

溃坝问题研究综述

王立辉¹ 胡四一²

(1.浙江省水利河口研究院防灾减灾所,浙江 杭州 310020;2.南京水利科学研究院水文水资源所,江苏 南京 210024)

摘要:针对大坝的安全及溃坝问题,从理论分析、物理试验、数值模拟、模型研究、资料统计分析等方面对溃坝问题的研究进行了综述,概括归纳了目前国内外在溃坝研究上的重点、研究方法和阶段成果,分析了各种研究方法的特点以及国际上关于溃坝研究的发展动向。

关键词:溃坝;大坝安全;数值模拟;综述

中图分类号:TV698.2+37 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)01-0080-06

Study on dam failure-related problems//WANG Li-hui¹, HU Si-yi²(1. Department of Disaster Prevention and Mitigation, Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: A review was made of the study on dam failure-related problems from the angles of theoretical analysis, numerical simulation, physical experiment, model study, data analysis, and so on. The key points, research methods, and stage achievements in dam failure research at home and abroad were summarized, and characteristics of different research methods and the trend of further study on the problems were analyzed as well.

Key words: dam failure; dam safety; numerical simulation; review

大坝溃决时,库区蓄水将突然下泄,造成下游水位陡涨和库水位陡降,这种非恒定流,包括坝址上、下游河道的水流波动称为溃坝波^[1],它是一种断波,水流的一些物理参数在断面上产生间断,其数学模型为圣维南方程组的黎曼问题。溃坝洪水与其他类型的洪水相比,具有其特殊性,影响因素复杂,产生机理目前仍不完全清楚,溃决过程中溃决模式(瞬溃、渐溃)、溃口形状、决口泥沙输运、边坡稳定性、决口的扩展过程、下游河床的水文水力因素等都会影响溃坝洪水波的传播。溃坝洪水理论上属于洪水水力学的范畴,但溃坝洪水波往往发生于大坝和堤防的突然溃决时段,其流量、水位在极短的时间内急剧变化,波形在传播过程中发生间断,流态急剧变化^[2],其分析计算需要采取特殊的方法作特殊的处理。

1 溃坝问题的控制方程

明渠中的溃坝波的传播通常由浅水方程来描述,它是 Navier-Stokes 方程组在不可压缩流体和静水压的假设下沿垂向积分的平均值。

1.1 一维溃坝问题的控制方程

忽略旁侧水流的一维浅水方程组一般形式:

∂U/∂t + ∂F/∂x = S (1)

其中 U = (A, Q)^T (2)

F = (Q, Q²/A + gI₁)^T (3)

S = (0, g(A(s₀ - s_f) + I₂))^T (4)

式中: x 为沿明渠的空间坐标; t 为时间坐标; Q, A 分别为断面的流量和湿周面积,两者均为 x 和 h 的函数,其中 h 为水深,是 x 和 t 的函数; g 为重力加速度; s_0 为河床底坡; s_f 为摩阻坡度; I_1 和 I_2 为静水压力项:

I₁ = ∫₀^h (h - η) B(x, η) dη (5)

I₂ = ∫₀^h (h - η) (dB(x, η)/dx) dη (6)

式中 $B(x, h)$ 为明渠水深 $h = \eta$ 时的湿周断面宽^[3]:

B(x, η) = ∂A(x, η)/∂η (7)

对于非单一湿周断面明渠,其明渠沿程湿周断面可以表示为下面的函数关系式:

A(x, h) = α(x) hⁿ (8)

式中湿周断面形状系数 n 在同一形状的明渠中是常数, $α(x)$ 则随明渠方向的距离 x 而变化。当 $n = 1$ 时明渠湿周断面为矩形, $α(x)$ 则是矩形湿周断面明渠

的底宽 ; $n = 2$ 时为三角形 , $a(x)$ 为三角形斜边的坡度 ; $1 < n < 2$ 时为凹形湿周断面 ; $n > 2$ 时为凸形湿周断面(见图 1)。

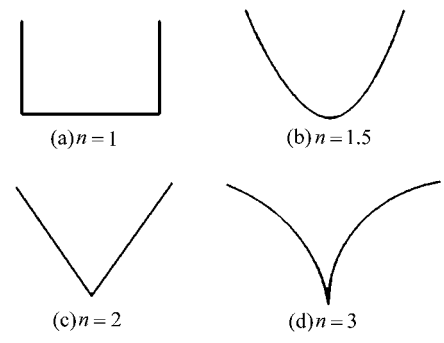


图 1 典型明渠断面

将式 (7) 和式 (8) 代入式 (5) 和式 (6) 得

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) a n \eta^{n-1} d\eta = a \frac{h^{n+1}}{n+1} \quad (9)$$

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) n \frac{da}{dx} h^{n-1} d\eta = \frac{h^{n+1}}{n+1} \frac{da}{dx} \Big|_{h=\text{常数}} \quad (10)$$

1.2 二维溃坝问题的控制方程

控制二维水流运动的浅水方程由连续方程和动量方程组成^[4] :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{U} = (h, uh, vh)^T$ (12)

$$\mathbf{F} = \left(uh, u^2h + \frac{gh^2}{2}, uwh \right)^T \quad (13)$$

$$\mathbf{G} = \left(vh, vwh, v^2h + \frac{gh^2}{2} \right)^T \quad (14)$$

$$\mathbf{S} = (0, ghS_{ox}, ghS_{oy})^T + (0, -ghS_{fx}, -ghS_{fy})^T \quad (15)$$

式中 : u 和 v 分别为 x, y 方向的平均流速 ; h 为水深 ; g 为重力加速度 ; S_{ox}, S_{oy} 分别为 x, y 方向的底坡 ; S_{fx}, S_{fy} 分别为 x, y 方向的摩阻坡度。在本文中摩阻坡度用曼宁公式来计算 :

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (16)$$

式中 n 为曼宁系数。

2 溃坝问题的试验研究

尽管目前数值模拟是溃坝研究的主流 ,从工程实际应用的角度来看 ,溃坝的模型试验仍必不可少 ,特别是大型的工程 ,模型试验的参数是工程设计和施工的主要依据 ,同时模型试验的结果能用来验证数值模拟计算方法的可行性。

溃坝的模型试验最早出现在 19 世纪中期的法国。1892 年获得溃坝问题的 Ritter 解后 ,20 世纪人

们做了一系列的试验来进行校核。这些试验^[1]表明 ,水槽闸板抽起后 ,闸门断面的水深与 Ritter 解接近 ,但闸板断面上游各瞬时的水面线都不符合 Ritter 解(即向上弯曲而不是向下弯曲)。此外 ,负波向上游传播的速度也比 Ritter 解约大 40%。

在土石坝溃决方面 ,美国和奥地利在 20 世纪五六十年代进行了大量的室内试验^[5] ,美国甚至还在现场做过 1:2 的大模型试验。根据两国的试验结果进行分析 ,两国的溃决时间尺度关系式基本一致 ,另外 ,对于同样的护坡块石 ,坡度减缓时 ,冲开坝坡的临界水头也会显著增加。如当下游坝面坡度由 1:1.5 减小到 1:2 时 ,试验表明临界水头增加 15%。

欧洲在最近几年投入巨资专门对溃坝洪水进行了全面的比较研究 ,1998 年由欧盟支持启动的 CADAM 项目^[6]历时 2 年 ,和随后启动的 IMPACT 项目^[7]都对土石坝的溃坝机理进行了大量的模型试验研究 ,取得了丰硕的成果。

1958 ~ 1959 年 ,中国水利水电科学研究院为配合三峡工程设计和科研任务 ,在林秉南教授^[1]的主持下进行了水平比尺为 1/30 000、垂直比尺为 1/300 的三峡小比尺变态模型溃坝试验 ,坝前库水位为 170 ~ 200 m ,相应库容为 344 亿 ~ 732 亿 m^3 ,模型试验按库水位高程、各种溃决形式选取了 23 个不同组合条件进行试验 ,确定了洪水波演进路线、下游淹没范围、灾害损失以及相应的防护对策等。试验得到了三峡溃坝洪水的明显特征和一些规律性的认识。在此试验的基础上 ,长江水利委员会在 20 世纪 80 年代进行了水平比尺为 1/500、垂直比尺为 1/125 的三峡大坝大比尺变态模型溃坝试验 ,对不同的入流条件和溃决条件等组合进行了 200 多次试验^[1]。

20 世纪 70 年代黄河水利委员会水利科学研究院对小浪底水库进行了溃坝试验 ,模型长 180 m ,水平比尺 1/1 000 ,垂直比尺 1/100 ,模型试验给出了溃坝流量过程线的经验公式^[5]。“75.8”板桥水库溃坝后 ,铁道部对板桥水库进行了模型试验 ,对溃坝口门进行了溃决试验和数学模型计算等方面的工作^[8]。

就目前研究而言 ,溃坝的试验研究仍过于简单 ,只能跟踪溃坝的水位 ,不能测定溃坝非恒定流流量。随着 PIV(粒子图像测速法)等现代流体测试技术在水力学中的应用 ,溃坝非恒定流流量测定有可能成为现实。

3 溃坝问题的理论分析

溃坝的研究从数学物理的角度可归结为求解控制水流运动的圣维南方程组的黎曼问题。1871 年圣维南提出的明渠非恒定流控制方程组(圣维南方

程组)为溃坝问题的水力学分析奠定了理论基础。1892年 Ritter 假设下游为干河床,忽略河床起伏和河床剪切摩擦作用,利用圣维南方程组的特征形式,第一次得到了矩形断面瞬时全溃问题的简化解(Ritter 解),但此解析解并不符合实际,由于河床摩擦作用,波峰向下游运动的速度和剖面与 Ritter 解存在误差。1949年和1957年 Stoker^[9]在 Courant 和 Friederich 的研究成果基础上,忽略河床起伏和摩擦作用,将坝址流态分为连续波流、临界流、不连续波流3种流态,将 Ritter 解扩展到下游有水的情形。1970年 Su^[10]将 Dressler 的摄动解^[11]推广到不同断面明渠中,给出了矩形、三角形、抛物线形断面明渠考虑摩擦作用时水面曲线和平均速度分布的一阶摄动解。1980年 Chen 等^[12]研究了考虑摩擦作用时有限长水库的溃坝问题。1980年林秉南^[13]利用特征理论和黎曼方法获得了有限长水库抛物形断面明渠平底瞬时全溃问题的解析解。1982年和1984年 Hunt^[14]将溃坝波近似地看作运动波来研究倾斜河床的溃坝问题。1982年陆吉康等^[15]利用特征理论和黎曼方法研究了抛物形断面倾斜明渠考虑摩擦作用的瞬时全溃问题的解析解。

在研究倾斜底坡的溃坝问题方面, Su^[10]利用扰动系列,获得逆行波峰达到上游边界的有效时间的近似解。Hunt^[14]对陡坡河床下游洪水波覆盖的有效距离接近坝址以上4倍水库长度的地区给出了一个纯运动波解。Smith^[16]对倾斜平面上缓慢的黏滞性稳定三维流给出了一个相似解,适用于海洋深处的水流。

由于圣维南方程组的拟线性及水流的不连续性,溃坝问题的分析求解难度较大,目前溃坝问题的解析解仅限于几个很简单的实例,即使对一维溃坝问题解析解的研究也不是很深入。因此,溃坝机理的研究将是今后溃坝问题研究的一个重点和难点。

4 溃坝问题的数值模拟

研究溃坝决堤现象比较可靠的手段是模型试验和应用计算机进行计算,特别是随着计算机和数值计算方法的迅速发展,数值求解圣维南方程组的黎曼问题逐渐成为了研究溃坝波的主要手段,特别是在研究区域的边值条件和初始条件较为复杂时,数值模拟的优越性更为明显。溃坝波的数值计算开始于最初的数值图解和20世纪初的微波运动分析,后来由于计算机技术的迅速发展,特征理论、有限差分法、有限元法和有限体积法在计算水力学上发挥了很大的作用,并解决了不少实际问题。目前求解圣维南方程组的数值方法很多,按离散的基本原理可

分为特征线法(method of characteristics)、有限差分法(finite difference method)、有限元法(finite element method)、有限体积法(finite volume method)等^[17],上述方法各有特色,在工程实践中得到了广泛的应用。

在我国,系统研究溃坝数值模型始于20世纪70年代^[13],以后针对我国一些水库的实际问题开展了一些模型研究,其中一维模型的研究成果较多,平面二维数值溃坝洪水计算成果相对较少,且多为较理想的边界情况^[18]。对于溃坝水流这种强间断的水流,由于其流态复杂和各种边界条件的影响,高精度、高分辨率的计算模型在实际工程应用中仍存在不确定性。此外,现有溃坝模型对于土石坝和堤防工程溃口流量过程计算采用的一些假定任意性较大,如何考虑溃口发展过程仍然是目前溃坝计算模型中没有得到很好解决的重要技术问题。

4.1 特征线法

特征线法最初源自 Massau 对浅水方程的图解积分,在 $x-t$ 平面上绘制特征线,在其交点上确定因变量来求解。特征线法将时间和空间离散一起处理,其优点是能反映问题中信息沿特征线传播的特点,算法符合浅水流动的机理,稳定性好,计算精度高,较适于解双曲型问题,对于求解周期短、流体变量变化急剧的溃坝问题效果较好。但是,由于特征线往往不在所需要的位置上相交,通常要在需要的位置上采用插值技术,给数值计算带来困难。为了避免特征线的这些不足, Hartree^[19]发展了特征有限差分法,该方法是通过指定计算时段,反求相交于指定时段的特征线来控制计算点的分布。林秉南在20世纪40~50年代曾对浅水方程的特征理论有过深入的研究^[1]。特征线法不足之处在于求解格式复杂,尤其对高维问题更为烦琐,因此,目前很少用于实际的数值计算,多作为理解其他数值方法的基础。

4.2 有限差分法

有限差分法是数值计算最早采用且至今仍被广泛应用的基本方法。其基本思路是将求解区域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解区域,用泰勒级数展开等方法将控制方程中的微商用差商代替进行离散,再建立代数方程组来求解。其数学概念清晰,简单灵活,解的存在性、收敛性和稳定性早已有较完善的研究成果,是比较成熟的数值方法。

Chow 等1973年提出了基于有限差分法、可处理间断与支流入流的非恒定流模型^[20]。Sakkas 等^[21]于1978年建立的模型将特征线法用于移动网格,可模拟缓流与急流、连续流与间断流,且可处理复杂地形。槐文信等^[22]用贴体坐标变换与剖开算

子法,在计算平面的交错网格上对控制方程进行隐格式离散,进行了洪潮遭遇情况下的水动力学计算。胡四一等^[23]对高性能差分格式在明渠非恒定流计算中的应用进行了有益的探讨。

4.3 有限元法

流体力学的有限元法借鉴于固体力学的有限元法,在20世纪60年代开始应用于流体数值计算,其理论基础是变分原理和剖分、插值技术。常见的有限元计算方法有直接法、变分法、加权余量法及能量平衡法等,有限元法适应性强、精度较高,原来存在的计算格式复杂、计算量较大、大型系数矩阵求解困难等问题,都随着算法的优化和计算机性能的不断改进已不再是难以解决的问题。但是有限元法对连续性要求限制了其处理流体参数大变形的能力,捕捉锐利波形比较困难,针对这种情况,发展了对间断问题处理能力较强的间断有限元法(discontinuous finite element method)^[24-25]。

4.4 有限体积法

有限体积法的基本思路是把计算区域离散为若干点,以这些点为中心,将整个计算区域划分为若干互相连接互不重叠的控制体。在有限体积法的计算中,将基本方程对每个控制体积分,得到一组以计算节点上的物理量为未知数的代数方程组,同时方程组离散沿坐标方向进行,形成的离散网格和离散方程与有限差分法相似,由于采用守恒型的微分方程并对每一计算体进行质量和动量守恒形式的离散,使得微分方程包含的守恒性质在每一个控制体都得到满足,保持各单元两侧相邻控制体的计算数值通量相等,整个计算区域上也能保持守恒性质。有限体积法兼有有限差分法的物理概念清晰和有限元法的适应不规则网格、复杂边界条件及计算精度较高的特点,因此在流体动力学的数值计算领域有着很大的发展潜力。

国外对有限体积法的研究较早,也较完善^[26-27]。一些大型流体计算软件也运用了有限体积法(如Fluent,Star-CD等)^[28]进行计算,计算结果较为理想。同时,国外将有限差分法的TVD概念引入有限体积法,构造了许多高分辨率的有限体积法TVD格式^[5-29]。Zhou等^[30]1994年建立了以无结构三角形或四边形网格、采用Osher格式的有限体积法模拟二维非恒定流的模型,用于Florida的Kissimmee河流域的水流模拟。国内,王船海等^[20]于1996年将流域径流概化为调蓄单元的零维模型、河道水流的一维模型、洪泛区的二维模型,采用直接坐标系下非均匀网格的有限体积法进行流域的溃坝洪水模拟,胡四一等^[31]在研究溃坝波的数值模拟上

参考了空气动力学的某些概念和计算方法,并根据圣维南方程组在物理和数学意义上与空气动力学中的不可压缩气体的无黏运动方程组类似以及两者之间的差别发展了一系列高性能、适合非恒定流(溃坝流)模拟的有限体积法的计算格式;谭维炎^[32]于1996年用有限体积法进行了长江中下游及洞庭湖防洪系统的洪水演进模拟;谭维炎等^[33]提出一种有限体积法高性能格式(Osher),在非结构网格单元引入逆风概念,从而实现了跨单元界面法向数值通量的逆风分解,并对长江口二维浅水流动进行了模拟。

近年欧洲CADAM和IMPACT项目专门对溃坝洪水的一二维数值模拟以及溃坝过程进行了颇有意义的探索和研究^[6-7]。

上述的方法是当前应用的主要方法,同时还有不少学者提出了诸如运动界面追踪法、有限分析法、边界元法等方法^[34],并在实际工程中得到了应用,这些成果在理论上和实践上均颇有价值,但也各有不足之处。数学模型能否正确地描述所研究的物理现象,计算结果是否可靠、合理,除了与所建的物理数学模型有关之外,在很大程度上还与其采用的数值计算格式及计算方法有密切关系,鉴于各方法的自身特点和适应性,实际工程中应按具体情况选择适当的数值方法。

5 溃坝模型研究

由于溃坝洪水的巨大危害性,世界各国对溃坝洪水都有系统的研究。溃坝洪水计算模型是洪水风险分析的重要工具,长期以来受到国内外学者的广泛关注,许多学者对这一问题进行过专门探讨。在20世纪中后期,土石坝的溃坝模型研究取得了很大的进展,产生了如美国的DAMBRK、荷兰的MIKE系列、丹麦的DHI等一系列能进行溃坝洪水计算的模型。

目前在国外应用较广泛的模型是美国国家气象局开发的溃坝与洪水演进模型^[35],该模型有3个数学模型及相应的计算程序:即DAMBRK——溃坝及溃坝洪水波动力演算模型;BREACH——土坝缺口侵蚀模型;SMPDBK——简化溃坝模型。

溃坝及洪水演算模型中最详尽最复杂的是DAMBRK模型,它由两部分组成:一是溃决洪水计算,包括溃决洪水流量过程线以及坝址溃坝水位计算;二是溃决洪水在下游的传播与演进模拟。DAMBRK模型采用了动力波法,使其除了能模拟一般洪水外,还能比其他方法更好地模拟溃坝波,并且该法还考虑了溃坝波加速度的影响以及河道束窄、坎桥路堤、支流汇入所产生的下游非恒定回水的影

响。SMPDBK 模型采用经验公式计算溃坝洪水流量,并利用 DAMBRK 模型中的无因次经验曲线对溃坝洪水在河道下游的演进进行模拟,该模型常在一些对精度要求不高的情况下使用。BREACH 模型可计算土石坝由漫顶或管涌导致的溃坝溃决口洪水流量,并可预测溃口的尺寸及形状等。BREACH 模型的计算精度稍差,应用时需采用其他方法加以验证。

近年来,欧美的一些专家在对大量溃坝模型试验和原型观测取得的数据进行分析的基础上,提出了一种全新的土石坝漫顶溃坝机理——Headcut Erosion(陡坎冲刷)机理^[36]。其溃决过程可简化为:漫顶水流对跌水面的细沟冲刷易形成较大的沟壑(陡坎),漫顶水流在陡坎中形成旋流而产生的剪切力以垂直于跌水面的方向冲刷侵蚀坝底,且冲刷侵蚀程度随流量的增加而迅速加大,最终导致大坝完全坍塌而溃决。

在欧洲 CADAM 项目里,专门对目前世界上一些有影响的模型进行了比较分析,得出的结论是目前各种模型仍然存在相当大的不确定性^[6]。

6 溃坝资料的统计分析

尽管溃坝所能取得的实测数据极为有限,但对以往溃坝资料数据的整理分析仍是理解溃坝机理的重要手段,同时基于已有的溃坝数据资料,可为溃坝的数值模拟中溃口参数的选取提供依据。在对溃坝资料进行整理时,研究者一般注重能实测到的溃坝因素,如溃口的大小、尺寸、溃口宽、河道糙率、边坡系数、溃决时间和溃口流量等,在对这些数据进行相关性分析过程中得到了一些经验公式,这些公式对理解溃坝机理起了很好的作用。MacDonald 等^[37]整理了 42 个溃坝的数据资料,给出了溃口形状、溃口尺寸和溃决时间对溃坝流量的影响;Fread^[38]分析认为溃口形状、尺寸和溃口形成时间三者中溃口宽的影响最明显,溃口形成时间在库容很大时影响更大,而溃口形状影响较小;黄景祥^[39]在全面分析了溃坝影响因素的基础上,就溃决水头、溃口形状和尺寸、河道糙率对溃坝流量的影响进行了单因素分析,并得到了相应的规律。

整体而言,因溃坝实测数据极为有限且可靠性不高,目前对溃坝资料的整理分析仍不深入,今后这方面的工作需加强。

7 溃坝问题研究的发展动向

虽然各国政府和学术界对溃坝问题的研究十分重视,并取得了丰硕的成果,但还存在许多问题没有解决,仍缺乏通用、可靠的溃坝预报系统。目前,溃坝

问题的研究主要在以下几个方面亟待进一步发展。

a. 加强溃坝机理问题的研究。充分利用已掌握的溃坝资料研究坝型、坝高、不同筑坝方式和筑坝材料、抗冲刷特性等对溃口发展的过程、出库流量过程线的影响。通过大量的物理模型试验、原型溃坝资料分析以及现场试验,发展和完善现有的溃坝机理。

b. 开发通用性好、高精度、可靠的溃坝模型。通过大量的溃坝资料统计、现场及实验室模型试验的成果和精确、可靠的数值计算方法,完善和改进已有的溃坝模型,而不是开发新模型。溃坝模型应能较为真实地反映溃坝的实际情况,且计算精度高,通用性好,实际操作简单,其结果能为相关部门的正确决策提供科学依据。

c. 建立和完善以溃坝研究为重点的流域防洪预警系统。溃坝研究的一个主要方面是溃坝洪水在下游的演进计算,研究溃坝后下游受洪水威胁的面积、水深、洪水到达的时间以及应采取的相应防灾对策等。因此,应把溃坝问题的研究与流域的土地利用规划、防灾减灾的研究结合起来,建立一整套完善的流域防洪预警系统。

8 结 语

近年来,国际上又出现了一轮新的溃坝研究高潮,这充分说明经济越发达,越需要对大坝的安全给予高度重视,更需要开展由于溃坝造成的人民生命财产损失和对经济发展造成的影响进行风险评估,并开展相应的对策研究。随着科学技术的不断进步,也需要不断地融入新的大坝安全管理理念与新的科学技术方法,开展深入细致的研究,以最大可能地降低溃坝的风险。本文从物理试验、理论分析、数值模拟、模型研究、溃坝资料整理分析等方面对国内外溃坝问题的研究进行了综述,并提出了今后的研究发展动向。

参考文献:

- [1] 林秉南. 明渠不恒定流研究的现状与发展[G]//林秉南. 林秉南论文集. 北京:中国水利水电出版社,2001:340-373.
- [2] AURELI F, MIGNOSA P, TOMOROTTI M. Numerical simulation and experimental verification of dam-break flows with shock[J]. J Hydraul Res, 2000, 38(3):197-206.
- [3] ZANUTTIGH B, LAMBERTIM A. Dam-break waves in power-law channel section[J]. J Hydraul Eng, 2001, 127(4):322-326.
- [4] YOON T H, KANG Seok-koo. Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids[J]. J Hydraul Eng, 2004, 130(7):678-688.

- [5] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993 517-519.
- [6] MORRIS M W ,GALLAND J C. CADAM :Dambreak modelling guidelines & best practice[R]. Munich :HR Wallingford Ltd , 1998.
- [7] MORRIS M W ,FABBRI K ,BRELEN H. IMPACT Investigation of extreme flood processes and uncertainty contract No. EVG1-CT-2001-00037 ,final technical report[R]. Wallingford :HR Wallingford Ltd 2005.
- [8] 戴荣尧,王群,罗昶,等. 溃坝模型试验及最大流量的研究[J]. 铁道工程学报, 1984(2) 22-28.
- [9] STOKER J J. Water wave[M]. New York : Interscience Publishers ,1957 334-341.
- [10] SU Shih-tun. Dry-bed wave due to sudden water releases[D]. Fort Collins :Colorado State University ,1970.
- [11] DRESSLER R F. Unsteady non-linear waves in sloping channels[J]. Proceedings ,Royal Society of London Series A , 1958 247 :186-198.
- [12] CHEN Chang-lung , AMBRUSTER J T. Dam-break wave model formulation and verification[J]. J Hydraul Eng ,1980 , 106(5) :747-767.
- [13] 林秉南 龚振瀛 王连祥. 突泄坝址过程线简化分析[J]. 清华大学学报, 1980 20(1) :17-31.
- [14] HUNT B. Dam-break solution[J]. J Hydraul Eng ,1984 ,110 (6) 675-686.
- [15] LU Ji-kang , LIN Bing-nan. Dam-break wave in prismatic channel[G]//林秉南. 林秉南论文集. 北京: 中国水利水电出版社 2001 419-423.
- [16] SMITH P C. A similarity solution for slow viscous flow down an inclined plane[J]. J Fluid Mech ,1973 58(2) 275-288.
- [17] 谭维炎. 浅水动力学的回顾和当代前沿问题[J]. 水科学进展, 1999 ,10(3) 296-303.
- [18] 魏文礼. 二维溃坝洪水波演进的数值模拟[J]. 水利学报, 2003(9) 43-47.
- [19] HARTEE D R. Some practical methods of using characteristics in the calculation of non-steady compressible flows[R]. Los Alamos :U. S. Atomic Energy Commission Report AECU-2713 ,1953 44-48.
- [20] 王船海 李光炽. 流域洪水模拟[J]. 水利学报, 1996(3) : 44-50.
- [21] SAKKAS J G ,STRELKOFF T. Computation two-dimensional dam break flood waves[J]. J Hydraul Div ,1978 ,104(9) :1269 -1288.
- [22] 槐文信 赵明登 童汉毅. 河道及近海水流的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社 2005 91-180.
- [23] 胡四一 谭维炎. 一维不定流计算的三种高性能差分格式[J]. 水科学进展, 1991 2(1) :11-21.
- [24] SCHWANENBERG D ,HARMS M. Discontinuous galerkin finite-element method for transcritical two-dimensional shallow water flows[J]. J Hydraul Eng 2004 ,130(5) 412-421.
- [25] 李宏. 高分辨率间断有限元方法[J]. 计算物理, 2004 21 (4) 367-376.
- [26] LEVEQUE R J. Finite volume methods for hyperbolic problems [M]. Cambridge :Cambridge University Press 2002.
- [27] TORO E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flow[M]. Chichester :John Wily & Sons 2001.
- [28] 李勇,刘志友,安亦然. 介绍计算流体力学通用软件: Fluen[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑, 2001 ,16(2) 254-258.
- [29] SHU C W ,OSHER S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shocks capturing schemes II [J]. Comput Phys ,1989 83 32-78.
- [30] ZHOU Di-hua ,SHEN H W ,LAI Jih-n-sung ,et al. Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling[J]. J Hydraul Eng ,1996 ,122(12) 692-702.
- [31] 胡四一 谭维炎. 无结构网格二维浅水流动的数值模拟[J]. 水科学进展, 1995 1(1) :1-9.
- [32] 谭维炎. 计算浅水水动力学: 有限体积法的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [33] 谭维炎 胡四一. 二维浅水流动的一种普适的高性能格式: 有限体积 Osher 格式[J]. 水科学进展, 1991 ,2(3) : 154-161.
- [34] 刘儒勋 舒其望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京: 科学出版社 2003 :120-275
- [35] 朱勇辉 廖鸿志 吴中如. 国外土坝溃坝模拟综述[J]. 长江科学院院报, 2003(4) 26-29.
- [36] HANDSON S J ,ROBINSON K M ,COOK K R. Predication of headcut migration using a terministic approach[J]. Transaction of ASAE 2001 44(3) 525-531.
- [37] MACDONALD T C ,LANGRIIDGE-MONOPLIS J. Breaching charactics of dam failures[J]. J Hydraul Eng ,1984 ,110(5) : 567-585.
- [38] FREAD D L. Breach an erosion model for earthen dam failures (Revision 1991) [R]. Silver Spring , Maryland : National Weather Service ,NOAA ,1991.
- [39] 黄景祥. 溃坝洪水影响因素分析[J]. 华南建设学院西院学报, 1993 ,1(1) 51-60.

(收稿日期 2005-08-30 编辑 熊水斌)

