

黄河下游透水丁坝瞬溃后水力及冲淤特性研究

彭秀竹¹, 赵莹², 高璐¹, 徐向舟¹, 夏军强³

(1. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁大连 116024; 2. 山东省水利科学研究院, 山东济南 250013;
3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

摘要: 溃坝是一种瞬时带有巨大破坏作用的灾害性过程, 可引起河床的骤冲、骤淤以及下游岸滩失稳坍塌。基于 MIKE21 FM 软件构建二维水动力数值模型, 模拟了黄河下游老君堂河段拟建透水丁坝群中首排丁坝瞬时全溃后所诱发的水流泥沙运动过程, 分析了溃坝后床面剪切力的分布变化, 阐明了坝群附近河床的冲淤特点。研究表明: 首排坝瞬溃后, 溃坝波受下游丁坝群的影响而改变了其传播演进过程线; 溃坝对主槽的输沙能力影响较弱, 但却显著地影响了坝区泥沙的起运和沉降; 首排坝的坝体和次排坝的坝头是受损最严重的区域, 因此建议采用实体丁坝与透水丁坝相结合的复合式配置方式, 即首排坝和次排坝采用实体丁坝, 其余位置采用透水丁坝, 以加强各工况丁坝群运行的稳定性。

关键词: 透水丁坝; 溃坝水流; 水沙过程; 河床冲淤; 数值模拟; 黄河下游

中图分类号: TV863; TV122⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0121-07

Hydraulic and alluvial characteristics of the lower Yellow River after the sudden dam-break of permeable spur dikes

PENG Xiuzhu¹, ZHAO Ying², GAO Lu¹, XU Xiangzhou¹, XIA Junqiang³

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Dam-break is a type of catastrophic process with instantaneous and huge destructive effects, which can cause sudden scouring and silting of the riverbed and even instability and collapse of the river bank in the downstream of the river. In this study, a two-dimensional numerical model based on the shape of the natural channel and the actual layout of the existing spur dike group was constructed using the MIKE21 FM software. The main objectives of this study are to simulate the downstream water and sediment transport process after the sudden failure of the first permeable spur dike, and then to analyze the changes in riverbed shear stress and the alluvial characteristics of the riverbed near the spur dikes. The results show that after the instantaneous failure of the first spur dike, the flood evolution is influenced by the downstream spur dikes and changes its process. However, the dam-break has little effect on the sediment transport capacity of the main channel, but significantly affects the incipient and settling motions of sediment in the area between the spur dikes. Furthermore, since the body of the first spur dike and the head of the second spur dike are the most vulnerable areas, a composite configuration structure of permeable and impermeable dikes is recommended for the spur dike group layout to improve its stability during operation, which is impermeable dikes for the first and second spur dikes and permeable dikes for the rest of the dike group.

Key words: permeable spur dikes; dam-break flow; process of flow-sediment; riverbed erosion; numerical simulation; the lower reaches of the Yellow River

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879032); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2019HLG02)

作者简介: 彭秀竹(1996—), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 从事水土保持与可持续发展研究。

通讯作者: 徐向舟(1969—), 男, 浙江龙游人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事水土保持与可持续发展研究。

1 研究背景

透水坝作为新型的水工建筑物,因其坝体受水流的冲刷淘蚀作用较小,具有较好的挑溜和缓流落淤的能力,能在约束河势的同时,不改变过洪宽度,甚至可提高防洪能力,已被广泛地应用于流域河道综合治理中^[1-2]。然而,由于筑坝材料透水系数较大、堤坝维护工作不到位以及堤防材料抗侵蚀性较弱等因素,在长期过坝渗流条件下透水坝的稳定性会受到严重影响,特别是在行洪过程中,透水坝更加容易失稳而发生溃坝(堤)事件^[3-4],从而造成下游地区生命和财产的灾难性损失。例如,2010年汛期黄河花园口岸边建立的透水桩坝尾段桩联(5根)倒入河中;2021年黄河桃花峪上游东安控导工程下首冲毁4联^[1]。由于溃坝水流具有突发性和灾害性的特点,坝堤溃决后会出现水流变化的强动力过程,引起河床的骤冲、骤淤以及河岸的强烈侵蚀^[5]。因此,对溃决后水流泥沙运动过程开展准确预测,评估溃坝灾害风险,从而加强区域防洪减灾能力,可为流域河道综合治理的除险加固提供合理的依据。

近年来,对溃坝问题的研究手段已从早期的理论与物理模型结合为主逐步转向数值模拟的应用^[5],由于一维、二维耦合数值模型能较好地模拟水流及泥沙运动的分布规律且计算耗时较短,因而得到迅速发展并已成功解决了很多实际问题^[6-8]。目前,溃坝问题的研究可分为两方面:一方面为溃坝后水流在下游河道的传播演进研究。具体分析溃坝引起的河道内水位、流速及溃口流量的变化过程和受淹淹没区域^[9-11];另一方面为坝堤洪水及堤后冲刷问题研究。利用动床条件下的溃坝水流试验及数值模拟,对下游河道的冲淤影响进行分析。研究发现,坝体失稳主要与局部冲刷坑的形成和累积有关,而坝头的破坏是诱发溃坝的先决条件^[12]。在水沙联合作用下,溃口冲刷坑附近易形成泥沙淤积体,此时床面冲淤变化又会反向影响溃坝洪水的行洪流量^[13]。目前研究中主要的困难是对溃坝问题的精细化模拟以及对溃口附近情况的真实性反映。另外,部分理论研究中假定河道为顺直渠道,忽略了天然河流呈蜿蜒状的平面形态对水流运动的影响,甚至简化了实际溃坝水流运动过程以及地形地貌特点^[4],因而获得的经验公式具有一定的独特性,而研究的广泛性和代表性还需进行深入的探讨。总之,目前对坝体溃决后的泥沙运动及其对地形地貌的改变等相关研究尚显不足,从而无法准确地评估

溃坝对下游河道产生的实际损害。

黄河下游因河势游荡,其水流侵蚀能力和泥沙输移能力均强于顺直河道。历史上黄河下游溃坝以冲决和溃决为主,漫决所占比例较小^[14]。丁坝是黄河下游常用的整治建筑物,近年来透水丁坝在河道中的应用逐渐增多。由于丁坝经常遭受到非恒定水流冲击,加上河床基础条件差,坝体水毁及溃决现象十分严重,但鲜有学者关注丁坝全溃的过程及其对下游的影响。鉴于此,本文模拟了在黄河下游游荡型河道中发生的透水丁坝溃坝事件,在浑水条件下,采用 MIKE21 FM 软件建立二维水动力泥沙数学模型,对透水丁坝全溃后下游水流泥沙运动以及输移规律进行了深入研究与分析。本研究中模型构建依托于天然实际河流,着重关注了丁坝群中首坝全溃过程,并根据溃坝后弯道水流的水动力轴线变化,详细地评估溃坝对下游河道中水、沙及河岸的实际影响。此外,依据模拟结果,针对丁坝群的配置结构提出针对性建议,以期为后续河道工程的设计及布置提供参考。

2 区域概况

黄河下游河南孟津至山东高村河段是典型的游荡型河段,全长约 275 km。由于长期中小水行河导致大量泥沙淤积在主槽中,形成了“二级悬河”且形势严峻^[15]。其中主槽床面淤积的泥沙颗粒粗于滩地床面,且均沿程逐渐细化,但主槽粒径变化趋势明显,据统计主槽表面粒径小于 0.025 mm 的细沙平均占比约为 10%^[16-17]。位于游荡段中的东明河段滩区大、堤线长、工程多,且防洪任务十分艰巨。两岸堤距上宽下窄,易发生横河、斜河现象,因此该河段建有 4 处险工、8 处控导工程。经过多年的调水调沙,东明河段河势总体向好发展,但一些特殊河段在长期小水作用下的河势还未得到根本调整,比如老君堂河段河势变化依然散乱不定。老君堂河段属于黄河下游调水调沙前平滩流量最小的河段^[18],自 2005 年以来老君堂河段主槽内出现了不规则型河心滩,在中小水作用下形成了两股河的畸形河势,表现为主溜逐年下滑,坐湾严重。对老君堂河段河势变化发展趋势进行分析发现,在大溜作用下,该河段河岸将受到淘刷,甚至会使滩咀掉落,造成河段内的老君堂控导工程脱河。因此,计划修建老君堂控导下延工程,旨在防止河势继续下滑,减轻河岸崩塌程度,促使老君堂控导工程发挥其应有的迎溜送溜作用。本研究是在老君堂控导下延工程修建的情景下,模拟下延首坝溃决后该河段的水力及冲淤特性。

3 数值模拟

3.1 数据来源

本文以老君堂河段为研究对象,采用 2017 年黄河下游干流河道地形图,河段总长度为 12 km。加载了 2017 年 5 月由黄河水文勘测局对老君堂河段 7 个监测断面的汛前实测地形高程数据。图 1 为研究区老君堂河段示意图。

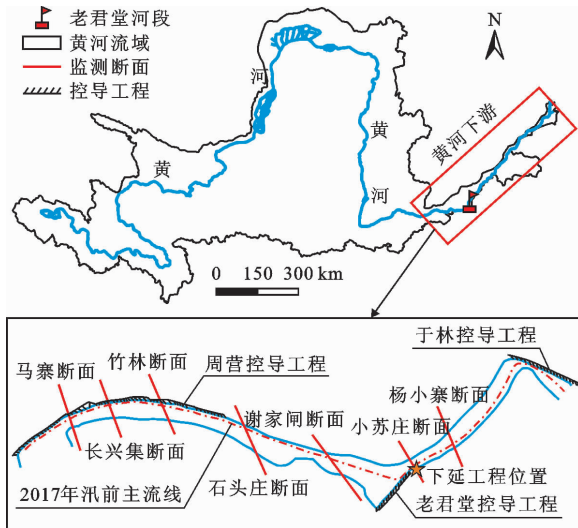


图 1 研究区黄河下游老君堂河段示意图

3.2 数值模拟方案

本文利用 MIKE21 FM 模块对研究区域进行水动力学计算,构建了基于非正交网格的典型天然河道二维水动力数值模型,该模型的控制方程是基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier - Stokes 方程,采用有限体积法求解^[19]。河道中老君堂控制工程的地形设计采用不过流边界形式处理。利用网格生成器对模拟河段进行非结构化网格划分,形成

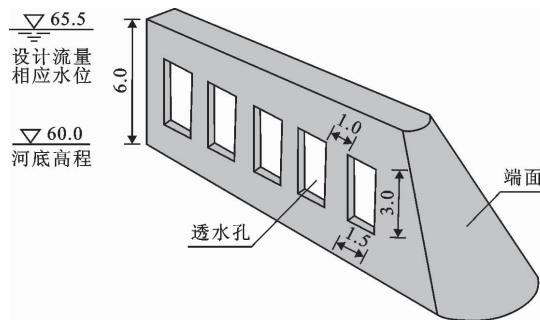


图 2 透水丁坝体型设计方案(单位:m)

由图 4、5 可知,未发生溃坝时 ($t = 0$), 5 排透水丁坝处于稳定运行状态,流速最大值恰好位于河道纵向中心,丁坝群附近主流线上流速呈现先增大、

三角形的网格区域。为了保持工程前后边界的顺直,在拟建工程区域采用结构化网格划分方法生成四边形网格,同时进行网格加密处理,从而清晰显示出复杂的水流流动形态。基于上述方法,本研究在模拟河段中共剖分了 12 207 个网格点。对黄河下游老君堂河段的丁坝尺寸统计发现,老君堂控制工程每道丁坝长度为 100 m,间距为 100 m,本研究中下延工程遵循原有的整治工程设计尺寸进行施工。采用本研究中设计的透水丁坝进行溃坝模拟,设计方案如图 2 所示。该透水丁坝由混凝土材料筑成,透空率为 30%,采用下挑式布设在主槽凹岸,挑角为 45°,共布设 5 道坝。本研究中参数设计参照文献[20]中的研究结果并与其保持一致,即模型中设置进口流量为 4 000 m³/s,含沙量为 30 kg/m³,出口边界水面高程为 63 m,坝顶高程为流量 4 000 m³/s 对应水位加 0.5 m 超高。此外,在透水丁坝前后共设置 6 个水文要素提取断面,并且在其中的断面 2 上布置 6 个含沙量提取点(1#~6#),如图 3 所示。模型的初始条件设定为稳定流场,模拟透水丁坝运作时下首瞬时全溃的情景。本研究只考虑坝体整体倾覆的情况,暂不考虑因坝体本身结构强度不足而导致局部破碎的工况。

4 结果与分析

4.1 瞬时全溃后流场变化

首坝破坏后,最大流速区域沿主流线下移,并且次排坝坝前流速迅速增大,次排坝受到强烈的瞬时水流冲击。在设定流量条件下,未发生溃坝 ($t = 0$) 和溃坝后 3 h ($t = 3$ h) 时透水丁坝群河段流速分布如图 4 所示,溃坝后次排丁坝坝前流速随时间变化过程见图 5。

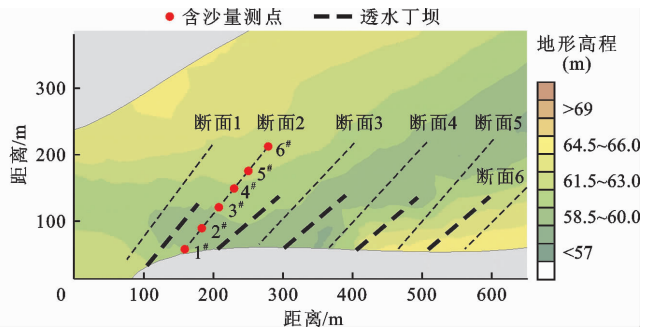


图 3 透水丁坝及水文要素提取断面布置

后减小的规律,最大流速位于首坝下游约 100 m 处,且靠近次排丁坝坝头位置(图 4(a))。上述丁坝群附近流场分布规律与现有研究成果相同^[21],说明本

文构建的模型可以合理地反映出丁坝群附近水动力特征。当首排丁坝瞬时全溃后,流线迅速改变,次排丁坝坝前原本无序的流线逐渐平顺集中,致使水流对次排丁坝迎水面造成强烈冲击,次排丁坝坝前流速在大约3秒内从1.74 m/s迅速增大到2.43 m/s(图5),形成湍急水流流态。在溃坝水流稳定之后,最大流速区域沿水动力轴线下移,但次排丁坝的坝头仍处于强烈冲刷的不利范围内(图4(b))。这说明无论首坝是否溃决,次排丁坝均会受到较强的冲刷力,因此在结构设计中应着重关注坝体稳定性以及坝头的防冲措施。

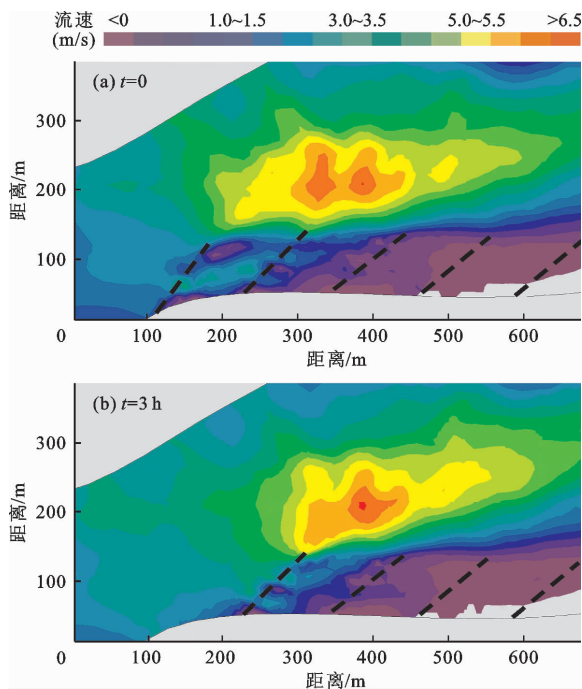


图4 溃坝前及溃坝后3 h透水丁坝河段的流速分布

表1 首坝全溃前后各透水丁坝处水位变化

m

项目	第1排坝前	第2排坝前	第3排坝前	第4排坝前	第5排坝前	第5排坝后
溃坝前水位	66.70	65.45	64.48	64.16	64.14	63.73
溃坝后水位	66.47	66.20	64.73	64.36	64.27	63.80
水位差	-0.23	0.75	0.25	0.20	0.13	0.07

4.3 溃坝对河道冲淤的影响

首排透水丁坝瞬时溃坝后,水、沙会进行重新调配直至稳定,而实现这一过程存在时间差异。水流经过约1 h后逐渐趋于平稳,而河床的稳定则需要经历更长时间(约3 h后)。图6为溃坝瞬时($t=1$ s)和溃坝后1 h($t=1$ h)透水丁坝河段的流线分布。从图6可以看出,在溃坝瞬时,穿透了丁坝透水空隙间的流线迅速做出改变,在 $t=1$ h时,水流已

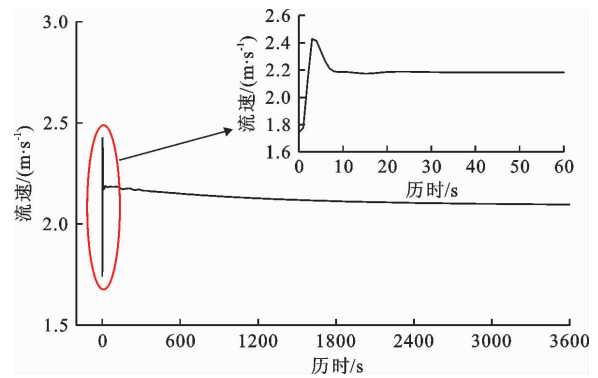


图5 溃坝后次排丁坝坝前流速随时间变化过程

4.2 溃坝水流影响范围

首排透水丁坝瞬时全溃后,下游的丁坝群对溃坝波的传播过程具有显著的影响。表1为首坝全溃前后,下游各透水丁坝处的水位变化。模拟结果表明,溃坝后下游各丁坝周围呈现出水流结构复杂多变的局面。由于河道弯曲和下游丁坝群的拦截,溃坝水流在演进过程中受边界条件影响显著,水流沿程阻力大,使得溃坝水流能量在传播过程中逐渐变小,向下游传播的强度和速度减弱,对下游河道影响作用逐渐减小。由表1可见,在首坝全溃之后,原本被束窄雍高在首坝坝前的水流突然崩散,致使坝前水位降低了约0.23 m。随后溃坝水流继续向下游行进,受到次排丁坝的阻碍水面再次迅速雍高,次排丁坝坝前水位上升了约0.75 m。溃坝水流对下游丁坝群水位变化的影响随着距崩溃位置距离的增大而逐渐削弱,到第5排坝前时水位仅升高了约0.13 m。在距离末排丁坝100 m处,溃坝水流对河道的影响基本消失。

经稳定下来,流线归顺于次排坝坝前。

提取了断面2上6个测点的悬沙浓度(即单位时间内单位宽度上通过某一断面泥沙量的垂向平均值),图7为溃坝后主槽中心区域断面2上5#测点的悬沙浓度和水流流速随时间变化过程。由图7可以看出,溃坝发生后,悬沙浓度和水流流速同时迅速地做出了响应,但其变化趋势有所不同。悬沙浓度先缓慢降低后逐渐趋于稳定,而水流流速则是骤降

之后再逐渐趋于匀速状态,但前者达到稳定状态所需的时间更长。随着河床的不断刷深,使得河道的过流能力迅速增大,水流流速则不断减小^[22],最终水流和泥沙逐渐趋于平衡,在经过约 3 h 后,河床基本稳定,与溃坝后的水流状态相互适应。此现象与已有研究^[23]中得出的泥沙冲淤变化的结果具有一

致性,也进一步验证了本文模型设计的合理性和模拟结果的可靠性。出现这种现象的原因可能是泥沙的淤积与水沙条件等因素之间存在滞后响应关系^[24]。由于不同的来水来沙条件下所形成的泥沙颗粒组成不同,而随着粒径组别的变粗,来沙对于淤积量的贡献率将变大。

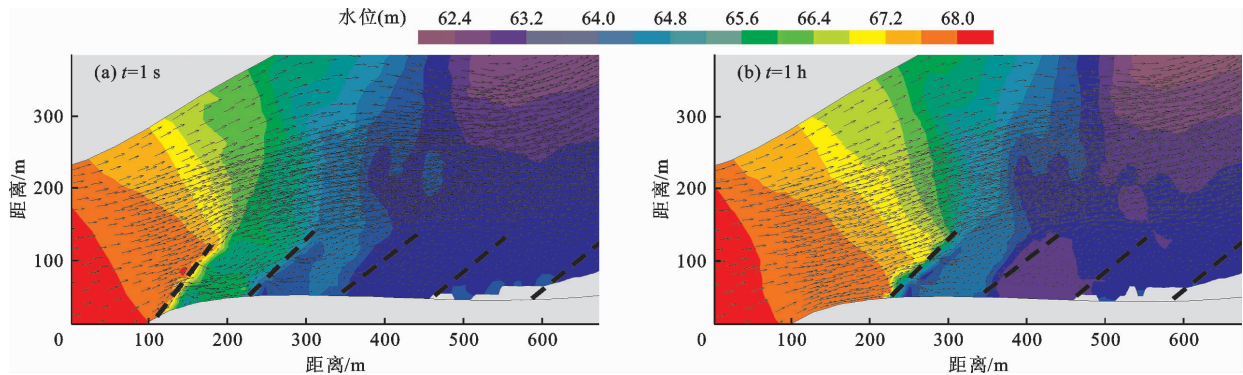


图 6 溃坝瞬时及溃坝后 1 h 透水丁坝河段的水位和流线分布

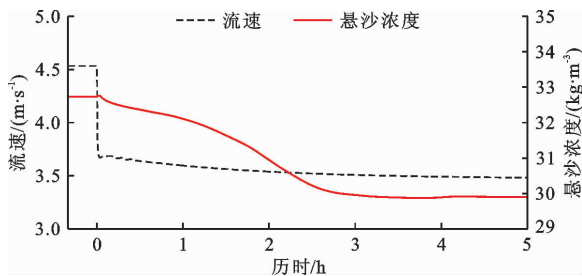


图 7 溃坝后主槽中心区域(断面 2 上 5#测点)流速及悬沙浓度随时间变化过程

溃坝后坝区和主槽这两个不同区域的悬沙浓度变化过程存在明显差异。在坝区,悬沙浓度从溃坝开始经短时剧烈变化后趋于稳定;而在主槽内,悬沙浓度一直呈现比较稳定的缓慢降低过程。图 8 为溃坝前后透水丁坝周围和主槽中心水体悬沙浓度随时间的变化过程。由图 8(a)可以看出,在首坝冲毁瞬间,坝区悬沙浓度陡增,在经过较短时间后,悬沙浓度开始骤降,最后缓慢降低趋于稳定。以位于坝身中部的断面 2 上 2#测点为例,在透水丁坝全溃时刻

($t = 1 \text{ s}$),该位置悬沙浓度瞬时由 29.3 kg/m^3 上升到 39.0 kg/m^3 ,经过大约 22 min 后又骤然下降至 30.0 kg/m^3 ,最后经过长时间的缓慢沉降趋于稳定浓度。总的来说,溃坝的发生对右岸泥沙的起动和沉降有较大的影响,坝区悬沙浓度最大变幅高达 103%。究其原因首排透水丁坝溃坝后,断面 2 位置的河床失去前方丁坝的保护,遭受到大量水体的直接冲刷,因而导致此处河床的泥沙在溃坝波的扰动下翻涌。之后由于此处水位雍高,流速降低并逐渐稳定,翻涌的大颗粒泥沙开始沉降,最终在断面 2 处实现冲淤平衡。图 8(b)中距坝头 30、60、90 m 分别对应断面 2 上的 4#、5#、6#测点。由该图可知,距坝头较远处河床遭受到溃坝水流的轻微冲刷,水体悬沙浓度小幅升高,而后逐渐趋于稳定。而距坝头较远处,由于溃坝后过流面积突然增大导致流速减小,故该处水体挟沙能力减小,悬沙浓度逐渐降低。同溃坝前相比,距坝头 60 和 90 m 处的悬沙浓度均降低了约 9%。

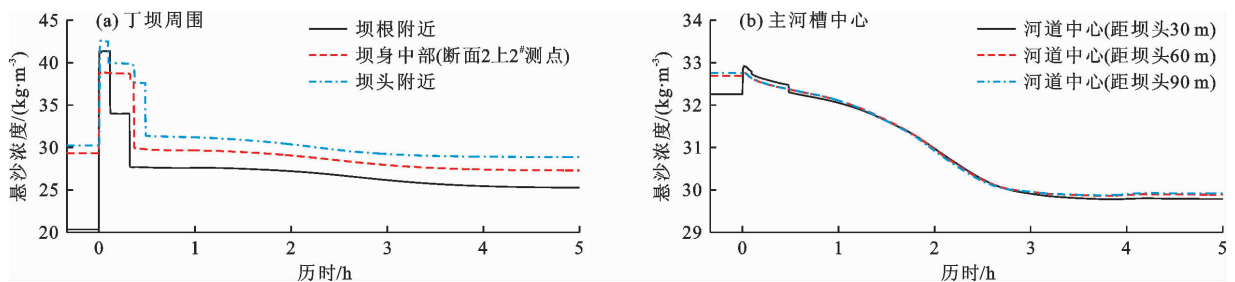


图 8 溃坝前后透水丁坝周围和主槽中心水体悬沙浓度随时间变化过程

5 讨论

5.1 溃坝对河道流场变化的影响

透水丁坝周围的水流有其特殊的运动规律。在首坝瞬时全溃之后,立即形成了剧烈的溃坝波。从图4(b)可以看出,丁坝河段全流场范围内的高流速集中于次排丁坝下游所对应的主流处。从机理上分析,流速分布的变化规律主要是能量损耗与离心惯性的共同作用结果,在弯道中水流呈现复杂的三维螺旋流运动,对弯道凹岸侧造成了强烈淘刷甚至造成河岸崩退,并引起横向不平衡输沙^[25],进而又会引起河床和河岸的不断变形,最终出现河道凹岸冲刷凸岸淤积的不利局面。这也是在此处修建控导工程及其下延工程的重要原因之一,因为丁坝群可以归顺水流,使贴近凹岸的主流线趋中,起到抑制河势下挫的作用。由图4可知,在透水丁坝群河段的主流线上,流速先增大后减小;当首坝瞬时全溃之后,流速最大值沿着主流线略微下移至第2排与第3排丁坝之间所对应的主流位置处。在天然河流中,由于水沙和边界的不断变化,弯道水流会表现出更为复杂的特点。然而,现阶段大部分试验研究的结果是基于规则弯道水槽或固定边界的清水条件,如文献[26]和文献[27],所以会使得试验模拟结果与实际坝堤溃决后对下游河岸所造成的灾害情况有很大差距,而本模型依托于天然实际河流而建立,并在浑水条件下进行模拟,可以从模拟结果中非常清晰地确定出溃坝之后整个弯道水流的水动力轴线变化,可为后续河道工程的布置提供参考。

5.2 河床冲刷、淤积等现象的作用机理

河床面切应力是泥沙起动的主要驱动力,直接

关系到河岸变形速度,因此分析透水丁坝对河床面切应力分布的影响,有助于理解河床冲刷、淤积等现象的作用机理。

图9显示了无丁坝、完整透水丁坝群和首排透水丁坝瞬时溃坝后3种状态下透水丁坝河段河床面切应力的等值线。由图9可以看出,无透水丁坝时(图9(a)),高切应力区位于河段凹岸及弯道凸岸附近,故河段凸岸会发生侵蚀。在右凹岸设置5排透水丁坝时(图9(b)),由于透水丁坝控导水流的作用,河道主流线由凹岸转移至凸岸,最大床面切应力所处位置也由凹岸转移至凸岸^[28],而泥沙强烈输移带也在同一部位,因此造成坝头附近和主槽中心位置的河床冲刷。低切应力区位于坝后回流区域,并且由于坝后流速的减小造成水流挟沙力降低,坝后泥沙落淤,从而达到造滩护岸的作用。当首排透水丁坝溃坝后(图9(c)),主槽区域的切应力变化与流速变化相互呼应,即在弯道水流中,河床面切应力的分布与纵向流速的分布具有一致性。同时最大切应力区域与溃坝之前相比有所减小,发生变化的区域主要集中在首坝上、下游范围内。究其原因首坝瞬时全溃后,水流在重力作用下瞬间陡落,重力势能与动力势能快速转换,而悬移质泥沙颗粒在相互碰撞中也会消耗溃坝洪水中的一部分动量,因此含沙水流的流速会有所降低;加之下游次排坝的阻水作用,同样也会降低水流流速,最终河床面切应力随水流流速的降低而发生变化^[29]。

根据上述模拟现象发现,河道水流流速与河床切应力的变化规律同样适用在控导工程改变河势的工况,无论是溃坝前还是溃坝后,河床切应力的变化均与流速变化保持一致。

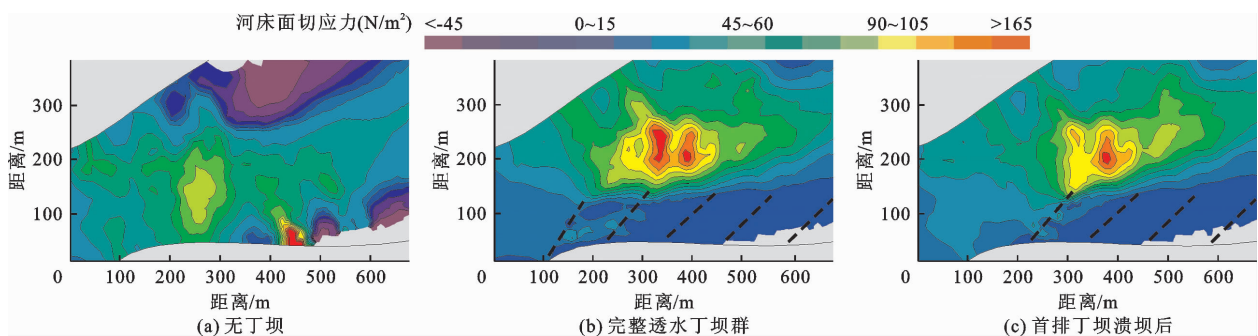


图9 3种状态下透水丁坝河段河床面切应力等值线

5.3 需要注意的问题

透水丁坝群中首坝的阻水及挑流作用很强,水流对其冲击最为剧烈,而其他各丁坝均处于首坝形成的缓流区内,由于首坝起到了屏障作用,从而下游

丁坝坝体受到的冲刷强度相对较弱^[22],可继续束窄水流,因此首坝是工程中最容易也是最先冲毁的位置。由于坝体中透水孔的存在,会使得应力集中,如果首坝采用统一的透水型丁坝,冲毁风险反而会增

大。建议首坝可采用实体丁坝的结构类型,并在工程设计中对其基础进行加固,其下游位置处仍采用透水丁坝型式。这种将两种坝型结合起来配置的复合式丁坝群类似于黄土高原上淤地坝的建设发展思路:以支流为骨架、小流域为单元,骨干坝和中小型淤地坝相配套^[30],不采用单一坝型式,能最大程度地发挥淤地坝系的效益。其次,本研究还发现,在透水丁坝群完整时,最大流速区出现在次排丁坝坝头所对应的主流处,而当首坝崩溃后,次排丁坝坝头仍然没有脱离被冲刷的不利范围,意味着次排坝的坝头及坝根等部位的基础同样处于强烈的水流侵蚀状态中,最终会造成其局部和整体崩陷塌落。综上所述,在丁坝群的设计施工中,应着重考虑第1座丁坝坝身整体的稳定性设计和第2座丁坝坝头的冲刷防护。同时,合理选址第2座丁坝的建造位置,应避开首坝下游主流收缩位置的横断面。

6 结 论

本文利用 MIKE21 中的 FM 模块建立了典型河道二维水动力数值模型,模拟了透水丁坝首坝瞬时全溃后水流在河道的传播演进过程以及对河道的冲淤影响,并根据研究结果对丁坝群结构及布设提出合理建议。主要结论如下:

(1)首排透水丁坝瞬时全溃后,水、沙对于溃坝行为迅速做出响应但表现出不同程度的适应性。透水丁坝河段主槽中心水流泥沙浓度先缓慢降低后逐渐趋于稳定,而流速则是骤降之后再逐渐趋于平稳,且前者达到稳定状态所需时间较长。

(2)首排透水丁坝瞬时全溃后,下游丁坝群阻碍了溃坝波的传播,影响了其向下游演进的过程线。溃坝波沿河道逐渐衰减,至丁坝群下游约 100 m 处消失。

(3)为防止溃坝或局部受损,建议采用复合式丁坝群配置结构。借鉴黄土高原沟道坝系建设思路,在丁坝群的规划设计中使用不同的坝型进行结合配置,如在首排和次排即最易冲毁的位置采用更为坚固的实体丁坝,其余位置处配置透水型丁坝。

本研究采用二维数值模型对黄河下游河道工程附近的水力和冲淤特征进行了系统的分析,但研究中发现溃决水流的演进过程呈三维特性,今后在长河段的研究中,可对局部复杂的位置进行三维模型数值模拟,使其结果更加符合实际情况,因此对复杂地形下的水流运动规律还需进一步地深入研究。

参考文献:

- [1] 侯琳,张红武,张罗号,等.黄河下游治理钢管透水桩稳定性计算[J].水利水电技术(中英文),2021,52(7):1-13.
- [2] HAIDER R, QIAO Dongsheng, YAN Jun, et al. Flow characteristics around permeable spur dike with different staggered pores at varying angles[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47: 5219-5236.
- [3] 威廉,刘峥,傅长锋.生态透水坝结构设计与试验研究[J].水电能源科学,2020,38(2):87-90+55.
- [4] XIA Junqiang, CHENG Yifei, ZHOU Meirong, et al. Experimental and numerical model studies of dike-break induced flood processes over a typical floodplain domain[J/OL]. Natural Hazards, 2022, (2022-12-12) [2023-02-07]. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05744-7>.
- [5] 张大朋,严谨,赵博文,等.二维溃坝的数值模拟及其自由液面大变形流动研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(12):120-133.
- [6] 许媛媛,张明亮,乔洋,等.考虑植被作用下的二维溃坝水沙耦合数学模型[J].水力发电学报,2015,34(12):73-83.
- [7] 陈文龙,宋利祥,邢领航,等.一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J].水科学进展,2014,25(6):848-855.
- [8] PILOTTI M, MILANESI L, BACCHI V, et al. Dam-break wave propagation in alpine valley with HEC-RAS 2D: experimental Cancano test case[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(6): 05020003.
- [9] VIERO D P, D'ALPAOS A, CARNIELLO L, et al. Mathematical modeling of flooding due to river bank failure[J]. Advances in Water Resources, 2013, 59: 82-94.
- [10] 周昔东,何小珑,袁浩,等.溃坝洪水演进及溃坝水流对下游坝体冲击研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(1):74-82.
- [11] 王兴华,付成华,穆霄泉.基于 FLUENT 三维数值模拟的溃坝洪水流动特性分析[J].中国农村水利水电,2020(4):133-138+144.
- [12] 喻涛,施浩亮,王平义,等.基于极差分析法的丁坝风险值试验分析[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(8):667-673.
- [13] 徐国宾,孟庆林,苑希民.含沙溃堤洪水数值模拟分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1008-1015.
- [14] 梁艳洁,罗秋实,赵正伟.黄河下游右岸堤防典型段溃决过程研究[J].人民黄河,2020,42(3):25-29+49.
- [15] 张红武,李振山.黄河下游河道与滩区治理研究[J].中国环境管理,2018,10(1):99-100.
- [16] 张治昊.黄河下游复式河道滩槽水沙运动与演变研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2015.

- [14] 彭思琪,代文江.基于SWMM模型的西安地铁停车场海绵城市建设效果模拟[J].陕西水利,2022(1):18-22.
- [15] BAEK S S, CHOI D H, JUNG J W, et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: experimental and modeling approach[J]. Water Research, 2015, 86: 122-131.
- [16] 夏威.基于LID的非点源污染调控效果研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [17] 刘碧云,任建民,张进丽,等.基于SWMM模型的兰州交通大学校园区城市雨洪模拟及LID效果评价[J].水电能源科学,2021,39(7):9-12.
- [18] 尚蕊玲,王华,黄宁俊,等.城市新区低影响开发措施的效果模拟与评价[J].中国给水排水,2016,32(11):141-146.
- [19] 李家科,李亚,沈冰,等.基于SWMM模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J].水力发电学报,2014,33(4):60-67.
- [20] 李沐寒,尹海伟,孔繁花,等.南京市鼓楼区LID空间配置与雨洪调控效益研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):30-38.
- [21] 贺靖雄,李翠梅,程桂,等.海绵城市雨水花园水文水质过程模拟[J].水电能源科学,2019,37(4):9-12.
- [22] 罗陶然.基于SWMM模型的海绵城市径流水量及水质模拟[D].西安:西安工业大学,2019.
- [23] 朱甜甜,于增知,于晗,等.基于不同土地利用类型下的初期雨水径流污染特征分析与LID措施研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):8-14.
- [24] 黄少卿.基于SWMM模型的LID设施雨洪及非点源污染控制效果研究[D].西安:西北大学,2020.
- [25] 王琳,陈刚,王晋.基于SWMM的济南韩仓河流域宏观LID实践模拟[J].中国农村水利水电,2020(4):1-4.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.室外排水设计标准:GB 50014—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [27] 吴洁,汪恂,李燕萍.基于LID的海绵校园设计模拟研究[J].水电能源科学,2021,39(8):128-132.

(上接第127页)

- [17] 张金良,李岩,白玉川,等.黄河下游花园口-高村河段泥沙时空分布及地貌演变[J].水利学报,2021,52(7):759-769.
- [18] 龚西城,张昊,李琳琪,等.黄河下游河势控制与滩区治理示范工程的实施及效果[J].人民黄河,2021,43(5):54-60+66.
- [19] 任杰,董增川,徐伟,等.基于MIKE21 FM模型的河道防浪林行洪影响分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):420-424.
- [20] 彭秀竹,徐向舟,赵莹,等.黄河下游丁坝群对河势控制效果研究[J].大连理工大学学报,2022,62(4):378-385.
- [21] 张帆.非恒定流作用下丁坝水沙运动及水毁特征数值模拟[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [22] NING Jian, LI Guodong, LI Shanshan. Numerical simulation of the influence of spur dikes spacing on local scour and flow[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2306.
- [23] 白玉川,许栋,王玉琦,等.二维溃坝波遇障碍物的水流泥沙数值模拟[J].水利学报,2005,36(5):538-543.
- [24] 唐小娅,童思陈,许光祥,等.三峡水库汛期泥沙淤积对坝前水位的滞后响应[J].水科学进展,2019,30(4):528-536.
- [25] 于洋.明渠弯道水流泥沙运动的三维数值模拟研究[D].大连:大连理工大学,2018.
- [26] 张晓雷,夏军强,陈倩,等.生产堤溃决后漫滩水流的概化模型试验研究[J].水科学进展,2018,29(1):100-108.
- [27] 孙志林,倪晓静,许丹.丁坝周围流动图像与局部冲刷深度[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(11):2189-2196.
- [28] 邹骥,刘亚,卢金友.平滩流量下弯曲分汊河道水力要素的突变性特征[J].长江科学院院报,2020,37(2):15-20.
- [29] 史志鹏,张根广,张宝军,等.溃坝洪水模拟中泥沙因素的影响[J].水电能源科学,2015,33(4):68-71.
- [30] 冉大川,姚文艺,李占斌,等.不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J].农业工程学报,2013,29(12):154-162.