

某滑坡地质灾害成因及治理设计分析

梅朴莲

云南省有色地质局三一〇队, 云南 大理

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2026年1月1日; 发布日期: 2026年1月8日

摘要

滑坡是常见的自然灾害, 威胁人类生命财产安全。全球气候变化与人类工程活动加剧滑坡灾害频发, 如2024年1月22日5时51分, 云南省昭通市镇雄县塘房镇凉水村突发山体滑坡灾害, 造成44人遇难, 经济损失约1.45亿元。本文以云南某滑坡为例, 基于地质力学与工程地质学理论, 系统分析滑坡特征及成因机制, 总结关键诱发因素, 对滑坡稳定性进行定性与定量分析评价, 并设计针对性的治理工程措施, 为滑坡灾害防治提供科学依据。

关键词

滑坡, 自然灾害, 成因机制, 诱发因素, 治理工程建议

Analysis of the Causes and Treatment Design of a Landslide Geological Disaster

Pulian Mei

Yunnan Provincial Bureau of Nonferrous Geology, Team 310, Dali Yunnan

Received: December 9, 2025; accepted: January 1, 2026; published: January 8, 2026

Abstract

Landslide is a common natural disaster that threatens the safety of human life and property. Global climate change and human engineering activities aggravate the frequent occurrence of landslide disasters. For example, at 5:51 on January 22, 2024, a landslide disaster occurred in Liangshui Village, Tangfang Town, Zhenxiong County, Zhaotong City, Yunnan Province, resulting in 44 deaths and economic losses of about 145 million yuan. Taking a landslide in Yunnan as an example, based on the theory of geomechanics and engineering geology, this paper systematically analyzes the characteristics and genetic mechanism of landslide, summarizes the key inducing factors, carries out qualitative and quantitative analysis and evaluation of landslide stability, and designs targeted

treatment engineering measures to provide scientific basis for landslide disaster prevention and control.

Keywords

Landslides, Natural Disasters, Genetic Mechanisms, Predisposing Factors, Governance Project Recommendations

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

近年来降雨诱发滑坡研究主要聚焦雨水入渗对坡体孔隙水压力、基质吸力及抗剪强度的影响，通过室内试验、现场监测与数值模拟等手段，建立了降雨强度、持时与滑坡启动时间的关系模型，并发展了基于无限边坡理论、有限元强度折减法等的稳定性评价方法。然而，针对复杂地质构造背景下红层滑坡的降雨响应机制，尤其是断裂构造对雨水入渗路径的控制作用及对坡体应力状态的影响，研究尚不够系统。同时，切坡修路、采矿、水库蓄水等人类工程活动对滑坡孕灾环境的扰动作用也日益受到关注，相关研究表明，不合理的工程开挖会直接改变坡体原始应力平衡，降低坡体稳定性，而人类活动与自然因素的耦合作用往往加剧滑坡的发生概率与破坏程度。尽管目前红层滑坡、降雨诱发机制及人类活动影响等方面的研究已取得显著进展，但对于地处构造活跃带、地质条件极为复杂区域的红层滑坡，其多因素耦合作用下的致灾机理与早期预警仍存在诸多科学问题亟待解决。本研究基于此背景，聚焦构造复杂区红层滑坡的成因机制与稳定性评价，旨在为该类滑坡的防灾减灾提供理论依据与技术支撑[1]。

研究区位于扬子准地台西部边缘丽江褶皱带与唐古拉-昌都-兰坪-思茅褶皱系的兰坪-思茅褶皱带内，北邻松潘-甘孜褶皱系，地质构造复杂。区域构造主要受维西-乔后断裂、红河-洱海断裂及格咱河断裂带南段控制，构造形变以走向北北西的断裂为主，褶皱次之。根据相关资料[2]，滑坡区地震基本烈度为Ⅷ度，对应的设计基本地震加速度值为 0.20 g，反应谱特征周期为 0.45 s，属于设计地震第三组，区域地壳稳定性评价为次不稳定区。

2. 滑坡体概况

2.1. 基本情况

该滑坡区为构造侵蚀地貌中山陡坡地形，包含 H1、H2 两个滑坡。H1 为已有地质灾害隐患点，曾于 2009 年滑动，2013 年整治后，2014 年雨季再次滑动导致挡墙倒塌、道路路基掏空；多年来持续蠕动变形，造成 3 段挡土墙严重开裂、变形倒塌，目前已在其墙体及周边安装 GNSS 基站、雨量计、GNSS 监测站、倾角监测站、无线预警广播站等 5 台监测预警设备。H2 为新发现灾点，位于 H1 南东侧，坡体开裂变形严重，后缘农户圈房因滑坡严重变形开裂、倾斜，现状稳定性较差，在地震、暴雨等不利因素下易失稳坍滑且范围易扩大；因距 H1 近，若不治理将对 H1 的发展及后续治理产生极大影响，目前无任何防治工程措施。本次治理项目同时包含 H1、H2 两滑坡。

H1、H2 滑坡灾害隐患已造成较大财产损失，严重威胁人民生命安全，并制约当地社会经济发展。经调查，两滑坡共威胁 40 户 190 人、财产 1600 万元，险情等级均为中型。其中，H1 滑坡威胁后缘街区常住人口 25 户 110 人及街道和赶集流动人口，财产 1000 万元；H2 滑坡威胁后缘常住人口 15 户 80 人，财

产 600 万元。

H1 滑坡地质灾害隐患点发育于向南西倾斜的斜坡上，整体地势北高南低，平均坡度约 25°。滑坡平面形态呈圈椅状，滑坡的潜在主滑方向为 212°，滑坡主轴投影长(竖向)约 90 m，宽(横向)约 100 m，厚度平均约 6.5 m，平面投影面积约 $0.81 \times 104 \text{ m}^2$ ，滑动体积约 $5.3 \times 104 \text{ m}^3$ 。滑坡坡体物质由第四系人工堆积层(Q_4^{ml})填土和第四系残坡积层($Q_4^{\text{el+dl}}$)含砾粉质粘土层组成，其主控滑结构面为上覆人工堆积层和第四系残坡积层与下伏基岩风化层间的土岩结合面，滑坡规模属小型浅层推移-牵引式土质滑坡。

H2 滑坡平面形态呈围椅状，滑坡区位于 H1 滑坡南侧约 20 m 的斜坡上，整体地势北高南低，平均坡度约 26°。滑坡潜在主滑方向为 215°，平均坡度约 25°。滑坡主轴投影长(竖向)约 70 m，宽(横向)约 60 m，厚约 5.0 m，平面投影面积约 $0.42 \times 104 \text{ m}^2$ ，滑动体积约 $2.10 \times 104 \text{ m}^3$ 。滑坡坡体物质由第四系人工堆积层(Q_4^{ml})填土和第四系残坡积层($Q_4^{\text{el+dl}}$)含砾粉质粘土层组成，其主控滑结构面为上覆人工堆积层和第四系残坡积层与下伏基岩风化层间的土岩结合面，滑坡性质为小型浅层推移-牵引式土质滑坡。

2.2. 地质概况

据野外勘查及收集资料，项目区地表覆盖第四系土体，下伏基岩为白垩系下统景星组地层，根据成因不同，第四系土体可分为人工堆积层、残坡积层，各地层分述如下：

(1) 人工堆积层(Q_4^{ml})

①-1 填土：灰色、灰褐色，松散、稍湿、主要由粉质粘土、混碎石粉质粘土组成，局部为碎石，含量 10%~35%，块径多为 10~200 mm；碎石主要由中风化砂质泥岩和少量中风化砂岩形成的碎石组成，充填粉质粘土及砾石，局部含杂质成分，分选性差，大小混杂，碎石磨圆度差，呈棱角状-次棱角状层厚不均匀，未经分层压实。局部含建筑垃圾及生活垃圾，土体结构松散、欠固结，夯填不均匀、具湿陷性；主要为项目区 H1 滑坡的上覆地层，在 H2 滑坡中仅在滑坡的中上部有分布。本次勘查揭露厚度 1.2~4.5 m 不等，根据实验室资料，该层孔隙比 $e = 0.468\text{--}0.693$ ，天然含水量 $W = 17.10\%\text{--}23.60\%$ ，液限为 22.4%~31.2%，塑限为 13.1%~19.4%，根据土层物质组成及其结构特征，结合现场试验以及前期勘察成果资料，建议承载力特征值[fak] = 50 kPa。

(2) 残坡积层($Q_4^{\text{el+dl}}$)

①-2 含砾粉质粘土：分布于整个项目区的斜坡地带表层，为项目区表层主要的土体，紫红色-黄褐色，稍湿，以含砾粉质粘土为主，含少量角砾，砾石含量约为 10%~25%，整体分选性较差，角砾分布不均匀，呈棱角状-次棱角状，母岩主要成分以泥岩为主，少量为砂岩、粉砂岩。主要分布于斜坡区，在 H2 滑坡中下部有出露，本次勘查揭露厚度 1.2~6.2 m 不等。根据实验室资料，该层孔隙比 $e = 0.487\text{--}0.656$ ，天然含水量 $W = 16.8\%\text{--}21.5\%$ ，液限为 24.0%~37.6%，塑限为 13.9%~21.1%，根据土层物质组成及其结构特征，现场试验结合实验室资料及前期勘察成果资料，建议承载力特征值[fak] = 155 kPa。

(3) 白垩系下统景星组下段(K_1^{j1})

为项目区的主要下伏基岩层，岩性以泥岩和砂岩为主，两层呈不等厚互层，根据区域地质资料，整体地层区域平均厚度 468 m。

②-1 全-强风化泥岩：紫红色、暗褐色，泥质结构，薄-中厚层状构造，主要由粘土矿物成分组成，泥质胶结，岩石水稳定性差，失水易开裂。全风化段岩芯多呈土柱状，强风化段岩芯完整性较低，强度较低，主要呈土夹碎块石，局部呈碎块、碎石状，粒径较小，颗粒大小不均，手折易碎，风化裂隙发育。根据实验室资料，该层孔隙比 $e = 0.50\text{--}0.70$ ，天然含水量 $W = 13.9\%\text{--}22.2\%$ ，液限为 20.1%~35.0%，塑限为 11.6%~21.8%，根据土层物质组成及其结构特征，现场试验结合实验室资料及前期勘察成果资料，建议承载力特征值[fak] = 250 kPa。

对该层土体取样做膨胀土试验，根据实验结果，自由膨胀率小于 40%，该土层为非膨胀土。

②-2 全-强风化砂岩：灰黄、灰绿色，稍湿，密实状，中-厚层状构造。全风化段多呈土柱状，岩芯完整性较低，强度较低，主要呈土夹碎块石，局部呈碎块、碎石状，粒径较小，颗粒大小不均，手折易碎，风化裂隙发育；受构造影响，节理裂隙网状发育，岩体风化强烈，多呈碎石土状，局部地段泥质含量多，成分主要以砂岩、粉砂岩为主。该层孔隙比 $e = 0.40\sim0.60$ ，天然含水量 $W = 13.2\%\sim21.8\%$ ，液限为 $19.2\%\sim36.9\%$ ，塑限为 $11.5\%\sim21.2\%$ ，根据土层物质组成及其结构特征，现场试验结合实验室资料及前期勘察成果资料，建议承载力特征值 $[fak] = 250 \text{ kPa}$ 。

对该层土体取样做膨胀土试验，根据实验结果，自由膨胀率小于 40%，该土层为非膨胀土。

2.3. 水文地质情况

区内地形舒缓为汇水地形，但总体地形较陡，地下水在旱季主要以吸着水和毛细水的形式存在，无地下水位表现；而在连续降雨情况下，松散岩类孔隙水得到补给，对滑坡坡体上松散类土层稳定性影响较大，长时间的降雨促使雨水大量入渗，长期浸润软化滑体，增大坡体自重，降低坡体与下伏土岩结合面的抗剪强度，从而产生滑移，诱发滑坡等地质灾害。

3. 滑坡特征

3.1. H1 滑坡特征

H1 滑坡平面形态呈“舌形”，位于乡集镇南侧公路下方斜坡上，上部呈三台不等高阶梯状分布，下部为阶梯状耕地；总体地势呈北东高南西低，滑坡坡脚高程 2414.68 m，坡度一般在 $15^\circ\sim25^\circ$ ；在挡墙修建回填区地形相对较缓，坡度多在 $10^\circ\sim15^\circ$ 。滑坡区域发育于向南西倾斜的斜坡上，整体地势北高南低。纵向呈台阶状，平台水平宽一般 20~30 m，滑坡区上部原为乡镇的畜牧市场用地，现状为荒地，闲置未使用，分布少量泡核桃树；滑坡区下部为台阶状梯田地形，现状为居民耕作地。斜坡场地分布 2 条冲沟，为季节性冲沟(图 1)。



Figure 1. H1 landslide panorama

图 1. H1 滑坡全貌图

3.2. H2 滑坡特征

H2 滑坡平面形态呈“舌状”，位于 H1 滑坡南东侧约 20 m 的斜坡上，滑坡上部为居民房屋；右侧为耕地，耕地主要呈阶梯状分布；左侧荒地，分布杂草及灌木，坡度较陡。H2 滑坡分布于南西向的大斜坡上，依山就势整体北东高南西低；滑坡坡脚高程 2418.00 m。地形右部耕地分阶平整，地形整体较缓，坡度一般 5°~10°；左部较陡，坡度一般在 20°~30°。滑坡纵向一般长 60 m，水平宽一般 40~65 m；滑坡现状上部主要为居民建设用地以及耕地，主要种植玉米以及核桃。坡体前缘下部为一较大的陡坎，主要分布杂草和灌木零星有乔木分布(图 2)。



Figure 2. H2 landslide panorama
图 2. H2 滑坡全貌图

4. 滑坡成因分析

综合分析 H1、H2 滑坡体形成的因素与其所处的地形地貌、岩土层特性、大气降雨、风化作用、地震及人类工程活动密切相关；根据区域具体情况并结合以往该区相关灾种诱发因素分析，该区内滑坡体诱发因素主要表现为强降雨，其次为地震。各因素对滑坡形成的影响主要表现为：

(1) 地形条件：滑坡发育于向南西倾斜的斜坡上，整体地势北高南低，坡体地形坡度 20°~30°，滑坡前缘斜坡中部有一大陡坎，高差约 20 m，该地形地貌有利于滑坡的形成、发展及发生，为滑坡的形成提供了地形条件；

(2) 不利的软弱夹层：滑坡区岩性组合为上部覆盖第四系松散填土及含砾粉质粘土土体，松散土体在长期的堆积过程中结构松散，透水性强，遇水易软化，在遭受剪切、揉搓、研磨时易在滑坡体内形成强度较低，呈可塑状态、软塑状、甚至流塑状的岩土体，进而形成滑动带。坡体在自重作用下易沿软弱界面失稳下滑，形成滑坡；

(3) 水文工程地质条件：坡体主要由第四系人工堆积层(Q_4^{ml})第四系的残破积层构成，岩土层透水性较好，大气降水入渗增加斜坡土体重度，雨季降雨入渗、饱和软化边坡岩土体，降低岩土力学强度，斜坡稳定性降低。使土体自重下滑力逐渐大于土体内部的摩擦阻力，产生滑动变形；

(4) 降雨：滑坡区属于季风气候区，是典型的冬干夏湿的高原季风气候，平均雨季开始期为 5 月份，

主要降雨集中在 6~9 月之间，主汛期在每年的 7、8 两月。且多出现持续降雨及单点暴雨，雨季降雨易使岩土体饱水。饱水后的岩土体重度增大、抗剪强度降低，下滑力增大，使斜坡产生蠕动变形，促进滑坡的形成；

(5) 地震：项目区属抗震设计地震第三组，抗震设防烈度为 8 度，设计基本地震加速度值为 0.20 g 。据实地走访调查，2021 年 5 月 21 日在项目区附近的漾濞发生 6.4 级地震，地震对项目区产生不小的影响，发生地震时，滑坡沿滑动方向的水平加速度将增大滑坡下滑力，减小滑坡抗滑力，从而降低滑坡整体稳定性；

(6) 人类工程活动：滑坡区近年来人类工程活动强烈，主要是农耕活动、工程活动等。农耕活动造成斜坡体上部植被锐减，土体裸露，降雨、农耕灌溉用水入渗等加大了孔隙水压力和坡体重量，软化土体导致力学强度降低，从而促使或诱发滑坡的发生；工程活动主要表现为滑坡区后缘场地平整、削坡建房，对坡体结构的破坏以及平整场地的土壤堆放，对滑坡后缘加载等，均不利于滑坡的稳定；滑坡后缘居民聚集区的生活污水直接排放在坡体上，沿坡面下渗进入坡体，长期浸润软化滑体，增大坡体自重，降低坡体抗剪强度，从而增大产生滑移的可能。

5. 滑坡稳定性分析评价

5.1. 定性评价

H1 滑坡坡体发育 0.1~15 cm 宽裂缝，岩土体破碎松散，已致坡体房屋倒塌。其前缘两侧地势陡，冲沟附近有坍滑体，陡缓交接处有渗水点。在地震、特大暴雨或持续降雨条件下，滑动面易进一步发展贯通，导致坡体沿坡面滑动并向后缘扩展，可能造成前后缘房屋、道路进一步开裂变形甚至倒塌，前缘农田被挤占掩埋。现状 H1 滑坡基本稳定，在暴雨、持续降雨及地震等不利工况下则处于欠稳定~不稳定状态。

H2 滑坡为本次调查新发现，地表变形特征显著，四周界线清晰。后缘圈房墙体开裂、变形、倾斜；村民耕地内有多条近垂直于主滑方向的横向拉张裂缝，导致耕地面开裂变形严重；中部填土区开裂变形亦严重，局部有坍滑体且有向后发展扩大趋势；右侧缘和前缘分布大量 2~15 cm 张开裂缝。该滑坡前缘临近陡坎斜坡，高差大、坡度陡，前缘存在溢水点。现状 H2 滑坡处于欠稳定~基本稳定状态，在暴雨、持续降雨及地震等不利工况下同样为欠稳定~不稳定状态。

H2 滑坡位于 H1 滑坡南东侧，两滑坡相距近、相互影响大，任一处治理缺失均会显著影响另一处。随着斜坡变形加剧，两滑坡对后缘乡集镇人民生命财产安全构成严重威胁。

5.2. 定量评价

(1) 计算模型、工况及防治工程等级

从滑坡纵坡面可以看出，本次所勘查的滑坡滑动面形态呈折线形，因此采用极限平衡理论，用传递系数法进行计算。经现场调查，H1 滑坡位于乡集镇旁，村庄人员、建筑物密集，滑坡相距较近，经现场实地调查，逐户分析，H1 滑坡现状主要对滑坡区前缘的农田、道路、居民房以及后缘街区常住人口 25 户 110 人及街道和赶集流动人口构成威胁，威胁财产 1000 万元，地质险情等级为中型，危险性较大。H2 滑坡主要威胁后缘常住人口 15 户 80 人，威胁财产 600 万元，险情等级为中型，危险性较大。

根据《滑坡防治设计规范》(GB/T38509-2020)第 6.1.1.1 条表 1 确定 H1 滑坡防治等级属于 II 级；H2 滑坡防治等级属于 III 级[3]。(表 1)

Table 1. Grading table for the importance of landslide prevention projects
表 1. 滑坡防治工程重要性等级划分表

岩性	特级	I级	II级	III级
威胁对象	威胁人数/人 威胁设施	≥ 5000 非常重要	≥ 500 且 < 5000 重要	≥ 100 且 < 500 较重要
				< 100 一般

根据《滑坡防治设计规范》(GB/T38509-2020)第 6.2.3.1 条确定两个滑坡计算工况如下：

设计工况：工况 I——基本组合，考虑基本荷载；

校核工况：工况 II——特殊组合，考虑基本荷载 + 降雨荷载；

校核工况：工况 III——特殊组合，考虑基本荷载 + 地震荷载。

(2) 计算方法

滑动面近似折线型，按照《滑坡防治工程勘查规范》及《滑坡防治设计规范》(GB/T38509-2020)的有关要求，对滑坡的稳定性及推力进行计算。将滑面视为折线型，计算时取滑坡的单位宽度为 1.0 m，简化为二维问题进行计算[3] [4]。

① 滑坡稳定性计算公式：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=i+1}^n \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i+1}^n \psi_j \right) + T_n}$$

其中：

$$R_i = [(W_i + V_i) \cos \alpha_i - U_{bi} - Q_i \sin \alpha_i + P_i \sin(\alpha_i + \beta_i)] \tan \varphi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i$$

$$T_i = (W_i + V_i) \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i - P_i \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi'_i / F_s$$

式中： F_s ——滑坡安全系数；

R_i ——第 i 滑动条块抗滑力，单位为千牛(kN)，第 n 滑动条块抗滑力 R_n ；

ψ_i ——第 $i-1$ 滑动条块对第 i 滑动条块的传递系数；

T_i ——第 i 滑动条块下滑力，单位为千牛(kN)，第 n 滑动条块抗滑力 T_n ；

W_i ——第 i 滑动条块的重量，单位为千牛(kN)；

V_i ——第 i 滑动条块垂直向地震惯性力(V 向上取“-”，向下取“+”)，单位为千牛(kN)；

Q_i ——第 i 滑动条块水平向地震惯性力(Q_i 方向与滑坡滑动方向一致时取“+”，反之取“-”)，单位为千牛(kN)；

U_{bi} ——第 i 滑动条块底面的孔隙压力，单位为千牛(kN)；

P_i ——作用于第 i 滑动条块的外力(不含坡外水压力)，单位为千牛(kN)；

α_i ——第 i 滑动条块底面与水平面的夹角(以水平线为起始线，逆时针为正角，顺时针为负角)，单位为度(°)；

β_i ——第 i 滑动条块的外力 P_i 与水平面的夹角(以水平线为起始线，顺时针为正角，逆时针为负角)，单位为度(°)；

c'_i ——第 i 滑动条块底面的有效凝聚力，单位为千帕(kPa)；

φ'_i ——第 i 滑动条块底面的内摩擦角，单位为度(°)；

b_i ——第 i 滑动条块沿滑面的长度, 单位为米(m);

② 剩余下滑推力计算公式:

$$E_i = T_i - R_i / F_S + \psi_i E_{i-1}$$

式中: E_{i-1} —第 $i-1$ 滑动条块作用于第 i 滑动条块的推力, 单位为千牛(kN), $i = 2, 3, \dots, n$;

E_i ——第 $i+1$ 滑动条块对第 i 滑动条块侧面的反作用力, 单位为千牛(kN), 与第 i 滑动条块的推力大小相等, 方向相反。

(3) 计算剖面

根据滑坡体变形情况及地形地貌,在H1滑坡坡体上布置了具有代表性的3条勘探线,在H2滑坡坡体布置具有代表性的2条勘探线,并布设了钻孔、探井等,稳定计算根据勘探剖面进行计算(图3)。

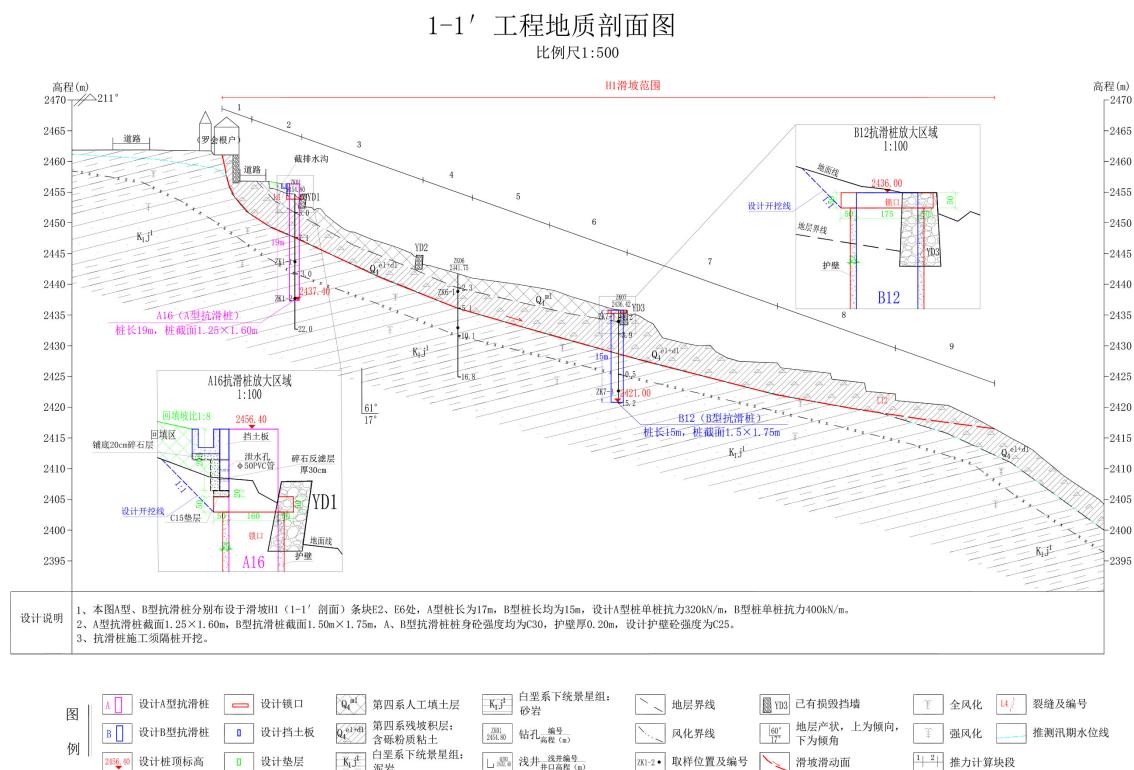


Figure 3. Engineering geological profile diagram

图3. 工程地质剖面图

(4) 计算参数选取

① 岩土重度(γ): 根据野外岩土重度试验成果, 该滑坡计算剖面, 滑坡(H1)以及滑坡 H2 滑体岩土均以人工堆积层(Q_4^{ml})和第四系全新统残积层(Q_4^{el+dl})为主。综合野外试验成果及室内土工试验, 第四系人工堆积层(Q_4^{ml})粉质粘土、混碎石粉质粘土天然重度 γ : 取 19.70 kN/m^3 , 饱和重度 γ_{sat} : 取 20.07 kN/m^3 ; 第四系全新统残积层(Q_4^{el+dl})天然重度 γ : 取 20.30 kN/m^3 , 饱和重度 γ_{sat} : 取 21.03 kN/m^3 。

② 抗剪强度指标(C 、 Φ 值)

室内试验统计值：

本次对滑坡滑带土采取原状样进行室内土工试验分析, 其中 H1 共取样 2 组, H2 滑坡共取样 3 组, 取样时在滑带部位选取泥质含量高, 角砾、碎石含量较少, 符合滑带土特征的土体, 采用环刀取样, 剔除

粒径较大的碎石。室内土工试验制样、试验严格按照《土工试验方法标准》GBT 50123-2019 规范要求, 通过天然直剪、重塑直剪、重塑饱和直剪获得实验数据(表 2)。

Table 2. Standard value table of shear strength index of landslide slip zone soil in laboratory test
表 2. 滑坡滑带土室内试验抗剪强度指标标准值表

滑坡 编号	样品 编号	天然反复直剪				重塑反复直剪			
		粘聚力 C_d (kPa)	摩擦角 Φ_d (°)	残余粘聚力 C_r (kPa)	残余摩擦角 Φ_r (°)	粘聚力 C_d (kPa)	摩擦角 Φ_d (°)	残余粘聚力 C_r (kPa)	残余摩擦角 Φ_r (°)
H1	HDY1	15.7	15.9	10.4	13.8	14.1	15.1	9.3	12.4
	HDY2	15.5	15.4	9.5	12.4	14.4	14	8.8	12
	平均值	15.6	15.65	9.95	13.1	14.25	14.55	9.05	12.2
H2	YP01	6.8	15.8	4.6	9.5	5.1	14.5	3.8	8.3
	YP02	15.5	7.9	8	5.9	14.3	7.1	7.2	4.7
	YP03	13.6	19.2	6.8	12.2	10.2	18.1	6.2	10.8
	平均值	11.97	14.3	6.47	9.2	9.87	13.23	5.73	7.93

滑带土 C 、 Φ 值反演:

项目区在勘查期间(旱季)H1、H2 两滑坡均未见变形加剧迹象, 现状处于欠稳定-基本稳定状态。经现场走访, H1 滑坡发生过两次滑坡, 分别在 2009 年和 2014 年, 在雨季(暴雨工况)时, 滑坡变形均逐渐加剧, 滑坡逐渐变形, 造成坡体上已有的 3 段挡土墙严重开裂、变形甚至倒塌; H2 滑坡在填土区域发生小范围的坍滑, 特别在滑坡左上部农户圈房下方, 初次滑坡变形主要体现在坡体的开裂。据访问滑坡逐年变形加剧, 造成坡体后缘的圈房挡墙严重倾斜。

综合判断在暴雨、地震等不利工况下 H1、H2 滑坡处于欠稳定-不稳定状态。选取 H1 滑坡 2-2 剖面, H2 滑坡 8-8' 剖面作为典型剖面来进行参数的反演分析, 其中 H1 滑坡分别给定滑坡稳定系数 1.06~1.15, H2 滑坡稳定系数 1.06~1.16, Φ 值均取试验统计平均值, 然后分别计算相应的 C 值, 反演过程见(表 3 H1、H2 滑坡典型剖面滑带土抗剪强度指标反演值)。

反演公式:

$$c = \frac{F \sum W_i \sin \alpha_i - \tan \phi \sum W_i \cos \alpha_i}{L}$$

$$\phi = \arctan \frac{F \sum W_i \sin \alpha_i - CL}{\sum W_i \cos \alpha_i}$$

Table 3. Standard value table of shear strength index of landslide slip zone soil in laboratory test
表 3. 滑坡滑带土室内试验抗剪强度指标标准值表

滑坡	剖面	Φ (°) = 13.10							
		C (kPa)	9.5	9.95	10.4	10.79	11.31	11.52	11.8
			稳定系数 K	1.06	1.08	1.09	1.1	1.13	1.14
H2	8-8'	Φ (°) = 14.30							
		C (kPa)	9.5	9.9	10.5	11.6	11.97	12.2	12.5
		稳定系数 K	1.06	1.07	1.09	1.13	1.14	1.15	1.16

滑带土 C 、 φ 值取值：

滑带土 C 、 φ 值取值主要是根据不稳定斜坡的发展历史，滑带土抗剪强度参数的选取合理与否，对滑坡体稳定性计算起关键性作用。H1 滑坡：滑坡勘查期间处于旱季，地下水位埋深较深，距离滑动面较远，滑面位于地下水位之上；雨季地下水位抬升，地下水较浅，滑面位于地下水位之下。滑坡后缘开裂变形，滑坡曾于 2014 年滑动造成坡体上三段挡土墙损毁，滑带土抗剪强度取残余指标；通过计算，反演得到的数据与实验值有一定相差，且用实验值计算所得的稳定系数与判断的实际稳定状态有出入，因此本次计算抗剪强度指标采用反演值，工况 I 抗剪强度粘聚力 C 值取 10.79 kPa，内摩擦角 Φ 值取天然峰值强度 13.10°；工况 II (暴雨)和工况 III (地震)，粘聚力 C 值取 10.29 kPa，内摩擦角 Φ 值取天然峰值强度 12.20°；

H2 滑坡勘查期间处于旱季，地下水位埋深较深，距离滑动面较远；雨季地下水位抬升，地下水较浅，滑面位于地下水位之下。滑坡现状下处于基本稳定状态，滑坡变形主要体现在坡体的开裂变形，滑带土抗剪强度取天然指标；通过计算，反演得到的数据与实验值有一定相差，且用实验值计算所得的稳定系数与判断的实际稳定状态有一定出入，因此本次计算抗剪强度指标采用反演值，工况 I 抗剪强度粘聚力 C 值取 11.60 kPa，内摩擦角 Φ 值取天然峰值强度 14.30°；工况 II (暴雨)和工况 III (地震)，粘聚力 C 值取 10.80 kPa，内摩擦角 Φ 值取天然峰值强度 13.23°。

本次滑坡稳定性计算所采用的滑带土抗剪强度参数结合滑坡变形滑动阶段、室内土工试验成果、参数反演综合确定(表 4)。

Table 4. Calculation parameter value table of landslide profile

表 4. 滑坡剖面计算参数取值表

滑坡	工况	内聚力 C (kPa)	内摩擦角 Φ (°)
H1 滑坡	工况I：基本荷载	10.79	13.1
	工况II：基本荷载 + 降雨荷载	10.29	12.2
	工况III：基本荷载 + 地震荷载	10.29	12.2
H2 滑坡	工况I：基本荷载	11.6	14.3
	工况II：基本荷载 + 降雨荷载	10.8	13.23
	工况III：基本荷载 + 地震荷载	10.8	13.23

滑坡安全系数(F_{st})：根据滑坡类型和滑动面(带)形态，在定性评价基础上，采用极限平衡理论，计算滑坡的稳定系数，定量评价滑坡的稳定性。根据《滑坡防治设计规范》(GB/T38509-2020)第 7.2.1 条表 5 确定安全系数取值[3]。(表 5)

滑坡区降雨入渗厚度：据气象资料，滑坡的地形及汇水面积、降雨强度，本次两滑坡坡体主要为第四系人工填土层及粉质粘土、混碎石粉质粘土，土体夯实较差，结构较松散，但滑坡区的地形整体较陡，汇水条件较差，综合判定降雨入渗深度取滑面以上全入渗，结合雨季地下水位抬升，在工况II和工况IV下滑体土重度取饱和容重。

地面荷载取值：两滑坡后缘斜坡上有村民建筑物分布，村庄建筑物多为砖结构，建筑物地面荷载按 15 kPa/层取值。

综合水平地震系数：据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》，项目区抗震设防烈度为Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.20 g，设计地震分组为第三组，本次设计考虑地震工况，水平地震参数取 0.20，地震

作用综合折减系数取 0.25, 综合水平地震系数 K_n 取 0.05。

Table 5. The safety factor value of landslide design in the project area
表 5. 项目区滑坡设计安全系数取值

滑坡	防治等级	工况	设计安全系数
H1	II级	工况I: 自重	1.25
		工况II: 自重 + 暴雨	-
		工况III: 自重 + 地震	-
H2	III级	工况I: 自重	1.2
		工况II: 自重 + 暴雨	
		工况III: 自重 + 地震	

(5) 算结果及稳定性判定

依上述公式和参数, 滑坡在现状和工程状态(考虑板后土回填、暴雨影响, 下滑力计算考虑安全系数)的稳定系数计算结果。根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T32864-2016, 第 13.3.2 款)判定标准[4](表 6)。

Table 6. Landslide stability state division table

表 6. 滑坡稳定状态划分表

稳定系数 K_f	$K_f < 1.00$	$1.00 \leq K_f < 1.05$	$1.05 \leq K_f < 1.15$	$K_f \geq 1.15$
稳定性	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

H1 滑坡稳定性计算结果:

现状工况(工况 I): 稳定系数 1.09~1.13, 处于基本稳定状态;

暴雨工况(工况 II): 稳定系数 0.98~1.04, 处于欠稳定状态 - 不稳定状态;

地震工况(工况 III): 稳定系数 0.94~0.98, 处于不稳定状态

H2 稳定性计算结果:

现状工况(工况 I): 稳定系数 1.00~1.11, 处于基本稳定状态;

暴雨工况(工况 II): 稳定系数 0.92~1.01, 处于欠稳定状态 - 不稳定状态;

地震工况(工况 III): 稳定系数 0.88~0.96, 处于不稳定状态。

5.3. 综合评价

经野外现场勘查及稳定性计算, H1 滑坡现状工况(工况 I)处于基本稳定状态, 暴雨工况(工况 II)处于欠稳定 - 不稳定状态, 地震工况(工况 III)处于不稳定状态; H2 滑坡现状工况(工况 I)处于欠稳定 - 基本稳定状态, 暴雨工况(工况 II)处于欠稳定 - 不稳定状态, 地震工况(工况 III)处于不稳定状态。

经调查统计, H1 和 H2 两滑坡对滑坡区前缘的农田、道路、居民房以及后缘街区常住人口共 40 户 190 人及街道和赶集流动人口构成威胁, 威胁财产 1600 万元, 地质险情等级为中型, 危险性较大。

5.4. 滑坡发展趋势、破坏形式及危害

(1) H1 滑坡

根据野外调查, 现状下 H1 滑坡变形特征主要为坡体上分布有多条裂缝, 造成坡体上三段已有挡土墙损毁严重, 开裂、变形甚至倒塌; 且导致坡体上原有的厕所倒塌, 并被推出原有位置约 5.0 m; 滑坡活动导致前缘罗万根户闲置自建房墙体有一较大裂缝; 坡体在后缘的下错变形导致后缘道路的路基裸露; 滑

坡中部因坡体滑动而地面隆起，挤占农田，且导致村民种植的核桃树折断。滑坡现状在不利工况下处于蠕动变形阶段，随着滑动面的进一步发展贯通，滑坡在地震、特大暴雨或持续性降雨条件下，沿坡面发生滑动的可能性较大，并有向两侧缘扩展的趋势。

根据滑坡的变形特征及稳定性计算成果，推测滑坡可能的破坏形式为：整个滑坡体经过中上部坡体推移作用及下部牵引作用，沿前缘陡坎处剪出，对滑坡后缘村庄及道路构成直接威胁、危害。建议治理工程措施根据保护对象的位置，在滑坡的后部、中部布置支挡[1]。

现状条件下，H1 坡主要对滑坡区前缘的农田、道路、居民房以及后缘街区常住人口 25 户 110 人及街道和赶集流动人口构成威胁，威胁财产 1000 万元。

(2) H2 滑坡

根据野外调查，现状 H2 滑坡变形特征主要为后缘分布有多条横向拉张裂缝，造成后缘农户圈房地面、墙体开裂变形及倾斜严重，滑坡中部变形明显，滑坡在不利工况下处于蠕动变形阶段，随着滑动面的进一步发展贯通，滑坡在地震、特大暴雨或持续性降雨条件下，沿坡面发生滑动的可能性较大，并有向两侧缘扩展的趋势，易与 H1 滑坡连成一个大的滑坡，对后缘居民的生命及财产安全造成严重威胁。

根据滑坡的变形特征及稳定性计算成果，推测 H2 滑坡可能的破坏形式为：中上部坡体整体滑动，沿前缘剪出口剪出，造成滑坡坡体后缘村民建筑大范围开裂变形倒塌。建议治理工程措施根据保护对象的位置以及滑坡区的具体施工条件，在滑坡中后部布置支挡工程[5]。

调查统计，现状条件下，H2 滑坡主要对滑坡区前缘的农田以及后缘街区常住人口 15 户 80 人及街道和赶集流动人口构成威胁，威胁财产共 600 万元。

5.5. 滑坡治理工程措施

(1) 抗滑桩板墙工程

H1 滑坡抗滑桩板墙工程：在滑坡后缘道路下坡脚边布设一排 A 型抗滑桩板墙，共 21 棵，桩心间距 5.0 m，桩身截面采用 1.25×1.60 m 的方桩。其中单桩长 13.0 m 的抗滑桩 3 棵(A19~A21)，设计单桩抗力 310 KN/m；单桩长 15.0 m 的抗滑桩 1 棵(A18)，设计单桩抗力 320 KN/m；单桩长 17.0 m 的抗滑桩 7 棵(A1~A7)；设计单桩抗力 320 KN/m；单桩长 19.0 m 的抗滑桩 10 棵(A8~A17)，设计单桩抗力 420 KN/m。

在中部已有损毁挡土墙(YD3)后布设一排 B 型抗滑桩板墙，与右侧挡墙衔接，共 15 棵，桩心距 5.0 m，桩身采用 1.50×1.75 m 的方桩。其中单桩长 14.0 m 的抗滑桩 3 棵(B1~B2, B15)，设计单桩抗力 400 KN/m；单桩长 15.0 m 的抗滑桩 4 棵(B3, B12~B14)，设计单桩抗力 400 KN/m；单桩长 18.0 m 的抗滑桩 8 棵(B4~B11)；设计单桩抗力 450 KN/m。

H2 滑坡抗滑桩板墙工程：在滑坡后缘靠近保护对象的位置布设一排 C 型抗滑桩板墙，共 11 棵，桩心距 5.0 m，桩身采用 1.25×1.75 m 的方桩。其中单桩长 13.0 m 的抗滑桩 2 棵(C1, C11)，设计单桩抗力 400 KN/m；单桩长 17.0 m 的抗滑桩 4 棵(C2, C8~C10)，设计单桩抗力 430 KN/m；单桩长 19.0 m 的抗滑桩 5 棵(C3~C7)，设计单桩抗力 430 KN/m。

(2) 截排水工程

沿 H1 滑坡后部道路坡脚(拟设抗滑桩板墙后)设置 S1 截排水沟(入口处与上方公路路基衔接)，排水沟在 A 型抗滑桩后经过坡体，随后经村庄道路，将坡体后部汇水及村庄区生活污水引出，并在中部出水点布设盲沟。

(3) 挡土墙工程

对 H2 滑坡前部 C 型抗滑桩桩心线两端布设挡土墙 D1、D2，总长 6.00 m，主要作用为拦挡回填土边

坡，避免填土从滑坡右侧剪出。两挡土墙设计尺寸：顶宽 0.8 m，底宽 1.9 m，总高 2.5~3.5 m，其中基础埋深 1.0 m，出土高 1.5~2.5 m。面坡垂直，背坡坡比 1:0.2，墙趾宽 0.5 m，高 0.8 m，由 C20 砼浇筑。

(4) 回填反压工程

根据 H1、H2 滑坡力学性质为牵引-推移复合型的特征，为有效防止滑坡进一步发展，拟在三排桩间挡土板背后区域进行回填反压。根据设计挡土板数量及实际地形，回填总长度为 250 m，回填宽度为 1.0~4.0 m，回填高度为 1.0~2.0 m，回填土方量 911.88 m³。回填土采用抗滑桩桩孔开挖土，并严格夯实。

(5) 治理效果评价

通过实施抗滑桩板墙支挡工程，可有效地控制滑坡在极端不利条件下整体失稳，工程治理后可确保 H1 滑坡和 H2 滑坡抗滑桩板墙后坡体的整体稳定，消除坡体变形滑动对村庄、道路的危害和威胁。滑坡背后雨季汇水下渗对滑坡的稳定性影响较大，拟设截排水工程将雨季坡面汇水排出，经过工程治理后，可减弱雨季汇水对滑坡稳定性的影响，减轻因滑坡滑动而对村民建筑的破坏。通过计算，本治理方案通过实施工程措施后 H1 滑坡以及 H2 滑坡的稳定系数得到明显的提高，并满足滑坡最不利条件下的安全系数要求。

5.6. 监测工作布置

(1) 滑坡监测：本次两个滑坡主要监测在施工过程中滑坡的变形情况，采用测缝法和巡视相结合的方法监测。

(2) 抗滑桩监测：每 3 颗抗滑桩设置 1 个监测点，共布设 15 个监测点，主要采取巡视观察和变形测量监测相结合的方法，对抗滑稳定性及治理效果进行监测，监测内容为抗滑桩变形、位移情况，以便及时维护。

(3) 挡土墙监测：每个挡土墙共布设 1 个监测点，主要采取巡视观察和变形测量监测相结合的方法，对挡土墙稳定性及治理效果进行监测，监测内容为挡土墙变形情况，以便及时维护。

(4) 截排水沟监测：排水沟共布设 5 个监测点，主要采取巡视观察与和变形测量监测相结合的方法，对排水沟稳定性及治理效果进行监测，监测内容为排水沟变形、位移情况以便及时维护。

滑坡监测一般每年应观测 15 次。变形滑动明显时，应增加观测次数，可以增加到每周或每天一次。在暴雨时，应加密观测次数，可以增加到数小时一次。

抗滑桩、挡土墙、截排水沟监测次数为 15 次/年，施工结束时进行第一次监测，以后旱季(11 月~4 月)每 2 个月一次，雨季(5 月~10 月)每 1 个月 2 次，主要通过对抗滑挡土墙、截排水沟进行测量，监测抗滑桩、挡土墙、截排水沟变形情况、工程质量和运行效果，以便及时对工程进行维护、排除险情，确保工程安全运行，雨季加大密度。

6. 讨论

综上所述，滑坡地质灾害的成因分析是治理设计的根本前提，需从地形地貌、地层岩性、地质构造等内在地质条件，以及降雨、地震、人类工程活动等外在诱发因素进行系统考量，明确各因素在滑坡形成与发展中的作用机制及权重关系。基于此，治理设计应遵循“预防为主、防治结合、因地制宜、综合治理”的原则，灵活选用排水、支挡、减重加载、坡面防护、监测预警等单一或组合技术手段，在确保治理效果安全可靠的前提下，兼顾经济性、生态性与可持续性。未来，随着地质勘查技术、监测预警智能化水平的提升以及新型环保材料的研发应用，滑坡地质灾害的成因机理研究将更加深入，治理设计也将朝着更精准、高效、绿色的方向发展，为保障人民生命财产安全和促进区域经济社会的可持续发展提供坚实的地质安全屏障。

参考文献

- [1] 黄润秋, 等. 中国西南山区降雨型滑坡形成机理与减灾关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 881-896.
- [2] 中国建筑科学研究院, 等. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 中国地质环境监测院, 等. GB/T 38509-2020 滑坡防治设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [4] 中国地质调查局, 等. GB/T32864-2016 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [5] 殷跃平, 等. 三峡库区滑坡灾害成因与防治对策[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1066-1077.