

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230161

# 基于 BIM 的面板坝动态设计方法研究及实践

侯毅, 曾 铿, 虞 鸿, 朱明笛

(浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

**摘要:** 面板坝在我国水利水电建设中应用广泛、发展迅速。针对面板坝常规设计的局限性,提出了基于 BIM 技术优化面板坝设计方法,通过可视化比选定线、结构参数化设计和模图表关联计量,实现了趾板定线动态比选、结构应力动态计算和坝体挖填动态决策,并分析了模型成果的数字化应用。进而将该方法应用于高坪桥水库面板坝设计,通过开发 BIM 插件、可视化编程和定制智能横断面,对趾板定线、BIM-FEM 联合分析和分区计算起到了提质增效的作用;同时模型成果轻量化交付,支撑“高坪桥数字水库智慧应用”,发挥 BIM 全生命周期价值。

**关键词:** 面板坝; BIM 技术; 动态设计; 工程数字化

**中图分类号:** TV222 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0060-05

## 1 引言

面板坝具有充分利用当地材料、施工简便、造价低等优点,在我国水电建设中取得了良好发展,是目前最常见的坝型之一<sup>[1]</sup>。由于自身具备较好的安全性和适应性,数十年来,面板坝设计主要采用经验设计法。但工程实践表明,在坝坡稳定、渗流控制、变形协调、结构应力等多个方面,需进行更为详细的分析计算<sup>[2]</sup>。BIM 技术具有可视性、优化性和模拟性的特点,能够为这些分析计算和结构优化提供基础模型,起到辅助设计的作用<sup>[3]</sup>;同时 BIM 模型可向建设期、运行期传递,支撑工程的智慧建设<sup>[4]</sup>、智慧运维<sup>[5]</sup>,逐步推动面板坝建设由经验筑坝向理论指导筑坝转变。本文针对面板坝常规设计方法自动化程度低、关联性弱的局限,提出了基于 BIM 的动态设计方法。开发定线插件实现可视化比选定线;可视化编程驱动参数化设计,提升 BIM-FEM 联合分析效率;定制智能横断面支持模图表一体化精准计量;实现了动态比选、动态计算和动态决策,同时探索了模型成果的数字化应用。

## 2 常规设计方法的局限性

面板坝设计的首要问题是坝址选择,坝址选

择的主要因素是找到一个合适的趾板位置,使趾板置于抗渗性能良好的岩基上,尽量避开不利地质因素,且趾板 X 线尽可能平直<sup>[6]</sup>,以减小纵向变形梯度。趾板 X 线定线不当,会造成多次开挖、素混凝土填塘等被动施工局面,浪费工期。在实际工程中,因存在覆盖层及不可预见的地层起伏,导致趾板处基岩情况不能完全掌握,往往还需在施工期基岩揭露后,对趾板 X 线进一步调整(称为二次定线)。因此趾板 X 线布置是一个多次比选、优中选优的过程,期间需反复切剖面查看地质情况,低效重复的工作量较大,且每次 X 线调整均会导致后续设计内容大量修改。

面板坝设计的关键问题是面板设计。面板为面板坝的防渗主体结构,关系到坝坡稳定、渗流控制、应力变形和抗震安全。面板设计需完成分缝分块、厚度计算、接缝止水、钢筋配置等内容,其中接缝设计是重难点。周边缝是面板坝最薄弱环节,为不规则三维空间线,缝内铜止水片结构异形、连接复杂,通常需多个局部剖面联合表达,设计制图、施工识图难度均较高。另外,面板分缝、配筋和止水布置等互相影响,常规设计各项工作彼此割裂,调整方案效率低下。

面板坝设计中坝体挖填对经济性影响最大,直接决定料场开采量和土方成本。常规设计采用断面法计量,设计精度受制于断面数量,且任何人

收稿日期: 2023-02-09, 修回日期: 2023-03-14

基金项目: 浙江省水利科技计划项目(RC2149)

作者简介: 侯毅(1989-),男,硕士、高级工程师,研究方向为水利工程 BIM 设计及应用,E-mail:601081728@qq.com

为错误均会带来实际中巨大的工程量偏差,设计复核工作费时耗力。

### 3 BIM 动态设计关键技术研究

针对常规设计局限,研究基于 BIM 的面板坝动态设计方法,将人工建模、算量、制图等重复机械工作交给计算机完成。如遇方案调整,修改参数,模、图、表动态更新,使设计从低效作业中解放出来,回归创意本质。基于 BIM 的面板坝动态设计流程见图 1。基于 BIM 的面板坝动态设计的优化目标为:①开发 BIM 插件,可视化布置坝轴线、趾板 X 线,提升定线质量与效率,实现动态比选。②通过可视化编程进行结构参数化设计,辅助 BIM-FEM 联合分析,实现动态计算。③基于坝址地形地质模型,开展面板坝挖填 BIM 设计,模图表关联计量,实现动态决策。

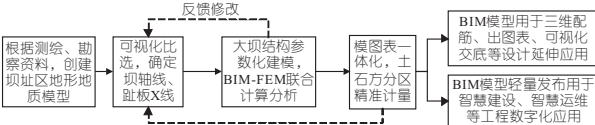


图 1 基于 BIM 的面板坝动态设计流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concrete face dam BIM dynamic design process

#### 3.1 可视化比选定线

趾板 X 线是面板底面与趾板基础面的交线,是趾板设计、施工的基准线。趾板 X 线根据坝轴线位置、面板坡比和坝基地形、地质条件来确定,尽可能保证每段趾板均布置在地质条件好、工程量和施工方便的岸坡上<sup>[7]</sup>。

利用离散平滑插值算法<sup>[8]</sup>推算钻孔间数据,构建图 2 所示的坝址区地质模型。基于地质模型,水工、地质人员可视化协同,直观布置坝轴线与趾板 X 线。为保证趾板建基于弱风化基岩,设置定线目标函数{趾板 X 线基本落于强、弱风化基岩面之间},函数变量包括坝轴线、面板坡比、强风化基岩曲面、弱风化基岩曲面。基于 Civil 3D 二次开发定线插件,功能如下:首先根据坝轴线和

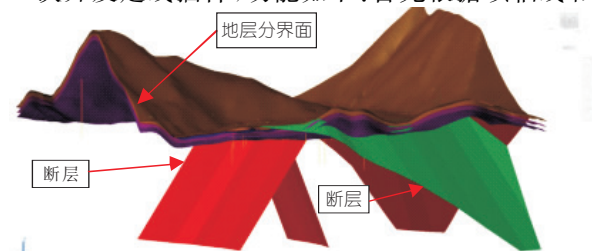


图 2 坝址区三维地质模型

Fig. 2 3D geological model of dam site area

面板坡比,向上游放坡至与地质曲面相交,得到上游坡脚线(图 3)。将自动生成的上游坡脚线化简规整,拟合为初始 X 线。沿初始 X 线设置纵剖面,分别以强、弱风化基岩面为上、下限, X 线各桩号高程为变量,进行包络搜索(图 4)。若超限,通过表格修改 X 线折点桩号、高程,其变化在三维主窗口和横剖面图中实时反映,多角度审视 X 线与基岩面的相对空间关系,满足定线目标后,确定为正式 X 线。

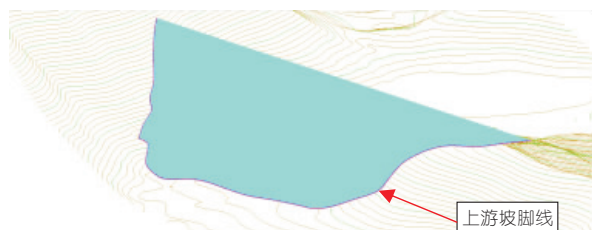


图 3 上游坝坡与地质曲面相交

Fig. 3 Intersection between upstream dam slope and geological surface

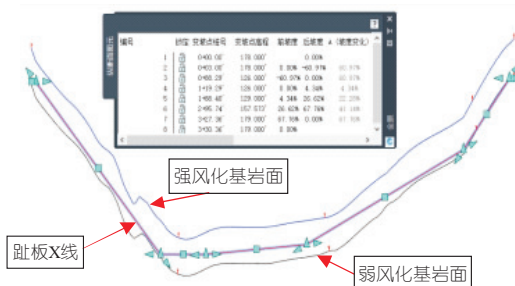


图 4 沿趾板 X 线地质纵剖面

Fig. 4 Geological longitudinal section along the toe slab X-line

定线完成后,正式 X 线偏移创建趾板建基面,沿建基面边界向地形曲面放坡,生成趾板边坡。定线插件能够沿坡脚线对趾板边坡进行逐点采样分析,得到当前方案边坡最高处的坡顶、坡脚高程,对照《建筑边坡工程技术规范》<sup>[9]</sup>相关条文,快速判别边坡安全等级。同时,从正式 X 线向相对隔水层曲面( $q \leq 3 Lu$ )垂直放坡,生成防渗帷幕曲面,自动统计帷幕曲面面积,见图 5。

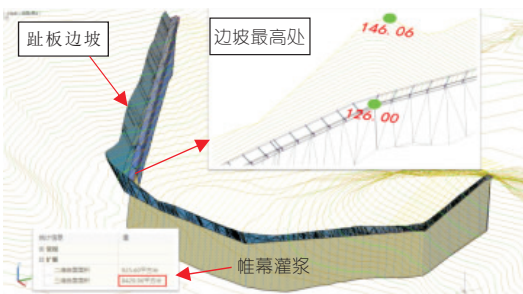


图 5 趾板 X 线三维可视化定线效果

Fig. 5 3D visualization alignment result of the toe slab X-line

由此可见,借助自主开发的定线插件,输入坝轴线和面板坡比,即可自动生成趾板 X 线,并支持可视化调整,在调整过程中,趾板边坡、防渗帷幕随 X 线动态更新,实现了动态比选。

趾板 X 线确定后导出折点坐标用于趾板设计,以趾板设计断面为轮廓, X 线为路径,放样构建趾板模型。

### 3.2 结构参数化设计

以面板为例,阐述结构参数化设计方法。首先分析面板设计过程,梳理设计参数包括面板厚度  $T$ , 面板分块宽度  $W$ , 垂直周边缝段长度  $L$ 。面板厚度  $T$  主要根据便于配置钢筋和止水、厚度足够控制渗透水力比降低于允许值等要求确定。百米以下坝常采用等厚面板,按照下式<sup>[10]</sup>计算:

$$t = 0.3 + \alpha H \quad (1)$$

式中,  $t$  为面板厚度;  $H$  为从坝顶到计算断面的高度;  $\alpha$  为经验系数,近代面板坝一般取 0.003。

面板分块宽度  $W$ , 根据河谷形状、面板应力和变形计算成果及施工条件确定<sup>[11]</sup>。垂直缝(图 6)方向与坝轴线垂直,从坝顶沿坝坡延伸到周边缝,在接近周边缝  $L$  处转弯至与之垂直。需要注意的是,  $L$  长分缝面并非铅垂面,而是垂直于周边缝的空间斜面,见图 7。

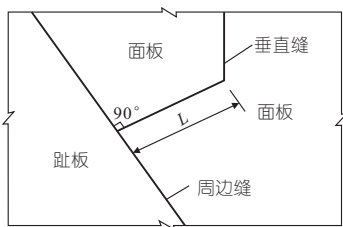


图 6 垂直缝示意图

Fig. 6 Schematic diagram of vertical joint

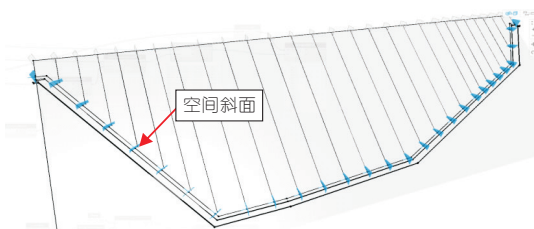


图 7 面板模型分缝示意图

Fig. 7 Schematic diagram of dam face model splitting

通过 Revit+Dynamo 可视化编程,创建面板模型。程序设计逻辑见图 8,步骤如下。

**步骤 1** 根据顶部轴线、面板坡比和面板厚度创建面板粗略模型。

**步骤 2** 提取趾板与面板交线为边界,裁剪粗略模型,得到面板整体模型。

**步骤 3** 根据各条块设计宽度创建分缝面,切割得到面板分块模型。

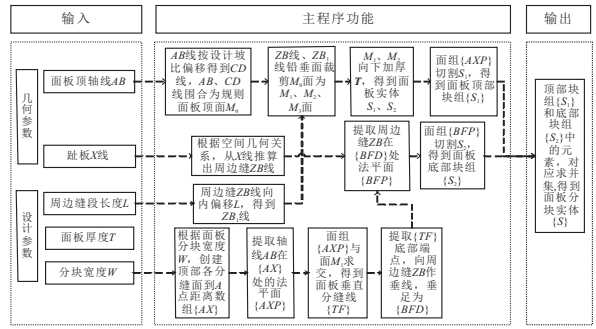


图 8 可视化编程逻辑框图

Fig. 8 Logic diagram of visual programming process

#### 步骤 4 面板模型各分块编号标记。

输入参数后执行程序自动完成面板建模和分缝,通过调参模型自动更新,从而提高模型修改效率。可视化编程创建的数组、平面集、实体集等中间对象可单击查看,以检验运行过程的正确性。Dynamo 程序文件可在多个工程中复用,形成普遍的效率提升。

FEM 是应用于复杂结构优化设计的重要分析方法。通常在进行 FEM 计算时,建立几何模型、划分网格等前处理工作需花费大量时间<sup>[12]</sup>。本文采用 BIM-FEM 联合分析,主要流程为:基于 BIM 模型划分网格,导入 FEM 软件计算,减少前处理工作量;根据计算结果优化结构,调参修改模型后再次导入 FEM 软件计算;重复“导入计算—模型修改—重新导入计算”过程,至结构应力变形满足要求。采用参数化设计,使 BIM 模型修改时间大大缩短,能够即时响应 FEM 计算结果,显著提高 BIM-FEM 联合分析效率,实现动态计算。

### 3.3 模图表关联计量

借助 Civil 3D 的道路模块,在三维地形中直观开展“面向对象”的设计,构建图 9 所示面板坝挖填模型,分区统计土、石方挖填量。首先通过平、纵、横要素定义面板坝坝体参数模型。其中智能横断面是设计重点,断面各点包含唯一编号,按照“Point-Link-Shape”的层级定义各分区面积,并包含上下游坝坡 link 指向建基曲面、坝顶与建基

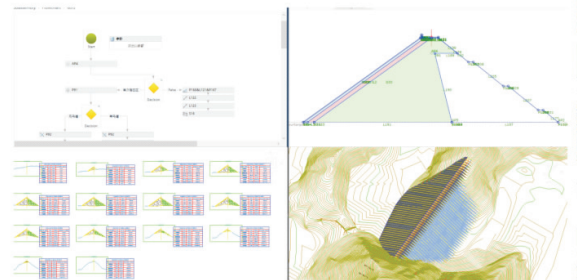


图 9 面板坝坝体挖填模型

Fig. 9 Excavation and filling model of concrete face dam body

面高差决定当前桩号断面有无次堆石区、有几级马道等逻辑定义,使得各分区能够自适应地形起伏。沿坝轴线按任意间距设剖面线,从模型提取剖面图和工程量表,模、图、表动态关联、自动更新。

这种设计方法将传统量中切横断面、梯形公式计算<sup>[13]</sup>等手动工作交给计算机完成,避免了人为错误和断面过少引起的工程量偏差,提高了精度;同时动态关联的机制使得工程量能够随设计调整实时变化,高效便捷,支持了面板坝挖填动态决策。

### 3.4 模型应用研究

模型成果可进行三维配筋、出图出表和可视化交底等延伸应用,避免了建模、设计两张皮。通过轻量化渲染发布<sup>[14]</sup>,使模型成果从本机环境走向线上,构成工程数字化的基础。BIM 为信息集成与传递提供了载体,通过 ID 将模型构件与面板坝实体中的结构、设备一一对应,使项目数据库中的各类设计、施工、运维信息能够按对象来组织、呈现。基于 BIM+GIS+IOT 打造数字孪生场景,展示工程建设、运行形象面貌<sup>[15]</sup>,赋能工程管理。

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

高坪桥水库工程位于龙游县社阳溪上游,总库容  $3\ 206 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,概算投资 9.9 亿元。工程由拦河坝,发电引水系统,溢洪道、放水洞、电站厂房等组成。如图 10 所示,拦河坝采用面板坝,坝顶长 276 m,宽 8 m,面板坝高 61 m。坝体分区填筑,分层碾压,自上游至下游依次分为 6 个主要填筑区。面板坝防渗体系由 L 型防浪墙、防渗面板、趾板、止水及灌浆帷幕组成。

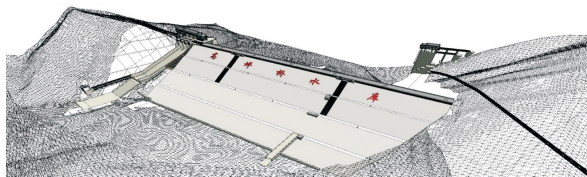


图 10 高坪桥面板坝 BIM 模型

Fig. 10 BIM model of Gaopingqiao concrete face dam

### 4.2 实践效果

高坪桥水库工程从初步设计阶段开始采用 BIM 动态设计。三维可视化比选趾板一次、二次定线,保证趾板的建基条件良好,施工过程顺利。可视化编程创建坝体结构模型,利用 Dynamo-Hypermesh-Abqus 联合分析其应力变形。如图 11 所示,先将 BIM 模型导入 Hypermesh 软件划分网格,完成相关设置后,利用 Abqus 求解器进

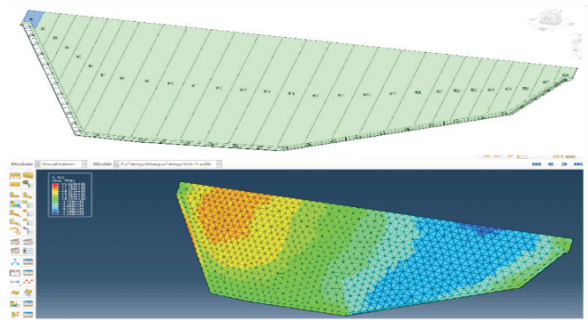


图 11 高坪桥面板坝有限元计算示意图

Fig. 11 Finite element calculation of Gaopingqiao concrete face dam

行计算,根据计算结果调参优化至结构定型。如图 12 所示,基于模型三维配筋,生成关联的钢筋图、表。对面板周边缝止水鼻坎朝向、多向连接等细节可视性交底,减少了施工差错。模、图、表一体化,精准统计主堆石区、次堆石区、混凝土面板、垫层料、过渡料等工程量,减少了料场开采。

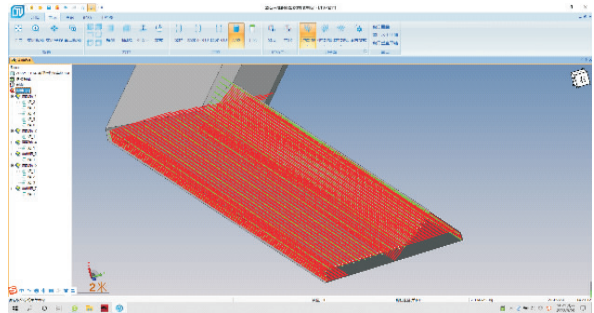


图 12 高坪桥面板坝趾板配筋应用

Fig. 12 Toe slab 3D reinforcement of Gaopingqiao concrete face dam

依托模型成果,将工程原有“高坪桥水库标准化管理平台”升级为“高坪桥数字水库智慧应用”。围绕水库日常运行管理需求,按照“建筑物—分部工程—构件实例”三级树状目录组织模型构件,将设计、施工和运行阶段的各类信息结构化处理后,集成至对应模型构件。以面板三向测缝计 JMT3 为例,仪器模型绑定设计定位桩号、施工期设备编号和运行期实测数据,如图 13 所示,在页面中点击模型,交互展示变形过程线、分布图,辅助面板坝结构安全评价。高坪桥数字水库智慧应用以“BIM+业务”为核心亮点,数字赋能水库管理,荣获浙江省水利数字化改革第一批最佳应用。



图 13 高坪桥数字水库智慧应用页面

Fig. 13 Page of Gaopingqiao digital reservoir intelligent system

## 5 结 论

a. 基于 BIM 的面板坝动态设计提升了设计的自动化、智能化水平,对选址定线、结构优化、图表计量等工作确能起到良好的辅助作用,特别是传统设计中人力密集环节,动态设计提质增效作用尤其显著。

b. 基于通用 BIM 软件的二次开发、可视化编程能够更具针对性地解决设计问题,是解决 BIM 设计“最后一公里”问题的技术路径,值得深入研究,以推进 BIM 设计多点应用向全面 BIM 正向设计转变。

c. BIM 技术全生命周期的特征契合工程数字化需求。从基于 BIM 动态设计到基于 BIM 精益施工和精细管理,充分发挥模型信息传递作用,具备广阔应用前景。

d. 数字孪生的浪潮对深化 BIM 技术应用提出了新要求。以 BIM 设计为龙头,拓展基于 BIM 的工程数字化应用,强化模型与算法、模型与业务的融合,是下一步的研究方向。

### 参 考 文 献:

[1] 贾水欣,费文平,赵蒙屏. 混凝土面板分缝对堆石坝动力特性的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2015(10):163-166,169.

[2] 沈凤生. 混凝土面板堆石坝设计与实践关键技术研究[J]. 水利规划与设计,2017(1):1-6,10.

[3] 解凌飞,李德. 基于 BIM 技术的水利水电工程三维协同设计[J]. 中国农村水利水电,2020(3):105-

111.

[4] 张社荣,刘珊,王超. 基于 BIM+GIS 的碾压混凝土坝浇筑进度监控平台开发[J]. 水电能源科学,2021,39(10):93-97,126.

[5] 王培成,包腾飞,朱茜. 基于 BIM 的大坝安全监测信息管理系统开发研究[J]. 水电能源科学,2019,37(4):72-75.

[6] 王蒙,张合作,程瑞林. 基于 CATIA 的面板坝趾板三维设计研究[J]. 水力发电,2018,44(6):57-61.

[7] 董甲甲,蔺志刚,王美斋,等. 混凝土面板堆石坝趾板的三维设计方法研究[J]. 水利规划与设计,2018(2):125-126,146.

[8] 虞鸿,徐肖峰,方海挺,等. 大中型泵站群桩基础数字化协同设计方法研究与实践[J]. 水电能源科学,2022,40(12):213-216,177.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范:GB50330-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[10] 蒋国澄,傅志安,凤家骥. 混凝土面板坝工程[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997.

[11] 胡耘,张嘎,程嵩,等. 面板堆石坝面板竖缝特性对面板应力变形影响分析[J]. 岩土力学,2009,30(4):1089-1094.

[12] 宁晓旭,李健刚,王磊,等. 基于 BIM 设计的有限元模型转化计算方法研究[J]. 公路,2020,65(9):107-113.

[13] 赖文辉,刘佳丽. 基于 AutoCAD 的土石坝土方量的快速计算[J]. 中国农村水利水电,2007(8):78-80.

[14] 晁阳,牛志伟,齐慧君. 基于 WebGL 的 BIM 模型可视化研究[J]. 水电能源科学,2020,38(9):79-82.

[15] 孙少楠,潘传旭,赵继伟. 基于多维度的水利工程 BIM 信息交互管理及应用[J]. 水电能源科学,2021,39(11):179-183.

## Research and Practice on BIM Dynamic Design Method of Concrete Faced Dam

HOU Yi, ZENG Zeng, YU Hong, ZHU Ming-di

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Co., LTD., Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** Concrete faced rockfill dam is widely used and rapidly developed in water conservancy and hydropower construction in China. This paper optimized the design method of concrete face dam based on BIM technology, realizing the dynamic comparison and selection of toe slab alignment by visual comparison and selection, achieving dynamic calculation of structural stress by structural parametric design and dynamic decision of dam excavation and filling through module-drawing-chart correlation measurement. As the result of dynamic design method, the model was applied to engineering digitization. Then the method was applied to the design of Gaopingqiao Reservoir face dam. Through the development of BIM plug-in, visual programming and customized intelligent cross section, it has played a role in improving the quality and efficiency of toe slab alignment, BIM-FEM joint analysis and zoning quantity calculation. In addition, the lightweight delivery of the model results supports the "intelligent application of Gaopingqiao digital reservoir" and gives full play to the value of the whole life cycle of BIM.

**Key words:** concrete faced dam; BIM technology; dynamic design; engineering digitization