

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.03.022

温度场探测堤坝集中渗漏研究综述

王新建¹, 许宝田², 陈建生³

(1. 华北水利水电学院资源与环境学院, 河南 郑州 450011; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;
3. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 将堤坝渗漏温度场探测问题研究过程分为 4 个阶段: ①完全定性分析阶段; ②原理模型定性分析阶段; ③理论模型初步应用阶段; ④系统化理论模型阶段。总结了各阶段的主要成果和研究特征, 揭示了这一研究领域的发展规律。据此, 探讨了温度场探测堤坝集中渗漏的研究方向, 初步建立了正分析模型, 指出了模型分析方法和实现反分析的途径。

关键词 堤坝安全; 渗漏; 温度场; 温度探测模型; 反分析; 综述

中图分类号 TV223.4; O357.3 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)03-0089-06

Status and prospects of research on temperature field tracer method used in leakage detection//WANG Xin-jian¹, XU Bao-tian², CHEN Jian-sheng³ (1. Faculty of Geotechnical Engineering of North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Geo-technical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The research process of temperature field tracer method used in detection of leakage from dams and dyes can be divided into four stages : the completely qualitative analysis , the establishment of a preliminary model , the application of the model , and the establishment of a systematic theoretical model . Characteristics of research results in every stage are summarized in detail . Furthermore , the development trend of temperature tracer technology is discussed , and the model analysis method and the approach to back analysis are proposed .

Key words : dam safety ; leakage ; temperature field ; temperature tracing model ; back analysis ; review

温度场探测堤坝渗漏是物探技术检测堤坝安全的发展和延伸。文献 [1] 把这种方法归为天然示踪法的一种, 总结了天然示踪法的特性和优点。天然示踪法区别于人工示踪法, 通过研究地下水温度、电导、磁场或环境同位素等自然物理场特征, 分析或计算堤坝中的渗漏通道位置。天然示踪法中的示踪剂来源于天然形成的物理化学场, 具有成本低、效率高、无污染等优点。

1 研究现状

综观温度场探测堤坝集中渗漏的研究过程, 大致可分为 4 个阶段。

1.1 完全定性分析阶段

完全定性分析阶段是利用温度探测堤坝渗漏的探索阶段, 这一阶段的研究都是定性分析。温度场探测堤坝渗漏国外起步较早^[2], 是从勘探地下水进行地温研究^[3-5]中得到启发的。1965 年起在美国加

利福尼亚州塞米诺土坝上首次进行了一项为期 3 a 的实测研究。通过观测发现, 6 月份测出的低温区正是沿下游坝面观察到的渗流量较大区, 得出低温和大量渗漏存在联系, 温度测值和抽水试验所得到的渗透系数有很好的负线性相关关系。还有研究认为, 流动的地下水会产生冷却的效果, 因而地温相对较低的部位可能存在流动的地下水^[6]。俄国学者在渗流热监测上也做了大量研究, 通过观察土坝中测压管水头是否有反常变化来判断坝体或坝基是否存在渗流异常^[7-9]。

国内有不少文献描述了温度在堤坝中的异常特征^[10-15], 通过绘制堤坝中的温度曲线或平面温度曲线^[10-18], 再参考堤坝环境(库水或江水、大气)温度变化特征进而判断堤坝是否存在渗漏^[10-14]。绘制的曲线有两类: 一是垂向温度变化曲线^[10-16, 18]; 二是水平向温度曲线^[2, 17]。文献 [2] 为了充分证明温度探测渗漏的可靠性, 绘制了不同深度的水平温度

基金项目: 华北水利水电学院高层次人才启动基金(200716)
作者简介: 王新建(1970—), 男, 河南遂平人, 博士, 从事岩土体渗漏理论与测试研究。E-mail: xinjianwang@163.com

曲线,若某位置存在渗漏通道,则该位置不同深度处的温度都有不同程度的异常。在此研究阶段,常把温度异常曲线和其他物探曲线做定性对比,或联合起来做渗漏分析^[10-17]。温度异常研究一是用于定性分析地下水渗漏的流速^[12],二是用于判定堤坝渗漏的位置。文献[15-16]对比分析了渗流速度与温度异常的关系;文献[10,13]进行了温度异常和水位变化关系的对比研究,认为温度曲线变化与水位升降有一定的相关性。由于集中渗漏和渗流的性质不同,高水位和低水位引起的渗透流速可能不同,进而影响通过土体的水量,最终导致热量传递和温度异常的差异。

在该研究阶段,文献[2,18]是单独用温度研究堤坝渗漏的突出代表,对温度数据的采集仪器、采集方法和影响因素做了详细的论述,并对温度数据进行了一系列的校正,包括测温探头校正、日温变化校正、深度校正、地形校正、岩性和地貌校正等。在没有温度数学模型的情况下,这些校正有时很难操作,特别是校正幅度和各因素校正比例难以确定;同时校正还要考虑热传导的滞后效应等。

温度的采集手段主要分两类,一是测量钻孔^[10-17]或1m深小孔^[2]中的水温,二是直接测量土体温度。利用钻孔采集温度数据时,温度异常分析常作为补充手段,钻孔一般不是为研究温度异常而特别设置的。探测精度会受到钻孔自身对流换热的影响,误差随钻孔直径的增大而增大。一般勘探钻孔孔径都比较小,孔内流体自身换热很慢,由于研究区域是在饱和土体中,渗流作用使钻孔和土体之间达到热平衡,能保持水体和土体基本相似的温度分布。测量工具是带有电缆的温度仪,每隔一段测量一个数据,优点是采集速度快,但当测量孔很深时由于电缆长、质量大,不断改变深度会不方便。直接测量土体温度时可将某一种管子楔入土体,在管子内部插入一连串的温度测试探头,等温度稳定后读取数据^[2]。文献[19]详细介绍了应用光纤进行堤坝温度测量和数据处理的方法,可供温度数据收集时参考。

总之,完全定性分析阶段的特征是没有建立产生温度分布的数学模型,更没有定量计算结果,感性认识和探测结果的定性分析是本阶段的主要研究方法和手段。

1.2 原理模型定性分析阶段

温度探测堤坝渗漏的第二个研究阶段是借鉴热传导理论建立土体温度探测理论模型。由于这些模型是基于原理性的,建立在十分理想的条件下,加之所需要热物理参数实测很困难,因此并没有利用这些模型计算实际问题,而是进行定性分析。

热源法是这一阶段原理模型的理论基础。严格地讲,热源法就是格林函数法^[20],热源仅仅是其中的一种特殊物理现象,数学上瞬时或点热源都可以用狄拉克(Dirac)分布函数—— δ 函数来表示,定义为

$$\delta(x-b) = \begin{cases} 0 & x \neq b \\ \infty & x = b \end{cases} \quad (1)$$

式中 b 为热源位置。这里的热源形式主要有面热源^[21]和线热源^[22-24]。前者借鉴热传导理论中平面持续热源法的温度分布方程,并绘出放热和吸热情况下土体中不同时刻的温度分布曲线和某点在两种情况下温度随时间的变化曲线。后者研究较多,文献[22]给出了土体热传导方程,严格根据格林函数进行解析;文献[23]引进土体在热传导过程中带有渗流项的传热方程,在此基础上探讨了利用钻孔中的温度分布判断不同岩性地层中垂向流的方法,定性分析了大尺度范围内有局部热源时的地温分布特征。

在线热源模型研究中逐渐形成了虚拟热源的概念。数学模型中的理想热源实际上是不存在的,把实际热源处理后代替模型中的热源项作等效处理是虚拟热源的基本原理。实际上,无论是面热源还是线热源都是有大小或者宽度的,而本文所涉及的热源法模型都是建立在 δ 函数对实际热源的假设上的,这样的模型即使能够用于实际计算,也无法直接求解渗漏通道的大小(半径)。

原理模型定性分析阶段的特点是依照热传导理论引进原理模型并建立了温度分布的方程,该阶段加深了人们对土体热交换理论的认识,丰富了分析方法,但仍没有把这些应用于计算实际工程问题。

1.3 模型初步应用阶段

这一阶段研究文献不多,并且理论模型都是热源法模型。文献[25]基于镜像法推导温度方程,考虑地面可能对温度分布有影响,先通过已知管涌(渗漏通道)引起的温度场数据求得模型中的参数,再用模型计算其他渗漏,适合于热源埋深浅的情况。计算上突破了定性分析实际问题的传统,缺点是对勘测有特殊要求,比如在测定系数上要求勘测线揭露管涌(渗漏通道),实际操作很难做到,其次是管涌通道的直径是根据温度曲线估计的,温度数据来源于未经校正(井水对流换热对曲线有影响)的井水温度等。

文献[26]主要基于能量守恒热源法,即渗漏通道从土体中带走的热量等于引起土体温度变化所损失的能量,即 $Q_{\text{水}} = Q_{\text{地}}$, $Q_{\text{水}}$ 表示渗漏水吸收的热量, $Q_{\text{地}}$ 表示地层释放出的热量。通过建立虚拟热源法模型,可以计算渗漏通道的半径、渗漏流量,还可以方便地判断地层中渗漏通道的数目。缺点是必

须已知与渗漏通道相近的温度。在确定渗漏通道的温度时,采用图示法应用方便但误差较大。

在堤坝渗漏安全研究中,确定渗漏通道的位置是进行堤坝渗漏整治的前提和基础。因而如何运用温度场探测渗漏通道位置是重点。文献[1]在上述研究成果的基础上,详细分析了渗漏渗流在土体中的运移特征、热传递的特征、环境(库水、渗水和尾水等)温度与土体热传递的关系等,最后在最低温平面上利用模型计算出土坝集中渗漏通道的空间位置、展布特点、范围和渗漏强度。

总之,该研究阶段的特点是在模型化的基础上取得了定量计算的长足发展,在利用温度场计算渗漏通道的参数上有了很大进展。缺点是没有考虑土体的复杂热边界条件,某些重要参数仍然依赖热源法定性分析(包括图示法)或对勘探有特殊要求。

1.4 系统化理论模型阶段

为了更加准确地探测堤坝集中渗漏的位置,必须建立更符合工程实际的系统化理论模型。文献[27-28]利用基本的热传导理论建立了简单边界条件下的探测模型,并应用数值迭代法求解得出热源位置及其他参数的近似值。

数学模型的假设 ①渗漏通道充满流水,土体和孔隙水构成均一且各向同性导热介质。②在渗漏通道横截面内,水流自身对流换热快,流体本身不存在温度差异。但由于同周围土体发生热交换,顺通道流动水流在渗漏方向上存在温度梯度。③在渗漏发生一段时间后,渗流和温度场达到稳定状态。④土体初始温度场均匀,渗漏对温度场的影响范围和堤坝尺寸相比很小。⑤由于钻孔直径很小,土体温度用钻孔水体温度代表。

简化后最终方程如下:

$$\exp\left[2\left(\frac{T-C_2}{C_1}\right)\right] = x^2 + (d-y)^2 \quad (2)$$

式中: T 为温度; C_1, C_2 为仅与边界条件和介质物性有关的参数; x, y 为测点相对于热源的坐标; d 为热源埋深。

文献[28]建立了考虑渗流影响的复杂边界条件下的土体热传导模型,求解了简化边界条件后的解析解,并把方程解作变量转换,把渗漏通道位置和其他参数作为未知变量,建立目标方程,最后利用反分析技术实现用温度场探测渗漏通道位置。

该阶段系统地论述了渗漏土体中热传导的机理,对各种环境温度做了理论分析,初步提出完备的数学模型,提出了系统化理论模型和新的研究思路;不足之处是模型假设过多,计算中的边界条件过于简单,可能存在较大的误差。

2 研究展望

有效解决温度场探测堤坝集中渗漏的思路有两种:一是对所有的堤坝渗漏问题建立统一的温度探测模型。有渗漏的堤坝传热过程相当复杂,影响温度分布的因素很多,这样势必造成模型庞大,求解困难。二是针对不同的渗漏问题建立不同的温度探测模型。表1是堤坝渗漏问题的分类,可供建立具体模型时参考。结合以上研究,要完善温度探测渗漏研究,还需要做如下几方面的工作。

表1 模型组织结构分类

温度探测模型	渗漏通道类型	线性 渗漏通道不大,等效热源
		柱状 作为渗漏模型的边界条件处理
		面状 断裂,平直界面均匀渗漏
	传热类型	稳态 适合渗漏时间长、导热系数大的岩体
		瞬态 适合土体,考虑时间因素的影响

2.1 圆柱状渗漏温度探测综合模型

2.1.1 热传导方程

假设 ①土体是均匀多孔介质;②传热过程由土颗粒热传导和渗流换热共同完成;③忽略流体的动能和耗散。

基于以上分析,井水温曲线是渗流、地热和渗漏通道传热的综合结果。要分解井水温曲线需要建立传热模型。有渗流时多孔介质的能量方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

式中: ρ, ρ_w 分别为饱和土体与水的密度; c, c_w 分别为饱和土体与水的比热容; $\mathbf{v}$ 为渗流速度场; k 为热传导系数。

2.1.2 温度边界条件

模型的温度边界条件为:①地热的影响可以等效为作用在底面边界上的常热流 q ,利用不受渗漏影响的温度梯度估计其值: $q = -k \frac{\partial T}{\partial n}$ 。②土坝上边界为第一类边界条件: T 为常数或对流换热条件。

③横向上认为土坝无限宽,为绝热边界: $k \frac{\partial T}{\partial n} = 0$ 。

④初始条件 $t = 0, T = \lambda y + T_0$,其中 y 为深度, T_0 为坝顶温度, λ 为深度上的温度梯度。以上问题的解析解可表达为 $T = f(x_i, \beta_j)$,其中 x_i 代表热源位置, β_j 是其他有关参数。

2.1.3 非线性评价

众所周知,线性回归简洁快速,非线性模型的线性化回归是解决非线性模型的主要传统途径之一,条件是非线性模型的非线性程度不是很强。评价非线性模型的两个主要指标^[29]是模型固有非线性曲率 α^T 和参数效应非线性曲率 α^N :

$$\alpha^T = \frac{4 \| C^T dX^2 \|_2^2}{V'V} \quad (4)$$

$$\alpha^N = \frac{4 \| C^N dX^2 \|_2^2}{V'V} \quad (5)$$

式中: V, V' 分别为误差行向量和列向量; C^T, C^N 分别为函数二阶偏导数矩阵在解轨迹切空间和法空间上的投影。非线性模型进行线性处理的判别依据是 ① $\alpha^N > 1, \alpha^T > 1$, 表明非线性模型的非线性很强, 线性化所产生的模型误差大于观测误差。② $\alpha^N < 1, \alpha^T < 1$, 表明模型的非线性不是很强, 可以采用线性近似。③ $\alpha^N < 1, \alpha^T > 1$, 表明参数效应非线性很强, 固有非线性不是很强, 通过参数变化后可以对模型进行线性化处理。④ $\alpha^N > 1, \alpha^T < 1$, 说明参数效应非线性弱, 但模型的固有非线性很强, 不能进行线性近似。

2.1.4 反分析

反分析法的基本原理参看文献 [30]。将正分析所求结果作变量变换, 将热源位置、发热量等作为未知量, 探测温度数据作为已知量进行模型的求解计算。

a. 回归分析。由于采集的数据受各种因素影响以及由于模型的简化, 计算结果会有误差。在数据充足的情况下, 可以通过非线性回归求解热源强度和位置, 以增加探测的准确度。渗漏探测非线性回归基于一般的非线性回归模型, 可以表示为

$$T = f(X, \beta) + \varepsilon$$

式中: X 为可观察的测试位置随机向量; β 为待估的渗漏通道位置等参数向量; T 为独立观察变量温度, 它的均值依赖于 X 与 β ; ε 为随机误差。

b. 用模拟退火法实现参数最优化。由于所研究问题的复杂性, 利用一般的拟线性回归分析很难得到全局最优解, 模拟退火法可以增大现实全局最优化的可能性。最优化的目的是使目标函数 $S(\beta)$ 取得最小值, $S(\beta)$ 最小的那个解 β 即为回归模型的最终解。

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [T_i - f(X_i, \beta)]^2$$

c. 数值最优化方法。拟线性回归和模拟退火法都是建立在正分析的解析解基础之上。非稳态温度微分方程多为超越方程, 其根含有级数, 通过回归分析得到真实解比较困难, 这时正分析和反分析都适宜采用数值方法, 但当变量较多或搜索范围较大时, 常见问题是不能保证实现全局最优化、计算不收敛及计算时间太长等。

2.2 多通道渗漏温度探测模型

堤坝中往往会发生多个渗漏通道, 这时温度场

是多渗漏通道传热作用的叠加。用虚拟热源法可以判定多渗漏通道 [26]。利用叠加原理将正问题的各个解组合成一个, 再进行反分析, 然后在反分析目标函数中作如下处理: 假设渗漏通道的 j 个正问题的解为 $T_j = f_j(X_j, \beta_j) + \varepsilon_j$, 分别有 i 个测量, 则最小化的目标函数为

$$S(\beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^n [T_{ji} - f(X_{ji}, \beta_j)]^2 \right\}$$

式中: m 为渗漏通道的个数; n 为测量点的个数。

2.3 周期变化边界条件下的温度场探测模型

堤坝处于不断变化的环境中, 库水温度也随外界环境温度的变化而变化, 因而即使渗漏和渗流都达到平衡, 在不同的月份、不同日期以及同一天不同时刻测量值都是不同的。温度数据的采集不可能同时完成, 而且不同采样地点的温度受到的影响即使在同一时刻也是不同的, 因而考虑周期变化的温度边界条件是必要的, 一般假设这种周期的边界条件是 [20]

$$T(t) = \bar{T}_w + \bar{T}_w \cos(\omega t + \theta)$$

式中: $\bar{T}_w$ 为简谐温度波的平均值; $\bar{T}_w$ 为相对于 $\bar{T}_w$ 的温度波幅; ω 为温度波的角频率; θ 为温度波的初始相位。根据线性叠加原理, 由此边界条件引起的物体内部的温度分布也可以分为两部分, 一部分是恒定边界温度 $\bar{T}_w$ 引起的 $T_1(X, t)$ 温度分布, 另一部分是围绕 $\bar{T}_w$ 的一个单纯简谐温度 $\bar{T}_w \cos(\omega t + \theta)$ 引起的温度分布 $T_2(X, t)$ 。

2.4 仿真模型及专家系统

仿真模型还需进行耦合分析和数据校正。

a. 耦合研究。渗漏堤坝的温度场研究包含两个层次的耦合。首先是管流和渗流的耦合研究, 渗漏和渗流是两种截然不同的流动状态, 可把集中渗漏看作具有一定粗糙度的管道流。在以上模型的基础上, 采用管流和渗流耦合可使模型更趋于真实。文献 [31] 给出了管流-渗流耦合方程, 在改变边界条件的情况下, 可得出总流量和压降之间的关系, 其中包含了关于管道的未知参数, 这些未知参数可以作为回归分析中的未知参数。其次是温度场和渗漏场的耦合研究, 一方面渗漏影响热流流动, 另一方面温度会影响流体的流动特性。单独研究温度和流场耦合的文献 [32] 不多, 一般是温-流-固耦合研究 [33-34] 较多, 通过简化可作建模参考。

b. 数据修正。来自于探测井的温度数据尤其要进行修正, 首先建立井水自然流动换热模型, 并加入到回归或者优化分析中去。对于实际工程来说, 上述仿真探测渗漏系统建立过程相当复杂, 可通过现代计算机手段建立直接由测量数据得出结果的专

家系统,以便快速、准确、方便地得到仿真结果。专家系统研制流程如图1所示。

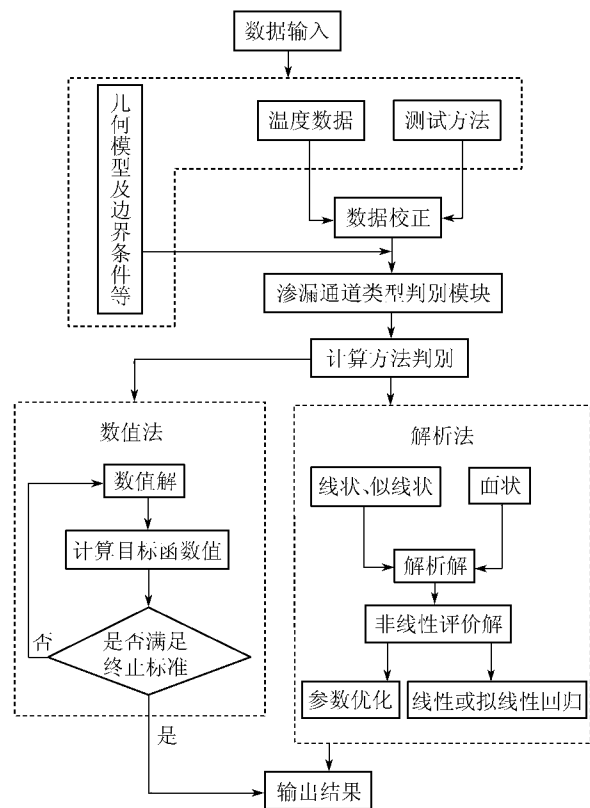


图1 专家系统研制流程

3 结 语

本文详细提出了温度场探测堤坝集中渗漏的发展方向、模型雏形和最终目标,但作为堤坝渗漏研究的新领域,温度探测堤坝渗漏研究还有很大的拓展空间,作为一个跨学科研究课题,需要综合多方面的知识。只有充分考察渗漏、渗流机制以及影响该过程的诸多主要因素,才能建立能够模拟真实过程的仿真系统。目前岩土体的热性能实验分析尚十分欠缺,诸多含水岩土体的参数难以得到,温度探测渗漏仿真模型还需要完备的岩土体热物理实验作为支撑。数值计算方面,对于含有特殊函数或者复杂方程组的反分析还需要研制专门的计算程序。

参考文献:

- [1] 王新建,陈建生,陈亮.天然示踪法在灰土坝渗漏探测中的应用[J].水利水电科技进展,2005,25(6):67-74.
- [2] ARMBRUSTER H, TROGER I. 温度量测法探测土中的渗流[J].林叔忠,译.广东水利水电,1994(3):15-17.
- [3] BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS I S. Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile[J]. Water Resource Research, 1965, 2: 325-328.
- [4] DRURY M J, JESSOP A M, LEWIS T J. The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes[J]. Geothermics, 1984, 13: 163-174.

- [5] HURTIG E, GROSSWIG S, JOBMANN M, et al. Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes: experimental application for fluid logging[J]. Geothermics, 1994, 23: 355-364.
- [6] ZHOU Hui-lin, Tian Mao, Chen Xiao-li. Feature extraction and classification of echo signal of ground penetrating radar[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2005(6): 1009-1012.
- [7] IKUTA R, YAMAOKA K, MIYAKAWA K, et al. Continuous monitoring of propagation velocity of seismic waves using ACROSS[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(13): 1627-1629.
- [8] MYXER H A, ДИИОВ. 将温度作为土石坝性态的指示因子[J]. 苏伯林, 译. 大坝观测技术, 1994(2): 22-24.
- [9] NAGAO T, UYEDA S. Heat flow measurements in the northern part of Honshu using shallow holes[J]. Tectonophysics, 1989, 164: 31-314.
- [10] 刘建刚, 魏兵荣, 包明文, 等. 马家沟水库大坝渗漏示踪分析[G]. 红水河, 2005, 24(2): 70-72.
- [11] 杜国平, 曹建辉, 李国凡, 等. 示踪技术堤坝水库绕坝渗漏研究中的应用[J]. 地下水, 1998, 24(4): 172-177.
- [12] 杨松堂, 陈建生. 小浪底坝肩绕坝渗漏的综合示踪研究[J]. 西部探矿工程, 2003(7): 1-3.
- [13] 刘建刚, 陈建生, 陈亮. 综合示踪方法探测复杂堤基渗流定性[J]. 地质与勘探, 2002, 38(2): 4-6.
- [14] 刘建刚, 陈建生. 基岩渗漏成因病险堤坝的两个典型实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 684-689.
- [15] 刘建刚, 陈建生, 陈亮. 小浪底缓倾角结构坝基的渗漏及示踪探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1339-1343.
- [16] 葛建. 综合示踪方法探测陡河水库堤基渗流场[J]. 南通职业大学学报, 2005, 19(2): 64-69.
- [17] 陈建生, 张发明, 杨立昂, 等. 探测库水绕坝基岩体渗漏的综合示踪方法研究[J]. 工程勘察, 1999(1): 34-38.
- [18] 金旭, 竹内笃雄, 陈晓冬, 等. 大坝和堤防渗漏快速探测的浅层地温测量方法[J]. 大坝与安全, 2004(1): 20-23.
- [19] 魏德荣, 赵花城, 秦一涛. 基于光纤温度测量的渗漏监测技术[J]. 浙江水利科技, 2004(2): 19-21.
- [20] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 283-336.
- [21] 刘建刚, 陈建生. 平面热源法在北江大堤石角段堤基渗漏分析中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2002(3): 63-65.
- [22] 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, 2003, 5(12): 37-39.
- [23] 董海洲, 陈建生. 利用温度示踪方法探测基坑渗漏[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2085-2090.
- [24] 陈建生, 董海洲, 余波. 利用线热源法研究堤防集中渗漏通道[J]. 地球物理学, 2003, 18(3): 400-403.
- [25] 董海洲, 陈建生. 利用孔中温度场分布确定堤坝渗透流速的热源法模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 40-43.
- [26] 陈建生, 董海洲, 吴庆林. 虚拟热源法研究坝基裂隙岩体渗漏通道[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4019-4024.

- [27] 王新建 陈建生. 温度探测土坝圆柱状集中渗漏模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(4): 31-36.
- [28] 王新建 陈建生. 堤坝集中渗漏温度场探测模型及数值试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 81-86.
- [29] 王新洲. 非线性模型能否线性化的使用依据[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(2): 145-148.
- [30] 肖庭延, 于慎根, 王彦飞. 反问题的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 13-69.
- [31] 段永刚 陈伟 黄诚. 井筒与油藏耦合条件下的水平井非稳态产能预测(I): 数学模型[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 11-15.
- [32] 黄涛 杨立中. 隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 554-559.
- [33] 黄涛 杨立中, 陈一立. 工程岩体地下水渗流-应力-温度耦合作用数学模型的研究[J]. 西南交通大学学报: 自然科学版, 1999, 34(1): 11-15.
- [34] 韦立德 杨春和. 考虑饱和-非饱和渗流、温度和应力耦合的三维有限元程序研制[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 100-104.

(收稿日期 2007-04-18 编辑 骆超)

(上接第 69 页) 在防洪决策支持系统中, 单纯利用水文学模型不能有效地模拟干流水位和淹没范围; 单纯利用水力学模型无法模拟流域内复杂的产汇流情况, 也不能准确地计算河道的区间入流情况。基于此, 本文尝试采用分布式概念性水文模型与一维洪水演进模型、二维洪水淹没模型相嵌套, 以松散结合方式组成防洪决策支持系统, 进而模拟了青岛大沽河流域干流洪水演进和淹没情况。

本文建立的系统已在青岛大沽河流域实际的防洪任务中发挥了积极作用, 通过未来几年洪水资料的率定和验证, 能够不断提高预报精度和水平。但是该系统还有较大的发展空间, 具体表现在: 基础资料和数据还需要更新和完善, 包括土壤类型、植被情况以及铁路、公路的地形更新等。同时, 该流域实测流量过程非常少, 很多关键参数只能凭借使用者的经验, 使得系统的准确性有所降低。另外模型结果的直观显示等方面也有待完善, 有必要开发表达更形象的三维立体显示功能等。

参考文献:

- [1] 李纪人. 数字地球与数字水利[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 14-16.
- [2] 芮孝芳, 石朋. 数字水文学的萌芽及前景[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 55-58.
- [3] 芮孝芳. 洪水预报理论的新进展及现行方法的适用性[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5): 1-4.
- [4] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 563-572.
- [6] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool[R]. Texas: Grassland Soil and Water Research Laboratory, 2005.
- [7] 周学漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [8] 黄炳彬, 方红卫, 刘斌. 复杂边界水流数学模型的斜对角笛卡尔方法[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2003, 18(6): 679-685.
- [9] 余常昭. 水力学: 下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [10] 滕胜叶. 青岛市大中型水库防汛控制运用资料汇编[G]. 青岛: 青岛市水利局, 1999.
- [11] 青岛市水利勘测设计研究院. 青岛市大沽河防洪工程规划[R]. 青岛: 青岛市水利局, 1999.
- [12] 万洪涛, 周成虎, 万庆, 等. 地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 560-568.

(收稿日期 2007-07-12 编辑 骆超)

(上接第 83 页)

- [27] 张幸农 应强 陈长英, 等. 江河崩岸现象形成原因和机理的研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.
- [28] ZHANG Xing-nong, YING Qiang, CHEN Chang-ying, et al. Experimental study on mechanism of bank collapse in the Yangtze River[C]//SHAO Xue-jun. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation: volume III. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1654-1658.
- [29] 刘东风. 长江安徽段崩岸原因分析及工程防护方案思考[C]//长江护岸工程及堤防防渗工程技术经验交流会(第六届) 论文汇编. 武汉: 长江重要堤防隐蔽工程建设管理局, 长江科学院, 2001: 70-75.
- [30] 黄本胜, 白玉川, 万艳春. 河岸崩塌机理的理论模式及其计算[J]. 水利学报, 2002(9): 49-60.
- [31] 刘汉龙, 朱伟, 高玉峰. 堤防崩岸机理及其对策探讨[C]//堤防加固技术研讨会论文集: 下册. 南昌: 水利部

国际合作与科技司, 1999: 41-45.

- [32] 徐永年 梁志勇 王向东, 等. 长江九江河段河床演变与崩岸问题研究[J]. 泥沙研究, 2001(4): 41-46.
- [33] 岳红艳, 余文畴. 层次分析法在崩岸影响研究中的应用[C]//长江护岸工程及堤防防渗工程技术经验交流会(第六届) 论文汇编. 武汉: 长江重要堤防隐蔽工程建设管理局, 长江科学院, 2001: 23-30.
- [34] 成昆煌, 张荣国, 姜树海, 等. 长江九江市城防大堤溃口技术原因分析报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 1998.
- [35] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利水电大学学报, 1999, 32(1): 21-23.
- [36] 王小波, 刘红星. 影响长江中下游干流河段岸坡稳定的因素分析[C]//长江护岸工程及堤防防渗工程技术经验交流会(第六届) 论文汇编. 武汉: 长江重要堤防隐蔽工程建设管理局, 长江科学院, 2001: 65-69.

(收稿日期 2007-05-28 编辑 骆超)