Reactivation Characteristics and Failure Mechanism of the Hongyan landslide

Suichuan Ren[1], Ran Tang[1*], Huajin Li[1]

[1] *School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China*

[*] *Corresponding author. Email: 546488149@qq.com*

ABSTRACT

This paper studies the Hongyan landslides with complex reactivation mechanisms induced by human engineering activities. Through field investigation, drilling, in site monitoring and numerical simulation, the reactivation characteristics and instability mechanism of the Hongyan landslide were systematically studied. The results show that the regional lithology, topographic characteristics, geological structure and engineering activities have a certain promoting effect on the reactivation of the Hongyan landslide; the existence of clay in the sliding body and the layered structure in the sliding body enhances the sensitivity of the slope. The free surface of the slope creates favorable conditions for the subsequent deformation of the sliding body; the sliding body is mainly the ancient landslide accumulation body, and the layered structure before the slope sliding is retained in the ancient landslide accumulation body; the excavation of the slope reduces the anti-sliding force and changes the free surface conditions, which directly leads to the reactivation of the landslide; during the deformation process, due to the change of the free surface conditions, the sliding body shows the characteristics of counterclockwise deflection. The reactivation of the Hongyan landslide is the result of the interaction of multiple inducing factors, and its instability mechanism is complex. This study is of great significance for the hazard evaluation of such ancient landslides.

Keywords: Ancient landslide, Reactivation, Excavation, Stratified Structure, Failure Mechanism.

红岩村老滑坡复活特征与失稳机理研究

任穗川 [1]， 唐然 [1*]， 李骅锦 [1]

[1] *成都大学 建筑与土木工程学院，四川 成都，610106*

[*] *通讯作者. 电子邮箱: 546488149@qq.com*

摘要

本文研究了在人类工程活动影响下具有复杂复活机理的红岩滑坡。通过野外调查、钻孔和现场监测等方法，系统研究了红岩滑坡的复活特征和失稳机理。结果表明：区域岩性、地形特征、地质构造和工程活动对红岩老滑坡的再复活有一定的促进作用；滑体和滑体中层状结构内粘土的存在增强了边坡的敏感性。边坡的临空面为滑体的后续变形创造了有利条件；滑体主要为老滑坡堆积体，老滑坡堆积体内保留有斜

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_21

坡滑前的层状结构；边坡开挖降低了抗滑力，改变了临空面条件，直接导致滑坡复活；在变形过程中，由于临空面条件的变化，滑体呈现出逆时针偏转的特征。红岩老滑坡的复活是多种诱发因素相互作用产生的结果，其失稳机理复杂，本研究对此类老滑坡的危险性评价具有重要意义。

关键词：*老滑坡, 复活, 开挖, 层状结构, 失稳机理*

1. 引言

国外学者把第四纪以来发生的滑坡统称为古滑坡，国内将发生在全新世后的滑坡细分为老滑坡[1]。近年来，受人类工程活动与极端天气影响，降雨等自然事件与开挖卸荷等工程扰动已成为诱发老滑坡复活的主要因素[2]。这类滑坡具有隐蔽性与敏感性，往往造成的广泛破坏与严重的生命财产损失，且古（老）滑坡的变形失稳机理复杂[3]。因此，深入研究古（老）滑坡的复活特征和失稳机理具有重要意义。

老滑坡的复活过程通常是由多种因素的共同作用导致的，不同的因素对滑坡的变形过程起到不同的影响[4, 5]。一些学者的研究表明，地震对老滑坡的复活有一定的促进作用。老滑坡在滑动堆积后达到了一定的内部平衡，而当地震发生后堆积体内的平衡状态被打乱，从而导致之后的滑坡复活。短期强降水或季节性降水会降低老滑坡岩土体的强度与力学性能，同时使岩土体内孔隙水压力升高，促进斜坡内部形成连通的滑带，最终沿滑带滑动破坏。随着人类工程活动的不断扩大，在滑坡的各种诱发因素中，人类工程活动如边坡开挖或水库蓄水等逐渐从关键因素转变为决定性因素[6, 7]。例如，开挖坡脚会破坏原有的应力平衡导致边坡失稳，边坡趾部的开挖将显著降低其抗滑力，从而直接促使滑坡的复活。

红岩村滑坡位于贵州省贵阳市东南部，是地质构造活动强烈的地区。8-9 月，边坡坡面变形迹象明显，如果发生滑坡灾害，将堵塞临近河道，造成重大的生命财产损失。本文以红岩滑坡为例，采用现场调查、野外勘探和深部位移监测等手段，系统研究了老滑坡的复活特征和失稳机理。红岩老滑坡由工程活动和地质构造等多种诱发因素共同作用使老滑坡堆积体的再复活，因此其滑坡复活机理复杂。这项研究成果将为老滑坡复活的运动特征、触发因素和潜在演化模式的理解提供新的参考。

2. 研究区概况

2.1 研究区地质与地貌条件

研究区域位于南明区红岩村东侧，红岩老滑坡北侧为南明河，与河道最近距离 20m。研究区地处扬子准地台的黔南台陷贵定南北向构造变形区。根据野外调查和构造分析，区内构造活动频繁，主要存在 4 条断层将老滑坡和南明河包围。其中高枧断层位于斜坡台地南部，走向 NW20°，西向为一条北东向断层，走向 NW70°，均为正断层性质，东西向两端均有南北走向的逆断层。区域内地形主要受构造运动和侵蚀作用的影响，形成了中低山河谷地貌，表现为东高西低、南陡北缓，南边坡度可达到 25°到 40°。研究区海拔高度在 1033~1242m，高程差约 209m。该边坡中前缘部分可见明显人工开挖而形成的多个近乎垂直的台阶，最高的台阶达到 20.8m，平均倾斜度为 10~15°。

2.2 研究区地层岩性

通过野外调查、探槽和钻探，揭示了地层的岩性和分布特征。研究区地层主要由第四纪全新世滑坡堆积物(Q_4^{del})、泥盆纪莽山组(D_2m)和志留系高塞田组(S_2g)组成。基岩地层一般为单斜构造，倾角为 143°，倾角为 17°（**图 1**）。地质单元包括 D_2m 中的石英砂岩，S_2g 中的粉砂岩、灰岩和泥灰岩，以及在不同深度的层中反复出现的泥页岩和粘土岩。斜坡区的硬岩主要为灰岩和泥灰岩，特点是硬度大、结构致密、强度高。软岩主要为完全风化的泥岩、粉砂岩和石英砂岩，这些岩石强度低，稳定性差。特别是泥岩，浸水后容易软化，再暴露在阳光下更容易发生崩解。基岩层结构

复杂，按剖面 1-1'可分为 VI 层，从第 II 层到第 VI 层厚度逐渐增加，第 I、II、III 层基岩滑动形成堆积区。根据滑后堆积物的岩性，将坡面划分为堆积 I 区、堆积 II 区、堆积 III 区 3 个区(**图 2**)，分别以石英砂岩、粉砂岩为和生物碎屑灰岩为主，其中堆积区的粉砂岩在开挖过程中多数被清除。老滑坡堆积物保留了较完整的原始分层结构。但与基岩相比，砾石土的层状结构姿态发生了明显变化。粘土含量高的页岩、泥岩和粘土岩强度低，在多种外部因素的影响下容易发生软化和泥化。因此，层状结构之间普遍存在软弱层，也存在发育的节理和裂隙。由于内外生地质作用的共同影响，堆积区岩土体主要以砾石和块石为主，其间以粉质粘土充填。

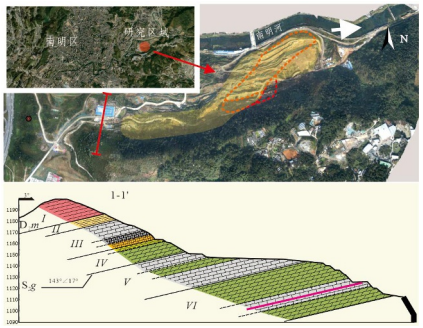

图 1 红岩村滑坡全貌与地层岩性。I 石英砂岩；II 砂岩、粉砂岩、粘土岩夹层；III 灰色石灰岩、生物碎屑灰岩、黄色砂质泥岩；IV 灰黄色粘土岩、灰绿色泥灰岩、粘土岩夹层；V 灰色石灰岩、灰绿色泥灰岩夹层；VI 石灰岩、泥灰岩、粘土岩。

2.3 研究区老滑坡基本特征

老滑坡在历史上发生过大规模长距离滑动，致使现平面形态呈 EW~NEE 向长条形，最大横向宽度为 205m，沿滑动方向长度约 800m，总面积为 0.15km^2。老滑坡堆积体厚度沿东北方向逐渐增大，遍布整个中部地区，最大厚度可达 50m。开挖现场出露岩土层显示，在老滑坡运动过程中，岩层受到挤压形成褶皱构造和反倾斜岩层，堆积区 III 地层走向由原来基岩同向的 SE 向转向 NE~NEE 向(**图 2**)。

图 2 老滑坡变形情况与结构特征

3. 复活滑坡的特征

3.1 红岩滑坡形态特征

红岩滑坡长 560m，最宽处达 115m，前缘海拔高度约为 1043m，后缘高约 1135m，主要滑动方向为 N30° E。滑体厚度约 12m~47m，体积约为 100 万 m^3。根据地表和深部位移监测结果表明，滑坡目前处于均匀变形状态。根据不同的变形类型和地貌表现形式，将滑坡区划分为主滑区、牵引变形区和受压区三个区域。

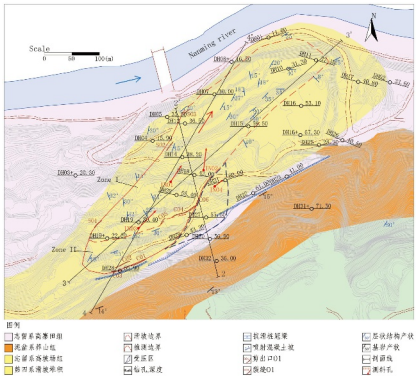

图 3 红岩滑坡工程地质平面图

主滑区地形坡度为 5~20°，坡表主要为工程开挖产生的不稳定边坡。区内高程 1043~1116 m，堆积体厚度 28~47m。老滑坡堆积体覆盖基岩 IV~VI 层，主要由灰岩、泥页岩、石英砂岩组成。滑体主要以砾质土的形式存在，砾石约占 60%，其余部分为粘土。层状结构中软岩层被软化为粉质粘土性质的软弱带，粘粒含量高于老滑带。滑动体主要由含石英砂岩和含生物碎屑灰岩的砾石土组成。滑床主要为老滑坡生物碎屑灰岩堆积层，其层状结构保持良好。中、后滑移面沿生物碎屑灰岩弱夹层分布。由于前部滑体内未见生物碎屑灰岩堆积，且石英砂岩堆积层中没有优势滑动面。据此推断，前部滑面属于原本的老滑面。

牵引变形区地势平缓，以南部支护结构为主，高程在 1116～1135m 之间，堆积体厚度为 5～28m。牵引变形区位于滑坡后缘，堆积体厚度较主滑区明显减小。牵引变形区滑动面较缓，滑动面倾角仅在与主滑区交界处才与主滑区一样陡；区内滑体成分与主滑区相似，但牵引变形区内的滑动面需要贯穿两类砾石土，但石英砂岩的砾石土层中不存在连续的软弱带，可判断牵引变形区滑力要小于主滑区。

受压区的西北部为红岩滑坡的东部边界，抗滑桩顶梁布置在受压区内。随着滑坡的变形，梁体表面裂缝不断出现，冠梁从西侧向东侧被滑坡剪断，可见受压区受到了红岩滑坡变形的滑力，其方向为 NEE 向。

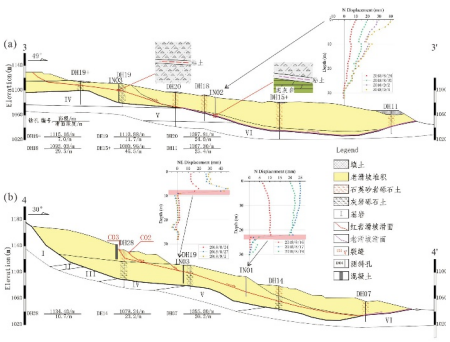

图 4 红岩滑坡剖面图

3.2 地表变形特征

根据对当地工作人员所记录，首次观察到滑坡区域的变形和裂缝时间为 2018 年 6 月。2018 年 3 月，在研究区以南 S_2g、D_2m 地层边界附近进行了水平开挖和抗滑桩施工。施工过程断断续续持续到 7 月中下旬。6 月 8 日，抗滑桩顶梁开始出现剪切裂缝。到 7 月 7 日，冠梁沿裂缝被剪断，其中一段上升了 35 厘米，裂缝宽度为 40 厘米。从 7 月 30 日开始，冠梁不同部位出现了更多的剪切裂缝，并不断变宽。部分冠梁在 8 月中旬被剪断，随后冠梁东部继续形成剪切裂缝。剪切裂缝的形成标志着滑坡早期蠕变的趋势，蠕变至少持续了一个月。

直到 8 月初边坡陆续出现地面裂缝，主要出现于边坡的南部。一开始，边坡中部道路东侧出现的剪切裂缝可归类为 C06，3 条平行分布的剪切裂缝，裂缝间距为 2~3 m，长度为 4~5m。随后，陆续发现张拉裂纹，坡段平台下方发育张拉裂缝 C04，深度为 5~30cm，C04 向西 10 m 处 C05，宽 1~5cm。喷射混凝土边坡见 C01，长 50m，后方土体沉降约 10cm。抗滑桩前方出现张拉裂缝 C02 和 C03，长度为 20~30 m，宽度为 1~10 cm。可见裂缝深度为 5~10cm。

平整开挖对老滑坡的复活有积极影响。在 3 月至 5 月 24 日期间，已将坡前区域开挖至海拔 1078 m。随后，从 5 月 24 日至 7 月 21 日，它被挖掘到海拔 1068 米。8 月 25 日，在平台高程 1068 m 处发现了一个剪出口，长度为 15m，剪出口剪出长度为 30cm，可见灰黄色粘土层构成的光滑滑带。随后，8 月 30 日，在边坡东南段和东北段发现剪出口 SO2 和 SO3，剪出口 SO2 出露于生物碎屑灰岩内，可见灰色泥岩夹层为滑动带，剪切出口 SO3 位于老滑坡堆积体内部。

3.3 深部位移情况

测斜仪的位置如图 3 所示。位移曲线如图 5 所示。监测数据为 8 月-9 月底。8 月 23 日，探测器在 IN01 钻孔下潜至 23 米深时遇到障碍物，该钻孔入口标高为 1098.43 米。测斜仪测量结果显示，上部岩体的滑动方向和位移相似，可视为一个块体，该块体沿约

1m 厚的滑动带连续变形，位于 23m 处。9 月 28 日，探测器在 IN03 钻孔下潜至 9 米深时遇到障碍物，测量结果与 IN01 接近，块体沿约 2~3m 厚的滑动带连续变形，位于 9m 处。IN02 测斜仪的测量结果显示，滑动体沿临空面不断变形，且滑动体在东侧的压力逐渐减小，IN02 的最终位移方向如图 3 所示，说明该孔的位移主要向北方向移动。IN04 的变形相对较小，主要在 0~23m 深度向东变形，最大位移为 12mm，该孔测量结果证明 IN03 所在的区域不断受到滑体的挤压。

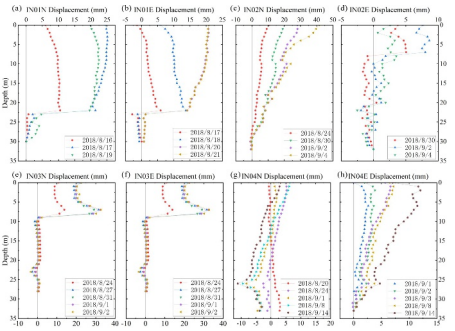

图 5 测斜孔监测曲线图

4. 红岩滑坡复活与失稳机理

4.1 复活机理

对于红岩滑坡来说，人类工程活动是导致滑坡复活的重要诱发因素之一。在边坡区域内进行的人类工程活动主要涉及边坡开挖。根据开挖时间的不同，开挖可分为三个阶段：2013 年以前，主要为当地农民耕地。2013 年至 2014 年，第一阶段开挖主要针对南明河河道附近的坡脚，开挖后在河上架桥，沿河道修路。斜坡开挖工作直到 2017 年 10 月至 12 月才恢复。第二阶段开挖主要集中在边坡中后部分。随后，2018 年开始第三阶段开挖，主要集中在边坡中前部分，开挖时间从 3 月持续到 7 月下旬。这三次开挖是引起边坡地形变化的主要原因。

老滑坡堆积体在滑动堆积过程中，仍有部分未释放的应变能储存在其内部。第一阶段开挖释放了堆积体内部的一些应力，导致堆积体内部发生了卸荷回弹变形。第二阶段开挖对边坡后缘进行卸载，有一定积极作用。随后，针对滑坡构造高度发育的区域进行第三阶段开挖，导致内部大量残余应力释放，边坡表现出明显的卸荷回弹变形。此时，边坡沿堆积体内软弱层倾斜方向向开挖临空面方向蠕变。在变形过程中，随着软层发生剪切变形，软弱层的强度逐渐由静摩擦向动摩擦强度转变。随着变形的增大，软弱层逐渐转变为滑带。

4.2 失稳机理

本文提出的红岩滑坡失稳机理主要基于监测资料和地质调查。一些识别证据可以用来说明边坡破坏的机理：(1)滑坡滑动方向主要受滑坡后缘的生物碎屑灰岩控制，其倾角 60°～80°，倾向为 15°～30°；(2)测斜数据显示，滑坡变形过程中出现逆时针方向的偏转；深部位移监测表明，红岩滑坡滑动面主要沿生物碎屑灰岩堆积内的软弱层分布，软弱层沿层状构造分布。

红岩滑坡的破坏机制可归纳为以下四个阶段：第 1 阶段剪切变形：此阶段边坡开挖导致边坡卸荷回弹，边坡沿软弱层发生剪切变形。沿生屑灰岩堆积层结构分布的粘土层力学强度低于老滑坡滑动面，灰岩堆积层结构控制滑坡变形。此时变形主要发生在滑坡后缘，且随时间逐渐增大，主滑动方向为 N60~80° E。块体 1 和块体 3 沿层状结构倾向滑动。第 2 阶段阻碍变形：此阶段滑体变形受到边坡阻断，滑体不断挤压受压区，块体 2（受压区）受到块体 1 和块体 3 滑动变形的挤压。受压区临空条件差，东北部为长缓坡，南侧为高陡坡。在滑体变形过程中，受压区土体受到挤压，表现为由西向东出现冠梁裂缝。第 3 阶段逆时针偏转：此阶段滑体在 NEE 向已无变形空间，滑动方向只能向临空条件较好一侧偏转。块体 3 同时受到块体 1 的推动和块体 2 的阻碍，块体 3 若要继续滑动，必须改变滑动方向，NNE 向滑体经人工开挖后呈现多级台阶状。第 4 阶段滑动破坏：此阶段滑面逐渐贯通，后方滑体推动前方滑体滑出，块体 3 滑动方向偏转后，向块体 4 推挤。最后，在块体 1 和块体 3 的共同影响

下，块体 4 滑动破坏。

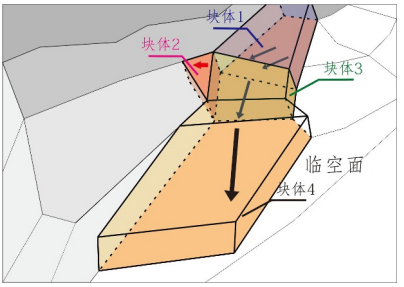

图 6 红崖村滑坡失稳机理模式图

5. 结论

本文以红岩滑坡为例，通过现场勘察监测等手段对滑坡进行深入的研究，主要得出以下结论：

（1）红岩滑坡是老滑坡堆积体的局部复活，主要滑动方向为 N30° E。红岩滑坡变形方向主要受滑坡后缘生物碎屑灰岩层控制。这种地质构造使滑坡更容易复活。其次，临空面条件决定了滑坡的变形过程和方向。

（2）红岩滑坡复活是地质构造、地貌和工程活动等因素共同作用的结果。其中，人类工程活动是导致红岩滑坡复活的决定因素。

（3）边坡开挖导致堆积体内部卸荷反弹，沿软弱层倾斜方向变形，直到倾斜方向滑体再没有进一步变形的空间，滑体只能向临空条件较好侧偏转。卸荷效应和有利的临空条件共同导致红岩滑坡滑体由北东向向北东向发生逆时针偏转。

参考文献

[1] Zhang, Y. S.;Wu, R. A.;Guo, C. B.;Wang, L. C.;Yao, X.;Yang, Z. H., "Research progress and prospect on reactivation of ancient landslides," Advances in Earth Science 33(7), 728-740 (2018). https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2018.07.0728

[2] Ma, S.;Qiu, H.;Hu, S.;Yang, D.;Liu, Z., "Characteristics and geomorphology change detection analysis of the Jiangdingya landslide on July 12, 2018, China," Landslides 18(1), 383-396 (2021). https://doi.org/10.1007/s10346-020-01530-3

[3] He, K.;Ma, G.;Hu, X.;Liu, B., "Failure mechanism and stability analysis of a reactivated landslide occurrence in Yanyuan City, China," Landslides 18(3), 1097-1114 (2021). https://doi.org/10.1007/s10346-020-01571-8

[4] Huang, X.;Wang, L.;Ye, R.;Yi, W.;Huang, H.;Guo, F.;Huang, G., "Study on deformation characteristics and mechanism of reactivated ancient landslides induced by engineering excavation and rainfall in Three Gorges Reservoir area," Nat. Hazard. 110(3), 1621-1647 (2022). https://doi.org/10.1007/s11069-021-05005-z

[5] Yin, Y.;Zheng, W.;Liu, Y.;Zhang, J.;Li, X., "Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiaju landslide in Sichuan, China," Landslides 7(3), 359-365 (2010). https://doi.org/10.1007/s10346-010-0225-9

[6] Yu, X.;Gong, B.;Tang, C. a., "Study of the slope deformation characteristics and landslide mechanisms under alternating excavation and rainfall disturbance," Bull. Eng. Geol. Environ. 80(9), 7171-7191 (2021). https://doi.org/10.1007/s10064-021-02371-7

[7] Zhang, C.;Yin, Y.;Dai, Z.;Huang, B.;Zhang, Z.;Jiang, X.;Tan, W.;Wang, L., "Reactivation mechanism of a large-scale ancient landslide," Landslides 18(1), 397-407 (2021). https://doi.org/10.1007/s10346-020-01538-9

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.