

库区滑坡体渗流特性与蓄水诱发机制研究

于帅印

浙江华东岩土勘察设计院有限公司 浙江 杭州 310030

摘要：库区滑坡灾害频发，严重威胁库区人民生命财产与航道安全。本文聚焦库区滑坡体，分析其工程地质特征，涵盖地质背景、结构变形及水文地质条件。研究滑坡体渗流特性，包括水文地质条件、渗透参数及库水位变动下的渗流场特征。探讨蓄水对滑坡体稳定性的影响机制，提出蓄水诱发滑坡的模式、时间效应、判据及监测预警方法，为库区滑坡防控提供科学依据。

关键词：库区滑坡；渗流特性；蓄水诱发；渗流-应力耦合；稳定性评价

引言：库区多处于地形复杂、地质构造活跃区域，是滑坡灾害的高发地带。库区水位周期性波动与区域强降雨，进一步加剧了滑坡发育，对库区人民生命财产和航道稳定构成严重威胁。深入探究库区滑坡体渗流特性与蓄水诱发机制，对于准确评价滑坡体稳定性、制定科学合理的防控对策至关重要。本文将围绕这一主题展开系统研究。

1 库区滑坡体工程地质特征

1.1 库区地质背景与滑坡基本特征

库区多处于地形阶梯过渡带，以中低山峡谷地貌为主，地质构造复杂，多为褶皱、断裂发育区域，地层以砂泥岩互层的“红层”及第四纪松散堆积层为主，是滑坡灾害的高发区域。库区水位周期性波动（如145~175m蓄水与消落）和区域强降雨，进一步加剧了滑坡发育。滑坡多分布于库岸缓坡及支流沿岸，呈带状分布，以堆积层滑坡为主要类型，整体规模差异较大，体积从数立方米到数十万立方米不等。滑坡体多呈西高东低的态势，滑面倾角平缓，表层岩土体风化强烈，土石混合分布，稳定性较差。据调查，库区滑坡多集中于汛期，受地质背景和外部诱发因素共同影响，对库区人民生命财产和航道稳定构成严重威胁。

1.2 滑坡体地质结构与变形模式

滑坡体地质结构具有明显的分层性，自上而下主要分为表层风化层、滑体、滑带和滑床四部分。表层风化层厚度较小，多为粉质黏土和碎石土，结构松散；滑体主要由第四纪松散堆积物及风化岩块组成，土石比约6:4~7:3，孔隙比大、透水性强；滑带多为浅灰色粉质黏土，是滑坡变形的核心部位，抗剪强度低；滑床多为完整性较好的基岩，岩层产状与滑坡体倾角存在差异^[1]。滑坡变形模式主要为牵引式滑动，部分表现为沿软弱夹层的折线型滑动，变形过程具有阶段性特征，初期以缓慢

沉降、裂缝发育为主，随着诱发因素加剧，逐渐出现加速滑动，最终形成整体失稳。滑带的软化、蠕变是滑坡变形的主要内在因素，外部因素则通过影响滑带力学性质诱发变形。

1.3 滑坡体水文地质条件

滑坡体水文地质条件受库区水位、降雨及地层岩性共同控制，地下水类型主要为孔隙潜水和基岩裂隙水，补给来源主要为大气降水和库水渗透。表层松散堆积层透水性强，地下水渗透速度较快，地下水埋深随库水位和降雨变化呈现明显波动；深层基岩裂隙水渗透速度较慢，水位相对稳定。滑坡体内地下水径流方向与滑坡体坡度基本一致，多向库岸方向排泄，在滑坡前缘形成泉点出露。由于滑坡体结构松散、孔隙发育，地下水易在滑带处富集，导致滑带土体饱和和软化，抗剪强度大幅降低，同时孔隙水压力升高，有效应力减小，加剧滑坡体的不稳定性，是滑坡诱发的重要水文地质因素。

2 库区滑坡体渗流特性研究

2.1 滑坡体水文地质条件

滑坡体水文地质条件直接决定其渗流特性，核心取决于地层岩性、地质结构及外部补水条件。滑坡体表层为透水性强的松散堆积物，是地下水的主要渗透通道；中层滑体为土石混合体，透水性不均，局部存在相对隔水夹层；深层滑带及滑床透水性较弱，易形成地下水富集区。地下水补给以大气降水入渗和库水侧向渗透为主，排泄方式包括地表蒸发、泉点出露及向库区排泄，径流路径受滑坡体形态和地质结构控制，呈现“上部快、下部慢”的特点。库水位的周期性升降会改变滑坡体地下水补给和排泄平衡，降雨则会快速提升滑坡体中后部地下水位，当降雨强度超过土体入渗能力时，多余雨水以坡面径流形式排泄，进一步影响滑坡体渗流状态^[2]。

2.2 滑坡体渗透特性参数

滑坡体渗透特性参数是研究渗流场特征的核心，主要包括渗透系数、孔隙度、给水度及水力梯度等，其取值受岩土体类型、密实度、颗粒级配及风化程度影响显著。表层松散碎石土渗透系数较大，一般在10-3~10-2cm/s之间，孔隙度约30%~40%，给水度较高，利于地下水快速渗透；滑体土石混合体渗透系数呈不均匀分布，受岩块含量影响较大，变化范围为10-4~10-3cm/s；滑带粉质黏土渗透系数极小，多在10-5~10-4cm/s之间，属于相对隔水层。通过现场试验和室内试验结合的方式，可精准测定各层岩土体渗透参数，其中渗透系数和水力梯度是反映滑坡体渗流强度的关键指标，直接影响库水位变动下渗流场的演化规律。

2.3 库水位变动条件下的渗流场特征

库水位变动是影响滑坡体渗流场特征的主要外部因素，其升降过程会导致滑坡体渗流场发生动态演化，呈现明显的阶段性特征。库水位上升时，库水通过滑坡前缘侧向渗透，使滑坡体地下水位同步抬升，渗流方向主要为从库岸向滑坡内部，水力梯度较小，渗流速度平缓，此时滑坡体处于饱水状态，孔隙水压力逐渐升高；库水位下降时，滑坡体内部地下水排泄受阻，形成反向渗流，水力梯度显著增大，渗流速度加快，前缘地下水位下降速度快于中后部，形成明显的水位差，产生较大的渗透力。渗流场的变化主要集中在滑坡前缘及滑带区域，库水位变动幅度越大、速度越快，渗流场扰动越强烈，对滑坡体稳定性的影响越显著。

3 蓄水对滑坡体稳定性的影响机制

3.1 蓄水对滑坡体的作用效应

蓄水对滑坡体的作用效应主要体现在水岩相互作用、浮托效应、渗透效应及冲刷效应四个方面，共同影响滑坡体稳定性。水岩相互作用使滑坡体岩土体长期处于饱和状态，发生软化、泥化现象，导致抗剪强度指标显著下降，其中内摩擦角可降低2°~5°，黏聚力可降低30%~50%。浮托效应主要作用于滑坡前缘，库水对滑体产生向上的浮力，减小滑体有效重量，降低抗滑能力。渗透效应由库水位变动引发，形成动态渗流场，产生渗透力，加剧滑体内部岩土体的位移和变形。冲刷效应则是库水对滑坡前缘岩土体的侵蚀、淘刷，导致前缘支撑力减弱，易引发牵引式滑动，这四种效应相互叠加，共同加剧滑坡体的不稳定性。

3.2 库水位变化对稳定性的影响规律

库水位变化对滑坡体稳定性的影响呈现明显的规律性，主要与水位变动幅度、升降速度及持续时间相关。库水位上升阶段，滑坡体稳定性呈缓慢下降趋势，下降

幅度较小，主要因浮托效应和岩土体软化导致；库水位下降阶段，稳定性急剧下降，是滑坡失稳的高发期，因反向渗流产生的渗透力增大下滑力，同时前缘地下水位快速下降，有效应力变化剧烈^[3]。水位变动幅度越大、下降速度越快，滑坡体稳定性下降越明显，如库区水位消落幅度达30m时，部分滑坡安全系数可下降约15%。库水位长期处于高水位状态，会加剧岩土体长期蠕变，导致滑坡体稳定性持续降低，而反复的水位升降会使滑坡体进入恶性循环，进一步恶化稳定性。

3.3 降雨与蓄水联合作用效应

降雨与蓄水联合作用是诱发库区滑坡的关键因素，两者叠加产生的效应远大于单一因素的影响。降雨主要通过入渗作用提升滑坡体中后部地下水位，增加滑体自重，同时软化滑带土体，降低抗剪强度；蓄水则通过浮托、渗透效应影响滑坡前缘稳定性，两者叠加时，滑坡体中后部地下水位升高与前缘渗透力增大形成协同作用，导致滑体内部应力-应变状态显著恶化。当降雨强度超出土体入渗能力时，坡面径流会冲刷滑坡表面，进一步破坏滑体结构。研究表明，库水位下降与强降雨联合作用时，滑坡体稳定性会急剧下降，渗流与水力梯度的增强会显著加剧滑坡不稳定性，是库区滑坡失稳的最主要诱发模式。

3.4 渗流-应力耦合分析

渗流-应力耦合分析是揭示蓄水对滑坡体稳定性影响机制的核心方法，其核心是考虑渗流场与应力场的相互作用、相互影响。渗流场的变化会导致滑坡体孔隙水压力改变，进而影响岩土体有效应力分布，导致应力场发生调整；而应力场的变化会引起滑坡体岩土体变形、孔隙结构改变，反过来影响渗流参数和渗流场特征，形成双向耦合效应。通过有限元方法可建立渗流-应力耦合模型，模拟库水位变动和降雨条件下，滑坡体渗流场、应力场的动态演化过程，精准捕捉滑带应力分布、位移变化规律，克服传统极限平衡法无法准确耦合渗流与应力场的缺陷，为滑坡体稳定性评价和失稳预测提供科学依据。

3.5 稳定性定量评价

滑坡体稳定性定量评价以岩土体力学参数、渗流特征及外部诱发因素为基础，采用定性与定量相结合的方法，核心是计算滑坡体安全系数，判断其稳定状态。常用评价方法包括极限平衡法、有限元强度折减法及渗流-应力耦合数值模拟法等。评价过程中，需结合现场监测数据、室内试验结果，确定岩土体抗剪强度、渗透系数等关键参数，模拟不同蓄水工况、降雨条件下的滑坡体稳定性。安全系数大于1.2为稳定状态，1.0~1.2为欠稳定

状态,小于1.0为不稳定状态。通过定量评价,可明确滑坡体最危险滑动面位置、稳定性薄弱环节,预测不同工况下滑坡体失稳风险,为防控对策制定提供精准的数据支撑。

4 蓄水诱发机制与防控对策

4.1 蓄水诱发滑坡的典型模式与力学机制

蓄水诱发滑坡存在多种典型模式,主要可划分为牵引式滑动、推移式滑动以及折线型滑动这三种类型。其中,牵引式滑动最为常见,它通常是由于库水对滑坡前缘进行冲刷淘蚀,使得前缘部位率先失稳,进而牵引带动后部岩土体发生滑动。从力学机制角度来看,其核心在于蓄水所引发的一系列变化。蓄水会导致孔隙水压力升高、岩土体软化以及渗透力增大,在这三者的共同作用下,滑坡体的抗滑力不断减小,而下滑力却持续增大,最终打破了滑坡原有的力学平衡状态。具体来讲,库水饱和会使岩土体的有效应力降低,抗剪强度也随之衰减;孔隙水压力升高会产生浮托力,相当于减小了滑体的有效重量;库水位变动过程中形成的渗透力会直接增加下滑力。同时,长期的水岩作用还会促使岩土体发生蠕变,进一步降低其稳定性。除此之外,滑坡体地质结构的不均匀性以及滑带中存在的软弱夹层,都会加剧蓄水诱发滑坡的风险,并形成各具特点的不同失稳模式。

4.2 蓄水诱发滑坡的时间效应与判据

蓄水诱发滑坡的时间效应显著,主要体现在滞后性与阶段性两大特征上。滞后性意味着滑坡失稳并非在蓄水瞬间发生,而是会滞后一段时间,这主要是因为岩土体在蓄水后需要经历软化、蠕变过程,同时孔隙水压力的积累也需要一定时间,这些因素共同作用导致滑坡失稳存在时间差。阶段性则表现为滑坡变形过程可划分为初期缓慢变形、加速变形以及失稳破坏三个阶段。在初期,滑坡变形较为缓慢,不易察觉;随着时间推移,进入加速变形阶段,变形速率明显加快;最终达到失稳破坏阶段,滑坡将发生整体滑动^[4]。各阶段变形特征和速率差异显著。滑坡失稳判据主要围绕变形速率、孔隙水压力变化及应力状态这三个核心指标。当滑坡体日均变形速率超过1mm/d且持续增大,孔隙水压力快速升高后突然下降,以及滑带应力达到或超过岩土体抗剪强度时,均

可判定滑坡即将失稳。另外,结合库水位变动幅度和速度,将变形、水压力、应力等多方面指标综合考量,构建多指标综合判据体系,能够更全面、准确地捕捉滑坡失稳前的各种征兆,从而有效提高滑坡失稳预测的准确性和可靠性。

4.3 蓄水诱发滑坡的监测预警方法

蓄水诱发滑坡的监测预警方法以“实时监测、精准预警、快速响应”为核心,结合传统监测与智能化技术,构建全方位监测体系。监测内容主要包括滑坡体位移、孔隙水压力、地下水位、岩土体应力及库水位等关键指标。位移监测采用GNSS、测缝计等设备,实时捕捉滑坡体表面及内部位移变化;孔隙水压力和地下水位监测通过钻孔埋设传感器,跟踪渗流场动态变化;库水位监测结合水文站数据,掌握水位变动规律。通过数据采集、传输、分析,建立预警模型,划分预警等级,当监测指标达到预警阈值时,及时发出预警信息。同时,结合信息技术实现实时监测与精准预警,为滑坡防控和应急处置提供及时、可靠的支撑。

结束语

库区滑坡体渗流特性与蓄水诱发机制研究意义重大。本文全面剖析了滑坡体工程地质特征、渗流特性,揭示了蓄水对滑坡体稳定性的作用机制,明确了蓄水诱发滑坡的典型模式、时间效应与判据,并提出有效的监测预警方法。研究成果有助于提高对库区滑坡灾害的认识,为滑坡防控和应急处置提供科学指导,保障库区的安全与稳定。

参考文献

- [1]李明,张恩铭,郑阳,等.降雨和库水联合作用下万州石龙门滑坡体渗流稳定性分析[J].华南地质,2025,41(1):170-184.
- [2]李正先.库区滑坡体稳定性监测方案改进[J].建筑与施工,2025,4(12):61-62.
- [3]郑洁,王晋荣,王菁菽.滑坡体渗透性原位试验与反演研究[J].人民长江,2022,53(6):141-145,173.
- [4]王晗旭,王世杰.龙羊峡库区水位波动作用下的滑坡变形特征[J].科学技术与工程,2026,26(7):2759-2769.