

堤坝隐患及渗漏 无损检测技术与仪器

房纯纲 姚成林 贾永梅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家“十一五”科技支撑项目：水库大坝安全保障关键技术研究（2006BAC14B06）资助

堤坝隐患及渗漏 无损检测技术与仪器

房纯纲 姚成林 贾永梅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍无损检测法检测堤防和大坝内部渗漏隐患、混凝土坝裂缝及缺陷；同时介绍了作者首创的采用压实计法控制土石坝碾压质量和电化学法监测碾压混凝土初凝时间；具体介绍了各种无损检测法检测堤坝内部隐患的机理、有关仪器的工作原理、仪器构成及使用方法；并且详细介绍了无损检测法在大坝、堤防、城市地下排灌系统和景观湖泊渗漏检测等现场应用经验。

本书适合水利水电工程技术人员和大坝安全管理人员参考，也可供大学和科学研究单位的研究生作为参考资料。

图书在版编目 (C I P) 数据

堤坝隐患及渗漏无损检测技术与仪器 / 房纯纲, 姚成林, 贾永梅著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 7

ISBN 978-7-5084-7668-1

I. ①堤… II. ①房… ②姚… ③贾… III. ①大坝—无损检验②大坝—渗流控制—无损检验 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第126530号

书 名	堤坝隐患及渗漏无损检测技术与仪器
作 者	房纯纲 姚成林 贾永梅 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 15.25印张 362千字
版 次	2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

Preface

我国有大坝 8.6 万多座，其中大部分是 20 世纪 50~60 年代修建的中小型土坝，这些大坝病险严重，许多成为三类坝。随着时间流逝，一些大型坝也出现老化和安全问题。从 2007 年开始，在 3 年时间里，国家投入巨资对 6240 座病险坝进行了除险加固，消除了病害，保证了大坝安全运行。

对于病险坝内部存在的裂缝、松散区、不均匀区、渗漏通道等各种隐患，不可能由人工查看发现，只有采用专用仪器设备才能探测清楚，这些专用仪器设备为除险加固工程设计提供了可靠依据。

我国堤防多数建在冲积平原上，地层一般为二元结构，表面覆盖层较薄，下层为较厚的饱和粉细砂及砂砾石层，堤基极易产生渗漏，严重时出现管涌险情。及时探明险情，确定渗漏位置，改进人工“拉网式”查管涌的落后方法，对于堤防的除险加固将起到十分重要的作用。

近年来，特别是在 1998 年洪水后，国内外有关部门及一些单位对于堤防隐患探测技术给予高度重视，积极开展了有关技术研究及专用仪器研制，在许多大坝和堤防上均有一些成功应用的例子。

中国水利水电科学研究院在国家支持下引进了一些先进的大坝隐患检测仪器，其中包括：瞬变电磁仪、探地雷达、可控源音频大地电磁仪、便携式红外线成像渗漏检测仪、地层地温仪、水下地形仪、复电阻率检测仪、多频电磁剖面仪、高密度电法仪和遥控水下探测器等，这些仪器已经成功地应用于工程现场。

作者从国家“七五”科技攻关项目开始，就从事堤坝质量和安全检测（监测）技术与仪器研究开发工作，研制成功瞬变电磁仪、压实计、电化学法监测碾压混凝土初凝时间及相关仪器、表面波裂缝检测仪、地层地温仪、大坝安全监测系统 etc 仪器设备。除了进行水利水电量测技术和仪器研究以外，作者还进行了无损检测技术检测堤防和大坝内部渗漏、缺陷研究和现场应用，取得了一些经验，现将有关研究成果和现场应用经验收集整理成此书，供同行们进行经验交流。

本书在第1章里介绍堤坝渗漏隐患的特点,从了解这些特点出发,选择适当的技术和仪器检测、定位存在的隐患。目前,堤坝渗漏隐患所用的仪器大多属于电磁法和电法仪器,其工作机理是利用隐患部位的电导率与正常部位电导率比较,如发现异常值超过一定范围,表明该处存在隐患。因此,需要了解堤坝的土石填料在正常情况下的电导率值。第2章介绍了土和岩石的电导率的有关资料,主要内容节选自J. D. McNEILL所著《ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SOIL AND ROCK》(Technical Notes, GEONICS LIMITED)一文及有关文献。采用物探方法获得的只是堤坝填料的一种或几种物理参数,不能直接获得堤坝填料的土工参数。为了能直接采用物探结果对堤坝的安全性进行评估,作者进行了堤坝填料物理参数(电导率)与土性参数的相关关系研究,以提高物探结果用于堤坝的安全性评估的准确性,关于这方面内容在第3章介绍。第4章介绍目前国内外已经采用过的20几种大坝渗漏和隐患的检测技术与仪器,其中,瞬变电磁仪、表面波裂缝检测仪、地层地温仪是作者与研制小组研制成功的,并应用于大坝和堤防渗漏、管涌、缺陷检测。第5章介绍近年来作者采用无损检测技术进行堤坝现场渗漏隐患检测实例,检测的内容包括坝体渗漏、心墙缺陷、混凝土防渗心墙施工质量、绕坝渗流、库区渗漏、城市地下排灌系统定位、城市景观湖泊渗漏、煤矿采空区、隧洞衬砌质量等。第6章碾压混凝土现场快速质量检测技术,介绍了由作者率先研究成功的电动势法监测碾压混凝土初凝时间的原理、室内试验、仪器研制和工程现场应用情况。20世纪80年代中期,国内开展了两种新坝型的研究推广工作,即混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝,并且普遍采用振动碾作为碾压工具。由于堆石坝的填料直径很大,有时可能达到80~100cm,甚至更大,采用传统的挖坑取样压实质量检测技术在施工过程中遇到了很多困难,已经不能满足工程需要。“七五”国家科技攻关项目中列入了压实计控制堆石坝碾压质量的研究项目,作者创造性地研制成功压实计,只要将压实计安装在振动碾上,就可以实时控制压实质量,并作打印记录。该项目已经推广到几十个工程项目中成功应用,并获得良好效果。该研究成果获得1990年国家科技进步二等奖。有关压实计的内容在第7章介绍。

在本书介绍的内容中,葛怀光、鲁英、刘树棠参加了瞬变电磁仪的研制与现场应用研究工作;张震夏、王炳娟领导并参加了表面波裂缝检测仪的研制及现场应用研究工作;李平、赵文波参加了表面波裂缝检测仪的研制及现场应用研究工作;邓中俊、王会宾参加了大坝安全的无损检测工作;臧瑾光和葛怀光参加了“九五”国家科技攻关项目电动势法监测碾压混凝土初凝时

间；吴昌瑜、周晓文参加了堤坝电导率与土性参数的相关关系研究工作中的堤坝填筑材料土性参数测试工作；葛怀光、姜福田、周晓光和程坚参加压实计研制与试验工作。在此，一并感谢！

随着坝龄增长、病险库增加，大坝安全检测技术研究与应用的重要性必将凸显出来。作者是第一批将地球物理勘探技术引进水利水电工程安全检测领域的科研工作者，并成功研制了一些专用仪器设备。从事这一技术领域的科研人员人数虽少，工作的意义却很重大。作者相信，会有越来越多的科研工作者和工程技术人员从事这项工作，将这一全新技术领域进一步发展，使之更加成熟，更好地服务于水利水电工程管理及其他科学技术领域。

为了更清楚地表示第5章中某些检测结果，在附件中附印了18幅彩色图，这些图的编号与正文相同。第5章正文中图号加“*”的，表示其彩色图在附件中。

房纯纲

2010年3月11日

目 录

Contents

前言

第 1 章 堤坝渗漏隐患的特点	1
1.1 概述	1
1.2 我国堤防构造的特点	2
1.3 堤防隐患（缺陷）分类	2
1.4 堤防出险的表现形式	2
1.5 堤防隐患的特点	3
1.6 对堤防隐患探测技术的要求	3
1.7 可用于隐患探测的堤防物理参数	4
第 2 章 土和岩石的电导率	6
2.1 概述	6
2.2 电导率/电阻率	7
2.3 影响地层电导率的因素	8
2.4 土壤和岩石的电导率	13
2.5 土壤和岩石电阻率现场测量结果	20
2.6 小结	31
第 3 章 土的电导率与土工参数的相关关系	33
3.1 概述	33
3.2 测试方法	33
3.3 堤防电导率与土性参数的相关关系	34
3.4 小结	37
第 4 章 检测技术与仪器	39
4.1 瞬变电磁堤坝渗漏检测仪（TEM）	39
4.2 频率域电磁法（FEM）	51
4.3 探地雷达（GPR）	55
4.4 可控源音频大地电磁法（CSAMT）	57
4.5 表面波裂缝检测仪	58

4.6	便携式红外成像渗漏检测仪	63
4.7	地层地温仪	65
4.8	示踪法 (Tracing)	68
4.9	混凝土坝声波层析检测	69
4.10	光纤测温堤坝渗漏监测系统	70
4.11	电法	73
4.12	自然电场法	74
4.13	充电法	75
4.14	高密度电法	75
4.15	编码式供电电源电场法	77
4.16	水下地形仪	78
4.17	钻孔示踪技术	79
4.18	复电阻率检测仪	79
4.19	多频电磁剖面仪	80
4.20	核磁共振找水仪	80
4.21	地震多波型数据采集仪	84
4.22	小流速仪	85
4.23	微磁力仪	85
4.24	声发射监测	85
4.25	水量平衡法	86
4.26	直升机载遥感成像系统	86
4.27	几种电法仪器的比较	87
4.28	如何正确选用堤坝隐患探测仪器	88
第5章	现场检测实例	92
5.1	土坝防渗心墙质量和绕坝渗流检测——综合物探法	92
5.2	大坝基础渗漏检测——综合物探法	104
5.3	堆石围堰高喷防渗墙渗漏检测——综合物探法	116
5.4	震损水库大坝内部受损情况检测——综合物探法	121
5.5	沙漠水库渗漏检测——综合物探法、温度法	131
5.6	土坝心墙渗漏检测——频率域电磁法	143
5.7	绕坝渗流检测——瞬变电磁法、频率域电磁法	146
5.8	大坝除险加固效果质量检测——综合物探法	149
5.9	水库除险加固工程高喷防渗墙检测——综合物探法	156
5.10	土坝渗漏探测——地层地温测量	159
5.11	混凝土坝裂缝检测——稳态表面波法	160
5.12	大坝基础防渗墙浇筑质量检测——超声波法	162
5.13	隧洞衬砌质量检测——探地雷达法	165

5.14	堤防渗漏隐患及管涌通道探测——瞬变电磁法、频率域电磁法	170
5.15	古代城市雨洪利用地下灌排系统探测——综合物探法	174
5.16	城市湖泊渗漏检测——综合物探法	179
5.17	煤矿地下采空区探测——可控源音频大地电磁法	188
第6章	碾压混凝土现场快速质量检测技术	194
6.1	概论	194
6.2	电动势法测量碾压混凝土层面初凝时间	195
6.3	电阻变化率法测量碾压混凝土层面初凝时间	202
6.4	电动势法和电阻变化率法施工现场应用研究	204
6.5	结论	209
第7章	压实计控制堆石坝碾压质量	210
7.1	概述	210
7.2	YS—1型压实计工作原理与性能测试	211
7.3	堆石坝筑坝现场应用试验	216
7.4	碾压混凝土碾压试验	221
7.5	结论	223
参考文献		224
附件		227

第 1 章 堤坝渗漏隐患的特点

1.1 概述

我国大江大河大湖的堤防多数建在冲积平原上，地层一般为二元结构，表面覆盖层较薄，下层为较厚的饱和粉细砂及砂砾石层，堤基极易产生渗漏，严重时出现管涌险情。此外，堤防经历次填筑而成，填土不匀、堤身不密实且存在生物洞穴及其他隐患，每到汛期，遇高洪水位，堤脚堤身容易产生管涌、散浸等渗漏险情。及时探明险情，确定渗漏位置，改进人工“拉网式”查管涌的落后方法，对于堤防的除险加固将起到十分重要的作用。

洪水退后，加固沿江堤防、防止以后洪水再度肆虐是全国和沿江地区的重要任务。在除险加固以前，首先应查明险工险段。一些水毁工程，经由人工查看可以发现；而大量隐藏在堤身和堤基内的隐患，人工巡查不可能发现，只有采用专门研制的仪器设备，精心探测才能发现。查明隐患的位置，有针对性地对重点堤段采取加固除险措施，保证将有限的人力、物力和财力用在最需要的地方，对于提高防洪减灾效果，保证安全度汛是十分重要的。

大坝的安全运行与国民经济建设和保障人民生命财产的安全有着十分密切的关系。随着大坝的数量和运行时间的增加，病险坝的数量也不断增加。国际大坝委员会失事统计委员会（ICOLD AD HOC COMMITTEE ON STATISTICAL INTERPRETATION OF DAM FAILURE）对截至 1987 年 24 个国家的 142 座大坝失事原因进行统计分析，其中混凝土坝及其基础 16 件，土石坝及其基础 104 件，土石坝失事占总数的 73%，比例相当高。而渗漏是造成土石坝失事的主要原因之一。

我国有大坝 8.6 万多座，其中大部分是 20 世纪 50~60 年代修建的中小型土坝。由于当时施工条件的限制和建成时间久远，这些大坝病险严重，许多成为三类坝。从 2007 年开始，3 年时间里，国家投入巨资对 6240 座病险坝进行除险加固，消除病害，保证大坝安全运行。

对于病险坝内部存在的裂缝、松散区、不均匀区、渗漏通道等各种隐患，只有采用专用仪器设备才能探测清楚，为除险加固工程设计提供可靠依据。然而，总的来说，目前国内外尚无探测堤防渗漏隐患的成熟技术和行之有效的仪器。近年来，特别是在 1998 年洪水后，国内有关部门及一些单位对于堤防隐患探测技术给予高度重视，积极开展了有关技术研究及专用仪器研制，探测方法主要有瞬变电磁法、频率域电磁法、高密度电法、表面波法、浅层反射地震法、放射性同位素示踪法等。这些方法在长江、黄河、北江、永定河和洞庭湖、鄱阳湖等堤防上均有一些成功应用的例子。

为叙述方便起见，本章以堤防隐患探测为例进行介绍，其中许多内容也适用于土坝。

1.2 我国堤防构造的特点

我国堤防总长度达 26 万 km，仅长江干堤长度已达 3600km。这样长的堤防，无论在洪水期防洪抢险、枯水期除险加固方面，还是在渗漏和隐患探测方面，均存在相当大的困难，在世界上也是十分罕见的。我国堤防修筑年代久远，有的堤防从宋代起已经开始修筑，至今已有 800 多年历史。堤身经历次填筑，土料就地取材，填土不匀，结构复杂，常有树根、秫秸等物埋入堤内，天长日久，腐烂成隐患。我国堤防绝大多数由人工填筑，有的经人工夯实，有的甚至未经夯实，堤身密实度低，普遍存在缺陷，病害种类繁多。此外，有些堤防存在白蚁、蛇等生物洞穴，严重破坏了堤坝结构，形成渗漏隐患。

我国大多数堤防在修筑前未作基础处理，基础薄弱。堤防基础一般为二元结构，即上层为几米到十几米厚不透水的覆盖层；下层为十几米到几十米厚透水的砂砾石层和细砂层。堤防建在覆盖层上，两者成为一体，像是一座挡水墙浮在透水的砂砾石上。

1.3 堤防隐患（缺陷）分类

由于堤防修筑质量差、堤身高度不够、经多年水力冲刷带走细颗粒土、基础塌陷造成不均匀沉降和生物侵害等原因，致使存在多种缺陷，或称为隐患。有的隐患存在于堤身内，也有的存在于覆盖层和浅层基础内。当这些隐患发展严重时，遇高洪水位，堤防发生渗漏或漫顶灾害。通常归纳起来，堤防的隐患有以下 3 类。

(1) 洞：蚁穴、鼠洞、烂树根、塌陷产生的空洞以及浅层基础内细颗粒土流失形成的孔洞（管涌隐患）等。

(2) 缝：纵缝、横缝、斜缝、隐蔽缝、开口缝等。

(3) 松：密实度低（孔隙率大）或填料含粗颗粒土过多等。

1.4 堤防出险的表现形式

我国堤坝隐患种类多种多样，形态各异。由此，在洪水期形成的险情也有多种类型。在此列举常见的几种形式。

(1) 漫顶：当洪水位高于堤顶时，发生漫顶。为防止漫顶发生，应修筑子堤挡水。

(2) 管涌：常发生在堤脚和基础处，由于水流冲刷带走细颗粒土，留下砾石形成渗漏通道，或在堤内挖鱼塘、种水稻等破坏了覆盖层，使地下高压水上冒，形成管涌。管涌较少发生在堤身处，有时生物洞穴造成堤身管涌。

(3) 散浸：由于堤身为砂土，密实度小，渗透系数大，高洪水位时，堤身内浸润线抬高，水由堤内坡渗出，形成散浸。

(4) 滑坡：有基础的原因，也有堤身的原因。基础的细颗粒土被水冲走或黏土基础经水长期浸泡，强度减弱，承受不住堤身压力，产生滑坡。堤身内存在裂缝或经水长期浸

泡，内摩擦力降低，也可能出现滑坡。

(5) 崩岸：形成崩岸的原因复杂，因出险堤段不同而异，目前对崩岸原因有不同解释。洪水期，出现水下顶冲崩岸，有可能掏空堤基，十分危险。近年来，洪水退后，出现多处严重崩岸，河滩后退，严重威胁堤防安全。

(6) 裂缝：基础不均匀沉降、滑坡等原因使堤身产生裂缝。

(7) 塌陷：由于堤身存在大蚁穴等缺陷或基础沉降形成塌陷。

根据我国当前 88 例堤防险情的统计分析，各种险情的分布见表 1.1。

表 1.1 堤防出险的险情分布

险情类别	数量	出险原因
渗漏	29 (33%)	砂土抗渗强度低，在高水位时产生渗漏，形成管涌
裂缝滑坡	22 (25%)	砂土不均匀，密实性差，产生不均匀沉陷，堤坝砂土抗剪性能低
堤内漏洞（软弱层）	9 (10%)	堤坝内存在蚁穴、涵管，施工质量差，土块上堤没有打碎，碾压不实
坍塌崩岸	18 (20%)	堤岸根部淘刷，土密实性差，抗剪强度低，根石深度不够，根石坍塌
其他（漫溢、冲刷、涵洞破裂）	10 (11%)	

由表 1.1 可知，渗漏占出险险情最大比例。

1.5 堤防隐患的特点

为了有效地探测堤身和堤基内部缺陷，首先应该了解堤防隐患的特点。这样，才能有的放矢地研究探测方法，研制开发有效的探测仪器。堤防隐患的特点归纳如下。

(1) 我国堤防长，隐患分布范围广，深浅不知，位置不定，在堤防表面难以发现。

(2) 隐患种类多。堤身内可能存在 1.3 节所列多种形式缺陷。基础内细颗粒土被冲走，形成渗漏通道；黏土基础经水长期浸泡强度降低。

(3) 与堤身的体积大小和埋深比较，缺陷的体积小，增加探测难度。

(4) 缺陷种类和性质未知。

(5) 缺陷部位的物理特性与周围的正常部位相差无几。

(6) 缺陷部位的某些物理参数值小于周围正常土体的物理参数值（如电导率等），周围正常土体的物理特性掩盖了异常体，探测时，形成放射医学上所谓的“阴性扫描”。与异常部位特征强的“阳性扫描”或勘探对象性质与围岩不同的物探比较，堤防隐患探测的困难大很多。

1.6 对堤防隐患探测技术的要求

1.5 节所述堤防隐患的特点决定了探测工作的困难程度，对探测技术和探测仪器提出很高要求。

(1) 灵敏度高,能探测到微弱异常信号。

(2) 分辨率高,能探测出体积小、埋深大的目标。

(3) 速度快,由于堤防很长且体积大,往往一段堤防需要探测几个剖面,隐患普查的工作量很大,探测速度快是很重要的指标。

(4) 重量轻,便于移动。

(5) 操作简便,一般技术人员经短期培训能独立操作。

(6) 探测结果出图快,图像容易识别。

现有的堤防和大坝隐患探测仪器,大多借用地质勘探用物探仪器,不能满足堤防隐患探测需要。为了解决这一技术难题,很有必要针对各种形式堤防渗漏和隐患的特点研制新的专用仪器。

1.7 可用于隐患探测的堤防物理参数

1.7.1 可利用的物理参数

在研究堤防隐患探测技术和研制探测仪器以前,首先应当研究考察由于存在缺陷,堤防的哪些物理量发生变化,并可利用这些变化了的物理量探测出隐患之所在。

(1) 电和电磁:堤防存在缺陷和发生渗漏时,筑堤材料和/或基础的电导率(电阻率)发生较明显变化,采用电法和电磁法可探测出电导率异常。

(2) 声:堤防发生渗漏时,会产生水流声和水与土体摩擦声,可用声发射法检测渗漏通道定位。

(3) 光:指可见光形成的图像。

(4) 热:由于河水温度低于堤身、堤内坡和堤内地面、水田、鱼塘的温度,发生渗漏时,渗漏部位的温度低于正常部位的温度,采用直接测温 and 红外线成像技术可及时发现渗漏部位。

(5) 振动波:堤防存在缺陷或发生渗漏时,其弹性模量和密实度等参数发生变化,弹性波在病变部位传播时,波速、波形发生改变。表面波和浅层反射地震波均可利用。

(6) 水流:堤防存在渗漏通道时,利用放射性同位素示踪剂查找渗漏路径和渗漏入口,或者通过测量流场变化,探测渗漏入口。

(7) 磁:堤防存在孔洞缺陷时,局域磁力发生改变,利用磁力仪可测量这种变化。

(8) 重力:堤防存在较大缺陷时,密度减小,利用微重力仪可发现缺陷部位。

最后两项是国外专家提出的方法,国内尚未开展这方面工作。

1.7.2 电法、电磁法的特点

在物探界,电法和电磁法统称为“电法”,即是电法探测的简称。但是,这两类仪器在仪器结构和检测技术方面存在较大不同。在水利水电工程中,电法探测的物理基础是水工结构物中的异常体或缺陷与正常结构物具有不同的电学、磁学性质。利用电磁场(人工或天然的)空间和时间的分布规律,发现并定位异常体或缺陷的存在。

任何一种地质体,或强或弱地都具有几种电磁学性质:导电性、激电性、介电性、导

磁性。电法中，可以单独利用其中的一种性质，也可以同时或分别利用其中的两种或三种或全部电磁学性质，以便从多方面研究异常体。根据工程现场情况常采用几种不同的仪器和不同的测量方法，称为“综合物探法”。目前，地质物探实际应用的电法已达 20 余种，常用的几种方法有：瞬变电磁法、高密度电法、频率域电磁法、探地雷达和激发极化法等。

在大多数情况下，当堤坝存在隐患和发生渗漏时，在诸多可利用于隐患探测的物理参数中，电导率（电阻率）变化最明显，且易于探测。因而可以认为，在诸多物探方法中，电磁法和电法是探测堤防渗漏隐患比较有效和常用的方法，这也是截至目前堤坝隐患探测采用这两种方法最多的原因。这两种方法所探测的物理量均是堤坝的电导率（或电阻率），通过解读探测结果图中异常区的性质、位置、形状和大小，推断隐患是否存在、隐患的位置、深度及其性态。

已经被利用的电磁波频率范围及其对应的探测方法见表 1.2。

表 1.2 已被利用的电磁波频率范围及其对应的探测方法

频 率	直 流	$10^2\text{ Hz} \longrightarrow 10^3\text{ Hz} \longrightarrow 10^4\text{ Hz}$	$10^7\text{ Hz} \longrightarrow 10^8\text{ Hz}$
探测方法	高密度电法	瞬变（时间域）电磁法、 频率域电磁法、激发极化法	探地雷达

第2章 土和岩石的电导率

如前所述,在诸多探测堤坝渗漏隐患的物探方法中,用得最多的是电法和电磁法。为了提高解读电法和电磁法探测结果的准确性,应当首先掌握堤坝填土和基岩的电特性和电磁特性,具备对大地电阻率的深入了解和认识,并能正确分析影响大地电导率的各种因素,掌握现场出现的各种问题对探测结果的影响。加拿大 J. D. McNEILL 对此问题进行过深入研究,并收集总结了大量的技术资料。

2.1 概述

在 20 世纪初,德国地质学家 Conrad Schlumberger 于 1911~1914 年间,首先采用近地层地质填图技术。该技术将电流注入大地,并绘出所产生的电动势分布图。从那时起,大地电阻率测量已经利用于各种地质问题,其中包括确定岩石岩性及基岩深度、卵石及黏土沉积定位及填图、地下水含量及含盐量填图、确定地下水中的污染涡流、永冻区内高冰层含量填图、地热区定位和考古填图等。我国从 20 世纪 70 年代开始,已有研究单位将电阻率法应用于土坝隐患探测。80 年代起,已经开始研究将高密度电法和电磁法应用于土坝隐患探测。在 1998 年洪水以后,国内外专家研究用物探方法探测堤防渗漏隐患的热情空前高涨,特别是对于高密度电法和瞬变电磁法的研究。

在许多情况下,作为电法探测结果的电阻率填图能够提供确定的地质信息,然而,在一些情况下,由于“地质噪声”太高,结果难以解释。电阻率法勘探的局限性在于大地电阻率本身的真值是很少有特征的。作为这种模糊的结果,总体上查看一下电阻率沿横向随深度变化情况,以便勾画出感兴趣的地质特性。为了确定异常体的性质,需要完全查清背景的特征。而且,虽然常规电阻率技术对有特征的探测目标的深度是敏感的(由改变电极间距确定),但是,测量时测量电极之间电阻率的非均匀性远比特性随深度变化小,如果非均质体靠近测量电极,将产生大的测量误差和大噪声勘探剖面。由于这些原因,电阻率勘探应用于工程问题不像期望的那么普遍,特别是在北美洲。然而,在欧洲电阻率勘探已成功应用,并作为较常规手段。

人们既注意到电阻率测量解决地质问题的可能性,也注意到常规电阻率填图的一些缺点,这些因素导致国外开始开发利用电磁技术测量地层电导率仪器。电磁法仪器主要包括两类:频率域电磁法和时间域电磁法。

频率域电磁法仪器的原理和特点是,发射线圈所产生的正弦变化的磁场在地层产生感应电流,它们的幅值线性正比于地层电导率(反比于电阻率)。这些感应电流大小变化在周围产生二次磁场,二次磁场的变化在接收线圈内感应电流信号,感应电流信号的大小由

二次磁场强度确定。通过采用电磁技术，避免了测量电极接触大地，检测结果不受电极接地电阻误差的影响。使用频率域电磁法仪器可以完成大地真实电导率填图。现场检测速度决定于工作人员的步行速度或一个测站的工作时间。而且，采样值进行平均可以获得非常好的电导率分辨率。

时间域电磁法仪器的原理和特点是，放在地面上的发射线圈里的电流突然中断，在大地感应涡流，涡流从发射线圈扩散开，涡流的衰变产生二次磁场，二次磁场的大小由大地电导率决定。二次磁场的变化在接收线圈内感应电流信号，感应电流信号的大小由二次磁场强度与衰减速度确定。对接收线圈内的接收信号按一定的时间间隔进行采样，就可以获得不同深度地层的电导率信息。

为了提高对电法和电磁法探测结果解读的准确性，工作人员必须了解土壤的物理特性，具备对大地电阻率的深入了解和认识，并能正确分析影响大地电导率的各种因素，掌握现场出现的各种问题对探测结果的影响，例如：①何处砾石比细颗粒土料有较大电阻性；②哪些因素对地下水位探测结果产生影响；③如上周降雨量很大，会不会影响测量；④所测土壤类型的典型电阻率是多少；⑤当堤坝出现渗漏现象时，渗漏处的电阻率是如何变化的；⑥如何根据电阻率检测结果判断堤坝某处存在隐患，等等。

通过讨论在典型现场条件下影响土壤和岩石的电导率/电阻率的各种因素，本章试图提供一些现场检测资料来解答这些问题，以便提高工作人员解释勘探结果的准确性。本章讲述的内容是：①电导率和电阻率的定义；②叙述土壤和岩石有关物理性质；③物理性质与电导率的关系；④讨论在不同气候地区土壤的常规电阻率测量。

2.2 电导率/电阻率

物质的电阻率/电导率是使电流流过该物质困难和容易程度的计量。电阻率是物体的一种特性，与物体的尺寸无关。在 MKS（米、千克）单位制里，它的单位是 $\Omega \cdot m$ ，是边长为 1m 的立方体样品测量得到的电阻，在 CGS（厘米、克）单位制里，电阻率定义为跨过边长为 1cm 正方体的相对面的电阻，其单位为 $\Omega \cdot cm$ 。从定义关系可以看出，如给出电阻率单位为 $\Omega \cdot cm$ ，必须除以 100 才能得到单位是 $\Omega \cdot m$ 的电阻率。

与物体的电阻率相反的定义是电导率。在 MKS 单位制中，电导率的单位是 mho/m， $1\Omega \cdot m$ 电阻率表示 1mho/m 电导率， $100\Omega \cdot m$ 电阻率相当于 0.01mho/m 电导率等。电导率的另一种单位是西门子 (S/m)。为了避免在十进小数后紧跟着零，常常将电导率用 mS/m 表示：0.01S/m 电导率对应于 10mS/m 电导率，等等。这样做的有利方面是 1~1000 $\Omega \cdot m$ 电阻率范围可以用 1000~1mS/m 电导率范围覆盖，这样的数据容易处理。为统一使用单位，本书中所有电导率单位均使用 mS/m。

当使用交流电进行电阻率测量时，样品的电特性随频率改变。事实上，土壤和岩石是复杂物质，其中有很多机理影响着流过样品的电流大小。然而，对于具有电导率为 1~1000mS/m 范围内电导率较低（电阻率较高）的材料，控制电流大小的电特性与测量用信号频率高低相对无关，即用常规电阻率测量设备测量到的直流或低频电导率与采用低频电磁技术测量结果基本相同。

2.3 影响地层电导率的因素

大多数干燥的土和岩石是具有很高电阻率的电绝缘体。然而，在少数情况下，当导电物质在岩石中有足够大含量时，大大增加了岩石的视在电导率，如磁铁矿、镜赤铁矿、碳、石墨、黄铁矿、赤黄铁矿等。在本章讨论的土壤中假设这些物质不存在。

一般来说，土和岩石的电导率是通过水填充的孔穴和通道发生电解性形成的，属于离子导电。土和岩石的电导率取决于以下因素。

- (1) 孔隙率，孔穴的形状和大小、数量，相互连接的通道的形状和大小。
- (2) 水填充这些孔穴的程度，即含水量。
- (3) 所含水中溶解的电解质种类和浓度。
- (4) 温度和孔隙水的相态。
- (5) 胶体的数量和成分。

由于土或岩石的成分、构成和所含的水分在很大程度上决定了电导率，本节将详细讨论其物理和化学性质，以示其如何影响物质的电导率。

2.3.1 土的组成

土基本上由4种成分组成：①矿物；②有机物；③水；④气体。

图2.1以图表形式绘出一种非饱和壤土内这些成分的相对比例。此图所表示的是一种温带土壤，图中干壤土的重量百分比为：有机物4%；黏土22%；粉土44%；砂30%。对于潮湿地区土壤，45%固体空间为黏土矿物，55%为有机物。

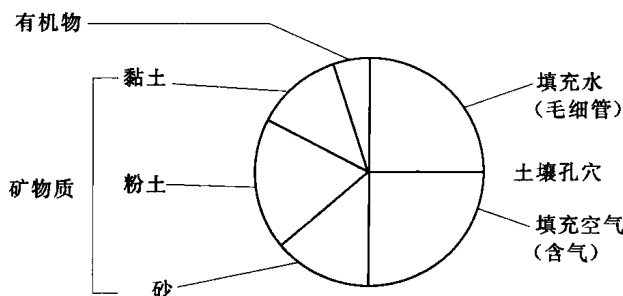


图 2.1 除去多余水分后，壤土的体积组成

土壤的矿物部分变化很大，可以将其归纳为颗粒尺寸变化。

砂——大多数为石英，少量为长石和云母存在，所有颗粒包裹着一些铁和铝的氧化物（看到的锈红色—棕色是由氧化物产生的）。

粉土——石英占主要成分，比砂里的长石和云母少一些，以包裹形式存在的铁和铝的氧化物多一些，由于

颗粒较大，表面可以存在较多的包裹物。

黏土——均匀分散的石英、长石、云母、铁和铝的氧化物，所有这些物质以黏土的粗颗粒形式存在，只占很小一部分（直径为0.002~0.001mm）；细颗粒部分（直径小于0.001mm）是胶状体，由层状硅酸盐和少量铁和铝的氧化物组成。

土壤中砂和粉土内的矿物是电中性的，是绝好的绝缘体。完全干的黏土也是绝缘体，但是，掺入水分后发生了根本变化。黏土含有极微小颗粒，呈现出薄片状构成，为此，经常称黏土为“层状硅酸盐”。诸如长石、云母等原生矿物氧化后生成稳定的次生矿与原生矿组合在一起，颗粒非常细小，被称为微晶体。

图2.2是美国农业部绘制的土壤组分三角图。P点代表黏土（土壤）含量50%，粉