生牙根桩桩底在贯入过程中将较少地向两侧排开土颗粒,更多地携带桩底周围大量土颗粒一起竖直向下进入更深的土层,从而导致桩底部的土颗粒量增多,进而遭受更大的挤压,产生更强的抗力。侧摩阻力的曲线分布显示,这几种桩的侧摩阻力差异不大,并且数量级都在 10^5 ,而桩阻力的数量级在 10^6 ,因此,模拟中侧摩阻力对桩阻力的影响很小,仿生桩的承载力优势在于桩端阻力。

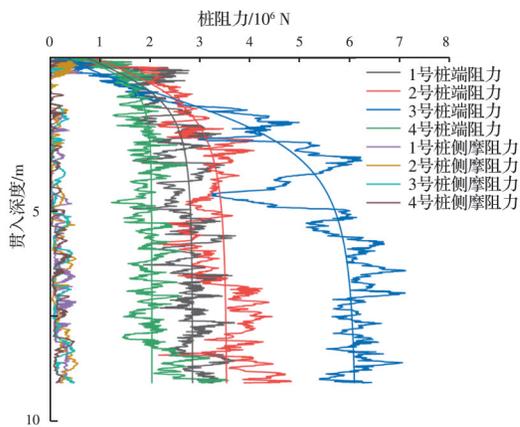


图8 桩阻力-贯入深度关系图

Fig. 8 Diagram of pile resistance-penetration depth

2 透明土模型试验方案

由数值模拟结果可知,桩底内凹的结构确实具有承载性能上的优越性,但数值模拟所用的模型桩结构过于简单,无法真实反映实际桩型的承载性能和桩周土体的位移变化,通过透明土模型试验进一步研究。

2.1 透明土试样及制备

透明土试样由熔融石英砂和折射率相匹配的空隙液配制而成。熔融石英砂的颗粒粒径为 $0.5\sim 1.2\text{ mm}$ 。对不同折射率条件下透明土试样透明度的测试发现,在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,孔隙液折射率为 1.4585 的透明土试样的透明度最优。根据陈强等^[27]的测定,在 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 时,采用正十二烷和15号白油以体积比 $1:2.5$ 左右混合而成的孔隙液配置的透明土透明度最好。因此,从体积比 $1:2.5$ 开始进行微调,直到调节至试验温度下最佳的透明度。正十二烷与食品级15号白油的基本物理性质如表2所示。

表2 正十二烷和15号白油的基本物理性质

Table 2 Basic physical properties of n-dodecane and No.15 white oil

材料	外观	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	25 °C时的折射率
正十二烷	无色透明	750	1.421 5
15号白油	无色透明	849	1.465 8

注:折射率采用阿贝折射仪测得。

透明土试样的制备:首先按照合适的折射率配置好混合液,至少确保能够没过石英砂 2 cm ^[28]。将混合液倒入 $250\text{ mm}\times 230\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的模型箱,边搅拌边倒入石英砂。加入合适的量后,在模型箱内放入6个 2 kg 的砝码进行压实固结,并用真空泵对配置好的透明土试样进行抽真空处理 1 h ,接着静置 24 h 。最终使透明土试样达到相对密实且透明的程度,如图9所示。配置好的透明土透明度良好,放置在试样后的字和图案可以清楚看见。配置完成后的透明土(油样)内摩擦角 φ 约为 35.5° ,抗剪强度约为 10 kPa 。



图9 配置完成的透明土试样

Fig. 9 Transparent soil sample after configuration

2.2 试验装置及步骤

模型试验装置如图10所示,包括精密光学平台、CCD工业相机、沉桩加载仪、片光源激光器、控制系统、图像采集系统及计算机。沉桩加载仪通过底部的螺丝与模型桩垂直相连,形成一个整体。试验在黑暗环境中进行。通过调整激光器与透明土试样的位置,使激光器的光束垂直照亮透明土试样内部的一个平面;模型桩固定在透明土试样的中间部位,激光扇面应与模型桩轴线对齐,确保图片拍摄的是模型桩中心轴的位置。控制CCD工业相机镜头的视线与激光扇面垂直,以保证消除视差效应的影响。调节CCD相机的配套软件,打开连续拍摄模式,拍摄间隔为 1 s ,摄取初始灰度图像作为基准。进行试验前,先将实验室的遮光窗帘全部拉下,保

证环境黑暗,并将CCD相机固定在相机支架上,支架固定在光学平台上,整个过程保持相机位置的静止。相机的镜头轴线垂直于观察面,轴线的位置在玻璃面的垂直中心线上,调节相机的光圈和焦距,使视场宽度合适。然后将桩基贯入速率调节为0.5 mm/s,并保证贯入过程中桩基始终垂直。

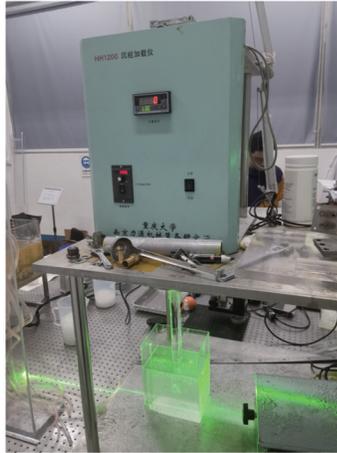


图10 试验装置
Fig. 10 Test device

采用粒子图像测速法(PIV)对试验结果进行处理。选用Matlab中的PIVlab对图像进行分析,该算法能够处理沉桩时各个时刻的横、竖向位移,并以比色条模式直观地反映出某一时刻桩周土体的位移分布,有利于分析试验结果。图11为试验中的模型箱照片。

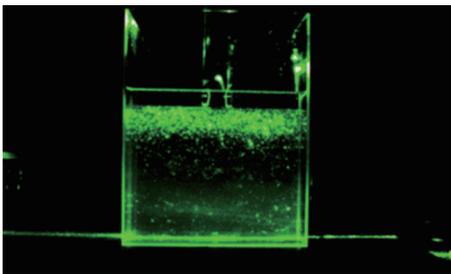


图11 试验模型箱
Fig. 11 model box during experiment

试验采用了两种模型桩:仿生牙根桩和锥形桩。数值模拟已简单抽象了仿生牙根桩的近似模型,验证了桩底内倾的可行性,因此,无需再进行简单模型的试验研究。直接按照初始设计的效果图制作仿生牙根模型桩,得到的结果更加精确。桩底去除部分和保留部分之间的分界面为抛物面,去除的类楔形体沿桩轴线的长度为80 mm。由于长度受限,两模型均只取桩底部作为分析对象。模型桩

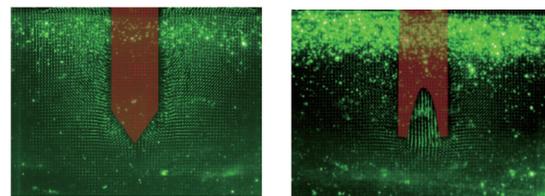
材料均采用有机玻璃(亚克力),该材料透光性好,能减少因反射带来的激光散点紊乱,从而避免影响图像处理。有机玻璃的密度为 $1.18\sim 1.19\text{ g/cm}^3$,透光率达92%以上,常温下硬而脆,抗拉、压强度约为 $50\sim 77\text{ MPa}$,抗弯强度约为 $90\sim 130\text{ MPa}$ 。两根桩直径 $R=35\text{ mm}$,桩总长 $L=250\text{ mm}$ 。研究表明^[29],沉桩挤土的径向影响范围大概为 $10R\sim 12R$,相对于试验容器偏大,但远端作用效果弱,对桩周近处定性分析影响很小。

3 试验结果分析

利用沉桩试验仪对普通桩和仿生牙根桩进行沉桩加载,分别加载至 $3R$ (两桩半径 $R=17.5\text{ mm}$)。由于牙根桩不是多轴线对称形,因此,主要分析相机投影方向平面的土体响应。

3.1 土体位移场分析

图12为普通桩与牙根桩加载至 $3R$ 深度时两桩桩底周围的位移矢量图。对比两桩底位移矢量图可以发现:普通桩贯入作用下,位移矢量箭头与水平方向夹角约为 45° ;牙根桩贯入作用下,位移矢量箭头与水平方向夹角约为 60° 。对于桩底土体位移方向,普通桩桩底土体位移主要沿其圆锥法线方向,牙根桩桩底在靠近凹槽处土体位移沿其法向移动,在中空处以及靠近牙根尖部主要沿竖直向下方向。从整体上看,牙根桩相对于普通桩,其土体响应更集中在竖直方向,在土体位移趋势上,分布也没有那么均匀。该结果与离散元模拟结果一致。



(a) 普通桩 (b) 牙根桩

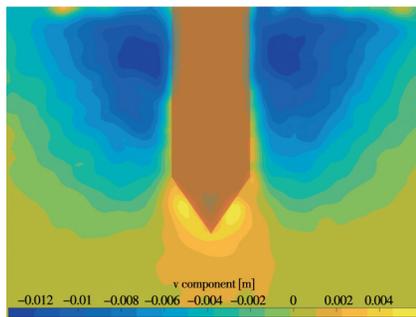
图12 桩底位移矢量图

Fig. 12 Vector diagram of pile bottom displacement

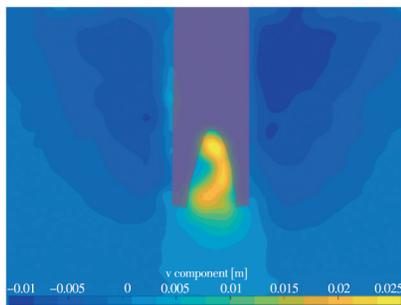
3.2 土体竖向位移

图13为普通桩和牙根桩的桩底竖向位移云图。从图13可以看出,两桩在竖向位移趋势上一致,呈桩侧土体向上隆起,桩底土体向下位移压缩;向上位移量从近桩侧向远桩侧逐渐减小,土体向下位移量从近桩底部到远桩底部逐渐减小。从竖向位移量来看,锥形桩两侧位移分布等值曲线较密,变化

梯度大,而牙根桩位移等值线分布则更为均匀。从最大向下竖向位移量来看,锥形桩竖向位移量显著小于牙根桩,向下变化梯度小,分布更加均匀;在桩底向下距离 R 处分布则趋于相近。除此之外,牙根桩在桩底处出现小范围极密的位移等值线分布,在此处竖向位移量沿近桩处向远桩处变化很快。这很可能是因为仿生牙根桩桩底两牙根之间处于由贯入挤土引发的土体高应力压缩区,高度压缩的土体较难发生应变,会随着桩底一同下移。而圆锥桩贯入主要造成向桩体两侧挤压排土,对桩底部的土体局部压缩程度较小^[30-31]。



(a) 普通桩



(b) 牙根桩

注:向下为正方向。

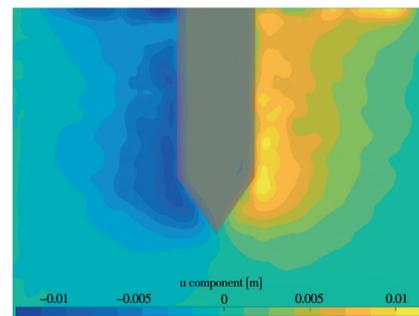
图 13 桩底竖向位移云图

Fig. 13 Cloud diagram of vertical displacement of pile bottom

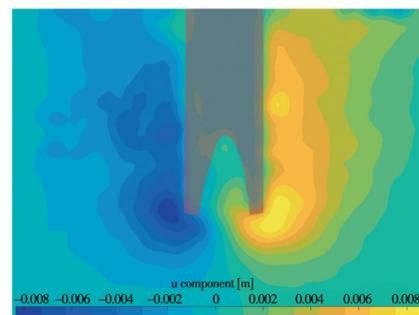
3.3 土体水平位移

图 14 为普通桩和牙根桩的桩底水平位移云图。从图 14 可以看出,锥形桩和牙根桩的水平位移变化趋势大致相同,水平位移沿近桩侧向远桩侧逐渐减小,两桩的影响范围也大致相同;在最大位移量上,牙根桩水平位移略小于锥形桩,说明两桩排开的土体体积大致相同。另外,锥形桩水平位移沿桩侧长度分布均匀,牙根桩水平位移则更集中于牙根底部及牙根两侧,牙根凹槽处几乎没有水平位移。观察仿生牙根桩的结构特点可知,在向下贯入土体的过

程中,两个分叉靠内的一侧逐渐向内靠拢,引起凹槽内土体受到压缩和排挤,导致每个分叉受到推移土体的反力。周东等^[32]指出,在抵抗桩周土体位移时,桩基础会产生“遮拦效应”,即仿生牙根桩的分叉部分会对原本倾向于向两侧扩散的土体产生阻碍作用,从而使凹槽中土体与凹槽外土体产生较大的相对位移。相对位移产生的摩阻力会限制桩周土体的横向位移,从而使牙根桩的水平位移呈现影响范围小且更加集中的特点。



(a) 普通桩



(b) 牙根桩

注:向右为正方向。

图 14 桩底水平位移云图

Fig. 14 Cloud diagram horizontal displacement of pile bottom

4 结论

1) 仿生牙根桩承载竖向荷载的性能优于普通桩。原因可能是牙根桩桩底局部竖向位移大,土体受压缩程度大,密实度高,从而使土体抗剪强度增大,剪切破坏面与水平轴的夹角更大,土体反力的竖向分量更大,使其承载性能更好;牙根桩桩侧土体的竖向位移沿长度分布均匀,使得侧摩阻力也分布均匀,从而充分发挥桩身承载性能。

2) 仿生牙根桩贯入对周围土体的总体变形影响略大于锥形桩。对于仿生牙根桩,引发的水平位移更集中,影响范围更小;而锥形桩影响范围更大,

土体压缩程度更小。土体竖向位移趋势主要体现为仿生牙根桩桩侧土体更多地被带入更深的地层,同时,桩底土形成一个大约与水平轴成 60° 角的挤压带,将压力传导至更深部;锥形桩贯入主要表现为沿圆锥面外法向方向挤排土,角度一般小于仿生牙根桩。

3)试验结果与DEM离散元预测的水平位移和竖向位移等值线的变化趋势相似,但由于DEM离散元缺乏对孔隙水的模拟,故其对于桩基贯入过程中土体变形的模拟有一定的局限性。具体表现为土颗粒切向接触刚度会因为孔隙水的存在而降低,从而造成力的模拟结果偏大。

4)对比仿生牙根桩与圆锥桩贯入过程中桩底位移矢量场发现,仿生牙根桩两个牙根间土体的挤压效应是仿生牙根桩与圆锥桩贯入机理不同的主要原因。

参考文献

- [1] 岳喜军,雷胜友,刘鹏,等.植物的根和建筑仿生[J].建筑技艺,2010(2):110-112.
YUE X J, LEI S Y, LIU P, et al. Approaching architecture bionics based on study of plants, roots [J]. Architecture Technique, 2010(2): 110-112. (in Chinese)
- [2] 浅谈生物形态在仿生建筑设计中的应用[C]//第二国际仿生设计与科技学术研讨会论文集,2021:140-143.
A brief discussion on the application of biomorphic architecture in bionic architectural design [C]// Proceedings of the Second International Symposium on Bionic Design and Technology, 2021: 140-143. (in Chinese)
- [3] 贺茂生,刘宏,孙克强,等.根式仿生基础应用技术研究[J].现代交通技术,2011,8(1):49-52.
HE M S, LIU H, SUN K Q, et al. Study of bionic root foundation application technology [J]. Modern Transportation Technology, 2011, 8(1): 49-52. (in Chinese)
- [4] 吴文乐.自升式平台仿生桩靴设计与作业评估[D].江苏镇江:江苏科技大学,2017.
WU W L. Design and operation evaluation on bionic spudcan of jack-up [D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [5] BISHOP R, HILL R, MOTT N. The theory of indentation and hardness tests [J]. Proceedings of the Physical Society, 2002, 57: 147-159.
- [6] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass [J]. Primary Care, 1972, 33(1): 75-91.
- [7] BALIGH M M. Undrained deep penetration. I: Shear stresses [J]. Geotechnique, 1986, 36(4): 471-485.
- [8] BALIGH M M. Undrained deep penetration, II: Pore pressures [J]. Géotechnique, 1986, 36(4): 487-501.
- [9] BALIGH M M. Strain path method [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1108-1136.
- [10] SAGASETA C, WHITTLE A J, SANTAGATA M. Deformation analysis of shallow penetration in clay [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(10): 687-719.
- [11] GILL D R, LEHANE B M. Extending the strain path method analogy for modelling penetrometer installation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(5): 477-489.
- [12] XIANG Y Z, LIU H L, ZHANG W G, et al. Application of transparent soil model test and DEM simulation in study of tunnel failure mechanism [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 178-184.
- [13] ZHONG W H, LIU H L, WANG Q, et al. Investigation of the penetration characteristics of snake skin-inspired pile using DEM [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(6): 1849-1865.
- [14] PINCUS H J, ISKANDER M G, LAI J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 425.
- [15] 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 Z H, KONG G Q, LIU H L, 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)
- [16] 曹兆虎,孔纲强,周航,等.基于透明土的静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J].岩土力学,2015,36(5):1363-1367,1374.
CAO Z H, KONG G Q, ZHOU H, et al. Model test on installation effect of tapered piles in transparent soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1363-1367, 1374. (in Chinese)
- [17] ZHANG W G, GU X, ZHONG W H, et al. Review of transparent soil model testing technique for underground construction: Ground visualization and result digitalization [J]. Underground Space, 2022, 7(4): 702-723.
- [18] 刘汉龙,钟海怡,顾鑫,等.平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(1):1-10.

- LIU H L, ZHONG H Y, GU X, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnels excavation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 1-10.
- [19] SIEMENS G, OLDROYD C, BEDDOE R. Flow cell with high-resolution spatial and temporal degree of saturation measurements for two-dimensional near-surface phenomena using unsaturated transparent soil [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2021, 44: 20200082.
- [20] ADS A, SHARIFUL ISLAM M, ISKANDER M. Effect of face losses and cover-to-diameter ratio on tunneling induced settlements in soft clay, using transparent soil models [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(8): 5529-5547.
- [21] ADS A, ISKANDER M, BLESS S, et al. Visualizing the effect of Fin length on torpedo anchor penetration and pullout using a transparent soil [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 108021.
- [22] BOLTON M, GUI M, GARNIER J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand [J]. *Geotechnique*, 1999, 49: 543-552.
- [23] GU X Q, CHEN Y W, HUANG M S. Critical state shear behavior of the soil-structure interface determined by discrete element modeling [J]. *Particuology*, 2017, 35: 68-77.
- [24] WU K, LIU S Y, SUN W C, et al. DEM study of the shear behavior and formation of shear band in biaxial test [J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(4): 1431-1440.
- [25] DUAN N, CHENG Y. A modified method of generating specimens for a 2D DEM centrifuge model [C]//Geo-Chicago 2016: Sustainable Materials and Resource Conservation, 2016: 610-620.
- [26] PETERS J F, MUTHUSWAMY M, WIBOWO J, et al. Characterization of force chains in granular material [J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(4): 041307.
- [27] 陈强, 董桂城, 王超, 等. 基于透明土技术的桩后土拱效应特征分析[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(3): 509-522.
- CHEN Q, DONG G C, WANG C, et al. Characteristics analysis of soil arching effect behind pile based on transparent soil technology [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(3): 509-522. (in Chinese)
- [28] ZHANG W G, ZHONG H Y, XIANG Y Z, et al. Visualization and digitization of model tunnel deformation via transparent soil testing technique [J]. *Underground Space*, 2022, 7(4): 564-576.
- [29] RANDOLPH M F, STEENFELT J S, WROTH C P. The effect of pile type on design parameter for driven piles [C]//Brighton: British Geotechnical Society, 1979: 107-114.
- [30] WHITE D, BOLTON M. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand [J]. *Geotechnique*, 2001, 54(6): 375-397.
- [31] 吴明雷, 付艳青, 刘聪. 基于透明土的静压桩贯入特性的模型试验研究[J]. *建筑科学*, 2022, 38(3): 49-55.
- WU M L, FU Y Q, LIU C. Model tests on the penetration characteristics of jacked pile in transparent granular soil [J]. *Building Science*, 2022, 38(3): 49-55. (in Chinese)
- [32] 周东, 刘汉龙, 仇文岗, 等. 被动桩侧土体位移场的透明土模型试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2686-2694.
- ZHOU D, LIU H L, ZHANG W G, et al. Transparent soil model test on the displacement field of soil around single passive pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2686-2694. (in Chinese)

(编辑 胡玲)