

# 高密度电法在岩溶隧道渗漏通道探查中的应用

谭道远, 邹济韬, 刘海鳌, 胡 丰, 王月伟

(中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**在灰岩分布区岩溶的发育对浅埋隧道危害极大,主要表现为降雨或者地下水引起的隧道渗漏.以京珠高速广东段姚双坳隧道为例,应用高密度电法对隧道调查区内岩溶渗透通道进行了探查.探测结果与地面调查所探查的岩溶塌陷等实际地质体相吻合,验证了高密度电法在岩溶地区渗漏通道探查中可行性和准确性.

**关键词:**岩溶地区;浅埋隧道;高密度电法;渗漏通道

**中图分类号:**TV221.2 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.008

## 0 引言

如今国内高密度电法的应用比较多,涉及的领域也很广,根据不完全统计主要有:李巍等(2013 年)<sup>[1]</sup>运用高密度电法探测复杂地形条件下煤矿的不积水采空区,得到的结论与实际钻探结果相符;周杨等(2012 年)<sup>[2]</sup>运用高密度电法探测土坝的坝体浸润线取得了很好的效果;程邈(2011 年)<sup>[3]</sup>运用高密度电法对建设项目工作区域内可能存在的断层进行勘察,取得了较好的地质效果.

## 1 方法选择

在岩溶区进行地质勘察时,由于岩溶区地下水地质的复杂性和岩溶发育的空间不均性,仅仅依靠传统地质调查方法不易得到令人满意的勘察结果<sup>[4]</sup>.如果能够运用合适的物探方法,结合工程地质调查进行现场勘查,就可以获得比较准确直观的结果,选取合适的物探方法进行调查非常重要,更容易获得准确直观的结果,同时能够节约经济成本.下面就几种常用的物探方法进行优选.

### 1.1 电法

高密度电法是一种阵列勘察方法,其功能可视为测探与电剖面法的结合<sup>[5]</sup>.高密度电法原理简单,图像直观,是一种分辨率比较高的物探方法.该方法在工程地质勘察和地质灾害调查中应用广泛.

隧道勘察区地表以第四系亚黏土为主、局部出露泥盆系东岗岭组灰岩,下伏岩层主要为灰岩、砂岩,并广泛发育有岩溶不良地质体.在布置测线之前,进行了现场介质电阻率测量,场地内主要介质电性差异明显(详见表 1),与其他有关文献[6]相比较,数据之间数量级吻合性较好,因此可以作为有效的电法勘探结果解释参考.

表 1 测区主要地下介质物理参数范围值

Tab.1 Measuring area mainly underground medium physical parameter range value

介质	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
空气	$\infty$
水	$< 100$
土层	$n \times 10 \sim 2 \times 10^2$
完整灰岩	$n \times 10^2 \sim n \times 10^3$
砂岩	$n \times 10 \sim n \times 10^2$

注:  $1 < n < 10$ .

在各种地质作用的长期作用下,灰岩经过水的化学和机械作用后会形成溶蚀裂隙、溶沟、溶槽、溶洞、溶蚀洼地等<sup>[7]</sup>.一般情况下,岩溶发育的岩体与岩溶不发育的岩体具有明显的电性差异:溶槽、溶沟通常充填有土类充填物,视电阻率呈现低阻异常;位于水位以下或土类充填的溶洞,视电阻率呈现低阻异常;空洞或半充填溶洞,视电阻率呈现高阻异常<sup>[8]</sup>.因此,通过这种地电性质的差异,我们利用电法勘探能够找到岩溶、断层等不良地质体.

收稿日期:2013-11-08;修订日期:2014-01-19

作者简介:谭道远(1990-),男,湖北咸宁人,中国地质大学(武汉)硕士研究生,主要研究方向为隧道灾害评估与防治,水土耦合数值模拟,E-mail:373715992@qq.com.

工作区内存在大量高压输电线路、人文电磁干扰严重;并且工作区内地形起伏较大,不利于电磁法施工.因此选用直流高密度电法.该方法具有以下优点:①电极布设一次性完成,减少了因电极设置引起的干扰和由此带来的测量误差;②能有效地进行多种电极排列方式的测量,可获得丰富的关于地电结构信息;③受人文电磁干扰小;④工作效率高.

## 1.2 重力法

重力法在地形平坦的岩溶发育地区得到广泛应用.重力法进行岩溶勘察的基础是岩溶溶蚀空间在一般情况下相对于围岩都是低密度体<sup>[9]</sup>.而且该方法需要进行地形影响校正,同时还要排除地表风化带和潜水面起伏等的影响,该方法不适合山区岩溶勘察<sup>[10-11]</sup>.

## 2 直流高密度电法在岩溶勘察中的应用

### 2.1 隧道工程地质条件

京珠高速媯双坳隧道北行长约 755 m;南行长约 760 m.位于乳源县东坪乡长溪村北西约 2.5 km.隧道区段内围岩多以Ⅲ、Ⅳ级为主,但受地质构造、节理发育等影响,隧道内岩溶十分发育.已探明的溶洞内多以黏土充填并夹有孤石,部分溶蚀洼地、落水洞漏斗直接从地表发育到隧道断面内.地下水类型主要是基岩岩溶裂隙水,主要受地表水补给,因此受大气降水影响大.隧道内水量较大,部分设置的排水管中有鱼虾等流出.各裂隙相互贯通直至地表.媯双坳隧道北行洞,共检测到 41 条裂缝(纹),其中有 39 条环向裂缝(纹),占 95.1%,2 条纵向裂缝(纹),占 4.9%.检测到 1 处积水、1 处滴水、1 处冒泥、24 处渗水痕迹、41 处渗水.媯双坳隧道南行洞,共检测到 35 条裂缝,其中有 33 条环向裂缝(纹),占 94.2%,1 条纵向裂缝,占 2.9%,1 条斜向裂缝,占 2.9%.检测到 3 处滴水区、35 处渗水痕迹、11 处渗水.根据勘察报告,场区地表水及地下水主要活跃在雨季,施工期勘察钻孔的水位位于钻孔底面以下,所打钻孔均为干孔.

### 2.2 测线布置

测线布置如平面图所示,沿隧道右线布置一条纵向测线 1,长 310 m;横向切隧道岩溶渗漏灾害严重地段,布置 6 条测线,分别为测线 2,长 100 m;测线 3,长 100 m;测线 4,长 100 m;测线 5,长 140 m;测线 6,长 140 m;测线 7,160 m;7 条测线总长度为 1 050 m(详见图 3).本次物探工作参数为:工作装置为施伦贝尔装置和温纳装置、电极距

为 4.5 m、隔离系数为 1~39、最大电极数为 80、供电电压为 240 V.

### 2.3 成果解释

测线 1 位于隧道左、右两洞之间,大致与隧道平行.由图 1(a)可看出:浅层电阻率高低不一,是由局部灰岩出露造成的;深部高电阻率区域为灰岩,测线 100~180 m 和 190~250 m 段深部低电阻率区域推断为大型岩溶渗漏通道发育区.在测线 1 正交的 144 m 处、190 m 处、220 m 处分别为测线 4、5、6,比较纵向测线与多条横向测线可以得出测线 1 的 144 m 处、220 m 处低电阻率岩溶发育区对应测线 4 与 6 剖面内的岩溶发育区,测线 5 测线位置处于岩溶发育区间隙,无明显岩溶发育,表明该次高密度电法探测的测线之间空间对应性比较好.

测线 2 大致与隧道走向垂直.由图 1(b)可看出:该电阻率断面图分层性良好,结合工程地质实地勘察分析,浅层低电阻率异常区域为风化黏土填充的岩溶漏斗与溶蚀洼地,而深部高电阻率区域为灰岩,地表至隧道顶部之间剖面内不存在岩溶渗漏通道.

测线 3 大致与隧道走向垂直.由图 1(c)可看出:浅层电阻率高低不一,是由局部灰岩出露造成的;深部高电阻率区域为灰岩.物探剖面 35~40 m 之间存在极低电阻率区域,地面勘察表现为第四系泥土覆盖,上覆植被发育茂盛,推断为含水率较高的第四系黏土填充塌陷;测线 0~70 m 段深部低电阻率区域异常,东西侧出现明显分区,原因是野外工程地质勘察查明,隧道西南侧发育一系列岩溶塌陷和大面积溶蚀区,而东北侧则岩溶不太发育,差异的具体原因是由于西南部地势较低且平缓,雨水能集中汇入溶蚀岩层,而东北部为山坡,雨水易顺坡流下而不易下渗入坡面.

测线 4 大致与隧道走向垂直.由图 1(d)可看出:浅层部分地区由于灰岩出露区被溶蚀,形成溶槽等溶蚀地质体,溶槽内被第四系风化黏土填充,导致视电阻率偏小溶槽底部可能发育垂直连通的溶蚀通道;深部高电阻率区域为灰岩.

测线 5 大致与隧道走向垂直.由图 1(e)可看出:该电阻率断面图分层性良好,浅层低电阻率区域为粉质黏土,而深部高电阻率区域为灰岩,测线 72 m 左右位置浅层极低电阻率部位为地表工程地质勘察发现的大面积溶蚀洼地.

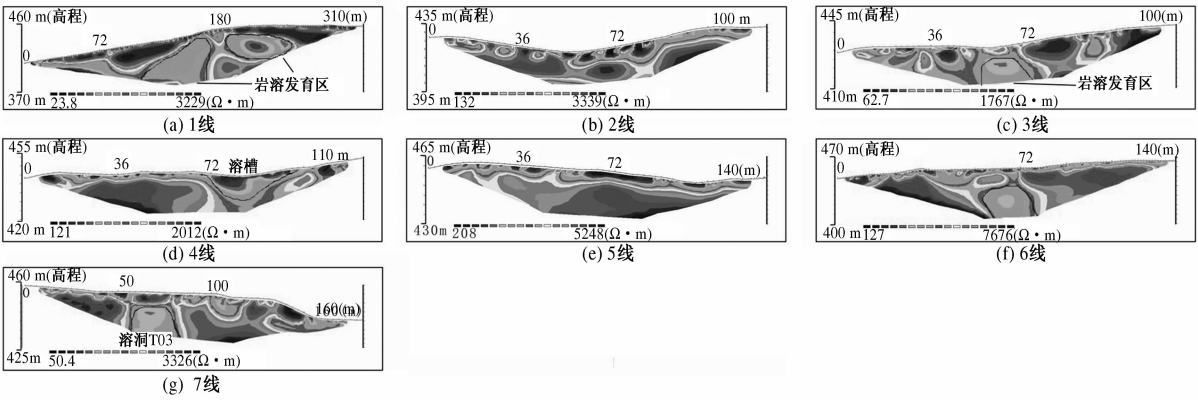


图 1 婣双坳隧道测线 1-7 视电阻率断面图

Fig. 1 Line 1-7 apparent resistivity sections of Pishuang'ao tunnel

测线 6 大致与隧道走向垂直. 由图 1(f) 可看出: 浅层电阻率高低不一, 是由局部灰岩出露造成的; 深部高电阻率区域为灰岩. 测线 60 ~ 72 m 段深部低电阻率区域推断为大型岩溶渗漏通道发育区, 该岩溶地质体位于地面 10 m 以下, 为直径 12 m 左右的黏土或者堆积物填充溶蚀洞穴, 埋藏型地质体是传统工程地质勘查的盲区, 而物探勘察结果与已建隧道渗漏病害部位相吻合, 体现了其优越性.

测线 7 大致与隧道走向垂直. 由图 1(g) 可看出: 浅层电阻率高低不一, 是由局部灰岩出露造成的; 深部高电阻率区域为泥盆系灰岩. 测线 50 ~ 64 m 段深部低电阻率区域是由地表可见已塌陷溶洞 T03 (图 2) 引起的, 该溶洞内已有亚黏土充填, 上覆植被茂密, 并且垂向延伸较大. 由物探剖面图可以测量出溶洞 T03 的直径为 14 m, 与工程地质调查量测得的塌陷尺寸基本吻合, 证明电

法在该岩溶地区表现良好, 结果准确.



图 2 塌陷 T03 形态

Fig. 2 The form of subsidence T03

2.4 探测成果

通过对物探数据进行分析, 处理和解释, 结合现场已有的地质资料, 查明该岩溶地区渗漏通道物探图空间分布形态和位置, 展布于 CAD 图上如图 3 所示.

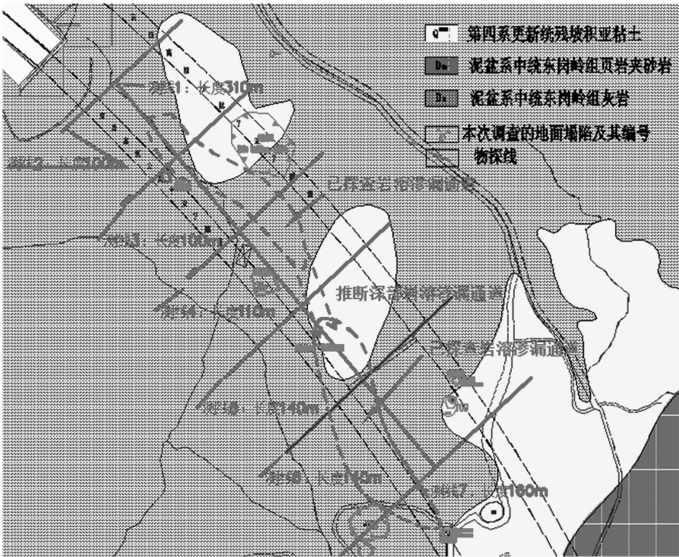


图 3 物探探查岩溶渗漏通道展布图

Fig. 3 Geophysical exploration karst seepage channel showed layout

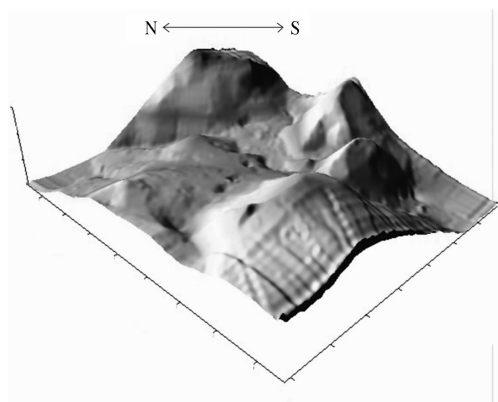


图4 隧道区的三维地形模型

Fig 4 3D terrain model of the tunnel region

可发现,岩溶通道主要出现在隧道北段至中段,与实地踏勘所得到的隧道内部渗漏病害出现位置符合.电法的适宜深度一般为80 m左右<sup>[5]</sup>,而调查区域地表距离隧道顶板距离垂直高度为最大为90 m左右,基本满足电法的勘察深度限制要求.大水量渗漏点在空间上与探查得到的溶洞位置相吻合,可以推断降雨地表水通过塌陷渗入地下岩溶渗漏通道后,通过比较短的路径直接渗入隧道内部,造成大水量的渗漏水灾害.运用 surfer 软件建立的模型反映隧道三维形态(图4)为丘陵环绕的洼地,因此隧道内部渗漏水应该为周围丘陵坡面流水汇集到洼地中,通过岩溶通道下渗所致.由于水量相对于山坡来说比较集中,因此也导致了隧道中西部岩溶较东侧更为发育.物探剖面1(e)没有能够探查到相应的岩溶发育,但剖面4与剖面6探查得到了中深度的岩溶通道发育,其深度表明北部岩溶不太可能为孤立式溶洞,可推断南北溶洞之间存在深部渗漏通道(图3),由于高密度电法有效作用深度或者深部精度有限,没有能够探查到.

### 3 结论

高密度电法能够直观的反映地质异常体的形态,在灰岩岩溶地区由于电阻反差较大,电法对岩溶通道的探测能获得比较好的效果,本实例中

电法获得的岩溶通道分布情况与施工报告中的大规模突涌水位置以及实地调查得到的雨期隧道内渗水点比较一致,结合野外工程地质调查获得的地表岩溶塌陷和溶洞分布情况,可以得到比较合理的调查区岩溶地质体空间分布.因此,只要方法得当,高密度电法在山区的岩溶渗漏通道的勘察中能起到较好的效果,能够为隧道渗漏的原因分析提供重要的决策依据.

### 参考文献:

- [1] 李巍,王信文,曾方禄,等.瞬变电磁法探测复杂地形不积水采空区的应用[J].CT理论与应用研究,2013,22(3):455-462.
- [2] 周杨,陈红卫.高密度电法在土坝浸润线探测中的应用[J].郑州大学学报:工学版,2013,33(5):92-95.
- [3] 程邈,傅焰林,李振宇.高密度电法在查明潜伏断裂中的应用[J].工程地球物理学报,2011,8(4):417-420.
- [4] 程志平.电法勘探教程[M].北京:冶金工业出版社,2007.
- [5] 顾中华.高密度电法探测溶洞成果精度分析[J].勘察科学科技,2008(4):27-29.
- [6] 李成香,王建军,唐诗群.应用综合物探方法探测隐伏岩溶漏斗[J].工程勘察,2008(3):99-101.
- [7] 王喜迁,孙明国,张皓,等.高密度电法在岩溶探测中的应用[J].煤田地质与勘探,2011(5):72-75.
- [8] SONG Ki-li, CHANG S. Identification, remediation, and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea [J]. Engineering Geology, 2012,92(105):117-130.
- [9] 刘崧.物探方法在岩溶勘查中的应用综述[J].地质科技情报,1997,16(2):85-91.
- [10] 姚伟,李文尧,张文杰.高密度电阻率法和探地雷达在昆明长水国际机场岩溶勘查中的应用[J].科学技术与工程,2012,12(31):8175-8179.
- [11] 尚小卫,杨进录,谷令强.物探方法在山体隧道勘察中的应用[J].西部探矿工程,2012(5):177-179.

## Application of High-density Electrical Method in Karst Tunnel Leakage Passage Detection

TAN Dao-yuan, ZOU Ji-tao, LIU Hai-ao, HU Feng, WANG Yue-wei

(School University of Geocience, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The development of Karst is harmful to the shallow buried tunnel in limestone distribution region, which is mainly characterised as the tunnel leakage caused by rain or groundwater. In this study, illustrated by the case of Pishuang' ao tunnel of Beijing-Zhuhai expressway in Guangdong province, high-density electrical method is applied to the detection of karst leakage passage of tunnel survey area. The detection results are consistent with the ground investigation of actual geological bodies (ie, karst collapses), which verify the feasibility and accuracy of high-density electrical method in the leakage passage detection of karst region.

**Key words:** karst region, shallow buried tunnel, high-density electrical method, leakage passage

(上接第 31 页)

- [8] 喻泽红,韩理安. 土工网处理桥头差异沉降的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 24-30.
- [9] 田小草,应荣华,张起森. 应用土工格栅处理软土地基上的桥头跳车问题[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 744-746.
- [10] 袁捷,凌建明. 桥头引道工后沉降评价与养护标准的研究[J]. 同济大学学报, 2004, 32(1): 49-53.
- [11] 中建标公路委员会. JTG B01—2003 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [12] Abusharar S W, ZHENG Jun-jie, CHEN Bao-guo, et al. A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 39-52.
- [13] 中华人民共和国行业标准. JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] 吴道尧. 半填半挖路基设计与施工技术要点探析[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2007(8): 75-77.
- [15] 宋雅坤,郑颖人,张玉芳,等. 加筋土挡墙稳定性分析研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2008, 35(11): 166-171.

## Calculation of Geogrid Reinforced for Alleviating Bump at Bridge Approach

SHEN Jun-min<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, ZHAO Jian-bin<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technique in Loess Area, Shanxi Provincial Research Institute of Communications, Taiyuan 030006, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The mechanism of the reinforced bridge approach embankment with geogrid is firstly introduced. According to the requirements of vertical acceleration that human body travels with, the settlement requirements of bridge approach are discussed and the transition section length of reinforced embankment for comfortable driving is determined. The arc assumption is made to describe the settlement curves and the Coulomb friction is used to model the interface characteristic between geogrid and soil. The stress of geogrid reinforcing the embankment is studied at last, the analytical expression to calculate the axial tension forces of the geogrid is obtained, and it is verified by the numerical simulation and practical project.

**Key words:** bridge-head bump, geogrid, reinforced embankment, analytical method, numerical simulation