

蔡家沟滑坡稳定性分析评价及综合防治研究

何 进, 林 磊, 冉 鑫

核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年5月18日; 录用日期: 2025年6月11日; 发布日期: 2025年6月19日

摘 要

本文基于工程地质测绘、钻探、室内试验及稳定性计算, 系统分析了蔡家沟滑坡区地形地貌、地质构造、水文地质条件及滑坡变形特征, 揭示了其形成机制与稳定状态。通过平面滑动法对滑坡稳定性进行定量计算, 结合暴雨工况下的剩余推力分析, 提出“抗滑桩-截排水-裂缝封填-监测”的综合治理方案。研究结果为类似滑坡的防治提供了理论依据与技术参考。

关键词

变形特征, 成因机制, 平面滑动, 稳定性分析, 综合治理

Caijiagou Landslide Stability Analysis and Evaluation and Comprehensive Prevention and Control Research

Jin He, Lei Lin, Xin Ran

Nuclear Industry Southwest Survey & Design Institute Co. Ltd., Chengdu Sichuan

Received: May 18th, 2025; accepted: Jun. 11th, 2025; published: Jun. 19th, 2025

Abstract

Based on engineering geological mapping, drilling, indoor testing and stability calculation, this paper systematically analyzes the topography, geological structure, hydrogeological conditions and landslide deformation characteristics of Caijiagou landslide area, and reveals its formation mechanism and stability state. The stability of the landslide was quantitatively calculated by plane sliding method, and combined with the analysis of the residual thrust under heavy rainfall conditions, the comprehensive management plan of “anti-slip piles-intercepting and draining-crack sealing and filling-monitoring” was proposed. The results provide theoretical basis and technical reference for the prevention and control of similar landslides.

Keywords

Deformation Characteristics, Causal Mechanisms, Planar Sliding, Stability Analysis, Comprehensive Management

Copyright © 2025 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. 引言

蔡家沟滑坡位于四川省雅安市名山区蒙阳街道(E103°08'43.26", N30°06'31.15"), 距名山县城约 5 km。滑坡区域上地处龙门山断裂带南段, 地质环境复杂, 滑坡、崩塌等地质灾害频发。2024 年 7 月 24 日, 受持续强降雨影响, 蒙阳街道蔡家沟发生滑坡险情, 威胁 11 户 39 人及 500 kV 高压输电塔基, 潜在经济损失达 800 万元。滑坡体体积 8.6 万 m^3 , 主滑体厚度 7~9 m, 滑体物质以粉质黏土及强风化泥质粉砂岩为主, 下伏中风化泥质粉砂岩, 属典型推移式顺层岩质滑坡。该滑坡具有滑速快、突发性强、危害大等特点, 亟需科学治理。

国内外学者对顺层岩质滑坡的形成机制与防治技术开展了大量研究。陈军[1]基于降雨入渗模型揭示了雅安地区冰水堆积物滑坡的灾变机理; 郭英华[2]结合反分析法优化了滑坡抗剪强度参数取值。然而, 针对小型推移式岩质滑坡的综合治理研究仍显不足。本文基于蔡家沟滑坡的工程实践, 系统探讨其发育特征、稳定性评价及综合治理措施, 以期类似灾害防治提供参考。

2. 滑坡区工程地质条件

2.1. 地形地貌

滑坡区属构造剥蚀浅丘地貌(图 1), 属单斜和顺向斜坡结构, 海拔高程 705~745 m, 相对高差 40 m。微地貌主要为斜坡、平台, 局部为陡坎。其中斜坡整体坡度 $15^\circ\sim 35^\circ$, 主要为旱地, 局部为林地; 缓坡平台处一般修建有房屋, 主要为砖混结构。纵向上台阶状斜坡局部陡缓相间, 前缘存在临空陡坎, 为滑坡的发育提供了有利的地貌条件。



Figure 1. General photograph of the landslide

图 1. 滑坡全貌照

2.2. 地质构造与地层特征

研究区区域地质构造属成都平原凹陷、熊坡背斜雁行带,形成与龙门山构造带走向一致的蒙顶山背斜、总岗山背斜夹名山向斜的褶皱凹陷地带[3]。研究区地质构造较简单,岩层单斜产状为 $275^{\circ}\angle 11^{\circ}$,主要发育两组共轭节理:1) 产状 $82^{\circ}\angle 85^{\circ}$,间距约 0.5~1.0 m,延伸长度约 1.5~2 m,裂面平直,略粗糙,微张;2) 产状 $175^{\circ}\angle 78^{\circ}$,间距 1~2 m,张开度 2~6 mm,延伸长度 0.8~1.5 m,裂面粗糙起伏,主要充填岩屑。研究区基本地震动峰值加速度值为 0.10 g,反应谱特征周期值为 0.45 s [4]。

研究区地层自上而下为第四系全新统填土层(Q_4^{ml})、第四系全新统残坡积层(Q_4^{el+dl}),下伏早第三系中统名山群(E_{1+2mn})地层。杂填土主要分布于现有公路和村民房屋附近,厚 0.5~0.8 m;粉质粘土呈红褐色,可塑状,在滑坡后缘坡顶位置厚 0.5~0.8 m,在前缘厚 1~3 m;强风化泥质粉砂岩呈棕红色,见铁锈侵染,呈半胶结状,遇水易软化,力学性质较差;中风化泥质粉砂岩呈薄~中层构造,局部夹泥质粉砂岩,抗风化能力较差,遇水易崩解,单轴抗压强度 8.5 MPa (天然)/5.4 MPa (饱和)。

2.3. 水文地质特征

研究区地表水主要为大气降水补给,以坡面散流方式向坡脚处排泄,部分地表水通过下渗方式排泄。地下水主要为基岩裂隙水,其透水性富水性较差,水位埋深约 4~10 m,多位于滑动面附近,主要顺坡向沿强风化裂隙渗出。据现场调查发现,在滑坡前缘中部有一泉点(图 2),常年有水,雨季时水量增大,流量约 0.05 L/s,动水压力加剧滑带软化。



Figure 2. Exposed photographs of springs
图 2. 泉点出露照

3. 滑坡发育特征及形成机制

3.1. 发育特征

3.1.1. 地貌形态特征

滑坡平面上呈圈椅形(图 3),滑坡边界根据调查变形迹象,结合剖面形态、坡体结构特征综合分析确定。滑坡后缘靠近斜坡坡顶,以地面张拉下错形成的裂缝为界;前缘为下方水泥路面,有明显鼓胀挤出现象;左右侧边界结合剪切裂缝与微地貌划定。滑坡纵向长约 120 m,横向宽约 90 m,滑动方向 274° ,滑体平均厚 8 m,方量约 8.6 万 m^3 。

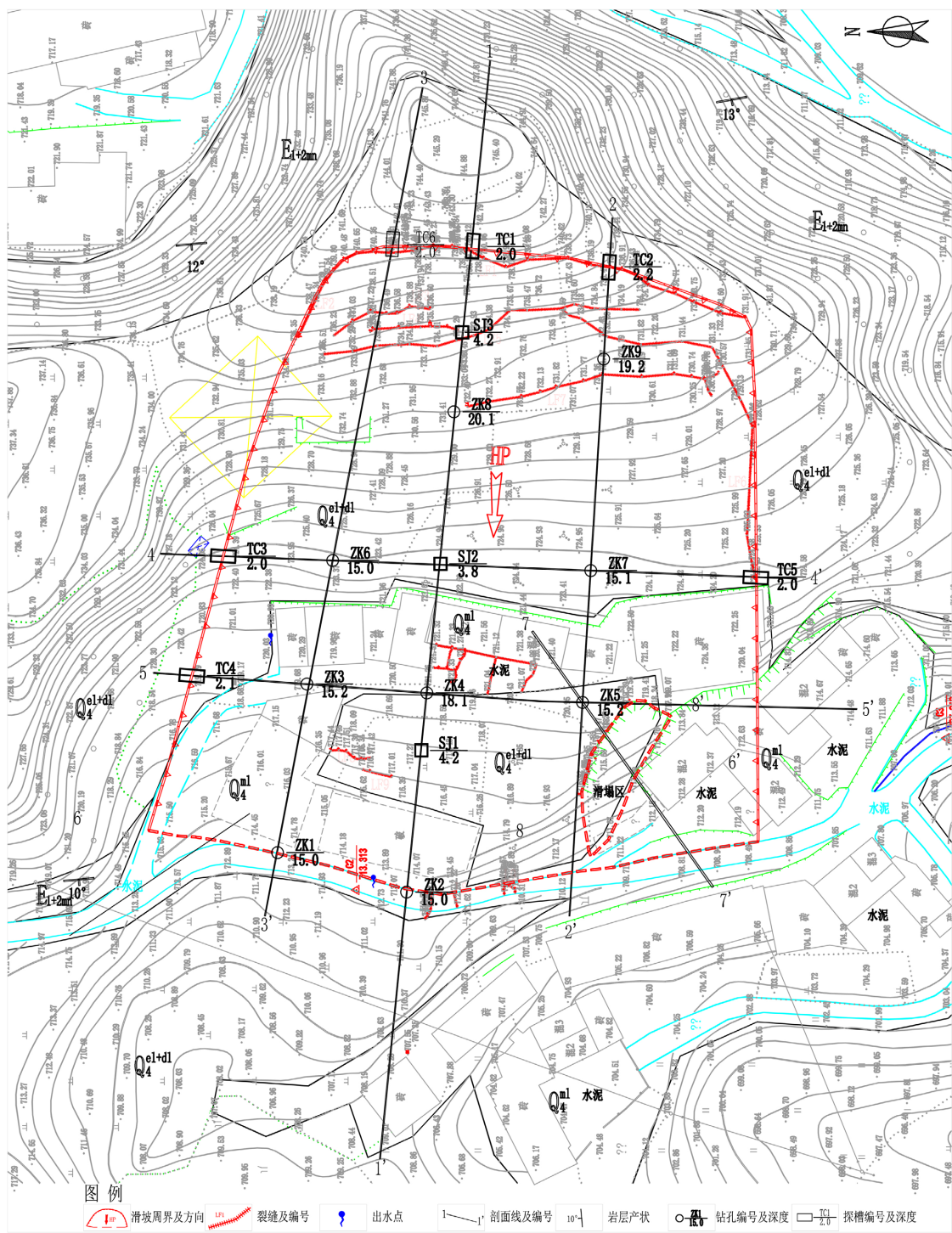


Figure 3. Landslide plan
图 3. 滑坡平面图

3.1.2. 滑坡边界特征

滑坡后缘：以张拉裂缝 LF1 为界(图 4)，裂缝长约 69 m，宽为 10~30 cm，形成错台，陷落高度多在 0.5~1.5 m，走向与滑动方向基本垂直。



Figure 4. Trailing edge boundary (tension crack)
图 4. 后缘边界(拉张裂缝)

滑坡左侧：发育剪切裂缝 LF2 (图 5)，裂缝长约 40 m，宽度 10~30 cm，形成错台，陷落高度多在 0.2~0.6 m，其走向与滑动方向基本一致。



Figure 5. Left boundary (shear crack)
图 5. 左侧边界(剪切裂缝)

滑坡右侧：发育剪切裂缝 LF3 (图 6)，裂缝长约 15 m，宽 5~20 cm，形成错台，陷落高度多在 0.1~0.3 m，其走向与滑动方向基本一致。



Figure 6. right boundary (shear crack)
图 6. 右侧边界(剪切裂缝)

滑坡前缘：以乡道内侧临空面为界，前缘右侧房屋出现明显往外鼓胀(图 7)，中部有一长期出水点，滑坡左侧陡坎处出现局部垮塌。



Figure 7. Leading edge boundary (bulge crack)
图 7. 前缘边界(鼓胀裂缝)

3.1.3. 滑坡变形特征

1) 滑坡活动历史

根据现场调查访问，该滑坡于 2024 年 7 月 24 日 9 时许，强降雨期间产生变形，该次变形强烈，形成多处拉张裂缝，在后缘斜坡以及边坡坡体表面陆续出现拉张、剪切、鼓胀裂缝，斜坡中前部房屋出现裂缝甚至垮塌破坏，形成本次的“蔡家沟滑坡”。

2) 滑坡变形特征

滑坡变形特征与其类型密切相关。推移式滑坡通常表现为后缘拉张裂缝与前缘鼓胀的协同演化(如图 4~7 所示)，与蔡家沟滑坡特征一致；而牵引式滑坡则呈现“前拉后推”的变形模式，如三峡库区八字门滑坡(黄润秋等，2020) [5]。对于顺层岩质滑坡，滑带常沿软弱夹层或风化界面发育，如贵州某顺层滑坡因泥化夹层遇水软化导致渐进式失稳(杨志华等，2019) [6]。此外，旋转滑坡多发育于厚层均质土体中，其滑面呈弧形，如福建某土质滑坡因坡脚开挖引发旋转剪切破坏(林峰等，2022) [7]。该滑坡的形成机制符合“降雨 - 渗流 - 软化”典型模式，与云南红层地区顺层滑坡的失稳机制(郑建国等，2021) [8]具有高度相似性。

经调查发现，滑坡后缘可见最高达 1.5 m 的错台，并在斜坡坡表及边坡顶部见有与滑壁延伸方向基本一致的拉张裂缝；滑坡上部靠近后缘的左侧存在一滑坡平台，其外侧存在一定反翘现象，形成了一拉陷槽(图 8)；滑坡前部裂缝发育相对较弱，由于前部坡体的抗滑作用，在滑坡前部出现挤压作用形成类似于褶皱的地层鼓胀和相应的纵横向裂缝[9]。从裂缝发育所处位置和走向来看，主要是由于上部强风化粉砂质泥岩失稳滑动，挤压下部产生变形，属推移式滑坡变形特征。



Figure 8. Lower trailing edge pull-in groove
图 8. 后缘下部拉陷槽

经调查发现 9 处较大裂缝，其中张拉裂缝 5 条，剪切裂缝 2 条，鼓胀裂缝 2 条，另外在前缘剪出口位置公路路面上，由于受滑坡剪出挤压影响，水泥路面上发育有 4 条扩张型张裂缝。变形具典型推移式特征：后部拉裂 → 中部剪切 → 前缘挤出。同时在滑坡前缘中部有一泉点出露，也属滑坡变形特征。

3.1.4. 滑坡物质结构特征

依据钻探资料，滑坡区地层主要为第四系全新统杂填土层(Q_4^{ml})、第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del})，下伏早第三系中统名山群(E_{1+2mn})地层。

滑体：为杂填土、粉质粘土、强~中风化破碎泥质粉砂岩等组混合成，成分杂乱。

滑带：主要沿强风化与中风化的界面发生滑动，强风化泥质粉砂岩在地下水和入渗的地表水浸润下，形成软弱带(图 9)。



Figure 9. Drill holes to expose slip-zone soils
图 9. 钻孔揭露滑带土

滑床：为较完整中风化泥质粉砂岩，岩体较完整。产状 $275^\circ \angle 11^\circ$ ，为顺层边坡。

3.2. 形成机制

从滑坡变形特征可以看出, 坡体的中后部首先由于强降雨条件下, 大气降水渗入裂缝中, 并随着时间推移使后部坡体逐渐向前推挤, 导致滑面整体上逐渐由后向前贯通, 并在坡体的整体下滑力大于抗滑力时造成坡体发生滑动而形成滑坡。滑坡在整体滑动前主要表现为坡体后部裂缝相对更为长大贯通, 而坡体前部裂缝发育相对较弱的特征。

滑坡是在一定的内因、外因等地质环境条件和其它因素综合作用下产生的, 影响因素包括地形地貌与地质构造、工程地质与水文地质条件、气候条件及其它因素。

1) 地形地貌与地质构造因素

滑坡区地貌类型为剥蚀浅丘地貌, 呈单斜斜坡结构, 坡向与岩层倾向基本一致, 属顺向坡, 为滑坡沿岩层面滑动提供了有利的条件。

2) 工程地质与水文地质因素

滑坡发育于破碎的强风化岩体, 地表水呈漫流状, 大多地面水下渗, 在较为完整的中风化层顶面形成富水带, 从而形成一含水量高、抗剪强度低的软弱面, 为滑坡形成提供了可能的潜在滑面。

3) 气候条件

“无水不滑”是滑坡的显著特点, 以往资料表明绝大多数滑坡都是经历了强降雨而产生滑动失稳[2][10]。该滑坡失稳下滑发生于2024年7月24日, 滑动前一周内研究区连续降雨, 并在下滑当天降雨量达163 mm。降雨不断渗入裂隙发育的风化岩中, 降低岩体抗剪强度, 增加滑体土重量及动水压力, 增加滑体渗透压力, 为滑坡变形失稳的主要诱发因素。

4) 人为因素

研究区人类工程活动强烈, 主要有修建房屋、公路以及高压电塔, 对坡体进行了开挖, 对地质环境产生不同程度影响, 同时修建过程中在滑坡前缘局部形成高度约3~5 m的陡坎, 形成了有效的临空面, 利于滑坡剪出。

上述内外因共同作用, 导致滑面逐渐贯通, 最终诱发滑坡, 这一过程与西南地区典型顺层滑坡失稳模式(郑建国等, 2021)[8]高度吻合。其中关键影响因素主要为滑坡区呈单斜顺层边坡, 以及持续降雨作用影响。

4. 滑坡稳定性评价

4.1. 滑坡稳定性定性评价

滑坡前缘出现渗水, 坡体上部及后缘拉张裂缝有明显继续扩大迹象。如遇地震、持续降雨、强降雨、暴雨, 滑坡存在进一步滑动的可能。从整体宏观上判定, 滑坡天然状态下处于基本稳定状态, 暴雨工况下处于不稳定状态。

4.2. 滑坡稳定性定量评价

4.2.1. 岩土体物理力学参数取值

滑体主要依据室内试验及现场大重度试验分析进行取值, 滑带土抗剪强度参数则根据土工试验结果和滑坡体现状极限平衡状态反算进行取值(表1)。

4.2.2. 计算工况及荷载组合

坡体主要为粉质粘土、强风化泥质粉砂岩, 地下水主要为基岩裂隙水, 目前裂隙已贯通, 且长期富水, 特别是暴雨工况下, 动水压力不容忽视。因此, 作用于滑体上的力有滑体自重 + 水压力。结合斜坡区的结构特征、变形机制及稳定性, 确定进行天然和暴雨2种工况下的稳定性计算(表2)。

Table 1. List of values of calculated parameters for slip bodies and slip zones
表1. 滑体与滑带计算参数取值一览表

土层名称	容重(KN/m³)		抗剪强度			
			天然		暴雨	
	天然	饱和	C (Kpa)	φ (°)	C (Kpa)	φ (°)
			天然	暴雨	天然	暴雨
滑体	22.0	23.0	15.5	20	8	15
滑带	/	/	7	11.5	6	10.5

Table 2. Calculation of landslide stability conditions and load combinations
表2. 滑坡稳定性计算工况及荷载组合表

编号	工况	荷载组合
1	天然工况	自重 + 水压力
2	暴雨工况	自重 + 暴雨 + 水压力

4.2.3. 计算模型与计算方法

根据勘查断面、滑坡变形迹象以及稳定性定性分析，对滑坡可能出现的滑面进行稳定性定量计算。研究区滑坡为顺层基岩滑坡，受裂隙切割影响沿岩层面发生顺层滑动，滑面形态为直线形，本次研究选取 1-1'、2-2' 典型断面(图 10、图 11)采用平面滑动法计算滑坡稳定性，计算结果及评价见表 3。

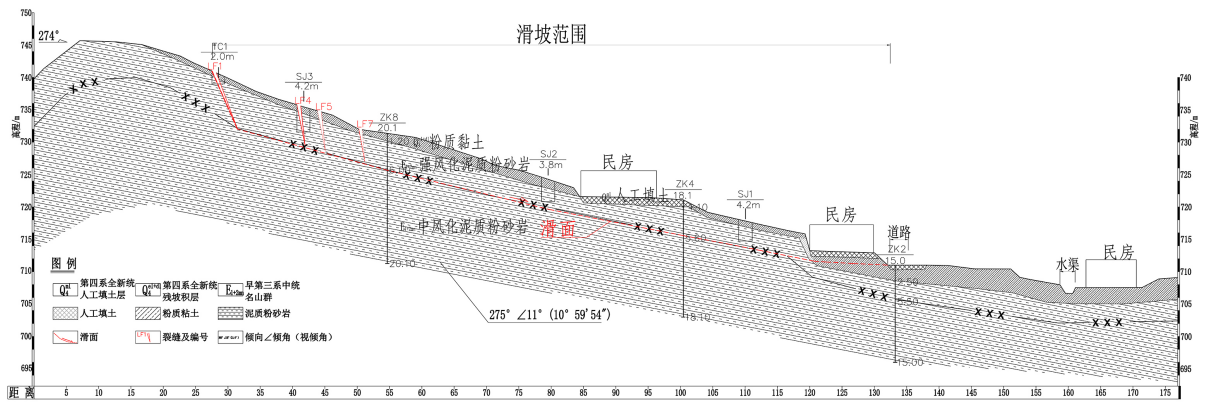


Figure 10. 1-1' Profile calculation model
图 10. 1-1' 剖面计算模型

Table 3. Landslide stability calculation results and evaluation table
表3. 滑坡稳定性计算结果及评价表

计算剖面	工况	稳定系数(Fs)	稳定性评价	安全系数(Fst)	剩余推力(kN/m)
1-1'	天然工况	1.136	基本稳定	1.25	262.77
	暴雨工况	0.998	不稳定	1.20	488.76
2-2'	天然工况	1.143	基本稳定	1.25	190.65
	暴雨工况	0.999	不稳定	1.20	378.43

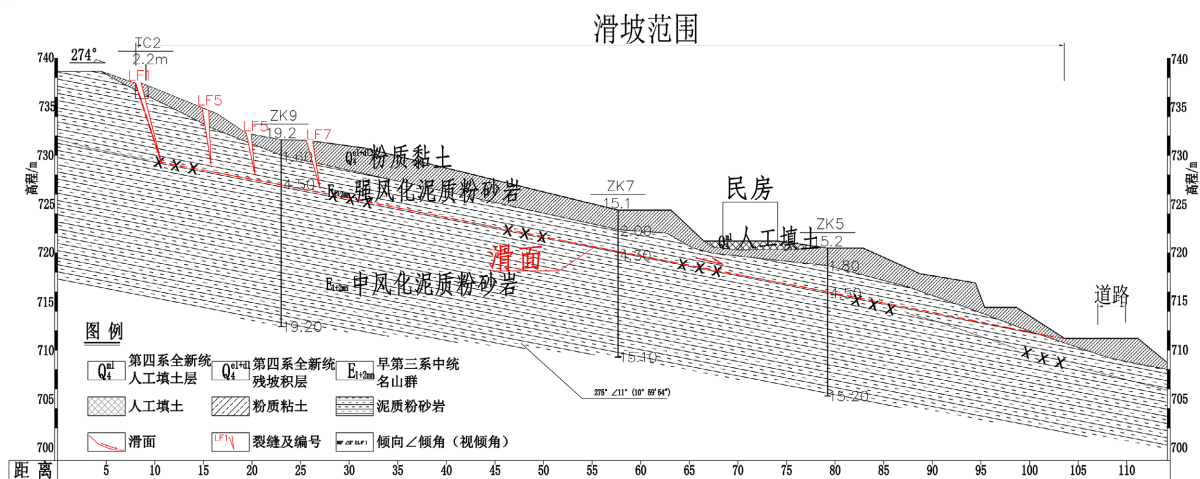


Figure 11. 2-2' Profile calculation model
图 11. 2-2' 剖面计算模型

由表 3 可知，天然工况条件下滑坡处于基本稳定状态，暴雨工况条件下滑坡处于不稳定状态。计算结果与现场调查的滑坡变形情况基本吻合。

5. 综合治理方案

5.1. 防治目标与原则

- 1) 根据滑坡类型、活动规律等进行专项设计，各类工程措施配合协调，综合整治的原则，确保在设计年限内不形成滑坡灾害。
- 2) 治理工程应尽可能考虑有利于滑坡自身稳定，尽量避免扰动岩土体，导致其内部应力变化。
- 3) 防治工程应选用安全可靠、经济合理、施工简便的成熟技术，便于维护、管理。
- 4) 防治工程应尽可能美化生态环境，与自然景观相协调，与城市建设规划相协调。

5.2. 防治技术方案设计

5.2.1. 方案比选与优化

根据滑坡工程地质条件、成因及发展趋势，需对滑坡区域进行综合防治，并提出以下两种治理方案。

方案一：抗滑桩 + 重力式挡土墙 + 排水沟 + 裂缝封填(图 12)。

- 1) 针对滑坡整体，在滑坡中前部设置抗滑桩工程，共设 A 型抗滑桩 18 根，A 型桩截面 1.5×2.0 m，桩间距 5 m，桩长 10 m，嵌固段 5 m；
- 2) 针对滑坡前缘滑塌区，设置重力式挡土墙，墙高 5 m，顶宽 0.8 m，面坡倾斜坡度 1:0.3，墙底倾斜坡度 0.1:1，并根据坡面反压回填；
- 3) 针对滑坡设置排水沟，长 200 m；
- 4) 滑坡裂缝封填，共约 280 m。
- 5) 治理工程应建立安全监测和防治效果监测点，同时建立以简易监测和巡视检查为主的长期监测点。本工程布置 11 个监测点，包括 3 个地表位移监测点和 8 个抗滑桩顶部位移监测点。

方案二：重力式抗滑挡土墙 + 重力式挡土墙 + 排水沟 + 裂缝封填。

- 1) 针对滑坡整体，在滑坡前缘设置重力式抗滑挡土墙，墙高 7 m，顶宽 0.8 m，面坡倾斜坡度 1:0.3，墙底倾斜坡度 0.1:1，并按 1:1.5 反压回填；

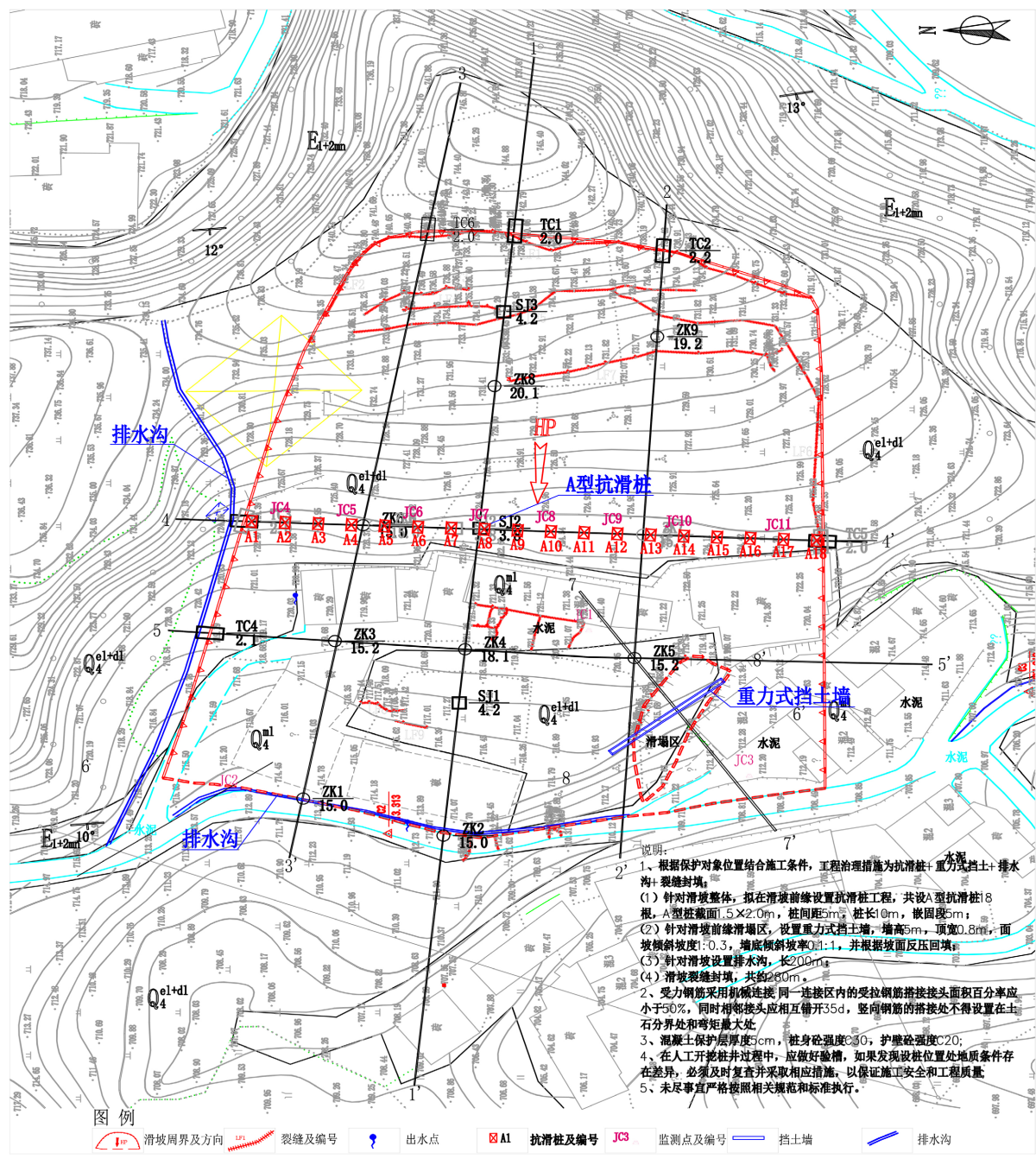


Figure 12. Layout of treatment measures and monitoring points
图 12. 治理措施及监测点布置图

2) 其余措施与方案一相同。

根据以上两种治理方案特点及工作量，分别从经济性、可行性、预期效果及环境影响等方面进行比选。从经济性方面分析，方案一造价略低于方案二，方案一要略优于方案二；从可行性及预期效果方面分析，两种方案都是常用的滑坡治理措施，技术都较为成熟，从技术可行性上看，两者基本相同；从环境影响方面看，方案一主要为抗滑桩工程，分项工程少，对环境影响较小。而方案二为挡土墙，侵占耕地较多，对环境影响较大。同时坡脚开挖严重，施工周期也较长。

按照“安全可靠，经济合理，技术可行，施工方便”的原则，通过以上几方面综合比选，研究区滑坡治理工程选择方案一作为推荐方案。

5.2.2. 主要分项工程设计

1) 抗滑桩：采用《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T 0221-2006)中的计算方法，用北京理正软件研究院的岩土计算软件《抗滑桩设计》采用 K 法进行设计验算，设计参数见表 4、表 5，计算结果见表 6。

Table 4. Table of landslide design parameters
表4. 滑坡设计参数表

岩土体名称	容重(kN/m³)		抗剪强度			
			天然		饱和	
	天然	饱和	C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)
粉质粘土	19.1	19.5	35	13.5	30	10
强风化泥质粉砂岩	22.0	23.0	15.5	20	8	15
滑带	/	/	7	11.5	6	10.5

Table 5. Table of rock design parameters for sliding beds
表5. 滑床岩石设计参数表

序号	项 目		单 位	强风化泥质粉砂岩	中风化泥质粉砂岩
1	重度	天然	kN/m³	22.0	24.2
		饱和	kN/m³	23.0	24.5
2	抗压强度	天然	MPa	/	8.52
		饱和	MPa	/	5.43
3	地基承载力特征值		kPa	240	800
4	岩石与锚固体粘结强度		kPa	270	360
5	基底摩擦系数			0.35*	0.45*
6	边坡允许率			1:1.0	1:0.75
7	地基水平抗力系数 K		MN/m³	20	60

Table 6. Calculation results of anti-slip pile design
表6. 抗滑桩设计计算结果

桩型	计算桩长(m)	嵌固段长(m)	桩截面(m)	根数	设计桩长(m)	桩间距(m)	桩顶最大位(mm)
A	10	5	1.5 m × 2.0 m	8	10	5	35

2) 挡土墙：拟在滑坡前缘陡缓交界处设计重式挡土墙。挡土墙长 20 m，高 5 m，顶宽 0.8 m，面坡倾斜坡度 1:0.3，墙底倾斜坡率 0.1:1。挡墙采用 C30 混凝土浇筑。挡土墙每 10 m 设伸缩缝一道，缝宽 2~3 cm，缝内沿墙顶、内、外三面用沥青木板填塞，嵌入深度不小于 15 cm。挡土墙设计采用库仑土压力计算方法，计算的主要物理力学参数见表 7，计算结果见表 8。

Table 7. Retaining wall design parameters
表7. 挡土墙设计参数表

墙后填土内 摩擦角(°)	墙后填土 粘聚力(kPa)	墙后填土容重 (kN/m ³)	墙背与墙后 填土摩擦角(°)	地基土容重 (kN/m ³)	修正后地基 承载力特征值(kPa)	地基土内 摩擦角(°)	墙底摩擦 系数
35.0	0	19.0	17.5	18.0	200	30.0	0.35

Table 8. Retaining wall stability calculations
表8. 挡土墙稳定性计算结果

治理工程	抗滑移验算 Kc	抗倾覆验算 K0	最大地基压应力	偏心距
重式挡土墙	1.518	3.050	125.003	0.120

5.2.3. 主要分项工程施工方法

1) 抗滑桩施工：抗滑桩施工包含以下工序：施工准备、桩孔开挖、地下水处理、护壁、钢筋笼制作与安装、混凝土灌注、混凝土养护等。主要施工方法为：① 桩孔开挖前应平整孔口，做好施工区地表截排水及防渗工作；② 采取跳跃方式开挖，每次间隔 1~2 孔；③ 按由浅至深、由两侧向中间施工的顺序进行；④ 桩孔开挖过程中应及时进行钢筋混凝土护壁；⑤ 钢筋笼尽量在孔外预制成型，在孔内吊放竖筋并安装。竖筋的接头采用双面搭接焊、对焊或冷挤压，接头点需错开；⑥ 桩身砼灌注应连续进行，不留施工缝。桩身混凝土灌注过程中，应取样做混凝土试块；⑦ 监测应与施工同步进行。当滑坡出现变形并将危及施工人员安全时，及时通知人员撤离；⑧ 施工材料及设备严禁置于滑坡体上，施工开挖的土石应及时清运，不允许随意堆放。

2) 挡土墙施工：① 基槽应采用分段开挖，开挖一段，立即浇筑后再开挖下一段；② 墙顶用 1:3 水泥砂浆抹成 5% 外斜护顶，厚度不小于 30 mm；③ 施工前要做好地面排水，保持基坑干燥；④ 基底力求粗糙，对粘性土地基和基底潮湿时，应夯填 50 mm 厚砂石垫层；⑤ 墙后原地面横坡陡于 1:5 时，应先处理填方基底再填土；⑥ 墙后填土宜采用透水性好的碎石土，必须分层夯实。

3) 排水沟施工：① 在混凝土浇筑前先用空压机将模板内杂物吹扫干净；② 采用流水施工，每一流水段内混凝土连续浇筑；③ 混凝土由料斗、泵管内卸出时，其片面上倾浇高度不得超过 2 m；④ 浇筑混凝土时设专人看模，经常观察模板、支架、钢筋、预埋件和预留孔洞的情况；⑤ 使用插入式振捣棒要快插慢拔，插点呈梅花型布置，按顺序进行，不得遗漏；⑥ 在沟壁混凝土浇筑以前，应将模板先进行湿润，然后在模板底部先填一层 50 mm 厚与设计混凝土配合比相同标号的水泥砂浆进行封堵；⑦ 混凝土浇筑完毕及浇筑过程中设专人清理落地灰及沾污成品上的混凝土颗粒。

6. 结论

- 1) 通过调查和钻探资料分析，研究区滑坡属小型推移式岩质顺层滑坡。
- 2) 通过选取典型断面采用平面滑动法计算分析，研究区滑坡天然工况下为基本稳定，暴雨工况下为不稳定，计算结果与现场调查的滑坡变形情况基本吻合。
- 3) 根据滑坡工程地质条件、发育特征、成因机制及稳定性分析，建议在滑坡中前部设置抗滑桩，在前缘滑塌区设置重力式挡土墙，同时封闭滑坡区裂缝，以及在滑坡后缘及两侧设置截排水沟。
- 4) 该滑坡为典型的顺层岩质滑坡，比较具有代表性，对工程选址、土地整治及类似滑坡工程评价和治理具有较大的借鉴意义。

参考文献

[1] 陈军. 雅安东岳庙冰水堆积物滑坡降雨入渗及其灾变机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2023.

-
- [2] 郭英华. 四川江安大井加油站滑坡形成机制及稳定性研究[J]. 中国西部科技, 2011, 10(17): 6-7, 10.
 - [3] 吴亚子, 朱建东, 李福德, 等. 观音滩滑坡变形特征及稳定性分析[J]. 河北水利电力学院学报, 2020, 30(1): 24-29.
 - [4] 中国地震局. GB18306-2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
 - [5] 黄润秋, 李守定, 陈国庆. 三峡库区八字门滑坡变形机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1125-1136.
 - [6] 杨志华, 王兰生. 贵州某顺层岩质滑坡滑带土特性与失稳机制[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 134-141.
 - [7] 林峰, 张建国. 福建某旋转滑坡变形特征与稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(4): 78-85.
 - [8] 郑建国, 刘小伟. 云南红层顺层滑坡降雨诱发机制与防治对策[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1563-1572.
 - [9] 聂天宇. 基于热敏性材料滑坡物理模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
 - [10] 黄庆亮. 苍溪县雍河场滑坡形成机制及稳定分析研究[J]. 中华民居, 2012(3): 213-214.