

基于统一场景的重力坝极端动力灾害链传递混合模拟方法

张社荣^{1,2}, 张耀飞^{1,2}, 王超^{1,2}, 王泉华^{1,2}

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:针对水电工程多灾害耦合效应连续模拟数据传递困难且缺乏全过程顺次模拟工具等问题,结合灾害链传递过程中的关键节点及参数,提出了多种数值模拟工具和物理引擎耦合的动力灾害链传递混合模拟方法。该方法采用数值模拟工具得到结构强度、变形等物理场及破坏模式,通过二次开发将物理场变量及结构破坏模式映射进入物理引擎,基于计算流体力学方法和物理引擎模拟方法顺次混合模拟结构损毁后的块体运动、库水下泄和洪水演进过程,从而实现极端动力灾害链传递的全过程模拟。某重力坝枢纽极端爆炸毁伤事故动力灾害链传递验证结果表明,该方法克服了单一数值模拟工具的局限性,实现了从原生灾害的结构响应到次生灾害演进全过程的集成一体化仿真预演,在计算精度和效率方面均达到工程应用尺度上较为理想的效果。

关键词:动力灾害链;重力坝;物理引擎;数值模拟;混合模拟方法

中图分类号:TV61

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)06-0001-09

Hybrid simulation method of extreme dynamic disaster chain transfer for gravity dams based on unified scene// ZHANG Sherong^{1,2}, ZHANG Yaofei^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, WANG Xiaohua^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problems such as the difficulty of continuous simulation data transfer of multi-hazard coupling effect in hydropower engineering and the lack of full-process sequential simulation tools, a hybrid simulation method of dynamic disaster chain transfer coupled with multiple numerical simulation tools and physics engine was proposed by considering the key nodes and parameters in the process of disaster chain transfer. The method adopts numerical simulation tools to obtain physical fields and damage patterns such as structural strength and deformation, maps the physical field variables and structural damage patterns into the physics engine through secondary development. The block movement, reservoir underflow, and flood evolution process after structural damage based on computational fluid dynamics and physics engine simulation methods in a mixed sequence are then simulated to realize the whole process of simulation for the transfer of the extreme dynamic disaster chain. The validation results of an extreme explosion damage accident in a gravity dam hub show that the method overcomes the limitations of single numerical simulation tool, realizes the integrated simulation preview from the structural response of the primary disaster to the whole process of the secondary disaster evolution, and achieves the more desirable effect in terms of precision and efficiency on the scale of engineering application.

Key words: dynamic disaster chain; gravity dam; physical engine; numerical simulation; hybrid simulation method

作为推动新阶段水利高质量发展的6条实施路径之一,智慧水利建设需要以数字化、网络化、智能化为主线,以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径,具备包含预报、预警、预演、预案在内的“四预”功能体系。其中,如何完成数字化统一场景的搭建,开展高保真的智慧化全过程模拟并辅助决策

是智慧水利建设的重点攻关难题。同时,面向2035年的灾害事故智慧应急科技发展战略指出,重大工程的非线性、强耦合行为以及损伤、破坏、倒塌演化全过程的监测、试验、建模、计算、控制和设计等研究还存在着许多尚未解决而又亟须解决的关键科学问题^[1],如灾害链传递原理不清晰、缺少能够支

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979188);天津大学自主创新基金项目(2023XJD-0065)

作者简介:张社荣(1960—),男,教授,博士,主要从事水工结构及地下工程研究。E-mail:tjudam@126.com

通信作者:王超(1986—),男,副教授,博士,主要从事水工结构安全评估技术研究。E-mail:wangchaosg@tju.edu.cn

撑统一场景的灾害链演化仿真工具、多领域仿真工具难以相互集成、多机理模型驱动下的耦合仿真无法形成数据通路等。此外,跨领域、多灾种、全流程的风险分析与评估系统研发不足,远不能满足未来经济社会发展对应急管理精准化水平的实际需求。面向大规模灾害的计算分析工具欠缺,特别是灾损评价的精准化计算方法和工具,无法满足智慧应急对相关参数精准度的需求。基于多尺度实验、大计算、大数据的高度融合来研发重大综合灾害耦合实验和模拟技术,构建具有高度智能化的情景推演和综合分析平台,是国家公共安全保障的重大需求^[2]。

由于重大综合灾害耦合效应的复杂性,往往无法将涉及多相多场的灾害链顺次进行连续性数值模拟。例如,对于重力坝坝体的极端动力非线性分析结果,尽管可以给出坝体的损毁位置、损毁程度和破坏模式等信息,但对结构损毁后的块体运动、库水下泄和洪水演进过程,由于软件接口及效率限制,很难使用多种数值模拟方法进行统一场景下的连续性模拟。因此,完全依赖数值模拟方法实现枢纽尺度极端工况的动力灾害链传递全过程模拟具有很大难度。同时,对自然灾害和极端事故灾害的效应场景预演和预测,也不能一味追求可视化的场景表达而忽视灾变过程的物理机制。

在计算机图形学方面,结构的损毁、损毁体的刚体运动、流体性状等都可以很好地用数值模拟软件模拟表达,然而模拟的精细程度要求越高,这种效果的表达受到的制约越多且耗时越长。因此,精细化尤其是多元耦合(有限元及离散元)情况下的数值模拟方法更易受到计算效率限制,并不适合于工程尺度和实时模拟。目前,基于物理引擎的模拟方法被很多学者关注。物理引擎^[3]是模拟环境中物体运动、场景变化、物体与场景间、物体与物体间交互作用和动力学特性效果的软件,专门用来模拟场景中复杂的物理运动,如破碎、水流冲击运动、流体运动等。物理引擎在建筑垮塌全过程视景模拟^[4]中已经得到较好的应用,基于物理引擎的建筑物垮塌过程模拟,是蕴含物理力学机制的科学性和可视化表达实时性的统一,给水利水电工程领域自然灾害和事故灾难的监测与预警、风险评估与预防、应急处置与救援、综合保障等环节带来了新的思路。

针对重大综合灾害耦合模拟问题,国内外学者已经取得了一些研究成果。例如:在情景推演技术方面,美国国土安全部提出了15种重大突发事件情景^[5-6];Heginbotham等^[7]开展了战略层面的情景推演研究;邓青等^[2]提出了基于增强的真实操作、虚

拟模拟、构造模拟(E-LVC)技术的重大综合灾害耦合情景推演方法,以及多尺度实验、大规模计算、大数据分析、现场态势的综合集成分析方法,实现了虚实增强的重大综合灾害情景的四维建模;杜志强等^[8]基于三维粒子系统,进行了雪灾模拟与实时绘制;王豪等^[9]引入物理引擎技术,构建了崩塌动力学理论与计算机模拟技术之间的对应关系,研发了基于Unity3D的崩塌运动过程三维模拟系统,模拟了崩塌运动过程中撞击碎裂物理过程;郭晶晶^[10]基于破碎动力学,结合PhysX物理引擎和RealFlow流体动力学模拟软件对水闸倒塌后的水流演进过程进行了场景模拟;张景奎等^[11]应用三维可变形离散元程序(3DEC)及其强大的二次开发功能,进行了高拱坝地震灾变破坏机理与溃坝仿真分析;王乃欣^[12]基于3ds Max、RealFlow等软件将建筑物模型、三维地面模型等进行融合,再现了土石坝溃口发展、边坡坍塌、洪水研究的全过程模拟。可见众多学者已开始对重大综合灾害耦合模拟方法进行探索,但是这些研究大多还停留在对软件的应用上,对灾变过程的物理机制考虑较少,对灾害链传递在模拟过程中的体现较浅,同时在模拟过程中多采用人工方式来建立和修改模型,使得模型的精度较低且建模过程费时费力。此外,物理引擎在流体模拟方面更适合高拟真度视景动画的生成,与计算流体力学软件有一定差距,其科学性有待考证。但Zheng等^[4]研究证明,物理引擎在块体碰撞运动模拟过程实时化方面相对于数值模拟工具来说具有更加高效的优势且较为真实。

鉴于此,本文综合运用数值模拟工具和物理引擎软件,提出一种包括极端动力灾害-结构破坏-坝头抛出-库水宣泄-洪水演进-洪水灾害在内的灾害链传递混合模拟方法,以期对灾害耦合效应的顺次连续性模拟和事故灾害的预演预测问题提供可行思路。

1 混合模拟方法及其原理

统一场景是建筑物、自然背景、流场动态等可视化模型的集成体,在此场景下可开展多模拟手段、多属性、多尺度,多相、多场等情况下灾害链传递过程的混合模拟。本文借助Blender软件建立统一场景,将数值模拟与物理引擎模拟相结合,明确灾害链的节点模拟与参数传递之间的关系,从而实现贯穿整个灾害链的物理及力学机制的传递与集成,并借助高拟真度的渲染引擎实现统一场景下整个灾害链传递过程的可视化。以重力坝枢纽尺度动力灾害链传递过程仿真为例,首先使用数值模拟工具对极端

动力荷载作用下的建筑物进行模拟分析,然后使用物理引擎进行块体碰撞模拟,并与计算流体力学模拟结果进行场景耦合,完成模型映射、流体模拟及场景渲染。混合模拟方法数据流转过程见图 1,主要分为数值模拟、物理引擎模拟及灾害链传递混合模拟 3 部分。

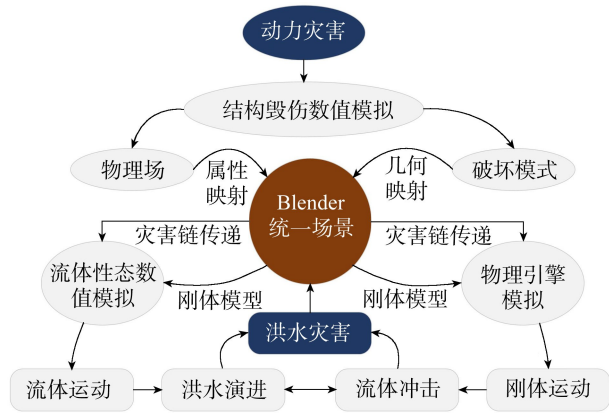


图 1 灾害链传递混合模拟方法数据流转过程

1.1 数值模拟

本文使用数值模拟工具进行建筑物结构物理场(位移、变形、强度等)及破坏模式、水流流体性态分析。虽然模拟方法为通用方法,但不同数值模拟工具使用方式及原理不同,应根据具体软件具体分析。

在结构性态分析方面,使用 LS-DYNA (SMP R11.1.0) 软件进行混凝土重力坝在爆破荷载作用下的数值模拟,得到极端动力荷载作用下的模拟结果并进行破坏模式分析,确定变形情况、损伤单元位置及坝体断裂关键帧等基本信息,为几何模型映射及属性映射建立基础。具体数值模拟分析及原理可参考文献[13]。

在流体性态分析方面,使用 Flow-3D (V11.2) 软件进行三维流体模拟,获取洪水演进性态。Flow-3D 基于流体体积法追踪液-液或液-固交界面并结合有限差分法求解三维 N-S 方程,可采用多网格体的方法进行建模,能快速生成流体演进过程并反映流体性态(流量、流速、压强等),具有模拟速度快、效果好、科学性强、可使用二三维耦合模拟等特点。洪水属于不可压缩流体的湍流运动,根据实际情况选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,其主要控制方程参考文献[12-

16] 选定。采用 truVOF 方法追踪自由表面流动,求解水气两相的体积分连续方程,以此确定自由液面位置,具体原理可参考文献[17-19]。

1.2 物理引擎模拟

为保证整个灾害链传递过程模拟的完整性与真实性,在开展流体模拟及物理引擎模拟前需将变形、位移、破坏模式等进行多软件之间大小尺度时间与空间范围的集成。本文通过开发脚本,在 Blender 软件构建的统一场景中重构重力坝数值模拟模型,将结构模拟结束点作为流体模拟初始点,即一种灾害的终结(动力灾害)作为下一种灾害(洪水灾害)的起始,搭建灾害链并完成灾害链的传递过程,在此基础上进行块体的刚体动力学及流体冲击模拟。

物理引擎是一种基于牛顿力学定律的计算机软件,它能够近似模拟离散块体之间的复杂物理行为,其在块体的大位移分析方面具有占用资源少、快速实时兼具准确性的优势,物理引擎原理可见文献[20]。本文使用平滑粒子流体动力学 (SPH) 算法对水流冲击下断裂、破损的坝头的运动情况进行模拟,可同时获取坝头运动状态及基于物理引擎的水流模拟结果。SPH 算法基于拉格朗日粒子法,通过描述粒子的位置、温度等变量随时间的变化情况来描述流体运动,设定粒子的物理属性来模拟流体与其他物体的碰撞响应[21],其基础理论可见文献[22]。

1.3 灾害链传递混合模拟

本文涉及灾害为极端动力灾害及洪水灾害,属于原生灾害发生后在短时间内直接触发次生灾害的短期灾害链范畴[23]。

以爆破作用导致溃坝洪水灾害为例,灾害链的完整链条包括极端动力灾害-结构破坏-坝头抛出-库水宣泄-洪水演进-洪水灾害 6 个方面(以“开始①-②③④-结束”来描述),链条头尾之间通过四节点衔接从而完成灾害链的传递过程。为支撑完整灾害链传递模拟,应针对中间节点①、②、③、④分别采用适合的方法以完成节点模拟及中间核心参数的传递(图 2),形成一体化混合模拟方案。

节点①、③、④使用数值模拟方法完成,节点②使用物理引擎模拟方法完成。节点衔接应重点分析

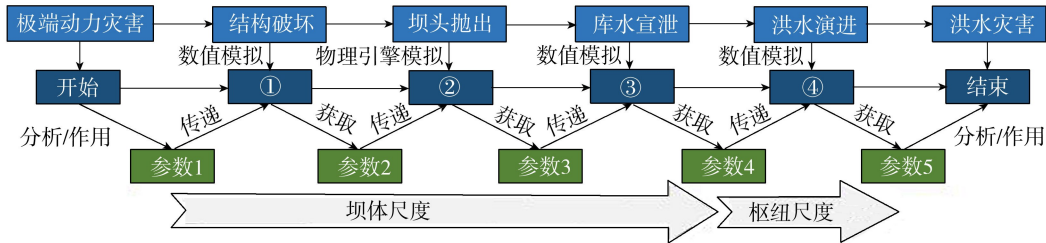


图 2 灾害链传递混合模拟关键节点及参数

中间核心参数的组成:

- a. 参数 1 指极端动力灾害作用。
- b. 参数 2 指损伤因子。依据节点②坝头抛出模拟需求,应获取重力坝坝头断裂部位。可借助节点①获取的损伤因子值判断单元损伤情况,以损伤单元完全贯穿坝头为控制条件,获取断裂部位。
- c. 参数 3 指溃口形状及位置。溃口形状及位置受到前置模拟结果影响并且一定程度上决定库水宣泄的水流过程,因此取该组合为参数 3。此结论依据库水宣泄模拟所采用的数学模型总结而来,应用时应根据选取的实际计算方法具体分析。数学模型和物理实验同样是研究洪水过程的一个重要手段^[24-27],节点③库水宣泄模拟需求可根据溃坝流量过程的数学模型确定,水流动态过程可由水库库容的连续方程、溃口冲刷规律和溃口水流流动规律来决定。从水量平衡角度出发,可得出溃坝洪水宣泄时的水量平衡方程

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

式中: V 为水库库容; t 为时间; Q_{in} 为入库流量; Q_{out} 为通过溃口的出流量。对于溃口流动问题,以美国国家气象局 FLDWAV 模型^[28]为例,其数学模型为

$$Q_{out} = C_v K_s C_d \sqrt{2g} \cdot \left[\frac{2}{3} b_s (h_i - h_b)^{1.5} + \frac{8}{15} z (h_i - h_b)^{2.5} \right] \quad (2)$$

其中 $C_v = 1 + 0.023 \frac{Q_{out}^2}{B_d^2 (h_i - h_{bm})^2 (h_i - h_b)}$

$$K_s = 1 - 27.8 \max \left[0, (R - 0.67) \right]^3$$
$$R = \frac{h_{i+1} - h_b}{h_i - h_b}$$

式中: C_v 为行进流速改正系数; K_s 为反映溃口下游淹没情况的改正系数; C_d 为流量系数,为一常数; g 为重力加速度; R 为淹没指标参数; b_s 为溃口瞬时底宽; h_i 、 h_{i+1} 分别为 i 、 $i+1$ 时刻的坝上游水位; h_b 为溃口底部高程; z 为溃口边坡; B_d 为坝趾处河道峡谷宽度; h_{bm} 为溃口发展最终高程,本研究中 $h_{bm} = h_b$ 。溃口底部高程及溃口底宽由溃口形状及位置决定,且受到前置模拟结果的影响,因此取该组合为参数 3。本文沿链条采用关联追溯的方式关联至参数 2 得到坝体断裂情况从而确定参数 3。关联追溯指的是从一个依据参数 2 确定的损伤单元出发,寻找与其有共同节点的其他损伤单元并不断迭代,将所有相关联的损伤单元作为整体,并从单元垂直方向的中间位置切分单元,断裂单元相连接便形成了表面光滑的贯穿裂缝,从而确定参数 3 所包含的溃口具体位

置、底部高程及溃口边坡等参数。最终根据随库水下泄而随时间发生变化的坝上游水位得到溃口流量过程,传递至节点③得到库水宣泄的数学模型求解结果。本文使用 Flow-3D 软件精细化模拟三维形态下的库水宣泄过程,溃口形状及尺寸在处理后的三维结构模型中体现,原理可见第 1.1 节,实现方法可见第 2.1 节。

d. 参数 4 指溃口流量过程线。节点③借助 Flow-3D 软件可模拟获取溃口处流量过程线,以供更大尺度场景的节点④洪水演进模拟应用。

e. 参数 5 指淹没水深、洪峰流量、洪水行进速度、洪水淹没范围等洪水灾损评估参数,由节点④模拟获取,可采用 Flow-3D、MIKE21 等流体动力学模拟手段完成。

2 跨平台数据流程序设计

混合模拟方法及其原理为全流程的多灾害顺次连续模拟提供了可行思路,但要真正实现灾害链传递的一体化模拟,就要自主编程,通过程序设计开发相应的平台工具形成完整框架,以解决链条中关键的数据流转(参数获取及传递)问题。

2.1 数据流程序框架

混合模拟方法的数据流程序框架由 5 个模块组成:

a. 数值模拟。使用数值模拟工具对建筑物进行数值分析,之后根据分析结果确定建筑物失去挡水能力的关键帧并提取这一时刻之前每个分析帧的几何及属性信息。此数据将用于三维模型重构。

b. 三维模型重构及处理。获取数值模拟结果后,将分析结果每一帧对应的几何、属性数据映射至统一场景中进行三维模型重构,最后进行模型处理工作。

c. 模型集成。将三维地形模型传入统一场景后,将重构的三维模型与地形模型相互集成并建立初始状态水体模型,形成流体动力学模拟场景。

d. 流体模拟。混合模拟方法在进行流体模拟时有物理引擎模拟及流体力学软件模拟两种途径。物理引擎模拟将坝头视为刚体,模拟时不考虑模型内部应力和应变,使用不同介质之间的物理响应来模拟碰撞现象,从而快速获取其在水流冲击作用下的运动过程及流体演进过程,即模拟坝头抛出过程。此方法在流体模拟方面相较于流体力学软件具有拟真度高且兼具一定准确性的特点,但在科学性方面不占优势,若需对流体性态及关键参数(如淹没范围、面积、损失、流量等)进行分析,可选用流体力学软件开展模拟分析,实际应用时可根据实际需要

(拟真度或科学性)灵活选用模拟手段。本研究节点②物理引擎模拟可借助 RealFlow 软件,节点③、④的流体模拟(包括库水宣泄及洪水演进)均选用 Flow-3D 软件,此时参数4(流量过程线)为模拟过程产物,也可导入其他软件中(如 MIKE21)进行节点④洪水演进模拟的验证。物理引擎模拟及流体模拟二者可同步进行与加载。使用物理引擎模拟时设置断裂坝体的坝头部分为活动刚体,除水体外的模型设置为被动刚体,水体模型设置为流体发射器,以此方式开展模拟获取流体网格及刚体运动过程。同时,在 Flow-3D 软件中划分模型网格,完成边界条件、求解器和初始条件等设定后可开展流体模拟。模拟可选用湍流模型中的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,流体选用 20℃ 下的水流,表面粗糙度可取 0.025 ~ 0.180 cm^[22,29-30],网格划分可使用软件自带剖分工具一键剖分,采用 GMRES 隐式求解器计算,设置初始水位及时间步长后开展模拟,若需要输出某一特定断面的流体特征值,可在断面处设置单独的 Flux Surface,以便输出该断面的流量、流速、压强等变化过程。在模拟时若受到性能限制,也可在需要观察水流细节处采取三维模拟形式,枢纽或流域场景下使用浅水方程模拟,以二三维耦合模拟形式减少计算量和计算时间。但多种维度耦合模拟的方法非本文重点,本研究淹没过程均以三维模拟的形式完成,以便将 Flow-3D 及 RealFlow 软件模拟结果相衔接。

e. 场景渲染。开发脚本将各节点模拟的时间步在统一场景中完成映射及对应,借助 Blender 软件的渲染引擎对整个灾害链传递过程进行处理。

2.2 框架实现关键点

要实现上述 5 个模块的功能,第一个关键点在于如何把单一数值模拟工具的结果映射到 Blender 引擎中完成三维模型重构及属性映射,可分为几何模型映射、关键帧获取及属性映射 3 个部分,据此完成物理引擎模拟以获取参数 3(溃口形状及位置),作为后续流体模拟(节点③库水宣泄与节点④洪水演进模拟)的初始条件;第二个关键点是如何将流体冲击模拟结果与流体性态模拟结果统一集成。

a. 几何模型映射。在进行数值模拟时,使用的模型的形状不一定是规则的,而物理引擎提供的基础模型往往是立方体、球体、柱体等规则形状。虽然能够在物理引擎中通过编辑网格对刚体形状进行修改使物理引擎模拟模型的位置、形状与数值模拟模型相似,但这一步骤无疑增加了工作量。因此提出一种将数值模拟模型直接转换为物理引擎刚体模型的方法。使用 Blender 软件底层 Python API 进行二次开发完成几何模型映射。如图 3 所示,首先根据

数值模拟结果获取单元及结点数据,单元数据包含结点组成,结点数据包含每个结点的笛卡尔坐标,其中 P 指结点, F 指面。通过观察数值模拟网格面中结点的组合规律,制作 Python 脚本将单元及结点数据进行处理后重组为面集合,使用 Blender 软件中 Python API 按照点→线→面建模方式完成模型单元映射,最后将所有单元均进行映射便可得到完整的 Blender 几何模型。

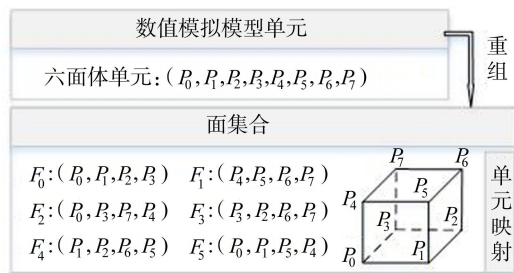


图 3 几何模型映射方法

b. 关键帧获取。从灾害链传递角度出发,需要明确极端动力荷载造成的灾害与洪水灾害之间的链接方式。对大坝来说就是要找到坝体失去全部或部分挡水能力而导致洪水灾害的时刻,即建筑物完全裂穿的关键帧,对应于节点②坝头抛出的开始时刻。在本混合模拟框架中,通过数值模拟获取了模型的小变形结果及单元的破坏情况,当破坏单元贯穿坝体模型后,坝头部分可能会在水流冲击下抛出,水流会顺着溃口流出导致库水宣泄、洪水演进致灾,因此需确定坝体在极端动力荷载作用下完全贯穿的时刻 T_c 及其对应帧,以此作为洪水灾害的起始点(物理引擎模拟起始帧)。模型单元是否发生破坏可根据其损伤因子进行判断,本混合模拟框架认为当单元损伤因子(参数 2)大于临界值时便出现宏观裂缝并失去作用^[31-32](本文损伤因子临界值参考文献[33]设置为 0.7)。确定损伤因子临界值后,选取损伤单元完全贯穿坝体的时刻为 T_c 时刻,取其对应帧为物理引擎模拟起始帧。

c. 属性映射及模型处理。在获取关键帧后,需将属性映射至物理引擎刚体模型中,在此基础上完成模型处理工作。本混合模拟框架主要涉及的属性包括变形及损伤因子两方面,分别反映小变形状态及单元破坏状态。将数值模拟的分析帧与 Blender 软件中的时间帧相对应,在对应帧处进行该分析帧的几何模型映射从而完成模型的变形映射。损伤因子是以单元消除的形式呈现,根据损伤因子临界值找出损伤单元,从面集合中清除组成这些单元的面,重组面集合并重建几何模型从而完成损伤因子的映射。实际上也可将数值模拟结果中其他无法通过改变几何形态来表达的属性,如应力、应变、能量等以

不同颜色在几何模型上显示从而完成此部分属性映射,可读取数值模拟结果每一结点的某一属性值,在面集合中根据面所包含的结点属性值设置所有面的渐变色,从而完成此属性的映射。完成属性映射后,可根据需要对模型进行进一步处理,如简化模型从而提高物理引擎模拟性能、从整体模型中挤出悬空单元集合体使模拟更加接近真实情况、切分模型形成断裂面的同时使得模型断面更加平滑以方便后续水流冲击模拟以及流体性态模拟等。使用处理后的模型完成物理引擎模拟(导致节点②坝头抛出的水流冲击模拟)以获取参数3(溃口形状及位置),作为流体模拟(节点③库水宣泄与节点④洪水演进模拟)的初始条件。

d. 流体冲击与性态仿真集成。混合模拟方法中,块体受流体冲击后的运动轨迹由物理引擎(RealFlow 软件)模拟完成,流体性态(流场分布,流速、流量、淹没深度等关键参数)由流体力学软件(Flow-3D)模拟得到,二者需保持模拟同步并在统一场景中完成集成。使用混合模拟方法中的流体模拟模块分别获取 RealFlow 及 Flow-3D 软件的模拟结果,并完成在 Blender 统一场景中的集成。其中 RealFlow 软件可直接与 Blender 软件完成帧对应过程,即前者模拟帧与 Blender 渲染帧保持同步。Flow-3D 软件的模拟结果中需要其流体性态模型,使用 FlowSight 将其导出并完成与 Blender 渲染帧的对应。通过 Python 脚本完成流体性态模型的直接读取,并基于 FlowSight 导出的流体模型命名格式(模型名_时间步)将物理引擎块体运动模拟的起始帧与及 Flow-3D 流体模拟的起始时间步对应时刻保持同步,根据二者模拟时间步长完成帧对照并在每一时间步设置模型的显隐状态,从而完成统一场景下物理引擎及 Flow-3D 软件模拟结果的集成。

3 案例验证

3.1 工程概况与模型

为了证明所提出的混合模拟方法的适用性,使用 LS-DYNA、Flow-3D 数值模拟工具结合物理引擎对混凝土重力坝枢纽尺度极端动力灾害链传递进行全过程模拟。假定混凝土重力坝高 120 m,正常蓄水位 115 m,溃口底高程 101.22 m,横缝将整个坝结构分成 20 个独立运行的坝段,包括 4 个溢流坝段及 16 个非溢流坝段。其库容-水位关系曲线可由下式确定^[16]:

$$V_s(h) = \omega_0 h + \omega_1 h^2/2 + \omega_2 h^3/3 \quad (3)$$

式中: $V_s(h)$ 为水位 h 对应库容; ω_0 、 ω_1 、 ω_2 为库容曲线系数,本文分别取-37.18、3.54、-0.013。工程水

位-库容关系曲线如图 4 所示。溃口底对应库容为 9877.28 万 m^3 ,正常蓄水位库容为 12542.09 万 m^3 ,阴影部分为库水位从正常蓄水位下降至溃口底高程时宣泄的水量。

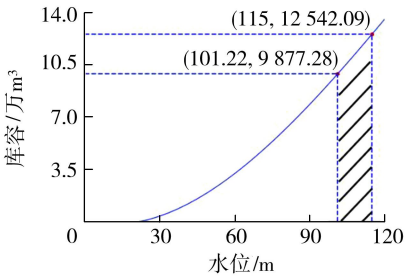


图 4 水位-库容关系曲线

建立重力坝坝段、水体、空气、炸药、地基三维模型,选择宽 15 m、高 120 m 的非溢流坝段研究其在水下爆炸作用下的破坏模式,坝体上部网格尺寸 200 mm,其余部位网格尺寸随距地基距离的增大而增大。使用 600 kg TNT 炸药,距离混凝土重力坝上游表面 5 m 且位于水下深度 5 m 处,炸药及附近水体网格尺寸取 100 mm,水体网格尺寸随距炸药距离的增加而增大,具体模型建立及模拟分析参考文献[13]进行。

三维地形模型采用该工程枢纽区场景模型,模型中有基本的地形地貌以及厂房、砂石骨料加工系统、桥梁乃至下游移民安置区等建筑物,为重力坝枢纽尺度灾害链传递模拟提供基本场景。

3.2 结果与分析

依据混合模拟方法,首先将 LS-DYNA 软件数值模拟得到的坝体结构损伤破坏特征映射到 Blender 软件中完成三维模型重构及处理(模型简化、松散块挤出、模型切分)工作,之后建立水体模型并与三维地形场景集成,完成场景搭建。此处模型简化指的是仅保留重构模型最外围边界面,将内部面去除,从而有效减少了几何面的数量,减轻了仿真软件加载几何模型的压力,松散块挤出及模型切分可参考第 2.2 节 c。其中三维模型重构的关键点在于损伤因子临界值及坝体贯穿关键帧的确定,李宇杰等^[33]指出损伤因子 0.7 为混凝土损伤临界值,而 LS-DYNA 软件中有效塑性应变即为损伤因子,本案例在此基础上根据数值模拟结果中有效塑性应变云图分布情况进行分析,得到坝体完全贯穿关键帧为第 42 帧,对应时刻为 0.2 s,在此基础上完成三维模型重构及处理并开展流体模拟,共分为物理引擎流体冲击模拟及流体性态数值模拟两部分。

物理引擎模拟使用 RealFlow 软件进行。在 RealFlow 软件中设置所有模型在不同帧的有效性,有效性是指该模型是否在某一帧参与流体模拟。将

破损坝头部分设置为活动刚体,水体模型设置为流体发射器,其余模型均设置为被动刚体,进行流体动力学模拟获取水流冲击过程并生成水体粒子,将每一帧的水体粒子建立流体网格,模拟过程中同步输出 Alembic 文件并在 Blender 中加载,完成流体冲击及演进的物理引擎模拟。也可使用物理引擎开展洪水演进模拟,其具有模拟速度快、效果好的优点,但物理引擎模拟方法无法进行进一步科学分析。综合案例需求和各模拟方法特点,本文基于数值模拟方法开展了洪水演进模拟。

流体性态数值模拟使用 Flow-3D 软件进行。在 Flow-3D 软件中基于 Blender 软件生成的实体模型和统一场景开展分析计算,获取溃口流量过程线并在 Blender 中与爆破过程集成,完成灾害链传递的完整过程搭建。选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,设置重力场并将流体设置为 20℃ 下的水流。几何模型为重力坝枢纽场景。

采用六面体结构化网格进行网格划分,为加快模拟速度,在坝体部位进行网格加密,网格单元边长为 1.8 m,地形场景网格边长为 10 m,总网格单元数为 5 544 041 个,活动网格单元数为 2 016 388 个。

模型的进口及出口均采用压力边界,设置水库初始水位 115 m,下游初始水位 0 m,上游恒定流量为 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。模型顶部设置为压力边界,大气压强为 101 kPa,水的体积分数设置为 0,表示完全是空气,水面水平,压力为静水压力。将网格嵌入地形内部,与地形相接部分设置为固壁边界,地形粗糙度设置为 0.07 cm。模拟时长设置为 100 s,设置为每 0.5 s 步长保存一次,重置点的时间步长设置为 2 s,

即可在 2 s 的倍数时刻调用存储的数据继续进行模拟,防止模拟中断而导致结果丢失。

鉴于混合模拟方法可弥补单独使用物理引擎模拟流体缺乏科学性的缺点,对流体模拟结果进行进一步分析研究。在下游河道入口处断面设置 Flux Surface 监测面,观察洪水流量过程(图 5)。由洪水流量过程线可以看出,在爆破灾害发生后,下游河道断面流量骤增,峰值流量达到 $15\,850.1\text{ m}^3/\text{s}$,后逐渐趋于平缓,最终基本稳定在 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,说明此时库水位已接近溃口底高程。除流量外,也可以借助数值模拟软件获取流速、压强等数据,相比于一维经验公式方法,二维或三维仿真模拟手段适用性更广也更为准确。

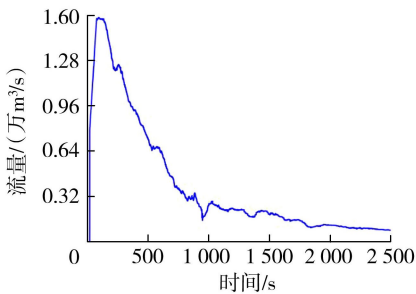


图 5 下游河道入口洪水流量过程线

最终使用混合模拟方法将数值模拟结果以及物理引擎模拟结果同步集成至统一场景中,实现极端动力灾害-结构破坏-坝头抛出-库水宣泄-洪水演进-洪水灾害导致洪水灾害的灾害链传递全过程模拟(图 6)。对统一场景下的洪水宣泄全过程模拟结果进行进一步分析发现,对蓄水重力坝进行爆破后,在爆破作用下贯穿的坝段坝头部分抛出形成溃口,溢流坝段水流与从溃口宣泄水流汇流后形成洪水,淹

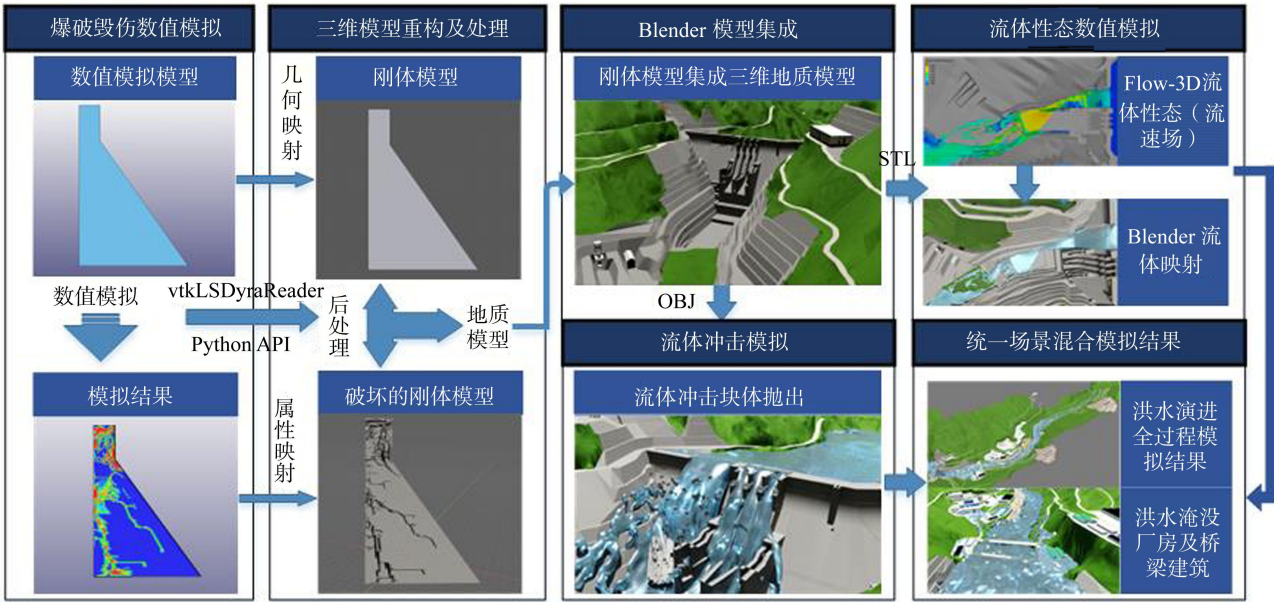


图 6 灾害链传递全过程模拟流程及结果

没了部分厂房、桥梁建筑。

在此基础上可进一步评估财产损失、制定应急处理措施、采取预防手段等,减少灾害发生后的生命财产损失。本文所提出的混合模拟方法适用于防洪业务应用场景下的灾害链连续性模拟,能够有效获取洪灾仿真预演视景并辅助进行防灾减灾决策。

4 结 语

从重力坝极端动力灾害链组成要素出发,借助数值模拟工具及物理引擎软件设计跨平台数据流转程序,提出基于统一场景的重力坝极端动力灾害链传递混合模拟方法,在混凝土重力坝枢纽尺度进行有效性及适用性验证。结果表明,混合模拟方法能够有效进行包括极端动力灾害-结构破坏-坝头抛出库水宣泄-洪水演进-洪水灾害在内的灾害链传递连续性模拟,获取洪水流量、流速等灾损评估参数及洪灾仿真预演视景。此外,混合模拟方法是一种通用方法,能够实现统一场景下的自动化数据流转,减少中间处理过程,提升应急决策时仿真模拟的时效性。在此方法基础上可不断进行拓展,对于各种不同坝型只需明确灾害链传递的关键节点,使用数值模拟工具及物理引擎软件实现数据流转即可完成模拟,在有灾害链模拟需求的应用场景下具有良好的发展前景。

参考文献:

[1] 刘奕,张宇栋,张辉,等. 面向 2035 年的灾害事故智慧应急科技发展战略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(4):117-125. (LIU Yi,ZHANG Yudong,ZHANG Hui,et al. Development strategy of smart emergency-response technology for disasters and accidents by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 117-125. (in Chinese))

[2] 邓青,施成浩,王辰阳,等. 基于 E-LVC 技术的重大综合灾害耦合情景推演方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6): 487-493. (DENG Qing, SHI Chenghao, WANG Chenyang, et al. Coupled disaster scenario evaluation and response method based on the E-LVC technology [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(6): 487-493. (in Chinese))

[3] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学:F 辑 信息科学,2009,39(1):2-46. (ZHAO Qiping. Overview of virtual reality[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2009, 39(1):2-46. (in Chinese))

[4] ZHENG Zhe, TIAN Yuan, YANG Zhebiao, et al. Hybrid framework for simulating building collapse and ruin scenarios using finite element method and physics engine [J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4408.

[5] Homeland Security Council, Department of Homeland

Security, USA. National planning scenarios[Z]. 2005.

[6] BURCH H, KITLEY C A, NAEEM M. Department of homeland security national planning scenarios: a spectrum of imaging findings to educate the radiologists [J]. Emergency Radiology, 2010, 17(4): 275-284.

[7] HEGINBOTHAM E, NIXON M, MORGAN F E, et al. The U. S. -China military scorecard: forces, geography, and the evolving balance of power, 1996-2017[M]. Santa Monica: RAND Corporation, 2015.

[8] 杜志强,刘雅玉. 基于三维粒子系统的雪灾模拟与实时绘制方法[J]. 地理信息世界, 2017, 24(3): 25-29. (DU Zhiqiang, LIU Yayu. A method of snowstorm simulation and real-time rendering based on 3D particle system[J]. Geomatics World, 2017, 24(3): 25-29. (in Chinese))

[9] 王豪,黄健,黄祥,等. 一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021: 1-10 [2023-09-26]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210237>. (WANG Hao, HUANG Jian, HUANG Xiang, et al. A method of using Unity3D to simulate the whole process of three-dimensional movement of rockfall[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021: 1-10 [2023-09-26]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210237>. (in Chinese))

[10] 郭晶晶. 水利工程结构灾变过程仿真[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2017.

[11] 张景奎,张燎军. 高拱坝地震灾变破坏机理与溃坝仿真分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 32-36. (ZHANG Jingkui, ZHANG Liaojun. Analysis of seismic disaster failure mechanism and dam break simulation of high arch dam[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): 32-36. (in Chinese))

[12] 王乃欣. 土石坝溃决溃口数值模拟与溃坝虚拟现实技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2018.

[13] WANG Xiaohua, ZHANG Sherong, WANG Chao, et al. Blast-induced damage and evaluation method of concrete gravity dam subjected to near-field underwater explosion [J]. Engineering Structures, 2020, 209: 109996.

[14] 张国强,孙双科. 竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 151-156. (ZHANG Guoqiang, SUN Shuangke. Effect of slot width on the flow structure of vertical slot fishway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 151-156. (in Chinese))

[15] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 41-49. (LI Minkang, JI Honglan, LUO Hongchun, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 41-49. (in Chinese))

[16] 许海军,陈守煜. 水库调库容调洪计算的数值-解析解法[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 69-73. (XU Haijun,

- CHAN Shouyu. Numerical-analytic method for reservoir backwater storage flood routing[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(3):69-73. (in Chinese))
- [17] 杨培思,蔡德所,莫崇勋. 基于 FLOW-3D 的竖缝式鱼道水力特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018,43(4):1675-1683. (YANG Peisi, CAI Desuo, MO Chongxun. Study on hydraulic characteristics of vertical-slot fishways based on FLOW-3D[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition),2018,43(4):1675-1683. (in Chinese))
- [18] 蔡钊,王海鹏,刘九夫,等. 双层翻斗式雨量计翻斗特性的试验和模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):79-85. (CAI Zhao, WANG Haipeng, LIU Jiufu, et al. Numerical and experimental investigation on characteristics of the double tipping bucket rain gauge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):79-85. (in Chinese))
- [19] 陈曜辉,徐辉,冯建刚,等. 断面形状对虹吸式出水渠道水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):47-52. (CHEN Yaohui, XU Hui, FENG Jiangang, et al. Effect of section forms on hydraulic characteristics of a siphon outlet passage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):47-52. (in Chinese))
- [20] MILLINGTON I. Game physics engine development[M]. San Fransisco:Morgan Kaufmann Publishers,2007.
- [21] 肖祥云,杨旭波. 基于物理及数据驱动的流体动画研究[J]. 软件学报,2020,31(10):3251-3265. (XIAO Xiangyun, YANG Xubo. Physically-based and data-driven fluid simulation research[J]. Journal of Software,2020,31(10):3251-3265. (in Chinese))
- [22] MÜLLER M, CHARYPAR D, GROSS M. Particle-based fluid simulation for interactive applications [C]// Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. San Diego: Eurographics Association,2003.
- [23] 李钢,张倪飞,董志骞,等. 多灾害作用下工程结构分析与设计方法研究进展[J]. 土木工程学报,2023,56(8):9-26. (LI Gang, ZHANG Nifei, DONG Zhiqian, et al. Research progress of engineering structure analysis and design methods under multiple hazards[J]. China Civil Engineering Journal,2023,56(8):9-26. (in Chinese))
- [24] 董柏良,夏军强,陈瑾晗. 典型街区洪水演进的概化水槽试验研究[J]. 水力发电学报,2020,39(7):99-108. (DONG Bailiang, XIA Junqiang, CHEN Jinhan. Experimental investigation of flood inundation over typical urban streets[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2020,39(7):99-108.)
- [25] 毛思媛,贾艳红,假冬冬,等. 嫩江下游洪水演进及对洪泛区植被影响分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):27-33. (MAO Siyuan, JIA Yanhong, JIA Dongdong, et al. Analysis of flood evolution in lower reaches of Nenjiang River and its impact on vegetation in floodplain [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):27-33. (in Chinese))
- [26] 张贵金,罗舸旋子,朱博渊,等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):28-35. (in Chinese))
- [27] 阎晓冉,王丽萍,张验科,等. 考虑峰型及其频率的洪水随机模拟方法研究[J]. 水力发电学报,2019,38(12):61-72. (YAN Xiaoran, WANG Liping, ZHANG Yanke, et al. Study on stochastic flood simulation method considering peak shape and its frequency[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2019,38(12):61-72. (in Chinese))
- [28] 黄金池. 堰塞坝漫顶溃口流量变化过程的数值模拟[J]. 水利学报,2008,39(10):1235-1240. (HUANG Jinchu. Numerical modeling of flow through breach of landslide dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2008,39(10):1235-1240. (in Chinese))
- [29] 诸韬,傅宗甫,崔贞,等. 双侧竖缝式鱼道水力特性三维数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2016,34(11):93-96. (ZHU Tao, FU Zongfu, CUI Zhen, et al. Three-dimensional numerical simulation of hydraulic characteristics of vertical double-slot fishways[J]. Water Resources and Power,2016,34(11):93-96. (in Chinese))
- [30] 汪红波,王从锋,刘德富,等. 横隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2012,30(5):65-68. (WANG Hongbo, WANG Congfeng, LIU Defu, et al. Study on numerical simulation of hydraulic characteristics of transverse diaphragm plate fishway[J]. Water Resources and Power,2012,30(5):65-68. (in Chinese))
- [31] KIM S, YU K, YOON B, et al. A numerical study on hydraulic characteristics in the ice harbor-type fishway [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2012,16(2):265-272.
- [32] 唐欣薇,周元德,张楚汉. 基于细观损伤力学模型的混凝土坝抗震分析[J]. 水力发电学报,2013,32(2):195-200. (TANG Xinwei, ZHOU Yuande, ZHANG Chuhan. Concrete dam seismic analysis based on mesoscale damage mechanics [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(2):195-200. (in Chinese))
- [33] 李宇杰,王梦恕,徐会杰,等. 纤维布补强地铁隧道结构的数值分析[J]. 土木工程学报,2014,47(8):138-144. (LI Yujie, WANG Mengshu, XU Huijie, et al. Numerical analysis of metro tunnel structure reinforced with fiber cloth material[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(8):138-144. (in Chinese))

(收稿日期:2022-11-19 编辑:俞云利)