

基于 BIM 的堆石坝施工全过程三维动态模拟与风险预演

付海林

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]某水库大坝为混凝土面板堆石坝, 坝高 70m, 坝顶长 630m, 总填筑量约 208 万 m³, 施工地质条件差、作业面交叉多、场地受限等问题突出。文章创建了基于 BIM 全施工过程三维动态仿真及风险虚拟预演体系模型, 探究堆石坝施工难点及 BIM 应用要点, 创建三维地质及设计模型, 导入施工信息及进度计划, 完成施工工序、机械布置及场地规划的四维虚拟建模并进行风险辨识、情境构建、过程虚拟预演及应急预案虚拟演练。

[关键词]堆石坝; 施工模拟; 四维动态模拟; 抽水蓄能电站

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19607

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

Three Dimensional Dynamic Simulation and Risk Simulation of the Entire Construction Process of Rockfill Dam Based on BIM

FU Hailin

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The dam of a certain reservoir is a concrete face rockfill dam with a height of 70 meters and a crest length of 630 meters. The total filling volume is about 2.08 million cubic meters, and the construction geological conditions are poor, there are many intersecting work surfaces, and the site is limited. The article created a three-dimensional dynamic simulation and risk virtual rehearsal system model based on BIM for the entire construction process, exploring the construction difficulties of rockfill dams and the key points of BIM application. It created a three-dimensional geological and design model, imported construction information and schedule plans, completed four-dimensional virtual modeling of construction processes, mechanical layout, and site planning, and conducted risk identification, scenario construction, process virtual rehearsal, and emergency plan virtual rehearsal.

Keywords: rock fill dam; construction simulation; four dimensional dynamic simulation; pumped storage power station

引言

抽水蓄能电站是电网调峰、填谷以及事故备用的大容量储能设施。面板堆石坝因其地形适应性强、施工周期短的特点, 被选为上水库挡水建筑物的理想坝型。但是面板堆石坝施工量大、填筑分区多、工序连接紧密, 二维图纸很难把时间上的先后顺序和空间上的关系表现出来, 风险辨识主要依靠经验和直觉。BIM 技术可以实现对设计信息与施工进度三维度的综合呈现。

1 堆石坝施工特点与 BIM 应用需求分析

混凝土面板堆石坝是由堆石体、过渡带、垫层区以及面板构成的。某水库大坝最大坝高 70m, 坝顶长 630 多 m, 工程填筑量达 208 万 m³ 之多, 主要分区为堆石区、次堆石区、过渡区、垫层区等等, 各个分区对于填筑料的粒径大小以及压实度都有不同的要求。面板堆石坝施工特点是: 第一、工序繁杂, 工作面交错。基础开挖与坝体填筑到面

板浇筑之间有着严格的先后顺序, 同时平行作业也较多; 第二、施工场地狭小, 交通运输不便。下水库处在山沟里交通条件较差; 第三、填筑质量和要求高, 过程控制难。堆石料压实施工的质量好坏直接影响着整个大坝的安全程度。某水库大坝曾经存在 F1 断层处理、岸坡过渡料压实度不够等问题。以上特点要求数字化管理: 工程施工方案的选择需要可视化仿真, 工程资源投入量需要数量化评估, 安全管理需要系统化辨识。所以应用 BIM 技术建立施工全过程三维动态模拟以及风险仿真系统的做法, 就是解决问题的一种有效方法。

2 BIM 模型构建与数据集成

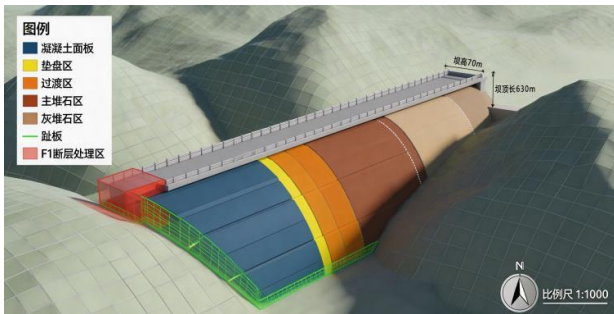
2.1 工程三维地质与设计模型构建

BIM 模型为施工全过程模拟的基础数据。以某水库大坝工程为例, 根据坝体结构分区以及地质分层绘制三维模型。在地下模型中, 根据勘察钻孔信息与地形测量成果

表 1 某水库面板堆石坝主要分区参数

分区名称	位置特征	主要材料	压实要求
垫层区	面板下游侧, 水平宽度 2~3 m	连续级配砂砾石	相对密度 ≥ 0.85
过渡区	垫层区下游, 水平宽度 4~6 m	最大粒径 300 mm 碎石	相对密度 ≥ 0.80
主堆石区	坝体主体, 上游侧	新鲜坚硬块石	相对密度 ≥ 0.75
次堆石区	坝体下游侧	允许风化岩石	相对密度 ≥ 0.70

建立起上水库坝址区的三维地质模型, 详细描绘出坝基岩层分段、断层破碎带 (F1 断层等) 的空间位置以及岸坡地貌; 对于设计模型来说, 根据面板堆石坝的设计图纸建立起整个工程所包含的所有结构分区的三维实体模型如坝轴线、趾板、面板、垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区、上游铺盖及压重区等等, 具体如图 1 所示。


图 1 某水库面板堆石坝 BIM 三维模型

模型精度达到 LOD300 等级别, 可以精确表示不同结构区间的几何尺寸大小以及空间位置关系以及材质等信息。大坝分区参数如表 1 所示。

2.2 施工信息与进度计划集成

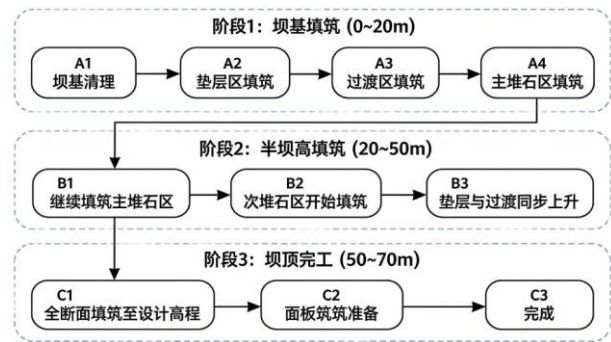
在三维模型的基础上, 把施工组织设计信息同模型的构件进行链接, 施工信息包含各个区域的土方填方量, 每层的厚度, 碾压次数以及使用的机械设备种类等等, 进度计划利用 Project 格式文件导进到 BIM 平台, 并把 WBS 分解树结构同三维模型中的构件进行对应, 构建出构件级别的进度信息链接关系, 施工进度计划同三维模型之间的链接是完成四维动态模拟的基础, 在此步骤中把每一个施工阶段都同计划工期相挂钩, 在三维的空间内可以实时动态呈现大坝的分层填筑生长轨迹。链接完毕之后的三维模型可以每天获取任意某一时刻点的大坝填筑进度状况, 为施工进度动态化管理提供了数据基础。

同时, 整合施工现场要素, 如运输车、推土机、振动碾等主要机械设备台数、规格及生产效率指标、施工工人分工、人数等, 将作为后续施工机械、资源配置仿真建模的基础数据。

3 施工全过程 4D 动态模拟实现

3.1 施工工序与工艺模拟

基于相关进度计划的 BIM 模型, 完成对某个水库面板堆石坝整个施工过程中的四维动态仿真。仿真包括了坝基清理、趾板开挖、坝体填筑以及面板混凝土浇筑等主要施工环节。坝体填筑依据“分区、分层、分序”来进行模拟, 在每一层的填充厚度保持在 0.8~1.0m 之间, 层的数量由高度来定大约 70~80 个。如图 2 所示, 利用时间线滚条条可以观察到大坝自下而上的逐层堆积长高的过程。


图 2 坝体分层填筑生长过程模拟截图

施工工艺模拟主要是针对重要工序进行技术交底。在垫层料坡面部分通过运用翻模砂浆固坡工艺来进行施工, 在 BIM 动画中可以清晰地显示出模板安放、砂浆填充及坡面夯实等工艺步骤的先后顺序、相对位置关系等等。面板混凝土浇筑模拟通过滑模顺面板斜面自下而上的连续爬升的方式进行浇筑, 体现面板与垫层之间的结合质量控制要求。通过工艺模拟使得现场施工人员能够清晰地理解每个工序的操作要点以及质量控制标准, 从而有效地提高了施工技术交底的速度及准确度。

3.2 施工机械与资源配置模拟

施工现场机械设备及材料的有效布置是实现填筑施工持续高效运转的基础。某水库大坝填筑高峰时期每天需完成约 8000~10000m³ 的填筑工作, 对运输车辆、推土机以及振动压路机数量及其调配都提出了一定难度。在 BIM 环境下运用离散事件仿真方法对机械设备的操作流程进行实时性仿真, 其模型见图 3。

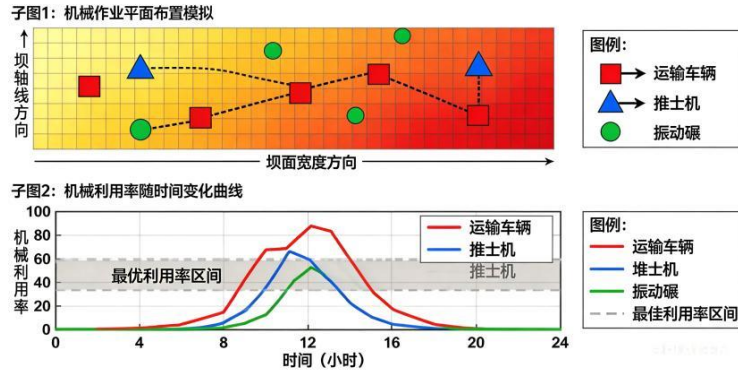


图3 施工机械作业与资源配置动态模拟界面

仿真方面,在填土方量、运距以及机械设备生产效率等因素的基础上,求得所需要的运输车辆、推土机及振动碾的最佳配备数量。运输车仿真涵盖了从料场装载到道路上行驶再到坝体卸载最后空车回程的全部过程,在仿真过程中可以查找到影响运输的瓶颈路段并且进行运输路径的选择。振动碾仿真体现了碾压遍数、碾压速率与碾压重叠宽度的要求,并保证每一层的填土都满足设计的压实度指标,资源调配仿真结果能够导出各种机器的工作率曲线图以及台班用量计划来作为现场机械设备的安排的标准。

3.3 施工场地布置与交通模拟

上水库坝址大多处于山间沟谷地带,施工场地十分狭小。某水库大坝上水库大坝是在山谷内,左、右两翼地势陡峭,施工便道分布在山腰上,受空间限制较大。利用 BIM 模型做出施工场地布置模型,包括临时道路、堆料场、混凝土拌合站、机械设备停放场所、办公生活区等各种临时设施的空间三维布置情况,如图4所示。

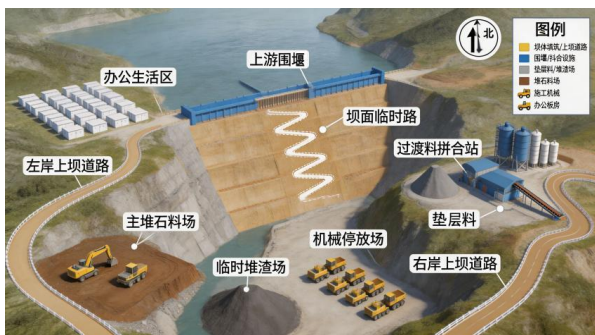


图4 施工场地布置 BIM 模型

交通仿真专注于研究填筑高峰期时施工便道的通过量,在此基础上构建运输车辆行驶路线网络,输入运输车辆数量、行车速度、车距等相关指标,模拟车辆行驶在网络道路上的情况,从而发现交通瓶颈,考察不同时间段道

路容量情况进而改善上坝便道布置方式或者调整运输车辆配车计划,施工场地布置及交通仿真 BIM 应用能较好地解决高峰期坝面交通堵塞带来的施工停顿难题。

3.4 模拟成果可视化与分析

四维动态仿真生成的结果主要有:施工进度动图、工程量统计图及资源需求曲线等。施工进度动图可以每日或者每周显示大坝填筑进度情况,并能与实际进度相比较,及时找出进度上的偏离;根据模型输出的分区填筑方量表,可以准确计算出每个区段的累计填筑量以及剩余待填筑量;机械利用率曲线用来表示各种机械设备在整个施工阶段中的工作强度,作为设备调度参考。

仿真分析可以发现施工中存在的矛盾点,比如:如果垫层区填筑速度高于面板浇筑准备工作速度,则软件能发出提示;当运输车辆在坝面上的卸料区同振动碾工作区出现空间上的交叠,则会提前做好调整。利用 BIM 施工全周期模拟,实现了从以往凭借经验进行施工管理到利用大数据、模型进行可视化管理的过程,使得施工组织更加合理有效。

4 施工风险识别与三维预演

4.1 施工风险因素识别与评估

面板堆石坝工程建设风险源种类繁多。基于某水电站大坝工程实例,运用 WBS-RBS 法开展全面的风险辨识工作,在不同施工过程中各个时期的典型风险因素见表2。

对于辨识出来的危险源使用风险矩阵法来进行评价,结合危险源发生的概率以及其带来的危害情况来判定各个危险源的危险等级大小。其中 F1 断层处置、过渡体压实度不合格、面板温差引起的裂缝属于较大风险源,应该加以重视。某水库电站大坝在工程建设过程中有效克服了 F1 断层凿槽及混凝土填充以及岸坡局部不规则过渡体压实度低等问题,获取了丰富的危险源防范措施。

表 2 面板堆石坝施工主要风险因素识别

施工阶段	风险类别	风险因素	风险等级
基础处理	地质风险	坝基 F1 断层处理不当, 趾板基础承载力不足	高
坝体填筑	质量风险	填筑料级配不合格, 压实密度不足, 过渡料压实度不够	高
坝体填筑	进度风险	雨雪天气导致填筑中断, 道路拥堵影响供货效率	中
面板浇筑	质量风险	面板混凝土温度裂缝, 滑模施工进度不当造成冷缝	高
面板浇筑	安全风险	高边坡作业坠落风险, 模板失稳	中
全阶段	环境风险	暴雨引发岸坡坍塌, 施工扬尘环境污染	中

4.2 基于模拟的风险场景构建

结合风险辨识及评价, 在 BIM 模型中创建典型的风险情景模型。风险情景模型建立运用情景分析法, 确定风险发生的触发因素以及演变过程。对于面板温度裂缝风险而言, 建立如下几个风险情景模型: 在面板混凝土浇筑过程中遇到高温天气, 面板混凝土入仓温度达到或者超过 28°C, 并且滑模滑升速度较快, 造成面板混凝土出现温度裂缝, 致使面板的防渗效果下降等。

风险场景的三维可视化是基于 BIM 模型。在模型内部以高光的方式标示出危险源点, 如趾板同 F1 断层面相交段、岸坡转角处的垫层单元等等。并且把风险要素和工期紧密结合起来, 在不同的时间节点设置监测时间窗口。比如面板混凝土浇筑期间对于温度特别敏感, 在这一阶段设定警戒线, 如果达到或者超过这个临界值就会报警。

4.3 风险过程动态预演与影响分析

基于建立的风险情境, 进行施工风险的动态模拟演练。模拟演练在 BIM 平台上通过动画的方式呈现出了风险发生、发展到最后演化成结果的过程。还是以板材温度裂缝为例, 动态模拟过程如图 5 所示。

风险过程动态预演分为三个部分: 首先是风险启动阶段的仿真, 在高温情况下观察混凝土温度场的变化及温度应变分布情况; 其次是风险发展的仿真, 在裂缝产生、发展直至连通的过程中进行观察, 最后是风险结果阶段的仿真, 在裂缝造成的板体漏水以及垫层细粒质流失等问题表现出来之后进行仿真。通过对风险动态预演的方式使得施工单位人员清楚地认识到了风险的发生原因及其发展的路线, 提高了对风险的认知水平以及关注度。

对风险后果进行量化评价。针对面板温控裂缝的风险, 利用有限单元法求解不同宽度、密度裂纹状态下面板的渗漏量以判断其对水库蓄水以及长期运行的影响; 针对坝体内填筑压实质量问题风险, 分析压实不足导致的坝体沉降及面板受力情况变化, 使风险后果得以量化, 从而能够据此有针对性地采取相应的风险防范对策。

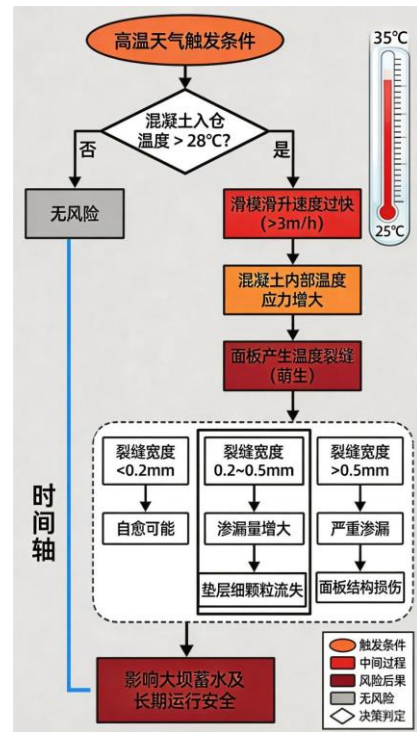


图 5 面板温度裂缝风险动态预演流程图

4.4 风险应对措施模拟与优化

对于识别出来的主要施工风险, 在 BIM 环境下进行仿真及优化处理风险预防手段。举例而言, 过渡料压实度不够的风险, 这个风险主要集中出现在岸坡起伏较大的地方。某水库大坝所采取的风险防范措施如下: 改进施工工艺, 小振碾结合大振碾用于补充压实岸坡边缘地带; 加大检查力度, 提高施工现场抽检频率, 并配置数字式压实监控器。然后在 BIM 模型内, 对经过改良之后的施工步骤再度进行模拟计算, 检验压实度是否满足要求。

面板温差应力裂缝防控措施模拟如下: 在 BIM 中设计好遮阳篷、喷淋降温系统的位置配置方案, 模拟采取降温措施对温差下温度控制的效果; 改变滑模推进速率的时间安排, 建立温度-速率关系曲线来保证温度变化率与混凝土固化速率相对应。经过多个方案模拟选择最好的降温

措施和滑升速度控制方法。图 6 表示了对风险防护措施进行改进过程。



图 6 基于 BIM 模拟的风险应对措施优化流程图

把经过模拟验证的风险防控手段加入施工方案当中，实现风险防控闭环；并将模拟结果同施工交底结合起来，制作出相应的风险防控措施动画交底片，提升现场施工人员对于风险防控要求的理解以及执行力度。

5 结束语

本文以河南某水库大坝混凝土面板堆石坝工程建设为例，详细介绍了基于 BIM 的堆石坝施工全过程三维动态模拟及风险预警方法体系。研究表明，利用 BIM 技术可以对堆石坝工程施工进行如下几方面的管理提升：首先是对三维地质以及设计模型建立起来后实现了对工程项

目信息的整体化呈现，其次是对四维动态模拟的使用使得坝体分层填筑生长过程一目了然从而更好地进行施工机械的选择与场地布置，最后是通过风险辨识以及三维预演能够对施工过程中可能遇到的风险因素的发展演变情况进行系统的分析，从而给施工方选择有针对性的风险控制策略提供了可靠的数据参考。伴随着 BIM、物联网、人工智能等新技术的发展结合，BIM 应用于堆石坝建设中正在向着智能化方向转变。

[参考文献]

- [1]唐永发,丁留涛,童培栋,等.某 300m 级堆石坝砾石土心墙料掺合施工工艺研究[J].水利技术监督,2026(6):369-372.
 - [2]杨韬.混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术[J].水科学与工程技术,2025(4):57-59.
 - [3]佟大威,孙楷翔,张君,等.堆石坝施工仿真参数 HHO-RDSOGM 在线更新模型研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2025,58(12):1272-1287.
 - [4]马红利,李小东,李兆宇,等.玛尔挡堆石坝坝体填筑分期快速施工方案与技术应用[J].陕西水利,2025(12):116-119.
- 作者简介：付海林（2001—），男，毕业于云南大学滇池学院土木工程专业，助理工程师，就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，项目施工管理部副主任。