Mechanism of Earthquake-induced Bedding Buckling and Tension Landslide in Three-rivers Basin: Test and DEM Modeling

Chen Wang[1], Xue-Liang Chen[1,*]

[1] *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

[*] *Corresponding author. Email: chenxueliang007@126.com*

ABSTRACT

In the Three-rivers basin of the Qinghai-Tibet Plateau, bedding rock slopes frequently experience landslide disasters. Buckling and tension cracking are common failure modes of these bedding rock landslides, yet the mechanisms of crack propagation remain unclear. This study utilizes shake table experiments and discrete element analysis to investigate the dynamic characteristics and crack propagation mechanisms of the "Xiaguiwa" bedding rock landslide under earthquakes. A Voronoi diagram damage discrete element model was developed based on the shake table model for the bedding rock slope. Arias intensity and Hilbert-Huang Transform (HHT) energy methods were used to analyze the dynamic characteristics and damage mechanisms of the "Xiaguiwa" landslide. Numerical methods were employed to assess displacement, shear, and tensile crack propagation. Results indicate that seismic tensile forces led to the destruction of the slope's top deposit layer, with buckling failure first occurring at 1/4 elevation of the bedding rock slope. Buckling induced high-frequency energy surges, exceeding 40 Hz. Subsequently, shear deformation emerged at the rear edge, extending down along structural planes. This process coincided with a concave formation at half- elevation. The accumulation layer displayed varying impacts on seismic energy across different elevations, particularly amplifying low-frequency (<10 Hz) and high-frequency (>40 Hz) seismic energy. The rock structure, slope angle, and dip angle not only influence slope dynamics but also alter the instability mode of bedding rock slopes, with smaller dip angles resulting in greater instability. Shear and tensile cracks are interdependent, as shear cracks consistently emerge and propagate along tensile cracks. This study elucidates the dynamic characteristics and crack propagation mechanisms of bedding rock landslides, providing valuable insights for the study of crack propagation in jointed slopes.

Keywords: *Modeling Test, Crack Propagation, Rock Landslides.*

三江流域地震引发的顺层屈曲与拉裂滑坡的机理：实验与离散元模型

王晨[1]， 陈学良[1,*]

1 中国地震局地球物理研究所，北京 100081

通讯作者. 电子邮箱：chenxueliang007@126.com

摘要

© 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_13

青藏高原三江流域多发顺层岩质滑坡灾害，弯曲破坏和拉裂破坏是顺层岩质滑坡常见的破坏模式，其裂纹扩展机制是未知的。本文采用振动台实验和离散元研究了地震作用下下归洼顺层滑坡的动力特性与裂纹扩展机理。本研究参考振动台模型建立了顺层岩质斜坡的 Voronoi diagram 损伤离散元模型。Arias intensity 和 Hilbert-Huang transform（HHT）能量方法被用于分析下归洼屈曲滑坡动力特性和损伤机制。数值方法被用于分析滑坡的位移、剪切与张拉裂纹的扩展。结果表明，地震拉张作用导致了边坡顶部堆积层的破坏；顺层岩质边坡在坡面 1/4 高程处首先出现屈曲破坏，屈曲导致高频波能量突增，可达 40Hz 以上；随后，后缘处发生剪切变形，并沿结构面向下扩展；这一过程与坡面 1/2 高度处的凹陷同时发生。堆积层对不同高程地震能量的影响不同，对低频（<10 Hz）和高频（>40 Hz）地震能量的影响更为显著。岩石结构与坡角和倾角不仅对斜坡动力特征有影响，而且会直接改变顺层岩质斜坡的失稳模式，小倾角结构具有大不稳定性。剪切裂纹和张拉裂纹有依存性，剪切裂纹总是沿着张拉裂纹出现、扩展。这项研究揭示了顺层岩质滑坡的动力特性与裂纹扩展机制，为节理边坡的裂纹扩展研究提供了参考。

关键字：*模型试验, 裂纹扩展, 岩体滑坡*

1. 引言

地震作用诱发滑坡等次生灾害有时大于地震过程造成的直接危害。地震引发的地质灾害呈现出一系列与通常重力环境下地质灾害迥异的特征，包括独特的失稳机制、大规模的高速抛射、超强的动力特性与远程运动、大量山体震裂松动以及众多的崩滑堵江现象[1]。毫无疑问，青藏高原东南三江流域因其复杂的地形地质条件和良好的孕震条件而成为滑坡多发区。比较严重的例子是 2008 年汶川地震引发了超过 10000 次山体滑坡，造成了大量的人员伤亡和财产损失。顺层边坡在地震作用下极易诱发大型滑坡，比较典型的瓦伊昂滑坡、新磨滑坡、唐家山滑坡、东河口滑坡和大光包滑坡，其中汶川地震触发的大光包巨型滑坡是亚洲第一滑坡。

顺层岩质滑坡常见的两种失稳形式为滑移-拉裂和滑移-弯曲[2]。滑移-弯曲型滑坡一般可进一步发展为剪断型破坏，其破坏往往具有突发性。顺层边坡的破坏形式受控于边坡的结构特征。坡角与倾角大致相仿时易发生弯曲-剪断破坏，而在倾角小于坡角时易发生滑移-拉裂破坏。顺层边坡倾角和坡角夹角越小越容易发生滑坡。我们还发现一种罕见的失稳形式，倾角很大时，顺层边坡会发生倾倒-拉裂破坏。岩层的几何参数（方位角、倾角和位置）和节理的数量与分布等使得顺层边坡地震响应非常复杂。岩层内部存在的预存裂纹和结构面、节理为滑坡启动提供了路径。在地震波作用下，岩体的剪应力和拉应力增大，促使岩体内剪切裂纹和张拉裂纹的扩展。最终剪切裂纹和张拉裂纹与节理和结构面相贯通，演化成滑坡。地震波在顺层岩质边坡内的传播路径和裂纹的扩展机制尚未探明，这极大得阻碍了地震下顺层边坡损伤机制的认识。

相较于解析解和小型试验，数值模拟方法更容易解释整体变形机制。而且由于大型试验的高成本而导致无法重复进行，试验无法揭示具备不同结构和力学参数特征顺层岩质边坡的统一规律。节理边坡的力学模拟中，有限元（FEM），有限差分法（FDM），不连续变形分析（DDA）和离散单元法（DEM）是常用的方法。二/三维动态 FEM 被用于研究顺层岩质边坡中的波传播效应和损伤累积[3]。这些研究给出了边坡的地震反应放大特征。连续方法很难评定节理边坡中的裂纹扩展特征，这限制了对节理边坡如何发展为滑坡的认识。节理边坡的裂纹扩展机理一直是一个复杂的问题。这些研究仅仅给出了一个出现裂纹的范围且其是不自然的或极其简单的。

本文设计了 1g 振动台模型试验，再现了地震诱发顺层岩质边坡的滑移-屈曲破坏。Voronoi 多边形中被用于生成完整岩块内随机的缺陷，重现节理边坡裂纹扩展的过程。地震滑坡是极其复杂的过程，通过对地震波传播，

坡体裂纹出现、扩展和贯通，岩体运动，崩解等滑坡全过程的研究。更好的理解地震-诱发的顺层岩质滑坡的机理。

2. 研究区概况和方法

2.1 研究区

下归洼滑坡位于金沙江沿岸，长约 1850 m，宽约 1000 m，面积约为 1850km^2，滑坡平均厚度约 40 m，体积约为 74km^3，滑坡后缘高程约 3200 m，前缘高程约 2500 m。根据出露地层，下归洼滑坡被分为 A、B、C、D 四个区域，A 区为滑坡主要滑动区，目前处于稳定状态，该区域的岩层严重弯曲和断裂。B、C 区坡面部分附着松散堆积层，受到地震作用有发生滑坡的危险。D 区坡表主要为岩石，最右侧覆盖松散堆积层。滑坡区位于巴塘与雄松-苏洼龙（金沙江断裂带）西支两个活动断层之间（图 1（a））。巴塘断层（F1）走向 NE30°，倾向 NW，约 200 km 长，是一条以右旋走滑活动为主的全新世活动断裂带，全新世晚期以来的水平滑动速率约为 3-4 mm/a，历史上触发了多次 6.0 级以上地震；雄松-苏洼龙（F2）断层走向近 SN，约 300 km 长，古新世以来经历了几百千米的右旋走滑运动。研究区下部基岩为二叠系下统 P1 角闪岩和云母片岩，堆积层为第四系全新统 Q4 冲积、冲洪积、崩坡积堆积物（图 1（b））。

2.2 试验方法与数值方法

2.2.1 试验方法

设计了加载系统，研究了边坡的动态损伤演化过程。地震波输入系统与采集系统是分离的。输入地震波采用 Matlab 配合直接控制设备，输出系统为 IMC 系统。在边坡的正 X 和负 Y 处设置高速摄像机，采集地震作用下边坡最直观的损伤特征。斜坡上设置了 22 个加速度传感器。同时，为了更直观地反映边坡动力响应的变化特征，在振动台上设置了加速度传感器。传感器被布置在模型中间的纵剖面上，以减少边界效应。测试输入包括地震波的自然波和人工波。它在 X 方向上加载。自然波是汶川地震中的茂县波。人工波采用 10Hz 正弦波。地震波振幅选取为 0.1~0.8g 和 1.0g。

2.2.2 模拟方法

GSI 岩体分级体系与 Hoek- Brown 破坏准则可以考虑岩石风化程度以及岩体中结构面对岩体强度的影响，获取较为真实的岩体参数，保证数值模拟的准确性。对岩体的弹性模量以及单轴抗压强度进行估计。

采用 Hoek - Brown 破坏准则:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^{0.5}$$

$$s = e^{(GSI-100)/9}$$

式中，s为岩体强度特征参数，σ_c为完整岩体的 UCS。地质强度 GSI 根据岩石类型和地质条件在 50 到 60 之间变化。岩体的变形模量E_m是根据 GSI 分级系统计算岩体参数如表 1 所示。

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{cm}}{100}} 10^{(GSI-10)/40}$$

离散元法的运动方程基于牛顿第二定律。计算分析采用动态松弛法求解，即将非线性静力学问题转化为动力学问题求解，求解方法为中心差分法（显式求解），要求小计算时步和合理的阻尼系数。离散单元法通过接触块体之间的重叠和刚度系数计算力的大小，块体剪切力与块体运动的历史和路径有关。

块体采用 Mohr-Coulomb 准则模型来模拟岩体抗拉破坏，如图 2 应力平面所示，Mohr-Coulomb 屈服函数可表示 A-B 的破坏包络线：

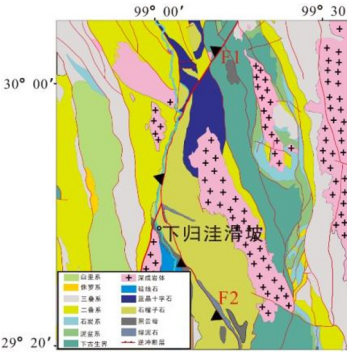
$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi}$$

式中：φ是摩擦角，c是凝聚力，$N_\varphi = (1 + sin\varphi)/(1 - sin\varphi)$。用张力屈服函数表示 B-C：

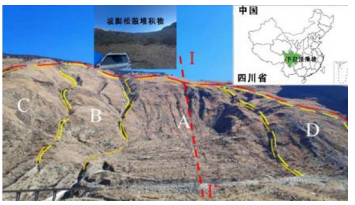
$$f^t = \sigma^t - \sigma_3$$

式中：σ^t是抗拉强度。

节理采用 Coulomb 摩擦准则，可实现接触面的滑动或张开，在接触面上，应力与位移的



（a）滑坡区断裂带分布[4,5]



（b）下归洼滑坡（镜像 NE60°）

图 1 滑坡区特征

关系被假定为线性关系，由法向刚度k_n控制：

$$\Delta\sigma_n = -k_n\Delta u_n$$

式中：$\Delta\sigma_n$和Δu_n分别为有效法向应力增量和法向位移增量。

表 1 GSI 岩体分级参数

类型	参数	数值
岩体	密度（kg/m^3）	2700
	E（GPa）	4.9
	UCS（MPa）	13.7

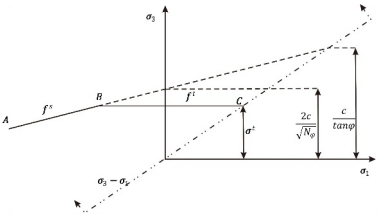


图 2 块体中的 Mohr-Coulomb 破坏准则

当重叠量为 0 时，块体间的作用力表现为拉力，若拉力超过节理的抗拉强度时，法向力消失，即$\sigma_n = 0$，接触体发生抗拉破坏。

接触剪切方向上，动态特征受剪切刚度k_s控制，被剪切强度τ_{max}限制。应力和位移可被分为两个阶段：

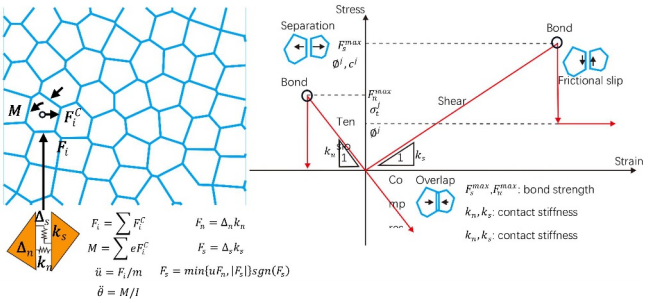


图 3 (a)微观力学性能指标；(b)voronoi 接触的屈服行为

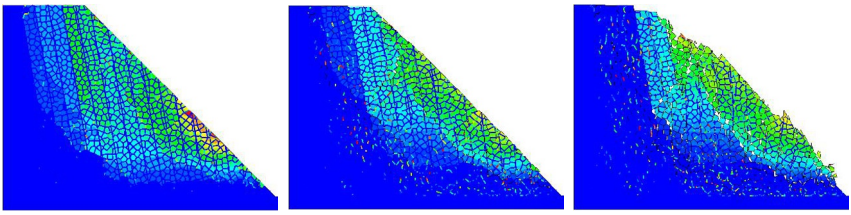


图 4 裂纹扩展

$$\tau_s = k_s \Delta u_s^e \quad |\tau_s| \le c + \sigma_n tan\varphi = \tau_{max}$$

$$\Delta\tau_s = sign(\Delta u_s)\tau_{max} \quad |\tau_s| \ge c + \sigma_n tan\varphi$$

式中：Δu_s^e为弹性剪切位移增量，Δu_s为总剪切位移增量。

在每次迭代时，如果剪切力超过$c + \sigma_n tan\varphi$，则块体之间发生滑动，其他情况时，τ_s与Δu_s呈线性关系。图 3 显示了 Voronoi diagram 的微观接触行为与本构模型。

在研究斜坡的损伤机制时，欲进行的数值模拟应该考虑两个方面问题：1、揭示地震波在穿过节理和层理时折射、反射或透射的能量转变；2、捕捉原始裂纹的产生、扩展和新裂纹的产生。传统的离散元方法提出了一些解决裂纹问题的方法，但是难以捕捉岩块内的裂纹，而只能处理岩块之间的裂纹。为了解决这一问题，提出一种修正的岩石损伤模型，即 Voronoi 多边形节理。在斜坡模型中，岩块之间的节理采用经典离散单元法建模，Voronoi 多边形用于生成完整岩块内随机的缺陷，岩块内的这种缺陷和生物体内无数的细胞、地质材料中的自然缺陷类似，这些缺陷的存在会使数值模拟中完整岩体的损伤过程与实际情况更接近（图 4）。

3 结果

如图 5 所示，在堆积体边坡中，顶部堆积层的响应非常强烈。坡肩沿堆积层迅速减小。在顺层岩质边坡中，随着振幅的增大，1/4 高程屈曲点处的振幅值和影响范围减小。后缘到肩部的距离增大，后缘受到结构面和节理的冲击。这表明在地震作用下，由于屈曲的动力变形明显而减小。顺层岩质边坡在坡面 1/4 高程处首先出现屈曲破坏。然后在后缘处发生剪切变形，并沿构造面向下扩展。此外，顺层岩质边坡中云母片岩附近的放大效应更为显著。坡面中部存在一个低响应区。产生这些现象的原因可能是弱薄岩层中复杂的地震波反射、折射叠加和强地震，以及岩层的振动位移。最终，堆积体和顺层岩质边坡的最大值分别从 12.65 和 16.00 减小到 8.94 和 6.62。分别降至原值的 70.67%和 41.38%。

4 结论

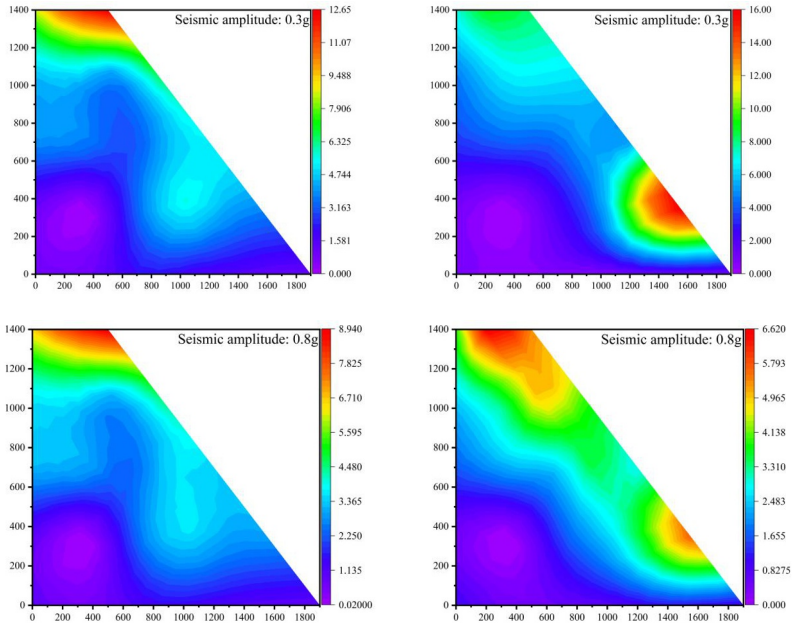
该研究通过振动台实验和离散元数值模拟，揭示了地震作用下青藏高原三江流域顺层岩质滑坡的动力学特征和裂纹扩展机理。研究发现，地震引起的拉伸作用导致边坡顶部堆积层破坏，屈曲破坏首先出现在坡面 1/4 处，并沿构造面向下扩展。云母片岩层显著放大了地震响应，提出了基于 Voronoi 多边形的裂纹扩展法则。为理解顺层岩质边坡在地震下的损伤机制提供了参考。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划项目（2023YFC3007305，2019YFC1509403，2018YFC1505001）；国家自然科学基金（51978633，51678537）的资助。

参考文献

[1] Gischig V S, Eberhardt E, Moore J R, et al. On the seismic response of deep-seated rock slope instabilities—Insights from numerical modeling. Engineering Geology, 2015, 193: 1-18.



（a）堆积体边坡　　（b）顺层岩质边坡

图 5 M_{AI}等值线

[2] Cui S, Pei X, Huang R, et al. The analysis of seismic induced progressive instability and failure mechanisms: A case study. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 174: 105646.

[3] Che A, Yang H, Wang B, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes. Engineering Geology, 2016, 201: 45-56.

[4] Wang C, Guo M, Chen X, et al. Damage evolution of the bedding rock landslide and debris landslide under earthquakes in the Three-rivers Basin. Engineering Geology, 2024, 339: 107631.

[5] 唐学武,王晨,郭明珠,等.青藏高原东南三江流域黄土类堆积体斜坡地震作用下的动力响应试验研究——以四川巴塘下归洼滑坡为例.地震工程学报,2024,46(03):536-547.Xuewu Tang, Chen Wang, Mingzhu Guo, et al. Experimental study on the dynamic response of accumulation slopes under earthquake action in Three-rivers Basin, southeast Tibetan Plateau: a case study of the Xiaguiwa landslide in Batang, Sichuan Province. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(03): 536–547.

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.