

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.138



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同含水状态下微生物珊瑚砂桩单桩复合地基 模型试验研究

申春妮¹, 章懿涛^{2,3}, 方祥位², 张伟⁴, 胡丰慧²

(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. 江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂, 江西 贵溪 335424; 4. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401311)

摘要: 微生物珊瑚砂桩复合地基是利用 MICP 技术固化珊瑚砂成桩与珊瑚砂组成复合地基, 具有就地取材、对原状砂土扰动小及对岛礁生态环境影响小等优势, 在岛礁工程建设中具有良好的应用前景。通过不同工况下的微生物珊瑚砂桩单桩复合地基模型试验, 研究地基相对密实度(50%、65%、72%)、面积置换率(8%、14%、20%)、含水状态(干燥和饱和)和水位升降对复合地基承载特性的影响规律。结果表明: 干燥状态下复合地基的承载力及桩侧摩阻力随地基相对密实度和面积置换率增大而增大; 复合地基的桩身轴力和桩土应力比随地基相对密实度增大而减小, 随面积置换率增大而增大; 提高地基相对密实度和面积置换率可有效提高复合地基承载力。饱和状态下复合地基的承载力为干燥状态的 49%~66%; 饱和状态相对于干燥状态桩身最大轴力和桩侧摩阻力减小, 桩土应力比增大。两次水位升降对微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的承载特性影响较小。

关键词: 微生物珊瑚砂桩; 复合地基; 模型试验; 承载力

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)05-0081-10

Experimental study on single pile composite foundation model of biocemented coral sand pile under different water content states

SHEN Chunni¹, ZHANG Yitao^{2,3}, FANG Xiangwei², ZHANG Wei⁴, HU Fenghui²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

3. Guixi Smelter Jiangxi Copper Company Limited, Guixi 335424, Jiangxi, P. R. China; 4. Department of Military Installations, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: The microbial coral sand pile composite foundation is composed of coral sand and coral sand piles solidified using MICP, which has the advantages of the ability to obtain local materials, less disturbance to the

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(51978103); 重庆英才创新创业示范团队项目(cstc2024cjh-bgzxm0012); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(JG2021072)

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。

方祥位(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: fangxiangwei1975@163.com。

Received: 2023-08-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978103); Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team Project Foundation (No. cstc2024cjh-bgzxm0012); Special Key Project of Technological Innovation and Application Development of Chongqing (No. JG2021072)

Author brief: SHEN Chunni (1976-), associate professor, main research interests: geotechnical microbiology technology and building materials, E-mail: scn1999@163.com.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fangxiangwei1975@163.com.

ground and marginal effects to the ecological environment of islands and reefs, and has good application prospects for construction of islands and reefs. Through the model test of single pile composite foundation of biocemented coral sand pile under different working conditions, the influence of relative density (50%, 65%, 72%), area replacement rate (8%, 14%, 20%), water content (dry and saturated) and water level fluctuation on the bearing characteristics was revealed. The test shows that in the dry state, with increase of the relative density and the area replacement rate, the bearing capacity and the pile side friction of the single pile composite foundation of biocemented coral sand pile increase. The axial force of the microbial coral sand pile and the stress ratio of pile and soil decrease with increase of the relative density, and increase with the area replacement rate. The bearing capacity of composite foundation can be effectively improved by increasing the relative density and area replacement rate. The ultimate bearing capacity of the single pile composite foundation of biocemented coral sand pile in the saturated state is 49%-66% of the bearing capacity in the dry state. Under the same upper load and area replacement rate, compared with the dry state, the pile side friction resistance and the maximum pile axial force of the composite foundation in the saturated state decrease, the stress ratio of pile and soil increases. The twice water level rises and falls have marginal effect on the bearing characteristics of single pile composite foundation.

Keywords: biocemented coral sand pile; composite foundation; model tests; bearing capacity

维护国家海洋权益,建设海洋强国,大规模岛礁工程建设势在必行、刻不容缓。中国已经或将要在部分岛礁进行陆域吹填,特殊海洋环境下吹填珊瑚砂的地基处理是一个具有挑战性的课题。常用的地基处理方法用于改善远离内陆珊瑚岛礁地基时会面临工程材料和施工机械运输困难、适用性不强、成本过高和造成岛礁生态环境破坏等问题^[1-3]。开发新的地基处理方法,利用可以就地取材的珊瑚砂作为陆域吹填地基施工材料能够加快岛礁工程开发和建设,具有重要意义。

微生物诱导碳酸钙沉积是一种广泛发生于自然环境的微生物矿化过程,在尿素和可溶性钙源存在的情况下,土壤沉积物中的特定细菌能够产生一种脲酶将尿素水解,分解生成的 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 结合形成碳酸钙沉淀,可用于不良土体的加固^[4-7]。针对工程性质特殊的岛礁珊瑚砂地基,方祥位等^[8]、Fang等^[9]、Liu等^[10]对珊瑚砂的微生物固化技术进行了深入研究,方祥位等^[11]基于“自然仿真”的思路,提出了微生物珊瑚砂桩复合地基这一新型技术。该地基技术通过往陆域吹填地基中灌注菌液及胶结液,注浆管附近的地基土在碳酸钙的胶结作用下固化成强度较高的竖向增强体,与珊瑚砂基形成复合地基。整个固化过程时间较短,反应产物成分与珊瑚砂相同,绿色环保,不会破坏岛礁生态环境,符合岛礁开发建设过程中“绿色工程、生态岛礁”的理念。

研究人员通过理论分析、试验研究和数值模拟等方法对复合地基承载和变形特性进行了深入分析,取得了诸多成果。在理论分析方面,张浩等^[12]提出了路基桩网复合地基承载模型,为路基桩网复合

地基设计提供理论支持。郭帅杰等^[13]通过最小二乘法拟合了复合地基加固区附加应力与上部荷载二者的抛物线方程,建立了桩体沉降计算公式。在试验研究方面,吕伟华等^[14]通过室内模型试验揭示了复合地基桩身轴力和桩侧摩阻力随上部荷载变化规律。王伟等^[15]基于多桩复合地基现场原位试验,得到了承载时荷载分担比及桩身轴力和桩侧摩阻力分布规律。Yin等^[16]通过对水泥土搅拌桩的室内模型试验,发现了水泥土搅拌桩在处理香港海底软土时的一些固结特性。在数值模拟方面, Kim等^[17]对复合地基、桩-土-褥垫层-承台相互作用等进行了有限元分析。刘明泉等^[18]基于ABAQUS,建立实际复合地基数值模型,研究了在上部荷载作用下桩体应力比及侧摩阻力等变化规律。盛桂林等^[19]运用ANSYS采用时程分析法对复合地基抗震性能和桩土应力进行了研究,基于室内试验和数值模拟发现在抗震性能方面复合地基表现良好。

复合地基相关研究成果比较丰富,并在实际工程中得到充分应用,但现有复合地基桩体多为水泥搅拌桩、CFG桩和石灰桩等,微生物珊瑚砂桩复合地基是一种新型地基处理技术,桩体为微生物技术成桩,新型复合地基桩体和桩间土体与传统复合地基有较大区别,原有的理论和工程经验等可能不再适用^[20-22]。笔者利用低pH法MICP技术固化珊瑚砂得到微生物珊瑚砂桩与珊瑚砂组成复合地基,通过不同工况下微生物珊瑚砂桩单桩复合地基模型试验,研究地基相对密实度、面积置换率、含水状态和水位升降对单桩复合地基荷载-沉降曲线、桩身轴力、桩侧摩阻力和桩土应力比等的影响规律。

1 模型试验概况

1.1 珊瑚砂

模型试验珊瑚砂(包括桩体和桩间珊瑚砂)取于某岛礁,筛除珊瑚砂中大于5 mm的颗粒得到试验用砂,通过筛析法得到珊瑚砂颗粒级配如表1所示,可得均匀系数 $C_u=3.94$ 、曲率系数 $C_c=1.04$,为级配不良砂。对试验所用珊瑚砂开展物性试验,得到珊瑚砂基本物性参数:颗粒比重2.76,最大、最小孔隙比分别为1.24和0.72,内摩擦角为 40.32° 。

表1 珊瑚砂颗粒级配

Table 1 Particle gradation of coral sand

粒径/mm	含量/%
<0.075	2.97
0.075~0.15	17.60
0.15~0.5	52.20
0.5~1.0	17.69
1.0~2.0	9.54

1.2 微生物珊瑚砂桩的制备

试验模型桩为低pH法MICP固化的微生物珊瑚砂桩。固化所用微生物为巴斯德芽孢杆菌(*Bacillus pasteurii*),经过接种活化、扩大培养等流程,控制扩培养液活性在 $1\text{ mmol}/(\text{min}\cdot\text{L})$ 左右;胶结液为 2 mol/L 的氯化钙(提供钙源)和 2 mol/L 的尿素(提供氮源)等体积混合溶液^[8]。微生物桩的制备过程为在内径5 cm的透明有机玻璃管中采用质量控制法分层(每层5 cm,根据控制初始相对密实度65%计算每层珊瑚砂质量)填充珊瑚砂高度至45 cm;砂样填筑完后,将pH值调节为4.8的菌液(1倍珊瑚砂体积)从模具顶部注入^[23],让菌液浸润整个砂样,细菌与珊瑚砂充分接触0.5 h后让其从底端橡胶管中缓慢低速流出;然后注入含氯化钙和尿素的胶结液(1倍珊瑚砂体积),采用试样上方的止水夹减缓胶结液流入速度,让胶结液从底端橡胶管中低速流出,操作进行3~4次。每天进行一遍上述过程,将细菌从顶部注入前,先缓慢注入蒸馏水2~3次清洗掉上一过程中的尿素和氯化钙,使得反应过程基本与之前保持一致。经过6~8 d微生物固化后,发现胶结液通入后不能从试样底部流出,微生物珊瑚砂桩固化完成^[21-22]。

将模具拆除并进行切割得到微生物珊瑚砂桩,桩体直径5 cm、桩体长度40 cm。在桩身左右距离桩端5、15、25、35 cm处粘贴电阻应变片,通过计算可以得到桩身轴力的分布,图1为试验微生物珊瑚砂桩应变片粘贴照片。

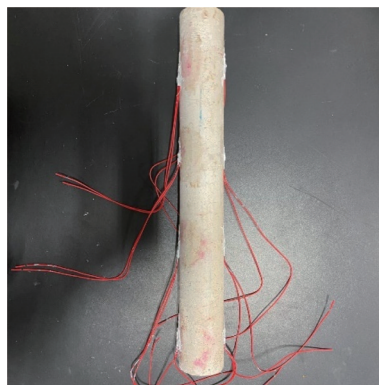


图1 桩体应变片粘贴图

Fig. 1 Paste diagram of pile strain gauge

1.3 试验方案设计

为研究干燥状态下地基相对密实度和面积置换率对复合地基承载特性的影响,选取50%、65%、72%三种地基相对密实度和8%、14%、20%三种面积置换率。岛礁上的珊瑚砂地基长期淹没在海面以下,且要经历潮水涨落,为研究饱和与水位升降下不同面积置换率的复合地基承载特性,地基相对密实度均为72%,选取与干燥状态下相同的3种面积置换率8%、14%、20%。试验方案如表2所示。

表2 试验方案

Table 2 Test plan

试验序号	试验含水状态	地基相对密实度/%	面积置换率/%
1	干燥状态	50	20
2	干燥状态	65	20
3	干燥状态	72	20
4	干燥状态	72	14
5	干燥状态	72	8
6	饱和状态	72	8
7	饱和状态	72	14
8	饱和状态	72	20
9	水位升降	72	8
10	水位升降	72	14
11	水位升降	72	20

为了均匀控制珊瑚砂地基的相对密实度,将珊瑚砂分16层填筑到模型箱中,每层5 cm,填筑高度共 80 cm ^[20]。依据设计的相对密实度计算出每层填筑的珊瑚砂质量,将称量好的珊瑚砂倒入模型箱并压实到相应的刻度线;同时,根据测试需求埋设沉降板、土压力盒等测量元件。在珊瑚砂填筑40 cm表面放置珊瑚砂桩,并用垂直线锤检验珊瑚砂桩是否垂直。填筑完毕进行整平并检测表面平整度。接着在模型箱正中央放置承压板和架设千斤顶。试验准备完毕并检查无误后开始加载和采集数据。

饱和和水位升降下复合地基模型试验中需在反力梁上放置水箱,水箱阀门连接软管使水流入埋

于砂基的水管中,水通过模型箱底部龙头连接导管流出^[20]。水位升降下珊瑚砂地基载荷试验流程为:在饱和状态下将荷载加载到 180 kPa,将水位匀速缓慢下降 50 cm 后维持 0.5 h 不变,随后将水位匀速缓慢上升 50 cm 后维持 0.5 h 不变。重复上述水位变化过程,水位升降两次完毕后继续后面各级荷载的加载直至试验完成。图 2 为复合地基模型试验照片。



图 2 模型试验照片

Fig. 2 Photo of model test

2 干燥状态下试验结果分析

2.1 单桩复合地基荷载-沉降特性

2.1.1 地基相对密实度对复合地基荷载-沉降特性影响

图 3 为不同地基相对密实度下单桩复合地基的 $P-S$ 曲线。随桩间珊瑚砂密实度提高,微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的承载力增大,沉降减小。用双折线法可计算出地基相对密实度为 50%、65% 和 72% 时复合地基极限承载力分别约为 375.06、497.86、672.42 kPa。可见提高桩间珊瑚砂的相对密实度能够有效增大复合地基承载力,相同荷载下的沉降也大幅减小。这是因为随着地基相对密实度增大,珊瑚砂颗粒间相互作用增强,珊瑚砂的承载力增大;另外,复合地基的挤土加密效应增强,珊瑚砂对桩体的侧摩阻力和握持力增大,桩体的承载作用发挥更为充分。

地基相对密实度为 72% 时复合地基承载力为 674.82 kPa,而在相同承压板下珊瑚砂地基的承载

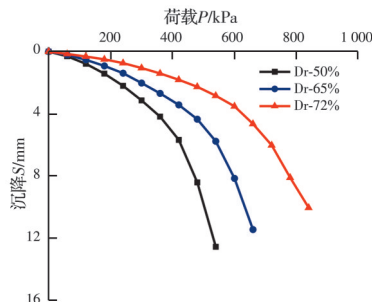


图 3 不同地基相对密实度下复合地基 $P-S$ 曲线图

Fig. 3 $P-S$ curves of composite foundation under different relative compactness

力为 480 kPa^[20],微生物珊瑚砂桩复合地基承载力比珊瑚砂地基提高约 41%,可见在微生物珊瑚砂桩能够有效提高珊瑚砂地基的承载力。

2.1.2 面积置换率对复合地基荷载-沉降特性影响

图 4 为不同面积置换率下单桩复合地基的 $P-S$ 曲线。随复合地基面积置换率增大,微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的承载力增大,沉降减小。复合地基面积置换率为 8%、14% 和 20% 时复合地基极限承载力分别约为 521.31、560.24、672.42 kPa。可见,提高复合地基的面积置换率能够有效增大复合地基承载力,相同荷载下复合地基的沉降量也大幅减小。根据复合地基承载力计算公式可知,面积置换率的变化会改变桩体和桩间珊瑚砂的荷载分担比,面积置换率增大,分担给桩体的上部荷载增多,桩间珊瑚砂承担的荷载较小,而桩体的承载力要远大于桩间珊瑚砂的承载力,因此,随着面积置换率增大复合地基的承载力增大。

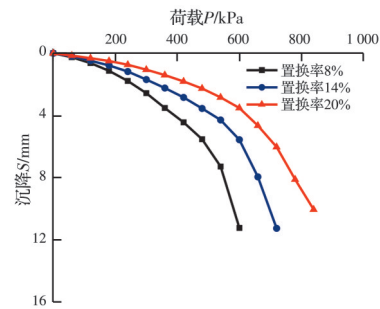


图 4 不同面积置换率下复合地基 $P-S$ 曲线图

Fig. 4 $P-S$ curves of composite foundation under different area replacement rate

2.2 桩身轴力分布

某一深度处的桩身轴力 Q 根据该处应变片所测应变 ϵ 计算^[24]。

$$Q = \epsilon EA \quad (1)$$

式中: E 为桩体的弹性模量; A 为桩身截面面积。

2.2.1 地基相对密实度对桩身轴力分布影响

图 5 为不同地基相对密实度下单桩复合地基的桩身轴力分布图。在各级荷载下,桩身轴力随深度增加而减小。上部荷载较小时,桩体各深度处轴力衰减速率相差很小;上部荷载较大时,桩体各深度处轴力衰减幅度出现较大差异。这是因为荷载较小时,桩体截面变形较小,桩侧土体阻力未充分调动,随着荷载增大,桩侧截面变形增大,桩侧土体阻力被充分调动,桩身各深度处轴力衰减幅度差异变大。

随上部荷载增加,桩身轴力增大,这是因为随着上部荷载增大,沉降位移进一步增大,桩体底端所受荷载不断增大,桩端阻力得到进一步发挥,轴力不断增大。另外,对比地基相对密实度为 50%、

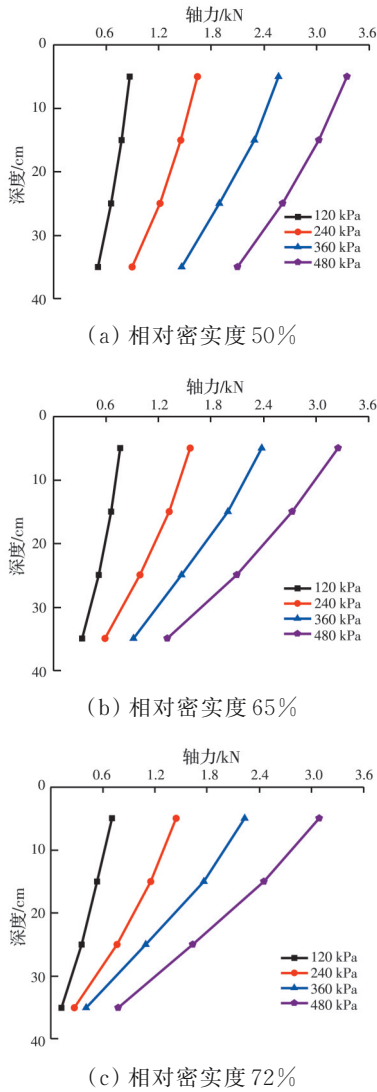


图 5 不同地基相对密实度下桩身轴力分布图
Fig. 5 Axial force distribution of pile under different relative density compactness

65%和72%的复合地基桩身轴力分布图发现,在相同上部荷载下,相对密实度增大,桩身轴力减小;特别是随深度增加,桩身轴力减小幅度更大。这可能是因为随着桩间土体密实度提高,颗粒间孔隙减小,珊瑚砂的弹性模量变大,桩周珊瑚砂能够分担更多的上部荷载,导致桩体的轴力减小更明显。

2.2.2 面积置换率对桩身轴力分布影响

图 6 为不同面积置换率下单桩复合地基的桩身轴力分布图。随面积置换率增大,在相同上部荷载下桩身轴力增大。这是因为复合地基面积置换率增大,意味着承压板面积减小,桩周珊瑚砂承受的上部荷载减小,导致桩体承担的上部荷载增大,桩身轴力增大。由于桩间珊瑚砂相对密实度均为 70%,故随深度增加,桩身轴力减小幅度均较大。

2.3 桩侧摩阻力分布

桩侧摩阻力 q_s 通过桩身单元体上下截面处的轴

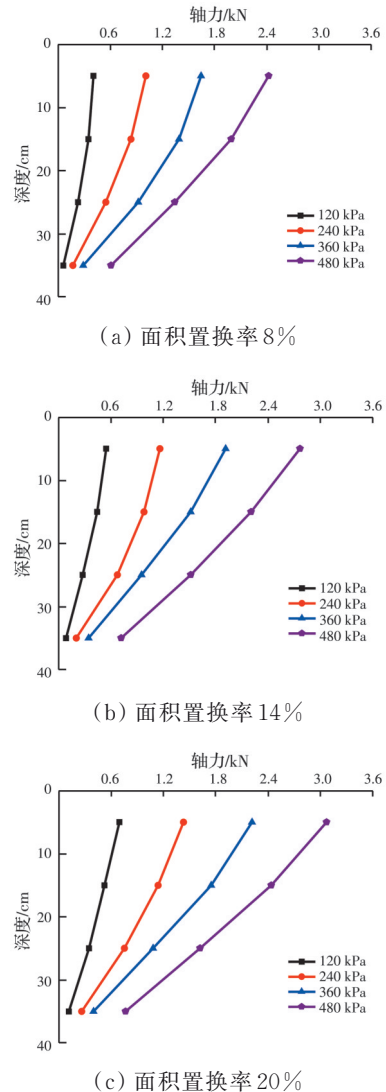


图 6 不同面积置换率下桩身轴力分布图
Fig. 6 Axial force distribution of pile under different area displacement rate

力 Q_1 和 Q_2 计算得到^[24]。

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

式中: L 为所选取桩身单元体长度; D 为桩体直径。

2.3.1 地基相对密实度对桩侧摩阻力分布影响

图 7 为不同地基相对密实度下微生物珊瑚砂桩的桩侧摩阻力分布图。随上部荷载增大,桩身同一位置处侧摩阻力增大。随深度增加,桩侧摩阻力先明显增大后增大速率变缓。随地基相对密实度提高,桩侧摩阻力增大;相对密实度为 50%、65% 和 72% 时微生物珊瑚砂桩的最大侧摩阻力分别为 32.74、50.57、54.39 kPa。这是因为桩侧摩阻力依靠桩侧土体剪切变形产生,桩间珊瑚砂密实度提高,桩间土变形模量增大,桩间珊瑚砂对桩体的挤密效果增强,桩土界面的粗糙程度增大,桩侧摩阻力提高。

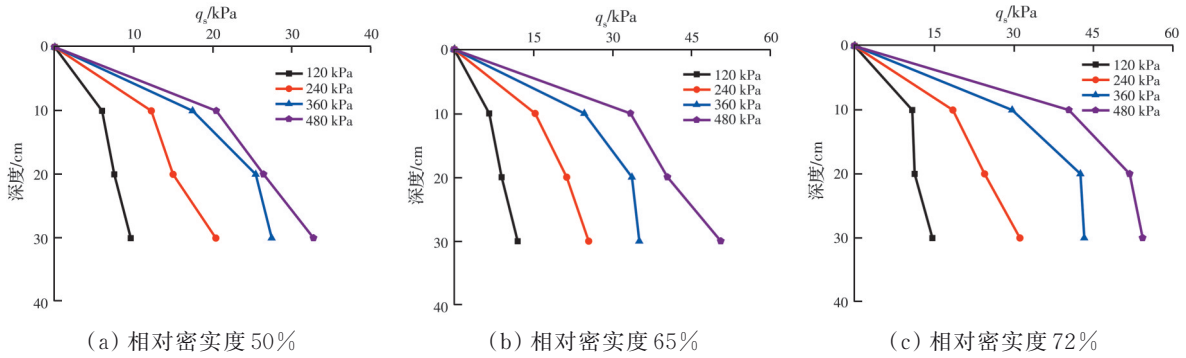


图 7 不同地基相对密度下桩侧摩阻力分布图

Fig. 7 Lateral friction distribution of piles under different relative compactness

2.3.2 面积置换率对桩侧摩阻力分布影响

图 8 为不同面积置换率下微生物珊瑚砂桩的桩侧摩阻力分布图。随上部荷载增大,桩身同一位置处的侧摩阻力增大。随深度增加,桩侧摩阻力先明显增大后增大速度变缓。随面积置换率提高,桩侧摩阻力增大;面积置换率为 8%、14% 和 20% 时微

生物珊瑚砂桩的侧摩阻力分别为 46.62、50.83、54.39 kPa;桩侧摩阻力随深度增加后期增大速率变缓更明显。这是因为随面积置换率提高,桩分担的荷载增大,桩体沉降增大,桩侧土体分担的荷载较小,桩侧土体沉降减小,桩身相对桩间土体位移增大,因此桩侧摩阻力提高。

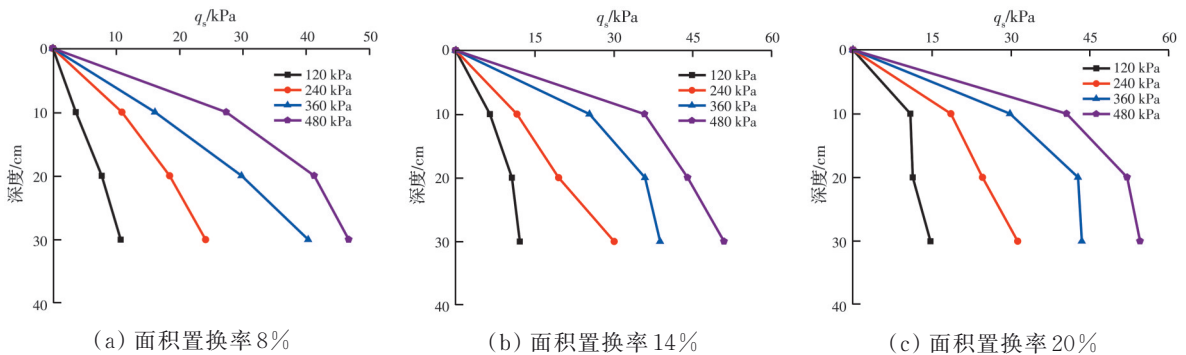


图 8 不同面积置换率下桩侧摩阻力分布图

Fig. 8 Lateral friction distribution of piles under different area displacement rate

2.4 桩土应力比

桩土应力比指复合地基桩体竖向应力与桩周土竖向应力的比值,能够较好反映复合地基的承载特性。

2.4.1 地基相对密度对复合地基桩土应力比影响

图 9 为不同地基相对密度下桩土应力比随荷载变化曲线。随荷载增大,桩土应力比增大。地基相对密度为 50%、65%、72% 时复合地基桩土应力比范围分别为 4.6~15.6、3.4~11.5、2.5~8.0。随相对密度增大,复合地基桩土应力比减小。这是因为相对密度增大,桩间珊瑚砂变形模量增大,桩周土承载性能提高,可承担竖向荷载增大,桩体承担的上部荷载减小,因此复合地基的桩土应力比减小。

2.4.2 面积置换率对复合地基桩土应力比影响

图 10 为不同面积置换率下桩土应力比随荷载变化曲线。随荷载增大,桩土应力比总体上增大。

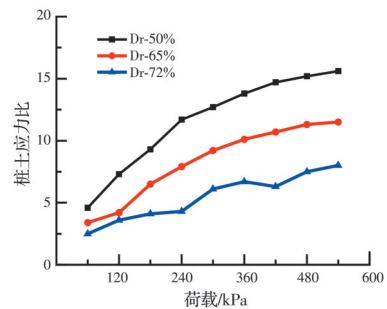


图 9 不同地基相对密度下桩土应力比随荷载变化曲线

Fig. 9 Pile-soil stress ratio varies with load under different relative compactness

面积置换率为 8%、14% 和 20% 时复合地基桩土应力比范围分别为 1.4~2.8、1.7~5.1 和 2.5~8.0。随面积置换率增大,复合地基桩土应力比增大。这是因为面积置换率增大,桩体分担的上部荷载增大,桩间土体分担的上部荷载减小,因此,复合地基桩土应力比增大。

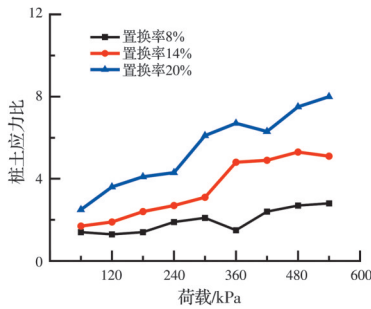


图 10 不同面积置换率下桩土应力比随荷载变化曲线
Fig. 10 Pile-soil stress ratio varies with load under different area displacement rate

3 饱和与水位升降下试验结果与分析

3.1 复合地基荷载-沉降曲线

图 11 为饱和与水位升降下单桩复合地基不同面积置换率的 $P-S$ 曲线。当面积置换率相同时,饱和与水位升降时复合地基 $P-S$ 曲线非常接近,承载力与变形相差不大,说明两次水位升降对微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的承载特性影响较小。在相同荷载下,两次水位升降后的复合地基沉降相比饱和状态略有增加。饱和状态下面积置换率为 8%、14%、20% 时复合地基极限承载力分别约为 255.73、324.65、443.17 kPa,分别约为干燥状态时的 49%、58%、66%。

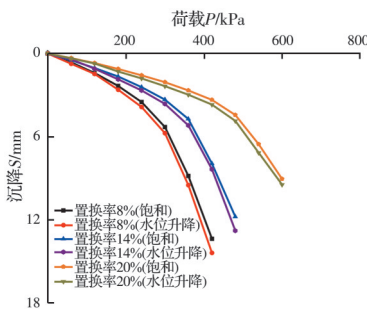


图 11 饱和与水位升降下复合地基 $P-S$ 曲线图
Fig. 11 $P-S$ curves of composite foundation under saturated and water level rise and fall

为与干燥状态时复合地基进行对比,图 12 给出了面积置换率为 20% 时不同含水状态下微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的 $p-s$ 曲线。相对于干燥状态,饱和与水位升降时复合地基承载力降低,沉降增大。饱和与水位升降时复合地基承载力约为干燥时的 66%;而相同相对密实度条件下饱和与水位升降时珊瑚砂地基承载力约为干燥时的 44%^[20]。饱和与水位升降时,水对珊瑚砂之间的咬合力起到了润滑作用,颗粒之间的咬合和嵌入作用下降,珊瑚砂的内摩擦角减小,导致桩间珊瑚砂承载力降低,从而复合地基承载力降低,沉降增大。由于水对桩

体的影响小于桩间珊瑚砂,所以饱和与水位升降时相对于干燥状态复合地基承载力降低幅度小于珊瑚砂地基。可见,微生物珊瑚砂桩能够有效减弱水导致珊瑚砂地基承载力下降的影响程度。

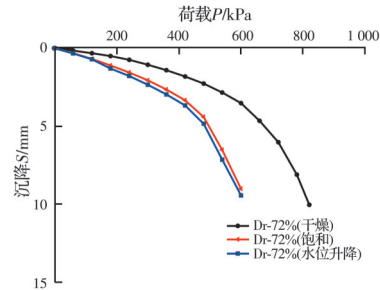


图 12 干燥、饱和与水位升降下复合地基 $P-S$ 曲线图
Fig. 12 $P-S$ curves of composite foundation under dry, saturated and water level rise and fall

3.2 桩身轴力分布

饱和与水位升降下复合地基桩身轴力分布基本相似,以饱和状态下复合地基为例进行桩身轴力分析。图 13 为饱和与干燥状态下单桩复合地基在不同面积置换率下的桩身轴力对比图。在各级荷载作用下,饱和与干燥状态下复合地基桩身轴力随深度增加而减小,相同上部荷载下桩身轴力随面积置换率增大而增大。另外,当上部荷载和面积置换率相同时,饱和状态下复合地基最大桩身轴力与桩身轴力沿深度方向衰减速率均小于干燥状态。由于水的作用,饱和状态下复合地基桩身轴力随深度增加衰减速率较平缓,且最深处的桩身轴力均大于干燥状态最深处的轴力。

3.3 桩侧摩阻力分布

饱和与水位升降下复合地基桩侧摩阻力基本相同,以饱和状态下复合地基为例进行桩侧摩阻力分析。图 14 为饱和与干燥状态下微生物珊瑚砂桩在不同面积置换率下的桩侧摩阻力对比。饱和与干燥状态下复合地基桩侧摩阻力均沿深度方向逐渐增大。当上部荷载相同时,桩侧摩阻力随面积置换率增大而增大。另外,当上部荷载和面积置换率相同时,饱和状态下复合地基桩侧摩阻力明显小于干燥状态下复合地基桩侧摩阻力。由于水的作用,随深度增加桩侧摩阻力增大速率变化不明显。

3.4 桩土应力比

饱和状态与水位升降下复合地基桩土应力比随荷载变化规律基本相同,以饱和状态下复合地基为例进行桩土应力比分析。图 15 为饱和与干燥状态下不同面积置换率下的桩土应力比随荷载变化图。饱和状态下,面积置换率为 8%、14%、20% 时,

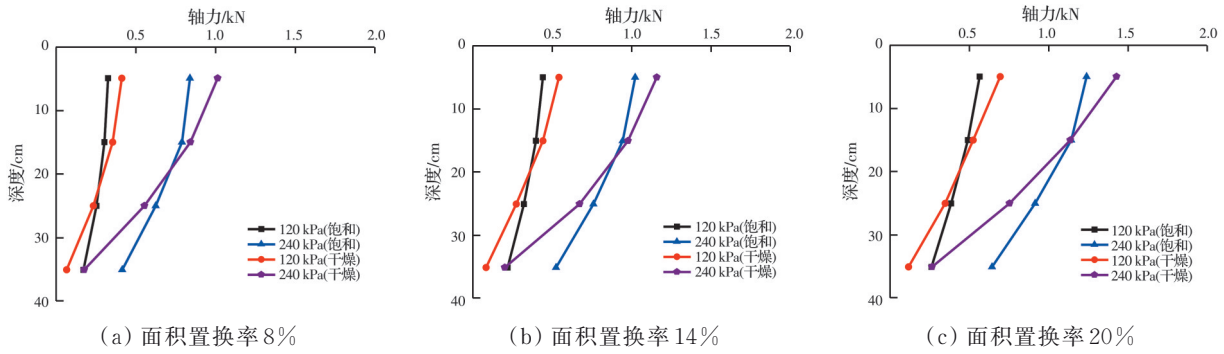


图 13 饱和与干燥状态下桩身轴力对比图

Fig. 13 Comparison of axial force of pile body under saturated and dry conditions

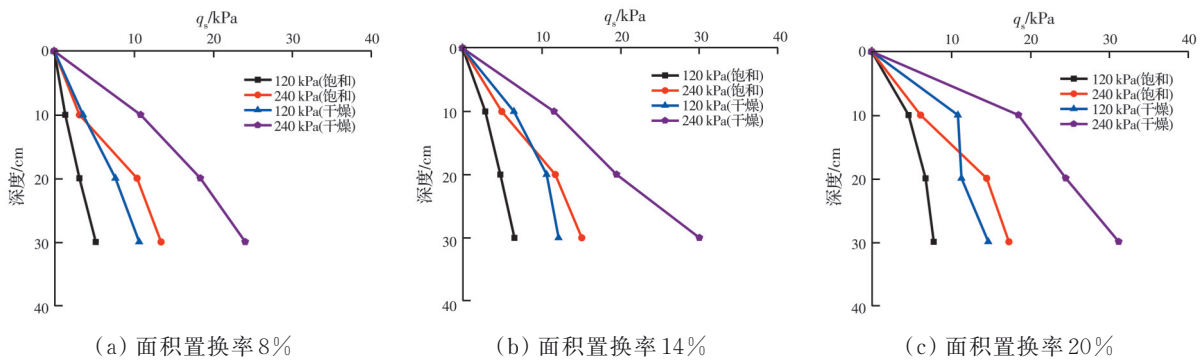


图 14 饱和与干燥状态下侧摩阻力对比图

Fig. 14 Comparison of pile side friction resistance under saturated and dry conditions

复合地基桩土应力比范围分别为 1.8~3.9、2.4~4.3、3.5~7.1, 对应干燥状态下桩土应力比范围分别为 1.4~2.1、1.7~3.1、2.5~6.1。随复合地基面积置换率增大, 桩土应力比增大, 与干燥状态下变化规律相同。另外, 当面积置换率相同时, 饱和状

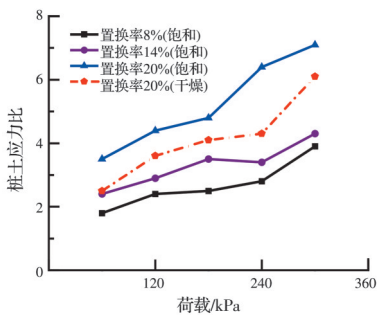


图 15 饱和与干燥状态下桩土应力比随荷载变化对比图

Fig. 15 Pile-soil stress ratio varies with load under saturated and dry conditions

态下复合地基的桩土应力比大于干燥状态。这是因为饱和状态下珊瑚砂颗粒间摩擦受到水的润滑作用, 颗粒间的相互作用减弱, 桩间珊瑚砂变形模量减小, 珊瑚砂承载力下降, 承担的上部荷载减小, 桩体承受的上部荷载增大, 总体上, 水对桩间珊瑚砂的弱化影响大于对微生物珊瑚砂桩的影响, 所以饱和状态下复合地基的桩土应力比大于干燥状态。

4 结论

1) 干燥状态下随地基相对密实度和面积置换率增大, 微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载力增大, 沉降减小; 提高地基相对密实度和面积置换率可有效提高复合地基承载力。

2) 干燥状态下微生物珊瑚砂桩桩身轴力和桩土应力比随地基相对密实度增大而减小, 随面积置换率增大而增大; 桩侧摩阻力随地基相对密实度和面积置换率增大而增大。

3) 两次水位升降对微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的承载特性影响较小; 饱和与水位升降下, 面积置换率为 8%、14% 和 20% 时微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的极限承载力分别约为干燥状态时的 49%、58% 和 66%。

4) 饱和与水位升降下微生物珊瑚砂桩桩身轴力、桩侧摩阻力和桩土应力比随面积置换率增大而增大。当上部荷载和面积置换率相同时, 相对于干燥状态, 饱和与水位升降下复合地基的桩身最大轴力和桩侧摩阻力减小, 桩土应力比增大。

参考文献

[1] 刘中民. 国际海洋形势变革背景下的中国海洋安全战略: 一种框架性的研究[J]. 国际观察, 2011(3): 1-9.

- LIU Z M. China's maritime security strategy under the background of the change of international maritime situation: A framework study [J]. *International Review*, 2011(3): 1-9. (in Chinese)
- [2] 贾宇. 关于海洋强国战略的思考[J]. *太平洋学报*, 2018, 26(1): 1-8.
- JIA Y. On China's maritime power strategy [J]. *Pacific Journal*, 2018, 26(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] 程新生, 刘星, 李书轮. 珊瑚岛礁跨海大桥的勘察实践及工程意义[J]. *水运工程*, 2018(8): 174-179.
- CHENG X S, LIU X, LI S L. Investigation of cross-sea bridge for atoll and engineering significance [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(8): 174-179. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] CHEN X H, GUO H X, CHENG X H. Heavy metal immobilisation and particle cementation of tailings by biomineralization [J]. *Environmental Geotechnics*, 2018, 5(2): 107-113.
- [6] LIU J L, FANG X W, SHEN C N, et al. Resistance to sulfate attack under drying-wetting cycles of reactive magnesia-microbial cured electrolytic manganese residue [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2023, 40(6): 547-559.
- [7] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14.
- LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [8] 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 X W, SHEN C N, CHU J, 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)
- [9] 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.
- [10] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [11] 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 X W, SHEN C N, LI Y Y, et al. Microorganism sand pile forming device and method: CN106906821A [P]. 2017-06-30. (in Chinese).
- [12] 张浩, 石名磊, 郭院成. 基于分段荷载传递法的桩网路堤结构荷载效应整体分析模型[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(9): 1630-1639.
- ZHANG H, SHI M L, GUO Y C. Analytic model for load effects in geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment based on segmented load transfer algorithm [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(9): 1630-1639. (in Chinese)
- [13] 郭帅杰, 宋绪国, 罗强, 等. 基于荷载传递理论的刚性桩复合地基沉降计算[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(10): 44-50.
- GUO S J, SONG X G, LUO Q, et al. Settlement calculation of rigid pile foundation based on load transfer theory [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(10): 44-50. (in Chinese)
- [14] 吕伟华, 邵光辉. 刚性桩复合地基荷载传递规律模型试验[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(6): 130-136.
- LYU W H, SHAO G H. Physical model study on load transfer law of rigid pile composite foundation [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(6): 130-136. (in Chinese)
- [15] 王伟, 聂庆科, 王英辉, 等. 多桩复合地基承载特性的现场试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(Sup1): 196-200.
- WANG W, NIE Q K, WANG Y H, et al. Field experimental study on bearing characteristics of multi-pile composite subgrade [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(Sup1): 196-200. (in Chinese)
- [16] YIN J H, FANG Z. Physical modelling of consolidation behaviour of a composite foundation consisting of a cement-mixed soil column and untreated soft marine clay [J]. *Géotechnique*, 2006, 56(1): 63-68.
- [17] KIM Y, JEONG S. Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction [J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(2): 248-257.
- [18] 刘明泉, 李晓芝, 刘春原. 带桩帽的刚性桩复合地基受力性能研究[J]. *施工技术*, 2016, 45(22): 95-98.
- LIU M Q, LI X Z, LIU C Y. Mechanical properties study of capped rigid pile composite foundation [J]. *Construction Technology*, 2016, 45(22): 95-98. (in Chinese)
- [19] 盛桂琳, 鲍鹏, 苏彩丽, 等. 刚性桩复合地基桩体抗震性能分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5): 1274-1278, 1286.
- SHENG G L, BAO P, SU C L, et al. Analysis of seismic behavior of pile body in rigid pile composite foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1274-1278, 1286. (in Chinese)
- [20] 郭毓熙, 章懿涛, 方祥位, 等. 不同含水和密实状态下

- 珊瑚砂地基承载特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(5): 49-57.
- GUO Y X, ZHANG Y T, FANG X W, et al. Experimental study on bearing characteristics of coral sand foundation under different water content states and relative compactnesses [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(5): 49-57. (in Chinese)
- [21] 申春妮, 方祥位, 胡丰慧, 等. 珊瑚砂地基中微生物珊瑚砂桩承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (Sup1): 68-73.
- SHEN C N, FANG X W, HU F H, et al. Experimental study on bearing characteristics of microbial coral sand piles in coral sand foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (Sup1): 68-73. (in Chinese)
- [22] 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 S, FANG X W, LIU H L, 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)
- [23] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil biocementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 615-626.
- [24] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)

(编辑 胡玲)