

DOI: 10.11779/CJGE202207010

“十三五”国家重点研发计划项目

# 堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备

邬爱清, 吴庆华

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 中国洪涝灾害问题突出, 防洪减灾关系人民生命财产安全和社会稳定。堤防工程是中国防洪体系的重要基础, 具有线路长、隐患多、险情频发等特点。目前, 对堤防抢险仍然以人海战术为主, 抢险效率低, 其主要原因是对堤防险情演化机理认识不够系统, 缺乏高精度的堤防隐患探测抢险技术与装备, 抢险技术装备化程度不高, 难以应用抢险实际。“十三五”国家重点研发计划项目“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”以长江、黄河、松花江等流域典型堤防工程为依托, 以提高堤防工程防御能力为目标, 以提高堤防隐患探测精度和应急抢险效率为关键突破点, 在堤防工程安全分类、典型堤防险情演化机理、堤防工程安全运行风险评估理论、智能化监测与信息化预警、堤防隐患快速探测和应急抢险技术装备等方面取得一系列创新成果, 社会和经济效益显著, 应用前景广阔, 为中国堤防防灾能力提升提供系统技术支撑, 具有重要意义。

**关键词:** 堤防工程; 险情; 隐患; 抢险; 装备

中图分类号: TV64; S26

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)07-1310-19

**作者简介:** 邬爱清(1963—), 工学博士, 正高级工程师(二级), 博士生导师, 享受国务院政府特殊津贴, 兼任国际大坝委员会堤防专业委员会委员, 中国岩石力学与工程学会副理事长, 长江水利委员会科技委委员, 《岩石力学与工程学报》副主编等职。长期从事水工岩土力学理论及工程应用研究。承担了三峡、隔河岩、水布垭、构皮滩、彭水、乌东德、锦屏、白鹤滩、溪洛渡、QBT、长江堤防隐蔽工程等30余个国家重点工程中的岩土力学相关理论与技术研究。主持国家十三五重点专项项目“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”和国家自然科学基金重大仪器研制项目“高坝水库运行岩体水力耦合模拟试验装置”各1项, 国家自然科学基金重点项目1项、面上项目3项及部级研究项目多项。主持编写国标《工程岩体分级标准》(GB/T50218—2014)、行业标准《水利水电工程岩石试验规程》(SL264/T—2020)、行业标准《核电厂工程岩土试验规程》(NB/T10664—2021)及团标《岩体真三轴现场试验规程》等标准5项, 主持编制《水工设计手册》(第2版)基础理论卷岩石力学章, 撰写专著3部, 发表学术论文160余篇, 授权国家发明专利20余项。获国家科技进步二等奖3项(1项排名第一), 省部级一等(特等)奖9项(5项排名第1)。E-mail: wuaq@mail.crsri.cn。



## Evolution mechanism of dike risks, quick detection of hidden dangers, and technical equipments of emergency rescues

WU Ai-qing, WU Qing-hua

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The flood disasters are severe and frequent in China, and affect the safety of people's lives and property and social stability. The dike engineering is an important foundation of China's flood control system, which is characterized by long lines, many hidden dangers and frequent dangerous situations. At present, the dike rescue is still dominated by the huge-crowd strategy, and the rescue efficiency is low due to the fact that the evolution mechanism of the dike risks isn't yet understood systematically, the high-precision detection and rescue technology of hidden dangers in the dike and the equipments are insufficient, and the degree of technical equipments for emergency rescues isn't high. Therefore, the National Key R & D Program of China “Evolution mechanism of dike risks, quick detection of hidden dangers, and technical

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC1502600)

收稿日期: 2022-03-05

equipments of emergency rescues” was carried out in the Yangtze River basin, the Yellow River basin, and the Songhua River basin etc., in order to improve the detection precision for hidden dangers in the dike and the efficiency of emergency rescues, aiming to promote the defense capability of the dike engineering. Many innovative results have been achieved in the fields of safety classification of dike engineering, evolution mechanism of dangers of typical dikes, risk assessment of safe operation of dike engineering, intelligent monitoring and early warning, quick detection of hidden dangers and technical equipments of emergency rescues, and so on, with remarkable social and economic benefits, broad application prospects and great significance.

**Key words:** dike engineering; dike risk; dike hidden danger; rescue; equipment

## 0 引言

为提升国家防灾减灾救灾能力,落实国家对防灾减灾救灾工作重大部署,“十三五”期间,由科技部等部门研究设立了国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项计划。2018年3月,“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”(2017YFC1502600)项目立项,为“重大水旱灾害监测预警与防范”方向。该项目由长江水利委员会长江科学院牵头承担,水利部水利水电规划设计总院、长江勘测规划设计研究有限责任公司、中国水利水电科学研究院、郑州大学、河海大学、黄河水利委员会河南黄河河务局、黑龙江省水利水电勘测设计研究院、长江水利委员会水文局和中国水电基础局有限公司共10家单位参与。项目围绕堤防险情演化与致溃机理,堤防工程信息化安全管理、隐患探测和险情应急抢险修复等问题,从2018年1月至2021年6月,通过近3年半联合研究,在堤防险情演化机理、堤防工程安全风险评价方法、堤防隐患探测与应急抢险技术装备研发等方面取得突破,系统提升了中国堤防工程抵御洪涝灾害的科技进步。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果,以及成果的应用情况等作简要介绍。

## 1 背景及研究现状

中国洪涝灾害问题突出,防灾减灾关系人民生命财产安全、社会稳定与可持续发展。堤防工程是中国防洪减灾体系的重要组成部分,是抵御洪水的重要安全屏障。据2010—2012年第一次全国水利普查,中国堤防总长度41.3679万km,其中5级及以上堤防27.5495万km,5级以下堤防13.8184万km<sup>[1]</sup>。截至2019年,全国已建成5级及以上江河堤防32.0万km<sup>[2]</sup>。中国的堤防多数是经历代培修加固而成,年代久远,地质条件复杂,受人类和动植物活动影响频繁,服役过程中不可避免会产生隐患和险情,致灾影响重大<sup>[3]</sup>。

堤防险情多与渗透破坏有关,目前还未完全掌握

各类管涌险情发生发展至溃堤的演化机制,对险情危害工程安全的条件和程度认识不清,已有成果尚缺乏代表性和系统性。在崩岸方面,主要集中在崩岸影响因素研究,对发生崩岸险情的内在机制和演化规律未能很好揭示。在接触冲刷方面,主要围绕土层结合面的接触冲刷问题,很少涉及穿堤建筑物的接触冲刷破坏。漫顶溃决与超标准洪水控制直接相关,其机理有待深入。鉴于此,亟需加强对堤防工程险情发生发展机制的研究,特别是有关险情致溃条件和致溃机制,为堤防险情识别、判断、评估及应急处置提供理论依据。

在堤防工程安全评估方面,国外围绕堤防失效模式、水文水力条件、后果评估等多个维度开展了相关研究,研究手段由确定性方法向随机分析和复杂性系统理论转变。国内针对堤防工程这种高度不确定性系统的工程安全评估和致灾风险分析方法还很欠缺,导致对险情的判断仍以经验和定性为主。随着各类监测设备与遥感等新技术的发展,为获取堤防安全运行实时数据提供了新的技术手段,研究基于实时监测数据的堤防动态安全评估和安全控制标准已成为发展趋势<sup>[4]</sup>。

中国防洪保障体系方面的研究有待进一步发展和完善。近年来,中国在水雨情数据的自动测报、远程传输和洪水预报等方面已取得重大进步,已成为水情预报和防洪会商的重要平台。如何在此基础上,进一步实现基于堤防工程全寿命周期数据库构建条件下的集监测、评估、识别与预警于一体的堤防工程综合安全管理系统,是提高堤防服役保障能力的重要发展方向。

堤防工程线路长,隐患多,且具有低可探特点。现有探测手段针对性不强,精度不足。为突破堤防隐患探测的发展瓶颈,需从探测理论、装备及探测策略等方面进一步开展攻关研究,提高堤防隐患探测的精度和探测效率。

在堤防险情处置和抢险技术方面,自“98”洪水后,中国在堤防险情处置及抢险技术方面已积累了重要经验<sup>[5-9]</sup>。针对当今堤防的抢险仍主要依赖传统技术和人海战术影响抢险时效问题,研发新型组装便携式、

成套式快速应急抢险及精准修复技术与装备, 提高应急抢险效率, 是堤防应急抢险面临的突出瓶颈。

为破解中国堤防工程安全运行与应急抢险中的系列关键问题, “十三五”国家重点研发计划在重大自然灾害监测预警与防范”专项中设立了本研究项目, 以集中全国重要力量开展系统研究和示范, 本文简要介绍项目研究成果。

## 2 研究目标、关键问题及主要研究内容

### 2.1 研究目标

针对中国堤防工程建设特点和防洪减灾战略要求, 以长江、黄河、松花江等重点流域堤防工程为依托, 在系统梳理各类堤防险情特征基础上, 揭示堤防管涌、崩岸、接触冲刷及溃决等典型险情演化过程与作用机制, 提出堤防风险识别和安全评估理论; 研究堤防全寿命周期基础数据库构建标准, 建立重点堤防全寿命周期数据库, 研发险情查一评一定一体化安全管理系统; 提出堤防运行安全监测、隐患探测关键技术解决方案, 研发快速高效应急抢险及修复技术和装备, 提高隐患探测精度和应急抢险效率, 提升防汛决策能力和水平, 增强堤防工程防洪安全保障能力, 充实完善“重大水旱灾害监测预警与防范”体系。

### 2.2 关键科学与技术问题

针对中国堤防工程建设现状特点和国家防洪减灾重大战略需求, 基于相关科学技术前沿以及国内外研究现状, 围绕堤防险情演化与致溃机理、堤防工程安全评价与信息化管理、隐患探测和险情应急抢险修复等问题, 从多学科交叉的视角, 凝练出“复杂条件堤防险情演化规律和致溃机理”及“堤防工程风险识别与安全评估”两大关键科学问题, “低可探物理背景下堤防工程隐患探测与识别”“成套装备化堤防应急抢险与修复”和“堤防工程信息化安全管理集成”三项关键技术, 综合运用岩土力学、材料力学、水文学、河流动力学、水力学、安全科学、信息科学及管理等多学科交叉前沿理论, 采用资料调研、多源信息采集、大数据分析、理论分析、监测反馈分析、数值仿真、室内外物理模型试验、现场试验、设备研发制造、系统平台集成等多种手段开展研究。

### 2.3 主要研究内容

针对堤防工程安全运行和险情应急抢险修复领域的重大科学问题和关键技术, 项目拟在以下方面重点开展相关研究工作: 从堤防工程的历史发展过程着眼, 构建其全寿命周期水雨工情基础数据库; 在此基础上, 研究堤防在复杂水文气象、地质、水力边界条件下的险情演化致溃机理; 研发堤防安全评估与风险评价、

监测预警信息化、隐患探测及应急避险等非工程措施新技术新方法; 研发堤防险情的快速高效应急抢险处置技术和装备。

按照研究内容的系统性和关联性, 项目设置 6 个课题分别开展有针对性的研究工作。课题设置及相关承担单位列于表 1。根据项目参与单位各自的技术优势和特点, 相应在上述 6 个课题中交叉协作开展, 分别承担了总计 26 个专题的研究任务。

针对部分单位参与骨干和参与承担多个课题相关内容研究的实际, 项目层面还在按课题要求确定课题负责人外, 对部分单位还设置了单位负责人, 并在项目实施方案中报备项目业务主管部门。这些措施有力保障了本项目的顺利实施。项目在规定的 3 年半时间内全面完成(部分超过)项目任务书预定指标。

表 1 课题设置情况

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	承担单位
1	堤防工程分类、信息构建与信息化管理技术研究	水利部水利水电规划设计总院
2	堤防险情演化机制与致溃机理研究	中国水利水电科学研究院
3	堤防工程安全运行风险评价理论与管理研究	河海大学
4	堤防工程风险识别和监测预警技术研究	郑州大学
5	堤防工程隐患快速探测技术与装备研发	长江勘测规划设计研究有限责任公司
6	堤防险情应急抢险修复技术及装备研发	长江水利委员会长江科学院

## 3 主要创新成果

### 3.1 堤防险情出险特征与基于工程安全的分类方法

#### (1) 堤防险情出险特征

建立了堤防历史险情全要素统计方法, 收集与整理了长江、黄河、松花江、淮河及北江 5 个流域 3664 组堤防险情资料, 揭示了上述流域堤防险情特征与出险规律。图 1 为课题 1 整理的堤防历史险情全要素统计信息内容结构。典型段堤防工程历史险情数据的统计应主要包括堤防基本信息、出险点险情描述、水文信息、堤身形态、堤身地质条件、堤基地质条件、岸坡特征、微地貌和其他相关材料。图 2 给出了长江流域 1998—1999 年长江中下游干堤 3107 个历史险情统计资料。统计结果表明, 长江流域堤防险情以管涌、散浸、脱坡、条崩、跌窝和漏洞为主, 都超过 80 例。

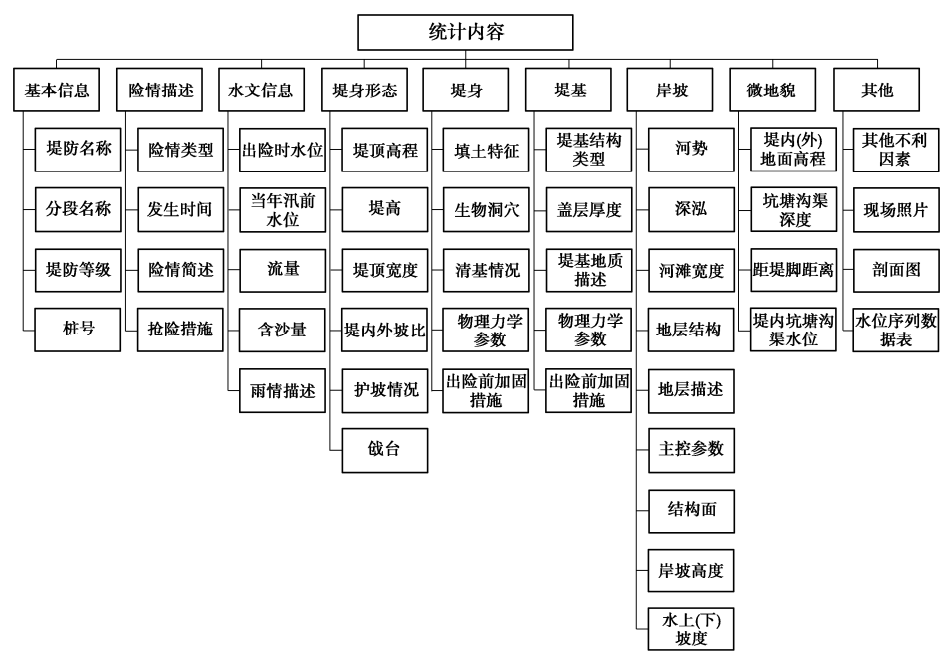


图 1 堤防工程信息统计内容

Fig. 1 Statistical content of information of dike engineering

另外，出险位置统计，堤身、堤基险情各占 46%，岸坡 5%，穿堤建筑物 3%<sup>[10]</sup>。

对流域堤防险情特征统计分析表明，因不同流域堤基地层结构、堤身土特征和堤防形成历史等方面的差异，险情出险特征也表现出相应的差异性。如长江和松花江的堤身险情，在长江流域以管涌、散浸、脱坡及崩岸等险情为主，松花江则以管涌、堤身变形与脱坡等险情为主<sup>[11-14]</sup>。

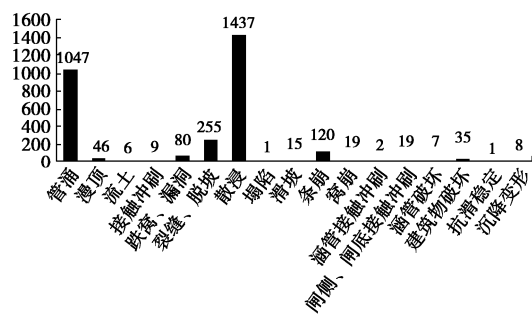


图 2 长江流域堤防险情类型分布直方图

Fig. 2 Histogram of distribution of dike risk types in Yangtze River basin

(2) 基于工程安全性的堤防工程分类方法

以长江流域险情为研究对象，根据不同险情类型及形成原因，识别其主要影响因素，并采用层次分析法确定了各因素的影响权重<sup>[10,15]</sup>。分别研究了堤基管涌和散浸险情、堤身散浸与漏洞险情、脱坡险情及接触冲刷等典型险情。如对 944 个堤基管涌和散浸历史险情研究，识别出堤基地质结构等 7 种影响因素。相应影响因素及权重如图 3 所示。

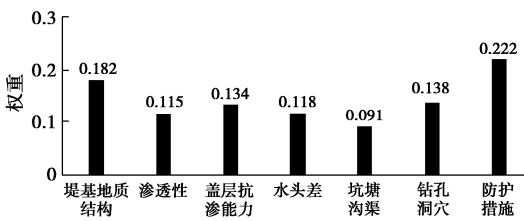


图 3 堤基管涌和散浸险情主控因素及权重

Fig. 3 Main factors and weights of dike piping and seepage risk

在上述成果基础上，建立堤防工程安全分类定量指标。该指标以安全主控因素的影响程度（权重）以及其导致险情的易发性综合确定：

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i a_i \quad (1)$$

式中  $\omega_i$  为第  $i$  项安全主控因素权重； $a_i$  为第  $i$  项主控因素的致险特征值。如果该项安全主控因素致险性存在，则  $a_i$  取 1；如导致险情的几率很低，则  $a_i$  取 0。

通过 32 个堤防不同类型历史险情反演，确定  $P$  值分类区间。综合反演结果，确定指标  $P$  值范围为：当  $P < 0.3$  则为安全（A 类）；当  $0.3 \leq P < 0.6$  则为基本安全（B 类）；当  $P \geq 0.6$  则为不安全（C 类）。

3.2 管涌等四类险情演化规律及影响机制

采用不同尺度物理模型试验，并结合数值模拟等手段，对管涌、崩岸、接触冲刷及堤防溃决等 4 种主要险情的演化规律及致灾影响机制展开研究，在新的试验技术及机制揭示方面取得重要进展。

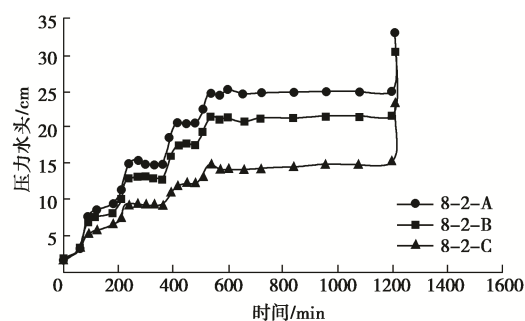
(1) 堤防管涌险情演化机制研究

在细观尺度的管涌险情研究机理方面，以细颗粒

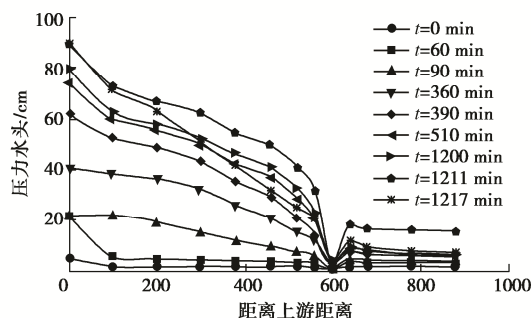
0.25~3 mm, 骨架颗粒 14~15 mm 的多色模拟砂为材料, 创新融合透明模型箱 (15 cm×15 cm×20 cm)、激光发射器、CCD 影像、水晶珠及含荧光孔隙流体等技术, 构建了细观尺度可视化管涌模型试验装置, 研究基于可视化透明土技术与 PFC 颗粒流方法的颗粒渗流精细三维重构及离散介质渗流数值模拟技术, 从颗粒-孔隙尺度揭示了增加颗粒之间摩擦系数、细粒含量和上覆荷载有利于土体内部稳定的规律<sup>[16-19]</sup>。

针对长江流域典型二元结构堤基, 以河流粉细砂和湖底淤泥质黏土为试验模拟材料, 构建中尺度 (模型尺寸 0.6 m×0.3 m×0.3 m) 堤防管涌演化机理研究试验模型, 研究黏土与砂土界面接触关系、管涌口尺寸、距离位置等对管涌发展的影响机制。试验结果表明, 上覆土层密实度和厚度越大、上覆土层与砂层接触越粗糙、距离上游越大时, 管涌险情不易发展; 管涌口径较小, 孔口局部比降较大, 一定条件下更易发生破坏<sup>[20]</sup>。

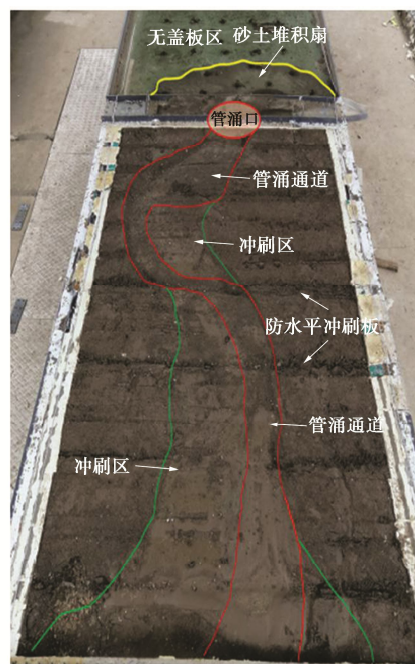
为克服管涌险情发展的边界效应问题, 长江科学院团队在 10 m 级大尺度堤防管涌险情机理试验研究方面取得重要进展<sup>[10]</sup>。在长江科学院沌口试验基地构建了试验尺寸为 12.0 m×3.0 m×2.5 m 的盖板可拆换式堤防管涌物理模拟系统, 并成功进行了堤防二元结构地层管涌险情演化机制全过程模拟试验, 首次在大尺度范围研究和再现了堤防工程管涌险情快速逆向侵蚀—砂层掏空—上覆黏土层或堤基塌陷—致溃过程。试验系统最大试验水头 6 m, 试验渗透水量抽水能力不低于 10 m<sup>3</sup>/h。图 4 为大尺度模型试验测点压力-时间过程及管涌路径展示图。



(a) 管涌口测点压力-时间过程线



(b) 模型中心断面近表层压力-时间过程线



(c) 管涌通道路径图

图 4 大尺度模型测点压力-时间及管涌路径展示图

Fig. 4 Water pressure vs. time of monitoring points and piping path by large-scale physical model

以 2020 年长江干堤岳阳瓦湾段管涌险情为例, 利用历史资料和现场调查为基础, 建立三维渗流有限元模型, 对堤内减压井失效和正常运行条件下的堤内薄层覆盖砂壤土地层水力梯度变化特征进行了数值模拟研究, 讨论了减压井的水力影响范围<sup>[21]</sup>。

## (2) 堤防崩岸机理研究

在长江多个典型历史崩岸特征与形成机制分析研究基础上, 借助长江防洪大模型水沙系统, 构建了静水条件下的水槽式崩岸试验模型和动水条件下的水槽式崩岸试验模型, 研究静水条件单因素及二元结构弯曲河流动水作用对河流崩岸形成影响机制<sup>[22-23]</sup>。

静水条件模型试验尺寸 12.0 m (长)×1.4 m (宽)×0.54 m (深)。主要研究静水条件下河岸坡度、河岸组成、二元结构上下层厚度等单因素变化对河岸崩岸的影响。动水条件弯道型河道试验尺寸为 50 m (长)×9 m (宽)×0.87 m (深)。主要针对二元结构弯曲河岸, 模拟一个水文周期内不同涨、落过程对典型河岸稳定性的影响。经对长江中游典型河段崩岸段近岸表层和下层泥沙取样分析, 基于相似准则, 设计二元结构河岸模型。这里, 上层模型砂  $d_{50}$  取 0.058 mm, 下层模型砂  $d_{50}$  取 0.2 mm。为模拟黏性土性质, 部分工况上层模型砂掺 1% 的环氧树脂。

研究表明, 河岸坡比越大, 上覆黏土与下层砂土的厚度比值越小, 上层土砂性强时, 坡体越不稳定; 崩岸强度在一个水文年周期内呈现一定的规律性, 枯水期崩岸最弱, 涨水期较弱, 洪水期最强, 水位陡降期次强, 水位缓降比陡降期强度明显减弱。弯道型



动水条件的不同模型堤内孔隙压力监测结果表明,水位陡降导致指向河道的渗透坡降显著增加;岸坡孔隙水压力随河流水位下降速率不同,表现出明显的孔隙压力消散滞后性和差异性特点<sup>[10]</sup>。

### (3) 堤防接触冲刷险情形成机制

针对穿堤无压管道和穿堤有压管道两种管道水力条件,自行设计可视化接触冲刷模拟设备,以粉细砂作为主要试验材料,分别采用两种模型试验尺寸条件开展对比性试验,并结合物质点法数值模拟,研究不同的管道水流条件、管道破损尺寸及位置对土体的侵蚀过程及接触冲刷作用机制。模型试验尺寸分别为  $50\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  和  $80\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ <sup>[10,24]</sup>。

在穿堤无压涵管接触冲刷机制方面,提出了险情过程可划分为无明显渗透侵蚀、渗透侵蚀启动及发展、侵蚀加剧和整体破坏等4个阶段,如图5(a)。穿堤无压涵管破损位置对接触冲刷启动和发展的影响不明显,但越靠近下游,越容易引起整体冲刷破坏;在临界水头前,揭示了管内堆积砂土的反滤作用可使接触冲刷险情逐渐停止的过程机制。

在穿堤有压涵管接触冲刷机制方面,提出了险情扩展过程可划分无明显渗透侵蚀、下游出口至孔口逆向侵蚀、孔口周边砂体侵蚀、沿管底向上游逆向侵蚀和整体破坏等5个阶段,如图5(b)。渗漏孔口尺寸越大越容易引起局部侵蚀破坏,但渗漏孔口位置则影响较小。

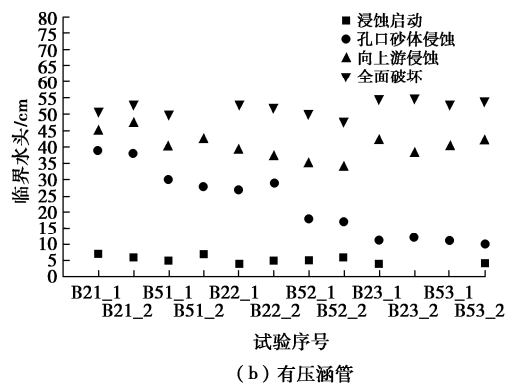
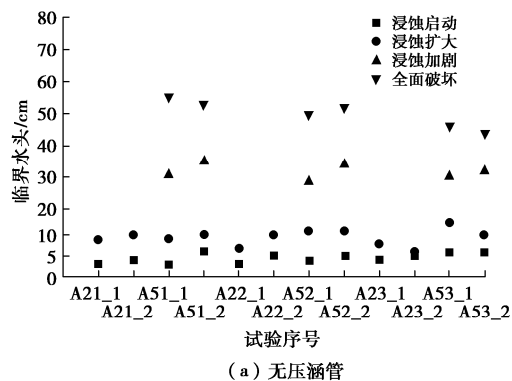


图5 不同阶段临界水头分布图

Fig. 5 Distribution of critical head in different periods

### (3) 堤防溃决机理

中国水科院团队首次建成了室内最大尺度的大型堤防瞬时溃堤和漫顶溃决模型试验与综合监测系统。试验模型河道长  $50\text{ m}$ , 宽  $5\text{ m}$ , 泛洪区面积  $208\text{ m}^2$ 。模型监测系统包括流量监测、水位计监测、流速监测、表面流场、溃口流场及水面形态测量及溃口地形测量等内容。基于建设的模型试验系统,开展了堤防瞬时溃堤和漫顶溃决条件下的模型试验。试验最大流量为  $1.6\text{ m}^3/\text{s}$ <sup>[10,25]</sup>。

基于模型试验,揭示了瞬时溃决溃口段河道及洪泛区水流运动规律以及土堤漫顶溃决溃口演化过程特征。图6,7分别为漫顶溃决试验中某试验组次溃口流量过程特征曲线与不同组次溃口展宽过程特征曲线。

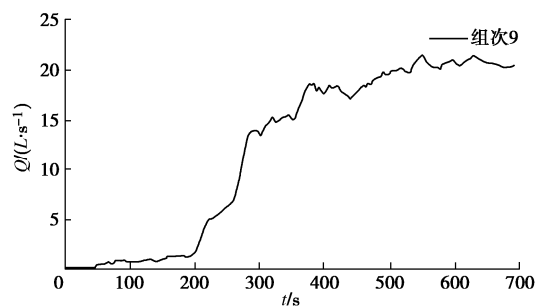


图6 溃口流量过程曲线

Fig. 6 Curve of flux vs. time of dike breach

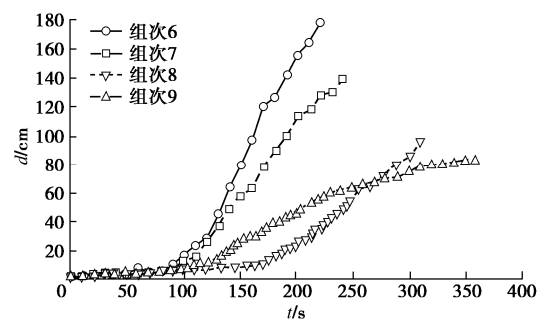


图7 溃口平均展宽过程曲线

Fig. 7 Curves of average width vs. time of dike breach

## 3.3 堤防工程安全运行风险评价理论

### (1) 堤防工程典型失效模式下的概率分析

以随机力学理论为基础,针对堤身与地基土黏结力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、土体弹性模量  $E$ 、堤身与地基土渗透系数  $k$ 、洪水水位  $H$  等参数的变异性,研究边坡失稳、渗透破坏、堤身漫溢破坏等典型失效模式下的概率计算方法,并取得相关理论研究成果<sup>[10,26-29]</sup>。

a) 提出了基于正交试验-神经网络的堤防边坡失效概率计算方法<sup>[26]</sup>。针对堤防失稳非确定性问题的,以土体黏结力  $c$ 、摩擦系数  $f$  和弹性模量为随机变量,以BP神经网络训练模型代替边坡抗滑稳定的功能函数,

结合正交试验和非线性数值模拟获取试验样本点和样本点试验值,利用蒙特卡洛法对随机变量抽样计算,获得边坡抗滑稳定失效概率。

b) 提出了基于 MBHDE (黑洞与差分优化的混合优化算法) 最危险滑面概率计算方法<sup>[28]</sup>。在堤防边坡失效概率计算方法方面,最危险滑面搜索是堤防边坡安全分析的关键,可转化为计算边坡某个给定滑面可靠度及寻找所有滑面可靠度最小值的组合优化问题。提出了改进的黑洞与差分进化的混合优化算法。

c) 提出了堤防工程渗透稳定性概率评价计算方法<sup>[10, 29]</sup>。考虑堤身、堤基土体渗透系数变异性或空间变异性,以渗透系数作为随机场变量,采用转动带法和蒙特卡洛方法研究了典型堤防断面的渗流场分布及渗透稳定可靠性及堤防渗透破坏概率。

d) 堤身漫溢水位风险概率计算<sup>[10]</sup>。当河流水位高于堤防堤顶时认为发生漫溢,堤防必然发生漫溢破坏,此时水文下的水文风险概率为 1.0。当水位低于堤顶高程时,认为一定不会发生漫溢破坏,即认为次风险下的水文风险概率为 0。假设水位频率曲线函数为  $f(h)$ , 则堤防发生漫溢失事的水文风险概率为

$$P_{\text{水文}} = \int_{h_1}^{\infty} f(h) \mathrm{d} h \quad , \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{水文}}$  为堤防漫溢风险概率,  $h_1$  为堤顶高程。

(2) 堤防工程失效综合分析概率计算

影响堤防安全运行的因素众多,这些因素往往存在很强的不确定性和随机性。在进行堤防风险概率求解时,应综合考虑各种失效概率模式对整个系统的风险贡献,这里用系统综合风险概率来描述。河海大学团队提出了利用故障树分析法实现对各失效模式及其失效后对系统的影响进行辨识的研究思想,如图 8<sup>[10]</sup>。故障树中的“逻辑或”运算符的功能相当于多个事件的串联系统。如果系统中任何一个事件的出现,则整个系统会失效。根据串联系统的失效概率计算公式,可获得堤防系统的综合失效概率计算公式。

(3) 堤防工程运行风险评价与控制标准

根据风险的定义,堤防的风险可视为堤防失事的概率与堤防失事造成后果的乘积。根据失事概率和失事后果的综合影响程度,利用风险评价矩阵分析法,提出了基于风险的堤防安全等级划分标准。如表 2,可将堤防安全等级划分为 4 个不同等级,1~4 为蓝色等级,安全风险小,可按日常管理方式进行;5~9 为黄色等级,有一定的安全风险,可在一定的管理和控制条件下运行;10~12 为橙色风险,安全风险较大,需加强管理,详细评价,减少风险;15~20 为红色等级,安全风险大,需采取加固措施或防范风险的措施<sup>[10, 30]</sup>。

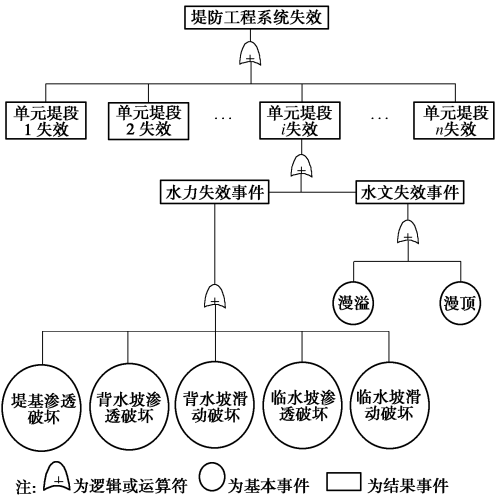


图 8 堤防系统失效的故障树模型

Fig. 8 Fault tree model for failed dike system

项目还提出了基于 ALARP 原则的堤防运行安全风险评价标准。基于 ALARP (最低合理可行性原则) 原则,采用历史统计法和横向对比法,并结合归一化方法和各损失类型的权重建立了考虑堤防失事生命损伤、经济损失、社会与环境损失的堤防工程各级综合风险评价标准,如图 9<sup>[10]</sup>。

表 2 基于风险的堤防安全等级标准

失事概率		失事后果				
概率	定性描述	轻微	一般	轻严重	严重	极其严重
0.001	不可能	1	2	3	4	5
0.010	极少	2	4	6	8	10
0.500	有时	3	6	9	12	15
0.990	非常可能	4	8	12	16	20

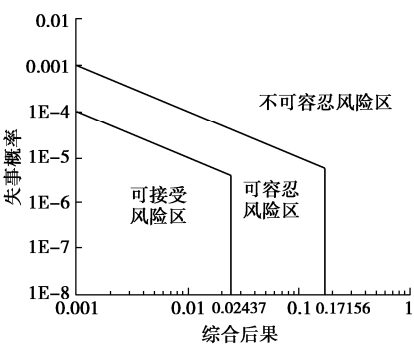


图 9 堤防失事综合损失可接受标准风险曲线

Fig. 9 Acceptable standard risk curve of general loss of dike

(4) 堤防工程风险管理方法研究

建立堤防工程保护区评估指标和灾害损失预测模型。提出一种基于数据场 K-means 聚类的洪涝灾情分级方法,建立了基于场景感知的洪涝灾害应急情景模型,提出了基于多方参与式的堤防风险防控与应急管理体的建议<sup>[30-33]</sup>。

### 3.4 堤防工程智能化监测技术

堤防工程线路长,对其安全性影响涉及方面与因素多。与水利水电枢纽等区域集成性较高的工程相比,监测技术难度相对较大。很难依据传统的监测思想,通过沿线埋设各种监测传感器等技术思路实现。构建堤防工程大范围整体信息采集与重点区域精细化采集相结合的“天-空-地-水”一体化监测与分析体系,是解决堤防工程安全监测瓶颈问题的重要方向。项目以堤防工程地表特征要素等基础工情、水文信息、崩岸险情及工程安全巡检等智能化监测需求,开展有针对性研究工作,取得多项应用性较强的科研成果。

#### (1) 堤防基础工情多源信息快速采集与分析技术

基于卫星遥感技术、无人机航拍技术、激光雷达技术、GPS高精度测绘技术等现代信息采集技术的研究,提出了依据不同的采集手段从不同采集尺度(高空、低空、近地表)和采集范围实现堤防基础工情多源信息的快速综合采集技术策略,研究了相关智能化信息处理技术<sup>[10]</sup>。

以长江荆江河段堤防大尺度监测为例,研究了基于雷达卫星影像的堤防工程监测与信息提取技术。基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术的研究及 Sentinel-1A 雷达卫星多时序数据分析,获取了示范河段堤防一个水文年度的相关地表变形规律<sup>[34]</sup>。

将机载激光测量系统(机载 LiDAR)技术应用于堤防低空及近地表测量。依据 LiDAR 点云数据,形成 1 m 高分辨率 DTM 数值地面模型。提出了基于机载 LiDAR 提取堤防工程特征信息圆环探测法,实现了堤防中心线及断面形态等特征信息的智能提取与检测<sup>[35]</sup>。

#### (2) 基于水雨工情的堤防综合监测体系构建

研发了适用于堤防高危河段的流速、水位及降雨等多要素感知与控制终端设备,突破汛期复杂环境下水雨工情 24 h 实时监测难题,实现堤防险工险段水位、流速、雨量等关键要素的自动实时采集、传输、储存及远程维护<sup>[10]</sup>。

集成三维激光扫描仪、水下多波束测深系统、雷达、GNSS、惯性导航系统、全景相机、测量平台及配套的数据采集软件,形成了堤防水陆一体化的堤防崩岸船载立体测量系统,实现了复杂环境河流崩岸等险情边界探测的高效率和高精度测量,且测试不受气候天气和时间的限制。采集空间分辨率由常规的 1:2000 比例尺 400 m<sup>2</sup>/点提高至 1 m<sup>2</sup>/点以上,观测速度提高达 1 倍以上<sup>[36-38]</sup>。

构建了基于“互联网+”的智能移动终端堤防工

程安全巡检快速采取系统,实现堤防异常情况 & 运行状态评判的快速采集与反馈<sup>[10]</sup>。

### 3.5 堤防工程险情信息构建、识别及预警平台

#### (1) 堤防工程全寿命周期数据库构建

自 20 世纪 90 年代以来,中国堤防工程数据库的研究与开发有了很大的发展。迄今为止,国内各大流域均已建成堤防数据库或基础数据库管理系统。传统的堤防数据库多以关联数据库为主,不能处理非结构化的数据,扩展性能差。云计算技术的发展和大数据的需求为非关联性数据库带来了新的机遇。云计算所处理的海量数据使传统的 RDBMS(关系型数据库)的性能瓶颈日益突出。海量的多格式、多类型、多尺度、跨地域的堤防工程基础数据,形成了一个分布式的、异构的、跨部门的资源类型多样的数据库群。如何将堤防基础大数据与现代网络、云计算、物联网及人工智能等新技术相结合,对其进行科学的挖掘与利用,提高数据服务水平,具有重要的研究价值。

针对堤防工程运行过程中的险情识别与监测预警需求,项目提出了堤防工程全寿命周期基础数据库的构建思想,研究了堤防工程泛结构化大数据特征、堤防工程数据标准化、堤防工程各类结构化数据和非结构化数据动态管理过程中的数据清洗技术以及堤防工程泛结构化数据信息集成与管理技术等内容,并选择长江荆南干堤进行了示范应用研究<sup>[10]</sup>。

在数据标准化研究方面,从堤防工程涉及的工程、水文气象、人文经济、地理、地质、物探、险情及监测数据 8 个方面开展了堤防数据标准化研究。提出了堤防数据标准化包含的 3 部分内容:结构化数据标准化;非结构化数据标准化;数据入库与清洗。通过数据分类、数据编码及表设计 3 个步骤,可对结构化数据进行标准化;利用 JSON 描述文档的关键信息,将带有文档属性的 JSON 连同文档一起存入数据库,可实现非结构化数据标准化;通过统一接入和动态配置的数据接入和清洗方法,提高数据清洗的兼容性。图 10 为堤防工程数据结构分类图<sup>[39]</sup>。

在数据清洗技术研究方面,提出了相似重复数据检测的优化算法及基于流式计算的数据清洗框架<sup>[40-41]</sup>。

#### (2) 堤防工程管涌险情辨识方法

针对堤防工程最典型的管涌险情识别问题,项目承担单位河海大学团队、郑州大学团队及长江科学院团队等研究力量对管涌险情识别分别从不同视角开展了研究工作,并取得了重要进展,分别提出了堤防工程管涌破坏主客观权重安全评价方法,堤防管涌险情深度置信神经网络(DBN)预测模型及基于致溃程度的管涌分类等方法<sup>[10]</sup>。



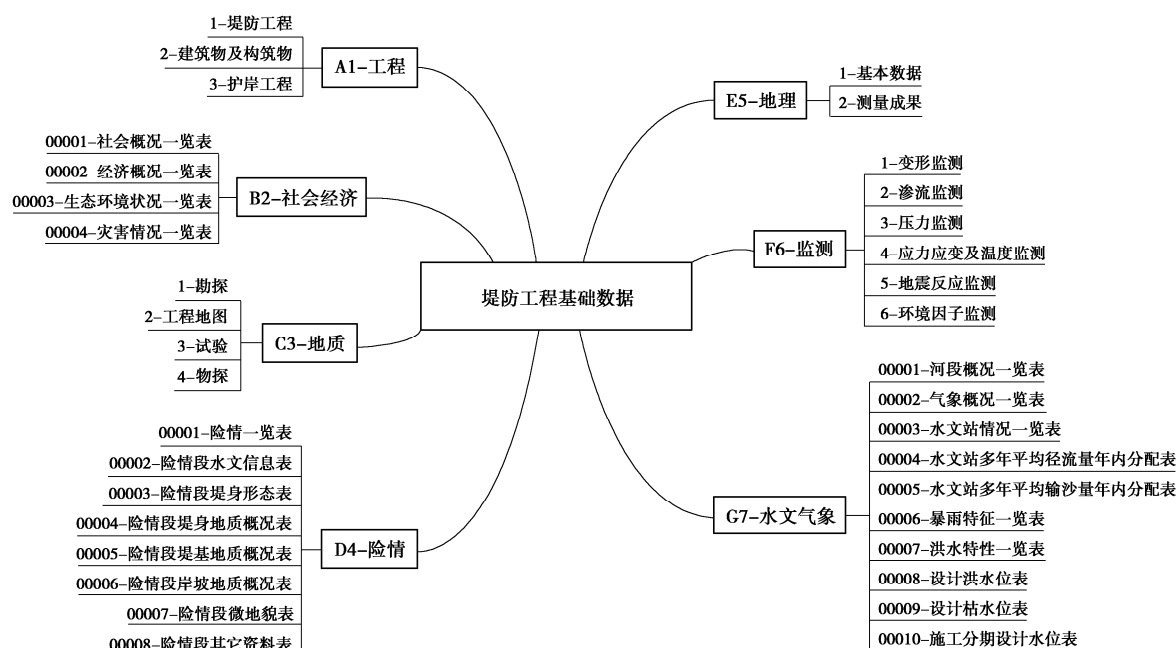


图 10 堤防工程数据结构分类图

Fig. 10 Classification of data structure of dike engineering

表 3 管涌致溃型评价指标及赋值

Table 3 Evaluation indexes and values of piping danger

因素		指标及赋值			指标取值		
管涌距堤身距离/m	参数值	0	0~50	50~100	100~200	200~500	>500
	赋值	10	9	7	5	3	1
管涌规模	参数值	直径大于 1 m 或管涌超过 10 个	直径大于 1.0~0.5 m 或管涌 5~10 个	直径 0.5~0.2 m 或管涌 3~5 个	直径 0.02~0.5 m 或管涌 2~3 个	直径小于 0.05 m	
	赋值	10	7	5	3	1	
管涌含沙量	参数值	含沙量大, 有增加趋势	含沙量大, 平稳	含沙量较小变弱趋势	含沙量减小至清水	一直清水	
	赋值	10	7	5	3	1	
堤外水头	参数值	持续快速上涨	持续缓慢上涨	平稳	缓慢下降	快速下降	
	赋值	10	7	5	3	1	
堤内水头	参数值	持续快速下降	持续缓慢下降	平稳	缓慢上升	快速上升	
	赋值	10	7	5	3	1	
堤身质量	参数值	无等级堤防; 堤身为砂性土, 缺陷明显	5 级堤防; 堤身为砂性土, 缺陷明显	4 级堤防	3 级堤防	1~2 级堤防	
	赋值	10	7	5	2	1	
堤基条件	参数值	砂性堤基	黏土厚度小于 5 m, 下层为砂性土	黏土厚度大于 5 m, 下层为砂性土	黏土堤基	基岩堤基	
	赋值	10	7	5	2	1	
已有工程措施	参数值	无工程措施	局部除险加固或工程措施失效	堤身或堤基除险或减压井施工	全面除险加固		
	赋值	10	7	5	1		

a) 堤防工程管涌破坏主客观权重安全评价方法。针对堤防工程管涌破坏模式的识别, 首先从地质、水文、加固措施和历史险情等方面提出 4 个方面 9 个指标体系, 经评价指标的归一化处理, 分别从渗透稳定力学分析及专家评判等途径研究各类指标的敏感性及其影响权重, 最后建立主客观融合模型, 并对堤防管涌破坏的安全性进行分级与评价<sup>[10, 42-43]</sup>。

b) 堤防管涌险情深度置信神经网络预测模型。依

据 193 组长江等堤防历年管涌险情数据, 选取水位高度、弱透水覆盖层厚度、允许比降、渗透系数及孔隙比 5 个主要因素, 以神经网络非线性分析为手段, 提出了管涌险情的深度神经网络 (DBN) 非线性智能化识别方法<sup>[10]</sup>。

c) 从堤防管涌险情对堤防工程危急程度角度出发, 提出了致溃型管涌概念和基于致溃程度的管涌分类评价方法, 避免无害管涌等类似简单定性概念可能

造成的偏差。表 3 为管涌致溃性评价指标体系及赋值。根据管涌致溃性赋值分值,可将管涌致溃性程度分为非致溃型管涌(1~3)、弱致溃型管涌(4~5)、致溃型管涌(6~7)和强致溃型管涌(8~10)等 4 种类型<sup>[10]</sup>。

(3) 堤防工程综合信息化管理与预警系统

基于自主知识产权的三维 GIS 平台,设计和开发了堤防工程信息管理系统,实现了与堤防工程全寿命周期数据库、堤防工程智能化采集信息的集成,并通过流场图、等值线、体渲染、时间轴控制等技术,实现了三维表达和集成管理。

形成了集安全分析、评估和预警等子系统于一体的堤防工程综合安全管理系统的总体架构设计方法,建立了堤防工程稳定性分析、险情评估及预警等各功能模块与总系统之间的链接与嵌入技术,提出了接口标准,并进行了各模块的开发和整合<sup>[10, 44-45]</sup>。

3.6 堤防工程隐患快速探测技术与装备

(1) MD-12 型大阵列时移电法堤防隐患远程智能探测设备研制

为解决低可探物理背景下的堤防隐患探测难题,从时移电法测试理论出发,基于时间和空间的探测策

略,设计与研发出大阵列固定式电法时移远程智能探测设备(MD-12),可并行采集 12 通道数据,集高密度多装置交换(15 种装置排列类型)、远程通信与物联网智能控制于一体<sup>[46-48]</sup>。

基于研制的 MD-12 设备在预埋的倾斜式 PVC 管空洞模型上进行了验证性测试,并与传统的 WDJ-4 高密度电法仪测试结果进行了比较。预埋的 PVC 管管径 20 cm,下倾 10°, #1 测线和 #2 测线埋深分别为 0.8, 1.1 m。高密度电法测试点距均为 0.5 m。对比测试结果表明,传统高密度电法仅能识别 #1 测线(径深比 1:4),而新研制的 MD-12 型电法装备可以识别至 #2 测线(径深比 1:5.5)下的空洞(图 11),表明 MD-12 型装备相对传统测试方法,测试精度显著提高。

(2) 堤防渗漏通道 MMS-1 型弱磁探测仪研制

磁电阻率法(magnetometric resistivity, MMR)是基于地质异常体与环境介质电阻率的差异性,通过测量人工源非感应电流激发的弱磁场(一般小于 5nT)的分布规律,以实现地质异常体勘查目标的一种地磁勘探法。Edwards 等<sup>[49]</sup>首次从理论和现场测试介绍了

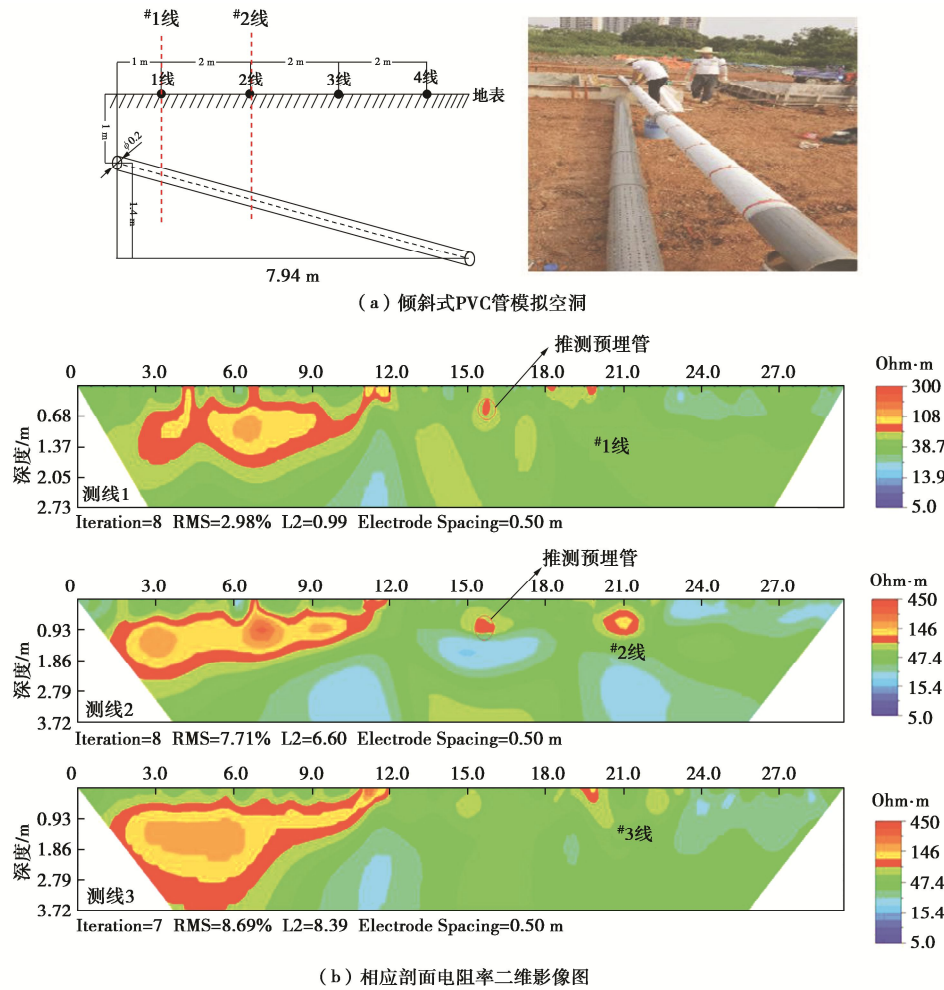


图 11 MD-12 研制设备测试结果

Fig. 11 Test results of MD-12 equipment

利用 MMR 法开展地质断层异常体探测的研究结果。Kofoed 等<sup>[50]</sup>介绍了应用 MMR 技术开展堤坝渗漏通道探测研究成果。项目针对堤防渗透通道的有效探测问题,长江科学院团队自主研制出基于 MMR 的堤防渗漏通道 MMS-1 型弱磁探测仪,如图 12。基于物理模型试验和现场测试等途径,对该探测仪的探测效果进行了测试验证。



图 12 MMS-1 型弱磁探测仪

Fig. 12 Weak magnetic detector MMS-1

该装备在堤防表面通过非接触方式探测由人工源构建的渗漏通道内电流引起的磁场异常分布,实现对渗漏通道位置的识别。设备由激励信号发射机、磁场测量系统及供电电极等构件组成。采用相位锁定等方法实现强干扰环境中的弱磁信号检测。系统测试分辨率可达  $0.01 \text{ nT}$ 。设备具备三分量磁场自动测试、存储和无线传输等测试功能<sup>[10]</sup>。

### (3) 堤防专用移动式瞬变电磁探测仪

为实现堤防隐患快速探测目标,基于瞬变电磁法探测技术原理,长江科学院团队设计和研发出快速移动式堤防隐患瞬变电磁连续采集探测系统,通过采集  $x, y, z$  3 个方向的磁场信号,实现堤防隐患的快速探测。该系统包括免磁感应移动载具及设置在移动载具上的瞬变电磁仪、发射天线、接受天线及移动端采集控制软件等,电磁数据采样频率为每  $1.2 \sim 1.6 \mu\text{s}$  一次,设备移动速度可根据沿堤线探测的密度和精度要求确定<sup>[10, 51]</sup>。

## 3.7 堤防险情应急抢险技术与装备

### (1) 管涌险情抢险技术与装备

针对减压井淤堵引起的管涌险情,研制了可快速安全清洗的应急洗井装备,实现了汛期减压井快速安全疏通<sup>[52-53]</sup>。

针对管涌抢险传统沙袋围井式抢险技术中物料短缺及时效性低的问题,发明了一种一体式及组装式充水围井(图 13),大幅减少了物料需求,提高了管涌抢险效率。针对汛期减压井淤堵减效或降低地层渗透水压应急抢险需求,提出了非钻植入式减压管思想(图 15),

联合组装式充水围井等便携式水压力平衡装备,有望实现汛期采用减压井对管涌险情进行快速抢险<sup>[54-55]</sup>。



图 13 组装式充水围井

Fig. 13 Assemble water impounding well structure

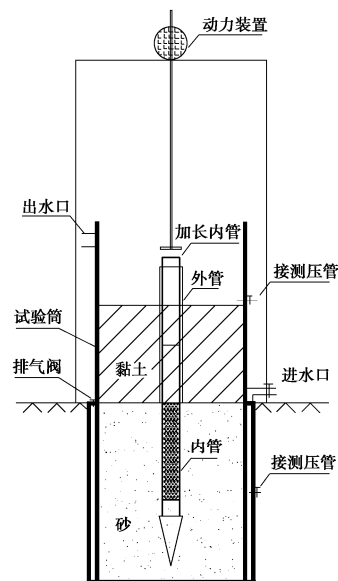


图 14 植入式减压管结构

Fig. 14 Structure of inserted relief pipe

### (2) 堤防溃口处置技术与装备

针对堤防溃口等险情快速植桩需求,研发了适用于堤防综合抢险的便携式液压激振锤植桩装置。该液压激振锤主要参数:质量为  $1.2 \text{ t}$ ,可配套小型挖机动力使用;高度为  $1.5 \text{ m}$ ;振动频率为  $2000 \text{ r/min}$ ;桩直径  $100 \sim 200 \text{ mm}$ <sup>[10]</sup>。

针对溃口冲击力大,抛投料流失率高,堵口物料的储备与运输等对险情位置环境依赖性强的特点,提出了在溃口前沿用主动式桩轮混合消能装置消能降速、以构件储存成品化形成的组装式透水消能四面体为堵口基本材料构件的堤防联合堵口技术思想,设计与研制了样品构件,并进行了水槽验证试验,如图 15, 16<sup>[10, 56]</sup>。



图 15 主动式桩轮耦合装置

Fig. 15 Active devices of coupling pile and runner



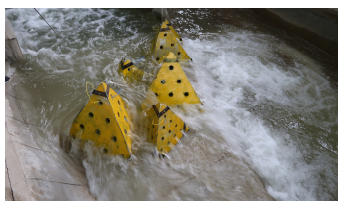


图 16 组合式透水四面体构件

Fig. 16 Formulation of combined pervious tetrahedron

### (3) 重力和水力展布式崩岸大布快速抢险技术与装备

针对黄河崩岸抢险中大布铺设贴合性较低问题, 河南黄河河务局团队利用长管袋重力或泥浆水头压力推展铺设土工大布, 研究了泥成分与浓度对泥浆流动性影响, 以及大布压重和水下滚动展铺同步控制技术, 形成崩岸快速抢险成套技术和装备, 如图 17<sup>[10]</sup>。

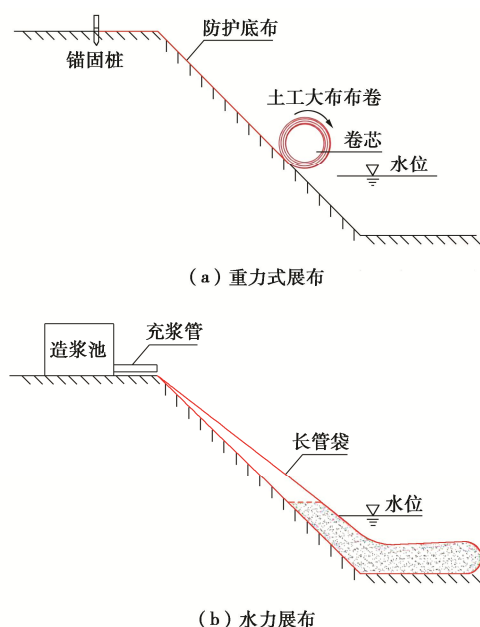


图 17 崩岸大布快速展布护岸技术

Fig. 17 Quick revetment technology by large-sized geotechnical cloth for rescue of bank collapse risk

### (4) 堤防隐患快速修复技术与装备

针对堤防隐患快速精准修复技术问题, 郑州大学团队围绕堤防高聚物注浆工艺与技术重点在以下 3 个方面展开攻关, 形成了堤防微创修复高聚物注浆成套技术与装备<sup>[10,56]</sup>。

a) 将 DPM(drilling processing monitoring)技术应用于堤防土体质量的随钻监测, 实现堤身与地基土体性能潜在隐患空间位置的快速随钻评价。

b) 研发了钻孔大深度高聚物导管注浆技术与装备。针对高聚物易堵塞注浆管的难题, 研发了可快速组装的长距离高聚物保压混合装置, 搭载了冲放式保压水囊, 形成了钻孔大深度高聚物导管注浆与反压复

合技术。

c) 研发了锁结式高聚物薄防渗墙建造技术与装备。针对传统高聚物超薄防渗墙受地质影响大、防渗搭接效果不好的问题, 研究利用成墙板锁结耳保证高聚物孔模的搭接, 形成锁结式高聚物超薄防渗墙快速成墙装置与技术, 如图 18。

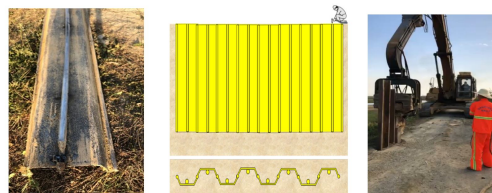


图 18 锁结式高聚物超薄防渗墙技术与装备

Fig. 18 Technology and equipments of locked polymer anti-seepage wall

## 4 成果示范应用情况

### 4.1 堤防渗漏通道弱磁法探测现场应用

#### (1) 基本情况

2020 年 7 月, 江西鄱阳湖发生特大洪水, 多个圩堤出现管涌、散浸及脱坡等险情, 局部圩堤甚至出现漫堤溃决。7 月下旬, 在江西鄱阳湖余干、鄱阳县等县防汛应急相应 I 级状态条件, 本项目团队深入防汛现场进行调研, 并开展现场测试工作。应用研制的 MMS-1 型渗漏通道弱磁探测仪进行余干县古埠联圩堤段管涌险情测试就是其中一例。

古埠联圩堤段管涌是当年余干防汛期间发生的比较严重的险情。现场勘察发现, 管涌口出口在堤内坡脚以外 20 余米部位, 且有多处渗水。据当地防汛人员介绍, 该部位堤段曾经是一个引水闸门旧址所在地。查明该管涌部位的主要渗漏通道的分布特征, 对管涌的处置具有重要作用。

#### (2) 技术应用效果

研究人员按照弱磁探测仪的测试技术原理, 在现场进行了相应的测试。图 19(a) 为该堤段管涌现场航空照片及弱磁法测量激励线和电极布置方案。根据堤防实际情况, 在图 19(b) 的测区范围内平行于堤防方向设置了 9 条测线, 每条测线 11 个测点, 测点与测点之间的间隔为 2 m, 测线与测线之间的间隔为 6 m。另外, 有 2 条测线实际设置了 15 个测点。因此, 本次试验共设置了 107 个测点。

图 20(a) 为消除了局部激励导线干扰和堤防地形正常场电极效应影响后的地面磁场异常比率响应图。从图中可以看出, 有两个数值较低的区域 a 和 b, 代表电流密度的分布在这两个区域较小, 即这两个区域的电导率较小, 且实际中这两个区域无管涌或

排水沟。相比于这两个低电导率的区域,图中数值较高的区域代表了高电导率的区域,连接这些高电导率的区域,得到了3个主要的电流路径,图中标注1,2,3为推断的管涌通道。

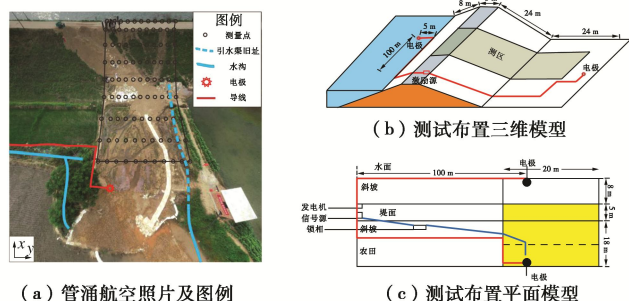


图 19 管涌位置及弱磁法测试布置

Fig. 19 Location of piping risk and test arrangement by weak magnetic detection

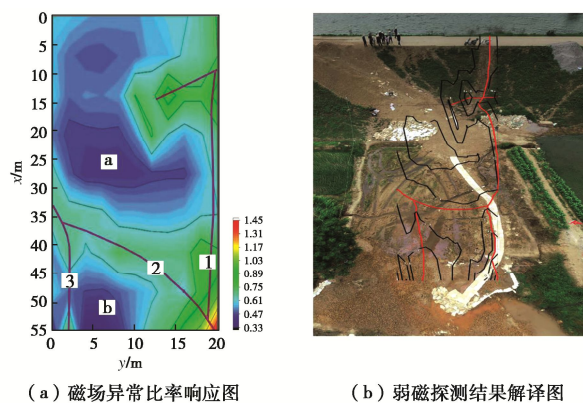


图 20 管涌弱磁法探测结果图

Fig. 20 Detected results of piping path by weak magnetic method

将推断的管涌路径绘至对应航拍影像图,得到管涌解译推断图,见图 20 (b)。如图 20 (b) 所示,路径 1 与引水渠旧址一致,并且水流汇入图中右下角的排水沟,这也对应于图 20 (a) 右下角的高数值区域。图 19 (b) 中电极放置在渗漏出水口。在图 20 (a) 中也反映出渗漏出水口周围的一个高数值区域,渗出的水来源于路径 2 和路径 3。

该应用实例表明,项目研制出的基于 MMR 的弱磁探测仪在堤防等岩土工程渗漏通道探测方面具有较好的推广应用前景。

## 4.2 减压井淤堵综合应急洗井技术应用示范

以湖北阳新长江干堤为例,介绍减压井清洗技术的应用效果。

### (1) 基本情况

阳新长江干堤由海口江堤和富池江堤组成,堤线长 31.5 km。1998 年洪水后,对阳新长江干堤进行了除险加固,加固后海口江堤达二级堤防标准,堤线长

24.33 km。针对长江二元地层结构特点,减压井技术因在汛期可实时消杀地层承压水头、占地面积小、具有自流特性等优势,是长江堤防除险加固的重要措施。在 1995 年至 2001 年间,在该长江干堤堤内共建 164 口减压井,其中,2001 年国家关于长江隐蔽工程专项治理中在桩号 K18+740 至 K27+210 的 8.47 km 内建设了 118 口减压井,减压井结构如图 21 所示。

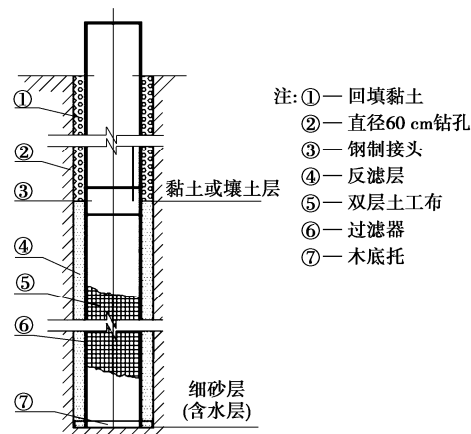


图 21 减压井结构示意图

Fig. 21 Structure of relief well

减压井工程运行经验表明,在减压井建成初期,减压井排水减压效果很明显,但随着时间的推移,减压井运行受到机械淤堵、化学淤堵等多方面因素影响,井管过滤器段产生淤积,汛期减压井出水量逐渐减小,降低了减压井的渗控效果,甚至失效。

根据对阳新长江干堤已运行 20 余年的 107 口减压井现场调研统计结果表明,对设计井深 18.0~30.0 m 的减压井,被填土覆盖或实测井深在 10 m 深以内的减压井共计 33 口,占比 31%。多数减压井测井深度明显小于设计井深,大部分保护井井池内壁留有的洪水痕迹明显高于管口高程,表明汛期或雨季减压井曾发生过倒灌现象。

### (2) 技术应用与效果

项目在该段选取 9 口减压井开展洗井示范研究。选取的示范减压井均为 2001 年组织实施,井间距 20~30 m,井管直径 300 mm。

首先针对井内淤积情况进行清淤处理。针对井内淤积的大量细砂及小石渣,采用空压机清淤技术将细颗粒砂土随井水抽出。针对人为抛掷井内的砖块、石头等块状物体,采用机井抓锥技术掏取。

减压井清淤后,利用轻型活塞洗井、高速射流循环喷射洗井及抽水大降深洗井等技术及其组合实施对减压井的洗井。轻型活塞洗井可在兼顾管壁强度条件下,基于活塞的运动形成的真空负压和水力冲击,清洗管壁,可选择低负压、多频次方式。高速射流循环



喷射洗井是在高水压作用下形成冲刷管壁的射流, 通过破坏管壁上的泥皮、扰动管外虑料, 达到清洗目的, 采用短时长、小流速和大流量方式。抽水大降深清洗是通过井内抽水, 形成漏斗, 增大含水层水力梯度, 达到疏通含水层目的。

联合采用轻型活塞洗井、高速射流洗井及抽水大降深洗井 3 项技术对现场 9 口减压井依次进行洗井试验。根据洗井前后的抽水试验结果, 以单位降深流量  $q$  和导水系数  $T$  的试验值进行对比。表 4 为上述减压井抽水试验结果。

根据表 4, 洗井后单位降深流量和导水系数有不同程度提高, 较洗井前  $q$  提升 1.2~5.4 倍,  $T$  提升 1.1~5.0 倍, 表明应急综合洗井技术的应用成效显著。

表 4 减压井洗井前后渗透性对比表

井编号	洗井前		洗井后	
	$q$ /( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$T$ /( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	$q$ /( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$T$ /( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )
J#57	0.92	3.46	5.00	17.28
J#59	0.89	6.05	2.68	12.10
J#60	1.60	12.96	3.61	25.06
J#61	3.74	25.92	4.32	28.51
J#63	2.27	13.82	3.76	29.38
J#64	6.22	27.65	8.51	45.79
J#65	3.42	25.92	8.39	45.79
J#66	1.23	13.82	4.71	44.06
J#67	3.53	21.60	6.20	33.70

如果按照减压井清洗前单位降深流量大小分别进行分类效果分析, 进一步可说明上述技术对于淤积严重的减压井效果更好。按洗井前减压井单位降深大小将减压井划分四类: 大于  $4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 、 $2 \sim 4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 、 $1 \sim 2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$  和小于  $1 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 。按上述 4 类减压井效果分别统计, 第一类, 主要有 J#64 井, 洗井后出水效率略有提升, 单位降深流量增大 36.82%; 第二类, 主要有 J#61、J#63、J#65、J#67 四口井, 洗井后平均单位降深流量增大 75.53%; 第三类, 主要有 J#60 和 J#66, 洗井后平均单位降深流量提升 3 倍, 单位降深流量分别恢复至 3.61, 4.71  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ , 这类减压井清洗有效性很大; 第四类, 主要有 J57#和 J#59, 清洗前淤堵严重, 排水减压效果差, 经过洗井之后单位降深流量明显提升, 增加 3~5 倍, 对这类减压井进行针对性清洗, 可迅速提高减压井排水能力。

在 2020 年 7 月长江发生高水位洪水期间, 上述洗井后的减压井出水状态良好。

4.3 高聚物精准修复技术应用

以新型锁结式高聚物超薄防渗墙建造技术在江西

东风联圩中的应用为例介绍该技术的应用示范情况。

(1) 基本情况

东风联圩工程位于都昌县东南部土塘水北岸, 赣江入湖尾闾地区, 滨临鄱阳湖。该圩堤建设于 20 世纪 60 年代。堤顶高程 21.33~23.28 m, 主坝堤顶宽度为 5.0~6.0 m, 迎水坡坡比一般 1:2.5~1:3.0, 背水坡坡比一般 1:2.0~1:2.5。现状防洪能力 5 a 一遇。

该堤段主要问题是, 堤身单薄, 部分堤段的堤顶高程、堤顶宽度、堤身坡度达不到设计要求。因历史原因, 该类堤防工程堤身填筑质量总体不好, 部分堤段在汛期高水位阶段时堤身堤基渗漏严重。为此, 针对某试验段开展了新型锁结式高聚物防渗墙加固试验性研究。

试验选点为珠光联圩的一段险情段, 该段在 2019 年 7 月汛期发生过管涌险情, 桩号为 0+416—0+450。

试验前为查明该堤段险情特征, 采用高密度法对该处进行了检测, 以确定疑似的渗流通道位置。共在迎水坡面和背水坡面布置了 2-d 测线进行测试。测试结果表明, 该堤坝整体电阻率偏低, 整体电阻率值在 80~160  $\Omega \cdot \text{m}$ 。在水平位置 3~9 m 的范围, 地面之下 0.5~2.5 m 的区域内, 整体电阻率偏高, 电阻率值在 300  $\Omega \cdot \text{m}$  左右, 在水平位置 9~28 m 的范围, 地面之下 0~3 m, 整体电阻率偏低, 整体电阻率值在 60~150  $\Omega \cdot \text{m}$ , 判断低阻区为疑似渗漏通道。

(2) 技术应用与效果

根据高密度电探测结果选择在水平位置 6~24 m 进行防渗加固, 沿堤坝轴向使用高频振动方式压入成槽板。第一块成槽板压入之后, 再接着压入第二块成槽板, 两成槽板间锁扣连接, 第三块成槽板压入后, 对第一块成槽板进行提升注浆, 这样沿需加固堤坝轴线依次交替连续进行施工, 如图 18。依此工艺建设的高聚物防渗墙厚度为 2 cm, 防渗墙成墙深度为 8 m。

防渗墙施工完成 2 d 后, 同样采用高密度电法在加固断面部位对高聚物防渗墙加固效果进行了检测。结果表明, 在注浆加固后, 堤坝加固部位电阻率明显提高。与注浆加固之前的探测结果相比, 堤坝电阻率值从 150  $\Omega \cdot \text{m}$  左右提升到 200  $\Omega \cdot \text{m}$  左右, 在水平位置 0~12 m 处, 深度 0.5~5 m 的范围内, 电阻率值提升至 500  $\Omega \cdot \text{m}$  左右, 整体注浆加固效果明显。

4.4 其他技术的应用示范情况

项目提出的堤防工程全寿命周期基础数据库构建方法及堤防工程信息管理与安全评价预警系统, 以荆南长江干堤为例进行了示范应用。

土工大布快速抢险崩岸险情技术在黄河下游左岸濮阳县境内焦集段—寨河段进行了示范应用, 如图 22。



(a) 试验段河势条件



(b) 岸坡压护效果

图 22 黄河河岸土工大布快速抢险

Fig. 22 Quick rescue by large-sized geotechnical cloth in dike of Yellow River

## 5 结 语

针对中国堤防工程建设特点和国家防洪减灾战略需求,十三五期间国家在重大自然灾害监测预警与防范专项研究中提出了开展“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”研究的项目立项指南。以长江、黄河、松花江等中国代表性大江大河堤防背景为依托,经过近4年总计达230余骨干人员的全力研究,项目围绕堤防典型险情演化过程与致溃机理、堤防风险识别与安全评价理论两个科学问题,以及低可探物理背景条件堤防工程隐患探测与识别新技术、成套装备化堤防应急抢险与修复新技术和堤防工程信息化综合安全管理技术等关键技术开展系统攻关,并取得重要研究成果。本文简要介绍了该项目的立项研究思想及7个方面的主要研究成果和相关应用示范效果情况。

由于堤防工程的复杂性,研究成果只是阶段性的或初步的,很多研究问题仍面临巨大挑战,如堤防溃口抢险技术等,只是在调研和研究过程中提出了一些新的抢险措施,要取得溃口等抢险技术的实战性突破,还有待全体科研和工程技术人员的持续努力。

另一方面,关于堤防工程系统性的研究项目,在国家层面仍偏少,希望本文就该重点项目的研究工作和研究进展介绍,能鼓励更多同行参与和致力于我国堤防工程的防汛抢险及技术进步研究行列。

**致 谢:** 特别感谢对项目完成作出重要贡献的课题单位负责人、课题负责人、专题负责人以及参加本项目研究的全体科研与工程技术人员;特别感谢司富安教高、孙东亚教高、王媛教授、章青教授、王宗敏教授、郭成超教授、马贵生教高、张家发教高等相关负责人的全力支持和努力。

## 参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部、中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Ministry of Water Resources, P.R.China, National Bureau of Statistics, P.R.China. Bulletin of First National

Census for Water[M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese))

- [2] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Ministry of Water Resources, P.R.China. 2019 Statistic Bulletin on China Water Activities[M]. Beijing: China Water Power Press, 2020. (in Chinese))
- [3] 包承纲, 吴昌瑜, 丁金华. 中国堤防建设技术综述[J]. 人民长江, 1999, **30**(10): 15 - 16, 50. (BAO Cheng-gang, WU Chang-yu, DING Jin-hua. Dike construction technology and development in China[J]. Yangtze River, 1999, **30**(10): 15 - 16, 50. (in Chinese))
- [4] 郭爱清, 周华敏, 吴庆华. 欧美国家堤防防洪若干特点及与我国的比较[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 11 - 18. (WU Ai-qing, ZHOU Hua-min, WU Qing-hua. Levees in Europe and United States: characteristics and comparison with China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 11 - 18. (in Chinese))
- [5] 张家发, 吴昌瑜, 李胜常, 等. 堤防加固工程中防渗墙的防渗效果及应用条件研究[J]. 长江科学院院报, 2001, **18**(5): 56 - 60. (ZHANG Jia-fa, WU Chang-yu, LI Sheng-chang, et al. Seepage control efficiency and application conditions of cut-off wall used for dyke reinforcement[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, **18**(5): 56 - 60. (in Chinese))
- [6] 郭爱清, 吴志广, 尹健民, 等. 钻孔压浆成墙法用于鄱阳湖区圩堤防渗墙施工[J]. 人民长江, 2001, **32**(5): 15 - 16, 36. (WU Ai-qing, WU Zhi-guang, YIN Jian-min, et al. Construction of the cut off wall with drilling grouting method applied in the dike of Poyang lake region[J]. Yangtze River, 2001, **32**(5): 15 - 16, 36. (in Chinese))
- [7] 张家发, 吴志广, 许季军, 等. 安庆江堤现有减压井运行效果初步分析[J]. 长江科学院院报, 2000, **17**(4): 38 - 40, 44. (ZHANG Jia-fa, WU Zhi-guang, XU Ji-jun, et al. Analyses on effectiveness of relief wells for Anqing Dyke[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, **17**(4): 38 - 40, 44. (in Chinese))
- [8] 杨光煦. 九江长江江堤堵口实录及经验[J]. 人民长江, 1998, **29**(11): 4 - 7, 49. (YANG Guang-xu. Emergency closure of dike breach at Jiujiang reach of Yangtze River[J]. Yangtze River, 1998, **29**(11): 4 - 7, 49. (in Chinese))
- [9] 张利荣, 严匡杼, 张海英. 唱凯堤决口封堵抢险方案及关键技术措施[J]. 施工技术, 2014, **43**(12): 26 - 28, 83.

- (ZHANG Li-rong, YAN Kuang-ning, ZHANG Hai-ying. Emergency rescue scheme and key technology measures of Changkai dike crevasse sealing[J]. Construction Technology, 2014, **43**(12): 26 - 28, 83. (in Chinese))
- [10] 郭爱清. 国家重点研发计划项目“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”综合绩效自我评价报告[R]. 北京: 中国21世纪议程管理中心, 2022. (WU Ai-qing. Self-Evaluation Report of the National Key R&D Program of China of “Dike Risks Evolution Mechanism, Hidden Danger Rapid Detection and Emergency Rescue Technology Equipment”[R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, 2022. (in Chinese))
- [11] 任增平, 潘光宜. 淮北大堤饶荆段险情类型及成因分析[J]. 水利规划与设计, 2019(9): 41 - 44, 156. (REN Zeng-ping, PAN Guang-yi. Analysis on type and formation cause of dangerous conditions in Raojing section of Huaibei Dam[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(9): 41 - 44, 156. (in Chinese))
- [12] 任增平, 金习武, 李 坤. 淮北大堤涡下段险情类型分析及成因研究[J]. 水利水电工程设计, 2020, **39**(3): 27 - 30. (REN Zeng-ping, JIN Xi-wu, LI Kun. Type analysis and cause study of risks at lower part of Wo river of Huaibei levee[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(3): 27 - 30. (in Chinese))
- [13] 司富安, 李 坤, 段世委, 等. 第二松花江堤防险情类型及成因分析[J]. 水利规划与设计, 2020(11): 117 - 119. (SI Fu-an, LI Kun, DUAN Shi-wei, et al. Analysis on the types and causes of danger prevention of the second Songhua River dyke[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(11): 117 - 119. (in Chinese))
- [14] 海 震, 李会中, 梁 梁. 枞阳江堤险情工程地质分析与评价[J]. 人民长江, 2019, **50**(增刊 2): 76 - 79. (HAI Zhen, LI Hui-zhong, LIANG Liang. Analysis and assessment on engineering geology of dangerous situation in Zongyang Yangtze River Embankment[J]. Yangtze River, 2019, **50**(S2): 76 - 79. (in Chinese))
- [15] 赵 鑫, 马贵生, 万永良, 等. 堤防工程堤基渗流安全评价方法[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 79 - 84. (ZHAO Xin, MA Gui-sheng, WAN Yong-liang, et al. A safety assessment method for seepage flow in dyke foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 79 - 84. (in Chinese))
- [16] 倪小东, 寇恒琦, 左翔宇, 等. 基于透明土技术与颗粒流方法联合开展管涌细观机理研究[J]. 水利学报, 2021, **52**(12): 1482 - 1497. (NI Xiao-dong, KOU Heng-qi, ZUO Xiang-yu, et al. Research on meso mechanism of piping based on transparent soil technology and particle flow method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, **52**(12): 1482 - 1497. (in Chinese))
- [17] 谷敬云, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(6): 1287 - 1296. (GU Jing-yun, LUO Yu-long, ZHANG Xing-jie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(6): 1287 - 1296. (in Chinese))
- [18] 樊茹玉, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的潜蚀细观数值模型研究[J]. 水电能源科学, 2021, **39**(2): 64 - 68. (FAN Ru-yu, LUO Yu-long, ZHANG Xing-jie, et al. Study on suffusion mesoscopic numerical model based on DEM-CFD method[J]. Water Resources and Power, 2021, **39**(2): 64 - 68. (in Chinese))
- [19] LUO Y L, LUO B, XIAO M. Effect of deviator stress on the initiation of suffusion[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(6): 1607 - 1617.
- [20] 刘洪辰, 吴庆华, 苏怀智, 等. 覆盖层及其与砂层接触面特性对堤基管涌影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, **18**(4): 165 - 170. (LIU Hong-chen, WU Qing-hua, SU Huai-zhi, et al. Experimental study on piping considering cover layer and its contact surface with sand layer characteristics[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, **18**(4): 165 - 170. (in Chinese))
- [21] 崔皓东, 陆 齐, 陈劲松, 等. 长江干堤典型管涌险情成因分析及对策研究[J]. 水利水电快报, 2021, **42**(1): 54 - 58. (CUI Hao-dong, LU Qi, CHEN Jin-song, et al. Causes analysis of typical piping dangers of main levees of Yangtze River and countermeasures[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, **42**(1): 54 - 58. (in Chinese))
- [22] 岳红艳, 吕庆标, 朱勇辉, 等. 河道岸坡水位涨落变化对崩岸影响试验研究[J]. 人民长江, 2021, **52**(增刊 2): 15 - 20. (YUE Hong-yan, LÜ Qing-biao, ZHU Yong-hui, et al. Experimental study on influence of river bank slope water level fluctuation on bank collapse[J]. Yangtze River, 2021, **52**(S2): 15 - 20. (in Chinese))
- [23] 吕庆标, 岳红艳, 朱勇辉, 等. 水位变化速率对河道崩岸的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(5): 11 - 16. (LÜ

- Qing-biao YUE Hong-yan, ZHU Yong-hui, et al. Influence of water level change rate on riverbank collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(5): 11 - 16. (in Chinese))
- [23] 吕庆标, 岳红艳, 朱勇辉, 等. 水位变化速率对河道崩岸的影响[J]. 长江科学院院报, 2021(5): 11 - 16. (LÜ Qing-biao, YUE Hong-yan, ZHU Yong-hui, et al. Influence of water level change rate on riverbank collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021(5): 11 - 16. (in Chinese))
- [24] 孙东亚, 姚秋玲, 赵雪莹. 堤坝涵管接触冲刷破坏模式分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, **19**(2): 276 - 280. (SUN Dong-ya, YAO Qiu-ling, ZHAO Xue-ying. Analysis of failure modes of conduits through embankment dams due to contact erosion[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, **19**(2): 276 - 280. (in Chinese))
- [25] 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 Qi-gang, ZHANG Da-wei, WANG Zhong-xiang, et al. Progress in flow characteristics and closure technology of dike breaches[J]. China Flood & Drought Management, 2021, **31**(8): 1 - 6. (in Chinese))
- [26] 丁家怡, 蔡伟, 周建方. 基于随机力学理论的堤防安全分析方法综述[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 66 - 72, 78. (DING Jia-yi, CAI Wei, ZHOU Jian-fang. Safety analysis methods for levees based on stochastic mechanics: a review[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 66 - 72, 78. (in Chinese))
- [27] 王小兵, 夏晓舟, 章青. 基于正交试验和神经网络的堤防边坡抗滑稳定可靠度研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 89 - 93. (WANG Xiao-bing, XIA Xiao-zhou, ZHANG Qing. Reliability analysis on anti-sliding stability of levee slope based on orthogonal test and neural network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 89 - 93. (in Chinese))
- [28] DING J Y, ZHOU J F, CAI W, et al. A modified hybrid algorithm based on black hole and differential evolution algorithms to search for the critical probabilistic slip surface of slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **129**: 103902.
- [29] 李少龙, 崔皓东. 渗透系数空间变异性对堤基渗透稳定影响的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 49 - 52, 58. (LI Shao-long, CUI Hao-dong. Numerical simulation on effect of spatial variability of soil permeability on seepage stability of levee foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 49 - 52, 58. (in Chinese))
- [30] 刘高峰, 龚艳冰, 王慧敏, 等. 国外堤防风险管理现状及对我国的启示[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 53 - 58. (LIU Gao-feng, GONG Yan-bing, WANG Hui-min, et al. Current situation of levee risk management abroad and its implications to China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 53 - 58. (in Chinese))
- [31] 龚艳冰, 杨舒馨, 戴靓靓, 等. 基于数据场 K-means 聚类的洪涝灾害突发事件分级方法[J]. 统计与决策, 2018, **34**(20): 47 - 49. (GONG Yan-bing, YANG Shu-xin, DAI liang-liang, et al. Stage division of flood disaster based on data field K-means clustering method[J]. Statistics & Decision, 2018, **34**(20): 47 - 49. (in Chinese))
- [32] 刘高峰, 龚艳冰, 黄晶. 基于流域系统视角的城市洪水风险综合管理弹性策略研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, **22**(3): 66 - 73, 107. (LIU Gao-feng, GONG Yan-bing, HUANG Jing. Research on resilient strategies of urban flood risk comprehensive management from the perspective of river basin system[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2020, **22**(3): 66 - 73, 107. (in Chinese))
- [33] CAO W W, YANG Y, HUANG J, et al. Influential factors affecting protective coping behaviors of flood disaster: a case study in Shenzhen, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(16): 5945.
- [34] 张健, 潘斌, 陈文龙, 等. 基于雷达卫星时序分析技术的荆江沿岸堤防形变研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 23 - 27. (ZHANG Jian, PAN Bin, CHEN Wen-long, et al. Detection of deformation along Jingjiang segment of Yangtze River dyke based on radar satellite time series analysis technique[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 23 - 27. (in Chinese))
- [35] 沈定涛, 钱天陆, 夏煜, 等. 机载 LiDAR 数据提取堤防工程特征信息圆环探测法[J]. 测绘学报, 2021, **50**(2): 203 - 214. (SHEN Ding-tao, QIAN Tian-lu, XIA Yu, et al. A ring detection method for levee features extraction based on airborne LiDAR data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, **50**(2): 203 - 214. (in Chinese))
- [36] 冯国正, 刘世振, 李艳, 等. 基于 GNSS/INS 紧耦合的水陆地形三维一体化崩岸监测技术[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 94 - 99. (FENG Guo-zheng, LIU Shi-zhen, LI

- Yan, et al. A bank collapse monitoring technology integrating 3D land and water based on GNSS/INS tight coupling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 94 - 99. (in Chinese))
- [37] 马耀昌, 刘世振, 樊小涛, 等. 基于崩岸监测的多波束系统参数设计[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 100 - 103. (MA Yao-chang, LIU Shi-zhen, FAN Xiao-tao, et al. Design of detection parameters of multi-beam sounding system for bank collapse survey[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 100 - 103. (in Chinese))
- [38] 刘世振, 樊小涛, 冯国正, 等. 现代高时空分辨率崩岸应急监测技术研究进展与展望[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 85 - 88, 93. (LIU Shi-zhen, FAN Xiao-tao, FENG Guo-zheng, et al. Modern emergency monitoring technology for bank collapse with high spatio-temporal resolution: review and prospect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 85 - 88, 93. (in Chinese))
- [39] 罗登昌, 韩旭, 于起超, 等. 堤防工程数据标准化研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 34 - 38. (LUO Deng-chang, HAN Xu, YU Qi-chao, et al. Standardization of dyke engineering data[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 34 - 38. (in Chinese))
- [40] 蒋园, 韩旭, 马丹璇, 等. 相似重复数据检测的数据清洗算法优化[J]. 计算机技术与发展, 2019, **29**(10): 79 - 82. (JIANG Yuan, HAN Xu, MA Dan-xuan, et al. Optimization of data cleaning algorithm for similar duplicate data detection[J]. Computer Technology and Development, 2019, **29**(10): 79 - 82. (in Chinese))
- [41] 于起超, 韩旭, 马丹璇, 等. 流式大数据数据清洗系统设计与实现[J]. 计算机时代, 2021(9): 1 - 5. (YU Qi-chao, HAN Xu, MA Dan-xuan, et al. Design and implementation of streaming big data ETL System[J]. Computer Era, 2021(9): 1 - 5. (in Chinese))
- [42] 宁丹麦, 罗玉龙, 詹美礼, 等. 堤防管涌险情主要影响因素的敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 45 - 48, 58. (NING Dan-mai, LUO Yu-long, ZHAN Mei-li, et al. Sensitivity analysis on weights of main influence factors of piping failure of dyke[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 45 - 48, 58. (in Chinese))
- [43] 冯迪, 王媛, 高山, 等. 分淮入沂整治工程典型堤段垂直防渗体防渗效果分析与评价[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 180 - 184. (FENG Di, WANG Yuan, GAO Shan, et al. Effectiveness of vertical anti-seepage body in typical levee segment of Huaihe River drainage project: analysis and evaluation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 180 - 184. (in Chinese))
- [44] 饶小康, 马瑞, 张力, 等. 基于GIS+BIM+IoT数字孪生的堤防工程安全管理平台研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 1 - 7. (RAO Xiao-kang, MA Rui, ZHANG Li, et al. Study and design of dike engineering safety management system based on GIS+BIM+IoT digital twin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [45] 张力, 马瑞, 徐志敏. 堤防工程三维可视化管理技术[M]. 武汉: 长江出版社, 2021. (ZHANG Li, MA Rui, XU Zhi-min. 3D Visualization Management Technology of Dike Engineering[M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2021. (in Chinese))
- [46] 李文忠, 肖国强, 孙卫民, 等. 长江堤防土电阻率测试及其与含水率和密实度的相关性研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 131 - 134. (LI Wen-zhong, XIAO Guo-qiang, SUN Wei-min, et al. Measurement of water content and its correlation with compactness and resistivity of Yangtze River embankment soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 131 - 134. (in Chinese))
- [47] 孙大利, 李貅, 齐彦福, 等. 基于非结构网格三维有限元堤坝隐患时移特征分析[J]. 物探与化探, 2019, **43**(4): 804 - 814. (SUN Da-li, LI Xiu, QI Yan-fu, et al. Time-lapse characteristics analysis of hidden dangers of three-dimensional finite element levees based on unstructured grids[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, **43**(4): 804 - 814. (in Chinese))
- [48] 孙卫民, 孙大利, 李文忠, 等. 基于时移高密度电法的堤防隐患探测技术[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 157 - 160, 184. (SUN Wei-min, SUN Da-li, LI Wen-zhong, et al. Technology of detecting dyke's hidden danger using time-lapse high-density resistivity method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 157 - 160, 184. (in Chinese))
- [49] EDWARDS R N. The magnetometric resistivity method and its application to the mapping of a fault[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1974, **11**(8): 1136 - 1156.
- [50] KOFOED V O, JESSOP M L, WALLACE M J, et al. Unique applications of MMR to track preferential groundwater flow paths in dams, mines, environmental sites, and leach fields[J]. The Leading Edge, 2011, **30**(2): 192 - 204.
- [51] 周黎明, 陈志学, 周华敏, 等. 堤防隐患瞬变电磁三维正



演模拟及分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 146 - 150, 156. (ZHOU Li-ming, CHEN Zhi-xue, ZHOU Hua-min, et al. Three-dimensional forward modeling and analysis of transient electromagnetic for detecting embankment's hidden danger[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 146 - 150, 156. (in Chinese))

[52] 盛小涛, 张 伟, 李少龙, 等. 阳新长江干堤减压井清淤洗井技术研究[J]. 人民长江, 2020, **51**(11): 209 - 213. (SHENG Xiao-tao, ZHANG Wei, LI Shao-long, et al. Study on dredging and washing technique of relief well in Yangxin reach of Yangtze River main dyke[J]. Yangtze River, 2020, **51**(11): 209 - 213. (in Chinese))

[53] 田 密, 盛小涛. 减压井超声波解堵试验初步研究[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(6): 102 - 107. (TIAN Mi, SHENG Xiao-tao. Plugging removal test of dike relief well based on ultrasonic technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(6): 102 - 107. (in Chinese))

[54] 郭爱清, 吴庆华, 包承纲, 等. 一种自稳性防汛构筑物及其快速搭建方法: CN109881625B[P]. 2020-07-10. (WU Ai-qing, WU Qing-hua, BAO Chen-gang, et al. A Self-Stabilizing Equipment and Quick Build Method for Flood Prevention and Rescue China: CN109881625B[P]. 2020-07-10. (in Chinese))

[55] 郭爱清, 盛小涛, 吴庆华, 等. 一种新型植入式减压井降压排水系统及方法: CN110130378B[P]. 2019-12-27. (WU Ai-qing, SHENG Xiao-tao, WU Qing-hua, et al. A Novel Drop Pressure-Drainage System and Method Based on the Implantable Decompression Well China: CN110130378B[P]. 2019-12-27. (in Chinese))

[56] 程永辉, 陈 航, 熊 勇, 等. 一种用于溃口抢险的旋转式快速消能系统及应用方法. 中国: ZL202010491729.9[P]. 2019.8.6. (CHENG Yong-hui, CHEN Hang, XIONG Yong, et al. A Rotary Rapid Energy Dissipation System and Application Method for Closure of Breach. China: ZL202010491729.9[P]. 2019.8.6. (in Chinese))

[57] 郭成超, 杨建超, 石明生, 等. 高聚物超薄防渗墙施工设备及工艺改进[J]. 水利水电科技进展, 2020, **40**(3): 68 - 71, 77. (GUO Cheng-chao, YANG Jian-chao, SHI Ming-sheng, et al. Improvement of construction equipment and technology of super-thin cut-off walls with polymer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, **40**(3): 68 - 71, 77. (in Chinese))

---

彩色插图索引

DOI: 10.11779/CJGE202207001 一文彩色插图 .....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202207002 一文彩色插图 .....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202207003 一文彩色插图 .....	(后插 2)
DOI: 10.11779/CJGE202207004 一文彩色插图 .....	(后插 3)
DOI: 10.11779/CJGE202207005 一文彩色插图 .....	(后插 6)
DOI: 10.11779/CJGE202207010 一文彩色插图 .....	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202207011 一文彩色插图 .....	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202207012 一文彩色插图 .....	(封 4)
DOI: 10.11779/CJGE202207013 一文彩色插图 .....	(封 4)