

基于数学模型的沂河橡胶坝群塌坝方案

陈界仁¹,赵悦君¹,任磊²,吕升奇¹

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098;2.上海市水利工程设计研究院有限公司,上海普陀 200061)

摘要:采用 mike11 软件建立了沂河水流数学模型,运用实测资料进行了模型验证,选取沂河、沭河等 6 座橡胶坝进行了单坝的泄流过程计算,依据橡胶坝的调度原则,开展了橡胶坝群的联合运用研究。结果表明:在考虑全塌坝时间均为 4 h 条件下,橡胶坝群联合运用后下游临沂断面洪峰流量 1 427 m³/s 较小埠东单坝塌坝时的洪峰流量 1 414 m³/s 增幅小于 1%。当临沂断面以上所来洪水的预见期在 8.95 h 以上时,给出的 2012 年洪水条件下橡胶坝的塌坝方案可提前下泄橡胶坝拦蓄的水量而不增大洪峰流量。

关键词:橡胶坝群;数学模型;洪峰流量;塌坝方案;沂河

中图分类号:TV649 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2022)01-0075-05

Collapse scheme of rubber dam group in Yihe River based on numerical model//CHEN Jieren¹, ZHAO Yuejun¹, REN Lei², LYU Shengqi¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract: The hydrodynamic numerical model of the Yihe River was established based on MIKE 11 software, and the model was verified by using the measured data. Six rubber dams along the Yihe River and the Benghe River were selected, among which the discharge process of each single rubber dam was calculated first and then the joint application of rubber dams was studied according to the scheduling principle of the dam group. The results show that in the condition of 4 hours collapsing time for all the dams, the peak discharge downstream the Linyi section is 1 427 m³/s and the peak discharge of the Xiaobudong rubber dam is 1 414 m³/s. The increase of discharge is less than 1% after the operation of rubber dam group. The scheme of dam collapse is put forward under the flood condition in 2022, in which the flood forecasting time upstream the Linyi section is longer than 8.95 hours. The proposed dam collapse scheme can store the water in advance and the peak flow discharge is not increased.

Key words: rubber dam group; numerical model; peak discharge; scheme of dam collapse; Yihe River

为了增加城市可利用水资源量和改善城市水景观,临沂市在沂河干支流上修建了规模大小不一的橡胶坝,形成橡胶坝群。当汛前预报有洪水到来时,这些橡胶坝都需要提前塌坝泄水,如果预报洪水量级较大,则需要塌坝到底,以避免洪水到来时造成河道壅水而不能顺畅下泄的情况。如果塌坝不及时和各橡胶坝不能统一调度,将导致橡胶坝下泄水量与自然洪水叠加,人为地加大了洪水量。很多学者开展了橡胶坝控制运用研究,Plaut 等^[1]对橡胶坝运行控制开展了测量研究;徐智廷等^[2]探讨了沂河梯级橡胶坝汛期调度运用,提出了汛期橡胶坝调度运用原则;李风增^[3]通过对胶南市风河梯级橡胶坝综合运用的研究,提出了橡胶坝调度控制办法;温会军^[4]对辽河干流 11 座橡胶坝的联合调度方案进行了探

讨,分析了橡胶坝联合调度的技术难点;张洪等^[5]对沂河葛沟橡胶坝的防洪调度进行探讨;陈瑞^[6]通过模型试验开展了橡胶坝溢流的流量系数研究;苑希民等^[7]对橡胶坝的泄流特性进行了模型试验;张庆华等^[8-9]对橡胶坝塌坝泄流进行了研究,提出了连续塌坝泄流过程的计算方法;刘杨等^[10]基于 MIKE FLOOD 水动力学模型,研究了在遭遇大洪水时橡胶坝群未塌坝运行的洪水动态演进情况;张靖等^[11]在对橡胶坝塌坝过程中形成的泄流过程模拟计算基础上,提出了快速估算橡胶坝塌坝最大泄流量的方法;张世功等^[12-13]针对橡胶坝对洪水调度及防洪影响进行了分析。

本文以临沂市的沂河橡胶坝群为研究对象,采用数学模型计算的方法,对橡胶坝塌坝泄流在临沂

断面形成的流量过程的变化规律进行分析,并提出临沂市沂河橡胶坝群在汛前的联合塌坝方案,研究成果可为临沂市沂河上橡胶坝群的联合度汛及其他类似的多橡胶坝运用提供参考。

1 数学模型建立与验证

一维水动力模型的基本方程采用圣维南方程组,该方程组由水流连续方程和水流运动方程组成:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为断面流量; x 为顺水流方向里程; A 为过水断面面积; t 为时间; q 为侧向入流流量; α 为动量修正系数; h 为断面水位; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度。上述方程组求解采用六点隐式差分格式。模型计算的进口边界条件采用流量过程,出口边界采用水位过程。

模型验证计算范围:沂河干流从上游的跋山水库坝下至下游的堽上水文站;支流考虑东汶河、蒙河、沭河,具体包括东汶河上游至岸堤水库,蒙河上游至高里水文站,沭河上游至姜庄湖。在模型计算范围内,沂河干流长约187 km,共布置断面190个;蒙河长约7 km,布置断面16个;沭河长约42 km,布置断面57个;东汶河长约67 km,布置断面69个。模型验证计算范围及断面位置见图1。

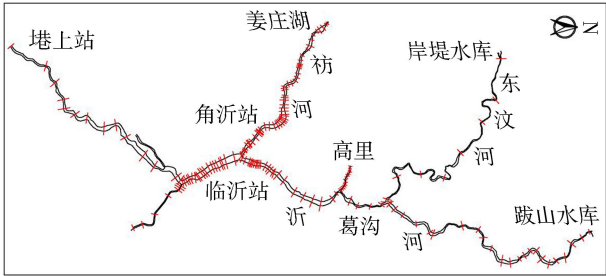


图1 模型验证计算范围及断面位置

橡胶坝作为一种可调控的水工建筑物,在模型的计算中被处理为流量控制点,其上下游为水位控制点。橡胶坝概化为顶部溢流的可调控水工建筑物,溢流时为实用堰,完全塌坝时为宽顶堰。依据GB/T 50979—2014《橡胶坝工程技术规范》实用堰的流量系数 $m=0.36\sim0.45$;宽顶堰的流量系数 $m=0.33\sim0.36$,相对变化较小。沂河橡胶坝为充水式,一般为双猫固定,根据规范,橡胶坝运行过程中流量系数 m 和相对坝高 P/H 分别采用式(2)(3)计算:

$$m = 0.163 + 0.0913h_1/P + 0.0951H_0/P + 0.0037h_2/P \quad (2)$$

$$P/H = 0.2127 - 0.2533h_1/H + 0.7053h_0/H + 0.1088h_2/H \quad (3)$$

式中: H_0 为坝袋内压水头; H 为设计坝高; P 为运行时坝袋充胀的实际坝高; h_1 为坝上游水深; h_2 为坝下游水深。

选择2006年、2007年的汛期实测水文资料分别进行率定和验证。在模型率定和验证的计算中,橡胶坝按其调度运用条件设置参数。设计坝高为3.5 m,塌坝20%时,坝水位为64.5 m,流量系数为0.396,按照泄流公式计算的流量为605 m³/s,实测的流量为576 m³/s,计算与实测偏差为5.0%。经多次试算调整,最终确定沂河干流河道河槽糙率为0.028,两岸滩地糙率值为0.04;东汶河河道河槽糙率为0.032,两岸滩地糙率为0.045;蒙河河道河槽糙率为0.03,两岸滩地糙率为0.042;沭河河道河槽糙率为0.029,两岸滩地糙率为0.044。临沂断面验证的水位、流量过程见图2。

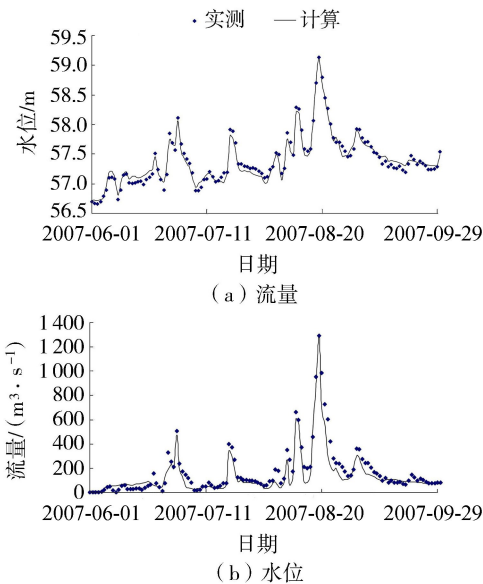


图2 临沂站2007年水位和流量验证结果

模型精度采用有效性系数 X_{NSE} 验证,公式如下:

$$X_{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

式中: Q_{obs_i} 为实测值; $\bar{Q}_{obs}$ 为实测系列的平均值; Q_{sim_i} 为模型计算值。模型验证的有效性系数临沂站水位为0.81,流量为0.86;葛沟站水位为0.84,流量为0.95。

从模型验证的水位、流量有效性系数分析,有效性系数最小为0.81,总体精度良好。从图2临沂站验证计算的水位、流量过程分析,计算的水位流量过程与实测结果基本一致,局部偏差较大,主要与闸坝实际应用中调度比较复杂,难以精确反映其调度情况有关。

2 单个橡胶坝塌坝的下泄过程计算结果

在模型验证基础上,选择沂河小埠东、桃园、柳杭橡胶坝以及沭河的角沂、花园、葛庄橡胶坝等6座,对河道恒定来流条件下单座橡胶坝塌坝泄流在临沂断面处流量过程的变化规律进行了计算。6座橡胶坝基本特性见表1。

表1 6座橡胶坝的基本参数

坝名	孔(节)数	单孔(节)宽/m	设计闸坝高/m	底板高程/m	蓄水量/万 m ³
小埠东	16	70	3.5	62	2830
角沂	4	74	4.5	66	550
花园	3	75	4.5	73	530
桃园	10	77	4.5	65	1250
葛庄	5	82	5.0	76	780
柳杭	5	90	5.0	69	2200

本文以来流流量 $Q=50\text{ m}^3/\text{s}$ 进行分析,假定在预测洪水来临前,6座橡胶坝均在自然洪水到达之前全塌。各橡胶坝实际最短塌坝时间未知,橡胶坝的设计塌坝时间一般为2h和4h,本文取各橡胶坝的塌坝到底时间均为4h。该条件下6座橡胶坝塌坝在临沂断面的流量过程如图3所示。

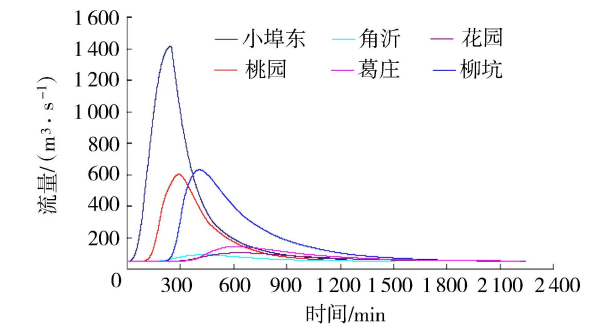


图3 单独塌坝时临沂断面的流量过程 ($Q=50\text{ m}^3/\text{s}$, $t=4\text{ h}$)

小埠东橡胶坝是下距临沂断面最近的橡胶坝,该橡胶坝对临沂断面的流量影响最大,只有小埠东橡胶坝塌坝条件下,临沂断面出现的峰值流量为 $1414\text{ m}^3/\text{s}$,在6座橡胶坝中最大。故6座橡胶坝联合调度最终形成的流量过程其峰值流量一定大于或等于 $1414\text{ m}^3/\text{s}$,按照峰小量大的原则,提出橡胶坝群联合运用后在临沂断面形成的峰值流量不大于小埠东单坝塌坝时在临沂断面形成峰值流量的1%的控制指标,以尽可能降低坝群运用的影响。

3 沂河橡胶坝群运用方案

3.1 橡胶坝群调度原则

橡胶坝群的调度必须要遵循以下几条较为关键的基本原则:

a. 避免与自然洪峰叠加的原则。梯级橡胶坝的塌坝必须在洪水到来之前完成,塌坝下泄形成的

流量过程要尽可能与自然洪水流量过程的主体部分错开,避免人为加大自然洪水的洪峰流量。

b. 峰小量大原则。梯级橡胶坝塌坝泄水时,为了减小对下游河床的冲刷,尽量避免泄水形成的流量过程成为陡涨陡落的尖瘦形流量过程,而要使其成为平缓的肥胖形流量过程。

c. 先蓄先泄原则。梯级橡胶坝无论是塌坝泄水还是充水拦蓄洪水尾部,都是先从下游开始,逆序进行塌坝或蓄水。

d. 限蓄原则。为了确保能够安全度汛,橡胶坝群中的各橡胶坝在汛期一般采取低于正常蓄水位的汛期限制水位,以此来减小洪水到来时需要下泄的蓄水量,进而降低风险。

按照上述4条基本原则,沂河6座橡胶坝的联合调度要在预测的洪水来临之前,从最下游的小埠东橡胶坝开始逐级向上进行塌坝,同时还要保证在橡胶坝群塌坝泄流过程中不发生陡涨陡落的现象。在满足以上条件的前提下,应使拦蓄的水量尽快下泄,避免和自然洪峰叠加。

3.2 恒定来流条件运用方案

选择临沂断面的泄流过程,按照逆序塌坝的基本原则,从6座橡胶坝中位于最下游的小埠东橡胶坝开始,采用逐级向上游塌坝、逐级计算择优的方法,逐渐增加橡胶坝的塌坝数量,最终完成6座橡胶坝联合塌坝方案。

最终得到的联合塌坝方案见表2,6座橡胶坝塌坝到底的时间均为4h,以小埠东橡胶坝开始塌坝的时刻为第0 min 计算,6座橡胶坝在8.95 h后全部塌到底,下泄水流全部流过临沂断面总计用时1820 min。

表2 6座橡胶坝的联合塌坝方案

坝名	开始塌坝时刻	塌坝到底时间/h	河道来流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
小埠东	第0 min	4	50
角沂	第94 min	4	50
花园	第188 min	4	50
桃园	第215 min	4	50
葛庄	第282 min	4	50
柳杭	第297 min	4	50

在上述坝群联合运用条件下临沂断面的峰值流量为 $1427\text{ m}^3/\text{s}$,相较于小埠东单坝塌坝时的峰值流量 $1414\text{ m}^3/\text{s}$ 增加了 $13\text{ m}^3/\text{s}$,峰值流量增幅小于1%,对峰值流量影响小。

若该塌坝方案中某些橡胶坝的塌坝到底时间增加,其下泄水流传至临沂断面的时间、峰值流量出现的时间等都会延后,峰值流量也会变小,如塌坝采取的开始塌坝时间不变,整个流量过程将变得更加“矮胖”,更有利于防止河床冲刷及保证河道防洪和

橡胶坝工程的安全,但塌坝所需的总时间也势必会增加,需要综合考虑进行取舍。因为在实际中还受到洪水预见期的影响,塌坝总时间不能无限长,若联合塌坝总时间过长导致不能保证在洪水到来前完成塌坝,反而更加不利,所以塌坝方案的选择还要结合洪水预报综合考虑。

3.3 实际洪水条件下的联合塌坝方案

实际洪水是非恒定流,运用实际洪水过程来检验橡胶坝群联合塌坝方案很有必要。实际洪水选择了2012年7月8—13日的一场较大洪水。在2012年7月8日0:00到7月13日0:00这段时间,临沂断面处出现的最大流量为5982.8 m³/s,本次洪水主要发生在7月10日和7月11日两天中,7月10日6:58时流量上涨开始超过1000 m³/s,7月10日14:52时流量达到最大值5982.8 m³/s,7月11日10:42时流量开始降到1000 m³/s以下。

按照临沂市现有的橡胶坝调度方案要求,橡胶坝群要在7月10日6:58临沂断面流量上涨到1000 m³/s之前全部塌坝到底,同时还要保证塌坝下泄的水流不与自然洪水的洪峰叠加,避免人为地加大洪峰流量,所以塌坝时机选择至关重要。开始塌坝时间的确定依赖于洪水的预见期,洪水预见期长,则有充足的时间来完成塌坝且能保证下泄水量提前通过,不与自然洪水洪峰叠加;若洪水预见期较短,在洪水到来前不久才开始塌坝,就可能发生橡胶坝还未全部塌到底而洪水就已经到来的情况,此时

橡胶坝就会对河道行洪造成一定的阻碍,下泄的水量与自然洪水发生叠加。

参考恒定流的橡胶坝群联合塌坝计算结果,6座橡胶坝从开始塌坝到全部塌坝到底所用时长总计8.95 h即8.95 h,所以最晚要在7月9日22:01时开始塌坝才能保证在临沂断面流量上涨到1000 m³/s之前完成全坝塌到底的任务。

考虑到洪水遇见期对于橡胶坝群联合调度的影响,在模拟中设置了橡胶坝联合塌坝方案在不同的洪水遇见期下的计算工况,这里的洪水预见期为提前预见河道流量增加到1000 m³/s的时间。洪水预见期选取20 h、15 h、10 h、8.95 h、5 h、0 h等6种情况,临沂断面流量过程的计算结果见图4。图中自然洪水过程指的是不考虑预见期,橡胶坝全塌情况。不同预见期塌坝流量过程均按塌坝时间4 h计算。

从图4的计算结果看出,预见期为20 h时塌坝下泄的水量在临沂站流量上升到1000 m³/s以前已经全部通过临沂断面,没有对自然洪水流量过程的主体部分造成影响;预见期为15 h时塌坝下泄的水量也基本上在临沂站流量上升到1000 m³/s前通过临沂断面;预见期10 h及预见期8.95 h时塌坝下泄的水量与自然洪水主体部分在峰前段均有不同程度的叠加,但对洪峰流量均无影响;预见期5 h时,橡胶坝群未能在自然洪水流量上涨到1000 m³/s之前全部塌坝到底,且下泄的水流与自然洪水的洪峰流量叠加,形成的最大流量为6199.9 m³/s,相对于自

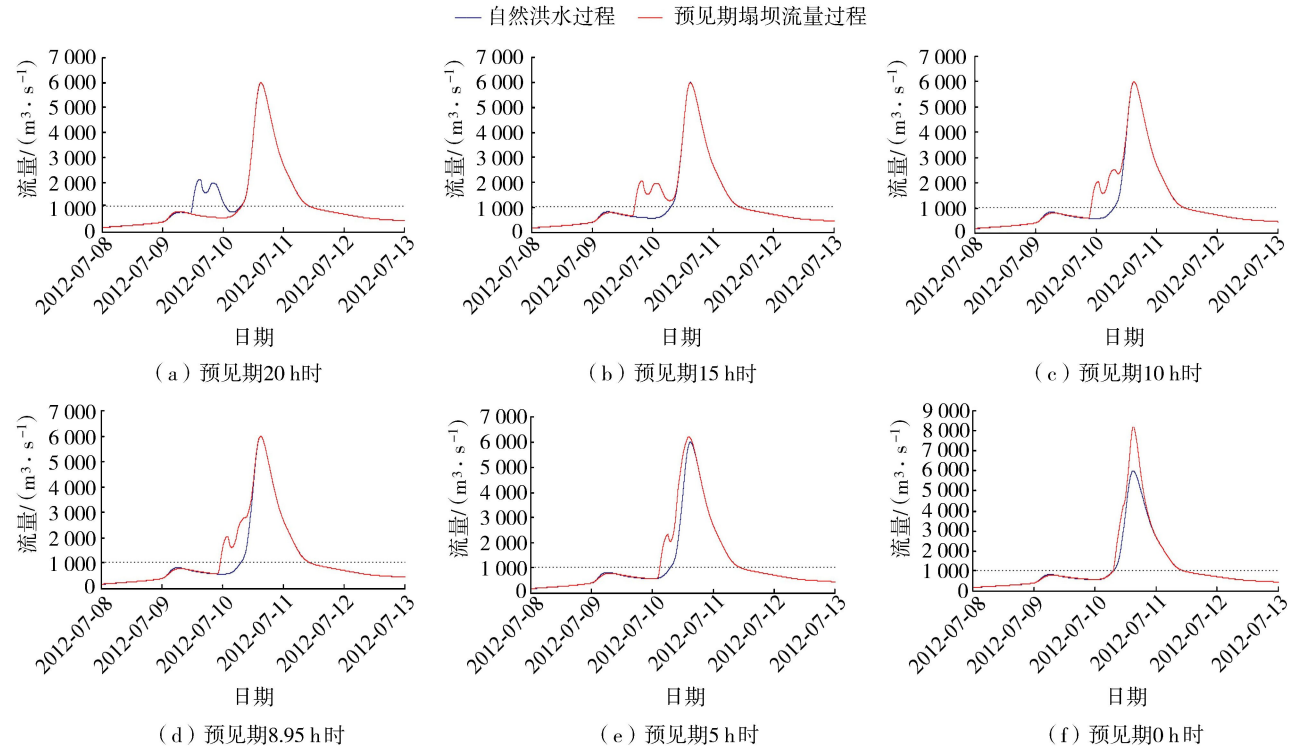


图4 不同洪水预见期运用联合调度方案的结果

然洪水过程的洪峰流量增加了 $217.2\text{ m}^3/\text{s}$; 预见期 0 h 时, 橡胶坝群在临沂站流量已经达到 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时才开始塌坝, 下泄的流量与洪峰流量发生了较大程度的叠加, 形成的最大流量为 $8\,218.4\text{ m}^3/\text{s}$, 相对于自然洪水过程的流量峰值增加了 $2\,235.6\text{ m}^3/\text{s}$ 。

由此可见, 当临沂断面以上所来洪水的预见期在 8.95 h 以上, 能够在临沂断面流量上涨到 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 之前完成 6 座橡胶坝的塌坝时, 在洪水中应用该橡胶坝群联合塌坝方案可以使橡胶坝拦蓄的水量提前下泄而不增大自然来水的洪峰流量。经多年实测暴雨洪水分析表明, 当预报小埠东坝上游来水洪峰流量上涨到 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上时, 洪水预报的平均预见期为 $8\sim 9\text{ h}^{[10]}$, 因此该联合塌坝方案在平均预见期下条件下能够完成预泄蓄水的任务。

4 结 语

本文采用数学模型计算方法对沂河、沭河等 6 座橡胶坝的泄流过程开展了研究, 得出了塌坝方案。在 6 座橡胶坝塌坝到底的时间均按 4 h 处理的条件下, 对各单坝的泄流过程进行了计算, 得到其下游临沂断面处洪峰流量为 $1\,414\text{ m}^3/\text{s}$ 。按照橡胶坝群的调度原则, 6 座橡胶坝联合运用时, 其下游洪峰流量为 $1\,427\text{ m}^3/\text{s}$, 流量增幅小于 1% 。2012 年 7 月实际洪水条件下, 该橡胶坝群联合塌坝运用时临沂断面洪峰流量增幅小于 1% , 计算分析得到的临沂断面以上所来洪水的预见期需要大于 8.95 h , 初步确定了橡胶坝群塌坝方案。

参考文献:

[1] PLAUT R H, LIAPIS I, TELIONIS D P. When the levee inflates[J]. Civil Engineering, 1998(1): 62-64.

[2] 徐智廷, 孙廷玺, 张世功, 等. 沂河梯级橡胶坝汛期调度运用原则探讨[J]. 中国水利, 2008(19): 61-62. (XU Zhiting, SUN Tinxi, ZHANG Shigong. Regulation of cascade rubber dam in Yihe River Basin[J]. China Water Resources, 2008(19): 61-62. (in Chinese))

[3] 李风增. 胶南市风河梯级橡胶坝综合管理与运用[J]. 中国水利, 2007(16): 65-66. (LI Fengzeng. Comprehensive management of Fenghe River cascade rubber dam in Jiaonan City[J]. China Water Resources, 2007(16): 65-66. (in Chinese))

[4] 温会军. 辽河干流橡胶坝联合调度方案编制方法[J]. 现代农业科技, 2012(9): 274-276. (WEN Huijun. Compiling method of joint dispatching scheme for rubber dam in Liaohe River[J]. Modern Agricultural Science and

Technology, 2012(9): 274-276. (in Chinese))

[5] 张洪, 艾茂宇. 沂河葛沟橡胶坝防洪调度初探[J]. 山东水利, 2012(1): 49-50. (ZHANG Hong, AI Maoyu. Preliminary study on flood control operation of Gegou Rubber Dam in Yihe River[J]. Shandong Water Resources, 2012(1): 49-50. (in Chinese))

[6] 陈瑞. 对橡胶坝流量系数的探索[J]. 水利学报, 1987(6): 36-39. (CHEN Rui. Study on discharge coefficient of rubber dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(6): 36-39. (in Chinese))

[7] 苑希民, 林继镰. 溢流橡胶坝泄流特性试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1996, 29(3): 342-348. (YUAN Ximin, LIN Jiyong. Experimental study on hydraulic characteristics of over flow rubber dan[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 1996, 29(3): 342-348. (in Chinese))

[8] 张庆华, 刁艳芳, 程传民. 梯级橡胶坝塌坝泄流计算仿真系统[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(4): 53-56. (ZHANG Qinhu, DIAO Yanfang, CHENG Chuanmin. Cascade rubber dams fall discharge calculation simulation system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 53-56. (in Chinese))

[9] ZHANG Q, DIAO Y. Cascade rubber dams fall discharge calculation and analysis[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38(8): 957-962.

[10] 刘杨, 张瑞海, 刘娟. 基于 MIKE FLOOD 模型的西北城市河道橡胶坝群洪水风险分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 113-119. (LIU Yang, ZHANG Ruihai, LIU Juan. Flood risk analysis of rubber dams group in urban rivers of northwest China based on MIKE model[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(6): 113-119. (in Chinese))

[11] 张靖, 沈欣菲, 周升龙. 橡胶坝塌坝最大泄流量快速估算方法[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 62-66. (ZHANG Jing, SHEN Xinfei, ZHOU Shenglong. Fast estimation method for maximum discharge of rubber dam collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research and Institute, 2020, 37(4): 62-66. (in Chinese))

[12] 张世功, 孙廷玺, 段伟华. 沂河梯级橡胶坝调度运用实况对洪水影响分析[J]. 治淮, 2010(5): 15-17. (ZHANG Shigong, SUN Tingxi, DUAN Weihua. Analysis on the influence of operation of Yihe cascade rubber dam on flood[J]. Journal of Zhi Huai, 2010(5): 15-17. (in Chinese))

[13] TAM P W M. Use of rubber dams for flood mitigation in Hong Kong[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123: 73-78.

(收稿日期: 2021-05-13 编辑: 骆超)