

溃堤洪水的二维水动力模型及其应用

苑希民, 田福昌, 冯国娜, 王丽娜

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了减少堤防溃决造成重大的生命财产损失, 加强防洪减灾非工程措施建设, 建立了溃堤洪水的二维水动力模型, 对溃堤洪水的精细化仿真模拟。该模型考虑了溃堤口门展宽变化, 局部网格加密处理, 并采用干湿水深理论与热启动技术对模型进行优化。将该模型应用于黄河内蒙段南岸灌区的溃堤洪水演进模拟, 利用2008年杭锦旗奎素段实际溃堤数据对所建模型进行验证, 结果表明: 流场分布均匀且光滑, 计算结果合理可靠, 模型具有较高的计算精度及可靠性。采用该模型模拟了沙圪堵工程与奎素段堤防同时溃决的情形, 并绘制了洪水风险图, 为该地区防洪风险管理决策提供了重要的技术支持。

关键词: 溃堤洪水; 二维水动力模型; 溃口展宽; 干水深; 湿水深; 热启动; 黄河内蒙段; 洪水风险图

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0225-06

Two dimensional hydrodynamic model and its application of levee breach flood

YUAN Xi min, TIAN Fu chang, FENG Guo na, WANG Li na

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to reduce the significant loss of life and property caused by levee breach flood and to improve the non projective measures in flood control and disaster prevention, a two dimensional hydrodynamic model was developed to simulate levee breach flood accurately. Dyke broadening was taken into account, local model grids were refined, and the model was optimized using the hot start, dry water depth, and wet water depth theory. In this paper, the model was applied to simulate the levee breach flood routing in the southern irrigated area of Inner Mongolia section of the Yellow River. The actual dike burst data in Kuisu reach of the Yellow River were used to verify the model. The results showed that the flow field is smooth and well distributed, which indicated that the research results are reasonable and reliable. The model was also applied to simulate the working conditions that two dike burst occurred at Shagedu engineering and Kuisu reach respectively. Flood risk maps were plotted, which can provide important technical support for the flood control risk management and decision in the area.

Key words: levee breach flood; two dimensional hydrodynamic model; dyke broadening; dry water depth; wet water depth; hot start; Inner Mongolia section of Yellow River; flood risk map

堤防作为防御洪水的重要工程措施之一, 一旦溃决, 将造成重大的生命财产损失。堤防溃决时, 除了采取必要的抗洪抢险措施封堵决口并转移受灾群众外, 利用数值模拟技术准确可靠地模拟溃堤洪水的演进过程, 获取相关洪水风险信息也是至关重要的。溃堤洪水的二维水动力模拟计算可提供淹没区内洪水的淹没水深、洪水流速及洪水前锋到达时间等信息, 为防洪风险管理决策提供技术支持。

近年来, 国内外许多学者研究了溃堤洪水演进的数值模拟技术, 其主要是利用二维水动力模型模拟溃堤洪水在二维平面上的演进情况。Blade 和 Morales Hernandez 等模拟了

洪水在冲积平原的演进情况^[1-4]; Masih 等^[5]运用 MIKE 21 模块对伊朗 Helleh 河溃堤洪水波浪的传播进行了模拟; Xin 等^[6]利用二维光滑粒子水动力模型理论对波浪及风暴潮有机组合的 27 种方案洪水漫过滚筒压实混凝土堤的演进过程进行了数值模拟, 并对相关理论进行了创新改进; Vacondio 等^[7]运用光滑粒子水动力数值模型模拟了开边界情况下实际洪水的浅水运动, 该模型适用于模拟溃堤、溃坝及海啸引起洪水的淹没模拟分析, 并成功应用到日本海啸引起的泛滥洪水在奥尻岛的演进模拟。我国李大鸣等^[8]建立了河道一维和蓄滞洪区二维耦合水动力模型及洪水仿真模拟系统, 并

收稿日期: 2014-09-19 修回日期: 2015-02-03 网络出版时间: 2014-03-19
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.1044.016.html>
基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助(B14012)
作者简介: 苑希民(1968-), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士, 主要从事防洪减灾及水利信息化研究。E-mail: yxm@tju.edu.cn
通讯作者: 田福昌(1989-), 男, 河北沧州人, 主要从事河流动力学及水利信息化方面的研究。E-mail: fuchang.cool@163.com

将其应用到大清河滞洪区五洼联合调度方案的实时模拟分析中;张大伟等^[9]建立了能够较好模拟天然河道溃堤洪水的一、二维耦合模型,该模型已经过典型测试算例验证并成功应用于松花江哈尔滨段松北分洪区溃堤洪水的模拟;付成威等^[10]运用一、二维实时动态耦合模型模拟了谷堆圩蓄滞洪区溃堤洪水的演进情况;曲红玲等^[11]建立了一维明渠非恒定流溃堤模型和二维溃堤波计算模型,并实现两者的耦合,考虑溃口线性梯形展宽,溃堤波的模拟采用有限体积无结构网格的 TVD-MUSCL 格式;郭凤清等多位学者采用各类数值方法模拟了洪水在蓄滞洪区等二维平面区域内的运动过程^[12-18]。然而,在模拟溃堤洪水过程中同时考虑溃口展宽变化的情况较少。

本文基于二维水动力学方法,拟针对黄河内蒙段南岸灌区建立具有实际地形的数值模型,在模型内通过热启动及动边界处理技术考虑堤防溃决时溃口的展宽变化过程,对溃口位置网格进行局部加密处理,并通过干、湿水深理论对所建模型进行优化。

1 溃堤洪水的二维水动力模型建立

1.1 模型基本理论

对于溃堤洪水在大范围灌区内的洪水演进过程,采用 N-S 方程的平面二维浅水方程来描述,控制方程形式如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (1)$$

其中,

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix};$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(s_{0x} - s_{fx}) \\ gh(s_{0y} - s_{fy}) \end{bmatrix}; F = [E, G]; s_{0x} = \frac{\partial Z}{\partial x};$$

$$s_{0y} = \frac{\partial Z}{\partial y}; s_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}; s_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}.$$

式中: h 为水深(m); t 为时间变量(s); u, v 分别为 x 和 y 方向的流速(m/s); S_{0x} 和 S_{0y} 分别为 x, y 方向的坡底源项; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x, y 方向的摩阻项; g 为重力加速度(m/s²); Z 为底高程(m); n 为曼宁系数(s/m^{1/3})。

采用中心格式的有限体积法对控制方程式(1)进行离散(控制体取任意的三角形单元),应用格林公式可得:

$$\int_{A_i} \frac{\partial U}{\partial t} dA + \int_{\Gamma_i} (F \cdot n) d\Gamma = \int_{A_i} D dA \quad (2)$$

式中: A_i 为 i 单元的计算面积; Γ_i 为 i 控制体的边界条件; n 为边界的外法线方向单位向量。

利用中心格式对边界条件进行积分,则有:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{A} \sum_{j=1}^3 F_j^* \cdot n \Delta \Gamma_j = S_i \quad (3)$$

式中: F_j^* 为第 j 条边的数值通量; Γ_j 为 i 单元第 j 条边的长度。

1.2 堤防溃决分洪

1.2.1 溃口展宽

土堤溃决是横向展宽和纵向冲刷的过程,破坏方式一般

为渐变溃。溃口形状按梯形设置,溃口宽度随时间变化规律和溃堤持续时间分别按经验公式(4)、公式(5)确定^[19]。溃口发展过程见图1。

$$B_b^* = \begin{cases} B_b/2 & t = 0 \\ B_b/2 \times (1 + t/T) & 0 < t \leq T \\ B_b & t > T \end{cases} \quad (4)$$

$$T = 1.527(B_b - 10) \quad (5)$$

式中: t 为溃堤后历时(h); T 为溃堤持续时间(h); B_b^* 为任意时刻的溃口宽(m); B_b 为最终溃口宽(m)。

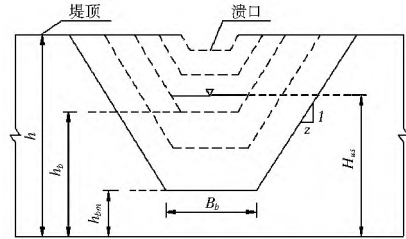


图 1 溃口剖面示意图

Fig. 1 Cross section of dyke

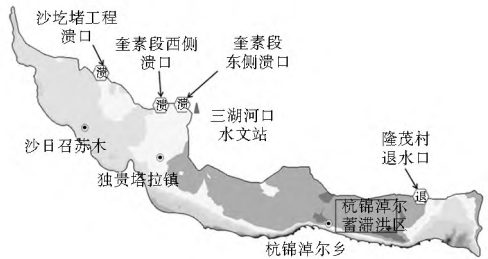


图 2 模拟区域及溃口分布

Fig. 2 Model domain and distribution of dyke breaches

1.2.2 溃堤分洪

模型内任意时刻溃堤分洪流量计算公式^[20]如下:

$$Q_b = c_v k_s C_d \sqrt{2g} \left[\frac{2}{3} b_s (H_{us} - h_b)^{1.5} + \frac{8}{15} z (H_{us} - h_b)^{2.5} \right] \quad (6)$$

其中, $c_v = 1 + \frac{0.023 Q_b^2}{B_d^2 (H_{us} - h_{bm})^2 (H_{us} - h_b)}$ 。

式中: g 为重力加速度(m/s²); k_s 为下游淹没情况校正系数; c_v 为行近流速改正系数; C_d 为流量系数; b_s 为任意时刻溃口底宽(m); H_{us} 为堤防上游水位(m); Q_b 为上一时刻流量(m³/s); h_b 为溃口底部高程(m); z 为溃口边坡坡度; B_d 为堤址处河道宽度(m); h_{bm} 为溃口发展最终高程(m)。

当溃堤入流边界设定为水位变化过程时,模型将根据任意时刻溃口处入流边界水位值,结合溃口处网格积水水位,通过式(6)计算每一模拟时间 Δt 开始前的分洪流量,并据此流量值推算洪水向下游演进过程中各网格中心点水位和边界通道流量。

1.3 模型优化措施

1.3.1 热启动及溃口展宽边界处理

堤防破坏方式采用渐变溃决,在洪水运动模拟过程中将通过热启动技术处理解决溃口展宽渐变带来的动边界技术问题。即当下一时刻($T+$)发生溃口横纵向扩展时,改动溃口展宽内边界条件,同时将该时刻(T)的模拟计算结果

作为下一时刻($T+$)模拟计算的初始条件,启动模型运行计算即可实现溃口展宽过程的连续性模拟。当模型运转遇到故障意外停止时,也可通过此热启动技术确保模型不间断运行。

1.3.2 干、湿水深优化

模型内通过设定干、湿水深参数改变网格属性,在任意时刻计算开始前程序都将自动比较每个网格积水深与干、湿水深之间的关系,通过以干水深为基础的通量计算理论来提高模型计算效率及稳定性。水深比较与动量计算对应关系见表1。

表1 水深比较与动量计算关系

Tab. 1 Relationship between water depth comparison and momentum calculation

水深比较	通量计算
$H < H_{dry}$	$\tau = 0, j_m = 0$
$H_{dry} < H < H_{wet}$	$\tau = 0, j_m$
$H > H_{wet}$	τ, j_m

注: H 为网格水深(m); H_{dry} 为干水深(m); H_{wet} 为湿水深/m; j_m 为质量通量; τ 为动量通量。

2 模型验证及应用

2.1 模拟区域概况

黄河内蒙段地处最北端,是我国凌汛问题最为突出的地区。黄河封河期,自下游向上游开始封河,已封河段冰下过流能力减弱,来水蓄滞于河槽内,形成了特有的河道水库。黄河开河期,自上游向下游开始开河,槽蓄水量集中释放,冰凌在动力作用下将堵塞河道,在弯道狭窄或浅滩处极易卡冰结坝,雍水成灾。加上河道淤积日益加重,过流能力降低,且跨河建筑物逐渐增多,导致冰坝雍水严重,溃堤险情频发。

本文将以内蒙段南岸部分灌区作为模型的验证区域,区域内包括独贵塔拉和杭锦淖尔两个乡镇,并建有杭锦淖尔蓄滞洪区,为防洪重点部位。模拟区域地势较为平坦,总面积为 264.74 km²,堤顶宽度为 4~6 m。区内设有水文实时监测数据较全的三湖河口水文站,上下游依次还设有石嘴山、巴彦高勒、昭君坟及头道拐水文站。模拟区域概况见图2。

2.2 模型建立

2.2.1 地形概化

采用非结构化三角形网格对模拟区域进行剖分,溃口等处进行网格局部加密处理,整体区域网格边长为 80 m,局部加密网格边长为 50 m,总共剖分网格约 13.8 万个,计算节点约 7 万个。根据 DEM 数据提取高程点,并利用 Kriging 法将高程数据赋予每个计算网格,修改网格属性。基于干、湿水深通量计算理论,设定每个网格干水深为 0.001 m,湿水深为 0.01 m,溃口处初始水深为 0.02 m,其余区域初始无积水。

2.2.2 参数设定

影响二维水力模型模拟洪水演进过程的参数主要为糙率和计算时间步长。综合考虑保护区内土地利用情况,糙率设为 0.057(经 2.3 节历史洪水验证);最大时间步长设为

5 s,最小时间步长设为 0.01 s。

2.3 模型验证

2.3.1 历史洪水概况

本文利用 2008 年历史实际洪水对模型进行验证。研究区域河道主槽淤积严重,过流能力很低,槽蓄水量分布不均匀,由于 2008 年开河期温度急剧升高,槽蓄水量释放快,在三湖河口水文站持续高水位影响(3 月 20 日 2 时 30 分最高水位达 1 021.22 m),3 月 20 日 1 时 50 分和 3 时 45 分,鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉奎素段黄河大堤先后发生两处溃决,两个溃口相距约 1 km 左右,初始口宽分别为 50 m 和 30 m,之后在水流强烈冲刷下,最终口门宽度分别稳定在 100 m 和 60 m,第二处溃口于 23 日 2 时 30 分成功封堵合龙。洪水在 21 日开始进入杭锦淖尔蓄滞洪区,并于 23 日中午,通过人工导流使溃决洪水在杭锦淖尔乡隆茂营村退入黄河。此次凌汛灾害,淹没面积约为 106 km²,3 885 户、10 241 人受灾,总的经济损失达到 9.35 亿元^[21-24]。

2.3.2 验证方案

奎素段东侧溃口位置距离三湖河口水文站较近,该溃口分洪入流边界采用三湖河口水文站实测水位序列,分洪时间为 2008 年 3 月 20 日 1 时 50 分至 3 月 23 日 2 时 30 分;奎素段西侧溃口分洪入流边界过程按 0.1‰ 的水面比降,通过三湖河口水文站实测水位序列推算得到,分洪时间为 3 月 20 日 3 时 45 分至 3 月 23 日 2 时 30 分。退水口位于隆茂村附近,退水过程按自由流出处理,退水水位为 1014.5 m,退水时长定为 72 h,退水时间为 3 月 23 日 12 时至 3 月 26 日 12 时。口门位置见图 2,分洪入流边界条件见图 3。根据溃口发展经验公式并结合实际溃口变化过程,溃口发展时长为 24 h,退水口宽为 100 m,其余口门展宽变化见图 4。

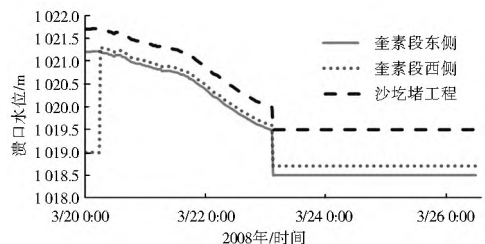


图3 入流边界条件

Fig. 3 Inflow boundary conditions

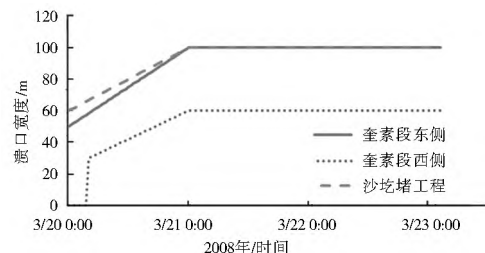


图4 口门展宽过程

Fig. 4 Variation of entrance broadening

2.3.3 验证结果及分析

应用所建模型对 2008 年历史洪水进行模拟计算,不同时刻的洪水淹没范围及水深见图 5。结果表明:洪水演进到

杭锦淖尔蓄滞洪区的时间为 24 h; 淹没总面积为 107.52 km²; 通过模拟隆茂村退水过程, 淹没区部分洪水已于 3 月 26 日 12 时退入黄河。与实际记载资料对比发现, 洪水到达杭锦淖尔蓄滞洪区的时间基本吻合; 受灾面积绝对误差为 1.52 km², 相对误差为 1.4%; 退水模拟效果较好; 同时验证该研究区域综合糙率为 0.057, 因此该模型可应用于该区域或类似区域的洪水风险分析计算。

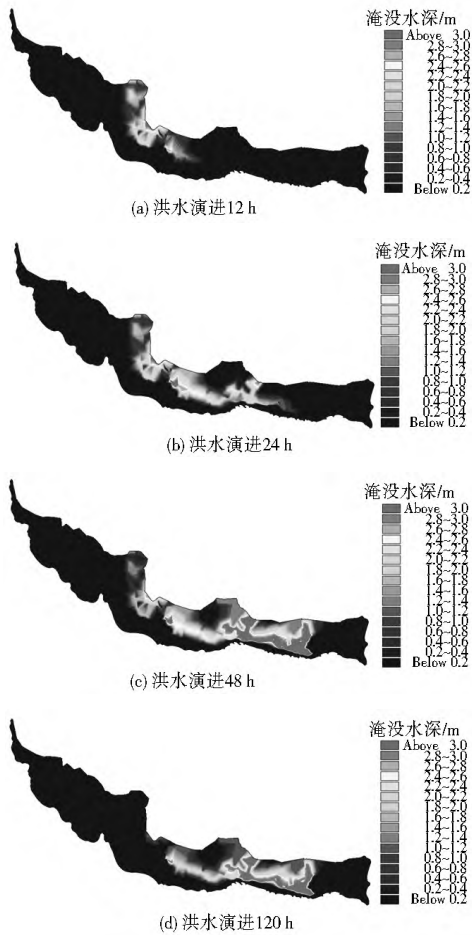


图 5 不同时刻的洪水淹没范围

Fig. 5 Flooded area under different times

2.4 模型应用

2.4.1 应用方案设定

考虑到模拟区域堤防现状及该区域可能遭遇的最大风险, 设定计算方案为: 沙圪堵工程处堤段与奎素段东侧同时发生溃堤。应用该模型此方案下洪水演进过程进行模拟计算。沙圪堵工程处溃口进洪过程通过三湖河口水文站实测数据, 按水面坡降 0.1‰ 推算, 分洪时间为 3 月 20 日 1 时 50 分至 3 月 23 日 2 时 30 分, 见图 3。奎素段东侧溃口分洪过程、隆茂村退水过程均与验证方案设定参数一致。溃口位置见图 1, 溃口宽度按 60~100 m 之间展宽变化, 溃口发展时长为 24 h, 口门展宽变化过程见图 4。

2.4.2 计算结果与分析

对设定方案进行洪水演进模拟计算, 结果见图 6, 可知洪水过程包括进洪和退洪两个完整过程, 经过 120 h 演进之后, 洪水已由退水口处退出多半水量, 上游区域洪水积水深较 48 h 时已有明显下降。

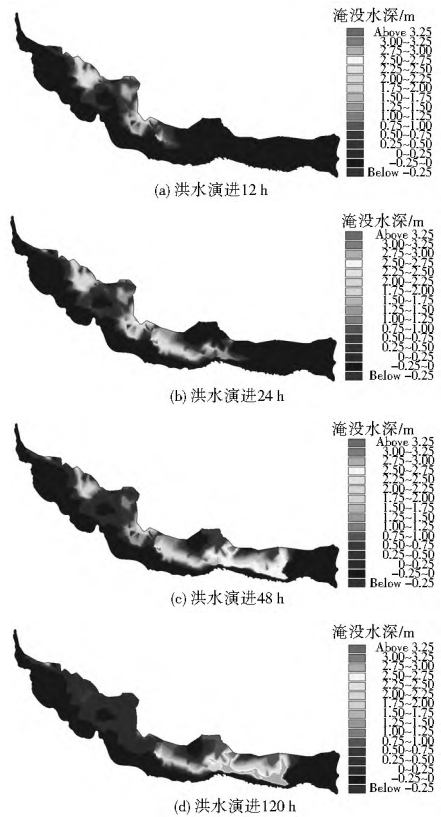


图 6 洪水演进过程

Fig. 6 Flood routing process

从洪水前锋到达时间分析, 洪水演进 12 h 可至苏五疙旦、水泉滩及木棍圪旦等村庄; 24 h 可至冯桂桥、赵大圪旦及小淖村等村庄; 48 h 可至芒哈图村、东口孜村及大青龙等村庄; 120 h 后, 除区域内坑洼蓄水外, 淹没区部分洪水已退去。整个洪水淹没过程中, 受灾总面积为 137.03 km², 受灾较为严重的地区为东口孜村、永兴村、小淖村及马二圪堵等村庄。根据模型验证方案和应用方案的洪水演进计算结果, 提取洪水最大淹没水深和洪水前锋到达时间, 采用规范统一的符号样式、色彩、标题命名、图例、指北针及布局等, 基于 GIS 平台绘制洪水风险图, 两种方案对应的洪水淹没水深图和洪水前锋到达时间图见图 7。

根据洪水淹没过程对不同时刻淹没面积进行统计(表 2), 结果显示, 随着分洪时间的增加, 淹没面积逐渐增大, 但增长率逐渐降低, 最终淹没范围趋于稳定。

表 2 洪水淹没面积随时间变化过程

Tab. 2 Variation of flooded area with time

时间/h	淹没面积/km ²	时间/h	淹没面积/km ²
6	23.34	12	38.48
18	52.79	24	64.46
30	75.17	36	83.04
42	90.50	48	97.3
54	104.26	60	112.01
66	119.29	72	124.03
78	127.21	84	130.96
90	132.35	96	133.51
102	134.45	108	135.1
114	135.64	120	135.94



(a) 验证方案淹没水深



(b) 验证方案到达时间



(c) 应用方案淹没水深



(d) 应用方案到达时间

图7 洪水风险图

Fig. 7 Flood risk maps

3 结论

本文对黄河内蒙古段南岸局部灌区建立二维水动力模型,考虑了溃口展宽的变化过程,并应用热启动及干、湿水深理论对模型进行了优化,保障了模型模拟精度及运行稳定性。利用鄂尔多斯市杭锦旗奎素段2008年历史洪水对模型进行了验证,模拟结果与历史实况较为吻合。因此,应用所建模型沙圪堵工程处堤段与奎素段东侧同时发生溃堤情况下的洪水演进过程进行了模拟计算,并根据计算结果提取相应的

洪水风险信息,绘制了规范统一的洪水风险图附件,对于相关防汛部分制定避险转移路线及抢险救灾方案具有重要的参考价值。

该模型适用于二维平面浅水区域的洪水演进模拟,模拟精度较高且能满足洪水风险图编制技术要求,但无法模拟溃口处水流的复杂变化状态,模型可以实现流入边界固定时溃口处内外水流的交换,但不能做到实时动态交换。因此,建议在地形数据能够满足计算精度要求的情况下,对河道和二维平面灌区建立统一的二维水动力模型,同时模拟洪水在河道与灌区之前的交换过程及其在灌区内的演进情况。

参考文献 (References):

[1] E Blade, M Gomez Valentin, J Dolz, et al. Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 42: 17-29.

[2] M Morales Hernandez, P Garcia Navarro, J Burguete, et al. A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 81: 26-44.

[3] Pascal Finaud-Guyot, Carole Delenne, Vincent Guinot, et al. 1D - 2D coupling for river flow modeling [J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2011, 339: 226-234.

[4] Jie Yin, Dapeng Yu, Zhane Yin, et al. Multiple scenario analyses of Huangpu River flooding using a 1D/2D coupled flood inundation model [J]. *Nat Hazards*, 2013, 66: 577-589.

[5] Masih Zolghadr, M Reza Hashemi, E Zia Hosseini-pour. Modeling of flood wave propagation through levee breach using MIKE21, a case study in Helleh River, Iran [A]. *World Environmental and Water Resources Congress [C]*. 2010: 2683-2693.

[6] Xin Rao, Lin Li, Farshad Amini, et al. Numerical study of combined wave and surge overtopping over RCC strengthened levee systems using the smoothed particle hydrodynamics method [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 54: 101-109.

[7] Vacondio R, Rogers B D, Stansby P K, et al. SPH modeling of shallow flow with open boundaries for practical flood simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138: 530-541.

[8] 李大鸣, 林毅, 周志华. 蓄滞洪区洪水演进一、二维数值仿真及其在洼淀联合调度中的应用 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12(3): 82-88. (LI Daming, LIN Yi, ZHOU Zhihua. Research on 1D and 2D numerical simulation of flood routing and its application of combined regulation in detention basin [J]. *Chinese Engineering Science*, 2010, 12(3): 82-88. (in Chinese))

[9] 张大伟, 李丹勋, 陈稚聪, 等. 溃堤洪水的一维、二维耦合水动力模型及应用 [J]. *水力发电学报*, 2010, 29(2): 149-154. (ZHANG Dawei, LI Danyun, CHEN Zhicong, et al. Coupled one and two dimensional hydrodynamic models for levee breach flood and its application [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(2): 149-154. (in Chinese))

[10] 付成威, 苑希民, 杨敏. 实时动态耦合模型及其在洪水风险图中的应用 [J]. *水利水运工程学报*, 2013(5): 32-38. (FU Chengwei, YUAN Ximin, YANG Min. A real-time dynamic coupling model for flood routing and its application to flood risk charting [J]. *Hydroscience and Engineering*, 2013(5): 32

38. (in Chinese))
- [11] 曲红玲. 河道溃堤与溃堤波的一、二维耦合计算数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2007(5): 49-54. (QU Hong ling. Numerical simulation for coupling of one dimensional river and two dimensional dike break waves [J]. Hydro science and Engineering, 2007(5): 49-54. (in Chinese))
- [12] 郭凤清, 屈寒飞, 曾辉, 等. 基于 MIKE21 FM 模型的蓄洪区洪水演进数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 34-37. (GUO Fengqing, QU Hanfei, ZENG Hui, et al. Flood routing numerical simulation of flood storage area based on MIKE 21 FM model[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 34-37. (in Chinese))
- [13] Dhondia J F, Stelling G S. Application of one dimensional two dimensional integrated hydraulic model for flood simulation and damage assessment [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics [C]. Cardiff, 2002: 265-276.
- [14] Dushmanta D, Jahangir A, Kazuo U, et al. A two dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation: a case study in the lower Mekong river basin [J]. Hydrological Progresses, 2007, 21: 1223-1237.
- [15] 张大伟. 堤坝溃决水流数学模型及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (ZHANG Dawei. Research on numerical model of levee breach and dam break water flow and its application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [16] 刘丽玲. 河道与渐溃堤坝耦合的水力数值模拟的研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (LIU Liling. Study of hydraulic numerical simulation for coupling river and gradual dike break [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [17] 范玉, 陈建, 李大鸣. 一、二维洪水演进数学模型在滞洪区的应用[J]. 华北水利水电学校学报, 2009, 30(4): 12-15. (FAN Yu, CHEN Jian, LI Daming. Application of flood wave advance numeric modeling of one dimension and two dimensions in flood detention area [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 30(4): 12-15. (in Chinese))
- [18] 张新华, 隆文非, 谢和平, 等. 二维浅水波模型在洪水淹没过程中的模拟研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(1): 20-25. (ZHANG Xinhua, LONG Wenfei, XIE Heping, et al. Numerical simulation of flood inundation processes by 2D shallow water equations [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(1): 20-25. (in Chinese))
- [19] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 洪水风险图编制技术细则(试行)附录[Z]. 2013. (Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Flood risk mapping technical rules (trial) appendix [Z]. 2013. (in Chinese))
- [20] 刘海娇. 基于一维、二维水力学耦合计算模型的洪水风险分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (LIU Haijiao. Research on flood risk analysis based on one dimensional and two dimensional hydraulic coupling calculation Model [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [21] 雷鸣, 高治定. 2007-2008 年黄河宁夏河段凌汛成因分析[J]. 黑龙江大学工程学报, 2011, 2(4): 37-42. (LEI Ming, GAO Zhiding. Ice floods occurred in the Ningmeng section of Yellow River in 2007-2008 [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2011, 2(4): 37-42. (in Chinese))
- [22] 方立, 冯相明, 严宝文, 等. 黄河内蒙古杭锦旗独贵塔拉素段凌汛期溃堤原因分析[J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(1): 31-33. (FANG Li, FENG Xiangming, YAN Baowen, et al. Analysis on ice flood damaged dike from the location of the inner Mongolia Hangjinqi Duguitalakuisu region of the Yellow River [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2009, 36(1): 31-33. (in Chinese))
- [23] 李建国. 黄河内蒙古杭锦旗段溃堤西口复堵[N]. 中国水利报, 2008-03-25 (001). (LI Jianguo. Dyke breach plugged up at the inner Mongolia Hangjinqi reach of the Yellow River [N]. China Water Resources News, 2008-03-25 (001). (in Chinese))
- [24] 彭绪鼎, 黄峰. 黄河内蒙古杭锦旗奎素段溃堤西口成功封堵[N]. 黄河报, 2008-03-25 (001). (PENG Xuding, HUANG Feng. Dyke breach plugged up successfully at the inner Mongolia Hangjinqi Kuisu reach of Yellow River [N]. Yellow River News, 2008-03-25 (001). (in Chinese))