

◀◀ 多相土石复合介质 电阻率特性及其应用

Duoxiang Tushi Fuhe Jiezhi Dianzulu Texting Jiqi Yingyong

赵明阶 汪 魁 荣 耀 刘运来 周军平◎著



人民交通出版社
China Communications Press

多相土石复合介质电阻率特性及其应用

赵明阶 汪 魁 荣 耀 刘运来 周军平 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了多相土石复合介质电阻率特性的最新研究成果。主要内容包括岩土介质的导电性能及电阻率结构模型、土石复合介质的界定及物理力学特性研究、多相土石复合介质电阻率特性的试验研究、多相土石复合介质电阻率特性的理论研究以及多相土石复合介质电阻率特性的应用研究等。

本书可供高等院校水利工程、道路工程、土建工程、地质工程、地球物理勘探等专业高年级学生使用,也可供相关专业的工程设计、施工、检测、监理及科研人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

多相土石复合介质电阻率特性及其应用 / 赵明阶等
著. — 北京: 人民交通出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-114-11387-1

I. ①多… II. ①赵… III. ①岩石电阻率—研究
IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 079125 号

书 名: 多相土石复合介质电阻率特性及其应用
著 作 者: 赵明阶 汪 魁 荣 耀 刘运来 周军平
责任编辑: 郭红蕊 潘艳霞
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010)59757973
总 经 销: 人民交通出版社发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市密东印刷有限公司
开 本: 787 × 1092 1/16
印 张: 7.25
字 数: 175 千
版 次: 2014 年 5 月 第 1 版
印 次: 2014 年 5 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-11387-1
印 数: 0001 ~ 1000 册
定 价: 35.00 元
(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



在水利工程建设中,涉及大量的土石填方,如港口陆域填方、土石堤坝、土地地基等。尤其是在我国西部山区,河流纵横,各类水工建筑物密布。由于受到地形地貌的限制,许多水工建筑物都是以土石混合料作为填筑材料,这些土石填方的承载能力与稳定性直接与土石复合介质的结构特征相关。但是作为填料的土石复合介质,它是由土颗粒、岩石颗粒、颗粒间的孔隙以及孔隙中的气体和水等组成的典型多相体,其颗粒组成复杂,粒径分布范围较广,级配变化较大,不同的土石混合料的工程特性变化较大,土石复合介质的颗粒成分和粒径大小、压实情况和综合含水率等因素都对其工程质量的好坏产生影响。因此,如何对土石复合介质的物理结构特征参数进行探测和评价就至关重要。

近年来,随着地球物理勘探方法在岩土工程中的不断普及,电阻率测试技术作为一种最为常用的物探方法,被广泛应用于各类土石工程的隐患检测和质量评价中。由于土石介质的电阻率与其物理特征参数息息相关,因此,在水利工程中,对各种土石填方的健康诊断和质量评价具有显著的效果。利用电阻率测试技术对土石填方进行诊断和评价的基础是岩土介质电阻率特性及理论模型的研究。目前,对于单纯的岩石介质或者土体介质而言,国内外已经开展了大量的电阻率特性的研究,其电阻率理论的结构体系相对完善,在单纯的岩石介质或土体介质中,电阻率测试方法的应用结果较为理想。然而由于土石复合介质颗粒组成广泛,粒径变化较大,其电阻率特性受颗粒的性质和大小、粗颗粒的含量、含水率、压实干密度等多种因素的影响,相对于纯岩石介质或者土体介质,其电阻率理论有着显著的不同。因此,利用现有的岩石或土体的电阻率理论难以准确地对土石复合介质的物理特征参数进行评价。

影响多相土石复合介质电阻率的因素较多,如含水率、孔隙结构大小、饱和度、颗粒含量及其特性等因素都对其电阻率特性具有影响,而且各影响因素之间具有关联性,使得多相土石复合介质的导电性能变得极其复杂。目前,还没有系统的电阻率理论的研究,也未形成相应的理论体系,从而阻碍了电阻率测试技术在各类土石工程勘探和检测中的应用。因此,多相土石复合介质的电阻率理论研究已经成为运用电阻率测试技术解决土石工程隐患探测和质量评价的关键技术问题。

鉴于上述情况,为了通过电阻率测试技术对土石复合介质的物理力学参数进行定量评价,为准确地对土石填方工程进行隐患探测和质量评价,作者依托国家自然科学基金项目(50779081、51279219)、重庆市教育委员会科技计划项目,对多相土石复合介质的电阻率特性及其应用进行研究。其目的是在对多相土石复合介质导电性能研究的基础上,分析多相土

石复合介质电阻率特性的影响因素,建立多相土石复合介质电阻率与其结构性参数之间的理论关系,基于理论和试验研究,初步建立多相土石复合介质电阻率特性的理论体系,提出基于土石复合介质电阻率理论模型反演物理参数的方法。然后结合土石坝和土石地基等土石填方工程的特点,设计不同的土石坝渗漏模型和填方缺陷模型,利用电阻率成像方法,对土石坝模型进行渗漏诊断,对土石填方模型进行质量评价,从而为电阻率测试方法在土石工程中进行隐患探测和质量评价提供科学的决策依据。书中所介绍内容为作者在多相土石复合介质电阻率特性的理论与试验方面所做的初探性研究成果,许多问题还有待进一步研究。

课题研究得到国家自然科学基金、重庆市教育委员会科技计划和江西省交通厅科技计划经费支持,同时在研究过程中得到了重庆市高校水工建筑物健康诊断技术与设备工程研究中心、水利水运工程教育部重点实验室、江西赣州高速公路投资有限公司等单位的大力协助和支持,在此,作者对给予本课题支持的单位表示衷心的感谢和诚挚的敬意。

由于作者学识所限,不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2013 年 12 月于重庆交通大学



第1章 绪论	1
1.1 岩石电阻率特性的研究现状	1
1.2 土的电阻率特性的研究现状	4
1.3 岩土电阻率特性在工程中的应用研究现状	5
1.4 电阻率成像技术及应用研究现状	7
1.5 多相土石复合介质电阻率特性的研究思路	9
第2章 岩土介质的导电性能及电阻率结构模型	11
2.1 岩土介质的导电性能	11
2.2 岩土介质的电阻率结构模型	15
2.3 本章小结	20
第3章 土石复合介质的界定及物理力学特性研究	21
3.1 土的分类体系	21
3.2 土石复合介质的界定	25
3.3 连续级配的土石复合介质的物理力学特性	28
3.4 间断级配的土石复合介质的物理力学特性试验研究	33
3.5 本章小结	38
第4章 多相土石复合介质电阻率特性的试验研究	40
4.1 电阻率测试原理及方法	40
4.2 多相土石复合介质电阻率特性的试验研究	42
4.3 多相土石复合介质电阻率与物理参数相关关系分析	47
4.4 本章小结	52
第5章 多相土石复合介质电阻率特性的理论研究	54
5.1 土石复合介质宏观导电结构模型	54
5.2 土石颗粒电阻率的确定方法	58
5.3 多相土石复合介质电阻率结构模型的试验验证	59
5.4 土石复合介质电阻率的影响因素分析	62

5.5	土石复合介质物理特征参数的电阻率反演	65
5.6	本章小结	67
第6章	多相土石复合介质电阻率特性的应用研究	69
6.1	概述	69
6.2	电阻率成像现场观测实施方法研究	69
6.3	土石坝渗漏模型的电阻率成像诊断试验研究	72
6.4	土石填方缺陷模型的电阻率成像诊断试验研究	91
6.5	本章小结	96
第7章	结论及建议	98
7.1	土石复合介质的界定及物理力学特性	98
7.2	多相土石复合介质的电阻率特性	99
7.3	多相土石复合介质电阻率特性的应用	100
7.4	进一步研究的建议	100
参考文献		101



第1章 绪 论

● 1.1 岩石电阻率特性的研究现状

关于岩石的电阻率理论模型,早在 20 世纪 20 年代就开始了研究,电阻率测井数据开始用于储油地层的定性解释,如油层的识别和划分。但是在 1942 年以前,虽然大量的研究集中在如何通过电阻率测井资料解释地下油气储层量的问题,但是这些早期的研究都没能确定岩石的饱和度和电阻率测井数据的关系,难以利用电阻率测井数据定量解释储层特性。直到 1942 年,美国测井工程师 Archie^[1]利用双对数坐标研究了饱和砂岩岩样的电阻率和孔隙度之间的关系。从此,Archie 定律在砂岩地层的测井解释中发挥了巨大的作用,但同时围绕 Archie 公式的研究和争论也一直都没有停止过,即使是在 21 世纪的今天,国际上仍然有人在研究 Archie 模型中的饱和度指数和胶结指数,其焦点在于 Archie 模型的适用性和其参数的物理意义^[2]。

由于 Archie 公式的前提是岩石的固体部分(骨架)是不导电的,然而由于泥质表面颗粒的导电性,所以首先在泥质地层中发现了 Archie 定律应用的偏差。于是,大量的学者开始了泥质附加导电性的研究,根据考虑泥质附加导电的不同方式,许多学者都提出了相应的岩石的电阻率模型。这些代表性的泥质岩石电阻率模型主要包括 V_{sh} 型导电模型和 Q_v 型导电模型两大类^[3]。

在 20 世纪 60 年代以前,研究岩石导电模型主要是从岩石泥质数量和泥质分布形式的角度来考虑岩石泥质的附加导电性,基于这种方式,形成了大量的 V_{sh} 型导电模型。Patnode 和 Wyllie(1950 年)^[4]率先发现了 Archie 公式在泥质砂岩中应用的偏差,发现通过 Archie 模型得到的泥质砂岩的地层结构因子要比实验测得的数据偏大,从而认为泥质砂岩的电阻率模型需要考虑泥质颗粒的附加导电性;Winsauer(1953 年)^[5]通过假设泥质颗粒悬浮在地层水中,将泥质作为一种导体参与电流传导,岩石的电导是泥质的电导与砂岩电导相并联而成,建立了二元导电模型;Wyllie 和 Southwick(1954 年)^[6]进一步研究给出了泥质电阻、电解液构成的电阻及泥质与电解液串联构成的电阻三种导电途径的三元并联导电模型;Poupon(1954 年)^[7]认为,岩石中泥质颗粒、砂岩等成分是分层导电的,基于此,研究了层状泥质砂岩导电模型;A. J. de Witte(1957 年)^[8]将泥质附加导电项与地层因素之积定义为储层的泥质含量,而且认为泥质含量和地层水的导电性无关,并据此提出了一个泥质附加导电性的补



偿变量 AF 。

虽然 20 世纪 50 年代关于泥质砂岩导电模型已经有了大量的研究成果,但这些成果中提出的泥质附加导电性仍然是一个概念性的指标,与利用测井数据直接定量表达不同。因此,20 世纪 60 年代初开始,与测井资料直接联系的泥质砂岩模型成为人们研究的焦点。Hossin(1960 年)^[9]用泥质含量的参数来描述孔隙度的大小,把饱和纯岩石模拟成饱和的泥质岩石,利用泥质导电性来模拟地层水的导电性,从而利用泥质附加电导率来表达含水纯岩石的电导率;Simandoux(1963 年)^[10]对砂和蒙脱石混合物的导电性进行了大量的试验研究,将泥质的附加导电性考虑成 $C_{sh} \cdot V_{sh}$ 的形式;Poupon 和 Leveaux(1971 年)^[11]针对印度尼西亚的低矿化度砂泥岩储层,研究了 C_0 - C_w 曲线的非线性,将泥质砂岩的电流传播分成三个路径,分别是岩层的地下水的电流传播路径、黏土矿物的电流传播路径以及地下水和黏土矿物相互交叉的电流传播路径,在此基础上提出了“印度尼西亚饱和度公式”。

上述模型大多是依赖于试验数据建立的地区性经验公式,没有一定的理论基础,而且仅仅依赖于泥质含量这个参数也难以进行精确地描述,所以上述模型没有得到进一步的发展。20 世纪 60 年代之后,一些学者研究了黏土矿物表面的双电层,由于带负电的黏土片状颗粒会和周围的水分子、阳离子等组成双电层,双电层中的阳离子和阴离子在电场的作用下发生交换从而形成附加电流,于是开始利用这种双电层理论解释泥质附加导电性。

从黏土矿物表面双电层这个角度考虑泥质附加导电对岩石导电的影响,也就是将泥质附加导电归结为这种附加的阳离子交换导电,阳离子交换容量 Q_v 表征黏土矿物表面吸附的阳离子交换能力,从这个角度形成了 Q_v 型导电模型。代表性 Q_v 型导电模型有:

(1) Winsauer 和 Mccardell(1953 年)^[12]首先通过双电层理论对泥质砂岩的导电性能进行解释,研究提出了岩石孔隙自由电解液导电和黏土矿物附加电导率两种导电途径相并联的泥质岩石电导率模型。

(2) Hill(1956 年)^[13]为了验证这种黏土矿物表面的导电性,对泥质砂岩进行大量的电导率测试实验和电化学分析,在此基础上对 C_0 - C_w 曲线的非线性关系进行了研究。

(3)对于含泥质的岩石,Waxman 等人认为,泥质岩石中黏土颗粒表面吸附了阳离子,而这些阳离子和周围的水分子、阳离子等组成双电层,双电层中的阳离子和阴离子在电场的作用下发生交换从而形成附加电流,因此,固体颗粒的导电性与可交换阳离子的数量有关。在这种思想指导下,Waxman 和 Smits^[14]于 1968 年提出了分散泥质砂岩 Waxman - Smits(W - S)电导率模型。

(4)Clavier 等(1977 年、1984 年)^[15-16]通过对不同的岩石孔隙水进行区分,认为孔隙中的自由水和黏土束缚水具有不同的导电性能,在这两种孔隙水并联导电的基础上提出了适用于泥质砂岩的双水导电模型。

(5)Hanai(1968 年)考虑到电解液中存在的导电颗粒,建立了应用广泛的 Hanai - Bruggeman 两相介质电导率模型(简称 H-B 电导率模型)^[17]。

这些岩石电导率模型在油田测井中得到了大量的应用,尤其是 W-S 模型和双水模型。20 世纪 80 年代,在上述岩石电导率模型的基础上,一些学者进一步对这些模型进行了研究,如 Bussian(1983 年)^[18]在利用 H-B 两相介质电导率模型研究低频条件下泥质砂岩的电导率特性时,建立了 Bussian 方程;在此基础上,Lima 等^[19-20]进一步研究了适用于黏土、泥

质及泥质砂岩的导电模型; Berg 等^[21-22]利用等效介质理论建立了计算含水饱和度的一般方程。

然而在 20 世纪 80 年代以后,在利用这些电导率模型进行电阻率测井数据的解释时,仍然发现了偏差,这些偏差不仅是对于泥质砂岩,而且对于一些纯净的砂岩也不能进行有效的解释。于是,相应的研究出现了新的岩石导电模型。主要研究进展如下:

(1) Diederix(1982 年)^[23]研究了商岭石和伊利石的非电化学特性,指出这种岩芯颗粒表面的粗糙性导致了饱和度指数的降低,这是因为这种粗糙性使得颗粒表面聚集了相对较厚的水膜,从而增加了电流传播的路径,使得电阻率对饱和度的敏感性降低,从而引起了 $I-S_w$ 曲线的弯曲。

(2) Swanson(1985 年)^[24]研究了黏土和燧石中的微孔隙对电阻率的影响,指出这种微孔隙也会引起饱和度指数的变化。在含水饱和度较低时,尤其是在低矿化度下,电阻率对次生孔隙中流体的类型响应比较迟钝。Swanson 认为,除了岩石颗粒表面的导电性和孔隙水的导电性之外,这种黏土矿物和非黏土矿物可能形成的微孔隙也具有传播电流的能力,同时,他推测微孔隙同其他导电路径可能是串联的。这一研究使人们进一步意识到微孔隙在电阻率中起的作用。

(3) Worthington(1985 年)^[25]也对这种微孔隙的影响进行了研究,指出由于这种微孔隙的孔隙结构特征对饱和度指数的影响而造成了描述含水饱和度可能产生的偏差。

(4) Brown(1988 年)^[26]进一步研究了 W-S 模型对泥质砂岩电阻率数据分析的偏差,指出泥质附加导电性的形成原因除阳离子交换之外还有其他因素。

(5) Crane(1990 年)^[27]也发表了上述类似的观点,他认为造成 $I-S_w$ 曲线弯曲的原因是由于微孔隙等其他因素导致了饱和度指数的变化。

通过这些岩石电阻率特性理论的研究,说明岩石的导电性是孔隙水和表面颗粒导电性共同作用的结果,但是根据岩石孔隙结构特征的不同,应该在不同的情况下,分别考虑自由孔隙、微孔隙以及黏土孔隙等不同类型的孔隙水的导电性能。

虽然泥质及黏土的附加导电性是组成岩土体介质导电性能的重要部分,但是片面的夸大这种附加导电性对泥质砂岩导电性的影响,也会导致不能准确地描述砂岩的整体导电性。曾文冲(1991 年)^[28]从地质沉积学原理对泥质砂岩的附加导电性进行了研究,认为砂岩泥质含量的增加是地质体内部能量转化的反映。随着高能量向低能量的转化,砂岩的骨架颗粒由粗变细,孔隙直径变小,弯曲度增大,从而地层孔隙结构更为复杂化。这种现象的结果就是,地层宏观导电截面的减小和长度的增加,从而电阻率也相应的增加;曾文冲还从渗流特性上将自由孔隙水和微孔隙水进行区别,并在基础上提出了可动水模型。

近年来,国内也有学者开展了泥质砂岩的导电性模型的研究^[29-34]。如朱家俊等(2003 年)^[29]建立了适用于泥质砂岩的双孔隙导电体积解释模型,该模型的所有特征参数均可由测井解释获得,并有明确的地质和物理意义,可与岩芯数据对比;范业活等(2005 年)^[30]根据单毛管双电层电位理论,结合串联毛管束理论,推导了含水泥质砂岩电导率模型;宋延杰(2005 年)^[31-32]建立了分散泥质和层状泥质同时存在的混合泥质砂岩通用双电层电导率模型;李剑浩(2007 年)^[33]导出了双水混联模型的等效地层水电导率新公式;张丽华等(2010 年)^[34]通过在饱和度方程中引入与岩石性质有关的岩性系数 a ,建立了新的三水模型。



● 1.2 土的电阻率特性的研究现状

1942年, Archie^[1]利用饱和和无黏性土的电阻率数据,建立了电阻率和孔隙结构特征的关系,提出了适用于饱和和无黏性土的电阻率理论模型。同时, Archie还提出了结构因子 F 的概念, F 定义为介质总电阻率与孔隙水电阻率之比,是个无量纲参数。结构因子 F 可反映土的结构和孔隙情况,与土的颗粒大小和形状、孔隙率、饱和度、胶结指数等有关。Archie公式主要适用于饱和的无黏性土、纯净的砂岩介质。

由于 Archie公式是针对饱和土的,所以它不适用于非饱和土的电阻率结构。Keller与 Frischknecht(1966年)^[35]在 Archie模型的基础上进一步研究了饱和度对电阻率的影响,提出了适用于非饱和土的电阻率模型。

上述两种土的电阻率结构模型都是只考虑了土体内部孔隙水的导电性,而忽略了土颗粒本身的导电性,实际中,对于土颗粒表面导电性良好的土体(黏性土), Archie模型是不适用的。因此, Waxman与 Smits(1968年)^[36]通过试验研究,提出黏性土颗粒通过表面双电层的阳离子交换进行导电,将土体的电流传播假定为是同时通过土颗粒和孔隙水两条路径进行的,在此基础上得到了适用于非饱和和黏性土的电阻率模型;在 Waxman和 Smits研究的基础上, David Huntley(1987年)^[37]、Worthington(1993年)^[38]研究了黏性颗粒对砂土电阻率的影响,在 Archie公式中结构因子概念的基础上提出了表观结构因子 F_a 的概念, F_a 为土体电阻率与孔隙液电阻率之比。David Huntley(1987年)^[37]研究了基质电阻率的影响,也就是表面传导的影响,提出土体导电性是土颗粒电阻率、孔隙液体电阻率、基质电阻率的综合影响的结果。在此基础上, Worthington(1993年)^[38]提出土的表观结构因子 F_a 和结构因子 F 的相关关系为:

$$F_a = F(1 + BQ\rho_w)^{-1} \quad (1.1)$$

显然,当不考虑土颗粒表面的导电性时, $F_a = F$ 。

Mitchell(1993年)^[39]认为土的导电模型是三元的,并提出了土的电导率三元结构模型;国内学者查甫生、刘松玉等(2007年)^[40-42]在 Mitchell土的电导率三元结构模型的基础上,推导出非饱和和黏性土的电阻率结构模型。

对于各向异性的土体,利用土电阻率特性指标可以定量描述土的各向异性。Mousseau和 Trump(1967年)^[43]最先提出了利用土的电阻率描述土的各向异性,定义土的各向异性因子 A' 的表达式为:

$$A' = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_H}} \quad (1.2)$$

式中: ρ_v 、 ρ_H ——土体沿竖向和水平向的电阻率大小。

在此基础上, Arulanandan和 Kutter(1978年)^[44]利用电阻率指标研究了土的各向异性,定义各向异性指数 A 表达为:

$$A = \sqrt{\frac{\rho_v/\rho_w}{\rho_H/\rho_w}} = \sqrt{\frac{F_v}{F_H}} \quad (1.3)$$

式中: F_V ——竖直方向的结构因子:

$$F_V = \frac{\rho_V}{\rho_H} \quad (1.4)$$

F_H ——水平方向的结构因子:

$$F_H = \frac{\rho_H}{\rho_w} \quad (1.5)$$

同时,还可以定义土的平均结构因子 $\bar{F}$:

$$\bar{F} = \frac{F_V + F_H}{3} \quad (1.6)$$

Arulanandan 和 Kutter (1978 年)^[44] 利用电阻率指标描述土的颗粒特征,定义了土的平均形状因子 $\bar{f}$,其表达式为:

$$\bar{F} = n^{-\bar{f}} \quad (1.7)$$

在上述土的电阻率理论模型研究的基础上,一些学者还通过大量的试验,通过测试土的电阻率与土体物性参数的相关关系,获得了土体电阻率的试验统计模型。如刘国华(2004 年)^[45] 采用改进的 Miller Soil Box 进行土样的室内电阻率试验,依据试验数据得出影响土的电阻率变化的主次因素顺序是:含水率、孔隙水的导电性、饱和度、土的种类,并基于 Archie 模型建立了一个适用于地区土的黏土电阻率模型。

● 1.3 岩土电阻率特性在工程中的应用研究现状

岩土体介质的电阻率特性是与其结构性参数息息相关的,通过岩土体的电阻率测试来反演其内部结构性参数,具有准确、无损、高效、经济、方便等优点。电阻率测试技术已经大量的应用于现场与室内岩土介质特征参数(如储层的含油程度、岩石的润湿性、土的密实度、岩石和土的渗透性等)的评价。

岩石的电阻率理论主要应用于电阻率测井中,由于岩石造岩矿物的复杂多变和区域地质环境的不同作用,岩石的孔隙结构特征千差万别,电阻率测井数据对油气储层的响应曲线也各不相同。因此,可通过电阻率测井资料来研究储层孔隙结构特性。事实上,岩石的导电性能影响因素较多,而且岩石孔隙结构特征千变万化,微观孔隙结构性参数难以控制,而通过合理的岩石电阻率结构模型可以避免一些难以控制的次要因素,抓住主要影响因素,从而可以发挥电阻率理论在测井资料分析中的优越性。

20 世纪 60 年代开始,一些学者开始通过岩石的电阻率理论研究岩石在受载条件下的变形特征。Brace 和 Orange(1968 年)^[46] 用二极法测试多种岩石在不同围压和裂隙水压力作用下的电阻率变化,研究了受载岩石的电阻率和形变的相关关系。在此基础上,张天中(1985 年)^[47] 等研究了不同岩样在压缩过程中的电阻率变化,得到压缩过程中岩样电阻率和应力关系的曲线。李德春等^[48] 针对典型的煤矿岩样,测试了几十块岩样在受压过程中的电阻率数据,得到不同类型岩样的电阻率和压力变化关系曲线。陆海龙等^[49] 通过对不同硬度煤样进行单轴压缩电阻率测试实验,研究了煤样电阻率的各向异性特征以及煤样在循环受载情况下电阻率与应力变化的关系。王云刚^[50] 对单轴压缩条件下的大尺度冲击性煤样



进行了电阻率测试试验,研究了电阻率随压力变化的关系,其成果表明煤样的单轴抗压强度和其电阻率呈一定的正相关性。

对于土体电阻率理论的应用,由于工程中土体多为压实土,到 20 世纪 90 年代,人们开始对击实土的电阻率特性进行深入研究,如 Kalinski (1993 年)^[51]、Abu - Hassanein (1996 年)^[52] 等研究了击实土的电阻率的主要影响因素。研究表明,一般情况下,土体的电阻率对含水率极为敏感,随着含水率的增加,土体的电阻率急剧减小。而在相同的击实功的情况下,可以通过测试击实土的电阻率来判断其结构性参数的大小。

Arulmoli 和 Arulanandan (1994 年)^[53] 首先将土的电阻率特性理论应用于砂土液化的研究,通过对砂土压缩过程中的电阻率测试试验,发现随着电阻率指标 $A\bar{f}/\bar{F}$ 的增大,砂土的压缩指数不断增大;而指标 $A^3/(\bar{F}\bar{f})$ 还与土的动力反应有较好地吻合;因此,可通过电阻率测试方法给出评价与砂土液化相关的力学指标。

John A. Howie (1997 年)^[54] 利用电阻率测试的方法研究了软土地基的结构特征,并利用电阻率数据对软土地基加固后的质量进行了评价。

E. Ristodemou 等 (2000 年)^[55] 利用电阻率测试技术对垃圾填埋场的污染特性进行了研究,建立了电阻率特性指标和污染土渗透系数之间的关系。

国内学者刘松玉等 (2000 年)^[56] 利用电阻率测试技术对水泥土的内部结构进行了研究,通过不同龄期的水泥土的强度大小,得到了水泥土的电阻率与龄期和含水率的关系。研究表明:水泥土的电阻率及抗压强度随着龄期的增加而增加,随含水率的增加而降低,并将水泥土的这种电阻率特性应用于水泥土粉喷桩的工程质量检测中。

Yoon (2001 年、2002 年)^[57-58] 研究了工业污染对砂土电阻率的影响,通过室内模拟污染土的特征,利用电阻率测试试验研究的方法,研究了土的污染对土的结构因子产生的影响。其研究结果表明:随着污染物浓度的增加,污染物的电化学反应增强,孔隙液中的离子运动能力不断减弱,电阻率结构因子不断增大。

Delaney (2001 年)^[59] 通过对冻土的电阻率数据进行测试,分析研究了低温对电阻率的影响。

M. Fukue 等 (2001 年)^[60] 研究了孔隙液体含有不同 KCl 和 NaCl 以及油等的黏土和砂的电阻率特性,通过大量的试验研究,得到了土体电阻率随不同孔隙液体的变化规律。

Shang 和 Rowe (2003 年)^[61] 通过测试垃圾填埋场的电阻率数据,研究了不同成分污染物的导电特性。

于小军 (2004 年)^[62-64] 通过对地区性膨胀土、水泥土、海相软土的电阻率特性进行大量的试验研究,建立了地区电阻率统计模型,并指出了膨胀土、软土电阻率结构性参数的获取、电阻率模型的特点,提出了适用于该类型土的平均表观结构因子的概念,建立了电阻率综合结构因子 M 预估软土蠕变量的方法,并利用电阻率综合结构因子,提出了连云港海相软土结构性弹塑性模型。

韩立华 (2006 年)^[65-66] 通过对重金属污染土的电阻率测试试验,研究了电阻率参数随重金属浓度变化的关系,提出了重金属污染土的电阻率参数的评价标准;韩立华^[65-66] 还通过对不同的水泥土和污染水泥土进行电阻率测试试验,分析了水泥龄期、水泥掺入比、含水率、饱和度等因素对水泥土和污染的水泥固化土的电阻率特性的影响,并据此预测了水泥土

污染后的强度和渗透性等的变化规律。

查甫生(2006年)^[40-42,67-72]从非饱和黏性土的电阻率理论模型研究出发,对合肥地区膨胀土、西安地区黄土等典型非饱和黏性土的电阻率特性进行试验研究。对膨胀土反复胀缩过程中的电阻率特性进行研究,得到了各级循环胀缩过程中土体微观结构的变化规律;通过黄土湿陷变形过程中的同步电阻率测试,利用电阻率结构性参数的变化规律,分析了黄土湿陷过程中土的微结构变化规律。

席培胜、刘松玉等(2007年)^[73]对水泥土搅拌桩桩芯样进行电阻率测试,通过电阻率参数指标定量分析了水泥土搅拌桩在水平方向和沿桩身方向的均匀性;并通过与搅拌桩桩身标贯击数和无侧限抗压强度等宏观力学指标对比,验证了利用电阻指标评价水泥土搅拌桩搅拌均匀性的科学性与可行性。

付伟(2009年)^[74]通过室内试验研究了单轴压缩和冻融作用下粉质黏土的电阻率特性。研究表明,利用电阻率测试技术能够描述土体受力过程中的应力和应变的变化特征。

国内其他学者也进行了大量的土体电阻率与物性参数的相关关系研究,如郭秀军(2003年)^[75]通过室内实验,研究了不同类型土的物性参数与其电阻率的关系,此基础上得出了黏土的压缩系数、黏聚力、压缩模量与电阻率的拟合关系;康辉平(2006年)^[76]研究了堤坝土体电阻率的影响因素,提出判定堤坝隐患的电阻率异常特征的方法;李庚(2008年)^[77]通过室内试验研究了不同含水率和击实状态下的击实土的电阻率特性;孙树林等(2010年)^[78]通过对不同石灰含量的黏土进行电阻率测试试验,分析了灰土比、含水率、饱和度、土的结构及土的粒径等多种因素对掺石灰黏土电阻率的影响,研究了电阻率与不同石灰配比击实土样的物理力学性质之间的关系。

● 1.4 电阻率成像技术及应用研究现状

电阻率层析成像(Resistivity tomography)是通过人工施加地下稳定直流电场,利用预先布置的若干道测量电极,采用预定的装置排列形式进行扫描观测,研究地下一定范围内空间电阻率变化规律的一种直流电阻率勘探方法。其基础是地下岩土体介质及各种探测目标之间的导电性差异,从而可以根据地下电阻率异常分析有关地质问题。“电阻率层析成像”一词首先是由 Shima 和 Sakayama 在 1987 年首次提出,并同时给出了反演解释的方法。随后众多学者进行了电阻率层析成像的理论研究,并在此基础上开展了与此相关的计算机模拟研究。第一台电阻率层析成像仪器——MCOHM-21 型诞生于 20 世纪 90 年代初期,由此电阻率层析成像在传统的电阻率法的基础上诞生。

电阻率层析成像技术目前的研究成果多集中在正演及反演算法上。电阻率正演过程事实上就是通过求解 Poisson 方程获得电场分布的过程,因此,根据 Poisson 方程的求解可将正演方法分为解析法、物理模拟法和数值模拟法。由于实际地质体的复杂性,往往都是多场源的叠加,使得解析法和物理模拟法都难以实施,而随着计算机科学技术的应用越来越广泛,数值模拟的方法越来越成熟,应用越来越方便。针对某一确定的边界条件,Poisson 方程的解具有唯一性。Poisson 方程的求解方法目前主要有积分法、有限差分法及有限单元法。各种方法的适用范围不同,积分法一般适用于几何边界条件较为简单的电阻率模型,而有限差分



法及有限单元法适应性强,使用范围广,是广泛使用的数值模拟方法。自从 Coggon J. H. (1971 年)根据有限元理论,提出电磁场总能量最小的思路,建立了模拟电场和电磁场的有限单元法,首次将有限元法用于电法勘探中,大量的学者开始研究电阻率正演的有限元算法^[79-83],如阮百尧等(2001 年)^[84]编制了三维地电断面的正演模拟有限单元法计算程序,并利用该程序模拟了三维点源电场的电阻率测深方法;黄俊革、阮百尧等(2003 年)^[85]推导了通过异常电位法计算偏导数矩阵的过程,从而使计算的边界条件得到简化,节约了计算时间,提高了反演的精度。蔡军涛、阮百尧(2007 年)^[86]在复电阻率二维数值模拟的过程中,研究了基于三角形单元的有限单元法。针对有限单元法在计算中不能考虑时间因子的影响,人们逐渐将有限差分法引入电阻率正演的计算中,如 Mufti (1976 年)^[87]、Dey 和 Morrison (1979 年)^[79]采用五点差分格式推导了泊松(Poisson)方程的数值解;而后 Dey 和 Morrison (1979 年)^[80]为了模拟三维任意形状的地质体,针对有限差分法对于复杂边界条件适应性差的缺点,在有限差分法中考虑了混合边界条件;Spitzer 等(1995 年)^[88]提出了共轭梯度的有限差分格式;从 20 世纪 80 年代开始,我国的地球物理工作者刘树才(1995 年)^[89,90]、吴小平等(1998 年)^[91]、刘正栋(2000 年)^[92]、王昌学等(2005 年)^[93]、韩江涛等(2009 年)^[94]也分别开展了有限差分法的不同研究。

电阻率反演也就是根据地下电场的分布情况,研究目标范围的岩土体介质电阻率分布情况。电阻率反演技术包括奥克姆方法、等位线追踪方法、联合代数重建方法、最小二乘共轭梯度方法、奇异值分解方法、正交变换投影方法、模拟退火方法以及遗传算法等。常用的电阻率反演的主要方法有最小平方优化法、块反演方法以及平滑约束反演方法等。电阻率法是最为古老的地球物理方法之一,电阻率成像反演本质上属于典型的地球物理反演问题。早在 1920 年, Schlumberger 就开始寻求对电阻率法资料的解释方法,但是当时的电阻率结果还难以反映地下断面的真实情况;Pelton 等(1978 年)^[95]首次对二维的电阻率数据和极化效应数据进行了反演;Petrick 等(1981 年)^[96]使用 α 中心法对三维的电阻率反演过程进行了推导,并取得了较好的结果。但是该方法对电导率的变化空间有较大限制性要求,而且对初始模型的要求也比较高,所以并未广泛推广;到 20 世纪 90 年代,Shima 等(1990 年,1992 年)^[97,98]先后两次改进该方法,并将其应用于井间的电阻率成像;而 Park (1991 年)^[99]利用有限差分法首次开展了三维电阻率反演方法的研究;而后 Ellis 等(1994 年)^[100]利用有限元法对三维电阻率反演进行了系统的研究;Zhang 等(1995 年)^[101]使用共轭梯度法对三维模型的正反演问题进行了研究。

随着电阻率勘探的大量应用,国内学者也对电阻率成像反演理论进行了大量的研究。如我国王兴泰等(1996 年)^[102]利用佐迪反演方法对地表高密度电阻率法的数据采集结果进行电阻率图像重建;王若等(1998 年)^[103]针对佐迪反演方法在二维拟断面应用中的缺陷进行了三个方面的改进,并通过数字模拟和野外实测数据对改进后的佐迪反演方法在二维电阻率反演应用中的可行性进行了验证;张大海等(1999 年)^[104]利用快速最小二乘方法对二维视电阻率断面进行反演;王丰等(1999 年)^[105]选择全局反演方法中的模拟退火和单纯形的组合算法,改进了模拟退火和单纯形算法的匹配技术,并将它引入到电阻成像反演问题中。

电阻率勘探方法作为地球物理勘探的主要手段之一,在地球物理勘探领域得到了大量

应用。而随着阵列勘探思想的提出和实施,高密度电阻率方法因其简便灵活、高效准确等优点在国内外已经被广泛采用。

在20世纪70年代末期,人们首次开始考虑实施阵列勘探,随后英国学者 Johansson 博士设计的电测深偏置系统成为高密度电法勘探的雏形,在此基础上,日本地质计测株式会社借助电极转换板实现了野外高密度电阻率法的数据采集,使高密度电法实现了全面自动化,但是这套装置整体设计还不完善,从而不能充分发挥高密度电法勘探的优越性。到20世纪80年代中后期,我国相关部门也开展了高密度电阻率勘探方法的研究,其中,原地质矿产部系统率先从理论与实际结合的角度,利用高密度电法勘探原理研制了相关的仪器设备,但是仍然有一定的缺陷性。到20世纪90年代初期,长春科技大学成功研制了由高密度工程电测仪和程控多路电极转换器组成的数据自动采集系统,从而使高密度电阻率勘探技术在国内外达到了实用化程度。目前,国内的高密度电法测试系统门类齐全,总体达到国际先进水平^[106]。

总而言之,电阻率测试方法不仅可应用于地下储层的油气勘探,在岩土工程勘察、环境地质工程、工程质量检测等各个领域都能得到较好应用。国内也已经开始将高密度电阻率勘探技术广泛应用到这些领域中,如张献民等(1994年)^[107]应用高密度电法数据对煤田陷落柱进行了解释;郭铁柱(2001年)^[108]对水库坝基进行高密度电阻率勘探,对其渗漏问题进行了评价;吴长盛(2001年)^[109]将高密度电法勘探应用于天津市大港区北大港水库堤坝裂缝的检测中;王文州(2001年)^[110]将高密度电法勘探应用于高速公路高架桥岩溶地区地质勘探中;王鹏(2009年)^[111]系统研究了二维电阻率层析成像技术在土石坝渗漏诊断中的应用;余东(2010年)^[112]采用物理模型试验,对土石坝渗漏的电阻率成像效果进行研究;赵明阶(2010年)^[113]首次开展了填方路基压实质量的电阻率成像诊断试验研究,证实了将电阻率法应用于路基压实质量诊断中的可行性。

● 1.5 多相土石复合介质电阻率特性的研究思路

通过上述国内外关于岩土体介质电阻率特性理论及应用的研究现状,可以发现,岩土体介质的电阻率特性是与其物理特征参数息息相关的,通过岩土体的电阻率测试来反演其内部结构,具有准确、无损、高效、经济、方便等优点。应用电阻率测试技术的基础是岩土体介质的电阻率特性及理论模型,尽管对于单纯的岩石或者土体介质,其电阻率理论已经较为成熟,但是对于水利工程中常用的土石复合介质的电阻率理论目前研究较少,在国内外还基本处于空白阶段,特别是多相土石复合介质物理特征参数,如孔隙比、土石比、综合含水率、压实度、干密度、石料粒径等对土石复合介质的电阻率特性都具有重要的影响。因此,多相土石复合介质的电阻率理论有待系统深入的研究。但不容置疑,单纯土体和岩石电阻率结构特性理论的研究,已经为多相土石复合介质电阻率特性的研究奠定了坚实的理论基础。因此,本书在纯岩土体介质电阻率特性及结构模型的基础上,开展多相土石复合介质电阻率特性理论及应用研究。主要研究思路与技术方案的如下:

(1) 岩土体介质的导电性能及电阻率结构模型研究。对单纯的岩石介质和土体介质的导电性能和电阻率理论进行总结,对典型的岩土体介质的电阻率特性进行分析,研究影响岩

土体介质电阻率特性的主要因素,为多相土石复合介质电阻率理论的研究奠定基础。

(2) 土石复合介质的界定及物理力学特性的研究。在对国内外土体分类体系研究的基础上,根据工程中常用的土石混合料,对土石复合介质的概念和内容进行界定;对不同级配类型的土石混合料进行击实试验和土石填方地基模型试验研究,分析土石复合介质工程特性,研究石料粒径、含石量、压实干密度、综合含水率等因素对其物理力学特性的影响。

(3) 多相土石复合介质电阻率特性的试验研究。制作大批量的具有不同含水率、孔隙率、饱和度、土石比的土石复合介质试样,分别测定其在不同物理状态下的电阻率特性和物理特征参数指标,分析多相土石复合介质综合含水率、孔隙率、饱和度、土石比等物理特征参数对电阻率特性的影响规律,为分析土石复合介质物理特征参数与电阻率特性的理论关系奠定基础。

(4) 多相土石复合介质电阻率特性理论模型研究。在试验获得的规律基础上,基于现有的非饱和纯土介质和岩石介质的电阻率模型,构建土石复合介质宏观等效导电结构模型,推导多相土石复合介质的电阻率和结构性参数之间的理论模型,以得到多相土石复合介质电阻率与综合含水率、孔隙率、土石比、干密度等结构性参数的理论关系,初步构建多相土石复合介质电阻率特性的理论体系。在此基础上,提出利用多相土石复合介质电阻率理论模型反演土石复合介质特征参数的方法。

(5) 多相土石复合介质电阻率理论的应用研究。针对水利工程中土石填方的特点,设计不同类型的土石填方模型,分别利用电阻率测试技术进行渗漏诊断和压实质量评价。第一,设计不同渗漏类型的土石坝渗漏模型,通过电阻率测试方法对土石坝中的裂缝及渗漏通道进行探测,把不同的电阻率成像结果与模型实际的渗漏裂缝进行对比,通过电阻率成像反演与渗漏相关的物理参数,从而对土石坝的渗漏情况进行诊断;第二,设计不同缺陷的土石填方地基模型,通过电阻率成像反演土石地基压实质量相关的物理参数,从而实现对土石填方地基的压实质量的评价。