

水动力驱动下粘-滑阶跃型滑坡启滑机制与动态预警

中文摘要

粘-滑阶跃型滑坡是一类以沿离散剪切带摩擦滑动为主的整体性变形体，在我国东南丘陵地区广泛分布。该类滑坡通过小规模、快速且间歇性的滑动事件（类似粘滑过程）持续释放能量并调节整体变形，虽短期内不易造成严重灾害，但在特定触发条件下可能由低速蠕滑迅速转化为灾难性溃滑，导致大范围破坏与人员伤亡。本文以福建省安溪县尧山大型滑坡为研究对象，综合开展系统的现场地质调查、地球物理探测、原位多物理场监测、室内环剪试验及深度学习预测研究，系统揭示了滑坡内部关键结构、水文动力过程与摩擦-速率-愈合行为之间的耦合机制。在此基础上，建立了滑坡从蠕滑到灾变的物理演化模型与动力学判据。主要研究成果如下：

(1) 综合多物理场监测与微动探测（MSM）技术，重建了尧山滑坡的内部结构，揭示控制其间歇性变形的地下关键结构与水文动力机制。滑坡变形表现为滑动脉冲与休眠期交替的周期性特征，坡体内部发育碗状构造与裂隙网络，促使孔隙水压力在局部积聚。滑动带下伏凝灰岩-残积层界面为主控面，剪切波低速异常区与滑动带空间吻合，推测为优势渗流通道与动力触发单元，是控制滑坡间歇性活动的关键地下结构。

(2) 通过原位水力特性测试、地下水水流速流向测定与电阻率层析成像（ERT），构建了滑坡三维水文地质结构，揭示其显著的非均质渗流特征及控制机制。滑坡呈“上陡下缓”形态，后缘形成大汇水区。崩坡积碎石土渗透性强、补给迅速，而残积土与全风化凝灰岩渗透性弱，导致滞水带与水力通道并存。滑动带渗透性最高，流速达 0.55×10^{-4} m/s，并沿主滑方向汇流。坡体地下水系统表现为上部管网状与下部集中渗流两种类型，降雨通过优先通道快速传导至滑动带，引发孔压波动与周期性变形，为滑坡活动提供关键水文触发条件。

(3) 基于多组环剪试验探究了滑动带材料在滑坡间歇性运动过程中的速率依赖与愈合特性，以揭示其潜在的运动控制机制。结果表明，残余摩擦系数与剪切速率呈显著对数关系：在低速阶段表现为速率弱化，而当剪切速率超过 0.3 mm/min 时转为速率强化，显示出明显的速率转折行为。休眠阶段的摩擦愈合过程符合对数增长规律，其愈合速率与法向应力无关，但受矿物组成显著影响。黏

土矿物含量较高的样品表现出较弱的愈合效应。此外，残余强度包络线呈非线性特征，尤其在低有效法向应力区间表现突出，该特征对滑坡再激活条件与稳定性评估具有关键影响。

(4) 系统揭示了孔隙水压力扰动下剪切带变形响应的关键物理过程。研究发现，在灾难性失稳发生之前，滑坡系统通常会经历由孔压加载触发的加速滑移脉冲与长期蠕滑构成的亚稳态阶段。该阶段可在多种水力-力学条件下被激发，持续增强的滑移脉冲和剪切带扩张过程逐步削弱系统的速率强化效应，最终跨越临界阈值并导致灾变失稳。进一步地，速率-状态摩擦（RSF）理论为解释剪切带摩擦蠕变行为提供了物理基础，将提出的临界摩擦阈值曲线纳入 RSF 框架作为失稳判据，可提升在动态孔压扰动下对缓慢滑坡灾变风险的评估能力。

(5) 构建从降雨入渗到滑坡滑动响应的物理模型框架，该框架实现降雨过程与滑坡位移响应之间的直接物理联系，为理解降雨驱动下蠕滑滑坡的非线性动力特征提供了理论依据。首先，建立基于物理机制的降雨入渗-地下水波动模型，定量刻画了地下水位随降雨时间序列的动态变化规律；随后，将水文响应作为驱动力输入，构建考虑应变软化与速率依赖特性的粘塑性滑坡动力学模型，用以模拟滑坡在孔压扰动下的变形演化。

(6) 基于粘-滑阶跃型滑坡成灾机制，建立了基于贝叶斯优化-时序卷积网络（BO-TCN）的滑坡位移预测模型，实现滑坡位移的动态预测与智能预警。模型通过时间窗口化与关键特征筛选，构建多源监测数据集；利用 TCN 捕获滑坡位移的多尺度时序依赖特征，并通过贝叶斯优化实现超参数的高效寻优。与随机森林（RF）、支持向量机（SVM）、长短期记忆网络（LSTM）等模型的对比结果表明，BO-TCN 模型在预测精度与泛化性能上显著优越，能够有效捕捉滑坡间歇性变形的非线性特征。

关键词：粘-滑阶跃型滑坡；地球物理探测；滑动带；孔隙水压力；摩擦阈值判据；预警模型