

## 汉江遥堤电导率与土性参数相关关系试验研究

房纯纲<sup>1</sup>, 贾永梅<sup>1</sup>, 周晓文<sup>2</sup>, 吴昌瑜<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 中水科总公司, 北京 100038; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 通过在汉江遥堤钻孔取样, 直接进行试样的电导率和土质、含水量、干密度、孔隙比以及颗粒级配等土性参数测试, 建立堤防材料的电导率与多种土性参数的相关关系, 目的是为提高物探结果解读准确性提供试验和理论基础。研究表明: 电导率与黏粒含量、含水量和孔隙比呈正相关, 与干密度呈反相关, 而与粉粒含量相关性不大。

**关键词:** 堤防隐患探测; 电导率; 土性参数; 相关关系

中图分类号: TM934.16 文献标识码: A

堤防渗漏是堤防最易发生的险情, 准确、及时探明堤防隐患, 确定渗漏位置, 能够对堤防的除险加固起到十分重要的作用。然而, 由于堤防地质条件的复杂性和多样性, 隐患探测相当困难。通过几年来现场应用情况比较和参加由国家防汛与抗旱办公室组织的两次堤防隐患探测仪器比测, 得出如下认识: 当堤防内部存在渗漏时, 在诸多堤防土体的物性参数中电导率(电阻率)的变化最大。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的方法。这两种方法所探测的物理量均是堤防的电导率(或电阻率), 通过解读异常区的性质、位置、形状和大小, 推论隐患是否存在及其性态。影响堤防土体的电导率有多种因素: 土质、土的密实度(或孔隙率)、颗粒组成、含水量、溶于水的带电离子种类与数量等。上述因素中任何一种因素发生变化都会使堤防土体的电导率发生变化, 这是物探结果存在多解性的原因。由此可见, 即使探测到电导率异常区存在, 也很难准确判断堤防的运行状态和安全性。为了提高电磁法和电法探测堤防渗漏隐患结果解读的准确性, 进而分析评估堤防的运行状态, 有必要进行堤防土体电导率与土性参数的相关关系研究, 建立相关数据库。中国水利水电科学研究院和长江科学院联合, 率先进行了此项研究。在汉江遥堤长37.67km范围, 钻孔取样350个, 最大取样深度达27m, 分土类选取其中144个样品进行了电导率和土性参数的联合测试。

## 1 堤防土体电导率影响因素简要分析

**1.1 土质** 黏土含有极微小颗粒, 呈现出薄片状构成。诸如长石、云母等原生矿物氧化后生成稳定的次生矿物与原生矿物组合在一起, 颗粒非常细小, 被称为微晶体。由于不完整结晶结果, 结晶体结构表现为表面带负电。在岩石风化形成黏土过程中, 带正电荷的阳离子(典型的有 $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $H^+$ 等)松散地附在黏土表面, 这些阳离子与其它阳离子进行交换, 或者当黏土与水混合时彻底溶于水中<sup>[2]</sup>。土壤的阳离子交换容量(CEC)是阳离子数量的量度, 亦即每100g黏土吸附的毫摩尔离子量。

表1给出一些常见黏土的阳离子交换容量, 该表显示阳离子交换容量与黏土类型有关。由于黏土的颗粒特别细小, 具有很大比表面积, 可以吸附很多带电离子, 这些离子对土壤的导电性贡献很大。腐殖质土含有大量带负电的腐质酸根, 并分解为很细小的胶体物质, 它具有很大的比表面积, 能吸取大量水分, 发

收稿日期: 2002-02-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会与长江水利委员会联合重点项目资助(50099620)

作者简介: 房纯纲(1939-), 男, 辽宁辽阳人, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电量测技术和仪器研究。

展不同密度的负电荷。

表1 常见黏土的阳离子交换容量<sup>[3]</sup>

粘土矿物	阳离子交换容量(mmol/g土)	黏土矿物	阳离子交换容量(mmol/g土)
高岭土	$3-15 \times 10^{-2}$	海泡石	$20-45 \times 10^{-2}$
多水高岭土	$5-10 \times 10^{-2}$	多水高岭土, 4H <sub>2</sub> O	$40-50 \times 10^{-2}$
凸凹棒石	$5-20 \times 10^{-2}$	蒙脱土	$80-150 \times 10^{-2}$
伊利石	$10-40 \times 10^{-2}$	蛭石	$100-150 \times 10^{-2}$
绿泥石1	$10-40 \times 10^{-2}$		

表2 阳离子交换容量(CEC)和5种不同组分土壤的胶粒含量<sup>[4]</sup>

土壤构成	有机物含量(%)	黏土含量(%)	CEC(mmol/g土)
砂	1.7	7	$6.3 \times 10^{-2}$
砂质壤土	3.2	13.2	$13.7 \times 10^{-2}$
壤土	4.9	16.8	$20.2 \times 10^{-2}$
砂土质壤土	5.4	18.4	$24.0 \times 10^{-2}$
黏土质壤土	5.5	31.2	$27.2 \times 10^{-2}$

表3 常见离子在25℃时的迁移率<sup>[3]</sup>

离子	迁移率(m <sup>2</sup> /sV)	离子	迁移率(m <sup>2</sup> /sV)
H <sup>+</sup>	$36.2 \times 10^{-8}$	K <sup>+</sup>	$7.6 \times 10^{-8}$
OH <sup>-</sup>	$20.5 \times 10^{-8}$	NO <sup>-</sup>	$7.4 \times 10^{-8}$
SO <sup>-</sup>	$8.3 \times 10^{-8}$	Li <sup>+</sup>	$4.0 \times 10^{-8}$
Na <sup>+</sup>	$5.2 \times 10^{-8}$	HCO <sup>-</sup>	$4.6 \times 10^{-8}$
Cl <sup>-</sup>	$7.9 \times 10^{-8}$		

不同成分土壤的阳离子交换容量列于表2。由表2可以看出阳离子交换容量随粘粒含量及有机物含量增加而增加, 由此得出一个重要概念: 土的电导率是粘粒含量及有机物含量的函数。

如上所述, 土体中水的电导率与离子总数及其迁移速度成比例。然而, 在外电场作用下, 离子运动速度受溶液黏度控制, 溶液的黏度高时离子运动速度慢。由于各种离子的有效直径不同, 离子运动速度不同, 例如, 如表3所示, 氯离子运动比钠离子略快些。在氯化钠溶液里, 钠离子和氯离子的离子数与其迁移率的乘积之和决定了氯化钠溶液的电导率。常见离子在温度25℃时的迁移率列于表3。

**1.2 水** 除了含有导电矿物的岩石外, 大多数完全干燥的土和岩石是具有很高电阻率的电绝缘体。只有在土体中含有足够量的水, 填充孔穴形成导电通路的条件下, 土体才具有导电性。水对土体电导率的影响来自三方面: 含水量影响导电通路截面积和带电离子溶液的黏度, 即影响带电离子迁移率; 土体溶入水中的带电离子种类和数量; 流入土体的水中原有的带电离子种类和数量。

洪水期和枯水期堤防含水量差别很大, 在高洪水位时堤防土体近似于饱和状态, 而枯水期堤防土体内的水一般以4种状态存在: ①堤顶和坡面土体中的水呈隔离状, 孔隙空间大部分由空气填充, 土体几乎不导电; ②堤坡内浅层土中的水呈纤维状, 水的导电通路已经形成, 电导率大小取决于由水构成的导电通路的截面积; ③堤坡内深部土中的水呈毛细管状态, 大部分孔隙空间被水填充, 毛细水上升高度由孔隙大小和形状决定; ④地下水层, 孔隙被水充满, 即是饱和区。最后两种状况下土体的电导率相近。

**1.3 气体** 一般土体中的气体对土壤电导率的直接影响可以忽略不计。然而, 当土体气体中含有CO<sub>2</sub>时, CO<sub>2</sub>溶于水成为碳酸, 少量碳酸分解成为氢离子和碳酸氢根离子, 碳酸氢根离子与不饱和土体中矿物作用将产生新的带电离子, 影响土体的导电性。

**1.4 温度** 土体中的水可以看作电解液, 电解液的黏度随温度变化, 黏度变化直接影响离子迁移率, 因而, 土体中水的电导率随温度变化。在常温条件下, 这种变化呈线性关系。例如, 在25℃时氯化钠的温度

系数是0.022,对于大多数其它离子也采用此值。在其它温度下电解液的电导率(T)由下式给出:

$$\sigma(T) = \sigma(25^{\circ}C)[1 + \beta(T - 25^{\circ}C)] \quad (1)$$

式中:  $\beta = 2.2 \times 10^{-2} / ^{\circ}C$ ; T为计算电导率的温度。温度每变化 $1^{\circ}C$ ,电导率变化2.2%,这意味着温度变化 $40^{\circ}C$ 将导致土的电导率增加近1倍。

## 2 汉江遥堤土体的电导率及土工参数测试

**2.1 江汉遥堤简介<sup>[6]</sup>** 汉江遥堤位于湖北省汉北平原最上端的汉江左岸,是汉北平原和武汉市的防洪屏障。遥堤全长55.265km、保护区面积11055km<sup>2</sup>、660多万亩耕地、760多万人。汉江遥堤经过几百年的培修和加固形成现在的规模,堤高8~10m,堤顶宽一般为8~10m。遥堤堤身修筑年代久远,多为就地取材,施工技术落后,导致堤身密实度差异较大,且有生物洞穴和杂物,历史上多次发生严重溃口等险情。堤身填土主要为素填土(砂壤土、粉细砂和粉质壤土等),少量为杂填土。堤基土为砂壤土、粉细砂、粉质壤土、粉质黏土、黏土及淤泥质土等,深部为基岩。工程区内地下水主要为赋存于第四系全新统冲积层上部砂壤土、壤土和粉质壤土中的孔隙潜水和赋存于第四系全新统冲积层下部粉细砂、砂壤土和砂卵石中的承压水。地表水主要为汉江水。

**2.2 测试方法** 试验由中国水利水电科学研究院与长江科学院合作进行。长江科学院在汉江遥堤钻孔取样350个进行了常规土工试验,最大取样深度达27m。大部分样品取自堤身填土,小部分取自堤基。每个芯样均在现场采取保湿措施,避免含水量变化。为了研究土体电导率与土性参数的相关关系及其变化规律,对其中144个样

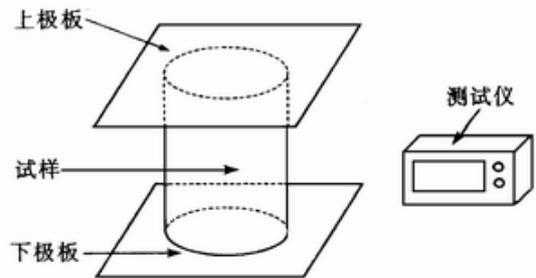


图1 样品电导率测试方法示意

品进行了电导率和土性参数的联合测试,样品直径为78mm,长度为180~210mm。样品电导率测试方法绘于图1。

对于联合测试的土样,首先进行电导率测试,而后进行土工参数测试。选择形状较完整的芯样加工成圆柱体试样。为减少电极与试样的接触电阻对测量的影响,用与试样土相同的少许扰动土加水调成糊状,涂在试样两端,再用不锈钢电极紧压在试样两端。不锈钢电极可以避免产生电极电势差。电导率测量采用直流法,土性参数测试按有关土工试验规程进行。

**2.3 堤防电导率与土性参数的相关关系** 此次试验所用样品颗粒较细,在144个样品中,棕色黏土、灰黑色黏土、重黏土等黏性土样品有89个;灰黑色砂壤土、褐色砂壤土、粉质砂壤土等砂性土样品有55个。其中,有73个样品只含黏粒( $< 0.005$ mm)和细粉粒(0.05~0.005mm)。表4列出了几个典型试验样品的天然物理性质指标和土粒组成,144个样品的天然物理性质指标变化范围归纳如下:密度为 $2.71 \sim 2.75 g/cm^3$ ;含水量为17.8~31.2%,随砂粒含量增加含水量有下降趋势;干密度为 $1.38 \sim 1.79 g/cm^3$ ,其中90%样品的干密度为 $1.45 \sim 1.70 g/cm^3$ ;孔隙比为0.50~0.93,其中90%样品的孔隙比为0.65~0.89。表5给出不同土质的电导率(电阻率)变化范围,表中显示电导率随土壤颗粒增大而减少。根据检测结果,得出电导率与黏粒含量、粉粒含量、含水量、干密度和孔隙比等土性参数的对应关系如表6和图2~图6所示。

由图2和图3可以看出,虽然堤防土体的电导率与黏粒和粉粒含量关系都较离散,但电导率随着黏粒(粒径 $< 0.005$ mm)含量的增加有明显增加的趋势,而与粉粒(粒径0.05~0.005mm)含量之间相关性不大。在黏粒含量变化范围16%~63%之内,电导率的变化范围为6~60mS/m。

图4表示电导率与含水量的相关关系,电导率随含水量增加而增加,在电导率变化范围6~60mS/m内,含水量由16%增至38.6%。图5表示电导率与干密度的相关关系,可见电导率随干密度减少而增加。干密度较小的材料中孔隙率较大,含水量较多,所以电导率较高。图6显示电导率与孔隙比的相关关系,随着孔隙比增加,材料可容纳的水较多,电导率随之增加。在电导率变化范围6~60mS/m内,孔隙比变化范围约为0.7~0.9。

### 表4 试验样品的典型颗粒组成

序号	天然物理性质指标				土粒组成颗粒大小					
	土密度 $\rho / (g \cdot m^{-3})$	含水量 W (%)	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	砂粒		粉粒		黏粒 <0.005	
					>0.25	0.25~ 0.1	0.1~ 0.075	0.075~ 0.05		0.05~ 0.005
1	2.72	29.5	1.51	0.81					48	52
15	2.72	28.2	1.51	0.80				14	57	29
25	2.73	31.5	1.47	0.86					55	45
36	2.72	32	1.42	0.74			1	21	66	12
44	2.73	29.3	1.51	0.81					49	51
53	2.73	29.2	1.39	0.82		1	4	16	62	17
66	2.72	28.7	1.48	0.75				14	65	21
86	2.73	23.6	1.63	0.67		9	6	12	50	23
104	2.72	29	1.52	0.79		3	3	4	61	29
119	2.73	21.6	1.67	0.64		25	8	4	32	31
128	2.74	17.9	1.82	0.50	1	22	27	16	23	11
142	2.75	16.6	1.6	0.72		32	24	19	18	7

### 表5 不同土质的电导率和电阻率范围

电导率/ $(mS \cdot m^{-1})$	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	土质描述
96~37	10~27	棕色黏土,重黏土,灰黑色黏土,棕色带青色黏土,棕褐色黏土,灰黑色重黏土,青灰色黏土。
36~19	28~52	褐色黏土,重粉质壤土,灰黑色中粉质壤土,重黏土,棕褐色粉质黏土,棕色粉黏土,棕色壤土,灰黑色粉黏土,棕色黏土含铁锰结构,棕褐色砂壤土(较软,含草根)。
19~12	52~84	棕色粉黏土,棕色黏土,重黏土(含铁锰结构),灰黑色壤土,棕色壤土,灰色细砂(稍硬),灰黑色上壤土,混合过渡砂壤土,灰黑色粉黏土,棕色壤土,棕色上轻砂壤土过渡到下为中砂壤土,棕色重粉质壤土,粉质砂壤土,棕褐色细砂(含土粒),灰黑色砂壤土(含有机质)。
12~6	84~164	棕色砂壤土(含有机质),砂壤土夹黏土,褐色粉质壤土,含大量有机质砂壤土和细砂(含粘土及云母片),灰黑色细砂和砂壤土,灰黑色极细砂,砂壤土(含有机质),褐色砂壤土,棕色细砂,灰色细砂(夹砾石)。

### 表6 电导率和土性参数测试结果

参数	电导率/ $(mS \cdot m^{-1})$	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	含水量 (%)	干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比	粘粒含量 (%)	粉粒含量 (%)
测值	59.8-6.1	16.7-164	31.2-17.8	1.38-1.79	0.93-0.5	75-5	86-13

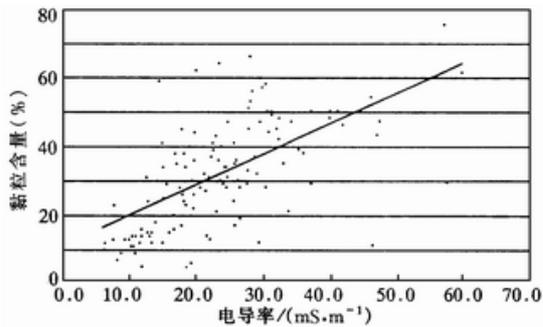


图2 汉江遥堤材料的电导率与黏粒含量的相关关系

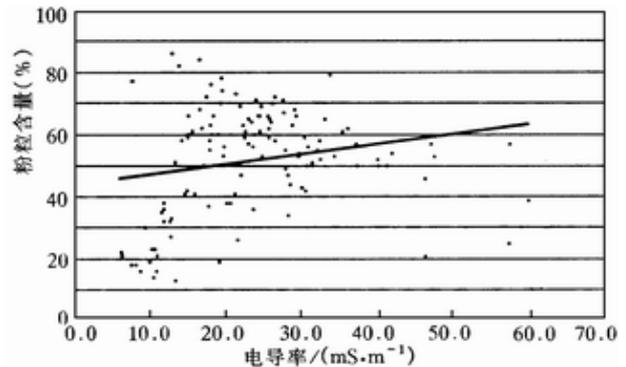


图3 汉江遥堤材料的电导率与粉粒含量的相关关系

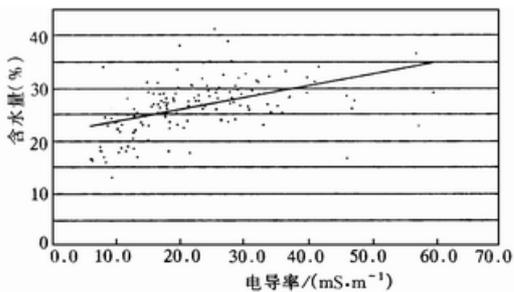


图4 汉江遥堤材料的电导率与含水量的相关关系

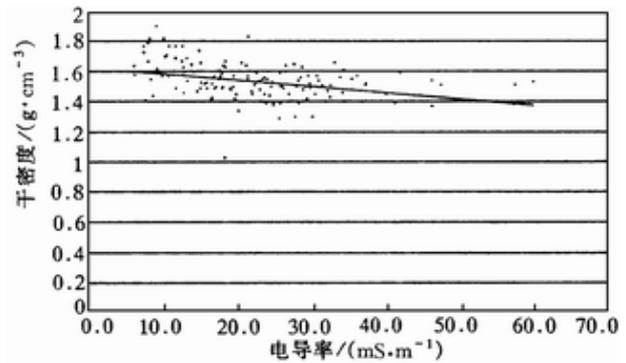


图5 汉江遥堤材料的电导率与干密度的相关关系

堤防填筑材料的电导率决定于材料的有关土性参数共同作用结果。上述试验结果反映了这种情况。进一步分析发现有些参数的作用是相对独立的,而有些参数的作用则是相互关联的。例如:土的成分和颗粒大小决定了带电离子种类和数量;而含水量、干密度和孔隙比这三个参数则是相互关联的,在饱和土情况下,干密度大,孔隙比小,则含水量小,因而电导率低。此结果与一般概念上错误认为密度大导致电导率高是相反的。在非饱和状态下,含水量对电导率影响极大,情况更加复杂。关于堤防填筑材料的土性参数的相互关系及其对电导率的影响问题,作者将在另文讨论。

### 3 小结

(1)通过对汉江遥堤的电导率与土性参数的联合检测,探讨了电导率的变化范围及土质、含水量、孔隙比等土性参数的影响。144个试样的检测结果显示:电导率的变化范围为6~60mS/m;电导率与黏粒含量、含水量和孔隙比呈正相关,而与干密度呈反相关;电导率与粉粒含量相关性不大。(2)运用上述相关关系有利于提高物探结果读解的准确性,例如:对于均质土坝和一段相对均质堤身,某处电导率提高,则提示该处含水量增大,可能存在渗漏现象;如果某段堤防电导率普遍较低,表明该段堤防含细颗粒土很少,高洪水位时出现散浸可能性大;当探测到某处堤脚或覆盖层电导率较其它部位电导率低时,表明该处含细颗

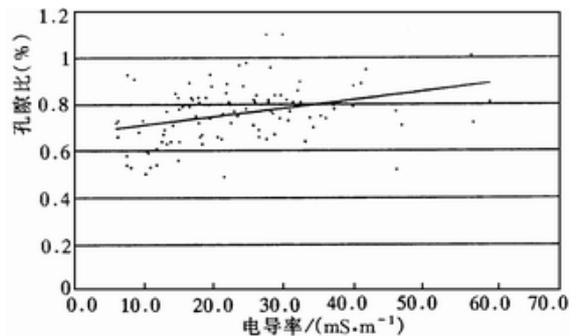


图6 汉江遥堤材料的电导率与孔隙比的相关关系

粒土较少或细颗粒土已流失,该处存在管涌隐患;相同土质的饱和土,电导率高则密实度低。(3)进行堤防电导率与土性参数的相关关系研究具有重要意义。本文只是一个初步的探讨,对于电导率及其与土性参数的相关关系作了定性的分析。针对电导率与单个参数相关关系比较离散的情况,下一步拟对各土性参数的影响进行定量的综合分析,探讨归一化的相关关系。

### 参考文献:

- [1] 房纯纲,等.堤防管涌渗漏隐患探测新方法[J].水利水电技术,2001,32(3):66-69.
- [2] McNeill J D.Electrical Conductivity of Soils and Rocks [R].Technical Note, Geonics Limited,1980.
- [3] Keller G V.Frischknecht F C.Electrical Methods in Geophysical Prospecting [M].Ch.1.Pergamon Press,N.Y.,1966.
- [4] Webber L R.Ed.Ontario Soils [M].Publication 492,Ministry of Arriculture and Food, Province of Ontario,Canada.
- [5] 孙维林,等.黏土的理化性能[M].北京:地质出版社,1992.
- [6] 长江勘测规划设计研究院.汉江遥堤防渗护岸工程单项初步设计报告[R].2001,10.