

冻土条件下均质土堤漫顶溃决试验研究

刘 昉,戚园春,吴敏睿

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300354)

摘要:为了研究冻土条件下的溃堤机理,开展了弯道水槽概化模型试验。基于结构光的三维成像原理,提出了一种无干扰全方位的实时溃口三维参数测量方法,并结合温度传感器监测堤内温度变化,研究了冻土条件下均质土堤漫顶溃决过程中溃口形态的演变规律和溃决区域的水位、流速、流量变化特性。依据试验中溃口冲蚀特点,将溃堤过程划分为渗透过流、堤后冲蚀、横向展宽、冲淤平衡4个阶段,黏性土堤和非黏性土堤第2阶段、第3阶段分别以陡坎冲蚀和失稳坍塌为主要特征,且黏性土堤会出现明显的陡坎合并现象。试验结果还表明:冻结后土体间隙的冰晶体与土颗粒相互胶结,土体的黏聚力增大,溃口扩展速率及溃决区域的水位、流速变化率均减小,且黏性土堤受冻土深度的影响更加明显;冻土条件下堤防背水侧与堤顶的连接处薄弱易溃,应加强维护,且一旦溃堤应优先对临水侧进行封堵。

关键词:均质土堤;漫溢溃决;水槽试验;冻土条件;传感器;溃口

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0021-07

Experimental study on erosion process of homogeneous embankment breaching due to overtopping under frozen soil condition//LIU Fang, QI Yuanchun, WU Minrui (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: A curve flume generalized model experiment was carried out to study the dike-break mechanism under frozen soil condition. Based on the three-dimensional (3-D) imaging principle of structured light, a non-interference and omnidirectional measurement method for the 3-D parameters of real-time breach was developed. Combined with the temperature sensor to monitor the temperature change inside the embankment, the evolution process of the breach and the variation characteristics of water level, velocity and flow rate in the failure area of the homogeneous embankment under frozen soil condition were studied. According to the characteristics of beach erosion, the process of embankment failure is divided into four stages, including infiltration and overflow, back-embankment scour, horizontal widening and balance of erosion and siltation. For both cohesive embankment and non-cohesive embankment, scarp scour and collapse instability are the main characteristics of the second and third stages respectively, and the phenomenon of scarp merger occurs obviously for the cohesive embankment. The test results also show that, the ice crystals in adjacent soil are cemented with the soil particles after freezing, the cohesive force of soil increases, and the expansion rate of the breach and the change rate of water level and velocity in the failure area decrease. In addition, the influence of the frozen soil depth on cohesive embankment is more obvious. The connection part between the backwater side and the top of the embankment is weak and easy to breach under frozen soil condition, so the maintenance should be strengthened, and the water side dike should be sealed first once the embankment breaks.

Key words: homogenous embankment; breach due to overflow; flume experiment; frozen soil condition; sensor; breach

堤防是筑于河渠外围,用于束缚水流、防洪御浪的重要挡水建筑物。极端自然条件、堤身内患及人为破坏均可能诱发溃堤事故。历史上“九江决堤”^[1]特大洪灾牵涉省市众多,百姓伤亡惨重,黄河流域更是洪水泛滥成灾。随着中华人民共和国成立后堤防安全防护工作和流域治理工作的大力开展,洪灾事件才逐渐减少。但近年来中小型溃堤事件仍

时有发生^[24],2021年7月内蒙古2座水库堤坝溃决,10月受连续强降雨影响山西部分区域支流出现溃堤。凶猛的溃堤洪水会冲毁民宅,淹没农田,致使水利、交通、通信等设施严重受损,给人民的生产生活和生态环境带来巨大的威胁。因此,深入研究堤防的溃决机理,掌握洪泛区的洪水演进规律非常重要,这对编制合理高效的堤防维护和抢险修复方案

也具有重要意义。

模型试验易于调控变量和监测数据,是研究堤坝溃决机理的重要手段。目前,关于大坝溃决机理的试验研究较多^[5-6],在堤防溃决研究方面,溃决区域的流量、流速、水位等水力要素的变化特性是研究热点之一。Roger 等^[7-8]最先发现溃堤波与溃坝波的差异,并通过模型试验探究了溃堤后稳定状态的溃口分洪特性。陆灵威等^[9-10]开展了大型水槽模型试验,通过测量整个溃决区域的水位、流场变化,探究了溃堤洪水在洪泛区及河道内的实时传播特性。张晓雷等^[11]在试验中考虑河槽形态,分析了溃堤后滩槽内的水位变化特性及滩区内的洪水波传播过程,并基于数值模拟分析了滩区糙率对水流演进过程的影响。基于物理模型试验结果,理解溃口形态的演变过程及其对水流要素的响应规律尤为重要。余明辉等^[12]探究了非黏性土土堤溃决过程中溃口形态的变化规律及其与流量、材料粒径之间的关系。魏红艳等^[13]进行了粉质黏土堤防漫溢溃决试验,探究了河道流量、土体含水率、孔隙率对溃口发展过程的影响。田治宗等^[14]开展了动床实体模型试验,探讨了堤防溃决过程中流量和溃口宽度对溃口区域流场、水位及地形冲淤的影响。梁艳洁等^[15]探究了流量、水位差、材料粒径对非黏性土土堤溃口横向展宽的影响。堤坝溃决模型常通过假定溃口形态线性变化来计算漫顶溃决洪水的演进过程^[16-18],研究具体的溃口形态演变规律可为数值模型的验证提供丰富的数据资料,而且采用精确便携的测量仪器有利于准确认识溃口形态的演变规律。在此类模型试验中,学者们多采用高清摄像机结合网格技术、图形分析技术处理溃口横向展宽,在溃口处布设自动地形仪确定溃口高程。张建云等^[19]和段文刚等^[20]分别在试验坝体内埋设自主研发的变形传感器和埋入式轻型冲蚀捕捉器,记录溃口的垂向冲蚀过程。然而,现有的测量工具无法兼备便携、量测范围全面和后续处理程序精简等特点。

除上述因素外,冻融作用也会影响堤防的溃决过程。位于季节性冻土区的堤防极易受冻融侵蚀的威胁,冻融作用会打破堤体内部的原有平衡状态,显著改变堤身土体的温度场和水分场^[21],影响土体粒径分布、孔隙状态、渗透性、强度等物理力学性质^[22-23]。溃堤过程与土体的物理力学指标密切相关,因此,冻融作用影响下堤防的溃决特性是否与前人研究结果一致尚需进一步探究。由于冻结期和融化期土体性质的变化趋势不同,直接研究完整冻融周期下的溃堤特性较为困难,故本文初步模拟冻土试验环境并开展大型弯道水槽概化模型试验。通过

在室外自然环境下冻结土堤,采用结构光传感器和温度传感器监测溃口形态和堤体温度,初步探究了冻土条件下均质土堤在漫顶溃决过程中溃口形态的演变规律和溃决区域的水位、流速、流量等水力要素的变化特性,旨在为堤防冻融侵蚀破坏机理的研究提供理论依据。

1 试验设计

1.1 试验装置

试验在天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开展。水槽平面布置见图 1,全长 30 m,深 1 m,堤前为 U 形主槽区,堤后为洪水演进区。砌砖水槽用于处理尾水,巴歇尔槽用于确定出口流量。堤顶宽 20 cm,堤底宽 100 cm,堤高 20 cm,坡度比为 1:2。堤顶设矩形引导溃口,深 2 cm,宽 10 cm。堤顶布置结构光传感器以测量溃口形态,该仪器基于结构光的三维成像原理,可实现溃口轮廓的主动测量,即被投射至溃口表面的结构光被调制后经摄像系统采集,再经计算机解析处理,可输出溃口的三维参数。

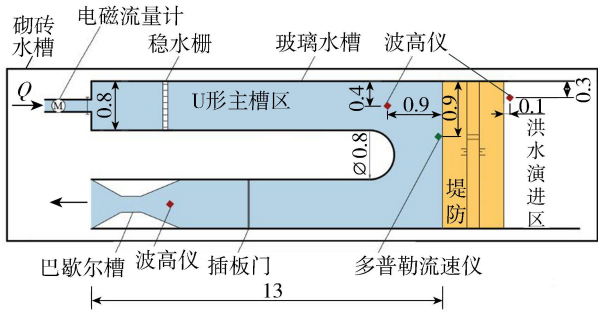


图 1 水槽平面布置示意图(单位:m)

本文将未考虑冻土作用的试验组次称为洪水条件,冻土条件和洪水条件下的堤防初始状态不同。冻土试验在室外完成筑堤和冻结,冻结时在堤底和两侧布置隔温棉,在堤身一侧不同深度处埋设温度传感器,以监测堤体温度,并确保溃口无法扩展至埋设位置。而洪水试验直接在水槽筑堤,筑堤时保证各工况堤身压实度一致,试验前在堤体表面涂抹防渗黏泥。洪水演进区初始为干河床,试验开始后打开进水阀和插板门,从上游蓄水,待水位距初始溃口底部约 1 cm 并稳定后微调插板门高度。当水位开始漫过引导溃口,计时并采集数据。至溃口形态和测点数据稳定后,结束采集。

1.2 试验工况

考虑到材料粒径会影响冻结作用对土体结构的改造,分别选用黏性土和非黏性土作为筑堤材料,颗粒级配曲线见图 2。试验组次和参数见表 1,各工况重复试验结果表明,溃口形态变化过程、溃决区域的水位和流速以及巴歇尔槽流量变化特性均非常接

近,从而保证了试验结果的可信度。

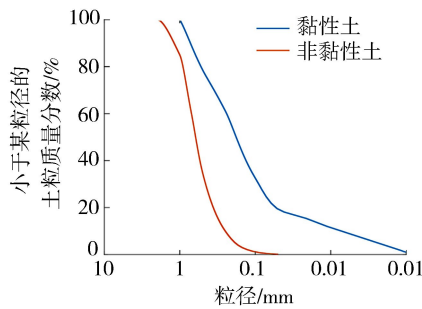


图2 试验材料级配

表1 试验组次和参数

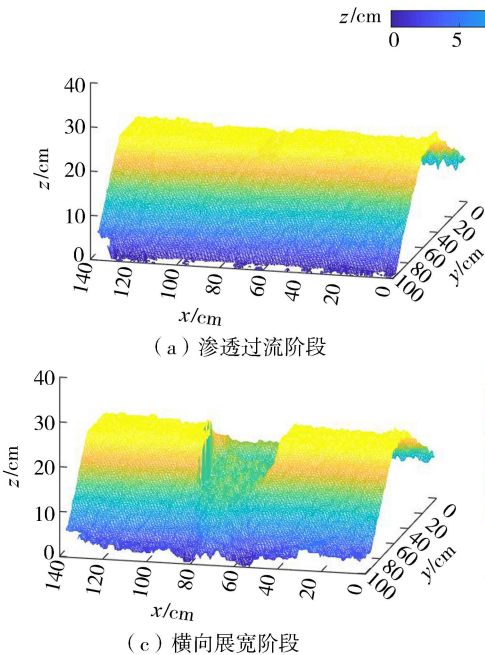
试验组次	筑堤材料	试验条件	冻土深度/cm	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	水温/℃
非黏性土	N-0	洪水	0	100.04	6.0
	N-2	冻土	2	100.00	4.1
	N-4	冻土	4	100.02	4.0
黏性土	C-0	洪水	0	100.01	6.1
	C-2	冻土	2	100.02	4.0
	C-4	冻土	4	100.00	4.0

2 试验结果与分析

基于溃口的形态演变规律将整个溃决过程划分为渗透过流、堤后冲蚀、横向展宽、冲淤平衡 4 个阶段,冻土条件下各阶段的溃决特性分析如下。

2.1 冻土条件下非黏性土堤漫顶溃决过程

- a. 渗透过流阶段。受主槽区水面波动的影响,水流在引导溃口表面缓慢行进,部分水流向引导溃口底部及两侧渗透。溃口形态见图 3。
- b. 堤后冲蚀阶段。水流一旦漫过引导溃口,重力势能转换为动能,在堤后表面冲出浅窄的冲刷沟。



随着背水侧股状水流延展为片状水流,冲刷沟宽度增大。堤顶与背水侧的连接处最先被冲蚀至非冻土层而形成凹陷,水流跌落至凹陷处,一方面形成反向漩涡,加速来流侧堤底淘蚀;另一方面形成挑射水流,加速堤后表面冲刷。冲积颗粒在坡脚处形成偏向主槽区下游的“空心冲积扇”。之后,跌坎逐渐向堤前移动,剧烈紊动区域随之扩展,溃口深度逐渐增加,堤前与临水侧的连接处横向扩展。由于冻结后土颗粒间的黏聚力增大,堤岸不易坍塌,溃口两侧形成明显的“悬臂”。此阶段溃口的垂向冲蚀较剧烈,阶段末冲刷沟两侧局部坍塌。

- c. 横向展宽阶段。堤防临水侧出现弧形跌坎,并沿水面线横向扩展。背水侧溃口较窄,坡脚伴有明显的冲蚀水舌。水流漫过跌坎,在溃口处充分紊动,溃口底部土颗粒最先被冲蚀搬运,顶部形成“悬臂”,当“悬臂”的重力大于土颗粒之间的黏结力时,顶部失稳坍塌,此时可在堤前临水侧观察到明显的堤身分层现象。溃口两侧呈锯齿状,该阶段溃口展宽最为剧烈,溃决区域的流速、流量、水位峰值均出现在此阶段。
- d. 冲淤平衡阶段。水流呈缓流状态,溃口形态及测点水力要素趋于稳定。上、下游水位差减小,水流流速减小,携沙能力减弱。

2.2 冻土条件下黏性土堤漫顶溃决过程

- a. 渗透过流阶段。水流在溃口表面缓慢行进,黏性土堤下渗量明显小于非黏性土堤,整体溃口形态见图 4,对应的溃口局部形态见图 5。
- b. 堤后冲蚀阶段。冻结后堤体表面粗糙度降

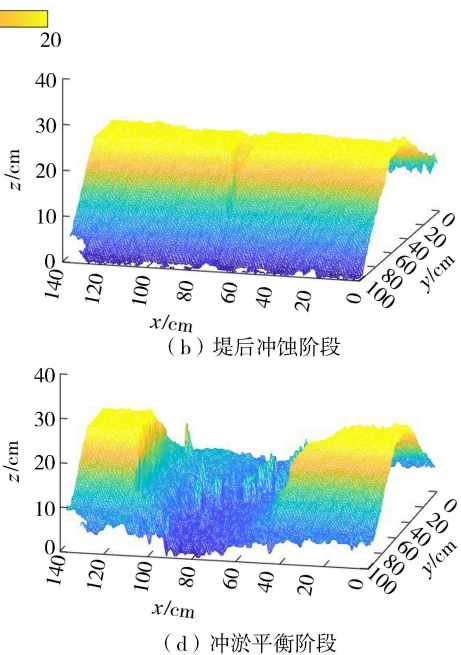


图3 非黏性土堤溃口形态

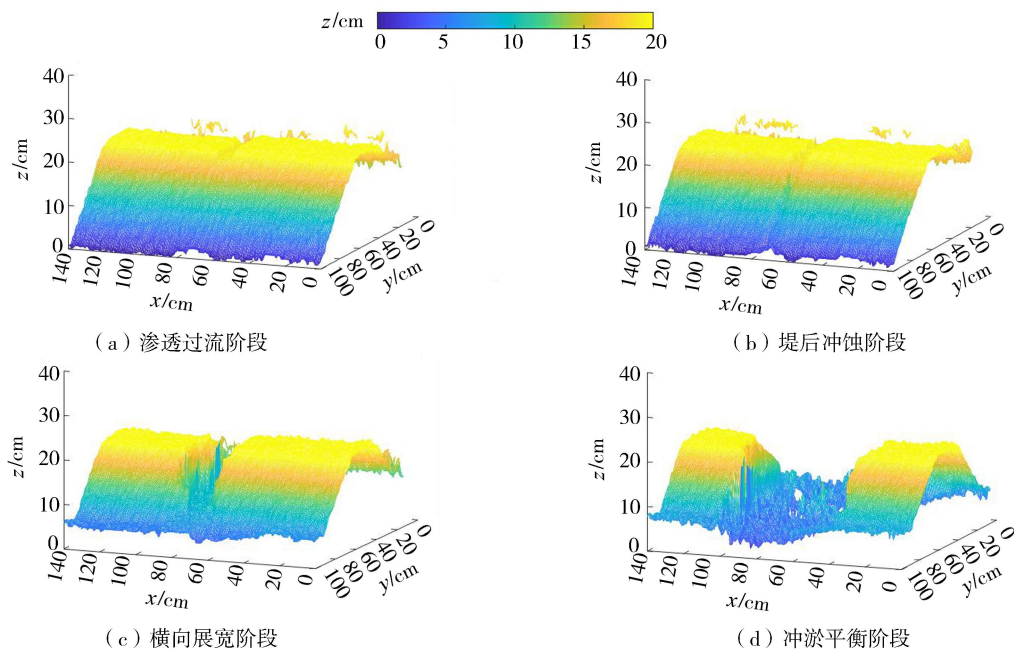


图4 黏性土堤整体溃口形态



(a) 堤后冲蚀阶段



(b) 横向展宽阶段



(c) 冲淤平衡阶段

图5 溃口局部放大示意图

低,水流一旦漫过引导溃口,便迅速延展为片状水流冲刷坡面,流向偏向主槽区下游。堤身表面薄弱部位的大粒径泥沙颗粒最先起运,堤身呈坑坑洼洼状,坡脚处的泥沙颗粒被冲蚀搬运。受水流转向的影响,背水侧上部易被冲蚀,该处最先形成一级陡坎,落点部位出现反向旋涡,一方面加速了顶部非冻土层的淘蚀,另一方面加剧了底部冻土层的冲刷。待底部冲刷至非冻土层后,背水侧开始出现次级陡坎。后期一级陡坎冲蚀至堤顶并缓慢向临水侧蚀退,堤后坡面的陡坎合并,坡脚呈喇叭形扩展。溃口两侧形成明显的“悬臂”,该阶段溃口垂向发展较为剧烈。当陡坎移动至临水侧与堤顶的交界处时,该阶段结束。

c. 横向展宽阶段。该阶段初期临水侧跌坎处出现瀑布状水流,跌坎底部被反向淘蚀。溃口区域

水流剧烈紊动,垂向冲蚀加剧,临水侧溃口呈弧形扩展,背水侧坡脚呈喇叭形扩展,冲积扇偏向主槽区下游,溃口平面形态接近双曲线形。随着水流持续冲刷,溃口两侧“悬臂”的重力大于土体之间的黏结力而失稳坍塌,溃口流量增大,坍塌土体被逐层冲蚀。直至溃口两侧岸脚处出现漩涡状挟沙水流,标志着新一轮的底部淘蚀。该阶段后期溃口以横向间歇性大体积坍塌为主,临水侧被逐层冲蚀,形成较厚的淤积层,溃口呈锯齿状。

d. 冲淤平衡阶段。水流呈缓流状态,溃决区域的水力要素和溃口形态均趋于稳定。上、下游水位差减小,水流流速减小,携沙能力减弱。

2.3 溃口形态变化规律

渗透过流阶段溃口形态和测点水力要素变幅很小,故从堤后冲蚀阶段开始计时分析。由于非黏性土堤和黏性土堤各工况分别在计时 400 s、2 400 s 后处于平衡状态,因此主要分析该时段内的溃口形态演变规律。各工况溃口形态变化参数见表 2,可以看出,冻土层的存在会减缓溃口的堤后冲蚀进程,由于黏性土堤黏聚力强,孔隙率小,透水性弱,延缓现象更加明显。冻土层越厚,非黏性土堤横向展宽阶段越长,而黏性土堤则相反,这主要是由于黏性土堤不易坍塌,在同一流量下可较早达到稳定状态。一般来说,黏性土在低温环境下冻结,当温度升高时孔隙冰逐渐融化,土颗粒间的胶结作用和黏聚力减小,土体会在自重作用下产生沉降。为了尽量避免融沉现象对冻土试验的影响,堤防冻结完成后便立即开展溃决试验,且在同一低水温 and 气温环境下进行。本文研究成果有助于初步了解冻土条件与洪水条件

表 2 溃口形态变化参数

工况	堤后冲蚀阶段			横向展宽阶段			
	用时/s	垂向发展速率/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	堤顶蚀退速率/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	用时/s	垂向发展速率/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	坡脚展宽速率/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	堤顶展宽速率/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
N-0	68	0.05		132	0.13		0.79
N-2	72	0.05		198	0.11		0.57
N-4	80	0.04		270	0.04		0.39
C-0	254		0.17	2 103		0.04	0.04
C-2	336		0.11	1 755		0.03	0.03
C-4	495		0.09	1 406		0.03	0.03

下堤防溃决过程的差异,但实际情况下季节性冻土区堤防会经历完整的冻融循环作用,因此,关于融沉现象对溃堤过程的影响需在之后的冻融循环试验中进一步考虑。

溃口的垂向深度和横向宽度是描述溃口形态的主要指标,本文选取堤顶若干断面计算实时平均溃口宽度和深度。各工况溃口形态变化见图 6~8。由图 6 可知,前 200 s 溃口形态演变最为剧烈,冻土条件下的溃口扩展速率小于洪水条件,尤其是在横向展宽阶段,且最终溃口宽度随冻土深度的增加而减小。黏性土堤溃决前期可观察到明显的堤顶蚀退现象,由图 7 可知,冻结后堤顶平均蚀退速率减小,且由于堤身分层,蚀退速率有明显波动。

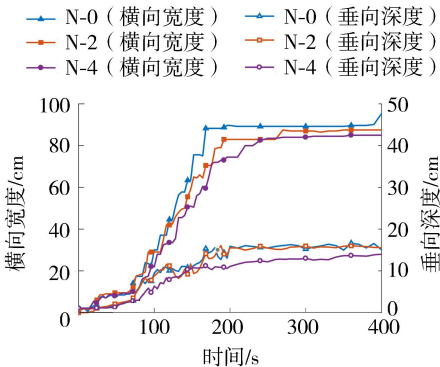


图 6 非黏性土堤溃口形态变化

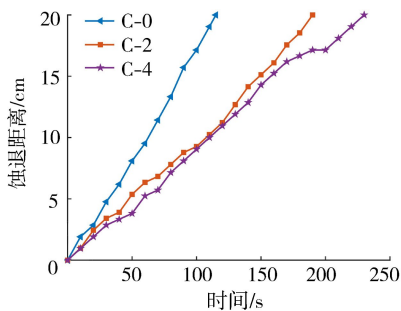


图 7 黏性土堤堤顶蚀退过程

黏性土堤溃决过程中,堤顶和背水侧坡脚的溃口宽度变化如图 8 所示,可以看出,坡脚处溃口连续扩展,而堤顶处溃口宽度呈明显的“阶梯式”增长。此外,与洪水期相比,冻土条件下的溃口平均展宽速率较小,且与冻土深度呈负相关。

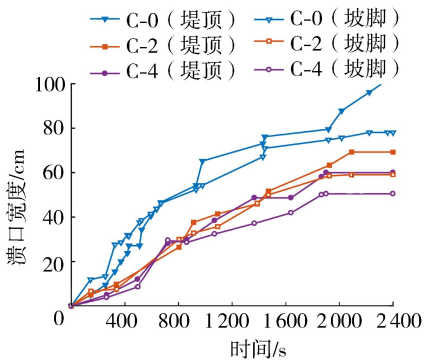


图 8 黏性土堤溃口宽度变化

2.4 溃决区域水力要素变化特性

堤防上下游水位差是影响溃口展宽的重要因素,各工况下溃决区域的水位、流速变化见图 9 和图 10,图中 h_q 、 h_h 分别为堤前、堤后水位, v_x 、 v_y 分别为 x 方向、 y 方向流速。将多普勒流速仪沿堤防临水侧坡脚线布置,测量位于溃口中心线且距槽底 5 cm 处的测点的三维流速, x 轴正方向与入口流量方向相同, y 轴正方向为顺堤防指向主槽区上游方向。该点流速不仅可以反映堤前主槽区河道水流强度,还可以反映溃堤过程上游分流对堤防决口的冲蚀强度。

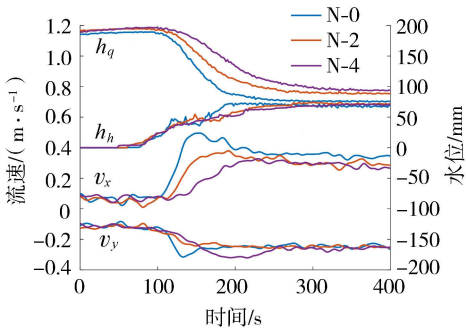


图 9 非黏性土堤溃决区域水位、流速变化

可以看出,堤后冲蚀阶段少量水流通过溃口,而上游来流恒定,故堤前测点水位微升。该阶段后期堤后冲积扇扩展至测点处,此处水位上升。横向展宽阶段溃堤水流呈明显的非恒定流特性,初期堤前后水位差最大,溃口水流呈急流状态,流速快速增大至峰值。随着溃口扩展,堤前水位回落,堤后水位上升,流速趋缓。对于非黏性土堤,该阶段测点水位、流速变化率与冻土深度呈负相关。而对于黏性土

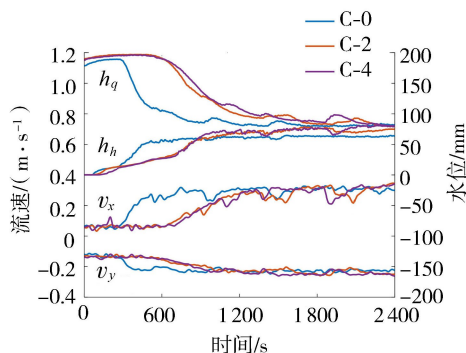


图 10 黏性土堤溃决区域水位、流速变化

堤,冻结后测点水位、流速变化率与洪水期相比明显减小,但冻土厚度的持续增大对堤防的溃决影响较小。黏性土堤溃口扩展以两侧大面积的土体坍塌为主,测点水力要素的波动较大。冲淤平衡阶段水流呈缓流状态。

溃口流量是决定洪泛区淹没程度的关键指标,本文在主槽区下游出口处设置巴歇尔槽,通过此处测点水深计算流量,计算结果可间接反映溃口流量变化。各工况下巴歇尔槽流量 q_b 变化曲线见图 11,图中 t^* 代表当前时长与总时长的比值。可以看出,上游来流恒为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,巴歇尔槽流量先减小后趋于稳定,且黏性土堤组次流量波动较大。工况 N-0、N-2、N-4、C-0、C-2、C-4 下降段的流量平均变化率分别为 $0.54 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})/\text{s}$ 、 $0.40 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})/\text{s}$ 、 $0.34 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})/\text{s}$ 、 $0.11 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})/\text{s}$ 、 $0.08 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})/\text{s}$ 、 $0.07 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})/\text{s}$,这表明冻土条件下的流量变化率小于洪水条件下的流量变化率,且与非黏性土堤相比,黏性土堤受冻土厚度的影响较小。

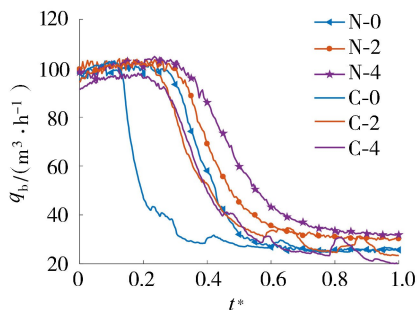


图 11 巴歇尔槽流量变化曲线

3 结 论

a. 本文提出的溃口形态测量方法无需在水流或堤防中安装仪器,具有便携、无侵入性、灵敏度高等特点。采用该方法不仅能够获取溃堤全过程的溃口形态参数,还能很好地捕捉到非黏性土堤溃决过程中出现的陡坎冲蚀、悬臂坍塌、弧形坎扩展、堤身分层等现象,以及黏性土堤溃决过程中出现的陡坎合并、弧形坎扩展、双曲线形溃口、大体积坍塌等现象。

b. 冻结作用增大了土体黏聚力,从而使溃口扩展速度减缓,稳定溃口宽度减小。

c. 堤防上下游水位和溃口流速变化过程与溃口发展过程相对应,黏性土堤溃口坍塌体体积较大,测点水位和流速波动较大。

d. 冻土条件下堤防背水侧与堤顶的连接处薄弱易溃,应加强维护,且一旦溃堤应优先对临水侧进行封堵。

参考文献:

- [1] 叶俊东. 百年大计呼唤质量第一:九江溃堤的警示[J]. 瞭望新闻周刊,1998(38):14-15. (YE Jundong, Century-old plan calls for quality first: warnings of Jiujiang dike-break[J]. Outlook,1998(38):14-15. (in Chinese))
- [2] 方立,冯相明,严宝文,等. 黄河内蒙古杭锦旗独贵塔拉奎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 Engineering of Heilongjiang University, 2009, 36 (1): 31-33. (in Chinese))
- [3] 姚秋玲,孙东亚,王新春. 江西抚河唱凯堤溃堤调研及原因分析[J]. 中国防汛抗旱,2012,22(2):22-23. (YAO Qiuling, SUN Dongya, WANG Xinchun. Investigation and analysis of causes of Changkai dike-break in Fuhe River of Jiangxi Province[J]. China Flood & Drought Management, 2012, 22 (2): 22-23. (in Chinese))
- [4] 刘文惠,谢昌卫,王武,等. 青藏高原可可西里盐湖水位上涨趋势及溃决风险分析[J]. 冰川冻土,2019,41(6):1467-1474. (LIU Wenhui, XIE Changwei, WANG Wu, et al. Analysis on expansion trend and outburst risk of the Yanhu Lake in Hoh Xil region, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41 (6): 1467-1474. (in Chinese))
- [5] 王立辉,胡四一. 溃坝问题研究综述[J]. 水利水电科技进展,2007,27(1):80-85. (WANG Lihui, HU Siyi. Study on dam failure-related problems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (1): 80-85. (in Chinese))
- [6] 曹伟,陈生水,钟启明. 坝体土料黏粒质量分数对均质土坝漫顶溃决过程的影响[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):37-40. (CAO Wei, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Influence of clay content on overtopping breach process of homogeneous earth dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (1): 37-40. (in Chinese))
- [7] ROGER S, DEWALS B J, ERPICUM S, et al.

- Experimental and numerical investigations of dike-break induced flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47(3):349-359.
- [8] STILMANT F, PIROTON M, ARCHAMBEAU P, et al. Dike-break induced flows: a simplified model [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13(1):89-100.
- [9] 陆灵威, 林斌良, 孙健, 等. 河道溃堤水波的物理模型实验研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11):25-34. (LU Lingwei, LIN Binliang, SUN Jian, et al. An experimental study of propagation of dike-break waves[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11):25-34. (in Chinese))
- [10] SUN Jian, LU Lingwei, LIN Binliang, et al. Processes of dike-break induced flows: a combined experimental and numerical model study [J]. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(4):465-471.
- [11] 张晓雷, 夏军强, 果鹏, 等. 溃堤洪水过程的模型试验与数值模拟[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4):71-81. (ZHANG Xiaolei, XIA Junqiang, GUO Peng, et al. Experimental and numerical investigations of farm dike-break induced floods [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4):71-81. (in Chinese))
- [12] 余明辉, 魏红艳, 梁艳洁. 无黏性土堤漫顶溃决口门形态变化试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(1):15-20. (YU Minghui, WEI Hongyan, LIANG Yanjie. Experimental study of overflow erosion of non-cohesive embankment [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(1):15-20. (in Chinese))
- [13] 魏红艳, 余明辉, 李义天, 等. 粉质黏土堤防漫溢溃决试验[J]. 水科学进展, 2015, 26(5):668-675. (WEI Hongyan, YU Minghui, LI Yitian, et al. Experimental study on overflow breaching of embankments constructed with silty clay[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5):668-675. (in Chinese))
- [14] 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. (TIAN Zhizong, LIANG Yueping, XIE Jixiang, et al. Model experimental study on hydraulic and scour-silt characteristics of embankment breach area [J]. Yellow River, 2003(3):32-33. (in Chinese))
- [15] 梁艳洁, 余明辉, 魏红艳. 无黏性土堤漫顶溃决过程初步研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5):89-94. (LIANG Yanjie, YU Minghui, WEI Hongyan. Study on overtopping erosion of non-cohesive embankment [J]. Advanced Engineering Sciences, 2011, 43(5):89-94. (in Chinese))
- [16] 张贵金, 罗舸旋子, 朱博渊, 等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2):28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):28-35. (in Chinese))
- [17] 龚政, 郭蕴哲, 杭俊成, 等. 沿海城市溃堤洪水模拟技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3):78-85. (GONG Zheng, GUO Yunzhe, HANG Juncheng, et al. Advances in dike-breaking flood simulation technology in coastal cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3):78-85. (in Chinese))
- [18] 沈鸿杰, 徐力群, 刘子茜. 改进 DB-IWHR 模型及其在尾矿库溃坝影响分析中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5):64-70. (SHEN Hongjie, XU Liquan, LIU Zixi. Improved DB-IWHR model and its application in influence analysis of tailings dam break[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):64-70. (in Chinese))
- [19] 张建云, 李云, 宣国祥, 等. 不同黏性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学:技术科学, 2009, 39(11):1881-1886. (ZHANG Jianyun, LI Yun, XUAN Guoxiang, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength [J]. Sci China:Tech Sci, 2009, 39(11):1881-1886. (in Chinese))
- [20] 段文刚, 杨文俊, 王思莹, 等. 非黏性土坝漫顶溃决过程及机理研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10):68-72. (DUAN Wengang, YANG Wenjun, WANG Siying, et al. Overtopping failure process of cohesionless earth dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10):68-72. (in Chinese))
- [21] 杨震, 李超, 冀鸿兰, 等. 冻融期黄河堤岸土体温湿度变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(1):76-83. (YANG Zhen, LI Chao, JI Honglan, et al. Characteristics and influencing factors of soil temperature and moisture of the Yellow River bank during freeze-thaw period [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(1):76-83. (in Chinese))
- [22] 胡成, 翁兴中, 朱懋江, 等. 纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1):84-92. (HU Cheng, WENG Xingzhong, ZHU Maojiang, et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1):84-92. (in Chinese))
- [23] 冯德成, 林波, 张锋, 等. 冻融作用对土的工程性质影响的研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2017, 47(2):111-127. (FENG Decheng, LIN Bo, ZHANG Feng, et al. A review of freeze-thaw effects on soil geotechnical properties [J]. Sci China:Tech Sci, 2017, 47(2):111-127. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-02 编辑:骆超)