

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.024

土石坝渗漏通道电场分布规律研究

王日升^{1,2}, 赵明阶¹, 李居铜²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250347)

摘要: 为研究土石坝渗漏通道电场分布规律, 首先通过土石串联-并联混合结构模型推导了土石复合介质的电阻率; 其次将土石坝渗漏通道进行模型概化, 推导了概化后渗漏通道内外的电场分布; 再结合土石复合介质电阻率求取了土石坝渗漏通道概化后模型的电场分布, 获得了渗漏通道内外电场分布响应规律; 最后将点源电场作用下不同土石比复合介质在不同含水率、不同孔隙率条件下的电场分布规律通过有限单元法进行模拟, 基于模拟数据对典型断面进行 Suffer 成像, 进一步明确了土石比、含水率、孔隙率等不同因素对土石坝渗漏通道电场分布规律的影响, 所得不同影响因素作用下的土石坝渗漏通道电场分布规律。

关键词: 土石坝; 渗漏通道; 电场分布; 电阻率; 串-并联模型

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0137-06

Investigation on Electric Field Distribution Laws of Earth-rock Dam Leakage Passages

WANG Risheng^{1,2}, ZHAO Mingjie¹, LI Jutong²

(1. College of Hehai, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. College of Traffic and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong 250347, China)

Abstract: In order to investigate the electric field distribution laws of earth-rock dam leakage passages, the resistivity of earth-rock composite media was obtained through the series-parallel hybrid model of earth-rock structures firstly. Then the earth-rock dam leakage passages were simplified to construct analysis model, followed by the derivation of field distribution inside and outside the leakage passage. Combined with the resistivity of earth-rock composite media, the electric field distribution of constructed model for earth-rock dam leakage passage was obtained and the response laws of electric field distribution for inside and outside the leakage passage was determined. Furthermore, the finite element method was used to analyze the electric field distribution laws of different earth to rock ratios composite media under different rates of water content and porosity subjected to point-source electric field. Finally, Suffer imaging of typical sections was constructed based on the simulation data and the effects of earth-rock ratio, water content and porosity on the electric field distribution laws of earth-rock dam leakage were further determined.

Keywords: earth-rock dam; leakage; electric field distribution; resistivity; series-parallel hybrid model

土石坝渗漏通道形成是土石坝破坏前期最主要的特征之一, 如何准确探查土石坝渗漏及监测其发展一直是广大水利科技工作者最关心的问题^[1]。电法检测土石坝隐患由于成本低、效率高越来越受青睐, 谭大龙等^[2]、宋先海等^[3]、江晓益等^[4]、孙礼钊

等^[5]先后采用高密度电阻率法对土石坝等进行了渗漏隐患探测, 虽然取得了一定的应用效果, 但他们在应用过程中均未充分考虑探测物性差异性带来的影响。早在 2009 年李雷等^[6]就曾提出我国在堤坝隐患探测中存在不考虑“介质材料的多样性和介质特

性的不确定性对探测结果影响”的问题。土石坝隐患探测中土石复合体电阻率是最重要指征参数,而电阻率作为介质的固有属性在检测过程中往往受到介质孔隙率、含水率、组分结构等多种因素影响而具有不同的响应特征,汪魁等^[7-9]通过建立电阻率结构模型研究了土石复合介质电阻率特性及其影响因素,但未进一步研究在不同影响因素下的电场分布。赵明阶等^[10-16]通过波、电及波-电耦合等成像技术对土石坝渗漏开展了深入的研究,但成像过程中均未将坝体材料差异性对波场及电场的影响予以考虑。

本文首先通过建立串-并联混合的电阻率结构模型推导了土石复合介质电阻率,后在模型概化的基础上推导了土石坝渗漏通道内外的电场分布,同时结合土石复合介质电阻率进一步明确了渗漏通道内外电场分布规律,最后将点源电场作用下不同土石比复合介质在不同含水率、不同孔隙率条件下的电场分布规律通过有限单元法进行模拟,基于模拟数据对典型断面进行 Suffer 成像,直观显示了土石比、含水率、孔隙率等因素对土石坝渗漏通道电场分布规律的影响。

1 土石串联-并联混合结构模型电阻率

如图 1 所示,假设土石复合介质并联模型中孔隙水的宽度 l_w ,土体、石块及气体宽度分别为 l_s 、 l_r 、 l_a ,土石模型中串联土体、石块高度分别为 l'_s 、 l'_r ,模型中单宽、单高均为 L ,则由其几何关系可知单位体积土石复合介质模型中固液气三相物理指标满足下列关系式:

$$l_{\text{串}} + l_s + l_r + l_w + l_a = L = 1, l_w + l_a = nL = n, l'_s + l'_r = L = 1, \frac{l_w}{l_w + l_a} = S_r \quad (1)$$

式中: n 为模型孔隙率; S_r 为饱和度。

由模型中土石复合介质串、并联关系可知:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{串}}} + \frac{1}{R_{\text{并}s}} + \frac{1}{R_{\text{并}r}} + \frac{1}{R_w} \quad (2)$$

式中: R 为模型总电阻; R_w 为模型内部孔隙水总电阻; ρ_w 为模型孔隙水电阻率; $R_{\text{串}s}$ 、 $R_{\text{并}s}$ 为土石模型中土体串联、并联电阻; $R_{\text{串}r}$ 、 $R_{\text{并}r}$ 为土石模型中石块串联、并联电阻; ρ_1 为土石模型复合介质电阻率; ρ_s 为土石复合介质中土体电阻率; ρ_r 为土石复合介质中石块电阻率; 各字母计算公式见参考文献^[7]中土

石串联模型、并联模型。

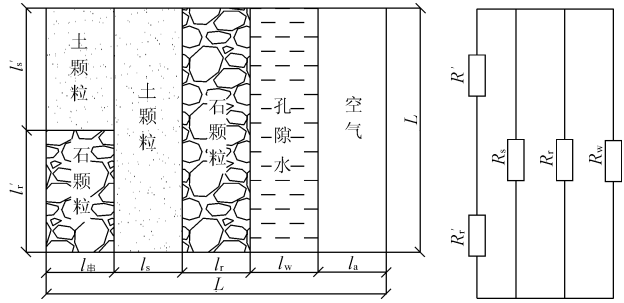


图 1 土石串、并联电阻率结构模型图

设土石并联模型所占比例为 λ ,则土石串联模型所占比例为 $1 - \lambda$,即:

$$\frac{l_s}{l_r} = \lambda f$$

$$\frac{l'_s}{l'_r} = (1 - \lambda)f, \quad \frac{l'_s l_{\text{串}} + l_s}{l'_r l_{\text{串}} + l_r} = f \quad (3)$$

又因为:

式中 f 为复合介质体积比,则串-并联混合模型的电阻率为:

$$\rho_1 = \left[\frac{(1-n)(\lambda-1)[(1-\lambda)f+1]^2}{(f+1)(2\lambda-1)[\rho_s(1-\lambda)f+\rho_r]} + \frac{\lambda^2 f(1-n)}{\rho_s(f+1)(2\lambda-1)} + \frac{\lambda(1-n)}{\rho_r(f+1)(2\lambda-1)} + \frac{S_r n}{\rho_w} \right]^{-1} \quad (4)$$

又在土力学^[17]中土体饱和度可表示为:

$$S_r = \frac{w\gamma_s}{e\gamma_w} \quad (5)$$

根据文献^[7]多相土石复合介质中式(5)可表示为:

$$S_r = \frac{w(1-n)(f\gamma_s + \gamma_r)}{n(1+f)\gamma_w} \quad (6)$$

将其进一步带入式(4)中可求得土石串-并联混合结构模型的电阻率为:

$$\rho_1 = \left[\frac{(1-n)(\lambda-1)[(1-\lambda)f+1]^2}{(f+1)(2\lambda-1)[\rho_s(1-\lambda)f+\rho_r]} + \frac{\lambda^2 f(1-n)}{\rho_s(f+1)(2\lambda-1)} + \frac{\lambda(1-n)}{\rho_r(f+1)(2\lambda-1)} + \frac{w(1-n)(f\gamma_s + \gamma_r)}{\rho_w(1+f)\gamma_w} \right]^{-1} \quad (7)$$

2 点源场中土石坝渗漏通道电场分布

为更好推导渗漏通道电场分布规律,将渗漏通道概化为圆柱体,假设在电阻率为 ρ_1 的均匀全空间

介质中,有一半半径为 r_0 ,电阻率为 ρ_2 的长均匀圆柱体,电场中电流密度为 j ,圆柱体与 x 轴垂直,如图 2 所示。

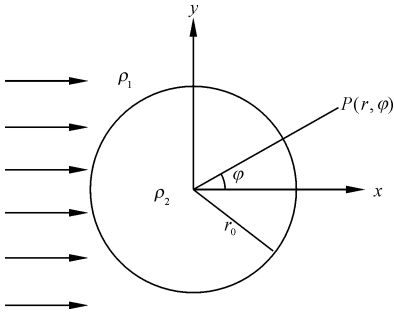


图 2 渗漏通道概化模型图

设 U_1 是圆柱体外电位, U_2 是圆柱体内电位。 U_1 、 U_2 由两部分叠加而成,一部分是正常电位,一部分异常电位,由文献[18]知均匀全空间正常部分电位为:

$$U_0 = -j\rho_1 r \cos\varphi \quad (8)$$

另一部分是柱内外的异常电位 $U_{\text{内异常}}$ 、 $U_{\text{外异常}}$,柱坐标系中的拉普拉斯方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

由图 2 知圆柱体仅与 r 、 φ 有关,与 Z 轴无关,因此上式可以简化为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (10)$$

求上式(10)可得通解:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n r^n + \frac{B_n}{r^n} \right) (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi) \quad (11)$$

又由极限条件, $r \rightarrow \infty$ 时, U_1 的 $A_n = 0$; $r \rightarrow 0$ 时, U_2 有限, U_2 的 $B_n = 0$ 。又由于电位的轴对称性, U_1 、 U_2 中都没有 $\sin\varphi$ 项, $C_n = 1$, 故:

$$U_1 = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{r^n} \cos n\varphi \quad (12)$$

$$U_2 = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n r^n \cos n\varphi \quad (13)$$

由衔接处电位相条件和电流密度法向分量连续性条件联立可得:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{r_0^n} \cos n\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n r_0^n \cos n\varphi \quad (14)$$

$$-j \cos\varphi - \frac{1}{\rho_1} \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{B_n}{r_0^{n+1}} \cos n\varphi = -j \cos\varphi \frac{\rho_1}{\rho_2} +$$

$$\frac{1}{\rho_2} \sum_{n=1}^{\infty} n A_n r_0^{n-1} \cos n\varphi \quad (15)$$

当 $n \neq 1$ 时,除 $A_n = B_n = 0$ 外,没有解。

当 $n = 1$ 时,代入式(14)、式(15)得:

$$B_1 = j \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \rho_1 r_0^2, \quad A_1 = j \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \rho_1 \quad (16)$$

将 B_1 、 A_1 分别代入式(12)、式(13),可求得渗漏通道内外电位分布:

$$U_1 = \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right) j \rho_1 r \cos\varphi \quad (17)$$

$$U_2 = \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} - 1 \right) j \rho_1 r \cos\varphi \quad (18)$$

又由电场中电场强度与电位的关系知:

$$E = -\nabla U$$

故代入式(17)和式(18)可得渗漏通道内外电场分布:

$$E_1 = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right) j \rho_1 r \cos\varphi \quad (19)$$

$$E_2 = \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} - 1 \right) j \rho_1 \cos\varphi \quad (20)$$

考虑土石坝渗漏通道中内部电阻率为水的电阻率,即 $\rho_2 = \rho_{\text{水}}$,则可得土石复合介质在串、并联混合导电结构模型下渗漏通道内外的电场分布:

$$E_1 = \left(\frac{\rho_{\text{水}} - \rho_1}{\rho_1 + \rho_{\text{水}}} \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right) j \rho_1 \cos\varphi \quad (21)$$

$$E_2 = \left(\frac{\rho_1 - \rho_{\text{水}}}{\rho_1 + \rho_{\text{水}}} - 1 \right) j \rho_1 \cos\varphi \quad (22)$$

3 不同土石比模型渗漏通道电场响应特征

3.1 不同土石比模型电阻率变化规律

引用文献[9],模型土颗粒电阻率 $\rho_s = 400 \Omega \cdot \text{m}$,石颗粒电阻率 $\rho_r = 526 \Omega \cdot \text{m}$,水的电阻率 $\rho_w = 11.2 \Omega \cdot \text{m}$,土颗粒密度 $\gamma_s = 2.52 \text{ g/cm}^3$,石颗粒密度 $\gamma_r = 2.68 \text{ g/cm}^3$,水的密度 $\gamma_w = 1.00 \text{ g/cm}^3$,则根据式(7)可得不同含水率 w 、不同孔隙率 n 、不同土石比 f 的电阻率变化规律,如图 3 所示。

由图 3 分析知,不同土石比模型在相同含水率和孔隙率条件下,电阻率总体变化幅度很小,最大变化量约 0.3%。由此可知在土石坝渗漏检测中,一旦确定组成坝体各组分成分的电阻率,则各组分在不同比值下对土石复合介质总体电阻率影响范围可忽略不计。

由图 4 分析可知,不同土石比模型在含水率相同的情况下,土石复合介质电阻率孔隙率增大而增大,由于多相土石复合介质中气相的导电性能很差,近乎绝缘体,因此模型骨架颗粒间的孔隙率越大模

型的导电性能越差,电阻率越高;孔隙率相同条件下,各模型电阻率均随着饱和度增大而减少,随着含水率增大,模型的导电结构发生变化,原高阻的气相

通道在逐渐含水后变为导体,从而导致整个模型电阻率降低。这可为土石坝电阻率检测过程中的数据反演提供饱和度小于 1 的理论反演依据。

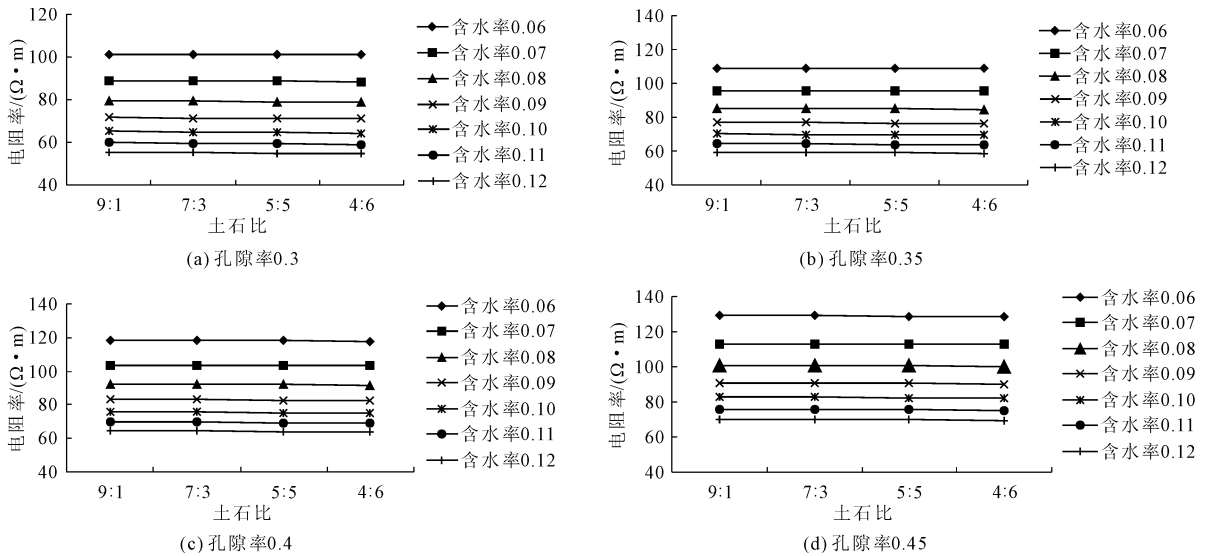


图 3 不同含水率孔隙率条件下电阻率随土石比变化图

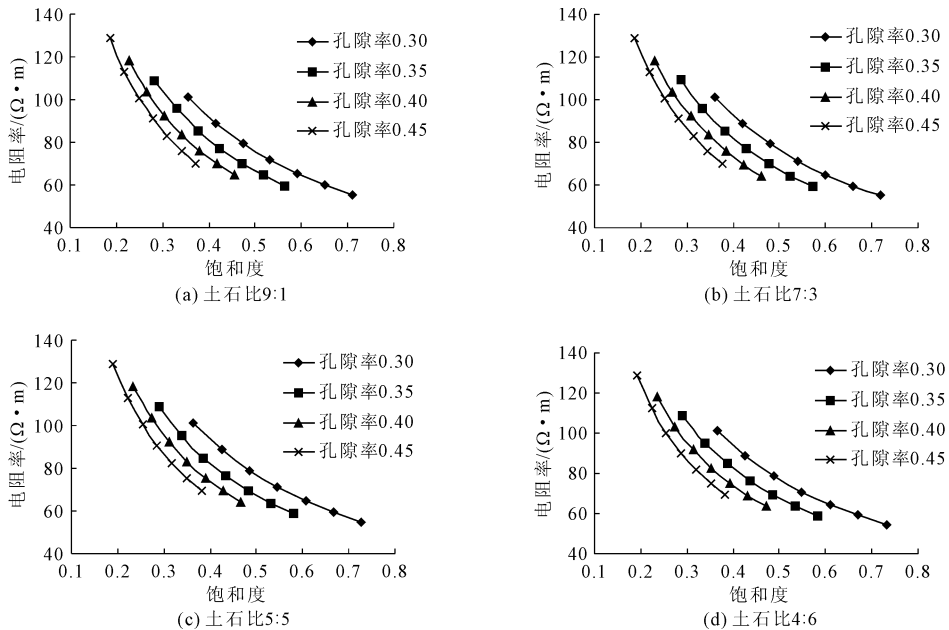


图 4 不同孔隙率土石比条件下电阻率随饱和度变化图

3.2 不同土石比模型电场变化响应特征

基于土石复合体电阻率 ρ_1 可通过理论导电模型予以确定,将确定后的 ρ_1 代入式(21)、式(22)即可得到土石坝在串、并联混合导电结构模型下渗漏通道内外的电场分布。为详细说明不同土石比模型在不同含水率条件下的电场响应特征,本文建立了 $32\text{ m} \times 9\text{ m} \times 9\text{ m}$ 的模型,内部沿 x 轴方向设直径为 0.5 m 的低阻贯通通道,通道距离 y 轴边界为 3 m ,埋深 4 m ,如图 5 所示。

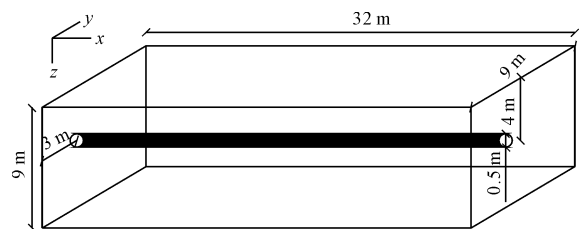


图 5 土石坝低阻贯通通道模型示意图

按照长宽高各 1 m 的单元对模型进行网格剖分,共可得 $2\ 592$ 个单元和 $3\ 300$ 个节点,将模型各

单元分别赋予不同土石比在不同含水率下的电导率(电阻率倒数),低阻通道单元赋予水的电导率,采用有限单元法求得各节点电位值,并将获得的电位值用 Surfer 成图软件进行成像,可获得土石坝渗漏通道在不同土石比不同含水率下的电场分布规律图像,为突出数值差异的敏感度本文在成图过程中对数值取对数运算。

将图像沿 y 轴按照每米一个进行剖分,则同一土石比模型在相同含水率下可得 10 张电场分布图,4 种土石比模型在 7 种含水率条件下共可得 280 张剖面图,为对比说明问题,本文只取含水率为 6% 和 12% 两种条件下在 $y = 1\text{ m}, 3\text{ m}, 4\text{ m}, 7\text{ m}$ 沿 x 方向的剖面图(图略)。

其它土石比下所得电场分布图与土石比 9:1 时相似,在此不再表述。

通过分析可知:

(1) 四种不同土石比坝体材料电流密度等势线均在 $y = 3\text{ m}, y = 4\text{ m}$ 深度 4 m 时发生偏折,且二者偏折方向相反。这是由于 $y = 3\text{ m}$ 恰好处于土石复合体和贯通低阻水体的分界面,由点源电场强度理论知 $E_1 = E_{\text{水}}$,又由电流连续理论可知:

$$E_1 = j_1 \rho_1 \quad E_{\text{水}} = j_{\text{水}} \rho_{\text{水}} \quad (23)$$

式中: $j_1, j_{\text{水}}, \rho_1, \rho_{\text{水}}$ 分别为土石复合体和贯通水体的电流密度和电阻率。

由式(15)知,在点源电场强度相同且 $\rho_1 > \rho_{\text{水}}$ 的情况下 $j_1 < j_{\text{水}}$,即贯通低阻水体的电流密度增大,出现因电荷净流入而产生积累,因此电流强度等势线会产生低阻“吸引”偏折。而在 $y = 4\text{ m}$ 界面,由于切片与 $y = 3\text{ m}$ 分别处于低阻的两个相反方向,故其等势线显示与 $y = 3\text{ m}$ 时相反。

(2) 相同土石比条件下,同一深度上的电流密度随含水率增大而增大,且距离点源点越近增大值越大。由于不同土石比模型所取供电点位置及供电强度均一致,所以点源点电场强度相同,故由式 $E = j\rho$ 可知,电流密度 j 随模型电阻率 ρ 增大而减少,又由图 3 可知,相同土石比相同孔隙率条件下模型电阻率随含水率增大而减少,因此在同一深度上电流密度随含水率增大而增大。自 $y = 3\text{ m}$ 开始随着电场点与点源点距离增大,电流密度增大率逐步稳定在 5%~8% 之间。

(3) 相同含水率条件下不同土石比模型在同一深度上电流密度变化不尽相同。含水率为 6% 时随着土石比减小,电流密度总体成先减少趋势后增大趋势;而含水率为 12% 时,电流密度总体成减少趋

势。不同土石比模型由于内部孔隙率不同电场分布差异性较大,说明不同土石比模型内部导电结构不一,即使含水率相同,孔隙率不同引起的孔隙水分布不均导致电场分布不同,含水率越小,表现越明显;随着含水率增大,孔隙内部被水体充斥后则出现孔隙率越大电流密度越大的电场分布规律。

4 结 语

基于土石复合介质串联-并联混合结构模型及概化后渗漏通道的电场分布,研究了不同土石比、不同含水率、不同孔隙率条件下土石坝体渗漏通道电场分布规律,获得以下结论:

(1) 通过建立土石复合介质串联-并联混合结构模型,推导了土石复合介质电阻率,并基于不同土石比模型模拟了不同含水率、不同孔隙率、不同土石比的电阻率变化规律:不同土石比模型在相同含水率和孔隙率条件下,电阻率总体变化幅度很小,变化最大约 0.3%;相同土石比及含水率条件下,不同土石比模型电阻率随孔隙率增大而增大,含水率和孔隙率相同的情况下,不同模型土石复合介质串-并联各模型电阻率均随着饱和度增大而减少。

(2) 通过将土石坝渗漏通道概化为圆柱体模型,推导了基于模型的渗漏通道内外的电场分布。

(3) 结合不同土石复合介质模型电阻率及土石坝概化渗漏通道模型电场分布,明确了土石比、含水率及孔隙率等影响因素作用下的电场分布规律。

(4) 基于有限单元法模拟了点源电场下不同土石比在不同条件下土石坝渗漏通道的电场响应特征,并对典型断面进行了 Surfer 成像显示,验证了点源电场下土石坝贯通低阻水体的电流密度会增大,出现因电荷净流入而产生积累导致电流强度等势线会产生低阻“吸引”偏折的现象,获得了在相同土石比条件下,同一深度上的电流密度随含水率增大而增大,而相同含水率条件下不同土石比模型在同一深度上电流密度变化因土石比、孔隙率不同而不同的电场分布规律。

参考文献:

- [1] 喻振华. 高密度电阻率法用于堤坝渗漏监测的数值模拟研究[C]//中国地球物理学会、中国地质大学(武汉). 第二届环境与工程地球物理国际会议论文集. 2006:123-126.
- [2] 谭大龙, 庾先国, 赵思维. 高密度电法在西岭雪山蓄水池稳定性探测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(2): 159-164, 107.

- [3] 宋先海, 颜 钟, 王京涛. 高密度电法在大幕山水库渗漏隐患探测中的应用[J]. 人民长江, 2012, 43(3): 46-47, 51.
- [4] 江晓益, 陈兴海, 陈 星, 等. 小型水库渗漏病害并行电法测试应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(6): 752-756.
- [5] 孙礼钊, 郑 琳, 包伟力. 高密度电阻率法在某水库南堤渗漏探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(5): 574-579.
- [6] 李 雷, 张国栋. 我国堤坝隐患探测技术及面临的问题与建议[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 91-99.
- [7] 汪 魁, 赵明阶, 余 东. 土石复合介质电阻率结构模型及影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 15-18, 27.
- [8] 汪 魁, 赵明阶. 土石复合介质电阻率特性理论及应用研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 90-94, 99.
- [9] 汪 魁. 多相土石复合介质电阻率特性理论及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [10] 赵明阶, 徐 容, 王俊杰, 等. 电阻率成像技术在土石坝渗漏诊断中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 1097-1101.
- [11] 赵明阶, 张 尧, 汪 魁, 等. 基于温度场和电阻率成像的土石坝渗漏诊断试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(6): 1-4, 27.
- [12] 赵明阶, 邹 颖, 张 欣. 含隐患土石堤坝的三维波场数值模拟及其特征分析[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 599-607.
- [13] 赵明阶, 余 东, 赵火炎. 土石坝渗漏的波速 - 电阻率联合成像诊断试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 118-126.
- [14] 赵明阶, 李 庚, 黄卫东, 等. 多相土石复合介质电阻率特性的试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(6): 928-933.
- [15] 余 东, 赵明阶, 杨建国. 土石坝坝体渗漏通道的电阻率成像诊断试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 224-226.
- [16] 张 欣, 赵明阶, 汪 魁. 土石坝渗漏的三维电阻率成像诊断试验[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 94-98.
- [17] 袁聚云, 钱建固, 张宏鸣, 等. 土质学与土力学[M]. 4版. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [18] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.

(上接第 130 页)

- [11] Rahardjo H, Santosov A, Leonge C, et al. Use of recycled crushed concrete and secudrain in capillary barriers for slope stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6): 662-673.
- [12] Rahardjo H, Satyanaga A, Harnas F R, et al. Use of dual capillary barrier as cover system for a sanitary landfill in singapore[J]. Indian Geotechnical Journal, 2016, 46(3): 228-238.
- [13] Rahardjo H, Leong E C, Alfrendo S, et al. Rainfall-induced Slope Failure and Preventive Measures in Singapore [M]. Singapore. Nanyang Technological University, 2014.
- [14] Morris C E, Stormont J C. Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(12): 1057-1065.
- [15] Cifuentes E, Aubertin M, Chapuis R P, et al. Analysis of the water diversion length of inclined, layered soil covers [C]//Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Joint CGS/IAH - CNC Groundwater Specialty Conference, Sea to Sky Geotechnique, Vancouver, B. C., 1 - 4 October 2006. Canadian Geotechnique Society Richmond, B. C. pp. 1744 - 1749.
- [16] Ng C W W, Coe J L, Chen Z K, et al. Water infiltration into a new three-layer landfill cover system[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 142(5): 04016007.
- [17] Aubertin M, Cifuentes E, Apithy S A, et al. Analysis of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(10): 1146-1164.
- [18] Steenhuis T S, Parlange J, Kung K S. Comment on the diversion capacity of capillary barriers by Benjamin Ross[J]. Water Resources Research, 1991, 27(8): 2155-2156.
- [19] Calgary, Alberta. Vadose Zone Modeling with VADOSE/W 2007[M]. Canada: GEO - SLOPE International Ltd, 2008.
- [20] Fredlund D G, Rahardjo H, Fredlund M D. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice [M]. USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [21] 邱清文, 张文杰. 湿润气候区带膨润土垫 ET 封顶的性能分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2): 190-193.
- [22] 焦卫国, 詹良通, 兰吉武, 等. 黄土 - 碎石覆盖层毛细阻滞效应及设计厚度分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(11): 2128-2134.
- [23] 黄月华. 膨胀土边坡中 CCBE 防护构的试验与计算模拟[D]. 成都: 四川大学, 2018.