

# 凌汛期堤防漫顶溃口破坏规律断面 模型试验 I :黏性土堤

刘 昉<sup>1</sup>, 周世佳<sup>1</sup>, 戚园春<sup>1</sup>, 吴敏睿<sup>1</sup>, 张 剑<sup>2</sup>, 徐国宾<sup>1</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354; 2. 天津大学前沿技术研究院有限公司, 天津 301700)

**摘 要:** 凌汛期河道存在大量冰凌, 导致河流壅塞、水位上涨, 对堤防安全造成了严重隐患。为了探究凌汛期黏性土堤的漫顶溃口破坏规律, 建立了室内水槽物理模型, 模拟了冰凌条件下的堤防漫顶破坏, 通过改变堤身含水率和河道流量, 分析了冰凌条件下溃堤时的溃口破坏形式、溃口发展过程和水位变化过程。结果表明: 溃堤过程中冰凌挤压对堤体的破坏作用明显, 堤身含水率和河道流量对溃堤过程有显著的影响; 与洪水条件相比, 冰凌条件下溃堤时溃口前期发展较为缓慢, 而中、后期较为强烈; 冰凌条件下的堤前水位峰值要高于洪水条件。

**关键词:** 黏性土堤; 凌汛期; 物理模型试验; 漫顶溃决; 溃口发展

中图分类号: TV871.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0132-10

## Cross-section model test for embankment overtopping breach patterns during ice flood season I : Cohesive soil embankments

LIU Fang<sup>1</sup>, ZHOU Shijia<sup>1</sup>, QI Yuanchun<sup>1</sup>, WU Minrui<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, XU Guobin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China;

2. Tianjin University Frontier Technology Research Institute Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

**Abstract:** The abundant ice in the river during the ice flood season clogs the river course and makes the water level rise, which poses a great threat to the safety of the embankments along the river. In order to investigate the law of overtopping failure of cohesive soil embankments during ice flood season, a physical model of laboratory flumes was established. By changing the water content of embankment body and the flow in the river, the breach patterns, breach development and water level change under ice flood condition were simulated and analyzed. The results show that the ice extrusion plays an important role in the failure process of the embankment body. The water content of the dike and the flow of the river have significant effects on the process of the embankment failure. Compared with the flood condition, the development of the failure under ice flood condition is relatively slow in the early stage, but more intense in the middle and late stage. Furthermore, the peak water level in front of the dike under ice condition is higher than that under flood condition.

**Key words:** cohesive soil; ice flood season; physical modelling experiment; overtopping outburst; breach development

## 1 研究背景

凌汛是地处较高纬度地区的河流特有的现象, 是冰凌对水流产生阻力而引起的河道水位明显上涨的水文现象<sup>[1]</sup>。冰凌洪水在向下游演进的过程中, 容易在急弯、浅滩或窄口处卡冰结坝, 导致水位急剧

上升, 威胁堤防安全<sup>[2]</sup>。干、支流出现的各种冰凌现象往往会衍生为冰塞、冰坝等, 进而形成冰凌灾害。灾害的发生除对滩地、村庄、引水工程、水电枢纽等设施有直接影响外, 还会破坏桥梁、堤防等基础设施<sup>[3-5]</sup>。2008年3月20日杭锦旗独贵特拉奎素段大堤发生溃堤险情, 塌方长度超过450 m, 随后大

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508403)

作者简介: 刘 昉(1979-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为工程水力学。

通讯作者: 徐国宾(1956-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为河流动力学及河床演变。

堤决口,溃堤宽度大约 50 m,水淹面积达 106 km<sup>2</sup>,受洪水威胁的村屯涉及群众 13 000 多人,造成直接经济损失  $6.9 \times 10^8$  元。

目前国内外研究堤坝溃决过程的物理模型试验取得了一定成果,南京水利科学研究院<sup>[6]</sup>、长江科学院<sup>[7-8]</sup>、中国水利水电科学研究院<sup>[9]</sup>和美国农业部<sup>[10-11]</sup>等均开展了均质土堤坝的溃决试验研究。Powledge 等<sup>[12-13]</sup>通过室内模型试验表明,陡坎的形成和发展是黏性土堤漫溢侵蚀最关键的机制,溃堤后期堤顶高程不断降低、溃决流量增大,会反过来加剧溃口的冲深和扩宽。朱勇辉等<sup>[7]</sup>和罗优等<sup>[14]</sup>的试验研究也证明了这一点。石国钰等<sup>[15]</sup>基于长江和汉江的堤防溃口拓宽实测资料,研究了堤防溃口的变化规律。Dhiman 等<sup>[16]</sup>通过试验发现黏性土堤坝溃决过程取决于堤前蓄水量、堤体几何特征、含水率和压实度等因素。部分学者对加冰条件下的水流运动也进行了研究,Fu 等<sup>[17-18]</sup>通过真冰试验,总结了冰的堆积特性及堆积后对上游水流的影响。Peters 等<sup>[19]</sup>搭建水槽模型试验,重点关注岸冰冰盖下的水流运动特性,发现冰盖下的水流流速要明显小于明流区水流。

当前国内外的溃堤物理模型试验研究大多集中于洪水期,对于凌汛期的研究较少。然而,受冰凌作用的影响,凌汛期和洪水期的溃决条件、溃决过程差异较大,因此有必要单独对其进行研究。在我国目前已知的溃堤溃坝事件中,85% 以上的堤坝都是由黏性土材料建成<sup>[20]</sup>。故本文以筑堤土体的含水率、河道流量为影响因素,探究黏性土堤在凌汛期溃堤时的溃口破坏形式和溃口发展、水位变化过程规律,寻找凌汛期与洪水期规律的差异,为凌汛期防凌措施的制定提供科学的参考和建议。

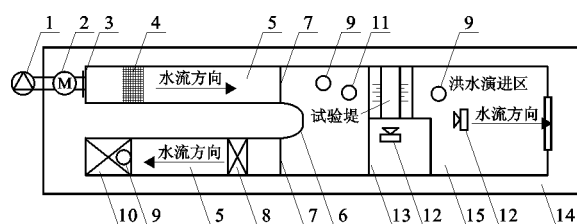
## 2 试验方案设计

### 2.1 试验模型

目前凌汛期溃堤实测资料匮乏,并且在溃堤物理模型试验中要满足水力学相似和土力学相似十分困难,本次试验目的为研究黏性土堤在凌汛期漫顶溃决时的溃口破坏形式和溃口发展过程规律,宜先在断面试验上开展机理性研究,再采用局部模型试验或整体模型试验的方法应用到实际工程中。因此综合考虑试验目的、模型场地、试验设备等因素,本文选择用概化模型进行断面模型试验。

试验在一个室内水槽模型中进行,模型分为上、下两部分,上部分为有机玻璃水槽,用于进行溃堤试

验,下部分水槽由砖和混凝土砌筑而成,用于尾水的沉淀回收和循环利用。砖砌水槽的尺寸大于上部有机玻璃板水槽。有机玻璃板水槽总长 30.0 m,宽 2.4 m,深 1.0 m,试验堤放置在距入口 14.0 m 处,堤前为 U 形槽,溃堤前水流在 U 形槽内流动,U 形槽上、下游宽均为 0.8 m,内弧段直径为 0.8 m,入口处设有电磁流量计和阀门,用来调节入口流量;下游出口处设置巴歇尔槽,用来计算出口流量;槽前安装插板门,用于调节堤前水位;堤前、堤后以及巴歇尔槽处装有波高仪,用来记录水位变化;堤顶装有结构光传感器,用于记录溃口变化数据,同时兼有录像功能;堤侧和堤后放有高清录像设备,记录溃口的发展过程,用来进行数据的核查对比。具体装置与试验模型如图 1、2 所示。



注:1. 水泵;2. 电磁流量计;3. 上游河道进水阀;4. 稳水栅;  
5. 有机玻璃水槽;6. U型河道;7. 拦截网;8. 下游河道插板门;  
9. 波高仪;10. 巴歇尔槽;11. 结构光传感器;12. 摄像设备;  
13. 有机玻璃模型;14. 下层水槽;15. 堤后河道

图1 试验装置示意图

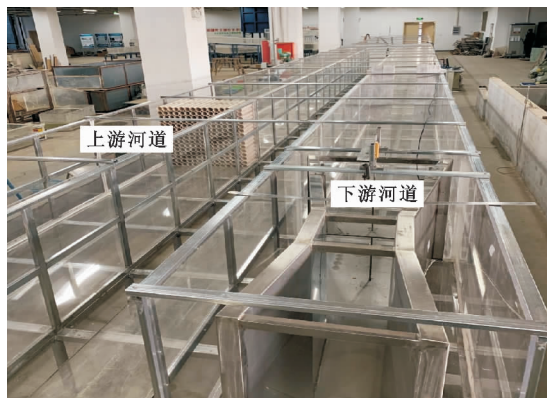


图2 试验模型现场布置

### 2.2 试验工况

试验堤高为 10.0 cm,堤顶宽度为 10.0 cm,边坡比为 1:1,堤防沿堤轴线方向长度为 1.2 m,模型比尺为 30。原型堤防为河流自然弯道处高为 3.0 m 的标准堤防,具有普适性。各组次筑堤所用土体颗粒级配均一致,考虑到含水率是堤身强度的重要物理指标,堤身强度大小会对溃口发展过程有明显影响,因此选取堤身含水率为试验变量之一,所用土的

最优含水率为 14.6%,根据堤防工程设计规范,堤防填筑土料含水率与最优含水率允许偏差为 $\pm 3\%$ ,因此本试验不同堤身含水率分别选择在 12%、15%、17%左右。河道流量是影响堤防溃决的主要因素,在溃堤过程中,河道流量的大小会影响堤前高水位维持时间,堤前后水位差带来的过堤水流动能会对溃口发展过程有明显的影响,因此选取河道流量为第二个试验变量。考虑到室内水槽和堤防模型的尺寸限制,以及试验步骤中对溃堤开始前稳定水位的要求(见 2.3 节步骤(2)、(3)),河道流量的取值范围须在 $10\sim 40\text{ m}^3/\text{h}$ 内,因此本次试验不同河道流量值分别设为 14、22、30  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

为尽量模拟真实的冰凌环境,试验用冰均为真冰,将水在 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下冷冻制成,试验时河道水温保持在 $4\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$ 。试验用冰尺寸以黄河宁蒙河段头道拐水文站所测封河期冰块尺寸厚度为依据,将 $0.6\sim 0.9\text{ m}$ 厚作为原型尺寸,试验用冰尺寸按照几何比尺 30 计算,同时考虑开河期温度和水温上升导致冰块部分融化的情况,本次试验所用冰块厚为 2.0 cm。在实际情况中,由于开河期冰块融化和冰块之间互相挤压破坏的作用,冰块的大小、形状和尺寸是随机的,考虑到初始溃口的大小,本次试验所用冰块的最长边长控制在 $4.0\sim 7.0\text{ cm}$ (原型 $1.2\sim 2.1\text{ m}$ )之间,总冰重为 60.0 kg 左右。

试验工况如表 1 所示。筑堤土体含水率约为 12%、15%、17%,入口流量约为 14、22、30  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

表 1 试验工况表

| 工况<br>编号 | 试验<br>条件 | 含水<br>率/% | 入口流量/<br>( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ) | 干密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 内摩擦<br>角( $\tan\varphi$ ) | 黏聚<br>力/kPa |
|----------|----------|-----------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------|
| A-1      | 洪水<br>条件 | 15.2      | 14.32                                       | 1204                                      | 0.1924                    | 11.30       |
| A-2      |          | 15.1      | 22.20                                       | 1195                                      | 0.2032                    | 11.19       |
| A-3      |          | 15.2      | 30.23                                       | 1210                                      | 0.1973                    | 11.43       |
| A-4      |          | 12.3      | 21.83                                       | 1214                                      | 0.1781                    | 2.85        |
| A-5      |          | 17.2      | 22.16                                       | 1178                                      | 0.2088                    | 13.40       |
| B-1      | 冰凌<br>条件 | 14.8      | 14.11                                       | 1235                                      | 0.2024                    | 10.92       |
| B-2      |          | 15.0      | 22.48                                       | 1220                                      | 0.1930                    | 11.09       |
| B-3      |          | 14.9      | 29.83                                       | 1187                                      | 0.1835                    | 10.80       |
| B-4      |          | 12.1      | 22.91                                       | 1180                                      | 0.1876                    | 3.64        |
| B-5      |          | 16.8      | 22.13                                       | 1213                                      | 0.1988                    | 14.30       |

### 2.3 试验步骤

(1)将试验材料按照既定的堤防断面尺寸堆筑成型,通过控制相同体积下的土重来使堤防的孔隙率保持一致,在堤身一侧顶部设置矩形引导溃口,诱

导溃口深为 1.5 cm,宽度为 5.0 cm。堤制作完成后放置 18 h,用来消除土的固结作用带来的影响。堤前进行防渗处理,防止溃堤开始前堤前水流入渗破坏堤体。

(2)开启水泵,通过调节上游进水阀门开度来控制入口流量。待入口流量值波动不超过 $0.2\text{ m}^3/\text{h}$ 后开始调节下游插板门,使河道水位缓慢上涨至距引导溃口底部 1.0 cm 处。

(3)分下列两种情况控制堤前溃堤水位:①待水位稳定后,通过对下游插板门进行微调,使水位缓慢上涨接近至诱导溃口处。溃堤过程开始时间为水流略高于溃口底部并刚流至诱导溃口上表面的时刻。②若为冰凌条件试验,待水位稳定后,在试验堤左侧面与拦截网围成的区域内缓慢加入既定尺寸和重量的冰块,并使其在堤左侧堆积;再次微调插板门,使水位缓慢上涨至与引导溃口齐平;当水位略高于引导溃口底部并流至堤防上表面时视为溃堤过程开始。

(4)试验中采集河道水位、溃口尺寸变化等数据,并加以分析。

### 2.4 试验方案验证

在室内物理模型试验中,影响溃口发展过程的各个因素如河道水流、堤身含水率、压实度等均可以得到很好的控制。为了验证本试验的可重复性和比尺的合理性,即比尺为 $\lambda_L=30$ 的溃堤试验是否可以较好地体现凌汛期溃堤溃口破坏的规律,本节进行了不同比尺的两组试验,并对两组试验中的陡坎移动速度、过堤水流流量和流速进行对比,试验结果须符合重力相似准则,并且两组试验结果差别须在合理范围内。

两组试验的筑堤用土及堤身含水率、压实度等指标均相同,验证试验工况见表 2。

表 2 不同比尺模型验证试验工况

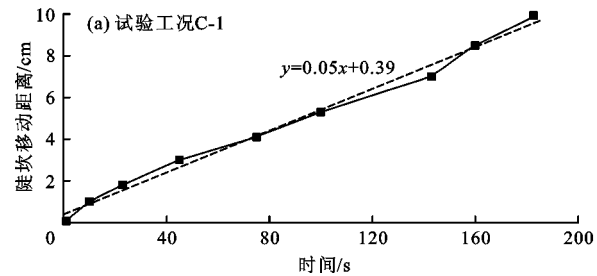
| 工况编号 | 比尺 $\lambda_L$ | 堤防高度/cm | 入口流量/( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ) |
|------|----------------|---------|-----------------------------------------|
| C-1  | 30             | 10      | 14.02                                   |
| C-2  | 10             | 30      | 218.27                                  |

根据李云等<sup>[21]</sup>基于黏性土均质堤坝溃决过程“陡坎”移动速度的相似,在保证原型和模型材料相似性的前提下推导出堤体“陡坎”冲蚀后退速度 $R$ 的比尺关系为 $\lambda_R=\lambda_L^{1/2}$ 。两组验证试验工况陡坎的移动距离随时间变化曲线如图 3 所示,陡坎移动参数比较见表 3。

表 3 两组验证试验工况陡坎移动参数比较

| 工况<br>编号 | 陡坎移动速<br>度/(cm·s <sup>-1</sup> ) | $\lambda_L$ | $\lambda_R = \lambda_L^{1/2}$ | 对应原型陡坎移<br>动速度/(cm·s <sup>-1</sup> ) |
|----------|----------------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| C-1      | 0.05                             | 30          | 5.48                          | 0.2740                               |
| C-2      | 0.08                             | 10          | 3.16                          | 0.2528                               |

由图 3 和表 3 可以看出,陡坎移动时间-距离



曲线与线性函数拟合程度较好,拟合函数的斜率代表陡坎移动的速度;两工况对应于原型的陡坎移动速度差值在合理范围之内。

按照重力相似准则,过堤流量比尺为  $\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$ 。根据模型的过堤流量分别计算相应原型的过堤流量,二者差别应当在合理范围内。图 4 为两组验证试验工况过堤流量随时间变化曲线。

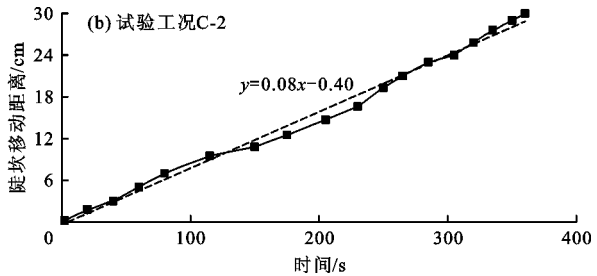


图 3 两组验证试验工况陡坎移动距离随时间变化曲线

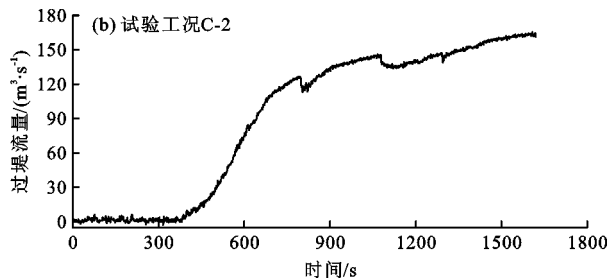
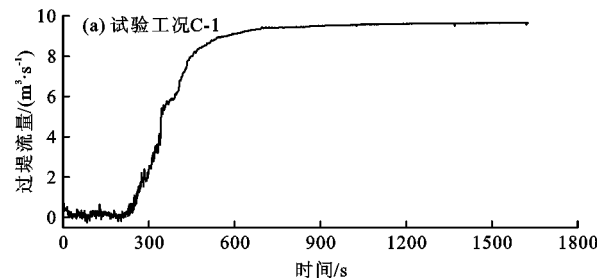


图 4 两组验证试验工况过堤流量随时间变化曲线

由图 4 可以看出,两组试验流量在 1 600 s 后均趋于稳定,水流在溃口发展稳定后满足质量守恒定律,入口流量与出口流量之差等于过堤流量,则过堤流量计算公式为:

$$Q_d = Q_i - Q_o \tag{1}$$

式中: $Q_d$  为稳定状态过堤流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_i$  为河道入口流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_o$  为稳定状态巴歇尔槽处的河道出口流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

取两组验证试验最后稳定阶段的过堤流量参数进行比较,结果见表 4。

表 4 两组验证试验工况流量参数比较

| 工况<br>编号 | 过堤流量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $\lambda_L$ | $\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$ | 对应原型过堤流<br>量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----------|-----------------------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| C-1      | 9.66                                          | 30          | 4929.50                       | 13.23                                             |
| C-2      | 159.40                                        | 10          | 316.23                        | 14.00                                             |

由表 4 可以看出,两组试验中对应原型过堤流量的差值在合理范围之内。

按照重力相似准则,过堤水流流速比尺  $\lambda_v =$

$\lambda_L^{1/2}$ 。两组验证试验工况过堤水流流速随时间变化曲线如图 5 所示,取两组试验稳定后的水流流速参数进行比较,结果见表 5。

表 5 两组验证试验工况流速参数比较

| 工况<br>编号 | 过堤水流流速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $\lambda_R$ | $\lambda_v = \lambda_L^{1/2}$ | 对应原型过堤水<br>流流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----------|-----------------------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| C-1      | 0.11                                          | 30          | 5.48                          | 0.6028                                            |
| C-2      | 0.18                                          | 10          | 3.16                          | 0.5688                                            |

由图 5 和表 5 可以看出,两组验证试验中对应原型过堤流速的差值在合理范围之内。

通过两组试验的堤顶蚀退速率、过堤流量和过堤水流流速对比,可以认为采用比尺  $\lambda_L = 30$  进行溃堤试验是可行的,试验具有可重复性,试验结果可以较好地体现凌汛期溃口破坏规律。

3 溃口的破坏形式

冰凌条件的溃口发展可分为两个阶段:垂向发展阶段和横向展宽阶段。垂向发展阶段的主要破坏方式



为沿程侵蚀、陡坎冲刷和冰凌挤压,横向展宽阶段的主要破坏方式为冰凌挤压和坍塌破坏。冰凌挤压现象是冰凌条件与洪水条件的破坏方式中最主要的不同点。

沿程侵蚀的主要表现形式为表面剥蚀和堤顶蚀退。表面剥蚀的主要原因为堤体表面局部抗冲性较弱或在水流浸泡作用下强度减弱的筑堤材料小团粒被水流剥离,表面剥蚀使得堤体表面呈坑坑洼洼状。堤顶和堤坡的坡度不同,两者之间的过渡点(堤肩)被水流冲刷成弧形,漫顶水流与堤体表面基本平行,此过程称为堤顶蚀退。陡坎是指堤坡由原来的连续斜面转变为

一个垂直面和一个水平面构成的阶梯状坡面,侵蚀和坍塌交替发展导致陡坎不断向上游发展的过程即为陡坎侵蚀过程。筑堤材料抗拉强度低于破坏主动应力时会产生坍塌破坏。溃口在垂向发展阶段时,提前冰凌堆积影响过流,河道内的水流对冰凌产生推力,造成冰凌挤压现象,此时冰块尺寸大于溃口宽度。待溃口发展至横向展宽阶段初期,冰凌尺寸稍大于溃口宽度,过堤流速增大,带动冰凌通过溃口,溃口处土体被过堤冰凌挤压刮蹭,带走部分土体,促进溃口发展。图 6 和 7 分别为垂向发展阶段和横向展宽阶段的破坏现象。

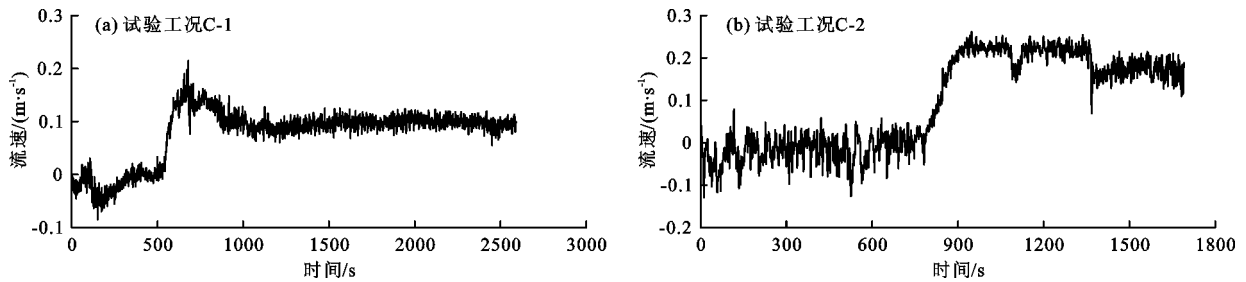


图 5 两组验证试验工况过堤水流流速随时间变化曲线

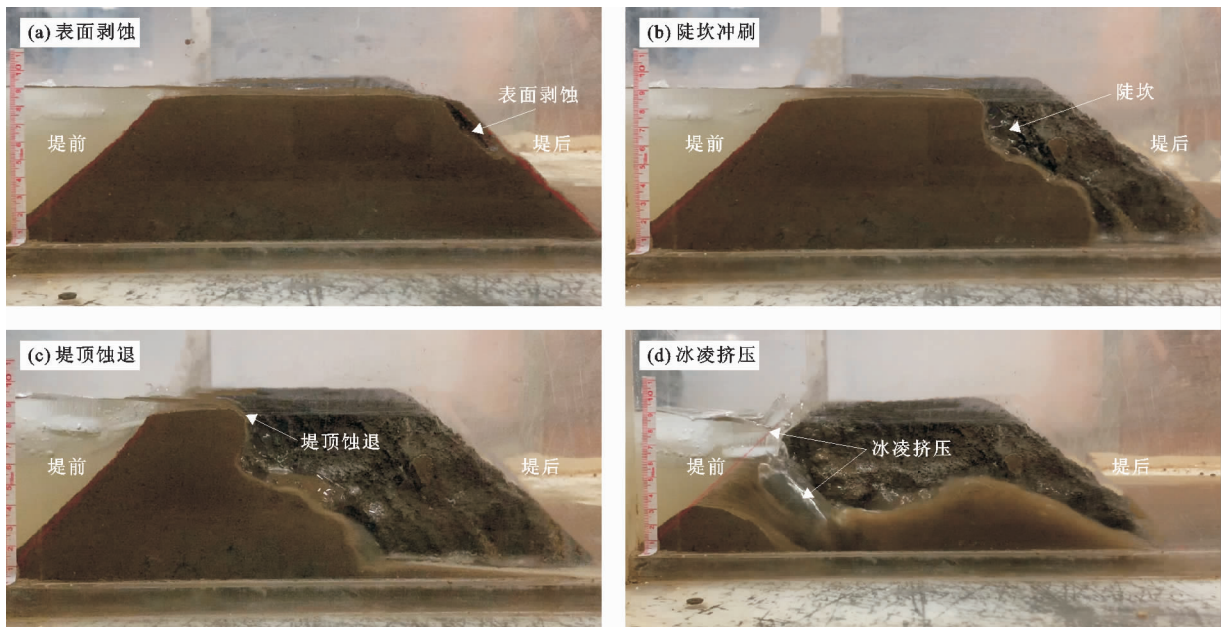


图 6 垂向发展阶段堤体的破坏方式

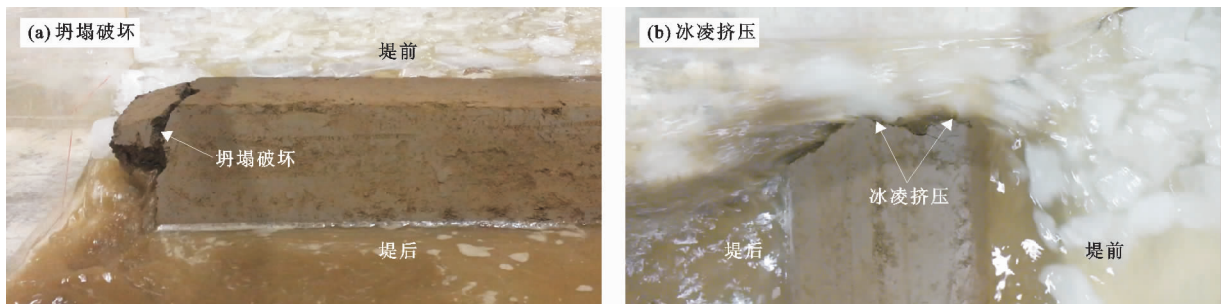


图 7 横向展宽阶段堤体的破坏方式

4 溃口的发展过程

黏性土堤的溃口发展过程主要包括垂向发展阶段和横向展宽阶段,分别针对这两个阶段的试验结果进行分析,可得到黏性土堤的漫顶溃口破坏规律。在垂向发展阶段,堤顶蚀退距离随时间的变化是衡量溃口发展快慢的主要指标,因此,将堤顶蚀退距离的变化规律作为这一阶段的主要研究内容。试验中通过采集特征断面的实时高程数据,分析堤顶蚀退距离的变化特性。以 A-1 工况为例,不同时刻的堤顶蚀退距离如图 8 所示。

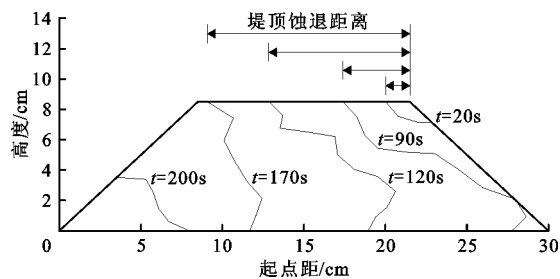


图 8 不同时刻堤顶蚀退距离计算示意图

4.1 溃口垂向发展阶段

4.1.1 冰凌条件下的试验结果分析 在入口流量或堤体含水率发生变化时,溃口的垂向发展过程会有所差别,主要差别在于溃口堤顶蚀退的速率不同。图 9 为冰凌条件下入口流量和堤体含水率变化对堤顶蚀退的影响。

由图 9(a)可以看出,在含水率为 15% 的情况下,入口流量越大,溃口堤顶蚀退所需的时间越短,垂向发

展过程越快。如试验组次 B-2、B-3,当入口流量分别为 22、30 m<sup>3</sup>/h 时,溃口堤顶蚀退持续时间分别为 198 s、97 s,而当入口流量减小到 14 m<sup>3</sup>/h 时,堤顶蚀退持续时间为 388 s,与前两组差异较大。这主要是因为入口流量越大,水流在流经堤体时作用在堤体上的剪切力越大,导致溃口的堤顶蚀退持续时间明显减小。

由图 9(b)可以看出,当含水率为 12% 和 15% 时,堤顶蚀退时长分别为 105 和 195 s,蚀退速度分别为 0.12 和 0.07 cm/s;而当含水率达到 17% 时,堤顶蚀退时长为 1 170 s,堤顶蚀退速率减小至 0.01 cm/s。这说明在冰凌条件下,堤身含水率的改变会对溃口垂向发展有明显的影

响,含水率越高,溃口垂向发展越缓慢。

4.1.2 冰凌条件与洪水条件试验结果对比 两种条件下溃口垂向发展过程的主要区别在于堤顶蚀退的快慢,表 6 列出了洪水和冰凌条件下各工况的堤顶蚀退时长。图 10 和 11 分别为不同流量和含水率时两种条件下堤顶蚀退距离随时间的变化曲线。

表 6 洪水与冰凌条件下各工况堤顶蚀退时长对比

| 试验工况                       |                        | 洪水<br>条件/s | 冰凌<br>条件/s | 增大<br>数值/s | 增大<br>率/% |
|----------------------------|------------------------|------------|------------|------------|-----------|
| 含水率<br>15%                 | 流量 14m <sup>3</sup> /h | 175        | 388        | 213        | 122       |
|                            | 流量 22m <sup>3</sup> /h | 120        | 198        | 78         | 65        |
|                            | 流量 30m <sup>3</sup> /h | 88         | 97         | 9          | 10        |
| 流量<br>22 m <sup>3</sup> /h | 含水率 12%                | 81         | 105        | 24         | 30        |
|                            | 含水率 15%                | 120        | 198        | 78         | 65        |
|                            | 含水率 17%                | 503        | 1170       | 667        | 133       |

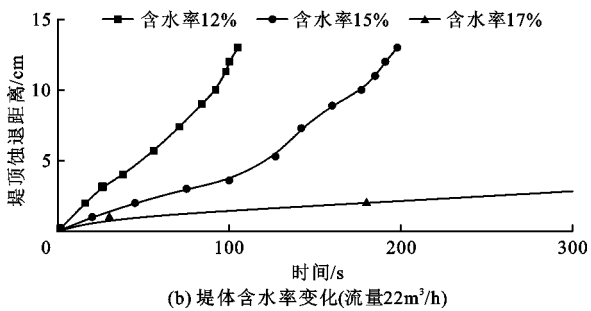
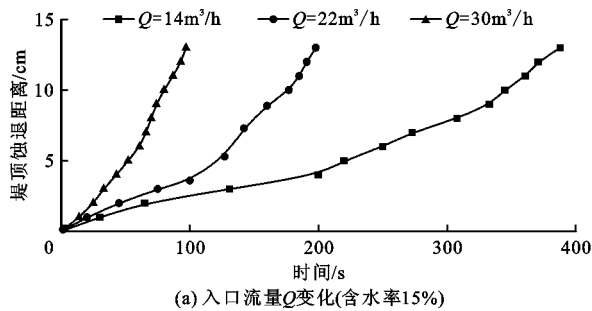


图 9 冰凌条件下入口流量和堤体含水率变化对堤顶蚀退的影响

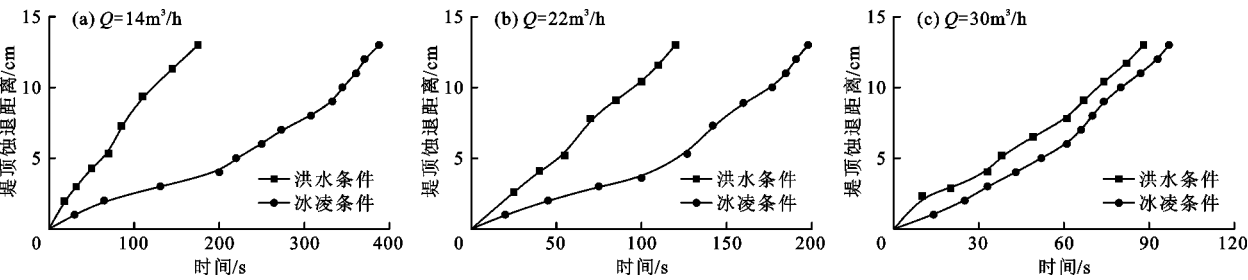


图 10 洪水和冰凌条件下不同流量时堤顶蚀退距离随时间变化曲线(含水率 15%)

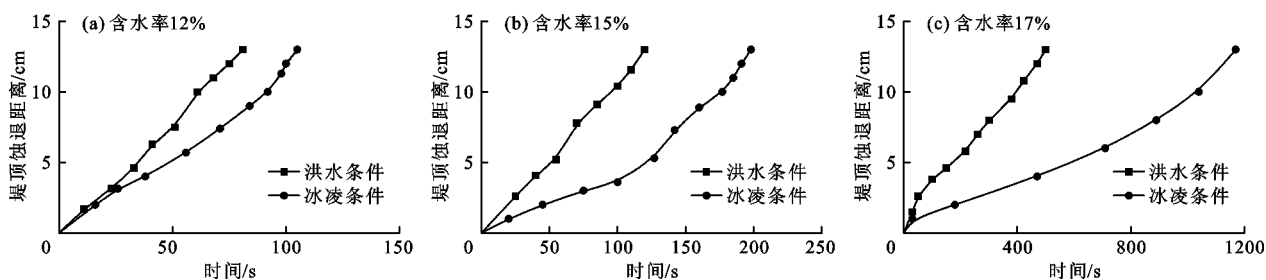


图 11 洪水和冰凌条件下不同含水率时堤顶蚀退距离随时间变化曲线(流量  $22\text{ m}^3/\text{h}$ )

结合表 6 及图 10、11 可以看出,冰凌条件下溃口堤顶蚀退时长较洪水条件下有不同程度的增大,流量越小,增幅越大,增幅最大的是流量  $14\text{ m}^3/\text{h}$  左右的组次,增加了 213 s,增大率为 122%。当入口流量相同时,堤顶蚀退时长随着含水率的增大而增大,增幅最大的组次为含水率 17% 左右的组次,增加了 667 s,增加率为 133%。3 种含水率的增大率依次为 30%、65% 和 133%。这说明在溃口发展初期,即垂向发展过程中,冰凌的存在可以延缓溃口的发展,流量越小、堤身含水率越高,延缓作用越明显。这为凌汛期的溃堤抢险工作提供了较为充分的反应和准备时间,因此在凌汛期要着重加强前期的巡查工作,有利于早发现风险隐患,尽早做出准备。

## 4.2 溃口横向展宽过程

4.2.1 冰凌条件下的试验结果分析 冰凌条件下黏性土堤的溃口横向展宽过程一般是在垂向发展过程即将结束的时候开始。横向展宽过程包括水流对水下部分侧边的冲刷以及水上部分土体的坍塌,还包括冰块过堤时对堤身两侧的挤压刮擦和撞击作用,这个作用出现的时间并不规律,主要出现在溃口横向展宽的初始阶段,此时的溃口宽度还不足以使冰块顺畅通过溃口,冰块会在过堤水流的推动下裹挟土体,对溃口展宽起推动作用。流量越大,水流流速越大,水流携带冰块撞击土体时的初始动能就越大。图 12 为冰凌条件下入口流量和堤体含水率变化对溃口横向展宽的影响。

由图 12(a) 可以看出,在溃口横向展宽阶段的前期,溃口发展速率明显较大,曲线的坡度较陡,在横向展宽阶段的中后期,溃口发展曲线坡度放缓,慢慢趋于稳定。主要原因是前期水流主流向转变为沿溃口方向,此时溃口宽度较窄,过堤水流和过堤冰块与溃口两侧的土体有较大的接触面积,此时水流裹挟冰块和土体的能力最强,因此在溃口的横向展宽阶段前期溃口发展速率明显要比中后期快。影响水流裹挟冰块和土体的能力的一个重要因素是河道内

的水流流量大小,在前 600 s 内,水流流量达到  $30\text{ m}^3/\text{h}$  的组次溃堤速率是  $14\text{ m}^3/\text{h}$  组次的 1.5 倍,流量越大,冰块在通过溃口内侧时对堤身的刮蹭作用就越强,这也是前中期展宽速率差别如此明显的原因之一。

如图 12(b) 所示,试验组次 B-4、B-2、B-5 含水率分别为 12%、15% 和 17% 左右,由于 B-5 试验组次达到溃口展宽稳定所需的时间最短,为 500 s,因此以前 500 s 为例。可以看出,随着堤身含水率增长,溃口的平均展宽速度降低,分别为 4.72、3.52、2.71 cm/min,由此说明冰凌条件下堤身含水率越大,溃口的横向展宽速度越慢。并且随着含水率的增大,溃口的坍塌次数明显降低,依次为 11 次、6 次和 3 次,这是因为当含水率升高时,土体颗粒之间的黏结力增大,土的抗剪强度增大,越不容易产生坍塌失稳的现象。

4.2.2 冰凌条件与洪水条件试验结果对比 洪水条件和冰凌条件下的横向展宽过程大致相同,均为先经历一段快速展宽过程,随后进入缓慢展宽阶段。不同点在于冰凌条件下溃口的最终展宽宽度更大,溃口展宽速度更快。根据试验的快速展宽阶段实际情况,本节对两种条件下的所有试验组次进行对比时,均采用溃口横向展宽阶段前 500 s 时的溃口平均展宽速度作为衡量指标。表 7 列出了洪水条件与冰凌条件下各工况的溃口展宽数据,图 13 和 14 分别为两种试验条件下不同流量和不同含水率时溃口宽度随时间变化曲线图。

由表 7 及图 13、14 各工况的溃口横向展宽对比结果可知,冰凌条件下各工况的快速展宽速度和溃口最终宽度大于洪水条件。当含水率不变时,流量越大,快速展宽阶段的展宽速度增大倍数越小。在流量不变的情况下,含水率越高,快速展宽速度增大倍数越大。这说明冰凌条件下溃口的横向展宽比洪水条件剧烈,这也为该阶段的溃口抢险工作增加了难度。

表 7 洪水与冰凌条件下各工况溃口展宽情况对比

| 试验工况                       |                            | 前 500 s 平均展宽速度/( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) |      |      | 溃口最终宽度/cm |       |      |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|------|------|-----------|-------|------|
|                            |                            | 洪水条件                                                 | 冰凌条件 | 增大倍数 | 洪水条件      | 冰凌条件  | 增大数值 |
| 含水率 15%                    | 流量 $14\text{m}^3/\text{h}$ | 2.44                                                 | 2.89 | 1.18 | 24.21     | 26.46 | 2.25 |
|                            | 流量 $22\text{m}^3/\text{h}$ | 2.99                                                 | 3.43 | 1.15 | 32.15     | 34.82 | 2.67 |
|                            | 流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ | 3.58                                                 | 3.83 | 1.07 | 39.23     | 40.14 | 0.91 |
| 流量 $22\text{m}^3/\text{h}$ | 含水率 12%                    | 4.34                                                 | 4.56 | 1.05 | 40.04     | 41.83 | 1.79 |
|                            | 含水率 15%                    | 2.99                                                 | 3.43 | 1.15 | 32.15     | 34.82 | 2.67 |
|                            | 含水率 17%                    | 2.37                                                 | 2.78 | 1.17 | 22.36     | 24.11 | 1.75 |

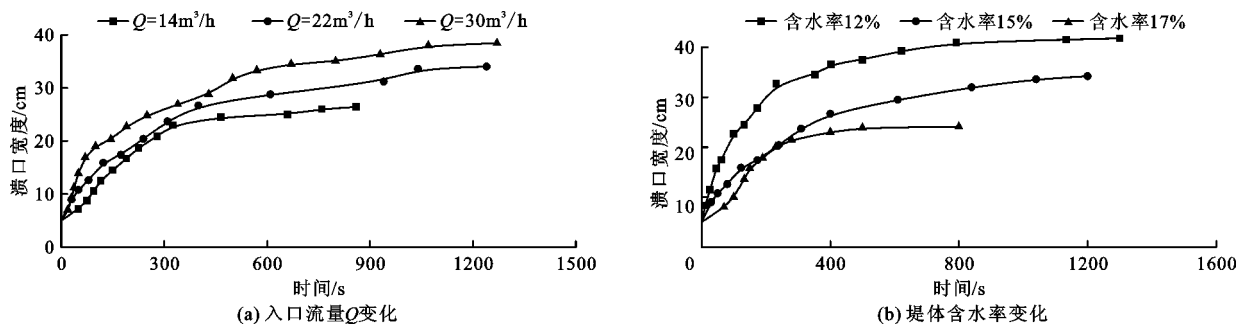


图 12 冰凌条件下入口流量和堤体含水率变化对溃口横向展宽的影响

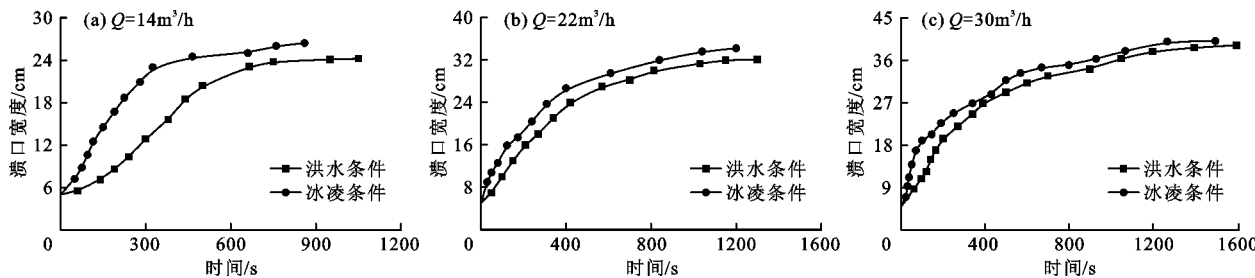


图 13 洪水和冰凌条件下不同流量时溃口宽度随时间变化曲线

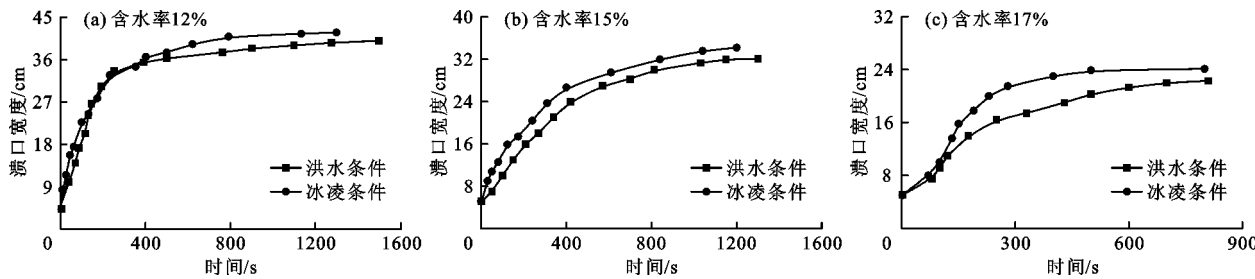


图 14 洪水和冰凌条件下不同含水率时溃口宽度随时间变化曲线

5 堤前水位变化过程

5.1 冰凌条件下不同流量和不同含水率的影响

水位变化的 3 个阶段特征明显,先经历平缓上升阶段,随后进入水位急剧下降阶段,在溃堤后期水位逐渐下降至稳定水位。图 15 为冰凌条件下入口流量和堤体含水率的变化对堤前水位的影响。

由图 15 可以看出,河道流量越大,水位峰值和

最终稳定水位越高,水位变化幅度越小,同时水位降低时长也依次缩短,水位变化更加剧烈。堤身含水率越低,水位峰值和水位变化幅度就越高,但最终稳定水位会降低,同时水位降低时长也依次缩短。

5.2 冰凌条件与洪水条件试验结果对比

冰凌条件下的水位变化规律和洪水条件下的水位变化规律基本相同,表 8 列出了洪水条件与冰凌条件下各工况的堤前水位变化数据,图 16 和 17 为



两种试验条件下不同流量和不同堤体含水率时堤前 水位随时间变化曲线。

表 8 洪水与冰凌条件下各工况堤前水位变化对比

| 试验工况                   |                        | 水位峰值/mm |       |      | 水位变化幅度/mm |       |      | 水位变化速度/(mm·min <sup>-1</sup> ) |       |       |
|------------------------|------------------------|---------|-------|------|-----------|-------|------|--------------------------------|-------|-------|
|                        |                        | 洪水条件    | 冰凌条件  | 增大数值 | 洪水条件      | 冰凌条件  | 增大数值 | 洪水条件                           | 冰凌条件  | 增大数值  |
| 含水率 15%                | 流量 14m <sup>3</sup> /h | 88.21   | 91.82 | 3.61 | 50.04     | 51.37 | 1.33 | 6.28                           | 4.11  | -2.17 |
|                        | 流量 22m <sup>3</sup> /h | 86.43   | 95.40 | 8.67 | 37.89     | 47.02 | 9.13 | 6.84                           | 5.03  | -1.81 |
|                        | 流量 30m <sup>3</sup> /h | 91.71   | 99.06 | 7.35 | 25.98     | 33.99 | 8.01 | 7.87                           | 6.80  | -1.07 |
| 流量 22m <sup>3</sup> /h | 含水率 12%                | 87.92   | 92.34 | 4.42 | 49.16     | 52.46 | 3.30 | 12.94                          | 11.53 | -1.41 |
|                        | 含水率 15%                | 86.43   | 95.40 | 8.67 | 37.89     | 47.02 | 9.13 | 6.84                           | 5.03  | -1.81 |
|                        | 含水率 17%                | 91.91   | 98.49 | 6.58 | 39.24     | 44.46 | 5.22 | 3.74                           | 3.41  | -0.33 |

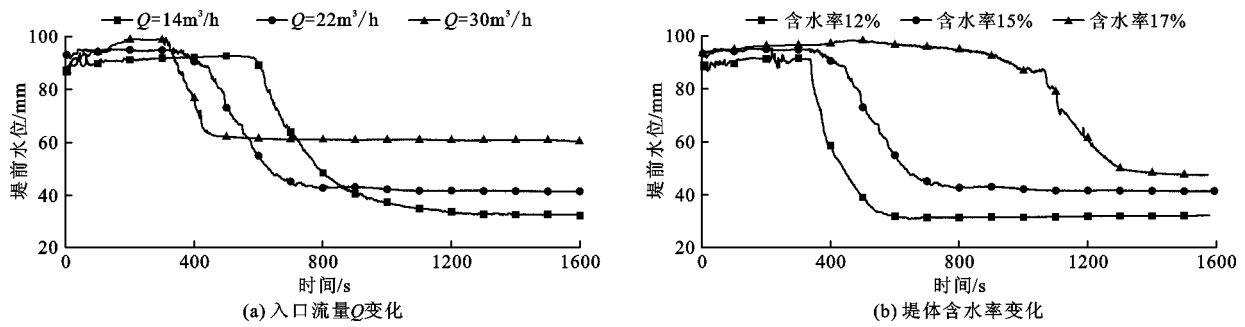


图 15 冰凌条件下入口流量和堤体含水率变化对堤前水位的影响

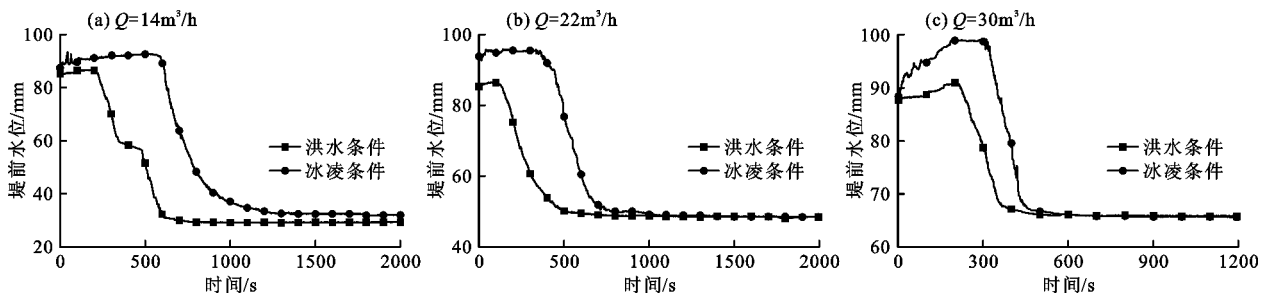


图 16 洪水和冰凌条件下不同流量时堤前水位随时间变化曲线

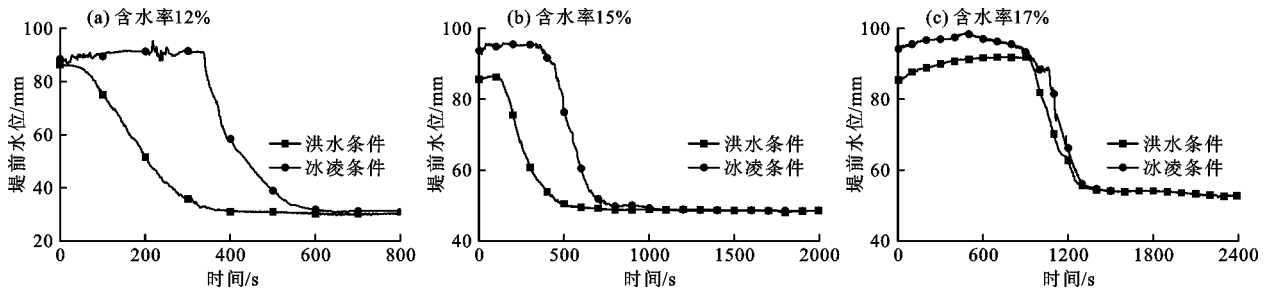


图 17 洪水和冰凌条件下不同含水率时堤前水位随时间变化曲线

由表 8 及图 16、17 各工况堤前水位变化对比可知,冰凌条件下各工况的水位峰值要高于洪水条件,这主要是由于冰块在堤前堆积使得水位壅高造成的,说明在预防冰凌条件下的溃堤时,要特别注意河道中的水位壅高隐患。冰凌条件下的堤前水位变化速度整体要慢于洪水条件,但水位变化幅度却大于

洪水条件,因此冰凌条件下的堤防溃决是一个持续时间长且溃决流量大的过程,对堤后的破坏程度要大于洪水条件,增加了溃堤抢险的难度。

## 6 结论与讨论

本文建立了室内大型玻璃水槽模型,模拟了凌

汛期黏性土堤的溃决过程。根据物理模型试验结果,得出了以下结论:

(1)冰凌条件下溃堤时的溃口破坏形式可以划分为沿程侵蚀、陡坎冲刷、冰凌挤压和坍塌破坏。

(2)堤身含水率和河道流量对溃口发展和堤前水位变化有显著的影响。堤身含水率越小,溃口变化速率越快,堤前水位变化幅度越大;河道流量越大,溃口变化速率越快,堤前水位变化幅度越小。

(3)与洪水条件相比,冰凌条件下冰凌壅塞会导致溃堤初期溃口发展较为缓慢,但在溃堤中、后期,溃口的展宽速度和最终溃口宽度都大于洪水条件。并且在整个溃堤过程中,冰凌条件下的水位峰值高于洪水条件。

(4)凌汛期要着重加强前期的堤防巡查工作,这有利于及时发现风险隐患,尽早做出准备。发生溃堤险情进行抢险时,要尽量抓紧前期时间,如果前期未能较好地控制溃口发展,中、后期溃堤所造成的危害要远远大于洪水期。

本次试验仍然有一些不足之处:

(1)试验目的为探究溃口破坏形式、溃口发展规律和堤前水位变化,对过堤水流流量、流速变化、最终溃口断面、堤后洪水演进等结果没有进行深入探究。

(2)本文结论基于室内物理模型试验数据得到,缺乏现场实测资料和数值模拟结果支撑。

#### 参考文献:

- [1] 山东黄河河务局. 凌汛与防凌[M]. 郑州:黄河水利出版社,2015.
- [2] 颜亦琪,陶新,刘吉峰,等. 2000年以来黄河宁蒙河段开河期冰凌洪水特点分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(3):176-180.
- [3] 陈冬伶,王兵,范旻昊. 黄河宁蒙河段2009-2010年度凌情特点分析[J]. 人民黄河,2012,34(1):22-24.
- [4] 杨开林. 河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J]. 水利学报,2018,49(1):81-91.
- [5] 贺新娟. 宁夏黄河河段冲淤演变与洪水、凌汛影响分析[D]. 天津:天津大学,2015.
- [6] 张建云,李云,宣国祥,等. 不同粘性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学(E辑:技术科学),2009,39(11):1881-1886.
- [7] 朱勇辉,VISSER P J,VRIJLING J K,等. 堤坝溃决试验研究[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(2):150-157.
- [8] 段文刚,杨文俊,王思莹,等. 无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.
- [9] 张大伟,黄金池,何晓燕. 无黏性均质土石坝漫顶溃决试验研究[J]. 水科学进展,2011,22(2):222-228.
- [10] HANSON G J, COOK K R, HUNT S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments [J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(5): 1783-1794.
- [11] HUNT S L, HANSON G J, COOK K R, et al. Breach widening observations from earthen embankment tests[J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(3): 1115-1120.
- [12] POWLEDGE G R, RALSTON D C, MILLER P, et al. Mechanics of overflow erosion on embankments. I: Research activities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(8): 1040-1055.
- [13] POWLEDGE G R, RALSTON D C, MILLER P, et al. Mechanics of overflow erosion on embankments. II: Hydraulic and design considerations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(8): 1056-1075.
- [14] 罗优,陈立,郝婕好,等. 均质土石坝不同因素与漫顶破坏模式的内在联系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014,47(5):610-614.
- [15] 石国钰,叶敏,唐佩文. 堤防分洪溃口变化特征初探[J]. 人民长江,1997,28(1):30-32.
- [16] DHIMAN S, PATRA K C. Experimental study of embankment breach based on its construction parameters [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2017, 1-26.
- [17] FU Hui, GUO Xinlei, KASHANI A H, et al. Experimental study of real ice accumulation on channel hydraulics upstream of inverted siphons [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 176: 103087.
- [18] FU Hui, GUO Xinlei, YANG Kailin, et al. Ice accumulation and thickness distribution before inverted siphon [J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(1): 61-67.
- [19] PETERS M, CLARK S P, DOW K, et al. Flow characteristics beneath a simulated partial ice cover: Effects of ice and bed roughness[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, 32(1): 21-29.
- [20] 钟启明,陈生水,梅世昂. 均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J]. 工程科学与技术,2019,51(5):25-32.
- [21] 李云,王晓刚,宣国祥,等. 均质土坝漫顶溃坝模型相似准则研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2010,25(2):270-276.