

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.1501

礁灰岩嵌岩桩的模型试验

刘海峰^{1,2}, 朱长歧¹, 孟庆山¹, 王 星^{1,2}, 李小刚³, 吴文娟^{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; 3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 援建马尔代夫的马累 - 机场岛跨海大桥项目作为我国“一带一路”的经济建设规划之一, 桥梁桩基坐落于与我国南海珊瑚礁岩土体结构极为相似的珊瑚礁中。由于国内外开展珊瑚礁嵌岩桩的设计经验不足, 故需要通过试验方法获取珊瑚礁嵌岩桩的承载特性和相关数据。对取自马累岛和机场岛桥基位置的礁灰岩岩芯开展室内桩基承载特性试验研究。测得礁灰岩的密度、相对密度、饱和单轴抗压强度、三轴剪切强度等基本物理力学指标, 结合礁灰岩中嵌岩桩模型试验结果, 获得模型桩承载力随桩端位移的变化规律。试验结果表明: 桩岩界面先后经历弹性剪切、剪应力跌落和摩擦剪切 3 个阶段。在弹性剪切阶段, 界面剪切变形以弹性变形为主, 极限弹性位移 η 呈现出随弹性模量 E 增大而递减的趋势。在剪应力跌落阶段, 应力软化急剧, 并很快过渡到界面的摩擦剪切。通过试验发现, 在低围压下, 礁灰岩的残余侧摩阻力与饱和单轴抗压强度呈正相关关系。随着围压增大, 残余侧摩阻力受围压影响较大。

关 键 词: 礁灰岩; 嵌岩桩; 桩侧摩阻力; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2018)05 - 1581 - 08

Model test on rock-socketed pile in reef limestone

LIU Hai-feng^{1,2}, ZHU Chang-qi¹, MENG Qing-shan¹, WANG Xing^{1,2},
LI Xiao-gang³, WU Wen-juan^{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; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: As one of ‘the Belt and Road Initiative’ economic development program, the Cross-sea Bridge in Male-Airport island was constructed by China. The foundation of the bridge was located in coral reef which was similar to the geotechnical structure in South China Sea. Due to lack of design experience of rock-socketed pile in coral reef in China and overseas, it is necessary to obtain the load-bearing characteristics and relevant data of rock-socketed pile in coral reef by appropriate test method. Indoor experimental study was conducted on mechanical properties of reef limestone cores that came from pile foundation of the bridge in Male-Airport island. Basic physical and mechanical parameters such as density, relative density, saturate uniaxial compressive strength and triaxial shear strength of the reef limestone were tested. Combining the consequence with the results from model rock-socketed pile test on the reef limestone, the variation law of the bearing capacity with the pile tip displacement was obtained. The investigation suggested that the interface of the pile and rock experienced elastic shear, shear stress drop and friction shear stage. In the elastic shear stage, the shear deformation was mainly elastic deformation, and the ultimate elastic displacement decreased with the increase of the elastic modulus. In the stage of shear stress drop, the stress rapidly softened, and transformed to the friction shear stage. In the test, the shaft resistance of reef limestone was positively correlated with the saturate uniaxial compressive strength under low confining pressure. Meanwhile, shaft resistance was greatly influenced by the confining pressure when confining pressure rose.

Keywords: reef limestone; rock-socketed pile; side resistance of pile; model test

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No. 2013CB956104); 国家自然科学基金项目(No. 41330642, No. 41372316, No. 41472287, No. 41372318)

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2013CB956104) and the National Natural Science Foundation of China (41330642, 41372316, 41472287, 41372318).

第一作者简介: 刘海峰, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事海洋钙质土的工程特性方面的研究工作。E-mail: liuhaifengucas@163.com

1 引言

嵌岩桩作为一种特定的桩基类型具有单桩承载力高、沉降小、抗震性能好等优点,自我国 20 世纪 90 年代得到广泛的应用和研究^[1-3]。目前,国内的嵌岩桩设计多集中在陆源岩石,关于珊瑚岛礁中因生物成因形成的礁灰岩的嵌岩桩设计尚未涉及,随着国内外在珊瑚礁地区大规模工程建设的开展,关于该类岩体的嵌岩桩设计与研究将显得愈加重要^[4-5]。其中嵌岩桩在礁灰岩中的破坏模式和嵌岩段的极限承载力将是研究的热点。众多研究者对嵌岩桩的荷载传递机制和破坏模式进行了研究。何思明等^[6]根据桩体与围岩体接触面上的应力-应变关系以及剪滞模型,分析了桩岩相对刚度、外荷载等级对荷载传递特性的影响。赵明华等^[7]基于桩-岩结构面剪胀及破坏机制,建立适于弱质岩石嵌岩桩侧摩阻力传递模型,从理论上分析嵌岩桩桩径、桩-岩模量比、剪胀角对嵌岩桩荷载传递的影响。

在嵌岩桩设计时,根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[8]规定:嵌岩桩单桩竖向极限承载力由桩周土极限侧摩阻力和嵌岩段总极限阻力组成。规范考虑了嵌岩深径比、岩石的软硬程度和成桩工艺对计算的修正,但对应力条件、界面形状等考虑不够充分。关于承载力的确定,采用试桩法对于海洋环境的岛礁来说,运输风险大,成本高。为了确定桩的极限承载力,众多研究者开展了桩-岩石界面的常法向应力条件(CNL)和常法向刚度条件(CNS)下的力学特性研究^[9-10]。Indraratna 等^[9]的试验研究表明,在其他条件相同的情况下,常法向应力条件下的剪胀角大于常法向刚度条件下的值。常法向刚度条件下的剪切应力峰值大于常法向应力条件下的值。Ooi 等^[10]对礁灰岩进行的常法向刚度直剪试验表明,界面形状会对礁灰岩的剪切强度产生影响,常法向刚度条件下的剪切强度与岩样的强度有关。

但仅考虑到采用平面内的剪切破坏模拟桩周的圆柱面破坏是不合适的,不能准确地反映剪切应力在桩周的分布规律。对此,研究者们^[11-12]在试验方法上进行了改进。王耀辉等^[11]采用室内模型试验方法,在岩石中浇筑直径为 162 mm、长为 500 mm 的模型嵌岩桩,嵌岩桩的内部为钢管,在钢管与岩石之间注入水泥浆,钢管上安装电阻应变计以测量在荷载试验中桩身的轴向应变,对桩岩石界面的摩阻特性进行研究。同时,为了充分考虑岩石在实际地层里的应力条件,叶琼瑶等^[12]在软岩嵌岩桩的模

型试验研究中,采用改造的静三轴压力室对岩样施加围压和轴向压力来模拟岩体在实际地层里的三向受压状态。本次试验同样采用了模型试验的方法,对压力室进行了改造,能够完全避免岩样与水接触,有效防止水对岩样的渗透和软化作用。

2 礁灰岩的物理力学性质试验

本次试验所采用的礁灰岩岩芯均来自于拟建桥址区的 2[#]、13[#]、30[#]钻孔。依据钻孔信息得到的岩性特征及分层详见表 1。

表 1 场地地层
Table 1 Site formation

地层 编号	地层厚度/m		地层 名称	地层 编号	地层厚度/m		地层 名称
	范围值	平均值			范围值	平均值	
1	1.30~11.10	4.93	填土 (Q4ml)	(5-2)a	3.20~14.80	10.10	砾砂混 砾块
2	0.40~0.50	0.45	礁块石	(5-2)b	16.00	16.00	砾砂混 砂砾
3	3.00~18.20	10.48	砾砂混 砾块	5-3	13.40~17.50	15.13	礁灰岩
4-1	2.40~17.20	7.74	礁灰岩	6-1	1.00~17.70	5.53	礁灰岩
4-2	2.30~6.30	4.27	礁灰岩	6-2	2.00~24.10	7.50	礁灰岩
4-3	4.00~9.80	6.90	礁灰岩	6-3	0.80~14.50	5.88	礁灰岩
(5-1)a	0.90~13.00	9.82	礁灰岩	7-1	1.10~38.30	14.82	角砾混 砾块
(5-1)b	3.60~18.90	8.58	礁灰岩	7-2	0.70~8.70	4.77	礁灰岩
(5-1)c	9.60~13.00	11.30	礁灰岩				

通常,礁灰岩从结构上划分为 5 类,即块状结构、砾块结构、砾屑结构、砂屑结构、包粒结构^[4]。本次试验中的礁灰岩类型也涵盖上述 5 种。在以往的研究中,研究者们^[13-14]通过试验发现结构参数对钙质沉积物的力学性质的影响很大。Zhu 等^[13]在对取自南海海域的胶结钙质沉积物的研究中发现,密度和胶结度是海滩岩的主要参数,海滩岩的峰值抗压强度与密度和胶结度均成正相关关系。Clark 等^[14]也曾尝试了对此类生物灰岩进行工程分类,考虑的主要参数为颗粒大小、强度以及碳酸盐含量。

鉴于此,为了得到相同结构礁灰岩的力学特性。考虑到珊瑚礁的取芯率较低,试验中取较为完整的礁灰岩岩芯或相邻深度结构相同的礁灰岩岩芯,加工制样成标准 50 mm×100 mm 的圆柱体试样和模型嵌岩桩试样。通过试验测试相同结构的礁灰岩的密度、饱和单轴抗压强度、饱和三轴剪切强度等基本物理力学指标。在试验中,岩样的编号为 A~H,相关试验与岩样编号对应。试验所用礁灰岩岩样的结构类型和岩芯状态如图 1 所示(由于对 3 个钻孔所得岩芯进行试验编录时,存在较多的字母重

复，图中标准圆柱体试样上的标识与文中的岩样编号不对应，具体可见图片中标注的岩样编号）



图 1 礁灰岩岩样

Fig.1 Reef limestone samples

礁灰岩试样 C、E、G 均为块状珊瑚。岩样 C 的珊瑚质地硬脆，密度较大，内部有较多微小孔隙。岩样 E 为星孔珊瑚，由排列紧密的格栅结构构成内封闭孔隙，其密度较小。岩样 G 为小星类珊瑚，珊瑚没有明显的格栅结构，但充满细微孔隙，其密度较低，吸水性较强。

在显微镜下对礁灰岩试样 A、B、D、F、H 的薄片观察可知，试样 A 中存在大量的溶孔，溶孔边界有针状文石晶体发育，但完全未填充溶孔。试样 B 中，同样存在溶孔，溶孔内有颗类状方解石发育。作为海相胶结的典型方式，在试样 B 的薄片，可清晰地观察到珊瑚藻的生殖窝结构。试样 D 中有凝块间的胶结，同时也观察到胶结物被再次溶蚀的现象。在试样 F 中，存在溶孔，溶孔周边有针状文石发育，部分溶孔已被针状文石充满。试样 H 中出现大量排列紧密的珊瑚藻结构，并发现有孔虫等附礁生物，局部范围的珊瑚藻出现开裂，珊瑚藻内有溶

蚀孔洞。

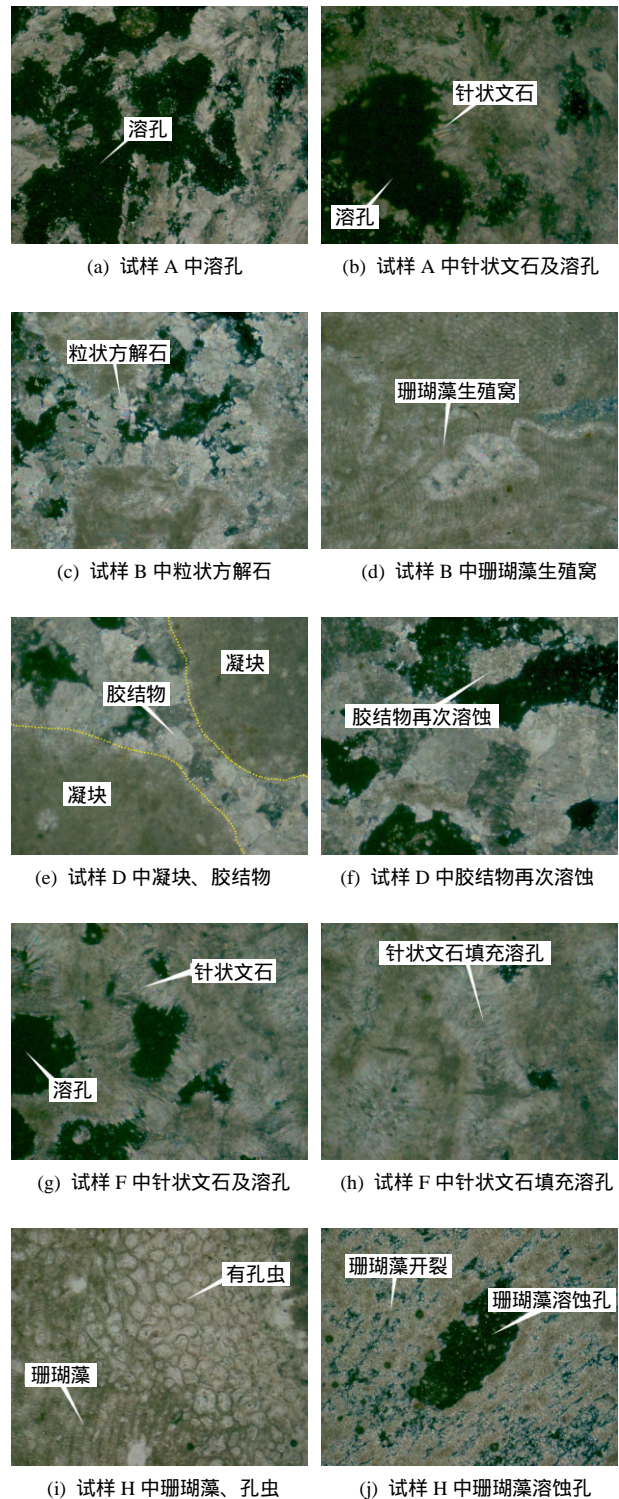


图 2 礁灰岩的正交偏光图像

Fig.2 Crossed polarization microphotographs of reef limestone

2.1 密度和相对密度试验

试验参照《水电水利工程岩石试验规程》(DL/T5368-2007)^[15]相关内容进行。由于在以往对胶结钙质沉积物的密度试验中，采用蜡封法进行

密度测试时, 试样表面的空洞多被石蜡灌满, 致使试样的测试体积值偏小, 使得密度值偏大。为了避免上述试验误差, 本次试验直接采用量积法。对制作成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准试样进行编号; 采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺量取标准试样的尺寸, 并将岩样在烘箱内进行干燥处理后称其质量, 测试结果见表 2 所示。依据《土工试验规程》(SL237-1999)^[16]规定, 将礁灰岩试样研磨成粒径小于 0.075 mm 的砂样, 利用比重瓶法进行相对密度试验, 试验中采用煤油作为试液。由于钙质沉积物的成分单一, 其测试结果在 2.65~2.68 之间。

表 2 礁灰岩的密度
Table 2 Densities of reef limestone

试件编号	密度 /(g/cm ³)	试件编号	密度 /(g/cm ³)
A	1.67	E	1.36
B	1.85	F	2.03
C	1.90	G	1.50
D	2.10	H	2.13

2.2 单轴抗压强度试验

采用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。岩样为直径 50 mm、高度 100 mm 的标准样品, 试验采用位移法控制加载速率, 加载速率为 0.002 mm/s。通过试验测出礁灰岩岩样在轴向压力下的极限应力、弹性模量, 共进行 8 组试验, 测试结果见表 3。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)^[17], 依据饱和单轴抗压强度 f_{rk} 的大小对工程岩体进行分类, 按 $f_{rk} < 5 \text{ MPa}$, $5 \text{ MPa} < f_{rk} < 15 \text{ MPa}$, $15 \text{ MPa} < f_{rk} < 30 \text{ MPa}$ 将岩样分为极软岩 A、B, 软岩 C、D、E, 较软岩 F、G、H。

表 3 礁灰岩的饱和单轴抗压强度
Table 3 Saturated uniaxial compressive strength
of reef limestone

试件 编号	饱和单轴 抗压强度 f_{rk} /MPa	弹性 模量 E /GPa	试件 编号	饱和单轴 抗压强度 f_{rk} /MPa	弹性 模量 E /GPa
A	4.9	2.1	E	15.0	10.6
B	5.0	2.6	F	18.7	18.7
C	8.6	3.2	G	22.2	15.6
D	14.7	6.3	H	26.3	9.0

2.3 三轴剪切试验

利用美国 MTS 公司生产的 MTS815.03 型压力试验系统, 对直径 50 mm、高度 100 mm 的礁灰岩试样进行饱和状态下的三轴剪切试验, 共进行了 7

组试验。试验结果显示, 礁灰岩在饱和状态下的抗剪强度 c 值在 1.2~3.3 MPa 间, 内摩擦角 φ 介于 26.5°~38.5°。

试验结果可以看出, 礁灰岩的物理力学性质差异较大。这是由于礁灰岩作为一种生物灰岩, 是由造礁石珊瑚遗骸与附礁生物及藻类通过海相胶结的方式形成的。不同种类的珊瑚具有不同的生物结构, 使其密度和结构强度不同, 如具有封闭格栅结构的礁灰岩样 E 的密度仅为 1.36 g/cm³, 但由于结构排列紧密, 其抗压强度较高。

除此之外, 胶结程度和溶蚀作用也会对礁灰岩的密度和强度产生影响, 强胶结的礁灰岩中, 钙质碎屑紧密填充珊瑚骨架的空隙, 使得礁灰岩的孔隙率较小。而在溶蚀作用下, 礁灰岩中会形成与外界连通的孔洞, 使得孔隙率提高。如试样 A 中溶孔发育明显, 溶孔周边仅有强度较弱的针状文石发育, 未完全填充孔隙, 导致试样强度较低; 试样 H 中出现紧密排列的珊瑚藻结构, 在皮壳状珊瑚藻对珊瑚肢体的紧密绑结作用下, 使其强度较高。

珊瑚礁地形中, 珊瑚的种类繁多, 不同相带的礁灰岩结构不同, 这也使得礁灰岩的不均匀性是一种普遍的现象。

3 模型桩试验

礁灰岩在整个地层分布中, 随着深度变化, 具有软硬互层, 相带交替的特点。在桩身承载力设计中依据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[8]的规定, 单桩竖向极限承载力标准值由总极限侧阻力标准值和总极限端阻力标准值确定。其中, 总极限侧阻力标准值需由不同地层中的桩侧摩阻力进行分层叠加计算。

据此, 试验对不同深度处、不同结构和强度的礁灰岩进行分段研究。通过模型摩擦桩试验, 研究地层围压和礁灰岩强度对桩侧摩阻力的影响规律, 得到不同物理力学性质礁灰岩的极限侧摩阻力标准值。

3.1 模型桩的制作

模型桩的制作方法和实际的钻孔灌注桩的施工顺序类似。考虑到柱状岩芯的不规则性, 先将圆柱岩样的上、下底面切平, 将岩芯切磨成直径为 84 mm、高为 80~110 mm 的圆柱样, 在圆柱中心钻取直径为 30 mm 的圆孔(图 3), 为了避免端承力的产生, 将钻孔沿纵向贯穿。在孔中心放置直径为 24 mm 的不锈钢螺纹杆, 杆底部与岩样下端面齐平, 顶部高出上端面 5 mm, 杆与孔壁的间隙为 3 mm。



图 3 岩芯钻孔

Fig.3 Boreholes of the cores

为了保证螺纹杆在模型桩中的垂直度，灌浆在水平的工作面上进行，利用夹具将螺纹杆和岩样固定。在杆与礁灰岩孔壁的空隙间填充水泥浆，灌浆采用高强快硬的水泥，水泥浆在搅拌时加适量减水剂，使水泥浆的水灰比小、流动性大。利用长颈漏斗从多个位置灌浆，保证螺纹杆和礁灰岩孔壁间的空隙充满水泥浆。水泥浆凝结硬化后，水泥和螺纹杆机械咬合紧密，整体刚度大，能够避免在荷载试验中桩身构件从混凝土中脱落。浇筑同龄期的水泥浆圆柱试样，进行单轴压缩试验。获取模型桩的相关力学参数如表 4 所示。

表 4 模型桩的相关力学参数

Table 4 Relevant mechanical parameters of model piles

材料	弹性模量 / GPa	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / (°)	单轴抗压强度 / MPa
礁灰岩	1.8 ~ 18.7	1.2 ~ 3.3	26.5 ~ 38.5	2.8 ~ 26.3 (饱和状态)
水泥浆体	10.2	/	/	25.0
螺纹杆	206.0	/	/	530.0

3.2 试验装置和试验方法

试验装置如图 4 所示，主体结构为专门改造的压力室。在上盖板中心处设置有中心导向孔，导向管可从中心导向孔穿出，导向管底部与岩样上底面贴合。岩样下端面设置有垫环，垫环的高度为 20 mm，内径为 50 mm，可满足模型桩达到破坏时的峰值位移活动范围。利用乳胶膜将导向管、岩样、垫环和底座嵌套在一起，在下部用橡皮筋将乳胶膜与底座箍紧，上部用橡皮筋将乳胶膜与导向管底部圆环箍紧。导向杆从导向管插入，端部作用在模型桩顶部。

试验在岩土力学与工程国家重点实验室的 TKA 全自动应力路径三轴仪上进行。反力架压头作用在导向杆顶部，轴向荷载通过反力架底部的千斤顶施加，桩顶位移通过测量千斤顶位移得到，桩端

荷载通过压头处的荷载传感器测得，荷载传感器的量程为 100 kN。围压通过压力体积传感器控制。试验采用位移控制法施加轴向荷载，加载速率为 0.04 mm/min。由于试件的尺寸较小，可忽略桩侧摩阻力在桩身的不均匀分布，通过取平均值的方法得到不同试验阶段的桩侧摩阻力。即试验中测得桩身的轴向荷载 F 和模型桩的桩侧面积 S ，通过 F/S 得到桩侧摩阻力随桩顶位移的变化规律。

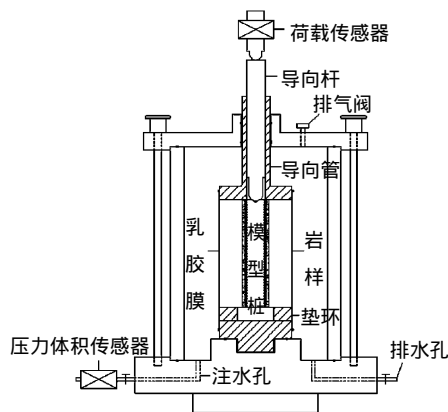


图 4 模型试验装置简图

Fig.4 Equipment sketch of model test

3.3 结果分析

桩侧摩阻力与桩端位移关系曲线表明，在试验初期，加载头与桩顶存在一个接触压密的过程。试验曲线表现为缓慢上升，斜率较小。随后，试验曲线斜率增大，并稳定在一恒定的斜率直至峰值破坏，达到峰值破坏时桩顶的位移在 2 ~ 5 mm 之间。桩-岩石界面发生破坏以后，桩的承载力迅速降低并趋于稳定，此时桩的承载力由残余侧摩阻力提供。试验曲线如图 5 所示。

试验结果如表 5 所示，试验中礁灰岩的残余侧摩阻力在 609 ~ 1 996 kPa 间，综合平均值为 1 117 kPa。残余侧摩阻力与围压和礁灰岩强度大小密切相关。在围压为 500 kPa 时，饱和单轴抗压强度分别为 15.0、26.3 MPa 的试样 E 和 H 的残余侧摩阻力分别为 609、995 kPa，说明在低围压下，岩样的强度和摩阻力的大小呈正相关关系。在围压为 1 000 kPa 时，不同饱和单轴抗压强度的试样 A、C、D 的残余侧摩阻力值比较接近，说明随着围压的增大，岩样的强度对残余侧摩阻力的影响减弱。

同时，同为较软岩的试样 H、F、G 分别在围压为 500、1 000、2 000 kPa 的条件下进行试验时，所得的残余侧摩阻力分别为：995、1 283、1 996 kPa。说明嵌岩摩擦桩破坏时，随着围压的增大，界面剪切强度增大。这是由于嵌岩摩擦桩的破坏发生在岩

样和水泥胶结面,高围压增加了界面法向应力,因此界面剪切强度增大,从而提高了桩侧摩阻力(图6)。

模型试验中,桩侧摩阻力和桩端位移关系可以绘制成一条曲线,理想的桩侧摩阻力和桩端位移曲

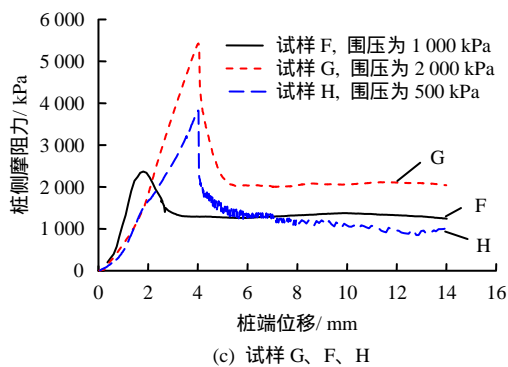
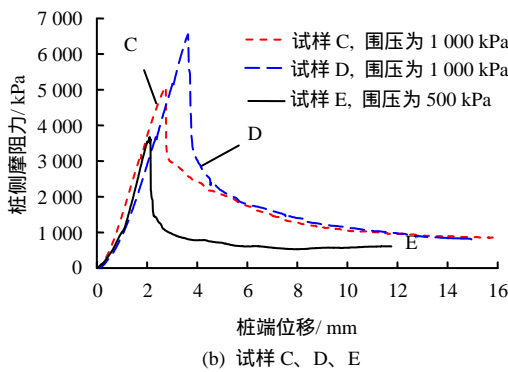
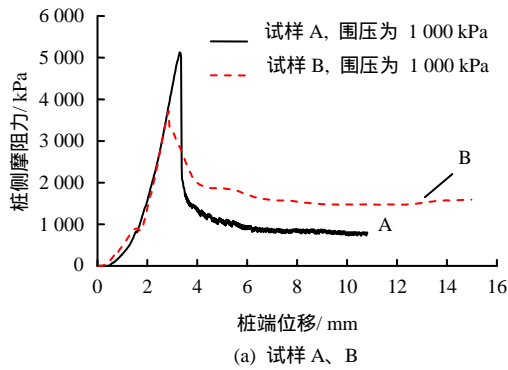


图5 模型桩的桩侧摩阻力-桩端位移关系曲线

Fig.5 Relationships between pile side friction and pile end displacement of model piles

表5 模型桩试验结果汇总

Table 5 Summary results of model piles

试件编号	饱和单轴抗压强度 / MPa	围压 / kPa	峰值摩阻力 / kPa	残余摩阻力 / kPa
A	4.9	1 000	5 130	880
B	5.0	1 000	3 718	1 475
C	8.6	1 000	5 080	867
D	14.7	1 000	6 558	834
E	15.0	500	3 621	609
F	18.7	1 000	2 371	1 283
G	22.2	2 000	5 425	1 996
H	26.3	500	3 826	995

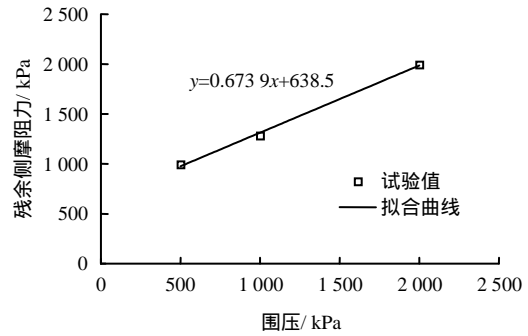


图6 残余侧摩阻力与围压的关系

Fig.6 Relationship between residual pile side friction and confining pressure

线如图7所示,通过曲线可以直观地观察模型桩在试验过程中承载力的变化。可将试验曲线分为3个阶段:第1阶段为弹性剪切阶段,试验初期为加载头与桩顶的接触压密的过程。剪应力增长缓慢而剪应变增长较快,试验曲线表现为缓慢上升,斜率较小。随后,桩端荷载增加,剪切应力增加,剪切变形以明显的弹性变形为主,在桩周应力尚未达到模型桩和礁灰岩界面的抗剪强度之前,此阶段为界面弹性剪切,试验曲线斜率较大,并稳定在一恒定的斜率直至峰值破坏。第2阶段为剪应力跌落阶段,在试验曲线达到峰值时,模型桩和礁灰岩界面开始出现剪切破坏,并由于剪切破裂面的迅速扩展,使得桩身侧摩阻力迅速下降,在曲线中表现为急剧的界面应力软化。第3阶段为摩擦剪切阶段,剪切破裂面贯通,剪应力跌落停止,曲线斜率突然变缓,剪切应力随剪切应变的增加逐渐达到残余强度,试验曲线表现平稳。

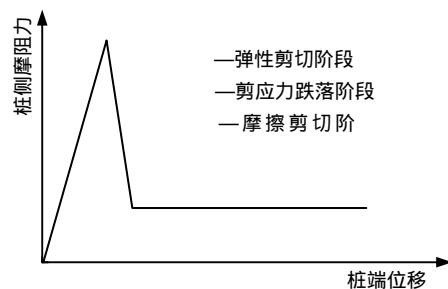


图7 理想荷载-位移关系曲线

Fig.7 Ideal load-displacement curve

桩岩界面在弹性剪切时,剪切变形以弹性变形为主。模型桩峰值侧摩阻力对应的位移称为极限弹性位移 η ,由于在模型桩达到峰值侧摩阻力以前,桩岩界面处于弹性变形阶段,界面吸收弹性能,岩样的弹性模量 E 与 η 密切相关,在相同围压条件下,不同弹性模量的试样A、B、C、D、F所对应的极

限弹性位移 η 不同，呈现出极限弹性位移 η 随弹性模量 E 的增大而递减的趋势（图 8）。

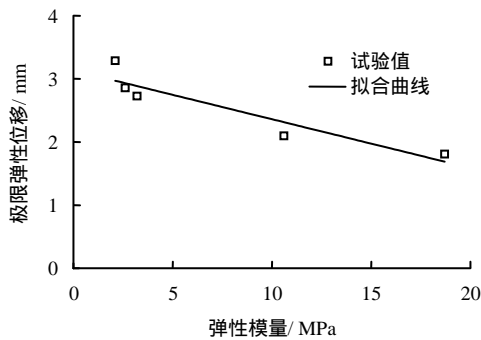


图 8 极限弹性位移与弹性模量的关系

Fig.8 Relationship between limit of elastic displacement and elasticity modulus

在设计中，大直径桩的桩端极限弹性位移 η ，可作为桩身极限承载力和桩身破坏的参考依据。

依据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[8]规定，当根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系确定单桩竖向极限承载力标准值时，宜按下式估算：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中： Q_{sk} 为总极限侧阻力标准值； Q_{pk} 为总极限端阻力标准值； q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值； q_{pk} 为极限端阻力标准值； l_i 为桩周第 i 层土的厚度； u 为桩身周长； A_p 为桩端面积。

根据本次室内嵌岩桩模型试验数据，结合场区岩土物理力学性质试验、原位测试以及场地礁灰岩的工程地质分层特征的综合分析的基础上，在缺少场地试桩资料的情况下，借鉴其他工程的有关工程经验，对各岩土层中礁灰岩层的极限侧摩阻力标准值提出设计建议值（见表 6）。

表 6 极限侧摩阻力标准值的设计建议值

Table 6 Suggested design values of limited side friction standard value

地层编号	地层名称	标准点荷载强度指数 I_{S50} / MPa	饱和单轴抗压强度 f_{tk} / MPa	极限侧摩阻力标准值的设计建议值 q_{sik} / kPa
4-1	礁灰岩	3.45	10.73	100 ~ 120
4-2	礁灰岩	2.87	/	80
4-3	礁灰岩	2.80	10.10	70
(5-1) a	礁灰岩	2.33	10.02	220 ~ 240
(5-1) b	礁灰岩	2.47	7.50	150 ~ 180
(5-1) c	礁灰岩	1.91	5.93	80 ~ 120
5-3	礁灰岩	4.97	9.44	90 ~ 140
6-1	礁灰岩	3.26	10.55	180 ~ 200
6-2	礁灰岩	2.83	8.42	110 ~ 170
6-3	礁灰岩	2.73	5.53	90 ~ 120
7-2	礁灰岩	2.59	10.35	120 ~ 150

4 结 论

珊瑚礁作为一种特殊的岩土介质，孔隙率高，具有明显的不均匀性及软硬互层等特点。在目前现场试桩成本高，工作条件恶劣的情况下，采用围压可控的模型桩试验可以得到可供设计使用的试验结果：

(1) 礁灰岩模型摩擦桩试验表明，礁灰岩摩擦桩具有较高的承载力，可以作为珊瑚礁地形的一种基础形式。鉴于桩身在低应变下的突然破坏和安全储备考虑，在设计中应以桩身残余侧摩阻力值作为极限侧摩阻力标准值的设计参考。

(2) 桩身侧摩阻力的发挥经历 3 个阶段，即弹性剪切阶段、剪应力跌落阶段和摩擦剪切阶段。在弹性剪切阶段，桩侧摩阻力随桩端位移增加迅速，达到峰值强度时的桩端位移较小，此阶段的剪切变形以弹性变形为主。在峰值处，桩身出现剪切破坏，破裂面迅速贯通，应力急剧软化，该过程为剪应力跌落阶段。破裂面完全贯通后，桩岩界面为摩擦剪切，此阶段的桩身残余摩阻力较为稳定。

(3) 桩身残余侧摩阻力的大小与礁灰岩的强度和地层围压有关，在低围压下，残余摩阻力大小与礁灰岩的饱和单轴抗压强度呈正相关关系，当围压增大时，残余侧摩阻力提高。在高围压下，不同饱和单轴抗压强度的试样，其桩身残余侧摩阻力值比较接近，说明在高围压下，饱和单轴抗压强度对桩身残余侧摩阻力影响减弱。

(4) 在弹性剪切阶段，桩岩界面以弹性变形为主，界面吸收弹性能，岩样的弹性模量 E 与极限弹性位移 η 密切相关。在相同围压条件下，不同弹性模量的试样所对应的极限弹性位移 η 不同，呈现出极限弹性位移 η 随弹性模量 E 的增大而递减的趋势。

参 考 文 献

- [1] 张建新, 叶红东, 杜海金, 等. 嵌岩桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1222 - 1225.
ZHANG Jian-xin, YE Hong-dong, DU Hai-jin, et al. Some problems in design of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1222 - 1225.
- [2] 张建新, 吴东云, 杜海金. 嵌岩桩承载性状和破坏模式的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 320 - 323.
ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun, DU Hai-jin. Testing study on bearing behaviors and failure mode of rock-

- socketed pile[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 320 - 323.
- [3] 刘兴远, 郑颖人, 林文修. 关于嵌岩桩理论研究的几点认识[J]. **岩土工程学报**, 1998, 19(5): 118 - 119.
LIU Xing-yuan, ZHENG Ying-ren, LIN Wen-xiu. Some cognition on the theoretical research of rock-socketed piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 19(5): 118 - 119.
- [4] 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, ZHAO Huan-ting, ZHU Chang-qi, et al. The coral reef engineering geology of Spratly Islands[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [5] 赵焕庭. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
ZHAO Huang-ting. The natural geography of the Spratly Islands[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. JGJ94-2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [9] INDRARATNA B, HAQUE A, AZIZ N. Laboratory modeling of shear behavior of soft joints under constant normal stiffness conditions[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1998, 16(1): 17 - 44.
- [10] OOI L H, CARTER J P. A constant normal stiffness direct shear device for static and cyclic loading[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1987, 10(1): 3 - 12.
- [11] 王耀辉, 谭国焕, 李启光. 模型嵌岩桩试验及数值分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(8): 1691 - 1697.
WANG Yao-hui, TAN Guo-huan, LI Qi-guang. Test and numerical analysis of model rock-socketed pile[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1691 - 1697.
- [12] 叶琼瑶, 黄绍铿. 软岩嵌岩桩的模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(3): 461 - 464.
YE Qiong-yao, HUANG Shao-keng. Model testing study on rock-socketed piles in soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 461 - 464.
- [13] ZHU CHANGQI, LIU HAIFENG, ZHOU BIN. Microstructures and the basic engineering properties of beach calcarenites in South China Sea[J]. **Ocean Engineering**, 2016, 114(1): 224 - 235.
- [14] 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]. **Geotechnique**, 1977, 27(1): 93 - 99.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.