

珊瑚礁灰岩物性特征及工程性质研究进展

钟毓^{1,2}, 汪稔^{1,2}, 李琦^{2,3*}, 魏厚振^{2,3}, 李霞颖^{2,3}

1. 广西大学土木建筑工程学院, 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. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 礁灰岩是珊瑚礁岩体的基础和主体部分, 其物理力学特征及工程性质的研究在海洋开发建设中具有重要的战略意义。国内外对不同地区礁灰岩的研究表明, 礁灰岩具有高孔隙、低密度、低强度的物理性质, 且由于成岩作用复杂, 其岩石结构发育具有不均匀性, 不同胶结程度的礁灰岩具有不同的应力响应, 这与其他常规软岩及脆性岩石性质相比明显不同。目前对礁灰岩的研究总体上仍处于初级阶段, 尚不能很好地解决珊瑚礁工程建设中的诸多难题, 需要系统地开展更加深入的研究。建议首先进行科学的结构分类, 加强对不同结构类型礁灰岩的物理力学特征、工程性质、微观胶结机理以及海水侵蚀作用对其物性特征影响等方面的研究。

关键词 礁灰岩; 物性特征; 工程性质; 珊瑚礁; 海洋开发建设

珊瑚礁是造礁石珊瑚群体死亡后, 由其遗骸、各种附礁生物以及一些贝类和藻类等, 经过地质沉积、生物破坏及海洋动力等共同作用后, 相互胶结而形成的岩土体^[1]。礁灰岩是珊瑚礁下部成岩部分, 是珊瑚岛礁岩体的主体部分, 其主要矿物成分为碳酸钙(CaCO_3), 故将其称为礁灰岩^[2-3]。

自古以来, 海洋建设对各国发展来说至关重

要, 海洋具有丰富的渔业、石油、天然气、可燃冰等资源。然而, 珊瑚礁几乎是远海中唯一的陆地资源, 是渔业的天然避风和停靠港口, 是海洋建设的基础平台。并且, 珊瑚礁区油气储量惊人, 仅中国南海石油地质储量就高达 $230 \times 10^8 \sim 300 \times 10^8$ t, 是缓解中国未来能源短缺的巨大储备库, 因此, 珊瑚礁在岛礁工程建设中被赋予多重重要功能^[4-5]。

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2020-03-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330642)

作者简介: 钟毓, 博士研究生, 研究方向为珊瑚礁岩土工程, 电子信箱: zhongyu1216@163.com; 李琦(通信作者), 研究员, 研究方向为能源、环境与水资源, 电子信箱: qli@whrsm.ac.cn

引用格式: 钟毓, 汪稔, 李琦, 等. 珊瑚礁灰岩物性特征及工程性质研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 57-70; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.20.012

近年来,中国海洋建设事业蓬勃发展,国家领导人高度重视海洋科学建设,提出维护国家海洋权益、建设海洋强国的战略。随着建设“一带一路”、“21世纪海上丝绸之路”倡议的提出,岛礁工程建设在国内积极推进^[6]。礁灰岩作为珊瑚礁岩土的主体,是岛礁工程建设的基础和立足点,其物理特性和工程性质决定了各项工程建设的稳定性,因而,礁灰岩的研究是珊瑚礁工程建设中的重要篇章^[7-8]。由于礁灰岩成份特殊,成因复杂,其物理力学特性十分特殊,与其他常见陆相、海相沉积岩石性质相比差异均较大,给岛礁工程建设带来了许多意料之外的困难,引起了国内外学者的广泛关注。

国外对珊瑚礁地质的研究始于20世纪70年代,由于海洋油气的发现及海上油气开采平台建设带来的工程问题,研究人员对钙质砂以及礁灰岩的化学成分、物理性质(密度、孔隙度、渗透率、波速等)及静力学性质进行了探讨,结果表明礁灰岩主要成分为碳酸钙,具有高孔隙度、低强度等特点^[9]。国内对珊瑚礁工程地质的研究相对较晚,20世纪70年代后期开始珊瑚礁的现代工程建设,80年代初期对南海海域的部分珊瑚礁群岛进行了现场勘探、测试及室内物理试验。目前,对珊瑚礁灰岩的研究,主要围绕珊瑚礁工程建设中个别场址具体地基承载力与桩基承载力验算、礁灰岩样室内强度试验以及珊瑚混凝土材料选取等方面,其中大部分研究者重点关注礁灰岩的基本物理特性和受压破坏时受力与变形的关系等,这与海洋科学建设的实际需要还有很大的差距,亟待开展深入、系统的研究。

1 礁灰岩的分布及分类

1.1 礁灰岩分布

按照“最高珊瑚覆盖率的礁坪、礁顶、浅水礁区等近表层礁范围”的严格定义,世界资源研究所(2002)统计认为,全球珊瑚礁总面积约为 $28.43 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在 30°S 至 30°N 之间的热带和亚热带海洋地区,位于太平洋、印度洋和大西洋沿岸,或者岛滩浅水区中,其中印度洋—太平洋地区占主要部分,约为总量的91.9%^[10-11]。中国是世界上重

要的珊瑚礁国家之一,珊瑚礁资源丰裕,占全球总面积的2.57% ($0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$),为全球第八。中国珊瑚礁种类丰富多样,有岸礁、礁丘、环礁、台礁等,主要分布在海南岛、澎湖列岛、雷州半岛西南岸、涠洲岛和台湾岛的海岸沿岸及南海诸岛128个以环礁为主要类型的礁区。其中,南海诸岛为主要礁区,约占面积为 $0.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,为全国珊瑚礁面积的78%^[12-13],是珊瑚礁建设的重点区域。

随着“一带一路”倡议及共同建设“21世纪海上丝绸之路”战略构想的实施,珊瑚礁工程建设项目日益增多。“21世纪海上丝绸之路”沿线的珊瑚礁分布如图1所示,珊瑚礁分布广泛,海上丝绸之路沿线城市港口均有珊瑚礁分布,因而珊瑚礁岛的建设情况对促进全球经济和贸易十分关键。礁灰岩是珊瑚礁地质的基础及主体,对于携手推进“一带一路”建设更具有重要的战略意义。

1.2 礁灰岩命名及结构分类

一直以来,研究者对礁灰岩的命名众说纷纭,不同研究方向的学者对珊瑚礁灰岩的命名存在不同的看法,有的根据其成因称其为生物礁,有的根据其化学成分命名为钙质沉积物,有的将其称为海滩岩,还有的则直接将其归类于灰岩^[14-15]。对同一种岩石的不同命名,不利于综合各界研究的信息和成果,容易导致礁灰岩研究内容杂乱,不易被总结,因而统一的分类命名工作对于研究礁灰岩来说十分重要。

根据珊瑚礁形成过程中是否发生迁移,礁灰岩可以分为原生礁和次生礁^[2]。Fookes等^[16]提出按粒径及成岩胶结作用将碳酸盐沉积物分为泥状灰岩、粉砂状灰岩、粗砂状灰岩、砾状灰岩、细粒石灰岩、碎屑石灰岩、砾状石灰岩(或角砾石灰岩)、结晶石灰岩及藻礁石灰岩,之后又以碳酸盐成分的百分含量为指标,补充了含石英及黏土矿物的碳酸盐岩石的分类。Clark等^[17]在Fookes的基础上,从岩石工程分类的角度改进了分类标准,从组分、粒径及单轴抗压强度等方面对礁灰岩的分类进行了拓展,建立了礁灰岩的工程分类图。朱长歧等^[18]将碳酸盐类沉积物分为碳酸盐生物砾屑和碳酸盐生物砂。张更生等^[19]根据珊瑚礁的物性特征将礁灰岩分为

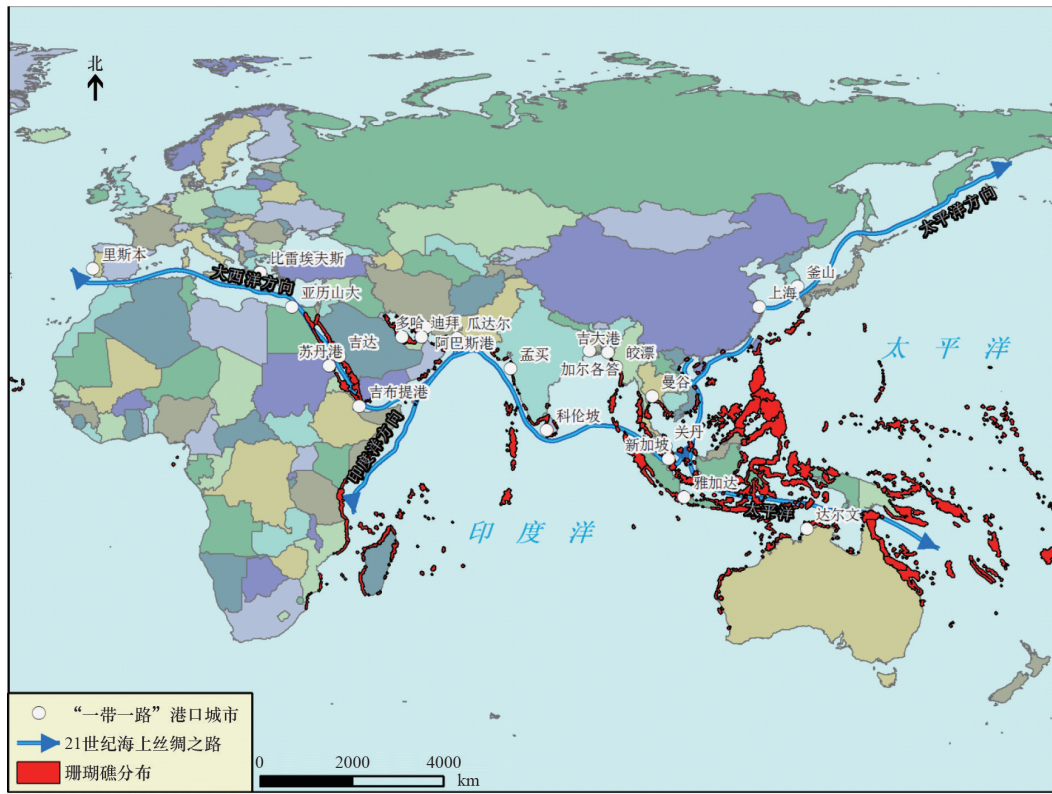


图1 “21世纪海上丝绸之路”沿线珊瑚礁分布

管状珊瑚礁岩、蜂窝状珊瑚礁岩和致密状珊瑚礁岩。

Fookes 及 Clark 等对礁灰岩的分类方法能够在一定程度上反映不同类型礁灰岩的胶结类型及强度特性,但是并没有反映出生物礁岩石的沉积特点,没有体现珊瑚礁灰岩与其他碳酸盐岩的区别,当成因和胶结不明时无法明确地进行分类,并且分类结果较复杂,在工程中使用多有不便。而其他对礁灰岩的分类则过于简单和片面,没有很好地对礁灰岩进行总结分类。目前,国内采用较多的命名和分类为中国科学院南海海洋研究所提出的分类方法,该分类方法采用结构-组分分类命名方案^[1]。首先,将礁灰岩分为块状结构、砾块结构、砾屑结构、含砾砂屑结构、砂屑结构和包粒结构6种结构类型(图2)。然后,根据岩芯组成成分将礁灰岩分为珊瑚灰岩、珊瑚砾块灰岩、生物砂砾块灰岩、珊瑚砾屑灰岩、生物砂砾屑灰岩、珊瑚藻石砂砾屑灰岩、生物砾砂屑灰岩、含砾砂屑灰岩和生物砂屑灰岩9种。

由图2可知,不同结构的礁灰岩在颗粒组份上存在明显的差异——例如,块状结构主要是由较大

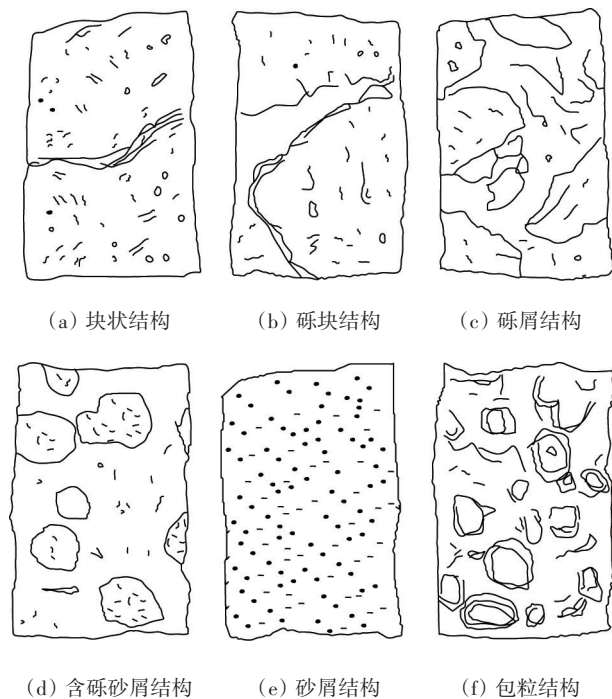


图2 珊瑚礁灰岩结构类型^[1]

块体的珊瑚组成,砂屑结构则是由砂级生物碎屑组成,其物理性质及力学特性也因结构而区别明显。上述结构-组分分类命名方案,基于礁灰岩结构类型进行区分后加上成因解释,既可对不同胶结状态礁灰岩有明确区分,又可对珊瑚礁灰岩进行较为细致的描述,还可免除在成分不明时造成的分类混乱;并且,分类方法简单易观察,在野外及工程中可操作性强,给研究及工程人员带来极大的便利,在中国珊瑚礁研究学者中使用频率较高,建议给予推广。

2 礁灰岩的矿物组成与微观结构

岩石的物理力学性质与岩石本身的微观结构、矿物成分、孔隙度、结晶大小、形状等紧密相关,岩体结构破坏是其组成材料及岩石结构破坏的累积过程^[20-23],礁灰岩的力学性质研究离不开对其矿物成分和微观结构的研究。

2.1 礁灰岩矿物组成

陆源上常见岩石大多数都是由多种矿物的集合体组成,而珊瑚礁灰岩主要由造礁石珊瑚和海洋生物骨骼沉积而成,由于远离大陆、孤立于海洋中,其矿物成分单一,主要为文石和低/高镁方解石,化学成分主要为 CaCO_3 ,含量高达90%以上^[24]。

目前对礁灰岩矿物成分的研究方法主要为X射线衍射分析法(XRD),其原理是利用不同矿物的衍射强度不同确定该岩石的矿物成分及其含量。Gischler等^[25]采用电镜扫描法和XRD分析了大西洋、印度洋和太平洋海域内包括伯利兹、巴哈马、佛罗里达、马尔代夫、法属波利尼西亚、大堡礁等6个地区的钙质沉积物,发现这些沉积物主要由文石和低/高镁方解石组成,结构中存在大量针状文石结晶和块状方解石结晶。唐国艺等^[26]对爪哇地区的礁灰岩进行矿物成分分析,发现该地区礁灰岩中 CaCO_3 含量高达99%。吕晨炜^[27]对中国南海礁灰岩块进行化学成分的定量和定性分析,发现珊瑚骨料的化学成分以 CaCO_3 为主,含量占95%以上。朱长歧等^[28]对海南西沙群岛的石岛、广金岛、永兴岛和三亚鹿回头公园内的砂状生物岩、粗砂状生物灰

岩、砾状生物灰岩、碎屑状生物灰岩4种岩样进行了矿物鉴定,发现4种钙质胶结岩样的矿物成分均主要为文石和高镁方解石,二者含量达95%以上。

由此可见,不论产于何地的珊瑚礁灰岩均属于碳酸盐岩系,其化学成分均主要为 CaCO_3 ,且含量极高,为可溶性岩石。由于矿物成分的特殊性,加上礁灰岩在成岩过程中,深受海水动力条件的影响,极易发生溶蚀现象,在不同层位形成大小不等的孔洞或孔隙,对工程建设十分有害,易发生地基塌陷、潜蚀、渗漏等工程灾害^[29]。

2.2 礁灰岩微观结构及胶结成分

礁灰岩主要是由海洋生物遗骸胶结而成,结构中含大量珊瑚残枝及其他藻类,由于海洋生物的孔洞结构及海水水力侵蚀的溶蚀作用,岩石内存在大量孔隙,其胶结成分主要为方解石、生物微晶及针状文石(图3)。礁灰岩微观结构的研究主要在室内试验方面,通过岩石薄片鉴定和扫描电镜观测,获得礁灰岩岩样的物质成分、胶结模式和生物结晶成分。

商志垒等^[30]对取自南沙群岛西科1井的岩样进行薄片鉴定,分析了该地区的礁滩体系沉积模式,结果表明,西科1井中礁灰岩的主要造礁生物为珊瑚及红藻,在第四系地层中(约20~210 m)主要造礁生物为珊瑚,胶结物类型主要有文石及方解石,岩石内部有大量孔隙发育。唐国艺等^[26]在偏光显微镜下观察了印尼东爪哇某海岛的礁灰岩岩石薄片,发现其主要物质组成为生物碎屑,岩石结晶差且孔洞率较大,岩体内孔隙十分发育。李莎等^[31]选取了马尔代夫地区不同深度的18组珊瑚礁灰岩样品进行岩石切片鉴定,根据岩石的结构、成分、结晶类型等将礁灰岩分为3类——支架型珊瑚礁灰岩、生物胶结礁灰岩及含生屑中晶灰岩,发现不同类型的礁灰岩均主要为方解石结晶,其内部孔洞发育显著,具有明显各向异性。Shen等^[32]分析了中国西沙祁连岛礁灰岩的微观特性,从岩石薄片观察可知,其主要由珊瑚、藻类、生物碎屑、有孔虫等胶结而成,胶结物为针状文石和颗粒状方解石,结构内存在大量孔隙。朱长歧等^[33-34]采用扫描电镜及岩石薄片鉴定2种方法对多个地方的礁灰岩岩样进

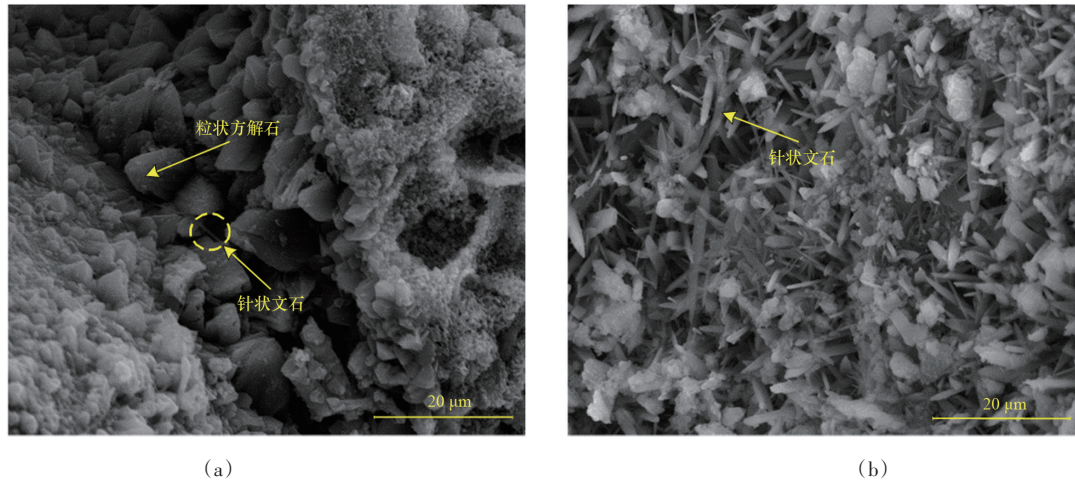


图3 珊瑚礁灰岩扫描电镜图片^[28]

行分析,确定了其胶结成分主要为粒状方解石、生物微晶及针状文石,岩样内存在大量溶蚀孔隙。

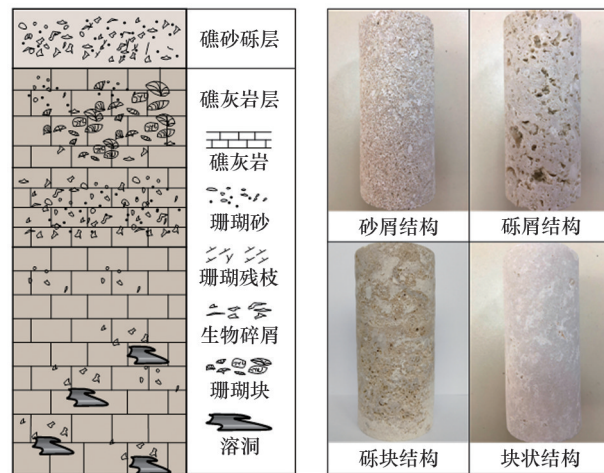
由上述可知,礁灰岩保留了大量原生生物结构,具有多孔隙的特征,导致其密度与其他岩石相比偏小。王国忠^[35]研究认为珊瑚礁灰岩的成岩作用主要有粘结、碎解、微晶化、内沉积、新生变形作用、胶结作用及白云石化作用等,其中主要是胶结作用使沉积物石化成岩。朱长歧等^[28]根据礁灰岩样受拉时劈裂面特征分析,针对单轴抗拉强度代表试样,分析了胶结度、密度、孔隙率与强度的关系,表明胶结度是控制强度的关键参数。由此可见胶结作用对于礁灰岩的重要性,但大部分礁灰岩中胶结作用较弱,因此强度普遍较低;并且礁灰岩胶结物主要成分为CaCO₃,在海水侵蚀作用下易产生溶蚀孔洞,从而导致其结构各向异性特征突出,具有特殊的物理力学特性。目前,对礁灰岩的微观结构及胶结情况的系统研究较少,且未能将其与宏观特性结合分析,今后应加强此方面的研究。

体中交替夹杂着一些未胶结的松散生物碎屑;由于海水侵蚀作用,岩体中可见溶洞发育。珊瑚礁体及礁灰岩岩芯样品如图4所示,礁灰岩存在于珊瑚礁体下部,故大部分礁灰岩的研究样品来源于珊瑚礁体钻孔取芯;岩芯样品具有不均质性,呈多种结构,大部分呈灰色、灰白色,有少量黄色杂质,结构内部存在大量孔隙。

3 礁灰岩的物理力学特性

3.1 礁灰岩样品及试验方法

珊瑚礁灰岩发育于海洋环境,礁体存在明显的分层,通常表层由未胶结成岩的松散礁砂砾沉积组成,主要成分包括生物砂屑、珊瑚残枝、珊瑚块等,沉积厚度可达10余米;下层为胶结的礁灰岩^[36],岩



(a) 珊瑚礁礁体示意

(b) 礁灰岩岩芯样品

图4 珊瑚礁礁体及礁灰岩岩芯样品

由于珊瑚礁所处地理位置特殊、礁灰岩沉积物样品采取难度大、成本高昂,现阶段对礁灰岩的研究仍停留在初级阶段,一般主要对其密度、孔隙度、渗透率、波速等相关物理参数进行测量。其力学性质的相关研究则集中在静力学方面,研究者对礁灰

岩的单轴抗压强度、抗拉强度及三轴压缩的应力-应变关系进行了相关研究,研究内容和方法均比较常规。目前,有关动力学方面的研究较少,孟庆山等^[37]采用霍普金森压杆系统对礁灰岩进行了单轴冲击试验,结果表明礁灰岩的动力学特性与一般的陆源岩石不同。

3.2 礁灰岩基本物理参数

表征礁灰岩物理特性的参数主要有密度、孔隙度、渗透系数、P波速度等。由表1^[38-48]可知,礁灰岩的不均质性明显,不同结构礁灰岩的物理性质相差较大,各项参数值之间跨度均比较大,例如,礁灰岩

的饱和密度约为 $1.12\sim 3.07\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,孔隙度约为 $1.68\%\sim 53.78\%$,渗透率和含水率都比较大。

由于礁灰岩的成因特殊,其物理性质与其他常见岩石的区别也非常明显。礁灰岩的密度、孔隙度、P波波速与常规岩石的对比结果如图5所示。礁灰岩密度及纵波波速整体值均较小,孔隙度较大,这与其疏松多孔的结构特征相符合。而且,礁灰岩的不均匀特性明显,其物理性质与岩石结构、岩性、岩化程度等因素相关,研究时应针对不同的结构区别对待。

表1 礁灰岩基本物理参数

取样点	结构类型	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)			含水率/%	孔隙度/%	渗透系数/ ($10^{-5}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	P波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	参考文献
		天然密度	干燥密度	饱和密度					
南沙永暑礁	块状结构	—	—	—	—	6.42~7.19	—	4242~5418	孙宗勋等 ^[38]
	砾块结构	—	—	—	—	29.02	—	3818, 5197	
	砾屑结构	—	—	—	—	23.68	—	4433, 5234	
	砂屑结构	—	—	—	—	1.86~8.32	—	4034~5218	
	包粒结构	—	—	—	—	—	—	4909~5129	
南沙群岛	—	1.11~1.72	—	1.63~2.07	2~25	45~55	—	2780~3693	王新志等 ^[39]
巴哈马	—	—	—	2.37~2.47	—	—	—	—	严与平等 ^[24]
沙特吉达	—	—	1.2~2.0	—	2.5	—	—	—	白晓宇等 ^[40]
沙特红海	—	—	1.2~2.0	—	0.2~13.2	—	4400~11900*	1201~2173	刘志伟等 ^[41-42]
西沙群岛	块状结构	1.33~2.17	—	—	0.5~2.2	18.36~53.78	462~541	—	朱长歧等 ^[28, 33]
	碎屑结构								
爪哇岛	碎屑结构	1.33~2.56	—	—	—	—	22500*	1535~1763	吕晨炜 ^[27]
西沙群岛	—	1.12~3.08	1.11~2.92	1.12~3.07	—	5.81~36.33	—	2311~4230	杨永康等 ^[43]
巴哈马	—	1.5~2.1	—	—	—	—	42.8~255	—	任世锋等 ^[44]
马尔代夫	—	—	—	—	—	23~35	—	—	卢超健等 ^[45]
	—	—	1.5~2.14	1.85~2.55	—	10~47	—	2567~4650	李莎等 ^[31]
瓦努阿图	—	—	1.67~2.03	—	—	—	—	1477~1576	李志勇等 ^[46]
马尔代夫	块状结构	—	1.39~2.09	1.86~2.26	—	21.2~47.7	—	4121~4756	刘海峰 ^[47]
	砾屑结构	—	1.71~2.37	1.98~2.55	—	10.5~35.4	—	3432~4890	
	砂屑结构	—	1.89~2.08	2.05~2.27	—	21.4~28.8	—	4032~4803	
	珊瑚格架	—	1.78~2.36	2.01~2.45	—	11.0~32.9	—	3019~5085	
马累岛	—	—	1.43~2.27	1.81~2.61	13~20	30~49	—	2359~3364	肖向阳等 ^[48]

注:*为现场数据。

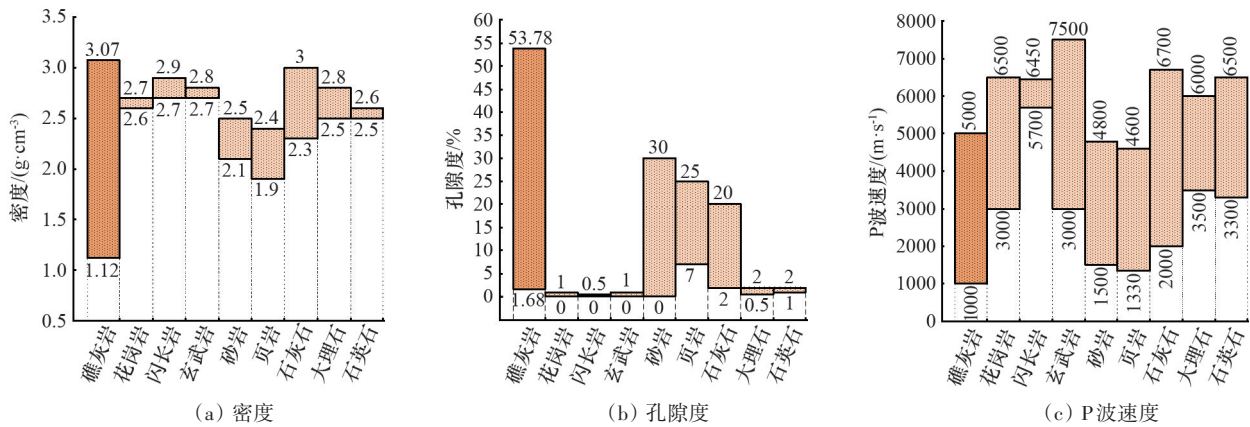


图5 礁灰岩与常见岩石物理参数对比

3.3 礁灰岩静力学特性

3.3.1 礁灰岩强度

岩石抵抗外力破坏的能力称为岩石的强度,由于受力状态不同,岩石的强度可分为单轴抗压强度、单轴抗拉强度和三轴压缩强度等。

肖向阳等^[48]、杨永康等^[43]、唐国艺等^[26]分别对马尔代夫、中国西沙群岛、印度爪哇岛的礁灰岩开展了干燥和饱和状态下的单轴抗压强度试验,结果如表2所示,礁灰岩的干燥单轴抗压强度为1.07~38.56 MPa,分布范围较广,数值总体偏低,按饱和单轴抗压强度分类属于极软岩或软岩。对礁灰岩

抗拉强度的试验主要采用巴西劈裂法,其强度值如表3所示,礁灰岩的干燥抗拉强度为0.64~2.65 MPa,饱和抗拉强度为0.46~4.4 MPa。有关珊瑚礁灰岩室内三轴压缩强度的研究较少,仅有少数学者在此方面做了一些探索。Carter等^[52]研究了澳大利亚西北大陆架上North Rankin A石油平台的礁灰岩在不同应力条件下的强度,结果显示,礁灰岩的峰值强度与其干密度和胶结度有一定关系,且强度分布不均匀,试验结果离散性高。

表2 礁灰岩单轴抗压强度

取样地点	单轴抗压强度/MPa		参考文献
	干燥	饱和	
中国西沙群岛	2.02~19.4	1.87~18.57	Zhu等 ^[33]
马累岛	—	4.9~26.3	刘海峰 ^[47]
	1.07~29.27	1.1~33.18	肖向阳等 ^[48]
某跨海大桥	—	2.8~10.73	万志辉等 ^[49]
马尔代夫	—	8.07	李莎等 ^[31]
沙特拉比格	—	1.0~17.2	刘志伟等 ^[41]
瓦努阿图共和国	—	26~48	李志勇等 ^[46]
巴哈马	—	10.5~29.1	严与平等 ^[24]
西沙群岛	1.82~27.42	0.86~18.94	杨永康等 ^[43]
巴哈马	2.5~22	1.5~17.4	任世锋等 ^[44]
印尼爪哇岛	1.1~38.56	1.57~22.79	唐国艺等 ^[26]
非洲吉布提	—	1.33~2.86	
中国南海	—	5.0~7.4	赵小波等 ^[50]
中国渚碧礁	7.95~10.78	5.04~7.21	

表3 礁灰岩抗拉强度

取样地点	单轴抗拉强度/MPa		参考文献
	干燥	饱和	
中国西沙群岛	0.64~2.52	0.46~2.06	Zhu等 ^[33]
马累岛	1.71~2.65	1.58~2.54	肖向阳等 ^[48]
马尔代夫	2.36	2.36	李莎等 ^[31]
中国渚碧礁	0.94~1.76	0.88~1.56	王新志 ^[51]
马尔代夫	—	0.8~4.4	刘海峰 ^[47]

将礁灰岩与其他常见岩石的强度进行对比如图6所示,礁灰岩的强度值相对较小,与其密度小、孔隙度大的物理性质相符。李莎等^[31]、刘海峰等^[47]将礁灰岩的抗压强度与抗拉强度相比,得到比值分别为4.0和5.2,远远小于常见陆源岩石抗压强度与抗拉强度的比值(9~11)。由此可见,礁灰岩无论是抗压还是抗拉特性都有其特殊性,现有对常见岩石的研究结果并不适用于礁灰岩,应加大其研究力度,以便服务于珊瑚礁工程地质的相关工作。

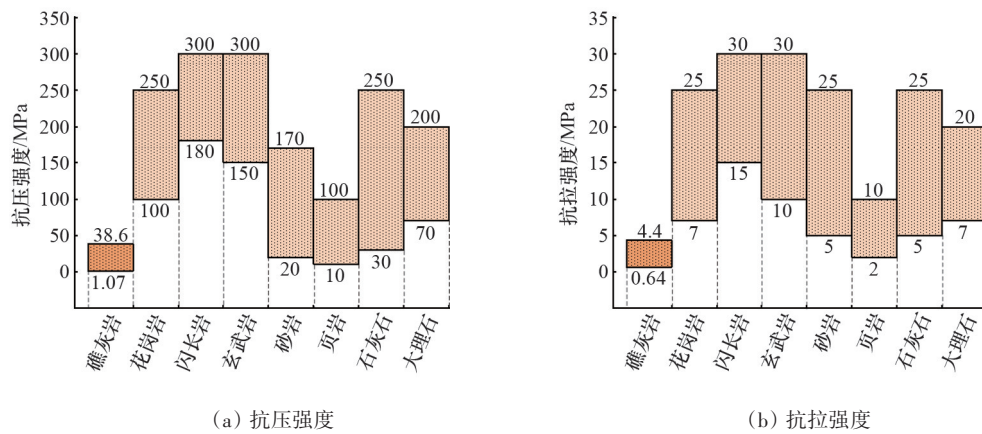


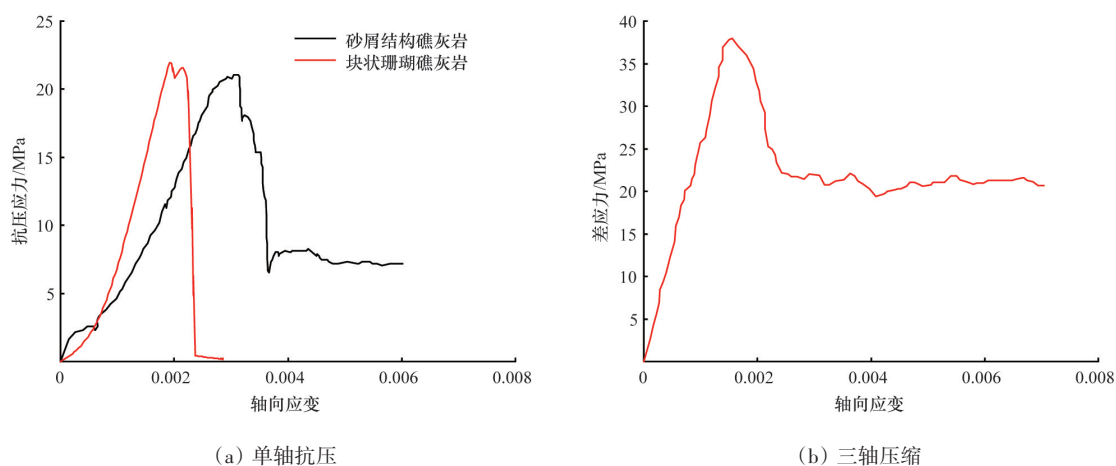
图6 礁灰岩与常见岩石强度对比

3.3.2 礁灰岩应力-应变特征

王新志^[51]、任世锋等^[44]对礁灰岩的单轴压缩应力-应变特性进行研究,发现礁灰岩没有压密段,初期为弹性变形,在应变极小时应力迅速达到峰值发生破坏,但仍具有较高的残余强度,并且礁灰岩的破坏属于张拉破坏,破裂面沿珊瑚生长线或胶结较弱处展开。Zhu等^[33]、刘海峰等^[47]通过不同结构礁灰岩饱和样品的单轴压缩试验发现,不同孔隙度、结构类型的礁灰岩有不同的应力响应,岩芯致密的礁灰岩表现出脆性破坏特征,峰后残余强度几乎为零;而孔隙度较高的礁灰岩随着应力的增加,孔隙被压密,峰值破坏后变形调整,具有较高的残余强度(图7(a))。Lagioia等^[53]认为礁灰岩受各向

同性三轴压缩时的应力状态分为3个阶段:初始弹性阶段、应力不变破坏拓展阶段、颗粒破碎体积应变增加阶段。刘海峰^[47]、王新志^[51]认为三轴压缩加载初期时,礁灰岩的变形以弹性为主,在轴向应变很小便发生脆性破坏,破坏后岩石有较高的残余强度(图7(b))。另外,不同结构类型礁灰岩的剪切强度不同,其粘聚力和内摩擦角的大小也有所差异。

由此可见,礁灰岩虽然属于软岩,抗压强度低,但又与一般的软岩性质不同。并且,不同结构的礁灰岩所表现的应力-应变特征也区别明显,因此,今后的研究中应将不同结构礁灰岩进行区分研究。

图7 饱和礁灰岩应力-应变曲线^[47]

4 礁灰岩的工程性质

珊瑚礁岛的工程建设历史悠久,早在20世纪就有在珊瑚礁上建设工程的实例,随着海底石油、天然气、可燃冰等海洋资源开发的兴起,珊瑚礁工程建设更是蓬勃发展。目前,国内外已有许多工程建于珊瑚礁之上,工程规模越来越大也越来越复

杂。由于礁灰岩特殊的地质情况(地层分布不均且存在许多溶蚀孔洞)以及礁灰岩特殊的物理力学性质,使得珊瑚礁工程在建设及使用过程中出现了许多问题,一些代表性的珊瑚礁工程及问题,如表4所示。

由表4可知,在已完工的珊瑚礁工程中,承载

表4 典型珊瑚礁工程及问题

基础类型	地区	珊瑚礁工程	时间	工程问题
桩基础	伊朗	Lavan 石油平台建设	1986	施工时出现掉桩,桩自由下落约 15 m ^[3]
桩基础	澳大利亚	North Rankin A 石油天然气平台	1972—1987	施工时打入式的开口桩承载力远低于设计值 ^[54]
浅基础	中国	西沙永兴岛港池防波堤	1995	地基受海浪潜蚀,渗流破坏;防波堤多处开裂、塌陷、下沉 ^[55]
加固地基	苏丹	苏丹港新集装箱码头	2006—2009	部分地区有淤泥夹层或者混层,承载力差;珊瑚砂颗粒级配不均匀,碾压效果差 ^[56]
加固地基		RSGT 码头	2008—2009	天然地基承载力较小 ^[57]
自然地基或加固地基	沙特	沙特拉比格 2×660MW 燃煤电站	2009—2013	礁灰岩内孔隙及裂隙发育良好且连通性好,施工降水难度大;礁灰岩地基存在较大的不均匀性,薄弱部位易造成基础塌陷和不均匀沉降 ^[42]
天然地基 独立基础或 条形基础	瓦努阿图	瓦努阿图太平洋小型运动会体育场馆 瓦努阿图共和国国际会议中心 瓦努阿图马拉坡学校改扩建项目	2016—2017	钻探易导致礁灰岩岩芯破碎和漏浆问题;在孔洞处易发生局部破坏,导致不均匀沉降 ^[46]
桩基础	马尔代夫	马尔代夫跨海大桥	2015—2018	场地内的礁灰岩为软岩,部分为极软岩,具有强度各向异性及低应变下易破碎;礁灰岩地层内有大量溶蚀孔洞,桩基基础和承载力难以确定 ^[45]

力要求低的建筑多采用浅基础,通常将加固后的珊瑚砂屑或风化礁灰岩作为持力层;较大型的建筑则要求将承载力较高的礁灰岩层作为持力层,多采用桩基础。礁灰岩层中溶蚀孔洞的存在使珊瑚礁工程施工过程中容易产生掉桩现象,且在孔洞处易发生局部破坏,带来不均匀沉降。礁灰岩的强度低、易破碎,其特殊的物理力学特性导致其桩基及地基承载力按已有规范估算时远低于设计值,难以确定。

4.1 礁灰岩地基承载力

对珊瑚礁灰岩地基承载力的研究,主要是为研究珊瑚礁工程建设中地基沉降与变形的问题,珊瑚礁灰岩的地基承载力主要由现场原位测试确定,测

试手段有标准贯入、重力触探、平板荷载试验等。

单华刚等^[58]对南沙群岛永暑礁采用了标准贯入试验,结果表明珊瑚礁地层标贯值离散性大(1~100),基础承载力标准值为 250 kPa。白晓宇等^[40]对沙特某电厂珊瑚、珊瑚碎屑岩和珊瑚状石灰岩互层地层进行了标准贯入试验,得到 927 个样本的锤击数范围为 8~136,变异系数为 0.53,由标准贯入值确定的承载力为 250~400 kPa。同样,赵晓波等^[50]对不同胶结程度的珊瑚礁灰岩层开展标准贯入和动力触探试验,结果离散性较大。余强等^[59]对西沙琛航岛东岸的珊瑚礁灰岩碎石土分 3 层进行了重型动力触探试验,得到平均锤击数分别为 $N_{63.5}$ = 15.9、6.1、4,计算得到的地基承载力分别为 240、

180、130 kPa。由此可知,珊瑚礁地基岩土结构组成和密度在空间上分布不均匀,采用标准贯入试验的地基承载力测算结果离散性较大。通常,珊瑚礁工程中采用静载荷试验确定其地基承载力和变形的特征。唐国艺等^[26]对印度尼西亚东爪哇岛某工程场地的上部半成岩钙质土进行了5组平板荷载试验,结果表明表层钙质岩土地基承载力不高,约为250 kPa,只能够满足荷载和沉降要求不大的建筑物。刘志伟等^[42]在沙特拉比格电站项目的建设,分别选取了3个点的珊瑚礁灰岩地基进行载荷试验,结果表明礁灰岩的地基承载力相对较高,约为310 kPa,变形模量为22 MPa,其中2个点卸载后回弹值大,而另1个点回弹值小,证明礁灰岩层的不均性明显。

综上所述,礁灰岩层不均匀性明显,按传统的承载力计算方法不易确定其地基承载力,如何改进测试方法和计算模型仍是珊瑚礁工程建设中亟需解决的重要问题。

4.2 礁灰岩桩基础

桩基础具有承载力相对较高、沉降量较小的优点,随着珊瑚礁工程规模逐渐扩大,桩基形式被广泛应用到珊瑚礁工程建设中。但由于珊瑚礁岩土的特殊力学特性,按原有经验进行桩基设计并不符合其沉降规律,会引发一些工程事故。鉴于此,研究者开始对珊瑚礁的桩基开展了一系列的研究,目前对珊瑚礁桩基的研究主要集中在上覆钙质砂层,对桩基在钙质砂层的应用和影响桩基承载力因素进行了一些探讨^[60-63],但对于礁灰岩桩的应用研究较少。部分研究者开展了一些礁灰岩的现场试桩试验,肖向阳等^[48]根据试桩试验测定桩基的极限侧阻力,结果表明礁灰岩桩基可达到的实测最大侧阻力比地质勘探所提供结果大5~7倍;卢超健等^[45]对礁灰岩地层桩的侧摩阻力进行测试,结果表明礁灰岩桩侧残余摩阻力较高,平均为1091.2 kPa,其大小随围压增加而增加,且与其单轴抗压强度相关。由于现场试桩成本高、操作较复杂,刘海峰等^[34]开展了不同结构礁灰岩镶嵌桩的模型试验,分别研究礁灰岩层围压和强度对桩侧摩阻力的影响规律,估算了不同礁灰岩嵌岩桩的极限侧摩阻力标准值。

珊瑚礁工程建设规模将越来越大,桩基础在礁灰岩地层中的运用也将越来越普遍,对礁灰岩层桩基性质的研究应进一步加强。

4.3 珊瑚混凝土

混凝土是工程建设中常备建筑材料,常规混凝土骨料一般为陆源石英砂和碎石,采用淡水拌和。珊瑚礁岛远离大陆,建筑材料短缺,为解决该问题研究者尝试用珊瑚材料拌和混凝土,并且对拌合材料的选择、混凝土的力学性质、耐久性和微观结构等方面进行了研究。

珊瑚混凝土中一般将破碎的礁灰岩块用作粗骨料,珊瑚砂作细骨料,用海水拌和。郭超^[64]用礁灰岩碎块、珊瑚砂、硅酸盐水泥及减水剂拌和了强度为C30的珊瑚混凝土,并分析了其基本力学性质和温缩性质,结果表明珊瑚混凝土的强度较低,珊瑚骨料的强度决定混凝土强度。为提高珊瑚混凝土的张拉强度,部分研究者开展了对加筋珊瑚混凝土的研究,将耐海水腐蚀的纤维材料(碳纤维、剑麻纤维、聚丙烯纤维等)加入珊瑚混凝土中,取得了较好的效果^[65-67]。鉴于海洋环境对混凝土材料具有腐蚀性,研究者开展了珊瑚混凝土耐久性和腐蚀性的室内和现场试验,通过对比不同水泥品种对混凝土强度和耐久性的影响研究,得出使用硅酸水泥效果较好^[68-69]。

目前对珊瑚混凝土的研究多局限于室内试验,对于现场工程实际运用的研究比较少,应加强珊瑚混凝土应用技术及现场环境下珊瑚混凝土强度和耐久性的研究。

5 海洋环境对礁灰岩的化学作用

珊瑚礁灰岩属于方解石含量极高的碳酸盐岩。朱立军等^[70]认为,碳酸盐岩中方解石表面的化学反应机理代表了岩溶作用过程中最本质的特征。由此可推断,礁灰岩在海水、降雨及岛礁地下水入渗的作用下将会发生化学侵蚀,其长期性能会受海洋环境的影响。

工业革命以来,大规模化石能源的开发利用导致大气中CO₂气体排放大幅增加,其中有30%被海洋吸收^[71],导致海水pH下降。据Caldeira、Wick-

ett^[72]估算,至3000年时,海水表面的pH值将降低0.7左右。过量的CO₂浓度将改变海水化学系统,打破原有的碳酸盐平衡体系,海水中CO₂分压的升高将使海水中碳酸根离子浓度[CO₃²⁻]下降,而海水中钙离子浓度[Ca²⁺]相对稳定^[73],将导致碳酸盐饱和度下降,碳酸钙溶解率上升。已有研究表明,海水酸化可使珊瑚骨骼变脆、易碎^[74]。孙杰等^[75]认为由于海洋环境的恶化,珊瑚礁海岸的侵蚀作用加强。Drupp^[76]基于对夏威夷海岸处钙质砂孔隙水的现场调查及分析发现,海洋酸化将会提高由镁方解石和文石组成的生物及非生物碳酸盐的溶解速率。

大量研究表明,碳酸盐岩体系极易在酸性水溶液中发生反应,使得其物理力学性质发生改变^[77]。Madland等^[78]比较了有无CO₂作用的高孔隙度饱和白垩岩的受力特性,结果表明,CO₂的存在使得白垩岩样品溶蚀作用增强,强度降低。Guen等^[79]往砂岩和石灰岩中注入含CO₂流体,证实了向地层注入CO₂将对水岩系统的物理和化学演化产生重要影响,低pH值的流体会溶解并扩大已存在裂缝系统,使得地层渗透率增加。Grgic^[80]研究了CO₂对鲕状灰岩长期化学-力学行为的影响。Clark等^[81]研究了不同岩相的碳酸岩在注入含CO₂盐水条件下的化学反应,结果表明不同岩相碳酸岩在微观结构、波速、变形等方面改变不同,并且改变的主要原因来源于化学作用。

综上所述,处在海洋环境中的珊瑚礁灰岩的物理力学性质将会受到海洋水化学的作用影响,并且随着海洋酸化的加剧,形势将更加严峻。因此,应加强对礁灰岩的水岩反应方面的研究。

6 结论

珊瑚礁灰岩广泛分布于全球临海地区,在海洋开发中占有重要的战略地位。由于成岩环境特殊,礁灰岩组成成分单一(CaCO₃含量高达90%以上),具有高孔隙、低密度、低强度的物理力学性质。作为一种特殊的岩土材料,礁灰岩受力特性与其他常规软岩及脆性岩石均不相同。因此,开展礁灰岩的物理力学特性研究,不仅可以丰富岩石物理力学理论,同时也有利于“海上丝绸之路”的岛礁建设的推

进。

鉴于目前对礁灰岩的研究较少,未来应加大对其研究力度,建议从以下3个方面开展深入研究。

1) 不同结构类型礁灰岩的物理力学性质研究。礁灰岩的密度、孔隙度、波速等物理性质均与其结构类型息息相关,不同结构的礁灰岩受力时的应力-应变响应也有区别。然而,以往的研究很少将不同结构类型的礁灰岩区别对待,使得研究结果杂乱不易总结。

2) 礁灰岩的微观胶结机理研究。礁灰岩的胶结程度是影响其强度的关键因素,礁灰岩破坏经常于胶结及孔隙处,目前对礁灰岩微观结构的研究仅停留于其胶结成分和岩溶孔隙类型等,对于胶结形成的内在机理以及胶结的微观形态对岩石宏观力学性质的影响均需进一步的研究。

3) 海水侵蚀作用对礁灰岩物理力学性质的影响。珊瑚礁灰岩处于复杂的海洋环境中,海水的侵蚀作用对礁灰岩物理力学性质有较大影响,并且礁灰岩的碳酸钙含量极高,其溶蚀作用对礁灰岩物理力学性质也有较大影响。近年来CO₂浓度过高带来的海洋酸化问题已经不容忽视^[82-83],可能加剧海水对礁灰岩的影响,应纳入研究范围,更加全面地考虑珊瑚岛礁的建设问题。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 朱袁智, 沙庆安, 郭丽芬. 南沙群岛永暑礁新生代珊瑚礁地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [3] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] 甘玉青, 肖传桃, 张斌. 国内外生物礁油气勘探现状与我国南海生物礁油气勘探前景[J]. 海相油气地质, 2009, 14(1): 16-20.
- [5] 余克服, 张光学, 汪稔. 南海珊瑚礁: 从全球变化到油气勘探第三届地球系统科学大会专题评述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1287-1293.
- [6] 李国选, 严双伍. “21世纪海上丝绸之路”倡议推进下的中国南海岛礁建设[J]. 当代世界与社会主义, 2018, 2(2): 156-162.
- [7] 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): 4-7.
- [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.
- [9] Carter J P, Airey D W, Fahey M. A review of laboratory testing of calcareous soils[C]//Proceedings of the second international conference on engineering for calcareous sediments. Rotterdam: Balkema Publishers, 1999: 401-432.
- [10] Bonney T G. The Structure and Distribution of Coral Reefs[J]. Nature, 1889, 40: 222.
- [11] Beger M, Sommer B, Harrison P L, et al. Conserving potential coral reef refuges at high latitudes[J]. Diversity and Distributions, 2014, 20(3): 245-257.
- [12] 孙金龙, 徐辉龙. 中国的海滩岩研究与进展[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2): 103-108.
- [13] 张乔民, 余克服, 施祺, 等. 中国珊瑚礁分布和资源特点[C]//2006中国科协年会论文集. 北京: 中国科学技术协会, 2006: 4320-4324.
- [14] 罗祖虞. 碳酸盐岩的生物化学成因及岩石分类[J]. 石油实验地质, 1981, 3(1): 13-22.
- [15] 张园园, 王建坡, 马俊业, 等. 礁滩分类以及在岩芯中的识别[J]. 古生物学报, 2009, 48(1): 89-101.
- [16] Fookes P G, Higginbottom I E. The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes[J]. Géotechnique, 1975, 25(2): 406-411.
- [17] Clark A R, Walker B F. A proposed scheme for the classification and nomenclature for use in the engineering description on Middle Eastern sedimentary rocks[J]. Géotechnique, 1977, 27(1): 93-99.
- [18] 朱长歧, 汪稔. 生物碳酸盐类沉积物的工程分类[J]. 土工基础, 1998, 12(4): 37-42.
- [19] 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.
- [20] Anselmetti F S, Luthi S, Eberli G P. Quantitative characterisation of carbonate pore systems by digital image analysis[J]. AAPG Bulletin, 1988, 82(10): 1815-1836.
- [21] Lindqvist J E, Åkesson U, Malaga K. Microstructure and functional properties of rock materials[J]. Materials Characterization, 2007, 58(11): 1183-1188.
- [22] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 14-18.
- [23] 赵斌, 王芝银, 伍锦鹏. 矿物成分和细观结构与岩石材料力学性质的关系[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 59-63.
- [24] 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(Suppl 2): 47-49.
- [25] Gischler E, Dietrich S, Harris D, et al. A comparative study of modern carbonate mud in reefs and carbonate platforms: Mostly biogenic, some precipitated[J]. Sedimentary Geology, 2013, 292: 36-55.
- [26] 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.
- [27] 吕晨炜. 水泥-乳化沥青固化礁砂路用性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [28] 朱长歧, 周斌, 刘海峰. 天然胶结钙质土强度及微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1655-1663.
- [29] 詹文欢, 孙宗勋, 张乔民, 等. 南沙群岛海区珊瑚礁灾害性地质分析[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 58-65.
- [30] 商志垒, 孙志鹏, 解习农, 等. 南海西科1井上新世以来礁滩体系内部构成及其沉积模式[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(4): 697-710.
- [31] 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.
- [32] Shen J W, Wang Y, Zhao N, et al. Carbonate sedimentary characteristics of the beach rocks around Qilian Islets and Cays, Xisha Islands: Implication for coral reef development and decline[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 474: 264-278.
- [33] Zhu C Q, Liu H F, Zhou B. Micro-structures and the basic engineering properties of beach calcarenites in South China Sea[J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 224-235.
- [34] 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.
- [35] 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [36] Zhu C Q, Qin Y, Meng Q S, et al. Formation and sedimentary evolution characteristics of Yongshu Atoll in the South China Sea Islands[J]. Ocean Engineering, 2014, 84: 61-66.
- [37] 孟庆山, 范超, 曾卫星, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 183-190.
- [38] 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): 79-84.
- [39] 王新志, 汪稔, 孟庆山. 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.
- [40] 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, 38(11): 21-25, 31.
- [41] 刘志伟, 李灿, 胡昕. 珊瑚礁礁灰岩工程特性测试研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(9): 17-21.
- [42] 刘志伟, 杨生彬, 程东幸, 等. 沙特拉比格2×660 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.
- [43] 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.
- [44] 任世锋, 席文熙, 曹中兴. 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.
- [45] 卢超健, 罗辉. 马累-机场岛跨海大桥建设场地工程地质特性及评价[J]. 工程建设与设计, 2016, 5: 71-74.
- [46] 李志勇, 王维理. 珊瑚礁地区工程地质特征[C]//2016年全国工程勘察学术大会论文集. 北京: 中国建筑学会工程勘察分会, 2016: 260-264.
- [47] 刘海峰. 礁灰岩的工程地质特性及其嵌岩桩的竖向承载力试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [48] 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.
- [49] 万志辉, 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.
- [50] 赵小波, 胡建华. 珊瑚礁地层工程勘察实例及探讨[J]. 工程建设与设计, 2016, 2: 64-67, 71.
- [51] 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]. 北京: 中国科学院大学, 2008.
- [52] Carter J P, Johnston I W, Fahey M, et al. Triaxial testing of North Rankin calcarenite[C]//Proceeding of the international conference on calcareous sediments, Perth, Australia. Rotterdam: Balkema Publishers, 1988: 515-530.
- [53] Lagioia R, Nova R. An experimental and theoretical study of the behaviour of a calcarenite in triaxial compression[J]. Géotechnique, 1995, 45(4): 633-648.
- [54] King R, Lodge M. North West Shelf development——The foundation engineering challenge[C]//Proceeding of the International Conference on Calcareous Sediments, Perth, Australia. Rotterdam: Balkema Publishers, 1988: 555-564.
- [55] 朱长歧. 西沙永兴岛码头渗透变形的工程地质分析[C]//中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会第四届地基处理学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1995: 677-679.
- [56] 袁求武, 关泽潮, 文晓雅. 珊瑚料基层施工技术在某港口工程中的应用[J]. 施工技术, 2012, 41(7): 21-23+37.
- [57] 贺迎喜, 董志良, 王伟智, 等. 沙特 RSGT 码头项目吹填珊瑚礁地基加固处理[J]. 水运工程, 2010, 10: 100-104.
- [58] 单华刚, 汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 299-304.
- [59] 余强, 姜振春. 西沙琛航岛礁工程地质特征[J]. 土工基础, 2013, 27(10): 115-117.
- [60] Lee C Y, Poulos H G. Tests on model instrumented grouted piles in offshore calcareous soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(11): 1738-1753.
- [61] Zhang C, Nguyen G D, Einav I. The end-bearing capacity of piles penetrating into crushable soils[J]. Géotechnique, 2013, 63(5): 341-354.
- [62] 刘崇权, 单华刚, 汪稔, 等. 钙质土工程特性及其桩基工程[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 331-331.
- [63] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1714-1720.
- [64] 郭超. 南海岛礁珊瑚集料混凝土工程性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [65] 王磊, 刘存鹏, 熊祖菁. 剑麻纤维增强珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 826-830.
- [66] Yang S, Yang C, Huang M, et al. Study on bond performance between FRP bars and seawater coral aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 272-288.
- [67] Liu J, Ou Z, Peng W, et al. Literature review of coral concrete[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(4): 1529-1541.
- [68] Chen C, Ji T, Zhuang Y, et al. Workability, mechanical properties and affinity of artificial reef concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 227-236.
- [69] 林伟才. 海水拌制珊瑚礁砂混凝土的特性及工程应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [70] 朱立军, 李景阳. 岩溶环境中岩-土界面方解石的表面化学特征及其反应机理[J]. 中国岩溶, 1997, 1: 20-24.
- [71] Feely R A, Sabine C L, Lee K, et al. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans[J]. Science, 2004, 305(5682): 362-366.
- [72] Caldeira K, Wickett M E. Anthropogenic carbon and ocean pH[J]. Nature, 2003, 425: 365.
- [73] Langdon C, Broecker W S, Hammond D E, et al. Effect of elevated CO₂ on the community metabolism of an experimental coral reef[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(1): 11-1.
- [74] Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms[J]. Nature, 2005, 437

- (7059): 681–686.
- [75] 孙杰, 詹文欢, 姚衍桃, 等. 广东省海岸侵蚀现状及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 142–152.
- [76] Drupp P S, De Carlo E H, Mackenzie F T. Porewater CO₂-carbonic acid system chemistry in permeable carbonate reef sands[J]. *Marine Chemistry*, 2016, 185: 48–46.
- [77] Gouze P, Luquot L. X-ray microtomography characterization of porosity, permeability and reactive surface changes during dissolution[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2011, 120: 45–55.
- [78] Madland M V, Finsnes A, Alkafadgi A, et al. The influence of CO₂ gas and carbonate water on the mechanical stability of chalk[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 51(4): 149–168.
- [79] Guen Y L, Renard F, Hellmann R, et al. Enhanced de-formation of limestone and sandstone in the presence of high fluids[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 112(B5): B05421.
- [80] Grgic D. Influence of CO₂ on the long-term chemomechanical behavior of oolitic limestone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B7): B07201.
- [81] Clark A C, Vanorio T. The rock physics and geochemistry of carbonates exposed to reactive brines[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3): 1497–1513.
- [82] Albright R, Takeshita Y, Koweek D A, et al. Carbon dioxide addition to coral reef waters suppresses net community calcification[J]. *Nature*, 2018, 555: 516.
- [83] Pandolfi J M, Connolly S R, Marshall D J, et al. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification[J]. *Science*, 2011, 333(6041): 418–422.

Physical and engineering characteristics of reef limestone: A review

ZHONG Yu^{1,2}, WANG Ren^{1,2}, LI Qi^{2,3*}, WEI Houzhen^{2,3}, LI Xiaying^{2,3}

1. College of Civil Engineering and Architecture, 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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The reef limestone is the main part of the coral reef rock mass. Its physical and engineering characteristics are important issues in the ocean construction, which concerns directly with the development process of "the 21st-Century Maritime Silk Road" infrastructure. This paper reviews the studies of the coral reef limestones in different regions in recent decades, it is found that they have physical properties of high porosity, low density and low strength, with complex diversity of structure types due to their complex sedimentary environment and with different stress responses for different degrees of cementation. These properties are distinct from those of other continental and marine sedimentary rocks. So far, the studies of coral reef limestones are few and many problems are emerging along with the coral reef engineering constructions. Therefore, the studies of these aspects are highly desirable. The coral reef limestones should be classified by texture and structure types before a systematic study. The microscopic cementation mechanism, the engineering mechanical characteristics and the effect of seawater erosion are important topics in further studies of coral reef limestones.

Keywords reef limestone; physical characteristics; engineering characteristics; coral reef; ocean development construction ●



(责任编辑 韩星明)