

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.20211186

陈启刚,张大伟,王忠祥,等.堤防溃口水流特性与封堵技术研究进展[J].中国防汛抗旱,2021,31(8):1-6.CHEN Qigang,ZHANG Dawei,WANG Zhongxiang,et al.Progress in flow characteristics and closure technology of dike breaches[J].China Flood & Drought Management,2021,31(8):1-6.(in Chinese)

# 堤防溃口水流特性与封堵技术研究进展

陈启刚<sup>1</sup> 张大伟<sup>2</sup> 王忠祥<sup>1</sup> 钟强<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京100044;2. 中国水利水电科学研究院,北京100038;

3. 中国农业大学水利与土木工程学院,北京100083)

**摘要:**堤防溃决洪水可能造成巨大的经济损失甚至人员伤亡,及时封堵溃口是减轻损失的必要措施。溃口封堵效率的提升既有赖于封堵技术的创新,又以对溃口水流特性的深入认识为前提。回顾了近年来主要通过物理模型实验取得的溃口演进过程和水力特征的研究成果,总结了溃口封堵工程实践中主要采用的封堵材料及其计算方法与适用条件、堵口方法及其配套构件与施工装备,追踪了溃口封堵技术的新发展趋势。在梳理已有进展的基础上,提出应加强溃口水流特性实验研究,注重溃口参数便携式测量技术和自动化、快速堵口装备研发。

**关键词:**堤防;溃口;水流特性;封堵技术;研究进展

中图分类号:TV871.3

文献标识码:A

文章编号:1673-9264(2021)08-01-06

## 0 引言

堤防是沿江河、湖泊及海洋沿岸修建的挡水建筑物,千百年来一直是人类抵御洪水灾害的主要工程手段。例如,我国早在春秋时期就在黄河下游修筑了堤防工程,战国时期的黄河下游堤防已经具有相当规模<sup>[1]</sup>。

然而,由于堤防防洪标准不可能无限高,加之人为及自然因素的长期作用和维养缺失等,当洪水超过堤防的抵御能力,或堤防发生险情抢护不当或不及时,都会造成堤防决口<sup>[2]</sup>。由于堤防溃决往往具有突发性、决口位置难以预测,特别是在超标准洪水发生时,堤防溃决引发的洪水往往对社会经济发展和人民生命财产造成巨大危害。例如,长江流域在1998年、2016年和2020年均因洪水引发多起造成巨大损失的决堤事件。堤防溃决后,尽早封堵溃口是减轻溃决洪水损失的必要措施。堤防溃口封堵既是系统性

工程问题又是综合性技术难题,其有效性、安全性和实施效率涉及人员、物料、装备的科学选择与合理调度,并与溃口水力特性密切相关<sup>[3]</sup>。为了科学指导溃堤险情的处置,特别是针对溃口流速快、冲刷深的复杂水流条件,本文对国内外关于堤防溃口水力特性、演变过程与封堵技术的研究进展进行系统性总结。

## 1 溃口水流特性

溃堤与溃坝一直是国内外水利、防灾等领域学者的研究热点。两者的溃决过程与溃口水流特性存在许多相似之处,但也因为边界条件的不同而存在明显区别:坝体溃决的垂向侵蚀与横向展宽一般同时发生,而堤高相对于坝高则低很多,溃口的垂向冲刷发展过程较快,横向展宽及崩塌过程基本决定进滩流量的大小;溃坝水流的入口边界为水库中准静止的水体,溃口上下游水位落差通常较大,而

收稿日期:2021-06-01

第一作者信息:陈启刚,男,副教授,E-mail:chenqg@bjtu.edu.cn。

通信作者信息:张大伟,男,正高级工程师,E-mail:zhangdw@iwhr.com。

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC1502602)。

溃堤发生时河道内的水流通常有一定的流速,将对溃堤水流的传播产生影响<sup>[4]</sup>。因此,溃堤洪水研究成果在许多情况下并不能直接应用于溃堤洪水。当前,对于溃决过程及其水流特征的研究主要采用数值模拟方法<sup>[5-6]</sup>,而原型观测和高精度模型实验成果非常有限。

### 1.1 溃堤演进过程

堤防溃决有多种形式,国内外对瞬间突溃和漫顶溃决开展的研究较多,其中瞬间突溃发生较少但更容易建立理论分析和数值计算模型,漫顶溃决则是全球范围内堤防溃决的最主要原因<sup>[7-9]</sup>。由于数值模拟难以准确描述溃决过程中复杂的水沙作用过程和边界条件,物理模型实验在近年来开始逐步得到重视。其中,瞬间突溃物理模型实验中溃决时间是影响实验结果的关键,研究表明,当模拟堤防溃决的时间  $t_0$  满足如下条件时方可视作瞬间溃决<sup>[10]</sup>:

$$t_0 \leq 1.25 \sqrt{\frac{h_0}{g}} \quad (1)$$

式中:  $h_0$  为溃口上游河道内水深, m;  $g$  为重力加速度。

对于堤防漫顶,已有研究通常将土堤溃决过程分为3个阶段,见图1。非黏性土堤溃口刚发生时,口门狭窄并向河道扩展,溃口水深及流速较小,溃口主要沿垂向侵蚀,河道内水位变化不显著;之后,溃口两侧因坡度过大而崩塌失稳,溃口在继续变深的基础上开始快速展宽,且溃口下游的展宽速度大于上游,进滩流量持续增大并接近最大值,河道内水位快速降低;随着河道内水位降低,溃口外水位增加,堤防内外两侧水位差减小,溃口流量逐渐减小并趋于稳定,溃口上游侧停止扩宽,垂向侵蚀及下游侧展宽减慢并逐渐趋于停止,溃口断面逐渐趋于稳定<sup>[7]</sup>。在溃口发展的过程中,宽度和深度均主要沿初始溃口轴线的下游侧扩展,最终形成的溃口深泓线靠近溃口下游并与理论分流线近似平行<sup>[11]</sup>。最近,果鹏等<sup>[4]</sup>通过概化模型实验发现黏土堤漫顶溃决过程存在类似的3个阶段,其特点是初始阶段的溃口更为窄深,溃口两侧在崩塌前通常形成悬臂结构。沿溃口水流方向,堤防坡脚处的展宽速率大于堤顶展宽速率。

溃口最终断面形状与堤防土壤特性和水头差有关,当堤防为沙壤土时决口断面形状近似为矩形,当堤防为黏土结构时决口断面呈三角形、抛物线形或梯形<sup>[12]</sup>; Rifai 等<sup>[8]</sup>发现溃决前堤外水深越大,溃口深泓线向下游移动的距离越短,深泓线与主流方向的夹角越小。堤防溃决展宽速率与

堤前水流及堤坝土体特性有关。Tabrizi<sup>[13]</sup>的水槽实验结果表明,溃口处的流速越大,溃口的展宽速率越快;Zhu 等<sup>[14]</sup>的水槽实验结果表明,堤防土料中黏粒含量越高,堤防被冲刷的速度越慢,黏土和沙土的溃决破坏方式也不相同,其中溯源冲刷是由黏性混合土料填筑的堤坝溃决的主要形式,而水流剪切冲刷是沙质堤坝溃决的主要形式;果鹏等<sup>[4]</sup>的实验研究表明,当黏土堤防土体含水率小于15%时,溃口展宽速度也受含水率大小的影响。

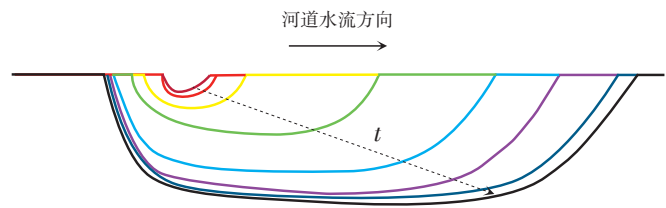


图1 土堤漫顶溃决的溃口发展过程示意图

### 1.2 溃口水力特征

堤防溃决后河道水流经溃口以涨水波形式快速涌入洪泛区,溃口流量迅速增大,主河道内水位具有先迅速下降,然后维持稳定,再缓慢升高,最后趋于稳定的变化过程;比较而言,溃堤对溃口上游水位的影响比下游更显著;由于洪水持续流入,洪泛区水位表现为持续升高<sup>[15]</sup>。受河道内水流方向影响,无论溃堤初期还是稳定期,溃口流速和水位的分布都不对称,偏上游的位置流速和水深较小,水深和流速最大值出现在溃口中心偏下游<sup>[7,16]</sup>。溃堤初期溃口附近的洪水波流速最高,且洪水波呈近似对称扇形或椭圆形分布,以溃口中心为中心向洪泛区前进,流场对称性随着溃堤时间快速减弱,低水位、高流速区向下游偏移。在溃口处,水流经过堤防端头时先收缩后扩散,具有显著的绕流特征,最大流速位于溃口口门处,堤防外主流两侧形成旋涡,并在口门下游裹头部位形成局部冲刷坑<sup>[17]</sup>。马洪福<sup>[12]</sup>的实验结果表明,溃口下游主流两侧的旋涡特征与溃口流态有关。

关于溃口典型水力特征,对已有溃堤事故的统计分析表明,一般溃口宽度特征值主要分布在10~240 m区间,口门水头主要分布在1.5~30 m区间,溃口上下游落差小于5.7 m,口门流速主要分布在2~8 m/s区间,溃口流量分布较不均匀,最小仅约10 m<sup>3</sup>/s,最大可超过4 000 m<sup>3</sup>/s,溃口区弗劳德数主要分布在0.4~0.8区间,流态多呈缓流<sup>[18]</sup>。其中,溃口流量及流速是溃堤封堵施工十分关注的水力变量,马洪福等<sup>[12]</sup>基于实测溃决数据的聚类分析表明,溃口流量与溃口

宽度相关性最高,并建立了流量与溃口宽度之间的函数关系。张晓蕾等<sup>[15]</sup>的实验表明,溃口流量与溃口内外水位差直接相关。Elalfy等<sup>[7]</sup>和果鹏等<sup>[4]</sup>分别观察到溃口流量随着溃口展宽而持续增大,但增大速率逐渐减小,溃口流速先增加后减小,最终趋于稳定。已有研究结果表明,溃口流量、流速与溃口几何形态及上下游水位落差之间存在内在相关性,溃口流量和口门平均流速的经验关系可表示为<sup>[4,19]</sup>:

$$\begin{aligned} Q &= mb\sqrt{2gh}^{1.5} \\ V &= \mu\sqrt{2gh} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $m$  为流量系数;  $\mu$  为流速系数;  $g$  为重力加速度;  $b$  为溃口宽度,  $m$ ;  $h$  为溃口前淹没水深,  $m$ 。

溃口流态与溃决过程有关。在溃决初期及中期,水流动能较大,由于溃口口门过流断面的压缩作用,溃口流态由河道内的缓流变为急流,距离溃口较远处的滩区流态为缓流,在洪泛区形成剧烈水跃,流场以沿溃口轴线运动的水流为主<sup>[20]</sup>;溃决过程中水跃发生的位置由距溃口较远处逐渐趋向溃口位置<sup>[15]</sup>,溃决后期的溃口流态逐渐变为缓流,尽管洪泛区依然以中轴线处的水流为主,但两侧的涡流流速增加,涡流形态基本稳定<sup>[21]</sup>。

## 2 溃口封堵技术

### 2.1 封堵材料

溃口发生后,口门位置往往比降较大,加上较大的洪水下泄,小尺寸堵口材料很难在河床保持稳定,而较大的堵口物料又受到施工机械设备和作用空间的限制。因此合理确定封堵材料尤为重要。目前,工程实践中使用的决口封堵材料大致可分为就地取材类、预制块体类、框架组合类、浮体沉箱类、橡胶织物类等五类<sup>[2,21-22]</sup>。

就地取材类主要包括块石、石渣料、埽料(秸秆、柳枝、芦苇等)、土工料等。埽料适用于高含沙水流,在黄河流域决口封堵中应用较多。块石的抗冲稳定性优于混凝土异形块体,但当流速较大时难以形成坝体。土石料通常装入编织袋、麻袋、土工织物袋中,稳定性好、适应变形能力强,可以迅速减缓流速,阻止堵口口门处对堤身及附近河床的冲刷,且高强机织土工反滤布可工厂化制作,储运方便灵活,适用于龙口宽度较小且水深较浅的决口<sup>[21]</sup>。

预制块体类主要包括混凝土四面体、混凝土异型块体、铁棱角、钢网石笼、铅丝石笼、竹石笼等,这些物料需预

先制作,并储备一定数量,主要用于裹头、合龙等关键部位抢险。在戽堤合龙等流速过大时,可将钢筋石笼、混凝土体相互串联以增加抗冲能力。最近,单定军等<sup>[23]</sup>针对直升机空投封堵溃口技术,提出了空心蜂巢、实心蜂巢、空心方砖、实心方砖等不同类型的预制块体,并对不同投放高度、水流速度、投放方式的效果,及块体落水后的运动特性进行了实验研究,但这些材料目前尚未在工程中实际使用。

框架组合类主要有三脚架、钢木组合构架和堵口桁架。河流在发生决口时,如果水流大、流速快,人员和船只无法靠近,更无法用打桩的方式来固定沙袋时,可以根据决口的大小应用不同规格的三脚架。钢木组合构架组装拆卸灵活,可利用打桩机械作业,组装后整体稳定性好,搭设模板可以作为抢险平台,适用于大型装运设备不易操作的特殊条件下施工,但由于靠人力搭设,应用条件为口门处流速不大于  $2\sim 3.5\text{ m/s}$ ,水深不大于  $8\text{ m}$ 。堵口桁架是由型钢制成的梯形结构,当发生决口时,把堵口桁架置于缺口组成一个框架,然后再以这个框架为依托建立堵水墙,能防止填塞物料被水流冲走,它不受决口地基条件的限制,特别适用于快速堵住高水位的缺口,但未见有实际工程应用的报道<sup>[22]</sup>。

浮体沉箱类包括沉车、沉船技术和箱型结构。在龙口流速大、其他堵口材料效果不佳的情况下,沉车、沉船技术是初堵决口的有效措施,可以快速减小决口处的过流量及流速,减缓口门被冲刷而加宽、加深,又可作为堵口抢险施工平台的下部支撑体。箱型结构物技术成本低廉、作业速度快,降低了传统堵口作业方法的难度和风险,当溃口宽度、溃口流速在一定范围内时,用箱型结构物封堵溃口的作业方法是有效可行的,沉箱堵口后减缓水势效果较为明显,决口扩大的危害性可基本得到控制,为后续抛投作业提供良好的条件<sup>[24-25]</sup>。

橡胶织物类属柔性堵口材料,包括塑料编织布、土工织物、膨胀截流橡胶袋、塑枕、模袋混凝土等,这类材料主要用于小型决口的封堵。

抗冲稳定性是决定堵口材料选择的关键因素。对于抛投材料的稳定性认识目前有两种观点:一种是认为应当从封堵材料对构成戽堤是否有效出发,认为凡是停留在戽堤范围内的材料均被视为是稳定的;二是抛投材料必须稳定在口门上游脚或戽堤轴线以上才是稳定的。目前比较认同的观点是,封堵材料的块体能够止动于要求范围内即为稳

定。目前江河堵口普遍是向溃口自由抛投石块、土工包、大块混凝土等材料,块状抛投料的抗冲稳定性与几何形状和尺寸密切相关,堆石体在流水中的抗冲稳定性与块石块径、形状系数及堆石体宽度相关;其中石块、混凝土四面体等单粒体材料的稳定性计算已有较多可以使用的经验公式<sup>[19,26]</sup>。这些材料在溃口处的水下稳定性系数约为0.7~0.8,在高速水流中常被冲向下游导致物料利用率低,通常现场堵口物料的实际使用量为理论计算量的1.5倍,如果遇到急流甚至会高达2倍以上<sup>[27]</sup>。

钢网石笼是大中型溃口或截流施工中常见的堵口截流物料,通常利用其自重稳定在溃口口门处,但在流速较高的口门中,石笼往往难以稳定扎根在着落点,而是大多都被水流冲向溃口下游,常用于浅水或低流速区。目前,许多研究针对石笼结构水下运动特点及提高抗冲稳定性的抛投方法进行了研究,但还没有专门的稳定性计算公式。周景芍等<sup>[17]</sup>通过模型实验研究铅丝网石笼水下沉落形式为弧线下沉,可分解为沿坡面下沉和顺水流方向滑动,同时指出高水流条件下会出现先滑落后滚落的运动形式,并研究了坡面沉落时间和抛投偏移量。马洪福<sup>[21]</sup>的研究表明,采用条状或扁状石笼,并将其长轴顺水流方向投放到溃口中,有利于提高其抗冲能力。土工长管袋具有沉落偏移量较小的特点,程义吉等<sup>[28]</sup>指出土工长管袋适用于平堵,且施工流速不宜超过3 m/s,周景芍等<sup>[29]</sup>发现土工长管袋在水中下沉为头慢尾快,且管带自身呈上凸曲线,赵雨霖等<sup>[30]</sup>提出不同流速条件下土工包应采用不同土石比例。

## 2.2 堵口方法

堤防决口封堵方法基本上可分为平堵、立堵、混合堵3种<sup>[31]</sup>。立堵是从决口两端或一端,沿设计堵口轴线向中间进占,逐渐缩窄口门,最后留下缺口,备足物料,抢堵合龙闭气。平堵是在选定的堵口轴线上自下而上层层抛填,逐层填高,直至达到设计高度为止。当决口口门较宽、基础软弱、冲深较大时,采用立堵与平堵结合的方法,可以相互取长补短,称为混合堵法。国内外堵口工程应用更多的是立堵法<sup>[12]</sup>。

立堵又可分为土石堵口技术、石笼堵口技术、打桩进堵技术、钢木土石组合技术等。土石堵口技术一般适合口门流速2 m/s、水深4~5 m的情况。中国人民解放军中部战区陆军第27集团军某工兵团在多次抗洪实践中提出的钢木土石组合坝封堵决口技术即为立堵法的一种,该方法在决口处

水深4~6 m、流速3.2~3.7 m/s、落差1.5 m左右且决口处土质能植入钢、木桩的情况下效果较好,在1998年九江段溃口堵复抢险中得到了应用<sup>[32]</sup>。石笼堵口技术由于加大了抛投物重量,适合口门速度5 m/s、水深6 m、落差3 m的情况。此外,沉车抢堵溃口在形式上也属于立堵法。

平堵施工方法包括架桥平堵、抛料船平堵、空投平堵、箱型结构物封堵、沉柳落淤技术等。在水深、流速大、落差大的决口处使用的沉船和装配式箱型结构堵口也属于平堵技术。装配式箱型结构堵口技术可适用于决口流速7 m/s、但口门宽度不超过60 m的情况<sup>[33]</sup>。我国“十一五”时期对利用直升机投放堵口组件抢险的相关问题进行了探索性研究,其中堵口组件具有较好的挡水性、抗冲性、稳定性且适合采用直升机投放是研究的关键问题<sup>[34]</sup>。近年来,新型平堵施工技术相继被提出,潘恕等<sup>[35]</sup>提出的橡胶坝围堰快速堵口技术可用于流速不大于3 m/s,水深不超过5 m的溃口。美国陆军工程师研究发展中心于2011年进行了快速堵复堤防溃口的新技术试验研究,提出采用拱形充气橡胶袋先行堵水消势,然后再土石堵复溃口的方法。马洪福<sup>[21]</sup>提出了基于阵列火箭锚的堵口技术,并对其中的关键技术参数进行了实验研究。

## 2.3 封堵构件与装备

决口封堵的关键工序包括抢筑裹头和封堵决口,所需构件与装备伴随着堵口技术而发展。堤头护裹施工在低水头、小流速且土质较好时通常采用打桩填柳或抛石护裹,主要使用的构件包括木桩、钢管或螺旋锚,施工设备可为斧头、铁锤及植桩机;高水头、流速大及土质较差的条件下,可在堤头前铺放土工布软体排或抛柴石枕、打钢管构架抛石、抛填抗冲石笼等进行裹护,需要的构件主要为钢管<sup>[2,21]</sup>。

传统决口封堵技术多用柳枝、秸秆、土石料等土工材料来修筑堵口坝体及附属结构物,以人力使用简单的日常工具为主,机械化程度和堵口效率低<sup>[9]</sup>。石料、土工包及石笼抛投技术不仅可单独用于低流速、小水头溃口封堵,还大量配合应用于钢木土石组合封口技术、沉箱及沉船技术。其中,块石尤其是特大块石的抛投,需要采用船载挖掘机、浮吊等大型施工装备,要求具有较高的施工技术水平;挖掘机及装载机是中小型溃口抢险中抛投铅丝网石笼及土工袋等必不可少的抢险装备;土工包则可以通过使用快速装填机提

高作业效率,降低劳动强度<sup>[36]</sup>。钢木土石组合封口技术及其改进形式适用于大江大河决口封堵,在我国工程实践中应用较多,该技术可以不使用大型机械设备,早期主要依靠斧头、铁锤等小型工具人工完成作业,经过长期实践,目前已研发出便携式防汛抢险专用植桩机供使用。沉船、沉箱技术通常用于大流速决口的初堵,需要采用定位船将其托运至指定位置,并通过爆破充水使其下沉。

近年来,一批新的堵口构件和装备伴随新堵口技术被提出。马洪福<sup>[12]</sup>提出了利用火箭锚提供抛投材料锚固力的堵口技术,该技术需要对火箭锚结构和动力进行专门设计,且需要辅助使用锚索和岸基锚固构件。单定军等<sup>[23]</sup>提出的空投重物封堵溃口技术需要使用直升机进行堵口材料的抛投。潘恕等<sup>[35]</sup>提出的橡胶坝围堰快速堵口技术基于通用橡胶坝体、专门设计的钢浮箱底板和钢管桩构件,配合拖船运输和打桩定位可实现快速堵口。李齐等<sup>[37]</sup>提出的浮力坝式挡水堤溃口抢堵技术,采用带有聚苯乙烯塑料泡沫材质的防水帆布做挡水坝主体,通过锚桩和锚索实现坝体固定。目前,这些新技术尚未在工程实践中得到检验。

### 3 结 语

基于上述总结和分析,得到的主要结论和认识如下:

(1)通过数值模拟特别是物理模型实验,对于溃口发展过程和水流特性已有较为深入的认识,比较而言,物理模型实验结果更接近真实溃决过程,但更深入的研究依赖于实验和测量技术的进一步发展。

(2)经过长期的工程实践,应用于溃口封堵的物料已较为丰富,溃口封堵技术及配套的构件和装备已较为成熟,但现有的溃口封堵技术存在封堵效率低、人力强度大和安全风险高的特点。

(3)未来应进一步加强溃口水流特性及封堵技术的研究。包括复杂条件下溃口水流特性及其快速预测技术,溃口水流及地形参数的便携式、自动化测量技术,适于复杂水流条件、自动化程度高的快速堵口技术和成套装备。

### 参考文献

[1] 李民.黄河文化百科全书[M].成都:四川辞书出版社,2000.  
[2] 满卫东,孙英文,王亮.堤防决口抢险的实施方法[J].黑龙江水利科技,2005(3):127.

[3] 曾秀娟.堤防决口封堵水力学数值模型研究[D].南昌大学,2015.  
[4] 果鹏,夏军强,周美蓉,等.生产堤溃口展宽过程的概化模型试验研究[J].水科学进展,2020,31(2):99-109.  
[5] 张大伟,程晓陶,黄金池,等.基于Godunov格式的溃坝水流数学模型[J].水科学进展,2010,21(2):167-172.  
[6] 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.  
[7] Elalfy E, Tabrizi A A, Chaudhry M H.Numerical and Experimental Modeling of Levee Breach Including Slumping Failure of Breach Sides[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144 (2) : 04017066.  
[8] Rifai I, Abderrezzak K, Erpicum S, et al.Floodplain Backwater Effect on Overtopping Induced Fluvial Dike Failure[J].Water resources research,2018,54(11):9060-9073.  
[9] Sadeghi S, Hakimzadeh H, Amini A B.Experimental Investigation into Outflow Hydrographs of Nonhomogeneous Earth Dam Breaching due to Overtopping[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,146(1):04019049.1-04019049.13.  
[10] 陆灵威.河道溃堤水流的物理实验与数学模型研究[D].清华大学,2016.  
[11] Rifai I, Erpicum S, Archambeau P, et al.Overtopping induced failure of noncohesive, homogeneous fluvial dikes[J].Water Resources Research,2017,53(4):3373-3386.  
[12] 马洪福.阵列锚技术在堤防溃口堵复中的应用研究[D].华北水利水电大学,2019.  
[13] Tabrizi A A. Modeling embankment breach due to overtopping[D]. South Carolina:University of South Carolina,2016.  
[14] Zhu Y H, Visser P J, Vrijling J K, et al.Experimental investigation on breaching of embankments[J].Science China Technological Sciences,2011,54(1):148-155.  
[15] 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.  
[16] Sebastian Roger, Benjamin J.Dewals, Sébastien Erpicum, et al.Experimental and numerical investigations of dike-break induced flows[J].Journal of Hydraulic Research,2009,47(3):349-359.  
[17] 田治宗,梁跃平,解吉祥,等.堤防溃口口门区水力及冲淤特性模型试验研究[J].人民黄河,2003(3):32-33.  
[18] 马洪福,孙东坡,刘明潇,等.基于聚类分析的堤防溃口水力边界特征

- 值研究[J].水力发电学报,2019,38(4):75-86.
- [19]熊勇,程永辉,陈航.堤防溃口应急抢险技术研究综述[J].长江科学院院报,2019,36(10):169-174.
- [20]Stilmant F, Piroton M, Archambeau P, et al. Dike-break induced flows: a simplified model[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2012, 13:89-100.
- [21]任建斌.堤防决口封堵材料应用分析[J].中国水能及电气化,2017(7):59-63.
- [22]洪娟,陈徐均,于伟,等.堵口料体及其应用技术研究综述[J].人民黄河,2009,31(8):20-22.
- [23]单定军,张劲松,代健.重物落水后运动过程的数学模型[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(6):720-725.
- [24]孙芦忠,严建国,赵建钧.箱型结构物封堵溃坝水力学特性试验研究[J].长江科学院院报,2003,20(6):9-18.
- [25]尹洪波,孙芦忠,陈宝峰.抢险箱型结构物沉落的特性研究[J].人民长江,2007(6):100-102,123,151.
- [26]李继革,肖焕雄.河道立堵截流抛投粒径研究[J].水电能源科学,2001(3):79-81.
- [27]颜志庆,李琪,马洪福,等.堤防溃口特征分析及水流特性研究评述[J].中国农村水利水电,2018(11):183-187.
- [28]程义吉,薛永华.充泥长管袋在堵口合龙中的应用[J].水利建设与管理,2004,24(4):77-79,82.
- [29]周景芴,耿明全,黄淑阁.新型堵口料体水力特性试验研究[J].人民黄河,2003,25(3):12-13.
- [30]赵雨森,刘洪彬,肖发光.土工布在黄河抢险堵口及水中进占中的应用[J].河南水利与南水北调,2008(12):33,35.
- [31]陆海.堤防决口堵复方法探讨[C]//中国水利学会,水利部淮河水利委员会.青年治淮论坛论文集.2005:70-74.
- [32]王邦雨.钢木土石组合坝封堵堤防决口技术的施工方法[J].治淮,1999(4):38-39.
- [33]庞有师,吴广怀,孙芦忠.装配式箱型结构堵口技术初探[J].中国水利,2000(2):30-31.
- [34]贾志峰,富飞.投放重物封堵溃口试验探究[J].长江科学院院报,2011,28(9):25-25.
- [35]潘恕,汪自力,余咸宁,等.橡胶坝围堰快速堵口技术试验研究[J].人民黄河,2000,22(9):26-28.
- [36]杨志毅,王永利,郝胜强.应急抢险用土方作业编织袋快速装填机[J].工程机械,2014,45(1):15-19.
- [37]李齐,马峰,杨芙蓉,等.浮力坝式应急挡水子堤的设计应用[J].中国防汛抗旱,2013,23(1):80.

## Progress in flow characteristics and closure technology of dike breaches

CHEN Qigang<sup>1</sup>, ZHANG Dawei<sup>2</sup>, WANG Zhongxiang<sup>1</sup>, ZHONG Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

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

3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

**Abstract:** Dike-break floods usually result in catastrophic property damages and loss of lives, which can be reduced significantly through emergency closure of the dike breaches. In order to increase the efficiency of breach closure, both innovations on closure technology and deep understanding of the flow characteristics of dike breaches are required. This paper reviews recent experimental results on the evolution process and flow characteristics of dike breaches. The application conditions and calculation methods of various materials and the key auxiliary components and construction equipment of closure methods that have been adopted in engineering practices were summarized. New breach-closure measures that have been proposed recently were introduced. The existing progress indicates that further experiment research on the flow characteristics of dike breaches were needed. Meanwhile, the development of portable techniques for measuring breach parameters and automatic equipment for quickly breach closure should be enhanced.

**Keywords:** dike; breach; flow characteristics; closure technology; research progress

责任编辑 杜晓鹤