

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

# 基于Fredlund & Xing模型的渗流分析在川东红层梯田滑坡中的应用

廖 勇,乐 建,胡 力,顾伟伟,徐今星

Application of seepage analyses based on Fredlund & Xing model in red beds terrace landslides in eastern Sichuan

LIAO Yong, LE Jian, HU Li, GU Weiwei, and XU Jinxing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202049

# 您可能感兴趣的其他文章

# Articles you may be interested in

# 桩埋管参数对渗流下能量桩热--力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal–mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data 马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

# 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV 张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179

# 管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring 武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75

# 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

# 基于遗传算法-支持向量机的滑坡渗透系数反演

Estimation of hydraulic conductivity of landslides based on support vector machine method optimized with genetic algorithm 胡鹏, 文章, 胡新丽, 张玉明 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 160–168



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202049

廖勇, 乐建, 胡力, 等. 基于 Fredlund & Xing 模型的渗流分析在川东红层梯田滑坡中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 104-114.

LIAO Yong, LE Jian, HU Li, *et al.* Application of seepage analyses based on Fredlund & Xing model in red beds terrace landslides in eastern Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 104-114.

# 基于 Fredlund & Xing 模型的渗流分析在 川东红层梯田滑坡中的应用

廖 勇,乐 建,胡 力,顾伟伟,徐今星

(四川兴蜀工程勘察设计集团有限公司(四川省自然资源投资集团),四川成都 610072)

摘要:四川省巴中市通江县新场镇七家沟村二社水头上滑坡为川东典型红层梯田滑坡,区内类似斜坡覆盖范围广泛,但针对该地区此类滑坡的渗流分析研究较少。在对滑坡区进行大量野外调查、勘查、资料收集的基础上,综合运用卫星遥感、无人机航拍、机载 LiDAR、室内试验等技术手段,基于 Fredlund & Xing 土水特征曲线数学模型,采用 Geo-Studio 中 SEEP/W 模块进行渗流分析,将不同时间阶段分析结果与 SLOPE/W 模块耦合,继而得到稳定系数与降雨、时间之间的动态变化关 系,揭示了滑坡的变形过程和形成机理。研究显示:(1)连续降雨促使坡体地下水位升高,稳定性降低,最终导致水头上滑 坡整体失稳破坏;(2)滑坡变形过程、地下水出露特征与 Geo-Studio 计算结果基本吻合,说明基于 Fredlund & Xing 数值模拟 在类似地区能提供较为准确的模拟结果;(3)开垦梯田(水田)会降低坡体稳定性。研究结果可为四川山区类似滑坡灾害进 行隐患排查和主动防范提供理论支撑,为防灾减灾提供参考依据。

关键词: Fredlund & Xing; 渗流; 数值模拟; 耦合; 川东红层; 梯田; 滑坡 中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)03-0104-11

# Application of seepage analyses based on Fredlund & Xing model in red beds terrace landslides in eastern Sichuan

LIAO Yong, LE Jian, HU Li, GU Weiwei, XU Jinxing

(Sichuan Xingshu Engineering Survey and Design Group Co. Ltd. (Sichuan Natural Resources Investment Group Co. Ltd.), Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** The Shuitoushang landslide in Ershe in Qijiagou Village of Xinchang Town in Tongjiang County is a typical red-bed terrace landslide in eastern Sichuan. There are few studies on the seepage analyses of such landslides in this area, but similar slopes are widely distributed in the area. In this paper, on the basis of a large number of field investigations, surveys and data collection of disaster sites, the satellite remote sensing, UAV aerial photography, airborne LiDAR, indoor tests and other technical means are comprehensively used to analysis the landslide. Based on the mathematical model of Fredlund & Xing soil-water characteristic curve, the SEEP/W module in Geo-Studio is used to conduct the seepage analysis, and the analysis results at different time stages are coupled with the SLOPE/W module. Then the dynamic relationship between the stability coefficient, rainfall and

**第一作者:**廖勇(1980-),男,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程勘察设计、地质灾害勘查设计等方面的研究工作。 E-mail: 38732464@qq.com

收稿日期: 2022-02-27; 修订日期: 2022-05-29 投稿网址: www.swdzgcdz.com

time is obtained, revealing the deformation process and formation mechanism of the landslide. The results show that: (1) the continuous rainfall causes the groundwater level to rise and the slope stability to decrease, eventually leading to the overall instability and failure of the Shuitoushang landslide. (2) The deformation process of the landslide and the characteristics of groundwater exposure are basically consistent with the results calculated by Geo-Studio, indicating that the results based on Fredlund & Xing model can provide more accurate simulation results in similar areas. (3) Reclamation of terraced fields (paddy fields) will reduce slope stability. The results can provide theoretical support for hidden danger investigation and active prevention of similar landslide disasters in mountainous areas of Sichuan, and provide a reference for disaster prevention and mitigation.

**Keywords**: Fredlund & Xing; seepage; numerical simulation; coupling; eastern Sichuan red beds; terrace; landslides

国内外很多学者对滑(边)坡与降雨特征、地下水 渗流关系展开研究。张玉成等凹认为滑坡发生明显滞 后于降雨,但滞后期一般不超过10d。房玉洁等<sup>21</sup>、张 勇等同研究巴中地区降雨和滑坡之间的关系,认为滑 坡灾害和强降雨类型密切相关。李绍红等[4]等研究基 岩型浅层边坡稳定性,认为降雨具有明显的时效性。 张桂荣等间通过模拟预测降雨及库水位联合作用下秭 归八字门滑坡的稳定性,认为降雨量超过一定限制对 滑坡影响较大且具有滞后性。林锋等阿研究贵州大榕 滑坡形成机制后认为,多年来在堆积区南侧低洼地带 持续堆填弃土及长时间较强降雨导致滑坡发生。郁 舒阳等四等讨论了不同非饱和土参数在不同雨型下对 边坡渗流特性以及稳定性的影响,认为稳定性系数总 体上随降雨持续走低。王雪冬等『等研究降雨入渗特 征,根据试验结果对经典 Green-Ampt 入渗模型进行改 进。Hou等<sup>19</sup>分析汉源县中海村滑坡发生机制,认为 是地下水上升诱发了滑坡。易武等<sup>[10]</sup>应用 Visual Modflow 软件模拟滑坡渗流场,认为滑坡地下水位随库水位波 动而变化。张杰等<sup>[11]</sup>依据 Green-Ampt 模型对梯田边 坡中农作物灌溉入渗进行稳定分析,认为梯田农业灌 溉不利于边坡稳定。

四川盆地以东一大巴山褶皱带以西一带普遍分布 侏罗系、白垩系红色碎屑沉积岩层,上覆崩坡积、残 坡积含碎块石粉质黏土层,为典型红层地区。区内多 为中低山地貌,人口密集,耕地资源紧张。受人类生 产活动影响,研究区内斜坡地带多开垦为种植水稻的 梯田,对斜坡地层结构、微地貌有不同程度的影响。 红层地区滑坡比较发育,很多学者对红层滑坡成因机 制进行了相关研究<sup>[12-14]</sup>,均认为红层滑坡与降雨密切 相关。但针对四川境内梯田分布的滑坡渗流分析及 成因机理研究较少。

2021年9月28日四川省中巴市通江县新场镇七

家沟村二社水头上滑坡(以下简称"水头上滑坡")发 生剧滑,造成10余处房屋、300m水泥路损毁,44户 149人紧急撤离。水头上滑坡9月1-5日遭遇3d暴 雨天气(日降雨量均超80mm)至发生剧滑,历时近 1个月,远超一般降雨诱发滑坡成灾的滞后时限。该 区已进行过多次地质灾害排查和详细调查,采用遥 感、InSAR、无人机航拍等新技术的地质灾害风险评 价工作也已完成,但是并未发现该区域有何异常。因 此,该类型滑坡具有高度复杂性和隐蔽性,对此进行 研究十分必要和紧迫。故本文选择水头上滑坡为研 究对象,通过野外调查、勘查钻孔、室内试验,结合卫 星影像、无人机三维航拍、机载 LiDAR 等数据资料, 对滑坡成因机制进行定性分析,将梯田作为单独地层 建立滑坡地质模型,基于 Fredlund & Xing 土水特征曲 线数学模型<sup>[15]</sup>,采用 Geo-Studio 中的 SEEP/W 模块<sup>[16]</sup> 进行渗流分析,将不同时间阶段分析结果与 SLOPE/ W模块<sup>[17]</sup>耦合,继而得到稳定系数与降雨、时间之间 的动态变化关系。并将水头上滑坡还原至未开垦前, 即将梯田土层与坡体含碎块石土视为同一地层作为 对比,以研究开垦梯田对滑坡稳定性的影响。

#### 1 地质环境条件

通江县属亚热带秦巴区湿润季风气候类型,降雨 集中在 5—9月,多年平均降雨量 1 119.3 mm, 2021 年 1月 1日至 10月 1日降雨总量为 1 522.3 mm,其中 9 月降雨量为 463.7 mm,是历史平均月降雨量 164.5 mm 的 2.8 倍。剧滑前日降雨量 83.9 mm,9月日降雨分布 如图 1 所示。

研究区位于通江河右岸缓坡中部,属侵蚀剥蚀-中 切割中低山地貌,高程 650~850 m。滑坡周边出露的 地层除第四系松散堆积层之外,主要为中~上侏罗统 (J<sub>2-3</sub>)、下白垩统(K<sub>1</sub>)砂泥岩互层(图 2)。



Fig. 1 Distribution of daily rainfall in Tongjiang County in September, 2021



#### 2 数据来源

#### 2.1 滑前数据

由于滑坡已发生剧滑,滑坡前高精度地形数据已 无法获取。本次所用滑坡前地形数据是在 2004 年 5 月《通江土地利用现状图(1:10000)》的基础上,采用 滑坡前 Google 高程数据结合 2016 年 4 月 16 日 Google 高清卫星影像图、2017 年 5 月 12 日 Google 高清卫星 影像图及滑动后人工测量高程值进行内插修正获得。

本文收集了通江县气象站 2021 年 9 月 1 日一30 日的降雨数据,主要用于滑坡的诱发因素分析。

2.2 滑坡发生后数据

(1)野外调查勘查

滑坡发生后笔者第一时间参与了灾害成因的现

场调查分析工作,防范二次灾害发生。同时,技术人员迅速开展滑坡区基础地形、地质资料和历史卫星影像数据的收集以及现场勘探、测绘、室内试验等工作,通过各类数据的分析研究,为滑坡成因机理分析、 变形趋势研判、治理方案选择提供支撑。

(2)无人机航拍影像

采用轻型无人机航拍数据精细建模,再通过数值 模拟进行定量分析,最后与工程地质分析方法相互验 证,是一条高效、实用、可靠的途径<sup>[18]</sup>。

2021年9月29日,利用南方测绘公司SF700无人 机对滑坡区进行航拍,航拍面积1.23km<sup>2</sup>,共获取航拍 照片368张。为了动态跟踪对比滑坡发展情况,2021 年10月13日再次对滑坡区相同区域进行航拍。数据 获取后采用高性能计算机处理计算,获得高分辨率数 字地表模型(digital surface model, DSM)和数字正射影 像图(digital ortho map, DOM)。

(3)无人机机载 LiDAR

2021年10月13日,利用飞马公司机载D-LiDAR2000 获取了滑坡区 1.38 km<sup>2</sup>高精度激光雷达点云数据, 制作了大比例尺数字高程模型(digital elevation model, DEM)。通过 LiDAR 数据与无人机航拍获取的三维 数据进行精度比对,结合现场调查情况,得出无人机 载 LiDAR 数据在研究区获取的数据具有更高的精度。 2.3 调查结果

通过野外调查,基本查明了滑坡区下伏基岩岩 性、结构面发育及产状特征、坡体地下水出露情况、 滑坡影响区变形特征等。通过调查访问,掌握了滑坡 前坡体变形历史、坡体人类耕种活动、建筑物变形开 裂等相关信息。这些调查结果能为滑坡渗流分析及 成因机理的定性判断提供依据。

# 3 滑坡特征分析

# 3.1 坡体结构特征

水头上滑坡平面上总体呈箕状,平面图如图 3(d) 所示,主滑方向 42°,主滑纵坡长 375~408 m,宽 240~ 320 m,高差最大 118 m。通过现场调查,水头上滑坡 区地层岩性为耕植土(Q<sup>ml</sup>)、第四系崩坡积含碎石粉 质黏土(Q<sup>col+dl</sup>)、侏罗系上统蓬莱镇组(J<sub>3</sub>p)粉砂质泥 岩,岩层产状 320°∠23°,强风化—中风化,上覆含碎块 石粉质黏土、耕植土。通过主滑剖面 6-6<sup>\*[19]</sup>揭示(图 4), 滑体主要由耕植土、含碎石粉质黏土组成,滑带土为 软塑粉质黏土,滑床为粉砂质泥岩(图 3)。耕植土层 主要分布在梯田区域,主要成分为流—软塑状粉质黏





土,厚0.3~0.7 m,弱透水性。梯田下部为含碎石粉质 黏土,碎石含量 15%~30%,厚2.7~12.0 m,稍湿一饱

高程/m

和, 孔隙发育, 中等透水性。强风化粉砂质泥岩, 厚 2.5~6.1 m, 中等透水性。中风化粉砂质泥岩, 揭露厚 度 4.7~14.8 m, 微透水性。勘察发现坡体分布有地下水, 为潜水, 水位埋深 0.7~9.5 m。 3.2 滑坡变形破坏特征

通过对滑坡区多期卫星影像、无人机倾斜摄影、 机载 LiDAR 等数据处理分析,结合现场调查、勘查、 取样测试分析等方法,对滑坡特征有了清晰的认识。 滑坡区总体上分为主滑区(A区)、滑坡影响区(B区)、 中部弱变形区(C区)3个区域(图3)。

(1) 主滑区(A区) 特征

根据坡体变形破坏特征,结合现场调查访问、工程钻探、滑坡区各类影像资料,主滑区分为启动区 (Ⅰ)、滑移区(Ⅱ)、侧向滑移区(Ⅲ),见图 3。启动区 (Ⅰ)位于滑坡体中上部,高程 745~795 m,下部剪出 口高程 745~760 m。启动区纵向平均长 140 m,宽 245 m,厚 9 m。启动区坡度 17°~39°,坡向 30°,主滑 方向 25°,岩性如前文所述。启动区边界条件和空间 特征十分清晰。滑体以岩层层面作为底滑面,以含碎 块石粉质黏土层底部软塑粉质黏土为滑带土,以坡体 侧面下错陡坎或剪切变形裂缝作为两侧边界,滑坡后 缘下错明显,形成 1.5~3.0 m 滑坡壁,如图 5(a)所示。 该区域自 2021 年 9 月以来先后经历多次强降雨天气, 一部分降水渗入坡体,坡体地下水位升高,坡体表面 有地下水渗出,如图 5(b)所示,土体有效重度、强度 降低,为启动区进一步变形创造了有利条件。滑动



(a) 滑坡壁



(b)坡体地下水渗出(红色标注)
 图 5 启动区滑坡壁与地下水特征
 Fig. 5 Characteristics of the landslide wall and groundwater in the start-up area

后,于启动区下部形成总体 WN 走向的弧形鼓丘。

滑移区(Ⅱ)位于滑坡体中下部,坡向 60°,高程 650~760m,以整体式滑移为主要特征。当启动区失 稳下滑后,以巨大的动能推挤下部斜坡表面原有松散 堆积物。下部斜坡主要为梯田(图 6),5-9月封闭蓄 水种植。由于地表水、连续强降雨下渗,使得坡体已 处于蠕滑状态,但此时滑移面尚未全面贯通。在受到 启动区下滑推挤作用之下,滑移面全面贯通,滑移区 向下滑动。将无人机正摄影像与滑动前卫星影像进 行对比(图 4),发现主滑区滑动距离 40~48 m, 主滑方 向 42°, 滑坡剪出口在水泥路下方。由于滑移区下滑 挤压,在本区下部发育总体 ESE 走向的鼓胀区,造成 道路开裂变形,农田、房屋受损严重(图7)。另外,随 着滑移区急速下滑,与启动区之间形成一条弧形错断 边界,该次级滑坡壁高1.5~7.5 m(图 8),壁高随高程 逐渐降低。本区地下水十分丰富,坡体各部位均有泉 眼出露,并在坡体形成径流,汇集于道路内侧排水 沟。滑移区中下段西侧低、东侧高,导致滑动方向向 西偏转,这一特点与坡体中地下水渗流方向一致。



图 6 滑坡区内梯田(Google 卫星影像图, 2016 年 4 月 16 日) Fig. 6 Terraced fields in the landslide area (Google satellite image, April 16, 2016)



Fig. 7 Damaged houses and road

(2)滑坡影响区(B区)

滑坡影响区(B区)如图3所示。滑坡发生后,通 过现场调查及无人机高清三维模型影像,发现受主滑



图 8 滑移区次级滑坡壁 Fig. 8 Secondary scarp of the landslide

体高速滑动和运动过程中牵引、拖拽作用的影响,在 滑坡区上坡一侧形成一条总体走向 ESE、长 220.0 m, 宽 15.0~20.0 m 的牵引区。牵引区分布大小拉张裂 缝 20 余条。拉张裂缝由坡外向坡内依次下错,方向 与滑坡边界走向一致。经笔者现场测量,裂缝长 7.5~ 125.0 m,宽 7.0~25.0 cm, 深 25.0~50.0 cm, 无地下水 充填。

(3)中部弱变形区

中部弱变形区(C区,见图 3)为滑移区(Ⅱ)与侧 向滑移区(Ⅲ)中间一带的三角形区域,横向宽 50 m, 纵向长 85 m,高程 693 ~ 728 m,坡度 20° ~ 25°,坡向 62°。 通过钻探、探槽揭露,覆盖层厚度 2.0~3.0 m,基岩埋 深普遍较浅。该区域与侧向滑移区(Ⅲ)处于同一斜 坡,与滑移区(Ⅱ)斜坡交界处形成 NW 向山脊。该区 域在水头上滑坡发生前后均处于基本稳定状态,调查 过程中未发现明显变形迹象。

3.3 滑坡形成过程分析

通过现场调查,结合多期卫星影像分析,水头上 滑坡长期处于稳定状态。但是,有利的地形地貌、地 层岩性为水头上滑坡发生的主要控制因素,连续性降 雨为诱发因素。滑坡位于斜坡中部,后缘堆积层厚, 下部滑带土(粉质黏土)强度低,梯田陡坎为滑坡剪出 提供了良好的临空条件。所在斜坡地段坡度较缓,地 层渗透性一般,加之地表为梯田(水田),排水条件 差。2021年9月以来,通江县遭遇罕见连续强降雨天 气(图1),导致坡体地下水位上升,稳定性持续下降。 根据滑坡变形特征,推断水头上滑坡形成经历了蠕 滑、滑动、剧滑、牵引4个阶段:

启动区蠕滑-滑动推移挤压阶段:受连续强降雨影 响,雨水下渗及地下水渗流导致启动区地下水位逐渐 升高,孔隙水压力持续增大,土体有效重度降低,坡体 滑动面逐渐贯通,在月末强降雨诱发作用下,由蠕滑 发展到滑动阶段,推动挤压前方土体。通过对滑动前 遥感影像进行分析,在启动区下部存在一平台,推断 该平台起到一定缓冲作用,因此并未持续下滑。

滑移区蠕滑-滑动-剧滑阶段:处于蠕滑阶段的滑 移区,在受到上部土体推移挤压和月末强降雨综合作 用下,突然失稳滑动。由于下方缺乏有效堆积支撑平 台,滑动段持续运动至坡体下部,形成鼓丘状堆积体, 才基本稳定下来。

主滑区牵引拉裂阶段:滑移区剧滑再次激活启动 区,启动区继续向下滑动,牵引、拖拽主滑区后缘坡 体,在影响范围内形成数量、规模可观的拉张裂缝。

# 4 数值分析与耦合

#### 4.1 Fredlund & Xing 模型

国内外学者研究表明,对于非饱和多孔介质,其 渗透系数为饱和度和体积含水率的函数,由于体积含 水率和饱和度与基质吸力之间的关系可以用土水特 征曲线来体现,渗透系数也是基质吸力的函数。受土 水特征曲线迟滞效应的影响,合理应用土水特征曲 线相当困难<sup>[20]</sup>。Fredlund等<sup>[15]</sup>通过对土体孔径分布曲 线的研究,用统计分析理论推导出适用于全吸力范围 的任何土类的土水特征曲线的表达式,即Fredlund & Xing 模型:

$$\theta_{w} = C_{\phi} \frac{\theta_{s}}{\left\{ \ln \left[ e + \left(\frac{\phi}{\alpha}\right)^{n} \right] \right\}^{m}}$$
(1)

式中: θ<sub>w</sub>——体积含水率/%;

θ。——饱和体积含水率/%;

*C*,——函数的修正函数;

e——常数 2.718 28;

*φ*───负孔隙水压力/kPa;

a、m、n ------ 拟合参数,通常a、m、n的值可用拟
 合算法和测量数据点的方式获得<sup>[16]</sup>。

本文根据 Geo-Studio 提供的样本函数曲线<sup>[17]</sup> 和岩 土体饱和状态参数<sup>[19]</sup> 来拟合确定非饱和岩土体渗透 函数和土水特征曲线,其中α、m、n取值为α=100 kPa, m= 2, n=1。

利用式(1), Fredlund 等提出了渗透系数计算方法,即沿整个体积含水率函数进行积分<sup>[21]</sup>,其计算公式为:

$$k_{w} = k_{s} \frac{\sum_{i=j}^{N} \frac{\theta(e^{v}) - \theta(\phi)}{e^{vi}} \theta'(e^{vi})}{\sum_{i=j}^{N} \frac{\theta(e^{v}) - \theta_{s}}{e^{vi}} \theta'(e^{vi})}$$
(2)

式中: $k_w$ ——负的孔隙水压力对应的渗透系数/( $m \cdot d^{-1}$ );

 $k_{s}$ —他和渗透系数/(m·d<sup>-1</sup>);

y---虚拟变量;

- *i*——*j*到*N*之间的数值间距;
- j、N——最小、最大负孔隙水压力/kPa;
- θ—第*j*步的负孔隙水压力/kPa, θ'为方程的起始值。
- 4.2 数值模型的建立

Geo-Studio2012 软件中的 SEEP/W 模块<sup>1161</sup> 是一种 专门用于岩土渗流计算的有限元模块,可以用来还原 滑坡发生前后的动态水文响应过程,该模块中已嵌入 式(1)。本文采用该模型计算饱和-非饱和土体动态含 水率,将结果用于式(2),得到各时步坡体渗流分析运 算结果。 6-6'剖面(图4)在水头上滑坡各阶段起决定作用, 因此,以该剖面为基础建立模型。假定梯田为粉质黏 土层,均匀分布于坡体表面,取平均厚度0.5 m,其下 分别为含碎块石粉质黏土、滑带土(粉质黏土)、强风 化粉砂质泥岩、中风化粉砂质泥岩。勘察钻孔揭示启 动区段滑带土与滑移区段强度存在差异,在此分别定 义为滑带土①、滑带土②,以示区别。另外,根据基岩 产状与斜坡坡面产状关系、基岩岩体质量等级,推定 滑带土以下基岩为不滑动层,其他地层为满足摩尔-库 仑(Mohr-Coulomb)本构模型的弹塑性材料,各地层参 数见表1。数值模型采用四边形和三角形网格进行有 限元网格划分,单元尺寸2.5 m、5.0 m,共计划分9799 个节点,3247个单元(图9)。



Fig. 9 Simulation numerical model and finite element meshing

#### 4.3 坡体渗流数值分析

水头上滑坡前的水文地质资料已无从考证。但 是滑动后,通过在滑坡区地质钻孔进行稳定水位观 测,结合地区经验复原滑动前坡体地下水稳定水位作 为初始状态也是一种可行的方法。基于此,在 SEEP/W模块中设定瞬态渗流边界条件:以地表坡面 为入渗边界,图1中的日降雨量曲线作为入渗量曲 线;以坡体初始水位线作为模型初始水头(图9虚线 所示);模型左边界、右边界和底边界均设置为透水边 界,以真实反映岩土材料性质。模型中分别于启动区 (图9)设置4个监测点(A1—A4),用于观察孔隙水压 力、材料渗透系数变化。数值模型中各层岩土材料物 理力学参数按表1取值。模拟以1d作为计算步长, 计算周期为2021年9月1—27日,共计27个时步。

通过瞬态叠加运算,得到每一时步地下水渗流场 分布,这里选取第0天、第27天的坡体地下水渗流场 进行对比分析(图10)。通过对比坡体初始地下水渗 流场和滑坡前地下水渗流场发现滑坡前0孔隙水压 力等势线明显升高,在坡体多处位置与地面线相交, 说明坡体中有地下水渗出,与现场调查结果一致。通 过位于非饱和土体(含碎块石粉质黏土)中的监测点 A2,分析滑坡前坡体材料属性、孔隙水压力的动态响 应过程。如图 11(a)所示,监测点 A2 含水率变化经历 了 3 个上升阶段:降雨开始前 5 天,随着雨水入渗和 9 月 4—5 日强降雨的发生,体积含水率由 38.9% 急剧 上升至 43.1%,这个阶段降雨量最大,对含水率影响也 最大;随着降雨停歇,含水率趋于稳定,在中下旬随着 降雨入渗,含水率再次上升并达到饱和含水率;在此

表1 计算模型中岩土材料物理力学参数取值

 
 Table 1
 Values of physical and mechanical parameters of geotechnical materials in the calculation model

岩土材料	重度	黏聚力	内摩擦角	饱和体积	饱和渗透系数
	$/(kN \cdot m^{-3})$	/kPa	/(°)	含水率/%	$/(m \cdot d^{-1})$
耕植土(粉质黏土)	20.5/20.5	8	10	60	0.05
含碎块石粉质黏土	20.7/22.0	25	21	45	1.52
滑带土①	20.3/21.8	11	15	45	0.05
滑带土②	20.3/21.8	20	16	45	0.05
强风化粉砂质泥岩	22.5/23.4	30	27	20	1.24
中风化粉砂质泥岩	23.7/24.6	125	30	20	0.001

注:"/"号前后分别为天然重度和饱和重度。



Fig. 11 Hydrological monitoring results in the landslide soil (monitor point A2)

期间,渗透系数也随之增大至 1.5 m/d,如图 11(b)所示。A1—A4 监测点孔隙水压力监测结果显示,坡体内同一截面不同深度,其孔隙水压力总体变化基本一致,即随降雨入渗孔隙水压力增大。雨停后,随着地下水渗流补给量逐渐减小至小于坡体排泄量,地下水位下降,孔隙水压力降低。强降雨结束半个月以后,坡体仍有泉眼出露,剪出口出水量也未见明显减少,这和计算结果推论一致。降雨对浅层碎石土滑坡的作用主要通过增加滑坡体的孔隙水压力,使滑体的下滑力增大<sup>[21]</sup>。另外,研究发现滑移区土体材料属性、孔隙水压力动态响应过程与启动区类似,受篇幅所限不再单独说明。

#### 4.4 坡体稳定性及滑坡过程分析

将 SEEP/W 模块每一时间步计算得到的渗流分析 结果耦合到 SLOPE/W 模块<sup>[16]</sup>,利用 Morgenstern-Price 方法计算滑坡的稳定性系数变化。SLOPE/W 模块模 拟计算模型中各岩土材料参数按表 1 取值。滑面为 指定滑面(图 9)。如图 12(a)所示,启动区的稳定性系 数初值为 1.198,稳定性系数在降雨后均有降低趋势; 在 9 月中下旬连续降雨后,稳定性系数降至 1.008,启 动区坡体已经处于蠕滑阶段;在 27 日降雨后,稳定性 系数降至 0.97,启动区失稳滑动。滑移区稳定系数初 值为 1.205,稳定性系数走势与启动区一致,但在 27 日 降雨后,稳定系数 1.026,处于蠕动挤压阶段。通过模 拟计算结果显示,启动区率先失稳下滑,推移挤压前 方土体,触发了本已临界滑动的滑移区,大规模滑动 随后展开,直到在剪出口附近堆积趋稳,这与滑坡形 成过程定性分析结果基本一致。



为了进一步研究梯田(水田)对坡体稳定性的影响,将坡体复原后渗流分析结果与坡体复原后 SLOPE/ W模块进行耦合,稳定性计算结果如图 12(b)所示,启 动区最小稳定性系数 1.001,滑移区最小稳定性系数 1.043。复原后稳定性系数计算结果均比现状坡体大, 说明在该地区斜坡开垦梯田(水田),改变了坡体原生 渗流环境,在一定程度上降低了坡体稳定性。

# 5 结论与建议

(1)川东红层梯田水头上滑坡为推移式滑坡,连续性降雨导致坡体地下水位逐步升高,稳定性逐步降低,前期连续性降雨和临近暴雨导致滑坡发生。

(2)把梯田纳入进来进行现状坡体渗流分析,其 结果与稳定性分析耦合与复原后坡体稳定性分析结 果对比显示,该地区斜坡梯田(水田)对坡体稳定性有 不利影响。在梯田斜坡稳定性分析中采用这种方法 具有一定的创新性。

(3)滑坡渗流分析和稳定性分析结果与坡体勘察、调查、定性分析结论基本吻合,说明基于 Fredlund & Xing 模型的有限元渗流分析在川东红层梯田滑坡中有很强的适用性。

降雨入渗是水头上滑坡发生的主因,导致不论是 专业人员地面调查的传统方法,还是遥感、InSAR等 新技术都难以预报,这是个世界性难题。在此,笔者 认为可以从以下几个方面做好防灾减灾工作:使用 ArcGIS导入精度大于1:10000的DEM,结合现场调 查,对斜坡单元按坡度、坡向、地层岩性等孕灾条件 进行筛选确认,实行分类地质灾害防控,即对潜在危 害性大的斜坡,新建或改扩建坡面截排水设施,将降 水阻挡或及时排出;对于潜在危害性斜坡,加强汛期 人工巡视排查。

另外,通过本文研究,将水田改为旱田有助于坡 面排水,对坡体稳定有利,但还需要加强这方面的研 究讨论。

本文受数值模拟软件、研究经费和时间等因素影 响,并未考虑上方坡体汇水、坡体自然排泄、滑带土 体浸泡软化、大气降水蒸发等因素对坡体渗流分析和 稳定性分析的影响,可能影响分析的结果准确性,后 续的工作研究中持续跟踪这方面研究进展。

# 参考文献(References):

- [1] 张玉成,杨光华,张玉兴.滑坡的发生与降雨关系的研究[J].灾害学,2007,22(1):82-85. [ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHANG Yuxing. Research on the relationship between landslide and rainfall[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 82 85. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 房玉洁,肖天贵,许强.四川巴中地区引发滑坡地质 灾害的强降水类型及典型案例分析[J].地球科学前 沿,2015,5(1):171 - 185. [FANG Yujie, XIAO Tiangui, XU Qiang. Different types of heavy rainfall which triggered the landslide in Sichuan Bazhong area and typical case analysis[J]. Advances in Geosciences, 2015, 5(1):171 - 185. (in Chinese with English abstract)]
- 【3】张勇,温智,程英建.四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J].水文地质工程地质,2020,47(2):178-182.
  [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2):

178 – 182. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 李绍红,朱建东,王少阳,等.考虑降雨类型的基岩型 浅层边坡稳定性分析方法[J].水文地质工程地质, 2018,45(2):131-135. [LI Shaohong, ZHU Jiandong, WANG Shaoyang, et al. Stability analysis methods for the bedrock shallow slope considering rainfall types[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 131-135. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张桂荣,程伟.降雨及库水位联合作用下秭归八字门 滑坡稳定性预测[J].岩土力学,2011,32(增刊1):476-482. [ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water lever fluctuations and rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 1): 476 - 482. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 林锋,王茜,葛海龙,等.贵州省岑巩县大榕滑坡特征及形成机制研究[J].工程地质学报,2014,22(3):396-404.
  [LIN Feng, WANG Qian, GE Hailong, et al. Characteristic and mechanism of Darong landslide in Cengong County, Guizhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 396 404. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郁舒阳,张继勋,王军磊,等.基于Fredlund & Xing参数下不同雨型边坡渗透稳定性分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2017,39(6):46 51.[YU Shuyang, ZHANG Jixun, WANG Junlei, et al. Seepage and slope stability analysis under different rainfall patterns based on Fredlund & Xing parameters[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2017, 39(6):46 51.(in Chinese with English abstract)]
- [8] 王雪冬,李世宇,孙延峰,等.考虑非饱和浸润层厚度 和累积入渗量的改进Green-Ampt模型[J].水文地质 工程地质, 2021, 48(6): 64 - 71. [WANG Xuedong, LI Shiyu, SUN Yanfeng, et al. An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration in the inner dumping site of an open pit coal mine[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 64 - 71. (in Chinese with English abstract)]
- [9] HOU Runing, CHEN Ningsheng, HU Guisheng, et al. Characteristics, mechanisms, and post-disaster lessons of the delayed semi-diagenetic landslide in Hanyuan, Sichuan, China[J]. Landslides, 2022, 19(2): 437 – 449.
- [10] 易武,董志鸿,黄海峰,等.三峡库区树坪滑坡地下水 渗流场分析.工程地质学报,2014,22(增刊1):70 76. [YI Wu, DONG Zhihong, HUANG Haifeng, et al.

The analysis of groundwater seepage field in Shuping landslide in The Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(Sup1): 70 - 76.(in Chinese with English abstract)]

- [11] 张杰,韩同春,豆红强,等.基于农作物灌溉入渗的梯 田边坡稳定性探讨[J].四川大学学报(工程科学版), 2014,46(增刊1):79-85. [ZHANG Jie, HAN Tongchun, DOU Hongqiang, et al. Research on slope stability of terrace based on crop irrigation infiltration[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(Sup 1):79-85. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3783 3790. [ZHANG Ming, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Study of mechanism of landslide induced by rainfall in gently inclined red stratum in east Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3783 3790. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李蕊,于孝民,王振涛.川东红层缓倾角地层中降雨引起滑带土饱和对滑坡的稳定性影响[J].土工基础, 2012, 26(4): 94 97. [LI Rui, YU Xiaomin, WANG Zhentao. Influence of slipped soil on the stability of landslides in eastern Sichuan Province[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(4): 94 97. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨戒,李绍红,吴礼舟.降雨作用下川东红层地区浅层土质滑坡稳定性数值分析[J].水力发电,2017,43(5):37-42. [YANG Jie, LI Shaohong, WU Lizhou. Numerical analysis on the stability of rainfall-induced shallow landslide in red-bed area of east Sichuan[J]. Water Power, 2017, 43(5):37 42. (in Chinese with English abstract)]
- [15] FREDLUND D G, XING Anqing. Equations for the soilwater characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521 – 532.
- [16] Geo-Slope International Ltd. Geo-Slope International Ltd(2007a)SEEP/W user's guide for finite element seepage analysis[M]. Calgary, Alberta, Canada: Geo-Slope International Ltd., 2010.
- [17] Geo-Slope International Ltd. Geo-Slope International Ltd(2007b)SLOPE/W user's guide for slope stability analysis[M]. Calgary, Alberta, Canada: Geo-Slope International Ltd., 2010.
- [18] 张欢, 巨能攀, 陆渊, 等. 基于无人机的滑坡地形快速 重建与稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2021,

48(6): 171 – 179. [ZHANG Huan, JU Nengpan, LU Yuan, et al. Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 171 - 179. (in Chinese with English abstract)]

- [19] 四川兴蜀工程勘察设计集团有限公司.通江县新场 镇七家沟村二社水头上滑坡治理工程勘查报告[R]. 成都:四川兴蜀工程勘察设计集团有限公司,2021.
  [Sichuan Xingshu Engineering Survey and Design Group Co. Ltd. Investigation report of the Shuitoushang landslide control project[R]. Chengdu: Sichuan Xingshu Engineering Survey and Design Group Co. Ltd., 2021. (in Chinese)]
- [20] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2569 2576. [LIN Hungchou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. On application of soil-water characteristic

curves to landslide forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2569 – 2576. (in Chinese with English abstract)]

- [21] FREDLUND D G, XING Anqing, HUANG Shangyan. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533 – 546.
- [22] 许建聪,尚岳全.降雨作用下浅层碎石土滑坡解体破坏机理研究[J]. 自然灾害学报,2008,17(3):117-124. [XU Jiancong, SHANG Yuequan. Study on mechanism of disintegration and failure of shallow debris landslide under rainfall action[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3):117 124. (in Chinese with English abstract)]

**编辑:**汪美华 刘真真