

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1594

珊瑚砂地基中膨胀混凝土桩竖向受压承载性能研究

邓玮婷¹, 丁选明^{1,2}, 彭 宇¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045)

摘 要: 为研究珊瑚砂地基下膨胀混凝土桩竖向承载特性, 开展了室内单桩竖向静载模型试验, 分析了膨胀混凝土桩的单桩荷载-位移曲线以及轴力、桩侧摩阻力等沿桩长分布特性, 与 PLAXIS 3D 软件数值模拟结果进行对比并探究了线膨胀率对承载特性的影响。结果表明: 珊瑚砂中膨胀混凝土桩的荷载位移曲线呈现缓变型, 在加载过程中, 荷载主要由桩侧摩阻力承担, 轴力随着深度的增加而减小, 桩侧摩阻力随深度先增加后逐渐减小, 随荷载的增加逐渐发挥作用。随着膨胀剂用量的增加, 桩身线膨胀量逐渐增加, 桩-土相互作用更加明显。添加 25% HCSA 型膨胀剂可提高近 20% 的极限承载力和 56% 的极限侧阻力, 提高桩体线膨胀率可以有效提高桩的极限承载力和侧摩阻力。该研究可为珊瑚砂桩基工程设计提供参考。

关 键 词: 珊瑚砂; 膨胀混凝土桩; 模型试验; 承载特性; 数值模拟

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 08-2814-07

A study of vertical bearing capacity of expansive concrete pile in coral sand foundation

DENG Wei-ting¹, DING Xuan-ming^{1,2}, PENG Yu¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To investigate the vertical bearing characteristics of expansive concrete piles embedded in coral sand foundation, the vertical static load test of single model pile was carried out in laboratory. The load-settlement curve, axial force and frictional resistance of single expansive concrete pile were analyzed, and compared with the numerical results from PLAXIS 3D software simulation. The effect of the linear expansion rates was discussed. The results show that the load-displacement curves of expansive concrete piles in coral sand show a slow change. During the loading process, the load is mainly borne by the side friction resistance of the pile. The axial force decreases with the increase of the depth, and the side friction resistance of the pile first increases with the depth and then gradually decreases, and gradually plays a role as the load increases. With the increase of expansive agent dosage, the linear expansion of pile shaft increases gradually and the pile-soil interaction becomes more obvious. Adding 25% HCSA expansive agent can increase the ultimate bearing capacity by nearly 20% and the ultimate value of pile side friction by 56%. Increasing the linear expansion rate of the pile can effectively increase the ultimate bearing capacity and side friction resistance of the pile. This study provides a reference for the pile foundation projects in calcareous sand foundation.

Keywords: coral sand; expansive concrete pile; model test; bearing characteristic; numerical simulation

1 引 言

近年来, 随着海洋强国战略的发展, 我国南海地区各种军用、民用工程正在如火如荼的建设中。珊瑚砂是一种特殊的生物质土, 在我国南海分布广泛, 其碳酸盐含量高硬度低、颗粒易破碎, 内部孔

隙多、粒间易胶结、颗粒形状不规则等物理力学性质与普通陆源砂差异较大^[1-5]。实践和研究表明, 传统的理论和经验对珊瑚砂地基下的桩基工程建设是不适用的^[6], 选择经济、适用的桩基类型是尤为重要的。

早期国外学者对珊瑚砂地基中桩基工程的研究

收稿日期: 2019-09-16 修回日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51878103, No. 41831282)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51878103, 41831282).

第一作者简介: 邓玮婷, 女, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事珊瑚砂地基中膨胀混凝土桩的研究。E-mail: dwtcqu@163.com

通讯作者: 丁选明, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事桩基动力学和地基处理等方面的教学和科研工作。E-mail: dxmhhhu@163.com

多通过进行现场试验。Angemeer 等^[6]通过打入足尺开口钢管桩, 得到珊瑚砂地基下深埋桩的承载力低于石英砂的结论。Nabil^[7]通过在阿拉伯湾进行现场试验, 发现打入桩会减少桩侧摩阻力, 桩侧摩阻力极限值约为钻孔桩的 60%。我国学者秦月^[8]、单华刚^[9]等通过进行室内单桩模型试验得到了珊瑚砂地基中桩-土相互作用机制、不同受力方向桩基荷载传递机制和桩端土破坏模式; 江浩^[10]通过单桩、群桩模型试验得出造成桩侧摩阻力较低的原因是颗粒破碎。

膨胀混凝土桩是在混凝土中加入膨胀剂, 使桩体膨胀, 以达到提升桩基承载力减小沉降的作用。美国 Sheikh 教授等^[11-12]通过自主配制膨胀剂, 在黏土中进行膨胀混凝土桩性能研究, 得出添加 10%~30%膨胀剂可以增加 50%的侧摩阻力并减少约 50%的沉降, 桩的长期强度和刚度也较普通混凝土桩有所提高。颜万才^[13]、李顺群等^[14]将膨胀混凝土桩应用于上海、武汉的工程实践中, 通过现场试验数据证明了膨胀混凝土桩的经济性、可行性。然而, 针对珊瑚砂地基下膨胀混凝土桩承载性能的研究尚未展开。

本文通过室内模型试验和 PLAXIS 3D 建立单桩模型相结合的方式, 对比珊瑚砂地基下膨胀混凝土桩与普通混凝土桩的荷载-位移曲线、桩身轴力以及桩侧摩阻力分布情况等, 进行珊瑚砂中膨胀混凝土桩承载性能的研究。

2 试验概况

2.1 试验材料

试验采用取自南海某岛的珊瑚砂, 首先进行物理性质试验得到砂样的物理力学指标见表 1。通过筛分, 得到原始级配的珊瑚砂不均匀系数 $C_u = 2.47$, 曲率系数 $C_c = 1.08$ 属于级配不良土, 级配曲线如图 1 所示。试验时采用人工填筑、分层轻压的方式进行地基制备, 以得到相对密实度为 51%的均质砂样。

试验采用的 HCSA 膨胀剂是赵顺增等^[15]研制成功的新一代高性能混凝土膨胀剂, 与国内传统膨胀剂相比, 具有膨胀性能高、稳定性好、安全可靠的特点。膨胀剂掺量为占胶凝材料的质量百分比, 使用时按照质量百分比以干粉的形式添加至水泥中

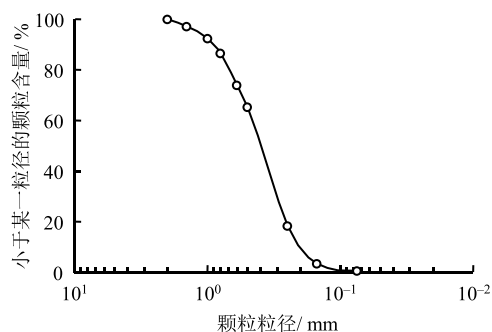


图 1 珊瑚砂级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curves of test sand

充分搅拌, 之后与河沙混合均匀, 加水充分拌合, 在模型槽中现场浇筑, 室内养护 30 d 后进行试验。

2.2 试验方案

2.2.1 模型桩

试验采用 3 根长 600 mm、直径为 71 mm 的模型桩, 分别添加 HCSA 膨胀剂 0%、15%、25%, 浇筑时水泥和河沙的比例为 1:2, 桩身混凝土配合参数如表 2 所示。

表 2 模型桩混凝土配合参数

Table 2 Concrete composition of model pile

桩号	水泥质量 / kg	河沙质量 / kg	膨胀剂质量 / kg	膨胀剂占胶凝材料比例 R_m / %
1	2.50	5	0.00	0
2	2.12	5	0.38	15
3	1.87	5	0.63	25

2.2.2 试验仪器与加载方式

试验仪器包括模型槽、加载系统和测量系统。模型槽大小为 1 m×0.8 m×0.8 m, 用有机玻璃制作四周挡板和底板并设置角钢加固, 加载系统由千斤顶、液压泵和应力计组成。单桩自下而上设置 7 对对称布置的应变片, 每对间隔 10 cm。加载时在载荷板上对称放置两个百分表, 测量桩顶竖向位移, 试验装置如图 2 所示。

试验采用慢速维荷加载法, 每加一级荷载, 稳压 30 min 视为稳定。初始荷载 0.35 kN, 荷载增量 0.2 kN 接近预估临界状态时减小荷载增量, 当在某一荷载作用下位移迅速增大或达到千斤顶最大量程方可停止加载。

3 试验结果分析

3.1 膨胀率

试验加载结束后, 将测试桩从模型槽中取出, 刮去表面浮砂, 用游标卡尺测量桩的直径。对比桩

表 1 珊瑚砂的物理性质参数

Table 1 Physical properties of test sand

材料	黏聚力 c / kPa	摩擦角 φ / (°)	相对密度 G_s	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	最小干密度 / (g · cm ⁻³)
珊瑚砂	2.86	41.35	2.78	1.70	1.22

1 ($R_m = 0\%$), 计算得到桩 2、桩 3 的线膨胀率如表 3 所示。由此可得, 桩的线膨胀率随膨胀剂添加剂量的增加而增加。

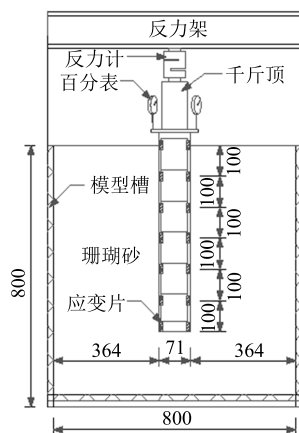


图 2 试验模型及加载示意图 (单位: mm)

Fig.2 Test model and loading (unit: mm)

表 3 膨胀混凝土桩的线膨胀率

Table 3 Linear expansion rate of expansive concrete pile

桩号	1	2	3
线膨胀率/%	0.00	0.54	0.98

3.2 膨胀剂对桩基承载特性的影响

图 3 反映了各组竖向压力作用时, 桩顶部的竖向位移变化情况。从图中可知, 桩 1、桩 3 的荷载-位移曲线均呈现缓变型, 在加载初期, 桩周土处于弹性变形阶段, 位移近似线性增大, 进一步随着荷载的继续增加, 桩顶位移增长速率逐渐提高。

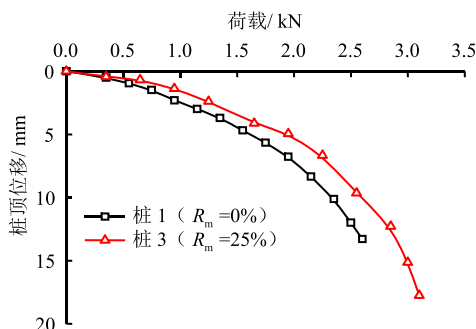


图 3 试验桩荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves of the tested piles

如图 4 所示, 采用双折线法计算极限承载力, 可得桩 1、桩 3 的极限承载力为 1.85 kN 和 2.20 kN。结果表明, 模型桩掺入 25% 的膨胀剂可以提升 18.9% 的极限承载力, 由图可知, 在相同荷载作用下桩 3 的桩顶竖向位移总是小于桩 1, 说明添加膨胀剂也可以减少桩体竖向位移。由于桩 3 相对于桩

1 的线膨胀率为 0.98%, 桩沿桩径、桩长均有所膨胀, 桩体对桩周和桩端土体有挤压作用, 提升桩身受到的侧向土压力, 提高桩侧摩阻力及端阻力, 从而提升桩的极限承载力并减少竖向位移。

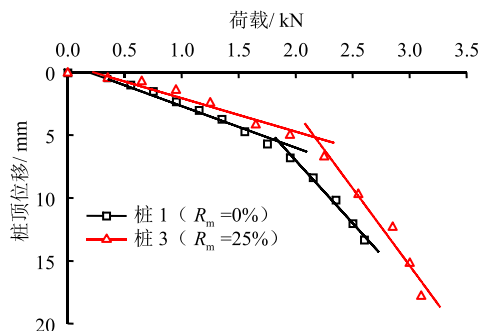
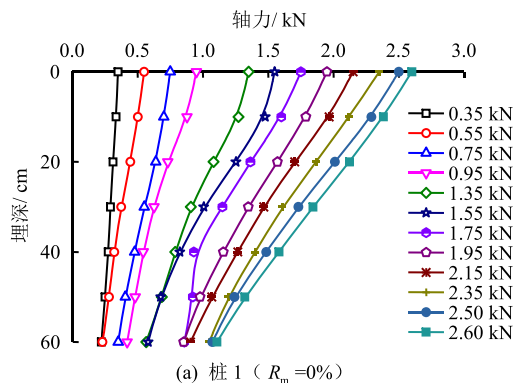


图 4 双折线法确定模型桩极限承载力

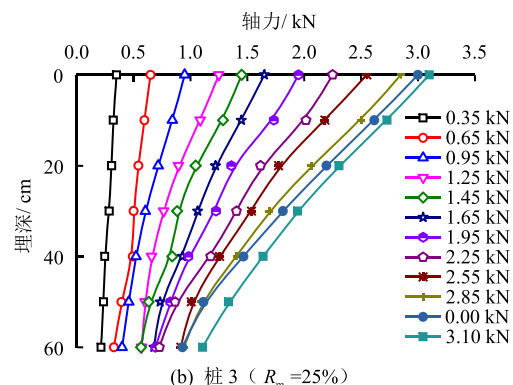
Fig.4 Ultimate bearing capacity by double broken lines

3.3 桩身轴力传递特性

模型桩轴力分布如图 5 所示。图中表明, 膨胀混凝土灌注桩的轴力分布规律与普通现浇混凝土灌注桩的轴力分布相似。轴力自上而下逐渐减小, 当荷载较小时, 轴力变化不大, 随着荷载增加, 桩-土相对位移增加, 侧摩阻力逐渐发挥作用, 轴向力减小速度加快。在极限荷载下, 珊瑚砂中桩 1、桩 3 桩端土体分担的荷载分别约为 43% 和 35%, 桩端阻



(a) 桩 1 ($R_m = 0\%$)



(b) 桩 3 ($R_m = 25\%$)

图 5 桩身轴力分布

Fig.5 Distribution of axial force

力发挥的作用随膨胀剂掺量的增加逐渐减小, 桩 3 较桩 1 的桩端阻力分担比例减少约 8%, 说明添加膨胀剂更有利于侧摩阻力的发挥。

相同荷载作用下桩 1 与桩 3 中轴力变化情况如图 6 所示, 在 0.95 kN 荷载作用下, 桩 1 与桩 3 轴力分布规律相同, 各截面处二者轴力差异并不明显, 而在 1.95 kN 荷载时, 桩 3 的轴力分布近似平行, 从桩顶至桩端逐渐减小, 减小的速率基本保持不变, 桩 1 的桩身上部轴力衰减速率大于桩身下部, 而且桩 3 与桩 1 轴力差值随深度的增加而增大。

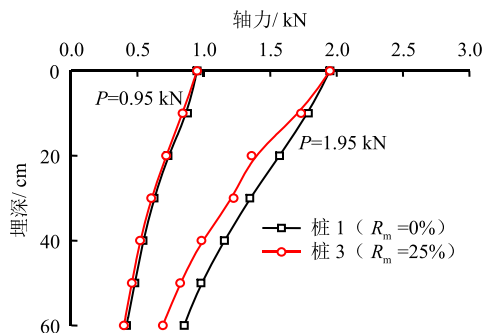


图 6 桩 1、桩 3 相同荷载下桩身轴力分布

Fig.6 Distribution of axial force along with pile 1 and pile 3 under same loadings

3.4 桩侧摩阻力特性

图 7 描述的是模型桩的桩侧摩阻力分布情况。由图可知, 当荷载较小时, 两桩的侧摩阻力变化均不明显; 当大于荷载 1 kN 时, 侧摩阻力随深度变化趋于明显, 先逐渐增大在埋深 15~35 cm 之间的达到最大侧摩阻力, 然后随着深度减小。桩 3 的最大侧摩阻力为 19.64 kPa, 约为桩 1 最大侧摩阻力 12.59 kPa 的 1.56 倍, 说明膨胀剂的加入有利于提高桩的侧摩阻力。对于单根桩, 侧摩阻力随荷载的增大而增大, 但当荷载临近极限荷载时, 侧向摩擦力接近充分发挥, 其增量逐渐减小。

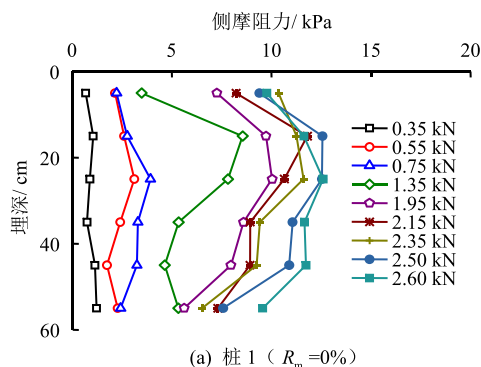
4 数值模拟

4.1 有限元模型建立

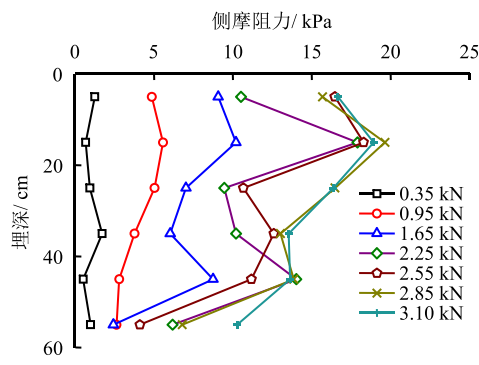
利用 PLAXIS 3D 软件, 建立如图 8 所示的数值模型, 数值模拟的模型尺寸与试验模型尺寸保持一致, 模型共计划分 10 998 个单元、16 546 个节点。

桩采用实体单元, 材料选择线弹性模型, 桩身材料参数依据试验实际测得取弹性模量 22.3 GPa, 泊松比 $\nu = 0.17$, 重度 $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ 。设置实体单元的线膨胀率来模拟添加膨胀剂造成桩体的膨胀, 根据模型试验实测结果输入线膨胀率。珊瑚砂采用摩

尔-库仑模型, 材料参数采用物理力学性质试验结果, 相对密实度为 50% 时, 弹性模量为 13 MPa, 土体重度 $\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 2.86 \text{ kPa}$, 内摩擦角为 41.35° , 剪胀角取 11° , 泊松比 $\nu = 0.25$ 。桩-土之间设置界面以模拟桩-土接触, 界面材料参数设置选取从相邻的土, 通过输入界面接触系数对珊瑚砂材料性质进行折减作为接触界面材料, 修改界面接触系数对试验结果进行拟合。



(a) 桩 1 ($R_m=0\%$)



(b) 桩 3 ($R_m=25\%$)

图 7 桩侧摩阻力分布

Fig.7 Distribution of side frictional resistances

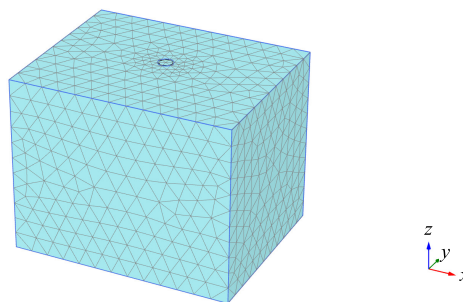


图 8 模型有限元网格划分

Fig.8 FEM meshes of the model

4.2 有限元模型合理性验证及分析

4.2.1 荷载-位移曲线

为验证模型的正确性, 将有限元模型计算荷载-位移曲线与试验实测曲线对比, 如图 9 所示。通过对比可知, 两种方法得到的荷载-位移曲线吻合较

好,证明了所建立模型的合理性。由图可知,荷载-位移曲线均呈现缓变型,在荷载加载初期位移随荷载呈线性增加,当荷载达到极限承载力后,荷载-位移曲线的斜率增加,位移与荷载又呈现近线性变化。

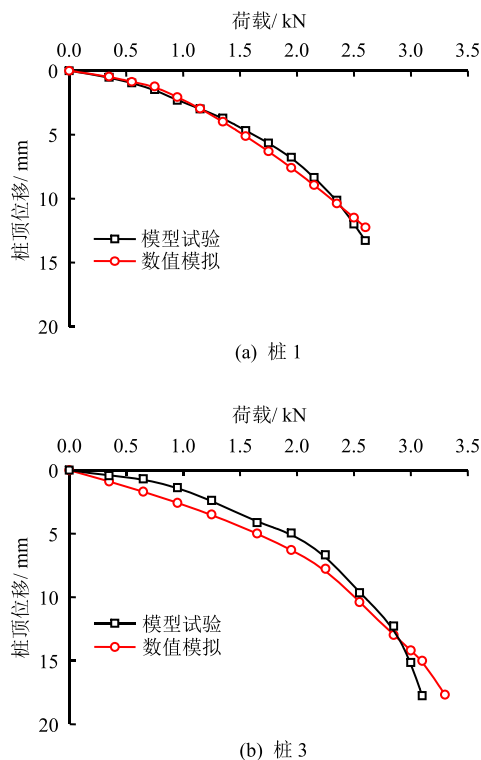


图9 有限元计算与试验结果比较
Fig.9 Comparison between FE simulations and test results

4.2.2 桩身轴力分布

从图10可以看出,数值模拟结果与试验结果规律大致相同。桩身轴力自上而下随深度逐渐减小,随着荷载的增加,单桩的轴力分布曲线接近平行,轴力衰减速率不随荷载的增加而增大。其中桩1桩身轴力减小速率随深度变化不明显,桩3轴力衰减速率随深度的增加而增大,说明与普通混凝土桩相比,膨胀混凝土桩的侧摩阻力更大。

对比在相同荷载作用下,桩的数值模拟结果与试验结果如图11所示。对于桩1埋深小于40 cm部分轴力分布基本相同,埋深大于40 cm数值模拟轴力衰减速率大于试验结果,因为数值模拟不能考虑加载过程中珊瑚砂的颗粒破碎对桩端土体的挤密作用。而桩3轴力变化稍有不同,从桩顶开始,试验结果的轴力衰减速率较大,后随深度增减逐渐减小至小于数值模拟结果,因为数值模拟只考虑了桩体膨胀对膨胀混凝土桩侧摩阻力的有益影响,未能考虑膨胀剂对桩周土体强度的加固作用,最终桩端阻力试验结果均大于数值模拟结果。

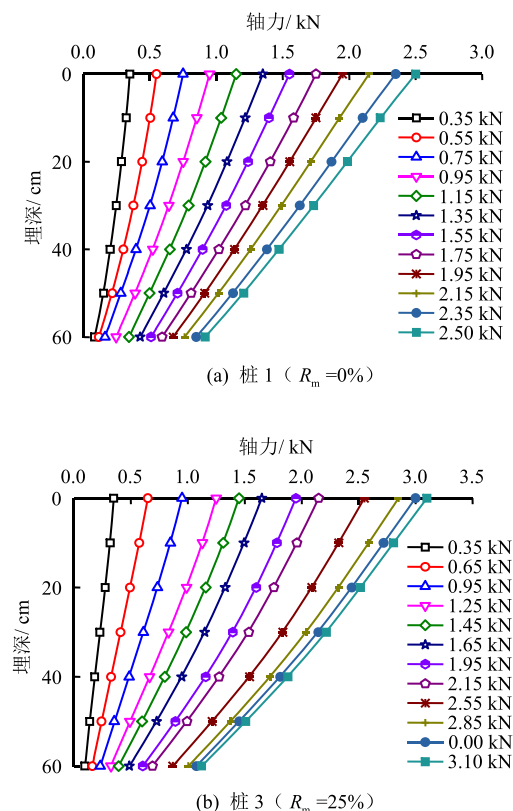


图10 数值模拟桩身轴力分布
Fig.10 Distribution of axial force from FEM simulations

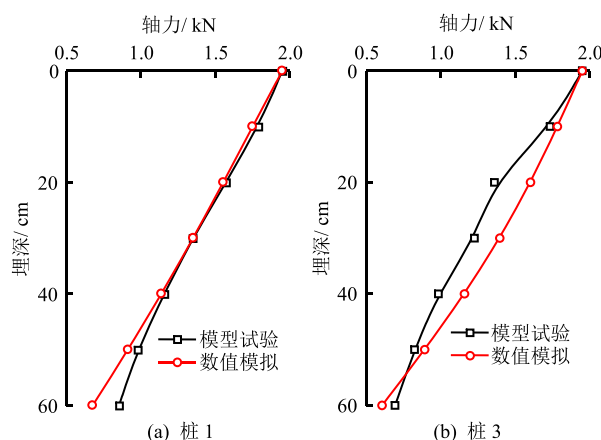


图11 1.95 kN荷载作用下有限元计算与试验结果轴力比较
Fig.11 Comparison of axial force between FE simulations and test results under 1.95 kN load

4.3 线膨胀率对膨胀混凝土桩承载性能的影响

桩身膨胀是膨胀混凝土灌注桩承载力提高的主要原因之一^[14],膨胀剂的掺量不同造成桩身线膨胀率不同进而影响桩的承载特性。根据4.1节中所述有限元模型,对表示桩的实体单元线膨胀率LE分别取0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%进行计算,研究线膨胀率对膨胀混凝土桩竖向受压承载性能的影响。

4.3.1 线膨胀率对极限承载力的影响

根据数值模拟结果做出荷载-位移曲线分布如图

12 所示, 由图可知, 当只考虑线膨胀率的影响时, 在荷载加载初期线膨胀率大的工况桩顶竖向位移增长速率略大于线膨胀率小的工况。随着荷载增加侧, 摩阻力逐渐发挥作用, 桩体膨胀对减小桩顶竖向位移的优势逐渐显现。荷载-位移曲线斜率转折点所对应的横坐标随线膨胀率的增加而增加, 说明其极限承载力随桩身膨胀而增加。

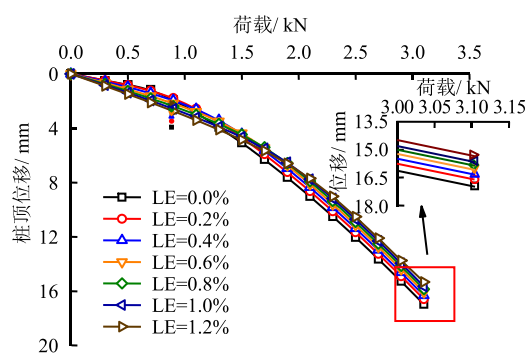


图 12 不同线膨胀率的荷载-位移曲线

Fig.12 Load-displacement curves for various linear expansion rates

通过双折线法得到桩的极限承载力分别为 1.559、1.704、1.757、1.824、1.879、1.947、2.006 kN, 极限承载力随线膨胀率变化曲线如图 13 所示。由图可知, 在桩径相同的情况下, 极限承载力与线膨胀率成正相关, 随着线膨胀率的增加而增大, 说明通过提高桩体线膨胀率来提升桩的承载性能是可行的。

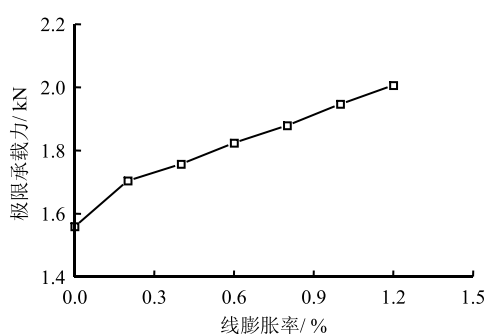


图 13 极限承载力随线膨胀率变化曲线

Fig.13 Ultimate bearing capacity versus linear expansion rate

4.3.2 线膨胀率对桩侧摩阻力的影响

根据轴力得到不同工况下相同荷载作用下桩侧摩阻力的分布情况如图 14 所示。当荷载较小时, 桩-土相对位移较小, 侧摩阻力未充分发挥作用, 随深度变化不明显, 其分布情况受线膨胀率的影响较小; 在 3.1 kN 荷载作用下, 侧摩阻力沿桩身自上而下逐

渐增加, 之后随侧摩阻力增长速率趋于平缓, 最大侧摩阻力出现在埋深 40~60 cm 区域内。对比不同工况, 整体上各工况的极限侧摩阻力随线膨胀率的增加而增加。线膨胀率为 0%、0.4%、0.8%、1.2% 的工况极限侧摩阻力分别为 13.74、14.17、14.79、15.52 kPa。线膨胀率为 1.2% 时极限侧摩阻力提高了 12.95%, 而试验结果线膨胀率为 0.98% 时极限侧摩阻力较普通混凝土桩提高了 56%, 说明桩身膨胀仅是侧摩阻力提高的一个因素。

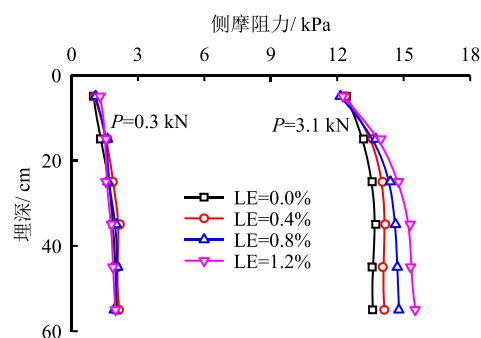


图 14 桩侧摩阻力随线膨胀率变化曲线

Fig.14 Distribution of skin friction with linear expansion rate

4.3.3 线膨胀率对荷载分担比例的影响

桩侧摩阻力 Q_s 及桩端阻力 Q_p 所占比列随荷载 Q 变化如图 15 所示。由图可知, 珊瑚砂中侧摩阻力对桩基承载力起主要的作用。侧摩阻力的贡献作用随荷载的增加先增大后减小, 原因是在荷载较小时桩-土相对位移较小, 桩侧摩阻力较小; 随着荷载逐渐增加, 侧摩阻力逐渐发挥作用, 桩侧摩阻力分担比例逐渐增加; 当荷载继续增加时, 桩侧摩阻力得到充分发挥, 桩端阻力承担荷载比例逐渐增加, 侧摩阻力承担比例逐渐减小。

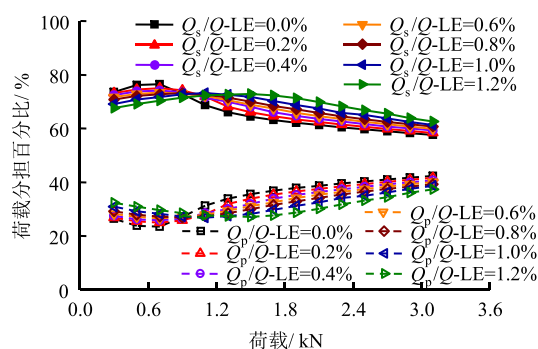


图 15 荷载分担比例变化曲线

Fig.15 Curves of load-sharing ratio

不同线膨胀率的工况相比, 荷载分担曲线变化规律有所不同。初始荷载作用下, 线膨胀率较大的

工况桩端阻力发挥的作用更大,随着荷载的增加,桩侧摩阻力逐渐发挥作用,线膨胀率较小的工况 Q_s/Q 曲线增长速率更快且先达到峰值,说明线膨胀率较小的工况桩侧摩阻力先充分发挥作用,之后 Q_s/Q 曲线呈现下降趋势且下降趋势逐渐变缓,此时相同荷载作用下线膨胀率大的工况侧摩阻力所占的比例高于线膨胀率小的工况。

5 结 论

本文对珊瑚砂地基中膨胀混凝土桩的竖向承载性能进行了研究,通过模型试验和数值模拟对比分析,得到以下结论:

(1) 模型试验结果表明,添加 HCSA 膨胀剂,桩体线膨胀率随膨胀剂掺量的增加而增大,添加 25% 的膨胀剂可以提升珊瑚砂地基中模型桩 20% 的承载力,提升 56% 的极限侧摩阻力。

(2) 模型试验结果表明,珊瑚砂中膨胀混凝土桩荷载-位移曲线呈现缓变型,桩身轴力随埋置深度的增加而逐渐减小,桩侧摩阻力随深度先增加后减小,承载过程中侧摩阻力作为荷载的主要承担者。

(3) 数值模拟结果表明,在桩径相同的情况下,极限承载力与桩身线膨胀率成正相关,且线膨胀率的提高可有效提高桩侧摩阻力,但桩身膨胀是膨胀混凝土桩的桩侧摩阻力提高的一个因素。

参 考 文 献

- [1] FOOKES P G, HIGGINBOTTOM I E. The classification and description of nearshore carbonate sediments for engineering purpose[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(2): 406-411.
- [2] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(4): 607-626.
- [3] 刘崇权, 杨志强, 汪稔. 钙质土力学性质研究现状与进展[J]. *岩土力学*, 1995, 16(4): 74-84.
LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. Research status and progress of mechanical properties of calcareous soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1995, 16(4): 74-84.
- [4] 彭宇, 丁选明, 肖杨, 等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2663-2672.
PENG Yu, DING Xuan-ming, XIAO Yang, et al. Study of particle breakage behavior of calcareous sand by dyeing tracking and particle image segmentation method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2663-2672.
- [5] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. *岩土力学*, 2014, 33(7): 1831-1836.
ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 33(7): 1831-1836.
- [6] ANGEMEER J, CARLSON E, KLINK J H. Techniques and results of offshore pile load testing in calcareous soils[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. [S. l.]: [s. n.], 1973.
- [7] NABIL ISMAEL F. Skin friction of driven piles in calcareous sands. discussion[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(3): 530-533.
- [8] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1714-1720.
QIN Yue, MENG Qing-shan, WANG Ren, et al. A study on bearing characteristics of single pile in calcareous sand based on model experiment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1714-1720.
- [9] 单华刚. 珊瑚礁钙质土中桩基工程承载性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
SHAN Hua-gang. Research on bearing behavior of pile in calcareous soil of coral reef[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [10] 江浩. 钙质砂中桩基工程承载性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
JIANG Hao. Study on bearing behavior of pile foundation in calcareous sand[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [11] SHEIKH S A, O'NEILL M W. Long-term behavior of expansive concrete drilled shafts[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1986, 13(2): 213-217.
- [12] SHEIKH S A, O'NEILL M W, MEHRAZARIN M A. Expansive concrete drilled shafts[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1985, 12(2): 382-395.
- [13] 颜万才. 膨胀混凝土在加固钻孔灌注桩中的应用[J]. *地质学刊*, 1997(2): 103-106.
YAN Wan-cai. Application of expansive concrete in reinforcing bored piles[J]. *Journal of Geology*, 1997(2): 103-106.
- [14] 李顺群, 丁威. 膨胀混凝土灌注桩的受力分析[J]. *辽宁工学院学报*, 2004, 24(4): 53-57.
LI Shun-qun, DING Wei. Stress analysis of expansive concrete cast-in-place piles[J]. *Journal of Liaoning Institute of Technology*, 2004, 24(4): 53-57.
- [15] 赵顺增, 刘立. HCSA 膨胀剂与化学外加剂、水泥的适应性研究[J]. *膨胀剂与膨胀混凝土*, 2006(2): 1-5.
ZHAO Shun-zeng, LIU Li. Study on the adaptability of HCSA expansive agent to chemical admixtures and cement[J]. *Expansive agent and expansive concrete*, 2006(2): 1-5.