

# 含裂隙岩石微裂纹起裂扩展及损伤演化分析

李传龙, 俞然刚, 马国良, 杨文东, 宋若松, 张立松

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 为探究含有不同裂隙类型(张开、闭合)、裂隙倾角和裂隙长度岩样的微裂纹起裂扩展及损伤演化规律, 基于 PFC<sup>2D</sup> 构建了含裂隙岩样模型并进行单轴压缩数值试验, 从细观角度解释了不同裂隙倾角和裂隙类型岩样的起裂及破坏特征差异, 并从能量角度对岩样进行损伤分析。结果表明, 随着裂隙倾角  $\alpha$  的增大, 张开型峰值强度呈正相关, 闭合型则先减小后增大, 弹性模量与峰值强度变化规律一致。当  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  时, 两种含裂隙岩样多从裂隙尖端起裂; 当  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  时, 两种岩样破坏路径相似; 基于胶结破坏能定义损伤变量和修正系数, 建立了演化模型, 分别从裂隙类型、倾角和长度三个角度验证了模型的合理性。研究结果可为进一步了解含裂隙岩体受载后的损伤演化过程提供理论基础。

**关键词:** 裂隙岩石; 裂隙倾角; 裂纹起裂机理; 颗粒位移矢量场; 损伤演化

**中图分类号:** TU45; TV223.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0166-04

## 1 引言

自然岩体中广泛存在着不同尺度的原生不连续面, 包括节理、裂隙、弱面及断层等<sup>[1]</sup>。如隧道开挖造成围岩局部扰动可能导致应力重分布引起裂隙进一步发育、扩展和贯通, 严重时甚至引起岩体的局部塌落。因此, 对含裂隙岩石微裂纹的扩展机理及损伤特性展开研究具有重要的工程意义。刘华伟等<sup>[2]</sup>分析了裂隙闭合情况和摩擦系数对岩石强度和破坏模式的影响。WANG C G 等<sup>[3]</sup>采用不连续变形分析方法对张开与闭合裂纹进行了模拟研究; 周军华等<sup>[4]</sup>基于声发射方法探讨了裂隙对岩体的力学及损伤演化特征的影响; 赵东雷等<sup>[5]</sup>基于室内试验建立了层状岩体的损伤演化方程。已有研究多从裂隙尖端应力场角度<sup>[3]</sup>分析岩样起裂机理, 以声发射振铃计数<sup>[4]</sup>或弹性模量<sup>[6]</sup>等定义损伤变量, 损伤修正参数影响变量较多, 不够简化。鉴此, 本文基于颗粒位移矢量场阐述平面应力状态下含裂隙岩样微裂纹起裂机理, 采用能量分析岩样损伤演化过程, 定义损伤变量和修正参数, 以期为后续相关研究提供参考依据。

## 2 数值模型

### 2.1 数值模型的建立

在 PFC<sup>2D</sup> 中生成岩样模型的长、高分别为 50、100 mm, 共 14 487 个不同尺度的圆形颗粒, 颗粒间接触采用平行黏结接触模型(PBM)。完整岩样数值模型见图 1(a), 删除颗粒模拟非贯通张开裂隙, 见图 1(b); 光滑节理模型(SJM)模拟非贯通闭合裂隙, 见图 1(c)。为方便表述, 含张开裂隙岩样简称张开岩样, 含闭合裂隙岩样简称闭合岩样。设计了裂隙的分布形式(图 1(d)、(e)), 裂隙长度  $2a$  分别为 10、15、20 mm, 裂隙倾

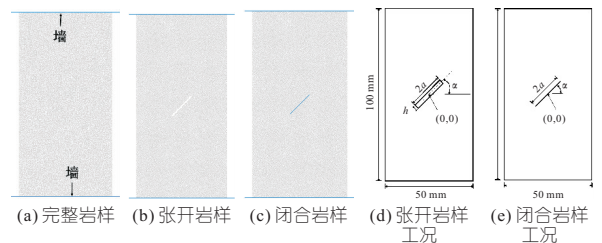


图 1 岩样数值模型及工况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model of rock samples and working conditions

收稿日期: 2022-09-05, 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979281)

作者简介: 李传龙(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为隧道围岩稳定性, E-mail: lichuanlong2020@163.com

通讯作者: 俞然刚(1967-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为建筑物检测、鉴定与加固, 水泥、混凝土性能及外加剂, 岩土及岩石力学等, E-mail: yurg2020@163.com

角  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ ，其中张开裂隙厚度  $h$  为 1 mm，共 42 种模型。给定上下两端墙恒定速度为 0.05 m/s，方向相反，大小相同，实现对岩样的单轴压缩加载，当峰后强度达到峰值强度的 70% 时，数值试验停止。

### 2.2 细观参数标定

采用“试错法”标定 PBM 所用细观参数，其中颗粒最小半径为 0.2 mm，摩擦系数为 0.5，最大最小半径比为 2.0，接触模量为 10 GPa，密度为 2 440 kg/m<sup>3</sup>，刚度比为 1.2；平行黏结模型的细观参数中接触模量为 7.9 GPa，黏结强度为 34 MPa，刚度比为 1.2，抗拉强度为 34 MPa，内摩擦角为  $65^\circ$ ，摩擦系数为 0.36；光滑节理模型的细观参数中法向刚度为 1 500 GPa/m，切向刚度为 1 300 GPa/m，摩擦系数为 0.5。标定所用天然岩石为中风化凝灰岩，取自山东省青岛市地铁某标段，取样深度为 19 m，将细观参数标定结果与天然岩石室内单轴压缩试验所得物理力学参数进行对比，见表 1。由表 1 可知，模拟结果与天然岩石参数的误差均小于 7%，初步验证了所用细观参数的正确性。

表 1 天然岩石与 PFC 模拟的物理力学参数对比

Tab. 1 Comparison of physical and mechanical parameters between natural rock and PFC simulation

参数	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松 比	内摩擦 角/ $^\circ$
实测值	39.70	3.20	11.50	0.200	45.0
PFC <sup>2D</sup> 模拟	38.50	3.40	11.30	0.191	43.0
误差/%	3.02	6.25	1.74	4.500	4.4

## 3 结果与分析

### 3.1 含裂隙岩样的力学特征

不同几何尺寸分布下张开岩样峰值强度与弹性模量变化曲线见图 2，完整试样峰值强度  $\sigma_c$  为 38.5 MPa，弹性模量  $E$  为 11.3 GPa， $\sigma_c$  与裂隙倾角  $\alpha$  呈正相关关系，当  $2a = 15$  mm， $\alpha$  由  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$  时， $\sigma_c$  由 25.8 MPa 增大到 34.3 MPa，与裂

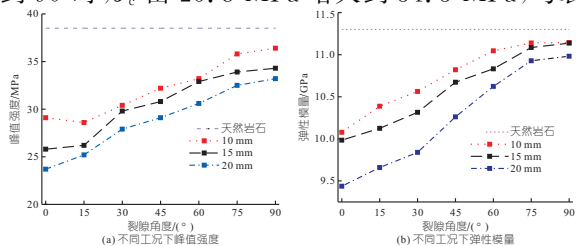


图 2 张开岩样力学特性变化曲线

Fig. 2 Change curve of mechanical properties of rock samples containing open fractures

隙长度变化呈负相关。 $E$  随几何尺寸变化与  $\sigma_c$  变化规律一致。张开岩样峰值强度随裂隙倾角变化规律与秦楠等<sup>[7]</sup> 基于室内试验结果相同，验证了数值模拟的正确性。

闭合岩样峰值强度  $\sigma_c$  与  $E$  变化曲线见图 3，随着裂隙倾角  $\alpha$  增大， $\sigma_c$  先减小后增大，当  $2a = 15$  mm， $\alpha$  由  $0^\circ$  增大到  $45^\circ$  时， $\sigma_c$  由 37.6 MPa 减小至 32.6 MPa， $\alpha$  由  $45^\circ$  增大到  $90^\circ$  时， $\sigma_c$  由 32.6 MPa 减小至 37.1 MPa，闭合岩样  $E$  随几何尺寸变化趋势与  $\sigma_c$  变化趋势一致。

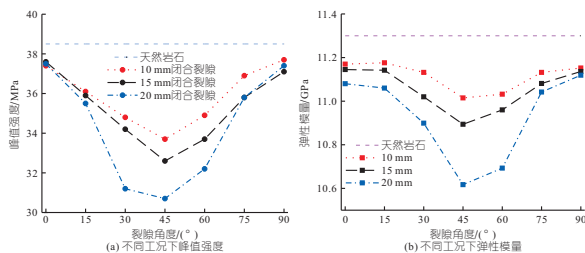


图 3 闭合岩样力学特性变化曲线

Fig. 3 Change curve of mechanical properties of rock samples containing close fractures

### 3.2 微裂纹的起裂及扩展特征

#### 3.2.1 不同裂隙倾角下含裂隙岩样起裂特征

以  $2a = 15$  mm 含裂隙岩样(峰前  $0.5\sigma_{max}$ )为例，分析岩样起裂特征见图 4。为便于观察，将裂隙及其附近岩样进行放大处理。

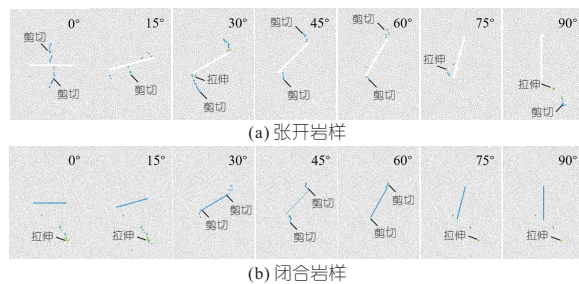


图 4 含裂隙岩样微裂纹起裂特征

Fig. 4 Initiation characteristics of microcracks in fractured rock samples

当  $\alpha$  为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时，张开岩样首先在垂直于裂隙中部产生剪切微裂纹，闭合岩样在裂隙右下远场产生拉伸微裂纹，并优先集中于裂隙下侧进行扩展发育；当  $\alpha$  为  $30^\circ \sim 60^\circ$  时，两种岩样均于裂隙尖端处萌生翼型剪切微裂纹；当  $\alpha$  为  $75^\circ \sim 90^\circ$  时，由于裂隙尖端的应力集中程度较低，二者均在裂隙远端产生远场微裂纹。

#### 3.2.2 不同裂隙倾角下两种含裂隙岩样破坏特征

对比不同角度含裂隙岩样微裂纹扩展的最终结果(峰后  $0.7\sigma_{max}$ )见图 5。当裂隙倾角较小时，两种岩样均于裂隙中部发育出劈裂微裂纹，但张开岩样主要在裂隙尖端萌生发育微裂纹并向左

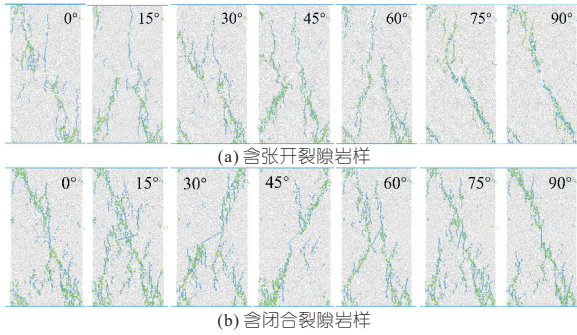


图 5 含裂隙岩样微裂纹扩展特征

Fig. 5 Propagation characteristics of microcracks in fractured rock samples

上、右下两端角部扩展,闭合岩样集中于裂隙中部发育;当倾角中等时,张开岩样微裂纹多沿垂直裂隙倾角方向扩展形成“H”型共轭破坏,闭合岩样多为单斜面破坏形式;当倾角较大时,二者扩展路径几乎一致;由尖端萌生,向试样左上、右下方向扩展,最终形成单斜拉剪破裂面。在相同  $\alpha$  下,闭合岩样微裂纹数量多于张开岩样。

## 4 微裂纹起裂及扩展损伤颗粒流分析

### 4.1 微裂纹起裂过程颗粒位移矢量场分析

从细观角度来说,由于材料颗粒在力的作用下发生相对运动,颗粒间的黏结发生改变,当外力的大小超过其临界强度时,颗粒黏结破坏,微裂纹产生。

通过 PFC<sup>2D</sup> 分析微裂纹两侧局部范围内的颗粒位移状态,进一步了解微裂纹的形成机理。如图 6 所示,将局部范围放大,箭头颜色表示颗粒位移大小,箭头方向表示颗粒位移方向。图 6(a) 为  $\alpha=0^\circ$  张开岩样(峰前  $0.5\sigma_{max}$ ),位移场呈轴对称,最大位移为  $0.077\text{ mm}$ ;由墙体至裂隙,位移方向由竖直至水平方向逐渐偏转;沿裂隙面位移差值约为  $0.015\text{ mm}$ ,裂隙中部位移最大,故在裂

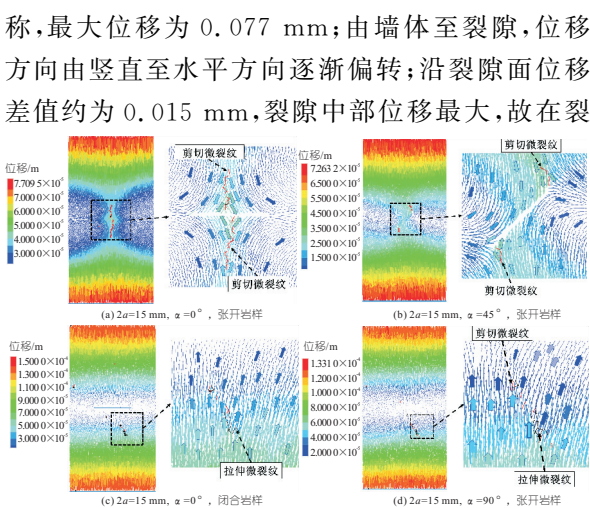


图 6 含裂隙岩样起裂过程颗粒位移矢量图

Fig. 6 Vector diagram of particle displacement in the initiation process of fractured rock samples

隙中部萌生剪切微裂纹,裂纹两侧颗粒位移数值接近,夹角为锐角。图 6(b) 为  $\alpha=45^\circ$  张开岩样(峰前  $0.5\sigma_{max}$ ),由于裂隙倾角的存在,颗粒位移矢量场无明显轴对称性,裂隙上下裂纹面在压剪条件下发生相对错动,在裂缝端部产生应力集中,在裂隙端部萌生剪切微裂纹。图 6(c) 为  $\alpha=0^\circ$  闭合岩样(峰前  $0.5\sigma_{max}$ ),图 6(d) 为  $\alpha=90^\circ$  张开裂隙岩样(峰前  $0.5\sigma_{max}$ ),在裂隙附近颗粒位移差值较小,位移方向无明显偏转,在裂隙右下方萌生拉伸微裂纹,裂纹两侧位移相差较大,夹角为锐角。

### 4.2 微裂纹扩展损伤分析

#### 4.2.1 微裂纹扩展及能量演化特征

在 PFC<sup>2D</sup> 中总能量(边界能)由耗散能和应变能组成,耗散能分为摩擦能和胶结破坏能,应变能分为颗粒应变能及胶结应变能。如图 7 所示,以  $2a=15\text{ mm}$ ,  $\alpha=30^\circ$  张开岩样为例,进行能量演化特征分析:①在加载初期岩样处于弹性阶段,边界能缓慢增加,与应变能基本相等,耗散能较小可忽略,主要原因是在此阶段基本没有摩擦能和微裂纹产生,几乎无能量耗散;②随着加载的进行,边界能及应变能加速增长,总能量与应变能及胶结应变能与颗粒应变能之间差值增大,耗散能逐渐增加,岩样内部开始产生塑性变形且微裂纹部分萌生;③当轴向加载至岩样峰值强度时,边界能增速减缓,应变能达到峰值,主要表征为微裂纹开始大量萌生,颗粒之间摩擦表面积增大,胶结破坏能与摩擦能增长加速;④当加载至峰值强度后,应变能几乎不再增长,总耗散能急剧增加,微裂纹大量萌生,耗散能以胶结破坏能为主体;⑤当峰后强度加载至  $0.85\sigma_{max}$  时,岩样塑性变形破坏使弹性应变能不可逆转,产生下降趋势。

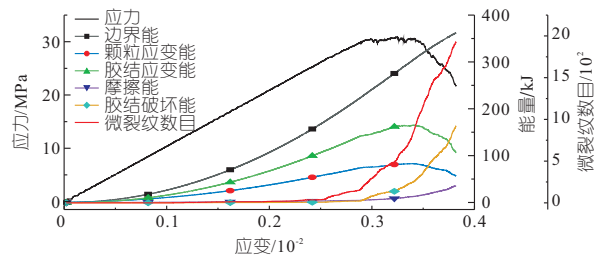


图 7 数值模型能量—微裂纹—应力—应变关系曲线

Fig. 7 The energy-microcrack-stress-strain relation curve of numerical model

#### 4.2.2 损伤演化关系模型及验证

岩样受压损伤程度可用损伤度  $D$  来衡量,考虑有效承载面积定义损伤度<sup>[8]</sup>为:

$$D = 1 - A_c/A \quad (1)$$

式中,  $D$  为损伤度,  $D=0$  为无损状态,  $D=1$  为完

全损伤状态;  $A_c$  为损伤后有效承载面积;  $A$  为无损状态有效承载面积。

从能量角度采用胶结破坏能定义某一时刻含裂隙岩样的损伤  $D_E$  :

$$D_E = E_S / E_E \quad (2)$$

式中,  $E_S$  为该时刻的累计胶结破坏能;  $E_E$  为加载结束后完全损伤时的累计胶结破坏能。

基于微裂纹扩展特性和应变等效原理, 建立单轴压缩条件下凝灰岩试样的损伤本构模型为:

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D) \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为应力;  $E_0$  为初始弹性模量;  $\varepsilon$  为应变。

引入损伤修正系数  $D_u$  将损伤本构模型进一步修正:

$$\sigma = E_0 (1 - D_u D) \varepsilon = E_0 \left( 1 - \frac{E_S}{E_E} + \frac{E_S}{E_B} \frac{E_S}{E_E} \right) \varepsilon \quad (4)$$

式中,  $E_B$  为系统累计输入总能量(边界能)。

由式(3)拟合应力-应变曲线(图 8), 初始理论推导曲线与实际数值试验曲线在峰值强度前相差较小, 以胶结破坏能与边界能比值定义修正系数  $D_u$ , 比运用残余强度和峰值强度来定义更为简化, 修正后的理论曲线与实际数值曲线的分布形态与变化趋势较为一致。

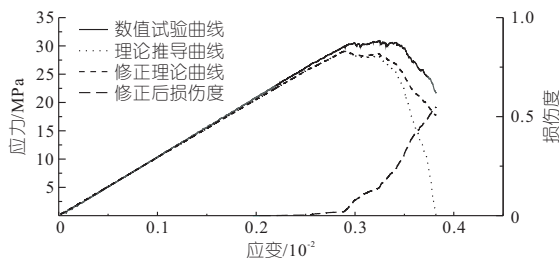


图 8 岩样模拟、理论、修正理论应力-应变曲线对比

Fig. 8 Comparison of simulated, theoretical and modified theoretical stress-strain curves of rock samples

为验证所述损伤修正模型, 选定峰值强度和试验停止后破坏强度为特征点, 对比不同角度下  $2a = 15 \text{ mm}$  岩样理论与模拟数值差异见图 9, 模拟峰值强度  $\sigma_c$ 、破坏强度  $\sigma_H$ 、理论峰值强度  $\sigma_{Lc}$ 、破坏强度  $\sigma_{LH}$ 。总体来看, 理论应力值与数值试

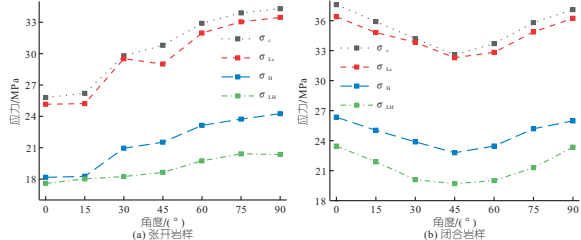


图 9 含裂隙岩样模拟-理论强度对比

Fig. 9 Comparison of simulated and theoretical strength of fractured rock samples

验值相差较小, 张开岩样峰值强度平均误差为 0.903 MPa, 破坏强度平均误差为 3.271 MPa; 闭合岩样峰值强度平均误差为 0.809 MPa, 破坏强度平均误差为 2.431 MPa, 从裂隙类型和倾角两方面说明了修正损伤模型的合理性。

进一步以  $\alpha = 45^\circ$  张开岩样为例, 分别选取裂隙长度  $2a$  为 10、15、20 mm 进行模拟-理论曲线形态对比, 见图 10, 理论曲线能较好地贴合实际数值模拟曲线, 验证了不同裂隙长度下修正损伤模型的正确性, 可能是由于岩样形成宏观破裂面后弹性应变能释放, 导致损伤修正参数定义误差, 峰后的理论强度小于数值试验。

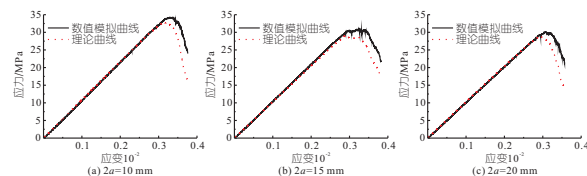


图 10 不同裂隙长度模拟-理论对比曲线

Fig. 10 Comparison of simulated and theoretical curves for different fracture lengths

## 5 结论

a. 同一裂隙倾角  $\alpha$  下, 张开岩样的峰值强度  $\sigma_c$  低于闭合型; 同一裂隙长度下, 张开型在  $\alpha = 0^\circ$  时  $\sigma_c$  最小, 闭合型在  $\alpha = 45^\circ$  时  $\sigma_c$  最小; 弹性模量与峰值强度变化规律一致。

b. 当裂隙倾角较小时, 两种岩样起裂及破坏特征有明显差异; 倾角中等或偏大时, 二者起裂特征一致, 张开岩样多形成“H”型共轭破坏, 闭合岩样多为单斜面破坏形式。

c. 岩样受载损伤与能量变化紧密相关, 基于胶结破坏能建立损伤演化关系模型, 能较好地反映平面应力条件下含非贯通裂隙岩样应力随应变的变化过程。

## 参考文献:

[1] 曹平, 曹日红, 赵延林, 等. 岩石裂纹扩展一破断规律及流变特征[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8):1737-1762.

[2] 刘华伟, 杨晨. 闭合与非闭合裂隙岩石单轴压缩的颗粒流细观分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 131-135.

[3] WANG C G, WANG S H. Modified generalized maximum tangential stress criterion for simulation of crack propagation and its application in discontinuous deformation analysis[J]. Engineering fracture mechanics, 2022, 259:108159.

- (8): 2108-2119.
- [2] WU Y Y, ZHANG M, YANG L, et al. Failure mechanisms and dynamics of the Shanzao rockslide in Yongjia County, China on 10 August 2019 [J]. *Landslides*, 2021, 18(7): 2565-2574.
- [3] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. *Landslides*, 2018, 15: 123-133.
- [4] 闫怡秋, 郭长宝, 张永双, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的西藏雄巴古滑坡变形特征[J]. *地质学报*, 2021, 95(11): 3556-3570.
- [5] 刘沛源, 常鸣, 武彬彬, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的成汶高速汶川段滑坡易发区选线研究[J]. *地球科学*, 2022, 47(6): 2048-2057.
- [6] 周定义, 左小清, 喜文飞, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 16-24.
- [7] 王文衡, 黄静, 崔龙, 等. 基于 SBAS 技术的 WLL 水库大坝变形监测分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(2): 119-122, 156.
- [8] 李慧. 基于光学遥感和 InSAR 技术的滑坡早期识别与监测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [9] 邓云涛. 基于 InSAR 技术的岷江上游滑坡早期识别[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [10] 冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 384-393.

## Deformation Analysis of Shanzao Landslide Based on SBAS-InSAR Technology

YANG Ben, MIAO Hai-bo, MA Chuang, ZHU Long-qi

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Landslides induced by typhoon rainstorm has the characteristics of abruptness and difficulty in the investigation. Taking the Shanzao landslide that occurred during the typhoon "Lekima" as an example, based on 24 landscape data of Railway Sentinel-1 from Sept. 12, 2017, to Aug. 9, 2019, this paper analyzed the sequential cumulative deformation of landslides in this period by SBAS-InSAR technology and further analyzed the regularity of surface deformation of landslide mass with meteorological data. The results show that the deformation before the occurrence of Shanzao landslide is mainly divided into three stages: creep stage of landslide mass, deformation of front edge of landslide mass increases significantly and gradually expands toward the middle of the slope mass, and accelerated deformation stage of the rear edge of landslide mass. The vertical deformation rate and accumulated deformation data of InSAR monitoring points on the landslide mass show that the deformation rate and accumulated deformation in the front and middle of slope are small, and it mainly focus on the rear edge of the landslide, with the maximum deformation rate and accumulated settlement of 40 mm/a and 320 mm respectively. The landslide is a push-over landslide. The research results provide a new idea and method for the early identification, monitoring and early warning of landslides, and have a certain reference value for the prevention and control of landslide disasters.

**Key words:** Shanzao landslide; deformation of the landslide; Sentinel-1; SBAS-InSAR; Typhoon Lekima

(上接第 169 页)

- [4] 周军华, 杨坤, 房凯, 等. 裂隙对含孔洞砂岩力学及损伤演化特征的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 968-975.
- [5] 赵东雷, 左双英, 黄春, 等. 层状岩体各向异性损伤力学特征的试验研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(11): 144-147, 91.
- [6] 张超, 杨楚卿, 白允. 岩石类脆性材料损伤演化分析及其模型方法研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(9): 2344-2354.
- [7] 秦楠, 张金龙, 王永岩. 含不同倾角单裂隙类岩石单轴强度及蠕变速率的研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(3): 662-667, 697.
- [8] 周科平, 胡振襄, 高峰, 等. 基于核磁共振技术的大理岩三轴压缩损伤规律研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3117-3122.

## Analysis of Microcrack Initiation, Propagation and Damage Evolution in Fractured Rock

LI Chuan-long, YU Ran-gang, MA Guo-liang, YANG Wen-dong, SONG Ruo-song, ZHANG Li-song  
(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** In order to explore the microcrack initiation, propagation and damage evolution of rock samples with different crack types (opening and closed), inclination and crack length, based on PFC<sup>2D</sup>, the fractured rock sample model was constructed and the uniaxial compression numerical tests were carried out. The initial crack and failure characteristics of rock sample under different crack obliquity and type were explained from the perspective of mesoscopes. The damage analysis of rock samples was carried out from the perspective of energy. The results are as follows. With the increase of crack inclination angle, the peak strength of the open type is positively correlated, while that of the closed type decreases first and then increases. The elastic modulus is consistent with the change of peak strength. When  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ , the microcrack initiation characteristics of the two kinds of fractured rock samples are consistent. When  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , the failure paths of the two rock samples are similar. The damage variable and correction coefficient were defined based on the energy of cementation failure, and the evolution model was established. The rationality of the model was verified from the perspectives of fracture type, inclination angle and length. The research results can provide a theoretical basis for further understanding the damage evolution process of fractured rock mass after loading.

**Key words:** fractured rock; crack angle; crack initiation mechanism; particle displacement vector field; damage evolution