

兴仁围豹滑坡形成条件及诱发机制探讨

陈寿稀^{1, 2} 廖德武¹ 兰中孝¹ 郑冰¹ 杜艳松¹ 王源¹¹

(1 贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2 贵州省地矿局地球物理地球化学勘查院

(贵州省地矿局 109 地质大队), 贵州 贵阳 550018)

【摘要】: 在亚热带暖温湿润季风气候区, 以兴仁围豹滑坡为研究对象, 探讨含软弱夹层的顺层滑坡的形成条件及诱发机制。通过实地调查滑坡所在地区的自然地理、气候水文、地形地貌、工程地质、地质构造等有直接影响的环境条件, 运用理论综合分析探讨围豹滑坡诱发机制, 结果表明: 围豹滑坡形成原因为特定的环境条件及人类活动, 雨水入渗软化滑动面及静水压力相互作用诱发滑坡。

【关键词】: 兴仁围豹滑坡 形成条件 诱发机制 软弱夹层 顺层滑坡

【中图分类号】: X915. 5 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1003-6563(2022)04-0072-05

0 引言

2018年8月9日晚23时20分左右, 兴仁市马崖镇哪鲁村围豹六组突发顺层滑坡灾害(以下称围豹滑坡)^[1], 造成3栋房屋损毁。因险情把控准确、主动避让果断, 实现该地质灾害的成功避让, 避免了18人因灾伤亡, 确保滑坡影响范围内的生命财产安全。

围豹滑坡为基岩顺层滑动失稳, 基岩顺层滑动是贵州省较为典型的灾害类型, 贵州山区乡镇发展建设过程中受自然、人为工程活动因素影响, 大多沿基岩层面或岩土接触面失稳或复活。目前, 相关学者对滑坡形成条件以及诱发机制开展了大量的研究, 如阿塔巴德滑坡形成条件与诱发机制分析^[2], 软弱结构面岩质边坡断面开挖不大时不会出现沿软弱结构面产生破坏^[3], 软弱夹层顺层岩质边坡在工程建设活动过程中开挖切脚形成临空面, 诱发软弱夹层岩质顺层滑坡^[4], 重庆云阳鸡扒子滑坡主要由强降雨诱发^[5], 云南小湾引水沟堆积体由于不合理削坡而发生复活变形^[6], 兰州市安宁区凤凰山上洼子滑坡形成条件开展了研究^[7], 青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价^[8], 岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特征及其诱发机制^[9], 综上所述, 较多学者对大型滑坡形成机制与诱发因素开展了相关工作并取得丰富成果, 但对诱发在山区农村小型顺向岩质滑坡的形成及诱发的研究相对偏少。

鉴于此, 本文以围豹滑坡作为研究对象, 对山区农村小型顺向滑坡的形成及诱发开展相关工作并展开探讨, 揭示顺层岩质滑

作者简介: 陈寿稀(1968-), 男, 高级工程师, 主要从事工程地质及水文地质方面的工作。廖德武(1981-), 男, 正高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质及环境地质方面的工作。

基金项目: 贵州省科技计划(社会攻关计划)项目(黔科合 SY 字[2015]3057);黔地矿科合[2017]36 号

坡的形成及诱发的内在因素，为山区农村建设过程中防灾减灾工作提供相关的理论技术支撑。

1 围豹滑坡形成条件

围豹滑坡的形成具有特定的地质地貌环境条件。其形成的基本条件主要包括自然地理、气候水文、地形地貌、工程地质条件及地质构造等。

1.1 自然地理条件

研究区位于兴仁县马马崖镇哪鲁村围豹六组，位于兴仁县城北西 56km，行政划分归属马马崖镇管辖。

1.2 气候水文条件

研究区属亚热带暖温湿润季风气候区，为夏湿冬干温和区域，平均气温 15.2℃，7 月至 8 月均温度 21~22℃，日最高气温约 32.5℃；1 月气温最低，月均约 6.1℃，日最低气温-3.5℃。据图 1 资料，多年最大降雨量为 1576.00mm，多年最小降雨量为 884.00mm，多年平均降雨量 1241.11mm；5 月至 9 月为丰水季节，12 月至次年 3 月为枯水季节，雨季集中在 5 月至 8 月。据图 2 资料，多年月最大降雨量在 6 月份，为 298.05mm，多年月最小降雨量在 2 月份，为 17.74mm，多年月平均降雨量 103.43mm。研究区雨水充沛，为滑坡形成及诱发提供了动力条件。

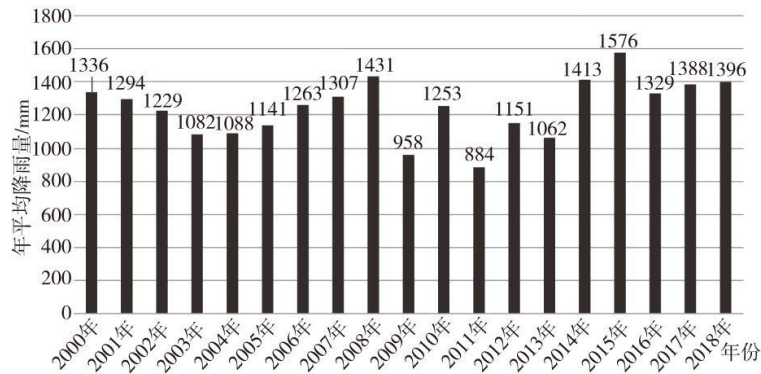


图 1 多年年平均降雨量资料图

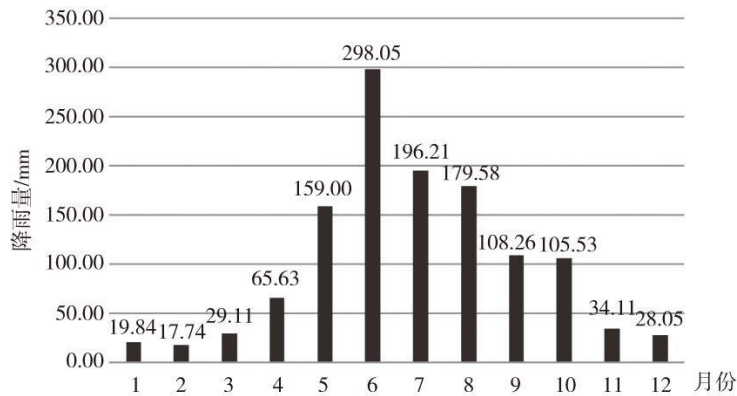


图 2 多年月平均降雨量资料图

1.3 地形地貌条件

研究区为溶蚀地貌，地形起伏较明显，属于典型的中山溶蚀地貌特征，总体地势为西部高、东北低，最高点为滑坡体后缘的刘家坡山顶(高程约 1274.1m)，滑坡前缘位于研究区南部围豹(高程约 1242.4m)，相对高差约 28.7m。灾害点标高为 1274.10~1242.00m 之间，其地形地貌的主要特点为西高东低斜坡地貌，地形坡度为 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，平均 23° ，地势较缓，裸露岩层溶沟溶槽随处可见，植被覆盖率较高，根劈作用显著。研究区典型的地形地貌特点为区内滑坡灾害的孕育与发生提供了充分的能量条件。

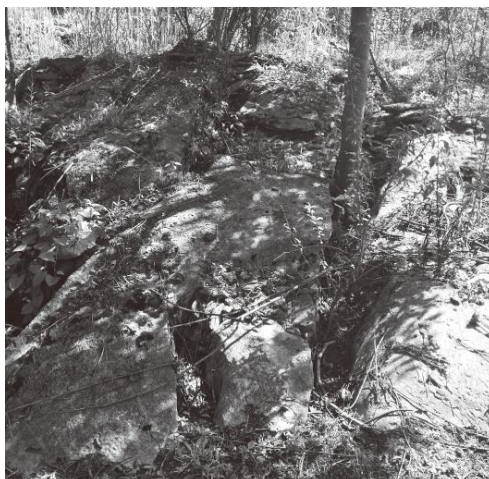


图 3 研究典型的地形地貌条件

1.4 工程地质条件

研究区为浅海台地相沉积区，滑坡区内地层主要有第四系耕植土(Q4pd)和三叠系关岭组(T₂g)基岩构成。耕植土，褐色，含植物根系，以粘土为主，夹 35%~45%的碎石，结构松散，孔隙较大；基岩为灰色中厚层夹薄层灰岩，层间夹软弱夹层(图 4)，软弱夹层为厚 1.2~36mm 的泥化夹层，成分粘土含量在 70%~80%。滑坡体后壁较陡呈多级台阶状，陡坎坡度为 $50^{\circ} \sim 76^{\circ}$ ，岩体节理裂隙发育，岩体极其破碎，植被发育，滑面多处可见清晰的擦痕，擦痕形成的方向与滑坡的主滑方向相同，滑面光滑。岩体在雨水、日晒等外部因素影响下易风化形成松散物源，松散物源为滑坡提供了物质条件。



图 4 滑坡后缘及滑面软弱夹层

1.5 地质构造条件

研究区大地构造位置属右江造山带晴隆—安龙构造变形区中部，主要构造线整体呈北东向分布，滑坡区地质构造条件复杂，其主要褶皱及断层有大石板背斜、鹧益断层。岩层产状为 $22^\circ \angle 20^\circ$ ，根据现场调查，主要发育 3 组节理： $①46^\circ \angle 83^\circ$ ， $②155^\circ \angle 77^\circ$ ， $③256^\circ \angle 86^\circ$ ，表层风化较强，节理裂隙面张开 $0.5 \sim 4.9\text{mm}$ ，最大可达 5.3mm ，层面粗糙，充填有粘土、岩屑等物质，连通性较好，受断层及褶皱作用的影响，岩石节理裂隙发育，岩体结构破碎。

1.6 人类工程活动

研究区人类工程活动强烈，破坏地质环境严重，对地形地貌、工程及水文地质条件的破坏，主要表现为公路及民房工程建设形成人为边坡，在降雨和其他因素的诱发下极易产生滑坡。

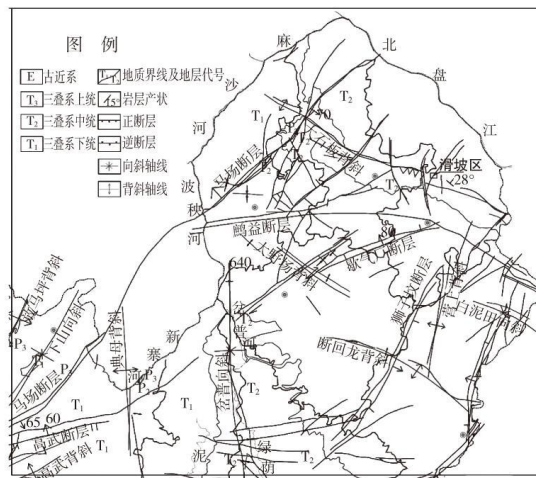


图 5 研究区构造分布图

2 滑坡稳定性及起动条件分析

2.1 滑坡稳定性分析

根据斜坡临空面产状、岩层产状及节理裂隙面产状采用赤平投影分析定性分析(图 6)，斜坡临空面倾向与岩层倾向一致，为顺层岩质斜坡，临空面倾角大于岩层倾角，斜坡处于不稳定状态，有沿岩层层面滑动失稳的条件。

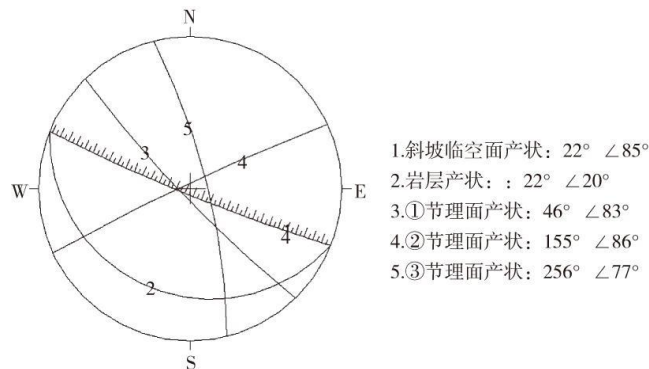


图 6 斜坡赤平投影分析图

2.2 滑坡起动条件分析

对于沿平面发生变形是否产生的条件，根据陈明东^[10]对岩体结构及变形特征分析，当不考虑岩体内聚力 C, 可用岩层倾角 α 与滑面的内摩擦角 ϕ 来判断滑坡是否起动的依据，即起动角是滑面的倾角。据此按力学原理进行分析，当滑块存在约束边界时，判断滑块是否起动的依据是岩体节理面走向与滑移面走向夹角 β 的大小，在 α 不很大时，临界条件表达式为：

$$\beta_0 = \cos^{-1} A \left(\frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right) - B \quad (1)$$

$$\text{其中, } A = \frac{L}{\sqrt{L^2 + b^2}}, B = \tan^{-1} \frac{b}{L}$$

式中，L 和 b 分别为被裂隙分割块体的长度和宽度，当 $L \geq b$ 时，表达式简化为：

$$\beta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right) \quad (2)$$

根据现场实际调查，选取控制性滑块计算岩体临界起动角为：

$$\beta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{\tan 11^\circ}{\tan 22^\circ} \right) = 61.31^\circ$$

式中， 11° 为试验测试的滑面软弱夹层内摩擦角， 22° 为岩层倾角，岩体节理面走向与岩层走向夹角分别为 24° 、 47° 、 54° ，均小于岩体临界起动角 61.31° ，说明斜坡具备滑移的条件。

2.3 静水压力作用分析

坡体节理裂隙发育，当坡体前缘临空则会导致坡面产生卸荷现象，当地表水沿卸荷裂隙下渗至滑面产生静水压力作用，对滑面以上滑体部分产生浮托力，对滑面以下产生压力，则静水压力在滑体单位面积上表达为：

$$P = \gamma_w (H - Z) \quad (3)$$

式中：P 为静水压力 (MPa)； γ_w 为水的容重 (取 $9.8 \times 10^3 \text{N/m}^3$)；H 为地下水水头高程 (m)；Z 为滑动面上任意点高程 (m)。

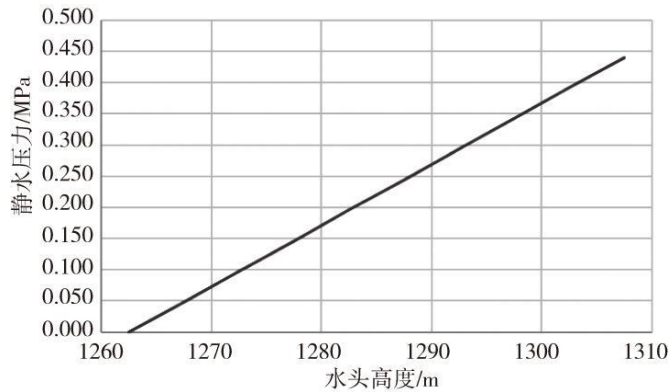


图7 静水压力与水头高度的关系

结合滑坡区水文地质条件，临空面剪出口标高为 1262.87m, 后缘裂隙入渗点标高为 1311.51m, 则坡体后缘静水压力为：

$$\begin{aligned}
 P &= \gamma_w (H - Z) \\
 &= 9.8 \times 10^3 (1311.51 - 1262.87) = 0.47 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

据静水压力与水头高度的关系图分析，静水压力大小与水头高度大小呈线性关系，静水压力对软弱结构面向下产生压力，向上产生浮托力，破坏软弱结构面原有的结构，导致滑动面的形成。

3 围豹滑坡形成机制

对围豹滑坡形成条件分析，结合地形地貌条件、岩土构成特征、地质构造特点等，推断该滑坡孕育与演化过程分为 4 个阶段 (图 8)。

3.1 结构面孕育阶段

该原始条件下斜坡受大石板背斜、鹫益断层构造作用影响，岩体受到挤压作用，导致岩体次生节理裂隙发育，岩体本身物理力学性质逐渐变差，与原生结构相比抗风化及抗侵蚀能力相对减弱。由于滑坡区处于亚热带暖温湿润季风气候区，雨水充沛。在风化作用及雨水作用影响下，斜坡岩体内部裂缝进一步发育并产生延伸现象，此阶段节理裂隙未形成贯通。

3.2 前缘临空面形成阶段

此阶段主要是受人类建设过程活动强烈的影响，公路及民房工程建设，对斜坡进行切脚形成顺向临空面，坡脚开挖沿岩层走向进行开挖，形成坡向与岩层倾向一致的临空面，基岩的软弱夹薄层面在临空面暴露。

3.3 后缘裂缝形成阶段

该阶段由于滑坡区前缘已形成临空面，改变了岩石原来的应力状态，岩体的应力状态要进行重新分布，在岩体重力作用的影响下，软弱结构面作为滑面，斜坡沿滑面存在向临空的方向发生滑移破坏现象，斜坡中后部在前缘滑移过程中受到牵拉作用，斜坡岩体沿节理裂隙面向临空面产生裂隙，并在雨水作用下沿软弱夹层逐渐形成贯通。

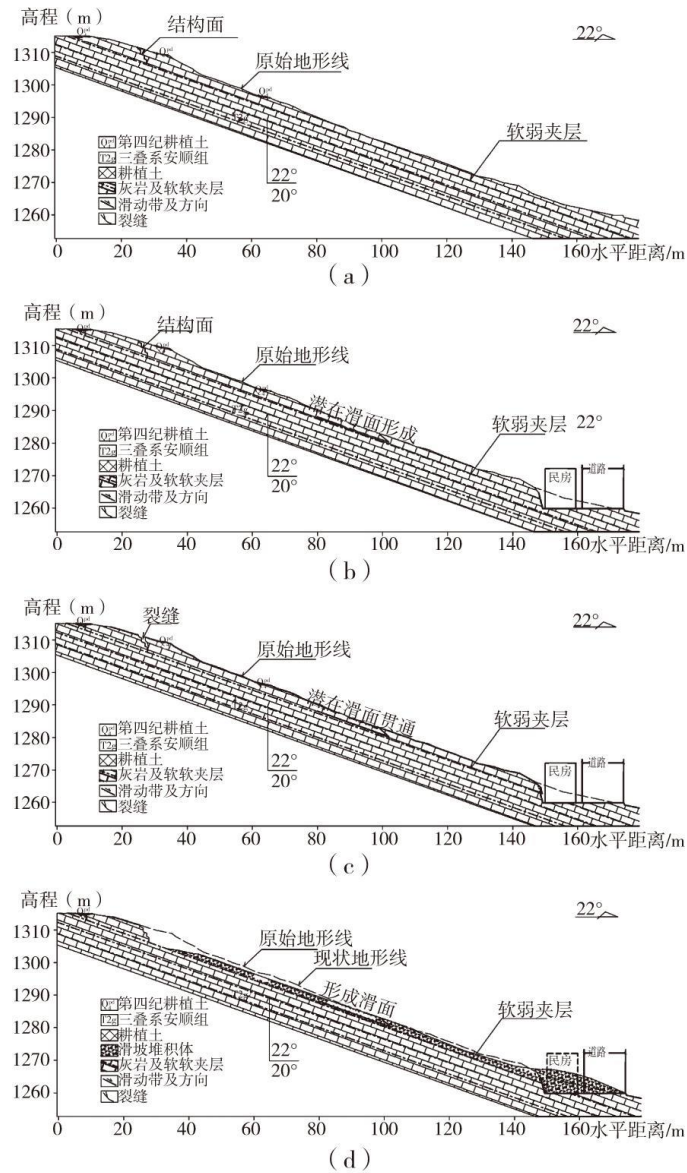


图 8 滑坡演化过程分为 4 个阶段

3.4 滑移起动产生阶段

斜坡岩体节理裂隙面与岩层软弱夹层形成贯通，在风化及雨水共同作用下，由于斜坡前缘已经存在临空面，斜坡岩体在自重作用条件下，岩体产生卸荷现象，导致岩体本身向斜坡方向进一步产生滑动，当雨水沿后缘裂隙下渗至岩层软弱夹层，软弱夹层物质在雨水作用下进一步软化，其抗剪强度指标逐渐降低，当斜坡的下滑力大于抗滑力时，导致斜坡岩体形成整体滑动。

对上述条件分析：当斜坡前缘形成临空面时，斜坡沿临空面产生卸荷现象，雨水入渗软化滑面及静水压力相互作用，斜坡岩体向临空面产生滑移，斜坡前缘岩体沿软弱夹层面产生滑移，后缘岩体沿节理裂隙产生拉裂破坏，形成滑移-拉裂型滑坡。

4 结论

(1)在亚热带暖温湿润季风气候区特殊的自然地理、气候水文、地形地貌、工程地质、地质构造及人类活动孕育了兴仁围豹滑坡。

(2)通过对滑坡稳定性及起动条件分析：斜坡临空面倾向与岩层倾向一致，具备沿岩层倾角产生失稳的条件；岩体节理面走向与岩层走向夹角分别为 24° 、 47° 、 54° ，均小于岩体临界起动角 61.31° ，具备了滑移的条件；静水压力作用为滑坡提供了动力条件。

(3)通过理论综合分析探讨，围豹滑坡可分为结构面孕育阶段、前缘临空面形成阶段、后缘裂缝形成阶段及滑移起动产生阶段4个阶段；雨水入渗软化滑面及静水压力相互作用形成滑移-拉裂型滑坡。

参考文献：

- [1]兰中孝,王忠福,廖德武,等.兴仁县马马崖镇哪鲁村围豹六组滑坡地质灾害应急调查报告[R].贵阳:贵州地矿基础工程有限公司,2018.
- [2]陈文涛,杨志全,朱颖彦,等.阿塔巴德滑坡形成条件与诱发机制分析[J].中国安全科学学报,2020,30(11):148-155.
- [3]廖德武.软弱结构面岩质边坡支护工程实例与分析[J].贵州科学,2019,37(2):26-30.
- [4]廖德武,程娟.软弱夹层顺层岩质滑坡形成机制及稳定性分析[J].地质灾害与环境保护,2019(2):8-13.
- [5]李曰国,杨淑碧.云阳鸡扒子滑坡发育特征[C]//全国第3次工程地质大会论文选集(下卷).成都:成都科技大学出版社,1988:946-952.
- [6]杨根兰,黄润秋,严明,等.小湾水电站饮水沟大规模倾倒破坏现象的工程地质研究[J].工程地质学报,2006,14(2):165-171.
- [7]伦国星,崔志杰,贾昊冉,等.兰州市安宁区凤凰山上洼子滑坡形成条件及稳定性分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2015,51(6):803-808.
- [8]王占巍,赵发睿,谢文萃,等.青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价[J].水土保持通报,2020,40(3):81-87.
- [9]徐舜华,吴志坚,孙军杰,等.岷县漳县6.6级地震典型滑坡特征及其诱发机制[J].地震工程学报,2013,35(3):471-476.
- [10]陈明东,王兰生.链子崖危岩体变形破坏机制及整治对策[J].地质灾害与环境保护,1991(1):33-42.