高密度电阻率法在堤坝隐患探测中的应用

高亚成，冷元宝

（1.河海大学地质及岩土工程系，江苏 南京　210098；2.黄河水利委员会物探研究所，河南 郑州　450003）

摘要：简要介绍了高密度电阻率法探测原理和工作特点.应用该方法在堤坝上进行了探测试验，获得了堤坝隐患部位的电阻率二维成像图；通过对电阻率二维成像图异常形态、高低阻等特征分析来判别隐患的性质、范围大小和埋深，结果表明，与查证结果相吻合.

关键词：高密度电阻率法；隐患探测；阵列勘探；电阻率异常

中图分类号：P631.3+22　　文献标识码：B　　文章编号：1006-7647(2005)S1-0110-02

目前我国大部分土质堤坝在运行过程中均存在由于施工、应力变化以及不可抗拒的自然因素而可能引起的诸如管涌、裂缝、局部疏松、软弱夹层等安全隐患，需要及时查清和采取工程措施，防止溃堤等地质灾害的发生.对于堤坝隐患探测有多种物探方法，其中高密度电阻率法就是一种新的电探方法[1]，它根据常规电法原理，采用专用仪器设备，用来观测堤坝的电性差异，达到查清隐患的探测目的.高密度电阻率法由常规电阻率法的点探测变成剖面纵横二维勘探，因此具有一定的电阻率的二维成像功能[2,3].根据笔者应用高密度电阻率法在堤坝上的探测试验效果，高密度电阻率法探测堤坝隐患的新技术具有信息丰富、准确、直观的优势，是一种很有前途的方法[4].

1　高密度电阻率法探测原理和特点

1.1　高密度电阻率法探测原理

高密度电阻率法探测隐患以岩土导电性差异为物质基础，通过向堤坝施加稳定的人工电场然后利用测量仪器系统观测、记录电场分布情况，研究电场的分布规律（见图 1）.在理想条件下堤坝可视为均质体，电场分布均匀，其电阻率各向变化不大.当堤坝存在隐患时，均质体遭到破坏，隐患体部位与周围土体产生电性差异，致使电场发生奇变，在隐患部位引起电阻率异常.根据观测到的视电阻率异常的形态和高低阻特征，结合地质情况以及水文、水位资料来综合判别堤坝隐患的性质、范围和埋深.

1.2　高密度电阻率法探测的特点

高密度电阻率法与常规电阻率法不同的是方法技术和探测点密度.高密度电阻率法采用了一种阵列勘探方法，改变了传统的直流电法勘探的常规工作模式，野外测量时只需将全部电极（几十至上百根）置于探测剖面各测点上，然后利用程控电极转换开关和微机控制电测仪就可以进行相邻电极间的不断组合交换，实现数据的快速自动采集、存贮，完成探测剖面的二维地电断面的勘探全过程（见图 1）.高密度电阻率法采用电极阵列勘探时，电极距的装置形式仍然采用常规电阻率法电极距装置形式，有单边三极、施伦贝尔、温纳、偶极、微分等装置以及以上装置的复式组合，按一定方式组合构成一种统一的测量系统.测量电极距的选择取决于被探测对象的规模和埋藏深度，基本原则是在保证最大电极距能够探测到主要对象的前提下还要考虑被探测对象周围介质背景也能在二维成像图中得到充分反映.电极装置排列方式决定剖面断面图的形状，对于温纳、偶极、微分等装置，由于一条探测剖面中测点总数固定不变，当极距扩大时，反映不同勘探深度的剖面测点将依次减少，整条探测剖面测量结束后得到一种倒三角形的断面图.对于单边三极、施伦贝尔装

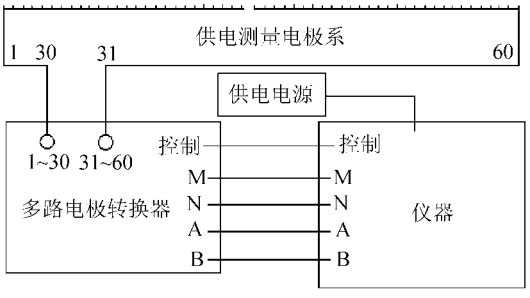


图 1　高密度电阻率法工作系统示意图

作者简介：高亚成（1953—），男，江苏常州人，工程师，从事工程检测工作.

置,前者相当于常规三极测深,后者相当于常规对称四极测深,整条探测剖面测量结束后得到一种矩形断面图件展示形式.

2 高密度电阻率法应用实例分析

2.1 花园口穿堤涵管探测试验

郑州市自来水厂在黄河大堤花园口段有一穿堤涵管,直径约 1 m,埋深 10 m.高密度电阻率探测采用施伦贝尔温纳装置,2 m 点距,64 根电极,电极隔离系数 1 ~ 21.剖面实测视电阻率 ρ_s 断面见图 2,从图中可以看出,穿堤涵管引起明显的呈近等轴圆的视电阻率高阻异常.

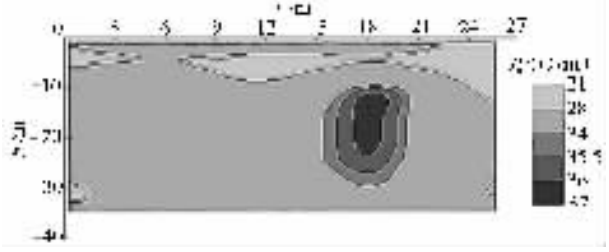


图 2 花园口穿堤涵管剖面实测视电阻率断面

2.2 空洞和疏松层探测

在郑州市武陟沁河老左堤上,采用水平钻孔(垂直大堤走向)埋设一外直径为 400 mm 的素水泥管,堤顶向下垂直深度 5 m.高密度电阻率探测试验采用温纳装置,点距 1 m,64 根电极,电极隔离系数 1 ~ 20.剖面实测视电阻率断面见图 3,图中可见在区域电阻率背景中叠加 3 个电阻率高阻异常体,中部一个视电阻率 92.5 Ω·m 等值引线封闭的近等轴状的高阻异常为埋设的素水泥管引起,左右高阻异常体推断为局部松散体引起,后经钻孔证实.

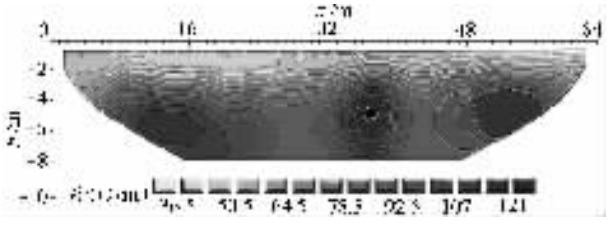


图 3 武陟沁河空洞试验剖面实测视电阻率断面

2.3 裂缝隐患探测试验

郑州市黄河大堤高密度电阻率法普查探测中在某一堤段发现了裂缝隐患.高密度电阻率探测采用单边三极装置,点距 1 m,64 根电极,电极隔离系数 1 ~ 20.从剖面实测视电阻率断面(图 4)中可以看到,中部见有一条明显的电阻率 88 Ω·m 等值线封闭的长条状高阻体异常,在其他部位还伴有多条次生高阻体异常.后经证实,该堤段除与明显长条状高阻体异常所对应的一条离顶部埋深 1.8 m 近直立状裂缝以外,其他部位裂隙非常发育,属危堤,极需工程处理.

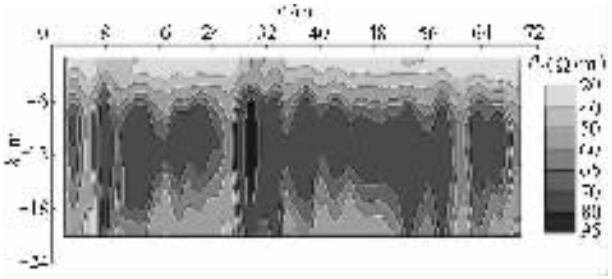


图 4 黄河堤防裂缝试验剖面实测视电阻率断面

2.4 软弱体探测试验

黄河九堡老口门段,堤身为 1843 年决口后人工填筑而成,根据有关资料和钻孔揭露,堤身自上而下主要分三层,第一层堤身为人工修筑填土,厚度 7 ~ 13 m;第二层为老口门人工修筑填土,厚度 3 ~ 35 m,填土中含有秸杆等杂物;第三层为大堤基底,以中砂层为主,局部夹有薄层黏土.

高密度电阻率法探测采用单边三极装置连续滚动,点距 2 m,电极隔离系数 1 ~ 48.剖面实测视电阻率断面见图 5,图中起点 0 m 对应(47 + 700)桩,419 m 对应 99 号坝,447 m 对应 100 号坝,681.5 m 对应 106 号坝.视电阻率 6 ~ 20 Ω·m 之间的低阻异常正对于黄河九堡老口门的口门内,视电阻率低阻异常范围基本上与钻探控制的老口门决口后修筑时人工第二层填土中含有秸杆等杂物的软弱松散的土体范围相符.

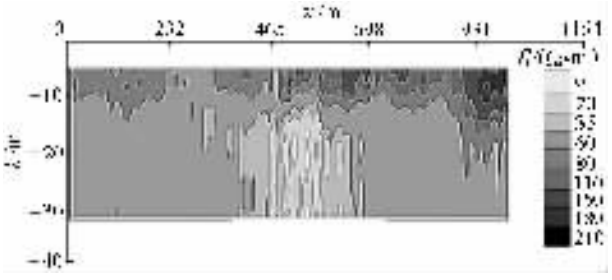


图 5 黄河九堡老口门软弱体试验剖面实测视电阻率断面

3 结 论

a. 由高密度电阻率法获得的探测剖面视电阻率断面图可知,无论是高阻体还是低阻体都有良好的视电阻率异常显示,对异常的解释推断结果与实际一致.

b. 高密度电阻率法对地电结构具有一定的 CT 成像能力,获得的剖面实测视电阻率断面图与钻孔控制结果对比精度相近,应用高密度电阻率法在探测寻找堤坝管涌、裂缝、局部疏松、软弱层等隐患方面具有工程意义.

c. 高密度电阻率法具有测点密度大,一次可完成探测剖面的二维勘探过程,观测数据可靠,反映异常明显,获得地质信息丰富等优点,(下转第 128 页)

多，沉降急剧增加．认为土体已破坏，停止试验．

2.4 数据整理

静力载荷试验共设 6 个试点，对 $P \sim S$ 和 $S \sim t$ 的原始记录用平均值法（实质为修正后的沉降值与真值的离差平方积为最小）进行修正．修正公式[6]为

$$S' = S_0 + CP \tag{1}$$

$$C = \frac{N\sum P_i S_i - \sum P_i \sum S_i}{N\sum P_i^2 - \left(\sum P_i\right)^2} \tag{2}$$

$$S_0 = \frac{\sum S_i \sum P_i^2 - \sum P_i \sum S_i}{N\sum P_i^2 - \left(\sum P_i\right)^2} \tag{3}$$

式中：S' 为修正后的沉降值，mm；S_0 为直线方程在沉降 S 轴上的截距，mm；C 为直线方程的斜率，mm/N；P 为承压板单位面积上所受的压力，N；P_i 为荷载级的单位压力，N；S_i 为相应于 P_i 的沉降观测值，mm；N 为荷载级数．

界限压力值采用 2 倍沉降增量法确定，即当某级压力下的沉降增量 ΔS_{i+1} 大于或等于前级压力下沉降增量 ΔS_i 的 2 倍时，则取该前级压力为比例界限压力．采用破坏荷载的前一级荷载作为极限荷载 P_u，见表 5．

表 5 承载力汇总

试坑号	比例界限承载力 P_{cr}/(10^{-3}MPa)	极限承载力 P_u/(10^{-3}MPa)	试坑号	比例界限承载力 P_{cr}/(10^{-3}MPa)	极限承载力 P_u/(10^{-3}MPa)
1	556	610	4	304	348
2	309	338	5	460	465
3	273	312	6	304	340

2.5 变形模量

变形模量可根据实验数据由下式得出：

$$E_0 = (1 - \mu^2)\frac{P}{sd} \tag{4}$$

式中：E_0 为地基土的变形模量，MPa；μ 为地基土的泊松比，取 0.42；P 为承压板上的总荷载，N，取各比例界限对应值；S 为与荷载相应的沉降量，mm；d 为承压板直径，为方形板时取等代直径 $d = 798$ mm．

由以上公式计算出各试点的变形模量见表 6．土的变形模量平均值为 9.18 MPa．

表 6 各试点的变形模量

试坑号	P/(10^{-3}N)	S/mm	E_0/MPa	试坑号	P/(10^{-3}N)	S/mm	E_0/MPa
1	278	21	13.66	4	152	22	7.12
2	155	21	7.57	5	230	37	6.42
3	136	10	14.06	6	152	25	6.27

3 结 语

虽然膨胀土的地基承载力较高，对于一般建筑物而言地基承载力不是主要矛盾，但由于其裂隙发育且外界条件变化如雨季与旱季以及气温、季风的变化对其承载力大小都有影响，特别是随含水量的增加，承载力急剧下降[7]．因此，准确合理地评价膨胀土的地基承载力有着极其重要的意义，尤其是对于荷重大的建筑物．考虑将来塔基可能出现局部积水、膨胀土的含水量增加、承载力降低等原因，建议：设计塔基地基土的承载力取 0.28 MPa；地基土的变形模量可按 9.18 MPa 取用．

参考文献：

[1] 姜新佩．开挖回填式基础抗拔承载力的理论研究[J]．水利水电技术，2003，34(11)：40-42．

[2] 宿辉．膨胀土地基抗拔试验研究[J]．水利水电技术，2002，33(5)：47-49．

[3] 河北工程学院，河北省电力勘测设计研究院．邯石 500 kV 输电线路工程膨胀土地基浸水载荷试验研究报告[R]．1999．

[4] 刘特洪．工程建设中的膨胀土问题[M]．北京：中国建筑工业出版社，1997．

[5] SDGJ62—84，送电线路基础设计技术规定[S]．

[6] SDGJ112—87，膨胀土地区建筑技术规范[S]．

[7] 吴礼年．合肥地区膨胀土地基承载力的分析探讨[J]．岩土工程技术，2001(1)：31-33．

（收稿日期：2005-03-23 编辑：马敏峰）

（上接第 111 页）

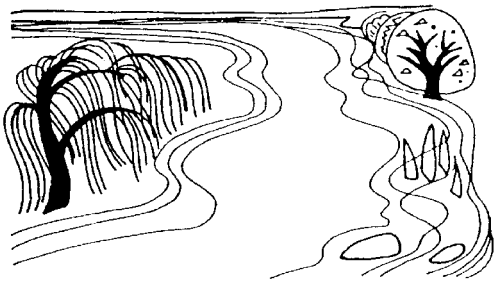
其成果有一定的实用价值，可推广应用．

参考文献：

[1] 王兴泰．工程与环境物探新方法新技术[M]．北京：地质出版社，1996：108-132．

[2] 汤洪志．高密度电阻率法二维成像技术及其在工程勘查中的应用[J]．工程勘察，2003(5)：62-64．

[3] 赵敏敏．高分辨率电阻率法 CT 探测技术在病险水库勘察中的应用[J]．中国水利，2004(1)：54-58．

[4] 郭建强．地质灾害勘查地球物理技术手册[M]．北京：地质出版社，2003：91-131．

（收稿日期：2005-05-19 编辑：熊水斌）