

# 反射系数 K 法在岩溶探测中的应用

陈绍求 ,肖志强

(中南工业大学地质系 ,湖南长沙 410083)

摘要 岩溶是导致地层塌陷的主要原因。利用反射系数 K 法解释电测深  $\rho_s$  曲线 ,能突出溶洞引起的异常 ,明显地反映出地下溶洞的存在。

关键词 电阻率测深 ;反射系数 K 法 ;岩溶

中图分类号 :P631.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-8918(2000)03-0225-05

岩溶和煤矿采空区是引起地层塌陷等地质灾害的重要因素 ,探测岩溶和煤矿采空区的分布规模、空间位置 ,避免地质灾害的发生 ,为高层建筑、大型厂房、高速公路、桥梁、大坝等各类高标准工程项目的建设提供可靠地质依据 ,是当前工程物探的重要任务。

探查岩溶的物探方法很多 ,但真正要确定洞穴或岩溶地段的空间分布位置则是不容易的。作者在宁横公路 k16+780~k17+280 地段 ,用常规的电测深法在  $500 \times 30 \text{ m}^2$  测区内进行了面积性探测。以公路路基中线为中心剖面 ,左右间隔 15 m 共布设 3 条平行剖面 ,开展点距为 10 m、最大  $AB/2=65 \text{ m}$  的电测深工作。该设计路段地表大多为稻田耕植土覆盖 ,基岩为灰岩 ,在 k16+790~k17+180 路段 ,地表可见多处塌陷 ,说明地下岩溶发育。通过对所观测的电测深  $\rho_s$  曲线进行反射系数 K 法解释 ,并经钻孔验证 ,比较准确地确定了探测路段范围内溶洞的规模和空间赋存位置 ,为后续公路路基铺设提供了可靠的地质信息。

如果溶洞的规模和埋深不大 ,加上覆盖层的影响 ,溶洞顶板及充填物引起的  $\rho_s$  异常较弱 ,只在  $\rho_s$  曲线上反映为局部微弱变化 ,人们在解释时就可能忽略或将其圆滑掉 ,造成解释失误。对于那些埋深较大、覆盖层较厚的溶洞 ,即使规模较大 ,异常也不会十分明显。在常规的  $\rho_s$  等值线断面图上 ,这种弱小异常往往被周围其它异常所淹没而失去其异常特征 ,所以 ,单纯依靠  $\rho_s$  这一参数来区分地下溶洞 ,其分辨率显然是很低的 ,因此必须把  $\rho_s$  局部弱小异常加以提取和放大以突出溶洞引起的异常。反射系数 K 法是对已有的  $\rho_s$  曲线进行 1 次高通滤波 ,即放大、突出局部异常 ,压制低频背景异常。经过这种处理的电测深曲线 ,能明显地反映出地下溶洞的存在。下面以中心剖面的电测深  $\rho_s$  曲线经过反射系数 K 法解释以后的成果加以说明。

## 1 突出溶洞 $\rho_s$ 异常的应用实例

电测深  $\rho_s$  曲线的类型取决于地电断面的性质。曲线类型发生变化的原因通常是由于某岩层的缺失或新地层的出现 ,因此 ,通过它的分布和变化可以了解地下介质的电性结构。由于溶洞的规模和埋深都不大 ,它所引起的  $\rho_s$  曲线类型的变化不明显甚至较复杂 ,因此 ,单纯依靠  $\rho_s$  曲线类型的变化来发现地下溶洞的存在十分困难。

图 1 中  $\rho_s$  曲线为 H 型。粗略一看 ,曲线中段有明显的低阻异常 ,该点地下似乎有溶洞存

在。因为测区内大部分地段的  $\rho_s$  曲线为 G 型,为电阻率值较低的覆盖层与  $\rho_2 \rightarrow \infty$  的基岩—灰岩的二层电性结构。

图 1 中单支 K 曲线的首支存在明显的 K 值负异常,梯度较小,分布范围较宽,反映的是地下浅部电性变化和电性分层,可由此计算出浮土覆盖层的厚度和灰岩的埋深。单支 K 曲线的变化规律否定了依据  $\rho_s$  曲线类型作出的判断。由于该测点下浮土较厚,加上测区内潜水面离地面达 9 m,导致覆盖层中与灰岩接触部位的介质电阻率值降低,从而使得  $\rho_s$  曲线呈 H 型。两相对比,单支 K 曲线出现负异常的极距小于  $\rho_s$  曲线的低阻异常所在极距,而 K 值负异常的渐变过程则反映出覆盖层中介质电性逐渐变小的过程。图中反射系数 K 法的解释结果和钻孔验证结果的对比表明,这种解释方法具有较高的精度。

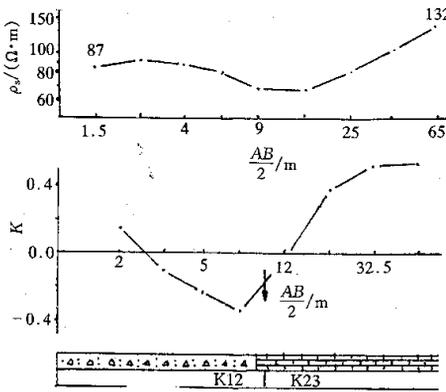


图 1 280/0 点电测深曲线及其解释结果

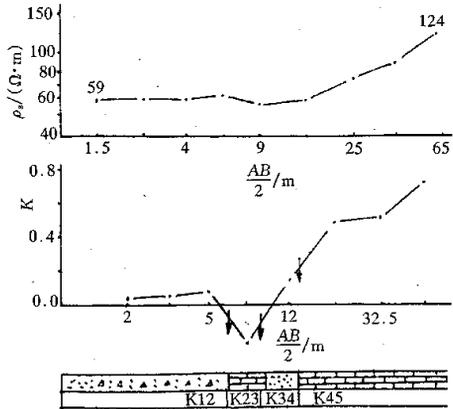


图 2 135/0 点电测深曲线及其解释结果

图 2 中  $\rho_s$  曲线呈不太明显的 KH 型, K 型部分很弱,稍不注意,就有可能被圆滑成 G 型曲线。因为曲线的首支仅在  $AB/2 = 6$  m 处向上微凸,而尾支则在  $AB/2 = 15$  m 处就开始以  $45^\circ$  渐近线上升,说明基岩埋深不大。从曲线特征可以看出,该点下面可能有溶洞存在。K 型部分的  $\rho_s$  曲线起伏变化幅度不大,宽度也很小,表明引起异常的溶洞顶板厚度不大。H 型部分的  $\rho_s$  曲线宽度大一些,但下凹的幅度也不大,说明溶洞的规模不大,其中的充填物不可能引起明显的低阻异常。而该点在单支 K 曲线上,同样存在明显的 K 值负异常,即放大了原来的  $\rho_s$  异常。但该 K 值异常的特点与图 1 中浮土引起的 K 值负异常的特点明显不同,表现为梯度大,范围小,呈跳跃状,反映出浮土覆盖层、溶洞顶板和溶洞充填物三者之间电性突变的关系,其实质反映出了上述三种介质构成的二组界面上电流的反射形式和反射量的大小。经钻孔验证,该点地下 9.8~14 m 存在溶洞,浮土覆盖层厚 6.5 m,而溶洞顶板仅 3.3 m 厚(图 2)。对  $\rho_s$  异常而言,由于浮土覆盖层和溶洞充填物为低阻,溶洞顶板厚度又不大,不可能引起非常明显的高阻异常,从而出现了前面所说的曲线类型不明显的特征。

图 3 的  $\rho_s$  曲线呈 KKH 型,其首支为复式的 K 型曲线。第一个 K 型曲线部分反映出了浮土覆盖层的电性变化,并显示了覆盖层较厚的特征,但在  $AB/2 = 15$  m 时,曲线又出现了一个上凸,中段  $\rho_s$  值相对较小,下凹幅度较大。该曲线类型独特,可以说是图 1、图 2 中  $\rho_s$  曲线的组合,表明该点地下既存在较厚的浮土覆盖层,又存在一定规模的溶洞,稍不注意,曲线就会被圆滑成 KH 型。

图 3 中单支 K 曲线存在 2 个明显的负异常。 $AB/2 = 7.5$  m 处的负异常梯度、幅值都小,

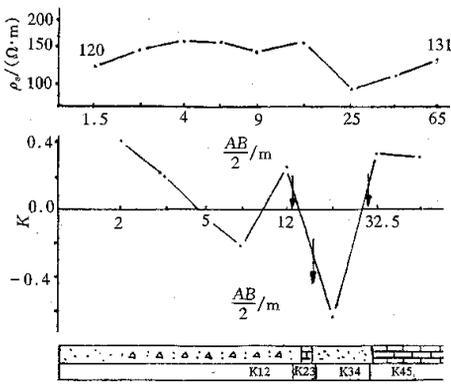


图 3 230/0 点电测深曲线及其解释结果

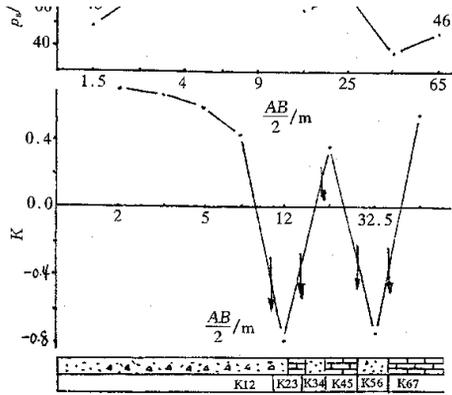


图 4 250/0 点电测深曲线及其解释结果

反映浮土覆盖层的电性变化,而  $AB/2=20\text{ m}$  处的异常梯度、幅值都大,呈跳跃状,反映出浮土覆盖层与溶洞顶板和溶洞顶板与溶洞充填物间构成的电性差异。经钻孔验证,该点地下  $15\sim 31\text{ m}$  为溶洞,其直径达  $16\text{ m}$ ,溶洞顶板仅  $1.5\text{ m}$  厚(图 3)。正因为该溶洞规模大,又处于潜水面以下,溶洞充填物形成的低阻异常使得  $\rho_s$  曲线尾支呈小于  $45^\circ$  渐近线上升。

图 4 中  $\rho_s$  曲线亦呈 KKH 型,与图 3 不同的是,复式 K 型曲线出现在中段。通常情况下,曲线的第二个 K 型局部跳跃可能会被认为是干扰或观测误差引起的而不被重视或被圆滑掉。从整条曲线的分布特征看,第一个 K 型部份表明了浮土覆盖层和第一个溶洞顶板的电性变化,第二个 K 型部分表明了第一个溶洞充填物和第二个溶洞顶板的电性变化; $\rho_s$  曲线尾支呈 H 型,则反映出第二个溶洞充填物和其底部灰岩的电性变化。虽然曲线的首支反映出了浮土覆盖层较厚的特点,但却没有反映出它和第一个溶洞顶板的电性差异,究其原因,为该点所处地势较高,潜水面相对较低,造成电性差异不明显所致。

图 4 中单支 K 曲线分别在  $AB/2=12\text{ m}$  和  $AB/2=32.5\text{ m}$  处存在明显的负异常,且具有梯度、幅值大,呈跳跃状的共同特点,表明该测点下有连续存在的溶洞。根据单支 K 曲线做出了解释结果,经钻孔验证,浮土覆盖层厚  $12.8\text{ m}$ ,第一个溶洞顶板厚  $2\text{ m}$ ,其充填物厚  $3.9\text{ m}$ (图 5)。数据于第二个溶洞,因工程不要

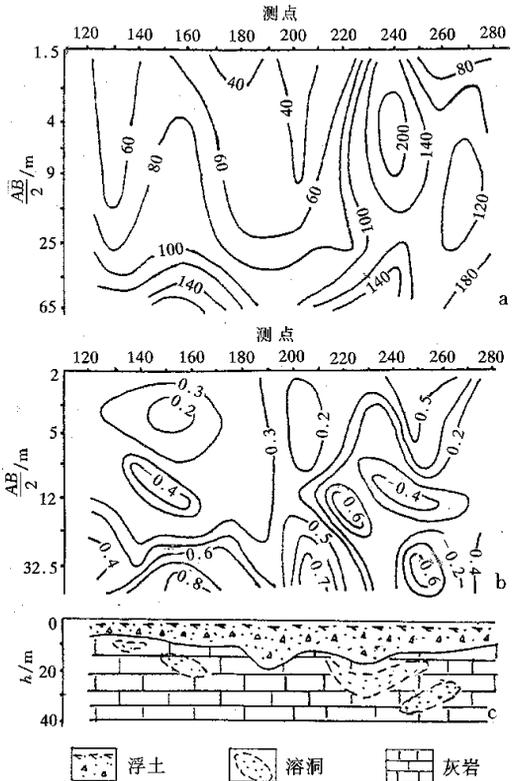


图 5 中心剖面 0 线的综合剖面  
a— $\rho_s$  等值线断面 b—K 等值线断面 c—地质断面

求对深部溶洞进行验证而未被证实。

图 5a 显示的  $\rho_s$  等值线的分布规律仅能大致反映出浅部浮土覆盖层沿剖面的电性变化, 而未能把溶洞所在部位的局部高、低阻  $\rho_s$  异常体现出来, 这就是常规电测深解释手段很难直接确定溶洞的空间位置的原因之一。

图 5b 为该剖面的  $K$  等值线断面, 图中分布有 4 个负异常, 但异常范围都不大。其中 3 个分布在剖面的中部, 即 135/0~165/0 和 210/0~250/0 点间, 表明这些部位有溶洞分布, 并已被钻孔证实。而 240/0~270/0 点间剖面底部的  $K$  值负异常, 应是埋深和规模都较大的溶洞的反映, 只不过超出钻孔规定钻进深度而未能得到证实。显然, 从整个图来看,  $K$  等值线的分布规律无疑突出了溶洞引起的局部异常。对那些由浮土覆盖层电性变化引起的  $K$  值负异常, 由于其梯度和幅值都小, 在勾绘等值线时这种低背景值反映不出来, 因而在解释时也不会造成错误的判断。

图 5c 为该剖面的地质断面, 除 260 点下较深处的溶洞为推断的外, 其余均被钻孔所证实。不难看出, 客观存在的溶洞与  $K$  值负异常的形态相吻合。如果仅用  $\rho_s$  等值线断面图来圈定溶洞的存在部位, 则仅能圈定出高阻和低阻异常这 2 种态势, 而溶洞形成的低阻异常则无法从中明显地独立出来。反射系数  $K$  法却能把  $\rho_s$  的局部弱小异常加以提取和放大, 使得溶洞的分布范围在  $K$  等值线断面图上直接表现出来, 并有很好的形态相似性。

### 2 $\rho_s$ 曲线的解释精度

解释电测深  $\rho_s$  曲线的主要目的是得到各电性层的埋深、厚度和电阻率值。对于以探测地下溶洞为目的的电测深工作, 解释结果的正确与否, 直接影响到公路建设的质量。实际上, 需要进行溶洞探测的路段, 通常都是岩溶发育地段, 溶洞多而且埋深、规模都不会太大, 因而观测到的电测深  $\rho_s$  曲线多呈不规则形态, 加上不需要很大的探测深度,  $\rho_s$  曲线大多很短, 常规解释方法很难有满意结果。而单支  $K$  曲线解释是对  $\rho_s$  曲线进行 1 次微分, 无需各电性层的参数, 方法简便, 人为误差小, 既提高了解释精度又避免了常规解释方法的多解性, 还可以节约大量的钻探工作量, 扩大钻探的地质效果。表 1 中  $\rho_s$  曲线的反射系数  $K$  法解释结果与钻孔揭露结果比较吻合, 相对误差不大。

表 1 单支  $K$  曲线解释的界面埋深与钻探结果对比

钻孔号	测深点号	$h_1/m$			$H_1/m$			$H_2/m$		
		钻探揭露	解释结果	相对误差	钻探揭露	解释结果	相对误差	钻探揭露	解释结果	相对误差
K34	200/0	12.8	13.8	-7.5						
K57	280/0	9.0	10.0	-10.5						
ZK1	135/0	6.5	6.4	6.7	9.8	9.2	6.3	14.0	14.2	-1.4
ZK16	230/0	14.5	12.9	8.3	16.0	16.5	-3.1	31.0	30.0	3.3
K13	150/0	9.1	9.2	-1.1	11.4	11.3	0.9	14.3	12.5	13.4
K37	250/0	12.8	10.5	19.6	14.8	14.5	2.0	18.7	19.0	1.6
K48	240/0	15.0	14.5	3.4	17.5	18.0	-2.8	21.7	23.0	-5.8
K50	160/0	12.8	10.4	20.7	13.2	13.7	-3.7	15.5	17.0	-9.2

### 3 结论

1. 岩溶探测中, 一般来说, 溶洞顶板不可能形成非常明显的  $\rho_s$  高阻异常, 大多数溶洞、溶洞顶板、溶洞充填物所形成的  $\rho_s$  异常也就不可能十分明显地从观测到的资料中体现出来。由

浮土覆盖层与溶洞顶板和溶洞充填物、溶洞充填物与溶洞底板构成的电性界面 ,对电流场的反射量  $K$  值却只能在  $+1 \sim -1$  之间变化 ,界面两侧介质电性差异越大 , $K$  值的变化就越灵敏 ,梯度也越大 ,这就是反射系数  $K$  法的高分辨率和优于常规解释方法的实质。

2. 这种灰岩地区公路路基的勘测 ,地面通常较平坦 ,地下介质呈水平层状分布 ,因而  $\rho_s$  曲线受其它干扰导致畸变的因素少 ,有利于发挥反射系数  $K$  法解释  $\rho_s$  曲线的优势。无疑 ,在岩溶或洞穴探测中 ,电阻率测深法仍然是一种实用的工程物探方法 ,在获取准确的  $\rho_s$  资料的同时 ,采用反射系数  $K$  法对其进行解释 ,可以较准确地确定溶洞的空间位置 ,收到较好的效果。

#### 参考文献 :

- [ 1 ] 陈仲候 ,王兴泰 ,杜世汉 . 工程与环境物探教程 [ M ] . 北京 :地质出版社 ,1993  
 [ 2 ] 龙凡 . 电反射系数  $K$  法在赤峰西部水文地质勘察中的应用效果 [ J ] . 物探与化探 ,1988 ( 2 )

## THE APPLICATION OF REFLECTION COEFFICIENT K METHOD TO THE KARST DETECTION

Chen Shaoqiu ,Xiao Zhiqiang

( Central South Polytechnic University ,Changsha 410083 )

**Abstract** :Karst is the main factor responsible for the collapse of strata. The application of reflection coefficient  $K$  method to the interpretation of electric sounding  $\rho_s$  curve can make prominent anomalies caused by karst and obviously reflect the existence of underground karst.

**Key words** :resistivity sounding ;reflection coefficient  $K$  method ;karst

第一作者简介 :陈绍求 ( 1944 - ) ,男 ,湖南邵东人。1970 年毕业于中南矿冶学院地质物探专业 ,现任中南工业大学地质系副教授 ,主要从事电法勘探教学和科研工作。发表论文 25 篇。