

基于DTM的溃坝风险图编制技术

王晓航, 李雷, 盛金保, 彭雪辉

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 溃坝洪水风险图对于制定区域防洪应急预案、进行溃坝洪水风险分析是十分必要的。利用 BREACH 模拟溃口, 采用无结构网格有限体积法进行二维溃坝洪水演进计算, 利用 TIN 模型将计算结果可视化, 制作成水深风险图、流速风险图、淹没历时风险图、洪水到达时间风险图, 并对风险图进行了空间分析。本文充分利用了 GIS 对空间数据以及空间数据和属性数据联合分析的功能, 对溃坝洪水风险图制作的基本原理和方法进行了探讨, 并应用于沙河集水库大坝溃坝模拟, 具有较强的实用价值。

关键词: 风险图; 溃坝; 数值模拟; TIN 模型; 空间分析

中图分类号: TV122.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)04-0061-05

Technologies for dam-break risk mapping based on DTM

WANG Xiao-hang, LI Lei, SHENG Jin-bao, PENG Xue-hui

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Dam-break flood risk mapping is necessary to formulate flood prevention emergency plans and make analysis of dam-break risk. BREACH is used to stimulate changes in the shape of the break and calculate break-induced flow discharge. Two-dimension dam-break flood propagating numerical simulation is conducted based on unstructured grids and FVM. TIN model is applied to visualize the numerical simulation results. Risk maps of flood depth and flood velocity at different moments of dam-break, risk map of flood submergence duration, risk map of flood arriving time are drawn and used to carry out spatial analysis. The fundamental principles of drawing dam-break flood risk mapping are discussed in this paper. The methods proposed are applied to analyze Shaheji reservoir dam, which is of high value in practice.

Key words: flood risk mapping; dam-break; numerical simulation; TIN model; spatial analysis

溃坝是一种低概率、高危害的社会致灾因素,一旦溃决,将给下游人民的生命和财产安全造成极大的威

收稿日期: 2008-01-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC14B03); “948”推广项目(200739), 科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB2J059)

作者简介: 王晓航(1981-), 女(蒙古), 辽宁朝阳人, 助理工程师, 硕士, 主要从事大坝安全管理及地理信息系统研究。

E-mail: xiaohangwang@nhri.cn

胁. 随着国家经济的发展和治水思路的转换,提出了治水新思路和一系列新理念. 其中一个重要的方面就是要建立风险和风险管理的观念,将风险分析和风险管理应用于水库大坝安全管理. 溃坝洪水风险图的制作是进行水库大坝风险管理的前提^[1]. 溃坝洪水风险图直观反映了某种模式的溃坝发生后,水库下游不同历时可能的淹没范围、淹没水深、淹没流速、淹没历时及洪水到达时间等因素. 根据溃坝洪水风险图,可以合理制定水库溃坝应急预案,对人员和财产进行及时转移;可合理评估溃坝损失,为防洪保险提供科学依据;可合理制定水库下游发展规划,避免在风险大的区域出现人口与资产的过度集中^[2].

地理信息系统(GIS)是指在计算机软硬件支持下,把各种地理信息按照空间分布,以一定的格式输入、存储、检索、更新、显示、制图和综合分析的计算机系统,是空间数据显示、加工和处理的有效工具. 其重要特征是存储和处理的信息是与地理位置相关的空间信息,并能够对空间信息及与该空间信息相关的属性信息进行空间查询和空间分析. 因此,可利用 GIS 技术进行溃坝洪水风险图编制和管理,如数据获取、基础信息管理、溃坝洪水风险分析、溃坝洪水风险图绘制、更新和发布等^[3].

加拿大、美国、丹麦等一些国家利用 GIS 技术进行溃坝洪水风险图制作的研究,预见溃坝灾害影响程度和范围,已经实现了溃坝计算成果 GIS 平台下的可视化. 国内的这一领域尚处于起步阶段,但 GIS 技术在洪灾风险分析、流域洪水风险图制作和风险区划等方面的应用研究已经取得了不少成果. 本文以沙河集水库为例,结合 GIS 技术,采用二维非恒定流计算方法对溃坝洪水风险图制作的技术进行探讨.

1 基于 DTM 的溃坝洪水风险图制作流程

溃坝洪水风险图编制应先确定水库溃坝模式,计算溃口出流量过程线作为溃坝洪水演进数值模拟模型的边界条件. 在 GIS 软件平台下提取水库下游计算区域内的高程点、河流、湖泊、行政区划、居民地等地理信息,其中,高程点作为数值模拟模型的输入数据;其它地理信息和人口、经济等非空间信息作为风险图制作的辅助数据;采用一维或二维非恒定流进行溃坝洪水演进模拟;采用基于 DTM(数字地形模型)对数值模拟结果进行可视化表达,制作洪水到达时间风险图、淹没历时风险图和溃坝不同历时水深、流速风险图,并叠加人口、经济、行政区划等信息制作人口风险图、经济损失风险图. 制作流程见图 1.

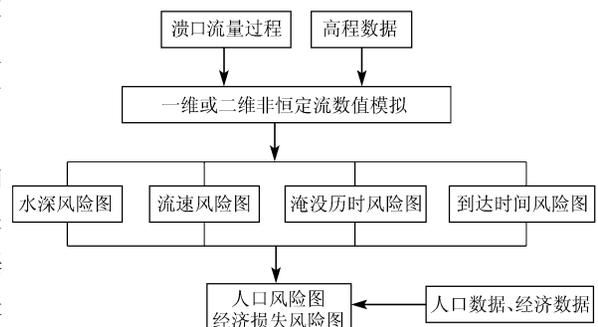


图 1 溃坝洪水风险图制作过程

Fig. 1 Process of drawing dam-break flood risk maps

2 基于 DTM 的溃坝洪水风险图技术

2.1 数据提取

溃坝洪水模拟最主要的基础信息是水库下游溃坝影响范围内的河道和周围陆地的高程数据,在 GIS 软件平台下,可以通过数字化提取这些信息. 此外,河流、道路、居民地、建筑物等辅助信息可以通过对相应的专题图数字化或者对遥感图像的解译得到. 人口、经济等非空间数据可以作为某空间地物的属性数据,使得所有数据通过 GIS 平台融合到一个系统中.

2.2 溃口流量过程计算

本文采用 BREACH 模型对溃坝后的溃口洪水进行模拟,获取溃口形状和坝址处流量过程线. 本文模拟的沙河集水库位于安徽省滁州市西北约 18 km 长江下游滁河支流清流河上,集水面积 300 km²,总库容 1.855×10⁸ m³,是一座以防洪、灌溉为主,结合城市供水、发电、养殖等综合利用的大(Ⅱ)型水库. 沙河集水库大坝为碾压式均质土坝,坝顶高程 44.6 m,最大坝高 26.5 m. 清流河上游属于山丘区河道,下游属于丘陵

区河道,河道比降滁州以上为1/2000,滁州以下为1/18500.上游洪水起涨较快,而下游由于滁河水位的顶托,落水较慢.清流河现有安全泄流量约 $600\text{ m}^3/\text{s}$,相当于5年一遇洪水,较大洪水时漫滩行洪,两岸经常受淹.计算工况为库水位42.5 m时,万年一遇洪水下29 m处发生管涌溃坝.溃口洪水模拟历时9 h,图2为溃口流量过程线.

2.3 溃坝洪水演进数值模拟

对于一维溃坝,瞬间全溃引起的不稳定流动可视为一维流动,如假定为静水压力分布和小底坡,则可用圣维南方程描述.对于二维溃坝,在静压假定和忽略风应力、柯氏力的条件下,描述溃坝洪水演进的二维控制方程为浅水方程^[4-7].目前,对于溃坝洪水波模拟的控制方程离散方法主要为有限差分法(FDM)、有限单元法(FEM)和有限体积法(FVM).本文采用二维浅水方程,无结构网格有限体积法进行了沙河集水库二维溃坝模拟.

2.4 基于DTM的溃坝洪水风险图制作

数字地形模型DTM(Digital Terrain Model)是地形表面形态属性信息的数字表达,是带有空间位置特征和地形属性特征的数字描述.DTM采用一个有限三维向量系列 (X, Y, Z) 表示地形的空间分布,其中 X, Y 表示地形点的平面位置, Z 表示相应点的高程、坡度、坡向等地形信息.实际研究中,DTM的 Z 值已经不仅仅局限于地形信息,它可以用于地形要素或者非地形要素的数字建模.本文用溃坝洪水的水深、流速、到达时间和淹没历时等值作为DTM的 Z 值,得到了水深DTM、流速DTM、到达时间DTM和淹没历时DTM.

DTM按其数据结构来分,可以分为规则格网模型GRID和不规则三角网模型TIN^[8].其中TIN模型通过不规则分布的数据点生成连续不相交的三角面来逼近地形表面.其优点是能充分表现高程细节的变化,以不同层次的分辨率来描述地形表面.与规则格网数据模型相比,TIN在某一特定分辨率下能用更少的空间和时间精确表示复杂表面,并且模拟的表面是连续的.本文采用了TIN模型制作了溃坝洪水到达时间风险图、淹没历时风险图,以及不同时刻的淹没水深风险图、淹没流速风险图.

2.4.1 TIN表面的创建 目前,TIN三角剖分均是在二维平面上进行,然后在三角形的顶点上叠加所对应的高程值,从而形成空间三角形平面.TIN表面模型可以从点、隔断线与多边形中生成,其中点集作为TIN的基础要素,隔断线与多边形可更好地控制TIN表面地形状.

(1)点集 点集是TIN的基本输入要素,决定了TIN表面的基本形状.TIN建模时,在地形变化较大的地方,使用较多的点;在平坦地区,则使用较少的点.

(2)隔断线 隔断线是构成TIN的线状要素,通常用来表示自然要素,是可以具有高度也可以是没有高度的线,在TIN中构成一条或者多条三角形的边序列.隔断线有软隔断线和硬隔断线两种^[9].硬隔断线表示表面上突然变化的特征线,如山脊线、悬崖及河道等.在创建TIN时,硬隔断线限制了插值计算,使得计算只能在线的两侧各自进行,而落在隔断线上的点同时参与线两侧的计算,从而反映了坡度的不连续性,改变了TIN表面的形状.软隔断线表示添加在TIN表面上用以表示线性要素但并不改变表面形状的线,如需要标出分析区域的边界,它不参与构建TIN.

(3)多边形 多边形用来表示具有一定面积的表面,具有4种类型:裁切多边形:定义插值的边界,处于裁切多边形之外的输入数据将不参与插值与分析操作;删除多边形:定义插值的边界,处于删除多边形之内的输入数据将不参与插值与分析操作;替换多边形:对多边形边界与内部赋予固定的 Z 值;填充多边形:落在填充多边形内所有的三角形赋予整数属性值,其 Z 值不受影响,也不进行裁切、删除或者替换操作.

根据构建TIN的数据源之间的约束条件可将数据源分为无约束数据域和约束数据域两种类型.无约束数据域是指数据点之间不存在任何关系,即数据分布完全呈离散状态,数据点之间在物理上相互独立.而约

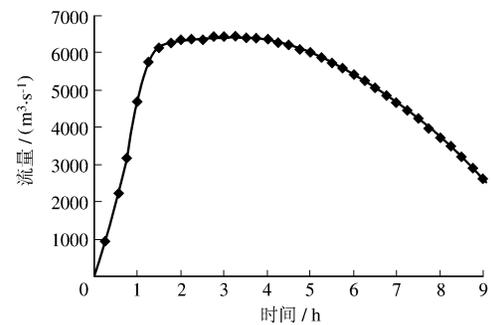


图2 沙河集水库大坝溃口流量过程

Fig. 2 Discharge curve of the break of Shaheji reservoir

束数据域则指部分数据点之间存在着某种联系,这种联系一般通过线特征来维护.约束条件分为两类:一是边界约束条件,指数据点被一多边形所包围,该多边形即为边界约束条件;另一为内部约束条件,是数据点之间存在的限制条件.由无约束数据域所形成的 TIN,称为无约束 TIN,相应的由约束数据域形成的 TIN 称为约束 TIN.约束 TIN 的最大特征是保留了原始数据中的约束条件,即约束条件也存在于 TIN 中.约束 TIN 能很好顾及地形结构特征和几何特征,是实际应用中经常使用的一种建模方法.

离散点构 TIN 的基本思路是利用随机分布的离散高程采样点建立连续覆盖整个区域的 TIN.其技术关键是确定哪 3 个离散数据点构成一个最佳三角形,并使得每个离散采样点均成为三角形的顶点.目前,TIN 中的 Delaunay 三角剖分建立数字地形结构模型应用的比较广泛. Delaunay 三角网中每一个三角形的外接圆内不包含其他三角形的顶点.只要不超过 3 个邻域点在欧几里得平面上共圆, Delaunay 三角网就总是唯一的. Delaunay 三角形网格模型适用于各种数据分布密度,具有唯一性,能得到尽可能等边的高质量三角形单元,追踪绘制等高线算法简单,适应不规则地形区域等优点.

本文采用 Delaunay 三角剖分构建约束 TIN,以河流两堤作为创建 TIN 的硬隔断线,行政区划边界作为软隔断线,计算区域作为裁切多边形,对二维溃坝洪水演进模拟计算结果进行了 TIN 的创建和可视化表达.计算区域示意图见图 3,计算区域局部 Delaunay 三角网见图 4.



图 3 计算区域
Fig. 3 Calculation domain



图 4 计算区域局部 Delaunay 三角网
Fig. 4 Delaunay TIN on local calculation domain

2.4.2 溃坝洪水风险图制作 本文利用 ArcEngine 组件,在可视化平台 Visual Basic 下对溃坝洪水风险图进行可视化和空间分析.采用梯度颜色坡道来绘出 Z 值:用彩色绘出 TIN 的表面来显示 Z 值的变化范围.这种绘图方法在每个面上内差等值线,一个面可以有 0 条、1 条或者 n 条穿越其中的等值线.在设定的等值线间隔之间的每个区域都用颜色坡道中的一种颜色来绘制.在一定范围内的连续 Z 值构成了连续的表面.由于表面包含了无数个点,在应用中不可能对所有点进行度量并记录.表面模型通过对区域内不同位置的点进行采样,并对采样点插值生成表面,以实现真实表面的近似模拟.在建立 TIN 后,可以由 TIN 求解该区域内任意一点的 Z 值.一般情况下,TIN 采用线性内插,即三角形三点确定的斜平面作为表面,能保证表面连续但不能保证光滑^[10].

根据上述方法制作的溃坝 6 h 淹没水深风险图见图 5,溃坝 3 h 淹没流速风险图见图 6.

通过二次开发,TIN 除了可以内差计算表面任意点的水深、流速、洪水到达时间和淹没历时等 Z 值之外,还可以实现与溃坝洪水相关的空间分析,如提取地形断面信息,计算选定区域内的淹没体积、平均水深、平均流速,计算任意断面上水深、流速的分布,计算任意点的洪水到达时间和淹没历时,计算不同时刻任意点的水深、流速,对区域内任意点分析水深、流速的变化过程.

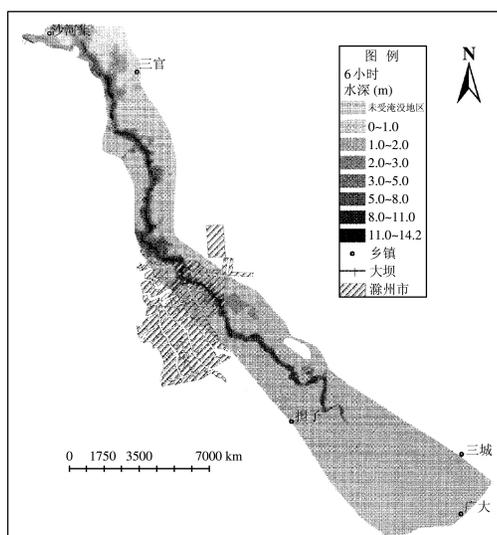


图5 溃坝6 h淹没水深风险图

Fig. 5 Risk map of flood depth after 6 hours of dam-break

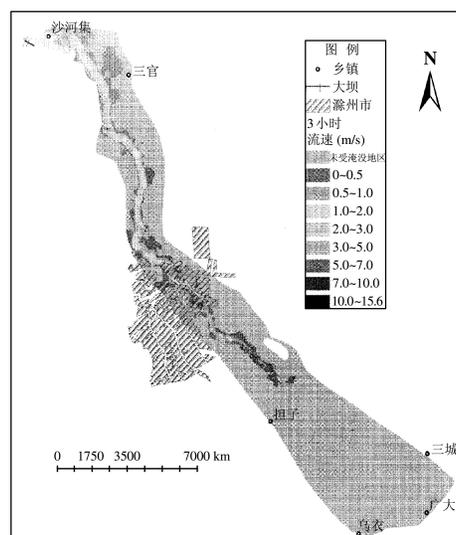


图6 溃坝3 h淹没流速风险图

Fig. 6 Risk map of flood velocity after 3 hours of dam-break

3 结 语

本文介绍了溃坝洪水风险图制作的基本原理和关键技术。对不规则三角网 TIN 的数据源、表面创建、可视化方法进行了探讨。通过 GIS 的二次开发,实现了 TIN 的可视化和空间分析,绘制了沙河集水库大坝溃坝水深风险图、流速风险图等,并实现了对 TIN 表面的一系列空间分析操作。溃坝洪水风险图为制订有效的应急预案、规划避难场所、选择撤退路线等提供了重要依据。GIS 强大的空间数据处理和分析功能是对溃坝洪水演进可视化显示的重要技术支持。利用 GIS 技术对溃坝洪水进行处理,溃坝洪水演进模型计算和 GIS 的集成必然成为溃坝研究的重要方向。溃坝数值模拟模型与 GIS 的完全集成,结合 GIS 和 OpenGL 技术开发适合我国水情的自主知识产权软件是溃坝数值模拟今后的发展方向。

参 考 文 献:

- [1] 王立辉. 溃坝水流数值模拟与溃坝风险分析研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2006.
- [2] 李晓新. 洪水风险图的制作及应用[J]. 山西水利, 2002, (5): 32-33.
- [3] 李 娜. GIS 技术在洪水风险图编制中的应用[J]. 防汛与抗旱, 2005, (17): 17-19.
- [4] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989: 457-464.
- [5] Elliot R, Chaudhry M H. A wave propagation model for two dimensional dam-break flows[J]. *J Hydr Res*, 1992, 30(4): 467-483.
- [6] Fennema R J, Chaudhry M H. Implicit methods for 2D unsteady free surface flow[J]. *J Hydr Res*, 1989, 27(3): 321-331.
- [7] Delis A I. Evaluation of some approximate Riemann solvers for transient open channel flows[J]. *J Hydr Res*, 2000, 28(3): 672-679.
- [8] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 27-37.
- [9] 汤国安, 杨 昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 27-37.
- [10] 邬 伦, 刘 瑜. 地理信息系统-原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 187-191.