

平潭海峡大桥海上地震勘探

高霞^{1,2}, 张永旺³, 魏文博^{1,4,5}

1. 中国地质大学地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083
2. 北京艾达天地岩土技术有限公司, 北京 100083
3. 中国地质大学能源学院, 北京 100083
4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
5. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 全长 3 478 m 的平潭海峡大桥是一大型桥梁工程, 桥位自然条件恶劣, 工程地质条件复杂. 为了克服浅层水域常见的电火花震源激发频率高、能量衰减快、探测深度浅等不足, 采用工程地震仪和振动冲击震源在海上开展地震反射波勘探工作, 结合地质钻探工作, 查明了桥址区的地层岩性分布、地质构造等工程地质问题, 为桥梁建设提供了重要的地质依据. 工程应用表明: 在地球物理条件不利的情况下, 获得了较清晰的地震反射波, 其有效波主频为 200 Hz 左右, 是水域工程地震勘探经济环保、简单有效的工作方法之一.

关键词: 平潭海峡大桥; 桥址勘探; 海上地震勘探; 震源.

中图分类号: P 631.4

文章编号: 1000—2383(2007)04—0540—05

收稿日期: 2007—04—12

Seismic Geophysical Exploration in Pingtan Strait Bridge, Fujian, East China Sea

GAO Xia^{1,2}, ZHANG Yong-wang³, WEI Wen-bo^{1,4,5}

1. *Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*
2. *Beijing Aida Tiandi Geotechnical Corp., Ltd., Beijing 100083, China*
3. *School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*
4. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*
5. *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Abstract Building the Pingtan Strait bridge in Fujian Province, with a span of 3 478 m, is a very large project. Due to the bad natural conditions and insufficient investment capital, the engineering problems are very complex. According to the vibrating impact—model source, reflection seismic exploration was conducted to investigate the strata configuration and the geological conditions. At the same time, the evaluation was made of the geological engineering conditions for building the bridge.

Key words: Pingtan Strait bridge; bridge site exploration; reflection seismic exploration; seismic source.

地处闽东沿海的平潭岛是福建第一大岛, 中国第五大岛. 岛西隔海坛海峡与大陆相望, 距省会福州 128 km, 东邻台湾海峡, 距台湾 128 km, 是我国大陆距台湾最近点(图 1). 交通不便制约了该县社会经济的发展, 拟建一座大型桥梁予以解决. 经过预可行性反复研究确定, 平潭海峡大桥西岸位于福清市小

山东村, 东岸位于平潭县娘宫村(郭金琼等, 1996), 大桥初步设计全长约 3 478 m, 桥型为预应力混凝土连续钢构桥. 桥位跨海长度为 3 478 m, 水深为 27 ~ 30 m 的区域有 595 m, 为降低工程造价, 选用 200 m 左右跨径. 要求在工程可行性研究中视勘探情况做小范围调整, 避开断层破碎带等不利地段(刘章捷

基金项目: 北京市重点学科“地球探测与信息技术(XK104910598)”资助.

作者简介: 高霞(1959—), 女, 高级工程师, 注册岩土工程师, 博士研究生, 长期从事工程物探和工程勘察的科研与实践.

E-mail: gaomia33@126.com

和王云安, 2001), 以求最合理经济的桥位。

海坛海峡风大浪高, 气候多变; 测区水深处水域较窄, 流速大, 海底中粗砂密实, 海底反射能量强, 穿透力差; 测区水浅处海底淤泥使声波能量衰减, 海底多次波干扰严重, 这些对地震勘探工作十分不利。在大桥规划选址阶段, 前人曾用浅海剖面仪做过 4 次海上地震勘探, 得出“基岩埋藏较深时, 反射波能量较弱, 在很多情况下甚至得不到反射波, 加上海底多次反射波的干扰, 基岩面难以辨别”的结论。对此, 勘察设计单位在本次可研阶段布置了 40 个海上勘探钻孔, 以弥补物探资料的不足。

1 桥址自然条件

1.1 水文、气象

桥位处潮汐属正规半日潮, 日间有 4 次涨落潮过程。最大流速 1.12 m/s, 最高潮位+ 7.48 m, 最低潮位- 0.22 m, 平均高潮位+ 5.79 m, 最大潮差 7.16 m。自福清小山东到北青屿水深较浅, 为 1 ~ 6 m。过北青屿出现深谷, 最大水深达 27 m, 范围约 350 m。过深谷区约有 1 000 m 长范围水深 5 ~ 10 m。主航道区, 最大水深为 27 ~ 30 m, 区域长 595 m。靠近平潭岸水深 5 ~ 12 m。根据平潭海洋站 1962—1978 年的风况实测资料, 最大风速为 34 m/s; 而 1979—1993 年风况实测资料, 最大风速为 30 m/s。平潭属亚热带海洋气候, 夏长冬短, 温热湿润, 年平均气温 19.6 °C。

1.2 区域地质概况

北东向的长乐—南澳断裂带大体上将福建沿海变质带划分成两个部分(图 1), 西侧变质程度很低, 称为福清—云霄变质带, 东侧称为平潭—东山变质带, 变质程度较深(陈斌, 1997)。岛上出露岩石主要有燕山晚期花岗岩和白垩纪火山岩。

桥位处工程地质可划分为第四纪松散沉积和基岩两大部分。在松散沉积层内, 除局部有软塑至流动状粘性土软弱地基覆盖外, 其余均直接覆盖着砂层, 层厚 6 ~ 25 m, 平均 15.5 m。其下卧层为低液限高压缩性粘土层, 属较软弱地基土层, 厚 5.5 ~ 24.6 m, 海峡中部较厚, 一般为 10 ~ 20 m, 再下面为中粗砂或含粘土中粗砂层, 层厚 1.5 ~ 22.8 m。基岩少量为花岗岩闪长岩, 大部分为火山岩及其浅层相, 其上部均有不同程度的风化。

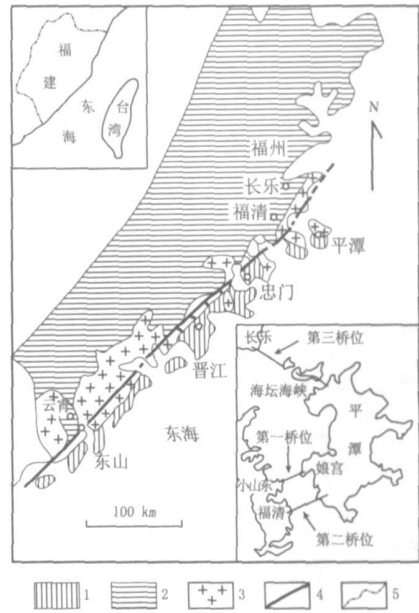


图 1 福建沿海中生代变质带地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of Mesozoic metamorphic belts of eastern Fujian

1. 平潭—东山变质带; 2. 福清—云霄变质带; 3. 花岗岩类; 4. 断裂带; 5. 省界

2 工作布置、原理与方法技术

2.1 工作布置及完成工作量

本次水域地震勘探范围以拟建桥轴线为准, 上、下游各扩大一定范围(上游 150 m、下游 100 m)。横穿海峡的测线 11 条, 顺海峡方向的测线 8 条, 测线总长度 34.7 km。多道数据采集测线 3 条, 测线长度 4.9 km。

2.2 基本工作原理

疏密波(膨胀波或声波)在水中传播和声波在空气中传播所遵循的定律是相同的(Richart, *et al.*, 1970)。根据 Albers(1960), 在 20 °C、20 m 深的海水中, V_w 约为 1 483 m/s, 实测 V_w 为 1 475 ~ 1 485 m/s, 覆盖层介质的 V_p 约为 1 550 ~ 1 750 m/s(图 2)。

由于地层的吸收作用, 地震波的反射振幅随着炮检距的增大而减小, 其变化情况比较复杂(郝钧等, 1992)。地震波由低波阻抗介质进入高波阻抗介质, 反射系数与入射角有如下关系: 当入射角较小时, 透射纵波能量较强, 反射纵波能量很弱; 当入射角较大时, 反射纵波能量较强, 透射纵波能量很弱。因此, 欲使反射纵波有较好的接受效果, 则要求入射角要适当, 既不能偏小, 也不宜过大。此次剖面测试工作偏移距为 10 m, 多道采集时偏移距为 30 m。

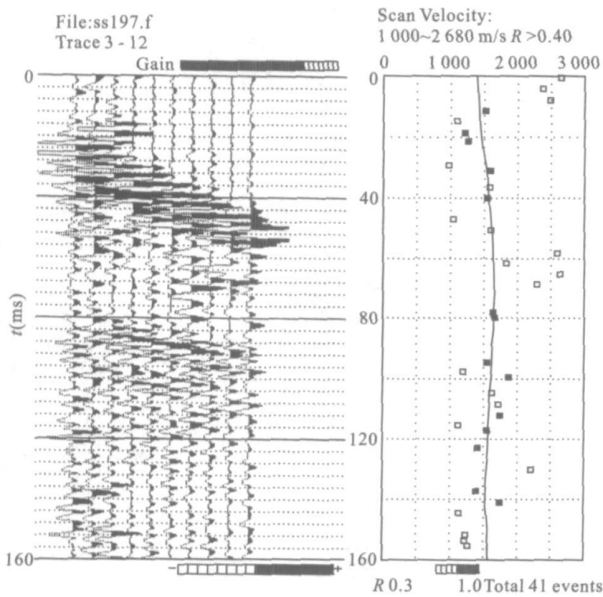


图 2 共炮点记录及速度分析(R 为相关系数)
Fig. 2 A seismic record of a shot and velocity analyse

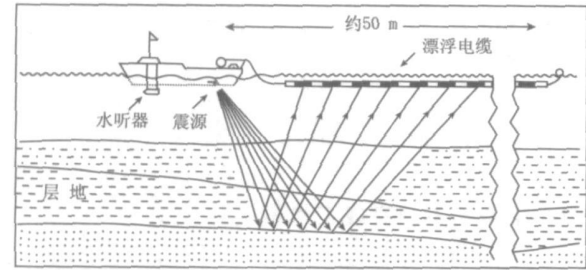


图 3 水上地震勘探布线装置示意
Fig. 3 Sketch of disposal devices in seismic exploration

2.3 主要方法技术

2.3.1 地震数据采集 本次平潭海峡大桥地震勘探采用单点激发与接收、等偏移距连续采集的方法,施测与浅海剖面仪类同。地震仪安置在轮船驾驶室内,水听器在船舷右侧沉放海中,激发震源在船底浅水面。地震波速测量使用多道快速采集方法,12 道漂浮电缆拖在船后(图 3)。

2.3.2 测量定位 平潭海峡大桥高程测量采用了较先进的测距三角高程法,即用红外测距仪先测量各水准点间的水平距离,然后用 2 架经纬仪同步对向观测直角,由大陆向海岛传递高程,建立平潭岛国家高程基准点,确保大桥测区的相对高程达到Ⅲ等水准精度(王炳南,1996)。

在地震勘探过程中,使用 1 架经纬仪在岸边测线上导航,3 架经纬仪前方交会定位,3 架激光测距仪跟踪定位,确保定位精度在 1 m。

2.3.3 震源方式 通常浅海剖面仪使用的电火花震源输出功率小于 800 J,水中发射声波频率高,能量衰减快,且有气泡效应。一般振动冲击震源能量可达 3 000 J 以上,最简单的方法是用铁锤直接敲击铁船船底产生声波,在垫板下充填砂土、塑料板等不同的材料即可改变激发频率。本次水上锤击震源的有效波频率为 200 Hz 左右。

3 资料处理与成果解释

3.1 资料处理

为了消除水底引起的长周期的多次反射波和水域常见的混响,海上资料除了做频率滤波、振幅恢复、时差校正、潮位校正、时深转换等常规处理以外(王云安和刘章捷,2001),还需做预测反褶积。Peacock and Treitel(1969)提出了一个长项预测反褶积因子,在设计技术上力求保留单位脉冲响应,直接压制多次反射波,而不影响原有的反射系数。为此,必须首先确定单位脉冲响应的时间长度,分出无作用时间区间,同时也应确定初始反射与干扰波之间需要清除干扰的时间区间。通过试验比较,此次处理选择的算子长度为 32 ms,以获得最佳结果。

3.2 成果解释

由平潭海峡大桥地震勘探剖面(图 4)可以看出:水下地形和覆盖层界面反射波同相轴清晰、连续;基岩面反射波同相轴有的较连续,有的间断,深部多见地震绕射波,该特征反映了火成岩基岩面起伏不平的形态。在测线的中部基岩面有一段较强的绕射波,与其相邻的基岩面绕射波减弱,且基岩面反射波波幅也减弱,同时基岩以下波序较乱,此特征反映岩性上的变化和在岩性接触带岩体破碎蚀变。在剖面图右侧基岩面凹槽下可见倾斜向下的两个同相轴,该特征为裂隙破碎带破碎面反射波,由此裂隙破碎带引起基岩面形成凹槽较为明确。未见断层和新构造迹象。

在剖面中部,水下地形变化较陡的覆盖层中可见 2 个绕射波,推断是局部较大块碎石所致,非沉船一类的障碍物。钻孔钻到此曾认为是基岩而终孔,物探解释基岩在其下方,对此增加一钻孔得以证实。

在覆盖层中的同相轴,经与地质勘探钻孔资料对照,对覆盖层中较明显的同相轴做了地质层位解释,得出地震—地质解释剖面图(图 5)。对基岩的解

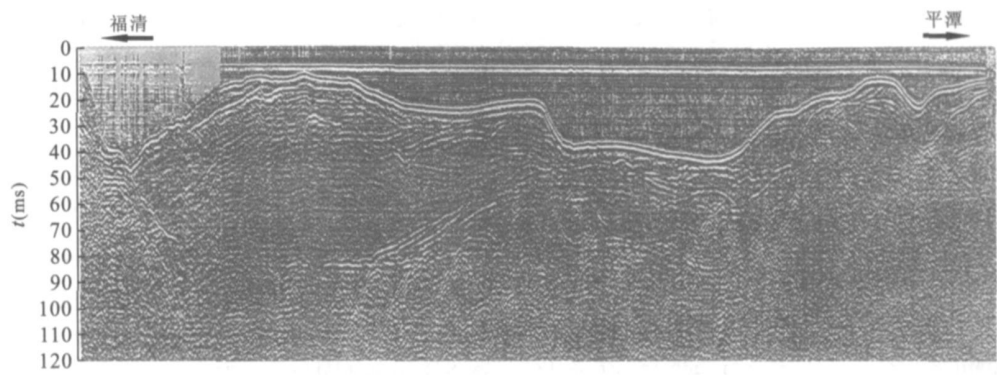


图 4 平潭海峡大桥中轴线时间剖面
Fig. 4 Time section of bridge axis

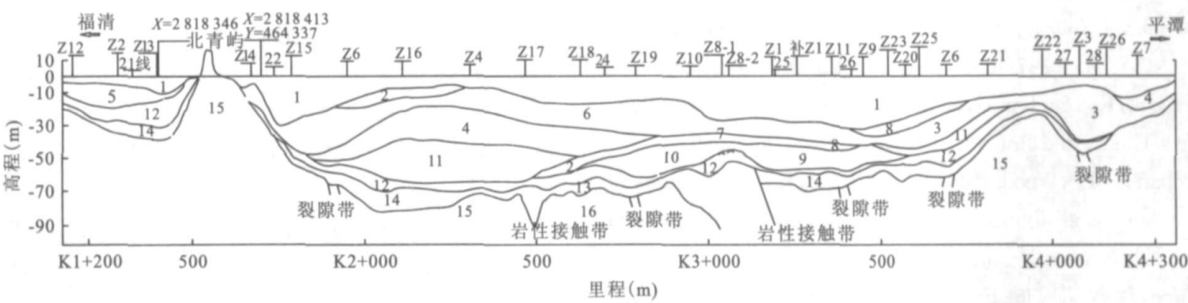


图 5 平潭海峡大桥中轴线地震—地质解释剖面
Fig. 5 Seismic-geological section of bridge axis

1. 海水; 2. 中砂; 3. 淤泥混砂; 4. 淤泥; 5. 淤泥混贝壳; 6. 淤泥混砂贝壳; 7. 中粗砂含少量贝壳; 8. 细砂; 9. 淤泥间砂; 10. 砂混淤泥贝壳; 11. 淤泥质粘土; 12. 砂质粘性土; 13. 强风化花岗闪长岩; 14. 强风化英安质凝灰熔岩; 15. 中—微风化英安质凝灰熔岩; 16. 中—微风化花岗闪长岩

释有些部位勾划出强风化带的厚度. 其根据是在基岩强反射波同相轴的上部有一较弱的反射波同相轴, 该同相轴的特征与基岩强反射波同相轴具有相似性. 由于基岩强风化顶界面上覆盖有一基本连续的砂质粘性土, 二者的物性差异不十分显著, 这是基岩强风化面反射波同相轴相对较弱的原因之一.

勘探区桥轴线北青屿—娘宫段的地质解释如下: 桩号 K1+730~K1+810 段, 水较深, 一般为 25~30 m, 覆盖层较薄, 一般为 9~22 m, 强风化带厚度较小, 一般为 4~6 m, 是较深的冲刷槽. 桩号 K2+000~K2+50 段, 水较浅, 一般为 5~10 m, 覆盖层较厚, 达 60 余 m, 属深厚覆盖层. 桩号 K2+520~K3+120 段, 基岩为花岗闪长岩, 其左右两侧围岩为英安质凝灰熔岩. 在岩性接触带处有风化深槽, 其中东侧岩性接触带, 即桩号 K2+920~K3+120 段, 风化槽较宽, 风化也较深. 在勘探区内平行于桥轴线的其他剖面也见有此特征的风化槽. 说明本区构造在岩性接触带较为发育, 属不良地质体. 在桥轴线 K1+900、K2+880、K3+390、K3+690 和 K4+080

桩号附近, 分别有高倾角裂隙带发育, 但规模不大, 宽度一般在 20 m 左右.

4 结语

本次平潭海峡大桥地震勘察工作采用振动冲击震源激发, 快速连续采集方法接收, 降低了激发频率(相对点火花震源), 增大了声波的穿透能力, 获得了较好的地震反射资料, 为主航道桥墩的选择提供了依据. 使原计划打 40 个勘探钻孔减少到 26 个, 降低了勘探费用, 提高了工作效率. 配合地质工作人员, 较圆满地完成了桥址区基岩面起伏形态与构造分布性质为主的勘探工作. 实践表明, 该方法经济有效, 使水域工程勘察工作得到简化.

References

Albers, V. M., 1960. Underwater acoustics handbook. The Pennsylvania state Univ. Press, 290.
Chen, B., 1997. Petrographic evidences and tectonic significance for two phases of metamorphism in sillimanite

- and garnet-bearing mica schists of Pingtan-Dongshan metamorphic zone of eastern Fujian, China. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 380—393 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. Q., Fang, Z. Z., Chen, B. C., 1996. Conceptual design of Pingtan Strait bridge. *Journal of Fuzhou University* (Natural Science Edition), 24: 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Hao, J., Zhao, M. W., Yao, G. X., et al., 1992. 3D seismic exploration technology. Petroleum Industry Press, Beijing, 28—30 (in Chinese).
- Liu, Z. J., Wang, Y. A., 2001. Engineering geological evaluation of Yangluo-Yangtze bridge, Wuhan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(4): 385—387 (in Chinese with English abstract).
- Peacock, K. L., Treitel, S., 1969. Predictive deconvolution: Theory and Practice. *Geophysics*, 34: 155—169.
- Richart, F. E., Woods, R. D., Hall, J. R., 1970. Vibrations of soils and foundations. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Wang, B. N., 1996. Far-distance leveling cross the Haitan Channel. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (1): 30—34 (in Chinese).
- Wang, Y. A., Liu, Z. J., 2001. Seismic geophysical exploration in Yangluo-Yangtze bridge, Wuhan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(4): 388—390 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈斌, 1997. 福建平潭—东山变质带夕线石榴云母片岩中两期变质作用的岩相学证据及其构造意义. *岩石学报*, 13(3): 380—393.
- 郭金琼, 房贞政, 陈宝春, 1996. 福建平潭海峡大桥方案设计. *福州大学学报(自然科学版)*, 24: 1—9.
- 郝钧, 赵珉文, 姚国骧, 等, 1992. 三维地震勘探技术. 北京: 石油工业出版社. 28—30.
- 刘章捷, 王云安, 2001. 武汉阳逻长江公路大桥工程地质评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(4): 385—387.
- 王炳南, 1996. 远距离跨海水准测量. *测绘通报*, (1): 30—34.
- 王云安, 刘章捷, 2001. 武汉阳逻长江大桥水域工程地震勘探. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(4): 388—390.