

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2020.0126

王静,李娜,郑敬伟,等.大型人工输水渠道高填方段溃决洪水情景[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):148-155,200. WANG J, LI N, ZHENG J W, et al. Burst flood scenario of high-filled section of large scale artificial water supply channel [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 148-155, 200. (in Chinese)

大型人工输水渠道高填方段溃决洪水情景

王静^{1,2}, 李娜^{1,2}, 郑敬伟^{1,2}, 韩松^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要:为防范大型人工输水渠道的高填方段在超常外力下一旦溃决无法用概率表征的潜在风险,需建立适宜的情景分析手段,以模拟与评估不同溃口规模下多种调控手段联合运用在应急处置中的有效性。利用中国水利水电科学研究院自主研发的洪涝仿真模型,通过改进立交河道计算单元的拓扑关系和退水闸模拟方式,建立了渠道一维、溃口流量及两岸二维同步耦合计算的溃堤洪水淹没模型。以某大型人工输水渠道典型高填方段为例,分类对比分析了不同溃口宽度、关闸时间和退水闸是否启用等共12种情景下的洪水淹没特征变化。结果表明:溃口宽度的增加对溃决洪水淹没范围和程度的影响较小;关闸时间越早,越可以有效减少淹没区的面积和水深,且在3h内效果更明显;当地形和构筑物条件有利于洪水扩散时,及早关闸对淹没范围的减小幅度更大;在洪水不容易扩散的区域,及早关闸对淹没水深的减小幅度更大;退水闸启用后对淹没的减轻作用与退水闸和溃口之间的相对位置和距离有关,位于溃口上游且距离越近时越有效。研究可为大型人工输水渠道制定或完善相应应急预案提供基本的手段和依据。

关键词:人工输水渠道;高填方段;溃决洪水;情景分析;溃口宽度;节制闸;退水闸

中图分类号:TV68 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Burst flood scenario of high-filled section of large scale artificial water supply channel

WANG Jing^{1,2}, LI Na^{1,2}, ZHENG Jingwei^{1,2}, HAN Song^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of MWR, Beijing 100038, China)

Abstract: To prevent the high-filled section of a large-scale artificial water conveyance channel from breaking under abnormal external forces, it is necessary to establish an appropriate scenario analysis method to simulate and evaluate the effectiveness of the combined application of multiple control measures in the emergency response under different breach scale. Using the flood simulation model independently developed by the China Institute of Water Resources and Hydropower Research, by improving the topological relationship of crossed channels and simulation method of recession sluices, a dike break flood inundation model of one-dimensional channel, breach flow, and two-dimensional simultaneous coupling calculation on both banks was established. Taking a typical high-filled reaches of a large-scale artificial water supply channel as an example, the changes in flood inundation characteristics under 12 scenarios, including different breach width, gate closing time, and whether the retreat gate is opened or not, are classified and analyzed. The results showed that: the increase of breach width had less impact on inundation extent and degree of outburst flood; the earlier the closure time of sluice gates was, the better the decrease of inundation area and water depth was, while the effect was more obvious during the first 3 hours after dike-

收稿日期:2020-03-19 修回日期:2020-08-26 网络出版时间:2020-09-15

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200914.1720.002.html

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1508003);南水北调中线一期工程安全风险评估项目 III 标段—洪水风险评估(JZ0203A242016)

作者简介:王静(1985—),女,山西沁源人,高级工程师,博士,主要从事水灾害与水安全研究。E-mail: wangjing8585@126.com

通信作者:李娜(1973—),女(回族),河南周口人,教授级高级工程师,博士,主要从事城市洪涝灾害仿真模拟和洪水风险管理等研究。E-mail: lina@iwhr.com

breaking happened. When the terrain and ground objects distribution were conducive to flood diffusion, closing the sluice gate early could decrease more inundation area, otherwise, in areas where flood was not easy to spread, it was more effective for the decrease of inundation depth. The mitigation function of recession sluice for inundation was relevant to the relative position and distance between the gate and breach, the sluice located in the upper stream of the breach with closer distance was more effective to decrease the inundation. The basic method and basis are provided for the formulation or improvement of corresponding emergency plans of the large-scale artificial water supply channel.

Key words: artificial water supply channel; high-filled section; outburst flood; scenario analysis; breach width; control gate; recession sluice

在降水分布严重不均的背景下,为了增强水资源配置能力,我国兴建了一批大型调水工程^[1]。长距离人工输水渠道在修建时为适应地形变化和满足水力设计参数要求,存在填方、挖方和半挖半填等不同的填筑方式。针对填方,尤其是高填方渠段(一般指填方高度大于6 m),由于其槽蓄水体部分或大部分处于地面高程以上,在输水运行时,一旦因超级地震、极端暴雨洪水或蓄意恐袭等超强外力而出现渠道溃决事件,很可能引起大量渠水外泄,在渠道外产生淹没,对当地的生产生活安全造成影响^[2-3],成为所在区域与工程修建前相比非固有的洪水风险来源之一。为防范这类潜在风险,在大型人工输水渠道上设置一系列控制闸和退水闸,通过上下游闸门的应急调度调控风险、减少损失^[4]。

目前,国内外学者在此类渠道或河道堤防溃决风险事件方面开展了较多研究,由于关注重点和研究目的不同,采用的方法基本可分为3类:(1)失事概率研究,基于水文不确定性和可靠度理论,着眼于堤防工程自身风险^[5]。(2)以层次分析法、模糊综合评价法为代表的研究,通过综合风险率或风险指数来反映评估对象之间相对风险的大小^[6]。(3)情景分析,利用基于物理机制的数值模拟技术对可能发生的溃决事件进行研究^[7-8]。由于人工输水渠道的水流大小主要根据调度规则控制,在水文上不具备一般行洪河道在特定气候、地形等孕灾环境支配下的概率分布特征,且一旦溃决,在应急决策中更关注的是可能造成的淹没和影响后果,而非不同渠段之间溃决风险的相对大小。所以,此类风险事件所具有的不确定性需要利用情景分析方法来判断^[9],通过假设各种可能发生的不利情景,利用模型定量模拟预测其可能造成的后果,为应急预案的科学编制和实施提供基本依据。

在溃决洪水的数值模拟方面国内外也已开展了大量研究:张大伟等^[10-11]采用 Preissmann 格式和 Roe 格式分别求解一、二维水流模型,针对建筑物密

集的城市区域溃堤问题,考虑社区和楼房内部的容水性,引入侵入水量的概念,构建了溃堤水流运动数学模型;姜晓明等^[12]基于黎曼近似解 Godunov 格式,通过堰流公式耦合,实现了河槽内外水力要素的交互和空间同步计算;Roger 等^[13]通过物理模型数据和二、三维数值模拟结果相结合得出二维模型可以重现淹没区的稳定流状态,但模拟的溃口处流量偏低,所以建议在溃堤洪水预报时综合运用二维和三维模型进行模拟。在溃堤洪水情景分析方面的研究有:丁志雄等^[14]利用溃堤洪水仿真模型针对江西抚河 2010 年唱凯堤溃堤进行情景反演,模拟出实际溃堤封堵修复过程和溃堤分流措施的效果;柳杨等^[15]利用 Infoworks RS 对新沭河防洪保护区溃堤风险的研究表明,洪水风险与溃口位置和洪水量级直接相关,且基本遵从地形高低原则,中下游风险明显高于上游;张红萍等^[16]针对黑龙江同抚堤 2013 年实际发生的溃口事件,采用自主开发的二维水动力学模型对比分析了不同扒口、封堵方案下淹没区的退洪效果。

研究表明随着水力学数值模型的不断发展,其在溃堤洪水风险事件分析中的应用也较为成熟,但以往研究大多以自然或人工修建的行洪河道为对象,且主要集中在对溃堤洪水的淹没分布特点进行分析。针对人工填方或高填方输水渠道溃堤产生的附加风险,更需要研究的是如何编制切实可行的应急预案,在紧急情况下能够及时、合理、有效运用各种调控手段,最大限度减轻渠道溃决的风险。本文以某大型人工渠道的典型高填方渠段为例,在构建同步耦合计算的渠道一维、溃堤及两岸二维水力学数学模型的基础上,通过分析不同溃口宽度、不同关闸时间、退水闸是否启用及其与溃口之间不同距离等方案下淹没范围和程度的变化,提出不同调度方式或运用方案对高填方段溃决洪水淹没的影响特点和大小,定量评估不同溃口规模下多种调控手段联合运用的有效性,

为科学编制事件发生前、后的应急预案提供基本的依据,同时也为预案实施能力建设提供了一种桌面推演手段。

1 人工输水渠道高填方段的基本控制工程

人工输水渠道通过节制闸控制各渠段的流量和

水位^[17-18],在经过区域原有的大小河流时,根据地形、水力条件通过倒虹吸、渡槽、暗涵、暗渠、涵洞等交叉建筑物^[19]保持各自水流流路的连续性,并配有分水闸向受水区输水,配有退水闸以保证检修、防洪和在其他紧急情况下的渠道安全^[20]。其典型渠段的基本控制工程分布见图 1。

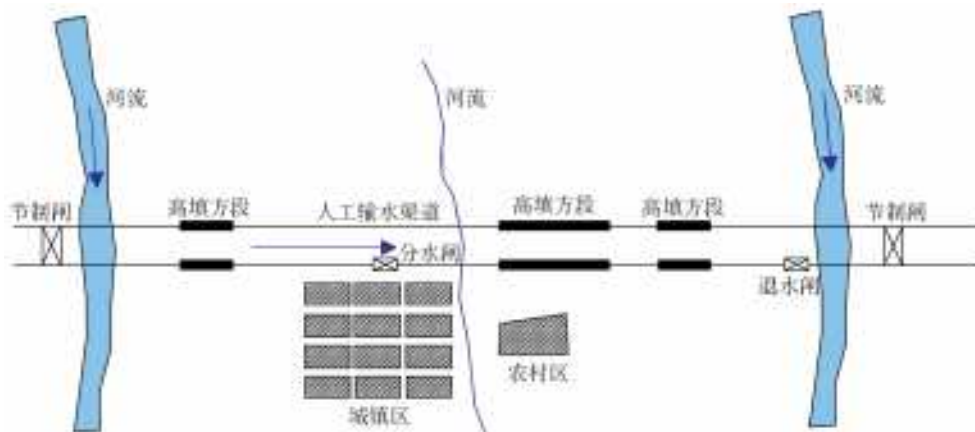


图 1 人工输水渠道高填方段上下游的基本控制工程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic control structures in the upstream and downstream of an artificial water supply high-filled section

2 溃堤洪水淹没模型及改进

采用由中国水利水电科学研究院自主研发的洪涝仿真模型^[21-24],并针对模型中基本计算单元的拓扑关系建立和退水闸计算方法进行一定的改进,用于模拟不同溃堤方案的淹没分布。该模型将研究区域按非结构不规则网格进行离散,区域内宽度较小的河道按特殊通道处理,结合有限体积法和有限差分法求解二维非恒定流方程组,在网格形心处计算水深,在网格周边通道上计算流量。溃口处流量过程根据渠道内和溃口外的实际水位、水深及溃口底高程按宽顶堰公式计算。本次研究针对立交河道概化、退水闸流量处理进行了一些调整。

2.1 立交河道计算单元拓扑关系的调整

洪涝仿真模型中的基本计算单元包括网格、通道和节点以及特殊通道和特殊节点(图 2)。由于人工渠道的宽度较网格平均尺寸偏小,所以按特殊河道考虑。在网格剖分时,将渠道的左右堤线分别作为特殊河道通道模拟对应左右岸的溃决洪水情景。在原有模型中,作为特殊处理的计算单元,特殊河道通道具有一定的宽度,并根据拓扑关系与其两侧网格之间存在水流交换;特殊河道节点具有一定的面积,通过与之相连的特殊河道通道上顺通道方向和通道左右两侧法线方向的流量判断每个计算步长末保留在特殊河道节点上的水量

和水深^[22]。由于人工输水渠道与已有河流相交时,一般通过交叉建筑物将河流从渠道上方或下方穿过,或不改变已有河流形态,将渠道从河流上方或下方穿过^[25-26],所以在模型概化时,需调整此类立交河道的拓扑关系,在满足人工渠道内水流运动与已有河道相互独立的同时,保证渠道左岸洪水可以向右岸流动。以图 2 中的区域为例,按照原始空间位置,与特殊河道节点 1 相连的特殊河道通道包括通道①、②和③,特殊河道通道①两端为节点 1、2,这会引起人工渠道内的水沿通道①流向已有河道,所以调整方法如下:

- (1)将通道①与节点 1 之间的连接断开,调整其两端节点为节点 2、3。
- (2)将与特殊河道节点 1 相连的特殊河道通道减少为通道②、③。
- (3)与特殊河道节点 3 相连的特殊河道通道由原来的通道④增加为通道①、④。

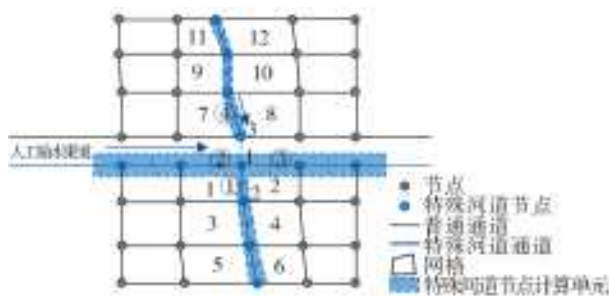


图 2 立交河道的计算单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation unit for crossed channels

2.2 退水闸模拟

退水闸的主要作用是在发生事故或检修时,上(或下)游节制闸关闭挡水,渠道内水流通过退水闸就近排入原有河道(图1),减少对渠道和当地防洪安全的影响。在洪涝仿真模型中,根据闸门调度方式的不同,可分为按时间调度、按水位调度和按流量调度,分别代表当模型计算时间达到开(或关)闸时间时打开(或关闭)闸门、当参考站水位达到开(或关)闸水位时打开(或关闭)闸门、当参考站流量达到开(或关)闸条件时打开(或关闭)闸门。本次针对渠道溃堤洪水的模拟主要考虑高填方段发生溃决后,启用退水闸退水,符合按时间调度的特点,且在渠道设计时一般按水流进入已有河道后,形态不受下游水位影响考虑,故采用宽顶堰自由出流计算过闸流量,从退水闸排出的水量因可沿退水渠进入河道并向下游演进,所以不再计算该水量在相邻网格内的运动过程,直接将每个计算步长内的退水量按排入研究区域外的水量参与水量平衡方程的求解,从而体现退水闸对于渠道内水流和淹没区洪水的影响作用。

3 案例分析

3.1 模型构建

选择的案例区域属于某大型人工输水渠道的多个典型高填方渠段,填方高度最大达13 m,渠道两岸经过部分城市化密集区域和大量乡镇、农村,左岸地形坡度较大,右岸大部分为平原区,坡度较小。在构建模型时,人工渠道以距离高填方段最近的上下游节制闸为边界,按一维非恒定流模拟;渠道两岸区域采用无结构不规则网格剖分,网格的边沿计算区域内的主干河道、大型湖泊、堤防、主干道路、铁路等具有阻水或排水作用的线状工程与地物布置,网格面积按平均为 0.04 km^2 控制,即 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,见图3。溃决洪水在两岸的演进按二维非恒定流模拟;渠堤溃决方式采用较为危险的瞬间全溃,溃口底高程取溃口处渠道底高程与渠外地面高程的高值,且渠道一维模型、溃口处的流量计算模块和溃口外洪水的二维演进模型同步耦合,在每个计算步长内进行参数的传递和交互。

3.2 情景分析

3.2.1 不同溃口宽度的洪水淹没情景分析

在假定溃口发生时立即关闭上下游的节制闸且未采取其他任何抢险措施的情景下,根据案例区域渠道堤防面板分块宽度,共分析了位于不同高填方

渠段左右岸的8个溃口(如图3所示,以I左、I右至IV左、IV右表示)在8、16、24和32 m等4种溃口宽度下溃决洪水的淹没情况。考虑到溃口发生后从应急决策到人员转移、工程抢险修复等所需时间,模拟总时长设为24 h。表1和图4分别为各方案的溃决总水量、淹没总面积、平均淹没水深和最大水深数据和分布图。由图表可见,同一溃口处,溃口宽度的不同对溃决总水量、最大淹没范围和平均淹没水深影响较小,仅对淹没区内的最大水深有所影响。当溃口宽超过16 m时,淹没总范围基本不变,平均淹没水深变幅未超过0.08 m,最大淹没水深变幅多数低于0.15 m。



图3 网格和通道分布示意图

Fig. 3 Grids and passages distribution

3.2.2 不同关闸时间的洪水淹没情景分析

在人工渠道的应急调度中,为保证闸前壅高水位不超过允许值,节制闸关闭至0开度的操作需要一定的时间^[27-28]。为了分析不同关闸时间下溃决洪水对两岸的影响,在案例区域的不同溃口处计算了包括立即关闸、0.5、1.0、2.0、3.0 h后关闸以及模拟时段内一直未关闸等6种情景。各方案的溃口宽度均为32 m,模拟总时长为24 h。从典型溃口的溃决总水量、淹没总面积(图5)和特征水深变化(图6)可以看出,同一溃口处关闸时间越早,淹没程度越小。提前关闸对淹没范围的减少幅度在右岸较左岸更为明显,但对最大和平均淹没水深的减小幅度则为左岸较右岸更多,这与案例区域的地形和渠道走向有关。左岸发生溃口后受渠堤阻挡,淹没水量主要集中于溃口附近,向外围扩散的范围有限,而右岸溃口后洪水根据地形向四周扩散的范围较远。另外,当关闸时间超过3 h后,右岸溃口的淹没面积、平均和最大淹没水深基本趋于稳定,所以针对案例区域的右岸溃口事件在应急抢险时,应在溃口发生后的3 h内采取措施,才能有效减少影响范围和程度。

表 1 不同溃口宽度下的典型高填方段溃决洪水淹没特征值统计

Tab. 1 Inundation characteristic values for outburst flood from typical high-filled section under different breach widths

序号	溃口编号	溃口宽/m	溃决总水量/万 m ³		淹没总面积/km ²		平均淹没水深/m		最大淹没水深/m	
			绝对值	变化值	绝对值	变化值	绝对值	变化值	绝对值	变化值
1	I 左	8	142	—	1.69	—	1.07	—	2.42	—
2	I 左	16	142	0	1.82	0.13	1.05	-0.02	2.66	0.24
3	I 左	24	142	0	1.82	0	1.11	0.06	2.80	0.14
4	I 左	32	142	0	1.82	0	1.15	0.04	2.89	0.09
5	I 右	8	157	—	6.87	—	0.38	—	1.91	—
6	I 右	16	157	0	6.87	0	0.46	0.08	2.08	0.17
7	I 右	24	157	0	6.94	0.07	0.50	0.04	2.43	0.35
8	I 右	32	157	0	6.94	0	0.53	0.03	2.72	0.29
9	II 左	8	35	—	0.61	—	0.66	—	1.27	—
10	II 左	16	35	0	0.61	0	0.67	0.01	1.29	0.02
11	II 左	24	35	0	0.61	0	0.70	0.03	1.38	0.09
12	II 左	32	35	0	0.61	0	0.72	0.02	1.51	0.13
13	II 右	8	36	—	6.28	—	0.17	—	1.40	—
14	II 右	16	36	0	6.55	0.27	0.18	0.01	1.73	0.33
15	II 右	24	36	0	6.59	0.04	0.19	0.01	2.01	0.28
16	II 右	32	36	0	6.59	0	0.19	0	2.22	0.21
17	III 左	8	40	—	0.41	—	1.53	—	2.89	—
18	III 左	16	40	0	0.41	0	1.58	0.05	2.89	0
19	III 左	24	41	1	0.47	0.06	1.46	-0.12	2.89	0
20	III 左	32	41	0	0.53	0.06	1.35	-0.11	2.88	-0.01
21	III 右	8	66	—	5.18	—	0.33	—	1.94	—
22	III 右	16	66	0	5.18	0	0.38	0.05	2.16	0.22
23	III 右	24	66	0	5.54	0.36	0.39	0.01	2.59	0.43
24	III 右	32	66	0	5.54	0	0.41	0.02	2.94	0.35
25	IV 左	8	22	—	0.55	—	0.65	—	1.31	—
26	IV 左	16	22	0	0.55	0	0.70	0.05	1.44	0.13
27	IV 左	24	22	0	0.55	0	0.72	0.02	1.52	0.08
28	IV 左	32	22	0	0.55	0	0.73	0.01	1.57	0.05
29	IV 右	8	36	—	3.36	—	0.18	—	0.60	—
30	IV 右	16	36	0	3.55	0.19	0.20	0.02	0.78	0.18
31	IV 右	24	36	0	3.89	0.34	0.20	0	0.90	0.12
32	IV 右	32	36	0	3.89	0	0.21	0.01	0.99	0.09

3.2.3 退水闸启用与否的洪水淹没情景分析

选择 2 处典型高填方段分析退水闸的启用与否对溃决洪水淹没的影响。表 2 为 2 个高填方段所在渠段的退水闸基本信息,其运用方式为溃口发生 3 h 关闭溃口上下游最近的节制闸,同时开启事故段上下游退水闸。溃口宽均为 32 m,模拟总时长为 24 h。其中,高填方段 2 与高填方段 1 相比在溃口上、下游各有一个退水闸,且上游退水闸距离溃口仅 3 km,有利于溃堤事件发生后上游渠道内槽蓄水量的排出。

利用溃堤洪水淹没模型计算的各溃口方案淹没结果表明,退水闸的启用可以有效减少溃决水量、洪水淹没和影响的范围和程度(表 3 和图 7),溃决总水量减少的比例分别为 11 %和 49 %,但高填方段 1 的其他各项淹没特征值变化均不大,淹没总面积和水深超过 2 m 的淹没面积分别只减少 2 %和 9 %,高填方段 2 的溃决洪水淹没总面积和水深超过 2 m 的淹没面积分别减少了 58 %和 38 %,由于淹没面积大幅减少,其平均淹没水深在启用后比未启用时有所增大。

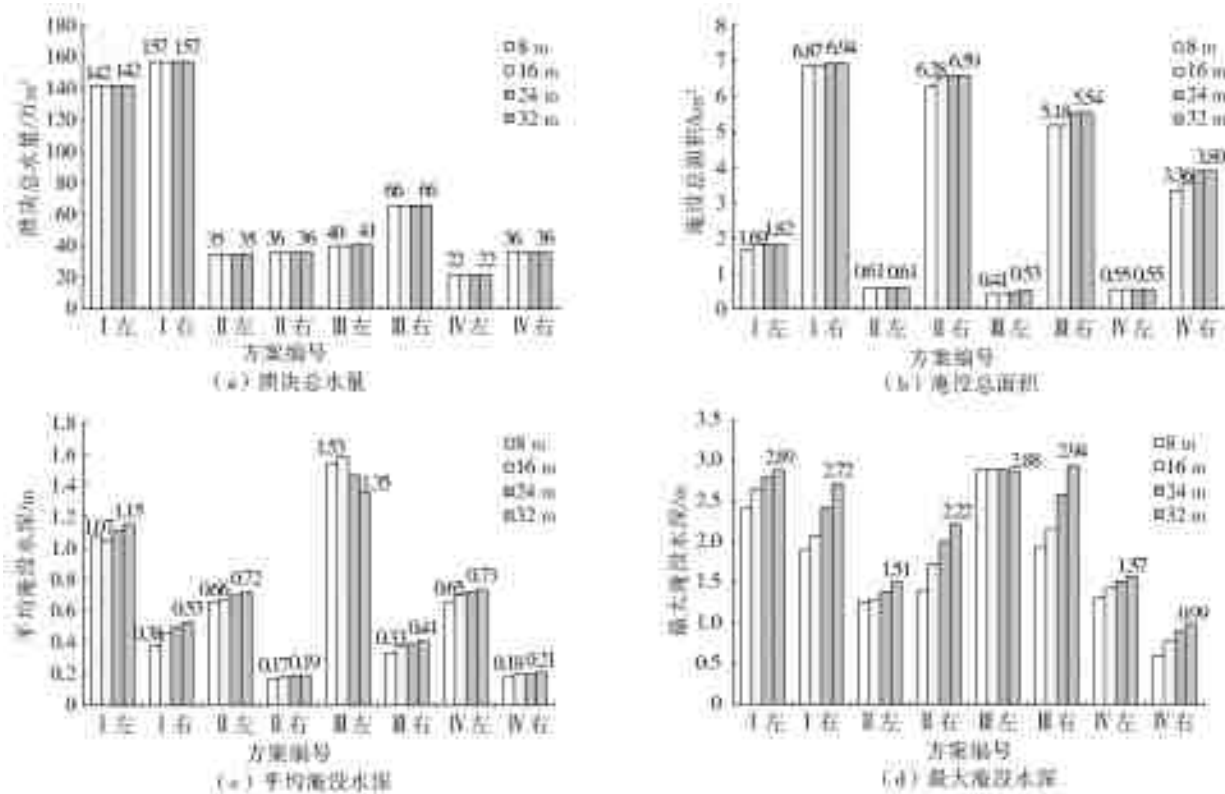


图 4 不同溃口宽度下各方案的洪水淹没特征值分布

Fig. 4 Inundation characteristic values histogram of each breach scheme under different widths

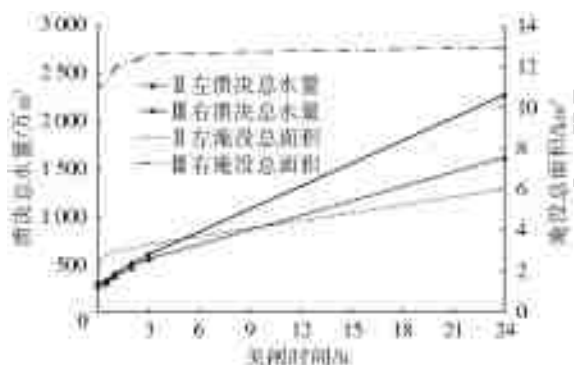


图 5 不同关闭时间下典型溃口方案的溃决总水量和淹没总面积

Fig. 5 The total dike-breaking volume and inundation area of typical breaches under different closing time for sluice gates

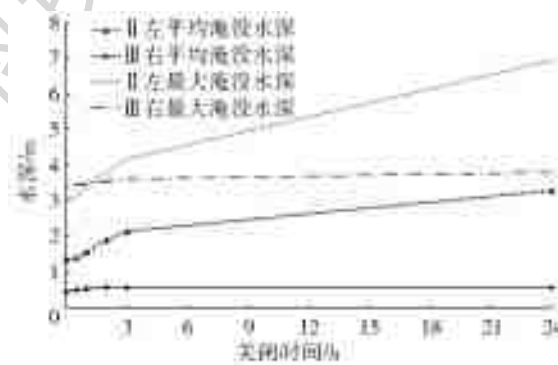


图 6 不同关闭时间下典型溃口方案的特征淹没水深

Fig. 6 The characteristic water depth of typical breaches under different closing time for sluice gates

表 2 典型高填方段的退水闸信息

Tab. 2 The recession sluices information of typical high-filled section

名称	上下游节制闸间距/km	溃口距退水闸距离/km	退水闸位于溃口的上下游位置	闸孔数/个	闸孔宽/m	闸底高/m	设计流量/(m³ · s⁻¹)
高填方段 1	13	11	下游	1	6.0	119.102	157.5
高填方段 2	30	3	上游	1	5.5	85.199	120.0
		10	下游	1	5.5	84.381	120.0

表 3 退水闸参与运用后的淹没特征值变化

Tab. 3 The change of inundation characteristic value of return sluice after its operation

方案名称	溃决总水量/万 m³	淹没总面积/km²	平均淹没水深/m	最大淹没水深/m	水深>2 m 的淹没面积/km²	
高填方段 1	未启用	399	6.45	1.22	3.97	1.40
	启用	354	6.29	1.20	3.97	1.27
高填方段 2	未启用	568	10.61	0.75	3.20	1.06
	启用	292	4.41	1.03	3.07	0.66

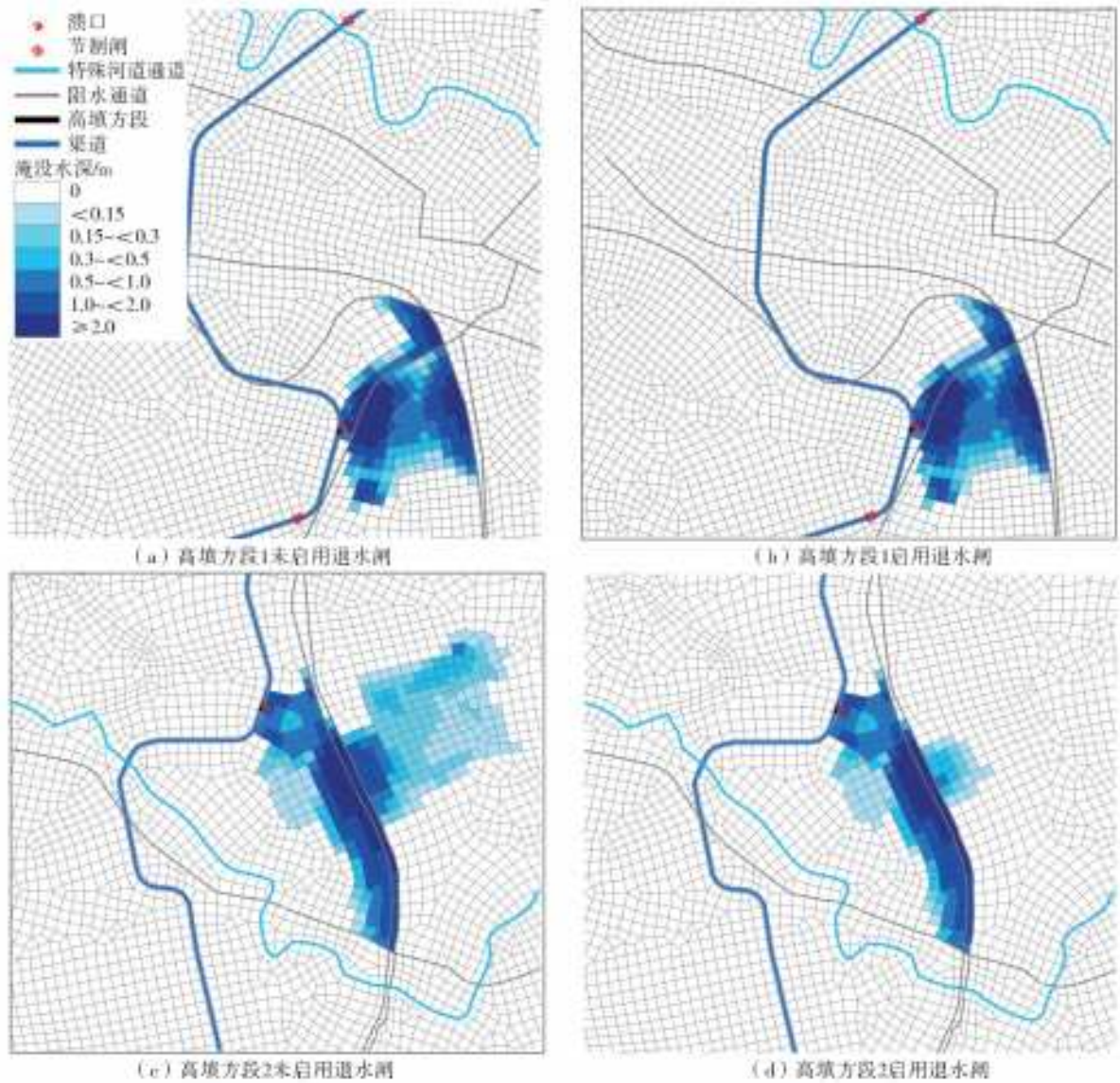


图 7 典型高填方段溃决洪水淹没水深图

Fig. 7 Flood inundation water depth maps for breach on two typical high-filled section

4 结 论

利用改进后的溃堤洪水淹没模型分析了某大型人工输水渠道典型高填方段在不同溃口宽度、关闸时间和退水闸是否启用情景下的溃决洪水淹没分布,得出以下结论:

(1)在同一高填方段且计算的总时段相同时,从溃决洪水在整个演进过程中造成的最大淹没结果看,溃口宽度的增大不会引起溃决总水量、淹没总范围和程度的明显变化,仅会使整个淹没区内的最大水深有所增加。

(2)溃口发生后,及早关闭离溃口最近的上下游节制闸可以有效控制溃决水量,从而减少对渠道左右岸的影响范围。当地形条件有利于洪水扩散时(如案例区域中的右岸溃口),在 3 h 内关闸时间越早,淹没总范围越小,但对淹没水深的降低效果不明

显;反之,当淹没区内的地形或存在阻水构筑物限制了洪水的演进范围时,在 3 h 内不同关闸时间对淹没总面积的影响不大,但可以明显降低淹没区内的水深。

(3)在关闭节制闸的同时,启用溃口附近的退水闸后,由于能直接将渠道内的剩余水量排入下游河道,减少了溃口处的外溢水量,所以可有效缩小淹没范围和降低淹没程度,且当有位于溃口上游和距离溃口越近的退水闸时,减少淹没的效果越明显。

在大型人工输水渠道的实际运行过程中,高填方段渠堤发生溃决的可能性是较低的^[29],通过加强监测和巡查及时发现隐患和险情,可以有效降低风险事件发生的可能性。一旦发生溃决后,由于可以通过关闭上下游的控制闸将可能发生外泄的水量限定为两闸之间渠段内的水量,同时启动就近的退水

闸还可以有效减少总水量,所以此类风险是可调控的。其影响范围除了与溃口宽度、关闸时间和退水闸启用情况有关外,还受渠道本身的规模、应急调度方案、两岸的地形和阻水、排水条件等因素的影响,是所有相关因素综合作用的结果。本研究主要选择典型案例渠段分析了单一因素变化时对溃决洪水淹没的影响情况,今后还需进一步对多种调控方式组合变化条件下的综合影响进行模拟和敏感性分析,以期为此类工程事件的预案完善和应急处置提供更全面的参考。

参考文献:

- [1] 高媛媛,姚建文,陈桂芳,等.我国调水工程的现状与展望[J].中国水利,2018(4):49-51. DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2018.04.025.
- [2] 槐先锋,王晓蕾,陈晓璐.南水北调中线干线工程防汛风险及对策研究[J].水利发展研究,2016,16(11):9-11,26. DOI:10.13928/j.cnki.wrdr.2016.11.003.
- [3] 屈志刚,申黎平,李明新,等.南水北调中线工程高填方渠道加强措施探讨[J].人民长江,2013,44(16):63-66. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2013.16.025.
- [4] 聂艳华,黄国兵,崔旭.南水北调中线应急调度节制闸预警水位研究[J].人民长江,2015,46(4):67-69,81. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.04.016.
- [5] 孙东亚,解家毕,姚秋玲.堤防工程失事概率分析方法及溃决模式研究[J].中国防汛抗旱,2010,20(2):25-28. DOI:10.16867/j.cnki.cfdm.2010.02.009.
- [6] 耿雷华,姜蓓蕾,刘恒,等.南水北调东中线运行工程风险管理研究[M].北京:中国环境科学出版社,2010.
- [7] 钟登华,李超,孙蕊蕊,等.长距离调水工程高填方渠道溃堤三维洪水演进情景仿真[J].水力发电学报,2015,34(1):99-106. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2015.01.016.
- [8] SALUNKHE S S, RAO S S, PRABU I, et al. Flood inundation hazard modelling using CCHE2D hydrodynamic model and geospatial data for embankment breaching scenario of Brahmaputra river in Assam[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(6):915-925. DOI:10.1007/s12524-018-0749-3.
- [9] 斯洛博丹·西蒙诺维奇.气候变化背景下的洪水风险管理[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [10] 张大伟,李丹勋,陈稚聪,等.溃堤洪水的一维、二维耦合水力模型及应用[J].水力发电学报,2010,29(2):149-154. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.02.028.
- [11] 张大伟,程晓陶,黄金池.建筑物密集城区溃堤水流二维数值模拟[J].水利学报,2010,41(3):272-277. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.03.006.
- [12] 姜晓明,李丹勋,王兴奎.基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J].水科学进展,2012,23(2):214-221. DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2012.02.006.
- [13] ROGER S, DEWALS B, ERPICUM S, et al. Hybrid modelling of dike-break induced flows[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Fluvial Hydraulics[C]. Brunswick, Germany, 2010:523-531.
- [14] 丁志雄,李娜,许小华,等.江西抚河2010年唱凯堤溃堤洪水模拟反演分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(4):285-292. DOI:10.13244/j.cnki.ji-whr.2019.04.006.
- [15] 柳杨,范子武,刘国庆,等.基于Infoworks RS的新沅河溃堤洪水风险分析[J].水电能源科学,2018,36(8):47-51.
- [16] 张红萍,刘舒,胡昌伟,等.黑龙江同抚堤溃堤洪水淹没及退水过程分析[J].中国防汛抗旱,2015,25(1):65-69. DOI:10.3969/j.issn.1673-9264.2015.01.023.
- [17] 方神光,吴保生.南水北调中线输水渠道中节制闸影响研究[J].水利水电技术,2008,39(2):32-35,39. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2008.02.018.
- [18] 黄少华,黄会勇,吴泽宇,等.基于GIS的大型人工输水渠道供水调度管理系统[J].南水北调与水利科技,2010,8(1):5-7,18. DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.002.
- [19] 黄会勇,刘子慧,范杰,等.南水北调中线工程总干渠水力学仿真模型研究[J].水利水电技术,2013,44(12):111-115,122. DOI:10.3969/j.issn.1000-0860.2013.12.029.
- [20] 何海燕,张永光.南水北调中线干线工程闫河退水闸监测资料分析[J].河南科技,2018(3):78-80. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2008.02.018.
- [21] 刘树坤,宋玉山,程晓陶,等.黄河滩区及分滞洪区风险分析和减灾对策[M].郑州:黄河水利出版社,1999.
- [22] CHENG X T. Urban flood prediction and its risk analysis in the coastal areas of China[M]. Beijing:China Water & Power Press,2009.
- [23] 李娜,仇劲卫,程晓陶,等.天津市城区暴雨涝仿真实模拟系统的研究[J].自然灾害学报,2002,11(2):112-118. DOI:10.13577/j.jnd.2002.0220.
- [24] 王静,李娜,程晓陶.城市洪涝仿真模型的改进与应用[J].水利学报,2010,41(12):1393-1400. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.12.002.
- [25] 戴桂枝.长距离引水中的河渠交叉建筑物型式探讨[J].人民长江,1990(1):13-16. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.1990.01.003.

(下转第200页)

- [35] 何文举,刘慧玲,颜建军. 基本公共服务支出? 收入水平与城市人口迁移关系:以湖南省市域中心城市为例[J]. 经济地理,2018,38(12):50-59. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2018.12.007.
- [36] 王录仓,高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究:以张掖绿洲为例[J]. 自然资源学报,2014,29(11):1888-1901. DOI:10.11849/zrzyxb.2014.11.008.
- [37] 韩增林,许旭. 中国海洋经济地域差异及演化过程分析[J]. 地理研究,2008(3):613-622. DOI:10.3321/j.issn:1000-0585.2008.03.015.
- [38] 张锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.
- [39] 郝汉舟,汤进华,翟文侠,等. 湖北省绿色发展指数空间格局及诊断分析[J]. 世界地理研究,2017,26(2):91-100. DOI:10.3969/j.issn.1004-9479.2017.02.010.
- [40] 赵会顺,陈超,胡振琪,等. 天山北坡经济带城市土地集约利用评价及障碍因素分析[J]. 农业工程学报,2018,34(20):258-266. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.20.033.
- [41] 姜文来. 绿色水利及其与节水型社会关系研究[J]. 中国水利,2005(13):44-46. DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2005.13.015.

(上接第 155 页)

- [26] 桑军伟. 南水北调中线工程左岸排水建筑物险情及影响分析[J]. 建筑工程技术与设计,2017(28):1387. DOI:10.3969/j.issn.2095-6630.2017.28.311.
- [27] 聂艳华,黄国兵,何建国. 节制闸控制规则对南水北调工程应急调度的影响[J]. 水电与新能源,2011(4):62-65. DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.2011.04.024.
- [28] 赵鸣雁,孔令仲,郑艳侠,等. 串联渠池闸门同步关闭情况下关闭时间对闸前水位雍高影响[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(6):157-163,170. DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0166.
- [29] 胡丹,郑良,李硕,等. 南水北调中线明渠工程运行风险评估方法研究[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(6):98-101. DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.06098.