

地震及降雨交互作用下典型路堑滑坡特征 及其诱发机制

——以云南漾濞 6.4 级地震为例

冯宇¹, 向亚文¹, 张志权¹, 海同¹, 袁刚烈²

(1. 中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司, 重庆 401329; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 以在建大理-漾濞-云耳高速公路工程为背景, 针对 2021 年 6.4 级漾濞地震下典型路堑滑坡, 采用电测量及无人机航测等方法对路堑滑坡灾害特征开展现场调查及测试; 结合室内模拟试验建立的土体电参数与损伤因子的相关性, 通过关系映射评估路堑边坡损伤演化规律, 探究地震典型路堑滑坡特征及其诱发机制。结果表明: 开挖扰动会增加地震滑坡风险, 地震作用下路堑边坡开挖面的顶部形成贯通主裂缝, 最大宽度及深度可达 3~4 m; 路堑滑坡致灾程度受到地震烈度及支护措施的影响, 随地震烈度的降低, 裂缝宽度及深度呈减小趋势, 支护措施的增加可显著降低边坡的滑移风险; 震损边坡在降雨渗流作用下, 沿裂缝深度方向土体损伤度进一步升高, 后缘面区域损伤因子大于 0.36, 裂缝宽度从 2.9 m 快速增至 8.0 m。综上, 支护不足、地震烈度与边坡受损程度呈正相关, 未支护边坡受到地震的影响较大; 地震与降雨作用之间存在互促效应, 降雨会极大影响震损边坡的稳定性。

关键词: 漾濞 6.4 级地震; 震后降雨; 路堑滑坡; 损伤演化; 诱发机制; 电测量

中图分类号: TU 411.01 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23135



Characteristics and Inducing Mechanism of Typical Cutting Landslides under the Interaction of Earthquake and Rainfall

——Taking Yunnan Yangbi Ms 6.4 Earthquake as an Example

FENG Yu¹, XIANG Yawen¹, ZHANG Zhiquan¹, HAI Tong¹, YUAN Ganglie²

(1. Anneng Chongqing Construction Development Co., Ltd, Chongqing 401329, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking slopes along Dali-Yangbi-Yuner highway under construction as the research target, in response to the typical cut slope landslides caused by the 6.4 magnitude Yangbi earthquake in 2021, some methods such as electrical measurements and drones were used to conduct field investigation and test the characteristics of the cut slope landslide disasters. Based on the correlation between soil electrical parameters and damage factors established by indoor simulation experiments, the damage evolution law of cutting slopes was evaluated through relationship mapping, and the characteristics and inducing mechanism of typical cutting landslides caused by earthquakes were

收稿日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42330704)

作者简介: 冯宇(1982—), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要研究方向为地质灾害应急。

通信作者: 袁刚烈(1995—), 男, 浙江宁波人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为地质灾害应急。

引文格式: 冯宇, 向亚文, 张志权, 等. 地震及降雨交互作用下典型路堑滑坡特征及其诱发机制: 以云南漾濞 6.4 级地震为例[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(2):195-203.

explored. The results show that slope excavation increases the risk of earthquake-induced landslides. Under the action of earthquakes, a through-going main crack forms at the top of the excavated surface of the road cut slope, with a maximum width and depth of 3–4 m. The degree of disaster caused by road cut landslides is influenced by seismic intensity and slope support. With the decrease of seismic intensity, the width and depth of cracks show a decrease trend. The increase of support measures can significantly reduce the risk of slope sliding. Under the influence of rainfall seepage, the soil damage degree of the earthquake damaged slope further increases along the depth direction of the crack. The damage factor in the trailing edge area is greater than 0.36, and the crack width rapidly increases from 2.9 m to 8.0 m. In summary, there is a positive correlation between insufficient support, seismic intensity, and the degree of slope damage, the unsupported slopes are significantly affected by earthquakes. There is a mutual promotion effect between earthquake and rainfall, and rainfall can greatly affect the stability of earthquake damaged slopes.

Keywords: Yangbi Ms 6.4 earthquake; post earthquake rainfall; cutting landslide; damage evolution; inducing mechanism; electrical resistivity measurement

截至2021年底,云南省公路通车里程由1980年的4.41万公里(4.41×10^4 km)发展至30.09万公里(3.009×10^5 km)^[1]。云南属于山地高原地区,公路建设多采用开挖方式,形成了大量的路堑边坡,开挖扰动边坡岩土体,在地震及降雨等作用下边坡极易发生开裂及滑坡^[2-3],严重时甚至造成人员伤亡及重大经济损失^[4-6]。因此,明确地震及降雨作用下典型路堑滑坡特征及其诱发机制对保障公路的交通安全具有重要意义。

滑坡影响因素及运动机理具有多变性和复杂性。开挖卸荷改变了边坡坡度及内部应力场^[7],叠加地震及降雨持续影响导致路堑滑坡多发^[8-10]。针对地震、降雨及开挖作用的路堑边坡失稳特征及灾害诱发机制,学者们通过振动台试验及数值模拟等方法展开了大量研究,如信春雷等^[11]研究近断层地震对阶梯式顺层岩质路堑边坡震裂损伤的作用机制,马坤等^[12]分析降雨作用下路堑边坡的变形特征及机理,徐兴华等^[13]模拟研究降雨作用及坡脚开挖激发路堑滑坡的灾变效应。现有研究多针对开挖、地震、降雨单一荷载作用下路堑边坡失稳机理进行研究,对于开挖、地震、降雨联合作用产生的互促效应研究仍存在不足,导致地震及降雨交互作用下路堑滑坡致灾机制解释不清。

在开挖、地震、降雨联合作用产生的互促效应作用下,边坡土体的损伤逐渐产生、传播和聚结,达到一定程度后边坡发生失稳破坏^[14-15],明晰荷载互促效应依赖于边坡损伤的实时测试及评估。现阶段,对于边坡损伤的测试及评估方法主要依赖于边坡位移监测^[16-17],单一的位移数据难以反映边坡整体损

伤状态,边坡内损伤实时测试及评估技术难点需要突破,关于量化边坡内损伤演化过程的研究仍处于起步阶段。电测法具有深度数据信息丰富、操作简单及快速测试等优势,被广泛用于土木工程等领域^[18]。土体的电参数与微结构特征相关,许多学者通过电测量方法评估岩土体的损伤演化过程。李笑唯等^[19]建立边坡软弱层损伤与电阻率变化率的关系,探讨将电测量方法用于边坡软弱层损伤累积研究中的可行性;杨榆璋等^[20]结合电测量方法测试及评估降雨作用下的全风化花岗岩路堑边坡侵蚀状态。鉴于此,以在建大理-漾濞-云耳高速公路为背景,针对2021年6.4级漾濞地震下路堑滑坡,采用无人机航拍及电测量等方法开展现场监测,基于土体电参数与损伤因子的相关性研究路堑边坡损伤演化规律,揭示地震及降雨交互作用下路堑滑坡的诱发机制。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

2021年5月21日,云南省大理州漾濞县发生6.4级地震,震源深度8 km,震中位于 $25^{\circ}40'N$, $99^{\circ}52'E$ 。此次地震最高烈度为Ⅷ度(8度),Ⅵ度(6度)区(含)以上面积约6 600 km²,等震线长轴呈北西走向,长轴106 km,短轴76 km,共涉及大理州6县市^[21]。文中研究区域为在建大漾云高速公路沿线,研究对象为该公路沿线的路堑滑坡。通过地质勘察及钻孔取芯得到大漾云在建高速公路线路穿越区域工程地质图,如图1。由图1可看出:该区域地质时代跨度不大,岩石种类较为单一,地层主要由上覆土层及下部基岩组成。边坡上覆土层主要为软塑、

可塑、硬塑粉质黏土、黏土及碎块石土、漂石、卵石、砂岩、砾岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩,局部为泥灰岩、黏土岩等岩石。

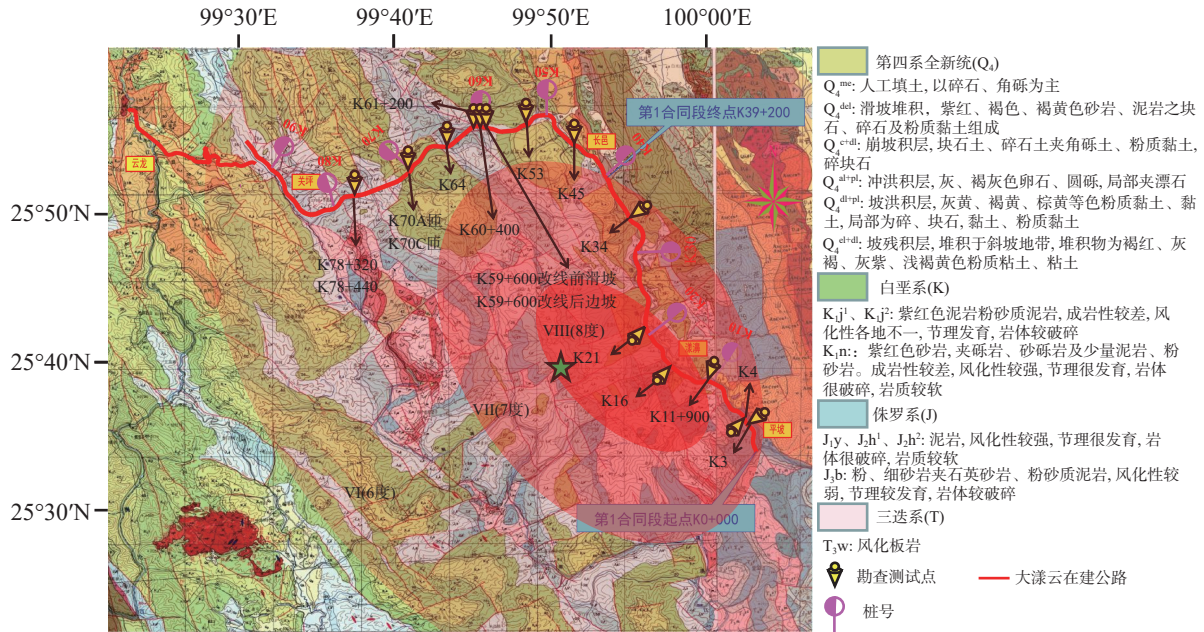


图1 公路沿线工程地质及调查测试点

Fig. 1 Engineering geology and survey testing points along the highway

1.2 研究方法

为探讨开挖、降雨及地震下路堑滑坡复杂的诱发机理,以路堑边坡损伤累积效应为切入点,对云南漾濞 6.4 级地震典型路堑滑坡灾害展开现场调查,

获取滑坡致灾因子、失稳规律及运移模式;开展无人机航拍及电测量等现场测试,获取边坡表面裂隙演化特征及损伤时空演化特征,分析地震及降雨交互作用下路堑滑坡诱发机制。研究技术路线如图 2。

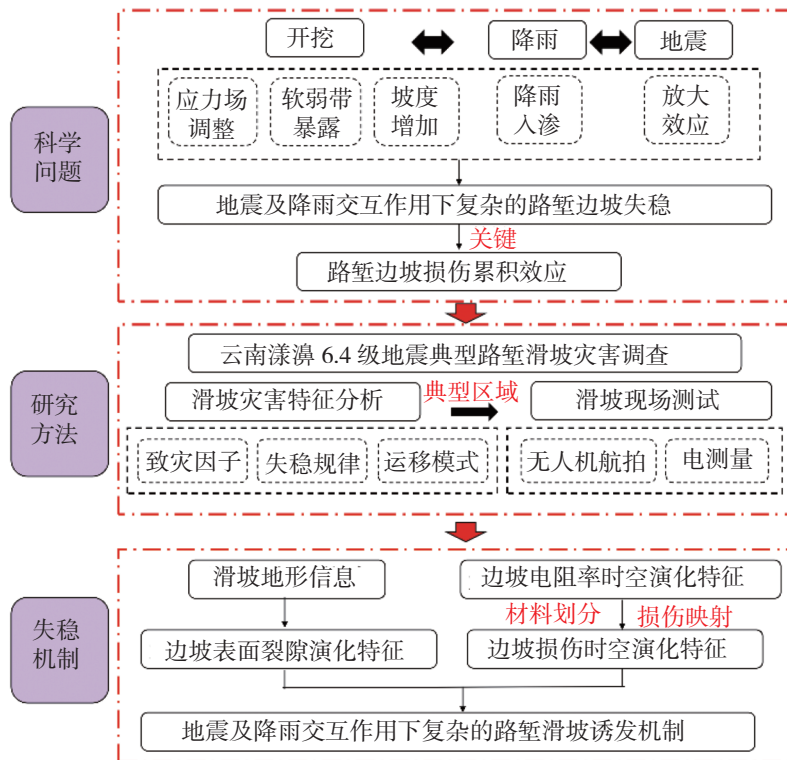


图2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

1.2.1 路堑滑坡灾害特征分析方法

对在建大漾云高速公路沿线在漾濞地震中的典型地质灾害进行现场调查,经初步分析,地质灾害主要触发因素有地震、降雨、工程活动作用,以降雨、地震为主要致灾因子。考虑地震烈度、开挖状态及地质条件的影响,在研究区域内利用无人机航测调查手段,获取滑坡的滑动方向、堆积体方量及裂隙分布及宽度、深度等特征,分析不同路堑滑坡的破坏特征及失稳规律,并确定典型滑坡勘测点,如图1。

1.2.2 路堑滑坡电测量测试方法

基于无人机调查结果,在VI度区域、VII度区域及VIII度区域选取若干勘测点采用无人机航测及地球物理勘探方法中的电测量方法获取滑坡的上覆土层厚度滑动面分布等地下信息,分析不同路堑滑坡的运移模式。假设土层是各向同性和均匀的,电测量原理如图3。

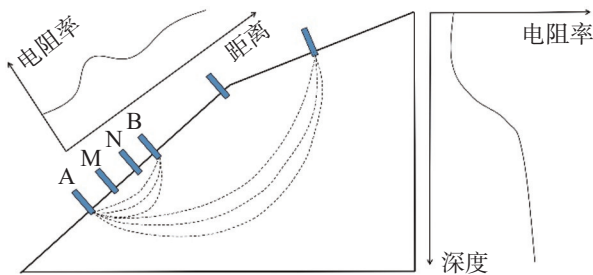


图3 电测量测试原理

Fig. 3 Testing principle of electrical measurement

采用传统的温纳装置进行测试,电源通过一对导电电极A和B在大地上建立稳定的电流场,输入强度为 I 的直流电。通过电极间距为 L 的另外2个导电和非极化测量电极M和N测量电极间电位差

ΔU , 测量点(电极M和N之间的中点)的视电阻率 ρ_s 计算式如下:

$$\rho_s = K \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

式中, K 为电极排列系数,测试装置一定时 K 为常数。布设足量的电极,通过在大地上产生电场测试地下电参数分布,由传输电缆传输电信号并记录数据,其中探测深度随供电电极间距的增大而增大,最终形成1个倒梯形的视电阻率剖面,采用最小二乘法进行反演计算获取边坡电阻率 ρ 。土体和岩体的导电性相差较大,可通过电阻率的分布获取边坡的地质构造。同时在地震及降雨作用下,边坡土体受损产生裂缝,导致土体导电性降低,因此可通过电阻率的变化及差异来识别边坡损伤的时间演化及空间分布特征。

2 路堑滑坡调查及测试结果与分析

2.1 路堑滑坡调查结果

2.1.1 不同烈度区内地震滑坡的破坏特征

不同烈度区内地震滑坡的破坏特征如表1。由表1可看出:VIII度区域未开挖斜坡存在局部失稳现象,后缘及坡面存在较多裂缝,最大滑坡体积达到50 000 m³;VII度区域半开挖半支护状态路堑边坡坡体整体向下蠕变,后缘裂缝贯通,坡面存在较多细小裂缝,混凝土格栅倒塌;VI度区域半开挖半加固状态路堑边坡局部塌陷,后缘及坡面存在裂缝。综上表明开挖扰动会增加路堑边坡的地震滑坡风险,且致灾程度与地震烈度呈正相关;支护措施的增加可显著降低边坡的滑移风险。

表1 不同烈度区内地震滑坡的破坏特征

Tab. 1 Failure characteristics of earthquake landslides in different intensity regions

地震烈度	类型	最大体积/m ³	特征
VIII(8度)	剪切滑动	50 000	未开挖状态,局部失稳,后缘及坡面存在较多裂缝
VII(7度)	剪切滑动	240 000	半开挖半加固状态,坡体整体向下蠕变,后缘裂缝贯通 坡面存在较多细小裂缝,混凝土格栅倒塌
VI(6度)	剪切滑动	39 000	局部塌陷,后缘及坡面存在裂缝

2.1.2 地震和降雨后典型路堑边坡的表面形态

以VII度区域为例分析边坡表面裂隙时空演化特征,该区域边坡处于半开挖半支护状态,边坡表层覆盖有碎石土,下部基岩为板岩,地震和降雨后上部碎石土沿板岩滑移,如图4。由图4可看出:地震后路

堑边坡存在多处开裂,其中形成宽度3~4 m的1号贯通主裂缝,在主裂缝后方50~70 m处存在2号和3号2条裂缝,坡面处锚索框格梁工程折断。地震后该地区进入雨季,在持续降雨作用下,1号贯通主裂缝逐渐拓展,宽度约8 m,同时坡体整体呈向下滑移的趋势。



图4 VII度区路堑滑坡特征

Fig. 4 Characteristics of cutting landslide in grade VII area

2.2 地震和降雨后典型路堑边坡电阻率演化规律

地震及降雨后 VII 区典型路堑边坡电阻率剖面如图 5。由图 5 可看出:地震后边坡电阻率整体呈层状分布,其中在深度(边坡表面与目标点的垂直高程差)0~<5 m 区域内出现局部高阻,电阻率分布区间为 1 000~30 000 $\Omega \cdot m$;深度在 5~<30 m 内,电阻率分布较均匀,区间为 0~1 000 $\Omega \cdot m$;深度大于 30 m 时,电阻率大于 1 000 $\Omega \cdot m$ 。电阻率除具有层状分布特征外,同时在局部区域存在沿深度方向的贯通特征,分布区间为 150~500 $\Omega \cdot m$,该区域与现场调研裂缝所在位置较吻合。同时,随着降雨的进行,在深度 0~<5 m 区域内出现局部低阻区域,而在沿深度方向贯通特征的区域电阻率呈增大的趋势,分布区间为 150~1 600 $\Omega \cdot m$ 。

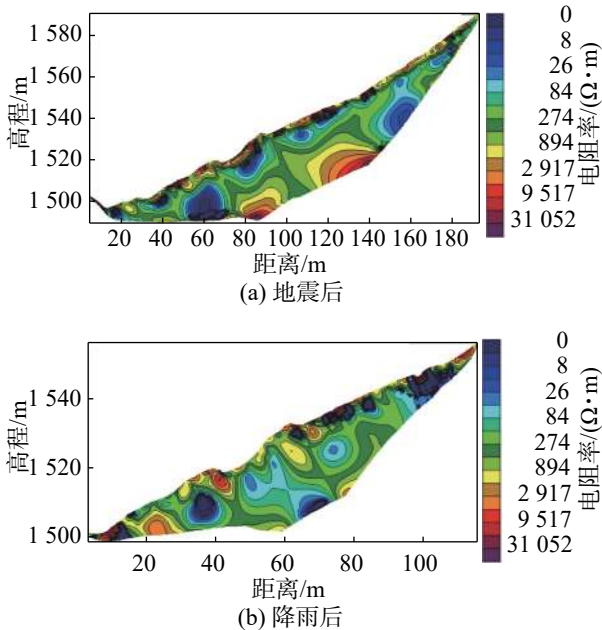


图5 地震及降雨后边坡电阻率分布

Fig. 5 Distribution of slope resistivity after earthquake and rainfall

将现场测量得到的电阻率进行对数转换,并引入高斯分布模型,结果如图 6。

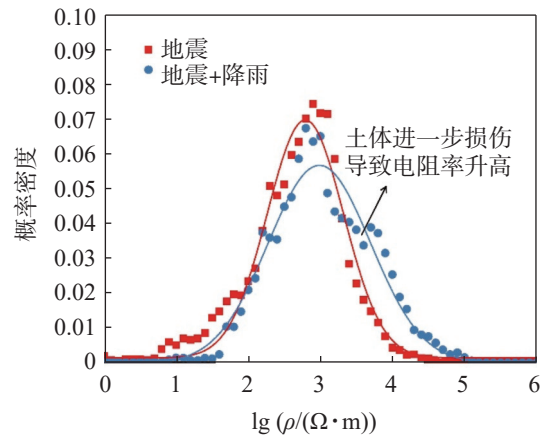


图6 电阻率高斯分布模型

Fig. 6 Gaussian distribution model of resistivity

由图 6 可看出:电阻率呈近似正态分布,数据可按高斯分布规律进行处理。对于均质材料,电阻率呈单峰特征,而随材料数量的增加,电阻率单峰峰度减小,概率密度峰值呈减小趋势^[22]。地震后对数电阻率单峰数学期望为 2.79,概率密度峰值为 0.070;降雨后土体损伤程度进一步增加,对数电阻率单峰数学期望为 2.99,概率密度峰值为 0.056。

为实现边坡材料的分割,以 2 m 作为区区间距,分区间分析沿边坡深度方向的电阻率,结果如图 7, 8。由图 7, 8 可看出:在深度 0~<10 m 区域内,电阻率概率密度峰值呈先减后增的趋势,对数电阻率数学期望则呈逐渐减小的趋势;在深度 10~<20 m 区域内,随深度的增加,概率密度峰值呈平稳波动的趋势,对数电阻率数学期望则呈逐渐增大的趋势;在深度 20~<30 m 区域内,概率密度峰值呈增大的趋势,对数电阻率数学期望也继续呈逐渐增大的趋势。以概

率密度峰值和谷值对应的电阻率 ($457, 933 \Omega \cdot m$) 为材料阈值, 将边坡材料划分为碎石土、裂隙土及板岩 3 种。其中电阻率区间为 $0 \sim 457 \Omega \cdot m$ 识别为碎石土, 电阻率区间为 $457 \sim 933 \Omega \cdot m$ 识别为裂隙土, 电阻率大于 $933 \Omega \cdot m$ 识别为板岩。

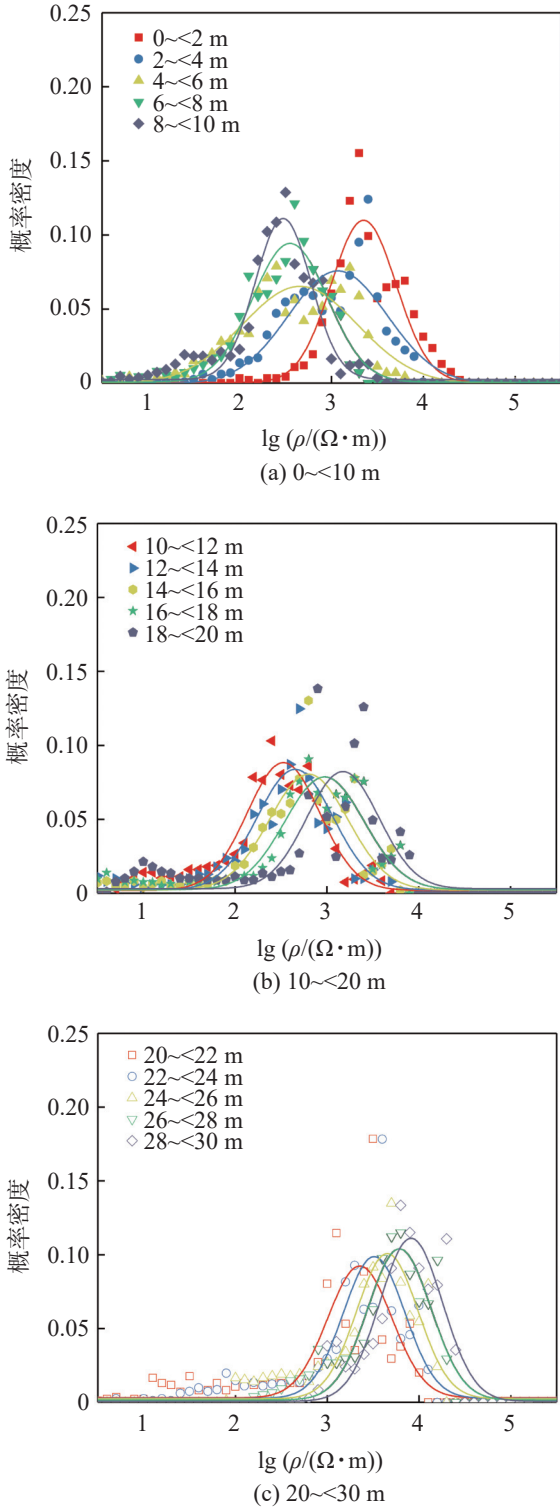


图7 不同边坡深度电阻率空间概率密度统计

Fig. 7 Spatial probability density statistics of resistivity in different slope depths

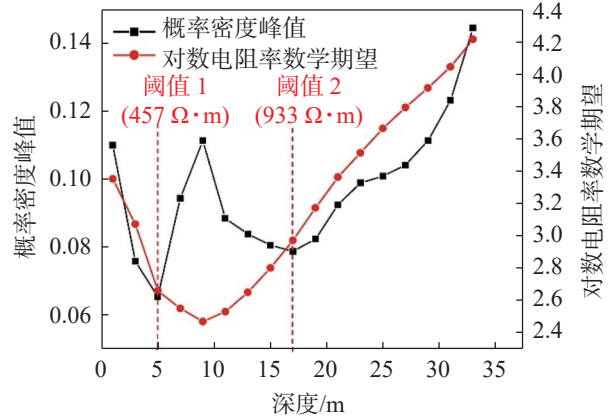


图8 材料阈值确定

Fig. 8 Determination of material threshold

结合电阻率数据剖面, 对地震及降雨后边坡的地质构造及损伤状态进行评估, 结果如图 9。由图 9 可看出: 地震后, 在表层以下深度 $20 \sim 30 m$ 范围内, 为单一的碎石土, 表层存在大量裂隙; 在 $30 m$ 以下为板岩, 碎石土与板岩之间存在 $2 \sim 4 m$ 的裂隙土层。裂隙土除层状分布特征外, 在测线方向 $70 m$ 及 $100 m$ 区域范围内存在沿深度方向贯通的裂隙土。随着降雨的进行, 表层裂隙的拓展更进一步, 沿深度方向贯通的裂隙土区域范围增大。

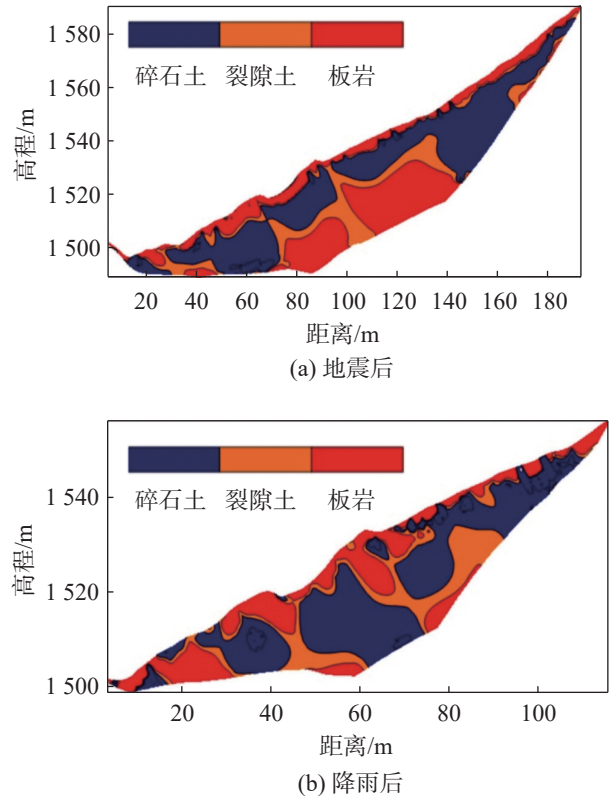


图9 地震及降雨后边坡材料分割

Fig. 9 Slope material segmentation after earthquake and rainfall

3 考虑地震及降雨交互作用的路堑滑坡诱发机制

3.1 边坡损伤演化规律

土体电阻率的变化与土体损伤参数之间存在关联性^[23]。为评估边坡的损伤演化规律,将降雨、地震等荷载作用于土体,模拟土体在地震及降雨作用下的受损过程。试验过程中开展电测量获取土体电参数,同时在荷载作用前后,通过静三轴试验测试土体强度。定义土体强度衰变为损伤因子,建立土体电参数与损伤因子的相关性:

$$\Delta\rho_0 = \frac{\rho_n - \rho_0}{\rho_0} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_D}{\sigma_0} \quad (3)$$

$$D = a \ln(\Delta\rho_0 + b) \quad (4)$$

式中: $\Delta\rho_0$ 为电阻率变化率; ρ_0 为初始电阻率; n 为工况数; ρ_n 为第 n 个工况下的电阻率; D 为损伤因子; σ_D 为荷载作用后损伤土体峰值应力; σ_0 为初始状态土体峰值应力; a, b 为系数,本研究中 $a=0.31, b=1.00$ 。通过同时检测边坡体内电阻变化率 $\Delta\rho_0$ 及边坡表面裂缝宽度演化来综合评估边坡的损伤演化规律,结果如图10。

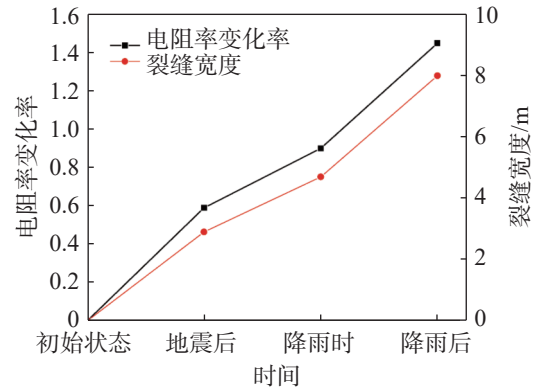


图10 电阻率及裂缝演化规律

Fig. 10 Evolution law of resistivity and fracture

由图10可看出:电阻率的变化率与裂缝宽度的增长趋势存在一致性,地震后,边坡的电阻率变化率为0.59,而裂隙的宽度为2.9 m;在地震后的降雨时间段内,边坡的电阻率变化率为0.90,而裂隙的宽度为4.7 m,边坡的损伤程度开始持续增长;降雨后,边坡的电阻率变化率为1.45,而裂隙的宽度为8.0 m,边坡的损伤程度进入快速增长阶段,坡体开始滑移。

3.2 滑坡诱发机制

结合地震及降雨后边坡损伤状态评估结果,震后受损边坡的灾变机制如图11。

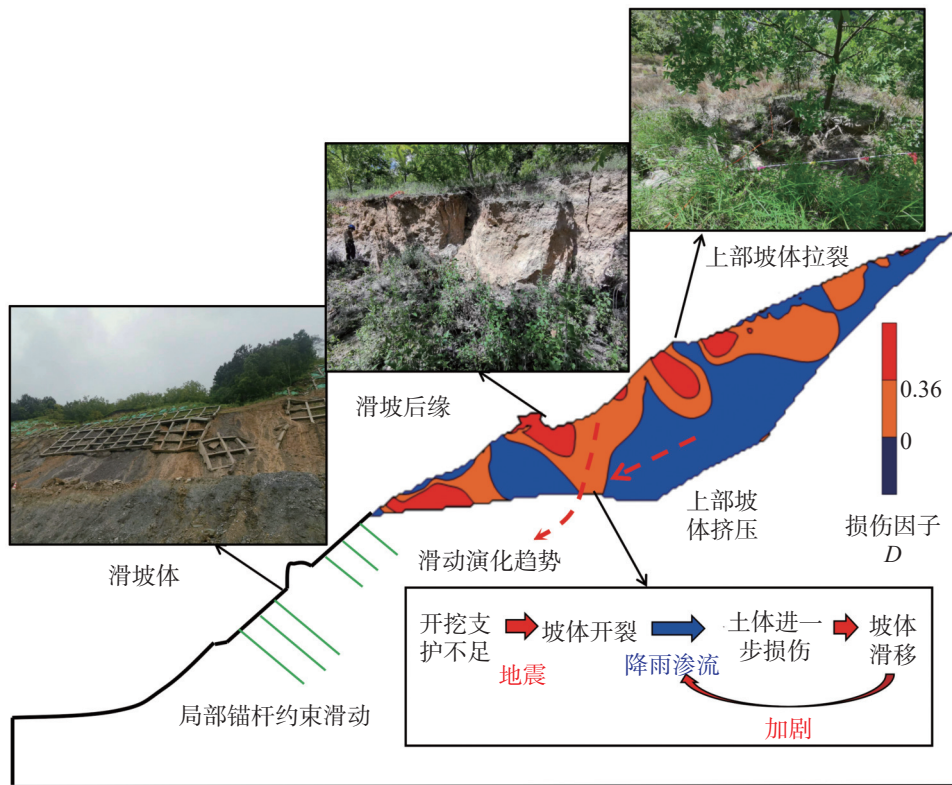


图11 滑坡诱发机制

Fig. 11 Trigger mechanism of the landslide

由图 11 可看出:由于开挖路堑边坡未及时采取支护措施时受到地震的影响,边坡处于受损状态,坡体多处开裂;在降雨作用下,裂缝受到渗流作用,土体进一步受损,坡体沿着滑动面逐步滑移挤压下部路堑边坡坡体;同时下部路堑边坡坡体受到部分锚杆的拉力及摩阻力,随着降雨作用下土体的进一步损伤,坡体多个后缘面区域损伤因子大于 0.36,下滑力逐渐大于拉力及摩阻力,坡体呈缓慢下滑的趋势,裂缝进一步拓展,加剧了降雨损伤作用;另一方面,下部坡体的滑移导致了上部坡体的拉裂,坡体产生多处裂缝,在降雨渗流作用下,上部坡体也开始滑移同时挤压下部坡体,加剧了下部坡体的滑移。

4 结论

以 2021 年 6.4 级漾濞地震下典型路堑滑坡为例,采用高密度电测量法及无人机航测方法,对路堑滑坡灾害特征开展现场调查及测试,探究地震典型路堑滑坡特征及其诱发机制,所得主要结论如下:

1) 支护不足、地震烈度与边坡受损程度正相关,未支护边坡受到地震的影响较大。开挖扰动会增加地震滑坡风险,致灾程度与地震烈度正相关,增加支护措施可显著降低边坡的滑移风险。

2) 地震与降雨作用之间存在互促效应,降雨会极大影响震损边坡的稳定性。路堑边坡在地震作用下受损,其开挖面的顶部形成贯通主裂缝,最大宽度及深度可达 3~4 m,但在局部锚杆拉力作用下滑移程度较小。在进一步的降雨渗流作用下,沿裂缝深度方向土体损伤度进一步升高,坡体局部损伤因子大于 0.36;坡体下滑力逐渐大于局部锚杆拉力及摩阻力,坡体呈缓慢下滑的趋势,裂缝宽度从 2.9 m 快速增至 8.0 m。下部坡体的滑移导致上部坡体的拉裂,坡体产生多处裂缝并滑移挤压下部坡体,加剧下部坡体的滑移。

参考文献:

- [1] 云南省统计局. 云南统计年鉴2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023:244.
- [2] 王飞, 吴红刚, 郭春香. 碎石土路堑高边坡地震动力响应过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 18-24.
- [3] PORTA G F, BEBBINGTON M, XIAO X, et al. A statistical model for earthquake and/or rainfall triggered landslides[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8:605003.
- [4] TANG Y, CHE A L, CAO Y, et al. Risk assessment of seismic landslides based on analysis of historical earthquake disaster characteristics[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(5):2271-2284.
- [5] ZHOU H X, CHE A L, LI G. Characteristics and failure mechanism of landslides along highways triggered by 2021 Ms6.4 Yangbi earthquake[J]. *Landslides*, 2022, 19(1): 165-176.
- [6] QI S W, XU Q A, LAN H X, et al. Resonance effect existence or not for landslides triggered by 2008 Wenchuan earthquake: a reply to the comment by Drs Xu Chong and Xu Xiwei[J]. *Engineering Geology*, 2012, 151:128-130.
- [7] 雷津, 崔圣华, 裴向军, 等. 基于射线理论的垂直P波入射过程滑坡滑带应力放大特征及成因分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6):149-161.
- [8] 陈宁生, 崔鹏, 王晓颖, 等. 地震作用下泥石流源区砾石土体强度的衰减实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16):2743-2747.
- [9] REN G M, XIA M, LV S M. Stability analysis of a landslide influenced by rainfall[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2023, 60(1):55-62.
- [10] 王浩, 王晓东, 泮俊. 超高速路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4):899-909.
- [11] 信春雷, 李文惠, 冯文凯, 等. 近断层地震动对阶梯式顺层岩质路堑边坡震裂损伤的作用机制[J/OL]. 振动工程学报, (2023-07-12) [2024-01-16]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1349.tb.20230711.1714.002.html>.
- [12] 马坤, 张永谋, 吴红刚, 等. 基于多传感器数据融合分析的路堑滑坡模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4):653-663.
- [13] 徐兴华, 尚岳全, 唐小明, 等. 降雨作用及坡脚开挖激发路堑滑坡的灾变效应[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4):6-15.
- [14] ZOU Y, QI S W, GUO S F. Factors controlling the spatial distribution of coseismic landslides triggered by the Mw 6.1 Ludian earthquake in China[J]. *Engineering Geology*, 2022, 296:106477.
- [15] 许波, 李静, 黄琪嵩, 等. 蠕动型滑坡位移变形规律与失稳判据研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(4):449-454.
- [16] LI H B, QI S C, YANG X G. Geological survey and unstable rock block movement monitoring of a post-

- earthquake high rock slope using terrestrial laser scanning[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(10):4523–4537.
- [17] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7):957–966.
- [18] NIE L C, MA Z, WANG C K, et al. Integrated ERT, seismic, and electrical resistivity imaging for geological prospecting on metro line R3 in Qingdao, China[J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2019, 24(4): 537–547.
- [19] 李笑唯,周晗旭,车爱兰. 电测量法在岩质边坡软弱层损伤累积研究中的应用[J/OL]. *工程地质学报*, (2022-03-18) [2024-01-16]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0776>.
- [20] 杨榆璋,但路昭,袁刚烈,等. 全风化花岗岩路堑边坡降雨侵蚀时空分布特征测试与评估[J/OL]. *安全与环境工程*, (2023-09-07) [2024-01-16]. <https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20221556>.
- [21] 曹彦波,李永强,李兆隆,等. 云南漾濞6.4级地震灾情快速评估[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(4):751–759.
- [22] ZHOU H X, CHE A L. Geomaterial segmentation method using multidimensional frequency analysis based on electrical resistivity tomography[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284:105925.
- [23] YUAN G L, CHE A L, TANG H. Evaluation of soil damage degree under freeze-thaw cycles through electrical measurements[J]. *Engineering Geology*, 2021, 293:106297.

责任编辑:闫芳芳