



珊瑚礁工程地质特性分析

任世锋¹, 齐钰², 黄磊²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 随着人类开发建设活动越来越多, 遇到了很多有关珊瑚礁的岩土工程问题。掌握珊瑚礁的工程地质特性是解决类似工程问题的关键。结合南海、加勒比海区域工程实例, 现场与室内试验相结合, 对珊瑚礁的分类、结构、物理力学性质及其应用进行总结分析, 为类似地质条件的工程项目提供借鉴作用。

关键词: 珊瑚礁; 岩土工程问题; 工程地质特性; 工程应用

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0207-06

Engineering geologic properties of coral-reef

REN Shi-feng¹, QI Yu², HUANG Lei²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Geotechnical engineering problems are found with human development and construction activities. Grasping the engineering geological properties of coral-reef is the key to solve the problems of the similar projects. Combining with the engineering project in the South China Sea and the Caribbean area, we carry out the field and laboratory tests to analyze the classification, structure, as well as physical and mechanical properties of coral-reef, and serve reference for the engineering projects with similar geological conditions.

Keywords: coral-reef; geotechnical engineering problem; engineering geologic property; engineering application

珊瑚礁是中低纬度浅海区最常见的生物沉积岩之一, 主要分布于南北回归线之间的热带海洋中, 总面积约 28.43 万 km², 其中印度洋—太平洋地区 (包括红海、印度洋、东南亚和太平洋) 占 91.9% 的面积, 大西洋和加勒比海约占全世界的 7.6%。

我国在珊瑚礁分布广泛的南海、南沙群岛的开发建设活动越来越多, 遇到了很多有关珊瑚礁的岩土工程问题, 如该层强度、均匀性、承载力和开挖分级等。本文主要基于南海和加勒比海地区工程实例, 对珊瑚礁的成因和工程特性进行分析。

1 分类

根据珊瑚礁在海洋中所处的位置和礁体的形

态, 可分为岸礁、堡礁、环礁、台礁和点礁。岸礁和堡礁又通称为近岸礁, 环礁和台礁通称为大洋礁或远洋礁。顾名思义, 近岸礁靠近大陆的连线, 远洋礁坐落于汪洋之中, 点礁则是位于泻湖内的小礁体 (图 1~3)。



图 1 澳大利亚昆士兰大堡礁 (近岸礁)

收稿日期: 2014-07-26

作者简介: 任世锋 (1981—), 男, 工程师, 从事工程地质勘察工作。



图2 南沙群岛美济礁 (远洋礁)

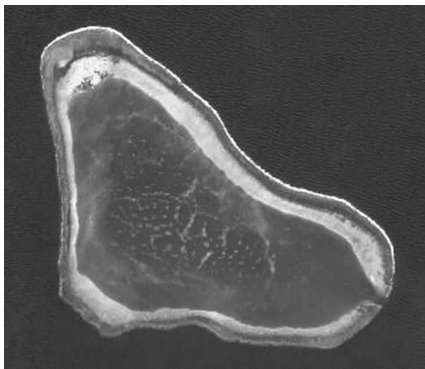


图3 中沙群岛黄岩岛泻湖内的小礁体 (点礁)

2 结构构造^[1]

珊瑚礁是由造礁珊瑚骨骼沉积、胶结而成，其分布规律服从珊瑚生长规律，并与相应地质时代的自然环境有关。珊瑚礁灰岩地层分布是比较有规律的^[2]，呈较明显的轮回建造、软硬交替的特征，即造礁珊瑚经过一个阶段生长后，由于环境变化等原因而死亡、风化，之后新的造礁珊瑚在其之上生长直至死亡、风化，如此循环堆积。

珊瑚礁复杂的立体结构派生出珊瑚礁岩特殊的孔隙结构特征，根据相关文献^[3]，珊瑚礁岩中的孔隙有4种类型：微孔隙、空隙、空穴、溶洞。微孔隙直径小于1 mm，主要有钙质颗粒粘结后形成的孔隙，该孔隙多分布于细颗粒钙质胶结形成的碳酸盐质岩石中，岩石较为致密；空隙直径1~8 mm，多分布于珊瑚礁灰岩中，呈管状、放射状、纤维状分布，连通性很好；空穴直径5~15 mm，多分布在珊瑚碎屑岩中，空穴无规则，无充填；

溶洞主要分布于较深的珊瑚礁岩中，无规则，连通性一般。资料表明，珊瑚礁的溶洞大小不一，在空间上分布也不均匀。

珊瑚礁地层从上到下一般可分为生物碎屑砂砾层、次生礁、原生礁3个层次(图4~5)。各层结构特点如下：

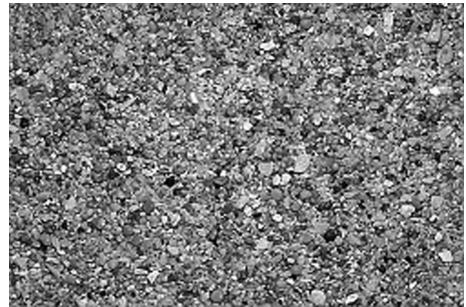


图4 典型珊瑚礁砂



图5 典型珊瑚礁石

1) 珊瑚碎屑土是由原生或次生珊瑚礁岩和珊瑚、贝壳残骸等生物经风化作用或海水动力作用搬运堆积或残积尚未胶结成岩的土，该层从上至下颗粒逐渐变细，从无胶结到弱胶结，呈松散-中密状态。

2) 次生礁岩也称为现代“海滩岩”，是在原生礁岩的孔隙、凹穴沟槽中以及礁坪上充填和堆积珊瑚和喜礁生物碎屑经过胶结压密作用形成的礁体。岩石呈块状构造，多孔结构，局部呈蜂窝状、树枝状结构，断面可看到胶结特征。

3) 原生礁岩是由珊瑚和一些珊瑚藻自然生长形成的，岩石呈多孔疏松结构或致密结构，块状构造，断面呈白色。疏松结构的珊瑚礁岩断面形似莲藕，致密结构断面形似微孔海绵，整体性强，

可视作碎裂结构岩体。

3 基本物理力学特性

珊瑚礁成层构造、多孔结构以及后期的充填和溶蚀导致其软硬、疏密不均匀, 工程性质指标离散和变异性较大。

图 6 为西沙群岛永兴岛和南沙群岛的典型地质剖面。根据勘察成果, 场地表层出露岩性为珊瑚碎屑或贝壳碎屑成分的砾砂及珊瑚礁, 在 20 m 范围内自上而下为砾砂、礁灰岩、次生礁灰岩、礁灰岩。

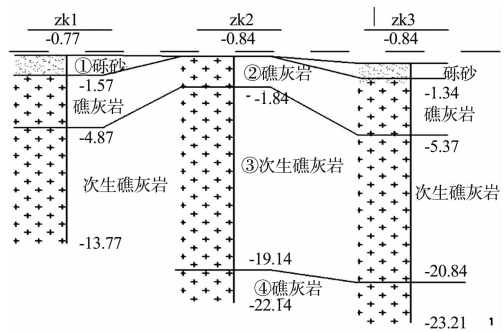


图 6 西沙群岛永兴岛和南沙群岛的典型地质剖面

图 7 为巴哈马地区的典型地质剖面, 在深度 50 ft (15.24 m) 范围内, 主要岩层为珊瑚礁灰岩, 自上而下可分为 3 个层次。

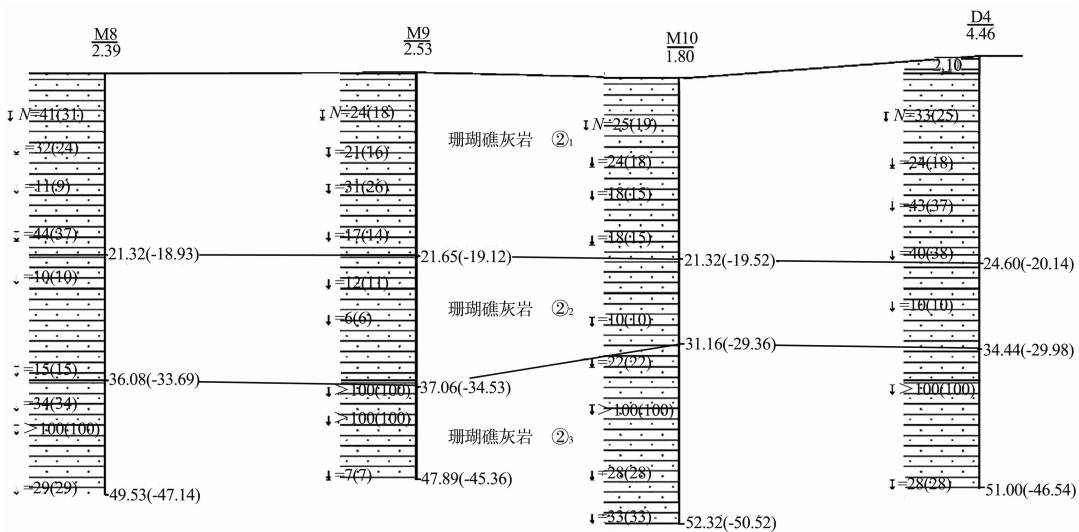


图 7 巴哈马北阿巴科港典型地质剖面

3.1 天然密度

室内试验测定了巴哈马北阿巴科港区域内 ②₁ ~ ②₃ 层珊瑚礁灰岩的天然密度, 范围值为 1.50 ~ 2.10 g/cm³, 密度分布不均。与一般石英砂及灰岩相比, 具有天然密度小、孔隙率大的特征, 该特征主要是其复杂的生长结构和胶结状态有关。表 1 为不同地区的珊瑚礁天然密度值^[4]。

表 1 不同地区珊瑚礁天然密度值

位置	天然密度 / (g · cm ⁻³)
西沙永兴岛	1.49 ~ 2.14
南沙群岛永暑礁	1.11 ~ 1.72
巴哈马北阿巴科港	1.50 ~ 2.10

3.2 标准贯入试验击数

珊瑚礁的多孔不均匀和软硬交替成层特征, 呈现出了标贯击数的离散和在垂直方向的变化, 不同地区各地层标贯试验数据见表 2。

3.3 单轴抗压强度

单轴抗压强度试验结果表明 (表 3)^[5], 珊瑚礁岩抗压强度指标相对一般灰岩较小, 且离散性较大, 属软质岩石范畴。根据相关文献, 礁灰岩破坏形态属拉张破坏, 破裂面沿着珊瑚生长线形成, 即珊瑚生长线是礁灰岩最脆弱的部位。礁灰岩破坏后仍具有较高的残余强度, 最高可达到峰值强度的 61%, 这与灰岩等脆性岩石破坏后强度完全丧失有别。礁灰岩破坏后强度是逐步降低的, 这在工程设计中具有重要意义。

表2 不同地区标贯试验数据

位置	层号层名	统计数量/个	实测标贯击数范围值/击	标贯击数平均值/击	变异系数	
南沙群岛	②礁灰岩	3	26 ~ >50	36.7		
	③次生礁灰岩	7	14 ~ >50	27.4		
西沙永兴岛	①砾砂	2	26 ~ 27	26.5		
	②礁灰岩	16	14 ~ 44	35.1	0.21	
		0 ~ 5 m	46	17 ~ 36	22.3	0.25
	③次生礁灰岩	5 ~ 9 m	50	17 ~ 44	23.8	0.30
		>9 m	28	15 ~ 30	23.9	0.14
巴哈马北阿巴科港	② ₁ 珊瑚礁灰岩	70	7 ~ >100	33.5	0.73	
	② ₂ 珊瑚礁灰岩	29	6 ~ 22	11.5	0.30	
	② ₃ 珊瑚礁灰岩	45	7 ~ >100	70.6	0.53	

表3 不同地区珊瑚礁单轴抗压强度值

位置	层号层名	岩石单轴抗压强度/MPa			
		饱和		干燥	
		范围值	平均值	范围值	平均值
南沙群岛	②礁灰岩	5.04 ~ 7.70	6.58	7.95 ~ 10.78	9.17
	②礁灰岩	2.16 ~ 13.30	9.05	7.23 ~ 18.70	12.06
	③次生礁灰岩	4.76 ~ 8.30	6.49	11.90 ~ 19.10	15.68
西沙永兴岛	④礁灰岩	9.01	9.01	15.80	15.80
	② ₁ 珊瑚礁灰岩	10.80	10.80	15.00	15.00
巴哈马北阿巴科港	② ₂ 珊瑚礁灰岩	1.50	1.50	2.50	2.50
	② ₃ 珊瑚礁灰岩	11.00 ~ 17.40	13.50	22.00	22.00

3.4 抗剪强度

珊瑚礁具有硬而脆的特征,其抗剪强度参数跟成分、胶结和密实程度有关,因难以采取原状样品,抗剪强度的测试数据较少。表4为不同地区相关工程所采用的抗剪强度参数^[6]。

表4 不同地区珊瑚礁岩体抗剪强度指标

位置	层号层名	内聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
南沙群岛	①砾砂	10	37 ~ 45
红海沙特 (某电厂工程)	珊瑚、珊瑚碎屑岩 和珊瑚状石灰岩互层		31 ~ 40
	② ₁ 珊瑚礁灰岩	60	30
巴哈马北阿巴科港	② ₂ 珊瑚礁灰岩	25	20
	② ₃ 珊瑚礁灰岩	100	40

3.5 渗透特性^[7]

3.5.1 钻孔内试抽水情况

抽水试验是通过抽水设备,在揭露含水层的钻孔、竖井、民井、试坑中抽水,可以获得一定的水位降低值(降深)和相应的流量,依据降深

和流量,按不同的边界条件采用相应的计算公式,确定含水层渗透性及了解相关水文地质条件的一种原位试验方法。

渗透系数计算采用公式为:

$$K = \frac{0.733Q}{(2H-S)S} \lg \frac{R}{r} \quad (1)$$

式中: Q 为涌水量 (m^3/d); R 为影响半径 (m); r 为抽水孔半径 (m); H 为含水层厚度 (m); S 为水位降深 (m)。

选择场区内代表性钻孔进行简易抽水试验(利用已有水井及井上现有抽水设备,只有一次降深并保持动水位稳定 2 ~ 4 h 的简化的单井抽水试验),抽水结果:采用额定功率 22 m^3/h 的水泵试抽 2 h,水位降深 0.38 m,涌水量约 9.02 m^3/h 。试抽说明场区基岩裂隙水渗透性强、涌水量大。

3.5.2 室内渗透试验

1) 试验原理。

水在岩石中呈低流速层流运动时服从达西定律。据此可以通过试验计算岩石的渗透系数。

2) 渗透系数的测定。

室内岩石渗透试验的仪器和方法与土的渗透仪相类似, 不过做试验时采用的压力差(水头差)比做土的试验要大得多。本次试验岩样取样深度分布在 0.39 ~ 12.22 m 之间, 所处岩层产生的围岩属于小围岩应力区, 为更好的模拟现场实际情况, 本次室内岩石渗透试验施加

的围压为 0 MPa, 施加的轴向应力(荷载)也为 0 MPa, 通过高压泵提升岩样进水口端的水头, 按照由低向高的压力顺序逐级进行, 试验过程中若岩样破坏或压力超过 5.5 MPa 停止试验。

3) 试验结果。

试验结果见表 5。

表 5 岩石渗透系数

层号层名	岩石渗透系数/(cm·s ⁻¹)					
	垂直			水平		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
② ₁ 珊瑚礁灰岩	2.55 × 10 ⁻³	1.52 × 10 ⁻⁵	8.83 × 10 ⁻⁴	1.17 × 10 ⁻³	1.73 × 10 ⁻⁵	4.24 × 10 ⁻⁴
② ₃ 珊瑚礁灰岩	5.05 × 10 ⁻⁶	4.28 × 10 ⁻⁷	2.74 × 10 ⁻⁶	1.13 × 10 ⁻⁶	5.14 × 10 ⁻⁷	8.22 × 10 ⁻⁷

3.5.3 渗透性评价

室内岩石渗透试验结果: ②₁珊瑚礁灰岩层垂直向渗透系数为 1.52 × 10⁻⁵ ~ 2.55 × 10⁻³ cm/s, 水平向渗透系数为 1.73 × 10⁻⁵ ~ 1.17 × 10⁻³ cm/s, ②₃珊瑚礁灰岩层垂直向渗透系数为 4.28 × 10⁻⁷ ~ 5.05 × 10⁻⁶ cm/s、水平向渗透系数为 5.14 × 10⁻⁷ ~ 1.13 × 10⁻⁶ cm/s。现场抽水试验结果: 采用额定功率 22 m³/h 的水泵, 试抽 2 h, 水位降深 0.38 m, 涌水量约 9.02 m³/h, 渗透系数约 1 × 10⁻³ cm/s。

室内岩石试验结果仅代表岩样的渗透性,

而实际岩体渗透性受控于岩体结构和构造, 如孔隙和裂隙的发育程度及其连通性, 而这种特征不能在岩样中充分体现, 因此原位渗透试验结果更反映实际情况。因此该项目珊瑚灰岩最终采纳了现场渗透试验成果。

4 工程应用

4.1 基础持力层

珊瑚礁灰岩有一定强度和厚度, 可作为重力式基础或桩基持力层使用, 表 6 为不同地区相关工程采用的承载力和桩基参数^[8]。

表 6 珊瑚岩层承载力容许值及桩基参数

位置	层号及层名	承载力容许值 f/kPa	泥浆护壁钻(冲)孔桩		打入桩桩基参数	
			桩的极限侧阻力标准值 q _f /kPa	桩的极限端阻力标准值 q _R /kPa	极限侧摩阻力标准值 q _f /kPa	极限桩端阻力标准值 q _R /kPa
南沙群岛	①砾砂	130	40			
	②礁灰岩	500	140	1 800		
	③次生礁灰岩	300	110	1 600		
	④礁灰岩	800	150	2 000		
西沙永兴岛	①砾砂	200	90			
	②礁灰岩	1 000	150			
	③次生礁灰岩	300	135	820		
巴哈马北阿巴科港	② ₁ 珊瑚礁灰岩	300			60	5 000
	② ₂ 珊瑚礁灰岩	190			30	2 000
	② ₃ 珊瑚礁灰岩	700			80	7 000

4.2 地基处理

表层和上部的珊瑚礁碎屑土及礁灰岩均匀性和稳定性较差, 若上部荷载较大时, 则不能满足

承载力和沉降变形稳定要求, 需进行相应地基处理。不同类型构筑物基础可根据其场地工程地质条件采用不同的地基处理措施。

考虑珊瑚礁及碎屑本身强度较高,但其孔隙率大、结构疏松,导致地基松散。地基处理的主要目的是提高密实度,可采用强夯、分层碾压或振冲密实的方法,能满足一般道路、机场、5层以下工民建的地基承载力及变形指标要求。若荷重较大,影响深度较深,可考虑采用水泥压浆加固或钻孔灌注桩的加固方法。

4.3 珊瑚礁可挖性及其作为填料的适宜性

珊瑚礁灰岩地层呈软硬交替分布,总体而言属开挖困难的地层。巴哈马采用合适机械先绞碎后再进行开挖,取得了较好的成果,且绞碎后其管道输送性较好。

综合分析场区岩芯揭露情况、标贯试验、抗压试验等,按照疏浚规范,珊瑚礁应参照岩石类分级。因此,第②₁珊瑚礁灰岩以碎块状、块状为主,局部短柱状,定为12级;②₂珊瑚礁灰岩以碎块状或散砂状为主,可挖性介于碎石与岩石之间,定为10~11级;②₃珊瑚礁灰岩以碎块状、块状为主,局部短柱状、柱状,定为12~13级。

珊瑚礁灰岩作为建筑材料,具有悠久的历史。而其作为填料,在巴哈马也广泛应用于道路垫层。工程实践证明,珊瑚礁灰岩作为填料的适宜性较好。但应注意的是,珊瑚礁岩土属于碳酸盐类岩土,其沉积物极易发生后期变化^[9]。其岩土体中多孔隙和裂隙发育,在水动力条件长期作用下,发生溶解现象,水沿节理、裂缝和原生孔隙流动并将孔隙扩大,甚至产生溶洞,引起地基不均匀沉降、地基失稳。此外在海浪的冲刷、淘蚀作用下也易引起建筑边坡失稳等工程地质问题。有利的方面是,珊瑚砂有一定的自胶结作用性,回填后在上部荷载作用下,强度会随着胶结作用增长,体现出珊瑚砂有一定的粘聚性,这一点有别于常规石英砂。在地下水位之上,可以呈陡壁开挖不塌。国外也有多个利用珊瑚砂^[10]作为回填材料的成功案例,比如苏丹港新集装箱码头堆场、沙特RSGT集装箱码头堆场均以珊瑚砂作为填筑材料,采用振动碾压密实,可以达到预期的效果。

5 结语

1) 珊瑚礁属生物沉积岩,广泛分布于中低纬度浅海区,呈现岸礁、环礁和点礁等不同形态,具有多孔结构、层状构造。

2) 珊瑚礁呈现硬而脆、疏密不均的特征,其天然密度 $1.11 \sim 2.10 \text{ g/cm}^3$,实测标贯击数 $7 \sim >100$ 击;单轴饱和抗压强度 $1.50 \sim 17.40 \text{ MPa}$ 。

3) 珊瑚礁具有较强的渗透性,其表层裂隙发育,渗透系数不低于 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

4) 珊瑚礁表层和上部的均匀性和稳定性较差,可采用强夯、分层碾压或振冲密实的方式进行地基处理。珊瑚礁下部强度较高、稳定性较好,可作为重力式基础或桩基持力层使用。

5) 珊瑚礁可作为堆场或道路的回填料使用,但应注意其属于碳酸盐类岩土,在一定水动力条件下可发生溶蚀现象。可采用先绞碎再开挖的方式进行开挖和疏浚,该层绞碎后适合管道输送。

参考文献:

- [1] 严与平,柯有青.浅谈珊瑚礁工程地质特性及地基处理[J].资源环境与工程,2008(12):47-49.
- [2] 梁文成.苏丹珊瑚礁灰岩地区地质勘察总结[J].水运工程,2009(7):151-153.
- [3] 白晓宇,张明义,李明怀,等.珊瑚礁地基的工程性状研究[J].工程勘察,2010(11):21-25.
- [4] 单华刚,汪稔,周曾辉.南沙群岛永暑礁工程地质特性[J].海洋地质与第四纪地质,2000(3):31-36.
- [5] 王新志,汪稔,孟庆山,等.南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008(11):2221-2226.
- [6] 孙宗勋.南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J].热带海洋,2000(2):1-8.
- [7] DL T5355—2006 水电水利工程土工试验规程[S].
- [8] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2014:384-416,783-792.
- [9] 孙宗勋,赵焕庭.珊瑚礁工程地质学[J].水文地质工程地质,1998(1):1-4.
- [10] 刘汉文.珊瑚礁砂作回填地基材料的研究及利用[J].西部探矿工程,1996(3):1-3.

(本文编辑 郭雪珍)