探测城市地质结构和地下环境污染的地球物理方法、仪器和 实例

--城市工程物探

城市地质结构是城市建设和发展的基础依据,治理城市地下环境污染是保证居民 健康的重要前提。

一、城市地质结构包括,但不限于:

基岩,埋深,覆盖层和风化层厚度,断层展布,基底结构,流砂层、黏土层和 溶洞分布等等。

二、城市地下环境污染包括,但不限于:

- 1. 工业废水和垃圾填埋场渗漏造成的地下水和土壤污染,由于工业废水和生活垃圾富含金属和重金属离子以及钾、钠等盐类离子,因此导致被污染的土壤和地下水的电阻率值显著降低,形成低阻带(体)。
- 2. 加油站和储油罐泄露造成的地下污染,由于油类是高阻物质,因此在地下形成高阻带(体)。
- 3. 被搬迁的市场和废弃的工厂在地下埋置的钢铁类和金属类等遗存物造成的地下污染,它们会形成磁异常和低阻体异常。
- 4. 地下洞穴,流砂体和软泥层在地面长期碾压下可能造成的地面塌陷,它们是低速体和低阻体,如果洞穴没有充水,则为高阻体。
- 5. 大型建筑物和重要设施的振动监测。
- 6. 大型建筑地基结构和持力层探测,地铁线路地基和孤石探测。
- 7. 各种地下管网布局和埋深定位。

三、城市工程物探:

上述的城市地下环境和污染不仅影响居民生活,而且制约城市发展,因此必须探测清楚。近些年来城市工程物探有了很大发展,成为一种专门领域。城市工程物探的特殊性在于:

- 人群密集,无法布设复杂的观测装置(郊区除外),因此观测装置需简单轻便;
- 电磁环境复杂,电磁噪声频带宽,强度大,因此要有很强或较强的抗电磁噪声干扰 能力;
- 人类活动和各类交通设施造成的振动大,因此要有很强的抗振动干扰能力;
- 城市遍布高等级道路,因此不能对地面造成损伤;
- 城市可工作的空间狭小,因此操作人员要少;
- 探测结果要进行严格验证,因此准确度要高,探测深度除特殊要求外,一般要达到 60-70m。

四、城市工程物探方法和仪器

根据上述各类问题和城市工程物探的特殊性,我们推荐下述方法和仪器设备:

1. 瞬变电磁法和 Protem G-TEM 浅层瞬变电磁法仪:

瞬变电磁法是人工发射电磁脉冲源,脉冲源在低阻体内部产生涡流,涡流又产生二次场,当电磁脉冲源关断后立即观测二次场随时间的衰减过程,从而求解探测目标体的形态、埋深和其电阻率值。瞬变电磁法适合探测上述的1,2,3,4和6类问题。

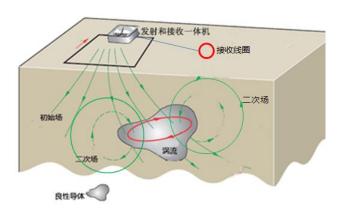


图 1 瞬变电磁法简单原理(偶极装置)

加拿大 Geonics 公司最新研制成功的 PROTEM CMX 和 PROTEM G-TEM 浅层 瞬变电磁仪,主要用于城市工程物探,探测深度 100-150m。发射线匝不接地,抗电磁干扰能力强,对地面振动不敏感,收一发一体化,轻便、全重仅 11kg 和 13kg,2-3 人操作即可。前者具有防爆功能,后者的其主要特点是:

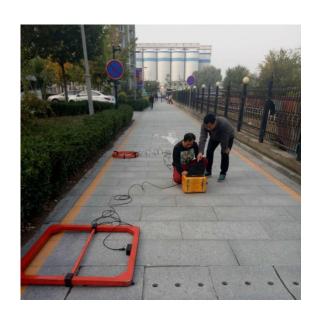


图 2 瞬变电磁仪在城市内观测

- 集成式 Panasonic 触屏电脑, 在太阳光下可视的 10" 彩色屏幕。
- 标准的 20 个和 30 个数据接收门(道),用户也可自行设置多达 100 个数据接收门:

- 在每次观测中可进行单次、多次或连续记录,适合中心、偶极和大定源等多种 观测装置;
- 可进行标准的或智能式的叠加观测,以降低噪声;
- 有多种数据表现形式,包括剖面和彩色伪断面;
- 有 320GB 数据存储能力;
- 集成 GPS, 可显示发射线框和接收机位置;
- 积木式设计,接收机和发射机即可作为一体操作,也可分体布置;
- 非常轻便,全重仅13kg,内置15V可充电锂电池。

2. 大地电导率法和 EM34-3XL 大地电导率仪:

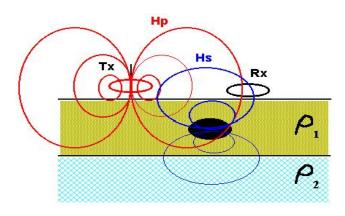


图 3 大地电导率仪工作原理

大地电导率法是通过发射线圈向地下发射不同频率的正弦交变电磁场 Hp,它在地下目标体中产生二次场 Hs(图3)。一次场和二次场均被接收线圈接收,并按下式计算出目标体的电导率值:

$$\sigma = \frac{4}{\omega \mu_0 s} \left[\frac{H_s}{Hp} \right] V$$

式中 ω 是发射电磁波的园频率, μ_0 是介质磁导率、是常数,S 是发射线圈和接收线圈之间的距离。S 越长, ω 越低,探测深度越大。



图 4 EM34-3XL 在工作

EM 系列大地电导率仪是加拿大 Geonics 公司的拳头产品,被世界工程物探领域广泛应用,其中 EM34-3XL 是加强型大地电导率仪,抗电磁干扰能力强,对地面振动不敏感,最大勘探深度 60m,有水平偶极和垂直偶极两种观测模式,以提高横向和纵向分辨率(图 4)。适合探测上述的 1, 2,3,4,6 和 7 等问题。

3. 瞬变电磁仪和大地电导率仪在城市勘查中的应用实例:

1) 探测垃圾场及其污染范围

采用 EM34-3 大地电导率仪和 PROTEM 瞬变电磁仪对垃圾填埋场体积、形状及 其污染范围和埋深进行详细勘探。两种方法观测结果一致。图 5 是其中的一条勘探剖面。

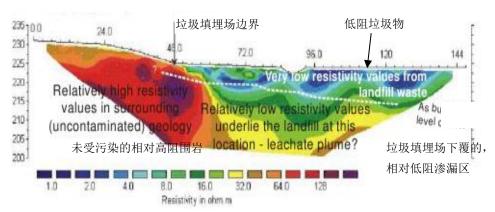


图 5 EM34-3 和 PROTEM 探测垃圾填埋场的污染范围和埋深(据 GEONICS 公司资料)

图 5 中的低阻体(蓝色区)是垃圾填埋场,下伏的中阻区(绿色至深绿色)是严重污染区一轻度污染区范围,剖面左边的相对高阻区(红色)和深部的相对高阻区(黄色)是未被污染和基本未被污染的区域。

2) 探测地下管线和储油渗漏

加拿大北阿尔伯达重质油生产基地的地下埋有很多地下管线,其渗透物对地下造成了严重污染。该基地关闭后进行重建,在重建之前,必须把地下管线和受污染的土壤全部拆除和移走。为此,用 Geonics 研制的 EM 大地电导率仪对管线的埋藏地点、深度以及受污染土壤的范围和厚度进行探测。图 6 是观测的地下电导率成像。经确认图中的线性异常是 5cm 直径、埋深 3 米的地下管线位置。此外,从图中还可见,线性异常外围存在高导区,其电导率比背景值高出 30ms/m 以上。经检测,高导区下的地下水中氯化物含量增高。这些氯化物是从地下管线渗漏出来的。

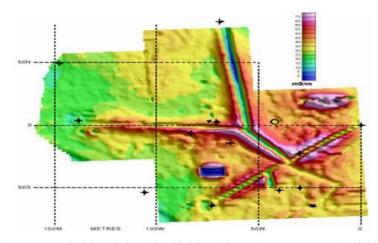


图 6 EM31 大地电导率仪对地下管线探测结果(据 GEONICS 公司资料)

3) 探测地下高阻洞穴

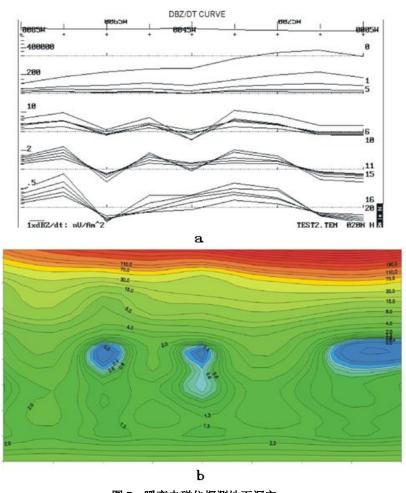


图 7 瞬变电磁仪探测地下洞穴

Protem 瞬变电磁仪探测澳大利亚某城市地下洞穴,上图是 26 道瞬变曲线,下图是反演的视电导率断面。可见瞬变曲线负异常区是电导率低值区、即高阻区,因为高阻排斥涡流所以瞬变场是负值。经验证它们是没有充水的洞穴。

4) 探测路基内黏土层

道路建设是推进社会建设的重要内容,也是构建便捷、通畅、高效、安全的交通

运输体系的重要组成部分。因此,查明待建道路路基土壤结构,是评估路基稳定性的重要凭据。

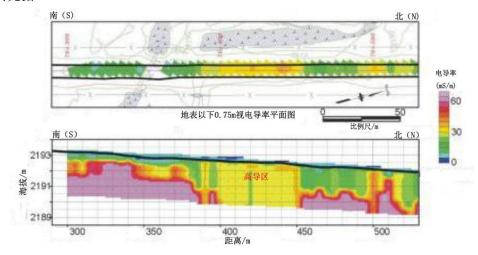
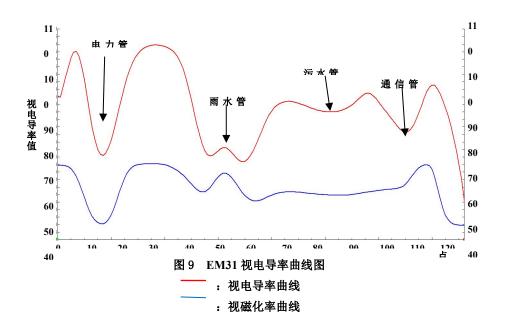


图 8 EM34 大地电导率仪探测路基黏

图 8 上图为 EM38 大地电导率仪探测的道路下方的视电导率平面图,距离在 400-450m 之间表现为黄色的是高电导率区间;图 8 下图为电导率断面图,同样在 400-450m,深度在 0-3m 之间表现为黄色的高电导率区间。推断 400-450m 处应该淤积 着大量的粘土,施工建设时应对该区域进行挖掘重填或堆载预压等相关措施进行处理,以防止地基沉陷,影响道路安全。

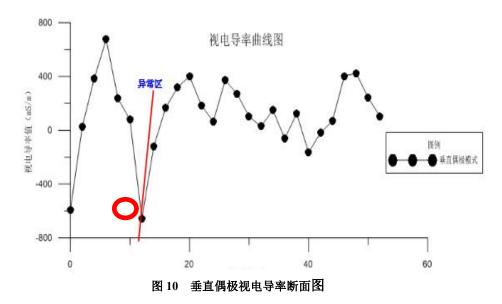
5) 探测地下管线

城市管道网络错综复杂,查明地下管道的分布,是城市管道二次改建的必要过程。 该测区位于北京一段未通车公路上,地下分布着一系列管道,管道走向基本都平行于 公路,东西走向。本次布设3条测线,线距5m,采用大地电导率仪对本区进行探测。 三条探测曲线结果形态一致,在此,以1线作为解释图件。



6) 探测重力桩和建筑基坑渗水位置

地基开挖前,为评估重力桩的止水效果,采用 EM34-3 大地电导率仪对重力桩进行了探测。



由图 10 可知:根据渗漏特点,可将渗漏位置视为高导圆柱体。高导圆柱体纵断面 视电导率曲线异常形态为"正-负-正"峰值形态,根据异常特点,勾画了上图红色圆形区域作为渗漏点位置。

4. 高密度电法和 RESECS II 三维高密度电法仪

三维高密度电法是通过观测与研究人工建立的地下电流场的分布规律以确定地下电性异常体的分布范围、埋深及其电导率值。由于高密度电法是通过向地下注入快速脉冲电流,并对地下电流场分布进行叠加观测,所以其观测精度和分辨率极高,探测深度可达 200m。

高密度电法通过供电电极 AB,向地下发射脉冲电流 I,此电流场通过地下不同电性物质时形成不同的电位差 $\triangle V$,由 MN 电极测量这些电位差值分布,从而划分出地下的各种物质分布,包括埋深、形状、体积以及电导率值等,如图 11 所示:

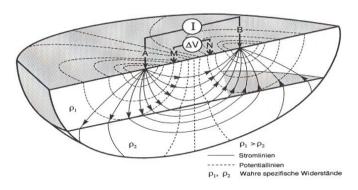


图 11 高密度电法原理示意图

RESECS II 是德国 DMT 公司研发的新一代高密度电法仪,其主要特点是:

- 1) 可进行多参数测量,包括实时计算和显示视电阻伪断面,计算复视电阻率和 IP,可监视地下电阻率随时间的变化等。
- 2) 最大发射电流达 2A, 分辨率达 30nV。
- 3) 可进行地面测量、井中测量、水域测量和联合测量。
- 4) 8 通道主机, 最多可以做到 8×128 道的 8 个通道同时测量的三维观测模式。
- 5) 通过 windows 操作系统来控制整个观测系统,界面友好,操作灵活。
- 6) 多达近 20 种观测装置和三维观测装置,用户还可以自定义观测装置。
- 7) 发射电流与测量电位的波形实时显示,方便操作员根据实时的波形找到最佳的供电电压已及最优的供电时间、采集延时、积分时间等参数。
- 8) 可实时显示电位观测精度和实效电极位置,对观测质量进行实时监控。
- 9) 比较轻便, 主机 12kg, 5.5m 极距的 16 道电极编码器重 10kg, 抗电磁干扰能力强, 对振动不敏感, 但需要直径 17mm 的小孔向地下插入电极。

RESECS 高密度电法仪分辨率高,探测精度高,即可探测低阻体/层,也可探测高阻体/层,可以探测城市地下环境和污染的任何问题。图 12 是 RESECS 高密度电法仪探测城市内的地下溶洞:

城市地下空洞,是城市安全的重大隐患。图 12 是用 RESECS 高密度电法仪对德国乌普塔市地下空洞的探测结果。左图是电极沿城市街道的布设情况,右图是探测结果,其中的高阻体(元宝状)是地下空洞所在。

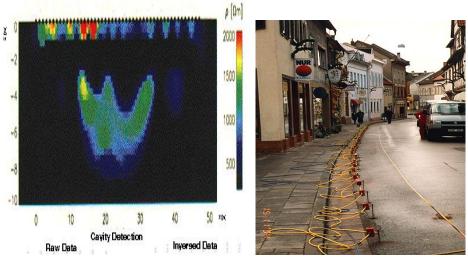


图 12 探测城市地下穴洞



图 13 RESECS II 现场工作布置

5. RESECS II 高密度电法仪在城市勘探中应用实例

1) 探测垃圾堆污染范围

涿州市拒马河岸有一垃圾堆放场。为探测该垃圾场是否对地下造成了污染,沿暂时干涸的河床用 RESECS 高密度电法仪做了探测,采用 wenner alpha 装置,电极距 5m。

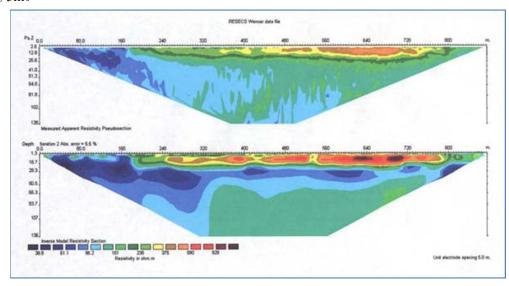


图 14 探测涿州市郊垃圾堆造成的地下污染范围

图 14 分别是视电阻率拟断面图(上图)和反演电阻率断面图(下图)。可见位于断面左侧的垃圾堆放场(低阻区),由于地表降水的渗透作用,其污染范围已向深部和河流下游渗透(蓝色低阻带)。

2) 探测机场地基

2015 年 7 月,北京地质调查研究院使用 RESECS II 高密度电法仪在北京市大 兴区探测北京第二机场地基结构。

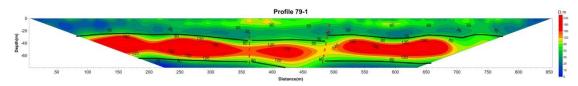


图 15 探测北京第二机场地基结构

可见在点距 480m 左右高阻电性层明显错动,显示为正断层。埋深 25m,断距 10 米。根据地质资料该断层属黄庄一高丽营断裂带,高密度电法探测结果的位置和产状与实际情况一致。此外在点距 360m 处电阻率的不连续为黄庄一高丽营断裂的 伴生的断裂破碎带。

3) 探测城市地基

为了评估大震源存在危险性,中国地震局系统最近几年来在很多大、中城市开展了活断层探测。福州市八一水库是活断层探测试验区,图 16 是 RESECS II 高密度电法仪的探测结果。

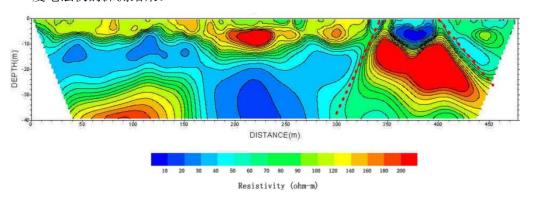


图 16 探测福州市郊地基结构

此次探测电极距 2.5m, 共 80 道。采用 wenner alpha 观测装置,探测深度为 40 米左右。从电阻率断面可见浅层由高阻薄层覆盖,高阻薄层的下面低阻区是松散沉积物。剖面右侧的浅层低阻体宽 40m, 是垃圾堆放场。红色虚线为断层位置。

4) 探测地下溶洞

武汉铁四院为高铁线路选址探测地下溶洞分布情况,布置了300米的3维高密度观测系统,点距5米,线距20米,3个通道同时观测。观测装置使用双边三极加偶极的方式。这样40米×300米的三维测网中具有13000多个数据点可以用与反演解释。

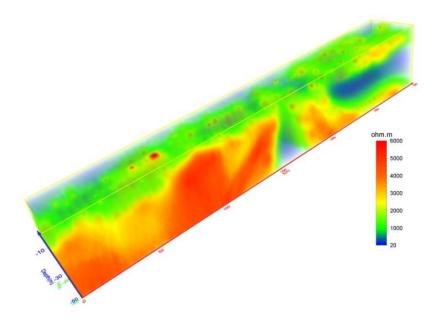


图 17 铁四院广西柳州某地三维高密度探测维结果

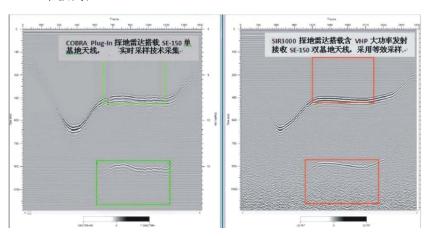
图 17 为三维观测的反演电阻率图,可以看到在 170 米左右很明显的低阻体横穿 3 条测线,推断此异常为地下暗河的反应。

6. Cobra 地质雷达

Cobra 地质雷达是瑞典 radarteam 公司研发的两种产品,第一种产品是 Cobra Wifi, 第二种产品是 Cobra Plug-in。这两种产品与其他地质雷达的主要区别是:

1) Cobra Wifi:

(1) 采用独有的实时采样技术,比一般地质雷达的等效采样技术提高信噪比 45dB, 极大的降低了数据采集中的噪声(图 18), 使得 Cobra Wifi 的分辨 率极高;



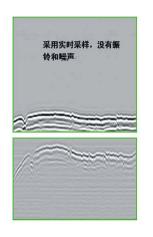




图 18 实时采样与等效采样效果对比试验结果

(2) Cobra Wifi 双通道,配置 250-500MHz 的智能组合天线,探测深度 0-10m,全屏蔽,抗电磁干扰能力强。对振动不敏感,空气耦合,重量轻,一人操作。



图 19 工作中的 Cobra Wifi

2) Cobra Plug-in:

- (1) 采用独有的实时采样技术,信噪比提高 45dB,每提高 30dB,勘探深度就可以提高两倍;
- (2) 配有三种低频天线,最低频天线带宽 15-105MHz,加上实时采样技术,其最大勘探深度达 100m;
- (3) 天线采用半屏蔽技术,具有较强的抗电磁能力,在北京市的试验表明,能 够获得清晰的探测结果;
- (4) 动态范围高达 192dB, 32 位分辨率, 重仅 4.7kg, 空气耦合, 一人操作。



图 20 Cobra Plug-in 在工作中

7. Cobra Wifi 地质雷达应用实例

1) 探测地下管网

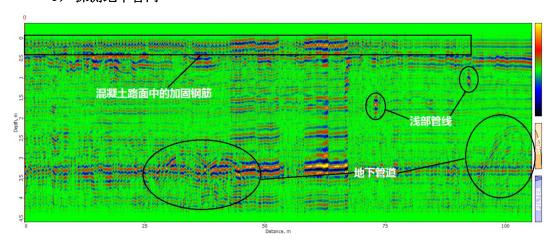


图 21 Cobra Wifi 探测厦门市区道路下面的管网分布

图 21 为福建省厦门建筑科学研究院在厦门市区某条公路上使用 Cobra WIFI 探地下管线、管道的位置,且将公路上的加固钢筋的疏密程度也非常清晰的显示出来。

2) 探测城市地下古建筑



图 22 Cobra Wifi 探测古罗马地下建筑

用 Cobra Wifi 探测掩埋地下的罗马古城,左图是探测结果的三维水平片面,右图是 发掘后的古罗马地下建筑,可见与 Cobra Wifi 探测结果一致。

3) 检测地下钢筋及各种管道分布和材质

Cobra 地质雷达出厂前要在已知的试验对其进行严格检测。图 23 是对 Cobra Wifi 的检测结果。

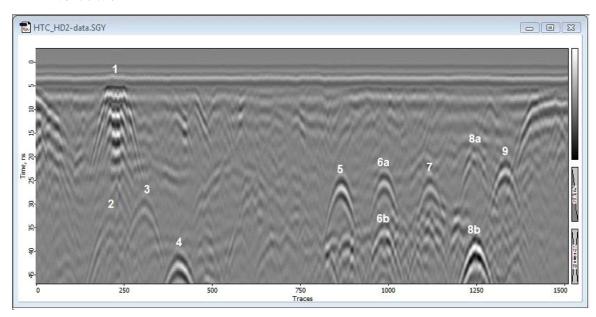


图 23 Cobra WIFI 出厂检测试验数据

检测内容包括:

1:4 根埋在浅部半径 4 mm 的钢筋,间隔 20cm

- 2:半径 60cm 的混凝管
- 3:半径 80cm 的混凝管
- 4:半径 60cm 的塑料管
- 5:半径 25cm 的塑料管
- 6:半径 18cm 的塑料管(充水)
- 7:半径 7cm 的铸铁管
- 8:半径 30cm 的塑料管(充水)
- 9:半径 16cm 的塑料管

从图 23 可见 Cobra Wifi 对 9 个不同的目标都有清楚反应。且由于材质不同、规模不同反应的程度有所不同。混凝管的绕射信号没有塑料管的强,这是因为混凝管与周围介质的介电常数差异没有塑料管大造成的,这是区分管道材料的方式之一。通过塑料管的对比还可以发现,当管中充水时同一位置会出现两个时间不同的绕射信号(6a、6b和 8a、8b)。这是由于管道中充水后,电磁波在水中传播速度较慢,电磁波在管道的顶面和底面反射时差变长造成。而这个时差可以用于估算管道的直径。从结果中可以看到6a 和 6b 两个绕射信号的时差为 11ns 左右,8a 和 8b 两个绕射信号时差为 18ns 左右。根据电磁波在水中的传播速度为 0.033m/ns 来计算,则 6 号管的半径为 18.1cm,8 号管的半径为 29.7cm。几乎与实际情况一致!

以上结果说明 Cobra Wifi 可以定位管线位置、区分管线材质、计算管线直径。

8. Cobra Plug-in 地质雷达在城市勘探中的应用实例

1) 北京市地铁探测实例

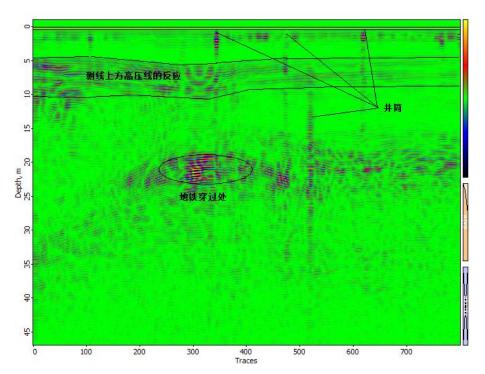


图 24 北京市地铁育新站附近地铁探测试验结果

图 24 为 Cobra Plug-In 搭载 SE-40 天线在北京育新站探测地铁 8 号线的地下位置。测线和地铁线路斜交。一条高压线近于平行于测线上方 20 多米。试验结果在测线与地铁相交处出现明显的异常反应。结果表明,即使在北京干扰很大的地区 CobraPlug_In 也能获得较好的探测结果,探测深度可达 25m 以上。

2) 厦门孤石探测实例

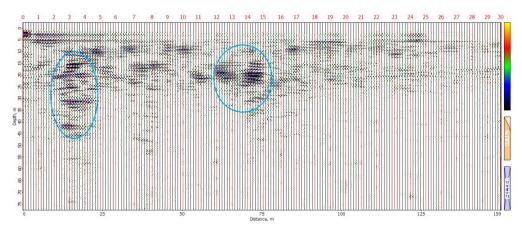


图 25 厦门某地孤石探测结果

图 25 为福建省厦门建筑工程质量检测中心有限公司在厦门市高崎附近使用 Cobra Plug-In 搭载 SE-40 天线探测地铁沿线的孤石,如果有孤石存在必须在盾构机施工前爆破掉。图中强反射信号位置(蓝圈区域)判断为孤石的响应。通过此剖面钻孔资料的

确认,在蓝圈位置处的确有孤石存在,孤石埋深约 20 米,直径 2 米左右。其他位置未见孤石。

3) 半屏蔽效果试验

常用的低频地质雷达天线由于无法做到屏蔽,导致低频地质雷达在城市中的使用 受到限制,探测深度较大的目标时就非常困难。而 Cobra SE 系列天线具有半屏蔽技术, 增加了低频地质雷达天线的适用范围。

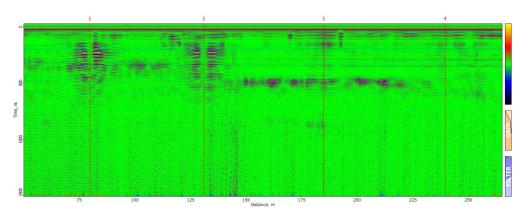


图 26 SE-40 天线半屏蔽效果试验结果

图 26 为 2015 年 4 月份 Cobra plug-In 搭载 SE-40 天线在湖北襄阳市隆中大道上的 试验结果。试验方法是将地质雷达天线从公路旁的路灯下方穿过以及从路灯旁侧 2 米 左右穿过 (天线的长轴垂直于路灯横梁),分别对数据进行对比。上图标记的 1、2 为 从路灯下方穿过时雷达信号,3、4 为从旁侧穿过路灯时的雷达信号。

从试验结果中很显然看到,当天线从路灯下穿过时,路灯带来很大的干扰,当天线从路灯旁侧 2m 穿过时干扰就非常微弱,甚至于没有。试验表明 Cobra SE 系列天线的半屏蔽技术的效果显著,表明 Cobra SE 低频天线可以在电磁环境复杂的情况下应用。

9. Megnex °多通道感应系统测量磁场梯度和脉冲电磁感应探测城市地下埋藏物

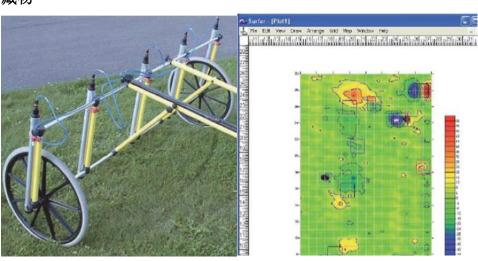


图 27 多通道 Megnex 探测系统

图 28 Megnex 探测结果: 可确定地 下埋藏物位置、大小和材料

10. Summit X Stream Pro 陆地拖缆地震仪和 Summit X One 地震仪

众所周知地震法是工程物探中最通用的方法,它的分辨率高,准确度也高,但它无法探测地下环境污染问题,在城市应用中由于交通和人为造成的地面振动,会使地震方法失效,为此必须设法避免这类干扰。方法之一是在夜间施工,方法之二是加大震源力度、压制干扰,方法之三是接收 S 波,因为交通造成的地面振动以 P 波为主, S 波分量弱。适合城市应用的地震仪有:

1) Summit X Stream Pro 陆地拖缆地震仪

Summit X Stream Pro 是专门用于工程地震勘探的仪器, 24 道,采用 plug & Trace 技术和陆地拖缆检波器排列,特别适合在城市进行工程地震勘探,当然也适合在其它任何环境下应用,其组成如下图所示:



图 29 陆地拖缆地震仪在城市工作

- 地震数据采集单元,内置 PC 机和集成式高分辨率显示器。
- 检波器安置在陆地拖缆上。陆地拖缆由多段 12m 或 24m 的编织段组成,各段之间用扣环连接,重量轻,体积小。P 波和 S 波检波器都安装在基板上,可手控变换位置。基板在"陆地拖缆"上的位置可以变动。基板和检波器的自重可使检波器与地面紧密耦合。数据传输电缆(大线)沿地震拖缆布置,检波器拾取的地震信号由数据传输电缆馈送至地震数据采集单元。在观测过程中"陆地拖缆"利用车辆或其它工具沿观测剖面移动(图 29)。
- 可用任何振动源(如小型可控震源或落锤等)作为震源。
- 施工便捷,生产效率高

2) 新型 Summit X One 地震仪

德国 DMT 公司最新研发和生产的第五代地震勘探仪 Summit X One,是当今世界上最轻便、最高度集成、最灵活的地震仪:单道数据采集站(RU)仅重 0.3kg,每 300m长测线设置一个数据收集单元(DC),它具有数据存储、中继、触发、供电、主机和数据传输等多种功能;多个 RU 和 DC 单元可组成二维或三维观测系统;独特的 SNAP

On 技术,可任意改变道间距,这对工程勘探非常有用;检波器可以紧邻采集站,避免了检波器小辫带来的干扰;具有当代高的技术指标:24位分辨率,瞬时动态范围>128dB@2ms,系统动态范围>144dB,带宽6000Hz,传输速度20M/秒,自动定位,图30。



图 30 Summit X One 地震仪

1.数据采集单元(RU) 2.每人可携带 20 个 RU 3.检波器靠近 RU(上图)数据收集单元 DC(下图)

3) 震源

在城市地震勘探选择合适的震源是非常重要的,震源要便捷,不能制造噪声,能产生 P 波和 S 波,能量要大。加拿大 VIBROMETRIC 公司研发和生产的的 VIBSIST-50 和 VIBSIST-50S 震源,是以振动频率和微振动次数可控相结合的原理而设计的微型可控震源。由于是点震源可同时产生 P 波和 S 波,由于每次冲击能量可叠加,故可积叠更大能量,穿透深度可达 250m。

工作过程是:由 PC 机给冲击锤发出预先编程的震动序列指令,冲击锤按此指令冲击与地面耦合的振动板,振动板再向地下传送振动序列信号,振动频率也由预先编程的振动序列指令控制。

VIBSIST-50 是结构式设备,分辨率高、安全、对地面无破坏,对环境友好,工效高,工作成本低。



图 31 VIBSIST-50 地面震源

11. Summit 地震仪在城市工程勘探中的应用实例

1) 勘探北京市小汤山地区的地基和活断层

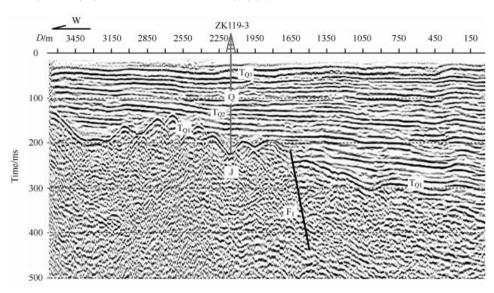


图 32 Summit II Plus 地震仪横切北京小汤山断裂的浅层地震反射叠加时间剖面 (据中国地震局物探中心资料)

根据反射波组分析断层 F_1 错断了第四系覆盖层底界,上断点埋深 160m,断距 20-30m,从反射剖面还可见:中更新统 T_{02} 及其以浅的反射层均未出现错断显示,因此 F_1 应为早更新世活动断裂。第四纪 Q 厚从西部 120m 向东加厚至 300m,基底波状起伏。

2) 探测厦门市地铁线路地基中的孤石(面波法)

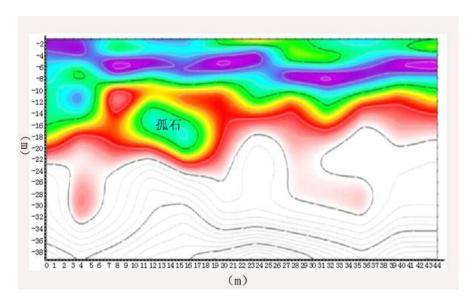


图 33 探测地基中的孤石

厦门市地基中含有花岗岩孤石,在用盾构机挖掘地铁通道前必须探清孤石分布,并击碎之,以免对盾构机破坏,2016年北京欧华联科技有限责任公司利用 Summit II Plus 地震仪,采用面波法对孤石探测进行现场试验,图 33 是探测结果,探测到的孤石与已知情况一致。

3) 探测城市的地下溶洞

图 34 是 SUMMIT 地震仪记录的面波对德国 Wuppertal 市地下灰岩溶洞的探测和钻孔验证结果。面波法确定的溶洞位置(红圈)与钻孔验证的结果(三角形▽)很一致,但若在同一垂直位置上有上、下两个溶洞存在,面波法只能确定出上部溶洞的位置,而无法区分出下部溶洞的存在。

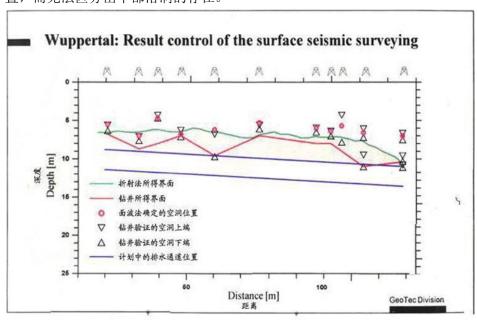


图 34 德国 Wuppertal 地下灰岩溶洞的探测和钻孔验证结果

4) 探测城市地基

探测结果相当细致,包括基底(速度值>3500m/s)界面起伏,风化带厚度和分层(黄色-绿色-浅灰)以及覆盖层内部结构和性质等均有清晰显示。

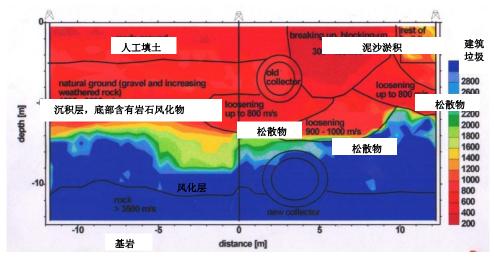


图 35 地基探测(井间地震 CT 成像)

5) 横波探测抚顺市地基结构

图 36 是北京欧华联科技有限责任公司用 Summit II Plus 地震仪对抚顺市一建筑工程的地基探测剖面。由于市内交通干扰严重,所以采用横波反射方法。横波反射波清晰,显示基底是一强反射层,双程反射时间 0.11-0.13ms,向西倾,在剖面西端有错断。覆盖层内有两个反射层位,是未受扰动的土层。

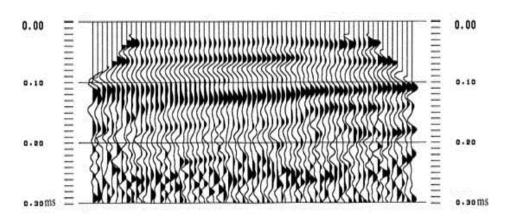


图 36 Summit II 地震仪在辽宁省抚顺市利用横波反射法探测地基结构