Study on the Fractal and Mechanical Properties of Apparent Fractures of Dolomite from Giant landslides

Jiang Tao, Cui Shenghua*

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
**Corresponding author. Email: cuishenghua18@cdut.edu.cn*

ABSTRACT
The mechanical properties of fractured rocks in the slip zone are crucial factors affecting the stability of landslides and the initiation of earthquakes. This study uses dolomite samples collected from the slip surface of the Daguangbao landslide, triggered by the Wenchuan earthquake. Through laboratory processing and fracture statistics, a two-dimensional box-counting method was employed for fracture fractal analysis to quantitatively describe the degree of fracture development. The study investigates the fractal characteristics of apparent fractures in dolomite from the Daguangbao landslide and their impact on the mechanical properties of the rock. The results indicate that the fractal dimension of fractures increases linearly with the number of fractures, and the distribution characteristics of fractures significantly affect the fractal dimension. Through uniaxial compression tests and fatigue tests, combined with acoustic emission monitoring, it was found that the higher the fractal dimension of fractures, the lower the compressive strength of the rock. Moreover, there is a power function relationship between the fractal dimension of fractures and the uniaxial compressive strength of the rock. Additionally, different fracture fractal dimensions lead to different stress-strain patterns, including elastic-single peak-collapse type, elastic-multi peak-collapse type, and yield-single peak-collapse type. Finally, the microstructure of the rock fracture surface was analyzed using SEM scanning, revealing the impact of fracture fractal dimension on the rock fracture mechanism. The study shows that the fractal dimension of fractures is an important factor affecting the strength and failure mode of rocks, which is significant for understanding the stability of landslides and the mechanism of earthquake initiation.

Keywords: *Daguangbao landslide, Fractured Rock in Slip Zones, Fractal Dimension of Fractures, Rock Fracture Mechanisms.*

巨型滑坡白云岩表观裂隙分形与力学特性研究

蒋涛，崔圣华*

成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，成都 610059

**通讯作者. 电子邮箱：cuishenghua18@cdut.edu.cn*

摘要

滑带碎裂岩体力学性质是滑坡稳定性和地震启动的重要影响因素，本文以大光包滑坡滑面采集的白云岩作为试样，通过室内加工和裂隙统计，采用二维盒维数法进行裂隙分形分析，以定量描述裂隙发育程度，研究了汶川地震触发的大光包滑坡中白云岩表观裂隙的分形特征及其对岩体力学特性的影响。结果表明，裂隙分形维数与裂隙数量呈线性增加趋势，且裂隙的分布特征对分形维数有显著影响。通过单轴压缩试验和疲劳试验，结合声发射监测，发现裂隙分形维数越高，岩体的抗压强度越低，且裂隙分形维数与岩体单轴抗压强度之间存在幂函数关系。此外，裂隙分形维数的不同也导致了不同的应力-应变模式，包括弹性-单峰-溃崩型、弹性-多峰-溃崩型和屈服-单峰-溃崩型。最后，通过 SEM 电镜扫描分析了岩体断口的微观结构，揭示了裂隙分形维数对岩体破裂机理的影响。研究表明，裂隙分形维数是影响岩体强度和破坏模式的重要因素，对于理解滑坡稳定性和地震启动机制具有重要意义。

关键词： *大光包滑坡，滑带碎裂岩体，裂隙分形维数，岩体破裂机理.*

© 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_15

1 .前言

在地震作用下滑带是控制滑坡变形失稳的关键因素，特别是大型、巨型岩质滑坡，在岩体结构、力学响应、破坏特性方面具有特殊性[1-4]。汶川地震触发的最大滑坡-大光包滑坡，发生在龙门山中段，海拔 3047m，是区内最高山峰。已有研究表明，大光包滑坡受断层影响滑带岩体遭受显著的先期构造破碎，结构面多被钙质胶结，可见大量方解石脉[5]。在仅 50cm^2 的岩体断面上就分布有大小数百条，在面积不足 40mm^2 的岩体断面上分布方解石脉也达 40 条之多，裂隙岩体强度对滑坡稳定性产生重要影响[6-8]。

虽然随着对大光包滑坡研究的步步深入，对滑坡区工程地质调查的逐渐完备，但对于高度先期碎裂岩石的定量描述及力学性质分析仍然有限。目前主要通过 SEM 扫描电镜和光学显微镜调查大光包滑带岩体结构特征，但微细观结构难以建立其与岩体力学性质的相关关系。分形（Fractal）是 20 世纪 70 年代，罗德尔布罗特为表征复杂图形和复杂过程而引入的，是现代数学的重要分支，越来越多的被应用于各领域[9]。本文通过对大光包滑坡滑带岩体方解石脉进行分形，用分形维数值来定量地描述平面上岩体方解石脉的发育程度及其力学特性。

2 .大光包滑坡

汶川特大地震因震源深度小、震级大，破坏力巨大，产生大量滑坡，尤其是 112 处单体面积大于 0.5 km^2 的大型滑坡[10]。在汶川地震的所有巨型滑坡中大光包滑坡规模最大，最大长度和宽度分别为 4.6km 和 3.7km，滑坡面积 7.2km^2、体积约 1.2×10^9m^3，最大堆积厚度达 550m。滑坡剪出口与其最高点“大光包”山峰相对高差逾 1400m，高陡后壁平均高 600m，滑坡距离 Lmax 达 4.5km，H_{max} 约 1.0km，侧向扩展宽度 2.2km。滑坡下游侧是一个长约 1km，高约 400m，产状 N80°~88°E/NW/30°~38°的连续滑动带[11-13]。

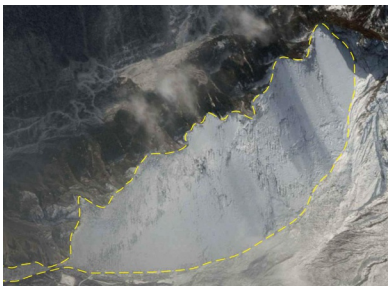


图 1 大光包滑坡南侧滑动带

3 .试验方法

3.1 试样

大光包滑坡最引人注目的特征之一是南侧暴露长 1.8km、面积 0.3km^2，倾向 N，倾角约 30 的大光面，是滑坡滑面。作者基于在光面上开挖了 12 个探槽（Tc1-Tc12），9 个钻孔（Zk1-Zk9），取震旦系灯影组（Z_d^3）白云岩试样。

首先现场筛选岩性、结构及层位一致的岩块进行室内加工，试样加工严格按照国际岩石力学学会建议的方法进行，而后通过人工筛选出受不同程度裂隙切割的试样。

3.2 岩体裂隙统计与分形

本文试验手段包括岩体裂隙统计和分形，岩体力学试验（单轴压缩试验，疲劳试验和声发射监测），微观分析（SEM 电镜扫描和岩石薄片）三大类。本文采用二维盒维数法[14]进行裂隙分形。

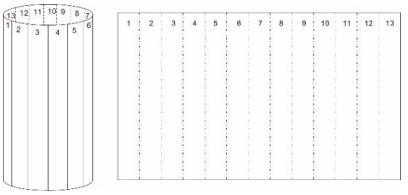


图 2 岩体试样的裂隙统计和分形

3.3 力学测试

对经过裂隙统计和分形计算后的试样进行单轴压缩试验和疲劳试验，试验中进行声发射监测。单轴抗压试验采用轴向应力控制，0.1KN/s 加载速率，在试样由弹性变形阶段进入

塑性变形阶段前的弹性极限后采用轴向变形控制，加载速率为 0.1mm/min。

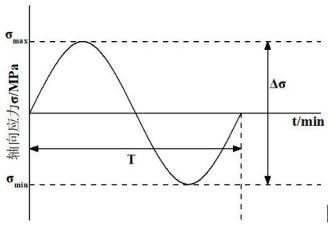


图 3 对试样施加波形各参数的特征

3.4 SEM 电镜

岩石薄片技术是岩矿及油气储层研究常规且极为重要手段，将岩石磨制成片，而后在光学显微镜下观察岩石结构及构造特征（岩石矿物尺度）；扫描电镜（SEM，电子二次成像技术）是用电子束和电子透镜代替光束和光学透镜。

4 .裂隙分形与力学特征

4.1 裂隙分形特征

试样裂隙统计及分形计算结果见表 1 和图 4，试样按总裂隙数由小到大进行编号，可以看出总裂隙的分形维值随着总裂纹条数的增加而呈线性增加趋势，而三类裂隙分维值与总裂隙条数的线性关系并不明显。D-6 裂纹条数少于 D-7，但其分形维值大于 D-7，这是由于分形维数不仅与裂纹多少有关，还受到裂纹分布情况影响，即裂纹颁的均匀性、方向性等。观察表明 D-7 次裂纹分布具有方向上的一致性特点。

表 1 试样裂隙统计及分形计算结果

试样编号	裂纹条数	分形维数			
		主裂纹	次裂纹	微裂纹	总裂纹
D-1	18	1.02	1.02	1.07	1.10
D-2	22	1.01	1.03	1.11	1.12
D-3	51	1.04	1.03	1.12	1.20
D-4	126	1.03	1.13	1.15	1.25
D-5	188	1.08	1.13	1.24	1.35
D-6	212	1.03	1.19	1.27	1.39
D-7	234	1.07	1.15	1.27	1.36
D-8	355	1.04	1.11	1.32	1.42
D-9	404	1.02	1.1	1.34	1.49
D-10	480	1.1	1.14	1.43	1.54

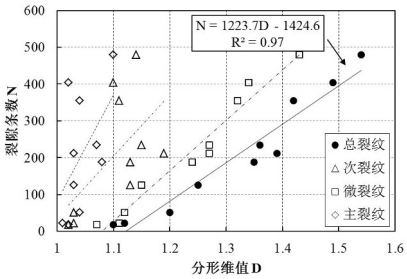
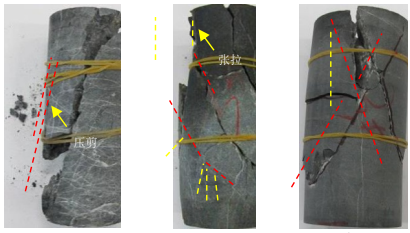


图 4 试样分形维值 D 取值

4.2 裂隙分形对岩体破裂的影响

裂隙岩体总体是受原裂隙分布特征控制的压剪与拉张组合断裂。不同试验存在差异，这种差异是由裂隙分维不同引起的。以 D-1、D-3、D-7 试样为例，D-1 裂隙发育较少，形成破裂面为“X”剪裂面，图中左上形成一条受控于原始竖向贯通方解石脉的张拉断裂；D-3 属于受方解石脉中度切割，其碎裂具有明显张、剪综合特征，上下形成两条剪裂面，且都发育数条由于压剪派生的张拉翼裂纹，且均受控于原有方解石脉；D-7 裂隙发育，但破裂面为单条陡倾剪裂面，相比于 D-1 剪裂面具有约 0.5cm 碎裂宽度，属于压剪碎裂带，且基本无张拉断裂。



D-7(1.36)　　D-3(1.20)　　D-1（1.10）

图 5 不同裂隙分维试样断裂模式

试样断裂面都受控于原始方解石脉，断口呈现灰白色特征。SEM 电镜扫描证实了宏观断裂，残留方解石晶体附着于断口表面，局部因拉应力（或压应力）而脱落；另外，由图可以看出，方解石晶体与白云石晶体大小存在明显差异，两者之间形成显明分界面，造成了岩体不连续的结构弱面。

静力加载断口在形成过程中因受到较大压力而产生晶体的剪切变形，在断口表面可见应

力集中部位（一般位于晶体棱角部位）产生晶体部分压碎而留下大量岩粉，或在由压应力而派生的剪切作用下，晶体沿自生解理面产生的剪切位移和碎裂现象，晶体或碎裂后的岩粉会在压应力作用下发生塑性变形，表现为被“压融”现象。疲劳碎裂以拉张型断口为主，断口面干净，在疲劳力作用下，晶体自身缺陷面产生动力响应而破裂，出现疲劳条纹。

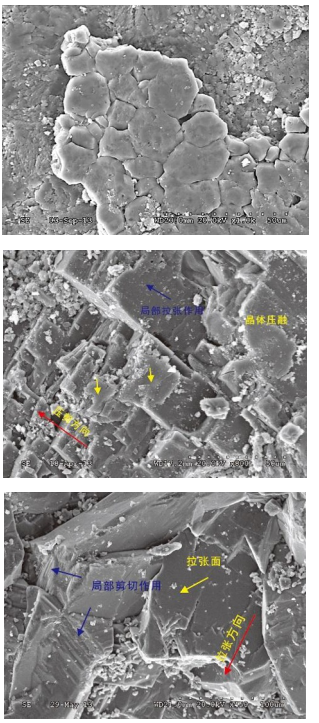


图 6 试样 SEM 电镜扫描特征

4.3 裂隙分形对岩体强度的影响

不同裂隙分维试样可分为三种不同应力－应变模式：弹性－单峰－溃崩型、弹性－多峰－溃崩型、屈服－单峰－溃崩型。

以 D-1、D-3、D-7 试样为例，D-1 试样属于弹性－单峰－溃崩型，试样具有较长的弹性变形时间，屈服过程十分短暂转而快速破坏；D-3 试样属于弹性－多峰－溃崩型，同样具有明显弹性变形过程，但由于初始裂隙增多，裂隙压密而形成的轴向应变量明显变大，弹脆性特征减弱，体现的是内部应力集中、初始裂隙大量激活、破裂面贯通的损伤过程，出现峰值波动转而快速破坏，从环向应力－应变曲线可以看出，峰值的波动与侧向体积扩容有关；D-7 试样属于屈服－单峰－溃崩型，由于初始裂隙发育密度大，压缩过程中，不同水平的应力集中伴随着不同强度初始裂隙的激活，微破裂生成，整个压缩过程是一个裂隙强度与加载水平较量的屈服过程，从环向应力－应变曲线可以看出屈服伴随着环向的体积扩容。

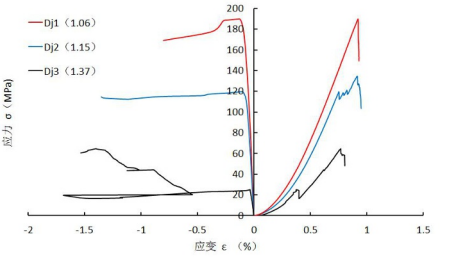


图 7 不同裂隙分维试样环向应力－应变曲线

试样体积应变－轴向应变关系曲线，更能体现现试样变形破坏的阶段性和扩容过程，可以分为三个阶段：1）初始裂隙压密阶段，由于采取变形控制的加载方式，加载初期由于环向变形量微弱，曲线基本保持与坐标轴 45 度直线上升；2）变形发展阶段，当超过某一临界值时曲线发生偏离，有利于扩容的损伤形成，不易进行损伤稳定性发展和加速发展区分；3）溃崩阶段，试样因主断裂形成或最终破坏而极速扩容。由图可以看出，不同裂隙分维试样体现出相同时程规律的损伤过程，但随着裂隙分维值增大，裂隙压密应变量增大，损伤扩展应变量减小。

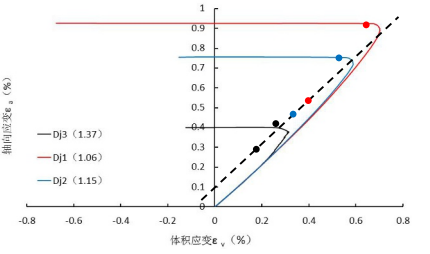


图 8 不同裂隙分维试样体积应变－轴向应变关系曲线

方解石脉分形维数与试样强度有明显内在联系，本文所得关系为幂函数关系：

$$\sigma = \sigma_0 D^r \quad (1)$$

式中：σ 为岩体单轴抗压强度，σ_0 为均质无碎裂理想白云岩石单轴抗压强度，D 为某碎裂岩体结构面（方解石脉）分形维数，r 为分形影响因子，D^r 为分形折减系数。本文所得 σ_0=294.67 MPa，r =-3.789。

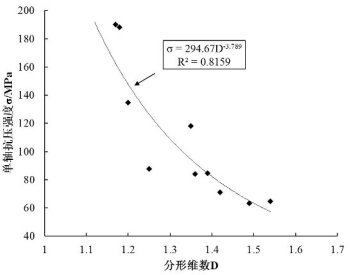


图 9 方解石脉分形维数与试样强度

5 .结论

本文以大光包滑坡滑面采集的白云岩作为试样，通过室内加工和裂隙统计，采用二维盒维数法进行裂隙分形分析，以定量描述裂隙发育程度，研究了汶川地震触发的大光包滑坡中白云岩表观裂隙的分形特征及其对岩体力学特性的影响。结果表明：

(1)裂隙分形维数与裂隙数量呈线性增加趋势，且裂隙的分布特征对分形维数有显著影响。

(2)裂隙分形维数的不同也导致了不同的应力-应变模式，包括弹性-单峰-溃崩型、弹性-多峰-溃崩型和屈服-单峰-溃崩型

(3)裂隙分形维数越高，岩体的抗压强度越低，且裂隙分形维数与岩体单轴抗压强度之间存在幂函数关系

参考文献

[1] 申通, 黄志全, 宋帅奇, 等. 金沙江矮子沟巨型古滑坡形成机制及运动过程研究[J]. 地震学报. 2023, 45(06): 1091-1110.

Shen Tong, Huang Zhiquan, Song Shuaiqi, et al. Formation Mechanism and Motion Processes of The Aizigou Giant Paleolandslide, Jinshajiang River[J]. Acta Seismologica Sinica. 2023, 45(06): 1091-1110.

[2] 杨晴雯, 裴向军, 崔圣华, 等. 地震大型滑坡滑带岩体结构特征及地质原型分析[J]. 科学技术与工程. 2018, 18(30): 22-29.

Yang Qingwen, Pei Xiangjun, Cui Shenghua, et al. Rock Structure Characteristics and Geological Prototype Analyses of The Sliding Zone of Earthquake-Induced Large Landslide[J]. Science, Technology and Engineering. 2018, 18(30): 22-29.

[3] 李天涛, 裴向军, 黄润秋. 强震触发大光包巨型滑坡运动特征研究[J]. 水文地质工程地质. 2014, 41(02): 116-121.

Li Tiantao, Pei Xiangjun, Huang Runqiu. A Study of Motion Features of The Daguangbao Large-Scale Landslide Induced by The Wenchuan Earthquake [J]. Hydrogeology & Engineering Geology. 2014, 41(02): 116-121.

[4] 高东. 大光包巨型滑坡的滑带特征及滑坡动力学响应机理研究[D]. 成都理工大学, 2015.

Gao Dong. Study on The Characteristics of Sliding Zone and Dynamic Response Mechanism of Daguangbao Giant Landslide [D]. Chengdu University of Technology, 2015.

[5] 杜野. 大光包巨型滑坡“滑带”岩体碎裂化研究[D]. 成都理工大学, 2013.

Du Ye. Study on the “Slip Band” Rock Mass Disintegration of Daguangbao Giant Landslide[D]. Chengdu University of Technology, 2013.

[6] 黄润秋, 裴向军, 崔圣华. 大光包滑坡滑带岩体碎裂特征及其形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2016, 35(01): 1-15.

Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Cui Shenghua. Cataclastic Characteristics and Formation Mechanism of Rock Mass In Sliding Zone of Daguangbao Landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2016, 35(01): 1-15.

[7] 裴向军, 黄润秋, 崔圣华, 等. 大光包滑坡岩体碎裂特征及其工程地质意义[J]. 岩石力学与工程学报. 2015, 34(S1): 3106-3115.

Pei Xiangjun, Huang Runqiu, Cui Shenghua, et al. The Rock Mass Cataclastic Characteristics of Daguangbao Landslide And Its Engineering Geological Significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2015, 34(S1): 3106-3115.

[8] 崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 等. 团块缺陷结构对岩石静动力学特性影响的数值模拟分析[J]. 工程力学. 2018, 35(01): 88-97.

Cui Shenghua, Pei Xiangjun, Huang Runqiu, et al. Numerical Simulation for Mechanical Properties of Rock With Block Mass Under Static and Cyclic Loadings[J]. Engineering Mechanics. 2018, 35(01): 88-97.

[9] Mandelbrot B. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension[J]. Science. 1967, 156(3775): 636-638.

[10] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报. 2009, 17(01): 29-38.

Yin Yueping. Features Of Landslides Triggered by The Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology. 2009, 17(01): 29-38.

[11] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报. 2008, 16(06): 730-741.

Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Li Tianbin. Basic Characteristics and Formation Mechanism of The Largest Scale Landslide At Dagungbao Occurred during The Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology. 2008, 16(06): 730-741.

[12] 殷跃平, 成余粮, 王军, 等. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报. 2011, 19(05): 674-684.

YIN Yueping, CHENG Yuliang, WANG Jun, et al. Remote Sensing Research on Daguangbao Gigantic Rockslide Triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology. 2011, 19(05): 674-684.

[13] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. 工程地质学报. 2009, 17(06): 725-736.

Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Zhang Weifeng, et al. Further Examination on Characteristics and Formatiom Mechanism of Daguangbao Landslide[J]. Journal of Engineering Geology. 2009, 17(06): 725-736.

[14] 祝文化, 李建雄, 张明中. 混凝土损伤裂纹的二维数字图像盒维数算法[J]. 武汉理工大学学报. 2008(06): 60-62.

Zhu Wenhua, Li Jianxiong, Zhang Mingzhong. 2D Digital Image Box-counting Dimension Calculational Method of Cracks on Damaged Concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology. 2008(06): 60-62.

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.