

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221733

# 基于 SBAS-InSAR 技术的山早滑坡形变分析

杨 犇, 缪海波, 马 闯, 朱隆奇

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 台风暴雨诱发滑坡具有突发性, 调查难度较大。以台风“利奇马”期间发生的山早滑坡为例, 基于滑坡发生前的升轨哨兵一号 2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日的 24 景数据, 采用 SBAS-InSAR 技术分析了该时段滑坡的时序累积变形, 并结合气象资料进一步分析了滑坡体地表形变的规律。结果表明, 山早滑坡发生前的形变主要划分为滑坡体蠕变阶段、滑坡体前缘变形显著增加并向坡体中部逐渐扩大阶段、滑坡体后缘加速变形阶段 3 个阶段; 滑坡体上 InSAR 监测点垂直方向的形变速率及累积变形数据显示坡体前缘及中部形变速率和累计变形较小, 变形主要集中在滑坡体的后缘, 其形变速率和累计沉降最大分别可达 40 mm/a 和 320 mm, 该滑坡为推移式滑坡。研究结果为滑坡的早期识别及监测预警提供了新的思路和方法, 对滑坡灾害的防治有一定的参考价值。

**关键词:** 山早滑坡; 滑坡形变; 哨兵一号; SBAS-InSAR; 台风“利奇马”

**中图分类号:** P642. 22; [TV221. 2]

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0175-05

## 1 概况

2019 年 8 月 10 日受台风“利奇马”的影响, 在浙江省永嘉县山早村引发了山早滑坡, 造成 32 人死亡<sup>[1,2]</sup>。山早滑坡所在斜坡的坡度为 25°~30°, 滑坡体主滑动方向约为 160°。将滑坡分为源区和堆积区, 滑坡源区长约 158 m, 最大宽度约 115~120 m, 面积约 11 130 m<sup>2</sup>。滑坡堆积区的最大长度和宽度分别为 216、140~145 m, 面积约 15 778 m<sup>2</sup>, 滑坡体整体呈“舌形”, 滑坡源主要为强风化凝灰岩, 堆积体为块碎石土。山早滑坡的工程地质平面图及滑坡发生后的影像图见图 1、2。其中图 2 影像图从 www. zjol. com. cn 中修改得到。台风过境时诱发的滑坡突发性强、危害性大, 给当地人民生命财产造成了严重威胁。因此, 开展滑坡灾害的早期识别和监测预警, 对防灾减灾工作具有重要意义。InSAR 技术中的小基线 (SBAS) 技术是近几年发展起来的一种新型大地测量手段, 可以获得毫米量级的地表形变信息, 已被成功应用于滑坡形变分析和灾害监测预警<sup>[3]</sup>。基于 SBAS-InSAR 技术, 对滑坡早期识别与形变

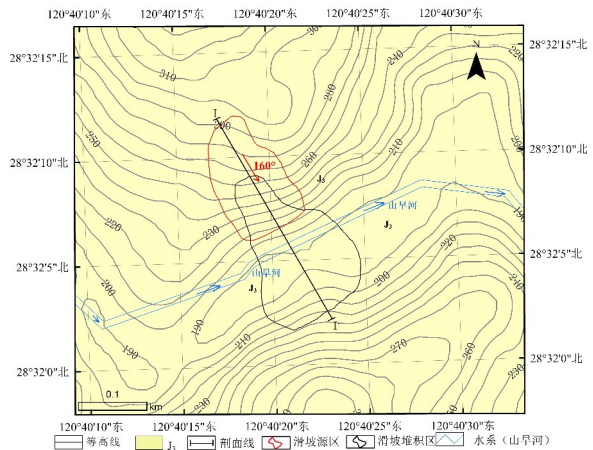


图 1 山早滑坡平面图

Fig. 1 Plan of Shanzao landslide



图 2 山早滑坡滑动后影像图

**Fig. 2 Image after the occurrence of Shanzao landslide**  
监测已进行了深入研究, 并取得相应成果<sup>[4-6]</sup>。可

收稿日期: 2022-08-21, 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2208085MD97)

作者简介: 杨犇(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害, E-mail: 1625547157@qq. com

通讯作者: 缪海波(1985-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为岩土体稳定性与地质灾害, E-mail: hbmiao@aust. edu. cn

以说,SBAS-InSAR 技术已广泛应用于滑坡的早期识别和不同尺度的地表形变监测研究。因此,本文针对山早滑坡,利用滑坡发生前 2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日哨兵一号升轨的 24 景数据,采用 SBAS-InSAR 技术分析了滑坡的时序累积变形趋势,并结合气象资料进一步分析了滑坡体周边、前后缘及中部的形变速率和累积变形的规律,旨在为滑坡灾害的监测预警提供科学数据支持和理论参考。

## 2 SAR 数据获取及处理方法

### 2.1 数据选取及覆盖概况

为探求“利奇马”台风来临前山早滑坡整体地表形变速率及累积位移变化趋势,使用来自欧空局 Sentinel 1A 的单视复数 SAR 影像数据,通过 SARscape 裁剪后的覆盖区域见图 3。

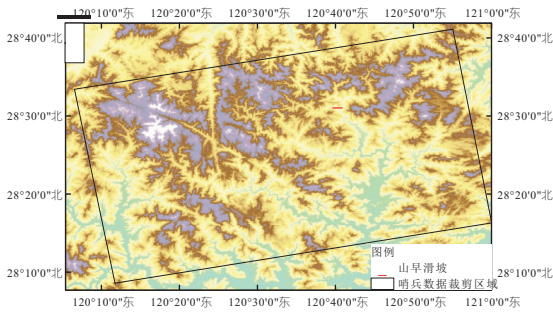


图 3 哨兵一号数据裁剪覆盖范围图

Fig. 3 Data clipping coverage map of Sentinel-1

选取 2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日的 24 幅 C 波段欧空局 Sentinel-1A 卫星升轨影像,其时间间隔为 24 d 或 36 d,累积时间基线空间基线长度见表 1。同时为了提高 SBAS-InSAR 的干涉结果精度,选取每一景遥感影像前后对应的 Sentinel-1A 精密轨道数据校正影像。由于研究区域地形起伏较大,在分辨率为 30 m 的 SRTM DEM 中消除地形相位的影响。

### 2.2 技术原理及形变速率的获取

#### 2.2.1 SBAS-InSAR 技术原理

SBAS 技术<sup>[7]</sup>的基本原理是基于小基线原则对所有可用的干涉像对的时间-空间基线进行约束,将遥感卫星获得的 SAR 数据自由组合成小基线数据集。采用最小二乘法得到一个地表形变时间序列,再利用 SVD 法将一系列小基线集联合,求出形变速率的最小范数解,解决总方程秩亏的问题,获得长时间序列形变<sup>[8]</sup>。该方法的主要流程见图 4。

#### 2.2.2 视向线形变速率获取

表 1 山早滑坡 Sentinel 1A 数据时间序列表

Tab. 1 Time series of Sentinel-1A data of the Shanbao landslide

编号	成像时间 (年-月-日)	成像 模式	极化 模式	累积时间	累积空间
				基线/d	基线/m
1	2017-09-12	IW	VV	0	0
2	2017-10-18	IW	VV	36	122.537
3	2017-11-11	IW	VV	60	-59.215
4	2017-12-17	IW	VV	96	94.771
5	2018-01-10	IW	VV	120	-78.880
6	2018-02-15	IW	VV	156	18.168
7	2018-03-11	IW	VV	180	-0.523
8	2018-04-16	IW	VV	216	-36.245
9	2018-05-10	IW	VV	240	-75.895
10	2018-06-15	IW	VV	276	116.913
11	2018-07-21	IW	VV	312	-87.090
12	2018-08-14	IW	VV	336	74.712
13	2018-09-19	IW	VV	372	-72.251
14	2018-10-13	IW	VV	396	-5.255
15	2018-11-18	IW	VV	432	48.337
16	2018-12-12	IW	VV	456	62.620
17	2019-01-17	IW	VV	492	-35.266
18	2019-02-22	IW	VV	528	-27.354
19	2019-03-18	IW	VV	552	52.977
20	2019-04-23	IW	VV	588	-164.727
21	2019-05-17	IW	VV	612	112.337
22	2019-06-22	IW	VV	648	6.207
23	2019-07-16	IW	VV	672	-8.954
24	2019-08-09	IW	VV	696	-110.417

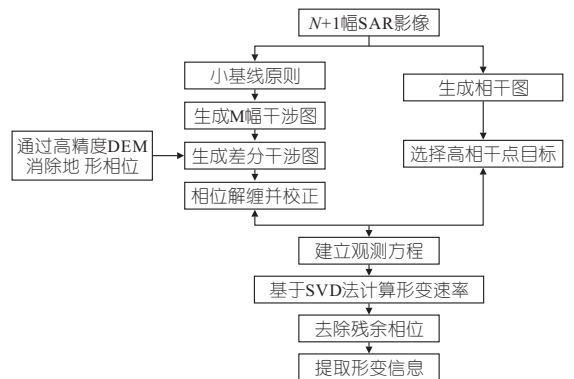


图 4 SBAS 处理流程

Fig. 4 SBAS processing flow

基于 SBAS 算法,采用 ENVI 中的 SARscape 模块对 Sentinel 1A 数据进行干涉处理,产生 72 个干涉对,时间基线为 120 d,临界基线为 2%,各像对空间和时间基线的连接方式见图 5。运行生成差分干涉图,部分差分干涉像对见图 6。

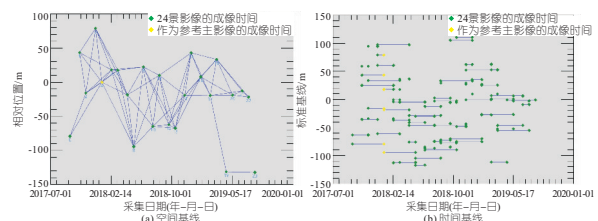


图 5 影像空间、时间基线

Fig. 5 Image space and time baseline

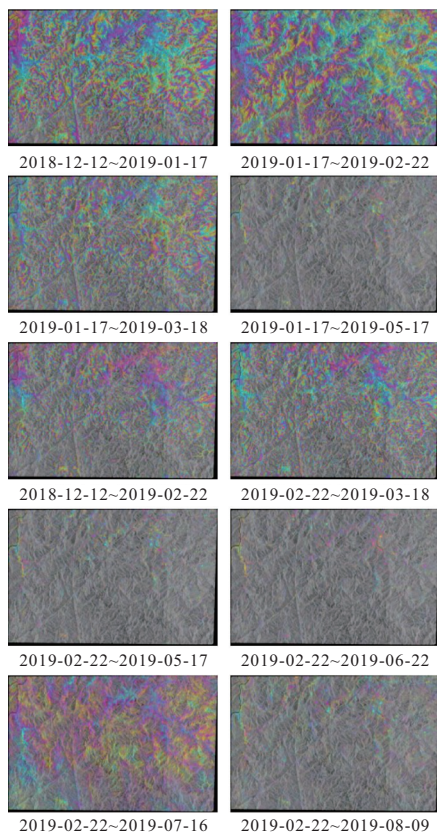


图 6 差分干涉像对(部分)

Fig. 6 Differential interference image pair(part)

在做轨道精炼与重去平过程中,不能确定刺点位置为稳定区域,由于研究区地形复杂,丘陵、山脉较多,直接导致干涉图上选择 GCP 点位置存在极大的不确定性,影响分析结果的精度。因此,在做地表形变测量时,借助 Google Earth 选取稳定点的位置(如稳定交通枢纽等构筑物)作为 GCP 点<sup>[9]</sup>,以此降低选点不当带来的误差。基于 ArcGIS 平台生成图层,再利用 SARscape 将地理坐标的 GCP 点转化成 SAR 坐标系下的 GCP 点。利用生成的 GCP 点对所有数据进行重去平及多次重去平优化,从而得到最终的 GCP 点数据。

对合成的干涉图进行反演及地理编码,获得地表沿雷达视向的平均形变速率,最终得到时间序列上的形变结果。

### 3 形变结果分析

#### 3.1 不同时期累积变形分析

2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日,山早滑坡累积时序形变见图 7。时序图以 2017 年 9 月 12 日的影像为基准,假设该期地表形变量为 0,因而滑坡在该时段内累积最大沉降量为 -296.45 mm,最大抬升量为 189.98 mm。由坡体时序形变图可知,山早滑坡变形主要划分为 3 个阶段:①

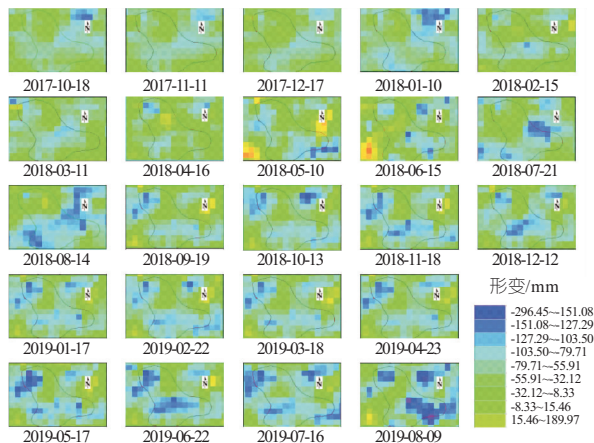


图 7 时序形变图

Fig. 7 Time series deformation map

第一阶段。2017 年 9 月 12 日至 2018 年 5 月 10 日,该阶段滑坡整体处于相对稳定状态,时序累积形变量多集中于 -32~15 mm 之间。②第二阶段。2018 年 5 月 10 日至 8 月 14 日,该阶段滑坡下部变形缓慢加剧,坡体前缘形变显著增加并向坡体中部逐渐扩大,以沉降为主,此阶段时序内累积沉降量最大可达 -127 mm。③第三阶段。2018 年 8 月 14 日至 2019 年 8 月 9 日,该阶段变形急剧增加,根据时序形变图可发现,形变主要集中于坡体中上部,以沉降为主,时序累积沉降量最大可达 -296 mm,2019 年 7 月 16 日至 8 月 9 日,坡脚处形变不断扩大且有向上发展的趋势。值得注意的是,滑坡外侧也存在较大变形,造成这种情况的原因有多种。如果这部分坡体运动的卫星探测有偏差,将导致分析结果偏大;或者这部分可能是一个实际的稳定区域,后来被滑坡变形加速区域的横向扩展或以上区域的崩塌影响。对于坡脚外侧还可能是受人类工程活动的影响,如坡脚开挖、修路等。

#### 3.2 InSAR 地表形变分析

为研究山早滑坡地表形变规律,在滑坡体外部及左右边界、后缘、中部及前缘坡体各取部分 InSAR 监测点进行分析。其中, # 1~# 3 位于滑坡体外部及左右边界; # 4~# 6 位于坡体后缘; # 7~# 9 位于坡体中部; # 10、# 11 位于前缘边界外,2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日滑坡 InSAR 监测点垂直方向时序累积位移变化曲线见图 8。由图 8 可知,研究时间内,滑坡体外部 InSAR 监测点的垂直方向形变速率多在一 10~0 mm/a、形变量多在一 30~30 mm 之间,维持稳定状态,坡体内部 InSAR 监测点多呈下降趋势,因而形变发生于滑坡体内部,且研究所圈画的滑坡边界较为准确。

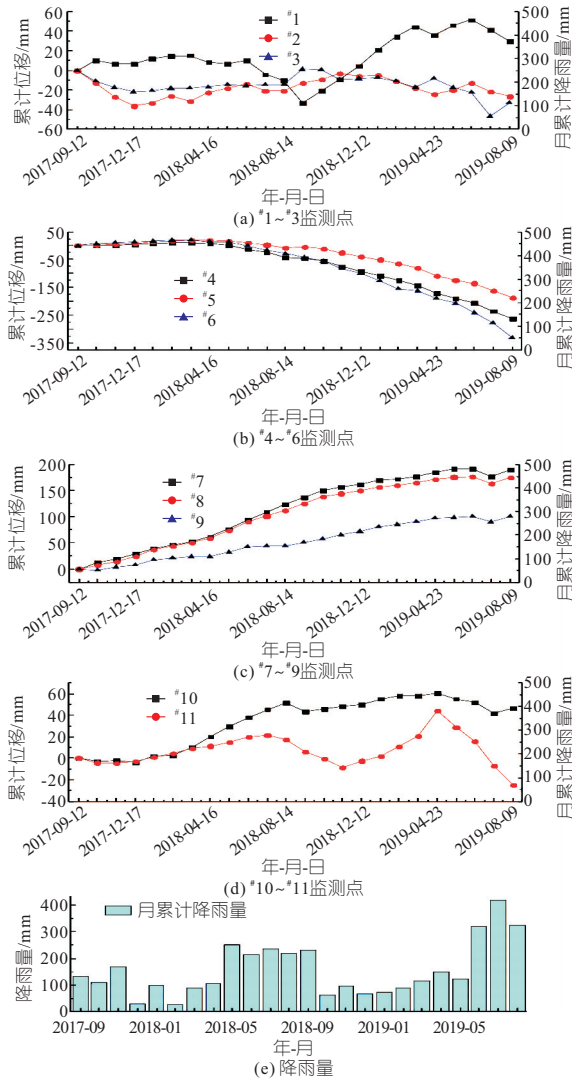


图 8 山早滑坡 InSAR 监测点垂直方向累积位移

Fig. 8 Vertical cumulative displacements of the InSAR monitoring points of the Shanzao landslide

对于坡体后缘 InSAR 监测点 #4~#6, 由图 8 可知, 其累积沉降量最大可达到 320 mm, 且后缘在研究时间内大体可分为两个阶段, 第一阶段自 2017 年 9 月 12 日至 2018 年 4 月 16 日, 该阶段内后缘稳定, 形变较小; 第二阶段自 2018 年 4 月 16 日至 2019 年 8 月 9 日, 此阶段较前一阶段变形加剧, 在一定程度上受降雨的影响, 使坡体被扰动, 滑坡体后缘向下滑动。对比气象数据得知, 2017 年 9 月 12 日至 2018 年 4 月 16 日降雨量小, 坡体形变小; 降雨自 2018 年 4 月之后较往年偏多, 此阶段坡体形变增加较大, 从滑坡发生前的 Google Earth 可以发现, 坡体后缘上部多为农田且植被覆盖率较坡体前缘及中部偏低, 致使后缘在雨季变形速率相对前缘、坡体中部及坡体外部的点要大。滑坡体中部 InSAR 监测点 #7、#8、#9 均呈上升趋势且变化趋势相同, 处于持续变形状态, 累积抬升量均在 100~200 mm 之间, 变形多为顶部

滑坡体表面松散岩土体滑落所致, 使得坡体中部累积位移抬升。由影像观测可发现, #7、#8、#9 监测点地势相对于其他监测点更为平缓, 且植被覆盖相对较高, 灌木林茂密, 导致坡体中部相干性较差, 演化的形变速率点偏少<sup>[10]</sup>。由其时序曲线图分析可知, 坡体中部 2017 年 9 月 12 日至 2018 年 4 月 16 日变形较小, 2018 年 4 月 16 日至 2019 年 8 月 9 日累计降雨量大, 受降雨及坡脚开挖影响, 形变速率加剧, 为整个研究时段形变最剧烈的阶段; 造成土体不同阶段的抬升和沉降, 年形变速率在 -10~10 mm, 但累积抬升仍为主要表现。由 #10、#11 监测点可知, 坡体前缘整体呈下降趋势, 但由于地势低缓, 变形程度较小, 明显小于中部, 由于靠近滑坡体底部, 其变化除表面松散岩土体滑落外, 还受人类工程活动的影响。根据滑坡体左侧(靠近高架桥一侧) InSAR 监测点数据显示, 两处监测点边界处形变速率在 -10~0 mm/a, #10 累积抬升 50 mm 左右, 而右侧速率偏高, 这与图 7 时序累积位移相符合。#11 在 2019 年 4 月份出现沉降速率不断变大的趋势, 与降雨强度增强有关。

## 4 结论

a. 根据不同时间序列的时序累积形变分析, 以 2017 年 9 月 12 日滑坡的地表形变为基准, 2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日该时段内滑坡累积最大沉降量为 -296.45 mm, 最大抬升量为 189.98 mm。山早滑坡变形主要划分为滑坡体蠕变阶段、滑坡体前缘变形显著增加并向坡体中部逐渐扩大阶段、坡体后缘加速变形阶段 3 个阶段, 且形变主要集中于坡体后缘, 以沉降为主, 时序累积沉降量最大可达 -296 mm。

b. 选取坡体周边及内部不同的 InSAR 监测点进行地表形变分析, 2017 年 9 月 12 日至 2019 年 8 月 9 日, 形变主要发生在雨季的滑坡体内部, 且滑坡后缘变形速率相对前缘、坡体中部及坡体外部的点要大, 其形变速率多在 -40~-20 mm/a, 最大约 -40 mm/a。滑坡后缘的地表形变较大, 前缘、中部的地表形变较小, 最大累计变形量分别可达约 320、50、200 mm, 且滑坡后缘地表变形表现为沉降, 而坡体前缘和中部变形主要以抬升为主。

### 参考文献:

[1] CUI Y L, HU J H, XU C, et al. A catastrophic natural disaster chain of typhoon-rainstorm-landslide-barrier lake-flooding in Zhejiang Province, China [J]. Journal of mountain science, 2021, 18

- (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