

# 堤防安全及抢险技术的分析与应用

刘 斌, 力 刚, 陈家强, 徐立建

(江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:**了解堤防的溃决机理和抢险手段对堤防安全运行有重要意义,将堤防的破坏形式分成漫顶破坏、渗透破坏和边坡失稳,分析了不同堤防破坏形式的机理,按溃口形成前后的顺序梳理了堤防的破坏形式及对应的抢护流程。结合实际案例分析了现代堤防抢险手段和传统手段的区别,对现有堤防的抢险方法进行了总结和展望。

**关键词:**堤防溃决; 应急抢险; 管涌; 堤防堵口

中图分类号:TV871

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)09-0066-0004

## Analysis and application of levee safety and rescue technology

LIU Bin, LI Gang, CHEN Jiaqiang, XU Lijian

(Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Understanding the breach mechanism of dikes and emergency response measures is of great significance for the safe operation of dikes. The failure modes of dikes are divided into three categories: overtopping failure, seepage failure, and slope instability. The mechanisms of dike failure are analyzed and the failure modes of dikes and the corresponding emergency response processes are sorted out according to the time of breach formation. Then the differences between modern dike emergency response measures and traditional measures are analyzed based on real cases. Finally, a summary and outlook of the existing dike emergency response methods are put forward.

**Key words:** dike breach; emergency response; piping; dike plugging

## 1 研究背景

堤防是有效的防汛手段之一,部分堤防由于早期缺少正规设计和勘察,存在地基条件差、堤身填筑质量差、堤后坑塘多等诸多问题<sup>[1]</sup>,高水位时会出现背水坡渗水、散浸、管涌等情况,需要进行抢险加固。传统的堤防抢险手段存在一定局限性,例如采用修建子堤的方式对抗漫顶的洪水,由于水位上涨

过快,子堤修建速度较慢,可能漫过堤顶产生破坏<sup>[2]</sup>。堤防抢险大都在暴雨、洪水等极端条件下进行,抢险情况复杂,时间紧迫。虽遵循“前堵后排”的抢险法则,但仍会由于“前堵”时进水口位置难以确定,材料易被冲走;“后排”时管涌面积过大,发展过快,堤防疏于管理或内部存在由生物活动等原因产生的空洞等各种因素,可能导致传统抢险方法失效。为方便抢险人员了解堤防险情的发展机理,抢

收稿日期:2023-05-24

基金项目:江苏省水利科技项目(2021026)

作者简介:刘斌(1979—),男,高级工程师,本科,主要从事水利工程管理工作。E-mail:jsydsd1997@163.com

险时能够迅速判断情况并提出抢险措施,促进极端条件下堤防应急抢险技术的发展,本文拟对溃堤产生的原因、现有的抢险技术、搭配使用的抢险物资和当前堤防抢险可能存在的问题进行分析与讨论,以期对未来堤防安全和抢险技术的发展提供参考。

## 2 堤防破坏形式

堤防溃决的具体原因繁多,若从破坏形式上分类,堤防破坏可以被总结为漫顶破坏、渗透破坏及边坡失稳。

### 2.1 漫顶破坏

漫顶破坏指漫顶水流和堤顶发生强烈的相互作用形成溃口,水流会沿溃口不断冲刷垂直和侧向的土体结构,土体持续被水流冲刷带走,直到水流动力不足或者边界抗冲能力增强才停止的现象<sup>[3]</sup>。堤防作为土石材料堆筑物,主要利用土石颗粒之间的摩擦和黏聚力来维持自身稳定,属于散粒体结构,抗冲能力差。真实溃口的发展过程难以监测,资料甚少,试验是研究其发展过程的主要方式。

堤防和土石坝的漫顶形式类似,造成漫顶的成因主要有洪水超堤防防洪标准或河床存在杂物或土堆积导致水位壅高,凌峰流量有明显增加,壅高水位和异物撞击,会对堤防造成损伤<sup>[4]</sup>。堤防的沉降作用导致堤顶高程下降,或施工时存在问题导致原本堤防的高程不足。上游坡冲刷破坏导致高程降低,如上游堤脚处土质较差,淘刷问题严重,最终堤脚被掏空,上游坡呈直角,容易塌落导致高程降低最终漫顶<sup>[5]</sup>。堤防沿岸存在违规建筑导致河道排洪能力下降,持续的高水位和高流速容易造成堤顶缺口,最终导致溃堤<sup>[6]</sup>。

### 2.2 渗透破坏

渗透破坏指在水和土骨架的相互作用下,细颗粒被带出后导致的土体破坏变形,渗透破坏可以被分成4种类型。

(1)管涌:细粒土受水流作用,沿着土骨架移动或者带出。

(2)流土:在渗流作用下,土体的颗粒群体同时流失。该现象在黏性土和非黏性土中都会发生。

(3)接触冲刷:渗流沿着两种不同介质的接触面流动时,将其中的细颗粒带走。

(4)接触流土:当渗流垂直于两种不同介质的接触面流动时,将其中一层的细颗粒带入另一层,而产生反滤层的淤塞现象。

为探究渗透破坏的发展规律,相关学者进行了

一系列试验研究。刘杰等<sup>[7]</sup>将复杂堤基分为均匀、双层和三层,对其进行渗流模拟试验,全试验结果表明堤基的渗透破坏主要集中在堤基最上部,即堤基和堤身接触带附近,且堤基的抗渗强度由堤基材料本身的抗渗强度确定。张炫等<sup>[8]</sup>通过渗透破坏试验,发现管涌主要发生在渗透性较强的粉砂中,流土则主要发生在轻粉质砂壤土中。梁越等<sup>[9]</sup>通过试验探究了孔隙率、细粒含量和渗透破坏的关系,结果表明对于相同孔隙率的情况下,细粒含量越少渗透性越高,细粒含量越多,土层越均匀,抵抗渗透破坏的能力越强。

管涌的首要成因为地层因素,若地基存在强透水砂层,则容易发生管涌。防渗措施缺乏管理、失效也是发生管涌险情的重要成因,如减压井淤堵、防渗墙运行效果差等。人类或生物活动导致坝内产生空洞,坝后覆盖层厚度减小同样会导致管涌破坏的可能性增加。由于管涌破坏产生的跌窝及坝身沉降,也会导致堤防高程降低,进而诱发漫顶破坏。

### 2.3 边坡失稳

堤防边坡失稳指边坡某一滑动面的滑动力大于抗滑力时,边坡沿滑动面滑动的现象,边坡失稳和上游水位、土体结构、土体性质等各方面有关。王四巍等<sup>[10]</sup>采用多因素正交直观敏感性分析方法对影响边坡失稳的因素进行了研究,并将各因素的影响力从高到低进行排列。边坡失稳的计算方法已经相对成熟,传统的边坡稳定计算方法有极限平衡法和极限分析法。随着有限元和有限差分理论的成熟,强度折减法和超载系数法等结合了弹塑性有限元分析的边坡稳定计算方法,在商业软件中得到了广泛使用。

因此,可以将边坡失稳的成因归纳为:土壤湿化导致其基质吸力降低,强度降低;容重的增加导致滑动力增加,最终诱发滑坡;水位骤降后,堤内产生向堤外的渗流场,加之坡脚受损,容易造成边坡失稳。

## 3 堤防抢险技术及应用

### 3.1 堤防溃口前的抢险

水位持续上涨时首先应考虑用沙袋等抢险物资加高堤防,因为堤防漫顶后水流将在薄弱处产生“初始溃口”,可能导致溃口逐渐扩大最终垮堤。堤防产生漫顶或者溃口前,堤后仍有一定资源调度能力,若能及时采取措施遏制险情发生,则可节省大

量物资,保证抢险人员安全并保障堤后设施财产。此时堤防仍具有挡水功能,当出现堤防渗透破坏的趋势时,采取的抢险原则为“前堵后导,抢早抢小”。上游边坡漏洞若不能及时发现,则会丧失抢在漏洞发展前堵口的机会,故在极端条件下快速检测上游漏洞位置,采用有效的堵口方法是漫顶前抢险的关键。

### 3.1.1 堤防渗漏检测技术

在缺少堤防检测的专业设备时,可采用观察上游水面是否存在冒泡、漩涡或投入泡沫塑料、稻谷糠壳、木屑碎末等易漂浮物并观察其运动趋势的方法来判断渗漏位置<sup>[11]</sup>。在水流较湍急的情况下,观察法容易失效。当漩涡发展到明显可见时,也代表着渗漏具有相当规模,在堤防抢险时容易错失先机。但随着科技的进步,堤防渗漏检测技术也得到了较大发展。目前常用的堤防渗漏检测方法有高密度电法、地震法、电磁法、示踪法以及人工水下探测法等,这些方法具有探测速度快、精确度高以及抗干扰能力强等优势,但仍存在一定局限性<sup>[12]</sup>。

考虑到单一物探方法存在的局限性以及环境不确定因素造成的多解性,近年国内外学者尝试将多种物探方法结合互补,使综合物探技术得到快速发展。董延朋<sup>[13]</sup>采用流场法、高密度电阻率法和多道瞬态面波法的综合勘探方法进行堤防渗漏探测,并结合工程实例得出综合这几种物探方法能够更加直观准确反应渗漏情况的结论。刘现锋等<sup>[14]</sup>采用地质雷达法、高密度电法和面波法等综合物探方法,得出不同方法之间可以互相补充的结论。沈添耀等<sup>[15]</sup>采用高密度电法和综合示踪法进行了堤防渗漏通道的探测,探测效率高,准确性强。综上所述可以看出,现代物探水平的精确度较高但专业性强,需要专业人员以及相应软件才能进行渗漏分析。

### 3.1.2 堤防渗漏抢堵技术

堤防渗透破坏引起的渗漏,其抢险分为“前堵”和“后导”两部分,两者同时进行,相辅相成。有效的前堵措施可以降低漏洞内流速,延缓渗透破坏的进程,相比于“后导”,“前堵”是从根本上遏制渗透破坏的措施。当漏水点已被及时探明且位置较浅时,传统的漏洞抢护手段如采用棉被、棉絮、草捆、土工编织袋等软性膨胀材料进行堵漏,仍具有价格低廉、材料易得及抢护较为有效的优势。当进水口位置仅能大致确定且渗漏较小时,可以采用软帘盖堵法,使用河堤附近的芦苇、柳枝、土工布等作为软垫铺盖在洞口,后坠以石块、土袋等重物压实并抛

投黏性土以达到闭气的作用。

实际抢险时情况复杂,进水口的形式多样,分布随机,会出现某一坝段有多个进水口或者进水口位于深水处的现象<sup>[16]</sup>。前者使用传统方法难以全部封堵,后者则会因为堵塞后接触面渗透坡降激增导致难以闭气。化学封堵技术是一种可以对一定范围内的堤防同时进行堵漏和加固的手段,化学浆材改性技术的产生,又使得该技术得到了持续发展<sup>[17]</sup>。其抢护方法为:根据下游渗水确定渗透破坏发生的大概位置,于堤顶钻孔后注浆并在出口处进行防渗处理,浆液短时间内就会和堤内水发生反应,形成固体颗粒填充管涌通道或者空洞以达到直接堵塞漏洞通道的目的。用于极端条件堤防抢险的化学封堵设备具有高度集成性,可将系统整体布置于货车内,由2~4名人员操作,险情发生时可及时赶到堤防险出处。

“后导”即在堤后进行导渗工作,包括疏导堤防漏洞内水压力以及抑制细土颗粒被带出。渗水在出水口易被发现,无需借助专业设备,派专人及时巡查即可。出水口的存在代表着渗漏通道的形成,也是判断漏洞大概位置的重要依据,发现后应及时反应,尽早对上游进行排查。出水口导渗时不得使用密闭材料,因为出水口无法排水时,渗流通道内的水压力也不会消散,容易形成新的出水口,在其他点位发生险情。对于渗漏破坏产生出水口的传统抢险手段为开挖导渗沟以降低渗漏通道内水压力,通过布置反滤围井、反滤层压盖、养水盆或堤后戗台等延缓堤内土料的流失,这些方法容易出现物料短缺、时效性低的问题。此后提出的一体式组装式充水围井及植入式减压井降压排水系统,即一体式组装式充水围井,可直接利用洪水对胶管进行填充,无需远距离运送大量物料,且围井的组装简单快捷,两者联合使用可提高管涌抢险效率并实时监控险情的发展。

### 3.2 堤防溃口后的抢险

当确定未发生渗透破坏时,可以在背水坡铺设橡胶板、土工膜和防水布等材料以减少漫顶水流对坡面的冲刷。防止漫顶破坏的应急抢险装置由塑料排水盲沟和混凝土帆布两部分组成。在漫顶前,预先在堤顶和下游面分块铺设混凝土帆布并搭设塑料排水盲沟,向混凝土帆布浇水后,帆布将在短时间内硬化成型进而保护坡面免受冲刷破坏。南京水利科学研究院也对堤防临时护坡进行了研究,提出了三层应急泄洪防护垫法,防护垫具有耐久性,



可多次使用,大幅降低抢修成本,提高抢险效率。

堵口抢险技术是应对溃口的主要措施,传统的堵口手段为抛沉沙袋石料、铅丝网石笼、钢木组合构架、沉车沉船等。极端条件下的传统堵口抢险手段,在缺少针对性抢险方法时,需要耗费大量人力物力,造成较大经济损失。堵口抢险还需要专业人员进行现场指导,当险情发生于堤防密集的区域时,抢险人员无法及时分析并采取相应措施。

堵口方法、堵口材料的生产及其结构的抗冲稳定性是堵口成功的关键。朱太顺<sup>[18]</sup>根据1998年长江大水总结了堵口抢险7字方针,即“裹、拦、导、分、堵、排、围”;祝杰等<sup>[19]</sup>则分析了该方针的普适性。极端条件下的堤防堵口仅靠人力抛投效率过低,须采用大型机械设备投入合理的堵口材料<sup>[20]</sup>。为保证堵口材料的廉价有效,南京水利科学研究院进行了适用于极端气候、可替代块石的新型土壤固化剂和固化石块结构形式的研发,该研究不但可在一定程度上缓解水泥土技术对水泥的依赖性,也为自然资源的合理利用提供了思路。为保证生产的块石具备耐水冲刷和便于施工的特性,分别对立方体试块和工字锁扣型试块进行射流试验,由于后者在冲刷时可以有效传递应力,其抗冲稳定性明显优于前者。

## 4 结 语

总结溃堤机理及极端条件下的抢险技术应用,可得出以下结论。

(1)现代堤防抢险的体系已相对成熟,专业性强,但堤防位置偏僻时,抢险人员难以到达,抢险时缺少专业人员指导也无法调用现代化设备,只能采用传统的方式。现代化设备与传统方法之间存在断层,能够由非专业抢险人员操作的简易抢险设备有待开发。

(2)堤防产生渗透破坏时,人工探查上游渗漏点仍是目前最精确高效的方法,适用于极端条件的堤防渗漏检测设备仍需进一步研究。

(3)现场工作人员可能存在经验缺失等各方面的因素,导致误判形式从而耽误险情。应加强现场工作人员的培训,简化操作手册的内容,以保证现场工作人员处置的正确高效。

(4)堵口材料的研发较少,在大型机械无法进场时,堵口抢险的效率偏低,仅靠人力处理溃口的方法效果不明显,溃口抢险的现代化水平有待进一

步提高。

### 参考文献:

- [1] 王世琦. 河道堤防的加高培厚技术探讨[J]. 科技视界, 2014(25):330.
- [2] 王威,黄为,冯忠民. 堤防抢险及对今后建设的建议[J]. 人民长江,1999,30(2):17-20.
- [3] 周建银,姚仕明,王敏,等. 土石坝漫顶溃决及洪水演进研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(2):287-301.
- [4] 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.
- [5] 王亚东,郭恩栋,高霖. 嫩江洪水灾害成因及堤防消险加固措施[J]. 自然灾害学报,2014,23(4):149-154.
- [6] 吕亚兵. 东荆河流域堤防险情成因浅析——以2010年东荆河汛期险情为例[J]. 科技创业家,2014(1):7.
- [7] 刘杰,崔亦昊,谢定松. 江河大堤均匀砂基渗透破坏机理试验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(5):642-645.
- [8] 张炫,何良德,庄宁. 苏北围垦大堤堤基土渗透破坏现场试验研究[J]. 中国水运,2011,11(7):162-164.
- [9] 梁越,曾超,储昊,等. 散粒土渗透破坏判别方法试验研究[J]. 人民长江,2015,46(18):75-79.
- [10] 王四巍,刘海宁,刘汉东. 黄河下游堤防边坡多因素敏感性分析[J]. 人民黄河,2009,31(7):18-19.
- [11] 李鸿均. 某堤防特大漏洞险情成因分析、处置措施及抢险实践[J]. 水利水电技术,2022,53(2):5-9.
- [12] 谭彩,潘展钊,袁明道,等. 综合物探技术在堤防渗漏抢险探测中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):184-188.
- [13] 董延朋,许尚杰. 应用综合物探方法探查坝体渗漏隐患[J]. 工程勘察,2012,40(1):91-94.
- [14] 刘现锋,谢向文,马若龙,等. 综合物探技术在复杂土质堤防隐患探测中的应用[J]. 人民黄河,2020,42(12):41-44.
- [15] 沈添耀,董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):63-69.
- [16] 黄淑阁,王军. 堤防漏洞险情发生规律与抢堵特点研究[J]. 人民黄河,2000,22(5):9-10.
- [17] 葛家良. 化学灌浆技术的发展与展望[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(2):3384-3392.
- [18] 朱太顺. 防汛抢险关键技术研究[J]. 人民黄河,2003,25(3):1-2.
- [19] 祝杰,薛云鹏,赵咸榕. 黄河堤防溃口对策在其他江河的适用性探讨[J]. 人民黄河,2003,25(3):20-21.
- [20] 周景苟,耿明全,黄淑阁. 新型堵口料体力特性试验研究[J]. 人民黄河,2003,25(3):12-13.