

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0683-07

珊瑚岛礁工程地球物理方法初探

崔永圣¹, 马 林¹, 刘宏岳², 黄佳坤²

(1. 海军工程设计研究院, 北京 100070; 2. 福建省建筑设计研究院, 福州 350001)

摘 要: 梳理了国内珊瑚岛礁岩土工程物探调查的现状, 结合钻孔原位测试, 采用成熟的物探方法对珊瑚岛礁进行综合地球物理勘探, 说明了各种物探方法的场地适应性和效果。主动源面波探测效果好, 面波视速度剖面很好地反映了珊瑚碎屑层与礁灰岩的地层层序; 水域地震反射波对外礁坪、向海坡、外海的沉积层界面反映清晰, 发现某岛礁的西南、东北端的水底形态不对称, 沉积层差异大, 可能与珊瑚礁成长的海洋水动力环境有关。孔内电阻率原位测试数据表明, 松散珊瑚碎屑层与礁灰岩的电阻率差异很小, 在同一数量级, 总体上无法采用电法类勘探方法进行地质分层。

关 键 词: 珊瑚岛礁; 工程物探; 高密度电阻率法; 主动源面波; 水域地震反射波法; 钻孔原位测试

中图分类号: S 922

文献标识码: A

Discussion on geophysical methods applied to investigation of coral island and reef

CUI Yong-Sheng¹, MA Lin¹, LIU Hong-yue², HUANG Jia-kun²

(1. Navy Institute of Engineering Design & Research, Beijing 100070, China;

2. Fujian Provincial Institute of Architectural Design & Research, Fuzhou 350001, China)

Abstract: The thesis summaries China's recent situations of geophysical prospecting in coral island and reef. Combined with the In-situ borehole test, three regular geophysical methods are adopted in the investigation of a coral island; their applicabilities and results are specified. It is shown that the active surface wave(ASW) and marine seismic reflection(MSR) can achieve satisfactory results; but the resistivity method is not suitable for coral island and reef. Apparent velocity profiling of ASW method figures out the geological stratigraphic sequence of coral clastic deposit and underlying reef limestone. MSR does well in the distinguishing the deposit interface of outer reef flat, seaward slope, offshore and discovers the unsymmetrical structure of sea bottom, deposit between the northeast and southwest survey line, which is probably related with the marine hydrodynamics in the coral growth and development. In-situ borehole test shows that the loose coral clastic sediments has little difference in electric resistivity with the reef limestone; therefore the resistivity method is overall not suitable for the geotechnical profiling for the reason of the same order of magnitude in electrical resistivity.

Key words: coral island and reef; engineering geophysical prospecting; high-density resistivity method; active surface wave; marine seismic reflection; in-situ borehole test

1 引 言

珊瑚礁是指造礁珊瑚群体死后骨骼和外壳聚集在一起形成的沉积构造, 是一种特殊的岩土类型。在珊瑚礁的岩土工程特性研究中是现代岩土工程的一个新课题。珊瑚岛礁形成过程与陆地不同, 受地质环境、海洋环境、造礁生物种类、生长条件影响较大, 形成的地形、地貌和地层岩性与陆地相比有其特殊性。珊瑚岛礁以生物层级为主, 在海洋动力

条件下由珊瑚等海洋生物生长、充填和堆积而成的稳定地质体。

20 世纪 70 年代我国才开始在珊瑚礁上进行工程建设, 开展了珊瑚礁物理力学性质的初步调查研究, 以后 10 多年随着南沙综合科考的开展, 珊瑚礁工程地质研究有进一步的推进, 开展了一系列珊瑚礁工程地质性质的现场测试和室内试验, 进一步认识了礁砂土的 3 个突出的土力学特点, 即高孔隙率、高摩擦角和低强度值, 并陆续发表了一些论文和专

收稿日期: 2014-01-24

第一作者简介: 崔永圣, 男, 1960 年生, 本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: bjdasheng@sina.com

著^[1-3]。

珊瑚礁是一种特殊的岩土类型,孙宗勋等^[1]提出新学科-珊瑚礁工程地质学,介绍了珊瑚礁和珊瑚礁工程地质学的概念和研究概况和该学科的方向任务以及面临的主要问题。中国科学院武汉岩土力学所对珊瑚礁的工程地质特性做了一些研究工作,主要集中在珊瑚礁的土力学性质和水文地质调查研究方面。珊瑚岛礁岩土层的地球物理参数,如弹性波波速、电阻率等以及利用各种地球物理参数进行地球物理勘探的工作鲜见报道^[4-7],总体上研究内容很少,所做工作很有限。

近年来对珊瑚岛礁工程地质特征研究深度不断加大,地球物理勘探技术也在尝试,本文基于已有地球物理勘探资料研究,对主动源面波、水域地震反射波和电阻率方法在珊瑚岛礁上适用性进行探讨,寻找研究珊瑚岛礁有效方法,以期今后勘察工作起到借鉴作用。

2 珊瑚岛礁岩土工程特征

根据勘察资料,便于后续分析研究,对珊瑚岛

礁进行必要的工程地质分区和地层划分(见图1),有助于对珊瑚岛礁工程地质特征深入研究。

2.1 工程地质分区

珊瑚岛礁工程地质分区,以地貌单元为基础,结合地层岩性、成因和分布规律,在平面上分为沙洲区、灰沙岛区、泻湖区、礁坪区和人工回填区五大区域(见图1)。沙洲区:礁坪上沙洲分布区域,由松散珊瑚碎屑覆盖,不长植物或植物稀少的小范围陆地区域,形成年代较新,主要由珊瑚砂构成。灰沙岛区:岛屿上的灰沙岛分布区域,由沙洲逐步发育而成。泻湖区:礁坪环绕的泻湖所占有的区域,是礁坪部分和湖内生物碎屑的最终和主要堆积区,主要由珊瑚碎屑构成,具有礁后沉积的特征。礁坪区:接近海平面的珊瑚礁生长和分布区域,由礁组合构成,高潮时淹没,低潮时大部分露出水面,局部存有浅海水。人工回填区:在礁坪上后期由人工进行回填碾压形成的人造陆地区域。为了便于今后研究,将回填场地划分为独立的岩土工程特性区域是有必要的。

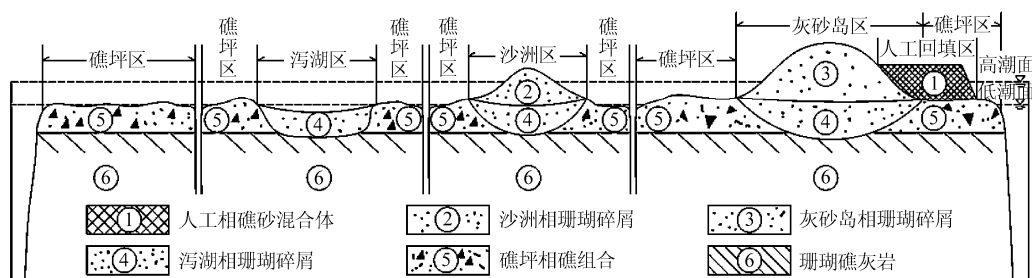


图1 珊瑚岛礁工程地质分区及剖面示意图

Fig.1 Sketch of engineering geological section of coral island and reef

2.2 地层划分

在工程地质分区的基础上,按照地层岩性特征、成因类型和沉积顺序,珊瑚岛礁地层由上至下分为以下6层(见图2)。层①为人工回填碾压层,分布在回填区域内。人工堆积形成,通过机械从礁坪或泻湖上开挖的珊瑚礁块、碎石和砂的混合物或珊瑚碎屑,经过回填堆积碾压夯实形成的人造地层。层②为沙洲相珊瑚碎屑层,分布在沙洲区域内,由海洋动力作用堆积而成,形成较晚,属新近沉积,一般呈松散~稍密状态,以珊瑚砂为主。层③为灰沙岛相珊瑚碎屑层,分布在灰沙岛区域内。由海洋动力作用堆积而成,其成因与沙洲相同,沉积年代较早,呈中密~密实状态,以珊瑚砂为主。潮间带部位局部见有“海滩岩”,厚达0~3 m,分布不连续,

具有岩石特征。层④为泻湖相松散珊瑚碎屑层,分布在泻湖区域内。海洋动力作用下的泻湖相沉积,具有礁后沉积的特点,松散~密实状态,具有随埋深增加密实度提高的特点。较大的泻湖珊瑚碎屑沉积较厚,可根据实际情况分为上部④₁松散层、中部④₂稍密~中密层和下部④₃中密~密实层。层⑤为礁坪相礁组合,分布在礁坪区域内。海洋生物沉积,它是在海洋动力条件作用下由造礁石珊瑚群落生长、充填和堆积而成,具有格架支撑结构,整体稳定性好。礁坪表面局部见有“海滩岩”,厚达0~8 m,分布不连续,具有岩石特征。层⑥为珊瑚礁灰岩,俗称礁灰岩,是珊瑚岛礁生物灰岩的统称,分布在各区下部。由礁坪~泻湖相等沉积物经后期成岩作用形成,是层③~⑤的基底。

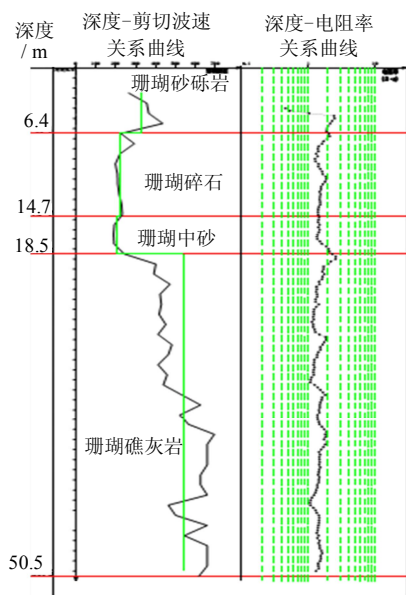


图 2 钻孔原位测试成果图

Fig.2 Borehole in-situ test results

3 珊瑚岛礁地球物理参数测试

各类地球物理勘探方法是利用探测目标体的物理参数差异,如探地雷达利用电性差异(介电常数、导电率)、电法利用电阻率差异、地震反射利用波阻抗差异等,进行地球物理勘探前,有条件时应尽量收集勘探区岩土的各种地球物理参数,或进行现场原位测试取得需要的岩土物理参数。

本次在南海某岛上的珊瑚岛礁岩土特性调查进行了孔内电阻率测试和孔内剪切波速测试,代表性钻孔的成果见图 2,其他测试孔的规律基本一致。测试成果说明,松散珊瑚砂与胶结的礁灰岩电阻率差异不大,礁灰岩的平均电阻率为 $1.47 \Omega \cdot m$,珊瑚碎石/砂的平均电阻率为 $1.59 \Omega \cdot m$,两者在同一数量级。分析原因认为,珊瑚砂、珊瑚碎石、礁灰岩的孔隙率大,而这些孔隙都是海水饱和的,不同深度的电阻率一定程度上的差别反映了礁灰岩的孔隙率不同,也即胶结程度稍有差别。

剪切波速测试采用 XG-1 型悬挂式剪切波速测试仪。从测试结果可看出,礁灰岩的剪切波速在 $420 \sim 670 \text{ m/s}$ 之间,珊瑚砂、珊瑚碎石的剪切速度在 $200 \sim 300 \text{ m/s}$ 之间,两者速度分界面清楚,存在明显的波阻抗界面。测试结果分别见图 2 和表 1。

4 珊瑚岛礁岩土工程物探方法

根据前人对珊瑚岛礁研究成果,岛礁的礁相按地貌单元可分为向海坡、礁坪(外礁坪、礁凸起、内礁坪)、灰砂岛、泻湖等几个相带^[8](见图 3)。西沙群岛的礁坪一般由外礁坪、礁凸起和内礁坪组成。

表 1 某代表性钻孔原位测试成果

Table 1 Typical borehole in-situ test results

深度 / m	厚度 / m	地层名称	平均剪切波速 / (m/s)	电阻率平均值 / ($\Omega \cdot m$)
0.0~4.2	4.2	珊瑚砂砾岩(海滩岩)		套管内
4.2~6.4	2.2	珊瑚砂砾岩(海滩岩)	329	2.17
6.4~14.7	8.3	珊瑚碎石	226	1.57
14.7~18.5	3.8	珊瑚中砂	204	1.61
18.5~50.0	31.5	珊瑚礁灰岩	538	1.47

在波浪影响深度范围内的珊瑚礁体向海坡一般分别斜坡型和陡坡型,主要受水动力作用的差异和造礁生物增长不同的影响。礁坪是珊瑚礁体向上发育到大潮低潮面后横向扩展形成的,向海坡、外礁坪、礁凸起一般为硬底质,通常发育有珊瑚砂砾岩(俗称海滩岩)。

由于珊瑚礁坪处于高潮淹没、低潮干出或半干出的海洋潮间带环境,致使现场勘探仪器和技术方法既有别于陆地工程地质勘探,也不完全同于深海的工程地质勘探。钻探、物探及许多原位测试虽然仍是珊瑚礁工程地质调查常用的勘探手段,但由于其特殊的物理力学性质及环境,在钻探过程中就应采用新的仪器设备和技术方法。工程物探是简便快速地了解珊瑚礁岩性、地层及结构的勘探方法。

珊瑚岛礁由于其特殊的地理位置和发育成长环境,工程地质条件与内陆差异大,在我国工程物探勘察手段无任何经验可借鉴,为了确定合适的岛礁岩土工程物探方法,选用目前国内成熟的各种物探方法,即水域地震反射波法、面波法、及高密度电法 3 种方法和相应仪器设备进行了场地适应性试验,通过现场试验确定每种物探方法的适应性和探测效果^[9-10]。

4.1 高密度电阻率法

分别在内礁坪海域与陆地灰砂岛两种场地开展了高密度电阻率法场地适应性试验。数据采集单个排列电极总数 60 根,极距 10 m。试验工作均采用温纳与施伦贝尔两种装置进行数据采集。下面分别列举其中一个排列的处理结果来介绍其探测效果。

图 4 为内礁坪水域试验段某排列的高密度电法勘探成果,上为电法实测数据剖面,下为反演成果剖面。从实测数据剖面上可以看出,实测数据畸变点较多,数据稳定性较差。从反演成果剖面上看,电阻率呈非层性分布,剖面浅部电阻率差异小,难以分层;剖面深部电阻率差异过大,与实际岩土分层及钻孔电阻率测试结果不吻合。分析探测效果不佳的原因主要是松散珊瑚砂层与礁灰岩的电阻率差

异不大,基本上在一个数量级,电阻率分层性较差。高密度电法和其他电阻率法在珊瑚岛礁的探测效果较差,不宜开展。

4.2 主动源面波法

主动源面波(多道瞬态瑞利面波)法在灰砂岛和潮间带 2 个不同微地貌单元分别进行了试验,采用 24 道采集,道距 1 m,偏移距为 -32/9 m,接收采用 4 Hz 垂直地震检波器。震源采用 18 磅铁锤敲击铁板激发面波。图 5 为灰砂岛和潮间带面波点的原

始面波记录。由图可见,灰砂岛面波能量(图中蓝色线圈定范围)非常发育,与直达波分离较好。礁坪上存在海滩岩地方的面波记录与灰砂岛有明显差别,呈现为频率较高,面波群速度较大。求取的频散曲线形态特征也差别较大。

图 6 为不同微地貌单元的面波频散曲线对比。灰砂岛的面波相速度整体上随深度逐渐增大,而潮间带存在海滩岩的面波相速度整体上呈“高-低-高”分布,表层速度可达 400 m/s 以上。

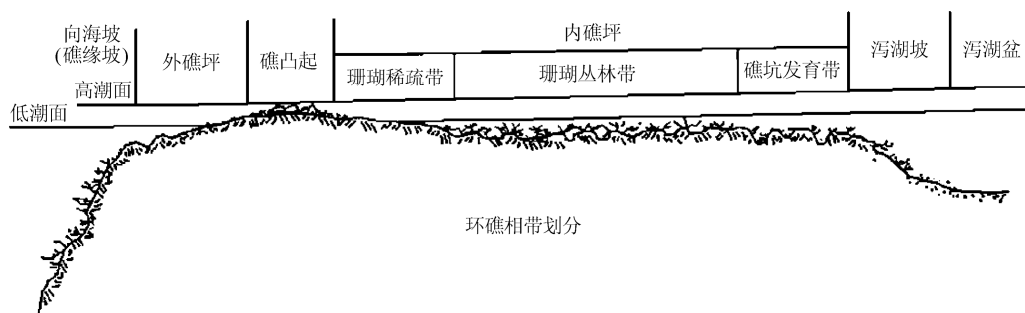


图 3 环礁相带划分

Fig.3 Coral reef face belt division

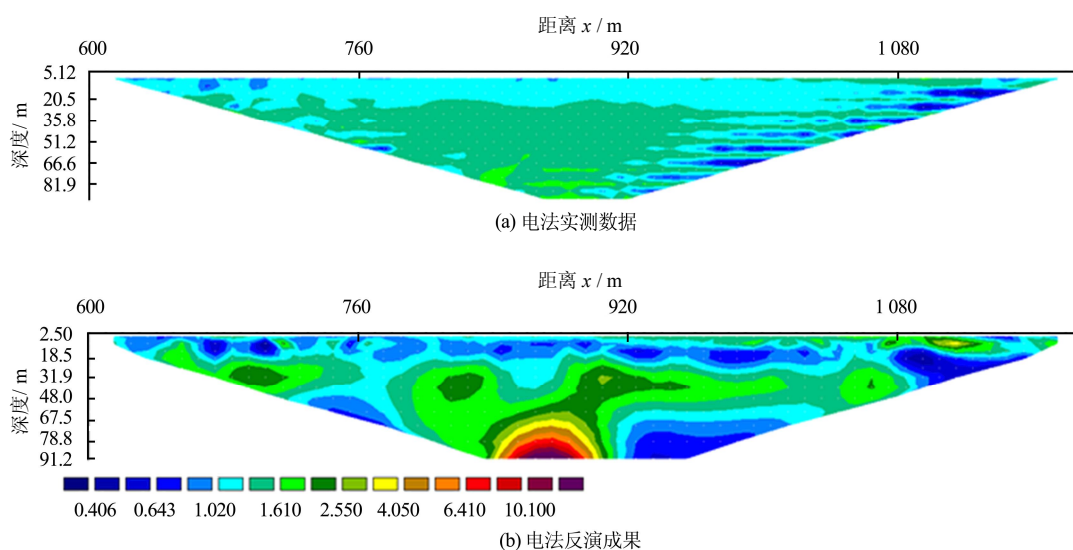


图 4 内礁坪高密度电阻率法实测数据与反演成果 (单位: $\Omega \cdot m$)

Fig.4 Resistivity raw data and inversion results in internal reef flat (unit: $\Omega \cdot m$)

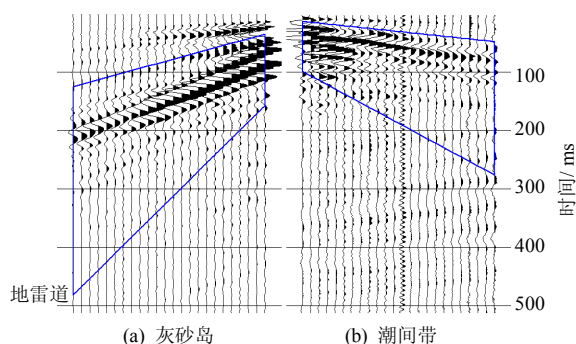


图 5 不同微地貌单元面波原始记录对比

Fig.5 Comparison of surface wave records of different landform units

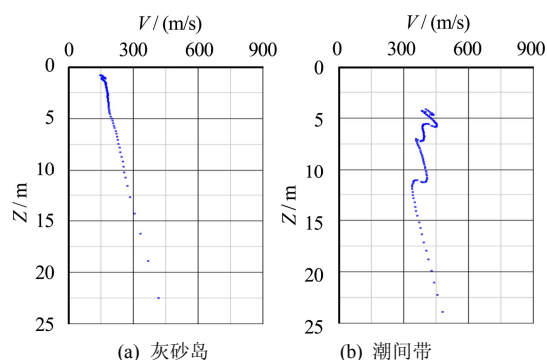


图 6 灰砂岛和潮间带面波频散曲线对比

Fig.6 Comparison of dispersive curves of rayleigh wave

图 7 为灰砂岛某测线的面波视层速度等值线图。通过与测线附近钻孔资料的比对分析可知, 该速度剖面图较好地反映了松散珊瑚砂和礁灰岩的地层层序, 探测结果准确可靠。

图 8 为潮间带面波视层速度等值线图。从图中

可以看出, 速度层呈“高低—高”3 层分布, 浅部速度层分布 300~500 m/s, 综合地质资料分析, 推断为珊瑚砂砾岩(海滩岩), 厚 2.9~4.7 m; 中部速度层分布在 200~550 m/s, 推测为珊瑚砂、碎石层; 深部速度 $V > 600$ m/s, 推断为珊瑚礁灰岩。

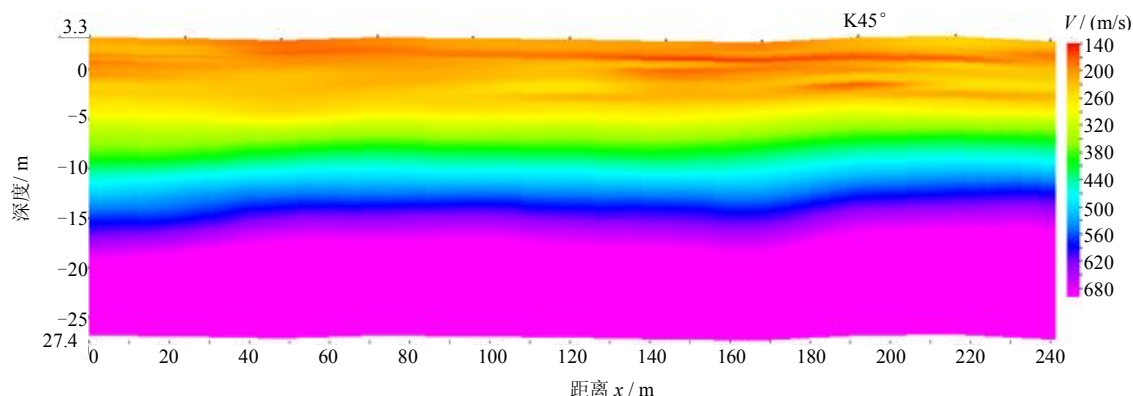


图 7 灰砂岛面波视层速度等值线图

Fig.7 Apparent surface wave velocity along the coral sand island

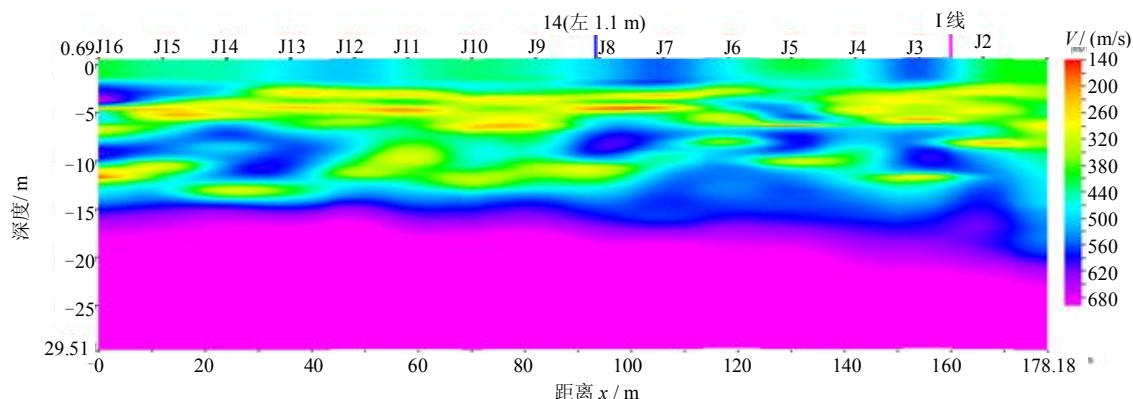


图 8 潮间带面波视层速度剖面图(存在海滩岩)

Fig.8 Apparent surface wave velocity along the intertidal belt(present of beachrock)

由于礁灰岩的埋深一般在 20 m 附近, 在主动源面波有效勘探深度范围内, 从试验效果看, 主动源面波的勘探效果较理想。

4.3 水域浅层地震反射波法

(1) 地震反射波方法

水域地震反射波法利用地下介质(岩土层)的波阻抗差异解决地质问题。其基本原理是: 地震波在地下介质传播过程中遇到介质存在波阻抗明显差异的界面时会发生反射, 反射波信号通过安置在地表的检波器接收并记录到地震仪, 通过分析计算反射波相位的时空特性来推断地下构造。本次调查采用水域走航式地震反射波方法, 接收采用 24 道漂浮电缆, 道间距为 1 m, 震源采用气动机械声波水域高分辨率浅层地震勘探连续冲击震源, 主频在 400~2 000 Hz, 频带合适, 余震衰减快, 能量适中, 脉

冲特性好, 对海洋生态及环境保护有利, 特别适合各类浅海和滩海过渡带浅地层剖面探测^[10]。作业时自动震源船 1.5 s 锤击一次, 工作船航速 2 节左右, 覆盖次数在 10 次以上。

水域地震反射波地震数据处理按标准流程进行^[11-12], 由于工作船的航速受发动机马力、海水流速、涨落潮、风向、驾驶技术等影响, 不可能保持恒定的速度, 震源激发点距取决于船速和震源船冲击间隔时间, 同一测线不同里程段炮点距有所不同, 因此采用准 CDP 叠加方式, 即抽取小面元的来自不同激震点、不同接收点上接收的反射地震信号进行叠加, 成果图件按 1 m 反射面元叠加^[13]。

(2) 地震反射波勘探效果

地震反射法在岛礁海域勘探效果理想, 下面以某岛东北方向和西南方向的 2 条测线为例说明。

图 9 为西南向测线的地震反射波时间剖面图, 剖面清楚反映了外礁坪、向海坡和台阶平台的形态, 外礁坪高 8.9 m, 宽 106.5 m, 坡度约为 8.3° ; 向海坡高 14.4 m, 宽 29.0 m, 高程变化在 $-10.3 \sim 24.7$ m, 坡度较陡, 陡度约为 46° ; 向海坡外的水底平台很平缓, 除向海坡坡脚一段约 100 m 稍大坡度外, 其余地段标高在 $-41.5 \sim 50.3$ m 之间, 该平台长度在礁坪外 8 km 未见明显变化。水底下地层同相轴清晰, 水底下有 2 层较强的波阻抗界面, 反射时间分别在 70 ms 和 80 ms 附近, 整体上沉积层界面较平缓, 分层层序清楚, 说明该区域的沉积环境相对较平静。

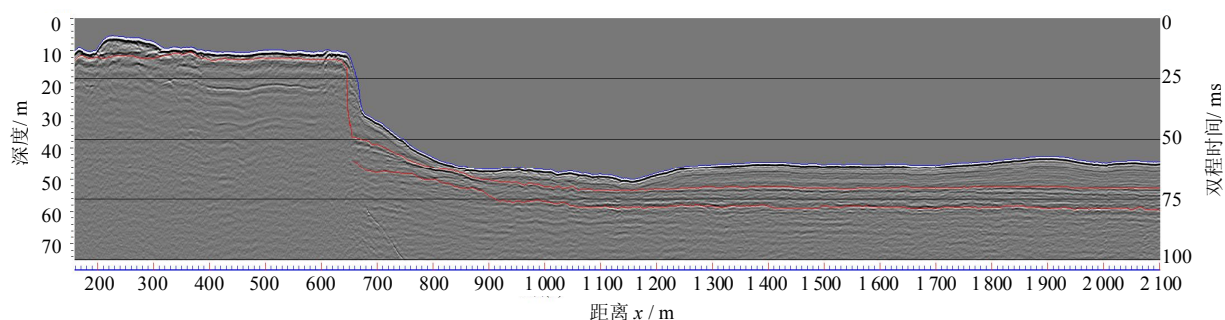


图 9 西南向测线的地震反射波时间剖面图

Fig.9 Marine seismic reflection profiling along the southwest line

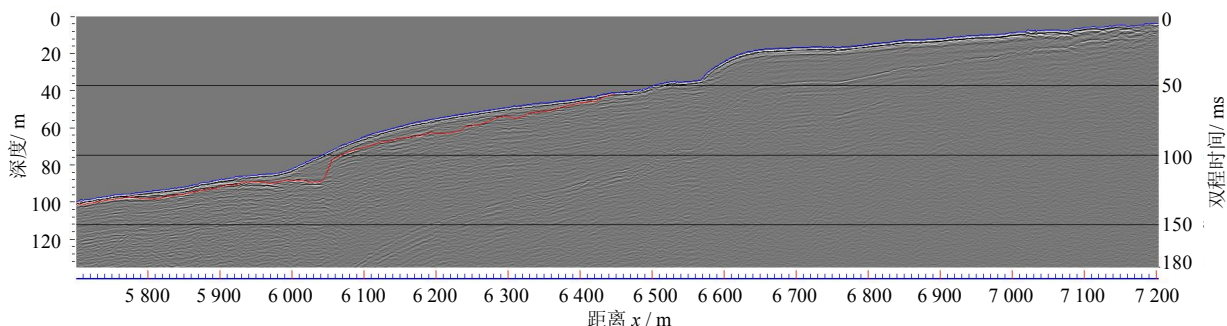


图 10 东北向测线的地震反射波时间剖面图

Fig.10 Marine seismic reflection profiling along the northeast line

南端与北端外海测线成果对比来看, 水底地形、水深不对称, 水底沉积地层也差别较大, 分析认为与珊瑚礁成长的水动力环境有关。

5 结 语

针对珊瑚岛礁的特殊地理位置和成长环境, 采用目前国内成熟的物探方法对在某珊瑚岛礁进行场地适应性试验, 从试验效果上看, 电法类探测效果不理想, 孔内电阻率原位测试数据表明, 松散珊瑚碎屑层与礁灰岩的电阻率差异很小, 在同一数量级, 由于珊瑚碎屑层、礁灰岩的孔隙率大, 在海平面下这些孔隙都是海水饱和的, 总体上无法采用电法类勘探方法进行地质分层。

图 10 为东北向测线的地震反射波时间剖面图。由图可见, 外礁坪、向海坡和台阶平台的形态, 但整体水底形态与西南端差别较大, 首先外礁坪的宽度大, 宽约 280 m, 高程为 $0 \sim 14.7$ m, 坡度约为 5.1° , 较缓; 向海坡高 15.9 m, 宽 74.5 m, 高程变化在 $-14.7 \sim 30.6$ m, 坡度较缓, 陡度约为 21° ; 外海水下形态变现为多台阶缓降形态, 向海坡坡脚往外海 1 200 m 水深高程变化从 $-30.6 \sim 128.3$ m, 平均坡度为 7.5° , 这缓降区域水底多次波明显, 表示水底介质较硬, 除台阶坡脚有少量沉积层外, 其余地方沉积现象不明显。

主动源面波在珊瑚岛礁能量非常发育, 探测效果好, 面波视速度剖面很好地反映了珊瑚碎屑层与礁灰岩的地层层序; 水域地震反射波对外礁坪、向海坡、外海的沉积层界面反映清晰, 发现某岛礁的南、北端的水底形态不对称, 沉积层差异大, 可能与珊瑚礁成长的海洋水动力环境有关。本文对珊瑚岛礁的工程地球物理勘探方法进行了初步探讨, 以此期望推动岛礁地球物理勘探领域的进一步深入研究发展。

参 考 文 献

- [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, 42(1): 1-4.

- SUN Zong-xun, ZHAO Huang-ting. Coralreef engineering geology advancing of a new discipline[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1998, 42(1): 1—4.
- [2] 王丽荣, 赵焕庭. 珊瑚礁研究成果述评[J]. 热带地理, 2008, 28(3): 228—233.
- WANG Li-rong, ZHAO Huan-ting. A review of the achievements of professor on coral reef[J]. **Tropical Geography**, 2008, 28(3): 228—233.
- [3] 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.
- [4] 单华刚, 邓中华. 浅层地震勘探法在珊瑚礁勘察中的应用研究[J]. 岩土工程师, 2000, 12(1): 19—21.
- SHAN Hua-gang, DENG Zhong-hua, WANG Ren. Study on the application of shallow earthquake prospecting to the investigation of coral reef[J]. **Geotechnical Engineer**, 2000, 12(1): 19—21.
- [5] 单华刚, 汪稔, 周曾辉. 南沙群岛永暑礁工程地质特性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 31—36.
- SHAN Hua-gang, WANG Ren, ZHOU Zeng-hui. Yongshu reef engineering geology of Nansha islands[J]. **Marine Geology & Quaternary Geology** 2000, 20(3): 31—36
- [6] 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 Zong-xun, LU Bo. Elastic wave properties of coral reef rock in Nansha Islands[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(2): 175—180.
- [7] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁礁灰岩力学特性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(11): 2221—2226.
- WANG Xin-zhi, WAN Ren, MENG Qing-shan, et al. Research on characteristic of coral reef calcareous rock in Nansha Islands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2221—2226.
- [8] 孙宗勋, 詹文欢, 朱俊江. 南沙群岛珊瑚礁岩体结构特征及工程地质分带[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(3): 11—20.
- SUN Zong-xun, ZHAN Wen-huan, ZHU Jun-jiang. Rockmass structure and engineering geological zones of coral reefs, Nansha Islands of South China sea[J]. **Journal of Tropical Oceanography**, 2004, 23(3): 11—20.
- [9] 王振东. 面波勘探技术要点与最新进展[J]. 物探与化探, 2006, 30(1): 1—6.
- WANG Zhen-dong. Essentials and recent advances of the surface wave exploration technique[J]. **Geophysical & Geochemical Exploration**, 2006, 30(1): 1—6.
- [10] 刘宏岳, 戴一鸣. 气动机械声波水域高分辨率浅层地震勘探连续冲击震源研制及应用[J]. 工程勘察, 2009, 37(10): 87—90.
- LIU Hong-yue, DAI Yi-ming. Air-driven mechanic acoustic seismic source for shallow high resolution marine geophysical profiling[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2009, 37(10): 87—90.
- [11] 刘宏岳. 水域浅层地震反射波勘探数据处理及工程实例[J]. 福建建设科技, 2008, 37(10): 87—90.
- LIU Hong-yue. Shallow marine seismic reflection data processing and its geotechnical application[J]. **Fujian Construction Science & Technology**, 2008, 37(10): 87—90.
- [12] 宋海滨. 地震海洋学导论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [13] 杨锴, 王华忠, 马在田. 共反射面元叠加的应用实践[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 327—321.
- YANG Kai, WANG Hua-zhong, MA Zai-tian. The practice on common reflection surface stack[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2004, 47(2): 327—321.