

综合物探方法在城市道路典型障碍物定位研究中的应用

杨超

(上海元易勘测设计有限公司, 上海 201203)

摘要: 在城市主干道路改扩建工程中,为准确测定地下原水箱涵及其附属隐伏护管桥的空间位置,保障高架桥梁桩基的准确设计及顺利施工,采用高密度电法、地震面波法、探地雷达法、GEM-2多频电磁法等几种常用工程物探方法,旨在对比方法有效性,总结技术要点,为城市道路典型障碍物定位研究积累技术资料及工程经验。地下原水箱涵道及其附属隐伏护管桥为钢筋混凝土,具有特殊的工程结构,与地层具有明显的物性差异,这里利用GEM-2多频电磁法清晰地探测到了护管桥的平面边界,高密度电法、地震面波法较为有效地圈定了护管桥及原水箱涵的空间位置,探地雷达法清晰地探测到了护管桥区域,并且精细地刻画了原水箱涵及护管桥的空间关系,这些成果为类似城市道路工程问题的地球物理勘察提供了实践依据及解决方案。

关键词: 城市主干道路; 护管桥; 原水箱涵; 多频电磁法; 高密度电法; 地震面波; 探地雷达

中图分类号: P631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.11

0 引言

城市道路一直是城市现代化水平的重要标志,宽阔舒适的道路不仅可以树立良好的城市形象,而且可以为城市交通提供良好的保证。随着城市的更新发展,许多既有道路无法与新的城市发展规划相匹配,因此需进行改建或者扩建^[1]。然而,在此过程中,会遇到各种地下构筑物,原水箱涵道及其附属隐伏护管桥便是其中典型障碍物,由于建设年代久远,竣工资料不完整、不精准、甚至缺失等原因导致空间位置信息缺失,成为道路,特别是桥梁桩基础设计、施工过程中的难点问题,给设计、造价及施工造成不利影响。要解决此问题,就需要在设计或施工之前对其进行精准探测,从而保障城市道路改扩建顺利有序的进行。

本次探测障碍物目标为原水箱涵及其保护结构(护管桥),两者皆属钢筋混凝土材质,具有特殊

的工程结构,与地层具有明显的物性差异,所处位置位于城市主干道路路面以下,根据现有资料仅清楚该箱涵高约3.5 m,宽约10 m以及其大概位置;具体边界、埋深及其与护管桥空间结构关系不清,且该道路为沥青路面,限速50 km/h,来往车辆密集,部分工程物探方法因激发、接收装置,采集、接收条件,信号接收原理,采集时间等原因或影响交通,或无法接地,不适宜在沥青路面的城市主干道路中进行,仅可在道路两侧人行道及绿化带进行。

针对上述典型障碍物的探查,一方面要确定其平面位置,另一方面要确定其深度,同时要明确两者之间的空间结构关系。基于此,笔者采用高密度电法、地震面波法、探地雷达法、GEM-2多频电磁法等几种常用工程物探方法,旨在对比方法有效性,总结技术要点,为城市道路典型障碍物定位研究积累技术资料及工程经验,为类似城市道路工程问题的地球物理勘察提供实践依据及解决方案。

1 方法原理及特点

1.1 并行高密度电法(PEM)

并行高密度电法(PEM)实现了所有参与电极的并行激发与采集^[2],供电测量过程中没有闲置电极^[3],采集数据量海量提升,而采集时间呈 n^2 倍缩短^[2]。与常规传统高密度电法每次供电只能采得一个测点数据相比,网络并行高密度电法可同时获取多个测点数据,是一种全电场观测技术^[4]。主要有

2类工作方法:AM法(图1(a))和ABM法(图1(b))^[2]。一次现场测量可实现直流电法勘探中的二极法、单极偶极、温纳三极、四极、偶极、微分和中梯等各类电法装置^[5-6](图1)。

1.2 瞬态面波勘探

多道瞬态面波法数据采集时用锤击作为震源,单端激发、多道接收,通过采集各频段瑞雷波的垂向分量,经处理可得到地下各层介质的瑞雷波速度和对应的频率(图2)。当地下存在异常体时,会在频散曲线中出现“之”字形现象,据此可判断地下异常体的存在。

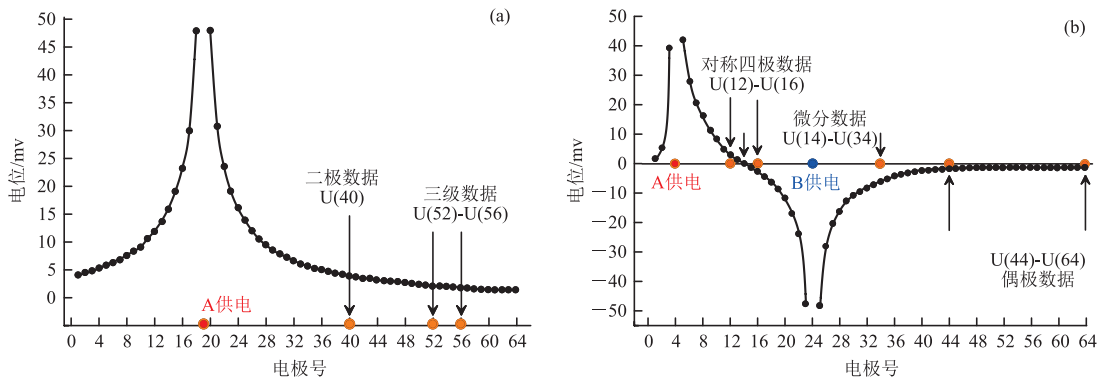


图1 电位分布及观测装置(据刘盛东,2007修改^[5])

Fig.1 Potential distribution and observation device in AM and ABM method

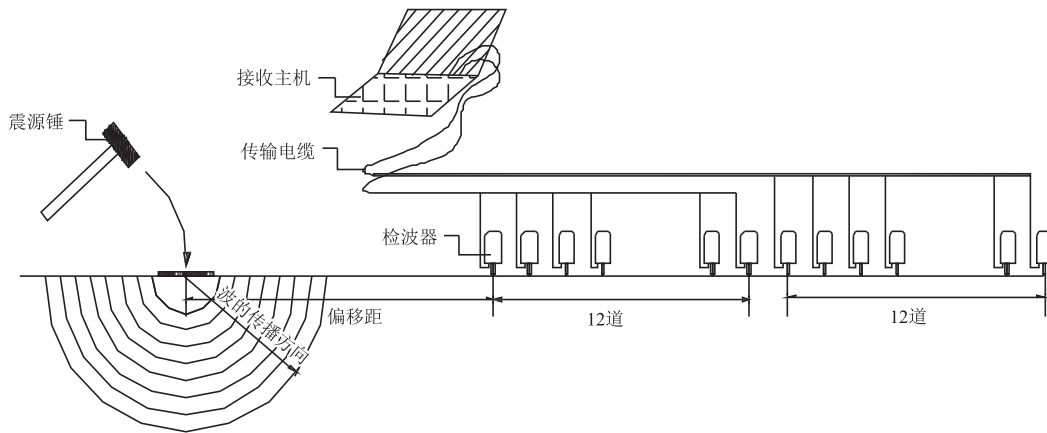


图2 瞬态瑞雷波勘探数据采集示意图

Fig.2 The sketch map of transient Rayleigh wave data acquisition

1.3 探地雷达探测方法

探地雷达是利用电磁波在介质传播过程中异常物体与周围介质的电性差异(介质电导率、介电常数差异),致使电磁波被反射而由接收天线所接收,通过对接收到的反射波的分析处理,从而确定异常物体空间位置及可能的物理属性(图3)。

1.4 多频电磁法

电磁法探测以地下介质的电、磁性为基础,通过发射不同频率的一次电磁场,从而使地下的良导体(如钢筋结构)中感应出微弱的涡流电场,由此电场产生二次磁场,被检测和记录^[7](图4)。

GEM-2 数据处理是去除一次场,保留能够反映

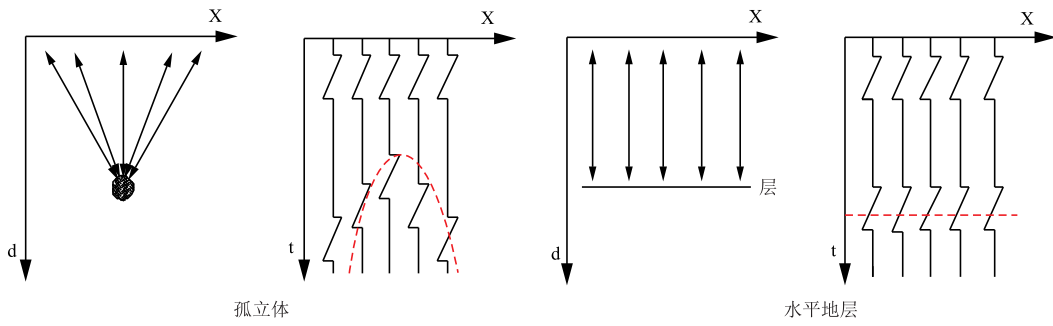


图 3 探地雷达探测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of ground penetrating radar

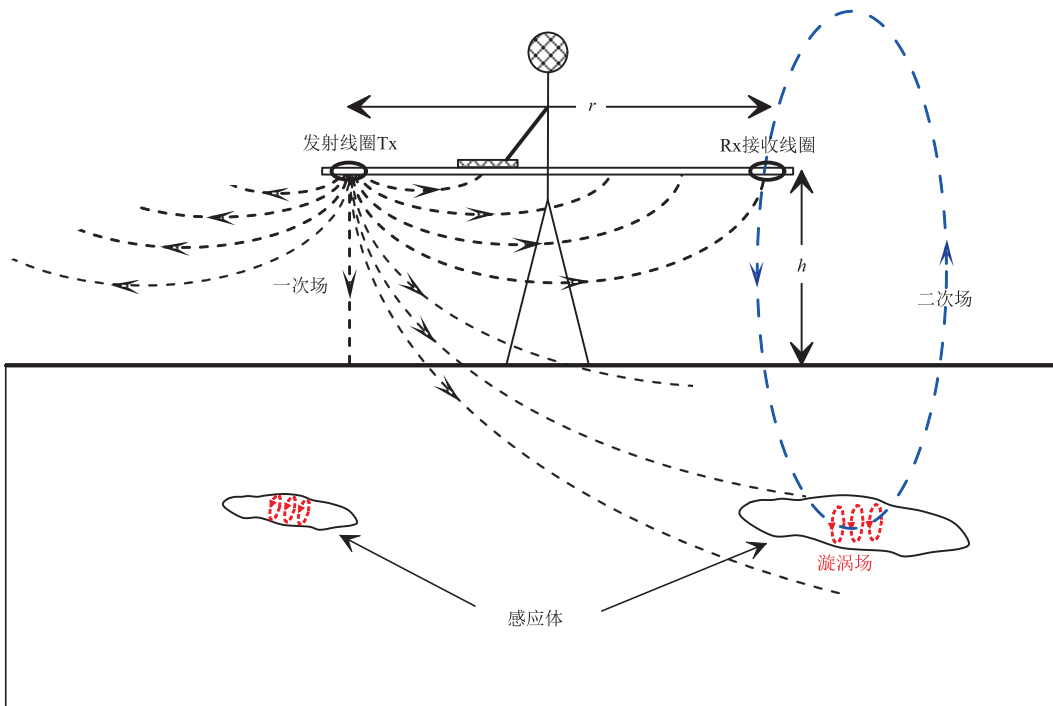


图 4 GEM-2 工作原理图(据 WON I J, 1996 修改^[8])

Fig. 4 The schematic diagram of GEM-2 working principle

目标介质信息的二次场信号,同时将二次场和一次场做比值,并乘以 10^6 ,称为归一化二次场,用百万分之一(ppm)度量^[7]。

对于水平共面模式(或垂直偶极子模式),地面以上 h 高度观测,归一化二次场可以写成^[7-8]:

$$\frac{H_S}{H_P} = -r^3 \int_0^\infty R(\lambda, \mu, \sigma, \omega) e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda = I + iQ \quad (1)$$

$$R(\lambda, \mu, \sigma, \omega) = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + i\omega\mu\sigma}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + i\omega\mu\sigma}} \quad (2)$$

其中: H_S :二次磁场

H_P :一次磁场

r :收发线圈距离

h :仪器距地面高度

J_0 :零阶贝塞尔函数

λ :积分变量

μ :磁导率

σ :电导率

ω :角频率

I :同相分量

Q :正交分量

GEM-2 所测原始数据就是同相分量和正交分量,基于此,可以获得其他不同物理意义的参数。

2 测线布置及数据采集

本次探测位于城市主干道路,路面为沥青,限速 50 km/h。根据收集资料及现场实际情况,先进行面上扫描,在此基础上利用不同方法进行纵向探测,并结合钻孔进行验证。

2.1 多频电磁法

1)探测位置

根据现场实际情况及收集资料分析,选择沿道路方向穿越原水箱涵进行剖面探测,剖面起止位置以观测至数据背景场为准(位置如图 5 所示)。

2)数据采集

采用美国 GEM-2 多频电磁仪,采集同相分量 I 和正交分量 Q ,连续自动测量,默认采样间隔 40 ms,每 3 个测量数据叠加为一个记录数据,即每 120 ms 记录一个数据,选用 1 525 Hz、5 325 Hz、18 325 Hz、63 025 Hz 等 4 个发射频率。

2.2 高密度电法

1)探测位置

根据现场实际情况及 GEM 成果分析,选择道路北侧绿化带穿越原水箱涵进行剖面探测(位置如图 6 所示)。

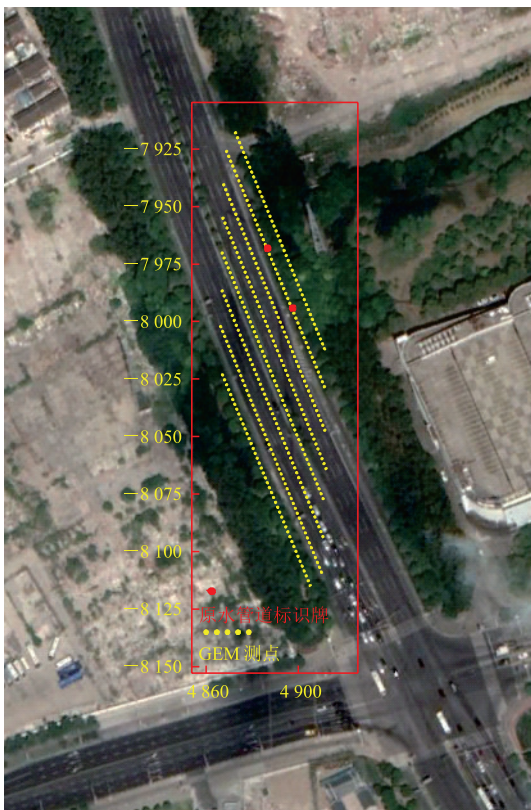


图 5 电磁法剖面测线位置图

Fig. 5 The location map of electromagnetic section survey line

2)数据采集

采用安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司的 HZE11I 并行高密度电法仪进行数据采集,64 道电极,电极间距 1.0 m,采用 AM 法获得联合三极数据。

2.3 探地雷达法

1)探测位置

根据现场实际情况及 GEM 成果分析,选择道路北侧人行道穿越原水箱涵进行剖面探测(位置如图 6 所示)。

2)数据采集

采用加拿大 EKKO 探地雷达系统进行数据采集,测点间距 0.5 m,100 MHz 主频天线。

2.4 多道瞬态面波法

1)探测位置

根据现场实际情况及 GEM 成果分析,选择道路北侧绿化带穿越原水箱涵进行剖面探测(位置如图 6 所示)。

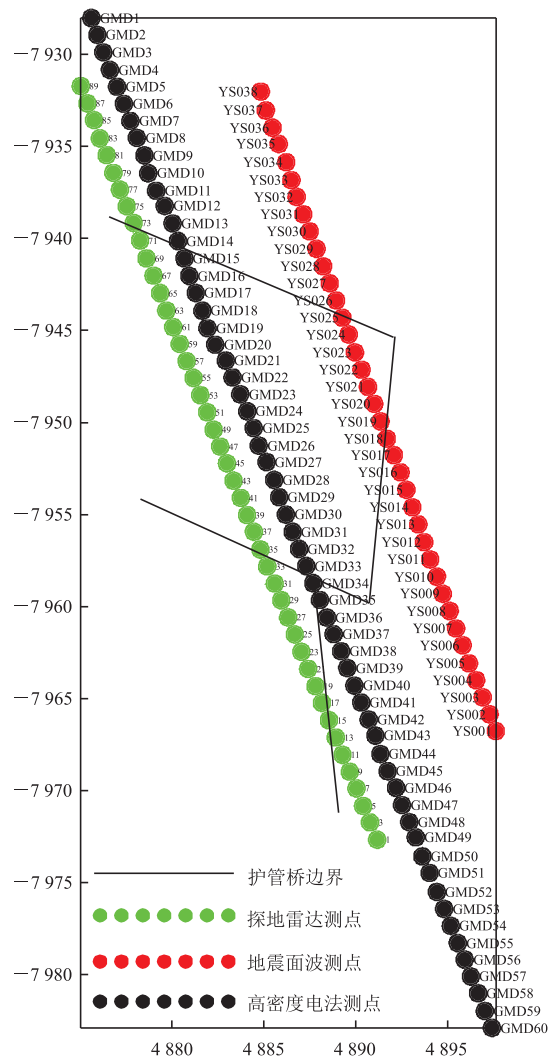


图 6 综合方法剖面测线位置图

Fig. 6 The location map of survey line

2)数据采集

采用北京水电所 SWS-6A 型工程地震系统进行数据采集,24 道,直线等道间距 1.0 m,最小炮检距 8 m,0.5 ms 采样间隔,每道采样数 2 048,4 Hz 检波器。

3 应用效果分析

3.1 多频电磁法(GEM-2)成果分析

通过正演模拟可以从理论上证明,GEM-2 多频电磁几乎是单极的,异常在目标的正上方^[8]。这里采用 1 525 Hz、5 325 Hz、18 325 Hz、63 025 Hz 四个工作频率,对不同深度的电导率层进行了探测。根据图 7、图 8 可知,从高频到低频:①电导率和磁导率皆具有很强的数值范围及梯度边界,皆具有清晰的菱形边界,且边界范围相同。由于测线是根据已知原水箱涵标志位置布置,剖面起止位置以观测至数据背景场为

准(图 5),结合目标体钢筋混凝土特性,判断该异常即为护管桥,桥宽约 20 m,长约 150 m;②电导率和磁导率皆具有清晰的菱形轮廓,根据图面轮廓及数据陡变梯度带特征可知,该菱形轮廓由至少 5 个相对的菱形体拼接而成,推测各小菱形体之间的弱异常条带为护管桥拼接缝,据此,基本确定了护管桥边界的位置,同时勾勒了该桥的结构特征(图 9)。

文中,4 个不同频率电导率梯度边界为 10^3 mS/m~ 10^5 mS/m 数量级,利用测量中介质电导率和电磁波频率,根据“趋肤深度列线图”计算各层的趋肤深度 $\delta^{[9-10]}$,从而获得探测深度 $d = \sqrt{\delta^{[7,11]}}$ 。由于各频率异常主体电导率值 $\gg 10^3$ mS/m,因此判断护管桥覆土深度很浅,加之钢筋网对电磁信号的屏蔽作用,低频信号无法穿透护管桥界面,据此,估算护管桥覆土深度 ≤ 0.6 m,并对该异常在道路北侧绿化带进行了揭露验证,发现其边界与 GEM-2 数据异常边界完全吻合,埋于地表以下 0.5 m(图 9)。

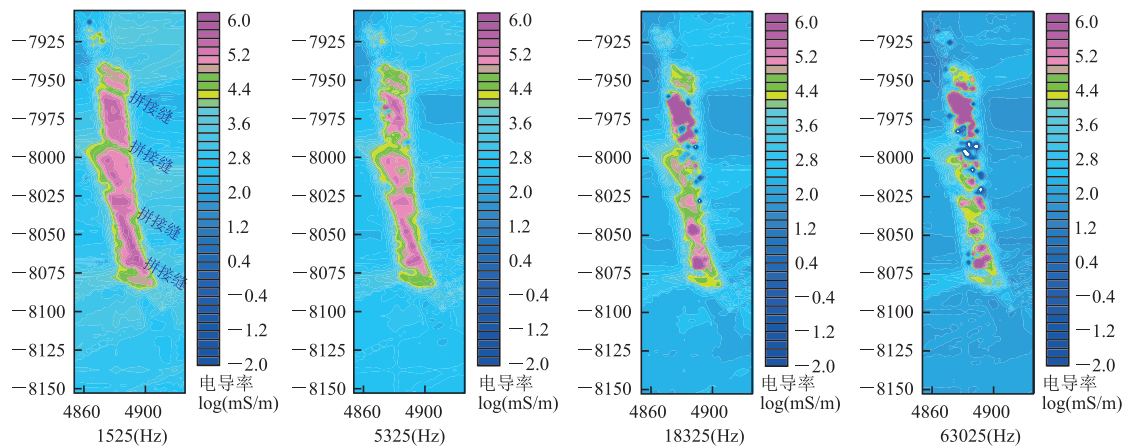


图 7 不同频率 GEM-2 电导率数据

Fig. 7 Conductivity data of GEM-2 at different frequencies

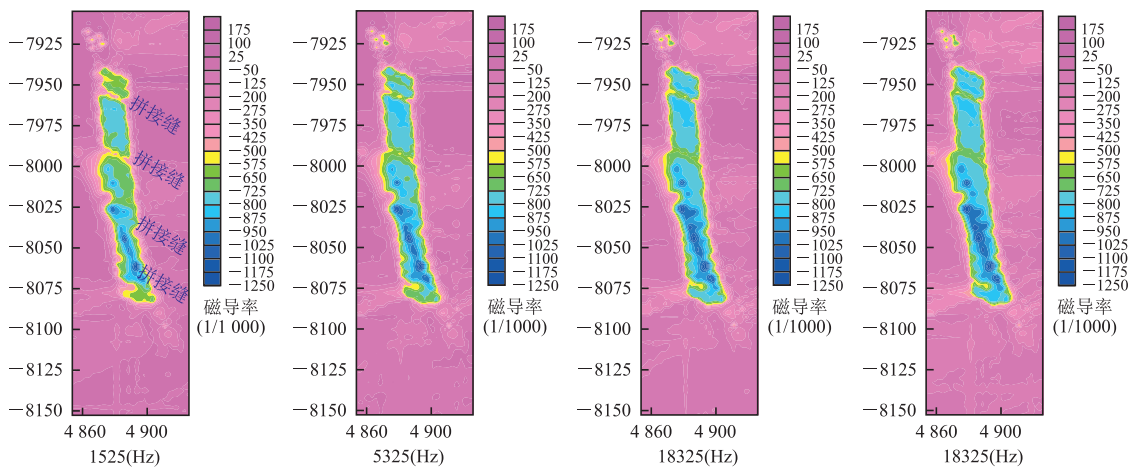


图 8 不同频率 GEM-2 磁导率数据

Fig. 8 Permeability data of GEM-2 at different frequencies



图9 护管桥边界解译及验证

Fig. 9 The verification photo of anomaly boundary

3.2 并行高密度电法(PEM)成果分析

由于现场条件限制,高密度剖面布设在道路北侧绿化带内,剖面长度 64 m,剖面与护管桥斜交,护管桥在剖面上的投影位于 15 m~36 m 处(图 10)。

本文采用联合三极进行反演,根据图 10 可知,在剖面 15 m~36 m 区间段,深度约 0.5 m,对应电阻率 $80 \Omega \cdot \text{m} \sim 2.8 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$,顶界面相对平直,具有明显梯度带,且该异常平面边界位置与 GEM-2 异常梯度边界位置完全吻合,可见高密度电法能够准确反映出主桥结构边界。在剖面 14.5 m~25 m 区间段(浅部低阻可能存在干扰),对应电阻率

$150 \Omega \cdot \text{m} \sim 2.7 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$,异常向小号点加厚,从 25 m 处的 5.6 m 厚增加至 14.5 m 处的 7.5 m 厚,推断该处为原水箱涵影响,认为剖面上箱涵左边界比顶部护管桥左边界伸出大约 0.5 m,右边界在护管桥正下方,电流无法穿透,向右主体为护管桥异常;在剖面 14.5 m~15 m 中间,深度约 2.5 m 处存在电阻率缩颈特征,推断为原水箱涵左上角与护管桥左下角边界,可见高密度电法能够反映出箱涵异常,由于位于护管桥下方,电流无法穿透,无法反应全貌,但因剖面上箱涵左边界已伸出护管桥,异常轮廓出现,能够大致进行判断。

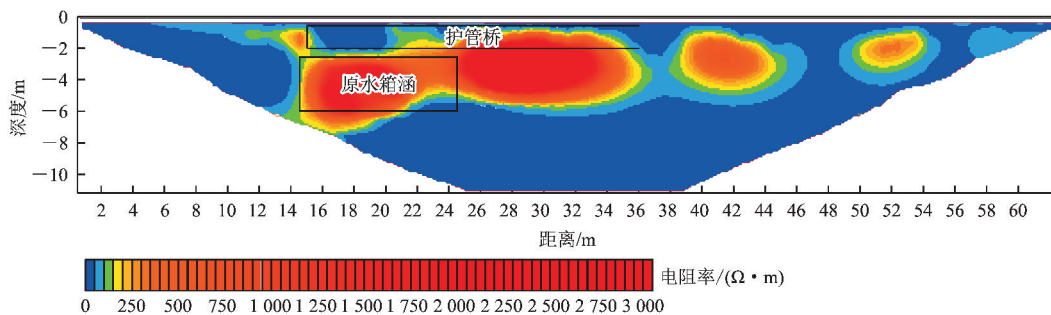


图10 联合三极反演电阻率断面解译推断

Fig. 10 The Inversion section of resistivity and interpretation map

3.3 探地雷达成果分析

由于现场条件限制,探地雷达剖面布设在道路北侧人行道内,剖面长度 44 m,剖面与护管桥斜交,护管桥在剖面上的投影位于 7 m~36 m 处(测点号 15~73)(图 11)。

根据图 11 可知,在剖面 7 m~36 m 区间段,深度约 0.5 m,可见明显的强反射同相轴,向下有多次反射现象,且两端存在绕射特征,其位置与 GEM-2 异常边界完全吻合,可见雷达已明显探测到护管桥结构边界。

沿表层同相轴向右追踪,可以发现大约在 10 m、12 m、14 m 处存在微绕射,其位置与 GEM-2 的条带状弱异常吻合,为护管桥拼接缝。沿中部同相轴向右追踪,大约在 16 m~30 m 处存在 2 处大型绕射双曲线弧,弧顶深 2.5 m,向下反射同相轴能量变弱,约至 6 m 深度处反射同相轴又明显增强,且双曲线弧基本消失,同相轴相对平直,据此推测剖面 16 m~30 m 处为原水箱涵,顶深 2.5 m,底深 6 m,箱涵高 3.5 m,且该箱涵可能为双排。

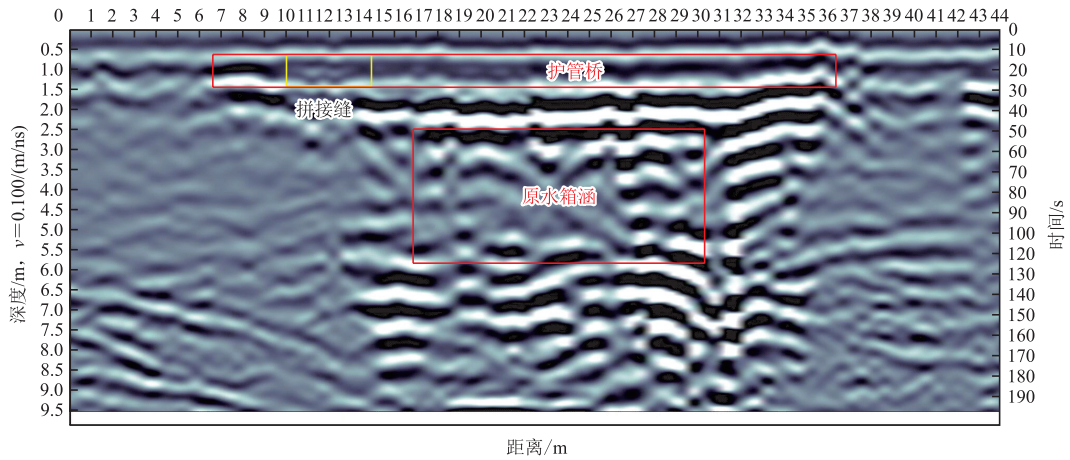


图 11 探地雷达解译推断

Fig. 11 The interpretation map of GPR detecting result

3.4 地震面波成果分析

由于现场条件限制,地震面波剖面布设在道路北侧绿化带内,剖面长度 38 m,剖面与护管桥斜交,护管桥在剖面上的投影位于 19 m~26 m 处(图 12)。

根据图 12 可知,在剖面 19 m~26 m 区间段,深度约 1.2 m 以上,可见明显的面波速度增大,其位置与 GEM-2 异常边界完全吻合,可见多道瞬态面波亦明显探测到原水箱涵结构边界,并且顶、底界面平直,结构反应非常清晰,据此,笔者结合验证资料,认为护管桥厚度为 0.7 m;0.5 m 以上至地表高速,则

是浅层的高频盲区。

在剖面 29 m~37 m(异常未结束)区间段,深度约 2.5 m,可见明显的面波速度增大,其左侧边界空间位置与探地雷达所反映的空间边界完全吻合,可见多道瞬态面波亦明显探测到原水箱涵结构边界,并且顶、底界面平直,结构反应非常清晰。

以上 2 种异常,护管桥异常为高波速覆盖层数据,原水箱涵异常则为中间高速夹层数据,两者皆为高阶模态与基阶模态的混合的频散数据,本文不做详细分析。

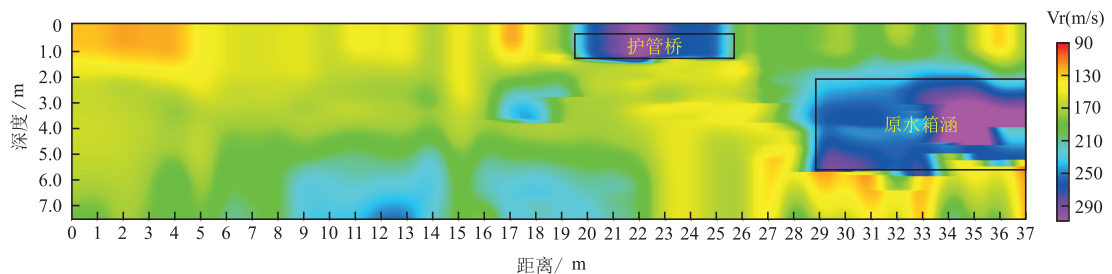


图 12 地震面波成果解译推断

Fig. 12 The interpretation map of seismic surface wave results

3.5 护管桥、原水箱涵边界界定及验证

综合不同方法成果,确定了护管桥及原水箱涵边界的三维空间位置关系,同时勾勒了该桥的结构特征(图 13)。对该异常在北侧(道路东侧)绿化带

进行了揭露验证,结果与数据异常边界基本吻合,护管桥埋于地表以下 0.5 m,桥厚 0.5 m,与解译结果相差 0.2 m;箱涵埋于地下约 2.2 m,与解译结果相差 0.3 m。

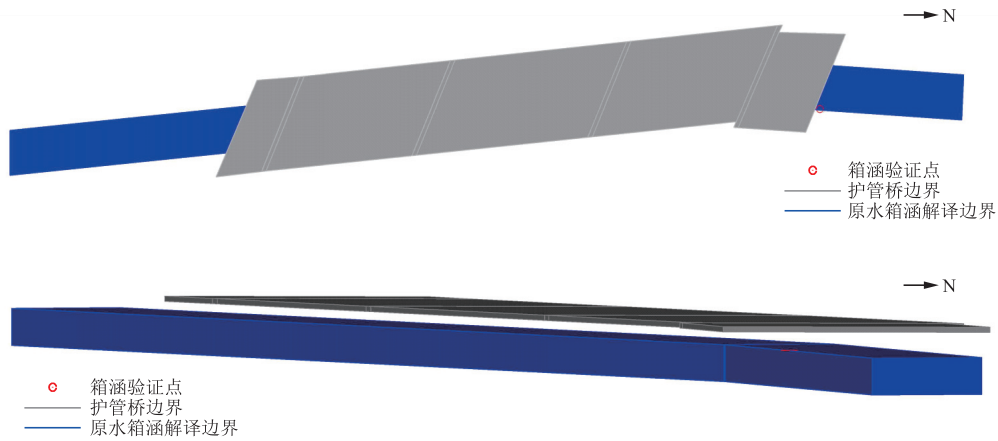


图 13 护管桥、原水箱涵边界解译及验证

Fig. 13 Boundary interpretation and verification of protective pipe bridge and raw water box culvert

4 结论

综合在城市道路地下隐伏护管桥、原水箱涵开展的 GEM-2 多频电磁扫描、并行高密度电法、地震面波和探地雷达成果,结合验证,表明各方法可以有效地探测出地下隐伏护管桥及原水箱涵的空间位置和结构,但是各种方法各具特点,总结如下:

1) GEM-2 多频电磁法在护管桥边界识别中效果非常明显,且异常位于目标体正上方,外业工作效率和成果处理速度也是所有方法中最快的最简单的,但是,由于钢筋混凝土的屏蔽作用,异常无法下穿,仅能反应目标体的平面位置。

2) 高密度电法联合三极效果非常明显,可以有效探测护管桥边界及埋深,由于电流无法穿透高阻体,其底部目标体无法识别,但当底部目标体伸出上覆高阻体遮挡时,异常体向伸出方向逐渐增厚,虽无法反应全貌,但异常轮廓出现,能够大致进行该侧边界判断。并且在上下目标体间存在电阻率缩颈特征,可大致推断原水箱涵左上角与护管桥左下角边界。

3) 探地雷达工作探测到了护管桥及原水箱涵的结构细节,是所有探测方法中精度较高的。但是,考虑到上海地区地下水位比较浅,部分雷达设备电磁波信号差,几乎无效,对于大深度探测估计更难以满

足。因此在布设雷达工作时,探测深度是最先需要考虑的问题,建议在使用前还是先做试验。

4) 地震面波清晰探测到了护管桥的底界面及原水箱涵的顶、底界面,但以上 2 种异常现象,护管桥异常为高波速覆盖层数据,原水箱涵异常则为中间高速夹层数据,两者皆为高阶模态与基阶模态的混合的频散数据,建议在使用前需定性分析清楚后,按照相应的正演模式进行频散曲线分析。

5) 城市道路地下典型隐伏障碍物探测,各构筑物工程地质结构虽有一定差异,但是本次探测工作所形成的工作经验及成果认识,仍具有一定的借鉴意义。展望这些典型隐伏障碍物的探测工作,笔者认为,埋深较浅者,应首先开展面积性扫描工作,快速识别异常边界,对于埋深较大的目标体,可开展综合物探方法进行纵向探测。

参考文献:

- [1] 刘美荣. 市政道路改扩建工程设计体会[J]. 住宅与房地产, 2016(33):226.
LIU M R. Design experience of municipal road reconstruction and expansion project[J]. Housing and Real Estate, 2016(33):226. (In Chinese)
- [2] 刘盛东, 刘静, 戚俊, 等. 矿井并行电法技术体系与新进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2336-2345.
LIU S D, LIU J, QI J, et al. Applied technologies and

- new advances of parallel electrical method in mining geophysics[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2336-2345. (In Chinese)
- [3] 曹煜, 刘盛东, 唐润秋, 等. 电法并行采集 AM 排列推导 ABM 排列技术研究[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1157-1165.
- CAO Y, LIU S D, TANG R Q, et al. Research on the derivation of ABM array for parallel acquisition of AM array technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1157-1165. (In Chinese)
- [4] 吴超凡, 邱占林, 杨胜伦, 等. 网络并行电法与传统电法超前探测效果对比[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 136-140.
- WU C F, QIU Z L, YANG S L, et al. A comparison of advanced detection effect between the network parallel electrical method and the traditional method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 136-140. (In Chinese)
- [5] 刘盛东, 刘士刚, 吴荣新, 等. 网络并行电法仪与稳态电法勘探方向[J]. 中国科技成果, 2007(24): 31-33.
- LIU S D, LIU S G, WU R X, et al. Exploration direction of network parallel high-density electrical instrument and steady-state electrical method [J]. China Science and Technology Achievements, 2007(24): 31-33. (In Chinese)
- [6] 曹煜. 并行直流电法成像技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2008.
- CAO Y. The imager technology of concurrent electrical meter[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2008. (In Chinese)
- [7] 何晓萍. GEM-2 数据处理与反演方法研究及其在冰厚度探测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HE X P. The Study of GEM-2 data processing and inversion methods for sea-ice thickness detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (In Chinese)
- [8] WON I J, KEISWETTER D A, FIELDS G R A, et al. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1996, 1(2): 129-137.
- [9] WON I J. A wide-band electromagnetic exploration method-some theoretical and experimental results[J]. Geophysics, 1980, 45(5): 928-940.
- [10] RAHMAN YACCUP, PETER BRABHAM. Ground electromagnetic survey (GEM-2) technique to map the hydrocarbon contaminant dispersion in the subsurface at Barry docks, Wales, UK[C]. AICCE, 2012: 1-9.
- [11] HUANG H P. Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors[J]. Geophysics, 2005, 70(6): G135-G142.

Application of comprehensive geophysical prospecting method in the research on the location of typical obstacles under urban roads

YANG Chao

(Shanghai Yuanyi Investigation & Design Co., LTD, Shanghai, 201203, China)

Abstract: In the reconstruction and expansion project of an urban trunk road, in order to accurately determine the spatial position of the underground raw water tank culvert and its auxiliary concealed bridge, which protecting the pipe, and ensure the accurate design and smooth construction of Viaduct Pile Foundation, several joint engineering geophysical exploration methods such as high-density electrical method, seismic surface wave method, ground penetrating radar method, and GEM-2 multi-frequency electromagnetic method are adopted which in order to compare the effectiveness, and summarize the technical points, and in order to accumulate technical data and engineering experience for the positioning research of typical obstacles in the urban roads. The underground raw water tank culvert and protection bridge are reinforced concrete, with a special engineering structure which has obvious physical properties different from the stratum. The results show that the plane boundary of the pipe-protecting bridge is clearly detected by GEM-2 multi-frequency electromagnetic method; and the spatial positions of the pipe-protecting bridge and the raw water tank culvert are delineated effectively by high-density electrical method and seismic surface wave method; and the ground penetrating radar (GPR) has detected the boundary of the pipe-protecting bridge, and delineated the spatial relationship between the raw water tank culvert and the pipe-protecting bridge. These results provide a practical basis and solution for the Geophysics Investigation of similar urban road engineering problems.

Keywords: main trunk road; pipe-protection bridge; raw water tank culvert; multi-frequency electromagnetic method; high density electrical method; seismic surface wave method; ground penetrating radar