

非均质坝体施工渗流与稳定性协同分析

郭晓阳 黄婉琳

北京海策工程咨询有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6743

[摘要] 非均质土石坝在施工期的时候渗流场与稳定性有明显时空耦合特征,其材料分区渗透系数能跨越6至8个数量级。孔隙水压力峰值能够达到上覆土压的40%至60%,这会让有效应力降低30%至45%,当浸润线处于坝体1/3高度时稳定系数降低12%至18%,而达到2/3高度时降幅会扩大到25%至35%。通过协同分析方法构建多场耦合数值框架,并且经过参数反演来校核模型,进而建立多指标评价体系,为施工期安全评估提供定量依据。

[关键词] 非均质坝体; 施工期渗流; 渗流-应力耦合; 协同分析; 参数反演; 安全评价
中图分类号: O357.3 **文献标识码:** A

Coordinated Analysis of Seepage and Stability of Heterogeneous Dam during Construction

Xiaoyang Guo Wanlin Huang

Beijing Haice Engineering Consulting Co., Ltd.

[Abstract] During the construction period of heterogeneous earth-rock dams, the seepage field and stability have obvious spatio-temporal coupling characteristics. The permeability coefficients of the material zones can span 6 to 8 orders of magnitude. The peak pore water pressure can reach 40% to 60% of the overburden pressure, which reduces the effective stress by 30% to 45%. When the phreatic line is at 1/3 of the dam height, the stability coefficient decreases by 12% to 18%, and when it reaches 2/3 of the dam height, the reduction expands to 25% to 35%. A multi-field coupling numerical framework is constructed through a coordinated analysis method, and the model is verified through parameter inversion. A multi-index evaluation system is then established to provide quantitative basis for safety assessment during the construction period.

[Key words] Heterogeneous dam; Construction period seepage; Seepage-stress coupling; Coordinated analysis; Parameter inversion; Safety evaluation

引言

土石坝施工期渗流场演化和稳定性交互作用特征复杂,非均质材料分区造成渗流路径分布并不均匀,孔隙水压力累积会改变有效应力场状况。传统分离式分析方法难以捕捉耦合演化规律,迫切需要建立协同分析方法揭示动态关联机制。协同分析借助多物理场耦合数值模拟实现渗流与应力双向反馈计算,结合监测数据进行反演校核所需参数,建立多指标融合评价准则为施工过程控制作支撑。

1 非均质坝体施工期渗流场演化规律

1.1 材料分区渗透性能差异特征

非均质土石坝的防渗核心采用高塑性黏土,其饱和渗透系数在 10^{-7} 至 10^{-9} m/s范围内,具有优秀的防渗性能。反滤层选用级配连续的砂砾材料,其渗透系数达 10^{-3} 至 10^{-4} m/s,可维持渗透稳定并快速排出渗水。坝壳堆石材料因颗粒尺寸大,孔隙结构发育,渗透系数达 10^{-1} 至 10^{-2} m/s,形成自由排水地质结构^[1]。不

同区域材料渗透系数相差6至8个数量级,构成典型非均质渗流系统,黏土心墙在饱和过程中因黏土颗粒膨胀致孔隙闭合渗透系数呈非线性衰减特征。堆石材料内部架空结构随机分布,使局部区域形成高渗透通道,水平渗透系数比垂直方向高2至4倍。材料接触界面处渗透系数突变导致渗流折射现象,渗流线进入低渗透层时会偏离法线方向。

1.2 填筑工况下渗流边界时变过程

坝体在施工过程中,渗流边界会随着填筑进度分阶段发生变化。上游坝壳率先填到设计高程之后,会临时形成挡水边界。初期阶段,渗流边界仅受降水影响,条件比较简单,浸润线靠近坝底位置。随着上游水位不断上升,浸润面会向上游坝面移动,这会使渗流路径缩短三成到五成。心墙填筑时间晚于坝壳,导致防渗体系存在时间差,渗流会在这个未闭合段形成绕渗通道。反滤层分段铺设会改变渗流出逸位置,若铺设滞后,局部渗透坡降将会增大两到三成五^[2]。雨季施工的时候坝面会新增入渗边界,

当降雨量超出表层材料入渗能力就会形成坝面径流,在填筑间歇期部分渗流边界会趋于稳定状态,但快速复工会打破这种平衡让边界条件再次进入非稳态调整。

1.3 浸润线空间分布演化机制

浸润线位置是受材料渗透性能空间分布所控制,在非均质坝体中呈现非光滑曲线形态。心墙区域低渗透特性会让浸润线梯度变得陡峭,在该分区内垂直距离与水平跨度比值达0.6至0.8,进入反滤层之后渗透系数会出现骤增情况,浸润线斜率显著降低且曲线趋于平缓状态,坝壳堆石料的高渗透性可使浸润线快速降至排水边界附近,出逸点处于下游坝坡中下部的位。碾压不均匀造成的渗透系数局部异常会引发浸润线扭曲,在压实薄弱区域形成局部隆起的现象,反滤层铺设厚度不足时排水能力会受到限制,浸润线在该层内壅高使局部区域水头梯度增大1倍以上。长期降雨入渗会使浅层饱和区朝着深部进行扩展,浸润线整体抬升0.5至1.2m改变原有空间分布形态。

2 施工渗流-应力耦合作用机理

2.1 孔隙水压力对有效应力场的调控效应

在快速填筑条件下,心墙黏土渗透系数远低于固结系数,填筑荷载引起的超孔隙水压力无法及时消散,其峰值能够达到上覆土压力的40%到60%。超孔隙水压力的存在会直接降低土体骨架承担的有效应力,按照太沙基有效应力原理,总应力保持不变时孔隙水压力增量完全转化成有效应力减量,心墙中心线部位排水路径最长,孔隙水压力累积最为显著,该区域有效应力水平相较于设计状态降低30%到45%^[3]。有效应力的削弱会改变坝体内部主应力的分布格局,最大主应力迹线会向上游侧偏转5至10°,应力集中区域从坝踵转移到了心墙底部,孔隙水压力的空间分布不均匀性使得附加剪应力产生,在心墙与反滤层接触面处形成局部剪切带。填筑间歇期孔隙水压力部分消散让有效应力得以恢复,但完全固结所需时间远远超过了施工周期,残余超孔隙水压力处于持续存在状态。蓄水工况引入稳态渗流场之后,孔隙水压力分布进行重新调整,上游坝体区域静水压力叠加在施工期累积值之上,有效应力场再次发生了扰动。

2.2 渗透力驱动的变形响应与渗透性演化

渗透水流在孔隙介质中运动时产生渗透力,该体积力方向是沿着渗流线指向的,其大小与渗透坡降成正比关系。心墙区域内渗透坡降达到了0.4至0.7,这时对应的渗透力密度为4至7kN/m³,作用于土体骨架会引发附加变形,渗透力在竖向所产生的分量会削弱土体的自重应力,这就相当于降低了材料容重15%至25%,使得压缩变形相应减小。水平向的渗透力分量会推动土体朝着下游侧发生位移,心墙顶部的水平位移增量能达到2至5cm,位移梯度在浸润线附近是最大的。反滤层由于渗透坡降突然下降,渗透力的作用随之减弱,其变形响应主要受上覆荷载控制。浸润线以上的非饱和区土体受基质吸力影响,变形特性和饱和区存在明显差异,在界面处形成变形不协调带,长期的渗流作用会使细颗粒发生迁移,心墙局部区域孔隙比增大0.02到0.05,压缩模量降低10%至18%,累积变形持续不断发展。变形过

程会改变孔隙结构的分布,压缩变形使孔隙闭合导致渗透系数减小,而剪切变形造成的结构破坏可能增大渗透性,两者相互竞争决定渗透系数最终演化趋势。

2.3 渗流-稳定性双向反馈耦合机制

渗流场通过孔隙水压力让有效应力降低,抗剪强度按照摩尔-库仑准则相应地衰减,稳定系数随着浸润线的抬升呈现出非线性下降趋势。当浸润线处于坝体1/3高度时,稳定系数相比干坡状态降低了12%至18%,浸润线达到2/3高度时降幅扩大到25%至35%,渗透力在下游坝坡产生的滑动分量会进一步恶化稳定状态,渗透坡降每增大0.1,稳定系数就下降3%至5%。坝体变形会对渗流场产生反作用,压缩变形让土层厚度减薄使渗流路径缩短,渗透坡降增大了8%至15%,剪切带的发育会形成高渗透通道,局部渗透系数增大1至2个数量级,渗流量也会相应增加^[4]。稳定性降低引发的局部滑移会改变边界几何形态,下游坡脚隆起抬高了出逸点位置,浸润线梯度也随之调整,心墙区域的水平位移会压缩反滤层厚度,排水能力受限使孔隙水压力壅高,有效应力进一步降低形成恶性循环。施工期的动态平衡依赖于渗流与稳定性相互制约,快速填筑打破平衡导致失稳风险激增,适当施工间歇允许孔隙水压力消散以恢复稳定储备。

3 基于协同分析的施工安全控制

3.1 多场耦合数值计算方法

渗流-稳定性协同分析运用多物理场耦合数值模拟方法,借助有限元法来求解渗流场控制方程和应力平衡方程的耦合体系。渗流场计算采用非稳态饱和-非饱和渗流模型,依据理查兹方程描述孔隙水运动的相关规律,同时考虑材料渗透系数随孔隙比变化的动态调整关系。应力场分析引入比奥固结理论,把孔隙水压力作为体积力项耦合到应力平衡方程之中,土骨架有效应力与孔隙水压力通过太沙基原理进行关联。耦合迭代算法运用交错求解的策略,先固定应力场去求解渗流方程以获得孔隙水压力分布,接着把压力场代入应力方程来计算变形与应力状态,随后根据变形更新孔隙比从而修正渗透系数,循环迭代直至满足收敛标准。坝体材料本构关系采用邓肯-张双曲线模型描述应力-应变非线性特性,其参数通过三轴试验来确定。网格划分需要兼顾不同材料分区的几何边界,心墙区域网格尺寸控制在0.5至1m的范围,反滤层及坝壳网格尺寸可放宽到2至3m。时间步长要依据填筑速率来进行确定,快速填筑期采用1至3d的步长,间歇期则延长至5至7d,边界条件设置需考虑施工阶段的特征,初期仅仅施加重力场,蓄水之后上游边界转换为总水头边界,耦合计算迭代收敛标准设定为位移增量小于0.1mm,并且孔隙水压力变化低于100Pa。

3.2 监测数据驱动的参数识别技术

协同分析的精度是依赖于计算模型参数准确性的,通过施工期多场监测数据反演识别关键参数来提升预测可靠性^[5]。监测体系包含心墙关键断面所埋设的渗压计阵列,其布置间距在10至15m之间,并且垂向分层设置于坝体底部、1/3高度以及2/3高度位置,以此实时采集孔隙水压力时程数据。坝体内部变形监

测使用测斜管和分层沉降仪组合的方式,测斜管沿着坝轴线方向按照20至30m的间距进行布设,以此来获取水平位移分布曲线,分层沉降仪则用于记录各土层压缩变形量,参数识别运用目标函数优化方法,遵循计算值与实测值的残差平方和最小这一准则,对渗透系数、压缩模量等敏感参数进行调整。反演过程采用遗传算法来全局搜索最优参数组合,将种群规模设定在50至100,把进化代数控制在200至500代,以避免陷入局部极值。心墙渗透系数识别范围设定成初值的0.5至2倍,将压缩模量允许调整幅度确定为正负30%。要是实测孔隙水压力峰值和计算值偏差超过15%,就优先对渗透系数进行调整,当位移偏差超过20%的时候就调整变形参数。识别完成之后的模型能够预测后续施工阶段的渗流与稳定性响应,通过动态更新参数库的方式来实现滚动预测,从而为施工过程调控提供定量依据。

3.3 协同安全状态评价准则

渗流-稳定性协同安全评价要建立综合考量多场响应指标体系,克服单一指标片面性。孔隙水压力安全度定义为设计允许值和实际峰值的比值以反映有效应力削弱程度,当安全度低于1.2的时候就需要采取相应工程措施,浸润线位置安全度用出逸点高程和设计值的差值来进行表征,若超出设计值5m则安全度降为警戒级别。渗透坡降安全度采用临界坡降和实际坡降的比值来进行衡量,心墙区域临界坡降取值在0.8至1.0之间,当安全度低于1.5时就存在渗透破坏风险。稳定系数作为综合性指标需通过极限平衡法或强度折减法来计算,施工期的最小安全系数要满足规范要求达到1.35以上,协同评价引入了多指标耦合判据,当孔隙水压力安全度低于1.2,稳定系数低于1.4时判定为高风险状态,渗透坡降安全度低于1.5,伴随浸润线超出设计值3m以上时触发渗透破坏预警,协同指标体系通过层次分析法来确定权重,孔隙水压力与稳定系数权重分别占比35%,浸润线与渗透坡降各占15%。综合评分采用加权求和的方法,总分低于70分

时安全状态不满足要求,需暂停施工并实施加固处理,评价准则根据施工阶段动态调整阈值,填筑期要侧重对孔隙水压力进行控制,蓄水期强化对浸润线与渗透坡降的监测。

4 结语

非均质坝体在施工期渗流场演化和稳定性劣化存在时空耦合特征,孔隙水压力累积会对有效应力起到削弱作用,渗流-应力双向反馈机制表明变形反作用于渗流场形成恶性循环。协同分析方法借助多场耦合数值计算达成双向迭代求解,参数识别技术依靠遗传算法来进行优化反演,协同评价准则通过综合多指标耦合响应构建多维阈值体系。研究成果能为施工控制提供一定理论支撑,未来需要深化材料非均质性影响机制,发展多尺度协同分析方法。

[参考文献]

- [1]卢斌,郑雪玉,吴修锋.特高堆石坝砾石土心墙非均质缺陷对渗流场影响分析[J].水电与抽水蓄能,2023,9(3):22-25+39.
- [2]赵琛,王煜,张方宁,等.极端降雨条件对防洪堤渗流稳定性的影响研究[J].水利规划与设计,2025,(12):48-54.
- [3]王冰,刘猛,朱家辉.基于线性回归模型的黄前水库土石坝渗流稳定性分析[J].四川水泥,2025,(06):48-50.
- [4]石振明,张公鼎,彭铭,等.非均质结构堰塞坝溃决机理模型试验[J].工程科学与技术,2023,55(01):129-140.
- [5]雷海林,张万栋,张汉康.基于有限元方法的水利工程坝体稳定性监测研究[J].水利科技与经济,2024,30(03):152-157.

作者简介:

郭晓阳(1984--),男,汉族,山西省原平市人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电工程。

黄婉琳(1994--),女,汉族,四川自贡市人,本科,工程师,研究方向:水利水电工程。