

# 黔北山区崩坡积堆积体降雨灾变机制与演化模式

杨 华

(贵州正业工程技术投资有限公司, 贵阳 550002)

**摘要:** 黔北山区各种成因堆积体广泛分布, 其中崩坡积堆积体最为常见。针对该地区某公路内侧一处崩坡积堆积体进行剖析, 通过精细化调查与测量、数值模拟等技术对堆积体降雨灾变机制与演化模式展开研究。该崩坡积堆积体早期受多轮降雨影响, 坡体浅表层已发生多次局部失稳破坏, 导致浆砌挡土墙开裂、混凝土挡土墙被掩埋, 路面结构严重损毁且通行困难, 后期降雨条件下仍存在局部失稳甚至整体失稳的可能。降雨数值模拟结果显示, 该堆积体在天然状态下处于非饱和状态, 持续强降雨将促使土体由非饱和向饱和状态发展, 降雨作用下暂态饱和区由坡表逐渐扩展、加深, 至降雨结束时整个斜坡土体几乎达到饱和状态。受基岩隔水作用影响, 下渗雨水在基覆界面处汇集, 孔隙水在重力作用下不断向坡脚运移, 导致基覆界面、坡脚段具有高孔隙水压力。一方面, 孔隙水对块碎石土的润滑、软化促使土体结构性减弱, 力学强度衰减。另一方面, 高孔隙水压力起到付托减重作用, 使土体有效应力降低, 两者综合导致坡体抗滑力减小, 进而会沿基覆界面发生整体滑动。而强降雨作用下堆积体发展成滑坡的过程可分为 4 个阶段, 即①降雨全面入渗; ②坡表局部饱和; ③饱和区扩展, 局部失稳; ④整体失稳破坏。早期多次局部失稳破坏仅发展至阶段③, 后期若出现此类强降雨甚至极端暴雨, 则该崩坡积堆积体极有可能发生整体破坏, 进而会造成道路完全阻断, 威胁行人和车辆。

**关键词:** 崩坡积物; 强降雨; 渗流场; 灾变机制; 演化模式

**中图分类号:** TU411.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0034-05

贵州北部地区山高谷深, 地质条件较复杂, 斜坡岩土体在长期风化剥蚀条件下形成崩坡积堆积体, 其规模在几万立方米至几百万立方米不等, 降雨作用下易发生持续蠕变甚至灾变<sup>[1]</sup>。这类堆积体多由粗粒土组成, 表层结构松散, 至深部密实度逐渐增加, 粗颗粒构成堆积体基本骨架, 也是其力学强度主要组成部分, 而细颗粒充填于孔隙间, 在较密实状态下增强土体黏结作用<sup>[2-3]</sup>。然而, 由于粗粒土孔隙较多且连通性好, 为降雨下渗提供极佳条件, 因而当降雨达到一定强度或持续时长, 堆积体易由坡表向下形成饱和区<sup>[4]</sup>, 而土体含水率的提升对其力学强度必然造成一定影响, 但强度衰减程度与含石率、级配密切相关<sup>[5]</sup>。

目前, 堆积体滑坡或粗粒土滑坡已取得较为丰富的研究成果, 降雨过程中粗粒土结构损伤、力学强度衰减、多场变化是其成灾内在作用<sup>[6-7]</sup>。王斌等<sup>[8]</sup>通过室内模型试验还发现堆积体内存在细颗粒含量变化与迁徙过程。而前期地震震裂损伤、后期降雨耦合作用的模式对堆积体滑坡影响更为强烈<sup>[9]</sup>。郑光等<sup>[10]</sup>在贵州岑巩龙家坡滑坡研究中发现强降雨引起的局部失稳是造成主滑体大规模破坏的主要原因之一, 坡体厚层堆积体、有利岩体结构与临空条件构成

滑坡孕灾条件。付敬等<sup>[11]</sup>还发现雨季强降雨会导致坡体内裂隙发展, 形成高孔隙水压力并补给地下水, 而瞬态的地下水运动及暂态附加水荷载是非饱和边坡成灾的控制因素。而堆积体斜坡破坏通常先后经历微裂隙发育-局部破坏-整体破坏, 呈现出“初期拉裂-坡面坍塌-塑性滑动”的破坏模式<sup>[12]</sup>, 并且随坡度变化堆积体滑坡成灾模式形成差异<sup>[13]</sup>。

本文以黔北山区公路内侧一处崩坡积堆积体斜坡为例, 通过精细化调查测量、数值模拟等技术对其降雨灾变机制进行研究, 同时结合前期失稳破坏特征分析其可能的成灾演化模式。研究成果不仅有助于促进对堆积体滑坡深入认识, 同时可为地方相似灾害防治提供指导。

## 1 崩坡积堆积体基本情况

### 1.1 地质环境条件

降雨黔北山区属亚热带季风性湿润气候, 四季分明, 年平均气温约 14.9℃, 年平均降雨量约 1 100 mm, 主要集中于 5—10 月, 占全年降雨量的 70% 以上。充沛的雨水也是引发地质灾害的主要因素, 降雨型滑坡占地区灾害数量的 90% 以上, 其中以土质滑坡为主。研究区为构造剥蚀低中山地

收稿日期: 2024-10-23

作者简介: 杨华(1991—), 男, 贵州贵阳人, 工程师, 研究方向为地质灾害勘察设计。

貌,植被覆盖率较高,近些年最大小时降雨量约 19 mm,最大日降雨量超过 70 mm,近些年强降雨已导致该崩坡积堆积体浅表层发生多次局部滑塌。

研究区内出露基岩为二叠系茅口组( $P_2m$ )灰岩,岩层产状  $132^\circ\angle 28^\circ$ ,节理裂隙较为发育,原岩风化破碎后在斜坡中下段形成崩坡积堆积体( $Q_4^{col+dl}$ )。堆积体主要为块碎石土,黄褐色,天然含水率为 13.5%~15.8%,表层结构较松散,往深部密实度逐渐增大,堆积物最大厚度约 12 m,顺坡向分布,呈现出上薄下厚的堆积形态,工程地质剖面图如图 1 所示。崩坡积块碎石土以灰岩块碎石作为基本骨架,细粒充填其中,块碎石优势粒径 2~8 cm,占比可达 65%,因而堆积物整体透水性较好,基覆界面构成该堆积体灾变的潜在滑动面。此外,研究区内地质构造较为简单,无构造断层,堆积体内未见稳定水位。

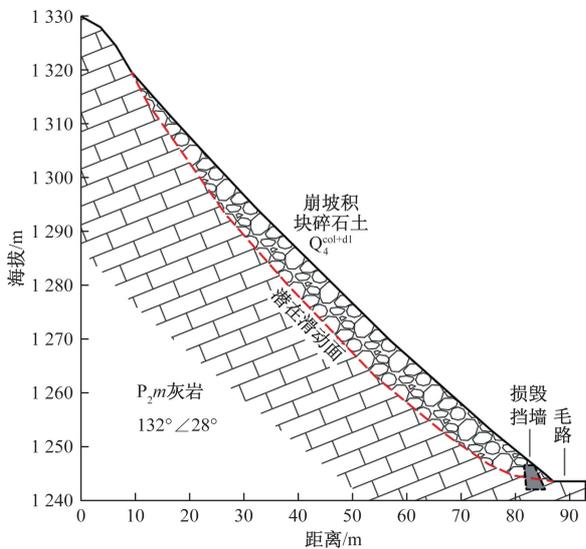


图 1 崩坡积堆积体斜坡工程地质剖面图

### 1.2 变形破坏特征

根据精细化调查,崩坡积堆积体长 108 m,宽 76 m,平均厚度约 8.5 m,总方量为 6.98 万  $m^3$ 。该堆积体为斜坡上部灰岩风化后持续崩塌掉落堆积而成,在道路内侧形成较大规模堆积体,其坡面较为平直,坡度约  $38^\circ$ ,堆积体特征如图 2 所示。由于崩坡积堆积物结构较松散,透水性强,在降雨作用下堆积体表层松散块碎石土已发生多次持续溜滑,其破坏深度为 0.5~1 m,最大失稳规模约 500  $m^3$ ,尤其雨季时常造成该段道路被阻断。

由于该堆积体整体稳定性较差,早期采用浆砌挡土墙对堆积体坡脚进行防护,但受浅表层松散堆积物持续溜滑破坏影响,浆砌挡土墙发生明显开裂变形,已无法起到有效保护作用。而后又采用混凝



图 2 崩坡积堆积体全貌特征

土挡土墙对堆积体前缘进行拦挡,但随着浅表层持续溜滑,混凝土挡土墙大部分被掩埋,后续失稳的松散堆积物仍不断运动堵塞道路,可见当前道路路面已严重损毁。

从堆积体工程地质剖面可知,该斜坡基覆界面较陡,加之土体结构松散,地区降雨丰富,雨季期强降雨作用下存在发生沿基覆界面整体失稳的可能。

## 2 崩坡积堆积体降雨数值模拟

### 2.1 模型概化

以斜坡实测工程地质剖面为基础,采用 Geostudio 软件中的 Seep/W 模块建立斜坡二维数值分析有限元模型,模型比例为 1:1,共 1 523 个节点,1 441 个单元,如图 3 所示。模型材料分为覆盖层、基岩两类,材料非饱和参数取软件内置参数,覆盖层渗透系数取  $10^{-3}$  cm/s 数量级,而基岩(灰岩)透水性差,以极低渗透系数视其为相对隔水层。由于该斜坡区覆盖层未见地下水位,故模型中将地下水位线视为深埋状态。

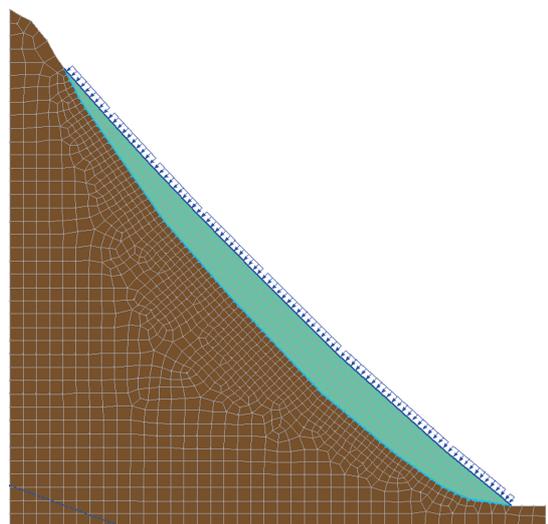


图 3 概化模型

模型降雨边界采用单位时间渗流量,其模拟平均降雨强度为6 mm/h,降雨持时为12 h,累积降雨量达72 mm,达到地区最大日降雨量。

## 2.2 渗流场特征

图4展示了崩坡积堆积体斜坡不同降雨时步的渗流场特征,随着降雨过程持续,斜坡渗流场变化显著,并主要集中于覆盖层内。在降雨初期(1 h),由于斜坡浅表层块碎石土结构松散,透水性最强,降雨致使浅表层形成不连续暂态饱和区,其厚度为0.3~0.8 m,并主要分布于斜坡中下部。而伴随降雨持续影响,4 h时斜坡覆盖层暂态饱和范围扩大,并且浅表层饱和范围已完全相连,堆积体坡脚、后缘饱和区深度相对较大,已接近基覆界面深度。降雨至8 h时,堆积体内饱和区范围、深度进一步发展,初步形成沿基覆界面的饱和区形态,坡脚处因坡内孔隙水向坡脚渗流运移,其孔隙水压力相对较大,达到40~50 kPa,坡体中部孔隙水压力等值线呈现锯齿状。当降雨结束时(12 h),堆积体内暂态饱和区基本形成沿基覆界面发展的饱和范围,即整个堆积体接近全饱和状态,高值孔隙水压力沿基覆界面由坡脚向坡中延伸,并且此时坡脚处孔隙水压力达到最大值。

从不同降雨时步渗流场中孔隙水压力等值线变化趋势可知,由于崩坡积堆积物透水性强,降雨对坡体影响较为明显,持续降雨作用下斜坡具备覆盖层全饱和的条件,这对于斜坡整体稳定性极为不利,尤其是基岩作为相对隔水层,雨水下渗在基覆界面汇集,孔隙水的润滑、软化以及高孔隙水压力下的浮托减重极易由基覆界面形成潜在滑动面,从而导致崩坡积堆积体发生整体失稳破坏。

## 2.3 降雨灾变机制

根据崩坡积堆积体斜坡降雨渗流场变化规律以及前期变形破坏特征,降雨作用下堆积体渗流场反映较强烈,浅表层松散的土体结构为雨水下渗提供良好通道,因而在降雨初期坡体浅表层就形成不连续暂态饱和区。当降雨强度偏小时,其对堆积体

的影响深度主要集中于浅表层,饱和甚至过饱和的松散块碎石土在自重作用下向坡脚运移,甚至表现出坡面泥石流特征,这也是前期发生多次局部破坏的主要原因,局部失稳的松散块碎石土掩埋挡土墙。

当遭遇极端强降雨时,降雨影响深度将进一步增大,直至基覆界面。从数值分析结果来看,强降雨将导致堆积体斜坡由坡表向深部逐渐达到饱和,饱和区范围几乎占据整个堆积体,即强降雨条件下整个崩坡积堆积体能够达到整体饱和状态,而在此情况下,孔隙水对粗颗粒骨架的润滑作用将减弱土体骨架强度,表现为摩擦强度衰减,而孔隙水对土体骨架间细颗粒的软化将使黏聚力减弱,表现为黏聚强度衰减,最终呈现出堆积体块碎石土力学强度随降雨持续影响而发生整体衰减。与此同时,下伏基岩作为相对隔水层,导致雨水下渗后在基覆界面汇集,孔隙水压力的增大减小上覆堆积体自重,对堆积体整体稳定性构成一定影响。在天然状态下,块碎石土力学强度能够满足斜坡基本稳定,而在饱水后土体力学强度的衰减必然导致坡体稳定性下降,当其不足以维持斜坡稳定性时将发生整体滑动。

## 3 崩坡积堆积体成灾演化模式

根据该崩坡积堆积体斜坡前期局部失稳破坏特征,同时考虑强降雨作用下坡体渗流场发展规律,当后期经历相同降雨条件时,该堆积体斜坡具有较大失稳概率,而综合堆积体物理力学性质与降雨影响,崩坡积堆积体斜坡整体失稳过程可分为4个阶段,即①降雨全面入渗;②坡表局部饱和;③饱和区扩展,局部失稳;④整体失稳破坏。其失稳演化模式如图5所示。

(1)降雨全面入渗。降雨初期,整个堆积体处于非饱和状态,加之土体结构松散,渗吸能力强,降雨过程中雨水几乎全部下渗,并以垂向渗流运动为主。这一阶段土体经历了非饱和状态下的低含水率向高含水率状态发展,降雨影响主要集中于堆积体表层,其深部土体仍处于初始状态。

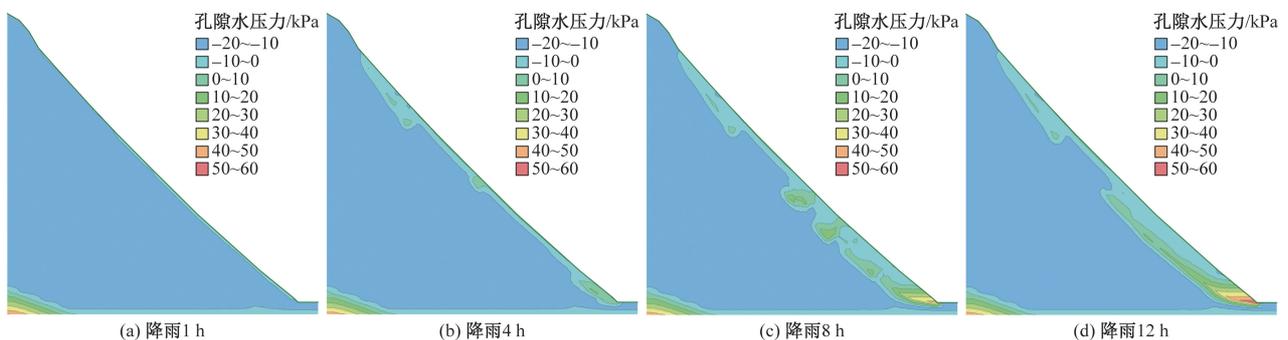


图4 不同降雨时步斜坡渗流场特征

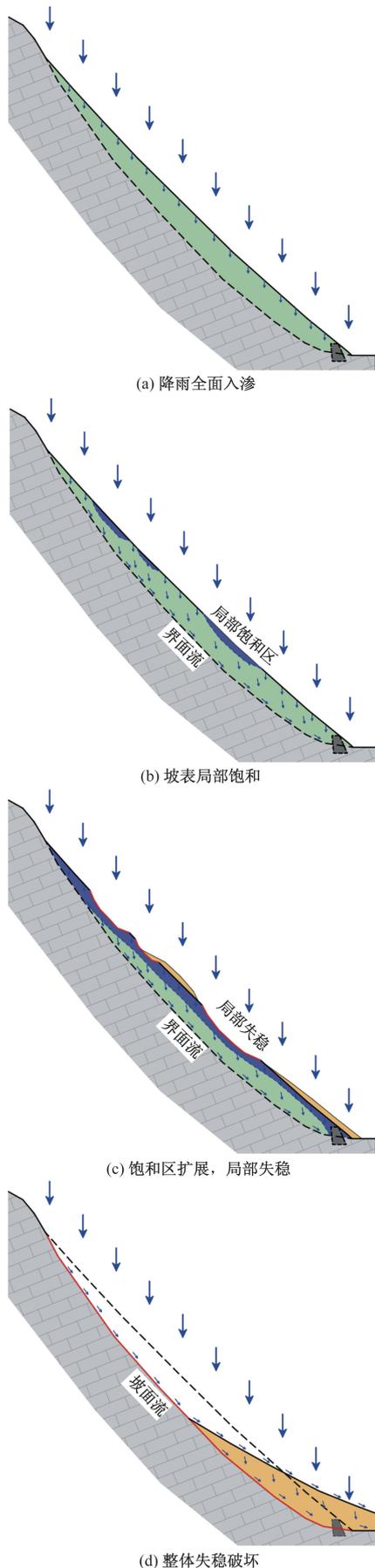


图5 崩坡积堆积体斜坡失稳演化模式

(2)坡表局部饱和。随着降雨过程持续,坡体浅表层土体含水率进一步提高,并且局部形成暂态饱和区,但表现为非连续状态。本阶段降雨影响深度增大,已至基覆界面附近,雨水下渗后浅层孔隙水除了垂向运动外,在自重作用下向坡脚运移,而深部孔隙水则以垂向运动为主,受基岩隔水作用影响,部分孔隙水沿基覆界面运动形成界面流。

(3)饱和区扩展,局部失稳。本阶段降雨对堆积体已构成全面影响,前一阶段形成的饱和区范围不断扩大并贯通,饱和区内孔隙水呈现出向坡脚的矢量运动,也导致坡脚段饱和区范围相对更大,饱和区深度已至基覆界面,而坡体中段厚度大,土体含水率也在降雨持续影响中提升,接近饱和状态。而前一阶段饱和区土体在持续饱水状态下力学强度衰减至最低值,并出现局部失稳破坏,失稳的松散土体堆积于坡表或向坡脚运动,早期堆积体多次局部失稳破坏也是这一阶段,但未进一步变形发展。

(4)整体失稳破坏。至降雨后期,降雨对堆积体已构成整体性影响,整个堆积体几乎达到饱和状态,此时土体力学强度发生大范围衰减,难以维持整体稳定性,因而沿基覆界面发生整体失稳破坏。失稳后基岩滑床出露,原基覆界面处的界面渗流转为坡面流,而高饱和状态滑坡体将呈现出溜滑运动特征,在缺少地形约束条件下将漫流发展。

#### 4 结论

以黔北山区一处崩坡积堆积体斜坡为例,在前期精细化调查测量基础上,对其降雨灾变机制与演化模式进行研究。该堆积体已经历多轮雨季降雨影响,坡体浅表层发生多次局部失稳破坏,并导致浆砌挡土墙开裂损伤、混凝土挡土墙被掩埋,路面结构严重损毁,工程防护措施基本失效,后期强降雨条件下发生整体性失稳的概率大幅度提升。

根据斜坡工程地质剖面建立数值模型,对斜坡强降雨渗流场特征与发展规律进行分析。随着降雨持续影响,崩坡积物由非饱和向饱和状态发展,降雨对堆积体影响深度逐渐增加,降雨作用下坡表暂态饱和区逐渐扩展、加深,直至整体饱和,并且基覆界面构成隔水界面,饱和孔隙水在重力作用下不断向坡脚渗流运移,坡脚与堆积体深部孔隙水压力增加。孔隙水对土体粗颗粒骨架的润滑、对细颗粒的软化促使土体摩擦强度、黏聚强度衰减,而高孔隙水压力具有浮托减重作用,减小土体有效应力,综合影响下使坡体抗滑力减小,进而发生整体失稳破坏。而通过对崩坡积堆积体降雨渗流场特征与

灾变机制分析,其整体失稳过程可分为 4 个阶段,即①降雨全面入渗;②坡表局部饱和;③饱和区扩展,局部失稳;④整体失稳破坏。早期多次局部失稳破坏仅发展至阶段③,而后若出现类似强降雨条件甚至极端降雨,该崩坡积堆积体存在发生整体性失稳破坏的可能。

### 参考文献

- [1] 陈忠发,张辉. 黔北岩溶地区地质灾害发育特征及防治措施分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(10): 115-117.
- [2] 张大权,江兴元,邹姐姐,等. 降雨渗流对堆积型滑坡稳定性影响的数值模拟:以贵州大榕滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 338-344.
- [3] 潘家军,孙向军,左永振,等. 骨架孔隙比对粗粒土强度变形特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2186-2194.
- [4] 冯文凯,白慧林,何山玉,等. 四川理县欢喜村冰水堆积体降雨条件下变形机理研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 48-54.
- [5] 孙向军,潘家军,卢一为,等. 级配和密度组合对粗粒土强度特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(8): 133-138.
- [6] 刘凯,李渝生,易树健,等. 美姑河火洛村溃散型滑坡的成因动力学机理研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 217-224.
- [7] 高连通,晏鄂川,刘珂. 考虑降雨条件的堆积体滑坡多场特征研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 263-271.
- [8] 王斌,李洁涛,王佳俊,等. 强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 234-248.
- [9] 杨校辉,陈昆全,刁显锋,等. 地震与降雨耦合作用下堆积体滑坡模型试验及稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 58-62.
- [10] 郑光,许强,林峰,等. 2012年6·29贵州岑巩龙家坡滑坡灾害的基本特征与成因机理:一个由侧向剪切扰动诱发大型滑坡的典型案例分析[J]. 吉林大学学报, 2014, 44(3): 932-945.
- [11] 付敬,艾凯,施华堂,等. 裂隙及强降雨入渗对堆积体滑坡渗流场及稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(9): 112-117.
- [12] 孟生勇,江兴元,杨义,等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 104-112.
- [13] 甘建军,唐春,陈炳贵,等. 降雨入渗对含软弱夹层堆积体滑坡的模型试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 109-117.

## Failure Mechanism and Evolution Model of Rainfall Disaster in Colluvial Deposits in Northern Guizhou Mountainous Area

YANG Hua

(Guizhou Zhengye Engineering & Technology Investment Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Various types of sedimentary deposits are widely distributed in the mountainous areas of northern Guizhou, among which landslide deposits are the most common. A landslide deposit on the inner side of a highway in the region was analyzed. The mechanism and evolution mode of rainfall disasters in the deposit was studied through refined investigation and measurement, numerical simulation and other techniques. The landslide accumulation body was affected by multiple rounds of rainfall in the early stage, and the shallow surface of the slope has experienced multiple local instability and damage, resulting in cracks in the mortar retaining wall, burial of the concrete retaining wall, severe damage to the road surface structure, and difficulty in passage. Under later rainfall conditions, there is still a possibility of local instability or even overall instability. The numerical simulation results of rainfall show that the accumulation body is in an unsaturated state in its natural state. Continuous heavy rainfall will promote the development of the soil from unsaturated to saturated state. During the rainfall process, the transient saturation zone gradually expands and deepens from the slope surface, and by the end of the rainfall, the entire slope soil body has almost reached saturation state. Affected by the water barrier effect of bedrock, infiltrated rainwater collects at the interface between the foundation and the cover, and pore water continuously migrates towards the foot of the slope under the action of gravity, resulting in high pore water pressure at the interface and foot of the slope. On the one hand, the lubrication and softening of gravel soil by pore water promote the structural weakening and mechanical strength attenuation of the soil. On the other hand, high pore water pressure plays a role in reducing the effective stress of the soil, resulting in a decrease in the anti sliding force of the slope, which in turn leads to overall sliding along the foundation cover interface. However, the process of accumulation body developing into landslide under heavy rainfall can be divided into four stages, namely: ① full rainfall infiltration, ② partial saturation of slope surface, ③ expansion of saturated area, local instability, ④ overall instability and damage. In the early stage, multiple local instability and damage only developed to stage ③. In the later stage, if such heavy rainfall or even extreme rainstorm occurs, the colluvial accumulation body is very likely to have overall damage, which will cause complete road blocking and threaten pedestrians and vehicles in the process.

**Keywords:** colluvial deposits; heavy rainfall; seepage field; failure mechanism; evolution mode