

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018110601

珊瑚礁灰岩工程地质特性研究新进展

郑坤^{1,2}, 孟庆山², 汪稔^{1,2}, 俞缙³, 吴文娟², 余克服¹

1. 广西大学海洋学院, 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 南宁 530004
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071
3. 华侨大学土木工程学院, 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 厦门 361021

摘要:随着“一带一路”的实施和“海上丝绸之路”的部署,珊瑚礁灰岩工程地质特性研究具有实际的战略意义和迫切需要。通过纵横观对比分析南海、红海、加勒比海、东南亚、印度洋以及亚丁湾地区珊瑚礁灰岩基本物理力学特性,定量地展现了海相生物成因的珊瑚礁灰岩的特殊性。与石灰岩、白云岩等碳酸盐岩相比,珊瑚礁灰岩离散性较大,特别是孔隙率有所偏大,强度有所偏小,这与珊瑚等原生物结构复杂、疏松多孔以及非均质性的固有特征相吻合,进而提出珊瑚礁灰岩物理力学特性具有“结构效应”。珊瑚礁体内部表现出软硬互层交替的垂直分带现象,究其原因是珊瑚礁灰岩孔隙发育程度不均匀、强度软硬不一以及结构构造无序性的整体宏观体现,从某珊瑚礁体地层划分的角度定量地揭示了珊瑚礁岩体的“成岩作用类型交替演化效应”。

关键词:珊瑚礁灰岩;工程地质;结构复杂;疏松多孔;软硬互层交替

中图分类号:P642 **文献标识码:**A

Advances in study of engineering geological characteristics of coral reef limestone

ZHENG Kun^{1,2}, MENG Qingshan², WANG Ren^{1,2}, YU Jin³, WU Wenjuan², YU Kefu¹

1. Key Laboratory of Coral Reef Research in South China Sea, Guangxi, School of Marine, Guangxi University, Nanning 530004, China
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Fujian Provincial Engineering Technology Research Center for Tunnel and Urban Underground Space, Xiamen 361021, China

Abstract: The research on engineering geological characteristics of coral reef limestone has become a significant and urgent need in the region of “One Belt and One Road” and the “maritime silk road”. By comparing the physical and mechanical characteristics of coral reef limestone from the South China Sea, the Red Sea, the Caribbean Sea, Southeast Asia, the Indian Ocean and the Gulf of Aden, the characteristics and properties of marine biogenetic coral reef limestone are studied in this paper. It is found that Compared with normal carbonate rocks, such as dolomite and limestone, the coral reef limestone is characterized by large discreteness. Its porosity is larger and intensity lower, due to its complicated texture. As the results, the engineering and mechanic properties of the coral reef limestone is obviously controlled by the texture of the rock, we called it the “texture effect” in this paper. In vertical sequence, coral-reef always shows alternation of hard and soft beds due to differentiation of pore development, as the results of “alternating evolution of diagenesis”.

Key words: coral reef limestone; engineering geology; complex structure; loose and porous; alternation of hard and soft beds

全球珊瑚礁主要分布于南北回归线之间的热带海洋中,广泛发育在红海、印度洋、东南亚以及太平洋地区,零星地分布在大西洋和加勒比海地区,温度 18~20 °C、盐度 27‰~40‰、海水溶解氧

量 4.5~5.0 mL/L 以及深度 0~50 m 是珊瑚礁最适宜的生长发育环境^[1]。珊瑚通常是由千姿百态的珊瑚虫组成的;有一类软珊瑚外层是没有碳酸钙骨骼的,死亡之后随即融入大海便销声匿迹了,虽然不

资助项目:国家自然科学基金项目“珊瑚礁砂混合体宏观力学性能及尺度效应研究”(41877267),“珊瑚礁工程地质评价及其工程力学效应的分带性研究”(41330642),“礁岸再造珊瑚礁混凝土损伤机制及其服役性能研究”(41472287),“南海钙质粉砂的干缩机制及抗裂加固方法研究”(41602314);中国科学院战略性先导科技专项(A类)“岛礁形态与岩土力学特性”(XDA13010201)

作者简介:郑坤(1992—),男,硕士,助教,主要从事珊瑚岛礁工程地质与力学特性的研究, E-mail: 792637096@qq.com

通讯作者:孟庆山(1974—),男,博士,研究员,主要从事珊瑚岛礁地质稳态评价与工程力学特性的研究, E-mail: qsmeng@whrsm.ac.cn

收稿日期:2018-11-06; **改回日期:**2019-01-03. 文凤英编辑

是珊瑚礁的建设者,却是珊瑚礁生态系统的重要组成部分;另一类硬珊瑚外表有一层保护性骨架,被称为石珊瑚或造礁珊瑚;造礁珊瑚随着源源不断地繁衍更替,经过长年累月沉积成岩作用,最终演化形成了体积庞大的美丽珊瑚礁,在全球生态环境资源研究中占有重要地位,被一些科学家称为“海洋中的热带雨林”和“海洋沙漠中的绿洲”^[2-4]。根据海平面的潮汐变化,赵焕庭^[5]将珊瑚礁地貌划分为岛屿、沙洲、干出礁、暗沙和暗滩,并按照珊瑚礁体形态和地理位置的不同,将其划分为裙礁、堡礁和环礁3个主要类型,尤以环礁最多;同时根据沉积相带的不同,将环礁地形划分为向海坡相带、外礁坪相带、礁坪突起相带、内礁坪相带、泻湖相带和潮汐通道^[6]。根据地质构造位置和海底地貌单元的不同,王国忠^[7]将其划分为大陆架礁、大陆坡礁和大洋型礁三种类型。乍看之下,这些雄伟壮观的海洋构筑物似乎是由石头建造的,但实际上是由各种各样的海洋生物沉积演化而成的,因此珊瑚礁仍继承了原生物骨骼疏松多孔、结构复杂以及非均质性的特点。珊瑚礁在岩石学上统称为珊瑚礁灰岩,属于海相生物成因的碳酸盐岩^[8-9];造岩矿物成分主要为方解石和文石,胶结类型主要为孔隙式胶结和接触式胶结^[10];化学成分基本为 CaCO_3 ,东南亚以及加勒比海地区珊瑚礁灰岩中的 CaCO_3 含量分别为99%和97%^[11-12]。

与珊瑚钙质土相比,目前珊瑚礁灰岩工程地质特性的研究还比较匮乏,处于起步探索阶段。金昱昕^[13]通过工程力学与地质生态学相结合的方法,利用单轴抗压强度和环境污染程度揭示了珊瑚骨骼结构的差异性。孙宗勋^[14]分析了珊瑚礁灰岩纵波速度与年龄、结构类型、孔隙率、沉积环境以及地质事件之间的定性关系。王新志^[15]研究了珊瑚灰岩的基本力学特性,认为初始压缩状态下不存在孔隙裂隙压密阶段,并在塑性流动阶段保持较高且稳定的残余强度。杨永康^[16]建立了珊瑚礁灰岩纵波速度与密度、孔隙率以及单轴抗压强度之间的拟合方程。范超^[17]利用霍普金森杆技术探究了珊瑚礁灰岩的动力学特性,建立了动态强度与能耗密度、入射能、应变率之间的拟合关系。李莎^[18]通过点荷载试验和巴西劈裂试验发现,珊瑚礁灰岩的破坏特征是沿着生长线方向发展的。刘志伟^[19]通过现场静载荷试验测试发现,随着荷载的增大,承压板底部珊瑚礁灰岩发生了永久性脆性变形。刘海峰^[20]通过模型试验测试了不同围压条件下珊瑚礁灰岩的侧摩阻力,发现珊瑚礁灰岩力学特性表现出较明

显的围压效应。肖向阳^[21]和任世锋^[22]研究了珊瑚礁灰岩的单轴抗压强度,均认为珊瑚礁灰岩属于软质岩范畴。万志辉^[23]采用后压浆桩技术提高了珊瑚礁灰岩桩基承载力。梁文成^[24]和王继成^[25]通过现场钻探勘察发现,珊瑚礁体内部结构呈现出较明显的软硬互层交替现象。ZHU^[26]基于现场试验和声波测井数据,并结合珊瑚礁灰岩室内物理力学试验,初步确定了马尔代夫跨海大桥群桩基础的设计参数。Wang^[27]首次采用数字钻孔摄像技术,并参照相关工程岩体分级标准,制定了珊瑚礁体完整程度的岩体完整性指数(RMDI)划分方法。

随着“一带一路”的推进和“海上丝绸之路”的建设,珊瑚礁体将作为重要的中继站,特别是中国援建马尔代夫跨海大桥的友谊工程,进一步体现珊瑚礁工程地质特性研究的必要性和迫切性。本文通过南海、红海、加勒比海、东南亚、印度洋以及亚丁湾地区珊瑚礁灰岩工程地质特性的对比分析,展现不同地区珊瑚礁灰岩的差异性以及相同区域珊瑚礁灰岩的不均匀性,主要表现在密度、孔隙率、纵波速度、水理性、点荷载强度指标、单轴抗压强度、抗拉强度、抗剪强度指标以及地基承载力上。考虑到大多数学者均认为珊瑚礁灰岩属于软质岩范畴,从科学系统的角度来讲,这种说法是不全面的。实际上,珊瑚礁灰岩微构造存在较明显的差异性,不均匀性较大,软硬程度不一。因此,需要继续深入地探究珊瑚礁灰岩工程地质特性,以便应对不同地质条件下国防工程的建设,为珊瑚礁体安全稳态分析提供更可靠的关键技术支撑。

1 珊瑚礁灰岩结构类型与成岩作用

基于珊瑚礁灰岩弹性纵波速度、孔隙度、干密度、回弹值之间的关系,郑坤^[28]将珊瑚礁灰岩划分为坚硬岩、较坚硬岩、较软岩、软岩、极软岩5种类型。Clark^[29]以固体骨架粒径和胶结连结程度作为主要分类指标,将珊瑚礁灰岩划分为泥粒胶结生物碳酸盐岩、泥晶胶结生物碳酸盐灰岩和重结晶灰岩3种类型。张更生^[30]根据沉积环境和岩性特征的不同,将某疏浚工程地区珊瑚礁灰岩划分为管状珊瑚礁灰岩、蜂窝状珊瑚礁灰岩和致密状珊瑚礁灰岩。与岩石学紧密相关的分类方法由中国科学院南海海洋研究所^[31]提出,根据岩石结构构造的差异性,将珊瑚礁灰岩主要划分为5种类型:一是珊瑚骨架灰岩,是由一种或多种较大块状的珊瑚骨骼组成,其整体形状呈准生长状态,比较完整致密,主要

集中于外礁坪沉积相带,其属于高能海洋热力和动力环境;二是珊瑚砾块灰岩,是由大小不一的珊瑚骨骼碎块杂乱无章地堆积胶结而成,珊瑚骨骼碎块磨圆度较低,碎块之间可充填少量砂粒,主要集中于礁坪凸起区域,其属于中高能海洋热力和动力环境;三是珊瑚砾屑灰岩,其与砾块结构比较相似,只是珊瑚骨骼碎块经长期风浪搬运磨蚀而磨圆度较高,碎块之间充填的砂粒较多,主要集中于内礁坪生长带,其属于中能海洋热力和动力环境;四是珊瑚砂屑灰岩,是由复杂多样的珊瑚等生物碎屑砂粒组成,与砂岩比较相像,主要集中在瀉湖盆堆积场所,其属于低能海洋热力和动力环境;五是包粒结构类型,是一种具有局限性的结构类型,常见的则是由珊瑚藻包裹珊瑚碎屑砂砾形成的,主要发育在内礁坪沉积带。

不同结构类型珊瑚礁灰岩主要是由成岩作用类型的交替演化效应造成的,随着成岩沉积环境的旋回变化,沉积物中会同时或先后发生多种成岩作用效应,都在不同程度地改造珊瑚礁灰岩的微构造。概括起来,在珊瑚礁区主要成岩作用有5种类型^[32]:一是胶结作用,是指沉积物或岩石内部颗粒周围胶结物之间的沉积固化作用,它是使松散沉积物变成坚硬岩石的最复杂、最活跃的成岩过程之一;二是溶解溶蚀作用,是指各种海洋生物的腐蚀作用、水流等的物理侵蚀作用以及水的化学溶解作用,它是使礁岩结构呈疏松多孔、破碎状态的重要影响因素;三是碎解作用,主要是指沉积物被机械侵蚀作用的过程,它将较大的珊瑚礁块破碎成若干较小的碎石块,或再进行搬运磨蚀作用形成较细的碎屑砂砾;四是黏结作用,是指造礁珊瑚或藻类以其基部粘附、固着或包裹于硬底之上,以保持其稳定的抗浪生长态的作用,广泛发育在礁格架相带、礁坪相带以及礁缘黏结相带;五是新生变形作用,珊瑚礁区主要为文石新生变形为低镁方解石和高镁方解石转变为低镁方解石;还有微晶化作用、白云石化作用、交代作用以及内沉积物作用都在不同程度地改造珊瑚礁灰岩的结构和组分。

2 珊瑚礁灰岩基本物理特性

2.1 密度、孔隙率和纵波速度

岩石密度(ρ)主要取决于造岩矿物性质和孔隙发育程度,而孔隙裂隙则是岩石微构造的重要特征之一,一般采用孔隙率(n)度量岩石的孔隙性,弹性

波速度(V_p)在孔隙裂隙传播过程中受到吸收和折射而逐渐衰减,在一定程度上密度、孔隙率以及纵波速度三者均能够定量地评价岩石力学特性的优劣^[33-34]。而海相生物成因的珊瑚礁灰岩,并不存在由构造运动引起的断裂结构面,这与其他岩石的结构构造截然不同^[35]。已有学者研究了不同地区珊瑚礁灰岩的干密度、孔隙率以及纵波速度,如图1—3

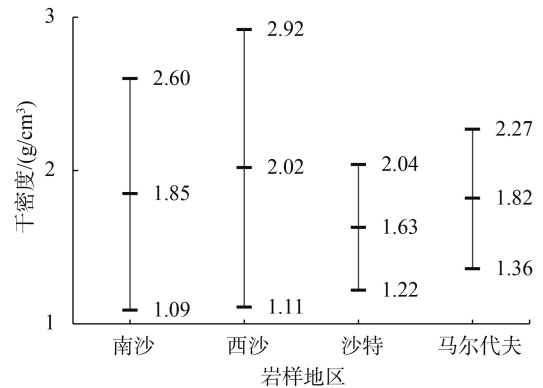


图1 不同地区珊瑚礁灰岩干密度变化对比^[14-21]

Fig.1 Comparison of dry density of coral reef limestone in different regions^[14-21]

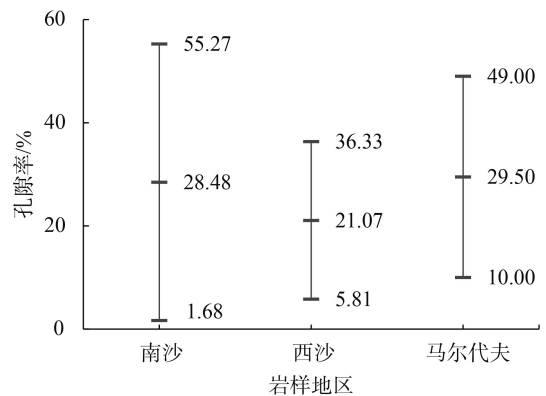


图2 不同地区珊瑚礁灰岩孔隙率变化对比^[14-21]

Fig.2 Comparison of porosity of coral reef limestone in different regions^[14-21]

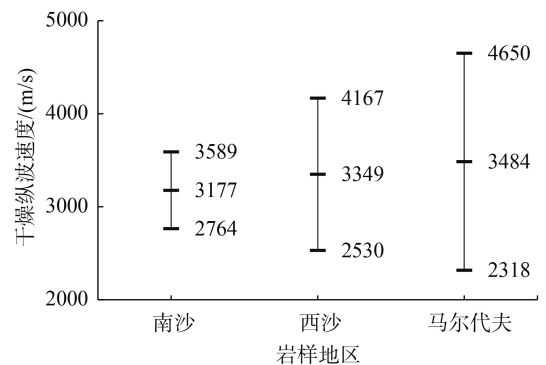


图3 不同地区珊瑚礁灰岩纵波速度变化对比^[14-21]

Fig.3 Comparison of longitudinal wave velocity of coral reef limestone in different regions^[14-21]

所示^[14-21], 直观地展现了珊瑚礁灰岩孔隙发育程度的不均一性。试验结果表明, 珊瑚礁灰岩干密度为 1.09~2.92 g/cm³, 孔隙率为 1.68%~55.27%, 纵波速度为 2 318~4 650 m/s; 与石灰岩($\rho=2.35\sim 2.83$ g/cm³, $n=0.5\%\sim 27.0\%$) 和白云岩($\rho=2.14\sim 2.76$ g/cm³, $n=0.3\%\sim 25.0\%$) 等碳酸盐岩相比, 珊瑚礁灰岩离散性较大, 并且孔隙率明显偏大, 这与珊瑚礁灰岩疏松多孔、极不均匀性的结构特征相吻合。

2.2 水理性

渗透性和软化性是岩石主要的水理性质, 常用渗透系数(k)和软化系数(K_R)表示, 分别反映岩石微构造特征和抵抗水侵的能力。通过现场抽水试验可确定珊瑚礁灰岩的渗透系数, 如表 1 所示^[11, 16, 21]。不难发现, 沙特地区渗透系数较大, 渗透性接近于砾石层, 表明该层珊瑚礁灰岩孔隙发育程度较好; 而印度尼西亚地区渗透系数较小, 对应的地层深度为 40 m 以下, 说明该地层岩体较为完整致密。通过单轴抗压试验可确定珊瑚礁灰岩的软化系数, 如表 2 所示^[11, 16, 21]。试验结果表明, 珊瑚礁灰岩软化系数为 0.31~0.91, 与石灰岩($K_R=0.68\sim 0.94$) 和白云岩($K_R=0.83$) 等碳酸盐岩相比, 软化系数整体偏小, 说明珊瑚礁灰岩具有较明显的水岩作用效应。

表 1 抽水试验测试的渗透系数^[11, 16, 21]

Table 1 Permeability coefficient measured by pumping test^[11, 16, 21]

岩样地区	渗透系数/(cm/s)
沙特	$4.3\times 10^{-2}\sim 1.2\times 10^{-1}$
巴哈马	1×10^{-3}
印度尼西亚	2.3×10^{-5}

表 2 单轴压缩试验测试的软化系数^[11, 16, 21]

Table 2 Softening coefficient of uniaxial compression test^[11, 16, 21]

岩样地区	软化系数	平均软化系数
西沙	0.69~0.91	0.80
马尔代夫	0.72~0.91	0.82
印度尼西亚	0.31~0.87	0.59

3 珊瑚礁灰岩基本力学特性

3.1 点荷载强度指标

点荷载强度指标是布鲁克和弗兰克林提出的, 试验操作具有简单快捷的特点, 可以作为岩石质量

等级划分的一个参考指标, 并且有时可以代表单轴抗压强度加以应用。已有研究表明, 沙特地区珊瑚礁灰岩点荷载强度指标为 0.04~1.25 MPa^[19], 瓦努阿图地区为 1.05~2.60 MPa^[36], 马尔代夫地区点荷载强度指标基本符合正态分布函数, 置信区间为 [2.8, 3.04] MPa, 置信度为 95%^[18]。不难发现, 岩样整体点荷载强度指标大小关系为: 马尔代夫地区>瓦努阿图地区>沙特地区。

3.2 单轴抗压强度

单轴抗压强度是岩石最基本、最重要的力学特性, 并广泛应用于岩体工程的建设, 用 R_c 表示。已有学者研究了不同地区珊瑚礁灰岩的单轴抗压强度, 如图 4、5 所示^[11-24]。试验结果表明, 干燥珊瑚礁灰岩单轴抗压强度为 1.10~38.56 MPa, 饱和珊瑚礁灰岩单轴抗压强度为 0.86~49.24 MPa, 与石灰岩($R_c=50\sim 200$ MPa) 和白云岩($R_c=80\sim 250$ MPa) 等碳

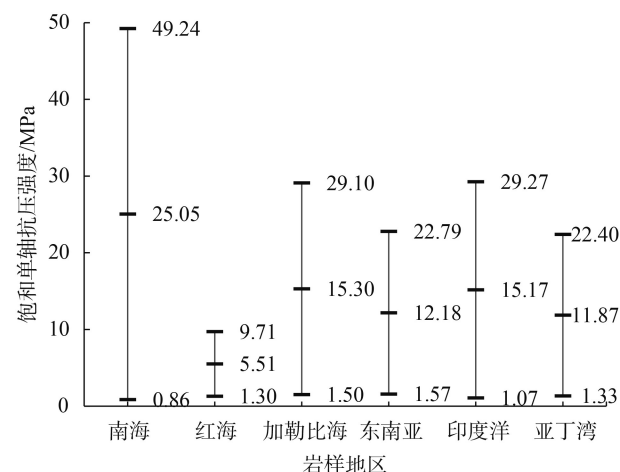


图 4 不同地区干燥珊瑚礁灰岩单轴抗压强度变化对比^[11-24]

Fig.4 Comparison of uniaxial compressive strength of dry coral reef limestone in different regions^[11-24]

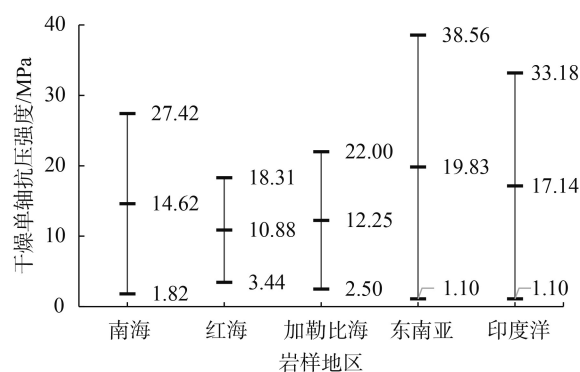


图 5 不同地区饱和珊瑚礁灰岩单轴抗压强度变化对比^[11-24]

Fig.5 Comparison of uniaxial compressive strength of saturated coral reef limestone in different regions^[11-24]

酸盐岩相比,强度明显偏小。《工程岩体分级标准》(GB/T50218-2014)^[37]定义软质岩为饱和单轴抗压强度小于30 MPa的一类岩石。不难发现,南海部分珊瑚礁灰岩为非软质岩范畴,因此,不能一概而论地将珊瑚礁灰岩统称为软质岩,进一步说明珊瑚礁灰岩离散性较大,软硬程度不一。

3.3 抗拉强度

珊瑚礁灰岩是经过钙质胶结沉积演化而成的,抗拉强度能够体现珊瑚礁灰岩的强度特性与结构特征,目前常用巴西劈裂试验间接测定岩石的抗拉强度,用 R_t 表示。李莎^[18]研究表明,珊瑚礁灰岩抗拉强度基本符合正态分布函数,置信区间为[1.97, 2.75] MPa,置信度为95%。南沙与马尔代夫地区珊瑚礁灰岩在巴西试验条件下的抗拉强度,如表3所示^[15,17,21]。试验结果表明,干燥珊瑚礁灰岩抗拉强度为0.94~2.65 MPa,饱和珊瑚礁灰岩抗拉强度为0.88~7.75 MPa,与石灰岩($R_t=5\sim 20$ MPa)和白云岩($R_t=15\sim 25$ MPa)等碳酸盐岩相比,强度明显偏小。

3.4 抗剪强度指标

岩石的剪切强度是通过抗剪强度指标表示的,即黏聚力(C)和内摩擦角(φ),岩石的抗剪强度愈高,两者愈大,反之则愈小^[38]。基于珊瑚礁灰岩在不同试验条件下的抗剪强度指标研究,能够为珊瑚礁工程提供更安全可靠的设计参数。珊瑚礁灰岩在单轴压缩与巴西试验条件下的抗剪强度指标,如表4所示^[15,21]。珊瑚礁灰岩在三轴压缩试验条件下的抗剪强度指标,如表5所示^[15,20]。珊瑚礁灰岩在剪切试验条件下的抗剪强度指标,如表6所示^[30]。试验结果表明,珊瑚礁灰岩黏聚力为0.50~7.34 MPa,内摩擦角为26.5°~71.0°,与石灰岩($C=10\sim 50$ MPa, $\varphi=35^\circ\sim 50^\circ$)和白云岩($C=20\sim 50$ MPa, $\varphi=30^\circ\sim 50^\circ$)等碳酸盐岩相比,珊瑚礁灰岩黏聚力明显偏小,内摩擦角差异性较明显。

4 珊瑚礁灰岩地基承载力

郑坤^[39]基于某珊瑚礁岩体多个钻孔岩芯回弹值沿深度的演化规律,定量地建立了珊瑚礁岩体地层划分方法,如表7所示,直观地展现了珊瑚礁岩体内部结构的软硬程度。对于软硬互层交替的珊瑚礁岩体而言,地基承载力的探究具有实际的工程意义,目前珊瑚礁地基承载力的确定基本上参考现场地质勘察的经验方法。通过现场平板载荷试验

表3 巴西劈裂试验测试的抗拉强度^[15,17,21]

Table 3 Tensile strength of Brazil split test^[15,17,21]

岩样地区	含水状态	抗拉强度	
		范围值/MPa	平均值/MPa
南沙	干燥	0.94~1.76	1.35
	饱和	0.88~7.75	4.32
马尔代夫	干燥	1.71~2.65	2.18
	饱和	1.58~2.54	2.06

表4 单轴试验换算的抗剪强度指标^[15,21]

Table 4 Shear strength index converted from uniaxial test^[15,21]

岩样地区	含水状态	抗剪强度指标	
		平均黏聚力/MPa	平均内摩擦角/(°)
南沙	干燥	1.58	50.4
	饱和	1.43	44.8
马尔代夫	干燥	1.86	38.4
	饱和	1.61	33.7

表5 三轴试验测试的抗剪强度指标^[15,20]

Table 5 Shear strength index of triaxial test exchange^[15,20]

岩样地区	含水状态	抗剪强度指标	
		黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
南沙	干燥	2.54	40
	饱和	1.87	35
马尔代夫	饱和	1.2~3.3	26.5~38.5

表6 剪切试验测试的抗剪强度指标^[30]

Table 6 Shear strength index by shear test^[30]

岩石类型	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
管状珊瑚礁灰岩	0.50~2.07	29.7
蜂窝状珊瑚礁灰岩	3.49~5.10	45.0~58.0
致密状珊瑚礁灰岩	3.87~7.34	51.3~71.0

测试显示,沙特地区珊瑚礁灰岩的地基承载力特征值为310 kPa,变形模量为22 MPa^[40]。利用超前钻注浆的钻孔灌注桩技术发现,巴哈马地区珊瑚礁灰岩地层单桩竖向抗压承载力特征值 $\geq 1\ 250$ kPa,单桩抗拔承载力特征值 ≥ 800 kPa,均满足体育场工程设计要求^[41]。李志勇^[36]研究发现,瓦努阿图地区强风化珊瑚礁灰岩地基承载力特征值为200 kPa,压缩模量为20 MPa;中风化珊瑚礁灰岩地基承载力特征值为220~400 kPa,压缩模量为25~30 MPa。根据《建筑地基设计规范》(GB50007-2002)规定的计算

表7 某珊瑚礁体的地层划分^[39]
Table 7 Stratigraphic division of a coral reef^[39]

珊瑚礁岩体深度/m	平均回弹值/MPa	珊瑚礁体地层	地层深度/m
0.0~18.5	0.24	碎屑层	18.5
18.5~70.6	8.48	软弱层	52.1
70.6~126.5	35.74	坚硬层	55.9
126.5~147.8	15.13	软弱层	21.3
147.8~176.3	31.44	坚硬层	28.5
176.3~200.0	7.41	软弱层	23.7

表8 苏丹地区珊瑚礁灰岩地基承载力^[42]
Table 8 Bearing capacity of coral reef limestone foundation in Sudan region^[42]

珊瑚礁体地层	饱和单轴抗压强度/MPa	地基承载力特征值/kPa
全风化珊瑚礁灰岩	1.30~2.60	130~330
强风化珊瑚礁灰岩	2.37~5.70	240~550
中风化珊瑚礁灰岩	3.41~9.71	500~1400

表9 巴哈马地区珊瑚礁灰岩地基承载力^[12]
Table 9 Bearing capacity of coral reef limestone foundation in Bahamas area^[12]

珊瑚礁体地层	地基承载力特征值/kPa
上部珊瑚碎屑砂砾层	170
中部次生珊瑚礁灰岩层	700
下部原生珊瑚礁灰岩层	1600

表10 马尔代夫地区压浆前后地基承载力对比^[23]
Table 10 Comparison of foundation bearing capacity before and after grouting in Maldives region^[23]

试桩状态	侧摩阻力/kN	端阻力/kN	极限承载力/kN
压浆前	63 023	4 216	67 239
压浆后	63 735	6 504	70 239

公式,利用饱和单轴抗压强度和折减系数可初步确定苏丹地区珊瑚礁灰岩地基承载力,如表8所示^[42]。严与平^[12]根据珊瑚礁体地层的垂直分带特征确定了巴哈马地区珊瑚礁灰岩地基承载力,如表9所示。表7—9直观地验证了珊瑚礁体内部呈现为软硬互层与垂直分带的结构特征,与大多数学者研究结果一致^[24-25,43-44]。万志辉^[23]探究了后压浆桩技术在珊瑚礁地层桩基工程中的应用,如表10所示;测试结果表明,压浆前后的珊瑚礁灰岩侧摩阻力基本保持不变,端阻力和极限承载力有了显著提升。

5 结论与展望

(1)通过南海、红海、加勒比海、东南亚、印度洋以及亚丁湾地区珊瑚礁灰岩工程地质特性的纵横观对比分析,发现珊瑚礁灰岩表现出较明显的地域差异性和自身不均匀性;究其原因主要是由珊瑚礁灰岩的“结构效应”、“成岩作用类型交替演化效应”以及“水岩作用效应”造成的。

(2)在密度方面,南沙与西沙比较相近,沙特与马尔代夫比较相近;南沙岩样从疏松到致密的孔隙率离散性最大,但纵波速度变化区间最小;就软化系数而言,西沙与马尔代夫比较相近,印度尼西亚整体偏小;点荷载强度指标整体大小关系为:马尔代夫地区>瓦努阿图地区>沙特地区;在单轴抗压强度方面,南海部分岩样属于非软质岩范畴,其他海域均属于软质岩范畴;抗剪强度指标整体大小关系为:致密状珊瑚礁灰岩>蜂窝状珊瑚礁灰岩>管状珊瑚礁灰岩;就地基承载力而言,原生珊瑚礁灰岩层>次生珊瑚礁灰岩层>珊瑚碎屑砂砾层,中风化珊瑚礁灰岩>强风化珊瑚礁灰岩>全风化珊瑚礁灰岩。

(3)与石灰岩、白云岩等碳酸盐岩相比,珊瑚礁灰岩基本物理力学特性离散性较大,特别是孔隙率有所偏大,强度有所偏小,这与珊瑚等原生生物骨骼疏松多孔、结构复杂以及非均质性的固有特征相吻合。

(4)珊瑚礁体内部表现出较显著的软硬互层交替特征,这正是珊瑚礁灰岩孔隙发育程度不均一、强度软硬不一以及结构构造无序性的整体宏观体现。因此,需要通过钻孔岩性特征和测井数据初步对珊瑚礁体进行地层划分,以便为地基基础工程提供更安全可靠的设计依据。

(5)基于珊瑚礁体长期受到风浪等海洋动力作用和海洋强国战略的需要,因此,进一步开展珊瑚礁灰岩动力学特性和三轴卸荷力学特性研究是维持珊瑚礁体长期安全稳定性的关键技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] 孙宗勋, 赵焕庭. 珊瑚礁工程地质学——新学科的提出[J]. 水文地质工程地质, 1998(1): 1-4. [SUN Zongxun, ZHAO Huanting. Coral reef engineering geology advancing of a new discipline [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998(1): 1-4.]
- [2] 廖宝林, 胡菲, 肖宝华. 回归珊瑚礁[M]. 广州: 广东科技出版社, 2016. [LIAO Baolin, HU Fei, XIAO Baohua. Return to Coral

- Reefs[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2016.]
- [3] 帕姆·沃克, 伊莱恩·伍德. 美丽的珊瑚礁[M]. 张凡珊, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2011. [Walker P, Wood E. The Coral Reef[M]. ZHANG Fanshan, trans. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing House, 2011.]
- [4] 赵焕庭. 中国现代珊瑚礁研究[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(4): 98-105. [ZHAO Huanting. Research of coral reef in modern China [J]. World Sci-tech R & D, 1998, 20(4): 98-105.]
- [5] 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景. 南海珊瑚礁地貌模型研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 112-120. [ZHAO Huanting, WANG Lirong, SONG Chaojing. Geomorphological model of coral reefs in the South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(9): 112-120.]
- [6] 赵焕庭, 王丽荣. 南海诸岛珊瑚礁人工岛建造研究[J]. 热带地理, 2017, 37(5): 681-693. [ZHAO Huanting, WANG Lirong. Construction of artificial islands on coral reef in the South China Sea Islands [J]. Tropical Geography, 2017, 37(5): 681-693.]
- [7] 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. [WANG Guozhong. Sedimentology of Coral Reefs in the South China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2001.]
- [8] 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. [ZHAO Huanting, SONG Chaojing, LU Bo, et al. A preliminary exposition of coral reef engineering geology A new research field: coral reef engineering geology [J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(1): 86-90.]
- [9] 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. [DUAN Kaibo, DUAN Dongsheng, WANG Hao, et al. Study Progress in limestone classification with perfection [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(5): 657-661.]
- [10] 朱袁智, 王有强, 赵焕庭, 等. 南沙群岛水暑礁第四纪珊瑚礁成岩作用与海平面变化关系[J]. 热带海洋, 1994, 13(2): 1-8. [ZHU Yuanzhi, WANG Youqiang, ZHAO Huanting, et al. The relationship between diagenesis of Quaternary coral reef of Yongshu Reef in Nansha Islands and Sea level changes [J]. Tropic Oceanology, 1994, 13(2): 1-8.]
- [11] 唐国艺, 郑建国. 东南亚礁灰岩的工程特性[J]. 工程勘察, 2015, 43(6): 6-10. [TANG Guoyi, ZHENG Jianguo. Engineering properties of reef calcareous rock in Southeast Asia [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(6): 6-10.]
- [12] 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, 22(S1): 47-49. [YAN Yuping, KE Youqing. On engineering geological characteristics and foundation treatment of coral reefs [J]. Resources Environment & Engineering, 2008, 22(S1): 47-49.]
- [13] 金昱昕, 陈天然, 孟庆山, 等. 单轴抗压强度揭示南海珊瑚骨骼结构的差异[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(2): 33-39. [JIN Yuxin, CHEN Tianran, MENG Qingshan, et al. Difference of coral skeletal structure revealed by compressive strength measurements [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(2): 33-39.]
- [14] 孙宗勋, 卢博. 南沙群岛珊瑚礁灰岩弹性波性质的研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 175-180. [SUN Zongxun, LU Bo. Elastic wave properties of coral reef rock in Nansha Islands [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(2): 175-180.]
- [15] 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, 27(11): 2221-2226. [WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Research on characteristics of coral reef calcareous rock in Nansha Islands [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2221-2226.]
- [16] 杨永康, 丁学武, 冯春燕, 等. 西沙群岛珊瑚礁灰岩物理力学特性试验研究[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2016, 15(5): 78-83. [YANG Yongkang, DING Xuewu, FENG Chunyan, et al. Experimental research on physics mechanics characteristics of coral reefs calcareous rock in Xisha islands [J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2016, 15(5): 78-83.]
- [17] 范超. 珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验研究[D]. 广西大学硕士学位论文, 2018. [FAN Chao. Experimental study on dynamic mechanical properties of coral reef limestone[D]. Master Dissertation of Guangxi University, 2018.]
- [18] 李莎, 毛茂, 徐升. 马尔代夫礁灰岩物理力学特性研究[J]. 武汉勘察设计, 2017(6): 54-57. [LI Sha, MAO Mao, XU Sheng. Study on physical and mechanical properties of reef limestone in Maldives [J]. Wuhan Investigation & Design, 2017(6): 54-57.]
- [19] 刘志伟, 李灿, 胡昕. 珊瑚礁灰岩工程特性测试研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(9): 17-21. [LIU Zhiwei, LI Can, HU Xin. Experimental study on engineering properties of coral reef calcareous rock [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(9): 17-21.]
- [20] 刘海峰, 朱长歧, 孟庆山, 等. 礁灰岩嵌岩桩的模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1581-1588. [LIU Haifeng, ZHU Changqi, MENG Qingshan, et al. Model test on rock-socketed pile in reef limestone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1581-1588.]
- [21] 肖向阳, 张荣, 彭登峰. 马尔代夫珊瑚礁岩土工程特性研究[J]. 铁道勘察, 2018, 44(2): 69-73. [XIAO Xiangyang, ZHANG Rong, PENG Dengfeng. Experimental study on geotechnical properties of coral reef in Maldives [J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(2): 69-73.]
- [22] 任世锋, 席文熙, 曹中英. 珊瑚礁物理力学性质分析及工程应用[J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2016, 17(2): 81-85. [REN Shifeng, XI Wenxi, CAO Zhongying. The physical and mechanical properties analysis and engineering application to coral-reef [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 81-85.]
- [23] 王志辉, 戴国亮, 龚维明. 珊瑚礁灰岩层后压浆桩增强效应作用机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 467-473, 482. [WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming. Enhanced mechanism of post-grouting pile in coral-reef limestone formations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 467-473, 482.]
- [24] 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, 164. [LIANG Wencheng. Geotechnical investigation of coral-reef limestone area in Sudan [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(7): 151-153, 164.]
- [25] 王继成, 叶剑. 浅谈苏丹珊瑚礁地质条件下的海港规划与设计[J]. 中国水运, 2012, 12(6): 18-20. [WANG Jicheng, YE Jian. On harbor

- planning and design under coral reef geological conditions in Sudan [J]. *China Water Transport*, 2012, 12(6): 18-20.]
- [26] Zhu C Q, Liu H F, Wang X, et al. Engineering geotechnical investigation for coral reef site of the cross-sea bridge between Malé and Airport Island [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 146: 298-310.
- [27] Wang J C, Wang C Y, Han Z Q. Analysis of coral reef rock mass integrity based on RMDI method [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 580-583: 641-650.
- [28] 郑坤. 珊瑚礁灰岩工程地质及声发射特性研究[D]. 广西大学硕士学位论文, 2019. [ZHENG Kun. Study on engineering geology and acoustic emission characteristics of coral reef limestone[D]. Master Dissertation of Guangxi University, 2019.]
- [29] Clark A R, Walker B F. A proposed scheme for the classification and nomenclature for use in the engineering description of Middle Eastern sedimentary rocks [J]. *Géotechnique*, 1977, 27(1): 93-99.
- [30] 张更生, 徐继涛. 影响疏浚珊瑚礁岩抗剪强度的关键因素[J]. *水运工程*, 2017(8): 57-61. [ZHANG Gengsheng, XU Jitao. Key factors affecting the shear strength of dredged coral reef [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2017(8): 57-61.]
- [31] 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. [Nansha Comprehensive Scientific Investigation Team, Chinese Academy of Sciences. Quaternary Coral Reef Geology of Yongshu reef, Nansha Islands[M]. Beijing: Ocean Press, 1992.]
- [32] 王瑞, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁的成岩作用[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(3): 221-233. [WANG Rui, YU Kefu, WANG Yinghui, et al. Diagenesis of coral reefs [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(3): 221-233.]
- [33] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013. [CAI Meifeng. Rock Mechanics and Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.]
- [34] 陈颀, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. [CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock Physics[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2009.]
- [35] 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]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)博士学位论文, 2008. [WANG Xinzhì. Study on engineering geological properties of coral reefs and feasibility of large project construction on Nansha Island[D]. Doctor Dissertation of Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.]
- [36] 李志勇, 王维理. 珊瑚礁地区工程地质特征[J]. *工程勘察*, 2016, 2(S1): 255-259. [LI Zhiyong, WANG Weili. Engineering geological characteristics of coral reef region [J]. *Engineering Survey*, 2016, 2(S1): 255-259.]
- [37] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50218-2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50218-2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.]
- [38] 贾喜荣, 弓培林. 岩石力学[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018. [JIA Xirong, GONG Peilin. Rock mechanics[M]. 2nd ed. Xuzhou: China University of Mining Press, 2018.]
- [39] 郑坤, 孟庆山, 汪稔, 等. 不同结构类型珊瑚礁灰岩弹性波特性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3081-3089. [ZHENG Kun, MENG Qingshan, WANG Ren, et al. Elastic wave properties of coral reef limestone with different structural types [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3081-3089.]
- [40] 刘志伟, 杨生彬, 程东幸, 等. 沙特拉比格2×600 MW燃油电站珊瑚礁地基工程勘察与实践[J]. *土工基础*, 2017, 31(5): 588-590, 598. [LIU Zhiwei, YANG Shengbin, CHENG Dongxing, et al. Geotechnical investigation of a 2 × 660 MW power plant on coral reef sands in Saudi Arabia [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2017, 31(5): 588-590, 598.]
- [41] 陈吉卫. 超前钻注浆的钻孔灌注桩在珊瑚礁岩中的应用[J]. *资源环境与工程*, 2013, 27(6): 769-772. [CHEN Jiwei. Application of cast-in-site bored pile in coral rock [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2013, 27(6): 769-772.]
- [42] 梁文成. 苏丹红海沿岸珊瑚岩土层地基承载力探讨[J]. *港工技术*, 2010, 47(3): 52-53. [LIANG Wencheng. Discuss on bearing capacity of subgrade of coral stratum along the coast of Red Sea in Sudan [J]. *Port Engineering Technology*, 2010, 47(3): 52-53.]
- [43] 罗新华. 浅谈苏丹港区工程地质特征[J]. *水运工程*, 2004(3): 49-50, 75. [LUO Xinhua. On engineering geological features of Sudan port area [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2004(3): 49-50, 75.]
- [44] 王爱溪, 林治平, 冯光华. 珊瑚礁灰岩中钢管桩动静承载力测试分析[J]. *施工技术*, 2018, 47(19): 82-84, 92. [WANG Aixi, LIN Zhiping, FENG Guanghua. Test and analysis on dynamic and static bearing capacity of steel pipe pile in coral reef limestone [J]. *Construction Technology*, 2018, 47(19): 82-84, 92.]