

水利工程堤防溃口应急抢险技术创新与应用实践

董嘉晨 吴晨鹏 何春霖

江苏省防汛防旱抢险中心（江苏省防汛抢险训练中心） 江苏 南京 210000

【摘要】：堤防溃口险情危及防洪安全，传统应急抢险存时效滞后、协同缺位、装备适配度偏低等短板。依托堤防工程险情演化规律，从技术迭代、体系构建、装备研制三维度展开探究，迭代升级溃口封堵与防渗工艺，搭建应急信息互通及跨区域资源调配架构，研制复杂工况专属装备并推动实战化推广，技术迭代增强封堵防渗效能，协同架构压缩应急响应周期，定制化装备夯实现场作业保障，为堤防溃口抢险构筑高效方案，驱动防洪减灾能力实现跃升。

【关键词】：堤防溃口；应急抢险；协同调度；定制化装备；防渗技术

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.069

引言

洪涝灾害高发背景下，堤防作为防洪关键防护屏障，溃口险情应对成效直接关联生命财产安全，传统抢险模式受制于技术滞后、协同梗阻、装备局限，已难以匹配复杂水文地质工况的抢险诉求。依托防灾减灾现代化理念，瞄准堤防溃口应急处置核心痛点难点，以技术革新、体系重构和装备升级探寻高效抢险路径，既能为一线抢险提供可落地方案，又能为防洪减灾体系健全输送创新活力，助力堤防应急抢险实现精准化协同化智能化转型。

1 水利工程堤防溃口应急抢险工作背景与行业发展现状

我国洪涝灾害屡有发生，堤防作为防洪减灾体系的核心屏障，溃口险情直接危及民众生命财产安全及区域社会平稳运行。现阶段全国5级及以上江河堤防逾32万km，多数堤防历经多代培修，地质工况复杂且隐蔽隐患遍布，溃口险情多经管涌、崩岸等前期险情逐步演变成^[1]。行业实践中，传统溃口抢险仍倚重人海式作业模式，虽在“98”洪水后积淀实战经验，现有技术却对溃口水流消能、抛投料防流失的专项适配性欠缺，专用装备的成套化与智能化赋能水平有限，尚未建立全链条协同调度机制，难以契合复杂水文工况下的快速抢险诉求，对整体应急处置效能提升形成掣肘。

2 水利工程堤防溃口应急抢险技术与实操环节的现存短板

2.1 传统抢险技术的响应时效与工况适配性局限

传统堤防溃口抢险技术常依赖沙袋堆砌、土石回填等手段，这类技术对物资储备规模和人力配置需求严苛，从物资调运至现场布设往往耗时甚久，难以契合溃口险情快速处置的时效诉求。溃口区域水流湍急且冲击力强，传统抛投料极易被水流卷走流失，既造成物资无谓损耗，还会错失关键封堵窗口期。部分堤防处于二元地层分布区域，堤基砂层与黏土覆盖层交错排布，传统防渗技术无法适配这类复杂地质条件，难以有效切断渗透路径，甚至会因施工失当恶化险情态势。传统处置

手段针对漫顶溃决、管涌诱发溃口等不同险情缺乏针对性策略，在高水头、大流量极端水文状况下，抢险成效也会大幅受限。

2.2 应急抢险现场多主体协同联动的衔接不足

堤防溃口抢险关联水利、应急、交通、属地政府等多类主体，各主体职责划分虽已有框架性界定，现场实操却极易出现衔接断层。各单位间信息传递仍依托传统通讯途径，尚未搭建统一的实时共享平台，防汛指挥部门因此难以实时掌握溃口发展态势、物料储备基数与人员调配进程。跨区域抢险队伍的进场路径规划、作业区域划定常因信息滞后产生矛盾，部分区域抢险力量重复投入的同时，关键点位却存在人力缺口。抢险现场的物资调拨、设备支援未建立有效协同机制，专业队伍与地方群众抢险力量的协作缺乏标准化规程，极易引发操作衔接疏漏，既削弱整体抢险实效，还易诱发二次安全风险。

2.3 专用抢险装备的场景适配能力与普及程度欠缺

现有堤防溃口抢险装备的场景适配能力存在显著缺陷，面向溃口前沿高流速水流的专用消能装备存量匮乏，难以有效削弱水流对封堵物料的冲击，部分装备体型笨重、机动性能欠佳，无法快速运抵偏远堤段或复杂地貌区域，在泥泞堤坡等场地作业空间大幅受限。专用抢险装备普及覆盖面较窄，基层防汛单位多依赖常规工程机械，既缺乏植入式减压管、锁结式高聚物防渗墙等新型装备，又存在操作人员专业技能培训缺失问题，即便配备先进装备也难以发挥应有作用^[2]。装备运维体系同样不完善，部分高精尖设备因长期搁置或管护失当，险情骤发时无法正常投用，进而制约了抢险作业的精准度与时效水平。

3 水利工程堤防溃口应急抢险技术创新方向与实施路径

3.1 时效优先型核心抢险技术的升级革新

3.1.1 溃口封堵技术优化

堤防溃口处高流速、大冲力的水流特性，要求从消能减冲和模块化封堵双维度对传统技术实施优化，可引入主动式桩轮耦合消能装置，在溃口前沿构筑消能屏障，依托桩体锚固与转

轮转动分解水流冲击力,降低抛投料流失比例,为后续封堵作业创造稳定施工条件。应推广组装式透水消能四面体构件的应用,此类构件可提前预制储备,险情突发时快速吊运至现场拼接,既能够实现初步挡水,又可借助透水结构进一步消解水流动能,破解传统土石封堵物料易被冲失的行业难题。配套便携式液压激振锤植桩装备,该装备自重轻、机动性佳,可快速在溃口两侧植入防护桩,形成封堵作业的基础围挡,取代传统人工植桩的低效作业模式。需建立差异化封堵方案,针对管涌诱发溃口、漫顶溃决等不同险情类型,匹配对应消能构件与封堵流程,管涌型溃口可先以非钻植入式减压管降低堤基水压,再开展封堵作业,提升技术适配性与整体抢险实效。

3.1.2 快速防渗材料研发应用

快速防渗材料研发应用需聚焦“微创修复、快速成墙、精准适配”核心诉求,打破传统材料施工耗时久、适配度低的局限,推广锁结式高聚物超薄防渗墙技术,借助高频振动压入成槽板,板体锁扣无缝衔接,灌注高聚物浆料快速固化形成2厘米厚防渗墙,精准处置堤身堤基渗漏通道,施工对堤防结构扰动微弱,契合险情现场微创修复诉求^[3]。开发适配多样地质的高聚物注浆浆料,面向二元结构堤基砂黏交错层段,调配高渗透注浆浆料,依托DPM随钻监测技术定位隐患,借助长距离保压混合注浆设备精准灌注,达成快速堵渗效果,改良注浆工艺并配套冲放式保压水囊,化解高聚物浆料堵塞管路难题,保障浆料均匀扩散,推进防渗材料预制化量产,预先储备各类模块及耗材,险情突发时直接调拨,显著压缩准备耗时,夯实溃口抢险防渗防护屏障。

3.2 全链条协同化应急调度体系的搭建完善

3.2.1 应急信息实时共享机制构建

堤防溃口应急信息实时共享机制的搭建,需依托堤防工程全寿命周期数据库打造统一信息平台,整合堤防基础工情、水文气象、险情监测、抢险资源等多维度数据,平台需打通卫星遥感、机载LiDAR、船载立体测量等监测设备的数据接口,实现溃口区域地形变化、水流流速、水位涨幅等数据的自动采集与实时上传,接入各抢险主体的物资储备台账、人员调配清单、装备运维状态等信息,消解信息孤岛。应建立标准化信息编码体系,对溃口险情等级、物料类型、队伍资质等信息开展统一标识,保障不同主体间信息传递无偏差,平台需增设移动端信息同步模块,为一线抢险人员配备智能终端,达成现场险情照片、视频的即时回传与指挥指令的精准下达,嵌入险情辨识模型,依托实时数据自动研判溃口发展趋势,为抢险决策提供数据支撑,形成“数据采集-分析研判-指令下达-反馈调整”的闭环信息链路。如图1。



图1 堤防溃口应急信息实时共享与指挥闭环体系

3.2.2 跨区域资源统筹调配模式优化

革新跨区域资源统筹调配范式,应率先构建分级分类物资储备架构,按堤防险段等级与溃口类型划定国、省、市三级储备仓,除常规砂石料外,定点预存组装式透水四面体、锁结式高聚物防渗模块等专用机具,配套搭建物资动态盘查补给机制,确保物资底数明晰、调拨高效。搭建跨区域调度指挥中枢,依托实时险情数据,以大数据算法精准匹配需求与资源分布,针对高流速冲刷、深层渗漏等溃口险情定向调运对应装备耗材。拟定标准化运输预案,明晰运输路径与应急通道,联动交通部门开辟绿色通道,搭建全流程责任溯源与台账管控机制,杜绝物资闲置或重复调拨。组建跨区域机动抢险专班,常态化开展联合演练,强化陌生堤段快速进驻与协同作战能力,保障跨区域资源精准投送、最大化释放效用。

3.3 场景定制化抢险装备的研发与推广应用

3.3.1 复杂工况抢险装备专项研发

堤防溃口抢险面临高流速、复杂地质、泥泞场地等复杂工况,需定向研发专项抢险装备,面向溃口前沿高冲击力水流消能诉求,研发主动式桩轮耦合消能装置,此装置可通过桩体锚固于溃口两侧堤坡,借助转轮转动分解水流冲击力,搭配的组装式透水消能四面体构件采用预制模块化设计,能快速拼接形成临时挡水消能体系,破解传统抛投料易被水流裹挟流失的行业难题。适配二元结构堤基的管涌型溃口,升级非钻植入式减压管装备并优化其便携植入结构,可在不破坏堤身的前提下快速嵌入堤基以实现承压水精准疏导,配套研发应急洗井装备,化解长期运行减压井的淤堵困境,保障汛期减压排水实效。契合偏远泥泞堤段抢险诉求,研发轻型化且高机动性的便携式液压激振锤,将装备重量控制在1.2吨以内并适配小型挖机动力,可快速完成防护桩植入,同步开发移动式瞬变电磁探测仪以实现溃口周边隐患的快速精准定位,为抢险作业提供前期数据支撑,全方位强化装备对复杂工况的适配能力。

3.3.2 新型装备实操培训与普及

新型抢险装备实操培训与普及需搭建分层分类培育体系,保障装备实际效能充分释放。面向基层防汛单位与一线抢险队伍,制定标准化实操培训纲要,覆盖装备原理、组装流程、故障排查等核心板块,重点强化锁结式高聚物防渗墙装备成槽板压入角度把控、注浆压力调控,以及MMS-1型弱磁探测仪测

点布设、信号判读等关键操作实训^[4]。构建“理论+实训+实战”培育模式,依托堤防抢险实训基地复刻溃口、管涌等真实险情场景开展沉浸式操作演练,组建省级技术指导团队深入基层驻点施教。建立装备普及推广机制,优先为重点流域险工险段配置新型装备,配套发放操作手册与视频教程并搭建线上答疑平台,定期回访装备使用成效并提供技术支撑,将操作技能纳入防汛抢险人员考评体系,倒逼操作熟练度提升,推动新型装备从“配齐配足”向“高效善用”转变。

4 水利工程堤防溃口应急抢险创新技术的实践应用与实际效能

4.1 革新技术在典型溃口险情中的应用实效

管涌诱发的堤防溃口处置中,非钻植入式减压管与组装式充水围井组合技术成效突出,可快速降低堤基承压水压力并实现水压力平衡,显著缩减传统沙袋围井的物料与人力投入^[5]。漫顶溃决险情处置时,主动式桩轮耦合消能装置与透水消能四面体搭配,可切实消减水流冲击力并降低抛投料流失概率,为后续封堵筑牢基础;二元地层堤基溃口治理中,锁结式高聚物超薄防渗墙技术可微创修复,2厘米厚防渗墙精准阻断渗漏通道且对堤身扰动极小,已在多圩堤险情处置中缩短防渗工期,保障抢险安全稳定。

4.2 协同调度体系落地后的应急响应能力提升成果

统一应急信息共享平台投用后,已实现堤防溃口险情数据实时流转,防汛指挥机构可同步掌控溃口演变态势、抢险物资存量及人员调度情况,规避信息滞后引发的决策滞后。跨区域

资源统筹调配模式优化,使专用抢险装备与物料能快速定向输送至险情现场,偏远堤段溃口处置中,相关装备物资进场耗时较以往大幅缩减。多主体协同联动流程标准化,疏通了水利、应急、属地政府等单位作业衔接链路,大型溃口抢险时各队伍分工清晰、配合默契,减少重复作业与人力物力无效损耗,整体应急响应协同水平与精准程度实现显著提升。

4.3 定制化装备普及后的抢险作业保障成效

便携式液压激振锤等定制化装备普及后,基层防汛单位于溃口两侧植桩作业效率大幅提升,取代传统人工植桩的低效模式,即便在泥泞堤坡等复杂场地也可快速完成防护桩布设;MMS-1型弱磁探测仪推广,让堤防渗漏通道定位更具精准性,能提前排查溃口隐患,为险情预判提供可靠数据支撑;锁结式高聚物防渗墙装备落地,破解传统防渗技术适配性欠佳难题,在多险段防渗作业中实现快速成墙且防渗效果稳定;新型装备普及还降低抢险作业对人力依赖,缩减一线人员高风险区域作业周期,强化抢险作业安全性与保障性。

5 结语

堤防溃口应急抢险是防洪减灾的核心环节,传统处置模式的固有局限已无法匹配复杂险情需求,从技术迭代、体系重构、装备升级维度推进革新,可推动溃口封堵与防渗作业实现效能升级,应急信息共享与跨区域资源调配体系能提升多主体联动实效,定制化抢险装备的研发普及则夯实了现场作业安全防护基础。系列创新实践印证了方案实操性,既为各类典型溃口险情处置提供应对方案,也为防洪减灾体系完善提供实践依据,助力堤防应急抢险向精准化、协同化方向稳步转型。

参考文献:

- [1] 肖克龙.水利工程堤防水闸深基坑抢险方法探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(26):202-204.
- [2] 高艺.堤防逐渐溃决水流特性及溃口封堵模拟研究[D].长春工程学院,2024.
- [3] 刘斌,力刚,陈家强,等.堤防安全及抢险技术的分析与应用[J].江苏水利,2023,(09):66-69.
- [4] 邬爱清,吴庆华.堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备[J].岩土工程学报,2022,44(07):1310-1328.
- [5] 王寒珠,丁在源.水利工程防汛措施与抢险对策研究[J].中国建筑装饰装修,2022,(04):146-147.