

基于FLAC³D的库岸边坡渗流-应力耦合稳定性分析

陈晓佳

塔城水利设计研究院有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6758

[摘要] 库岸边坡稳不稳,这在水利工程和岩土工程中是关键问题,其失稳往往与库水位涨落引发的渗流场-应力场耦合作用息息相关。本研究采用有限差分软件FLAC³D,构建库岸边坡的数值模型,实施渗流-应力耦合方面的分析,深入探究库水位变化时边坡的孔隙水压力分布、应力状况以及位移响应特点,通过考虑耦合作用,能更真实地呈现边坡稳定性的动态演变进程,为库岸边坡的防灾与安全设计给出科学根据。

[关键词] FLAC³D; 库岸边坡; 渗流-应力耦合; 稳定性分析; 数值模拟

中图分类号: U416.1+4 **文献标识码:** A

Stability analysis of seepage stress coupling of reservoir bank slope based on FLAC³D

Xiaojia Chen

Tacheng Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] The stability of reservoir bank slopes is a key issue in hydraulic and geotechnical engineering, and its instability is often closely related to the coupled effect of seepage and stress fields caused by fluctuations in reservoir water levels. This study uses the finite difference software FLAC³D to construct a numerical model of the reservoir bank slope, and conducts analysis on the coupling of seepage and stress. It deeply explores the distribution of pore water pressure, stress conditions, and displacement response characteristics of the slope when the reservoir water level changes. By considering the coupling effect, the dynamic evolution process of slope stability can be presented more realistically, providing scientific basis for disaster prevention and safety design of reservoir bank slopes.

[Key words] FLAC³D; Slope of reservoir bank; Seepage stress coupling; Stability analysis; numerical simulation

引言

由于库水按周期涨落,库岸边坡受此影响,内部渗流情形不断变动,而且与岩土体应力场发生复杂的相互作用。引发渗流-应力耦合的效果,显著干扰边坡稳定性,传统的极限平衡手段无法全面刻画该动态耦合过程及边坡内部力学响应状况。FLAC³D通过显式有限差分法,能切实模拟非饱和-饱和渗流与应力变形间的相互作用。本文主要是要用FLAC³D,针对库岸边坡在库水位变动时的渗流-应力耦合情况开展精细模拟,透彻探究它失稳的道理,进而实施综合稳定性评价。

1 基于FLAC³D的渗流-应力耦合分析方法

1.1 FLAC³D软件与耦合原理

FLAC³D中有齐全的流固耦合求解模块,耦合分析的核心是利用物理方程实现渗流场与应力场之间双向的数据交流。在计算的时候,软件在每个时步交替求解渗流方程与力学方程,渗流方程按照当前应力状态对孔隙水压力与饱和度分布予以更新;力学方程凭借更新后的孔隙水压力计算有效应力,进而算出岩土

体的新位移与应力情形。这种迭代求解法能如实呈现孔隙水压力变化引发岩土体变形、变形又反过来影响孔隙水压力传导路径的完整耦合流程。

1.2 库岸边坡数值模型的建立

模型搭建为分析打基础,按照工程地质勘察的资料,恰当地归纳边坡的地层构造、岩土体材料的分区以及潜在滑动面的形状。按照水库运行的资料,确定水库水位升降的边界条件和时间进程^[1]。在FLAC³D这个软件中,凭借创建精细的三维网格模型,针对不同材料分区赋予相应的弹塑性本构模型。在设定边界条件时,把坡面与可能的地下水水位面界定为渗流边界,对模型底部及侧向边界加上对应的位移约束,利用内置的FISH语言编写程序,可以实现库水位随时间不断变化的复杂边界模拟。

1.3 耦合计算流程与关键参数

计算流程主要涵盖初始地应力平衡、稳态渗流场初始化,以及后续库水位变化时的瞬态耦合计算。关键参数有岩土体的饱和渗透系数、非饱和渗透函数、弹性模量、内聚力、内摩擦

角及抗拉强度等,外场试验与室内试验需综合起来确定这些参数。在开展耦合计算的时候,重点留意非饱和区基质吸力及其对强度的作用,FLAC³D可凭借有效应力原理自动估计吸力效应。

2 渗流-应力耦合分析对库岸边坡研究的意义

2.1 深化对边坡失稳机理的认识

仅针对静力或单独渗流作用展开分析,不易全面阐释库岸边坡在水位骤降时常有的失稳现象。耦合分析揭示了这一复杂过程的真面目:水位急剧下降时,坡体中的孔隙水压力因渗透差异而无法及时消散掉,形成朝着坡外的动态渗透力,以致减弱边坡稳定性。水位一旦变动,非饱和区基质吸力的恢复明显跟不上,造成岩土抗剪强度不能同步提高,出现强度“空白期”。孔隙水压力和基质吸力在时空上的非同步变化,一起引发边坡不稳,说明这一水-力相互作用的原理,既说明了滑坡发生的关键条件,还为预测预警提供了理论依据。

2.2 提升稳定性评价的科学性与精确性

传统稳定性系数的计算,往往把渗流作用简化成静态静水压力或理想稳定渗流的形式,不能呈现库水位动态改变下的真实力学环境状况。耦合分析依靠全流程模拟,实时监测水位涨落时边坡内部孔隙水压力的时空变化情况,实时计算它对有效应力场的削弱程度和对岩土强度参数的折减程度^[2]。安全系数的计算就建立在瞬态渗流场同应力场协同作用的真实情形之上了,显著增进了评价模型的物理真实性,由此获取的稳定性评判结果不仅准确度更高,还可以揭示出最不利的临界水文情形,为风险评估给出了更确凿的量化证据。

2.3 优化边坡工程设计与治理方案

耦合分析可以精准描绘水位变动之下边坡的响应机制,进而更精准地找到潜在滑移面、塑性区以及最危险的水位变动路径。排水系统(诸如排水孔幕、疏干隧洞)的设置可根据动态渗压场予以优化,实现主动的水压降低;诸如抗滑桩、锚索的支护结构,其设计参数以及位置可对应力集中区予以针对性加强,对不同治理方案在水力耦合作用下的长期作用进行对比,能科学评判其控制变形和破坏的有效性,达成从“经验设计”往“模拟驱动优化设计”的转变,增强工程措施的经济性及可靠性。

3 库岸边坡稳定性综合分析过程

3.1 耦合作用下边坡响应特征分析

在模拟库水位变化给边坡稳定性带来的影响时,利用FLAC³D数值分析软件能精准地再现这一动态过程,把水位匀速上升、骤降等典型工况给设定好,模型可系统地边将边坡内部关键监测点与剖面的数据加以提取^[3]。包含着孔隙水压力在时间和空间上的分布,还有坡体表面及深部特征点的位移矢量,更是包含了展现材料屈服状态的塑性区发展范围,呈现内部力系调整情形的主应力场云图。通过将这些变量绘制成交动态云图与历时变化曲线,分析可突破单一指标的局限,依据多场耦合的观点完整认识边坡在外部条件变动下的响应机制。

认真剖析模拟成果,可以看出水位上升和下降这两种情形

下失稳原理大相径庭。库水位匀速升高时,地下水的浸润线慢慢往上抬升,致使坡体非饱和区体积减小,饱和区域内土体所受浮力变小,实际自重增长,水体侧向压力施加于坡面,共同致使坡脚区域的压应力显著地集中,剪应力水平相应地升高,给潜在滑移面的孕育造就了力学方面的条件。在水位急剧下降的状况下,坡体内外水位差急剧升高,孔隙内的水来不及及时流走,进而产生朝向临空面的较大动水压力(渗透力)。此渗透力直接抵消了部分土体的抗滑阻力,带动土颗粒发生移动,表现为坡体整体位移速率突然变快,而且位移方向显著朝向库区。

这些由数值模拟定量展现的响应特征,构成了判定边坡是否快要失稳的关键科学依据。孔隙水压力分布存在异常情况、位移速率呈现出拐点性增长的特点、塑性区自坡脚萌生接着逐步向坡体内部和后缘拉张区蔓延直至贯通形成连续的剪切带,都是边坡从稳定态势向临界态势乃至破坏态势发展的可视化标记。尤其塑性区达成贯通,实际上就是潜在滑裂面在力学方面彻底形成了,说明边坡整体安全储备全然耗尽。综合考量上述云图与曲线,给预测边坡稳定性的变化趋势、设定预警界限和及时采取加固办法,提供了极为关键的量化决策支撑。

3.2 稳定性系数的动态演化

按照流固耦合理论做边坡稳定性的动态评估,FLAC³D所内置的强度折减法,提供了一种与物理过程同步的分析工具。该方法的关键在于,在模拟库水位涨落以及伴随的渗流场动态变化进程中的任何一个特定时刻,软件可“固定”当前边坡的应力场与孔隙水压力场情形。系统逐步地降低边坡岩土体的抗剪强度参数,同时持续实施静力平衡计算,直到边坡达到极限平衡状态,进而出现失稳现象。这种方法把稳定性分析融合到非稳态渗流与应力场相互作用的连续过程中了,而不是孤立、静态的那种评估。

上述强度折减计算在一系列不同时间步与不同预设水位工况下多次开展,能获得一条呈现稳定性系数动态变动的连续曲线。该曲线横轴就是模拟时间或者水库水位高程,对应的实时安全系数以纵轴来表示,进而清楚地展现出在整个水位涨落循环中,边坡安全储备的起伏变动规律。曲线可以表明安全系数并非随水位单一变化,安全储备或许会在水位上升的中后期出现一个相对低的点,水位刚骤降那会儿,快速下降的过程更为显著。这种动态演化的曲线把传统那种孤立的、针对特定水位的稳定性计算,变成一个连贯的、能看得到的安全状态变化图谱。

对动态演化曲线做深入的剖析,可以精准找出边坡在整个运行期中最危险的时段,曲线上的全局最低处直接关联着稳定性最薄弱的工况,这大概是水位处在某一特定高度,或者是升降过程中的某一短暂状况^[4]。计算这个最小安全系数的时候,软件会同步呈现边坡处于临界失稳时的位移增量云图以及塑性应变云图,这些图像清楚地呈现出在该最危险的情形下,潜在滑裂面的具体所在、形态(是圆弧形、折线型或复合型)以及其从坡脚到坡顶后缘的贯通轨迹。综合考虑动态曲线以及滑动面形态,不仅把最小安全储备量化了,还从原理角度点明了失稳的可能

样式,为采取有针对性的工程防护措施提供了极为关键的定量及定性证据。

3.3 综合稳定性评价与失稳判据

以FLAC^{3D}进行边坡稳定性数值分析时,单一的判定指标往往有其局限性,对多源信息进行整合交叉验证,是让评价结论科学、可靠的核心方式。这套综合判据体系把计算过程的整体表现、关键物理量的变化趋势、内部破坏区的形态变化以及量化的安全度指标都整合到一起,它要求分析者不光关注最终得出的计算结果,仍需检查整个数值模拟流程的动态响应表现。把相互关联的不同侧面响应特征结合起来进行系统性诊断,防止因模型参数敏感或单一判据偶然引发误判。

一个周全且严谨的边坡失稳判定标准,通常由以下四个方面共同组成。以数值计算本身为出发点,若模型中出现大面积、一直持续的塑性流动,致使系统中的不平衡力无法在设定迭代步数内收敛至许可范围,这表明边坡已丧失维持静力平衡的能力,数值计算直接体现出失稳情况^[5]。针对位移响应而言,坡顶、坡脚等关键监测点的位移-时间历程曲线呈现明显上翘拐点,或者位移速率呈现非线性的急剧增长态势,这表明变形从稳态蠕变迈入加速破坏阶段了。针对内部破坏的机制而言,边坡中由剪切塑性应变区或拉伸破坏区组成的潜在滑移带,从坡趾直至坡肩后缘已完整连接成连续不断的破坏面,表示滑动通道已然形成。经由强度折减法直接算出的整体稳定性系数,该数值始终稳定地小于1.0,这从极限平衡理论角度,明确证明了边坡不安全。

若分析中上述四项判据一并出现或绝大多数符合,它们形成了一个相互验证、逻辑严谨的证据链,这样就能确切判定边坡在当下工况中是失稳的。这种综合评判手段极大增强了复杂边坡工程稳定性评价的可靠性,可以掌握边坡在不同库水位、不同

地震荷载还有不同加固措施等各类运行与极端情形下的稳定状况,给出最终的分级或是定性定量的综合评定,这为工程设计的决策给出了有力支撑,也给运营期间监测预警阈值的设定点明了关键参考方向。

4 总结

本文详细说明了运用FLAC^{3D}做库岸边坡渗流-应力耦合稳定性分析的办法、意义以及具体分析流程。FLAC^{3D}可有效模拟库水位变化时边坡渗流场与应力场的复杂相互作用情况,体现孔隙水压力消散延后、渗透力变化等关键耦合效应。耦合分析能更清晰地展现库岸边坡的失稳原理,更精准地评估其动态稳定性,给工程设计与治理提供直接、靠谱的技术支撑。该方法在保障水库运行安全、防治库岸滑坡灾害方面,具备重要的理论价值以及工程实践意义。

[参考文献]

- [1]车凌波.库岸边坡渗流-应力耦合机制及动态稳定性模拟研究[J].水利技术监督,2026,(01):174-177+192+232.
- [2]靳忠强,张延飞.基于Flac3D的不同水位下库岸边坡稳定性分析[J].兰州工业学院学报,2024,31(02):76-80.
- [3]黄文洪,张健,李龙,等.考虑水位频动影响的周宁坝址区边坡运行期稳定性分析[J].四川建筑,2020,40(04):138-142.
- [4]熊茹雪,洪托,白杰.基于渗流-应力耦合的库岸边坡稳定性分析——以祥云县清水河水库为例[J].地质灾害与环境保护,2019,30(04):59-66.
- [5]黄海清.水库库岸边坡致灾机理及风险防控研究[J].水利科技与经济,2025,31(11):17-21+37.

作者简介:

陈晓佳(1989--),男,汉族,新疆塔城人,本科,副高级工程师,研究方向:地质勘察。