

基于数值模拟的高混凝土坝应力变形特性分析研究

金坤兵¹ 成 娇²

1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

2. 邯郸市水利水电勘测设计研究院 河北 邯郸 056000

摘 要: 进行高混凝土坝数值模拟, 实际上得把几何建模、网格划分和边界条件设定这些基础工作都做到位, 合理搭配自重、水压等荷载。常规工况下, 坝体变形主要是顺河向水平位移, 从坝底向坝顶逐渐增大; 压应力在整个应力场中占主导, 不过坝踵附近偶尔会有拉应力集中。参数敏感性分析显示, 弹性模量和地基范围对坝体响应的影响最突出, 材料老化还会让长期变形更严重。总的说来, 利用有限元模拟就能把应力变形规律摸清楚, 为坝体安全评估提供依据。

关键词: 高混凝土坝; 数值模拟; 应力变形; 坝体安全评估

引言: 高混凝土坝运行期承受水压、自重及温度等多重荷载, 其应力变形特性可以说是评价结构安全的核心依据。数值模拟虽然能够系统揭示坝体力学响应, 但结果的可靠性往往取决于模型构建、参数选取与边界处理是否合理, 实际中这一点常被忽视。不同几何尺寸、材料参数及地基范围对坝体变形和应力分布影响各异, 进行敏感性分析有助于我们厘清主导因素。本文围绕模型建立、常规工况响应及关键参数影响展开, 旨在为坝体安全评估提供一些参考。

1 高混凝土坝数值模拟模型构建

1.1 坝体几何模型建立

高混凝土坝的几何模型构建可以说是数值分析的基础环节, 其准确程度直接关系到后续计算结果的可靠性。建模时, 需要依据设计图纸中的关键控制参数, 利用三维建模手段将实际坝体结构转化为可计算的数学表达。在这个过程中, 坝体断面形式、坝轴线走向以及坝顶高程等核心几何特征都要精确反映, 同时廊道系统、坝内孔洞以及止水设施等细部构造, 也应根据分析目的做适当简化。此外, 模型的空间坐标系设定应与实际受力方向保持一致, 这样便于荷载的准确施加和约束条件的合理配置。

1.2 计算区域网格划分与独立性验证

网格划分是将几何模型离散化为有限单元的关键操作, 其质量好坏直接影响数值解的精度和收敛性。针对高混凝土坝的结构特点, 我们通常采用以六面体单元为主的结构化网格方案, 在坝体与坝基接触带以及坝面转折部位, 实施局部加密策略, 从而确保应力梯度较大区

域的插值精度满足要求。至于网格独立性验证, 则需要通过逐次增加单元数量, 并对比关键部位位移与应力响应的差异来完成, 当相邻两套网格计算结果之间的相对偏差控制在可接受范围内的时候, 就可以认为网格密度达到了计算要求。

1.3 材料参数赋值与边界条件设定材料参数和边界条件怎么定, 可以说是数值模型能不能真实反映物理行为的关键环节。坝体混凝土这块, 得根据配合比和养护条件来给弹性模量、泊松比和密度这些基本力学指标; 坝基岩体则要按照地质勘察成果分层分区, 给不同的变形模量和强度参数。边界处理方面, 坝底和两岸坝肩要加法向位移约束, 模拟岩体对坝身的嵌固作用; 坝基底部完全固定, 上下游坝面和坝顶则是自由边界, 让它们在荷载作用下能按物理规律自由变位。

1.4 荷载工况组合与施加方式高混凝土坝运行时, 各种荷载一起作用, 荷载工况怎么组合和施加, 可以说是数值模拟成败的关键。主要荷载包括自重、上下游水压力、扬压力和温度荷载等。自重靠施加重力加速度场来实现, 水压力按静水压强沿深度线性分布加在坝面上, 扬压力则根据坝基渗流场, 给底面节点加上相应的释放荷载。这些荷载得按设计规定的极端高水位、正常蓄水位等控制条件来组合, 还要分成基本组合和特殊组合, 分别计算, 这样才能全面评估大坝在不同运行情况下的受力和安全裕度。

2 高混凝土坝常规工况下应力变形特性分析

2.1 坝体整体变形分布规律

从变形分布来看, 常规工况下高混凝土坝的整体变

形以顺河向水平位移为主导分量,其量值沿坝高自底部向顶部呈递增趋势,最大值通常出现在坝顶中部区域。对于高拱坝而言,空间上存在显著的倒悬特征,即在特定坝高范围内坝体倾向上游,而更高部位则转为顺河向下游方向。竖向变形主要表现为整体沉降,受自重与水荷载联合作用的综合影响。2025 年研究显示,采用 FEM-DDA 耦合方法能够获得坝体轴向、顺河向及竖向位移的全方位计算结果。短时间基线时序 GB-InSAR 技术的监测结果与传统垂线加水准方法在多个测点处吻合良好,均方根误差约为 2 毫米^[1]。各部位变形响应与水位变化之间存在显著相关性,整体变形场在空间上呈现连续过渡的特征。

2.2 坝体典型截面竖向、水平向变形特征

选取典型截面进行分析,有助于我们掌握变形沿不同方向的分布规律。竖向变形方面,沉降量自坝基向坝顶逐渐增大,最大值一般出现在坝顶附近。坝体中部截面的沉降分布比较均匀,而靠近两岸坝肩的截面因岩体约束影响,沉降量会明显减小。水平向变形方面,顺河向位移沿坝高呈非线性增长,位移最大值位于坝顶。高拱坝典型截面的倒悬变形在中上部比较显著,该区域上游向变形梯度相对偏大。某碾压混凝土重力坝蓄水至正常水位阶段的模拟结果显示,坝踵区最大顺河向位移为 4.18 毫米,坝趾区为 2.30 毫米,两区最大竖向位移分别为 6.25 毫米和 5.55 毫米^[2]。各高程处变形分布均呈连续特征,未出现明显突变或不协调现象。

2.3 坝体整体应力分布规律

在常规工况下,整体应力场以压应力为主导,拉应力仅局限于局部特定区域。上游面在水压力作用下主要承受主拉应力,下游面则以主压应力为主,且随着蓄水位的升高,上游面拉应力和下游面压应力均呈增大趋势。对于拱坝,最大主压应力通常出现在下游拱端附近,该区域的压应力水平显著高于坝体其他部位。整体应力沿坝高自上而下逐渐增大,坝体底部及坝踵坝趾处应力水平相对较高。某碾压混凝土重力坝蓄水至正常水位的计算显示,坝踵区最大应力为 18.41 兆帕,坝趾区为 13.19 兆帕,均未超过规范规定的混凝土抗压强度限值。通过数值模拟,我们能够明确坝体的应力状态及发展趋势,这为大坝安全评判提供了依据。

2.4 坝体拉应力、压应力集中区域分布特征

拉应力集中的区域,主要分布在坝体上游面与坝基交接的坝踵部位,以及上游拱端附近。在常规蓄水工况下,坝踵区域因水压力引起的弯矩作用,会产生显著的

拉应力集中,这也是抗裂设计里需要重点盯防的部位。拱坝坝踵的竖向应力在蓄水前后差别挺大,这说明水荷载对坝踵应力状态的影响很显著。强约束区建基面附近的拉应力水平本来就比较,要是温度控制再跟不上,就有可能催生新的裂缝。压应力集中的区域,则主要出现在下游坝面的坝趾部位,以及下游拱端附近的双向受压区^[3]。两岸坝肩的应力分布,受地质条件影响可能会出现一定程度的不对称,左拱端和右拱端的压应力及位移响应也会有所不同。拉压应力集中区域的分布特征,直接关系到坝体局部安全裕度的评估,是常规工况应力分析中需要重点关注的方面。

3 高混凝土坝应力变形敏感参数分析

3.1 敏感参数筛选原则与分析方法

高混凝土坝的应力变形状态受多重因素共同影响,不同参数对坝体响应的作用强弱差别还挺大,因此建立一套科学的敏感参数甄别机制很有必要。筛选工作主要遵循两条基本准则:一是参数变化所引发的坝体应力或变形场调整幅度,必须达到可辨识的量级水平;二是该参数在实际工程中具有一定的不确定性或显著变异性,确实需要纳入分析。在分析方法上,目前比较通行的技术路线包括局部敏感性分析和全局敏感性分析两大类。局部方法侧重于单个参数变动对输出结果的独立影响,计算效率较高,但难以捕捉参数间的交互效应;全局方法则能综合评估各参数的独立贡献及其耦合作用^[4]。近年来,投影寻踪回归法也被引入面板坝应力变形影响因素的分析中,该方法能够从高维数据中自动识别关键因子,并给出各因素的相对影响权重。

3.2 几何尺寸参数敏感性分析

坝体的几何尺寸参数是影响应力分布和变形特征的基础性要素,其中坝高、坝顶厚度、坝底宽度以及坝体轮廓曲线这些变量,对应力变形场都有不同程度的调控作用。坝高增加会直接加大坝体自重荷载和上游水压力,使坝踵部位的压应力水平和坝趾部位的拉应力水平同步抬升,整体的沉降变形自然也跟着加剧。坝体厚度尤其是坝底宽度的变化,对坝基面的应力均匀性有直接影响,合适的宽高比设计能够有效改善应力分布格局,并在一定程度上削弱局部应力集中。对于拱坝而言,曲率半径和中心角等轮廓参数同样不能忽视,因为这些几何特征决定了坝体在承受水荷载时的拱向传力路径和整体刚度特性。需要特别指出的是,几何尺寸参数之间并不是孤立作用的,坝高与坝底宽度的比值、厚度的渐变方式这类组合参数,往往比单一尺寸变量具有更强的调控效力。所以在敏感性分析中,必须把几何尺寸参数的

交互效应纳入考量,避免因忽略耦合关系而导致对关键影响因素的误判。

3.3 材料力学参数敏感性分析

材料力学参数是决定坝体应力变形响应的核心内因,其中弹性模量、泊松比、抗拉强度、抗压强度及热膨胀系数等,对坝体力学行为具有不同程度的控制作用。在诸多材料参数里,混凝土弹性模量可以说是最敏感的因子之一。弹性模量变化直接影响坝体在荷载下的刚度特性与变形协调能力,模量值越高,弹性变形越小,但也可能因约束增强而带来更高的温度应力和收缩应力。随着运行年限增加,混凝土会发生老化劣化,弹性模量呈逐渐衰减趋势。基于老化损伤模型的非线性动力分析显示,运行一百年后坝体顺河向相对位移峰值较新坝状态增大 13.5%,横缝开度增大 43.3%^[5]。泊松比的敏感性相对弹性模量来说低一些,但在涉及多向应力状态和复杂边界条件的分析中仍不可忽略。热膨胀系数在温度应力分析中具有关键作用,其取值偏差会直接影响施工期和运行期的温度应力仿真精度。材料参数随时间的老化演化规律及其对长期变形的影响,已成为当前高坝安全评估中绕不开的重要课题。

3.4 边界约束参数敏感性分析

简单来说,边界约束条件是有限元分析里影响计算精度的关键因素,主要包括地基范围怎么取、约束怎么加,以及坝基接触条件怎么定。地基范围取大了还是取小了,直接关系到模型边界效应能不能控制好。已有研究显示,如果地基范围取不够,坝体变位算出来会因为边界约束的虚假影响而明显跑偏。根据弹性理论分析和数值计算结果,工程上一般建议上游取五到十倍坝高,下游取五倍坝高,地基深度也取五倍坝高。在底部加完全位移约束,上下游加顺河向连杆约束,这样能比较好地模拟半无限地基的真实表现。地基岩体的变形模量差

异也很关键,尤其是在断层破碎带这类复杂地基里,模量不均匀容易导致不均匀沉降,进而使坝体产生附加应力和局部变形集中。地基的成层特性对动力响应也不能忽视,忽略它可能把位移结果算得偏高。坝体和地基之间的接触条件,同样在一定程度上影响坝体的变形模式和应力传递路径。

结束语

高混凝土坝的应力变形特性受模型构建、材料参数及边界条件等多重因素共同制约。常规工况下坝体以压应力为主导,变形沿坝高呈递增规律,拉应力主要集中在坝踵等局部区域。敏感性分析表明,弹性模量与地基范围对坝体响应影响最为突出,材料老化问题同样不可忽视,运行百年后变形显著增大。数值模拟能够有效揭示坝体力学行为,为安全评估提供可靠依据,后续还应加强长期服役性能方面的研究。

参考文献

- [1] 王鹏,史波,张斌,段杭,柯传芳,徐福斌,王雨佳,金霄.短时间基线集 GB-InSAR 白鹤滩特高拱坝坝面变形监测应用 [J]. 武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1440-1451.
- [2] 陈伟.施工期蓄水对重力坝应力变形影响分析 [J]. 地下水,2025,47(3):180-181+199.
- [3] 李红梅.超高混凝土面板坝面板的静应力及变形分析 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2024.
- [4] 杨映,曾乾礼,郑磊,等.高海拔地区混凝土坝热力学参数反演和温控措施优化 [J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(S1):282-287.
- [5] 陈灯红,徐英浩,潘子悦.考虑混凝土老化影响的高拱坝非线性地震响应分析 [J]. 自然灾害学报,2025,34(6):171-179.