

南沙群岛珊瑚礁礁灰岩力学特性研究

王新志^{1,2}, 汪 稔¹, 孟庆山¹, 陈剑文¹

(1. 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, 湖北 武汉 430071;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 对取自南沙群岛永暑礁和渚碧礁的礁灰岩的物理性质和力学性质进行测试, 包括声波测试、单轴抗拉强度试验、单轴抗压强度试验和三轴压缩强度试验。试验结果表明, 礁灰岩具有较高的孔隙率, 远远大于其他岩石, 其纵波波速为 2 700~3 700 m/s, 并随着孔隙率的增大线性减小; 礁灰岩的软化性较弱, 干燥抗拉强度和饱和抗拉强度相差不大; 礁灰岩的破坏形态表明其具有脆性岩石的特点, 但又与花岗岩等脆性岩石有本质的区别。在破坏时并不像其他脆性岩石一样具有单一破裂面, 而是沿着珊瑚生长线同时出现多个破裂面, 并保持较高的残余强度, 礁灰岩的这种破坏模式是由其特殊的岩体结构决定的。

关键词: 岩石力学; 南沙群岛; 珊瑚礁; 礁灰岩; 三轴压缩试验; 声波测试; 孔隙率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)11 - 2221 - 06

RESEARCH ON CHARACTERISTICS OF CORAL REEF CALCAREOUS ROCK IN NANSHA ISLANDS

WANG Xinzhi^{1,2}, WANG Ren¹, MENG Qingshan¹, CHEN Jianwen¹

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;* 2. *China Communications Planning and Design Institute for Water Transportation, Beijing 100007, China*)

Abstract: Mechanical properties of calcareous rock become one of the new research issues in geotechnical engineering while embarking upon ocean resources exploitation and marine works construction. Physico-mechanical properties of calcareous rock samples, which are taken from Yongshu and Zhubi coral reefs in Nansha Islands in South China Sea, are tested. The tests include ultrasonic wave test, uniaxial tensile strength test, uniaxial compression strength test, and triaxial compression strength test. The results show that the porosity of calcareous rock is much larger than that of other rocks; and the longitudinal elastic wave velocity is linearly decreased with the increase of porosity. Longitudinal elastic wave velocity is between 2 700 m/s and 3 700 m/s. The difference of dry and saturated tensile strengths is not evident; and the results show that the strength of calcareous rock does not decrease when it is saturated by water. Calcareous rock is brittle but it is different from granite. Multi-fracture planes emerge along the growth line of coral when breakdown occurs and it keeps considerably high residual strength. It is found that the damage pattern is determined by lithologic frame of calcareous rock.

Key words: rock mechanics; Nansha Islands; coral reefs; calcareous rock; triaxial compression test; wave test; porosity

收稿日期: 2008 - 03 - 27; **修回日期:** 2008 - 05 - 22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50639010); 国家科技支撑计划重点项目(2006BAB19B03); 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程领域前沿项目(O712041Q01)

作者简介: 王新志(1980 -), 男, 博士, 2003 年毕业于中国地质大学(武汉)工程学院岩土工程专业, 主要从事地基处理等方面的研究工作。
E-mail: wangxinzhi1220@163.com

1 引言

造礁石珊瑚群体死亡后其遗骸经过漫长的地质作用后形成的岩土体即为珊瑚礁^[1]。中国南海诸岛和部分南海海岸珊瑚礁发育,尤其是南海地区珊瑚礁分布范围广,地理位置显要。这些礁体是中国领土主权的标志,是开发海洋资源、建设我国南海海空交通中继站的重要基地。珊瑚在岩石学上统称为礁灰岩。珊瑚死后仍留在海底原地,丛生的珊瑚群体死后其遗骸构成的岩体,堆积在死前原生长地称为原生礁;珊瑚被波浪破坏后其残肢和各种附礁生物贝类及藻类的遗骸堆积胶结在一起构成次生礁。原生礁和次生礁构成了水中珊瑚礁灰岩地质体^[2]。礁灰岩是构成珊瑚礁的主体,其力学性质决定了珊瑚礁的稳定性。

为研究礁体的稳定性,需了解作为珊瑚礁主体的礁灰岩的工程力学性质。珊瑚属于腔肠动物,其种类繁多,形状和结构千差万别,死亡后经过漫长的历史时期,在海洋生物的充填、胶结作用和其他的海洋动力作用下成岩,又由于海平面的升降,其中被雨水淋滤过后发生溶蚀形成孔洞,因此礁灰岩的岩体结构较为复杂。本次试验的礁灰岩取自南沙群岛,2007年6月,中国科学院南海海洋研究所和中国科学院武汉岩土力学研究所合作对南沙群岛进行了一次综合科学考察,在南沙群岛的永暑礁(9°32′~9°42′N, 112°52′~113°04′E)和渚碧礁(10°54′~10°56′N, 114°04′~07′E)的礁坪取回了礁灰岩的样品,进行室内的力学试验研究。所取礁灰岩为淡黄色,块状构造,为大块的珊瑚骨骼组成,完整性好,是滨珊瑚胶结成岩后的产物,其中有一些细小孔洞(见图1),为海洋生物侵蚀的结果。

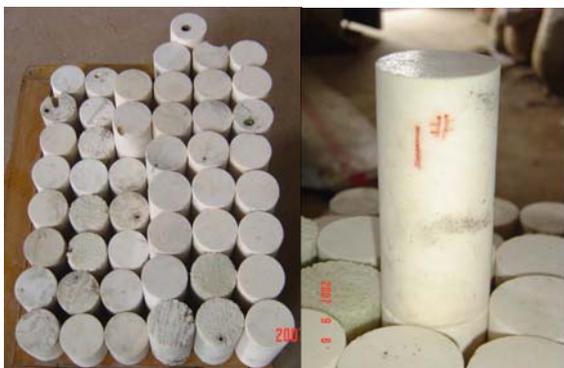


图1 礁灰岩岩样照片

Fig.1 Photos of calcareous rock samples

2 岩样制备

试验前先对岩样进行声波测试,岩块声波测试适用于能制成规则岩样的各类岩石。按照《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001)的标准,将岩样制成圆柱体,直径 ϕ 50 mm,试件高度为50 mm和100 mm。其两端面不平整度误差均不大于0.05 mm,沿试件高度,直径的误差不大于0.3 mm,端面垂直于岩样轴线,最大偏差不大于0.25°。试验前对岩样进行干燥和饱和处理,以测试干燥和饱和2种状态下礁灰岩的声波特性以及测试岩样在干燥和饱和2种状态下的力学性质。

3 试验设备

3.1 声波测试设备

试验所用仪器设备包括:(1)中国科学院武汉岩土力学研究所RSM智能声波测定仪RSMSY5,该仪器的分辨率为0.1 s,其双通道最小采样间隔为0.1 s,发射脉宽连续可调,信号放大器增益为-20~80 dB,带宽为1~500 kHz,每道采样点数为(0.5~16.0) $\times 10^3$ 。(2)纵波换能器(50 kHz)和检波换能器。(3)计算机及分析程序(声波仪检测程序V2.58)等。

岩石声波速度测定及数据处理系统采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的带有纵波探头、横波探头的RSM智能工程仪器——岩体声波检测分析仪完成,通过该仪器测量岩石的纵波速度,采用黄油作耦合剂。

3.2 电液伺服试验机

XTR01型微机控制电液伺服试验机(见图2)是长春新特技术有限公司研制的,功能齐全,性能稳定。该试验机主要由轴压系统、侧向压力系统、孔隙水系统、加温系统及微机控制系统5大部分组成。其中轴压系统和侧压系统的主要技术指标如下:

(1) 轴压系统

① 轴向试验力测量范围:0~2 000 kN;示值最大相对误差:<1%。

② 位移测量范围:0~100 mm;示值最大相对误差:<1%。

③ 轴向变形测量范围:0~5 mm;示值最大相对误差:<1%。

④ 径向变形测量范围:0.0~2.5 mm;示值最大相对误差:<1%。



图 2 XTR01 型微机控制伺服试验机

Fig.2 XTR01 computer servo-controlled test machine

(2) 侧压系统

- ① 最大侧向压力 100 MPa; 测量精度 < 1%。
- ② 岩样尺寸: $\phi 50 \sim 100$ mm。

4 礁灰岩声波特性

工程岩体的动力特性参数是评价岩体工程特性及稳定性的重要指标。为了准确获取这部分参数, 目前较通用的方法是波速测试法。研究表明, 弹性波在岩体中的传播明显地受到结构面及水的影响^[3]。在进行试验前, 分别对天然状态(天然含水量 2% ~ 25%)、干燥状态和饱和状态(饱和含水量 33% ~ 48%)的部分岩样进行了试验。测试结果见表 1。礁灰岩天然密度 1.11 ~ 1.72 g/cm³, 饱和密度 1.63 ~ 2.07 g/cm³。纵波速度反映了岩石的动压缩性质, 经测试礁灰岩天然纵波波速为 2 780 ~ 3 693 m/s, 饱和纵波波速为 3 000 ~ 3 630 m/s, 干燥纵波波速为 2 764 ~ 3 589 m/s。饱和后波速略有增大, 而干燥波速略有减小, 这是由于声波在水中的传播速度比在空气中传播速度快, 水充填岩石孔隙后使岩石波速略有增大。

岩体中存在孔隙、节理、裂隙、层面及断层, 这些结构面会影响声波在岩石中的传播速度。一般情况下, 岩石孔隙、节理、裂隙、层面、断层越发育, 声波速度会越低^[4]。礁灰岩在成岩过程中较少受到地质营力的影响, 因此一般没有节理、裂隙和断层, 但构成礁灰岩的各种珊瑚中有大量的孔隙存在, 珊瑚骨架之间不同程度地充填有珊瑚碎屑以及生物碎屑等, 部分孔隙被填实, 但礁灰岩中仍然存在大量的细小孔隙, 这些孔隙的存在影响了声波在岩石中的传播, 也降低了岩石的强度。礁灰岩的孔隙率是通过测试岩样的烘干质量、饱和质量和岩

表 1 礁灰岩物性参数及声波测试结果

Table 1 Physical parameters and acoustic wave test results of calcareous rocks

岩样 编号	天然密度 (g · cm ⁻³)	干燥密度 (g · cm ⁻³)	饱和密度 (g · cm ⁻³)	天然纵波 波速 (m · s ⁻¹)	干燥纵波 波速 (m · s ⁻¹)	饱和纵波 波速 (m · s ⁻¹)
C9	1.26		1.63	2 981		3 102
C22	1.25		1.68	2 847		3 014
C13	1.67		1.79	3 209		3 364
C14	1.69		1.80	3 001		3 156
C32	1.66		2.04	3 556		3 607
C33	1.62		2.01	3 604		3 630
C34	1.60		2.00	3 426		3 497
C37	1.69		2.07	3 632		3 606
C16	1.20	1.16		3 060	2 867	
C17	1.28	1.14		2 780	2 764	
C19	1.40	1.24		2 947	2 845	
C15	1.11	1.09		3 274	3 124	
C28	1.63	1.57		3 679	3 547	
C29	1.71	1.63		3 682	3 458	
C30	1.61	1.48		3 529	3 504	
C31	1.59	1.42		3 693	3 589	
平均值	1.50	1.34	1.88	3 306	3 212	3 372

样体积估算得来的, 假设孔隙都互相连通, 且为大开孔隙, 孔隙全部被水充满, 则礁灰岩的孔隙率 n 为可表示为

$$V_v = \frac{m_s - m_d}{\rho_w} \tag{1}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \tag{2}$$

式中: m_s 为饱和岩样质量, m_d 为烘干岩样质量, ρ_w 为水的密度, V_v 为孔隙体积, V 为岩样总体积。

通过式(1)和(2)估算得到礁灰岩的孔隙率结果见表 2。礁灰岩的孔隙率为 45% ~ 55%。而有些学者^[5]给出砂岩的孔隙率为 1.6% ~ 28.0%, 灰岩的孔隙率为 1.0% ~ 27.0%, 大理岩的孔隙率为 0.1% ~ 6.0%。由此可知, 礁灰岩的孔隙率是很高的, 因此其波速也相对较低。图 3 建立了礁灰岩孔隙率和纵波波速之间的关系。由图 3 可知, 随着礁灰岩孔隙率的增大, 纵波波速急剧减小, 纵波波速(V_p)和孔隙率(n)拟合的关系式为

$$V_p = -33.922n + 4 702.4 \tag{3}$$

式(3)拟合的相关系数为 0.862 5。

表 2 礁灰岩的孔隙率和风干波速

Table 2 Porosities and dry velocities of calcareous rocks

岩样编号	岩样体积/cm ³	烘干质量/g	饱和质量/g	孔隙率/%	风干岩样波速/(m·s ⁻¹)
C13	196.25	261.93	350.33	45.04	3 209
C14	192.91	254.58	346.60	47.70	3 001
C16	183.48	212.72	306.37	51.04	3 060
C17	184.93	210.11	312.32	55.27	2 780
C18	187.68	214.35	305.15	48.38	3 041
C19	186.01	231.02	327.93	52.10	2 947
C22	184.78	209.92	310.77	54.57	2 847
C23	182.36	203.12	300.63	53.47	2 913

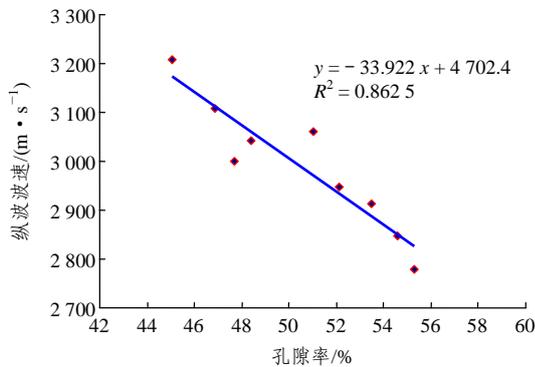


图 3 礁灰岩纵波波速和孔隙率关系图

Fig.3 Relationship between longitudinal wave velocity and porosity of calcareous rock

5 礁灰岩基本力学试验

岩石的应力 - 应变关系和强度性质是岩石的最重要的力学性质之一, 就单轴强度性质而言, 岩石类材料的抗压性能好, 抗拉性能却极差, 这是岩石类材料与一般金属材料在力学性质方面的一个重要区别。一般认为, 产生这种现象的原因主要是由于岩石材料的不均匀性及内部存在大量微裂纹所致。岩石的强度和变形是判定岩石工程稳定性的重要判据, 也是进行数值计算的基础数据^[5]。因此室内的基础试验是了解岩石强度和变形性质的必要手段。

5.1 抗拉强度

礁灰岩的抗拉强度试验采用巴西劈裂法, 岩样为圆柱样, 直径 ϕ 50 mm, 高度 50 mm。通过试件直径的两端, 在试件的侧面沿轴线方向画 2 条加载基线, 将 2 根直径为 ϕ 1 mm 的钢丝垫条沿加载基线固定。加载速率为 0.1 MPa/s, 加载直至岩样破坏, 测试了干燥和和 2 种状态下礁灰岩的抗拉强度, 结果见表 3。礁灰岩破坏时为突发的张性断裂, 变

表 3 礁灰岩密度和抗拉强度试验结果

Table 3 Results of densities and tensile strengths of calcareous rocks

含水状态	岩样编号	天然密度/(g·cm ⁻³)	纵波波速/(m·s ⁻¹)	抗拉强度 σ_t /MPa
饱和	D8	1.26	2 819	1.45
	D9	1.15	2 584	1.28
	D10	1.13	2 552	0.94
	D21	1.56	2 678	0.88
干燥	D1	1.35	2 565	1.44
	D2	1.35	2 604	0.94
	D3	1.31	2 959	1.06
	D5	1.35	2 836	1.14
	D7	1.38	2 771	1.76
	D16	1.25	2 682	0.95

形量很小, 不到 0.5 mm, 沿直径劈裂成两半(见图 4)。从试验结果可知, 干燥的礁灰岩的抗拉强度为 0.94~1.76 MPa, 平均抗拉强度为 1.21 MPa; 饱和礁灰岩的抗拉强度为 0.88~1.56 MPa, 平均抗拉强度为 1.14 MPa, 饱和后抗拉强度略有降低, 但差别不明显。



图 4 礁灰岩劈裂岩样照片

Fig.4 Photos of fractured calcareous rocks

由此可见, 礁灰岩的软化性较弱。从礁灰岩的物质组成和结构分析可知, 礁灰岩由文石和高镁方解石组成, 这 2 种矿物较脆而软化性较差。

5.2 单轴抗压强度

礁灰岩单轴抗压强度试验按照《水利水电工程岩石试验规程》(SL264 - 2001)进行, 岩样加工好后分成 2 组, 分别进行烘干和饱和处理, 并测试了纵波波速, 然后进行单轴抗压强度试验, 加载速率为 0.8 MPa/s。测得饱和礁灰岩的峰值强度为 5.04~7.21 MPa, 弹性模量为 7.9~12.9 GPa, 泊松比为 0.23~0.27。干燥礁灰岩的峰值强度为 7.95~10.78 MPa, 弹性模量为 9.61~22.4 GPa, 泊松比为 0.24~0.26。试验结果见表 4。图 5 为礁灰岩单轴压缩应力 - 应变曲线。由图 5 可知, 礁灰岩在初始压缩条件下应力 - 应变曲线为直线, 跟其他岩石差别在于

表 4 礁灰岩单轴抗压强度试验结果

Table 4 Results of uniaxial compression test of calcareous rocks

含水状态	岩样编号	抗压强度 σ_c /MPa	残余强度 σ_r /MPa	σ_r/σ_c	弹性模量 /GPa	泊松比
饱和	C9	7.21	3.67	0.51	9.70	0.23
	C13	6.35	3.85	0.61	12.90	0.25
	C14	5.04	2.43	0.48	11.70	0.24
	C22	7.70	3.03	0.39	7.90	0.27
干燥	C15	7.95	3.35	0.42	9.61	0.24
	C16	10.78	1.99	0.18	22.4	0.25
	C17	9.87	2.02	0.20	20.0	0.26
	C19	8.06	3.06	0.38	10.8	0.26

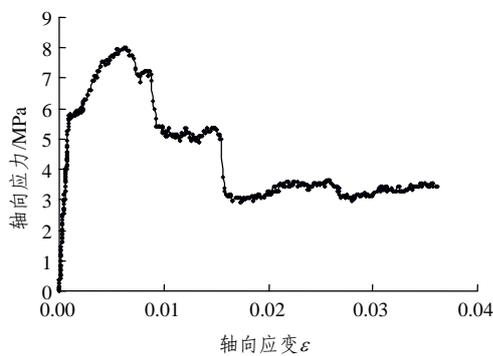


图 5 C19 岩样单轴压缩应力 - 应变曲线
Fig.5 Axial stress vs. axial strain curve of uniaxial compression test of rock sample C19

没有压密段, 该阶段主要表现为弹性变形, 而在应变很小的情况下应力迅速达到峰值, 局部发生张裂破坏, 强度降低, 但整体稳定性没有彻底破坏, 岩样仍然具有一定的残余强度, 这时变形继续增长, 局部的破裂面继续增加, 强度进一步降低, 并保持稳定。

根据岩石的破坏类型及微观破坏机制, 不论外荷载如何, 岩石的基本破坏形式只有拉坏和剪坏两类, 这两类破坏的基本表现特征为破坏面两边发生相对位移, 并伴随出现新的破坏面, 直至破坏面贯通岩样彻底破裂^[6]。从破坏后的形态来看, 礁灰岩属于拉张破坏, 并伴随有局部的摩擦印痕, 破裂面是沿着珊瑚生长线形成的(见图6), 说明珊瑚的生长线是礁灰岩最脆弱的部位, 破裂面首先由此处形成。

礁灰岩破坏后仍具有较高的残余强度, 最高可达峰值强度的 61%, 这跟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, 而不是突然发生应力陡降, 这在桩基工程设计中具有重要意义。



图 6 礁灰岩的生长线
Fig.6 Growth line of calcareous rock

5.3 三轴压缩强度

本次试验采用等侧向压力($\sigma_2 = \sigma_3$), 先以 0.05 MPa/s 的加载速率同步施加侧向压力和轴向压力至预定的压力值, 并保持侧压力在试验过程中始终不变, 以 0.5 MPa/s 的加载速率施加轴向荷载直至试件破坏。分别对干燥和饱和礁灰岩进行了测试, 围压分为 5 级, 分别为 5, 10, 15, 20 及 30 MPa。试验结果表明, 礁灰岩破坏时的变形非常小, 轴向变形 0.036 mm, 轴向应变不到 0.001 就发生脆性破坏(见图 7), 破坏后岩样仍然保持较高的残余强度, 试验结果见表 5。加载初期以弹性变形为主, 应力 - 应变曲线接近为直线, 直到屈服破坏, 这时岩样中破裂面早已形成, 在围压的作用下仍然有较高的残余强度, 此时岩样中主要表现为剪切和摩擦, 所反映

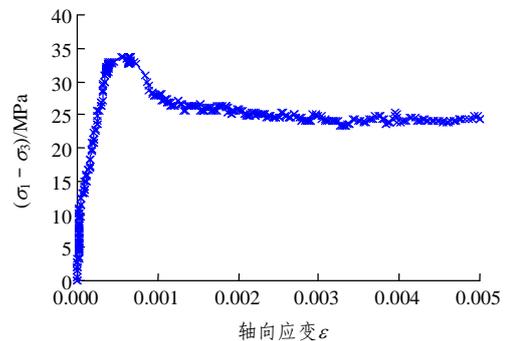


图 7 C28 试样三轴压缩应力 - 轴向应变曲线
Fig.7 Axial compression stress vs. axial strain curve of triaxial compression test of sample C28

表 5 礁灰岩三轴压缩试验结果

Table 5 Results of triaxial compression test of calcareous rocks

含水状态	岩样编号	围压 /MPa	峰值强度 /MPa	残余强度 /MPa	残余强度/峰值强度	弹性模量 /GPa	泊松比
干燥	C30	5	27.4	15.410	0.56	24.470	0.27
	C28	10	43.6	33.740	0.77	26.610	0.25
	C10	15	65.7	43.760	0.66	23.670	0.24
	C29	20	91.6	66.050	0.50	21.140	0.29
	C31	30	126.4	80.900	0.64	24.960	0.25
饱和	C6	5	23.4	16.000	0.68	18.570	0.26
	C32	10	41.7	17.510	0.42	21.336	0.24
	C34	15	53.3	34.428	0.65	13.579	0.26
	C37	20	68.8	42.660	0.62	11.915	0.28
	C33	30	98.3	66.840	0.68	20.129	0.24

出来的就是残余强度。礁灰岩的这种性质和花岗岩等其他脆性岩石有本质上的差别,花岗岩在破坏后应力迅速跌落,而礁灰岩破坏后仍然具有较大的承载能力。

此外,礁灰岩的破坏形式与其他岩石也有本质的区别。礁灰岩在破坏时并不像其他岩石一样沿着最大剪应力面发生剪切破坏,而是沿着珊瑚的生长线发生拉张破坏,形成多个碎条状,其破坏后形态见图 8。



图 8 礁灰岩破坏后照片

Fig.8 Photo of broken calcareous rock

5.4 强度参数估算

根据试验测得的礁灰岩单轴抗压强度 σ_c 和单轴抗拉强度 σ_t 来计算礁灰岩的强度参数内摩擦角 φ 和黏聚力 c , 根据莫尔 - 库仑包络线按直线推算的计算公式:

$$c = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \right) \quad (5)$$

按照试验测得的平均单轴抗压强度和平均单轴抗拉强度, 由式(4), (5)计算得到, 饱和礁灰岩的内摩擦角为 44.8° , 黏聚力为 1.43 MPa; 干燥礁灰岩的内摩擦角为 50.4° , 黏聚力为 1.58 MPa。而根据三轴试验计算饱和礁灰岩的内摩擦角为 35° , 黏聚力为 1.87 MPa; 干燥礁灰岩的内摩擦角为 40° , 黏聚力为 2.54 MPa。

6 结 论

礁灰岩是在中国南海广泛分布的一类特殊的岩体, 由于中国南海海洋资源开发的落后, 国内学者对其力学性质的研究还是刚刚起步, 本文通过一系列基本力学试验, 初步探讨了礁灰岩的基本力学特性, 得出以下结论:

(1) 通过对礁灰岩的声波测试, 礁灰岩的天然

纵波波速为 2 780~3 693 m/s, 饱和纵波波速则为 3 000~3 630 m/s, 干燥纵波波速为 2 764~3 589 m/s, 饱和后波速略有增大, 而干燥波速略有减小。

(2) 巴西劈裂试验结果表明, 干燥礁灰岩的抗拉强度为 0.94~1.76 MPa, 而饱和礁灰岩抗拉强度为 0.88~1.56 MPa, 饱和礁灰岩的抗拉强度略有降低, 礁灰岩的软化性较弱。

(3) 饱和礁灰岩单轴抗压强度范围为 5.04~7.21 MPa, 弹性模量为 7.9~12.9 GPa, 而泊松比为 0.23~0.27。干燥礁灰岩的峰值强度为 7.95~10.78 MPa, 弹性模量为 9.61~22.4 GPa, 而泊松比为 0.24~0.26。

(4) 礁灰岩常规三轴试验结果表明, 礁灰岩在破坏时是沿着生长线发生拉张破坏, 破坏后在围压作用下的残余强度最高可达到峰值强度的 77%, 表明礁灰岩破坏后仍然具有较大的承载能力, 这在工程实际中具有重要意义。

(5) 由礁灰岩的单轴抗拉强度和单轴抗压强度试验结果计算得到饱和礁灰岩的平均内摩擦角为 44.8° , 黏聚力为 1.43 MPa, 干燥礁灰岩的平均内摩擦角为 50.4° , 黏聚力为 1.58 MPa。三轴试验测得的饱和礁灰岩的内摩擦角为 35° , 黏聚力为 1.87 MPa; 干燥礁灰岩的内摩擦角为 40° , 黏聚力为 2.54 MPa。

参考文献(References):

- [1] 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 Ren, SONG Chaojing, ZHAO Huanting, et al. Coral reef engineering geology of Nansha Islands[M]. Beijing: Science Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 赵焕庭. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(ZHAO Huanting. Physical geography of Nansha Islands[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [3] 李 宁, 张 平, 段庆伟, 等. 裂隙岩体的细观动力损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 579 - 1 584.(LI Ning, ZHANG Ping, DUAN Qingwei, et al. Dynamic meso-damage model of jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 579 - 1 584.(in Chinese))
- [4] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(SUN Guangzhong. Rock structural mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [5] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.(LIU Yourong, TANG Huiming. Rock mass mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.(in Chinese))
- [6] 臧德胜, 李安琴. 真单轴压应力场下岩石的力学性质[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 099 - 1 103.(ZANG Desheng, LI Anqin. Rock mechanics properties under stress field of true uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 099 - 1 103.(in Chinese))