

DOI: 10.11779/CJGE20221480

# 重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用

蔡跃波<sup>1</sup>, 向 衍<sup>\*1,2,3</sup>, 盛金保<sup>1,2,3</sup>, 孟 颖<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;  
3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘 要:** 中国高坝建设水平世界领先, 但安全运行保障水平相对滞后, 应对洪水、强震、地质灾害、异常干旱或低温、恐怖破坏等极端事件的应急保障能力相对薄弱, 安全风险不容忽视。从基础与应用基础、应用技术研发、集成示范与推广 3 个层面进行综述, 包括: 非常规条件下大坝性能演化与灾变机理、极端条件下大坝安全诊断和风险控制、大坝失事早期预警标准与应急响应机制等基础理论研究; 大坝深水检测载人潜水器、大坝深水渗漏探测、深孔泄水建筑物疏堵与闸门修复、大坝突发事件应急监测与隐患快速探测、深水环境大坝缺陷修补、极端条件下大坝应急抢险与损毁快速修复等关键技术研发; 100 m 级深水环境大坝安全检测技术集成示范, 极端条件下大坝溃决早期预警与应急处置技术推广应用。对最新研究进行了综述和总结, 并对今后的主要发展方向提出了建议。

**关键词:** 重大水利工程; 大坝深水检测; 突发事件; 监测预警; 应急处置

中图分类号: TV698 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)03-0441-18

**作者简介:** 蔡跃波(1958—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事坝工新材料研发与应用、水库大坝安全评估与风险管理、水工建筑物耐久性提升研究。E-mail: ybcail@nhri.cn。

## Deep-water detection, monitoring, early warning and treatment of emergencies of major water conservancy projects: a review

CAI Yuebo<sup>1</sup>, XIANG Yan<sup>1,2,3</sup>, SHENG Jinbao<sup>1,2,3</sup>, MENG Ying<sup>1</sup>

(1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The construction level of high dams in China is leading in the world, but the guarantee level of their safety operation is relatively lagging behind. The high dams have relatively weak emergency support capability to deal with the extreme events such as flood, strong earthquake, geological disaster, abnormal drought, low temperature and terrorist destruction, thus their safety risks cannot be ignored. The review is carried out from three aspects: foundation and application basis, technical research and development, integrated demonstration and promotion. It includes: (1) The basic theoretical researches such as dam performance evolution and disaster mechanism under unconventional conditions, dam safety diagnosis and risk control under extreme conditions, early warning standards and emergency response mechanisms of dam failure; (2) Key technologies such as human-occupied vehicles for deep-water inspection of dams, deep-water leakage detection of dams, dredging and gate repair of deep-hole drainage structures, emergency monitoring of dams and rapid detection of their hidden dangers, defect repair of dams in deep water environment, emergency rescue and rapid repair of damage of dams under extreme conditions; (3) The integration demonstration of dam safety detection in 100 m-deep water, and the application and dissemination of early warning and emergency response of dam failure under extreme conditions. The latest researches on these issues are reviewed and summarized, and the relevant suggestions for the main development direction in the future are proposed.

**Key words:** major water conservancy projects; deep-water detection of dams; emergencies; monitoring and early warning; emergency treatment

## 0 引 言

截至 2020 年底, 中国已建成水库大坝 98566 座,

收稿日期: 2022-12-25

\*通信作者 (E-mail: yxiang@nhri.cn)

总库容 9306 亿 m<sup>3</sup>，大型水库 774 座，总库容 7410 亿 m<sup>3</sup>[1]。总体上看，中国重大水利工程大坝建设水平已居世界领先水平，但安全运行保障水平相对滞后，特别是面对工程老化及特大洪水、强震、重大地质灾害、异常干旱、极端低温、战争与恐怖破坏等极端事件的不利影响，以及库水位骤升骤降、旱涝急转、人因失误影响等引发的非常规运行工况。相对于中低坝，高坝运行面临新的安全形势和技术挑战[2]，这些高坝大库库容大、水头高，一旦出险，后果极其严重，其安全保障问题具有极端重要性。但迄今为止，保障高坝大库安全技术能力严重不足，其关键难点与挑战为[3]：

(1) 100 m 以上深水检测修补加固缺乏成熟的技术装备手段[4]，发达国家在此类装备的研发和工业化生产上处于技术领先，引进国内应用面临技术壁垒、成本及后期维护费用高、操作人员缺乏等多重问题。

(2) 极端条件下的大坝安全诊断和风险评估理论和方法尚不完善[5]，对于极端荷载以及非常规调控对大坝作用的特点、机制认识仍不够充分。

(3) 应对极端事件的应急保障能力薄弱[6]，由于突然性、随机性和破坏性，大坝突发事件应急监测技术、手段和要求与常规监测区别大，与之相关的研究甚少，造成大坝突发事件应急处置缺少必要的工程和环境信息支持，影响科学决策和处置效果。

本文综述了重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究的进展及示范应用情况，并对未来的主要发展方向提出了建议。

### 1 基础与应用基础研究

围绕前述关键难点与挑战，研究了非常规条件下大坝性能演化与灾变机理、极端条件下大坝安全诊断和风险控制理论与方法、深水环境大坝安全保障体系。

### 1.1 非常规条件下大坝性能演化与灾变机理

(1)非常规条件下大坝服役性态变化分析模型和方法[7-8]。提出了库水位骤变和地震高水位等非常规荷载工况下，混凝土坝运行性态分析理论和方法，揭示了库水位骤变影响大坝变形的新规律，以及非常规荷载影响期各主要影响因子识别与表征方法，建立了库水位骤变期间反映水位变化速率影响的混凝土坝变形分析模型；针对地震高水位影响期混凝土坝动态变形特征，构建了基于改进支持向量机模型的混凝土坝动态变形规律分析模型[9]，见图 1。模型应用于某 300 m 级双曲拱坝，引入库水位变化速率分量后，比传统变形分析模型结果拟合精度提高 15%。在此基础上提出了非常规荷载影响期混凝土坝结构力学参数反演方法，及其对混凝土坝运行性态影响分析方法。成果为揭示非常规条件下大坝服役性态的影响机理及其突变破坏触发机制提供了理论依据。

(2)非常规条件下高混凝土坝极限承载能力评估方法。在四参数等效应变的基础上，提出了基于应变空间循环往复荷载下混凝土变四参数动损伤模型[10]，用于描述混凝土在动力作用下劣化过程（图 2）。优化了坝基对坝体约束变形反演方法[11]，可分别对坝体与地基实际工作性态作深入评价，并考虑测点在空间位置上的互相影响，更加全面反映了大坝整体变形。针对强震作用下高混凝土坝局部位移非连续现象，提出了分区有限元-界面元（IBE-PFE）交互解法[12]，同时考虑接触非线性和接触刚体位移，用于模拟大坝静动力情况损伤过程，有效解决了混凝土坝非线性极限抗震能力分析评估难题。

(3)非常规条件下高土石坝极限承载能力评估方法。基于试验资料分析了土料性质、结构特性、固结应力状态和动荷载状态等对土石料地震残余变形影

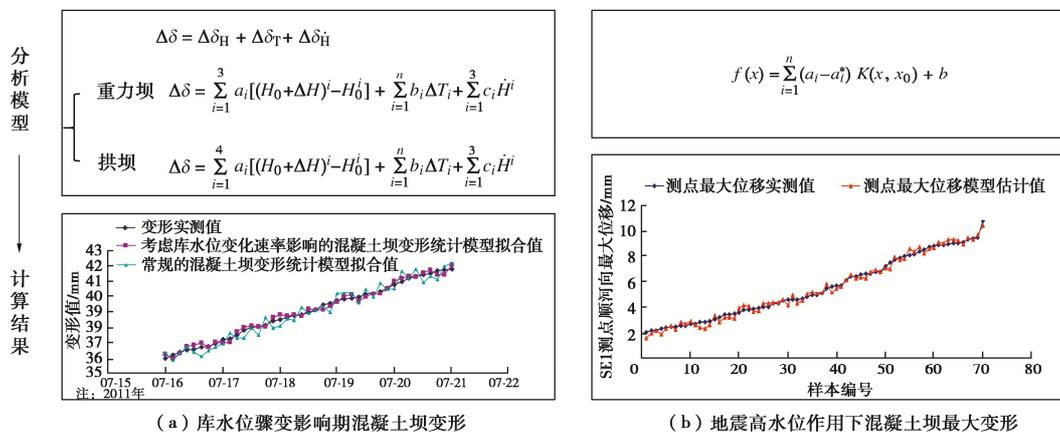


图 1 非常规条件下混凝土坝变形监控模型

Fig.1 Deformation monitoring model for concrete dams under unconventional conditions

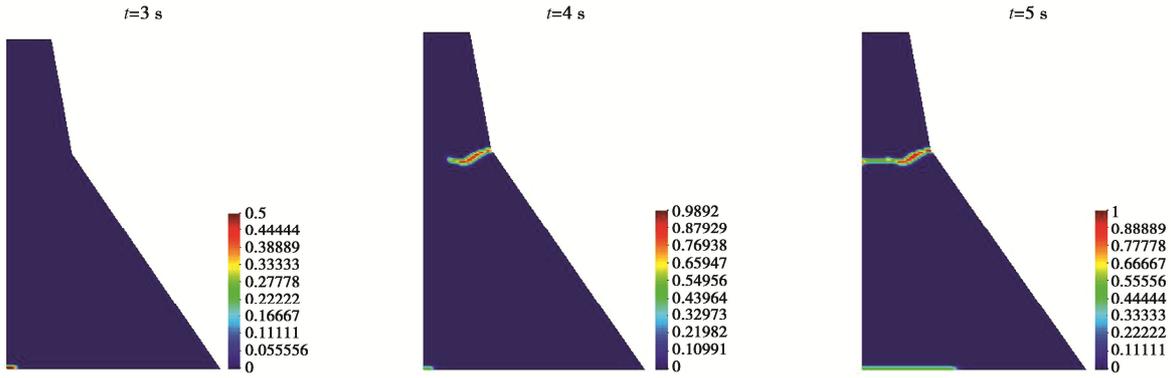


图 2 损伤模型

Fig. 2 Damage model

响, 系统揭示了地震残余变形发生机理。依据试验结果和机理分析, 提出了控制影响因素变量表达方式, 改进了已有地震残余变形模式, 提出了新的残余变形计算模型。剖析了等价黏弹性模型的等效线性分析方法、黏弹塑性模型的真非线性分析方法的特点和不足, 提出了基于剪应力比控制的循环三轴试验的非线性黏弹塑性模型, 见图 3。开展了高土石坝-地基系统典型土与结构接触面及不同类型土间接接触面的力学特性试验, 深度剖析了接触面接触力学特性; 考虑结构损伤演化影响, 建立了考虑大坝-地基系统结构特性和工作条件的典型接触面三维静动力弹塑性本构模型, 如图 4。通过堆石坝地震动力破坏的大型振动台模型试验, 揭示了强震作用下高土石坝抗震薄弱部位和失效模式; 针对高土石坝结构特点和强震荷载特征, 提出了高土石坝极限承载能力分析方法和相应评价指标。

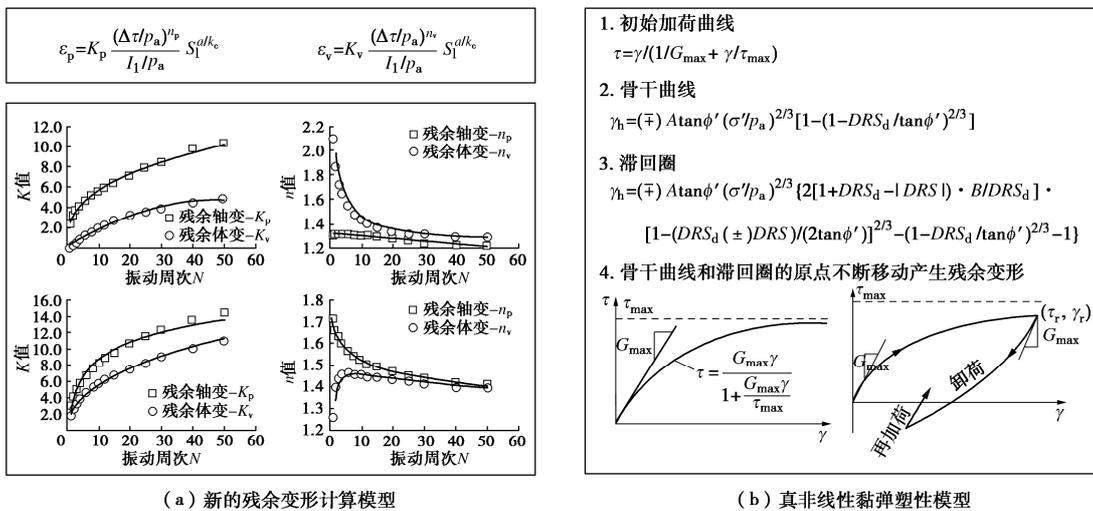
### 1.2 极端条件下大坝安全诊断和风险控制理论与方法

#### (1) 大坝安全多源数据管理及分析云服务系统。

搭建了安全监测大数据集群, 提出了多源数据粗差智

能识别与预测方法<sup>[13-16]</sup>, 并基于机器学习算法, 提出基于无监督学习的粗差识别方法, 实现海量监测数据粗差快速识别与处理。系统集成基于深度学习算法的监测效应量预测分析模型(图 5)。该模型泛化能力强, 适用于多种类型数据建模, 建模简单快捷, 输入数据可由一维扩展为多维使用。对比传统回归模型和机器学习模型, 该模型大坝变形预测模型精度更高。基于大数据和云计算技术开发了大坝安全多源数据管理与分析平台<sup>[17]</sup>, 涵盖了数据采集、仪器管理、运行管理、资料分析、专题分析、报表报告、巡视检查、项目管理、系统管理等功能。平台分为 PC 端 Web 应用和智能终端 APP 应用。实现了多源信息有效管理, 并按照实际需求进行存储、处理、管理等相应服务, 为用户提供了一体化的安全监测自动化系统。

(2) 极端条件下大坝安全多源信息融合诊断方法与准则。深入分析了强震、极端降水等极端条件及低温高水位、水位骤升骤降等非工况下大坝的工作性态<sup>[18]</sup>, 提出了基于云模型与证据理论的大坝安全



(a) 新的残余变形计算模型

(b) 真非线性黏弹塑性模型

图 3 改进地震残余变形计算和真非线性黏弹塑性模型

Fig. 3 Improved seismic residual deformation calculations and true nonlinear visco-plastic models

粗粒土与结构接触面弹塑性损伤模型的增量表达

$$\begin{Bmatrix} d\gamma \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\tau\tau} & C_{\sigma\tau} \\ C_{\tau\sigma} & C_{\sigma\sigma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{G_e} + \frac{1}{H_r} & \frac{1}{H_{rd}} \\ \frac{1}{\mu} + n_a + A_1 & \frac{C + C_e}{\sigma} - \frac{1}{H_{rd}} \cdot \frac{|\tau|}{\sigma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{Bmatrix}$$



大型多功能接触面试验仪

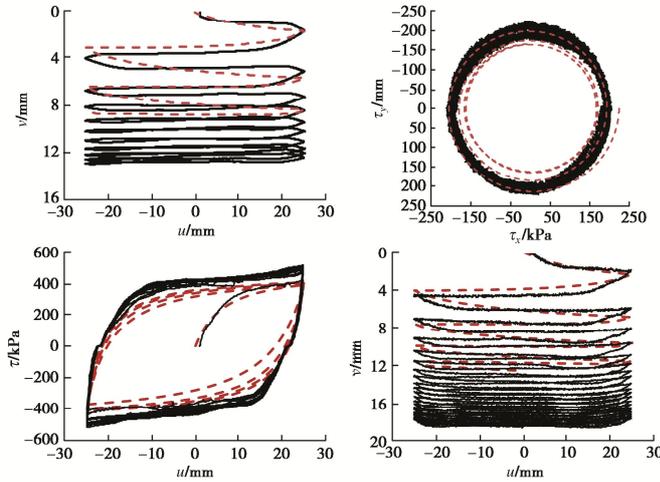


图4 高土石坝典型接触面三维静动力本构模型

Fig. 4 Three-dimensional static and dynamic constitutive model for typical contact surface of high earth-rockfill dams

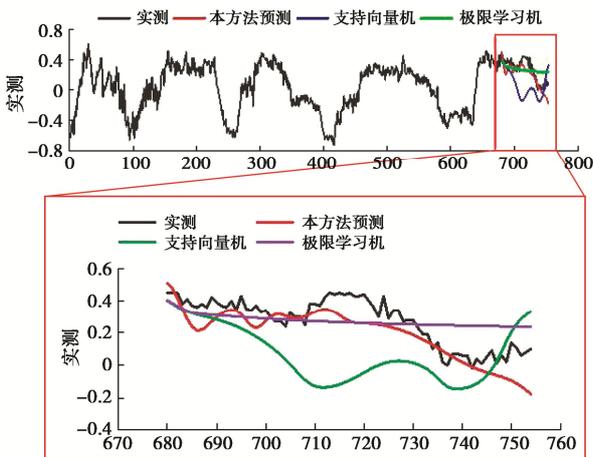


图5 基于机器学习的安全监测数据预测

Fig. 5 Prediction of safety monitoring data based on machine learning

多源信息融合方法。数值融合层采用循环神经网络对基础信息进行数值融合处理。特征融合层基于大坝强震、谷幅持续收缩、极端降水等基础信息，考虑不同水库大坝特点，针对性地评价极端条件对大坝服役性态影响。决策融合层采用云模型方法，以极端高/低水位与温度作用下混凝土坝监测数据为依据，由实测值求解评价指标隶属度，建立了基于云模型和证据理论的多源信息融合诊断模型，如图6所示。

(3) 极端条件下大坝失事风险评价与预警。建立了基于模糊贝叶斯网络的大坝失事风险评估模型(图

7)。从极端条件、大坝结构、外部环境三方面对失事风险的不确定来源进行归类划分，以识别溃坝风险因素及模式。建立的极端条件下大坝溃坝风险预警体系主要由3部分组成：数据收集模块、风险分析模块和风险预警模块。其中风险预警模块包括风险模型构建、预警指标拟定、风险调控对策库。通过明确风险因素之间的因果关系，采用模糊理论处理风险不确定性和模糊性，提出了溃坝风险模糊贝叶斯网络模型。

### 1.3 大坝深水检测与修补加固装备研发

(1) 大坝深水渗漏探测成套设备。针对面板堆石坝、重力坝与拱坝等典型水工建筑物，按耐压200 m设计分别研发了爬行机器人平台和吸附机器人平台(见图8)，解决深水渗漏检测“到不了”问题<sup>[19-20]</sup>。斜坡坝面水下检测，采用垂直4推进器加爬行履带底盘方案，分为水下爬行和浮游两种模式，满足38°斜坡坝面稳定爬行、驻停、高清示踪摄像功能，极大提高了斜坡坝面水下渗漏检测效率。重力坝、拱坝水下检测以水下负压吸盘等核心技术为基础，开发具备垂直坝面爬行和浮游的水下吸附机器人平台，机器人平台采用框架式设计，配备8个推进器和4个行走轮，采用1个直径16 cm、功率500 W的负压吸盘提供吸附力。该平台弥补了水下浮游机器人在垂直坝面检测时无法稳定定位检测的问题，为混凝土坝深水渗漏示踪检测、缺陷测量等作业提供了稳定可靠的检测平台。

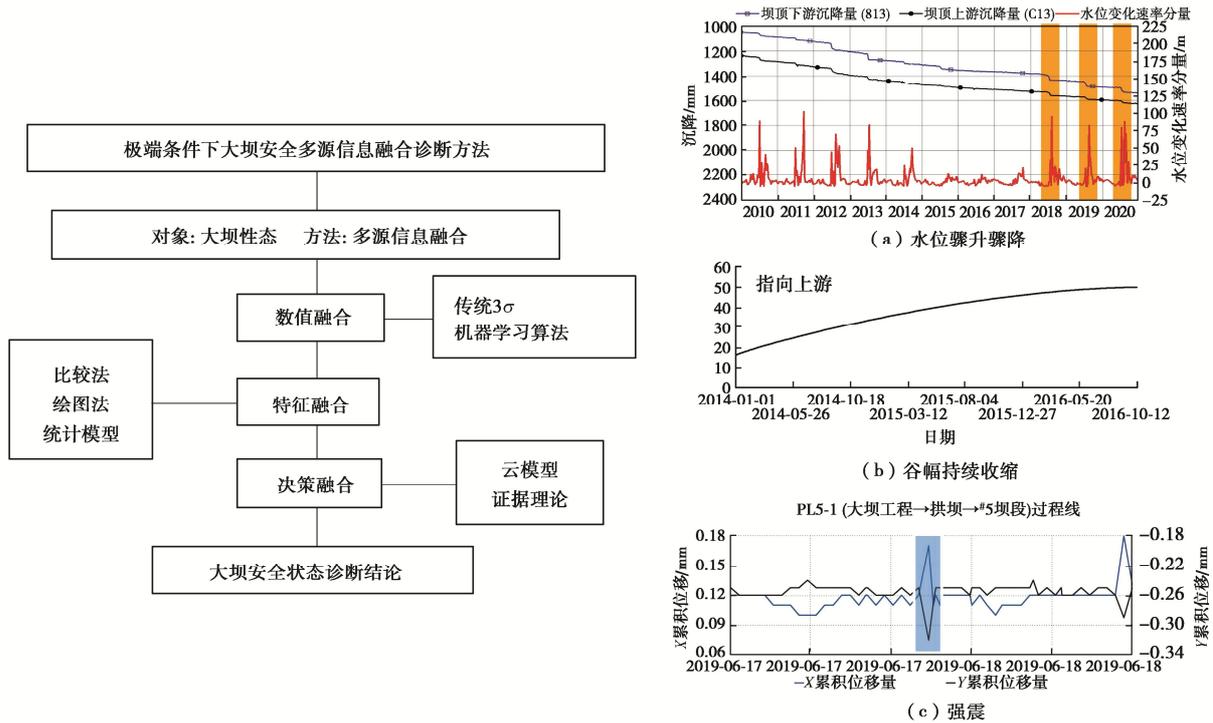


图 6 极端条件下大坝安全多源信息融合诊断方法

Fig. 6 Multi-source information fusion diagnosis method for dam safety under extreme conditions

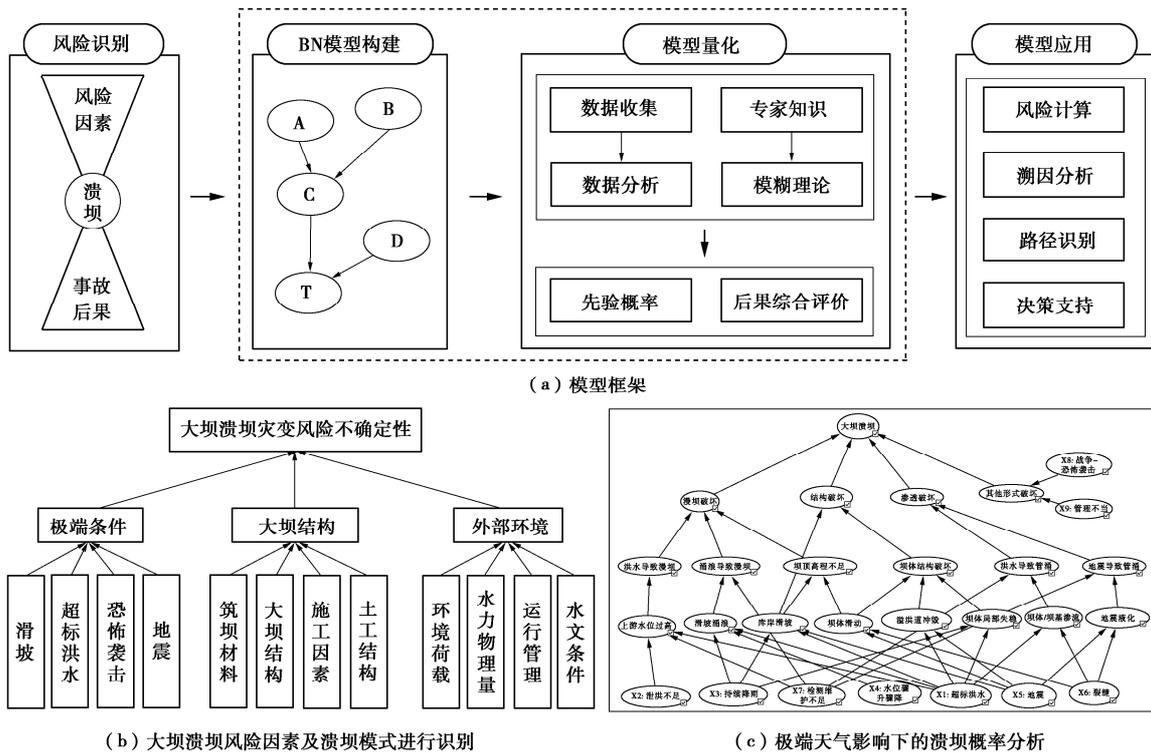


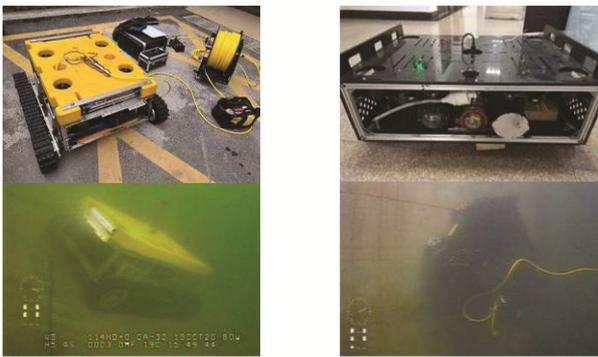
图 7 基于贝叶斯网络的大坝溃坝风险评估模型框架

Fig.7 Model framework for risk assessment of dam failure based on Bayesian network

(2) 大坝深水检测“禹龙号”潜水器与加固平台。针对大坝深水环境探测、修补加固等特殊需求，形成面向大坝检测的载人潜水器技术解决方案，突破 300 m 级深水环境大坝安全保障技术壁垒，重点解决载人潜水器作业固定、水下定位<sup>[21]</sup>、作业工具搭载、低能见度探测、安全防护、宽视野观察窗研制等技术

难题<sup>[3, 22-23]</sup>，集成一台功能完备、性能达标的具有自主知识产权的大坝检测专用载人潜水器“禹龙号”（见图 9, 10），首次实现了水利水电行业深水复杂环境载人装备从 0 到 1 的突破；通过在典型坝型大坝水下检测示范应用，为提高中国大坝深水检测与修补加固技术水平奠定了坚实的装备基础。“禹龙号”载人潜

水器能够综合潜水员与 ROV 的优势，以观察和探测为主，以精细作业为辅，可将专业技术人员带到水下作业现场，最大程度发挥专家临机决策能力，提高判断准确率及工作效率；同时可精细作业，且比潜水员作业深度大、时间长，并规避减压病。潜水器载员 2 人，可连续工作 8 h，探测速度为 600 m<sup>2</sup>/h，和传统潜水员作业相比，在相同规模下，其工作效率是传统作业方式的 3 倍以上，运行费用是传统作业方式的 1/2。



(a) 水下爬行机器人 (b) 水下吸附机器人  
图 8 水下机器人平台

Fig. 8 Platform for underwater robots



图 9 “禹龙号”载人潜水器

Fig. 9 Yulong human-occupied vehicle



图 10 潜水器设计与关键技术

Fig. 10 Design and key technology of human occupied vehicle

(3) 深水大粒径清淤技术及装备。针对清淤深度不足、效率较低、适用水速条件局限、对大粒径淤积物无能为力的现状，研制的 SSYA600 和 SSYA1000 型深水大粒径生态清淤装备<sup>[24]</sup>，见图 11。其中

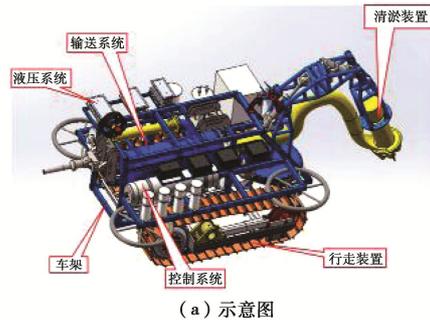
SSYA600 型深水大粒径清淤疏浚设备 (图 11 (a))，在疏浚深度、粒径适应性、生产能力等指标上取得突破，提升了高坝大库清淤疏浚能力；SSYA1000 型深水大粒径清淤疏浚设备 (图 11 (b))，在疏出最大块度、出渣量等指标上取得突破，解决了 150 m 级大水深、大流速、水位大变幅等条件下大粒径淤积物疏浚技术难题。



(a) SSYA600 型 (b) SSYA1000 型  
图 11 深水大粒径清淤疏浚设备

Fig. 11 Large particle size dredging equipments in deep water

(4) 深孔泄水建筑物疏堵装备“达诺 1 号”。针对深水建筑物淤堵及闸门存在的典型问题<sup>[25-26]</sup>，如深孔淤积造成深孔闸门卡阻，长时间淤积造成淤泥等板结成块，严重时会造成深孔堵塞，导致深孔闸门无法正常启闭，研发了可自行行走检查、清理淤积、疏通封堵、水下切割、水下修复等功能于一体的成套设备“达诺 1 号” (DreRo-I)，见图 12。可有效解决目前高坝大库大深度水下检查、清理、提门、金属结构修复等问题，同时提高了深水闸门运行过程中非常规情况的快速抢险及应急处置能力，包括深孔自推进疏堵成套装备、深孔板结淤堵物破碎与抽取技术、深水闸门提取及水下爆破拆除与切割和修复技术。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 12 深孔泄水建筑物疏堵装备“达诺 1 号”

Fig. 12 Dredging equipments of deep-hole discharge structures named DreRo-I

## 2 应用技术研发

围绕前述关键难点与挑战, 研发了极端条件下大坝应急监(检)测与早期预警技术、深水环境大坝缺陷检测技术与修补材料, 以及极端条件下大坝应急处置技术。

### 2.1 极端条件下大坝应急监(检)测与早期预警技术

(1) 突发事件应急监测与隐患快速探测新技术。为应对突发事件发生时的信息不对称, 基于无人机重构水库大坝应急场景<sup>[27]</sup>, 适用于突发灾害后对已损伤坝体快速建模, 及时发现并测量大坝表面损伤(图13), 成果图分辨率可达2 cm。针对混凝土坝裂缝缺陷, 研发了基于机器视觉识别的混凝土坝裂缝监测系统(图14)。该系统由裂缝监测硬件和裂缝监测软件系统组成, 通过合理设计和运用标定物, 使监测系统能适应不同距离的裂缝监测, 提高系统的灵活性和现场实用性。根据实验数据分析可知, 裂缝宽度检测绝对误差不超过0.3 mm, 裂缝宽度检测相对误差不超过5%, 且检测效率较传统方法更高<sup>[28-29]</sup>。

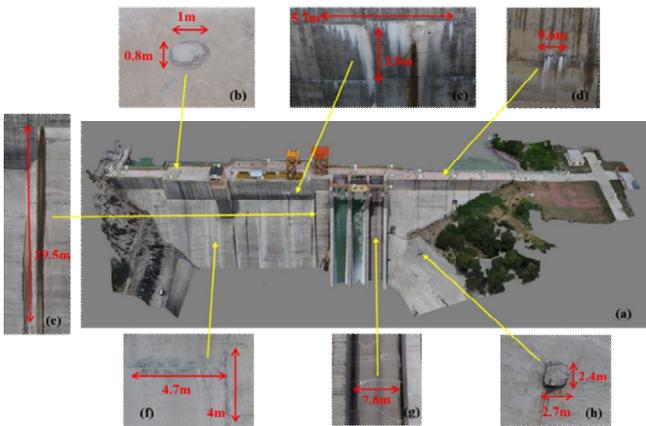


图13 大坝模型和检测到的大坝表面破损

Fig. 13 Model and detected surface damage of dams

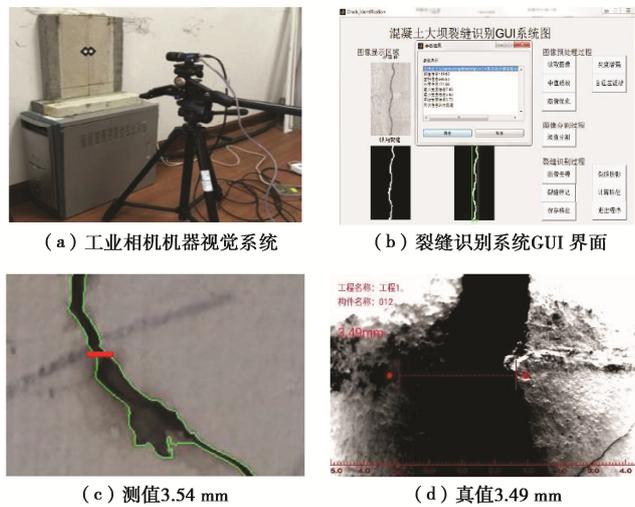
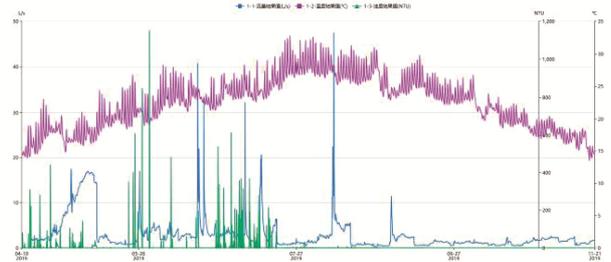


图14 基于机器视觉的混凝土坝裂缝监测系统

Fig. 14 Crack monitoring system for concrete dams based on machine vision

通过分析大坝突发事件应急预警需求, 基于现代传感及集成技术研发高性能多参数小型化传感器(图15), 完成了多参数智能监测设备构造设计、现场安装设计, 浊度计、水位计、温度计技术参数标定, 研发了采集软件<sup>[30-31]</sup>。高性能多参数(水位、水温、浊度)智能传感器由浊度探头、透水石、硅压传感器、内置半导体热敏电阻的温度传感器、不锈钢护管、测量电路、通气电缆等组成。传感器信号传输电缆内附导气管, 使传感器内腔与大气相通, 传感器在测量时自动温度修正及气压补偿, 确保测量精度。



(c) 多参数传感器的渗水量、水温、浊度等过程线  
图15 多参数传感器及采集过程线图

Fig. 15 Multi-parameter sensors and charting

此外, 明确了电阻率成像、探地雷达、弹性波成像等方法的适用条件和探测特点<sup>[32]</sup>, 发展了大坝隐患快速无损探测新技术与解析方法, 通过对比实际工程探测试验和模型试验; 提出了基于多元优化目标函数的多参数联合反演-多层次综合探测资料解析框架, 实现电法、地震等数据的联合反演, 提高解译效果; 建立了时移电法大坝渗漏观测系统(图16), 开展了时移电法探测试验; 采用空间数据库技术, 可按空间、时间处理分析数据并成图, 圈定高风险部位电阻率特征值; 提出了多断面成像资料时间序列反演目标函数, 为时间序列数据变化的解析奠定基础<sup>[33-34]</sup>。

(2) 大坝失事早期预警技术与标准。首先基于国内外溃坝数据典型大坝溃决前期特征进行数据挖掘。以土石坝为例, 分析了不同坝型溃坝数量、溃决原因及比例, 形成了基于荷载—建筑物—破坏—溃坝的破坏路径分析方法<sup>[35-36]</sup>; 据此明晰大坝失事案例时空分布规律, 采用贝叶斯网络方法构建大坝病害因果网络图, 计算溃坝率及识别影响大坝安全的关键因素;

运用多源信息融合方法挖掘大坝溃决前期特征,结合云模型和 D-S 证据融合算法挖掘大坝潜在失事模式<sup>[37]</sup>,如图 17 所示;在此基础上基于大坝失事案例多要素数据库,建立了可模拟溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时的参数预测模型,并与国内外常用溃坝模型比较,结果表明,模型结果上具有更小均方差和更大可决系数,即与实测数据更为接近<sup>[38-41]</sup>。

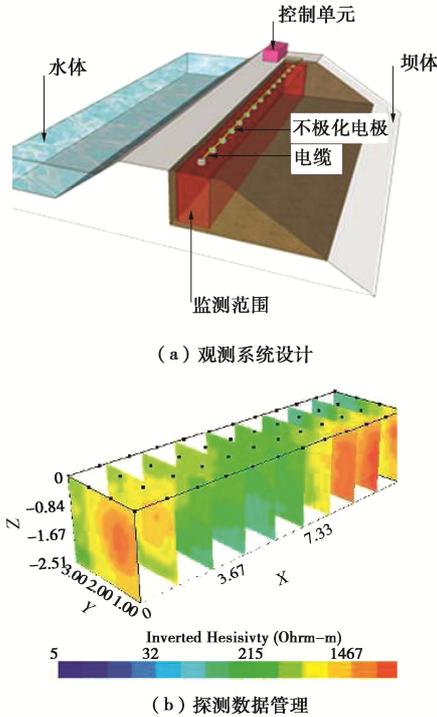


图 16 时移电法大坝渗漏监测系统

Fig. 16 Dam seepage monitoring system based on time-lapse resistivity method

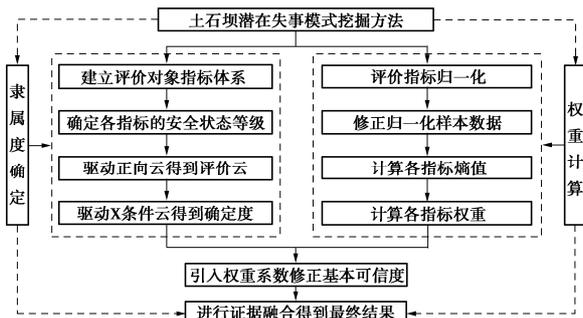


图 17 大坝溃决前期特征挖掘方法流程图

Fig. 17 Flow chart of feature mining method in early stage of dam failure

对于长序列大坝安全监测信息,建立了规范法、置信区间估计、典型小概率 3 种方法拟定早期预警指标;在此基础上,区分水工建筑物破坏类型(非突发性破坏和突发性破坏),基于可靠度理论明晰了大坝工程安全与溃坝概率间的映射关系,从而建立了“破坏类型-结构可靠指标-失效概率-早期预警指标”的风险预警方法与标准<sup>[42-43]</sup>,实现了基于阈值的预警向基于风险的预警的转变;并研发了基于风险的大坝早期预

警差别化管理工具,通过应用失效模型和生命损失估算量化大坝风险,对区域水库大坝进行风险评估与排序。

## 2.2 深水环境大坝缺陷检测技术与修补材料

(1) 深水环境大坝视声一体化渗漏探测成套技术。该成套技术以渗流资料分析为先导,以水下声纳渗漏检测技术确定渗漏异常区、以水下机器人高清喷墨示踪技术准确定位入渗点、连通性试验验证渗流通道为一体的综合渗漏探测技术,包括新型渗漏声纳快速检测仪探测仪(图 18)、基于 ROV 平台的高清摄像喷墨系统及流速矢量软件(图 19)等<sup>[44-45]</sup>。该技术实现渗漏广域普查到精确定位详查,各手段相互验证、互为补充,提高了效率与精度。最大检测深度达 150 m,渗漏流速检测精度为  $10^{-3}$  cm/s,缺陷定位精度达米级,示踪成像为 1080P 超清录像,检查距离 50 cm 以内。



图 18 渗漏声纳快速探测仪

Fig. 18 Sonar fast detector for leakage

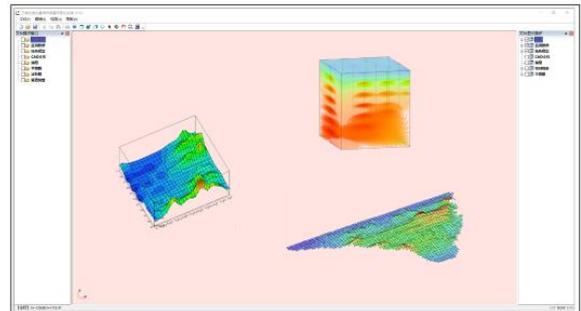


图 19 声纳流速矢量声纳可视化平台

Fig. 19 Visualization platform for sonar flow velocity vector

(2) 深水环境大坝缺陷系列修补材料与材料。“点”为深水环境下集中渗漏通道,开发了聚氨酯-沥青嵌缝膏封堵材料(图 20 (a))、水下抗分散型膏状速凝材料(图 20 (b))、改性低热沥青新型灌浆材料(图 20 (c))、双液深水高压注浆材料(图 20 (d))等水下快速堵漏材料以及配套的施工工艺<sup>[46-49]</sup>。

“线”为深水环境下混凝土裂缝,开发了水下混凝土裂缝高分子聚合物(图 21 (a))、深水循环式双液灌浆材料(图 21 (b))、乳化沥青水泥弹性砂浆(图 21 (c))等水下修补材料以及配套的施工工艺<sup>[50]</sup>。针对水下接缝止水失效,开发了高塑性接缝止水塑性填料(图 22 (a))、钢带复合型止水盖板(图 22 (b))、水下黏接剂等水下修补材料(图 22 (c))以及配套的施工工艺<sup>[51]</sup>。

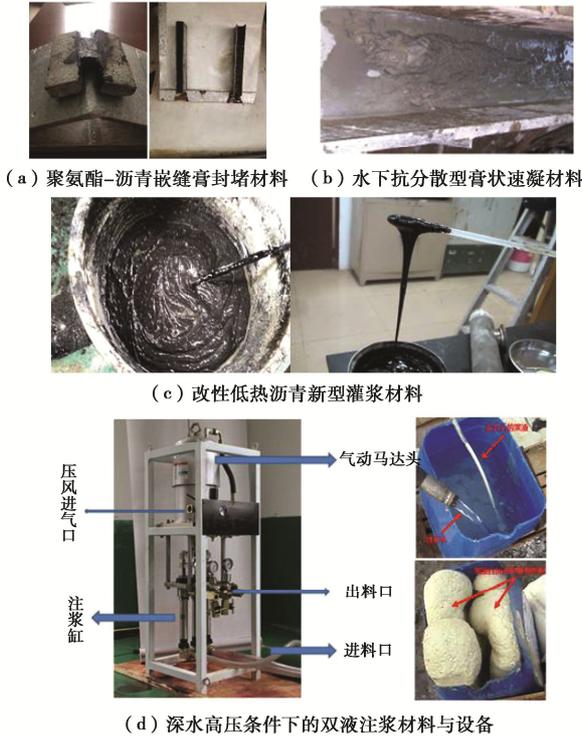


图 20 集中渗漏通道快速封堵材料

Fig. 20 Rapid plugging materials for concentrated leakage channels

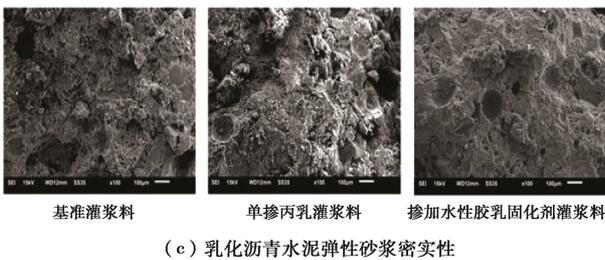
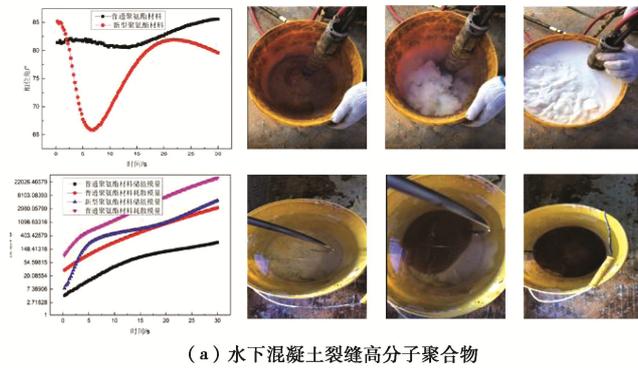


图 21 混凝土裂缝修补材料

Fig. 21 Repair materials for concrete cracks

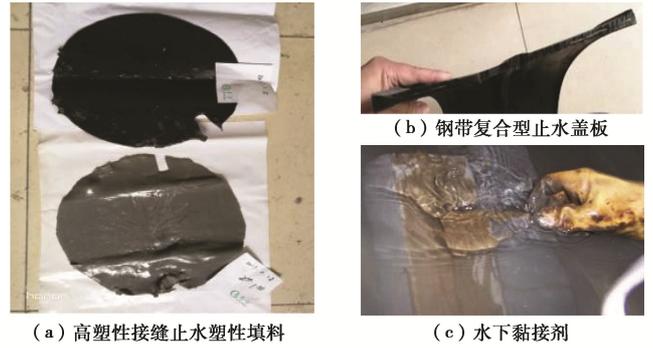


图 22 水下接缝止水失效修复材料

Fig. 22 Repair materials for water-stop failure of underwater joints

“面”为水下混凝土表层缺陷, 研发了水下混凝土防渗涂层(图 23 (a))、柔性碳纤维复合 GB 板材(图 23 (b))等水下修补材料及配套施工工艺<sup>[52]</sup>。

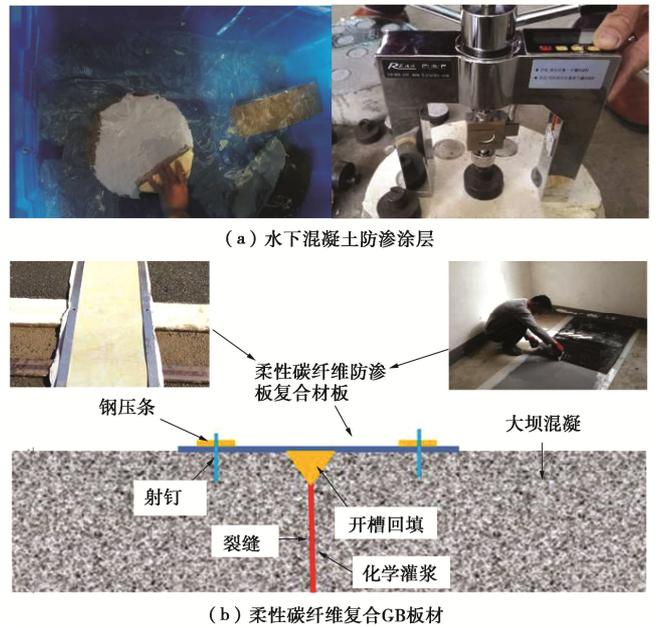


图 23 水下混凝土表层修补材料

Fig. 23 Repair materials for underwater concrete surface

### 2.3 极端条件下大坝应急处置技术

(1) 溃坝洪水对下游影响规律与应急处置技术。开展了溃坝洪水对下游水体影响规律研究, 如图 24 所示, 采用试验及数值模拟方法研究了溃坝洪水在弯道段、河道交汇段、障碍物河段等复杂边界条件下演进规律<sup>[38-39]</sup>, 揭示了上述边界对溃坝洪水水位、流量、峰现时间、壁面压强等参数的定量影响; 并运用模糊层次分析法建立了下游溃坝影响区预警模型<sup>[53]</sup>; 运用动态规划中的最优控制方法, 建立了点线结合型的防洪避难路径优选模型; 运用  $p$ -中位数法对防洪避难安置点进行规划布局, 建立了洪灾应急避难安置点综合评价指标体系与优选的数学模型, 从而形成了预警-撤离-安置全流程应急处置技术, 如图 25 所示。

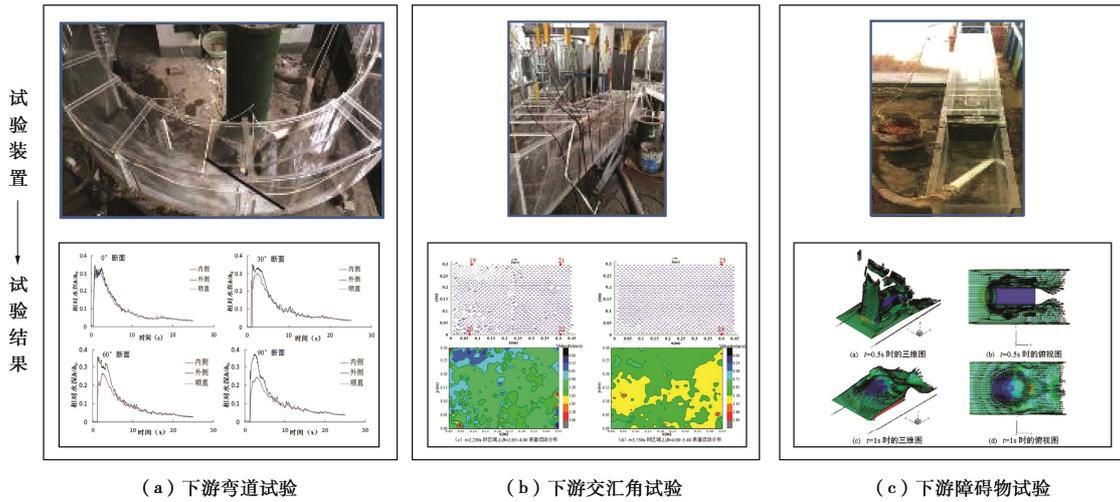
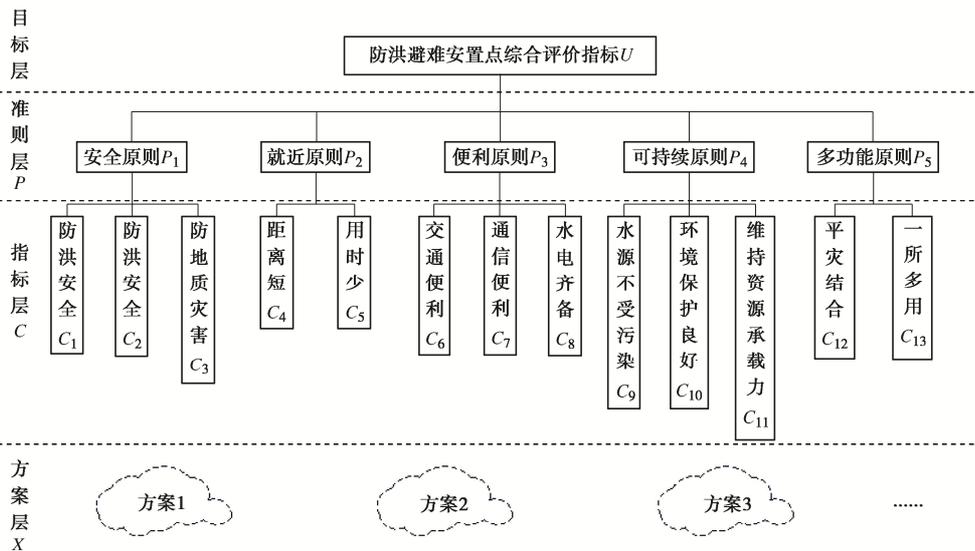
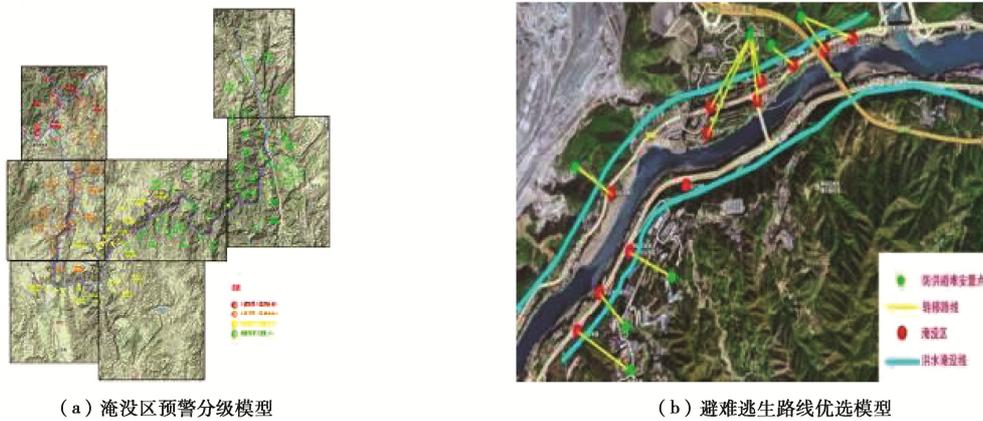


图 24 溃坝洪水对下游影响规律研究  
Fig. 24 Studies on flood routing law of dam break



(c) 应急转移安置点综合评价指标体系  
图 25 预警-撤离-安置全流程应急处置技术

Fig. 25 Emergency treatment technology for whole process of early warning, evacuation and resettlement

(2) 极端条件下大坝应急抢险与损毁快速修复技术。针对面广量大的土石坝，明晰土石接合部主要出险原因和破坏机理，针对局部渗漏、漏洞、接触渗漏

3 种典型高发土石接合部渗漏类型，分别提出了注浆处置方法与工艺（图 26）；通过模型试验模拟了不同缝隙大小、糙率条件下高聚物注浆体填充效果，并改



图 26 土石坝结合部渗漏险情的快速截渗及快凝注浆技术  
Fig. 26 Rapid seepage interception and quick-setting grouting

technology for leakage at joint part of earth-rockfill dams  
进行了导管注浆装置和超薄型防渗体成型装置, 提高了高聚物注浆技术用于土石结合部渗漏处置的适用性。试验结果表明, 集成式高聚物注浆设备集成化高、工作效率显著。提出了极端条件下面板坝破损面板渗漏快速修复技术<sup>[53]</sup>, 包括水下检查及破损部位清理、水上作业平台快速搭建、堵水料制备、水下快速灌注堵水料、堵水料速凝浆液充填灌浆、灌注水下不分散混凝土等系列流程。此外, 形成了坝体渗漏水下应急修复新材料、装备、技术与工艺, 研发了水下渗漏通道自吸式封堵技术(图 27), 有效利用水下渗漏通道入口周边的诱导流场(负压吸力), 使熔化为液态的相变材料能够被吸入渗漏通道中; 在渗漏通道中, 由于脱离热源相变材料又逐渐凝为固态, 从而淤积、堵塞渗水路径, 达到自吸式应急封堵目的<sup>[54-55]</sup>。此外, 选择

石蜡、松香、硬脂酸作为相变堵漏材料, 开展室内封堵水下渗漏通道试验研究(图 28), 对比不同材料的封堵效果, 优选出性能较好的复合相变材料为 8:2 的石蜡-松香复合材料。基于电阻加热和电磁加热原理研制出两类水下渗漏封堵装置, 通过开展水下熔化相变材料的模型试验, 对装置参数进行比选及优化。结果表明, 两类装置均能实现在水下熔化相变材料的功能, 电磁式水下封堵装置熔化效率更高, 更适用于水下渗漏应急封堵<sup>[56]</sup>。

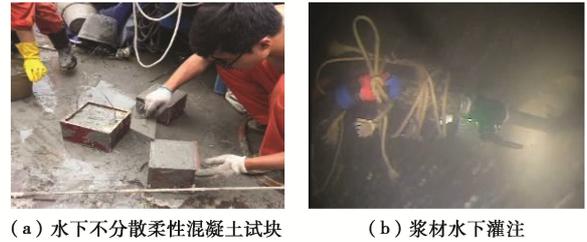


图 27 极端条件下面板坝渗漏快速修复技术  
Fig. 27 Rapid repair technology for leakage of concrete face rockfill dams under extreme conditions

研发了极端条件下溃坝堵口及大坝漫(冲)决时库水疏导应急抢险技术。针对极端条件下溃坝堵口应急抢险难题, 一是研发轻型高强专用装配式堵口网架(图 29), 该网架通过高强纤维丝网前铺挡水材料的方式进行截留, 竖桩和斜撑为主要承载结构。水压力通过网索传递给竖桩, 竖桩桩头通过插入溃口底部将荷载传递至土体, 桩与桩入水以前就相互连接, 提高其抗弯性, 桩生根可以快速安装斜撑与连接桁架, 提高抗倾覆的稳定性, 桩上端与导轨连结, 导轨上面为作业平台。横梁、斜撑桩起到辅助支撑的作用, 专用

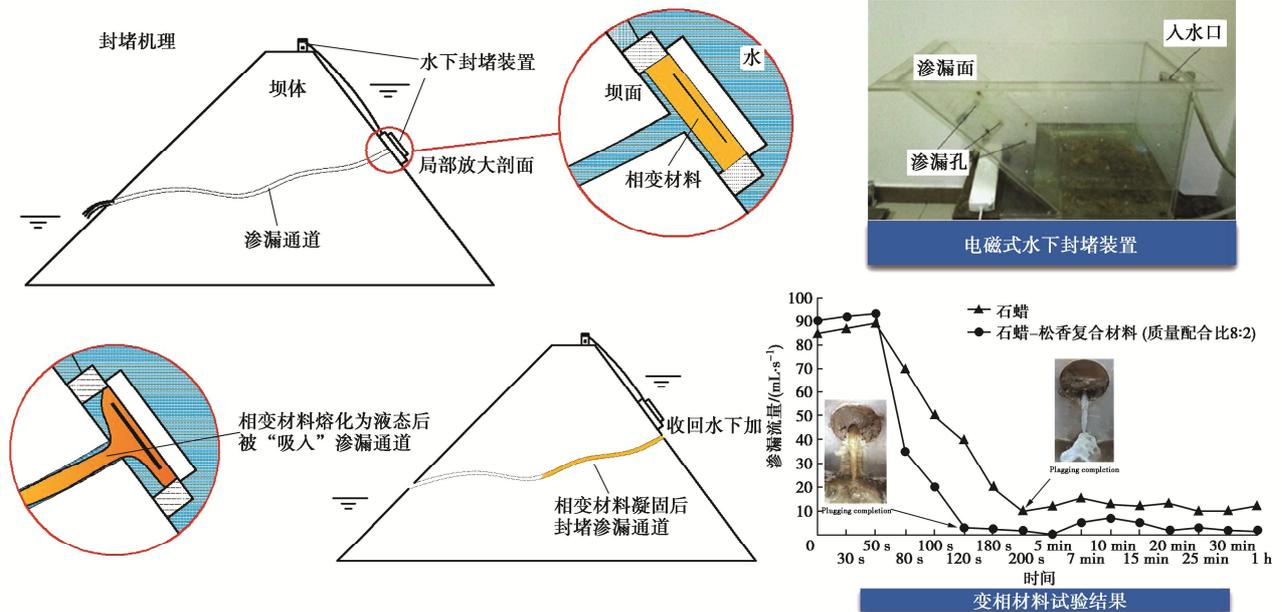


图 28 水下渗漏通道自吸式封堵技术

Fig. 28 Self-priming plugging technology for underwater leakage channels

端盒起到连接的作用。该网架具有体积小、重量轻、易施工、机动性强、抢险劳动强度低等特点。二是研发了堵口专用的可替代块石的新型土壤固化技术，通过碱性激发剂、矿物外加剂、聚电解质类外加剂分别处理水泥土，基于单掺及复掺配伍改良水泥的不同效果，得出外加剂最优复掺配比<sup>[57]</sup>，抗压强度可达 25 MPa，提升达 30%，节约 20% 的水泥用量。

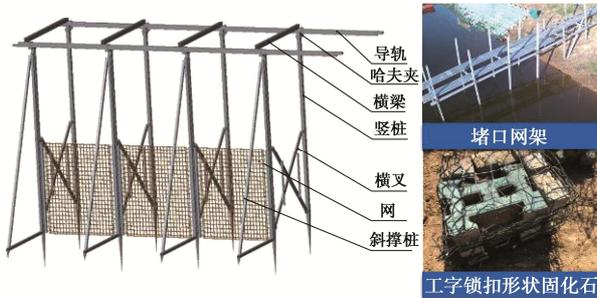


图 29 堵口网架和新型土壤固化剂

Fig. 29 Plugging grid and new soil stabilizer

为避免大坝漫（冲）决险情，研发了库水疏导应急抢险技术，可有效形成大坝“漫而不溃”或者“漫而缓溃”：①研发了下泄洪水通道快速筑岸技术和装备（图 30），该新型组合结构快速筑岸应急抢险技术和装备是解决库水紧急疏导的关键。对高强度塑钢板桩结构性能进行室内试验研究，并在江苏防汛防旱应急抢险试验基地开展溃坝洪水疏导试验，现场溃坝洪水疏导效果显著。②研发了土石坝漫顶过流坡面应急防护材料与抢险修固技术，泄洪防护垫及其应急抢险工艺如图 31 所示，可直接将其铺设在坝体表面过水，有效提高抢险效率。试验表明，泄洪防护垫能够有效保护坝面，提高其抗冲蚀能力。③研发了水泥毯临时坝面过水防护技术（图 32）。该材料是柔性水泥复合材料，采用特种织物缝纫的复合结构，内浸以高延性变性纳米复合特配料，底覆加防渗底衬，仅需浇水即可得需要的形状和强度，施工简单快速，节约人工和材料<sup>[58]</sup>。



图 30 下泄洪水通道快速筑岸技术

Fig. 30 Rapid banking technology for discharging flood channels

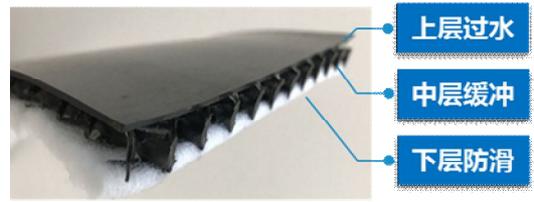


图 31 泄洪防护垫

Fig. 31 Flood protection pad



图 32 水泥毯临时坝面过水防护技术

Fig. 32 Protection technology for temporary overflow of dam surface with cement blanket

### 3 集成示范与推广应用

围绕重大水利工程大坝安全运行与应急管理的实际需求，笔者依托全国重大水利工程高坝大库，建立了大坝安全监测数据管理及分析平台示范工程、大坝深水检测与修补加固装备示范工程、大坝深水检测技术与缺陷修补材料示范工程，以及极端条件下大坝应急监（检）测与早期预警及应急处置技术示范工程。

#### 3.1 大坝安全监测数据管理及分析平台应用示范

大坝安全监测数据管理及分析平台在 10 余座大型工程中示范应用（图 33），能够有效提升大坝安全监测数据管理及资料分析水平。



图 33 安全监测云平台示范应用

Fig. 33 Platform for demonstration application of safety monitoring cloud

#### 3.2 大坝深水检测与修补加固装备示范应用

在水布垭水电站对水下爬行机器人进行现场测试，结果表明：该型机器人可在大坝上游面板上稳定爬行，摄像和照明清晰，性能良好，最大下潜深度 101 m。在隔河岩水电站对水下吸附机器人进行现场测试，

其吸附爬行状态稳定, 最大下潜深度 105 m。在湖南内下水库对基于 ROV 的高清示踪摄像系统进行测试, 示踪效果良好, 腔内颜料可满足约 50 次示踪。

在汤浦面板坝、新安江重力坝和锦屏一级拱坝 3 种坝型开展了“禹龙号”载人潜水器应用示范<sup>[4]</sup>(图 34), 水下单次最长作业时间超过 7 h, 最大下潜深度 200.7 m, 完成坝面巡检、水下示踪、坝面清洗、激光测距等试验, 全面验证了装备技术性能指标, 创造了中国内河水域载人下潜作业新纪录, 同时也表明“禹龙号”在高坝大库中具有良好的大深度检测能力。



图 34 大坝深水检测修补“禹龙号”潜水器与加固平台示范应用

Fig. 34 Platform for demonstration application of deep-water inspection and repair submersible and reinforcement of dams

SSYA600 型和 SSYA1000 型深水大粒径清淤疏浚技术设备示范应用于三峡、枕头坝、龙口等重大水利工程。SSYA600 型清淤系统完成了在水深超过 115 m 条件下的清淤作业, 清淤系统运行良好, 能够连续、稳定地进行清淤作业, 系统最大清淤能力超 500 m<sup>3</sup>/h。SSYA1000 型清淤系统克服了水流流速大、淤积物漂石含量高、漂石粒径大、淤积物料板结、水深变幅大、现场通航条件差等困难, 疏浚块石最大粒径 920 mm, 重量达 550 kg, 适应最大流速 5 m/s。

水下机器人“达诺 1 号”在小浪底水利枢纽工程进行了联合调试、布放回收演练(图 35 (a)), 进水塔内清淤及坝前淤积区域行走清淤示范, 达到了预期目标。在乌东德水电站坝后百米级水深水垫塘开展闸门爆破切割技术示范应用(图 35 (b)), 顺利完成了深水环境 25 mm 厚预置钢板安全爆破、精准切割任务。从回收的钢板来看切割面平整, 较好实现预设形状的切割。在云南文山马鹿塘二期工程放空洞内进行了疏堵应用(图 35 (c)), 该水电站清淤工程水深大、方量大、淤积物组成复杂, 清淤难度极大。示范结果显示, 达诺 1 号能够适应洞口复杂边界条件, 通过模块化设计的功能头换装成清淤耙, 抵达洞口部位打开了关键淤堵区域, 使得洞室全线贯通, 为后续开闸冲

砂创造了条件。

### 3.3 大坝深水检测技术与缺陷修补材料示范

深水环境大坝缺陷修补材料与技术金沙江观音岩水电站得以成功应用, 该工程大坝上游面水下水平层间缝处理(图 36 (a)), 对混凝土裂缝及廊道渗漏, 在坝前进行水下缺陷修复处理, 缺陷部位最大水深 120 m。对水平层间缝拟采用柔性碳纤维复合 GB 板材封堵, 同时结合水下补强化学灌浆的方案处理。通过现场检查, 柔性碳纤维复合 GB 板对水下裂缝修补效果显著。此外, 在万家口水电站导流洞涌水处理(图 36 (b))、响水涧抽水蓄能电站上库水下面板缺陷修复、泰安抽水蓄能电站上库水下面板缺陷修复等工程应用, 修补效果良好(图 36 (c), (d))。

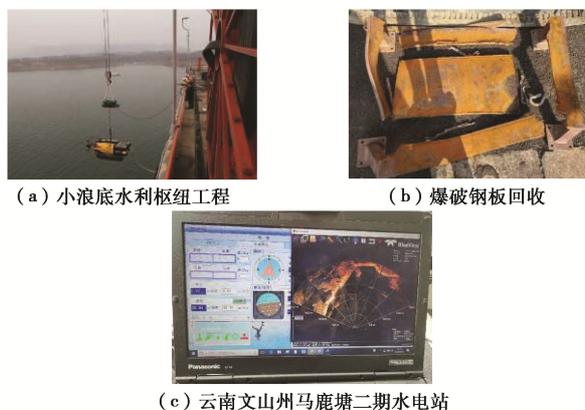


图 35 深孔泄水建筑物疏堵与闸门修复技术及装备示范应用  
Fig. 35 Demonstration application of technology and equipments for dredging and repairing gates of deep-hole discharge structures

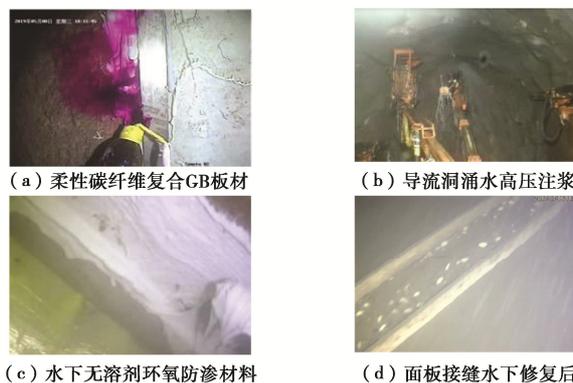


图 36 深水环境大坝缺陷修补材料示范应用  
Fig. 36 Demonstration application of defect repair materials for dams in deep water

### 3.4 极端条件下大坝应急监(检)测与处置技术

突发事件无人机巡检技术在观音阁水库库区大坝巡检中应用(图 37 (a)), 基于无人图像的大坝三维数字化模型重建技术成功应用于茆窝水库。无人机巡检技术和三维数字化模型重建技术的应用, 实现了

库区、主要水库建筑物、库区下游等数字化和自动监测,显著提高了水库运行管理现代化水平,极大增强了水库突发事件处理能力。渗流多参数传感器在大溪水库渗漏监测中得到成功应用(图 37 (b)),实现了渗水量、水质(PH)、水温、浊度等多参数同步测量,为监控大坝安全运行提供了监测数据,推广前景广阔。

极端条件下虹吸式管道水库应急排水技术应用于花果山水库防汛工作(图 38 (a)),成功应对 2019 年“8·02”强降雨,排水效果显著,确保了水库安全度汛。极端条件下面板坝渗漏快速修复技术应用于蓼叶水库(图 38 (b)),结果表明大坝渗漏量明显降低,应急处理成效显著,保障了大坝安全运行。土壤快速固化技术及装备应用于南京水利科学研究院太湖基地、当涂基地以及江苏省防汛防旱抢险中心(图 38 (c)),实施效果表明基于 NX 型固化剂所生产的固化石对于堤防护岸具有良好适用性,一定程度降低了防汛工程对于天然石料的依赖。大坝渗漏水下浇筑修补材料应用于白云水库面板堆石坝加固(图 38 (d))。

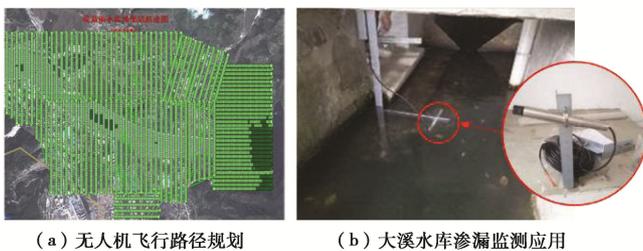


图 37 大坝突发事件应急监测与隐患快速探测技术示范应用  
Fig. 37 Demonstration application of technologies for emergency monitoring of dams and rapid detection of hidden dangers

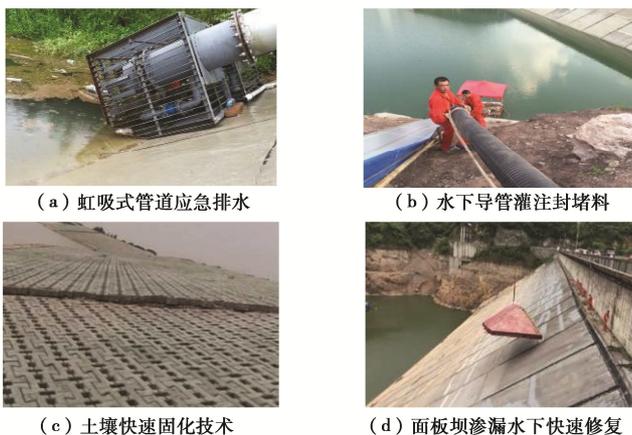


图 38 极端条件下大坝应急抢险与损毁快速修复技术示范应用  
Fig. 38 Demonstration application of emergency rescue and damage quick repair technology of dams under extreme conditions

## 4 结 论

本文综述了国家“十三五”重点研发计划项目“重

大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置”最新的科研成果,这些成果有力推动了相关领域科技进步,具体体现在:

(1) 应用基础研究方面,提出了非常规条件下大坝结构性态分析理论方法,建立了多源信息融合诊断方法、灾变环境耦合人因的溃坝事故控制方法、极端条件下大坝溃坝风险预警与调控方法等极端条件下大坝安全诊断与风险控制理论与方法;建立了基于洪水淹没致灾后果仿真与应急决策系统动力学方法、突发事件应急处置效果评价指标与评估方法等大坝失事早期预警标准与应急响应机制及处置效果评估方法。

(2) 关键技术装备研发方面,研发了大坝陡斜坡坝面爬行和垂直坝面非接触吸附渗漏检测机器人平台,填补了高坝深水微渗漏声呐探测设备空白;自主研发了大坝深水检测载人潜水器“禹龙号”成套技术装备,实现了高坝大库载人深水检测装备从 0 到 1 的突破;研发了深水大粒径清淤装备,以及集水下检查、清理淤积、疏通封堵等功能的水下机器人达诺 1 号成套装备和坝深孔门前清淤成套技术;研发了混凝土坝裂缝高分辨率监测技术和渗漏观测系统;研发了水-陆-空立体联合和机械化抢险成套技术、坝顶溢流应急护面和下泄洪水通道快速筑岸技术装备。建议进一步拓展深水检测装备作业能力,并集成深水检测与应急抢险关键技术装备与应急处置材料工艺技术体系。

(3) 材料与施工工艺研发方面,研发了堵口专用的人造石新材料和工艺设备,研发了水下快速堵漏、水下裂缝修复、水下接缝失效修复、水下混凝土表层修补、水下金属结构表面涂装等新材料及施工工艺;研发了不同坝型渗漏水下应急修复、泄洪建筑物应急封堵、泄洪建筑物损毁应急修复等新材料及施工工艺。

(4) 系统与平台研发方面,研发了大坝安全监测数据管理及分析云服务平台;基于洪水淹没致灾后果仿真与应急决策系统动力学模型,研发了应急决策支持平台;研发了流速矢量可视化平台和基于 ROV 水下高清示踪系统;研发了基于情景模拟的水库大坝应急监测预警系统。

致 谢: 在此谨对参加重点研发计划(2016YFC0401600)的有关单位及科研人员表示感谢。

## 参考文献:

- [1] 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 of the People's Republic of China. 2019 Statistic Bulletin on China Water Activities[M]. Beijing: China Water

- & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [2] 陈生水. 新形势下中国水库大坝安全管理问题与对策[J]. 中国水利, 2020(22): 1-3. (CHEN Shengshui. Issues and countermeasures of safety management of reservoir dams under new situation in China[J]. China Water Resources, 2020(22): 1-3. (in Chinese))
- [3] 中国工程院全球工程前沿项目组. 全球工程前沿-2020[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020. (Global Engineering Frontier Project Team of Chinese Academy of Engineering. Global Engineering Frontier- 2020[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020. (in Chinese))
- [4] XIANG Y, SHENG J B, WANG L, et al. Research progresses on equipment technologies used in safety inspection, repair, and reinforcement for deepwater dams[J]. Science China Technological Sciences, 2022, **65**(5): 1059-1071.
- [5] 盛金保, 厉丹丹, 蔡 尊, 等. 大坝风险评估与管理关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, **48**(10): 1057-1067. (SHENG Jinbao, LI Dandan, CAI Qian, et al. Research progress and its practice of key techniques for dam risk assessment and management[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, **48**(10): 1057-1067. (in Chinese))
- [6] 张建云, 向 衍. 气候变化对水利工程安全影响分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, **48**(10): 1031-1039. (ZHANG Jianyun, XIANG Yan. Analysis on the impact of climate change on the water conservancy project safety[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, **48**(10): 1031-1039. (in Chinese))
- [7] 赵二峰. 混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (ZHAO Erfeng. Multi-Scale Analysis Theory and Its Application for Safety Monitoring of Concrete Dams in Service[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))
- [8] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, **49**(1): 26-35. (GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(1): 26-35. (in Chinese))
- [9] HUANG X, ZHENG D, YANG M, et al. Displacement aging component-based stability analysis for the concrete dam[J]. Geomechanics and engineering, 2018, **14**(3): 241-246.
- [10] 刘 智, 赵兰浩, 吴晓彬, 等. 循环荷载下考虑滞回效应的混凝土损伤模型[J]. 工程科学与技术, 2020, **52**(4): 117-123. (LIU Zhi, ZHAO Lanhao, WU Xiaobin, et al. Damage model of concrete considering hysteretic effect under cyclic loading[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, **52**(4): 117-123. (in Chinese))
- [11] LIN C N, LI T C, LIU X Q, et al. A deformation separation method for gravity dam body and foundation based on the observed displacements[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, **26**(2): e2304.
- [12] 李凌霄, 刘晓青. 基于分区有限元与块体界面元混合法的强度折减边坡稳定分析法[J]. 水电能源科学, 2019, **37**(1): 123-126. (LI Lingxia, LIU Xiaoqing. Slope stability analysis using strength reduction method based on hybrid interface boundary elements and partitioned finite elements[J]. Water Resources and Power, 2019, **37**(1): 123-126. (in Chinese))
- [13] 李子阳, 郭 丽, 马福恒, 等. 基于统计诊断的大坝监测数据合理性检验[J]. 水利水电科技进展, 2018, **38**(5): 71-75. (LI Ziyang, GUO Li, MA Fuheng, et al. Rationality test of dam monitoring data based on statistical diagnosis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, **38**(5): 71-75. (in Chinese))
- [14] 鞠向阳, 张戈平, 郭海亮, 等. 监测传感器绝缘情况对人工测读和自动化测读的影响分析[C]// 中国水利学会 2019 学术年会论文集, 第五分册, 宜昌, 2019: 392-396. (JU Xiangyang, ZHANG Geping, GUO Hailiang, et al. Analysis of the impact of monitoring sensor insulation on manual and automated readings[C]// Proceedings of the 2019 Chinese Hydraulic Engineering Society Annual Conference, Volume V, YiChang, 2019: 392-396. (in Chinese))
- [15] 王士军, 张国栋, 葛从兵. 水库大坝安全监控与信息化[M]. 南京: 河海大学出版社, 2019. (WANG Shijun, ZHANG Guodong, GE Congbing. Reservoir Dam Safety Surveillance and Informationalization[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2019. (in Chinese))
- [16] 王士军, 谷艳昌, 吴云星, 等. 基于风险的大坝安全监测理念及应用[J]. 中国水利, 2018(20): 20-22, 53. (WANG Shijun, GU Yanchang, WU Yunxing, et al. Risk-based dam safety monitoring: concepts and applications[J]. China Water Resources, 2018(20): 20-22, 53. (in Chinese))
- [17] 牛广利, 李天旻, 何 亮, 等. 大坝安全监测云服务系统的研发与应用[J]. 中国水利, 2018(20): 42-45. (NIU Guangli, LI Tianyang, HE Liang, et al. Development and application of dam safety monitoring cloud service system[J]. China Water Resources, 2018(20): 42-45. (in Chinese))
- [18] HU C, ZHENG H K, ZHOU W, et al. Numerical simulation

- of the reinforcement effect of rock bolts in granular mixtures[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, **23**(7): 807-830.
- [19] 谭界雄, 田金章, 王秘学. 水下机器人技术现状及在水利行业的应用前景[J]. *中国水利*, 2018(12): 33-36. (TAN Jiexiong, TIAN Jinzhang, WANG Mixue. Future application of underwater robots in water sector and its technology status[J]. *China Water Resources*, 2018(12): 33-36. (in Chinese))
- [20] LIU X D, CHEN R, XUE Z F, et al. Design and optimization of a novel swirling sucker for underwater wall-climbing robots[C]// 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Munich, Germany, IEEE, 2018: 1000-1005.
- [21] XIANG Y, SHEN G Z, CHENG Z F, et al. Study on sound wave scattering effects of different markers placed on dam face in deepwater reservoir[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019(3): 1-9.
- [22] 王磊, 姜磊, 马利斌, 等. 载人潜水器在高坝水库领域应用的关键技术[J]. *中国水运(下半月)*, 2019, **19**(8): 17-18, 110. (WANG Lei, JIANG Lei, MA Libin, et al. Key technology of manned submersible in gaoba reservoir[J]. *China Water Transport*, 2019, **19**(8): 17-18, 110. (in Chinese))
- [23] YANG L L, LI Z J, XIONG H Y. Extended state-observer-based sliding mode control for unmatched uncertainty[M]// *Control, Mechatronics and Automation Technology*. CRC Press, 2015: 65-70.
- [24] LIU Z W, JIA J S, ZHENG C Y, et al. Application of Pneumatic Desilting Technology in Zhentou Dam-I Hydropower Station[C]// 2020 International Conference on Ecological Resources, Energy, Construction, Transportation and Materials, 2020.
- [25] 江超, 盛金保, 朱沁夏, 等. 中国水库深孔泄水建筑物统计与闸门前堆积物现状调研分析[J]. *中国水利*, 2018(12): 37-39. (JIANG Chao, SHENG Jinbao, ZHU Qinxia, et al. Statistics of deep-hole discharge structures in China and investigations on wastes accumulated at gates[J]. *China Water Resources*, 2018(12): 37-39. (in Chinese))
- [26] JIANG C, WEI G L, FAN L R, et al. Study on sedimentation characteristics and reduction measures of Bajiazui reservoir[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **455**(1): 012188.
- [27] 孙志恒, 李萌. 单组分聚脲在水工混凝土缺陷修补及防护中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (SUN Zhiheng, LI Meng. *Application of One-Component Polyurea in Defect Repair and Protection of Hydraulic Concrete*[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [28] DOU S Q, LI J J, KANG F. Parameter identification of concrete dams using swarm intelligence algorithm[J]. *Engineering Computations*, 2017, **34**(7): 2358-2378.
- [29] 王琳琳, 李俊杰, 康飞, 等. 基于无人机图像拼接技术的大坝健康监测方法[J]. *人民长江*, 2021, **52**(12): 236-240. (WANG Linlin, LI Junjie, KANG Fei, et al. Dam health monitoring method based on image mosaic technology of Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Yangtze River*, 2021, **52**(12): 236-240. (in Chinese))
- [30] KANG F, LI J J, ZHAO S Z, et al. Structural health monitoring of concrete dams using long-term air temperature for thermal effect simulation[J]. *Engineering Structures*, 2019, **180**: 642-653.
- [31] KANG F, LI J J, DAI J H. Prediction of long-term temperature effect in structural health monitoring of concrete dams using support vector machines with Jaya optimizer and salp swarm algorithms[J]. *Advances in Engineering Software*, 2019, **131**: 60-76.
- [32] 徐建国, 张春宇, 王博, 等. 高密度电法在土质堤坝高聚物防渗墙检测中的应用研究[J]. *水利水电技术*, 2018, **49**(12): 72-79. (XU Jianguo, ZHANG Chunyu, WANG Bo, et al. Study on application of high-density electrical method to detection of high polymer cutoff wall in earthfill embankment[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, **49**(12): 72-79. (in Chinese))
- [33] 徐建国, 方姝, 王博, 等. 高聚物防渗墙土石坝及其应力场与渗流场耦合分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, **15**(4): 1-5. (XU Jianguo, FANG Shu, WANG Bo, et al. Seepage field and stress field coupling analysis of dam with polymer anti-seepage wall[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2017, **15**(4): 1-5. (in Chinese))
- [34] 徐建国, 陈志豪, 王壬. 埋地排水管道高聚物注浆修复受力特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(1): 121-129. (XU Jianguo, CHEN Zhihao, WANG Ren. Mechanical characteristics of buried drainage pipes repaired by polymer grouting technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(1): 121-129. (in Chinese))
- [35] SHEN G Z, SHENG J B, XIANG Y, et al. Numerical modeling of overtopping-induced breach of landslide dams[J].

- Natural Hazards Review, 2020, **21**(2): 04020002.
- [36] 孟颖, 唐玲玲. 考虑致灾后果的溃坝洪水风险评估与等级划分[J]. 长江科学院院报, 2022, **39**(10): 61-65, 96. (MENG Ying, TANG Lingling. Risk assessment and rating of dam-break flood in consideration of disaster consequences[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, **39**(10): 61-65, 96. (in Chinese))
- [37] 周志维, 马秀峰. 基于F-ANP法的大坝风险评价与管理技术研究[J]. 中国水利, 2021(4): 41-44. (ZHOU Zhiwei, MA Xiufeng. Research on dam risk assessment and management technology based on F-ANP method[J]. China Water Resources, 2021(4): 41-44. (in Chinese))
- [38] CHEN S H, LI Y J, TIAN Z, et al. On dam-break flow routing in confluent channels[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(22): 4384.
- [39] TIAN Z, DING C, WANG W, et al. Supercritical flow in bend with variable curvature radius[J]. Journal of Hydraulic Research, 2019, **57**(5): 724-732.
- [40] FAN Q, TIAN Z, WANG W. Study on risk assessment and early warning of flood-affected areas when a dam break occurs in a mountain river[J]. Water, 2018, **10**(10): 1369.
- [41] TIAN Z, WANG W, BAI R D, et al. Effect of flaring gate piers on discharge coefficient for finite crest-length weirs[J]. Water, 2018, **10**(10): 1349.
- [42] 蔡 蓁, 王昭升, 朱思宇, 等. 土石坝风险实时评估与综合预警模型[J]. 水利水电科技进展, 2018, **38**(4): 57-63. (CAI Qian, WANG Zhaosheng, ZHU Siyu, et al. A real-time risk assessment and synthetical early warning model of earth and rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, **38**(4): 57-63. (in Chinese))
- [43] XIANG Y, FU S Y, ZHU K, et al. Seepage safety monitoring model for an earth rock dam under influence of high-impact typhoons based on particle swarm optimization algorithm[J]. Water Science and Engineering, 2017, **10**(1): 70-77.
- [44] 胡盛斌, 杜国平, 徐国元, 等. 基于能量测量的声呐渗流矢量法及其应用[J]. 岩土力学, 2020, **41**(6): 2143-2154. (HU Shengbin, DU Guoping, XU Guoyuan, et al. Sonar seepage vector method based on energy measurement and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(6): 2143-2154. (in Chinese))
- [45] 田金章, 查志成, 王秘学, 等. 视声一体化渗漏探测技术在面板坝渗漏检测中的应用[J]. 水电能源科学, 2019, **37**(1): 88-90. (TIAN Jinzhang, ZHA Zhicheng, WANG Mixue, et al. Application of video and sonar integrated leakage detection technology in concrete faced dam leakage detection[J]. Water Resources and Power, 2019, **37**(1): 88-90. (in Chinese))
- [46] LI P, TANG J H, CHEN X D, et al. Effect of temperature and pH on early hydration rate and apparent activation energy of alkali-activated slag[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019: 1-13.
- [47] 张 丰, 白 银, 蔡跃波, 等. 低温养护下溴化锂对水泥早期水化的影响[J]. 水利学报, 2019, **50**(4): 506-515. (ZHANG Feng, BAI Yin, CAI Yuebo, et al. Effect of lithium bromide on early hydration process of cement at low temperature[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(4): 506-515. (in Chinese))
- [48] 范成文, 白 银, 李 平. 快硬硫铝酸盐水泥基封堵材料早期性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 30-35. (FAN Chengwen, BAI Yin, LI Ping. Study on early performance of rapid hardening sulphoaluminate cement-based sealing material[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(2): 30-35. (in Chinese))
- [49] 王钰轲, 黄文清, 万永帅, 等. 不同初始状态软黏土在主应力轴耦合旋转下的孔压及3维变形规律[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(2): 84-94. (WANG Yuke, HUANG Wenqing, WAN Yongshuai, et al. Generation of pore pressure and three-dimensional deformation behavior of soft clay with different initial state under combined principal stress rotation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(2): 84-94. (in Chinese))
- [50] 张曦君, 王超杰, 田 晗, 等. 深水大坝裂缝修复型聚氨酯注浆材料的性能研究[J]. 中国建筑防水, 2021(3): 47-51, 61. (ZHANG Xijun, WANG Chaojie, TIAN Han, et al. Performance study on crack repairing polyurethane grouting material for deep-water dam[J]. China Building Waterproofing, 2021(3): 47-51, 61. (in Chinese))
- [51] 孙志恒, 徐 耀. 深水环境大坝缺陷修补材料与工程应用[M]. 北京: 中国三峡出版社, 2019. (SUN Zhiheng, XU Yao. Repairing Materials of Dam Defects in Deep Water Environment and Engineering Application[M]. Beijing: China Three Gorges Publishing House, 2019. (in Chinese))
- [52] KANG F, LIU J, LI J J, et al. Concrete Dam deformation prediction model for health monitoring based on extreme learning machine[J]. Structural Control and Health

- Monitoring, 2017, **24**(10): e1997.
- [53] 周晓明, 田金章, 查志成. 面板堆石坝水下应急加固技术及应用[J]. 人民长江, 2018, **49**(增刊 1): 189-191. (ZHOU Xiaoming, TIAN Jinzhang, ZHA Zhicheng. Underwater emergency reinforcement technology and its application for rock fill dam with face slab[J]. Yangtze River, 2018, **49**(S1): 189-191. (in Chinese))
- [54] 张盛行, 汤雷, 贾宇, 等. 相变材料水下自吸式堵漏状态试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 54-61. (ZHANG Shenghang, TANG Lei, JIA Yu, et al. Experimental study on underwater self-priming plugging state of phase change materials[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 54-61. (in Chinese))
- [55] 张盛行, 汤雷, 贾宇, 等. 复合相变材料性能调配及在应急堵漏中的应用[J]. 建筑材料学报, 2020, **23**(6): 1496-1503. (ZHANG Shenghang, TANG Lei, JIA Yu, et al. Properties of composite phase transition material and its application in underwater emergency plugging test[J]. Journal of Building Materials, 2020, **23**(6): 1496-1503. (in Chinese))
- [56] 郭丽萍, 陈波, 孙伟, 等. 修补用高延性水泥基复合材料性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, **39**(7): 169-174. (GUO Liping, CHEN Bo, SUN Wei, et al. Properties of high ductility cementitious composites for repair[J]. Journal of Building Structures, 2018, **39**(7): 169-174. (in Chinese))
- [57] XU F, WEI H, QIAN W X, et al. Mechanical and thermal behaviour of cemented soil with the addition of ionic soil stabilizer[M]// Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Cham: Springer International Publishing, 2018: 866-869.
- [58] 何旻, 钱文勋, 张燕迟, 等. 高速水流下空蚀热效应对水泥水化产物的破坏[J]. 材料导报, 2018, **32**(24): 4281-4285. (HE Yang, QIAN Wenxun, ZHANG Yanchi, et al. Thermal effect on the failure of cement hydration products under high velocity flow cavitation[J]. Materials Review, 2018, **32**(24): 4281-4285. (in Chinese))

### 第三届全国软土工程学术会议（三号通知）

近年来, 随着我国城市化进程快速推进, 重大基础设施建设与日俱新, 特别是长三角、珠三角等东南沿海地区, 作为我国经济发展的重要区域, 已经形成了大规模城市群, 基础设施建设需求日趋增长。由于沿海地区广泛分布的软土地层具有力学特性复杂、承载力低、变形大等特点, 在软土地区进行路堤、基坑、隧道和基础工程等构筑物的建设和运营面临着前所未有的机遇和挑战。

为加强全国各地的软土工程科技工作者之间的学术交流, 促进软土工程学科的最新研究进展、研究成果以及发展趋势的总结和展示, 由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办, 东南大学、江苏省岩土力学与工程学会承办的第三届全国软土工程学术会议将于2023年3月24—26日在江苏南京召开。此次会议将为深化软土地区重大基础设施建设与运营领域的创新理论及应用技术研究, 为我国城市化进程和可持续发展提供重要支撑。全国各地软土工程专家学者将欢聚一堂, 以“软土工程智能建造”为主题, 针对重大软土工程问题、软土工程新理论、新技术以及学科发展进行研讨。

会议将为学者和同行面对面深入广泛的学术交流研讨提供机会, 通过大会特邀报告、主题报告、分组报告、研究生专场报告等形式, 共同探讨土力学与软土工程学科的发展趋

势, 展现最新研究进展和成果。大家共享新思想, 激发新思维, 拓宽新视野, 进一步推动我国在软土工程的理论和工程实践等方面的进程, 促进我国软土工程领域的可持续发展。

诚邀土力学与软土工程领域的专家、学者和工程技术人员, 一起携手, 共襄盛会!

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

**承办单位:** 东南大学; 江苏省岩土力学与工程学会

**会议时间:** 2023年3月24—26日(24日报到)

**会议地点:** 南京金鹰尚美酒店。

**会议主题:** ①软土的基本特性与本构模型; ②软土工程勘察、测试与智能评价; ③软土地基处理创新与智能化施工; ④软土基础工程; ⑤软土地下工程; ⑥软土动力学与地震工程; ⑦软土工程数值仿真与信息化技术; ⑧绿色软土工程; ⑨软土地区重大工程实践; ⑩软土工程的其他问题。

**会议秘书处及联系方式:** 秘书长: 章定文 13813065390, 秘书处: 何欢 16620816392, 李宏 13951812136, 李梦迪 18910541910, 姜彤 13810553598, 联系地址: 南京市江宁区东南大学路2号东南大学交通学院, 邮编: 211189, 邮箱: softsoilseu@163.com。

(会议组委会)