

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0882

礁灰岩-混凝土界面剪切特性试验研究

刘海峰¹, 朱长歧¹, 汪 稔¹, 王新志¹, 崔 翔^{1,2}, 王天民^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为探究礁灰岩地层中钻孔灌注嵌岩桩的桩-岩界面剪切作用规律, 试验选取南海某岛礁的块状结构、砾块结构、砾屑结构及砂屑结构礁灰岩岩芯, 开展室内物理力学性质试验及常法向应力条件下的礁灰岩-混凝土界面剪切强度试验研究, 探究桩-岩界面剪应力-剪切位移关系曲线的变化规律。开展红砂岩-混凝土界面剪切对比试验, 揭示两种不同沉积作用类型的岩石与混凝土黏结面产生剪切强度差异的根本原因。试验结果表明: 礁灰岩-混凝土界面的剪切强度受礁灰岩的结构类型、桩-岩强度比等因素影响; 由于水泥浆在礁灰岩中的扩散填充作用, 礁灰岩-混凝土界面的黏结力和内摩擦角均高于砂岩-混凝土界面; 桩-岩强度比产生的界面剪切强度响应受礁灰岩结构类型的影响, 低桩-岩强度比时, 块状结构、砾块结构礁灰岩-混凝土界面的黏结力均高于高强度比条件; 桩-岩强度比增大, 块状结构礁灰岩-混凝土界面的内摩擦角增加, 而砾块结构礁灰岩-混凝土界面的内摩擦角变化不大。

关 键 词: 珊瑚礁灰岩; 嵌岩桩; 界面剪切; 结构类型; 强度比

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 05-1540-09

Shear test on reef limestone-concrete bonding interface

LIU Hai-feng¹, ZHU Chang-qi¹, WANG Ren¹, WANG Xin-zhi¹, CUI Xiang^{1,2}, WANG Tian-min^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This project planned to investigate the law of shear action in pile-rock interface of bored rock-socketed pile in reef limestone stratum. For this purpose, the shear test, physical and mechanic property test were performed on the four structure types of reef limestone core samples including framestone, bindstone, rudstone and bioclastic limestone which were sampled from a certain core reef in South China sea. In this way, the variation law of shear stress-shear displacement curve of pile-rock interface was explored. Meanwhile, shear test on the interface between red sandstone and concrete was also carried out to reveal the basic reason for the difference of shear strength between two different sedimentary types of rock and concrete bond surfaces. Based upon these, the investigation suggested that shear strength of reef limestone-concrete interface was affected by the structure type of reef limestone and the strength ratio of pile-rock interface. As a result of the diffusive filling effect of cement slurry in reef limestone, the cohesive force and internal friction angle of the interface between reef limestone and concrete were both larger than those of sandstone-concrete interface. The shear strength response of the strength ratio of pile-rock interface was influenced by the type of reef limestone structure. Cohesive force of the limestone-concrete interface of framestone and bindstone were both larger at a small strength ratio of pile-rock interface than that at a large strength ratio. Internal friction angle of the interface between framestone and concrete was bigger at a large strength ratio of pile-rock interface than that at a small strength ratio while this index changed little in the bindstone-concrete interface.

Keywords: coral reef limestone; rock-socketed piles; interface shear test; structural types; strength ratio

1 引 言

珊瑚礁是造礁石珊瑚群体死亡后, 其残骸经过

漫长的地质作用而形成的岩土体, 在全球范围内集中分布于南北纬度之间的热带海洋地区。著名的澳大利亚大堡礁和马尔代夫群岛均为珊瑚礁地形^[1-2]。

收稿日期: 2019-05-16

修回日期: 2019-09-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (No. XDA13010201, No. XDA13010301); 国家自然科学基金项目 (No. 41872721)。

This work was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13010201, XDA13010301) and the National Natural Science Foundation of China (41872721).

第一作者简介: 刘海峰, 男, 1989 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋钙质沉积物的工程力学特性的研究工作。E-mail: hfliu@whrsm.ac.cn

通讯作者: 朱长歧, 男, 1963 年生, 硕士, 研究员, 主要从事海洋工程地质、胶结钙质土的力学特性及地基加固理论的研究工作。E-mail: cqzhu@whrsm.ac.cn

作为珊瑚礁主体的礁灰岩, 具有明显区别于常规陆源岩体的成岩作用类型, 该成岩作用以生物化学胶结、重力压密及后期的冷变质作用为主, 而陆源岩石是以高温、高压成岩作用为主, 因此珊瑚礁岩体以多孔、低强度、脆性为特征, 具有明显的地貌差异性和沉积分带性^[1-3]。

国际上针对珊瑚礁沉积物的工程力学性质及其桩基承载特性的研究兴起于 20 世纪 70 年代。主要针对浅海油气开发中的海上平台桩基础设计及施工进行。工程涉及的区域有澳大利亚^[4]、南非^[5]、巴斯海峡^[6]、菲律宾^[7]、苏伊士湾^[8]、红海^[9-10]、古巴^[11]等地区。研究人员围绕上述钙质沉积物中的桩基竖向承载力设计问题, 开展了针对性的研究工作, 提出了适合钙质沉积物地层的桩型设计、桩身承载力参数取值方法及相应的施工工法。

Fahey^[12]、Ghazali^[13-14]等分别基于澳大利亚西北大陆架的 NRA 平台区域和红海近岸珊瑚礁沉积地层开展的现场钻孔灌注后压浆桩和打入桩的对比试验表明, 珊瑚礁地层具有高度结构性, 打入桩的承载力远低于钻孔灌注后压浆桩。万志辉等^[15]针对中国援马尔代夫跨海大桥开展的桩基承载力测试结果, 同样证实后压浆工艺可显著改善珊瑚礁地层中钻孔灌注桩的承载性状, 提高桩身承载力。

在工程及科研人员的共同努力下, 礁灰岩嵌岩桩的承载力设计及施工工法在珊瑚礁地形中得以运用和发展。但现有研究工作对桩-岩界面的荷载传递规律及其影响因素涉及较少。在可供借鉴的陆源嵌岩桩理论中, 何思明^[16]、赵明华^[17]等研究认为嵌岩桩的荷载传递特性主要取决于混凝土-岩石界面的剪切特性, 从理论上分析了嵌岩桩深径比、桩-岩模量比和剪胀角等因素对嵌岩桩荷载传递的影响, 提出了包括基于 Serrano 法计算嵌岩桩侧摩阻力的理论、基于剪胀效应的桩侧摩阻力计算模型以及考虑桩-岩界面脱黏与完全黏结两种条件下嵌岩段侧阻力分布规律的计算公式。

本次试验在上述研究工作的基础上, 以南海某岛礁的礁灰岩岩芯为研究对象, 考虑礁灰岩特殊的海相沉积作用, 结合宏细观研究方法, 开展常法向应力 (CNL) 条件下的桩-岩界面剪切试验研究。揭示桩-岩界面摩阻力发挥机制, 探究应力条件、礁灰岩结构类型、桩-岩强度比等因素对桩-岩界面剪切强度的影响规律, 并增加与红砂岩-混凝土剪切试样的对比试验, 探究两种不同沉积作用类型的岩石与混凝土黏结面产生剪切强度差异的根本原因。

2 礁灰岩的物理力学性质试验

在以往的研究中, Clark^[3]、Zhu^[18]、刘海峰^[19]等通过试验发现, 组构类型、胶结强度、成岩程度不同的礁灰岩, 其力学性质差异明显, 其中组构类型对钙质沉积物的力学性质影响较大, 礁灰岩较强的结构性也成为区别一般陆源软岩的显著特征。

鉴于此, 本次试验按照礁灰岩结构类型的分类方法, 对取自南海某岛礁的礁灰岩钻孔芯样进行划分, 具体可分为块状结构、砾块结构、砾屑结构和砂屑结构礁灰岩, 各结构类型礁灰岩如图 1 所示。

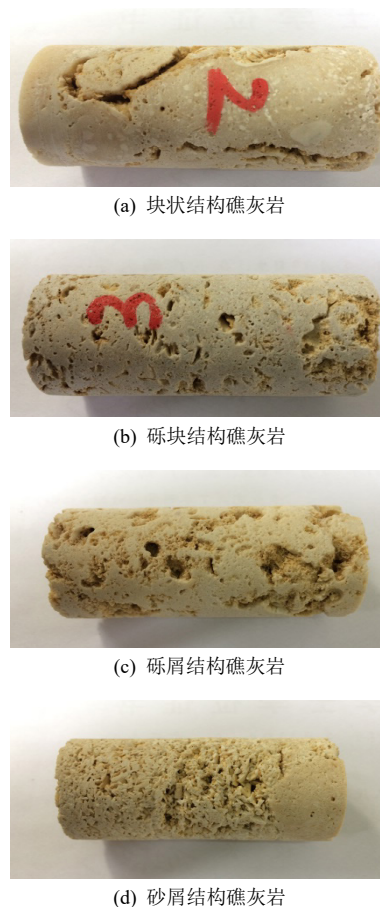


图 1 礁灰岩试样的结构类型

Fig.1 Structure types of reef limestone samples

试验中, 取相邻深度结构类型相同的礁灰岩岩芯, 加工制成 50 mm×100 mm 的标准圆柱体试件和边长为 150 mm 的立方体剪切试样。通过物理力学性质试验获得相同结构类型礁灰岩的密度、饱和单轴抗压强度等基本物理力学性质参数。选取湖北鄂州地区的红砂岩开展对比试验研究。

2.1 相对密度和密度试验

试样的相对密度试验依据《土工试验规程》(SL237—1999)^[20]进行, 将礁灰岩、红砂岩试样

研磨成粒径小于 0.075 mm 的粉样, 采用比重瓶法进行相对密度测试, 试验中采用煤油作为试液。测试结果表明, 礁灰岩的相对密度平均值为 2.65, 红砂岩的相对密度试验结果为 2.66。

试样的密度试验依据《水电水利工程岩石试验规程》(DL/T5368—2007) [21] 相关规定, 采用量积法进行。首先对直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱体试样进行编号, 礁灰岩试样的编号为 A~H, 红砂岩试样的编号为 S1~S3。利用游标卡尺量取标准试样的尺寸 (游标卡尺的精度为 0.02 mm)。将试样放置在 105 °C 的烘箱内干燥至质量恒定, 利用精度为 0.01 g 的天平称取试样质量, 计算可得试样的干密度。

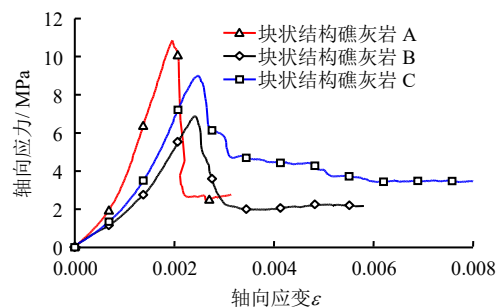
试验结束后, 将试样置于室内, 待吸湿稳定后, 将其置于真空饱和容器中, 进行抽真空饱和。在 100 kPa 的负压下饱和 4 h, 并在原容器中静置 4 h。取出试样, 拭去表面水分后称重, 精确至 0.01 g, 计算可得试样的饱和吸水率及饱和密度。试验结果如表 1 所示。

表 1 岩样的物理性质试验结果
Table 1 Experimental results of physical properties of rock samples

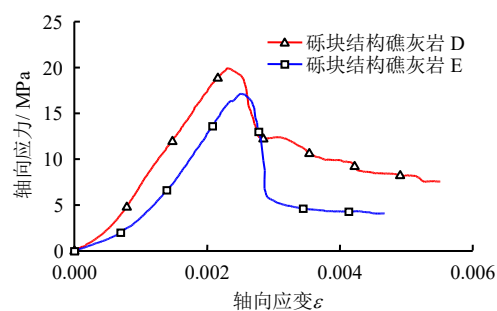
岩样 类型	试样 编号	干密度 /(g·cm ⁻³)	饱和密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙率 /%	饱和吸水率 /%
块状结构 礁灰岩	A	2.09	2.23	21.0	6.6
	B	1.90	2.09	28.5	10.1
	C	1.93	2.11	27.3	9.4
砾块结构 礁灰岩	D	2.10	2.25	20.6	6.8
	E	1.98	2.18	25.3	9.8
砾屑结构 礁灰岩	F	1.68	1.92	36.5	14.3
	G	1.54	1.89	42.0	22.6
砂屑结构 礁灰岩	H	1.65	1.96	37.7	18.8
红砂岩	S1	2.32	2.42	12.5	4.5
	S2	2.31	2.41	13.0	4.5
	S3	2.33	2.42	12.3	4.2

2.2 饱和单轴抗压强度试验

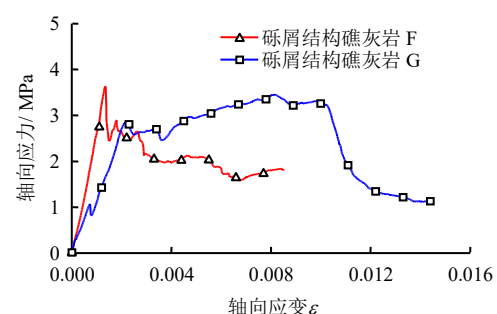
试样的饱和单轴抗压强度试验依托中国科学院武汉岩土力学所岩土力学与工程国家重点实验室自行研制的数字控制式电液伺服试验机 RMT-150C 岩石力学试验系统进行。试样为直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体试件。试验中采用位移控制法加载, 加载速率为 0.002 mm/s, 共进行 12 组试验。通过试验获得礁灰岩、红砂岩试样在轴向压缩荷载作用下的饱和单轴抗压强度、弹性模量等力学参数。试样的应力-应变曲线如图 2 所示, 试验结果统计如表 2 所示。



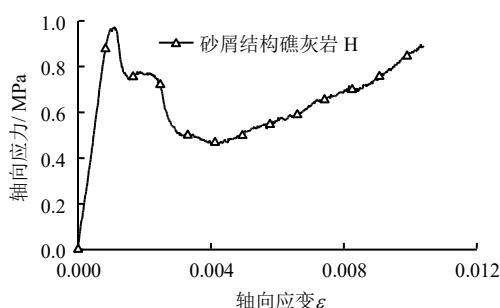
(a) 块状结构礁灰岩



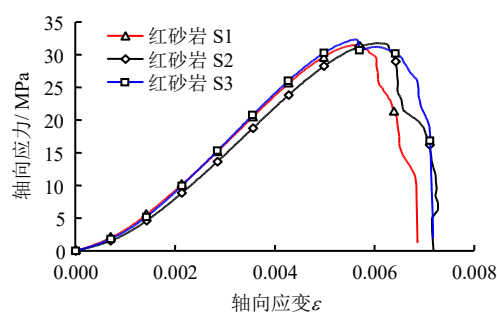
(b) 砾块结构礁灰岩



(c) 砾屑结构礁灰岩



(d) 砂屑结构礁灰岩



(e) 红砂岩

图 2 礁灰岩与红砂岩试样的应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curves of reef limestone and red sandstone samples

表2 岩样的饱和单轴压缩试验结果

Table 2 Results of uniaxial compression test of saturated rock samples

岩样 类型	岩样 编号	UCS / MPa	弹性模量 / GPa	UCS _{avg} / MPa
块状结构 礁灰岩	A	10.9	8.0	8.9
	B	6.9	4.4	
	C	9.0	5.7	
砾块结构 礁灰岩	D	20.0	6.0	18.6
	E	17.1	10.7	
砾屑结构 礁灰岩	F	3.6	2.9	3.6
	G	3.5	1.6	
砂屑结构 礁灰岩	H	1.0	1.1	1.0
	S1	31.5	7.3	
	S2	31.8	7.1	
红砂岩	S2	31.8	7.1	31.9
	S3	32.3	7.7	

注：UCS、UCS_{avg}分别为单轴压缩强度和单轴压缩强度平均值。

饱和单轴抗压强度试验结果表明，4种结构类型礁灰岩的饱和单轴抗压强度均低于红砂岩。礁灰岩的强度主要受其结构类型决定。本次试验中，不同结构类型礁灰岩的饱和单轴抗压强度由高至低依次为：砾块结构>块状结构>砾屑结构>砂屑结构。不同结构类型的礁灰岩试样，由于孔隙率不同，试样吸水饱和后，孔隙间持有的水份不同，孔隙率高的试样一般表现为较高的饱和吸水率。在轴向应力作用下，孔隙间的水分削弱了胶结颗粒间的摩擦强度，加速了破裂面发展，使得礁灰岩在较小的轴向应变下即发生破坏，应力峰值较小，同时峰值强度对应的轴向应变在0.002左右，远小于红砂岩达到峰值强度时的轴向应变值。由于礁灰岩的孔隙率较高，且颗粒间的胶结强度较低，礁灰岩试样的破坏类型为局部渐进式破坏。因此，在允许大变形的条件下礁灰岩在峰后仍具有一定的残余强度。而红砂岩则表现出明显的脆性破坏，峰后强度衰减为0。

试验中，孔隙率分别为42.0%、37.7%的砾屑灰岩G试样和砂屑灰岩H试样甚至表现出应力-应变曲线双峰值现象，即轴向压缩时试样端部首先出现明显的压缩挤密，表现出颗粒材料性状，强度随密度的增大而增加，直至达到第2个峰值点。

该试验现象与Zhu等^[18]针对西沙石岛的砂屑灰岩开展的饱和单轴压缩试验结果类似。对于高孔隙率、低胶结强度的砂屑灰岩和砾屑灰岩，试样在首个应力峰值后出现应变硬化现象较为普遍。

3 礁灰岩-混凝土界面剪切试验

3.1 试样制备

礁灰岩试样为取自南海某岛礁，直径为80 mm的钻孔岩芯。按照礁灰岩-混凝土界面剪切试验的设

计思路，针对性地选取4种结构类型的礁灰岩芯样（块状结构、砾块结构、砾屑结构和砂屑结构）。将岩芯两端切削平整，沿纵向对中剖开，加工成长度为10~15 cm的半圆柱体。芯样剖面向上，居中置于底面为150 mm×150 mm的立方体铸铁模具盒内，利用水泥砂浆填筑芯样与模具盒下半部分间的空隙，完成半剪切试样的制作。待砂浆凝结硬化后，在礁灰岩的剖面上浇筑C30混凝土（块状结构、砾块结构礁灰岩增加一组礁灰岩-C50混凝土剪切试样，构成不同强度比的桩-岩界面），浇筑中留出10 mm的剪切缝。终凝拆模后，将试样置于标准养护箱中养护28 d，形成完整的剪切试样（见图3）。将作为对比研究的红砂岩加工制成150 mm×150 mm×75 mm的长方体，按照上述相同的制样方法制备红砂岩-混凝土剪切试样。



(a) 礁灰岩半圆柱体剖面



(b) 标准养护后的剪切试样

图3 剪切试样的制备

Fig.3 Preparation of shear test samples

3.2 试验装置与试验方法

剪切试验在RMT-150C岩石力学试验机上进行。试样为经标准养护后在室内自然干燥的立方体剪切试样。

考虑到荷载速率效应对剪切试验结果的影响^[22]，本次试验设定的法向应力的预加载速率为0.1 kN/s，剪切速率为0.002 mm/s。同时，为获得礁灰岩-混凝土界面在不同法向应力下的峰值剪切强度的变化规律，试验对实际地层中的桩-岩界面的初始法向应力进行了放大处理。每组恒定法向应力剪切试验设计3~4个不同的法向应力值，法向应力 σ_n 取值为0.5、1.0、2.0、4.0 MPa。

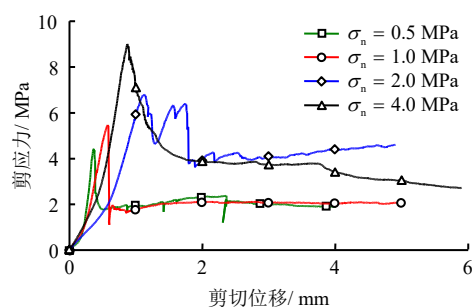
试验中实时采集剪应力、剪切位移及法向位移等数据，获取礁灰岩-混凝土界面剪胀、剪应力随剪

切位移的变化规律,对试验结果处理可得礁灰岩-混凝土界面的内摩擦角、黏结力等剪切强度参数。

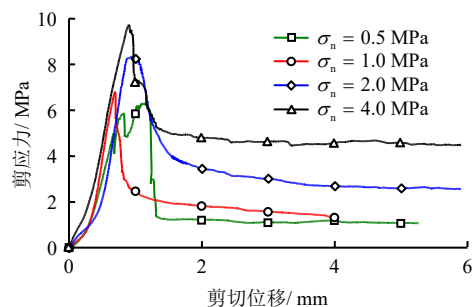
3.3 结果分析

3.3.1 结构类型对黏结面剪切强度的影响规律

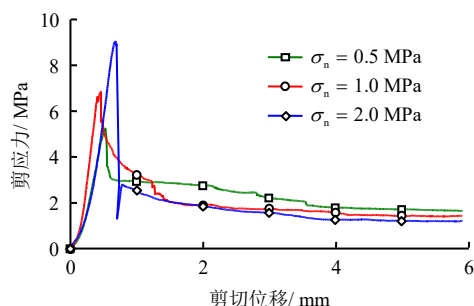
在恒定法向应力条件下,对4种不同结构类型的礁灰岩-C30混凝土剪切试样开展的剪切试验结果如图4所示。



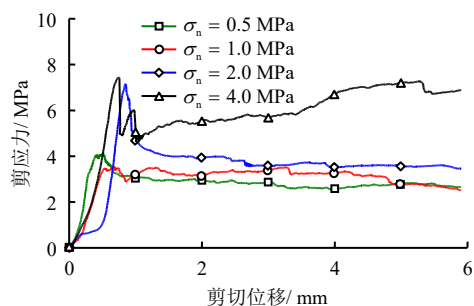
(a) 块状结构礁灰岩-混凝土试样



(b) 砾块结构礁灰岩-混凝土试样



(c) 砾屑结构礁灰岩-混凝土试样



(d) 砂屑结构礁灰岩-混凝土试样

图4 礁灰岩-C30混凝土黏结面CNL剪应力-剪切位移试验曲线

Fig.4 Shear stress-shear displacement curves of bonding interface between concrete(C30) and reef limestone in CNL shear test

由剪应力-剪切位移曲线可以看出,剪切荷载作用后礁灰岩-混凝土界面首先表现为缓慢的变形调整,剪应力随剪切位移增长缓慢,界面剪切刚度较小;在剪切面发生较小的变形协调后,剪应力-剪切位移曲线呈现较大剪切刚度的线性增长,当剪应力达到界面的抗剪强度时,黏结面破坏,对应的剪切位移量均小于1 mm。

随后剪应力衰减,不同结构类型的礁灰岩-混凝土剪切面,其剪应力跌落的速率不同,具体表现为弹性模量较高的砾块结构、砾屑结构、块状结构礁灰岩与混凝土界面的剪应力跌落较砂屑灰岩-混凝土界面更为迅速。

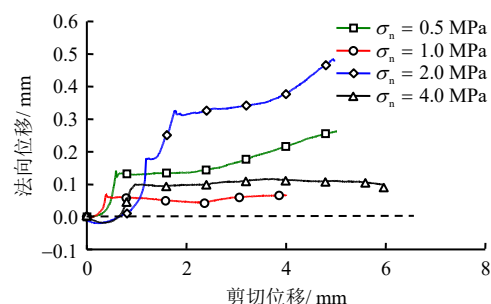
礁灰岩-混凝土界面在剪切破坏后,表现为滑动摩擦。不同结构类型的礁灰岩-混凝土界面,峰后剪胀不同(如图5所示)。但其残余剪切强度随剪切位移的变化趋势总体近似恒定(如图4所示)。试验结果显示,峰值剪应力随法向应力 σ_n 的增大而增大,同时,除砾屑灰岩-混凝土界面外,残余剪切强度也表现出随法向应力增加而增大的趋势。

试验结束后,对砾屑灰岩-混凝土试样的剪切破坏面观察发现,剪切破坏面位于砾屑灰岩内部(如图6所示)。在滑动摩擦阶段,由于砾屑灰岩强度低,孔隙率高,砾屑灰岩在高法向应力下发生压剪破碎,在剪胀曲线上表现为高法向应力下的显著剪缩,使得砾屑灰岩-混凝土剪切试样在滑动摩擦阶段的残余剪切强度并不随法向应力的增加而增大。

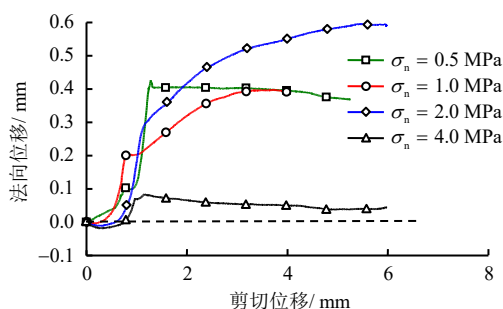
对比开展的红砂岩-C30混凝土黏结面剪切试验曲线如图7所示。试验结果表明,由于红砂岩-混凝土剪切试样在制样中存在微小的尺寸误差,低法向应力条件下,红砂岩-混凝土黏结面的变形协调期较礁灰岩-混凝土黏结面更长,剪应力-剪切位移曲线在初始阶段上升缓慢,初始刚度较小,随着法向应力的增加,变形协调速率增大,但总体上,其变形协调期(0.5~1.5 mm)远大于礁灰岩试样(小于0.3 mm)。

而后界面剪切刚度迅速增加,剪应力-剪切位移曲线呈线性增长并迅速达到剪应力峰值,峰值剪切强度对应的剪切位移为1.5~2.0 mm,远大于礁灰岩-混凝土试样;由于红砂岩的结构整体性高于礁灰岩,剪应力在达到峰值后迅速衰减,直至为0。

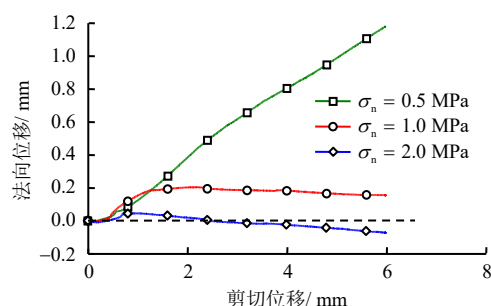
随后剪应力随剪切位移的增大呈现不同程度的增加,红砂岩-混凝土界面进入滑动剪切阶段,剪应力-剪切位移曲线表现平缓,剪应力保持稳定,形成较为恒定的残余剪切强度。其界面剪切破坏形态如图8所示。



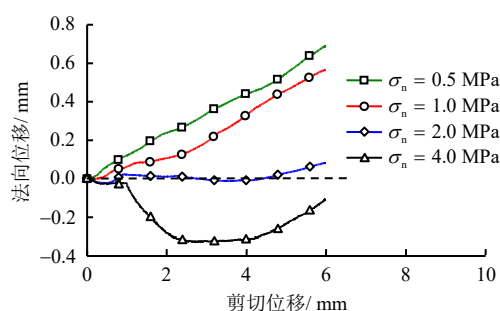
(a) 块状结构礁灰岩-混凝土试样



(b) 砾块结构礁灰岩-混凝土试样



(c) 砾屑结构礁灰岩-混凝土试样



(d) 砂屑结构礁灰岩-混凝土试样

图5 礁灰岩-C30 混凝土黏结面 CNL 剪切试验中剪胀曲线

Fig.5 Dilation of bonding interface between concrete(C30) and reef limestone in CNL shear test



图6 砾屑结构礁灰岩-C30 混凝土 CNL 剪切破坏面

Fig.6 Failure of bonding interface between concrete (C30) and rudstone limestone in CNL shear test

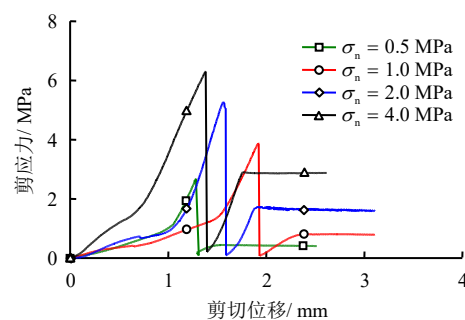


图7 红砂岩-C30 混凝土黏结面 CNL 剪切试验曲线

Fig.7 Shear test curves of the concrete(C30)-red sandstone in CNL shear test



图8 红砂岩-C30 混凝土 CNL 剪切破坏面

Fig.8 Failure of bonding interface between concrete(C30) and red sandstone in the CNL shear test

为对比不同沉积作用类型岩石与混凝土黏结面的剪切强度特性,试验依据摩尔-库仑准则整理出红砂岩、不同结构类型礁灰岩与 C30 混凝土界面的黏聚力和内摩擦角等强度参数(见图 9 及表 3)。如图 9 所示,拟合直线的斜率为界面内摩擦角的正切值,直线在竖轴上的截距为界面黏结力。结果表明,由于水泥浆在高孔隙率礁灰岩中的扩散填充作用,礁灰岩-混凝土黏结面的黏结力和内摩擦角均大于红砂岩-混凝土界面。

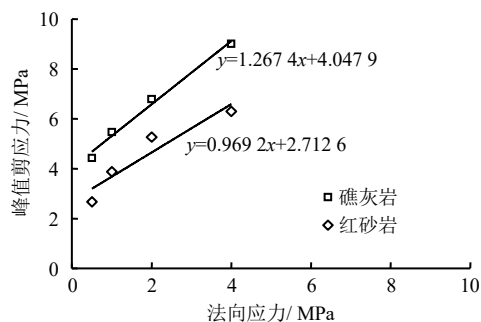
3.3.2 剪切试样黏结面的微观胶结特征

如图 10 所示,对块状结构礁灰岩、红砂岩与混凝土黏结界面开展的电镜扫描发现,由于砂岩的孔隙率较低,水泥浆在砂岩中的扩散范围较小,对砂岩的固化范围有限。

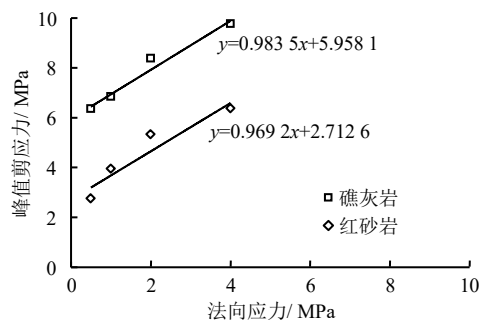
而对于礁灰岩,由于其孔隙率高,水泥浆在礁灰岩中的扩散影响范围大,形成与礁灰岩嵌固咬合的强胶结面。同时,由于礁灰岩的孔隙吸水作用明显,界面处的水泥浆水灰比降低,水泥浆硬化后,礁灰岩-混凝土界面处的水泥浆强度增幅高于红砂岩-混凝土界面,使得礁灰岩-混凝土黏结面的黏结力和内摩擦角均高于红砂岩-混凝土黏结面。

3.3.3 桩-岩强度比对界面剪切强度的影响规律

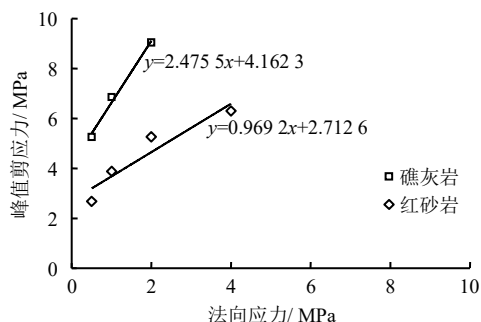
针对块状结构、砾块结构礁灰岩开展不同桩-岩强度比条件下的 CNL 剪切试验,规定界面强度比 $\Psi = f_{cu,k} / UCS_{avg}$, 其中, $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值 (MPa)。试样的相关力学参数如表 4 所示。



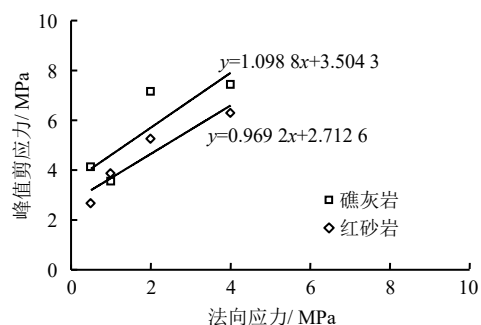
(a) 块状结构礁灰岩-混凝土试样



(b) 块状结构礁灰岩-混凝土试样



(c) 砾屑结构礁灰岩-混凝土试样

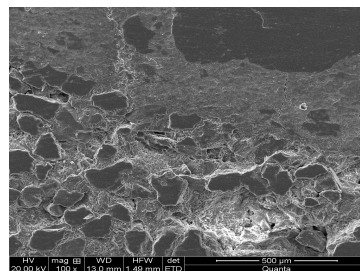


(d) 砂屑结构礁灰岩-混凝土试样

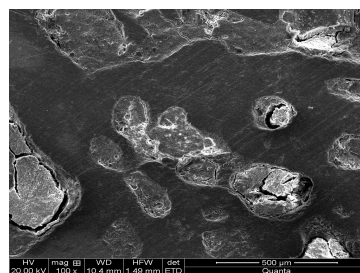
图9 礁灰岩-C30 混凝土黏结面 CNL 剪切试验结果
Fig.9 Test results of bonding interface between concrete(C30) and reef limestone in the CNL shear test

表3 礁灰岩-C30 混凝土黏结面剪切强度
Table 3 Shear strength of the bonding interface between concrete(C30) and reef limestone

岩性	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / (°)
块状灰岩	4.0	51.7
砾块灰岩	6.0	44.5
砾屑灰岩	4.2	68.0
砂屑灰岩	3.5	47.7
红砂岩	2.7	44.1



(a) 砂岩-混凝土黏结面



(b) 块状结构礁灰岩-混凝土黏结面

图10 砂岩、块状结构礁灰岩与混凝土黏结形态对比
Fig.10 Comparison of the bonding form between sandstone-concrete and framestone limestone-concrete

表4 礁灰岩-C30(C50)混凝土黏结面力学参数
Table 4 Relevant mechanical parameters of bonding interface between reef limestone and concrete(C30, C50)

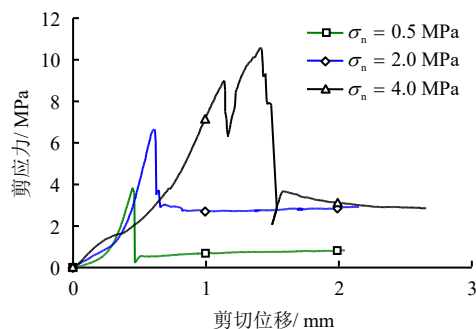
混凝土 强度等级	$f_{cu,k}$ /MPa	ψ	
		块状结构礁灰岩 UCS _{90°} = 8.9 MPa	砾块结构礁灰岩 UCS _{90°} = 18.6 MPa
C30	34.8	3.9	1.9
C50	54.3	6.1	2.9

块状结构、砾块结构礁灰岩与 C30、C50 混凝土黏结面的剪切试验曲线分别如图 4、11 所示。礁灰岩与两种强度等级混凝土黏结面的剪应力-剪切位移曲线的发展趋势相似,均包含 4 个阶段,即变形调整、剪应力增长、剪应力跌落和摩擦剪切。但相同法向应力条件下,块状结构、砾块结构礁灰岩-C50 混凝土界面破坏时的剪应力跌落速率高于礁灰岩-C30 混凝土界面。

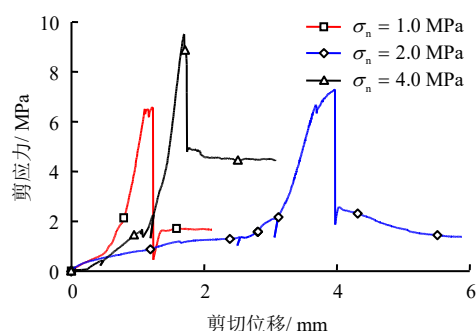
对比试验的处理结果如图 12 和表 5 所示,礁灰岩在不同强度比条件下的剪切强度并不相同。对于块状结构礁灰岩,低强度比时的黏结力大于高强度比条件,高强度比时的内摩擦角高于低强度比的剪切试样。而对于砾块结构礁灰岩,低强度比条件下的黏结力高于高强度比条件,强度比增加,而内摩擦角变化不大。

因此,针对弹性模量和饱和单轴抗压强度较低的礁灰岩地层,钻孔灌注嵌岩桩的桩身摩阻力设计不能仅仅依靠提高桩身混凝土的强度达到提高桩身界面剪切强度的目的,而需综合考虑礁灰岩结构类

型、桩-岩强度比等因素对桩-岩界面剪切强度的影响规律，避免造成材料的巨大浪费。

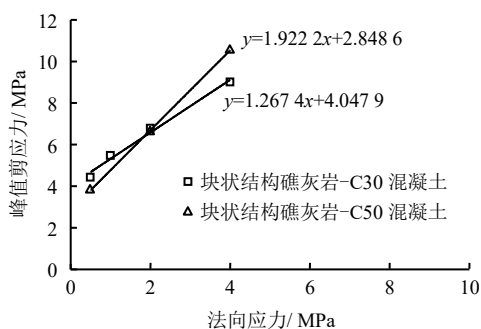


(a) 块状结构礁灰岩-C50 混凝土

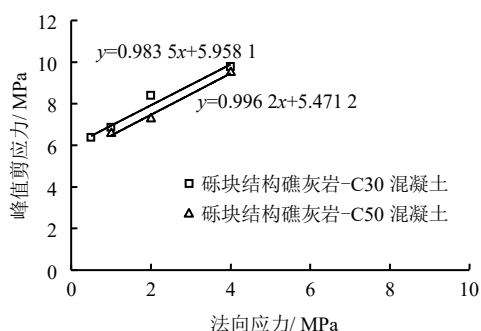


(b) 砾块结构礁灰岩-C50 混凝土

图 11 礁灰岩-C50 混凝土黏结面的 CNL 剪切试验曲线
Fig.11 Shear stress-shear displacement curves of bonding interface between reef limestone and concrete in CNL shear test



(a) 块状结构礁灰岩-混凝土



(b) 砾块结构礁灰岩-混凝土

图 12 礁灰岩与不同强度混凝土的黏结面剪切强度
Fig.12 Shear strength of bonding interface between reef limestone and concrete

表 5 礁灰岩-C30(C50)混凝土黏结面剪切强度
Table 5 Shear strength of bonding interface between reef limestone and concrete C30 (C50)

黏结类型	黏结力 c / MPa	内摩擦角 φ / (°)
块状-C30	4.0	51.7
块状-C50	2.8	62.5
砾块-C30	6.0	44.5
砾块-C50	5.5	44.9

4 结 论

礁灰岩-混凝土界面剪切试验结果表明，礁灰岩-混凝土界面剪切强度受礁灰岩的结构类型、桩-岩强度比等因素影响。

(1) 礁灰岩的结构类型、孔隙率及强度特性与礁灰岩-混凝土界面剪切强度存在明显的相关性。由于水泥浆在礁灰岩中的扩散加固作用，其与混凝土界面的抗剪强度均大于红砂岩-混凝土界面。

(2) 桩-岩界面强度比产生的界面剪切强度响应受礁灰岩结构类型的影响，低界面强度比时，块状结构、砾块结构礁灰岩与混凝土界面的黏结力均高于高强度比情形；界面强度比增大，块状结构礁灰岩与混凝土黏结面的内摩擦角增加，而砾块结构礁灰岩与混凝土黏结面的内摩擦角变化不大。

(3) 在礁灰岩地层中进行钻孔灌注嵌岩桩的桩身摩阻力设计时，应综合考虑礁灰岩结构类型、桩-岩强度比等因素对礁灰岩-混凝土界面剪切强度的影响规律，充分发挥礁灰岩材料的工程力学特性，避免造成设计及施工的巨大浪费。

参 考 文 献

- [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 Chao-jing, ZHAO Huan-ting, et al. The coral reef engineering geology of the spratly islands[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 赵焕庭. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
ZHAO Huang-ting. Physical geography of Nansha islands[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [3] 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.
- [4] NYLAND G. Detailed engineering geological investigation of North Rankin 'A' platform site[C]//

- Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Perth: [s. n.], 1988: 503-512.
- [5] EBELHAR R J, YOUNG A G, STIEBEN G P. Cone penetrometer and conductor pullout tests in carbonate soils offshore Africa[C]//Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Perth: [s. n.], 1988: 155-163.
- [6] ANGEMEER J, CARLSON E D, KLICK J H. Techniques and results of offshore pile load testing in calcareous soils[C]//Proceedings of 5th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1973.
- [7] DUTT R N, MOORE J E, MUDD R W, et al. Behavior of piles in granular carbonate sediments[C]//Proceedings of 17th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1985.
- [8] DUTT R N, CHENG A P. Frictional response of piles in calcareous deposits[C]//Proceedings of 16th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1984.
- [9] HAGENAAR J. The use and interpretation of SPT results for the determination of axial bearing capacities of piles driven into carbonate soils and coral[C]//Proceeding of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam: [s. n.], 1982.
- [10] GILCHRIST J M. Load tests on tubular piles in coralline strata[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(5): 641-655.
- [11] PUECH A, BUSTAMANTE M, AUPERIN L. Foundation problems in coral soils: a case history-the oil terminal of Matanzas, Cuba[C]//Proceedings of 22nd Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1990.
- [12] FAHEY M, JEWELL R J. Model pile tests in calcarenite[C]//Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Perth: [s. n.], 1988: 555-564.
- [13] GHAZALI F M, SOTIROPOULOS E, MANSOUR O A. Large-diameter bored and grouted piles in marine sediments of the Red Sea[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1988, 25(4): 826-831.
- [14] GHAZALI F M, BAGHDADI Z A, MANSOUR O A. A comparative study of pile foundations in coral formations and calcareous sediments in the Red Sea[C]//Proceedings of 9th Southeast Asian Geotechnical Conference. Bangkok: [s. n.], 1987.
- [15] 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.
- WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming. Enhanced mechanism of post-grouting pile in coral-reef limestone formations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 467-473.
- [16] 何思明, 卢国胜. 嵌岩桩荷载传递特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2598-2602.
- HE Si-ming, LU Guo-sheng. Study on load transfer characteristic of rock-socketed pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2598-2602.
- [17] 赵明华, 雷勇, 刘晓明. 基于桩-岩结构面特性的嵌岩桩荷载传递分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 103-110.
- ZHAO Ming-hua, LEI Yong, LIU Xiao-ming. Analysis of load transfer of rock-socketed piles based on characteristics of pile-rock structural plane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 103-110.
- [18] 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(1): 224-235.
- [19] 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 Hai-feng, ZHU Chang-qi, MENG Qing-shan, et al. Model test on rock-socketed pile in reef limestone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1581-1588.
- [20] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5368—2007 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5368—2007 Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [22] ZHI C T, WONG L N Y. Influences of normal loading rate and shear velocity on the shear behavior of artificial rock joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(6): 2165-2172.