

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.008

流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析

白广明,张守杰,卢建旗,杨甫权

(黑龙江省水利科学研究院,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为深入研究拟流场基本特征和流场法探测原理,完善流场法探测堤坝渗漏入口技术,从建立拟流场数学模型入手,通过对有渗漏典型堤坝工程拟流场进行有限元法数值模拟计算,得到了拟流场电位、电场强度及电流密度等主要物理量分布的基本特征。拟流场中电极附近电位、电流密度及电场强度呈尖峰状密集分布,其他区域数据幅值很小,且均匀分布;渗漏通道入口将引起堤坝前局部水域拟流场电流密度和电场强度数值异常突变。模拟结果表明流场法可以探测出渗漏通道入口,探测设备需要具有较小分度值和较强的抗干扰能力。

关键词:拟流场;流场法;电位;电场强度;电流密度;堤坝渗漏;渗漏入口;有限元法

中图分类号:TV871 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)01-0052-07

Numerical Modelling and Verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method

BAI Guangming, ZHANG Shoujie, LU Jianqi, YANG Fuquan

(Institute of Water Resources and Hydropower Research of Heilongjiang Province, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to improve the theory and technology of the flowing field method that is used to detect the entrance of dam leakage, this work started from the numerical modelling of a quasi-flowing field. The physical quantities of the quasi-flowing field for a typical dam are calculated by the finite element method and main distributing features of variables for the quasi-flowing field have been obtained. Result shows that intensities of the electric field, electric potential and current near the source had a peak distribution, and it decreased dramatically to a stable level at the far field. Due to the existence of leakage, an abnormal distribution of the current intensity and electric field appeared near the entrance of leakage in the water area. This abnormal can help detect the leakage entrance and the detecting device requires a smaller division value and high anti-interference ability.

Key words: quasi-flowing field; quasi-flowing field method; electric potential; electric field intensity; current; leakage of dams; dam leakage entrance; finite element method

堤坝是挡水建筑物,当堤坝后出现集中渗漏且不及时采取工程措施除险,渗漏水会带走细颗粒形成渗漏通道,直至堤坝溃决。及时、准确地封堵堤坝前的渗漏入口,或截断堤坝内渗漏路径,是遏制险情发展、避免发生堤坝溃决的有效方法,采用这些工程措施的前提是掌握渗漏入口位置或路径。由于渗漏入口在水下,渗漏路径在堤坝内部,于是人们发明了多种探测渗漏通道位置的方法^[1]。如:钻探及槽探法、自然电场法、高密度电阻率法^[2]、电阻率成像技术^[3-5]、探地雷达法^[6]、瞬变电磁法、瑞利波法、温度场法^[7-9]、同位素示踪法^[10]、熵权法^[11]等。由于堤坝工程结构复杂性和影响测试因素的多样性,目前堤坝渗漏探测技术还不能完美满足实际工程需要。

何继善院士提出了渗漏探测的全新物理探测方法——流场法^[12-13],并研制出了堤坝渗漏入口探测设备

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划引导项目(GZ16B005)

作者简介: 白广明(1958—),男,教授级高工,主要从事堤坝隐患探测研究。E-mail: baigm@126.com

引用本文: 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-58.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.008.

(DB 型堤坝管涌渗漏检测仪)。随后,流场法被应用在洪泽湖大堤等工程中的渗漏入口位置探测中,对于堤坝后已经出现管涌的渗漏,可以取得良好的效果^[14-19]。DB 型堤坝管涌渗漏检测仪 2006 年获得国家重点新产品称号,2008 年获得水利部水利先进实用技术推广证书,探测技术写入 SL 436—2008《堤防隐患探测规程》^[20],探测设备被国家水利部列为国家防汛储备物资,该项技术在全国广泛应用。

本文采用数值模拟方法给出流场法探测堤坝渗漏入口的依据,为完善拟流场法探测技术、正确应用流场法提供支撑。

1 流场法简介

流场法是探测堤坝渗漏入口位置的电法探测技术,是人为在堤坝后管涌出口和堤坝前水中安放电极,建立可以凸显渗漏流场的拟流场,通过测试堤坝前水域拟流场确定出渗漏入口的位置。探测设备主要由建立拟流场的发射机、A 极板、B 极板及测量拟流场的接收机、探头组成。发射机是具有一定频率和功率的电源。探测堤坝渗漏入口位置时,将与发射机 2 个电极连接的 A 极板、B 极板分别置入堤坝前水域远端和堤坝后渗漏通道出口水中。开启发射机电源后,A 极板、B 极板之间的堤坝及水域就建立起了拟流场。接收机置于堤坝前水域的探测船上,探测探头与接收机连接,当船拖拽的探头接近渗漏入口时,接收机可以采集到拟流场电流密度、电场强度幅值异常增大数据,测试现场便可以明确给出渗漏通道入口的位置,这是一般物探方法不具备的优点。流场法还具有对堤坝无损伤、操作简单、工作效率高等特点^[12-13]。

2 拟流场的数学模型

为深入研究流场法探测的理论和基本特征,正确建立拟流场数学模型是基础。拟流场是人为建立的电场,与电场的数学模型表达形式^[14-17]一致。

对于电场中导电介质内部的微元体,电流强度可以定义为电流密度 $\boldsymbol{j}$,微元体的导电参数定义为电导率 σ (电阻的倒数)。则在三维稳定拟流场中的任意点上,根据欧姆定律、克希霍夫电流连续性定律的微分方程式得

$$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

电位 U 满足拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \tag{2}$$

由式(2)可知,当边界条件是恒定值时,电位在拟流场空间的分布是稳定的,不随时间而改变。因此,它和静电场一样是一种势场。

电场强度 $\boldsymbol{E}$ 为 U 的梯度,电流密度 $\boldsymbol{j}$ 与电场强度的关系为

$$\boldsymbol{j} = \sigma \boldsymbol{E} \tag{3}$$

在实际问题求解时还需要引入边界条件,这里不做介绍。

3 拟流场中主要物理量分布及其分析

基于数学模型,采用有限元法对拟流场进行数值计算。为直观地了解、认识流场法,推进探测技术的深入研究和应用,通过典型土坝工程数值模拟计算,给出堤坝工程有无渗漏通道时拟流场主要物理量分布情况。

为使模拟计算可以反映通常工程的共有特征,减少工作量,研究依据渗漏不同情形,建立了典型工程 2 个二维平面计算模型。模型 1 为典型土坝无渗漏通道模型,模型 2 为典型土坝有渗漏通道模型。为反映渗漏通道存在位置的一般性,没有假设渗漏通道发生在土坝中段,假设发生在土坝偏左段位置,模型中对应在 (200,50) 至 (240,50) 两点连线位置上。拟流场模型 2 个电极电位数据依次为 100 V、0 V,分别设在模型区水域中 (150,100) 及渗漏通道在坝后出口 (240,50) 位置。2 个模型区的范围、拟流场中介质电阻率 ρ 及电极位置等参数见表 1。

3.1 拟流场中主要物理量分布及其分析

依据第2节介绍的拟流场数学模型进行有限元法数值计算,得出有无渗漏通道2个模型区的拟流场电

位、电场强度及电流密度分布(图1~3)。

图1为拟流场中的电位等值线,各等值线上百分数是等值线位置相对于渗漏出口电极的电位与拟流场两个电极间电位差的比值。由于计算模型中坝前水体电阻率为坝体及堤坝后土体电阻率的1/10,拟流场电压近90%集中在堤坝体及坝后区域;坝前大范围水域中电位在90~93V之间,变化区间相对较小,电位呈均匀分布;土坝产生渗漏通道后,拟流场中的等电位线向堤坝前水域方向略有移位。

表1 拟流场计算模型参数取值

Table 1 Parameters for the calculating model of the quasi-flowing field

模型区内部位	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	x/m	y/m	电极电位/V	电极位置坐标	
					x	y
坝前水域	20	200	200	100	150	100
土质堤坝	200	40	200			
渗漏通道	20	40	0.2			
坝后区域	200	160	200	0	240	50

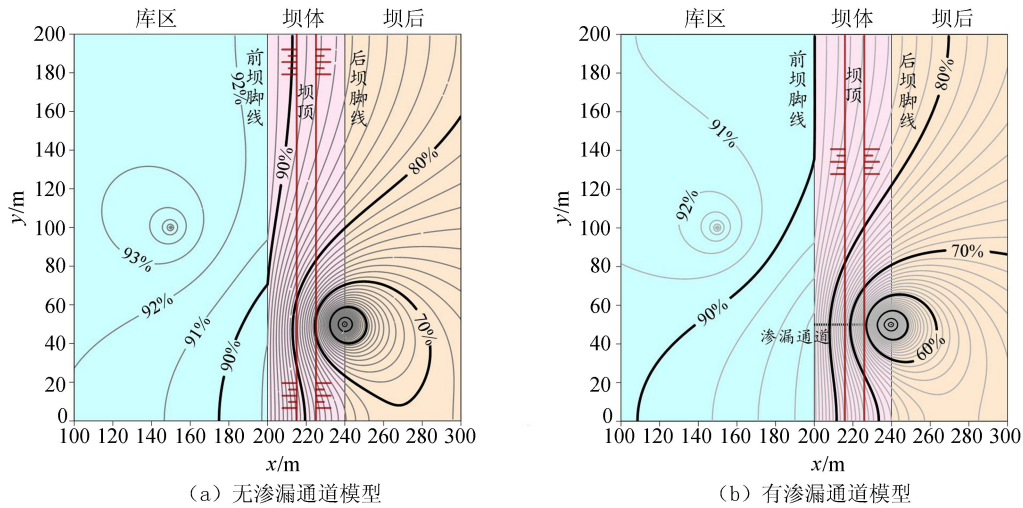


图1 拟流场电位分布对比

Fig.1 Comparison of the potential distribution of the quasi-flowing field

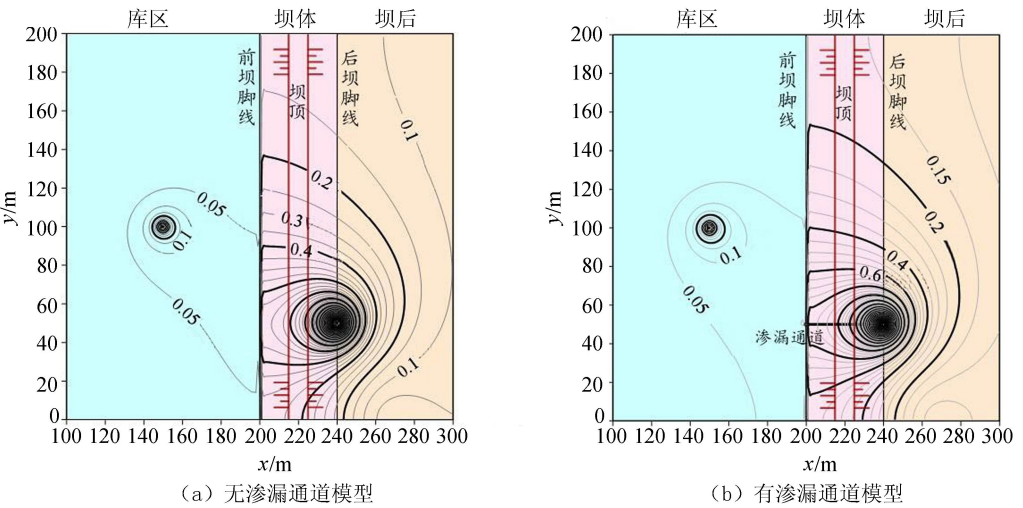


图2 电场强度分布对比(单位:V/m)

Fig.2 Distribution comparison of the electric field intensity (units: V/m)

图2为拟流场的电场强度等值线。除电极、渗漏通道入口附近外,大部分区域电场强度呈均匀分布,并且数值变化范围较小,本文计算模型特定条件下,数值在0.04~0.1V/m之间变化,变化范围仅为0.06V/m。由于各工程具体参数存在差异,一些工程中本数据值可能会更小,本数据对正确选择探测渗漏入口设备检测分度值有重要参考价值。

与坝前水域比较,坝体中拟流场的电场强度变化率较大,数值在0.1~1.0V/m之间变化,变化范围可达900mV/m,渗漏通道附近的电场强度最大。测量坝体区域的电场强度能较精确地确定渗漏通道位置,但需

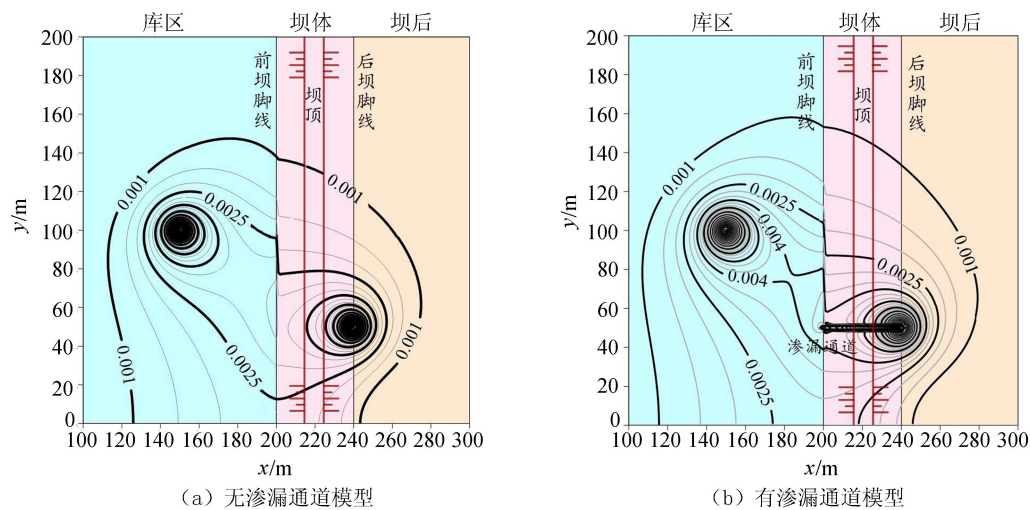


图 3 电流密度分布对比(单位:A/m²)

Fig. 3 Distribution comparison of the current intensity (units: A/m²)

要在坝体处进行破坏性钻孔,不适宜实际工程应用。为避免对堤坝体造成损伤,有人尝试在堤坝表面测试拟流场电场强度分布确定堤坝体内渗漏通道位置,但该方法受测试采样点离渗漏通道位置远近及堤坝体结构、测试极与堤坝表面介质接触电阻率等多方面因素影响,是需要深入研究、具有工程应用前景的新课题。

图 3 为拟流场的电流密度等值线。对比图 2、图 3 可以看出,电流密度等值线分布与电场强度相似,这符合式(3)所描述的电场强度与电流密度关系。除了电极附近以外的大面积区域,电流密度的变化范围较小,在本文计算模型特定条件下,电流密度在 0.5 ~4.5 mA/m² 之间变化。

拟流场水域中测得的电流是探头面积下对应的平均值。为提高分辨率和操作灵活性,可以采用加大电流探头尺寸方法,但是需要考虑到可操作性,如探头尺寸为 10 cm×10 cm 时,对应本模型需要测量拟流场电流值在 50 ~450 $\mu\text{A}/\text{dm}^2$ 之间,数值数量级很小,对电流表测量精度要求高。考虑到电场强度与电流密度在模型区水域中有着相似分布,测量电场强度相对容易实现,流场法宜采用测量电场强度方式探测堤坝渗漏入口位置。

拟流场中电极附近的电位、电场强度及电流密度数值相对其他区域数值显著偏大,在分布图中呈尖峰状,这符合双电极电场分布规律。

3.2 渗漏通道入口前附近水域拟流场主要物理量分布及分析

流场法探测堤坝渗漏入口位置基本方法是在堤坝前水域中巡回探测,探查渗漏入口附近特有拟流场信息,确定出堤坝渗漏入口位置。由此可知,掌握渗漏通道入口附近水域中拟流场主要物理量信息特征,是能够准确探查出堤坝渗漏入口位置的基础。

整理模拟计算结果,给出了图 4 ~6 有无渗漏通道模型中渗漏通道入口附近水域中 3 个断面(渗漏通道轴线上坝前水域、坝前水域中离水边线 0.5m 平行线及坝前水域中水边线,分别对应图 1 ~3 中纵坐标 50 m、横坐标 199.5 m 及横坐标 200 m 断面)的拟流场电位、电场强度、电流密度分布。

结合图 1 分析图 4 可以看出:(a)有无渗漏通道 2 种情况下,渗漏入口前附近水域的拟流场电位分布形态没有发生明显改变,电位在水域中的变化梯度仍然是均匀的。(b)产生贯通式渗漏通道后,坝前水域中分布的电位呈整体一致性的变化趋势,数值均降低 2 V 左右。基于本分析,采用测量堤坝前水域中拟流场电位分布的方法不容易探测出渗漏入口所在位置。

结合图 2、图 3 分析图 5、图 6 可以看出,无渗漏通道时,在渗漏入口前附近水域中电场强度、电流密度基本呈水平略有梯度分布;如果坝中有渗漏通道,渗漏入口前水域中拟流场电场强度、电流密度分布会产生明显改变,形成电场强度、电流密度尖峰区,凸显渗漏入口所在位置,在堤坝前水域中如果探测到了电场强度、电流密度尖峰区,也就找到了渗漏通道入口处,这是流场法探测技术的核心。

据此可以将流场法探测堤坝渗漏入口基本原理表述为:在堤坝前水域、堤坝后渗漏水出口处施加供电电极,在堤坝体及其前部水域建立起拟流场,由于堤坝内充满水渗漏通道的电导率明显高于周围介质,渗漏入

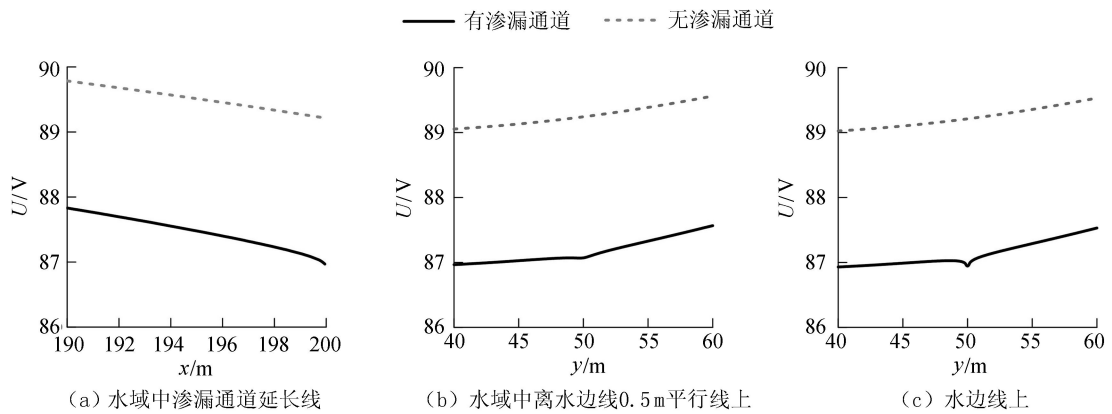


图4 有无渗漏通道时拟流场电位在渗漏通道入口前附近水域断面上的分布
Fig.4 Distribution of the electric potential of the quasi-flowing field near the entrance of leakage with and without leakage channel

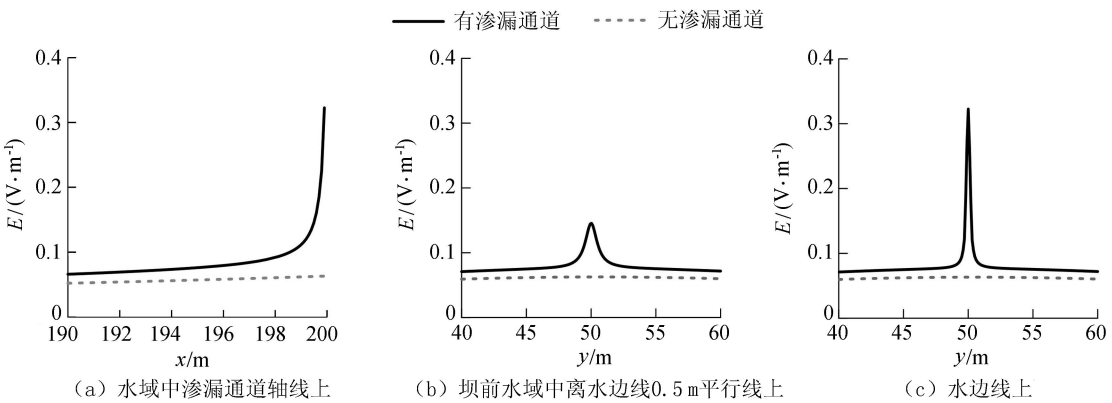


图5 有无渗漏通道时拟流场电场强度在渗漏通道入口前附近水域断面上的分布
Fig.5 Distribution of the electric field intensity of the quasi-flowing field near the entrance of leakage with and without leakage channel

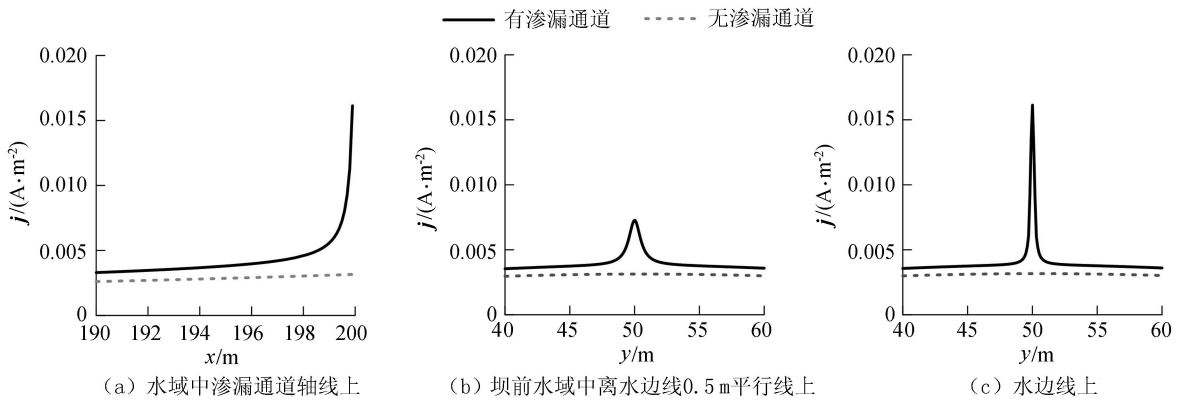


图6 有无渗漏通道时拟流场电流密度在渗漏通道入口前附近水域断面上的分布
Fig.6 Distribution of the current intensity of the quasi-flowing field near the entrance of leakage with and without leakage channel

口前附近局部水域中拟流场的电场强度、电流密度将明显高于其他区域,使用专用测量设备在堤坝前临近水域探测到电场强度、电流密度增大区域,便探测到了渗漏入口。

由本文模型算例可知,渗漏入口尺寸较小时,渗漏入口前水域中形成电场强度尖峰区范围也较小。模拟算例的渗漏入口尺寸设为0.2 m,模拟计算出电场强度尖峰区范围半径2 m左右,这在实际堤坝工程中是一个较小范围。为防止漏测渗漏入口现象发生,现场探测可以采用2种方法:(a)增加水域中测点分布密度,保证能够直接探测到渗漏入口位置。(b)将探测工作分成两步完成,首先在水域中大范围测量电场强度分

布值,绘制出在水域中如图2所示电场强度分布等值线图;第二步,加密测试堤坝前电场强度分布等值线数值较高区域,由于大大缩小了重点测试区域,测线距离可以设置很小,可以准确测试到渗漏入口位置。显然方法(b)具有明显优点,既可以提高探测工作效率,又不会出现漏测堤坝渗漏入口问题。

对比图5、图6可以明显看出,电场强度与电流密度具有同样的分布曲线,这符合式(3)所描述的电场强度与电流密度的关系。

4 结 论

a. 拟流场是在堤坝和其前部水域人为建立的双电极电场,通过数学方法可以建立数学模型。数学模型表明电场理论均适用于拟流场,如电位分布符合拉普拉斯方程;空间每点电流值均符合欧姆定律,数值上与介质电导率成正比,方向上是电位梯度的负方向,与电位等值线垂直;拟流场的电流密度与电场强度有相似的数值分布;拟流场的电位、电流密度及电场强度在拟流场电极附近呈突变尖峰分布等。

b. 堤坝有渗漏通道时,渗漏通道入口将引起堤坝前局部水域拟流场电流密度和电场强度数值突变,该事实证明流场法可以探测到堤坝渗漏入口,探查拟流场电场强度值异常增大区域是流场法确认渗漏入口位置最适宜的方法。

c. 本文计算例表明,堤坝发生集中渗漏时,渗漏入口引起附近水域电流密度和电场强度数值增大的范围大小与渗漏入口尺寸相关,由于探头临近时才能准确探测到渗漏入口,为避免漏测尺寸较小渗漏入口,提高探测工作效率,可以采用两步测量方法。

d. 产生渗漏通道后,堤坝前渗漏入口附近水域拟流场电场强度数值将明显增大,但是变化前后数据的数量级很小,提示探测设备需要有较小的分度值和较强的抗干扰能力。

e. 有渗漏通道时,堤坝体中渗漏通道位置拟流场电场强度分布值也产生明显变化,提示流场法也可以用于探查堤坝中渗漏通道的路径,这是有应用前景、有待深入研究的课题。

参考文献:

- [1] 徐竹青,张桂荣,郑军. 我国病险土石坝隐患分类及快速检测方法概述[J]. 水利与建筑工程学报,2010, 8(3):50-52,81. (XU Zhuqing, ZHANG Guirong, ZHENG Jun. Classification of hidden troubles and corresponding rapid detection methods about sick earth-rock dam in China[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2010, 8(3):50-52,81. (in Chinese))
- [2] 周俊龙,江世永,王兵,等. 高密度电阻率法在红卫水库土石坝隐患检测中的应用[J]. 后勤工程学院学报,2008,24(2):1-5. (ZHOU Junlong, JIANG Shiyong, WANG Bing, et al. On the application of high-density method in testing the flaw of Hongwei reservoir earth-rockfill dam[J]. Journal of Logistical Engineering University,2008,24(2):1-5. (in Chinese))
- [3] 孙方宇,徐顺强,李清林,等. 电阻率成像技术在沁河大堤隐患探测中的应用[J]. CT理论与应用研究,2011, 20(4):495-503. (SUN Fangyu, XU Shunqiang, LI Qinglin, et al. The application to Qinhe dam hidden trouble exploration with high density resistivity tomography technology[J]. CT Theory and Applications,2011, 20(4):495-503. (in Chinese))
- [4] 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. (ZHAO Mingjie, XU Rong, WANG Junjie, et al. Application of electrical resistivity tomography to leakage diagnosis of earth rock-fill dam[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences),2009,28(6):1097-1101. (in Chinese))
- [5] 王振宇,刘国华,张民强,等. 电阻率层析成像在堤坝隐患探测中的应用[J]. 浙江水利科技,2004(2):7-10. (WANG Zhenyu, LIU Guohua, ZHANG Minqiang, et al. Application of resistivity tomography technique to detecting hidden danger in embankment[J]. Zhejiang Science and Technology of Water Conservancy,2004(2):7-10. (in Chinese))
- [6] 杜家论,范建军,王颖轶,等. 敏感因素劣化对导堤边坡稳定性影响的数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016, 44(6):525-530. (DU Jialun, FAN Jianjun, WANG Yingyi, et al. Numerical simulation of effect of sensitivity factor degradation on stability of jetty slope [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016,44(6):525-530. (In Chinese))
- [7] 王新建,曾长女,许保田,等. 基于温度场反分析的堤坝多个集中渗漏通道探测方法[J]. 水利学报,2009,40(4):486-491. (WANG Xinjian, ZENG Changnu, XU Baotian, et al. Model for detecting multiple concentrated seepage passages in earth dams based on reverse analysis of temperature field[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(4):486-491. (in Chinese))

- [8] 陈建生,余波,陈亮. 利用地下水温度场研究江都高水河船厂段堤防的渗漏[J]. 岩土工程界, 2002,5(12):37-39. (CHEN Jiansheng, YU Bo, CHEN Liang. Using under-ground water temperature field to detect dam leakage, taking Jiangdu Gao Shui river's dockyard dam segment as a case study[J]. Geotechnical Engineering World, 2002,5(12):37-39. (in Chinese))
- [9] 陈亮,吴勇,陈建生. 坝基集中渗漏通道的温度场反分析与试验研究[J]. 东华理工学院学报,2007,30(4):356-357. (CHEN Liang, WU Yong, CHEN Jiansheng. Study on temperature field inverse analysis and experiment of concentrated leakage passage in dam base[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2007,30(4):356-357. (in Chinese))
- [10] 樊哲超,陈建生,李世兴. 环境同位素和模糊聚类法研究堤坝渗漏[J]. 水科学进展,2006,17(1):37-42. (FAN Zhechao, CHEN Jiansheng, LI Shixing. Application of environmental isotope and fuzzy clustering method to study leakage from embankment [J]. Advances in Water Science, 2006,17(1):37-42. (in Chinese))
- [11] 陈建生,何会祥,王涛. 基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):358-363. (CHEN Jiansheng, HE Huixiang, WANG Tao. Dam leakage detection based on entropy weight-variable fuzzy set model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016,44(4):358-363. (In Chinese))
- [12] 何继善. 堤防渗漏管涌“流场法”探测技术[J]. 铜业工程,1999(4):5-8. (HE Jishan. “Flowing field” technology to detect surge leakage in dams[J]. Copper Engineering, 1999(4):5-8. (in Chinese))
- [13] 何继善,邹声杰,汤井田. 流场法探测堤防管涌渗漏异常的分布实验[J]. 中国防汛抗旱,2008,1(增刊1):132-135. (HE Jishan, ZOU Shengjie, TANG Jingtian. Experimental studies on the distribution of the anomaly of the seepage and piping in the dyke by the flow field fitting method[J]. China Flood & Drought Management, 2008,1(Supl):132-135. (in Chinese))
- [14] 戴前伟,冯德山,王小平. 龚嘴电站大坝渗漏入口部位探测技术[J]. 水力发电学报,2006,25(3):88-90,83. (DAI Qianwei, FENG Deshan, WANG Xiaoping. The method to detect the leakage entrance of concrete dam at Gongzui hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006,25(3):88-90,83. (in Chinese))
- [15] 冷元宝,李跃伦,黄宜更,等. 流场法探测堤坝管涌渗漏新技术[J]. 人民黄河,2001,23(11):8,37. (LENG Yuanbao, LI Yuelun, HUANG Yigeng, et al. A new technique for detecting dam leakage in dyke by flow field method[J]. Yellow River, 2001,23(11):8,37. (in Chinese))
- [16] 邹声杰,汤井田,何继善,等. 流场法在堤坝渗漏管涌探测中的应用[J]. 人民长江,2004,35(2):7-10. (ZOU Shengjie, TANG Jingtian, HE Jishan, et al. Application of flow field fitting method in seepage and piping detection of embankments[J]. Yangtze River, 2004,35(2):7-10. (in Chinese))
- [17] 白广明,张守杰,张耘菡,等. 镜像法研究堤坝拟流场主要物理量分布特征[J]. 中国防汛抗旱,2017,27(6):125-130. (BAI Guangming, ZHANG Shoujie, ZHANG Yunhan, et al. The main physical distribution characteristics of quasi-flowing field are studied by means of mirror image[J]. China Flood & Drought Management, 2017,27(6):125-130. (in Chinese))
- [18] 曾明明,陈建生,王婷,等. 堤坝渗漏瞬态温度场模型[J]. 水利水电科技进展,2013,33(4):10-13. (ZENG Mingming, CHEN Jiansheng, WANG Ting, et al. Transient temperature field model for dam seepage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(4):10-13. (in Chinese))
- [19] 王新建,陈建生,陈亮. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2005,25(6):67-71. (WANG Xinjian, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Application of natural tracer method to leakage detection for ash filled earth dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005,25(6):67-71. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国水利部. 堤防隐患探测规程 SL436—2008[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

(收稿日期:2017-10-29 编辑:刘晓艳)