

综合物探方法在黏土地区开挖隧道的应用

吴庆良^{1,2}, 唐彬雪¹, 王惠贤¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067

摘要: 土体受水的影响大, 在黏土隧道中, 随着含水率的增加, 隧道围岩逐渐失去自稳能力, 失稳的可能性增大。利用土体含水率与电阻率的关系, 采用结合 AGI 高密度电法、EH4 大地电导率法的综合物探方法对重庆一隧址区隧道的失稳现象进行探测, 并推断导致黏土含水率高的原因。结果表明: 河床下方区域的电阻率较低, 且低电阻率区域沿河道走向分布, 自上而下逐步增加, 此时河床下方的黏土含水率由远及近越来越高。已知隧址区处于易汇水区域, 根据地质调结果排除原有地下水的影响, 验证推断: 造成河床下方黏土含水率较高的原因是隧址区破碎带的存在, 水流沿地表与地层间的导水通道进入地下, 增加了黏土层的含水率。向河底注入水泥浆, 与原有黏土体形成水泥土, 通过这种方式改善土体性能并做到防渗以减少黏土受水影响引起的失稳问题。

关键词: 综合物探; 黏土; 含水率; 电阻率

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)06-0192-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Tunnel Excavation in Clay Area

WU Qingliang^{1,2}, TANG Binxue¹, WANG Huixian¹

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China

Abstract: The soil properties are greatly affected by water. In clay tunnels, with the increase of water content, the surrounding rock of the tunnel gradually loses its self-stability and the possibility of instability increases. Based on the relationship between soil moisture content and resistivity, this paper uses the comprehensive geophysical prospecting method combined with AGI high density resistivity method and EH4 earth conductivity method to detect the instability of tunnels in a tunnel site in Chongqing, and infer the causes of high moisture content of clay. The results of comprehensive geophysical prospecting methods show that the resistivity of the area below the riverbed was low, the low resistivity area was distributed along the river channel and increasing gradually from top to bottom. At same time, the clay moisture content below the riverbed was increasing from far to near. It is known that the tunnel site area is in the catchment area. The influence of the original groundwater was excluded according to the site survey re-

sults. It is verified that the reason for the high water content of the clay under the riverbed is the existence of the fracture zone in the tunnel site area. The flow enters the underground along the water diversion channel between the surface and the stratum, which increases the water content of the clay layer. The cement slurry was injected into the river bottom to form cement soil with the original clay body. In this way, the soil performance was improved and the seepage control was achieved to reduce the instability problem caused by the influence of water in the clay.

Key words: integrative geophysical survey; clay; water content; electrical resistivity

土体的含水率会对地质环境造成一定的影响,特别是影响土体的强度以及变形情况^[1-2]。地下工程建设中,水的存在会影响整体结构的稳定性^[3],因土体含水率变化引发的工程灾害时有发生,而土质的不同也造成了灾害的差异性,比如,泥岩遇水膨胀崩解常引起仰拱底鼓^[4];黄土在含水率增加时,其多孔、湿陷的性质会加剧隧道衬砌变形等^[5-6];粉质黏土会随含水率的变化极大地改变围岩的变形和受力情况^[7]。在我国南部,黏土分布较广,对于黏土地区隧道,水会导致黏土层软化,降低围岩的自稳能力^[8]。如重庆某隧道,该隧道位于黏土地区,在 K15+900~K16+200K 标段的工程施工初期,土体含水率低,围岩稳定性高,随着施工的进行,黏土逐渐潮湿并引起围岩土体失稳,接着发生大面积塌方,导致工程中断。若仅通过地质资料调查事故原因,得到的结果是不准确的,还需借助物探方法进行调查^[9]。目前物探方法主要有电法、探地雷达、瞬变电磁法等^[10],为提高物探方法的准确性,通常采取多种物探方法结合的方式进行综合探测,并将其运用到各水文环境的地质调查中^[11-13],以更好地确定水源及事故原因。

针对上述工程中黏土含水率增大导致失稳这一现象展开调查,根据地调结果推断,可能是地表河流底部渗漏,水流进入了黏土层。为了验证这一推断,考虑各物探方法的适用范围,本文采用 AGI 高密度电法、EH4 大地电导率法相结合的综合物探方法对该隧道进行探测,将拟开挖区域一定范围内地层断面的电阻率变化信息绘制成图,分别分析每条 AGI 测线、EH4 测线的电阻率大小及变化范围,根据电阻率与含水率的关系^[14],得出探测区域土体的含水情况,继而推断出导致黏土含水率高的原因。

1 材料与方法

1.1 工程概况

隧道开挖区(图 1)为构造剥蚀、溶蚀形成的背斜山,山体呈东北—西南向延伸。隧道大致沿山体走向从下部穿越两山,两山之间地势起伏不大,在两山之间、隧道上方有河流穿过,河流宽度约占两山间距的一半。该河流沿槽谷方向发育延伸,是季节性溪流,全长约 15 km,最大流量可达 2 500~5 500 L/s 左右。隧道进口前部为两沟相交部分,由东向西发育的冲沟为主沟,雨后流量可达 2.5 L/s;东南向西北方向的冲沟为次级冲沟,雨后流量为 0.5 L/s。

地调显示,隧址区出露地层为三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})、中统雷口坡组(T_{21})、上统须家河组(T_{3xj})、侏罗系下统珍珠冲组(J_{1z})、中下统自流井组(J_{1-2z})、中统新田沟组(J_{2x})、第四系(Q_4),以第四系全新统作为主要调查对象,该全新统中多为黏土,其特性为:灰、褐黄色,硬塑状,含较多角砾,角砾成分为灰岩、砂岩及页岩,粒径 2~50 mm,含量 5%~15%,厚 0~22.96 m,主要分布在隧道进、出口段及洞身段地形坡度较小的地段地表。

1.2 方案实施过程

本文选用 AGI 高密度电法、EH4 大地电导率法相结合的综合物探方法进行探测。其中,AGI 高密度

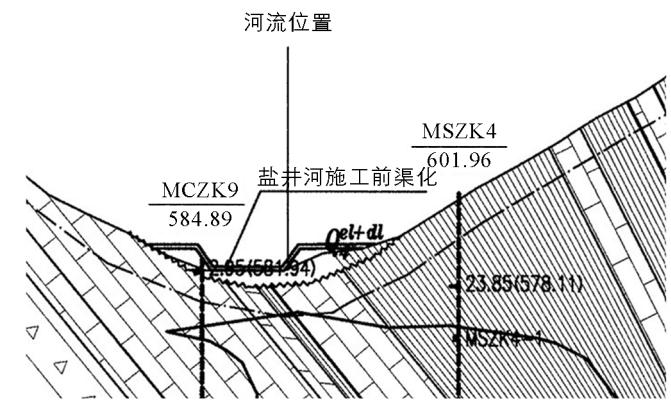


图 1 隧道汇水区示意图

电法利用电极转换开关和高密度电法主机控制器实现数据的采集工作；EH4 大地电导率法是一种采用电磁仪观测离地表一段距离内地层断面电性变化信息，基于断面电性信息进行分析研究的方法。

受地形复杂、空间有限等因素的影响，AGI 测线布置 8 条，探测总长度 924 m；EH4 大地电导率法布置测线 4 条，探测总长度 611 m。

1.2.1 AGI 现场探测方案实施

根据 AGI 测线布置要求和现场地形条件，保证单个区域内测点的连续性，本次测线按网状布置，具体布线情况如表 1 所示。

表 1 AGI 测线布置表

测线	电极数/根	极距/m	长度/m	测线大致走向
1-1 测线	45	3	132	与隧道方向斜交
1-2 测线	42	3	123	基本垂直隧道方向
1-3 测线	36	3	105	与隧道方向斜交
1-4 测线	22	3	63	基本垂直隧道方向
1-5 测线	41	3	120	与隧道方向斜交
1-6 测线	42	3	123	基本垂直隧道方向
1-7 测线	46	3	135	与隧道方向斜交
1-8 测线	42	3	123	基本垂直隧道方向

1.2.2 EH4 现场探测方案实施

根据 EH4 测点布置要求和现场地形条件，本次测量测点的选取遵循区域控制原则，即以待测隧道拟开挖轴线为中心划分区域，保证单个区域内测点的连续性，而整个测量范围内的测点在空间上呈网状布置，最后将区域连为整体，得到沿隧道拟开挖区域一定范围内地层断面的电性变化信息。具体测线布置情况如表 2 所示。

表 2 EH4 测线布置表

测线	测点数/个	极距/m	点距/m	长度/m	测线大致走向
1-1 测线	13	20	10	143	与隧道方向斜交
1-2 测线	14	20	10	155	与隧道方向斜交
1-3 测线	15	20	10	162	基本垂直隧道方向
1-4 测线	14	20	10	151	基本垂直隧道方向

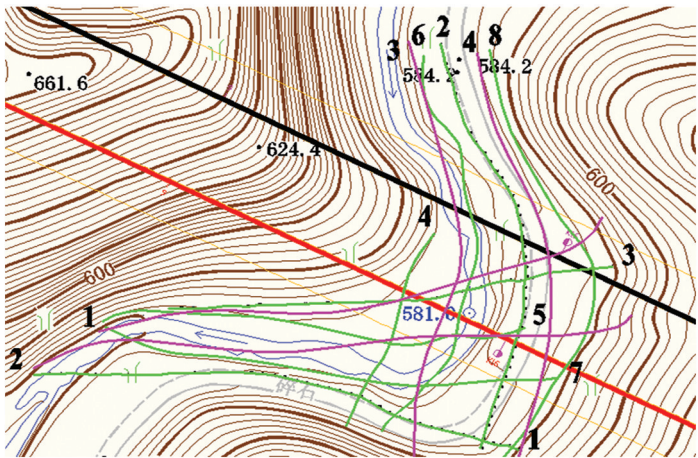


图 2 河流附近 AGI 法和 EH4 法测量现场布线图

整体布线如图 2 所示(绿色线条代表 AGI 测线走向，紫色线条代表 EH4 测线走向)，AGI、EH4 现场布置如图 3 所示。



图 3 河流附近 AGI、EH4 法测线现场布置图

1.3 理论基础

1.3.1 非均匀介质中的稳定电流场及视电阻率计算

非均匀介质条件下得到的电阻率是地下半空间体的综合响应, 称其为视电阻率 ρ_s ^[15]:

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} (\Omega \cdot m) \quad (1)$$

将电阻率与电场的分布联系起来, (1)式的电位差可表示为:

$$\Delta U = \int_N^M E_{MN} \cdot dl = \int_N^M j_{MN} \cdot \rho_{MN} dl \quad (2)$$

式中 E_{MN} 和 j_{MN} 为测量电极间任意点沿 MN 方向的电场强度分量和电流密度分量; ρ_{MN} 为测量电极间任意点的岩石电阻率; dl 为测量电极间任意点沿 MN 方向的长度单元. 将(2)式代入(1)式可得出:

$$\rho_s = \frac{K}{I} \int_N^M E_{MN} \cdot dl = \int_N^M j_{MN} \cdot \rho_{MN} dl \quad (3)$$

对于地下均匀各向同性的岩石, 其电阻率为 ρ , MN 间电流密度为 J_0 , 此时(4)式可写为:

$$\rho_s = \frac{K \cdot MN}{I} j_0 \cdot \rho \quad (4)$$

此时, ρ_s 应等于 ρ , 于是视电阻率的微分公式可表示为:

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN} \quad (5)$$

根据此式进行反演分析, 掌握数据的变化规律并发现和探查地下介质的分布状况.

1.3.2 最小二乘反演法

最小二乘反演法^[16]的反演过程不需要提供初始模型, 在首次迭代时采用一个均匀介质地下模型作为初始模型, 平滑限定的最小二乘方法方程表示为:

$$(J^T J + \lambda C^T C) \bar{P} = J_g \quad (6)$$

其中, J 是雅可比偏微分矩阵; λ 是阻尼因子; $\bar{g}$ 是测量视电阻率与计算视电阻率的对数差的偏差矢量; $\bar{P}$ 是模型参数的改正矢量; C 是二维平滑滤波因子; T 表示矩阵的转置.

2 结果分析

采用 AGI 高密度电法和 EH4 大地电导率法相结合的综合物探方法探测电阻率, 其中 AGI 的探测范围为 0~100 m, 有效范围为测线长度的 1/5~1/3; EH4 的探测范围为 40~1 000 m, 有效范围为 40~500 m.

2.1 AGI 高密度电法

对 AGI 每条测线进行温纳和偶极排列反演分析,得到的结果效果较好,如图 4 所示.

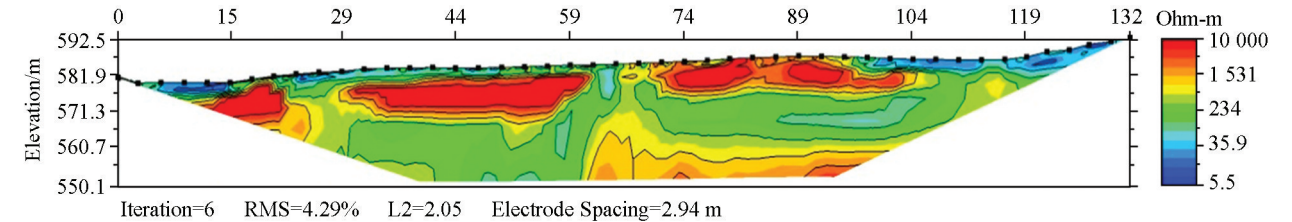


图 4 探测河流测线 1-1 温纳排列高密度电法反演分析图

图 4 为探测河流测线 1-1(温纳排列方式测量)反演分析图,探测剖面反演图形显示:电阻率变化范围在 5.5~10 000 $\Omega \cdot \text{m}$,电阻率分布较为均匀,地电水平分层特征明显.

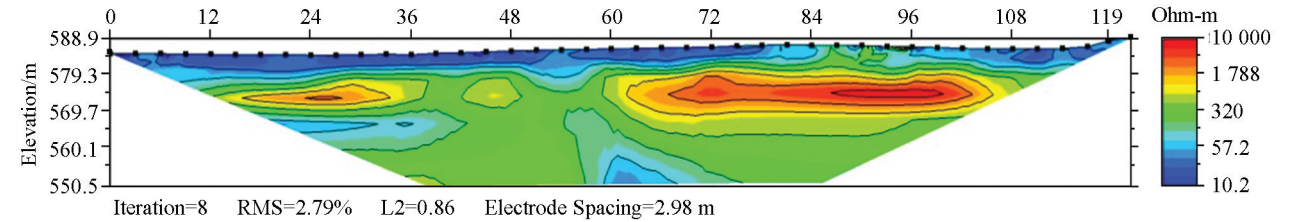


图 5 探测河流测线 1-2 偶极排列高密度电法反演分析图

图 5 为探测河流测线 1-2(偶极排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 10.2~10 000 $\Omega \cdot \text{m}$,整体电阻率偏高,沿布线走向地表以下浅埋层电阻率较低,该低电阻率区域沿河道走向分布.

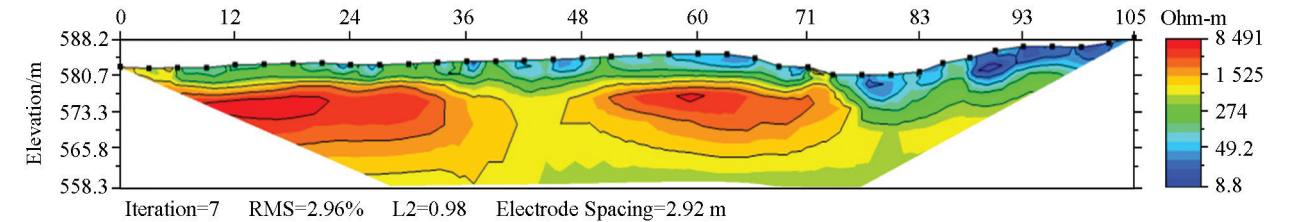


图 6 探测河流测线 1-3 温纳排列高密度电法反演分析图

图 6 为探测河流测线 1-3(温纳排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 8.8~8 491 $\Omega \cdot \text{m}$,电阻率变化明显,电阻率分布较为均匀,整体电阻率偏高,在距测线起点 83~90 m 的地表下方有电阻率较低的区域.该异常区域整体位于河床附近,沿河道走向分布.

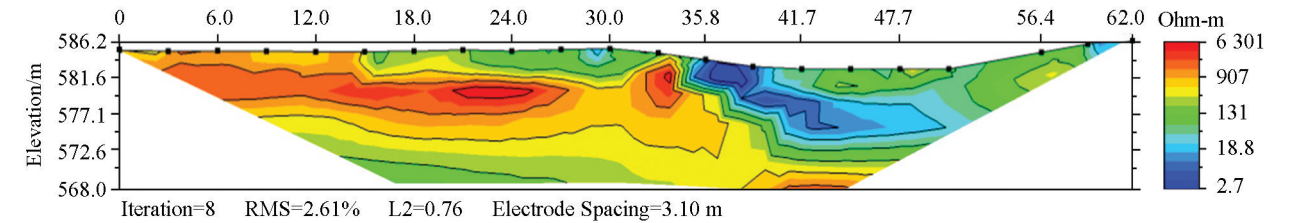


图 7 探测河流测线 1-4 温纳排列高密度电法反演分析图

图 7 为探测河流测线 1-4(温纳排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 2.7~6 301 $\Omega \cdot \text{m}$,电阻率变化明显,电阻率分布较为均匀,整体电阻率并不高,在距测线起点 36~48 m 的浅埋层有电阻率较低的区域.该异常区域整体位于河床附近,沿河道走向分布.

图 8 为探测河流测线 1-5(温纳排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 9.8~10 000 $\Omega \cdot \text{m}$,电阻率变化明显,电阻率分布较为均匀,整体电阻率偏高,在距测线起点 85~115 m 的浅埋层有电阻率较低的区域.该异常区域整体位于河床附近,沿河道走向分布.

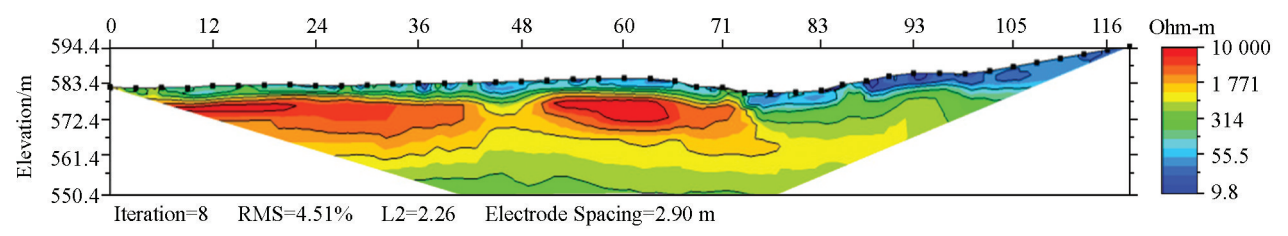


图 8 探测河流测线 1-5 温纳排列高密度电法反演分析图

图 9 为探测河流测线 1-6(施伦贝格排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 $11.8\sim5\,438\,\Omega\cdot\text{m}$,电阻率变化明显,电阻率分布较为均匀,整体电阻率并不高,在距测线起点 $6\sim72\text{ m}$ 的浅埋层有电阻率较低的区域.该异常区域整体位于河床附近,沿河道走向分布.

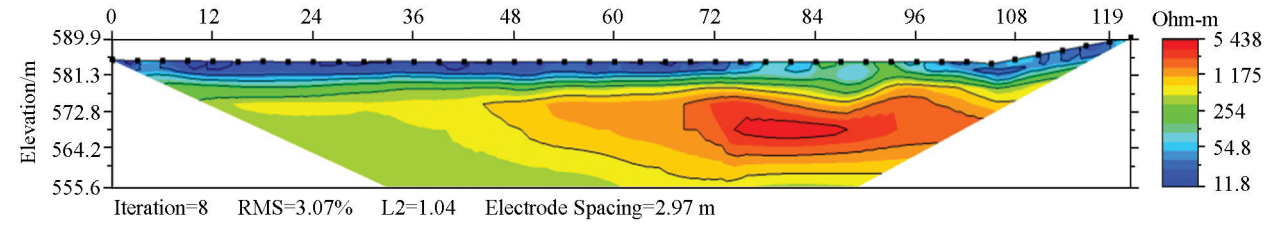


图 9 探测河流测线 1-6 施伦贝格排列高密度电法反演分析图

图 10 为探测河流测线 1-7(偶极排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 $9.6\sim10\,000\,\Omega\cdot\text{m}$,电阻率变化明显,整体电阻率偏高,在距测线起点 $3\sim9\text{ m}$ 、 $105\sim110\text{ m}$ 的浅埋层有电阻率较低的区域;在距测线起点 $110\sim116\text{ m}$ 处的浅埋层存在低电阻率的区域.该异常区域整体位于河床附近,沿河道走向分布.

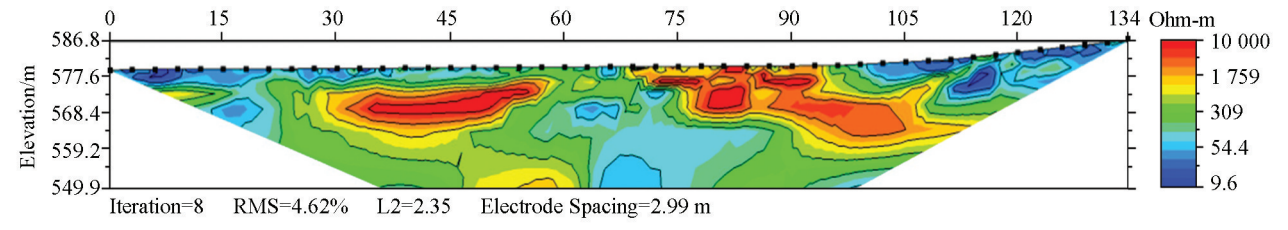


图 10 探测河流测线 1-7 偶极排列高密度电法反演分析图

图 11 为探测河流测线 1-8(偶极排列方式测量)反演分析图,从探测剖面反演图中可以看出:电阻率变化范围在 $5.6\sim10\,000\,\Omega\cdot\text{m}$,电阻率变化明显,整体电阻率较高,在距测线起点 $8\sim50\text{ m}$ 的浅埋层有电阻率较低的区域.该异常区域整体位于山脚附近.

对以上信息进行汇总后,得到表 3.

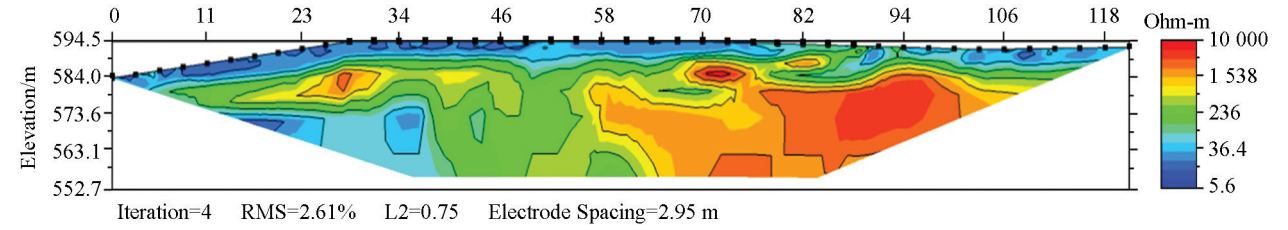


图 11 探测河流测线 1-8 偶极排列高密度电法反演分析图

表 3 AGI 探测河流物探异常区域汇总

序号	异常区域	里程桩号	埋深
1	距离测线 1-3 起点 $83\sim90\text{ m}$	K15+980 附近	$3\sim6\text{ m}$
2	距离测线 1-4 起点 $36\sim48\text{ m}$	K15+970 附近	$3\sim6\text{ m}$
3	距离测线 1-7 起点 $105\sim110\text{ m}$	K15+975 附近	15 m 左右

根据表中信息,将测量范围内低电阻率异常区域标识出来,即图 12 中红色圆圈划出区域。

经过对 AGI 高密度电法探测图像的分析研究发现,河流附近整体电阻率偏高,地电水平分层特征明显。但在距测线 1-3 起点 83~90 m、埋深 3~6 m 范围内(K15+980 附近),距测线 1-4 起点 36~48 m、埋深 3~6 m 范围内(K15+970 附近),以及距测线 1-7 起点 105~110 m,埋深 15 m 附近(K15+975 附近)出现低阻异常区域,此区域黏土含水率较高,由于该异常区域位于河道和山谷交界处下方,处于易汇水地带,推断造成此结果的原因是地表下方出现了破碎带,地表河流通过破碎带进入地下,导致浅层黏土层的含水率增大。

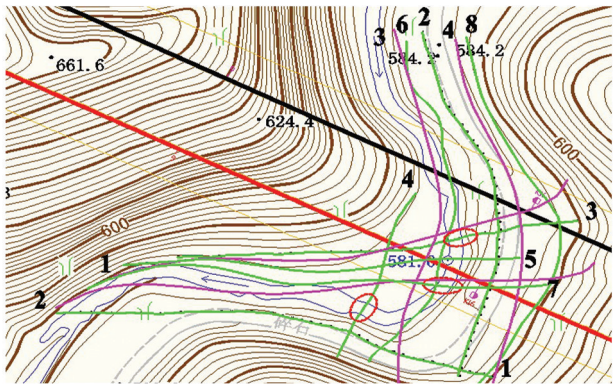


图 12 河流低阻体分布区域图

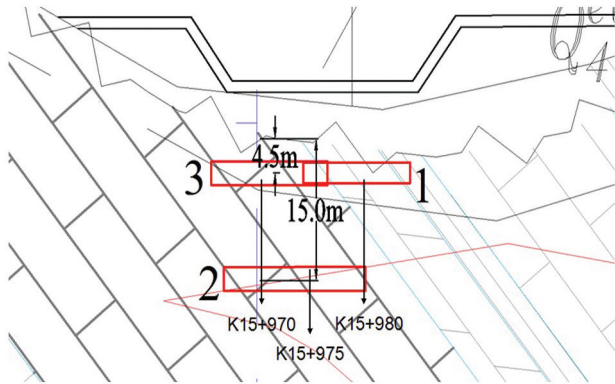


图 13 河流低阻体分布断面图

2.2 EH4 大地电导率法

EH4 大地电导率成像系统采集到的原始数据是时间序列的电场和磁场信号,仪器通过预处理后,对其进行 FFT 变换,获得电场和磁场虚分量、实分量以及相位的数据,并进行现场一维 BOSTICK 反演。选取一维 BOSTICK 反演结果中合理的相关系数和平滑系数,导出 DAT 数据文件,利用二维分析处理软件进行相应的二维反演分析;最后,对电导率数据进行成图处理,得到地层电性图形,如图 14~17 所示。

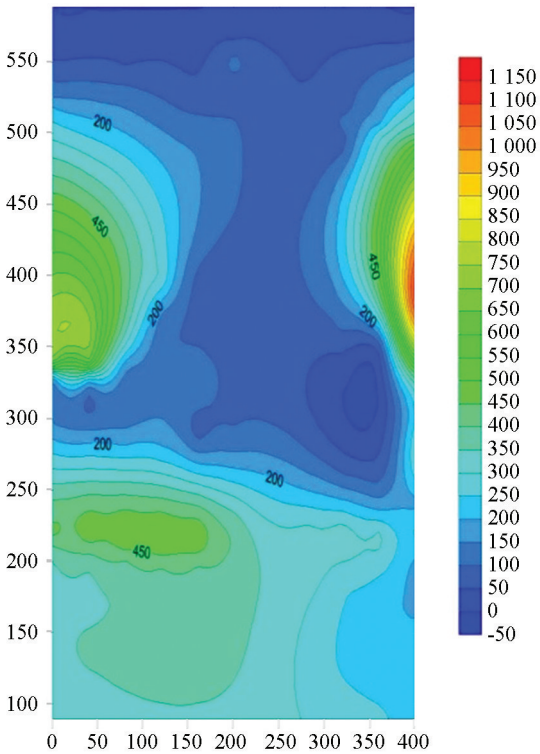


图 14 探测河流 2-1 测线

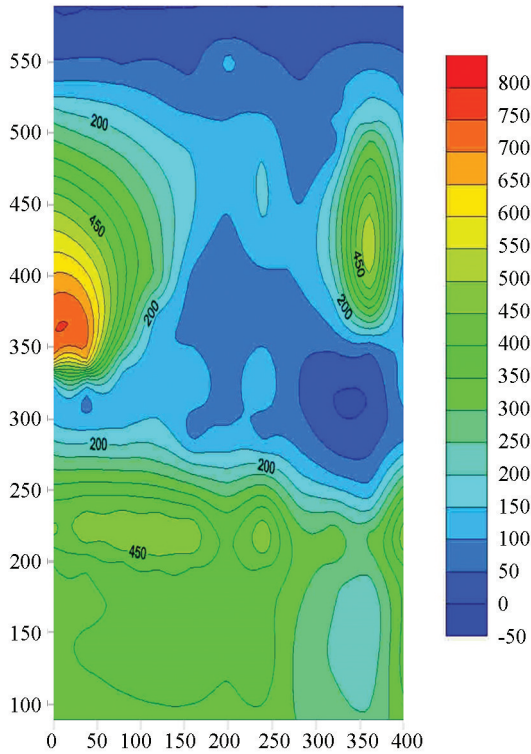


图 15 探测河流 2-2 测线

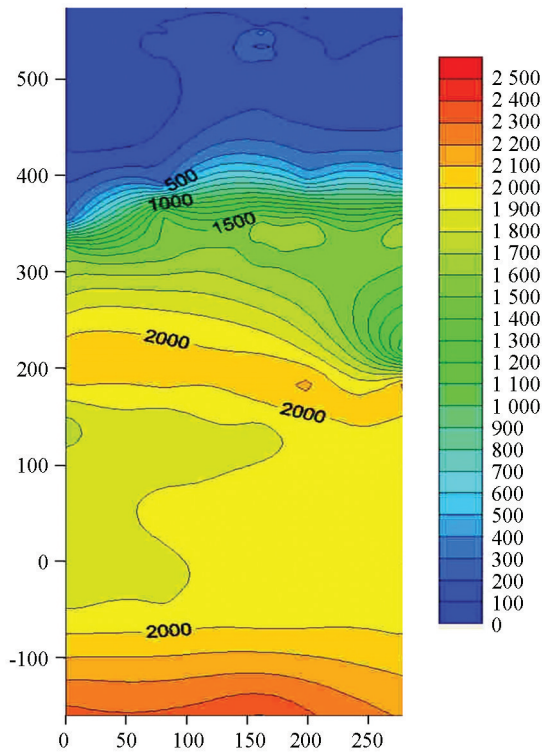


图 16 探测河流 2-3 测线

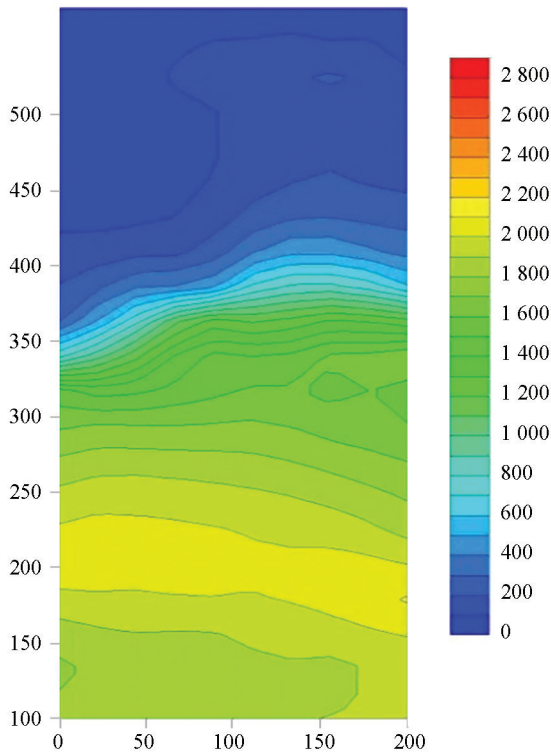


图 17 探测河流 2-4 测线

在河流区域共布置了 4 条测线, 根据探测结果反演图形可以看出, 地层电阻率分布范围分别在 $-50 \sim 1\,150\ \Omega \cdot \text{m}$ 、 $-50 \sim 800\ \Omega \cdot \text{m}$ 、 $0 \sim 2\,500\ \Omega \cdot \text{m}$ 和 $0 \sim 2\,800\ \Omega \cdot \text{m}$, 地层中电阻率的分布整体表现为自上而下电阻率逐步增加, 这与岩层分布信息吻合. 隧道下方地层电阻率较低, 且探测区域附近存在较多的河水, 表明隧道下方的黏土可能因小构造形成的破碎带与上部河流连通发生渗漏, 改变了其原有的含水率.

对 EH4 探测图像的分析研究发现, 地层电阻率分布范围在 $0 \sim 480\ \Omega \cdot \text{m}$, 地层中电阻率的分布整体表现为自上而下逐步增加, 这与岩层分布信息吻合; 距离隧道下方较近区域的电阻率较低, 说明隧道下方黏土层的含水率较高.

2.3 综合分析

通过 AGI 探测图形发现, 在河床下 20 m 范围内出现低阻异常, 可能是因为探测区域黏土含水率较高或处于汇水区域; 而在 EH4 探测中, 隧道下方也存在低阻区, 黏土含水率较高. 综合 AGI 高密度电法以及 EH4 探测图像结果, 初步分析得出: 河床至隧道下方一定区域内的电阻率较低, 此时岩层的黏土含水率较高. 已有的调查排除了地下本身存在孔隙水这一原因, 而隧址区处于易汇水地带, 由此推断水流可能因隧道下方破碎带的存在, 通过黏土层与地表间形成的一个连通通道流入地下, 导致了地层中黏土含水率的增大.

3 结论

采用 AGI 高密度电法和 EH4 大地电导率法相结合的综合物探方法进行探测, 通过电阻率绘制的反演结果图和地层电性图, 根据电阻率与含水率的关系, 得到以下结论:

- (1) AGI 测线的反演结果图显示: 沿布线走向地表以下浅层电阻率较低, 该低电阻率区域沿河道走向分布, 初步分析造成该现象的原因可能是河床下方浅层的黏土含水率较高或处于汇水区域.
- (2) EH4 测线的地层电性图显示: 地层中的电阻率自上而下逐步增加, 而隧道下方一定范围内的地层电阻率较低, 初步分析造成隧道下方电阻率低的原因可能是岩层黏土的含水率由下至上越来越高.
- (3) 在已知隧址区附近处于易汇水区域且排除原有地下水影响后, 综合 AGI 高密度电法和 EH4 大地

电导率法的电阻率结果,推断造成河床下方黏土含水率较高的原因是隧道破碎带的存在使地表与岩层下部贯通,地表河流通过形成的连通通道进入了黏土层.将水泥注入黏土中,在河床下方形成水泥土,增加黏土层的强度并满足防渗要求,为黏土因水引起的失稳问题提供了一种解决方法,这能在一定程度上减少工程中隧道开挖时灾害的发生.

参考文献:

[1] 孙宇乐,屈忠义,刘全明,等.基于多源遥感协同反演的区域性土壤含水率动态研究[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(12):46-53.

[2] 王军,曹平,赵延林,等.水土化学作用对土体抗剪强度的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):245-250.

[3] 傅鹤林,安鹏涛,伍毅敏,等.考虑排水体系时隧道突涌水分析[J].铁道科学与工程学报,2022,19(11):3335-3342.

[4] 赵涛,梁庆国,吴飞亚,等.基底围岩膨胀对泥岩隧道受力特性的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):538-546.

[5] 何伟奇.水蚀影响下大跨钙积黄土隧道开挖稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):311-318.

[6] 韩兴博,叶飞,陈子明,等.黄土盾构隧道地层特性演变规律及围岩压力计算[J].铁道科学与工程学报,2022,19(12):3715-3725.

[7] 展宏跃.隧道穿越第三系粉质黏土支护结构受力研究[J].铁道工程学报,2017,34(2):59-64.

[8] 李志强,杨涛.浅埋黏土层大跨度隧道施工技术与塌方风险分析[J].公路交通科技,2020,37(2):116-122.

[9] 邵雁.矿井综合物探技术在南方煤矿探测岩溶突水通道中的应用[J].中国煤炭地质,2009,21(7):62-65.

[10] 赵虎,张泉,谭建秋,等.基于综合物探方法的公路不稳定边坡潜在滑面探测[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):117-122.

[11] 杨洲,潘剑伟,王中美,等.综合物探方法在地下岩溶通道探测中的应用研究[J].中国水运(下半月),2022,22(4):120-122.

[12] 赵俊,向龙洲,李忠,等.综合物探在水文地质调查中的应用及适用性分析[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(S2):110-115,123.

[13] 杨武洋.煤矿陷落柱赋水特征的综合物探探查原理与方法[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):45-50.

[14] 刘国华,王振宇,黄建平.土的电阻率特性及其工程应用研究[J].岩土工程学报,2004(1):83-87.

[15] GAN J J, ZHANG Y X, LIU X. An Application of the High-Density Electrical Resistivity Method for Detecting Slide Zones in Deep-Seated Landslides in Limestone Areas[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 177(2): 104013.

[16] LOKE M H, BARKER R D. Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 131-152.

责任编辑 汤振金
孙文静