

高密度电阻率法在双柳长江大桥工程中的应用

徐成斌

(武汉华太岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 探寻工程中可能存在的复杂地质条件下的隐伏断层构造, 判断其性质、产状、埋深等信息, 对于工程的安全进行十分重要, 高密度电阻率法是一种以凭借岩体和土体之间导电特性的不同, 在人为施加稳定电流场的条件下, 探讨地下电流的传导方式和分布规律的勘探方法, 通过分析地层之间的电性差异, 可以判断出断层构造的具体分布和相关性质, 因此被广泛应用于工程地质勘察中。文中以新港高速双柳长江大桥及接线工程为例, 利用物探高密度电阻率法在拟设计路线上探寻隐伏断层构造, 可为类似工程提供参考。

关键词: 高密度电阻率法; 断层构造; 地质勘探

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0112-03

引言

随着高速公路建设的推进, 在高速大桥的建设过程中难免会遇到诸如溶洞、断层等不良地质条件, 如不能准确探寻出不良地质体的具体分布和性质, 会使得工程建设中容易突发地质灾害^[1]; 因此要求物探技术也随之不断发展和进步, 目前物探法有电法勘探、探地雷达、地震勘探、地震波雷达等, 在这些方法中, 高密度电阻率法是目前最常用的方法^[2]。高密度电阻率法是一种阵列勘探方法, 与其他的物探方法相比, 高密度电阻率法采集速率快, 全自动或半自动化的操作减少了人工操作带来的误差, 还可以直接对资料进行预处理, 十分便捷^[3]。

通过分析高密度电阻率法的电阻反演断面图和电阻反演值可以在不同工程地质勘察中探寻出如岩溶发育区、断层构造、地下暗河等地质条件。廖友清^[4]等运用高密度电阻率法和电磁波 CT 法等相互验证和补充, 对实际大桥工程中发育规模不同的岩溶进行了准确查明, 为大桥建设的安全施工提供了保障。牛德东^[5]等人利用高密度电阻率法发现了岩溶发育的位置和规模, 分布规律, 准确修正了施工安全风险等级。

文中结合新港高速双柳长江大桥及接线工程的地处位置和地球物理特征, 通过分析工程现场监测数据, 利用高密度电阻率法在大桥工程拟设计线路上寻找可能存在的隐伏断层构造, 对总线路分为 8 段测线进行测量, 判断出隐伏断层的具体性质、产状、埋深和发育规模等信息, 为工程后期的顺利进行打下了基础。

一、高密度电阻率法的原理与方法

1. 高密度电阻率法的基本原理

高密度电阻率法是利用探测对象与围岩之间的电导差异作为物理依据, 通过对人工建立的地下稳定电流场的分布规律进行分析, 从而对其进行识别。它属于直流电阻率方法, 它遵循了直流电阻率法的基本原则, 即用电源电极对地面供电,

观察两个电极之间的电势差异, 从而可以得到被测电极之间的视电阻率。

视电阻率计算公式如下:

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I}$$

式中 ΔU 为测量电极间的电位差, I 为供电回路的电流, K 为装置系数, 为视电阻率, 单位为 $\Omega \cdot m$ 。

装置系数按下式计算:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

高密度电阻率法的数据采集系统由主机、电极转换器、电缆等组成, 由电极转换器对各个电极进行高压电源和测量状态进行控制。通过电极变换器, 主机发出工作指令, 给电极供电, 加压, 接收和存储测量数据。在现场作业时, 将多个电极按照一定的间距排列, 观察时电极按照特定的规则排列, 一次排列可以达到多种观察设备, 并能快速自动采集数据。

2. 高密度电阻率法的工作方法

高密度电阻率法野外工作流程分为以下几个步骤进行:

(1) 布极、放电缆

沿布设好的测线放置电缆, 按最小电极距等间距打上铜电极, 每一根电极对应一个电缆节点, 注意电缆插头不能进水、泥沙等, 电极的入土深度应依据接地条件而定。

(2) 设置主机参数及检查接地电阻

在接上电缆电极后, 设定测试参数, 采用主机对接地电阻进行测试, 并对各电极进行接地电阻检测, 以确定接地质量、电线有断裂、有无漏电等。此次采用高密度电阻率法, 对接地电阻应在 $5k\Omega$ 以下, 如果接地电阻过大, 可采用浇水、打深电极等方法降低接地电阻。

(3) 所有电极均接好后, 启动测量。

(4) 判断数据质量

收稿日期: 2022-09-04

作者简介: 徐成斌 (1982-), 男, 硕士, 武汉华太岩土工程有限公司, 高级工程师, 国家注册岩土师, 主要从事岩土工程勘察、设计、施工及研究工作。

当剖面测量结束后,要对剖面曲线或整体数据进行检测,发现有几处坏点时,可进行单点测量函数重新测试。如果有大量的不良点资料,要立即找出问题所在,并重新测量整个剖面。如果测定结果良好,则进入下一段的测量或结束。

二、高密度电阻率法的应用实例

1. 工程概况

新港高速双柳长江大桥及接线工程是武汉都市区环线高速的过江通道,项目起于武汉市新洲区 S111 汉新线,跨越武英高速、武冈城际铁路等,止于黄鄂高速,途径武汉市新洲区、鄂州市华容区;路线全长约 34.7km,均为桥梁工程。本次高密度电阻率法共完成测线 8 条,总长 6,860m。

2. 地球物理特征

依据以往工作经验、资料的收集以及野外踏勘,认为场区内松散的覆盖层与下伏完整基岩电阻率存在着明显的差异,这为高密度电阻率法探测覆盖层厚度、较完整基岩面的起伏形态提供了有利的物性条件。需要注意的是页岩、泥岩等黏土矿物含量较高的沉积层,当其风化程度较高时,往往与上覆覆盖层电性差异不明显。

岩石受挤压力或张力作用而发生断裂、位移而形成断层,沿断层构造带在应力作用下断层面附近岩石破碎成碎石或粉末,形成断层角砾岩和断层泥。由于岩层破碎,裂隙发育,易遭风化,且往往充水充泥,与两侧围岩相比,断层一般具有较低的电阻率,这为高密度电阻率法探测断层提供了物性基础。

另外,沿断层构造带两侧岩层发生了相对位移,正断层或逆断层由于出现了岩层的抬升或下降,在电阻率断面图上,往往会表现为等值线同相错动、扭曲,平移断层则表现不明显,据此可判断断层的性质。

3. 装置选择及参数设置

依据踏勘情况及试验结果,本次高密度电阻率法装置类型选用温纳装置,温纳设备在深部浅层具有较大的初级电场,在地表干燥、高接地电阻、低供电电流下仍可获得高信噪比,同时对地形起伏的影响也很小。这是一种具有对称性的四极器件,其特征是 MN 和 AB 总是维持在 1:3 的比例,也就是说,AM=MN=NB,电极排列方式见图 1。

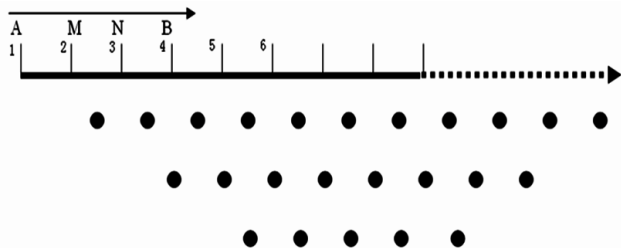


图 1 温纳装置排列及测点分布示意图

电极间距与电极间距的大小对检测地下对象的反应能力有很大的影响,一般情况下,电极间隔越小,对靶材的检测精度就越高,而电极数量和间隔越小,则表示电极排列长度缩短,导致检测深度降低,对大埋藏物体的探测性能也会受

到影响。因此需依据工作任务合理选择电极间距,本次高密度电阻率法测量主要为探测隐伏断层构造,结合经验,确定最小电极距 5m,一次布设电极 60 个,最大间隔系数 19。供电模式选择标准模式,即“正供-停供-负供-停供-正供-停供”,供电时间选择 2s。

4. 资料处理

所有野外采集的原始数据均经 100%复核无误,数据处理采用了较为成熟、可靠的 Res2dinv 方法,利用最小二乘法逆算法进行反演,可以实现带地形改正的自动反演。

(1) 数据预处理

1) 畸变点剔除

在采集数据时,对因仪器、人为因素、外部干扰、电极接地不良等原因造成的“尖点”数据进行了删除、插补。

2) 数据平滑

在测量过程中存在天然场噪声以及各种人文噪声,会形成各种干扰,对采集的数据进行滤波处理,以消除随机干扰,但需要注意的是要合理选择滤波参数,以兼顾最大程度消除干扰和保留有效信息。

3) 数据拼接与格式转换

在高密度电阻率法测量中,对同一测线上多个数据断面要进行拼接,使之成为一个完整的数据断面,如图 2 所示。为实现长剖面数据的有效拼接,在采集数据时合理设置滚动电极数以兼顾探测深度与工作效率。本次高密度长剖面测量时,设置每次滚动 30 道电极。采用 WDAFC 格式转换软件对同一测线多个数据断面进行自动拼接,对重叠数据作算术平均处理,且进行数据格式转换以支持后续反演程序。

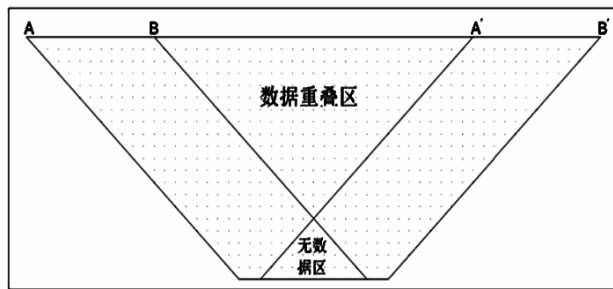


图 2 数据拼接示意图

(2) 反演计算

本次高密度电阻率法反演计算采用二维反演软件 Res2dinv。反演之前依已掌握的地质资料结合目标体规模等信息,合理设置阻尼参数、网格尺寸、层厚、迭代次数等以使反演迅速收敛,均方误差 RMS 无明显变化为宜。反演结果转换到 Suffer 软件中生成等值线图,以反演断面形式显示。

5. 解释推断

将野外采集的原始数据,按照上述的资料处理步骤处理之后得到反演电阻率断面图、物探地质解译图及物探解释成果。限于篇幅,取测线 1-1'和测线 7-7'高密度电阻率法成果进行分析,现将本次勘察的成果推断分述如下:

(1) 测线 1-1'高密度电阻率法成果分析

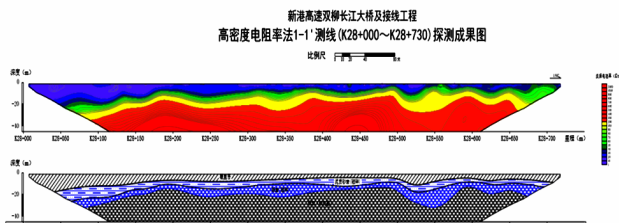


图3 高密度电阻率法1-1'测线(K28+000~K28+730)探测成果

测线全长730m,方位150°。装置类型为温纳装置,最小电极距5m,一次布设60道,最大隔离系数19,滚动测量,每次滚动30道电极。反演采用Res2dinv软件提供的最小二乘法算法进行反演,迭代次数3,均方根误差3.92%。

反演电阻率断面图显示:

该反演断面基本可分为三个电性层,第一层为覆盖层,主要为填土(粘性土为主)和粉质粘土,深度范围为地表至地下约7m,其电性特征表现为低阻,反演电阻率小于 $40\Omega\cdot\text{m}$ 。第二层深度范围为地下7~13m左右,反演电阻率一般小于 $100\Omega\cdot\text{m}$,岩层风化强烈,节理裂隙发育,岩层破碎,表现为相对低阻,结合钻探成果资料推断为泥质砂岩。第三层深度范围为地下13~45m左右,反演电阻率一般大于 $100\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对高阻,上部5m左右(局部较厚)节理裂隙发育,岩层破碎,下部岩层较完整,结合钻探成果资料推断为砾岩。此处小里程方向靠近长江,地下水位相对较高,所以断面从左往右,同一电性层电阻率有略微变大的趋势。

可以得出结论该断面上无明显断层反映。

(2) 测线7-7'高密度电阻率法成果分析

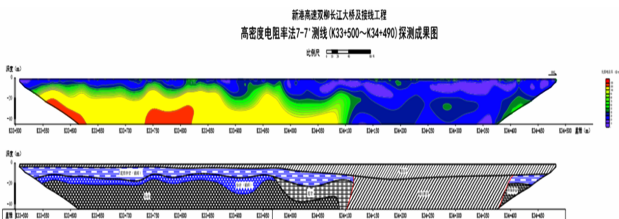


图4 高密度电阻率法7-7'测线(K33+500~K34+490)探测成果

测线全长990m,方位188°。装置类型为温纳装置,最小电极距5m,一次布设60道,最大隔离系数19,滚动测量,每次滚动30道电极。反演采用Res2dinv软件提供的最小二乘法算法进行反演,迭代次数3,均方根误差2.26%。

反演电阻率断面图显示:

K33+500~K33+970: 该段反演断面基本可分为三个电性层,第一层为覆盖层,主要为填土(粘性土为主)和粉质粘土,深度范围为地表至地下约4m,其电性特征表现为低阻,反演电阻率小于 $40\Omega\cdot\text{m}$ 。第二层深度范围为地下4~17m左右,反演电阻率一般小于 $100\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对低阻,岩层风化强烈,节理裂隙发育,岩层破碎,结合钻探成果资料推断为泥质砂岩。第三层深度范围为地下17~45m左右,反演电阻率一般大于 $100\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对高阻,上部7m左右(局部较厚)节理裂隙发育,岩层破碎,下部

岩层较完整,结合钻探成果资料推断为砾岩。

K33+970~K34+120: 该段反演断面基本可分为四个电性层,第一层为覆盖层,主要为填土(粘性土为主)和粉质粘土,深度范围为地表至地下约10m,其电性特征表现为低阻,反演电阻率小于 $40\Omega\cdot\text{m}$ 。第二层深度范围为地下10~20m左右,反演电阻率一般小于 $60\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对低阻,岩层风化强烈,节理裂隙发育,岩层破碎,结合钻探成果资料推断为泥质砂岩。第三层深度范围为地下20~37m左右,反演电阻率一般在 $60\sim 100\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对高阻,结合钻探成果资料推断为泥岩。第四层深度范围为地下37~45m左右,反演电阻率一般大于 $100\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对高阻,结合钻探成果资料推断为砾岩。

K34+380~K34+490: 该段反演断面基本可分为三个电性层,第一层为覆盖层,主要为填土(粘性土为主)和粉质粘土,深度范围为地表至地下约12m,其电性特征表现为低阻,反演电阻率小于 $40\Omega\cdot\text{m}$ 。第二层深度范围为地下12~21m左右,反演电阻率一般小于 $50\Omega\cdot\text{m}$,表现为相对低阻,岩层风化强烈,节理裂隙发育,岩层破碎,结合钻探成果资料推断为泥质砂岩。第三层深度范围为地下21~45m左右,反演电阻率一般在 $50\sim 70\Omega\cdot\text{m}$,岩层节理裂隙发育,较完整,结合钻探成果资料推断为钙质砂岩。

反演断面里程K34+120~K34+380全段异常低阻,两侧等直线几乎同方向扭曲,结合相关地质资料推断为襄樊广济断裂。

6. 勘探结果

本次高密度电阻率法勘察严格执行相关行业规范及设计要求,野外采集数据真实可靠,成果准确。主要目的在于寻找和探明拟设线路上隐伏的断层构造,探测结果表明,拟设线路上发育1处断层构造,位于里程约K34+120~K34+380处,上部覆盖层约12m,结合武汉区域地质资料,并经地质钻揭露资料对比后发现,物探与钻探结果二者吻合度较高,综合判断为襄樊—广济断裂。事实证明局部的低阻异常往往与岩层破碎、节理裂隙发育有关,探寻工程中可能存在复杂地质条件下隐伏断层构造,对工程的安全性和可靠性来说至关重要,为工程的顺利进行提供了保证。

参考文献

- [1] 刘国兴. 电法勘探原理与方法: [M]. 北京 地质出版社, 2005, 1: 63.
- [2] 龚术, 张智. 高密度电阻率法在高速公路不良地质体勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(6): 765-774.
- [3] 高亚成, 冷元宝. 高密度电阻率法的试验研究与应用[J]. 勘察科学技术, 2005, (6): 61-64.
- [4] 廖友清, 陈致同, 刘彦华. 综合物探方法在北盘江大桥岩溶地质勘察中的应用[J]. 地质学刊, 2020, 44(Z1): 185-191.
- [5] 牛德东, 侯莹. 高密度电阻率法在厚覆盖层隐伏岩溶隧道施工风险预判中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(8): 1-4.