文章编号: 1006-6616 (2018) 02-0244-09

# 侧扫声纳在琼州海峡跨海通道地壳 稳定性调查中的应用

### 李 振,彭 华,姜景捷,孙 尧

(中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081)

摘要:为开展琼州海峡跨海通道地壳稳定性评价,利用 Sonar Beam S-150D 侧扫声纳系统在琼州海峡海底开展了地形地貌调查,获得了琼州海峡跨海通道工程区的侧扫声纳影像。通过数据分析、图像判读,分析了地质灾害类型及其可能的危害。在琼州海峡海底发现软土、活动沙波、岸坡及活动构造等微地貌单元,跨海通道工程施工、运行阶段都将遭受相关地质灾害的危害。这些资料和分析为跨海通道工程地壳稳定性评价提供了基础资料,为工程规划线路优选、建设实施提供了技术支撑。研究表明侧扫声纳技术可应用于海底地壳稳定性调查与评价工作中。
 关键词:侧扫声纳;地形地貌;地质灾害;地壳稳定性;琼州海峡
 中图分类号: P553; P716.7

## APPLICATION OF SIDE SCAN SONAR IN THE INVESTIGATION OF CRUSTAL STABILITY OF THE CROSS-SEA CHANNEL IN THE QIONGZHOU STRAIT

LI Zhen, PENG Hua, JIANG Jingjie, SUN Yao

 $({\it Institute of Geomechanics}, {\it Chinese Academy of Geological Sciences}, {\it Beijing 100081}, {\it China})$ 

Abstract: For the crustal stability assessment of cross-sea channel of the Qiongzhou Strait, the Sonar Beam S-150d scan sonar system was applied to the topography investigation of the seabed in Qiongzhou Strait, in which the side scan sonar image of the engineering region was obtained. Through data analysis and image interpretation, the types of geological hazards and their potential harm were analyzed. Microgeomorphic units including soft ground, movable sand wave, bank slope and active tectonics are found on the Qiongzhou Strait seabed, which will cause relative geological disasters in the construction and operation stage of cross-sea channel engineering. All the data and analysis provide basic information for the crustal stability assessment of cross-sea channel engineering and technical support for the optimization of engineering planning and implementation. It shows that the side scan sonar technique can be applied to the investigation and assessment of the stability of the submarine crust.

Key words: side scan sonar; topography; geological hazard; crustal stability; the Qiongzhou Strait

基金项目:海洋基础性公益性地质调查项目 (DD20160149)

作者简介:李振(1984-),男,助理研究员,从事海洋地球物理、地应力、地应力测量与监测、岩石力学等方面的研究工作。E-mail: lizhen05400209@163.com

0 引言

"超级工程"琼州海峡跨海通道作为海南与内 地连接的纽带,为南海开发提供更为强大的后勤保 障,将极大巩固海南海防要塞、政治、军事、经济 地位,被寄予社会经济快速发展重任。国内学者针 对琼州海峡地质概况,对琼州海峡跨海通道工程地 质条件、通道建设可行性、线路比选, 乃至跨海通 道隧道方案均开展了大量研究[1~5]。然而,琼州海 峡地处雷琼坳陷,构造运动强烈,地震活动性强; 地形复杂,差异性较大,其区域地壳稳定性才是确 定工程能否建设和合理选择工程线路的重要因素。 区域地壳稳定性评价通常考虑以内动力地质作用为 主要内容的构造稳定性、以岩土体工程地质特征为 主要内容的岩土体稳定性和以崩塌、滑坡、泥石流、 地裂缝等地质灾害为主要内容的地面稳定性,研究 成果主要用于重大工程、城市建设等前期规划和选 址<sup>[6~9]</sup>,对于海域重大工程还未见应用。

为开展琼州海峡跨海通道地壳稳定性评价, 需全面甄别控制琼州海峡区海底活动断裂的分布 特征;全面了解海底地形地貌特征、浅地层结构、 浅层气、海底表面活动沙丘、不稳定边坡、陡坎 等潜在地质灾害因素。侧扫声纳仪器作为海洋地 质调查、海洋资源开发利用必需的仪器已经在海 洋测绘、海洋地质勘探、海底沉积物探测和海洋 工程等多个方面得到了广泛的应用<sup>[10-13]</sup>。前期卢 胜周等人对 Sonar Beam S-150D 侧扫声纳系统结构、 仪器参数,及在琼州海峡海域物探工程中的成功 应用进行了简介。因此,利用 Sonar Beam S-150D 侧扫声纳系统在琼州海峡海底开展地形地貌调查, 通过数据分析、图像判读,对海底地质灾害类型 及其潜在危害进行分析,不仅可以为跨海通道工 程地壳稳定性评价提供基础资料,也可以为工程 规划线路优选、建设实施提供技术支撑。

### 1 工程区地质概况

琼州海峡属于我国的南海,位于广东省雷州 半岛和海南岛之间,东连南海北部,西接北部湾, 呈东西向延伸,长超 80 km,宽 19.2~37.5 km, 南北平均宽度 29.5 km,最宽处 33.5 km,最窄处 18 km,面积 2400 km<sup>2</sup>,平均水深 44 m,最大深度 160 m (见图 1)。



图1 琼州海峡活动断裂与地震分布图

Fig. 1 Distribution of active faults and earthquakes in the Qiongxhou Strait

琼州海峡位于海南岛和雷州半岛断陷中部, 自晚第三纪始的地块差异性运动导致雷琼之间地 块下沉,形成地堑式凹陷。区域内构造运动强烈, 地震活动强度大<sup>[14-17]</sup>。自1400年以来,共记载了 在区内发生的 M<sub>s</sub>4 级以上地震 48 次(包括前余 震),最大为 1605 年琼山 7.5 级地震; 1970 年以 来共记录了大于 M<sub>L</sub>2 级的地震 1324 次,其中 5.0~5.9 级8 次,6.4 级地震 2 次。琼州海峡主要 受近东西向琼州海峡断裂、光村一铺前断裂和北 西向长流—仙沟断裂、海口—云龙断裂、铺前— 清澜断裂所控制,这两组断裂为长期继承性活动 断裂,新构造运动时期也有明显活动,是影响跨 海通道建设的主要活动构造。陆上的构造线方向 同区域—致,以断块差异性升降、第四纪基性岩 浆岩活动频繁、活动断裂发育为特征(见图1)。

2 侧扫声纳成像原理

侧扫声纳内部安装有声电转换的换能器线阵, 其内衬层由陶瓷组成。通过陶瓷的振动实现超声 波和电信号相互转化,达到信号的传播和接收目 的。换能器向两侧发出具有指向性宽垂直波束角、 窄水平波束角的扇形声波波束,照射拖鱼两侧狭 窄的海底,换能器接收经海底各点发射回波,按 照声波传播时间进行各点定位,而回波声强幅度 高低包含了对应海底的底质、地形起伏的信息。 侧扫声纳可以得到连续的有限宽度的海底地形地 貌的二维声图,并可能做到全覆盖。具有分辨率 高、海底图像连续性好、价格较低特点,所以, 侧扫声纳出现以后很快得到广泛应用,现在已成 为水下探测的主要设备之一。

装有换能器的声纳载体(拖鱼)被拖曳在海 面下一定深度(见图2),换能器在发射声脉冲后, 记录发射脉冲时间,并立即开始收听回声。按照 每个回声接收时间与脉冲发射时间差计算从拖曳 载体到反射物体的距离。事实上发射脉冲也是一 个非常强的信号,会在每个通道开始形成黑色标 志。之后一小段时间内声纳脉冲通过水体并且没 有产生任何回声。然后海底回声信号将依次到达, 并在显示器上显示。



 $R_s$ 一侧扫声纳拖鱼至目标物阴影最远点距离; $H_f$ 一拖鱼至海底高度



Fig. 2 Schematic diagram of side scan sonar imaging

凸出海底面物体将阻挡声波,并遮挡一定距 离的海底。这样在最终的记录上显示为声学阴影 区。运用测量的方法在声纳记录上量出参数,根 据系例几何关系大致的计算出目标的高度(见 图 3)。 基于侧扫声纳上述特点,对琼州海峡地区开 展海底地形地貌调查,可辨别获取琼州海峡跨海 通道区域海底地形地貌特征的分布变化规律,以 及各种地形地貌形态、结构。重点捕获沙丘、沙 垄、沙脊、海丘及沙波等活动性微地貌、不稳定



B3海底物体高度计算原理图 Fig.3 Calculation schematic of the height of the target on the seabed 边坡 (陡坎、滑坡等) 微地貌单元、软土地层浅

辺玻(陡环、滑坡等) 微地貌単元、软土地层浅 部不良地质土层分布情况、海底火山锥、活动断 裂发育程度及空间分布特征等信息,为这一区域 的地质灾害评价、海底火山分布、构造稳定性分 析、沉积速率分析等研究提供基础支持;为进一 步开展海域地质钻探、OBS 微地震观测、工程施 工奠定基础;为跨海通道建设论证提供海底基础 资料。

#### 3 SonarBeamS-150D 侧扫声纳

Sonar Beam S-150D 完整的数字双频侧扫声纳 系统由主机、拖鱼及连接线缆组成(见图4)。拖 体(拖鱼)的两侧附有两个超声换能器阵列,向 海底发射并接受超声波,并通过拖曳水中拖体 (拖鱼)来实现海床实况探测与分析。该系统具有 分辨率高,扩展性强的特点。

甲板主机设备通过线缆接收、处理并存储海 底反射声纳信号、拖鱼状况信息以及所有拖鱼携 带的传感器所属输出的信号(高度计、深度传感 器和运动 < 姿态 > 传感器),并利用 RealScan 软件 实现信息在显示器上的显示。除此之外,甲板主 机设备和 GPS 协同工作将位置信息添加到图像上, 作为导航和制图器提供帮助。

确定 连 接 好 所 有 缆 线 以 后, 打 开 电 源、 RealScan 软件启动,遵循显示器上出现的信息设置 通用信息(换能器频率、扫测量程、存储位置、



图 4 Sonar Beam S-150D 侧 扫 戶 纳 系 纳 Fig. 4 S-150D Sonar beam system

存储方式、安全深度、自动增益等)、侧扫声纳 (拖鱼类型、串口选择)、GPS(GPS的类型,通讯 端口以及波特率)、深度传感器、高度计(超声探 测器)、后拖长度及勘测等参数,即可施测。

#### 4 数据分析方法

侧扫声纳数据分析采用 PostScan 后期处理软件开展, PostScan 的功能包含例如图形局部放大、目标测量、GPS 坐标修正检验、倾斜幅度校正、镶嵌、高度校正等功能(见图 5)。该侧扫声纳系统调查获取通用的 XTF 格式文件, 文件开始是 XTFILEHEADER 结



图 5 PostScan 后期处理软件窗口信息 Fig. 5 PostScan processing software window information

构,文件大小最少为1024KB,它包括声纳通道和 测深通道信息等。后面是不同的数据包,目前主 要有声纳、测深、姿态和注释4种类型。载入\*. XTF文件以后,可以看到文件的扫测量程、操作 频率、采样频率以及文件大小等信息。

可通过鼠标对目标物体进行量测,先将鼠标 指针移到目标上并点击右键,然后将鼠标指针移 至阴影末端并再次点击右键即可得到目标物体的 长度、宽度、高度等形状信息。

## 5 琼州海峡海底地质灾害类型 分析

琼州海峡在往复潮汐作用下,形成东西两端 潮流三角洲、中部峡谷、两岸强烈侵蚀台地及海 陆交互相滨海平原的地貌格架。海底地形较复杂, 差异较大。东、西部峡口水深较浅,东、西峡口 为冲刷槽与浅滩相间,东部峡口呈"朵状"分布、 西部峡口呈"指状"分布;中部深水槽谷水深大 于50 m,长约70 km、宽约10 km,槽谷中轴线水 深 80~120 m。南北两侧分布有陡坎,最大高差为 70 m。峡底还分布有珊瑚礁、沙坡、沙垄、海丘、 火山锥等微地貌(见图 6)。发育活动沙波、软土、 古河道、侵蚀沟槽、海釜、水下浅滩、陡坎及海 底活动构造等多种地质灾害<sup>[18,19]</sup>。

软土区侧扫声纳调查时,超声波大部分被软 土层吸收,仅少量被反射、接收,影像图像表现 为均一灰黑色。调查显示软土主要分布于海峡水 下岸坡,由水下岸坡向谷坡方向逐渐变薄以至消 失尖灭,部分地区谷坡上部亦有分布。在南部岸 坡中部(玄武岩区)缺失。软土层是在缓慢流水 环境中的全新世沉积,天然含水量大于液限,天 然孔隙比大于1.0。软土层具有孔隙比大、天然含 水量高、压缩性高、抗剪强度低、透水性低和流 变性等性质。修建在软土上的建筑物在地震载荷 作用下,可能出现突发性沉陷以及不均匀沉降, 从而导致建筑物永久性变形破坏。1605年,琼山 地震中琼山、澄迈、临高、文昌大片陆地沉陷成海 可能就是软土震陷造成。为此,软土地层是跨海通 道工程不得不防的地质灾害类型之一(见图7)。



图6 琼州海峡跨海通道工程区地质灾害分布图

Fig. 6 Geological hazard distribution map of the cross-sea channel engineering area in the Qiongzhou Strait



图7 海底软土区地貌影像图

Fig. 7 Topographic image of the submarine soft soil area

沙波为广布于海底表面的波状微地貌,泥沙 颗粒在潮流、波浪作用下沿海底移动中形成。呈 垂直于潮流、波浪水流方向条状分布。按照波高、 波长,分为沙纹、沙脊、沙丘、沙垄等类型。侧 扫声纳超声波受到沙波坡体影响,坡体一侧反射 声波表现为"亮区";另一侧受波体遮挡,表现为 反射空白的"暗区"。调查显示沙波主要分布于峡 谷两端的谷坡和谷底上。由两端至海峡中部最窄 处,沙垄、沙丘呈逐渐发育趋势,海峡越窄,沙 垄、沙丘的波长、波高值越大。各种规模水下沙 坡,在波浪、潮流驱动下,具有强烈的侵蚀和堆 积作用,严重影响了海洋工程施工及运营的安全。 以海底侵蚀为例,自升式平台和固定式平台的桩 腿直插海底,桩腿迎流一侧的底部泥沙易被水流 携走造成侵蚀。长时间的侵蚀会导致一侧桩腿的 地基基础减弱,从而产生不均匀沉降,平台可能 发生倾斜,甚至翻倒。因此,海底活动沙波地貌 是跨海通道工程必须考虑的地质灾害类型之一 (见图 8)。

在工程区内发现疑似火山口、断层等活动构造,由于地壳活动和沉积作用引起地层错动及其 伴生的海底表面变形,将造成跨断层修建的构筑 物发生差异沉降,而对海洋工程产生极大危害。 项目组通过野外海上作业、室内数据分析,获得



图 8 各种规模沙波影像图 Fig. 8 Images of various sizes of sand waves

2 处疑似火山口的影像,均分布在 L5 测线上。火山(H1)地理坐标为 20°03.3768'N、110°05.6312'E,火山口中心处于 L5 测线与 Z24 测线交 汇处东约 500 m 处。火山锥底部直径约 400 m,火山口直径 100 m,坡高 24 m,锥体坡降 0.24 (见

图 9a)。火山(H2)地理坐标为20°03.1712'N、110°04.0505'E,火山口中心处于L5测线与Z25测线交汇处东约1200m处。火山锥底部直径约300m,火山口直径120m,坡高25m,锥体坡降0.28(见图9b)。



图 9 H1、H2 海底火山影像图 Fig. 9 Images of submarine volcanos H1 and H2

另外, 琼州海峡峡谷谷坡、谷底发育大量洼 地、陡坎等次一级地貌, 成为琼州海峡跨海通道 工程建设和运行期间长期遭受的地质灾害类型之 一。在海峡中部陡坎、洼地发育, 如上所述陡坎 比比皆是, 海峡中部是水下岸坡失稳重点防治 区域。

### 6 结论

(1)通过在琼州海峡进行侧扫声纳调查应用, 得到了连续的有一定宽度的二维海底地形地貌的 声图,据此辨别获取了琼州海峡跨海通道区域海 底地形地貌特征的分布变化规律,分析了地质灾 害类型及其可能的危害。

(2)在琼州海峡海底发现软土、活动沙波、 岸坡及活动构造等微地貌单元,跨海通道工程施 工、运行阶段都将遭受相关地质灾害的危害,跨 海通道工程选址应做好相应规避,将危害程度降 至最低。

(3)侧扫声纳所得的信息和数据分析为跨海 通道工程地壳稳定性评价提供了基础资料,为工 程规划线路优选、建设实施提供了技术支撑。研 究表明侧扫声纳技术可应用于海底地壳稳定性调 查与评价工作中。

#### 参考文献/References

 [1] 谭忠盛,王梦恕,杨小林.海底隧道施工技术及琼州海峡
 隧道方案的可行性 [J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2001,20(4):286~291.

> TAN Zhongsheng, WANG Mengshu, YANG Xiaolin. Construction technology of undersea tunnel and the feasibility of Qiongzhou Strait tunnel [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2001, 20 (4): 286 ~ 291. (in Chinese with English abstract)

- [2] 谭忠盛,王梦恕,罗时祥.琼州海峡铁路隧道方案初步比选分析 [J].中国工程科学,2009,11 (7):39~44,85. TAN Zhongsheng, WANG Mengshu, LUO Shixiang. Scheme comparison of Qiongzhou strait railway tunnel [J]. Engineering Science, 2009, 11 (7): 39~44,85. (in Chinese with English abstract)
- [3] 程振廷. 跨越琼州海峡铁路隧道施工方案刍议 [J]. 隧道 建设, 2008, 28 (4): 423~428, 451.

CHENG Zhenting. Preliminary construction plan for tunnel on Qiongzhou Strait crossing railway project [J]. Tunnel Construction, 2008, 28 (4): 423 ~ 428, 451. (in Chinese with English abstract)

- [4] 石要红,郑志昌. 跨海通道工程的工程地质调查方法-以琼 州海峡跨海工程地质调查为例 [J]. 南海地质研究, 2008,(1):108~113.
   SHI Yaohong, ZHENG Zhichang. Engineering geological investigation methods of cross-sea tunnel—A case study of engineering geological investigation of Qiongzhou Strait cross-sea engineering [J]. Geological South China Sea, 2008,(1):
- 108~113. (in Chinese with English abstract)
  [5] 石新栋,皇甫明,谭忠盛,等. 跨琼州海峡隧道方案的探讨
  [J]. 隧道建设,2010,30 (6):625~628.
  SHI Xindong, HUANGFU Ming, TAN Zhongsheng, et al.
  Study on options of Qiongzhou Strait tunnel [J]. Tunnel

Study on options of Qiongzhou Strait tunnel [J]. Tunnel Construction, 2010, 30 (6): 625 ~ 628. (in Chinese with English abstract)

- [6] 胡海涛,殷跃平.区域地壳稳定性评价"安全岛"理论及 方法 [J].地学前缘,1996,3 (1/2):57~68.
  HU Haitao, YIN Yueping. Theory and evaluation methods of regional crust stability "Safety Island" [J]. Earth Science Frontiers, 1996,3 (1/2):57~68. (in Chinese with English abstract)
- [7] 詹文欢,刘以宣. 琼州海峡的断裂构造与区域稳定性分析
  [J]. 热带海洋, 1989, 8 (4): 70~77.
  ZHAN Wenhuan, LIU Yixuan. A study on faulting and regional stability in Qiongzhou strait [J]. Tropic Oceanology, 1989, 8 (4): 70~77. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴树仁,陈庆宣,孙叶.我国区域地壳稳定性研究的新进展[J].地质力学学报,1995,1 (1):31~37.

WU Shuren, CHEN Qingxuan, SUN Ye. Recent progress of the study on regional crustal stability in China [J]. Journal of Geomechanics, 1995, 1 (1): 31 ~ 37. (in Chinese with English abstract)

- [9] 丁准泰. 广州市区域地壳稳定性评价 [J]. 中山大学研究 生学刊(自然科学、医学版), 2009, 30 (4): 83~94.
  DING Zhuntai. The evaluation of regional crustal stability in Guangzhou City [J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences、Medicine), 2009, 30 (4): 83 ~94. (in Chinese with English abstract)
- [10] 卢胜周,彭华,马秀敏,等. 侧扫声呐在琼州海峡跨海通道
   工程物探中的应用 [J]. 地质论评, 2015, 61 (S1): 89
   ~90.

LU Shengzhou, PENG Hua, MA Xiumin, et al. Application of side sweep sonar in engineering geoscience of cross sea channel in Qiongzhou Strait [J]. Geological Review, 2015, 61 (S1): 89 ~90. (in Chinese)

- [11] 罗深荣. 侧扫声纳和多波束测深系统在海洋调查中的综合应用 [J]. 海洋测绘, 2003, 23 (1): 22~24.
  LUO Shenrong. Comprehensive utilization of side scan sonar and multi-beam sounding system in oceanographic research [J].
  Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23 (1): 22~24. (in Chinese)
- [12] 周兴华,姜小俊,史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘,2007,27
   (4):64~67.

ZHOU Xinghua, JIANG Xiaojun, SHI Yongzhong. Application of side scan sonar and sub-bottom profile in the checking of submerged pipeline in Hangzhou Bay [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27 (4): 64 ~ 67. (in Chinese with English abstract)

- [13] 马建林,金菁,刘勤,等,多波束与侧扫声纳海底目标探测的比较分析 [J].海洋测绘,2006,26 (3):10~12.
  MA Jianlin, JIN Jin, LIU Qin, et al. Multibeam Echosounder Versus Side Scan Object Detection A Comparative Analysis [J]. Hydrograph, 2006, 26 (3):10~12.
- [14] 叶春池. 琼州海峡沉积与地形发育 [J]. 热带地理, 1986, 6 (4): 346~353.
  YE Chunchi. Distribution of sediments and submarine topography of Qiongzhou Strait [J]. Tropical Geography, 1986, 6 (4): 346~353. (in Chinese with English abstract)
- [15] 彭金伟. 琼州海峡固定式跨海通道地质条件分析 [J]. 路基工程, 2008, (3): 94~95.
  PENG Jinwei. Analysis to geologic condition of fixed type cross-sea passage of Qiong Zhou channel [J]. Subgrade Engineering, 2008, (3): 94~95. (in Chinese without English abstract)
- [16] 彭学超. 琼州海峡地质构造特征及成因分析 [J]. 南海地质研究, 2000, (12): 44~57.
   PENG Xuechao. Geological structure characterics and cause of formation analyzing in Qiongzhou Strait, South China sea [J].
   Geological South China Sea, 2000, (12): 44~57. (in

Chinese with English abstract)

- [17] 胡久常.海南岛及其邻区地震活动特征分析 [J].华南地震, 1994, 14 (4): 29~34.
  HU Jiuchang. A analysis of seismicity in Hainan Island and its neighboring areas [J]. South China Journal of Seismology,
- 1994,14 (4):29~34. (in Chinese with English abstract)
  [18] 杨克红,赵建如,金路,等.海南岛海岸带主要地质灾害类型分析 [J].海洋地质动态,2010,26 (6):1~6.
  YANG Kehong, ZHAO Jianru, JIN Lu, et al. Analysis of the main geological hazards types in coastal zone of Hainan Island

 $[\ J\ ].$  Marine Geology Letters, 2010, 26 (6): 1 ~ 6. ( in Chinese with English abstract)

[19] 张莉,李文成,沙志彬. 琼州海峡跨海工程新 M1线区地质条件及地质灾害因素评价 [J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25 (2):17~23.
 ZHANG Li, LI Wencheng, SHA Zhibin. Evaluation of