

DOI: 10.11779/CJGE2022S1013

珊瑚砂地基中微生物珊瑚砂桩承载特性试验研究

申春妮¹, 方祥位^{2*}, 胡丰慧², 姚志华³, 李洋洋⁴

(1. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 空军工程大学机场建筑工程系, 陕西 西安 710038; 4. 西沙水警区保障部, 海南 三沙 573100)

摘要: 微生物珊瑚砂桩是一种新型桩, 即利用微生物固化技术将珊瑚砂固化成桩。对不同相对密实度珊瑚砂地基中的微生物珊瑚砂桩进行载荷模型试验, 研究了珊瑚砂地基相对密实度对微生物桩的单桩承载力、沉降、轴力传递和桩侧摩阻力等特性的影响。试验结果表明, 利用微生物固化技术得到的珊瑚砂桩效果好, 桩体的无侧限抗压强度达到 12 MPa; 随珊瑚砂地基相对密实度增大, 微生物珊瑚砂桩单桩承载力增大, 桩顶沉降减小; 微生物珊瑚砂桩身轴力随珊瑚砂地基相对密实度增大而减小, 随深度增加而减小; 微生物珊瑚砂桩的侧摩阻力随珊瑚砂地基相对密实度增大而增大, 随深度先快速增大后缓慢减小; 桩端反力占总荷载比随珊瑚砂地基相对密实度增大而减小。试验结果为微生物珊瑚砂桩的工程应用奠定基础。

关键词: 微生物珊瑚砂桩; 模型试验; 承载力; 沉降; 桩侧摩阻力; 桩端反力

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S1-0068-06

作者简介: 申春妮(1976—), 女, 副教授, 主要从事岩土微生物技术及建筑材料研究。E-mail: scn1999@163.com。

Experimental study on bearing characteristics of biocemented coral sand piles in coral sand foundation

SHEN Chun-ni¹, FANG Xiang-wei^{2*}, HU Feng-hui², YAO Zhi-hua³, LI Yang-yang⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 4. Marine Protection Division of Paracel Islands, Sansha 573100, China)

Abstract: The biocemented coral sand pile is a new type of pile, which is a pile of coral sand solidified by biocementation reaction. The effects of relative compactness of coral sand foundation on the bearing capacity, settlement, axial force and shaft friction of single pile are studied by the pile load model tests in the coral sand foundation under different relative compactnesses. The test results show that the biocemented coral sand pile has good strength, and the unconfined compression strength of the pile can reach 12 MPa. When the relative compactness of sand between piles increases, the bearing capacity of single pile will be improved and the settlement will be reduced. The axial force of the biocemented coral sand pile decreases with the increase of the relative compactness and the depth of the coral sand foundation. The shaft friction increases with the increase of the relative compactness, while it increases quickly and then decreases slowly with the increase of the depth. The ratio of the pile end reaction to the total load increases with the increase of the relative compactness of the coral sand between the piles. The findings provide the basis for the engineering application of the biocemented coral sand piles.

Key words: biocemented coral sand pile; model test; bearing capacity; settlement; axial force; shaft friction

0 引言

随着中国在南海重大部署实施的逐步深入, 大规模珊瑚岛礁的工程建设势在必行、刻不容缓。岛礁陆域吹填土主要为珊瑚砂, 珊瑚砂主要由珊瑚碎屑和其它海洋生物碎屑组成, 碳酸钙含量大都在 90% 以上。珊瑚砂特殊的物质组成、结构和发育环境导致其具有独特的工程性质^[1-2]。研究珊瑚砂特殊的工程力学特性及珊瑚砂地基中的桩基础承载特性等对于岛礁工程建

设具有重要意义。

国内外学者对珊瑚砂本身的工程特性及其可能产生的危害等方面做了大量的研究; 海洋工程中建造大型海洋石油平台促进了珊瑚砂地层中的桩基工程研究。Nauroy 等^[3]对珊瑚砂地层中的混凝土桩和钢管桩

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978103); 基础加强计划技术领域基金项目(2019-JCJQ-JJ-082)

收稿日期: 2022-09-28

*通信作者 (E-mail: fangxiangwei1975@163.com)

等进行了模型和现场试验研究; 江浩^[4]对中国南海珊瑚砂中桩基工程的承载性状进行了较为系统的模型试验研究。研究均表明, 基于其它岩土材料地基的传统桩基础工程经验不能直接用于珊瑚砂。

微生物固化技术在岩土工程领域的研究已经取得了较大进展^[5], 但其研究主要针对普通砂(硅砂)。方祥位等^[6]率先对珊瑚砂的微生物固化技术进行了研究。Fang 等^[7]、郑俊杰等^[8]、李昊等^[9]研究了菌液活性、溶液盐度及浓度配比、注入方式等对微生物固化珊瑚砂的影响规律, 探讨了珊瑚砂的微生物固化机理, 并对微生物珊瑚砂固化体进行了渗透、单轴、三轴等试验, 揭示了固化体的静动力学特性。在此基础上, 方祥位等提出了利用微生物固化技术将珊瑚砂固化成桩的思路^[10], 并对微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载特性进行了初步的试验研究^[11]。

利用微生物固化技术成桩, 桩体强度可达到 10 MPa 左右, 可认为是一种低强度桩。微生物砂桩与常规低强度桩相比, 施工较快, 无需特殊养护, 且胶凝物质为碳酸钙, 与珊瑚砂成分相同, 生态影响小, 恢复快^[10]。微生物珊瑚砂桩的工程力学特性不同于常见低强度桩体, 且桩间土为珊瑚砂, 也有特殊的工程力学特性。珊瑚砂地基中的微生物珊瑚砂桩承载特性尚未见研究报道。本文对不同相对密实度珊瑚砂地基中的微生物珊瑚砂桩进行载荷模型试验, 研究珊瑚砂相对密实度对微生物砂桩的单桩承载力、沉降、轴力传递和桩侧摩阻力等特性的影响。为微生物珊瑚砂桩的工程应用奠定基础。

1 试验概况

1.1 微生物珊瑚砂桩的制备

(1) 试验材料与固化装置

试验所用珊瑚砂取自南海某岛礁, 主要成分为碳酸钙, 具有高孔隙比, 颗粒易破碎等特性。筛除珊瑚砂中大于 5 mm 的颗粒, 珊瑚砂颗粒级配如表 1 所示, 不均匀系数为 50, 曲率系数为 1.047。对珊瑚砂进行基本物性试验, 得到珊瑚砂基本物性参数如下: 颗粒比重为 2.76, 最大最小孔隙比分别为 1.12 和 0.62。

表 1 珊瑚砂颗粒级配

Table 1 Grain-size distribution of coral sand

粒径/mm	<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~5
含量/%	2.86	11.58	37.7	32.64	11.28	3.94

自行设计珊瑚砂桩固化装置, 如图 1 所示。固化模具材质为透明有机玻璃, 尺寸为内径 5 cm, 外径 7 cm, 高 60 cm。沿轴向中线分割成对称的两半(便于拆模), 两半管身用双面胶黏接到一起, 并用喉箍固定。

模具底端安装带孔橡胶塞, 将带有止水夹的乳胶管一端插入橡胶塞, 便于控制液体流出速度, 另一端插入容器用来收集反应后的底物溶液。固化装置主要由模具和铁架台构成, 模具固定到铁架台上。



图 1 珊瑚砂桩固化装置

Fig. 1 Solidification apparatus for coral sand piles

(2) 微生物珊瑚砂桩固化试验

装砂之前, 模具底端放置一层生化棉, 防止细砂被溶液带出, 接着装入一定量珊瑚砂并振实, 然后再放置一层生化棉, 以减少溶液对上层未固化珊瑚砂的扰动。

固化用微生物为巴斯德芽孢杆菌 (Bacillus pasteurii), 将少量纯菌株加入 100 mL 液体培养基中, 置于恒温振荡培养箱中进行活化培养, 菌液浑浊后进一步扩大培养为试验用菌液, 固化用菌液活性控制在 1 mmol/(min·L) 左右^[6]。固化用微生物氮源为尿素, 钙源为氯化钙, 分别加入蒸馏水配制成浓度均为 2 mol/L 的溶液, 等体积混合后得底物溶液。

珊瑚砂桩的固化工艺如下: 首先将菌液从试样顶部注入, 从底部流出, 重复 2~3 遍, 保证砂颗粒与细菌充分接触。接着注入 2 mol/L 的氯化钙和 2 mol/L 的尿素等体积混合底物溶液, 重复 3~5 遍。上述步骤每天一次, 一般 3 d 之后, 上层的珊瑚砂已经固化, 而下层的珊瑚砂没有完全固化, 此时珊瑚砂桩的渗透性比较低, 可在装置底端连接蠕动泵, 把反应后的底物溶液抽出或者通过蠕动泵反向注入。固化过程持续 7 d 左右, 固化完毕后拆模烘干得到微生物珊瑚砂桩。

1.2 单桩静载模型试验

(1) 模型试验装置

模型桩采用固化成功的微生物珊瑚砂桩, 长 40 cm, 直径 5 cm, 长径比为 8。模型箱由厚度为 8 mm 钢板焊接而成, 尺寸为 1.0 m×1.0 m×1.0 m, 由隔板隔出 0.6 m×0.6 m×1 m 部分用于本试验, 并设置钢化玻璃观察窗^[11]。

(2) 试验方案

为研究珊瑚砂地基相对密实度对微生物桩的单桩

承载力、沉降、轴力传递和桩侧摩阻力等特性的影响, 进行不同相对密实度珊瑚砂地基的单桩静载试验, 珊瑚砂地基相对密实度分别为 44%, 58% 和 70%。

采用百分表测量桩顶位移; 在水平距离桩中心位置 5 cm, 深度为 5, 10, 20, 30 cm 处和桩底及距桩底 10, 20 cm 处埋设微型土压力盒, 观测这些点的土压力。为测定桩身轴力沿深度的变化, 桩身前后距桩顶 5, 15, 25 和 35 cm 位置处分别贴应变片。

采用 5 kN 的油压千斤顶加载, 采用慢速维持荷载法分级加载。通过压力传感器获取加压信息, 达到千斤顶最大行程时终止加载。模型试验照片如图 2 所示。



图 2 模型试验照片

Fig. 2 Photo of model tests

2 试验结果与分析

2.1 微生物珊瑚砂桩特性

微生物固化后的珊瑚砂颗粒紧密连接在一起, 砂桩形状完整, 表面较光滑, 表明砂桩固化效果较好。

选取固化后的砂桩截取 10 cm 长的试样, 两端进行磨平处理, 进行无侧限抗压强度试验, 得到微生物珊瑚砂桩的单轴压缩应力-应变曲线。珊瑚砂固化体的无侧限抗压强度达到了 12 MPa, 微生物珊瑚砂桩可以认为是一种低强度桩。采用平均弹性模量法, 根据应力-应变曲线计算可得微生物珊瑚砂桩的弹性模量 E 为 1558 MPa。

选取无侧限抗压强度测试后的碎块进行微观结构 (SEM) 测试, 图 3 为珊瑚砂桩试样放大 800 倍的微观结构照片。从图 3 可以看出, 经过微生物固化作用后的砂桩内部生成了大量形状不规则且带棱角的碳酸钙晶体, 这些碳酸钙晶体一部分将珊瑚砂颗粒完全包裹, 一部分分布在颗粒间并产生黏结, 使颗粒紧密连接, 提高了砂桩的强度, 降低了桩的渗透性。

2.2 单桩承载力和沉降特征

$Q-s$ 曲线可以综合反映桩土体系的荷载传递情况、桩侧摩阻力和桩端阻力发挥情况, 并受到桩间土力学特性、桩身强度、桩长、桩径和桩长径比等因素

影响。图 4 为相对密实度分别为 44%, 58% 和 70% 的珊瑚砂地基中的微生物珊瑚砂桩 $Q-s$ 曲线。

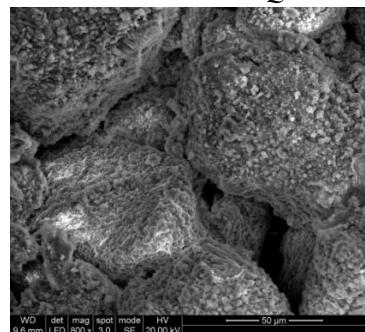


图 3 砂桩微观结构 ($\times 800$)

Fig. 3 Microstructure of core sand ($\times 800$)

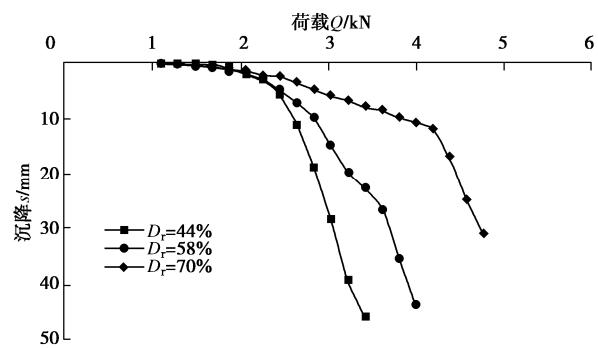


图 4 不同相对密实度条件下微生物砂桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 4 $Q-s$ curves of biocemented piles with different relative densities

由图 4 可知, 不同相对密实度条件下微生物砂桩的 $Q-s$ 曲线均属于陡降型曲线。对于陡降型 $Q-s$ 曲线, 取明显陡降的起始点对应的荷载值作为单桩竖向抗压极限承载力。当珊瑚砂地基相对密实度为 44%, 58% 和 70% 时, $Q-s$ 曲线上陡降段起始点对应的荷载分别为 2.45, 2.84, 4.19 kN, 相应的沉降量分别为 5.85, 9.87, 11.8 mm。当荷载大于竖向抗压极限承载力后, 沉降随荷载增大而迅速增大, 微生物砂桩失去承载能力。在相同荷载条件下, 珊瑚砂相对密实度越大, 桩顶沉降越小。增加珊瑚砂地基相对密实度可有效提高微生物珊瑚砂桩的承载能力和减小微生物珊瑚砂桩的沉降。

桩的承载力由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成, 桩顶沉降由桩体的沉降和桩体自身的压缩变形两部分组成。随珊瑚砂相对密实度增大, 桩基承载力增大、沉降减小的主要原因为: ①珊瑚砂的变形模量随相对密实度增大而增大, 压缩性随相对密实度增大而减小, 可以为桩体提供更大的桩端阻力, 使得桩基承载力增大; ②珊瑚砂相对密实度增大会导致桩侧水平有效应力增大, 桩侧摩阻力随之增大, 使得桩基承载力增大; 桩周土对砂桩的握持力增加, 桩体自身压缩变形减小; ③珊瑚砂颗粒在 100 kPa 的围压作用下就会

发生破碎^[2], 在夯实和加压过程中可能发生破碎现象, 随珊瑚砂相对密实度增大颗粒破碎越明显, 不规则的砂颗粒之间咬合紧密, 桩端阻力增大, 桩端沉降减小。

2.3 桩身轴力传递特性

取桩身前后相同位置处应变片测量值的平均值作为此处桩身应变, 桩身轴力为^[12]

$$Q = \varepsilon E A \quad (1)$$

式中, Q 为轴力, ε 为桩身应变, E 为桩身弹性模量, A 为桩身横截面面积。计算得到各级荷载作用下, 微生物珊瑚砂桩的桩身轴力分布如图 5 所示。

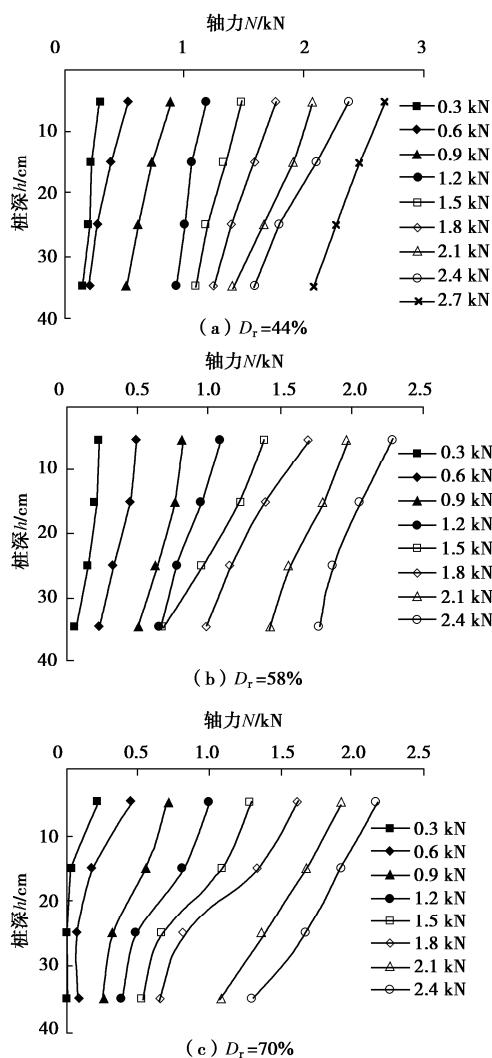


图 5 微生物珊瑚砂桩桩身轴力分布图

Fig. 5 Axial forces of biocemented piles

由图 5 可知, 在各级荷载下, 桩顶轴力最大而桩底轴力最小, 桩身轴力均随深度增加而减小。随深度增大, 相邻两级荷载作用下的轴力增量有减小的趋势。这是因为桩顶受到荷载后, 荷载通过桩身从上向下传递, 桩身受压向下移动, 造成桩侧土发生剪切变形, 将一部分力传向桩侧土, 桩侧受到向上的摩阻力。荷载向下传递过程中不断克服桩周土对桩体向上的摩阻

力, 桩侧摩阻力分担了一部分荷载, 造成桩身轴力减小。当荷载较小时, 就存在桩端阻力, 这表明微生物珊瑚砂桩的桩侧摩阻力较小, 桩端阻力占桩顶荷载的比例较大。江浩^[4]认为珊瑚砂的挤土加密效应不明显, 较普通砂小, 造成桩顶荷载大部分由桩端阻力提供, 与本文试验结果类似。

图 5 中桩身轴力均为正值, 说明桩身均受到压力作用, 这是短桩的特点; 如果桩体达到一定长度, 下部桩体将可能受到拉力作用, 且随着荷载增大, 拉力作用才会逐渐消除。随荷载增大, 轴力衰减速率增大。这是因为当施加荷载较小时, 桩身截面的变形较小, 尚未充分调动桩侧土体的阻力, 轴力衰减不明显; 当桩身截面变形达到一定程度时, 桩侧摩阻力增大, 承担更多的荷载, 轴力衰减速率逐渐增大。

对比图 5 (a), (b) 和 (c) 可以看出, 随着珊瑚砂地基相对密实度增大, 桩身轴力减小。说明大加珊瑚砂地基的相对密实度, 可以减小桩身轴力, 从而提高桩体极限承载能力, 达到防止桩体发生破坏的目的。

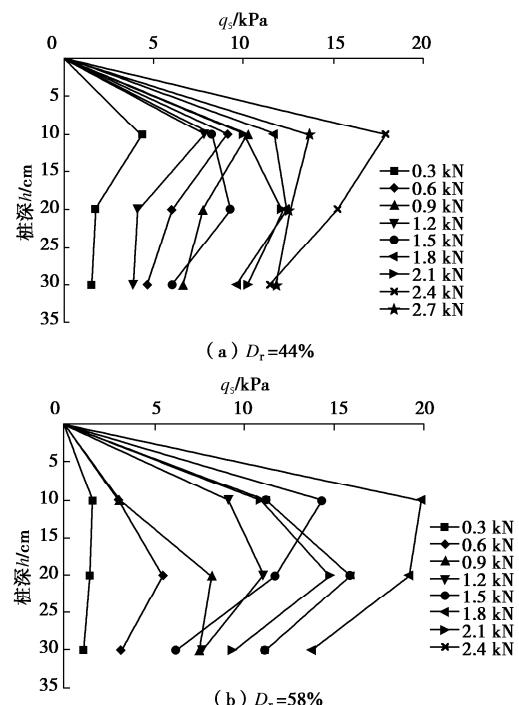
2.4 桩侧摩阻力与桩端阻力特性

桩身侧摩阻力 q_s 可用下式求得^[12]

$$q_s = \frac{Q_1 - Q_2}{L \times D \times \pi} \quad (2)$$

式中, Q_1 和 Q_2 分别为桩身单元体上下截面上的轴力, L 为桩身单元体长度, D 为桩身单元体直径。

微生物珊瑚砂桩受荷载作用后, 桩身产生压缩变形, 同时向下移动, 桩侧土抵抗砂桩向下移动而产生向上的摩擦阻力。图 6 为不同相对密实度珊瑚砂地基中, 微生物珊瑚砂桩在各级荷载作用下的桩侧摩阻力分布图。



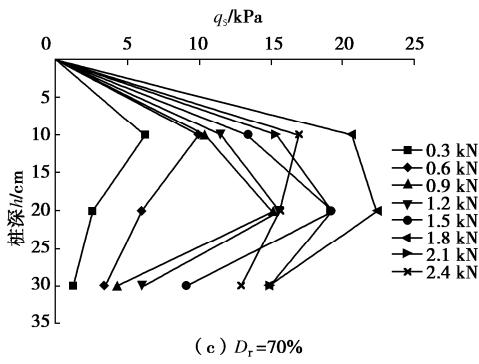


图 6 桩侧摩阻力分布图
Fig. 6 Shaft frictions of biocemented piles

从图 6 可以看出,微生物珊瑚砂桩的侧摩阻力随珊瑚砂相对密实度增大而增大,随深度先增大后减小。

当珊瑚砂地基相对密实度为 44% 和 58% 时,在桩身 0~10 cm 段,桩侧摩阻力随随深度增大而快速增大,在桩身 10~30 cm 段,桩侧摩阻力随随深度增大而缓慢减小。桩侧摩阻力快速增大段的终点均为桩深 10 cm 处,对应的桩侧摩阻力分别为 17.89, 19.80 kPa。

当珊瑚砂地基相对密实度为 70% 时,在桩身 0~10 cm 段,桩侧摩阻力随随深度增大而快速增大,在桩身 10~20 cm 段,桩侧摩阻力随随深度增大而缓慢增大,在桩身 20~30 cm 段,桩侧摩阻力随随深度增大而缓慢减小。桩侧摩阻力增大段的终点为桩深 20 cm 处,对应的桩侧摩阻力为 22.35 kPa。

可见,桩间土与桩端土弹性模量的改变,不仅改变了桩侧摩阻力的变化规律,而且改变了摩阻力的最大值。从桩侧摩阻力分布特征来看,侧摩阻力不是同时发挥,而是从上至下传递。

图 7 为不同相对密实度珊瑚砂地基中,微生物珊瑚砂桩在极限荷载作用下的桩侧摩阻力分布图。由图 7 可知,在极限荷载作用下,相对密实度分别为 44%, 58% 和 70% 珊瑚砂地基中,微生物珊瑚砂桩在极限荷载作用下的桩侧摩阻力分别为 19.20, 19.80, 22.35 kPa。桩侧摩阻力虽然随珊瑚砂相对密实度增大而增大,但是增大幅度不是很显著,可见相对密实度对桩侧摩阻力影响不明显。其主要原因为:①珊瑚砂与普通硅砂相比,挤土加密效应稍弱^[4];一般情况下,普通硅砂地基中随着相对密实度增大,桩周水平有效应力明显增大,桩侧摩阻力也会明显增大;但珊瑚砂的特殊工程力学特性导致其桩侧摩阻力增大不明显。②珊瑚砂具有颗粒易破碎的特性,随荷载增大,越来越多的珊瑚砂颗粒发生破碎,导致桩周水平有效应力减小。

图 8 为桩端反力与施加荷载关系图。从图 8 中可以看出,微生物珊瑚砂桩在相对密实度分别为 44%, 58% 和 70% 的珊瑚砂地基中的桩端反力分别为施加荷

载的 82.1%, 74% 和 66.4%, 桩端反力占总荷载比随珊瑚砂相对密实度的增大而减小。桩端反力受桩端持力层、成桩效应、进入持力层深度和桩体尺寸等因素的影响,本文中成桩方式和桩体的尺寸一定,仅分析桩端持力层特性对桩端反力影响。桩端反力占总荷载比随桩间砂相对密实度的增大而减小,其主要原因为:①桩身轴力传递到桩端,使得桩端土产生压缩变形,产生桩端阻力。桩端阻力与桩端珊瑚砂的压缩性和强度有关,珊瑚砂的变形模量随相对密实度增大而增大,压缩性随相对密实度增大而减小,因此桩端反力占比随珊瑚砂相对密实度增大而减小。②桩体的承载力由桩侧摩阻力和桩端反力构成,当荷载一定时,桩间珊瑚砂相对密实度越大,桩侧摩阻力越大,桩端反力占比减小。

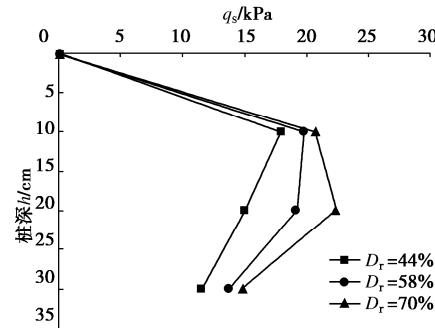


图 7 极限荷载作用下桩侧摩阻力
Fig. 7 Shaft frictions of piles under ultimate loads

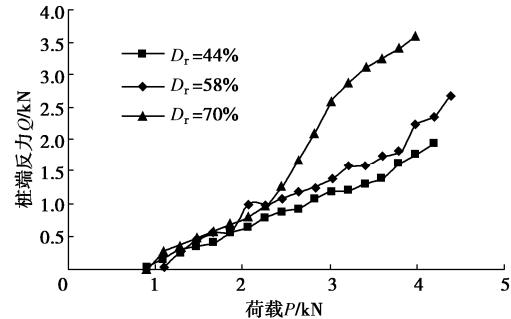


图 8 桩端反力与施加荷载关系
Fig. 8 Relationship between bottom reaction and load

3 结 论

进行了不同相对密实度珊瑚砂地基中的微生物珊瑚砂桩载荷模型试验,研究了微生物珊瑚砂桩的单桩承载力、沉降、轴力传递和桩侧摩阻力等特性,得到主要结论如下:

(1) 利用微生物固化技术得到的珊瑚砂桩效果好,桩体的无侧限抗压强度达到 12 MPa。

(2) 微生物珊瑚砂桩的单桩承载力随珊瑚砂地基相对密实度增大而增大,珊瑚砂地基相对密实度分别

为 44%, 58% 和 70% 时, 微生物珊瑚砂桩的单桩承载力分别为 2.45, 2.84, 4.19 kN; 桩顶沉降随珊瑚砂地基相对密实度增大而减小。

(3) 微生物珊瑚砂桩桩身轴力随珊瑚砂地基相对密实度增大而减小, 随深度增加而减小。增加珊瑚砂地基的相对密实度, 可以减小桩身轴力, 从而提高桩体极限承载能力。

(4) 微生物珊瑚砂桩的侧摩阻力随珊瑚砂地基相对密实度增大而增大, 随深度先快速增大后缓慢减小; 珊瑚砂地基相对密实度的变化, 不仅改变桩侧摩阻力的变化规律, 而且改变桩侧摩阻力的最大值; 桩端反力占总荷载比随珊瑚砂地基相对密实度增大而减小。

参考文献:

- [1] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(4): 607 – 626.
- [2] 吴京平, 褚 瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(5): 49 – 55. (WU Jing-ping, CHU Yao, LOU Zhi-gang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, **19**(5): 49 – 55. (in Chinese))
- [3] NAUROY J, LETIRANT P. Driven piles and drilled and grouted piles in calcareous sands[C]// The 17th Annual Offshore Technology Conference, Houston, 1985: 83 – 91.
- [4] 江 浩. 钙质砂中桩基工程承载性状研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2009. (JIANG Hao. Research on Bearing Behavior of Pile Foundations in Calcareous Sands[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese))
- [5] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 287-301.
- [6] 方祥位, 申春妮, 楚 剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2773 – 2779. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, CHU Jian, et al. An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(10): 2773 – 2779. (in Chinese))
- [7] FANG X W, YANG Y, CHEN Z, et al. Influence of fiber content and length on engineering properties of MICP-treated coral sand[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2020, **37**(6): 582 – 594.
- [8] 郑俊杰, 吴超传, 宋 杨, 等. MICP 胶结钙质砂的强度试验及强度离散性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, **41**(2): 250 – 256. (ZHENG Jun-jie, WU Chao-chuan, SONG Yang, et al. Study of the strength test and strength dispersion of MICP-treated calcareous sand[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, **41**(2): 25 – 256. (in Chinese))
- [9] 李 昊, 唐朝生, 尹黎阳, 等. MICP-FR 协同作用改善钙质砂的力学性能及抗侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(10): 1941 – 1949. (LI Hao, TANG Chao-sheng, YIN Li-yang, et al. Experimental study on surface erosion resistances and mechanical behavior of MICP-FR-treated calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(10): 1941 – 1949. (in Chinese))
- [10] 方祥位, 申春妮, 李洋洋, 等. 一种微生物砂桩成桩装置及方法: CN106906821A[P]. 2017-06-30. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, LI Yang-yang, et al. Microorganism Sand Pile Forming Device and Method: CN106906821A[P]. 2017-06-30. (in Chinese))
- [11] 陈 适, 方祥位, 刘汉龙, 等. 微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(5): 1475 – 1481. (CHEN Shi, FANG Xiang-wei, LIU Han-long, et al. Study on bearing behavior of microbial coral sand single pile composite foundation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, **15**(5): 1475 – 1481. (in Chinese))
- [12] 建筑桩基技术规范: GJ94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Technical Specification for Building Pile Foundation: GJ94—2008[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)