

文章编号: 1007-2993(2022)06-0448-04

# 马尔代夫珊瑚礁岩土地层结构与波速特征

李 硕<sup>1</sup> 徐青青<sup>2</sup> 乔建伟<sup>3</sup>

(1. 中国水电工程建设工程咨询西北有限公司, 陕西西安 710100; 2. 陕西省水利电力勘测设计研究院勘察分院, 陕西咸阳 712000; 3. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710043)

**【摘要】** 马尔代夫地处热带海洋环境, 珊瑚礁岩土广泛发育。通过工程地质钻探、室内试验和波速测试研究了珊瑚礁岩土地层结构和波速特征。结果表明: 马尔代夫珊瑚礁岩土由珊瑚砂和礁灰岩组成, 根据颗粒组成可将珊瑚砂分为细中砂和粗砾砂, 根据胶结程度可将礁灰岩分为块状礁灰岩和柱状礁灰岩; 珊瑚砂的剪切波速随深度增加而增加, 变化范围为 156~370 m/s, 等效剪切波速为 262.3 m/s; 根据完整性系数可将礁灰岩分为极破碎、破碎、较破碎、较完整和完整 5 类礁灰岩, 礁灰岩呈现出较规律的沉积旋回。

**【关键词】** 马尔代夫; 珊瑚砂; 礁灰岩; 地层结构; 波速

**【中图分类号】** P 642

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.06.004

## Soil Layer Structure and Wave Properties of Coral Reef in Maldives

Li Shuo<sup>1</sup> Xu Qingqing<sup>2</sup> Qiao Jianwei<sup>3</sup>

(1. China Northwest Water Conservancy & Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design Investigation Branch, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 3. China JK Institute of Engineering and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**【Abstract】** Maldives is located in the tropical marine environment, with coral reef rock and soil widely developed. Through engineering geological drilling, laboratory test and wave velocity test, the stratigraphic structure and wave velocity characteristics of coral reef were studied. The results show that the coral reef soil in Maldives is composed of coral sand and coral reef limestone. According to the grain composition, the coral sand can be divided into fine medium sand and coarse gravel sand. According to the degree of cementation, the coral reef limestone can be divided into massive reef limestone and columnar reef limestone. The shear wave velocity of coral sand increases with depth, ranging from 156 m/s to 370 m/s, and the equivalent shear wave velocity is 262.3 m/s. According to the integrity coefficient, reef limestones can be divided into five types: extremely broken, broken, relatively broken, relatively complete and complete. Reef limestones show regular sedimentary cycles.

**【Key words】** Maldives; coral sand; coral reef limestone; stratigraphic structure; wave velocity

### 0 引言

马尔代夫是世界上最大的珊瑚岛国, 是珊瑚礁岩土发育最为广泛的地区之一。珊瑚礁岩土包括上部松散的珊瑚砂和下部固结的礁灰岩。珊瑚砂是由珊瑚碎屑和其他海洋生物碎屑在风和水动力作用下原地堆积或近距离搬运异地堆积形成的特殊生物碎屑沉积物, 矿物成分主要为文石和高镁方解石, 碳酸钙含量高达 96% 以上, 因此又称钙质砂<sup>[1-4]</sup>。礁灰岩

是造礁石珊瑚群体死亡后其遗骸经过漫长的成岩作用形成的碳酸盐岩<sup>[5-6]</sup>。珊瑚礁岩土体特殊的沉积环境、物质组成和结构特征, 使其具有颗粒不规则、易破碎和高内摩擦角等特点, 其与陆源沉积砂工程性质存在较大差别, 是一种具有特殊工程性质的岩土体<sup>[7-8]</sup>。

目前对珊瑚礁岩土的研究多取材于我国南海各群岛, 研究包括地层结构特征、常规物理力学特性和

**作者简介:** 李 硕, 男, 1986 年生, 汉族, 陕西渭南人, 大学本科, 工程师, 主要从事特殊岩土性质研究与水利水电方面的工作。E-mail: litong35634@126.com

**通讯作者:** 乔建伟, 男, 1990 年生, 汉族, 安徽宿州人, 博士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事特殊岩土工程性质与地基处理技术的研究工作。E-mail: 15029207728@163.com

化学特性等方面<sup>[9-11]</sup>。针对珊瑚礁岩土的地层结构特征,中国科学院南海海洋研究所根据岩石结构构造的差异性,将珊瑚礁灰岩划分为5种类型<sup>[12]</sup>。针对礁灰岩的波速特性,郑 坤等<sup>[13]</sup>研究发现其与孔隙度、干密度和回弹模量具有很好的相关关系,并建立了拟合方程。因此,研究马尔代夫珊瑚礁岩土的地层结构和波速特性,不仅对揭示该区珊瑚礁岩土物理力学特性具有重要的参考价值,还对指导该区工程建设具有重要意义。本文在马尔代夫胡鲁马累岛选择典型试验场地,通过工程地质钻探、标准贯入、室内试验、波速测试和面波法对该区珊瑚礁岩土的地层结构和波速特征开展研究,研究成果可为该区工程建设提供一定的参考。

## 1 试验场地位置

试验场地位于马尔代夫胡鲁马累岛,属于2012年人工吹填岛,场地地势平坦,地表高程约为1.5 m,场地面积为100 m×80 m,场地中心坐标为N: 4°13'39", E: 73°32'49"(见图1)。

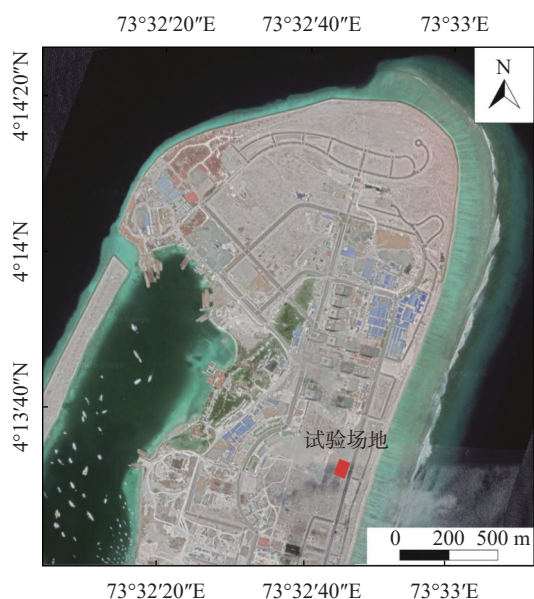


图1 试验场地位置

## 2 试验场地地层特征与原位测试

### 2.1 地层特征

在试验场地布设4个深度80 m钻孔,采用旋转钻进并进行全岩芯取样。钻探取样结果显示马尔代夫80 m以内珊瑚礁岩土包括珊瑚砂和礁灰岩。浅表部为吹填珊瑚砂,包括①层细中砂和②层粗砾砂,对试验点所取的珊瑚砂土样采用筛析法<sup>[12]</sup>测试颗粒级配,根据试验结果,统计了珊瑚砂(细中砂9组、粗砾砂15组)小于各粒径的质量百分比平均值,绘制颗粒分析曲线如图2所示。从图中可以看出,试验

场地珊瑚砂以砂粒( $d=0.075 \sim 2$  mm)为主,以粉黏粒( $d<0.075$  mm)和砾粒( $d>2$  mm)为辅。细中砂的颗粒分析统计结果显示,砂粒含量平均值为84%,粉黏粒含量平均值为8%,砾粒平均值含量为8%;粗砾砂的颗粒分析统计结果显示,砂粒含量平均值为78%,粉黏粒含量为5%,砾粒含量为17%。

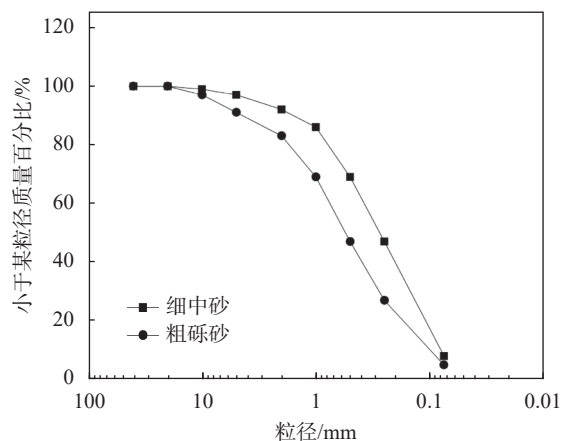


图2 珊瑚砂颗粒分析曲线

地表深度13 m以下为礁灰岩,岩芯呈碎块状和圆柱状(见图3),从岩芯可以看出块状和柱状礁灰岩均含有大量的孔隙和孔洞,后经浪蚀作用易进一步形成坑槽和空洞。碎块状礁灰岩岩芯采取率均小于50%,且局部深度内出现掉钻现象,进一步表明礁灰岩中存在大量空洞,单次掉钻最大长度约120 cm,表明礁灰岩地层中空洞最大高度可达120 cm;碎块状颗粒粒径大小变化范围较大,颗粒磨圆度低。柱状礁灰岩岩芯采取率多大于70%,岩芯呈短柱状,最大连续长度达1.2 m。统计礁灰岩岩芯中空洞大小,发现其直径变化范围较大,最大范围为1~50 mm,主要分布范围为8~20 mm。空洞的存在一方面增加了礁灰岩的渗透性,加大了礁灰岩取样和基坑降水的难度,导致工程造价增加;另一方面降低了其密度和强度,进而导致礁灰岩地层承载力和桩基承载力降低,威胁工程建筑的安全运营。



图3 礁灰岩岩芯典型照片

### 2.2 原位测试

在4个钻孔深度25 m以内的①层细中砂、②层

粗砾砂和③层礁灰岩中分别开展了标准贯入试验,统计不同地层的标贯击数如表1所示。从表1可知,①层细中砂标贯击数变化范围为7~20击,平均值为12.1击,标准差为4.1,变异系数为0.33;②层粗砾砂标贯击数变化范围为8~30击,平均值为17.6击,标准差为5.3,变异系数为0.30;③层礁灰岩标贯击数变化范围为27~114击,平均值为65.6击,标准差为27.0,变异系数为0.41。因此,①层细中砂标贯击数平均值最小,②层粗砾砂居中,③层礁灰岩最大。此外,礁灰岩标贯击数标准差和变异系数最大,表明礁灰岩强度具有较大不均匀性。

表1 不同地层标贯击数统计表

统计	细中砂	粗砾砂	礁灰岩
最大值	20	30	114
最小值	7	8	27
平均值	12.4	17.6	65.6
标准差	4.1	5.3	27.0
统计频数	20	34	16
变异系数	0.33	0.30	0.41

### 3 珊瑚礁岩石的波速特征

#### 3.1 剪切波速与场地类型

在试验场地布设10个深度20m钻孔,采用单孔法测试钻孔深度内珊瑚砂和碎块状礁灰岩的剪切波速。绘制测试深度珊瑚礁岩石随深度变化曲线如图4所示。从图4可知,马尔代夫浅地表珊瑚礁岩石剪切波速随深度增加而增加,上部珊瑚砂的剪切波速均小于400m/s,而礁灰岩的剪切波速则均大于400m/s,且深度16m及其以下礁灰岩的剪切波速均大于500m/s。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)判定试验场地覆盖层厚度为16m。①层细中砂剪切波速分布范围为156~221m/s,平均值185.2m/s;②层粗砾砂剪切波速分布范围为212~379m/s,平均值为296.4m/s,小于①层细中砂平均值的2.5倍;礁灰岩上部2m的剪切波速平均值427.5m/s。根据式(1)计算场地的等效剪切波速 $v_{se}$ 为262.3m/s。

$$v_{se} = \frac{d_0}{t} \quad (1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / v_{sei})$$

#### 3.2 礁灰岩纵波波速与完整性

在试验场地4个深度80m钻孔中使用WSD-3

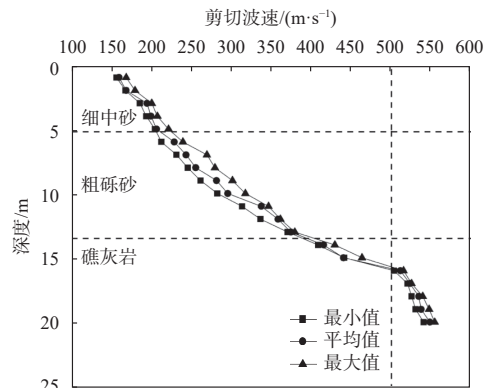


图4 珊瑚礁岩石剪切波速随深度变化特征

型数字波速仪在每个钻孔内间隔1m测试礁灰岩的纵波波速,并测试礁灰岩岩块的纵波波速。统计不同钻孔礁灰岩纵波波速结果如表2所示。从表2可以看出,不同钻孔礁灰岩纵波波速变化范围均较大,最小值约为1050m/s,最大值约为4650m/s,平均值约为2850m/s,不同钻孔纵波波速变异系数的变化范围为0.32~0.41。礁灰岩岩块纵波波速的分布范围为4651~5034m/s,平均值为4800m/s。

表2 马尔代夫礁灰岩纵波波速统计表

统计	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4
最小值/(m·s <sup>-1</sup> )	1117	1143	1047	1170
最大值/(m·s <sup>-1</sup> )	4651	4545	4651	4651
平均值/(m·s <sup>-1</sup> )	2925.3	2781.0	2683.9	2936.1
标准差	990.1	1047.1	1098.0	950.0
变异系数	0.34	0.38	0.41	0.32

岩体完整性是进行岩体质量分级和评估岩体基本力学性质的重要参数。根据礁灰岩岩体与岩块纵波波速测试结果,采用式(2)计算不同钻孔不同深度礁灰岩的完整性系数(见图5)。从图5可知:①按完整性系数可将礁灰岩依次定名为极破碎、破碎、较破碎、较完整和完整礁灰岩,一定深度范围内完整礁灰岩与破碎程度不同的礁灰岩依次发育,按完整礁灰岩出现次数为一个旋回,发现礁灰岩地层呈现出较有规律的多个旋回沉积,据此可将试验场地深度80m以内礁灰岩分为3个旋回沉积;②深度50m以上相同深度不同钻孔礁灰岩完整性系数相差较大,表明水平向上礁灰岩的层序较差,但深度50m以下相同深度不同钻孔礁灰岩完整性系数变化范围较小,一定深度范围的礁灰岩完整性系数基本位于同一区间,表明50m以下礁灰岩的层序逐渐趋于稳定。

$$K_v = (v_p / v_{pr})^2 \quad (2)$$

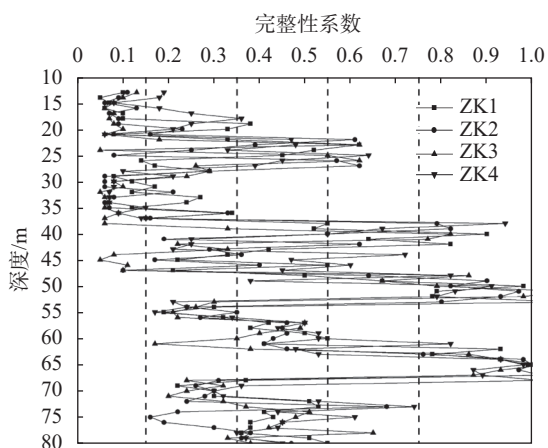


图5 礁灰岩完整性系数随深度变化图

#### 4 结论

(1) 马尔代夫珊瑚礁岩土由上部珊瑚砂和下部礁灰岩组成, 珊瑚砂按颗粒成分可进一步划分为细中砂和粗砾砂, 礁灰岩按胶结程度可划分为碎块状礁灰岩和柱状礁灰岩。

(2) 马尔代夫珊瑚砂剪切波速随深度增加而增加, 但均小于 400 m/s, 礁灰岩表层 2 m 的剪切波速分布范围为 400 ~ 500 m/s 且表层 2 m 以下礁灰岩的剪切波速均大于 500 m/s, 场地的覆盖层厚度约为 15 m。

(3) 礁灰岩岩体的纵波波速分布范围为 1050 ~ 4650 m/s, 平均值为 2850 m/s; 礁灰岩岩块纵波波速的分布范围为 4651 ~ 5034 m/s, 平均值为 4800 m/s。

(4) 礁灰岩按完整性程度可依次定名为极破碎、破碎、较破碎、较完整和完整礁灰岩, 礁灰岩呈现出较规律的旋回沉积。

#### 参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 许 宁. 浅谈珊瑚礁岩土的工程地质特性[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 81-88.

[4] 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, 6(4): 74-84.

[5] 赵焕庭, 宋朝景, 卢 博, 等. 珊瑚礁工程地质初论——新的研究领域珊瑚礁工程地质[J]. 工程地质学报, 1996, 4(1): 86-90.

[6] 段凯波, 段东生, 王 浩, 等. 灰岩分类研究进展及其进一步完善[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 657-661.

[7] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.

[8] YU H B, SUN Z X, TANG C. Physical and mechanism properties of coral sand in the Nansha Islands[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 8(2): 31-39.

[9] 王新志. 南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.

[10] 汪 稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究——从事珊瑚礁研究30年[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 202-207.

[11] 王新志, 汪 稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁礁灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2221-2226.

[12] 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.

[13] 郑 坤, 孟庆山, 汪 稔, 等. 不同结构类型珊瑚礁灰岩弹性波特性的研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3081-3089.

收稿日期: 2021-03-12