

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.139



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 不同含水和密实状态下珊瑚砂地基 承载特性试验研究

郭毓熙<sup>1</sup>, 章懿涛<sup>1,2</sup>, 方祥位<sup>1</sup>, 姚志华<sup>3</sup>, 胡丰慧<sup>1</sup>, 申春妮<sup>4</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂, 江西 贵溪 335424;  
3. 空军工程大学机场建筑工程系, 西安 710038; 4. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331)

**摘要:**珊瑚砂工程性质特殊, 研究珊瑚砂地基的承载特性对岛礁工程建设具有重要意义。通过不同相对密实度(50%、65%、72%、80%和85%)、不同含水状态(干燥和饱和)及水位升降等工况下的珊瑚砂地基平板载荷模型试验, 研究相对密实度和含水状态对珊瑚砂地基承载特性、颗粒破碎、分层沉降和土压力传递规律等的影响。结果表明:随着相对密实度的增大, 干燥状态下珊瑚砂地基极限承载力增大, 沉降减小; 相对密实度80%以上的珊瑚砂颗粒破碎较明显; 承压板正下方的土压力随深度增大而减小。饱和珊瑚砂地基的极限承载力约为干燥状态的44%, 地基破坏时的沉降约为干燥状态的2倍, 两次水位升降对地基承载力和沉降影响较小; 距离承压板中心不同位置处, 饱和(含水位升降)与干燥状态下珊瑚砂地基分层沉降呈现出不同的规律; 3种工况下土压力传递规律相似。

**关键词:**珊瑚砂地基; 承载特性; 颗粒破碎; 土压力传递规律; 水位升降; 模型试验

中图分类号: TU441 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)05-0049-09

## Experimental study on bearing characteristics of coral sand foundation under different water content states and relative compactnesses

GUO Yuxi<sup>1</sup>, ZHANG Yitao<sup>1,2</sup>, FANG Xiangwei<sup>1</sup>, YAO Zhihua<sup>3</sup>,  
HU Fenghui<sup>1</sup>, SHEN Chunni<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Guixi Smelter Jiangxi Copper Company Limited, Guixi 335424, Jiangxi, P. R. China; 3. Department of Airdrome Construction Engineering, Air force Engineering University, Xi'an 710038, P. R. China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China)

**Abstract:** The engineering properties of coral sand are special, so it is important to study the bearing characteristics of coral sand foundation for island construction. The influences of relative compactness and water

收稿日期: 2022-08-22

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; 重庆英才计划优秀科学家项目(cstc2021ycjh-bgzxm0051); 基础加强计划技术领域基金(2019-JCJQ-JJ-082); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-084)

作者简介: 郭毓熙(1996-), 男, 主要从事岩土微生物技术及应用研究, E-mail: 54gyx@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: 2022-08-22

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51978103); Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team Project; Chongqing Talents Program (No. cstc2021ycjh-bgzxm0051); Foundation Strengthening Plan Technical Field Fund (No. 2019-JCJQ-JJ-082); Shaanxi Province Key R&D Plan Project (2022SF-084)

**Author brief:** GUO Yuxi (1996-), main research interests: geotechnical microbiology technology and application, E-mail: 54gyx@163.com.

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

content state on the bearing deformation characteristics, particle breakage, layered settlement and the pattern of earth pressure transfer of coral sand foundation are studied through the plate loading model test of coral sand foundation under different working conditions, such as different relative compactness (50%, 65%, 72%, 80% and 85%), different water content states (dry or saturated) and water level variations. The results show that the bearing capacity of coral sand foundation increases and the settlement decreases with the increase of relative density in dry condition. The coral sand particles are broken more significantly while the relative compactness is greater than 80%. The earth pressure directly below the bearing plate decreases with increase of depth. The bearing capacity of coral sand foundation in saturated state is about 44% of that in dry state, the settlement in the failure is about 2 times of that in dry state, and the influence of two times of water level variation on the bearing capacity and settlement of foundation is small. At different locations from the center of the bearing plate, the developments of the layered settlement of coral sand foundations in saturated, water level variation and dry state are different. The pattern of earth pressure transfer is similar in the three states.

**Keywords:** coral sand foundation; bearing characteristics; particle breakage; the law of earth pressure transmission; water level variation; model test

随着经济全球化进程的推进和海上丝绸之路的提出,海洋对世界各国经济发展的影响越来越大,人类进入了一个大规模开发利用海洋资源的时期<sup>[1-2]</sup>。珊瑚岛礁作为海洋权益维护的立足点和海洋资源开发的平台,对海洋开发、科学研究及经济发展具有重要意义<sup>[3]</sup>。珊瑚岛礁主要由珊瑚砂构成,珊瑚砂工程力学特性和珊瑚砂地基承载特性研究已成为岩土领域研究的热点。

珊瑚砂是指由珊瑚、贝类等海洋生物碎屑或骨骼残骸形成的富含碳酸钙等难溶物质的特殊砂土,碳酸钙含量可达90%以上,学者们又称之为钙质砂<sup>[4-5]</sup>。珊瑚砂发育于热带海洋环境中,特殊的物质组成、结构和形成环境使其物理力学及工程性质同陆相沉积物相比具有显著的差异。由于珊瑚砂在沉积周期中并未发生长途搬运,使得生物骨架中的一些孔隙得以保留,故而形成的砂颗粒孔隙及内孔隙较多、磨圆程度低,在外力作用下易发生破碎<sup>[6-8]</sup>。Coop等<sup>[9]</sup>基于压缩试验研究发现,在压力较大的情况下,颗粒的破碎对珊瑚砂压缩性影响较大,珊瑚砂的压缩特性受碳酸钙含量、沉积年代及其所处的水文地质条件等影响。Allman等<sup>[10]</sup>对不同胶结物含量的珊瑚砂开展三轴试验发现,珊瑚砂的内聚力和剪切峰值强度随珊瑚砂胶结物含量的增大而增大。Datta等<sup>[11]</sup>对印度西海岸的4种珊瑚砂进行了低围压和高围压两种情况下的三轴试验研究,结果表明,珊瑚砂的破碎程度会随着颗粒内孔隙的增加、粒径的增大、剪应力的施加、围压的增大及颗粒棱角的增多而加深。Dutt等<sup>[12]</sup>发现,与现场实测数据相比,常规三轴试验测得的珊瑚砂摩擦角偏高,而等体积直接单剪试验所得到的摩擦角偏小,但总体处于现场实测数据范围内。中国学者对珊瑚砂研究起步较晚,但近40年来随着南沙群岛综合科学

考察的全面展开,珊瑚礁工程地质和珊瑚砂特性进入系统研究阶段,并取得了丰硕成果。汪稔等<sup>[13]</sup>编著了《南沙群岛珊瑚礁工程地质》,是中国第一部论述区域性珊瑚礁工程地质及其物理力学性质的专著。孙宗勋<sup>[4]</sup>综述了珊瑚砂的压缩性、破碎性、剪切特性和强度特性,指出颗粒破碎是影响珊瑚砂变形和强度特性的主要因素。张梅英等<sup>[14]</sup>、张家铭等<sup>[15]</sup>、纪文栋等<sup>[16]</sup>研究了压缩和剪切下珊瑚砂颗粒破碎情况及其对力学特性的影响。张小燕等<sup>[17]</sup>研究了蠕变试验过程中珊瑚砂颗粒破碎情况。在珊瑚砂地基承载特性方面,王新志等<sup>[18]</sup>进行了室内载荷试验,确定了不同密实度钙质砂的承载力及变形特性;李洋洋等<sup>[19]</sup>通过平板载荷试验研究了承压板尺寸和密实度对珊瑚砂承载特性的影响;沈扬等<sup>[20]</sup>通过自制平板载荷室内模型装置量化研究珊瑚砂密实度、级配及载荷板的形状、尺寸对珊瑚砂地基承载力的影响,并对比了珊瑚砂与石英砂承载力的差异性。但这些研究以干砂为主,较少考虑饱和珊瑚砂和水位升降的影响,且模型试验中没有考虑颗粒破碎的影响。

珊瑚砂富含内孔隙,颗粒易破碎,珊瑚砂地基的承载特性受颗粒破碎影响。由珊瑚砂组成的地基与硅砂地基工程性质差别较大,并且岛礁上的珊瑚砂地基长期被海水淹没,同时受到潮水涨落影响。笔者通过不同工况下的珊瑚砂地基平板载荷模型试验,研究相对密实度和含水状态对珊瑚砂地基承载特性、颗粒破碎、分层沉降和土压力传递规律等的影响规律。

## 1 模型试验概况

### 1.1 珊瑚砂

平板载荷模型试验用珊瑚砂取自南海某岛礁,

经过5 mm筛得到试验用砂<sup>[20]</sup>,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[21]</sup>相关规定,对试验所用珊瑚砂进行了土粒比重和颗粒分析等试验,为模型试验奠定基础。珊瑚砂各项基本物性参数如表1所示,珊瑚砂颗粒级配曲线如图1所示。

表1 珊瑚砂基本物性参数

Table 1 The basic physical property parameters of coral sand

比重 $G_s$	最小孔隙比 $e_{\min}$	最大孔隙比 $e_{\max}$	曲率系数 $C_c$	不均匀系数 $C_u$
2.76	0.72	1.24	1.04	3.94

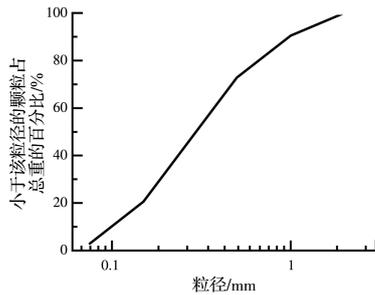


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

## 1.2 模型箱及数据测量采集系统

模型箱尺寸为1.0 m×1.0 m×1.0 m(长×宽×高),由8 mm厚的钢板组装和焊接而成,在箱体内部用钢板划分0.6 m×0.6 m×1.0 m的区域用于珊瑚砂地基平板载荷模型试验。为减小试验加载过程中模型箱的变形,采用钢杆对模型箱进行支撑。在模型箱的一侧设置钢化玻璃板,用于试验过程中观察土体变化。为了减小模型试验进行时模型箱内侧箱壁摩擦力对珊瑚砂的影响,填砂前在模型箱内侧箱壁粘贴塑料薄膜。在进行饱和状态与水位升降条件下的模型试验时,在玻璃板上粘贴一根透明玻璃管用于观察水位。

模型试验数据测量采集系统包括应力应变采集箱、土压力盒、荷载传感器、孔隙水压力传感器、位移计及数显百分表。应力应变采集箱为DH3816N静态应力应变测试分析系统,将该系统连接电脑,对试验加载过程中土压力盒、压力传感器、孔压传感器等测量的数据进行采集,采集箱每组12个通道,共72个通道,可同时采集应力和应变。

## 1.3 试验方案

通过室内平板载荷模型试验研究相对密实度和含水状态对珊瑚砂地基承载特性、颗粒破碎、分层沉降和土压力传递规律等的影响。

模型试验中采用的承压板为10 cm×10 cm的方形钢板,厚度均为10 mm,材料为Q235B级钢板。

珊瑚砂相对密实度 $D_r$ 综合了颗粒级配和孔隙比等影响,对地基承载特性有重要影响,能够较好地体现珊瑚砂的松散和密实程度,其计算公式为<sup>[21]</sup>

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

式中: $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ 为珊瑚砂最大、最小孔隙比; $e$ 为珊瑚砂天然孔隙比。

为研究相对密实度和含水状态对珊瑚砂地基承载特性的影响,在珊瑚砂干燥状态(含水率在6%左右)下选用5种不同的相对密实度,分别为50%、65%、72%、80%和85%,属于中密和密实珊瑚砂地基;在此基础上对密实度为72%的珊瑚砂地基开展饱和状态和水位升降下的平板载荷对比试验。试验方案见表2。

表2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

试验序号	珊瑚砂含水状态	相对密实度/%	荷载板尺寸
1	干燥状态	50	10 cm×10 cm
2	干燥状态	65	10 cm×10 cm
3	干燥状态	72	10 cm×10 cm
4	干燥状态	80	10 cm×10 cm
5	干燥状态	85	10 cm×10 cm
6	饱和状态	72	10 cm×10 cm
7	水位升降	72	10 cm×10 cm

需要指出的是,相关研究表明,珊瑚砂在水平方向的传递距离约为荷载板宽度或直径的1~2倍以上时,尺寸效应影响较小,可不考虑尺寸效应<sup>[22]</sup>。荷载板尺寸为10 cm×10 cm,而模型箱尺寸为60 cm,因此,可不考虑尺寸效应。

## 1.4 试验流程

1)珊瑚砂地基填筑和测量元器件埋设安装。为了较均匀地控制珊瑚砂的相对密实度,试验前按5 cm一层在模型箱内壁标好刻度;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。依据试验设计的相对密实度和珊瑚砂物理力学参数计算出每层填筑的珊瑚砂质量,将称量好的珊瑚砂分层压实到相应的刻度线,按照试验方案埋设沉降板、土压力盒等测量元器件。填筑完毕后整平表面并检测表面平整度,然后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。模型试验测量元器件实物布置如图2所示。

2)饱和状态和水位升降下珊瑚砂地基平板载荷模型试验。在反力梁上安放水箱,水箱阀门连接软管使水流入埋于珊瑚砂的水管中,水通过模型箱底部龙头连接导管流出。试验中,保持与珊瑚砂地



图 2 测量元器件实物布置图

Fig. 2 Measuring sensors layout

基表面平齐水位浸泡珊瑚砂 1 d 认为地基基本达到饱和状态,可开始试验。珊瑚砂地基平板载荷试验水位升降流程为:在饱和状态下将荷载加载到地基承载力特征值的 50% 左右,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。

3) 测量元器件的布置。采用土压力盒测量土体内部土压力,采用电子百分表测量沉降,对于饱和与水位升降工况,采用孔压计测量孔隙水压力,通过土压力盒数据减去孔压计数据得到真实土压力。在承压板正下方及距离承压板中心 10、20 cm 位置、深度 10、20、30、40 cm 处安置土压力盒采集土体内部土压力。在距离承压板中心 10、20 cm 位置,深度 15、30、45 cm 处埋设沉降板测量沉降。在承压板正下方深度 10、20、30、40 cm 处埋设孔压计测量孔隙水压力。土压力盒、沉降板及孔压计布置如图 3 所示。

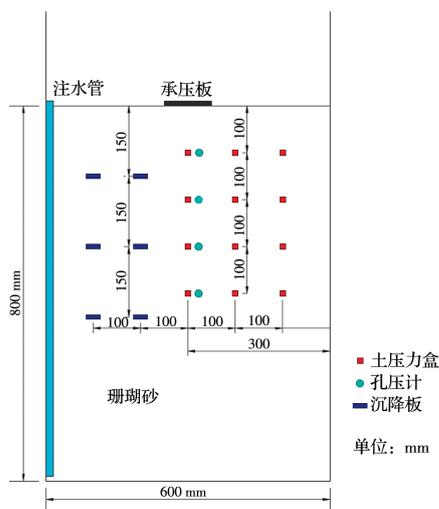


图 3 土压力盒、沉降板及孔压传感器布置示意图

Fig. 3 Layout of earth pressure cell, settlement board and pore water pressure sensor

## 2 试验结果分析

### 2.1 干燥状态下试验结果分析

#### 2.1.1 地基承载力及变形分析

图 4 给出了珊瑚砂地基在不同相对密度下的  $p-s$  曲线。在地基达到破坏之前,珊瑚砂地基的  $p-s$  曲线近似成直线,地基的变形主要是荷载作用下珊瑚砂颗粒间孔隙减小引起的,变形较稳定;当荷载超过一定值之后,珊瑚砂地基发生破坏,地基中形成连续滑动面,变形急剧增大。随着相对密度的增大,珊瑚砂颗粒间相互作用增强,使得珊瑚砂地基极限承载力提高,相同荷载下地基的沉降量也大大减小。

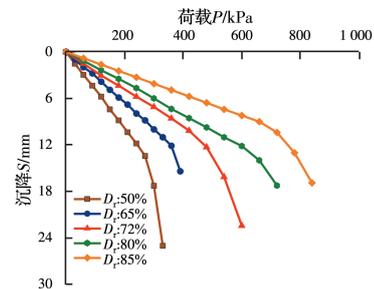
图 4 不同相对密度珊瑚砂地基  $p-s$  曲线Fig. 4  $p-s$  curves of coral sand foundation with different relative density

图 5 给出了试验珊瑚砂地基极限承载力随相对密度的变化关系。从图中可以看出,珊瑚砂地基极限承载力随相对密度的增大而增大,相对密度从 50% 增大到 80% 时,地基极限承载力增长速率越来越大,相对密度从 80% 增大到 85% 时,地基极限承载力增长速率减小。当相对密度为 85% 时,施加的荷载较大,造成珊瑚砂颗粒发生了一定程度的破碎,影响了珊瑚砂的极限承载力,使得相对密度从 80% 增大到 85% 时地基极限承载力增长速率减小。总的来说,通过夯实珊瑚砂,提高相对密度的方法能够大幅提高珊瑚砂地基的极限承载力,减小地基沉降。

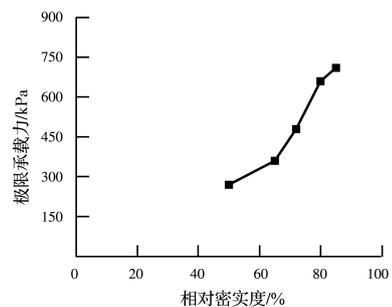


图 5 珊瑚砂地基极限承载力与相对密度关系曲线

Fig. 5 Relationship between bearing capacity of coral sand foundation and relative density

2.1.2 颗粒破碎分析

试验结果表明,由于荷载不是很大,珊瑚砂地基加载后颗粒破碎不是很明显,承压板正下方靠近表面的珊瑚砂颗粒破碎比其他地方明显。为研究颗粒破碎对地基承载力的影响,试验结束后对承压板下方 10 cm 范围的珊瑚砂进行了颗粒级配分析,并与试验前珊瑚砂颗粒级配进行对比,分析珊瑚砂颗粒的破碎情况。由于相对密度 80% 以下地基加载后颗粒破碎不明显(试验前后的颗粒级配曲线基本重合),图 6 仅给出了相对密度为 80% 和 85% 的珊瑚砂加载后的颗粒级配曲线。

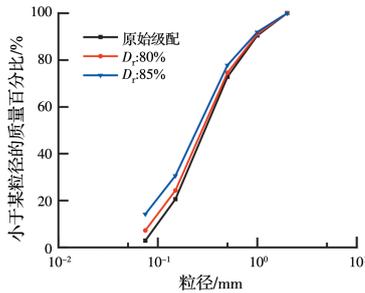


图 6 不同相对密度下珊瑚砂加载后颗粒级配曲线分布图  
Fig. 6 Particle size distribution curves of coral sand with different relative densities after loaded

从图 6 可以看出,加载后珊瑚砂地基承压板下方地基发生了颗粒破碎,受到较大荷载后珊瑚砂颗粒级配曲线发生了变化。随着地基相对密度增大,颗粒破碎程度提高,表现为 1.0~2.0 mm、0.5~1.0 mm、0.15~0.5 mm 及 0.075~0.15 mm 粒径范围的颗粒占比减小,其中 0.075~0.15 mm 的颗粒占比减小幅度较小,而 <0.075 mm 的颗粒占比增加。

为了对颗粒破碎程度进行量化,Hardin<sup>[23]</sup>建立了破碎势  $B_p$  和相对破碎指标  $B_r$ 。破碎势  $B_p$  表示的是砂颗粒破碎的潜能,认为粒径大的颗粒受到高应力将破碎成粉粒,而粉粒是不可破碎的,因此,采用粉粒粒径上限值 0.074 mm 作为破碎极限粒径。相对破碎指标  $B_r$  的最小值为 0,代表所有颗粒没有发生破碎;理论上限值为 1,代表所有颗粒都破碎成粉粒。相对破碎指标  $B_r$  基于式(2)先计算  $b_p$ <sup>[23]</sup>。

$$b_p = \lg \left[ \frac{d}{0.074} \right] \quad (2)$$

式中: $b_p$ 为某一粒径颗粒的破碎势; $d$ 为颗粒粒径,当  $d < 0.074$  mm 时, $b_p = 0$ 。

对于每一条颗粒级配曲线,破碎势可表示为

$$B_p = \int_0^1 b_p df \quad (3)$$

式中: $df$ 为  $b_p$  对应粒径的筛分通过百分比。

试验前后的总体破碎势之差为总破碎  $B_t$ ,即

$$B_t = \int_0^1 (b_{p0} - b_{p1}) df \quad (4)$$

式中: $b_{p0}$ 为试验前的  $b_p$ ;  $b_{p1}$ 为试验后的  $b_p$ 。

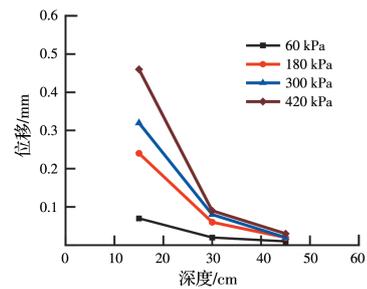
总破碎  $B_t$  与初始破碎势  $B_{p0}$  之比即为相对破碎指标  $B_r$ 。

$$B_r = \frac{B_t}{B_{p0}} \quad (5)$$

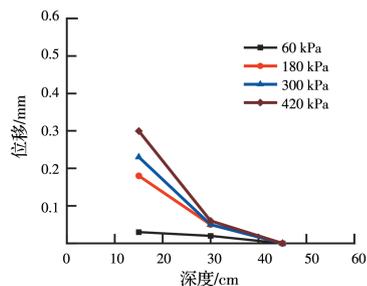
根据式(2)~式(5),对相对密度为 80% 和 85% 的珊瑚砂地基平板载荷试验颗粒破碎程度进行量化,通过计算得到两者的相对破碎指标  $B_r$  相比相对密度为 80% 的珊瑚砂地基,分别为 0.007、0.020,后者是前者的 2.85 倍,说明相对密度为 85% 的珊瑚砂地基平板载荷试验颗粒破碎程度比相对密度为 80% 的珊瑚砂地基有大幅提高,而颗粒破碎会导致珊瑚砂强度降低和压缩性增大<sup>[24-25]</sup>。从图 5 可以看出,相对密度从 50% 增大到 80% 时,地基极限承载力增长速率不断增大;相对密度从 80% 增大到 85%,地基极限承载力增长速率没有继续增大,而是发生了减小。因此,颗粒破碎使地基承载力随相对密度增大的趋势变缓。

2.1.3 分层沉降

为了研究荷载对珊瑚砂地基沉降的影响范围,以相对密度为 72% 的珊瑚砂地基平板载荷试验为例进行分析。图 7 给出了距离承压板中心 10、20 cm 位置不同深度处的土层沉降。随着深度的增加,上部荷载对土体的影响越来越小,在 30 cm 深度处(3 倍承压板宽),土体沉降位移不及总沉降的 2%。



(a) 距离承压板中心 10 cm



(b) 距离承压板中心 20 cm

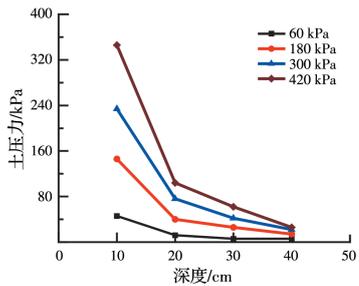
图 7 不同深度土层沉降图

Fig. 7 Solum settlement at different depths

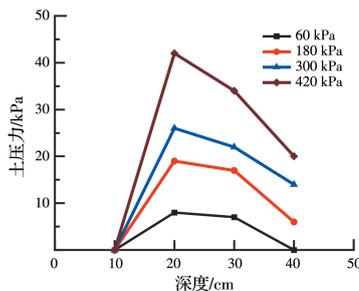
因此,当土层深度超过3倍承压板宽时,上部荷载对珊瑚砂地基沉降影响很小,这与文献[18]的研究结果相似。

#### 2.1.4 土压力传递规律

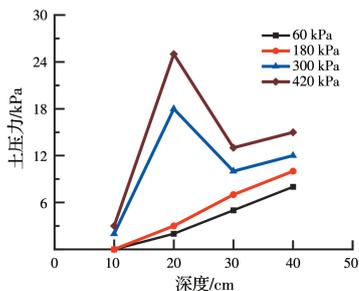
在地基载荷试验中,上部荷载将会传递到下部砂土中,以相对密实度为72%的珊瑚砂地基平板载荷试验为例对土压力传递规律进行分析。图8为各级荷载下距离承压板中心0、10、20 cm位置处土压力随深度的分布图。



(a) 距离承压板中心 0 cm



(b) 距离承压板中心 10 cm



(c) 距离承压板中心 20 cm

图 8 土压力随深度分布图

Fig. 8 Earth pressure distribution with depth

从图8中可以看出,在距离承压板中心0 cm时,承压板正下方的土压力随着深度增加而减小,在10~20 cm深度范围内,土压力下降幅度较大,超过50%;当深度大于30 cm时,土压力衰减速度放缓;当深度大于3倍承压板宽度时,土压力小于上部荷载的20%。这是因为上部荷载在向下传递的同时也会向周围方向传递,导致土压力随深度方向发生衰减。

在距离承压板中心10 cm处,在10~20 cm深度范围内土压力随深度增加而增大,随后土压力不断减

小。这是因为承压板受到荷载时,地基表面土体受到的力很小,因而土压力较小,深度增加,颗粒间的作用力增大导致土压力增大,故在20 cm深度左右达到最大值,随后因土压力向四周扩散衰减而发生下降。

在距离承压板中心20 cm处,当荷载小于180 kPa时,土压力随深度增大而增大;当荷载大于300 kPa时,土压力随深度先增大后减小,随后缓慢增大。这是由于珊瑚砂颗粒孔隙及内孔隙较多、表面较粗糙,颗粒与颗粒之间的作用力大于硅砂;当上部荷载较小时,颗粒间的作用力大于荷载对土体产生的作用力,颗粒与颗粒的作用力随深度增大而增大,因而土压力随深度增大而增大;当上部荷载较大时,荷载对土体产生的作用力大于颗粒间的作用力,土压力随深度增大而减小。

由此可见,在各级荷载作用下,对于距离承压板中心不同位置处的土压力传递呈现出不同的规律。

## 2.2 饱和状态与水位升降下试验结果分析

珊瑚砂处于饱和与水位升降状态时对珊瑚砂地基的承载特性有重要影响。

### 2.2.1 承载力及变形分析

图9为珊瑚砂地基在不同含水状态下的 $p-s$ 曲线。饱和与水位升降下珊瑚砂地基的极限承载力明显低于干燥珊瑚砂地基。饱和状态与水位升降下珊瑚砂地基在荷载加载到约210 kPa时地基发生破坏,干燥珊瑚砂的破坏荷载约为480 kPa,饱和珊瑚砂地基破坏荷载约为干燥状态的44%。

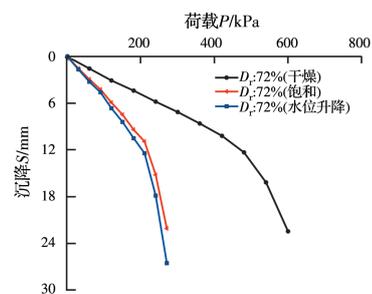


图 9 干燥、饱和与水位升降下珊瑚砂地基  $p-s$  曲线

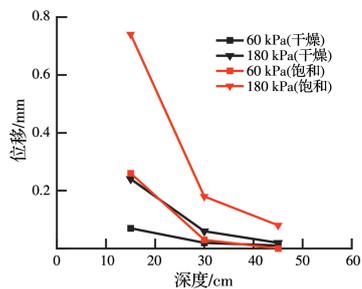
Fig. 9  $p-s$  curves of coral sand foundation under dry, saturated and water level variation

当荷载相同时,饱和与水位升降下珊瑚砂地基的沉降明显大于干燥珊瑚砂地基,与饱和状态下相比,两次水位升降后的珊瑚砂地基沉降略有增大。干燥珊瑚砂地基初始加载阶段变形量较小,并且随着荷载的增大稳定发展,在相同荷载条件下,饱和与水位升降下珊瑚砂地基变形量明显大于干燥珊瑚砂地基变形量。饱和与水位升降下珊瑚砂地基发生破坏后加载板下方土体的位移发生陡增,而干燥珊瑚砂地基破坏后加载板下方土体的位移发展

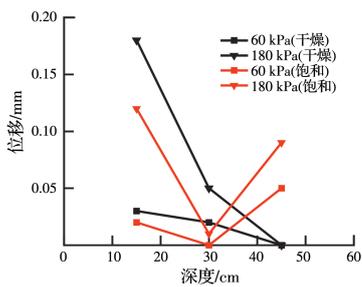
相比饱和与水位升降下珊瑚砂地基较为缓和。地基破坏时,饱和与水位升降下珊瑚砂地基的沉降约为干燥状态的2倍。这是因为地基中的水会对珊瑚砂颗粒之间的摩擦起到润滑作用,导致颗粒之间的咬合和嵌入作用降低,珊瑚砂骨架容易发生变形,造成力学承载性质降低。

### 2.2.2 分层沉降

相同条件时荷载对饱和与水位升降下珊瑚砂地基沉降的影响规律基本相同,以饱和状态下珊瑚砂地基为例进行分层沉降分析。图10为饱和与干燥状态珊瑚砂地基在距离承压板中心10、20 cm位置不同深度处土层沉降的对比。



(a) 距离承压板中心 10 cm



(b) 距离承压板中心 20 cm

图 10 干燥和饱和时不同深度土层沉降图  
Fig. 10 Solum settlement at different depths under dry and saturated state

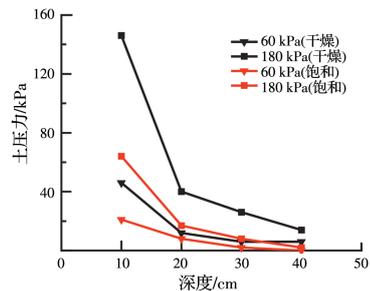
距离承压板中心 10 cm 时,饱和与干燥状态下珊瑚砂地基土体位移均随深度的增大而减小,饱和珊瑚砂地基的位移大于干燥状态下地基位移的2倍,且饱和状态下地基位移随深度衰减速度大于干燥状态。

距离承压板中心 20 cm 时,随着深度的增大,饱和珊瑚砂地基土体位移先减小后增大,而干燥状态下珊瑚砂地基土体位移一直减小。这是因为在饱和状态下,水对珊瑚砂起到了润滑作用,导致颗粒之间的咬合和嵌入作用降低,承压板正下方的土体受到荷载发生沉降时,珊瑚砂挤向周边导致隆起,与土体受压沉降引起的位移方向相反。因此,在深度小于 30 cm 时饱和状态下珊瑚砂地基的位移小于干燥状态下,随着深度增大,这种挤压隆起作用逐渐减弱,饱和珊瑚砂地基的位移逐渐大于干燥状态下。与距

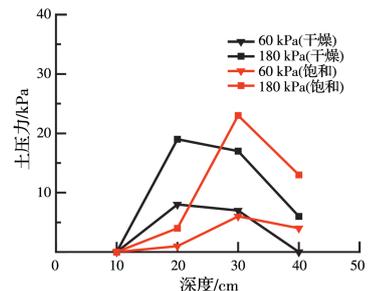
离承压板中心 10 cm 时相比,距离承压板稍远处位于珊瑚砂滑动面边缘一侧,导致周边隆起更为显著,因此二者沉降规律差异较大。

### 2.2.3 土压力传递规律

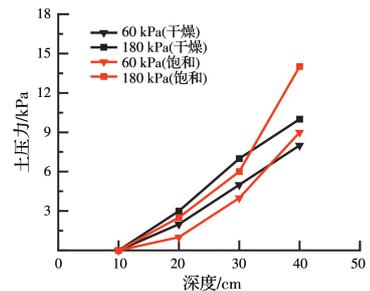
饱和与水位升降下珊瑚砂地基土压力应为土压力盒测得的土压力减去同深度处孔隙水压力。相同条件下饱和与水位升降下珊瑚砂地基土压力传递规律基本相同,以相对密度为 72% 的饱和珊瑚砂地基为例进行土压力传递规律分析。图 11 为各级荷载下距离承压板中心 0、10、20 cm 位置处土压力随深度的分布图。



(a) 距离承压板中心 0 cm



(b) 距离承压板中心 10 cm



(c) 距离承压板中心 20 cm

图 11 干燥和饱和时土压力随深度分布图  
Fig. 11 Earth pressure distribution with depth under dry and saturated state

从图 11 可以看出,在距离承压板中心 0 cm 处,饱和与干燥状态下承压板正下方的土压力都随着深度增大而减小,在相同荷载、同一深度下,饱和珊瑚砂地基的土压力小于干燥状态下。

在距离承压板中心 10 cm 处,干燥状态下珊瑚砂地基在 10~20 cm 深度范围内土压力随着深度的

增大而增大,随后土压力不断减小;而饱和状态下珊瑚砂地基在10~30 cm深度范围内土压力随着深度增大而增大,随后土压力不断减小。这是因为承压板受到荷载时,饱和与干燥状态下珊瑚砂地基浅层附近的土体受到的力很小,且饱和珊瑚砂地基浅层附近的土体受到的力比干燥状态小,故饱和珊瑚砂地基土压力达到最大值的深度大于干燥珊瑚砂地基。

在距离承压板中心20 cm处,饱和与干燥状态下承压板正下方的土压力均随深度增大而增大。这是因为承压板受到荷载时,距离承压板中心20 cm位置处浅层的珊瑚砂受到的力很小,故浅层的珊瑚砂土压力较小,随着深度的增大,颗粒间作用力增大,土压力增大。

综上,在各级荷载作用下,对于距离承压板中心不同位置处,饱和与干燥状态下珊瑚砂地基土压力传递呈现出不同的规律。

### 3 结论

1)干燥状态下,随着相对密实度的增大,珊瑚砂地基承载力增大,沉降减小;相对密实度80%的珊瑚砂地基的相对破碎指标是相对密实度85%的2.85倍;颗粒破碎使地基承载力增大趋势变缓。

2)干燥状态下,承压板正下方的土压力随深度增加而减小;在距离承压板中心大于10 cm及土层深度超过30 cm时,上部荷载对珊瑚砂地基沉降影响较小。

3)饱和状态珊瑚砂地基的极限承载力约为干燥状态的44%,地基破坏时的沉降约为干燥状态的2倍;两次水位升降对地基承载力和沉降影响较小。

4)距离承压板中心10 cm处,不同含水状态下珊瑚砂地基土体位移均随深度增大而减小;距离承压板中心20 cm处,饱和(含水位升降)状态下珊瑚砂地基土体位移随深度增大先减小后增大,而干燥状态下珊瑚砂地基土体位移一直减小。不同含水状态下珊瑚砂地基土压力传递规律相似。

### 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 marine safety strategy against the background of transformation of international marine situation: A framework analysis [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] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋, 2000, 19(2): 1-8.  
SUN Z X. Engineering properties of coral sands in Nansha Islands [J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(2): 1-8. (in Chinese)
- [5] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 32-37, 44.  
LIU C Q, WANG R. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(1): 32-37, 44. (in Chinese)
- [6] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 209-212.  
LIU C Q, WANG R, WU X S. Some problems for the tests of physicomechanical properties of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 209-212. (in Chinese)
- [7] 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 J P, CHU Y, LOU Z G. 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)
- [8] 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 C Q, YANG Z Q, WANG R. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 74-84. (in Chinese)
- [9] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands [J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 607-626.
- [10] ALLMAN M A, POULOS H G. Stress-strain behaviour of an artificially cemented calcareous soil. Engineering for calcareous sediments[C]// Proceedings of the International Conference on Calcareous Sediments. Perth, Western Australia: Rotterdam, 1988, 1: 51-60.
- [11] DATTA M, GULHATI S K, RAO G V. Crushing of calcareous sands during shear [C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas. 1979: 1459-1467.
- [12] DUTT R N, DOYLE E H, NANDLAL S, et al. Frictional characteristics of calcareous sands from offshore Florida [C]//Offshore Technology Conference,

- Houston, Texas. 1986: 589-600.
- [13] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
WANG R, SONG C J, ZHAO H T, et al. Engineering geology of Spratly Islands coral reef [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [14] 张梅英, 袁建新, 杨育文, 等. 珊瑚砂土在加载过程中颗粒滑移与孔隙分维变化特征[J]. 岩土力学, 1998, 19(4): 14-18.  
ZHANG M Y, YUAN J X, YANG Y W, et al. The characteristics of grain slide and pore fractal dimension variation of coral sandy soil in loading process [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(4): 14-18. (in Chinese)
- [15] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Sup1): 3010-3015.  
ZHANG J M, ZHANG L, LIU H, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup1): 3010-3015. (in Chinese)
- [16] 纪文栋, 张宇亭, 裴文斌, 等. 加载方式和应力水平对珊瑚砂颗粒破碎影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1953-1961.  
JI W D, ZHANG Y T, PEI W B, et al. Influence of loading method and stress level on the particle crushing of coral calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1953-1961. (in Chinese)
- [17] 张小燕, 蔡燕燕, 王振波, 等. 珊瑚砂高压下一维蠕变分形破碎及颗粒形状分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1573-1580.  
ZHANG X Y, CAI Y Y, WANG Z B, et al. Fractal breakage and particle shape analysis for coral sand under high-pressure and one-dimensional creep conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1573-1580. (in Chinese)
- [18] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 147-151, 156.  
WANG X Z, WANG R, MENG Q S, et al. Study of plate load test of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 147-151, 156. (in Chinese)
- [19] 李洋洋, 方祥位, 黄雪峰, 等. 珊瑚砂地基平板载荷模型试验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(10): 114-121.  
LI Y Y, FANG X W, HUANG X F, et al. Study of plate load model test on coral sand foundation [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(10): 114-121. (in Chinese)
- [20] 沈扬, 冯照雁, 邓珏, 等. 南海珊瑚砂地基承载力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1281-1290.  
SHEN Y, FENG Z Y, DENG J, et al. Model test on bearing capacity of coral sand foundation in the South China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1281-1290. (in Chinese)
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [M]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [22] 杨永康, 杨武, 丁学武, 等. 西沙群岛珊瑚碎屑砂承载力特性试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2017, 16(3): 61-66.  
YANG Y K, YANG W, DING X W, et al. Experimental research on bearing capacity characteristics of coral sand in Xisha Islands [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2017, 16(3): 61-66. (in Chinese)
- [23] HARDIN B O. Crushing of soil particles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [24] 陈火东, 魏厚振, 孟庆山, 等. 颗粒破碎对钙质砂的应力-应变及强度影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1490-1498.  
CHEN H D, WEI H Z, MENG Q S, et al. The study on stress-strain-strength behavior of calcareous sand with particle breakage [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1490-1498. (in Chinese)
- [25] 李彦彬, 李飒, 刘小龙, 等. 颗粒破碎对钙质砂压缩特性影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 352-359.  
LI Y B, LI S, LIU X L, et al. Effect of particle breakage on compression properties of calcareous sands with oedometer tests [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 352-359. (in Chinese)

(编辑 胡玲)