

# 降雨条件下槐梁子滑坡多场演化特征与稳定性研究

陶海川<sup>1,2</sup>, 张苑<sup>1,2</sup>, 姬凯鹏<sup>1,2</sup>, 王勇瑞<sup>1,2</sup>, 刘超<sup>1,2</sup>

(1. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北省地质局, 武汉 430043;  
2. 湖北省地质局水文地质工程地质大队, 湖北 荆州 434020)

**摘要:** 在持续强降雨条件下, 槐梁子滑坡发生显著的变形, 对居民的生命财产安全构成了严重威胁。基于详细的地质调查, 通过构建基于有限差分法的滑坡数值模型, 采用渗流-应力耦合分析, 研究不同降雨工况下滑坡的渗流场及位移场的演化特征及稳定性变化。结果表明, 槐梁子滑坡在自然条件下处于基本稳定状态, 但在强降雨等外部不利因素的作用下, 滑坡中前部位移明显。尤其在连续暴雨的条件下, 坡体孔隙水压力增加明显, 滑坡发生整体滑动的可能性很大。研究结果为类似滑坡的预警、治理工程提供重要的理论依据。

**关键词:** 滑坡; FLAC 3D; 数值模拟; 多场演化特征; 稳定性变化

**中图分类号:** P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)14-0278-09

滑坡是自然界中常见且破坏性极大的地质灾害之一<sup>[1-2]</sup>。其主要表现为由于外部扰动或长期积累因素, 导致坡体发生失稳并发生滑移, 给生命财产安全、基础设施以及生态环境造成巨大威胁<sup>[3-4]</sup>。降雨是诱发滑坡的主要因素之一, 尤其是在山区、丘陵地区及受人为活动影响较大的区域<sup>[5-6]</sup>。降雨通过水分渗透、土壤孔隙水压力的增大以及土壤强度的降低, 直接影响坡体的稳定性, 是引发滑坡的重要外部动力<sup>[7]</sup>。深入理解降雨对滑坡稳定性的影响, 对滑坡风险评估、土地利用规划以及有效的防灾减灾措施具有重要意义。

降雨诱发滑坡是地质灾害防控领域的重要课题<sup>[8]</sup>, 学者们开展了众多相关研究。陶海川等<sup>[9]</sup>揭示了降雨是2020年7月恩施沙子坝滑坡最主要的触发因素, 导致了约一百万立方米的滑体堵塞清江; 葛若鑫等<sup>[7]</sup>通过基于FLAC 3D的数值模拟研究揭示降雨入渗和地下水的流动对抚顺西露天矿南帮滑坡产生渗透压力, 坡体破裂面大量发育, 最大总位移约为1.27 m; 王剑等<sup>[10]</sup>发现在水的浸泡下, 碎石土强度大幅度衰减, 可以对滑坡稳定性造成极大影响; 郭萌等<sup>[11]</sup>研究土体强度参数时空变异性对降雨入渗下边坡变形破坏的影响规律; Marin和Velásquez<sup>[12]</sup>通过建立相关物理模型和参数分析

研究水力特性对边坡稳定性的影响及浅层滑坡降雨阈值的确定。尽管已有大量研究揭示降雨诱发滑坡的多种机制, 但由于其涉及土壤-水-气相互作用的复杂性, 滑坡发生的精确预测依然面临诸多挑战。降雨的空间分布、强度、持续时间及坡面土壤的类型和结构等因素, 都可能对滑坡的发生起到决定性作用。为了准确捕捉这些因素的相互作用, 研究者们已经采用多种数值模拟方法, 以便在不同的降雨情况下, 模拟坡体的稳定性变化。

数值模拟分析具有快速、低成本以及精确度高的特点<sup>[13]</sup>, 是研究滑坡最常用的方法之一。FLAC3D(fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions)作为一种先进的数值模拟软件, 广泛应用于地质工程领域, 尤其在模拟复杂的土体-水-气相互作用方面具有显著优势<sup>[14]</sup>。FLAC3D采用有限差分法, 通过三维空间的网格划分, 将复杂的物理过程转化为离散化的数学模型, 从而可以模拟坡体在不同降雨条件下的力学行为。该软件支持非线性材料模型, 能够模拟土体在降水作用下的动态响应, 包括土体的塑性变形、应力-应变关系的变化以及水分的渗透过程。在处理大规模地质体和考虑复杂边界条件时, FLAC3D表现优异的计算能力和精度, 尤其适用于研究降雨诱发的滑坡过程。

**收稿日期:** 2025-03-05

**作者简介:** 陶海川(1985—), 男, 黑龙江大庆人, 高级工程师, 研究方向为地质灾害勘查与设计; 张苑(1988—), 女, 湖北荆州人, 工程师, 研究方向为地下水资源; 姬凯鹏(1993—), 男, 辽宁调兵山人, 博士, 工程师, 研究方向为地质灾害成因机理与防治技术; 王勇瑞(1987—), 男, 河南安阳人, 工程师, 研究方向为地质灾害勘查与设计、矿山环境恢复治理设计; 刘超(1993—), 男, 湖北荆州人, 助理工程师, 研究方向为地质灾害防治。

本文旨在通过 FLAC3D 软件,以建始县槐梁子滑坡为例,建立降雨诱发滑坡的三维数值模型,探讨降雨对坡体稳定性的影响机制。通过对不同降雨强度、持续时间以及坡体土壤特性进行参数化模拟,揭示降雨引发滑坡的关键因素。本文综合考虑降雨的渗透过程、土壤水分的变化、孔隙水压力的作用以及土体的力学响应,分析滑坡发生的内在机理,不仅有助于提高对降雨诱发滑坡过程的理解,也为滑坡灾害的预测与防治提供了重要的理论依据和技术支持。

## 1 滑坡背景

### 1.1 研究区概况

槐梁子滑位于湖北省建始县双塘村 3 组,后缘地理中心坐标:东经  $109^{\circ}48'41''$ ,北纬  $30^{\circ}42'24''$  [图 1(a)],距离建始县城约 15 km。滑坡区地处鄂西南褶皱山地,地貌类型以中低山河谷为主,高程为 500~800 m,山体走势受区内构造控制,总体呈东北-西南向展布。构造上,该区位于新华夏系第三隆起带内,即华夏系湘黔边境隆褶带的北端。由于受长阳东西向构造带的影响,构造线方向呈现往东偏转,同时在总体构造组合形态上带有扭动的迹象,这种构造的特点表现为一系列北东向褶皱和压扭性断裂[图 1(b)]。滑坡区处于茅田-长梁复背斜轴部中段东南翼,建始断裂东南侧,背斜走向北  $35^{\circ}$ —东  $55^{\circ}$ ,为一复式背斜;建始断裂走向北  $30^{\circ}$ —东  $50^{\circ}$ ,为一张性断层,即东盘下降,西盘上升。受构造影响,东北、东南向节理裂隙较为发育,破坏了岩体完整性,一定程度影响了坡体稳定性。特定的地质构造与地貌配置与鄂西暴雨区的叠加,导致地质灾害易发。

建始县地处亚热带季风气候区,冬干夏湿,夏雨集中,且降水分布复杂,年际变化大。根据县气象局各降雨观测站 1999—2008 年的统计资料分析,年降雨量为 1 200~2 100 mm,年最大降雨量为 2 887.1 mm(檀木垭雨量站,1998 年),月最大降雨量为 922.3 mm(檀木垭雨量站,1982 年 7 月),日最大降雨量 236.3 mm(三里坝雨量站,1997 年 7 月 13 日)。降水多集中在 5—8 月,占全年降雨量达 61%。滑坡地段牯牛坪河谷走向为南西向,滑坡所在位置为牯牛坪河流的右侧凸岸,坡脚易受洪水的冲刷。水面高程为 675 m 时,河谷宽 30~50 m。丰水位 678 m 高程时,谷宽为 40~60 m。从区内主要河流及冲沟的流量变化情况来,境内河流及冲沟水量与大气降雨密切相关,大气降雨是地表水的

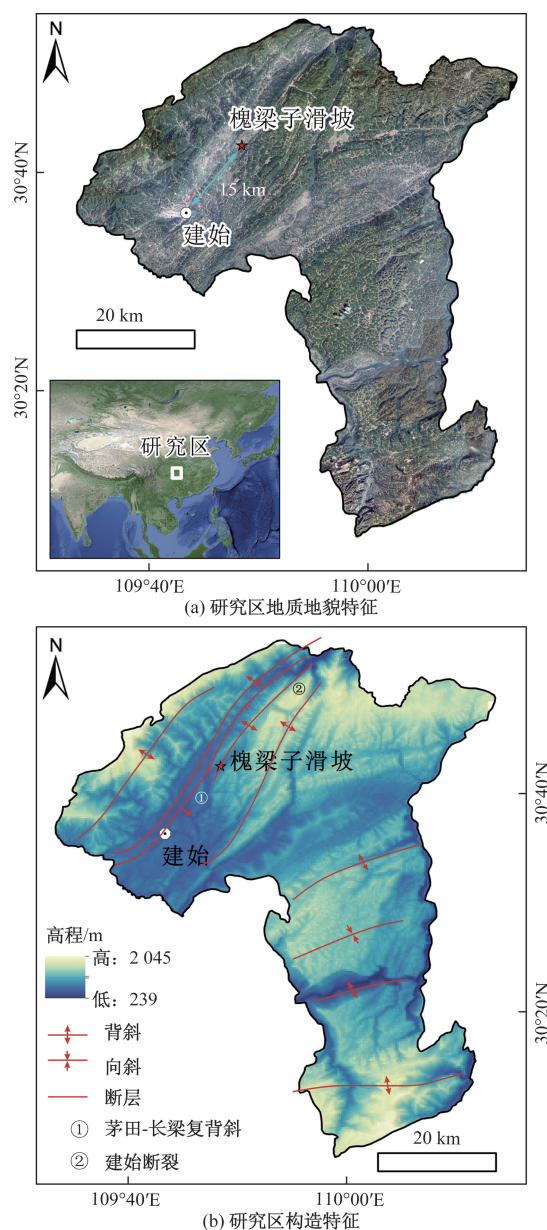


图 1 研究区概况

主要补给来源。河水或冲沟水流对岸坡的冲刷和洪水涨落形成的动水压力也是影响滑坡稳定性的一重要因素。

### 1.2 滑坡工程地质条件

滑坡区地势总体北西高南东低,牯牛坪河自北东向西南蜿蜒径流,最终经马水河汇入清江,河谷切割呈“U”形,谷底宽 30~60 m(图 2)。牯牛坪两岸的地势平缓,坡角  $20^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$ ,相对高差为 200~300 m,山麓地带人类工程活动较为频繁,很大程度上改变了原始地形地貌。

槐梁子滑位于牯牛坪河右岸,G209 国道横穿滑坡后部,居民主要集中于滑坡中上部(图 2)。在地形上,槐梁子滑坡呈两沟相夹逐渐向前缘放宽的扇

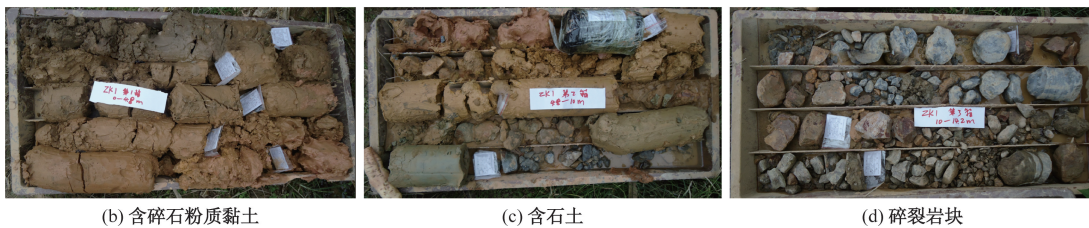
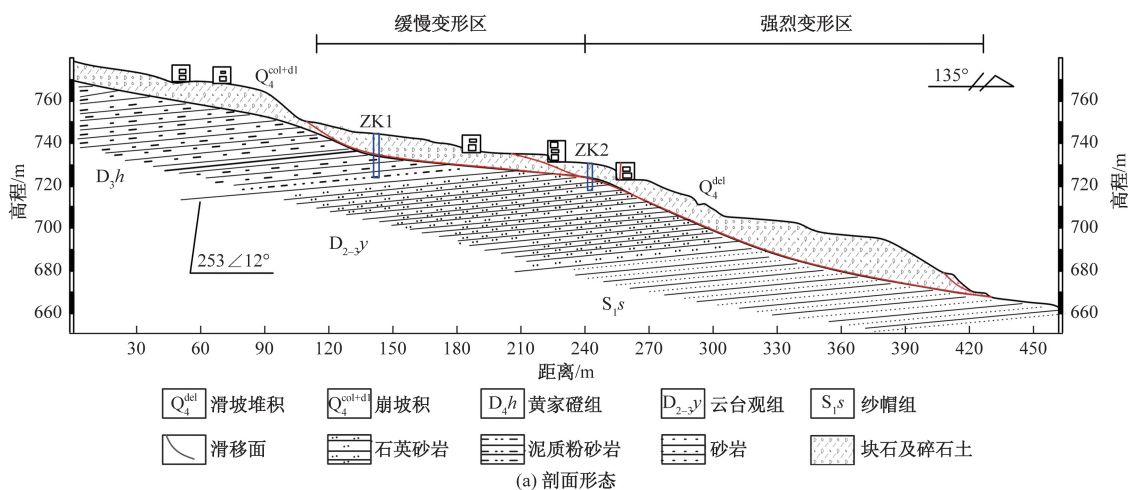
形。滑坡周界主要依据变形特征、微地貌综合确定,边界较清晰。滑坡后缘分布高程为 747~750 m,以陡坎地貌为界,该陡坎为滑坡早期滑动形成,高约为 10 m。滑坡左右两侧受冲沟控制:西侧冲沟走向  $170^{\circ}\sim 130^{\circ}$ ,沟宽为 3~5 m,底部沟床宽为 2~3 m,切深为 1~2 m,断面呈“U”形,属小型季节性冲沟;东侧冲沟走向  $140^{\circ}$ ,沟宽为 20~40 m,底部沟床宽为 20 mm,切深为 8~15 m,为大型常年流水冲沟。滑坡前缘直抵牯牛坪河河床。主滑方向  $135^{\circ}$ ,前缘高程为 653~667 m,后缘高程为 747~750 m,纵向长约为 350 m,平均宽度约为 400 m,平面呈扇形,剖面形态呈阶状[图 3(a)],滑体由北向南展布,面积为  $14\times 10^4\text{ m}^2$ ,滑体厚度为 6.4~21 m,平均厚

度为 12 m,总方量约为  $168\times 10^4\text{ m}^3$ ,为一大型中层土质滑坡。根据现场调查,槐梁子滑坡为一老滑坡。滑坡区早期地貌为一坡向东南坡面近平直自然斜坡,在降雨、河水冲刷及坡体卸荷作用下,原始斜坡产生整体滑动,滑坡后缘形成一高约为 10 m 陡坎,中部形成一缓坡平台,前缘外凸迫使河道拐弯。滑坡两侧受地形控制,在地貌上形成整体向两侧冲沟微倾,上下陡,中部缓的地貌形态,剪出口段坡体较陡,坡度  $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,局部呈陡坎地貌。

滑体主要为碎块石土(图 3),结构较松散,碎块石大小混杂,一般为 5~20 cm,多呈棱角-次棱角状,碎块石成分复杂,主要由石英砂岩、细砂岩组成,土石比 6:4~1:9;土为粉质黏土,可塑至硬塑,厚度为 6.4~21 m。滑体厚度总体呈后薄前厚,两侧薄中间厚的特点。滑床岩性以碎屑岩为主,主要为涉及黄家磴组、云台观组、纱帽组石英砂岩、细砂岩、页岩,岩层产状: $232^{\circ}\sim 253^{\circ}\angle 12^{\circ}\sim 23^{\circ}$ ,岩层产状为与坡向构成横向坡[图 3(a)]。坡体结构,节理裂隙发育,主要发育二组裂隙,产状分别为  $174^{\circ}\angle 56^{\circ}$ 、 $113^{\circ}\angle 43^{\circ}$ 。滑坡滑带沿基覆界面发育,总体呈凸状弧形发育,上部倾角  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,中下部倾角  $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。其物质主要为软弱的粉质黏土,土体呈褐黄色,局部呈灰褐色,黏性较高,呈软塑状,局部夹少量碎石,含量较低,粒径一般小于 1 cm,棱角状,遇水易软化。



图 2 槐梁子滑坡概况



(b) 含碎石粉质黏土

(c) 含石土

(d) 碎裂岩块

图 3 槐梁子滑坡典型剖面及钻孔揭示的滑坡物质组成

### 1.3 滑坡变形破坏特征

槐梁子滑坡初始变形时间为1998年6月,滑坡区后缘局部坡表有小规模坍塌、开裂变形,滑坡前缘房屋出现开裂变形。近年来,境内遇持续强降雨,牯牛坪河河水暴涨,临河岸坡局部坍塌变形,从而牵引上部坡体蠕动变形,现已造成滑坡区多栋房屋严重开裂变形,已影响到房屋整体结构(图4)。如滑坡变形进一步加剧,可能突发整体滑移,对区内28户107人的生命财产安全造成威胁,危害程度较大,社会影响极大。

滑坡中前部左侧房屋自1998年出现开裂以来,变形逐年加剧,以近年最为强烈。调查时,屋前场坪发育两条呈“X”字形的横张裂缝[图4(a)],其中一条自屋场东北侧沿 $195^{\circ}$ 方向延伸,裂缝贯穿正屋东侧墙体、屋场地面和西侧偏屋,长约为29 m,张开 $2\sim 7.5$  cm,深为0.3 m,裂缝两侧伴随地面鼓胀、下座变形[图4(b)];另一条裂缝与上述裂缝呈 $35^{\circ}$ 相交,延伸长约为20 m。现该房屋主体结构已受损严重,房屋属危房。

滑坡中部左侧房屋,因房屋外侧地面沉降变形,正屋左侧墙体出现竖向锯齿状拉裂缝[图4(c)],裂缝

下宽上窄,最大张开宽度为6.8 cm,已基本贯通整个墙体,经测量,裂缝外侧最大沉降量达0.8 cm;屋场地面见一走向 $20^{\circ}$ ,横向拉张变形裂缝,延伸长约为16 m,宽为0.2~1.0 cm。

房屋位于滑坡中部,为两层砖混楼房,房屋自1998年出现开裂以来,变形逐年加剧,现已成危房。受滑坡蠕动变形影响,房屋场坪不均匀沉降,现已造成房屋一楼大门两侧走廊立柱底部水泥墩拉裂,场坪出现多条纵向剪切裂缝[图4(d)];裂缝底部与上部墙体错位,水平位移为0.5~1.2 cm;二楼地面开裂,缝宽为1.5~3.0 cm,外侧下座达1.0 cm[图4(e)];二楼后墙整体产生横向沉降拉裂变形,最大张开宽度达7 cm[图4(f)]。

现场调查结果,滑坡变形主要集中在中前部,前部以局部垮塌和滑动为主,中部表现为大面积的房屋结构受损为特征。

### 1.4 滑坡稳定性影响因素

槐梁子稳定性影响因素可分为内在因素与诱发因素。内在因素与滑坡区地质条件有关,主要包括地形地貌条件及滑坡岩土体特性等,诱发因素主要有大气降水及人类工程活动。



图4 滑坡变形破坏情况

#### 1.4.1 内在因素

(1)地形地貌:槐梁子滑坡纵向上总体呈阶状,前缘较陡且临沟,提供较好的滑移临空面,为滑坡变形破坏奠定良好的基础条件。滑坡区内人工程活动较强烈,主要为挖填方进行建房修路及农田开垦种植,致使滑坡体纵向上形成大量的规模大小不一的平台,具备良好的降水入渗条件,不利于滑坡稳定。

(2)地层与地质构造:受构造影响,东北、东南向节理裂隙较为发育,破坏了岩体完整性。

(3)岩土体特性:滑坡区上覆岩性以碎块石土为主,物质结构较松散,透水性较好,利于水流的入渗与局部富集;下伏基岩透水性较弱,为相对隔水层,使上部土体软化,力学强度降低,易产生变形破坏。

#### 1.4.2 诱发因素

(1)降雨:降雨是槐梁子滑坡最重要的诱发因素。降雨入渗,致使滑坡体内孔隙水压力升高,土体重度增加,同时降水入渗还使岩土体浸水力学强度的降低,皆不利于滑坡的稳定。

(2)人类工程活动:滑坡区内人工程活动较强烈,主要为挖填方进行建房修路及农田开垦种植,致使滑坡体纵向上形成大量的规模大小不一的平台,具备良好的降水入渗条件。

## 2 数值模拟研究方案

通过对槐梁子滑坡在不同降雨工况下进行数值模拟,得到边坡的稳定性系数以及边坡的渗流及位移变化,依据变形的模拟结果对其进行稳定性评价及渗流位移分析。

### 2.1 计算原理

采用 FLAC3D 进行滑坡相关模拟工作。该软件是一种用于对土体、岩石、地下水、构造物和地面支撑进行岩土工程分析的数值建模软件。它能够通过调整三维网格中的多面体单元来拟合实际的结构。单元材料可采用线性或非线性本构模型,在外力作用下,当材料发生屈服流动后,网格能够相应发生变形和移动(大变形模式)。FLAC3D 采用显式拉格朗日算法和混合离散分区技术,能够非常准确地模拟材料的塑性破坏和流动。

通过对土体材料抗剪强度进行折减,分析折减后边坡内应力场、位移场的特征。当计算不收敛或出现明显贯通滑坡的塑性区时,发生边坡失稳破坏,前一级折减系数即为边坡稳定性系数。本次槐梁子滑坡稳定性模拟时选取 Mohr-Coulomb 模型。

### 2.2 滑坡模型

计算模型采用槐梁子滑坡主滑剖面[图 3(a)]概化模型,采用犀牛软件进行建模,数值模型采用六面体与四面体混合单元进行划分。计算模型长为 675.8 m,高为 182.6 m。模型共有 14 228 个节点、14 069 个单元。从上至下分别为滑体(碎块石夹粉质黏土)、滑带和滑床(泥质粉砂岩、砂岩、石英砂岩)。模型底部为固定边界,顶部为自由面,其他面限制法向位移。槐梁子滑坡剖面稳定性模拟模型如图 5 所示。

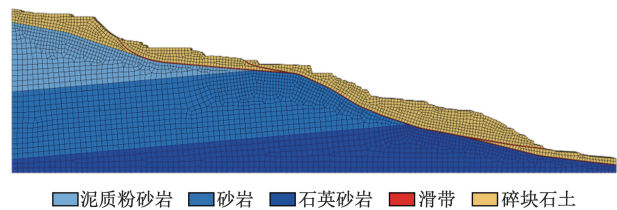


图 5 滑坡数值模型示意

### 2.3 参数确定

根据有关规范规范要求,在地表与探槽中进行了 2 组试坑渗水试验。采用双环(外环直径为 50 cm、内环直径为 25 cm)进行试验获取滑坡体渗透系数。在钻孔中分别对滑体分层采集样品。按设计要求选送 10 组进行岩土物理力学性质分析测试。样品规格为直径为 110 mm,长为 200 mm 柱状,用铁皮筒密封包装,所有样品均为填置防震物后装箱运送实验室。总体样品采集具代表性,采集包装运送均符合有关规范要求。测试包括天然含水量、比重、液限、塑限、液性指数、塑性指数、相对密度、孔隙度、饱和度等指标,进行常规固结、直剪试验,测试岩石的压缩系数、变形模量及抗剪强度。含水量采用烘干法;密度采用环刀法;比重测试采用抽气法(比重瓶法);塑性测试采用液,塑限联系测定法;颗分采用筛析法及密度计法;采用四联等应变直剪仪进行快速直接剪切试验测得样品抗剪强度;土体固结性能与压缩性采用常规压缩试验。

数值模拟所涉及的参数有岩土体的密度、相关弹性模量、岩土体强度参数、泊松比和饱和渗透系数。滑坡模拟所用参数根据现场实验和室内实验综合取值,具体参数如表 1 所示。

滑坡浸润线埋深是在分析槐梁子滑坡各钻孔监测数据基础上选取的,根据槐梁子滑坡各钻孔实时监测资料可知,勘察期间测得其后缘水位标高为 810.0 m,前缘水位标高为 665.0 m。根据国家技术监督局 2015 年发布的《中国地震参数区划图》

(GB18306—2015),建始县境内为地震烈度Ⅵ度区,属地壳相对稳定区。故不考虑地震工况。

根据上述分析,本次试验主要考虑3种工况,即天然工况、暴雨工况(50年一遇降雨)和强暴雨工况(100年一遇降雨)及极端暴雨工况。工程规范中并未确定相关参数数值,因此通过对该地区历时降水数据进行分析,确定暴雨工况降雨强度为200 mm/d,强暴雨工况降雨强度为250 mm/d。天然工况选择天然直剪试验结果的平均值,暴雨工况和强暴雨工况采用天然直剪与饱和直剪的中间值。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 天然工况下滑坡多场特征及稳定性

根据建立的滑坡模型,输入相应的参数,获取滑坡多场信息及稳定性变化。如图6(a)和图(b)所示,天然工况下滑坡表面的主应力最小且比较均衡,向下土层深度的增加会使得最大主应力增加。应力最大值出现在边坡最左下角,最小值在边坡表

面,从最小主应力图来看,应力的大小同最大主应力分布一致。图6(c)展示了天然工况下滑坡的孔隙水压力分布特征。可以看出,孔隙水压力等值线与浸润线基本保持一致,而且地下水位处的孔隙水压力为0,地下水位以下土体饱和为正值,深度越深,该滑坡初始孔隙水压力分布符合一般渗流应力的耦合规律。

图6(d)为滑坡的整体位移分布云图,结果表明,较大水平位移主要集中在坡面中下部的陡峭滑带区域。滑坡体的变形主要沿下部滑带发生,X方向的最大位移出现在滑坡体的前缘表面,位移范围为85~86 cm,方向沿X轴负方向(即沿滑坡体向下滑动)。滑坡中后部的变形较小,基本没有明显的沿X方向的位移,表明该区域处于相对稳定状态。位移云图显示,滑坡变形沿滑带分布较为集中,滑体的变形从前缘至后缘逐渐递减,最大位移值均出现在滑带控制区域内。滑坡后缘未发生明

表1 数值模拟参数

材料	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	饱和渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	弹性模型 $E/\text{Pa}$	泊松比 $\mu$
碎块石	2.29	$1.94\times 10^{-4}$	21	25	$2.2\times 10^7$	0.32
粉质黏土	1.88	$6.91\times 10^{-6}$	19	20	$5.3\times 10^7$	0.35
泥质粉砂岩	2.35	$1.26\times 10^{-8}$	33	$1.8\times 10^3$	$3.15\times 10^9$	0.28
砂岩	2.39	$8.33\times 10^{-8}$	36	$3.2\times 10^3$	$3.25\times 10^9$	0.25
石英砂岩	241.00	$1.15\times 10^{-9}$	38	$3.5\times 10^3$	$3.55\times 10^9$	0.24

注:HH、VV是指该成像模式使用的极化方式或双极化方式。

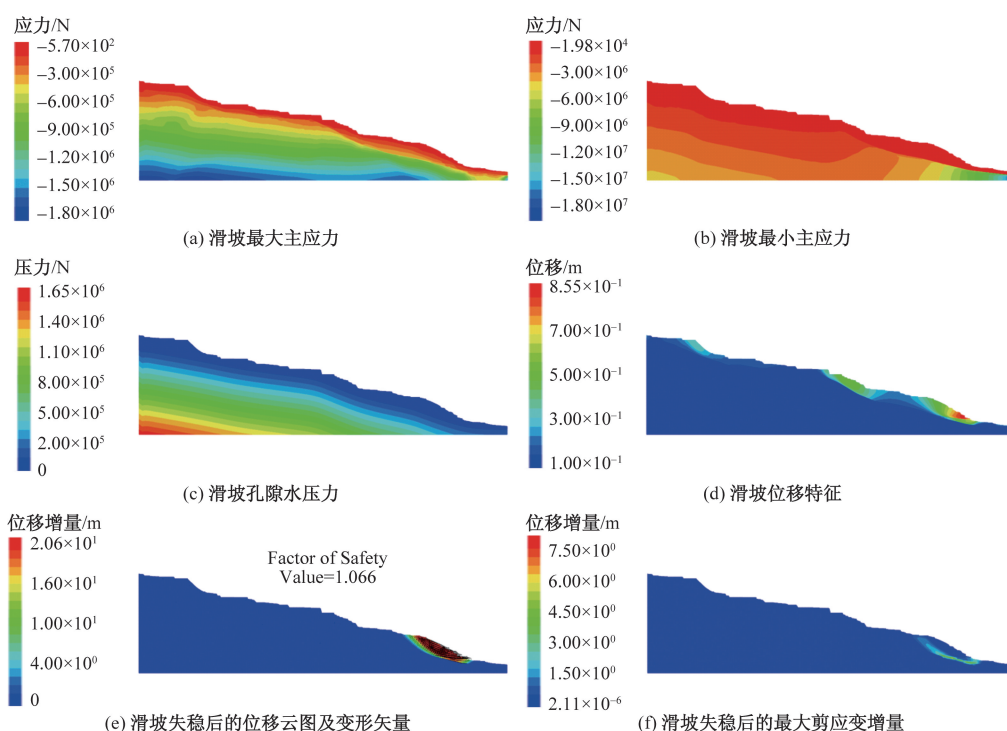


图6 天然概况下槐梁子滑坡多场特征及稳定性

显滑移。滑坡前缘的高位移区域表明滑带主导了滑坡体的滑动特征,是重点监测与治理的区域。模拟结果与现场观察的变形特征吻合,说明了数值模拟的有效性。

从图 6(e)和图 6(f)模拟了强度折减后滑坡失稳模式,结果表明,槐梁子滑坡失稳主要是由于前缘滑体的失稳下滑诱发,其变形破坏模式主要为圆弧形滑移破坏,与一般土质边坡变形破坏模式相同;从截面变形矢量图可以看出,滑坡上部表现为拉张破坏,底部与前缘带表现为剪切破坏。此外可根据其剪应变增量的大小来判断剪应变增量较大的部位,则为其潜在滑动面,变形破坏也多沿此处发生;剪应变增量较小或基本上没有发生变化的部位,一般不会有潜在滑动面的产生,这些部位也不会发生较大的变形或破坏。该滑坡体剪应变增量较小,主要分布在碎块石和粉质黏土的交界处,两土层交界处为潜在的滑动面,厚度为 3~5 m。在天然工况下,滑坡稳定性系数为 1.066,属于基本稳定状态。

### 3.2 (强)暴雨工况下滑坡多场特征及稳定性

滑坡在(强)暴雨工况的最大主应力和最小主应力均从滑坡表面随深度的增加而增加(图 7)。在连续降雨工况下,滑坡的最小、最大主应力均从深部到浅部由压应力渐变为拉应力,在滑坡浅表层应力均表现为拉应力,例如暴雨工况下,滑坡坡表产生的最大主拉应力为  $4.32 \times 10^3$  Pa[图 7(a)],而强暴雨工况下,滑坡坡表产生的最大主拉应力为  $7.68 \times 10^3$  Pa[图 7(d)],结果表明降雨会导致滑坡出现拉张破坏区。

拟不同降雨工况下滑坡内孔隙水压力情况如

图 8(a)和图 8(b)所示。结果显示,降雨后中下部的孔隙水压力变化较为平缓,坡脚和靠近坡面的部分孔隙水压力上升较大。特别是靠近表层的土体中,孔隙水压力变化最为显著。此外可以看出雨水从地表渗透进入边坡,并最终汇入地下水系统,未能及时渗透到边坡内部的水分会在地表积聚,形成水流并继续沿着地势较低的地方渗进土体。此外可以看出强降雨条件下,上部和接近坡面的土体中孔隙水压力线变得更为密集,这表明孔隙水压力的变化幅度增大,降雨水分在这些区域的渗透汇集更加显著。因此,降雨对边坡稳定性的影响主要集中在上部、坡面及坡脚区域,这些地方发生失稳滑坡的风险较高。由图 8(a)和图 8(b)对比可以看出,在不同工况下,随着降雨强度不断提高,边坡填土层接受雨水的能力逐渐变弱。

图 8(c)和图 8(d)显示(强)暴雨工况下滑坡的位移情况。结果显示失稳地段集中于坡面高程为 660.5~713.5 m、水平距离为 480.5~610.5 m。随着降雨渗透到边坡土体内,土体的含水量增加,导致抗剪强度下降。同时,土体的重量增加,综合作用下,滑坡发生一定的变形。通过图中对比可以观察到,随着降雨强度的提升,滑坡前缘的最大水平位移逐渐增大,由 7.98 m 增大得到甚至 88.2 m。这是由于在相同时间内渗入的降水量越多,抗剪强度的下降幅度越大,产生较大水平位移的区域也随之扩大,并向坡体的前后缘扩展;滑坡发生时,下滑土体的体积也会增大。在不同降雨强度下,较大水平位移主要集中在边坡坡面中下部的陡峭滑带区域,因此坡面滑带比其他部位更容易发生破坏,从而对边坡稳定性产生较大影响。

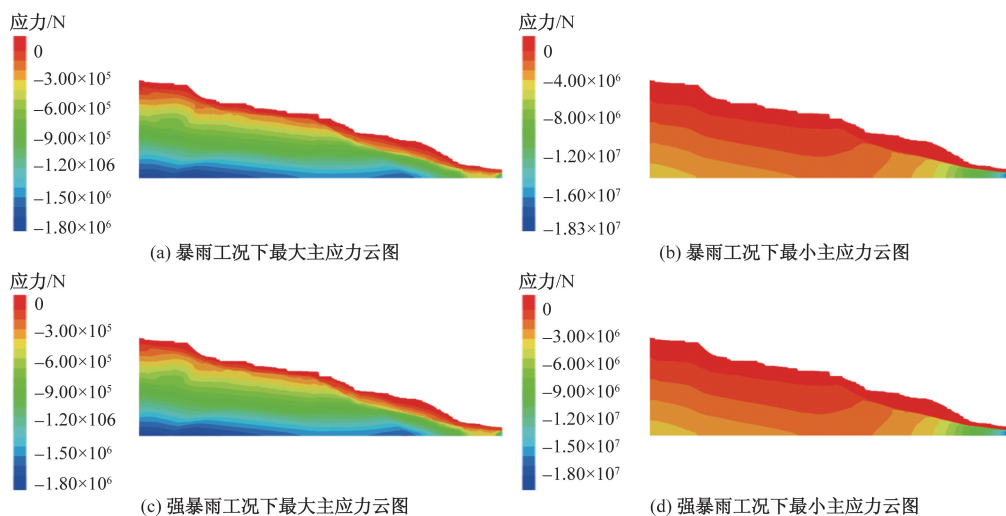


图 7 滑坡位移场特征

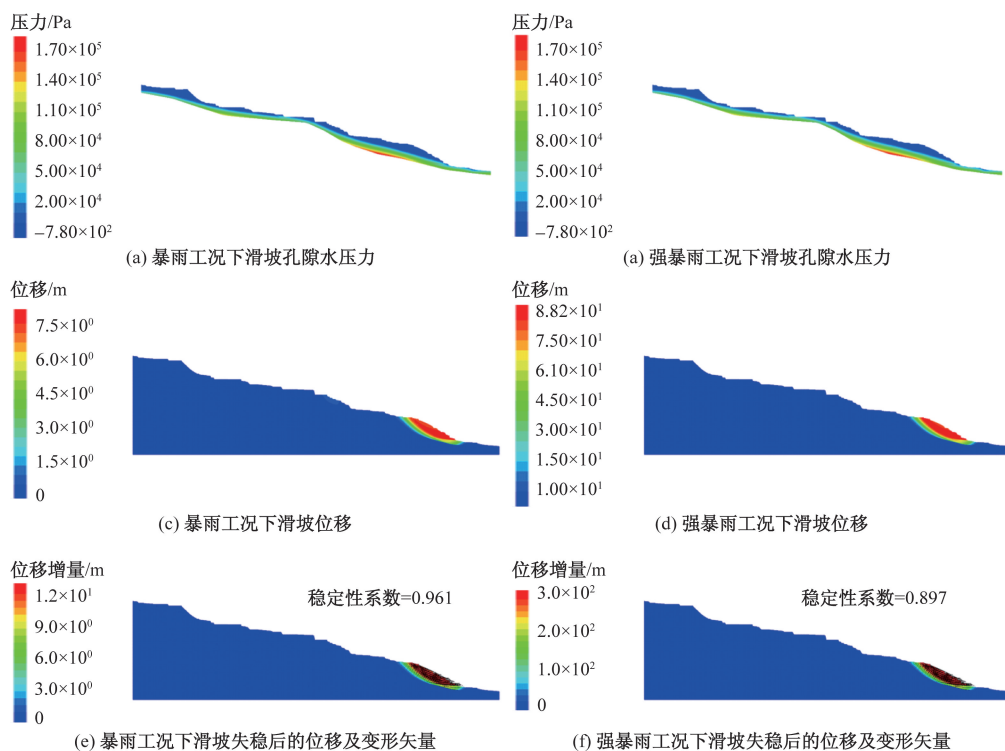


图 8 (强)暴雨工况下滑坡孔隙水压力特征与滑坡稳定性

图 8(e)和图 8(f)显示,在暴雨工况下,强度折减法计算得出滑坡整体稳定性系数为 0.961,属于不稳定状态,在强暴雨工况下,滑坡稳定性系数为 0.887,属于不稳定状态。滑坡失稳时最大水平位移出现在滑坡临空面坡脚处,相较于天然工况,其值有明显的提升。(强)暴雨工况下滑坡前缘滑体相较于后缘坡体内部出现了明显的剪应变增量贯通区,说明此处已经发生了剪切破坏。

### 3.3 不同降雨历时下滑坡稳定性变化

在 FLAC 中应用渗流-应力耦合计算,获取了不同降雨历时长下滑坡稳定性变化,如图 9 所示。滑坡稳定状态可根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)确定,具体划分如表 2 所示。

由滑坡稳定性计算结果,降雨作用对槐梁子滑坡的稳定性有着极重要的影响。滑坡初始稳定性系数均为 1.066(天然工况),处于一个基本稳定状态,随着降雨入渗作用的进行,滑坡稳定性系数逐渐减小,且降雨强度越大,滑坡稳定性系数降低速率越快。其稳定性系数的降低在两种工况下均表现出前期下降快、后期下降慢的特点。10 d 后为缓慢下降阶段,此外 250 mm/d 的降雨强度下,在降雨历时约 10 d 后滑坡稳定性系数基本趋于稳定,基本保持在 0.895 左右。

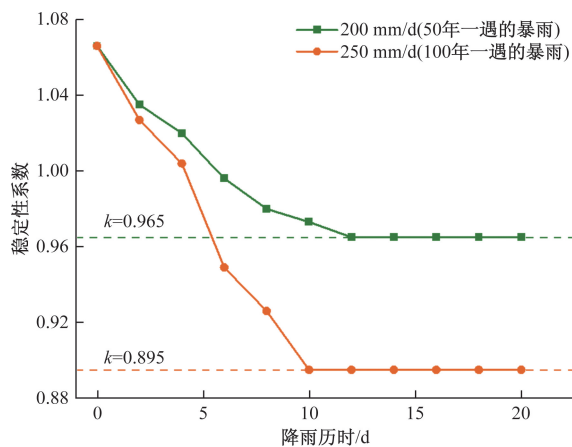


图 9 槐梁子滑坡稳定性变化

表 2 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数	$k < 1.00$	$1.00 \leq k < 1.05$	$1.05 \leq k < 1.15$	$k \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

## 4 结论

本文基于槐梁子滑坡的工程地质条件与变形特征,采用 FLAC 3D 数值模拟技术,研究降雨条件下滑坡的多场演化特征与稳定性变化,得出以下主要结论。

(1)槐梁子滑坡为老滑坡复活,其形成主要受降雨、人类工程活动以及前缘冲沟冲刷的共同作用

影响。在连续暴雨或极端强降雨条件下,滑坡存在整体失稳滑动的潜在风险,需特别关注。

(2)降雨强度越大,滑坡体内浸润线的上升速率越快,饱和区域扩展速率也随之加快。降雨初期,浸润线迅速上升,坡体稳定性系数快速降低;随着降雨持续,浸润线逐渐趋于稳定,坡体稳定性系数亦趋于平稳。

(3)滑坡位移动场的演化与渗流场变化高度相关,表明坡体变形主要受渗流场变化控制。孔隙水压力的显著增加是诱发滑坡失稳的关键因素,尤其在坡体前缘与浅表层区域表现尤为显著。

(4)长时间降雨对槐梁子滑坡稳定性具有显著削弱作用,降雨强度越大,滑坡稳定性系数的下降幅度越明显。因此,在降雨前期需加强坡体前缘地下排水及地表排水措施,有效遏制雨水渗入,降低孔隙水压力,减缓滑坡变形破坏。

### 参考文献

- [1] 肖燕,王潇,姚海鹏. 基于易发程度指数法的集镇斜坡地质灾害易发性评价——以茶恩寺镇斜坡为例[J]. 科技和产业, 2024, 24(9): 153-157.
- [2] WANG J, HU X, ZHENG H, et al. Energy transfer mechanisms of mobility alteration in landslide-debris flows controlled by entrainment and runout-path terrain: a case study[J]. *Landslides*, 2024, 21(6): 1189-1206.
- [3] 张鑫鑫,杜明,董洁. 岐山县宋家尧村滑坡形成机理[J]. 科技和产业, 2024, 24(7): 238-242.
- [4] 赵海松,向波,邵江,等. 青岗古滑坡体前缘开挖后局部复活特征及防治[J]. 科技和产业, 2023, 23(16): 263-268.
- [5] 潘明慧,王其光,江山,等. 强降雨作用下川西地区大型露天矿坑古滑坡复活特性[J]. 科技和产业, 2024, 24(22): 272-279.
- [6] 郑志文,孙玄. 半边街滑坡形成机制与基于有限元模拟的多场演化特征[J]. 科技和产业, 2024, 24(14): 281-288.
- [7] 葛若鑫,李嘉正,段进睿. 不同降雨工况下滑坡稳定性数值模拟及破坏机理[J]. 科技和产业, 2024, 24(10): 247-251.
- [8] 段军邦,吕耀成,李建波,等. 基于改进可拓理论-有效降雨耦合模型的库岸滑坡稳定性动态评价[J]. 科技和产业, 2023, 23(22): 253-261.
- [9] 陶海川,石长柏,江亚鸣,等. 恩施沙子坝滑坡破坏特征与形成机制[J]. 资源环境与工程, 2023, 37(3): 308-319.
- [10] 王剑,应春业,胡新丽,等. 浸泡作用下碎石土剪切强度衰减规律及机理[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 294-300.
- [11] 张鑫鑫,杜明,董洁. 岐山县宋家尧村滑坡形成机理[J]. 科技和产业, 2024, 24(7): 238-242.
- [12] MARIN R J, VELÁSQUEZ M F. Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides[J]. *Geomorphology*, 2020, 351: 106976.
- [13] 惠航,刘锋,冯兵,等. 基于 PFC2D 的柿子树坪滑坡变形特征模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 973-981.
- [14] 许源华,贺太红,谢配红,等. 基于 FLAC3D 的复杂堆积体稳定性分析及其治理研究——以贵州都匀-安顺高速公路摆拢大桥堆积体为例[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(5): 112-121.

## Research on Multi-field Evolution Characteristics and Stability of the Huailiangzi Landslide under Rainfall Conditions

TAO Haichuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, JI Kaipeng<sup>1,2</sup>, WANG Yongrui<sup>1,2</sup>, LIU Chao<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology, Hubei Geological Bureau, Wuhan 430043, China;

2. Hydrogeology and Engineering Geology Institute of Hubei Geological Bureau, Jingzhou 434020, Hubei, China)

**Abstract:** The Huailiangzi landslide has experienced significant deformation under continuous heavy rainfall, posing a serious threat to the safety of residents' lives and property. Based on detailed geological surveys, a landslide numerical model was constructed using the finite difference method and a coupled seepage-stress analysis approach was employed to investigate the stability of the landslide, as well as the evolution characteristics of the seepage field and displacement field under different rainfall scenarios. The results show that the Huailiangzi landslide is generally stable under natural conditions. However, under the influence of external adverse factors such as heavy rainfall, the stability of the slope significantly decreases. In particular, under continuous rainfall, the increase in pore water pressure is substantial, significantly increasing the likelihood of overall landslide movement. The findings provide important theoretical support for early warning systems and mitigation engineering of similar landslides.

**Keywords:** landslides; FLAC 3D; numerical simulation; multi-field evolution characteristics; stability variation