

泵闸水利工程数字孪生安全模型研究与应用

曹永勇^{1,2}, 袁程³, 屈永倩⁴, 熊冰³

[1.上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市200336; 2.上海城投航道建设有限公司,上海市200441;
3.同济大学,上海市200092; 4.大连理工大学,辽宁大连116081]

摘要:为提升国家水安全保障能力,致力于智慧水利建设与数字孪生流域建设,围绕“预报、预演、预警、预案”的“四预”系统,对复杂周边环境大型河口泵闸工程堤坝、基坑和外围堰工程进行科学计算与安全分析。依托智能化模拟、数据库建设以及数字化、智能化、网络化,构建具有“四预”功能的智慧水利系统,实现对风险的早期发现与管理。研究成果包括86组堤坝与基坑工程及43组外围堰工程的子数据库,构成智慧水利的核心,赋能精准地预报、快速地预警、前瞻地预演和细化地预案。“四预”体系以天、空、地一体化多元水利感知网为基础,实时与安全模型的科学计算相结合,制定灾害态势的时空阈值,为预警提供先机,为启动预演提供指引,为预案制定提供数据支撑,实现预报的先时筹备、预警的实时战备、预演的全时防备三位一体化预案体系,为水安全管理提供了强有力的技术支持。

关键词:泵闸水利工程;数字孪生;安全模型

中图分类号: TP183; TU312.1 **文献标志码:** A

文章编号: 1009-7716(2024)08-0105-06

0 引言

水利工程是城市基础设施的重要组成部分,其运行安全直接关系到城市的持续发展和居民生命财产的安全^[1-2]。随着环境的快速变化和突发事件的频发,传统的水利工程管理方法,依赖定期巡查和基于经验的决策,已经不能满足当前的需求^[3-4]。因此,开发一套基于信息技术的智能水利管理系统对于实现水利工程的实时监控、分析和管理的至关重要,这对于提高全国水安全保障水平具有重大的现实意义^[5]。

在智能水利管理系统中,科学计算与安全模型的建立是确保水利工程稳定性和安全性的基石^[6-7]。通过运用先进的有限元计算方法,系统能够在虚拟环境中模拟水利工程结构的物理响应,对不同工况下的应力、变形进行精确分析^[8]。这些计算方法结合实际的工程参数和材料特性,可以预测工程结构在自然力如水压、泥石流、地震等因素作用下的行为。安全模型融入了结构力学、水文学和环境工程等多学科的理论,为工程安全评估提供了严谨的理论依据。通过这些模型,工程师能够识别潜在的薄弱环节,

及时进行加固或维修,预防可能发生的灾害,确保工程安全。

数据反演技术在智能水利管理系统中扮演着关键角色,其允许工程师从有限的监测数据中提取出更多的工程状态信息^[9-10]。通过对监测数据的深入分析,系统可以反推出工程结构的内部状态,如裂缝发展、渗流变化等,这些信息对于评估工程的健康状况至关重要。构建的子数据库不仅储存了历史和实时数据,还包括了通过数据反演得到的工程状态评估结果^[11]。这个高度精细化的子数据库使得水利工程的监测从静态、片面的数据记录转变为动态、全面的健康诊断,为工程的长期运行提供了科学的数据支撑^[12]。

数字孪生技术是将物理实体通过数字化手段在虚拟空间中创建一个动态的模型,这一模型能够实时反映实体的状态和行为^[13-14]。在水利工程管理中,数字孪生技术是虚拟与现实之间的桥梁^[15]。通过收集工程的运行数据,系统能够在虚拟模型中实时更新状态,模拟出工程在不同情况下的行为和反应;模拟仿真功能则通过数字孪生模型,进行灾害情景的预演,如洪水冲刷、泄洪、水库溃坝等。这些仿真帮助决策者理解在特定情况下可能发生的事件序列,评估应对措施的有效性,优化应急预案。数字孪生与模拟仿真技术的应用,显著提高了水利工程应对突发事件的能

收稿日期:2023-10-19

作者简介:曹永勇(1987—),男,博士,高级工程师,从事航道、水运和港口工程相关科研、建设管理工作。

力,增强了预测和预防灾害的主动性。

本文旨在设计一种智能化水利工程管理系统——“四预”系统,通过实现对水利工程全过程的动态监控与实时分析,达到精准预测、快速预警、有效预演和周密预案的目的。这一系统的实施将极大提升水利工程管理的科学性、主动性和针对性,对于提高我国水利工程应对复杂多变环境的能力,以及减少因灾害引起的经济损失和人员伤亡具有重大的现实和理论价值。

1 四预数字孪生系统

数字孪生技术利用精确的物理模型、实时传感器数据以及预先构建的先验数据库,综合形成一个多维动态数字化副本^[16-17]。这一副本在虚拟空间中精确映射并模拟了物理实体在其生命周期内的全部状态和行为。先验数据库为数字孪生提供了丰富的背景知识和行为模式,增强了其预测和分析能力。通过这种方式,数字孪生成为了一个强有力的工具,不仅能够实时监控和反映实体的即时状态,还能够基于历史和先验知识进行深入地数据分析和行为预测。这使得数字孪生在设计、测试、维护和决策支持等各个环节中,能够提供高度精准的指导和优化策略,极大地提升了实体管理的效率和智能化水平。

1.1 四预概念

水利部将印发水利业务“四预”功能的基本技术要求,以加速构建以“2+N”业务体系为核心的“四预”功能智能业务框架,进一步推进我国智慧水利建设^[18-19]。在这一框架下,未来中国智慧水利建设的逻辑逐渐清晰:首先,将构建数字孪生流域和水利工程;其次,将打造以“预报、预演、预警、预案”为核心的“四预”业务应用体系。

在这一过程中,本文将专注于水利工程的“四预”系统,展开堤坝、基坑以及外围堰工程安全模型的科学计算与安全分析。通过智能化模拟、数据库建设和数字化、智能化、网络化的手段,构建出具备“四预”功能的智慧水利系统。该系统通过实时传感器数据与安全模型计算的融合,实现环境风险与建构筑物安全风险的预测与预警;通过预设极端灾害荷载与安全模型推演地融合,实现灾害荷载效应数据库指导地预演与预案,从而为全面增强国家水安全保障能力提供坚实的技术基础。未来,这些技术和系统的实施将谱写我国智慧水利的新篇章,确保水资源的高效管理和灾害风险的最小化。

1.2 系统开发集成

在现代水利工程管理中,利用数字孪生技术结合高级数据可视化手段对于提升水利系统的智能化和响应能力至关重要^[20]。本研究开发的四预数字孪生系统采用 Python 语言作为后端服务开发的主干,集成了 FastAPI 和 Uvicore 框架,以及面向切片设计模式和分层架构,以高效处理并返回数据。使用 MySQL 数据库进行数据存储,后端不仅能够处理传感器采集的数据,进行清洗和存储,而且通过生成 RESTful API 与前端进行交互。

前端应用则由 Vue.js 负责构建用户界面,结合 Three.js 和 ECharts 实现数据的高度可视化和直观展示。系统通过动态的三维模型和颜色变化直观地展现实时数据,利用波浪图形象地显示实时水位,并通过颜色的变化强调不同的状态。此外,折线图和点状图形成的对比,使用户能够便捷地对比预测的沉降和实际沉降数据。

安全状态通过直观的图标在界面上清晰显示,能够让用户迅速识别当前的安全状况。通过颜色编码的预案矩阵,用户可以高效地判断是否触发相应的应急预案。该系统的设计和实现,提供了一个高性能、可扩展且交互丰富的应用,为水利工程的安全监测、预警和维护提供了一个创新的手段,有助于加强水安全保障并支持智慧水利建设的进程。

总之,本文研究所开发的四预数字孪生系统,通过融合现代网络技术、数据库技术以及前沿的数据可视化技术,建立了一个强大的智慧水利支持平台,旨在通过先进的数据处理和分析能力,为水利工程提供全面的智能解决方案,确保水利设施的有效管理和安全运行,如图 1 所示。

2 工程简介

新川沙泵闸枢纽工程位于上海市宝山区罗泾镇长江江堤外侧,是吴淞江工程(上海段)的一部分。该工程包括泵闸枢纽和河道两部分。泵站双向引排涝规模为 $150 \text{ m}^3/\text{s}$;水闸设计排引流量分别为 $650 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $570 \text{ m}^3/\text{s}$,净宽 60 m ,闸槛高程 -3.26 m ;连接堤段长约 434.53 m ,围堰工程建筑物等级为 4 级。外河围堰设计洪水标准为 50 a 一遇高潮位 6.14 m ,设计风速按 10 级风,围堰顶高程 8.60 m ;内河设计高水位为 3.87 m ,围堰顶高程 4.40 m 。近年来,气候变化和人类活动导致水库水位快速变化,对水库结构影响重大。研究水位变化对水库结构的影响,有助于减少

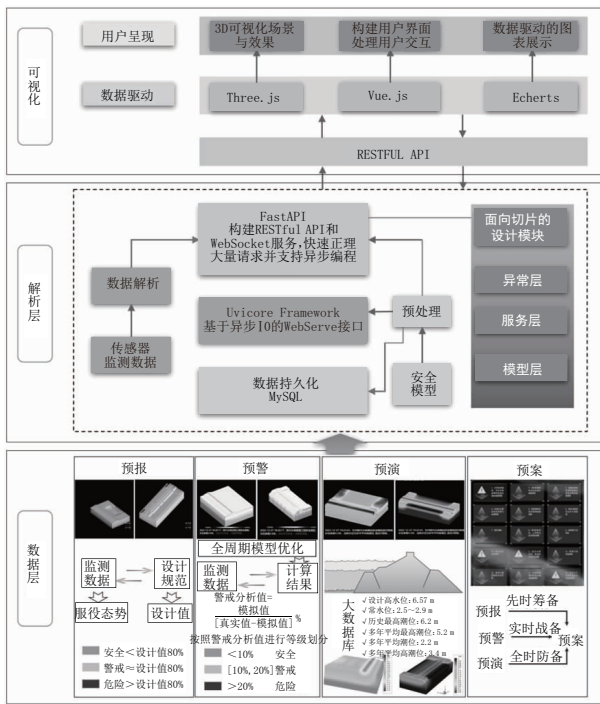


图1 本文提出的四预数字孪生系统集成框架

和避免水利工程事故,保障水资源地可持续利用。本文研究将反演设计常水位、历史最高潮位、多年平均最高潮位等水位变化引起的结构变形。

2.1 工程材料本构模型与物理属性

复杂建构筑物的力学性能计算需要科学性、准确性的计算模型,本项目以有限元模型作为数字孪生系统的核心计算模型,土体层与堆石料等均采用邓肯张 E-B 模型进行三维有限元计算,材料参数采用相应的三轴试验成果。堤坝与围堰工程的防渗墙根据《JH 一级电站沥青混凝土心墙坝筑坝材料试验研究报告》推荐,沥青混凝土心墙采用 6.9%油石比配比方案。混凝土基座采用 C25 混凝土材料,防渗墙采用 C30 混凝土材料。心墙与过渡料、防渗墙与坝基料之间设置接触面单元。

本研究计算的外围堰工程与堤坝基坑工程的三维空间整体几何信息与离散的网格信息,模型的几何边界截断范围严格按照规范进行选取。其中外围堰安全模型共计生成单元 751 263,节点共计 871 268,自由度超 25 万;堤坝基坑工程安全模型共计生成单元 1 039 565,节点共计 1 162 299,自由度超 300 万。通过多种工况下部署在建构筑物的传感器历史数据与有限元模型模拟数据的校对,完成有限元模型的参数修正,确保模型计算结果的准确性。

系统中的模型孪生体部分,通过在 WebGL 引擎中自研的多面体网格动态渲染技术,实现有限元计算结果在系统平台的可视化呈现,并可通过系统界

面提供的多类型用户操作功能,完成对孪生体多视角、多切片的力学云图显示。

2.3 外围堰安全模型计算结果

本研究采用了连续与非连续相结合的方法进行应力传递分析^[21],为精细模拟外围堰工程填筑及蓄水过程的应力传递^[22],有限元荷载步共分为 20 级,其中填筑分 10 级(应力连续传递),蓄水分 10 级,如图 2 所示,坝体及外围堰工程填筑采用分层激活单元法模拟。大坝填筑完成之后开始蓄水,蓄至最大蓄水位 8.6 m。该安全模型分别反演了包括设计常水位、历史最高潮位、多年平均最高潮位、多年平均潮位、多年平均高潮位、百年难遇潮位等在内的 10 个水位变化所引起的结构整体形变。

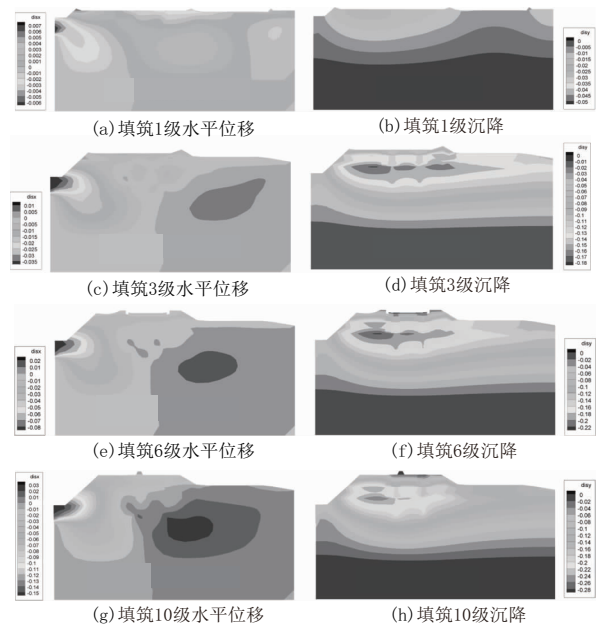


图2 外围堰工程填筑过程

图 3 详细展示了在多年平均高潮位 3.4 m 蓄水期围堰体在三个方位截图的形变云图。以外围堰左位截面为例,竖向沉降最大值为 6.5 cm,水平位移最大值为 0.45 cm。竖向沉降约占围堰体总高度的 2.10%,位于与堤坝交接的堆石区 1/2 高处。该区域也形成了最大应力集中,最大主应力达到 0.64 MPa,而最小主应力在堰体内部分布较为均匀,最小值均为 0.19 MPa。围堰工程中位处的水平位移最大,形变值为 0.35 cm,表明边界约束少的区域形变最大,具体数据见表 1。

2.4 堤坝基坑安全模型计算结果

为精细模拟堤坝工程填筑及蓄水过程的应力传递,有限元荷载步共分为 55 级,其中填筑分 12 级(应力连续传递),蓄水分 43 级。坝体及外围堰工程填筑采用分层激活单元法模拟,大坝填筑完成后蓄

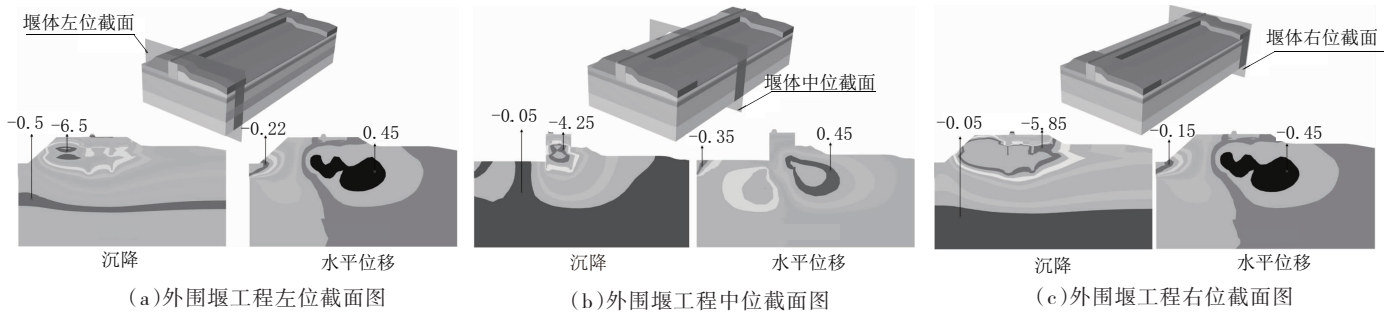


图3 外围堰三维有限元截面满蓄期形变云图(单位:cm)

表1 四预系统数据库分析结果

工程位置	外围堰工程				堤坝基坑工程					
	项目	计算值	监测值	误差 /%	项目	计算值	监测值	误差 /%		
工程左位	堰体形变 / cm	堰体沉降	6.50	5.98	12.62	堤坝与基坑工程形变 /cm	工程沉降	3.50	2.88	17.71
		堰体位移	0.45	0.54	16.67		工程位移	12.45	13.62	8.59
	堰体应力 / MPa	大主应力	0.64	—	—	堤坝与基坑工程应力 /MPa	大主应力	1.14	—	—
		小主应力	0.19	—	—		小主应力	0.49	—	—
工程中位	堰体形变 / cm	堰体沉降	4.25	5.42	21.59	堤坝与基坑工程形变 /cm	工程沉降	5.50	4.79	12.91
		堰体位移	0.45	0.54	16.67		工程位移	3.25	3.12	4.00
	堰体应力 / MPa	大主应力	0.57	—	—	堤坝与基坑工程应力 /MPa	大主应力	1.07	—	—
		小主应力	0.19	—	—		小主应力	0.51	—	—
工程右位	堰体形变 / cm	堰体沉降	5.85	6.12	4.41	堤坝与基坑工程形变 /cm	工程沉降	7.25	7.09	2.21
		堰体位移	0.45	0.54	16.67		工程位移	4.25	3.79	10.82
	堰体应力 / MPa	大主应力	0.61	—	—	堤坝与基坑工程应力 /MPa	大主应力	0.91	—	—
		小主应力	0.19	—	—		小主应力	0.49	—	—

水至最大蓄水位 8.6 m。安全模型反演了设计常水位、历史最高潮位、多年平均最高潮位、多年平均潮位、多年平均高潮位、百年难遇潮位等 43 个水位变化引起的结构整体变形。

在考虑支护结构周围土体应力重分布及底层土体回弹达到应力平衡状态的问题时, 本文研究对堤坝与基坑的安全性进行了四阶段开挖的计算反演。每阶段的开挖深度分别为: 第一阶段 -1.0 m, 第二阶段 -3.35 m, 第三阶段 -5.10 m, 第四阶段 -5.60 m, 如图 4 所示, 以科学预测结构的稳定性。

图 5 详细展示了在多年平均高潮位为 3.4 m 时蓄水期堤坝与基坑在三个方位截图的形变云图。以工程右位截面为例, 竖向沉降最大值为 7.25 cm, 水平位移最大值为 3.25 cm。竖向沉降约占工程总高度的 1.15%, 并且该区域也形成了最大主应力 0.91 MPa。工程最大水平位移发生在左边位置, 引起的原因主要是因为基坑以上混凝土支撑结构造成底部沉降变形, 迫使周围的土体产生轴向大变形, 数据详见表 1。

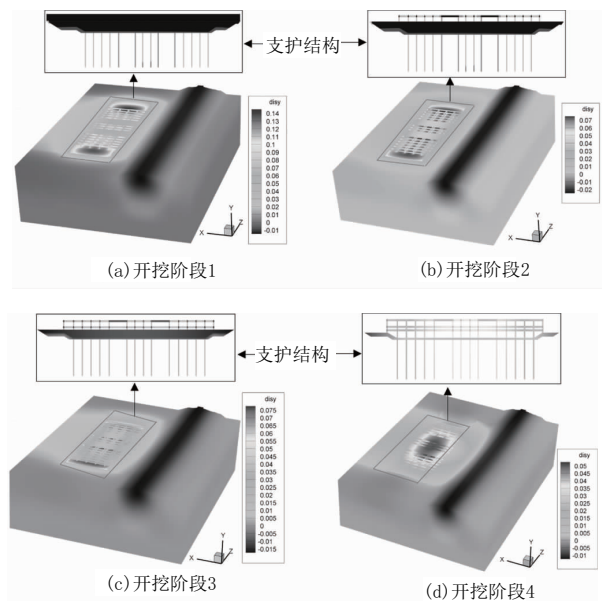
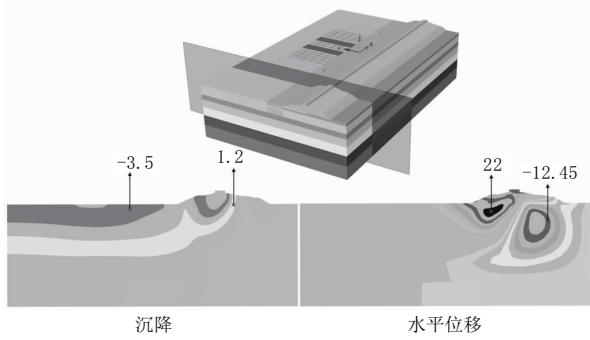


图4 基坑开挖三维有限元计算

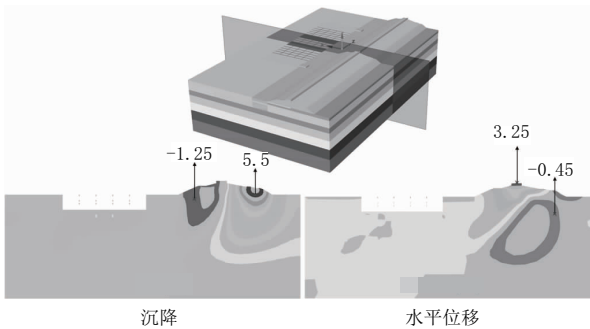
3 四预数字孪生系统集成与应用

3.1 系统集成

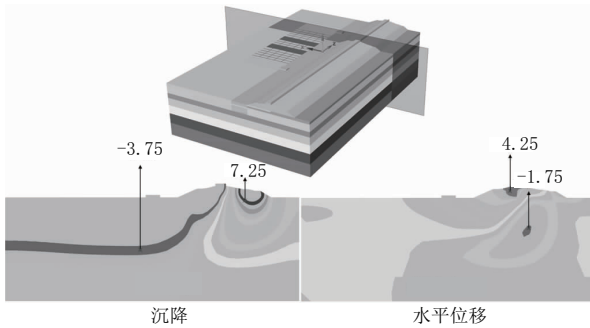
在构建堤坝基坑和外围堰的数字孪生系统时,



(a) 堤坝与基坑工程左位截面图(单位:cm)



(b) 堤坝与基坑工程中位截面图(单位:cm)



(c) 堤坝与基坑工程右位截面图(单位:cm)

图 5 堤坝基坑三维有限元截面形变云图

关键在于集成“四预”功能(预警、预报、预防、预测),并通过用户界面以直观的方式展示安全状态。为此,本文研究设计了一套包含颜色编码和图形符号的可视化方案:绿色勾选表示“安全”,黄色感叹号代表“警告”,红色叉号或三角感叹号意味着“危险”。系统在页面加载时自动获取最新的安全数据,并利用前端技术如 Ajax 实时更新状态图标。同时,一个以不同颜色区分各级预案(R1~R4)的预案矩阵,为用户提供了一个交互式工具,通过点击图标或预案级别即可访问详细的操作指南和数据。此外,系统还包括搜索和过滤功能,允许用户根据条件筛选安全状态或预案信息。这种设计不仅提高了安全管理的效率和响应速度,而且通过实时监控和分析数据,加强了预警的准确性和预测未来风险的能力,从而实现了堤坝安全的全面数字化管理,如图 6 所示。

3.2 工程应用案例

在 2022 年 9 月 12 日—14 日台风梅花期间,水库施工区域面临强降雨和 8 级大风。四预系统监测到潮位在短时间内急剧上升 3.74 m。安全模型通过反演预测及时评估了 3 个工程的形变情况。外围堰的实际最大沉降量为 124.72 mm,而模型反演值为 117.95 mm,误差小于 6%,满足安全标准,如图 6 所示。此外,堤坝耦合模型反演沉降与水平位移数据(见表 1)表明,在潮位达到 4.18 m 时,模型预测的沉降值与实测值误差不到 5%,表明安全模型具备准确的预测能力。安全模型能够提供连续全面的形变数据,辅助工程师进行有效的风险管理和运维决策。通过实时数据更新和预报系统联动,该模型为工程安全提供了全面、快速、精准的态势分析与评估,确保了工程在极端天气条件下的安全运行。

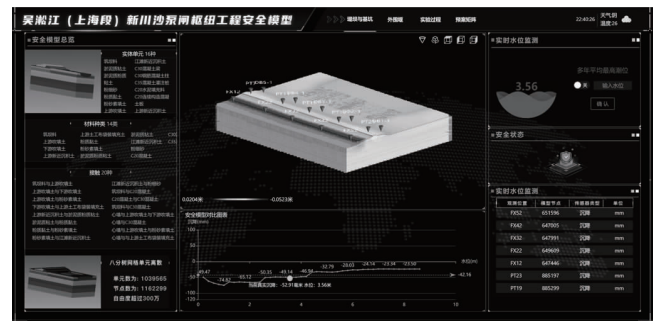


图 6 四预数字孪生安全系统

4 结论

本文研究采用三维非线性静应力与变形有限元分析方法,对吴淞江(上海段)新川沙泵闸枢纽工程的堤坝、基坑及外围堰工程进行了系统研究。以外河侧潮位变化为变量,推演了设计低水位 0.05 m、设计高水位 6.57 m、泵站引水最低运行水位 1.10 m、最低运行水位 2.00 m、引水设计运行水位 3.20 m、地震期高水位 5.84 m 及千年设计潮位 7~8 m。形成了 86 组堤坝与基坑工程子数据库及 43 组外围堰工程子数据库。构建的 129 组安全模型为精准预报、快速预警、前瞻性预演、细化预案提供数字赋能。主要得到以下结论。

(1)为确切模拟水工结构的响应,研究综合了填筑、填土、面板与防渗墙间的接触效应,设置界面分层单元以均匀应力过渡。考虑到复杂地形、大坝材料分区与分层填筑对应力-变形的影响,安全模型运用八分树技术细化网格,精确描述实际情况,其中 70%以上为高精度正方体单元。

(2)构建的数据库涵盖不同蓄水期的数据,能够精准反映早期水位变动导致的工程结构形变,并具备未来形变预测能力。通过迭代优化过程,反演误差控制在15%以内。

(3)数字孪生系统嵌入了连续全面的形变数据库,实时根据实测水位更新各点位的形变数据。一旦监测到形变超出设定阈值,系统将自动触发预警机制,启动风险管理控制程序。

参考文献:

- [1] 李强,季广平.水利工程施工中的质量与安全措施分析[J].水能经济,2017(2): 242.
- [2] 张士辰,彭雪辉.我国水库大坝安全管理应急预案存在的主要问题与对策[J].水利发展研究,2015(9): 25-29.
- [3] 罗军刚,赵杰,王蕾,等.基于综合集成平台的突发事件应急管理决策[J].水利信息化,2011(1): 29-34.
- [4] 彭雪辉,周克发,王晓航.水库大坝突发事件应急预案编制关键技术[J].中国水利,2008(20): 45-47.
- [5] 程翠云,钱新,王玉秋,等.水库大坝突发事件应急预案可行性评价方法初探[J].水利水运工程学报,2009(1): 71-75.
- [6] 王光谦,刘家宏.黄河数字流域模型[J].水利水电技术,2006(2): 15-21.
- [7] 王井腾,孙祥鹏,张文明,等.珠江防汛“四预”平台建设及应用[J].中国水利,2022(22): 39-42.
- [8] 吕娟,张大伟.智慧防洪对水利业务模型的功能需求与技术实现构想[J].中国水利,2022(8): 65-66.
- [9] 张道军.复杂水环境资源系统智能管理、预测和决策的研究[D].大连:大连理工大学,2002.

- [10] 徐军杨,陈思,李斌,等.数字孪生永宁江洪水预报模型构建及系统应用[J].水利信息化,2023(2): 1-8.
- [11] 孔宪京,周扬,邹德高,等.高面板堆石坝面板应力分析及抗挤压破坏措施[C]//现代水利水电工程抗震防灾研究与进展(2011年).北京:中国水力发电工程学会,2011.
- [12] 徐斌,邹德高,孔宪京,等.高土石坝坝坡地震稳定分析研究[J].岩土工程学报,2012,34(1): 139-144.
- [13] 牛广利,李天旸,杨恒玲,等.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报,2023,40(3): 181-185.
- [14] 蒋亚东,石焱文.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].科技通报,2019,35(11): 5-9.
- [15] 张建云,王光生,张建新,等.Web洪水预报调度系统开发及应用[J].水利水电技术,2005,36(2): 67-70.
- [16] 黄艳,杨国俊,王勤思,等.数字孪生三峡建设关键技术难点与解决方案[J].中国水利,2023(19): 27-34.
- [17] 覃扬扬,郭俊,刘懿,等.数字孪生流域知识图谱构建及其应用[J].水利水电快报,2023(11): 115-120.
- [18] 杜军凯,游进军,仇亚琴,等.面向“四预”的水资源智能业务应用体系研究[J].水利发展研究,2023,23(8): 1-6.
- [19] 李胜阳,姚亮,王迎春,等.西北山区流域融雪水资源“四预”应用系统技术研究[J].水利信息化,2023(1): 8-13.
- [20] 蔡运忠,程扬,梁爱萍,等.数字孪生水利工程建设管理平台研发及应用[J].水利发展研究,2023,23(8): 19-23.
- [21] 邹德高,尤华芳,孔宪京,等.接缝简化模型及参数对面板堆石坝面板应力及接缝位移的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1): 3257-3263.
- [22] 孔宪京,陈楷,邹德高,等.一种高效的FE-PSBFE耦合方法及在岩土工程弹性分析中的应用[J].工程力学,2018,35(6): 6-14.

(上接第100页)

性连接。

(3)新型外露式钢柱脚的抗剪承载力相比传统外露式钢柱脚具有一定优势,采用传统抗剪理论公式验算结果偏于保守。

(4)新型外露式钢柱脚采用预制装配式的建造模式,仍保留了外露式钢柱脚施工快捷、简便的特性,但对施工精度要求较高。

参考文献:

- [1] 赵培兰.钢结构柱脚的形式及设计原则[J].太原城市职业技术学院学报,2013(11):169-170.

- [2] 刘卫辉,郭洁,贺志坚,等.钢结构柱脚设计要点综述[J].建筑结构,2019(增刊2): 674-678.
- [3] 但泽义.钢结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [4] JGJ 99—2015,高层民用建筑钢结构技术规程[S].
- [5] 陈绍蕃,顾强.钢结构(上册)——钢结构基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] 李星荣,秦斌.钢结构连接节点设计手册(4版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [7] 杨勇,陈阳.PBL剪力连接件抗剪承载力试验研究[J].工程力学,2018,35(9):89-96.
- [8] 王艳君,左凌霄,路泽超.对外露式钢结构刚性柱脚设计探讨[C]//北京:工业建筑出版社,2020:328-331.