

地震反射波法在复杂地层跨海盾构隧道中的应用

陈建福

(中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要:厦门轨道交通2号线海东区间跨海修建,隧址沿线地质条件多变,地质勘探难度较大。地震反射波法在勘察岩土界面及地层分布,寻找断层、海底孤石、软弱破碎带等不良地质上都有着显著效果。该文结合海东区间跨海段勘察实例,通过对比地震反射波法勘察结果与钻探勘察结果,分析地震反射波法在跨海隧道勘察中的适用性。研究表明:地震反射波法对常规水土岩分界面具有较好的辨识度,可初步识别破碎带等不良地质,但对海底孤石及局部碎块状强风化基岩段,物探结果与钻孔实际揭示情况存在一定偏差。因此在跨海盾构隧道勘察过程中,尤其在进行孤石及破碎带密集地层,为获得较好的勘察效果,应采取物探和钻探结合的勘察方式,在物探发现的不良地质密集段,应进行针对性加密钻孔勘察。

关键词:地震反射波法;跨海盾构隧道;孤石;适应性分析

近年来,随着中国地铁项目的增多,施工过程中面临的不良地质情况也愈发复杂。厦门地铁2号线海东区间跨海修建,其最大埋深达60 m,隧址沿线海底淤积较厚,海床起伏较大且穿越孤石密集、基岩凸起及断裂带地层,施工过程中勘察难度较高。

施工中物探多以地震反射波法为主,该方法已被广泛应用于基桩动测、岩溶地区勘探、桥墩选址勘察、海底珊瑚岛礁探测、地裂缝勘察、地质灾害调查、煤层采空区勘探等方面,其具有预测范围广、效率及精度较

高、能大致判断不良地质体性状的特点。

在中国大部分隧道施工过程中,地质勘察一般都采取以物探为主,钻探为辅的综合勘察方法。但中国国内在地铁隧道尤其是跨海地铁隧道的修建过程中,地震反射波法的应用先例极少。在地质条件复杂的海底隧道施工过程中,地震反射波法的适用性及使用方式均亟待研究。

该文基于厦门地铁2号线海东区间,深入对比海底孤石段分别采用地震反射波法、钻孔勘探法和加密

及隧道轮廓线外一定范围岩溶分布情况的基础上,采取有针对性的处治措施,且在实际处治施工中应保证临时支护系统的施工质量,以免处治过程中再次发生事故。

参考文献:

- [1] 王梦恕.对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J].铁道勘察,2014(1).
- [2] 张彦龙,田卿燕,林海山.姚双坳隧道运营期地质综合探测技术研究[J].中外公路,2017(6).
- [3] 李哲,徐豹之,农骥.隧道超前水平钻进功速比与围岩响应特征分析[J].地下空间与工程学报,2018(S1).
- [4] 岳中琦.钻孔过程监测(DPM)对工程岩体质量评价方法的完善与提升[J].岩石力学与工程学报,2014(10).

- [5] 田昊.隧道地质数字钻进精细化识别方法研究.[D].山东大学博士学位论文,2015.
- [6] 赵鹏宇.公路山岭隧道超前钻探地质预报研究.[D].长安大学硕士学位论文,2014.
- [7] 谭卓英,蔡美峰,岳中琦,等.钻进参数用于香港复杂风化花岗岩地层的界面识别[J].岩石力学与工程学报,2006(S1).
- [8] 周轮,李术才,许振浩,等.隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J].山东大学学报(工学版),2017.
- [9] 祁伟.超前钻探法在隧道超前地质预报中的应用研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.
- [10] 舒森,王树栋,李广.瞬变电磁法指导复杂地质隧道超前水平钻探应用[J].物探与化探,2018(6).
- [11] 徐豹之.基于多小波分析及证据推理的隧道超前水平钻孔参数预报方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2019.

收稿日期:2019-09-29

作者简介:陈建福,男,高级工程师.

钻孔勘探法的探测结果,提出针对长距离复杂地层跨海地铁工程的勘察方法。

1 地震反射波法原理及应用

地震反射波法的工作原理为:采用人工激发震源的方式使震源附近质点产生振动,并形成地震波,其在遇到两种不同弹性介质界面时会发生反射现象,如图 1 所示。地面质点在反射波到达地面之后出现振动,该振动被检波器转变为电振动,此后电振动通过电缆被输送到地震仪器里放大,最后被转化为数字形式记录下来供后续使用。

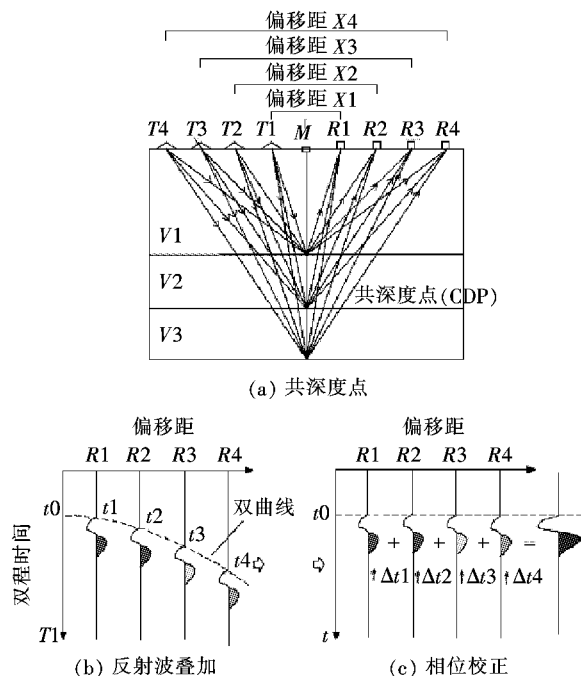


图 1 地震波反射叠加与相位校正

地震反射波法应用过程为:首先在海平面或地面上利用人工振源激振,当地震波遇到不同岩土体的交界面时,由于岩土阻抗不同,产生了反射和波速变化,信号变化被安置在海面或地面的检波装置接收并记录,通过分析反射波的相位变化,进行一系列复杂的时空反演可推断海底地层的构造,如图 2 所示。

2 工程概况

2.1 项目概况

厦门地铁 2 号线海东区区间于沧海大道站始发,以 500 m 曲线半径下穿海东湾公园后入海,此后以 350 m 曲线半径到达东渡路站。该区间工程为最小间距

为 7.3 m 的双线盾构隧道,区间线路总体分为盾构段和矿山段两部分。沿线路走向分别设置 4 个联络通道,在大兔屿设置 1 座风道,在游轮母港地块设置 1 座临时竖井,区间线路平面走向如图 3 所示。根据前期工程建设对该海域的勘探,海东区区间隧址范围内基岩主要为泥质砂岩、变质砂岩、花岗岩、凝灰熔岩,覆盖层主要为淤泥、砂类土层。

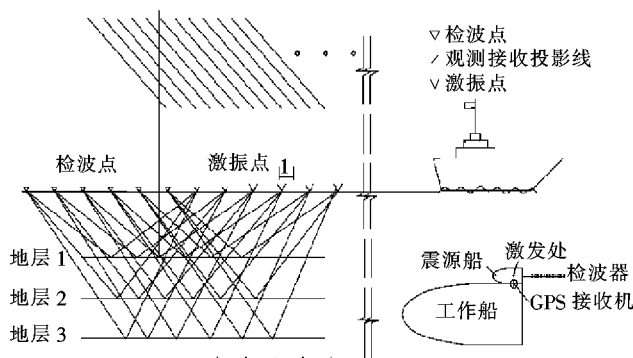


图 2 走航式水域地震反射波法原理图(单位:m)

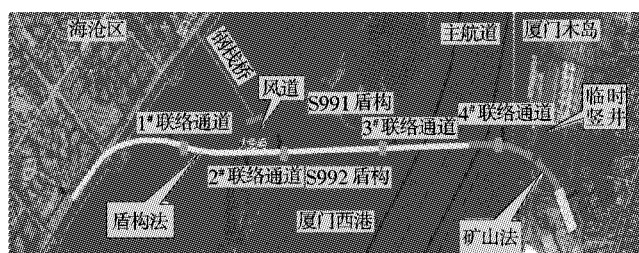


图 3 海东区区间线路平面图

2.2 地震反射波法地质探测的实施

2.2.1 物探基础

海东区区间具备的地质特点允许采用地震反射波法进行地质探测,主要地质特点如下:

(1) 区间内第四系覆盖层与基岩存在明显波阻抗差异,于层间界面能够形成良好的地震波反射界面。

(2) 隧址沿线存在多处地层错动及岩体破裂,此时地震时间剖面图将出现反射波组同相轴的错动、绕射波等异常特征,因而可实现对上述地质特征的探测。

(3) 该区间基岩有砂质泥岩、变质砂岩、花岗岩等多种岩性,且风化不均,由于碎裂状强风化基岩与中等风化基岩物性差异小,地震反射波组不易区分,在进行这些岩体探测时,宜辅以钻探进行探测结果校正。

2.2.2 物探实施

该次海域物探定位采用南方铨锐 GPS-RTK 接收系统,其水平探测精度为 $\pm(10 + 1 \times 10^{-6} \times D)$ mm (D 为距离),垂直精度为 $\pm(20 + 1 \times 10^{-6} \times D)$

mm。导航软件采用南方导航软件,该软件可实现定位观测与物探观测同步进行,使用时先将设计坐标输入,后通过其显示的船只运行轨迹、航速、航向及船只偏离设计测线的距离等来引导、指挥工作船按设计测线 and 要求的航速移动。探测过程中使用 SWS-5 型工程勘察与工程检测仪接收信号,探测中将其调至通频带接收、连续、自动记录模式。震源采用一秒激发一次的自制锤击震源,锤击震源挂于工作船旁,船尾部牵挂接收电缆向后延伸。

探测过程中选定的主要参数如表 1 所示。

表 1 水域物探参数

| 偏移距/ m | 采样率/ ms | 航速 | 电缆入水 深度/m | 道间距/ m | 记录长 度/ms |
|-----------|------------|-------|--------------|-----------|-------------|
| 12.0 | 0.1 | 1~2 节 | 1.0 | 2.0 | 200 |

2.2.3 地震反射波收集及处理

地震反射波采用 24 道专用水上检波电缆接收,该电缆灵敏度高、分辨率高(接收信号只有一个子波),可较好地适用于海底隧道勘察。采集数据使用 PMRfl-pro 水域多道地震反射软件进行处理,其处理流程为:

(1) 预处理:记录数据清理、记录激发时间校正、等偏剖面平移叠加、频谱分析与滤波、抽取共偏移道集。

(2) 剖面处理:速度分析、共偏移道集动校正、反射波形压缩、震源颤尾清理、水底多次波清理、自动拾取或手工标记反射波组同相轴。

(3) 解释处理:用记录数据频谱比较分析反射异常;用纵横剖面交点道比较,进行解释校正和检测闭合差;与钻孔资料对比,进行剖面地质释译。

2.3 钻探方法的实施

海东区间基岩风化程度高,软弱破碎的强风化基岩与中等风化基岩在物性参数上的差异小,阻抗相近,单纯采用地震反射波法不易区分,探测结果不能满足工程建设精度要求。因此应对反射波阻较接近的地段进行钻探补充勘察。

施工阶段对隧址范围内的基岩分布情况进行了两次钻孔勘察,第一次为常规钻孔勘察,目的是查明盾构穿越地层的分布情况,对物探结果进行补充和完善;第二次钻孔时盾构穿越密集孤石群,施工过程受到严重影响,因此在孤石区正上方进行钻孔加密补充勘察,目的是进一步明确隧道掘进线上孤石的分布情况和规模大小,以期对前期地质勘察进行校正,掌握更精准的地

质资料,为施工中的孤石处置措施提供依据。两次钻孔点分布情况如图 4 所示。

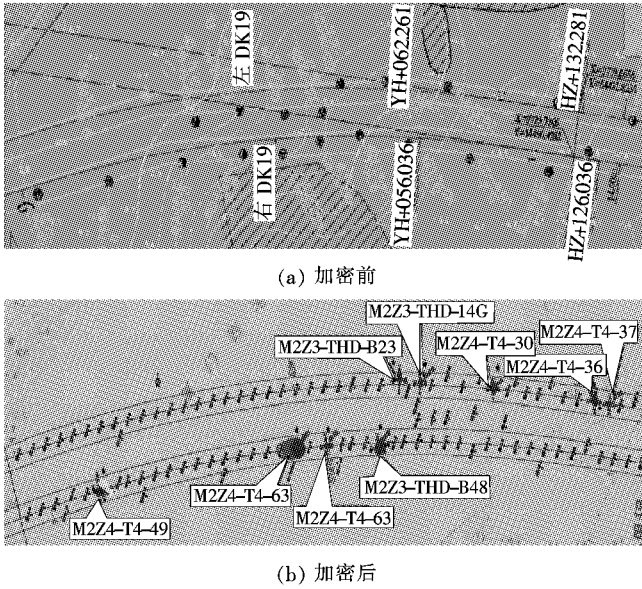


图 4 加密勘察前后钻孔布置对比

2.4 勘察结果对比分析

相同区间内的地震反射波图谱如图 5 所示。

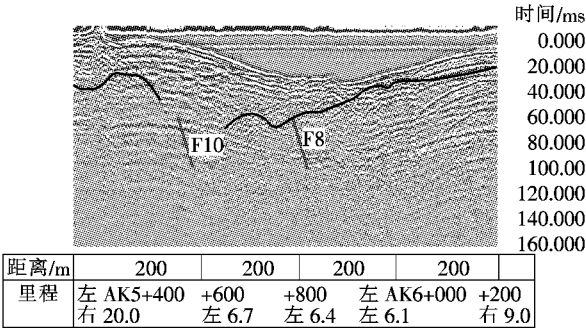


图 5 地震反射波图谱

由图 5 可见:在区间里程左 AK5+600(勘察坐标系)附近基岩地震反射波组能量较弱,推测此处岩体破碎,中等风化基岩埋深低于-60 m,存在 F10 断裂破碎带。区间里程 AK5+800 附近存在较弱基岩地震反射波能量,推测此处基岩岩体破碎,中等风化基岩埋深低于-55 m,存在 F8 断裂破碎带。

为验证地震反射波法在海底地质探测中的适用性,将物探结果与第一次部分钻孔探测结果进行了对比,如表 2 所示。

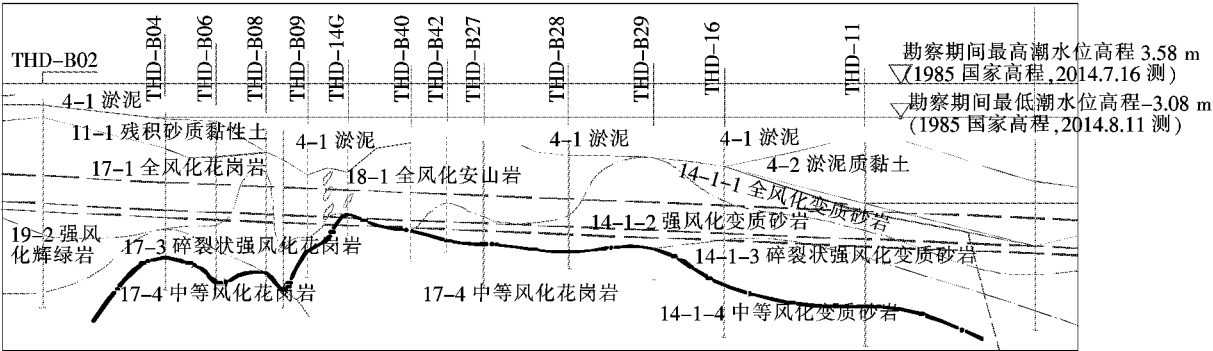
从表 2 可看出:物探解释深度与钻孔揭示深度的平均差别为 1.0~2.0 m,两者基本一致,但在局部碎块状强风化基岩较厚地段,由于碎块状强风化基岩与

中风化基岩物性差异小,中风化面物探地震波组无明显波组反应,物探解释深度与钻孔揭示深度误差较大。

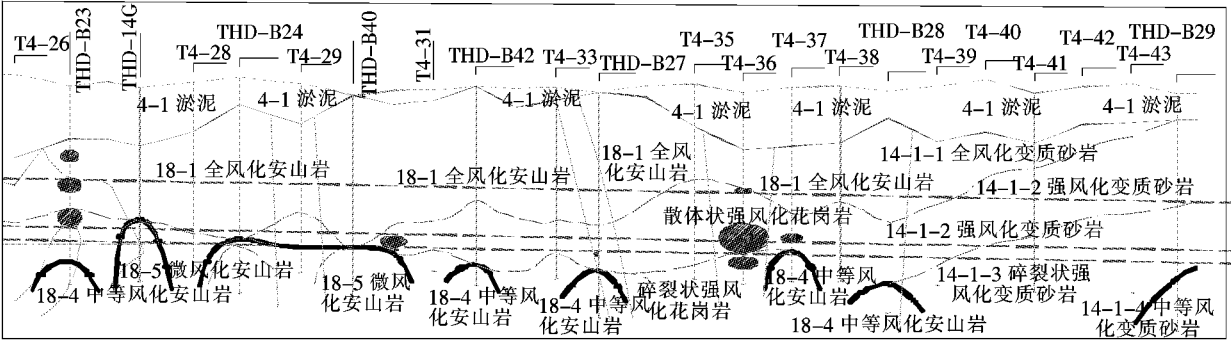
两次钻探对海底孤石段探测结果如图6所示。
从图6可以看出:加密勘察后,孤石的分布和规模

表2 物探解释深度与钻孔资料比对

| 线位 | 钻孔编号 | 钻孔资料 | | | | 物探解释 | | | | 误差/ m | 偏离测 线距 离/m |
|---------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|----------|------------------|
| | | 碎块状 基岩深 度/m | 碎块状 基岩标 高/m | 中风化 基岩深 度/m | 中风化 基岩标 高/m | 碎块状 基岩深 度/m | 碎块状 基岩标 高/m | 中风化 基岩深 度/m | 中风化 基岩标 高/m | | |
| 东渡 路北 移 | M2Z2—THD—B02 | 41.60 | —49.70 | 60.8 | —68.98 | 42.2 | —50.3 | 物性差异小, 反射界面不清晰 | | —0.6 | 2 |
| | M2Z2—THD—B03 | 36.90 | —37.67 | 46.8 | —47.57 | 36.1 | —36.9 | 物性差异小, 反射界面不清晰 | | +0.8 | 2 |
| | M2Z2—THD—B05 | 24.35 | —29.86 | 53.6 | —59.11 | 26.0 | —31.6 | 受构造带影响, 反射界面不清晰 | | —1.7 | 15 |
| | M2Z2—THD—B06 | | | 39.0 | —54.60 | | | 40.6 | —56.2 | —1.6 | 2 |
| | M2Z2—THD—B07 | | | 8.9 | —31.10 | | | 7.8 | —30.0 | +1.1 | 2 |



(a) 第一次钻孔勘察孤石探测结果



(b) 第二次钻孔勘察孤石探测结果

图6 孤石段钻孔勘察结果对比

得以进一步掌握。第一次钻孔勘察发现有一处孤石侵入隧道开挖轮廓的情况,而第二次探测发现,该区间孤石分布不连续性极强,勘察结果显示侵入区间轮廓范围的孤石有6处,多数为孤石部分侵入区间底板轮廓内,典型的孤石侵入隧道开挖轮廓情况如图7所示。从两次勘察结果对比看,钻孔密度对海底孤石和孤石

群探测精度影响很大。而从物探分析图上看,孤石区有波形变动,但极为分散,波形不连续且与岩土交界面有重叠,解释困难,说明物探对于离散孤石探测精度不高,需要结合钻探才能综合判定。
盾构通过上述孤石密集或基岩突起分布的地段时,由于同一断面处地层软硬不均,孤石很难被盾构滚

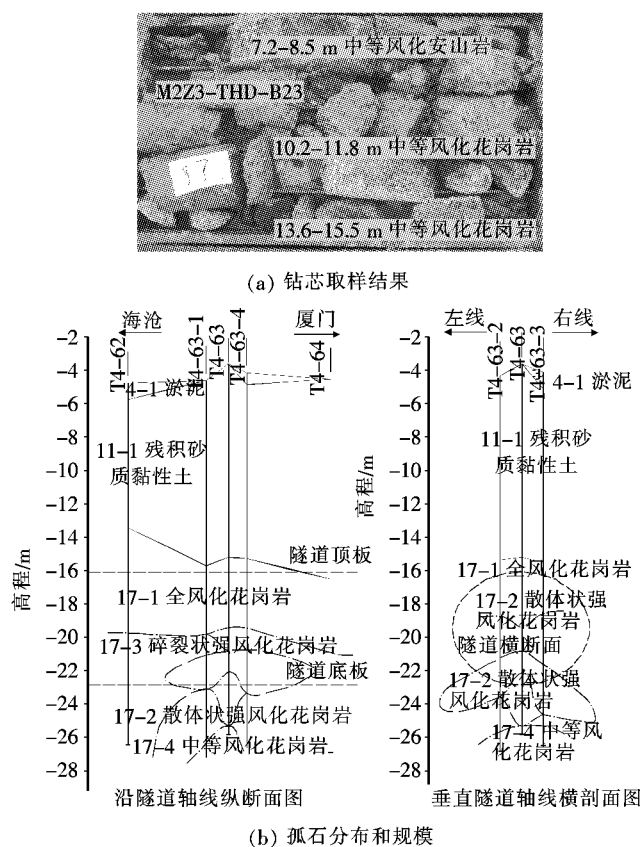


图 7 加密勘察揭示的孤石分布和规模情况

刀破碎从而卡在刀盘上随刀盘转动,转动的孤石对掌子面扰动巨大,因而极易造成海床坍塌等工程事故。此外,孤石处理不当时盾构机掘进效率低下,刀盘刀具磨损严重,易产生卡刀、掉刀、线路偏移等问题,影响施工进度及经济效益。

从厦门地铁 2 号线实际施工情况看,孤石问题为限制该工程掘进的主要影响因素。为了确保盾构施工进度和施工的安全性,应充分掌握孤石的分布范围及分布特性,并依此针对性地提出孤石预处理措施。

3 结论

以厦门地铁 2 号线海东区间工程地质勘察为背

景,通过地震反射波法与钻探勘察结果的分析,得出如下结论:

(1) 在海底地质勘察探测中,地震反射波法解释深度与钻孔揭示深度的平均差别为 1.0~2.0 m,说明物探勘察在跨海隧道地质勘察中适用性良好。但地震反射波法对碎块状强风化基岩面及海底孤石的识别精度较低。

(2) 对于海底孤石群,采用物探与钻探相结合的探测方式能够较好地揭示海底工程地质情况。孤石群的勘察精度与钻孔密度密切相关,越海工程在孤石密集地层中施工时应进行钻孔加密勘察,为孤石处理及线路优化提供依据。

参考文献:

- [1] 负永峰,张存明,王军舰,等. 反射波法在基桩动测中的应用[J]. 中外公路,2011(5).
- [2] 王文州. 物探技术在高速公路溶岩地区地质勘探中的应用[J]. 中外公路,2001(4).
- [3] 戚玉红,冯百全. 地震反射波法在锦州凌水湾大桥工程地质勘察中的应用[J]. 港工技术,2013(4).
- [4] 崔永圣,马林,刘宏岳,等. 珊瑚岛礁工程地球物理方法初探[J]. 岩土力学,2014(S2).
- [5] 章振华. 浅层地震反射波法勘探在地裂缝勘察中的应用[J]. 铁道工程学报,2014(8).
- [6] 周竹生,蒋婵君,郭有刚. 浅层地震反射波法在隧道工程勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报,2008(5).
- [7] 徐贵辉. 复杂岩溶地区隧道施工综合地质预报技术及工程应用[D]. 中南大学硕士学位论文,2010.
- [8] 马灵. 海上地震数据多缆采集与记录系统设计研究[D]. 中国科学技术大学博士学位论文,2012.
- [9] 王尔觉,潘广山,胡庆辉. 近海工程勘察中单道与多道地震方法对比研究[J]. 工程地球物理学,2016(4).
- [10] 王海林. 工程地质勘察中引入地震反射波法应用的相关性研究[J]. 工程技术研究,2017(8).
- [11] 孙柏林,雷霆,罗勇,等. 基于层次分析法的尚家湾隧道软弱地层围岩评价与处治研究[J]. 中外公路,2015(5).