

# Application of Comprehensive Exploration Method in Engineering Survey of Cross-River Subway Tunnel Crossing Fault Broken Zone

Bo Yang Wei Ma

Beijing Urban Construction Exploration&Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100101, China

## Abstract

This paper mainly introduces the application of the comprehensive exploration method of underwater seismic reflection wave method combined with drilling in the special investigation of crossing fault zone of Guangzhou metro tunnel project, China. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of the existing water geophysical methods, the geophysical methods are selected, and the applicability and effectiveness tests of the geophysical methods are carried out. Finally through geophysical positioning, drilling verification and comparative analysis, the location, scope and characteristics of the river bottom fault zone are revealed, which improves the richness, reliability and credibility of the fracture survey results of the river crossing subway tunnel, and provides detailed geological data and basis for the subsequent evaluation of the possible risks in the construction, the special fracture design of the subway engineering, and the formulation of the special construction scheme. According to the problems existing in the practical application and the design requirements of subway, the paper puts forward the matters needing attention and suggestions, which can be used for reference for similar projects.

## Keywords

cross-river subway tunnel; fault zone; water seismic reflection wave method; Comprehensive exploration

# 综合勘探方法在过江地铁隧道穿越断层破碎带工程勘察中的应用

杨博 马伟

北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 中国·北京 100101

## 摘要

论文主要介绍了采用水上地震反射波法结合钻探的综合勘探方法在中国广州过江地铁隧道工程穿越断裂带专项勘察中工作的应用。通过分析既有水域物探方法的优缺点, 选定物探方法, 并进行物探方法适用性、有效性试验。最终通过物探定位、钻探验证和对比分析, 揭示了江底断裂带的位置、范围及特征, 提高了过江地铁隧道断裂勘察成果的丰富度、可靠度及可信度, 为后续评价施工可能存在的风险、地铁工程断裂专项设计、制定专项施工方案等提供详实的地质成果资料及依据。最后, 根据实际运用中存在的问题及地铁设计需求等提出需注意的事项及建议, 对类似工程有借鉴意义。

## 关键词

过江地铁隧道; 断裂带; 水上地震反射波法; 综合勘探

## 1 引言

随着地铁建设进程加快, 地铁工程下穿江河的情况逐渐增多, 因此查明江底岩土层分布、构造地质特征、隧道围岩情况以及地下水等情况对地铁的建设具有重大影响。目前, 水域勘察主要采用小型水上平台, 但其仅在鱼塘、小河道、河涌等小型缓流水域适用性好。在大型河道水域, 水上施工风险大, 其适用性较差, 施工难度也更大。若采用水域勘探

船进行施工, 其钻探成本较高、易受航道通行的限制。因此, 在过江地铁隧道的勘察工作中, 常规水域钻探易受施工难度、航运限制等条件影响, 尤其在水域存在断裂构造带时, 其影响程度更大。同时, 仅进行钻探也无法完全满足特殊条件下地铁隧道工程建设的设计需求。为打破上述条件限制, 可引入地球物理勘探方法, 它不易受航运限制、江上钻探施工难度高等影响, 且具有费用较低、施工工期短、提供资料连续

完整等优势,对断裂等不良地质问题的探查优于地质钻探<sup>[1]</sup>。

目前,水上物探方法的探测深度一般为浅层地表,最大够达到百米以上,通常能满足地铁工程勘察深度要求,且探测精度高,可有效提升勘察成果准确性<sup>[2]</sup>。当前采用水域物探方法结合钻探进行多手段综合性勘探、对比验证,越来越受到青睐,也得到各设计院及建设方的认可。

## 2 工程概况

本项目为中国广州市黄埔区在建下穿珠江的地铁盾构区间隧道工程。隧道沿线下穿洪圣沙岛、珠江主航道支流、珠江江心洲、珠江主航道黄埔水道、黄埔港码头。根据前期工程地质调查及区域地质资料收集,拟建区间隧道工程场地附近场地存在隐伏断裂,推测与拟建地铁隧道相交。同时,根据工程地质灾害危险性评估报告,隧道过江段为活动断裂地质灾害危险性中等区。因此,根据地铁建设设计需要,需查明该断裂的具体位置、范围及断裂要素,并对该断裂对拟建过江隧道的影响进行分析、评价。

## 3 区域地质构造与工程地质条件

### 3.1 地形地貌

根据《广州城市地质》,拟建过江地铁隧道沿线地处珠江河口盆地沉积区及河谷区,主要为三角洲冲积河谷平原地貌<sup>[3]</sup>。地势较平坦、开阔,地面高程约为5.30~10.75m。地表水系较发育,为珠江水体。珠江两岸在黄埔港码头及洪圣沙岛均筑有浆砌片石河堤,河床断面总体呈西低东高型。江面宽度约0.8~1.0km,河道较为顺直,河床地形起伏,河床标高变化范围为-8.16~7.98m,最大水深约12m,总体上西浅东深。珠江水流流向由北向南,水面坡降不大。珠江水深随着涨落潮不断变化,水位会随潮汐水位涨落出现明显升降。

### 3.2 区域地质构造

由《广州城市地质》及《广州城市地质图集》可知,拟建地铁工程在大地构造上位于华南褶皱系,粤北、粤东北-粤中拗陷带,粤中拗陷的中部。印支运动使晚古生代地层发生过渡型褶皱,并发育了走向断裂。中、新生代主要发育断陷盆地,产生深、大断裂带。中生代的岩浆活动频繁,发生多次侵入和喷溢,新生代主要为基性偏碱性岩浆喷溢。广从断裂和瘦狗岭断裂将场区分层了几个构造区。瘦狗岭断裂以南的构造区,主体构造是东西向,其次是北西向。勘察地铁

线路主要位于该构造区内,位于该构造区的北部<sup>[3-4]</sup>。

测区位于广州市黄埔区,根据区域构造资料《广州城市地质图集》,该区域内发育的狮子洋断裂组,由11条次级北西向断裂组成。断裂组最后一次活动造成的地貌效应形成了狮子洋水道<sup>[4]</sup>。根据区域地质及拟建地铁线路走向,推测影响本工点的断裂为北西向的分F228南岗-虎门断裂。

### 3.3 地层岩性

根据《广州城市地质》<sup>[3]</sup>及《广州城市地质图集》<sup>[4]</sup>,拟建工程场地属于海陆相及内陆湖泊相地层,主要包含新生代第四系(Q)、白垩系(K)。

#### 3.3.1 第四系(Q)

其主要包含第四系由人工填土层(Q<sub>4</sub><sup>ml</sup>)、海陆交互沉积层(Q<sub>4</sub><sup>mc</sup>)、冲洪积层(Q<sub>3+4</sub><sup>al+pl</sup>)和残积层(Q<sup>d</sup>)组成,覆盖于基岩之上。

#### 3.3.2 白垩系(K)

其主要包括上统三水组康乐段(K<sub>2</sub>s<sup>1</sup>):棕红、紫红、暗紫色,主要为砂岩、含砾粗砂岩、砾岩,泥质胶结为主,粉细粒结构,中厚层状构造;下统白鹤洞组猴岗段(K<sub>1</sub>b<sup>1</sup>):浅紫红,暗紫红、紫棕色,主要为砂岩、粉细砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩,以砂质结构为主,泥质胶结,中厚层状构造。

### 3.4 地球物理条件

根据勘察成果资料及区域地质资料,测区内存在以下主要岩土层介质:第四系覆盖层、强一中风化含砾粗砂岩、砂岩。各种岩土层介质的波速及波阻抗如表1所示。

表1 测区内各岩土层介质的物性参数经验值一览表

岩土层名称	密度 g/cm <sup>3</sup>	横波波速 (m/s)	纵波波速 (m/s)	横波波阻抗 (kg/s·m <sup>2</sup> )	纵波波阻抗 (kg/s·m <sup>2</sup> )
填土层	1.80	170	1900	0.306 × 10 <sup>6</sup>	3.42 × 10 <sup>6</sup>
淤泥层、淤泥质土层、淤泥质砂层	1.65	100	1500	0.165 × 10 <sup>6</sup>	2.48 × 10 <sup>6</sup>
粉砂层~中粗砂层	1.75	200	1800	0.35 × 10 <sup>6</sup>	3.15 × 10 <sup>6</sup>
强风化含砾粗砂岩层、砂岩层	2.00	350	2350	0.70 × 10 <sup>6</sup>	4.70 × 10 <sup>6</sup>
中风化含砾粗砂岩层、砂岩层	2.30	500	3000	1.15 × 10 <sup>6</sup>	6.9 × 10 <sup>6</sup>

## 4 综合物探方法选择及适用性、有效性试验

### 4.1 水域地球物理勘探方法

目前水域综合物探的方法根据其应用目的不同,可分为剖面法和测深法,可细分为浅地层剖面法、旁侧声纳法、磁探测法、水上地震法和水上电法等<sup>[5]</sup>。目前,常采用的水域物探方法有高密度电阻率法、高频大地电磁法、瞬变电磁法及地震反射波法等<sup>[6]</sup>。其中,地震反射波法是比较成熟、常用的方法,利用波的动力学特性来研究工程地质问题,可探测地质构造、基岩面、覆盖层分层、水下地形等情况,是目前水域探测物探中首选方法<sup>[7]</sup>。例如,刘建军、马文亮、卢秋芽等采用浅层地震查明了水面下 50m 范围内的地层分布、不良地质滑坡及水下障碍物情况<sup>[8]</sup>。罗国煜研究发现地震法适合于探查隐伏富水优势断裂,对水下隐伏断裂探测效果和探测精度精度更优于电法<sup>[9]</sup>。唐大荣、方松耕采用浅层高分辨反射波法提高了对小断距断层的分辨,查明了过江隧道基岩埋深、断层位置及基岩破碎带范围<sup>[10]</sup>。同时,地震反射波法可以查清地表浅层各地层分层厚度及其连续变化形态、地层间接触关系、地质构造、地层内部空洞及松散软弱地层的规模及形状。相对于常规钻探,在连续追踪第四纪至基岩的岩土层界面、内部构造变化形态等具有不可替代的优势<sup>[11]</sup>。

### 4.2 物探方法选择

根据过江地铁隧道工程的断裂专题勘察要求及目的,结合测区内岩土层的地球物理条件,拟采用物探结合钻探的综合勘探方法。由于岩土层间存在较大的地震波速及波阻抗差异,满足进行地震反射波法的条件。因此物探方法选择对地质风化分层、构造破碎带探测效果明显的浅层地震反射波法。

### 4.3 物探方法适用性及有效性试验

本工程穿越珠江水域段水文地质条件、工程地质条件较为复杂,仅采用单一物探方法得到的测试结果,难以满足过江隧道勘察精度要求。因此,需通过在主测区旁珠江主航道支流进行小型现场试验确定该方法在测区内的适用性及有效性。同时,进一步验证并获取不同岩土层的物性参数,将测试结果与钻探成果进行对比分析,便于后续正式水上探测进行综合解释推断。

#### 4.3.1 仪器设备

物探测试采用的记录设备为美国 Geometrics 公司生产的

Geode 数字化信号增强型浅层地震仪,整机内置工业级计算机控制。水上地震电缆采用低频多道(12道×2)漂浮电缆,工作时的沉放深度采用水鸟控制。

#### 4.3.2 测线定位

根据试验物探测线布置,采用中海达 V9 型 RTK 进行测量。工作时,通过 GPS 信号采集 3 个控制点坐标、解算坐标系间的转换参数,最后用第 4 个控制点坐标来进行校对,通过反复校对保证测放精度误差在 2cm 内。

测量工作采用水上导航方式,将测量工具固定于船体,连接至地震仪及电脑。采用电脑导航定位。通过导航软件不断修正测量船体航向,保证实际测线沿设计测线航行。导航系统和地震数据采集系统自动记录定位数据、导航参数、炮点坐标、对应地震数据坐标以及其它测量信息。

#### 4.3.3 多道反射波收集及处理

多道地震数据在探测时采用《Geogiga Seismic 地震数据处理软件系统》及《HOLEWIN 弹性波处理系统(水域增强版)V13.0》软件进行自动收集处理。

#### 4.3.4 多道地震反射资料分析与解释原则

测试完成后,在地震时间剖面上找出标准层,其选定原则为测区内具有较强振幅、同相轴连续性好、测区内可追踪性好。然后通过标准层对时间剖面进行解释、对比,解释过程需将全部测试交点闭合,闭合差控制在 5%t0 以内。

#### 4.3.5 测试试验测试及解释结果

通过现场测试试验,珠江水域支流水上地震波反射得到的地震时间剖面上识别出 T1~T4 共 4 个地震波强反射波组。根据其地震相推断, T1 面为以上为珠江水体,其反射波组以水平层状连续反射为主; T2 为淤泥、淤泥质土、淤泥质砂层的底界,其反射波组能量强、连续性较好。 T3 为强风化岩层顶界反射波组能量强,连续性较好。 T4 为中风化层顶,部分反射能力较强、连续性较好,部分测段存在较多绕射波、回转波等。得到地震时间剖面如图 1 所示。并进行地震层位划分,识别出 4 个地震波强反射界面,其中 T1 为水底反射界面; T1 和 T2 反射界面之间为淤泥、淤泥质土、淤泥质砂等软弱土层; T2 和 T3 反射界面之间为粉细砂-中粗砂、粉质黏土等; T3 和 T4 反射界面之间为强风化的碎屑岩; T4 界面以下为中-微风化碎屑岩。最终得出综合地质解释剖面如图 2 所示。

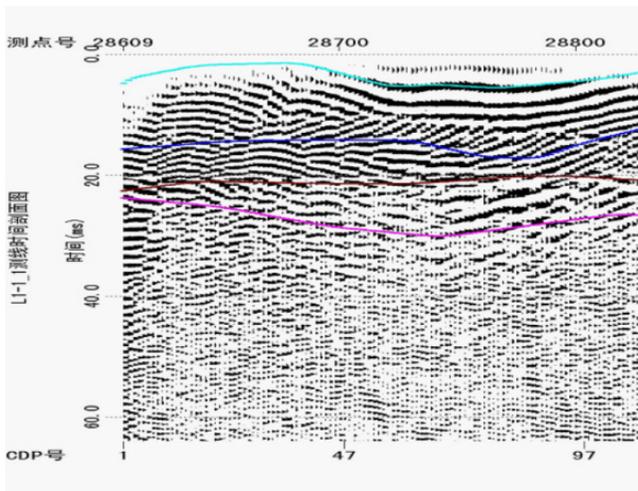


图 1 地震时间剖面

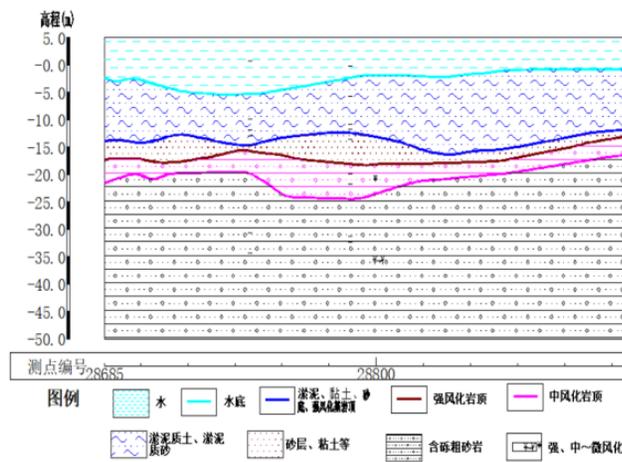


图 2 综合地质解释剖面

为验证物探成果的适用性及有效性，对其进行钻探验证，对比工程地质钻探剖面，两者吻合性较好。水上地震波反射法能较好解释岩土层变化及基岩风化层位变化，地层划分、层位深度及反映基岩特征探测结果较为准确，同时成果直观清晰。因此，该方法在本场地适用性较好、测试结果较好，选择该物探方法有效可行。根据本次现场测试试验对工作参数进行确定，采集参数如表 2 所示。

表 2 水上浅层地震反射法数据采集工作参数

序号	项目	采集参数	备注
1	滤波通带	全通	1.75~20000Hz
2	地震仪采样间隔	0.125ms	
3	记录长度	512ms	4096 样点
4	偏移距	10.0~20.0m	
5	炮间隔 / 道间隔	4~6m	
6	震源、漂缆沉放深度	1.5m	
7	航速	2.0~2.5 节	

采用上述参数采集的原始地震记录波组清晰连续、层位分明、信噪比高。后续处理得出的时间剖面波组清晰、层位分明，可取得很好的勘探效果。

## 5 物探成果综合解释及对比验证

### 5.1 物探成果解释原则

由于物探成果的多解性和易受干扰的特性，不同人员对于物探测试结果的解读易产生差异，无法与实际地层对应。为了让物探成果更符合实际情况，确定本次探测成果综合地质解释原则如下：①通过地震反射波测试结果追踪大致层位，参考工程地质钻探及土工试验对岩土层界面的划分为依据；②构造带及不良地质发育带的位置以地震反射波测试进行初步探查，最终性质判定、分布位置以钻探验证成果为主。

### 5.2 物探成果分析

根据勘察任务要求及目的，本次沿设计线地铁路中心或平行中线共布置了 3 条测线 L1-1 线~L1-3 线，测线横跨珠江主航道。本次水上地震反射波法 L1-1 线~L1-3 线主要位于设计线路 DK28+600~DK29+550 里程之间，各测线地震时间剖面如图 3、图 4、图 5 所示。

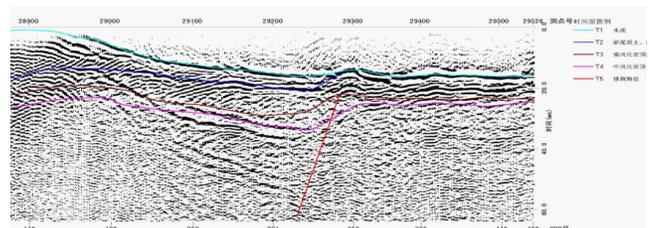


图 3 L1-1 线地震时间剖面

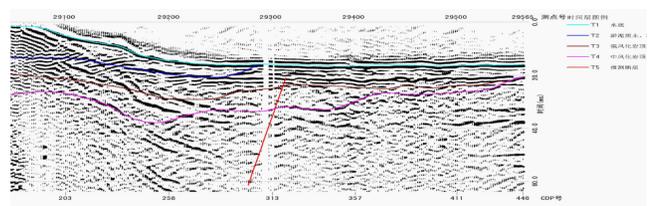


图 4 L1-2 线地震时间剖面

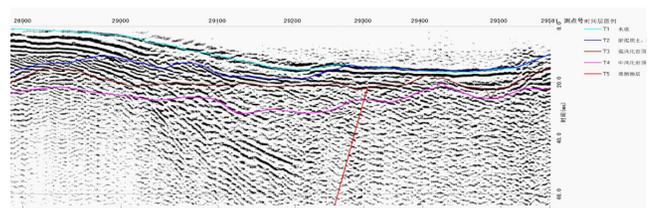


图 5 L1-3 线地震时间剖面

本次探测共发现 6 处异常，各测线的异常点位置及异常

表征归纳如表 3 所示。

表 3 水上浅层地震反射法探测异常点

测线名称	异常点点号	异常点位置	异常表征
L1-1 线	28985 点号	隧道穿越江心洲附近	地震波组错断, 并且有多次反射波组
	29279 点号	珠江主航道江底	同相轴处出现明显错断
L1-2 线	29100 点号	隧道穿越江心洲附近	地震波组错断, 并且有多次反射波组
	29310 点号	珠江主航道江底	同相轴处出现明显错断
L1-3 线	28965 点号	隧道穿越江心洲附近	地震波组错断, 并且有多次反射波组
	29305 点号	珠江主航道江底	同相轴处出现明显错断

### 5.3 物探成果异常解释

(1) L1-1 线点号 28985, L1-2 线点号 29100 和 L1-3 线点号 28965 附近存在物探异常, 表征为地震波组错断, 并且有多次反射波组。根据前期水上地震反射法在本场地测试试验积累的经验, 此情况为江心洲位置水深由浅入深地震波在水面与河床底来回震荡引起, 并不是断层构造引起。

(2) L1-1 线地震时间剖面同相轴在 29279 点号处出现明显错断, L1-2 线 29310 点号处反射波同相轴中断, L1-3 线 29305 点号处反射波同相轴中断。3 处异常点均处于同一水平位置附近, 且均往小里程方向倾斜, 倾角约 54°~61°。根据侧线 L1-1 线~L1-3 线异常点位置及异常表征, 结合区域地质推测在珠江主航道江底存在断裂或基岩破碎。

### 5.4 工程地质钻探验证

根据测线 L1-1~L1-3 物探结果, 显示在 DK29+240~350 附近存在异常。根据地铁勘察相关规范及设计技术要求, 沿地铁隧道外侧各施工一排钻探孔, 钻探孔间距约 30m, 异常边界处勘探孔间距加密至 15m。

本次项目在珠江水上钻探期间, 物探显示异常段附近揭露到具断裂特征, 揭露岩相发生突变, 岩层层序混杂错乱, 且岩芯破碎。同时, 揭露含砾粗砂岩、强蚀变花岗岩、花岗质碎裂岩。揭示岩层错断, 断裂面比较明显, 验证了物探异常点存在断裂的推测, 且说明水上地震波反射法在深部水域探测效果较好。

本次揭露断裂破碎宽度约 120m, 靠近断裂中部, 岩性混杂, 其中含砾粗砂岩位于上部, 下部为花岗质碎裂岩及强蚀变花岗岩。受断裂构造作用, 靠近断裂边缘处, 岩芯因断裂

构造作用, 岩芯可见明显断裂挤压痕迹, 局部具有高角度破裂面。根据钻探揭示的断层破碎带地质纵断面如图 6 所示(断层破碎带为图中虚线标示部分)。

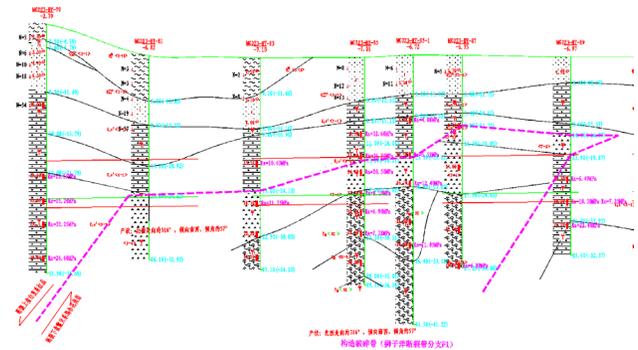


图 6 钻探揭露断裂示意图

## 6 综合地质解释

根据测线 L1-1~L1-3 物探结果及水上钻探验证, 在物探显示异常段附近揭示断裂破碎带。由区域地质资料本场地区域内存在狮子洋断裂组, 且揭示断裂相关产状及特征与区域地质资料较为一致, 推测该处为狮子洋断裂组内一组断裂。根据区域地质资料及本次勘察成果, 该断裂呈北西走向约 316°, 倾向南西, 倾角约 57°, 位于设计里程 DK29+240~DK29+350 段内, 断裂带宽度约 120m, 与区间隧道约近垂直相交, 断裂上盘为碎屑岩, 下盘为花岗岩。

同时, 根据物探及钻探成果, 得到过江段连续分布的综合地质纵断面图如图 7 所示。

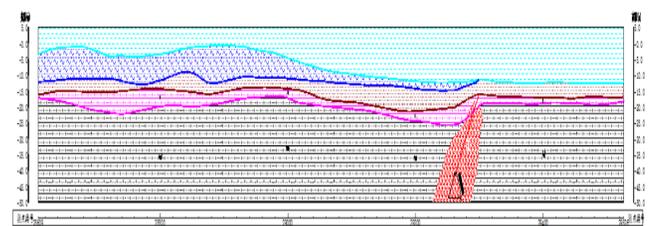


图 7 综合地质解释纵断面图

## 7 结论与讨论

在过江地铁隧道的勘察工作中, 常规水域钻探易受江河水域施工难度高、航运限制等条件影响, 尤其在水域存在断裂构造带时, 其影响程度更大。通过本次工程实践, 为打破上述条件限制, 采用水域物探结合地质钻探的综合手段不但揭示了江底断裂带的位置、范围及特征, 还发现过江隧道局部位于断裂带内, 且断裂带上部无稳定隔水层, 在过江隧道

施工时易引起涌水、涌砂事故。因此,该方法能有效探查过江地铁隧道的工程地质条件、断裂构造等情况,提高过江隧道勘察成果的丰富度、可靠度及可信度。同时,也能适当减少地质钻探的工作量,降低勘察施工难度。为后续评价施工可能存在的风险、专项设计、制定专项施工方案等提供详实的地质成果资料及依据,对类似工程有借鉴意义。

根据在实践过程中的经验及地铁设计需求,有以下几个方面值得注意:

(1) 水域地震反射波法作为目前首选水域物探方法,在浅水水域常存在水底多次反射波,易导致下覆地层反射信号失真,勘探成果不理想。因此在测试事件中必须进行物探方法适用性及有效性试验,并通过现场测试试验确定最佳工作采集参数。

(2) 目前物探手段和方法成果的解释存在多解性,因此在使用过程中宜采用多种物探手段进行相互验证、对比分析,从而进行综合地质解释,或者与钻探相结合进行综合勘探,这样才能使到的勘察成果具有较好的可靠度与可信度。

(3) 目前在地铁建设工程中,在穿越断层破碎带等不良地质时,通常需查明其裂隙、孔隙发育程度及地下水富集情况。地震波反射法能通过P波传播速度 $V_p$ 来查明裂隙或孔隙度。通过S波、P波在传播过程中的能量损耗差异,得到两种反射波强弱差异来查明破碎带是否富水,但由于S波不能在液体中传播,因此其在探查水底断裂破碎带是否富水存在一定的限制。

## 参考文献

- [1] 高云升. 物探方法在工程地质勘查中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2013(14):56.
- [2] 秦大海. 物探方法在工程地质勘查中的应用[J]. 世界有色金属, 2019(11):116.
- [3] 庄文明, 黄宇辉, 林小明. 广州城市地质[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [4] 庄文明, 黄宇辉, 林小明. 广州城市地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [5] 李利群, 王兆景, 何惠军. 综合水域物探技术在过江管道穿越过程中的应用[J]. 浙江建筑, 2015(10):42-45.
- [6] 宋明福, 刘宏岳. 大直径水底盾构隧道不良地质段及疑似溶洞探测技术的应用[J]. 隧道建设, 2013(02):122-128.
- [7] 佚名. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015(05):1-65.
- [8] 刘建军, 马文亮, 卢秋芽, 等. 工程物探在地铁越江隧道勘查中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2007(S1):275-279.
- [9] 罗国煜. 判定富水优势断裂的综合物探方法[J]. 工程勘察, 1992(03):69-72.
- [10] 唐大荣, 方松耕. 浅层高分辨地震反射波法在武汉市过江隧道工程地质勘察中的应用[J]. 物探与化探, 1987(04):37-42.
- [11] 王庆海, 徐明才, 刘永东. 强干扰下浅层、超浅层反射地震技术及其应用[J]. 物探与化探, 1987(02):79-80.