DOI：10.16285/j.rsm.2022.0782

基于透明相似模型试验的主控裂隙边坡变形破坏演化机制研究

冷先伦[1,2]，王 川[1,2]，盛 谦[1,2]，宋文军[3]，陈 健[1,2]，张占荣[4]，陈 菲[5]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 武汉轻工大学 土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430023；
4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430063；5. 成都大学 建筑与土木工程学院，四川 成都 610106）

摘 要：岩质边坡灾害孕育期的变形破坏发展过程通常受其内部长大裂隙（主控裂隙）控制，揭示主控裂隙边坡变形破坏演化机制对滑坡灾害防治具有重要意义。基于透明相似模型试验技术，选取 2 种典型主控裂隙（后缘陡倾角裂隙和前缘缓倾角裂隙）边坡为研究对象，在自研设备上开展了主控裂隙边坡内部变形破坏演化过程的模型试验研究；分别以位移速率和应变速率作为边坡变形和裂隙扩展的表征量，以无裂隙边坡变形破坏演化规律为参照，对比分析了后缘和前缘主控裂隙影响下边坡内部变形破坏的时空演化机制。结果表明：（1）通过模拟无裂隙边坡内部变形累积以及破裂萌生、扩展与贯通的渐进过程，验证了所采用的试验方法在研究边坡内部变形破坏演化过程方面的可靠性；（2）主控裂隙边坡内部变形破坏过程与无裂隙边坡相似，可分为变形累积、破裂带萌生/初始裂隙起裂、破裂带/裂隙扩展调整、破裂带/裂隙快速扩展贯通等 4 个阶段；（3）在初始主控裂隙滑移变形的作用下，后缘陡倾角裂隙尖端因受推移作用而发生拉张-剪切混合型起裂并向下扩展，前缘缓倾角裂隙尖端因受牵引作用而发生拉张型起裂并向上扩展，裂隙扩展速率随扩展长度的增加而呈指数型增长；（4）裂隙扩展类型随边坡变形与裂隙扩展过程不断调整，后缘陡倾角裂隙由初始拉张-剪切混合型扩展转化为剪切型扩展，并最终从坡趾附近剪出，前缘缓倾角裂隙由初始拉张型扩展转化为剪切型扩展，并最终与后缘破裂贯通。

关 键 词：透明模型试验；主控裂隙边坡；可视化技术；变形演化；裂隙扩展

中图分类号：TU 454 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 05－1283－13

Evolution mechanism of deformation and failure of rock slope with controlling fissure through transparent physical model experiments

LENG Xian-lun[1,2], WANG Chuan[1,2], SHENG Qian[1,2], SONG Wen-jun[3],
CHEN Jian[1,2], ZHANG Zhan-rong[4], CHEN Fei[5]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China;
4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China;
5. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China)

Abstract: The deformation and failure evolution process of rock slope during disaster incubation period is controlled by internal long fissures (controlling fissures), and the evolution mechanism is of great significance for the prevention of landslide disasters. Based on the transparent physical model experiment technology, two typical rock slopes with controlling fissures (one with a steep fissure at the back and the other with a gently inclined fissure at the front) were selected as the objects, and the evolution process of deformation and failure inside the slopes was studied through physical model experiments using the self-developed equipment. The displacement rate and strain rate were taken as the characterization quantities of the deformation and fissure propagation, and the spatiotemporal evolution mechanism under the influence of fissures was analyzed with the reference of the common slope without controlling fissure. The conclusions are: (1) The reliability of the proposed experiment method in the study of the deformation and failure evolution process inside the slopes was verified through the simulation of internal deformation accumulation and progressive

收稿日期：2022-05-24 录用日期：2022-07-26
基金项目：国家自然科学基金（No. 52079135）；中铁第四勘察设计院集团有限公司科研课题（No. 2020K043）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52079135) and the Research Project of China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. (2020K043).
第一作者简介：冷先伦，1980 年生，男，博士，副研究员，主要从事岩土工程与稳定方面的研究。E-mail: xlleng@whrsm.ac.cn

process of fissure initiation, propagation, and penetration. (2) The deformation and failure process of the slopes with controlling fissures is similar to that of the slope without controlling fissures and can be divided into four stages: deformation accumulation, failure band/fissure initiation, failure band/fissure expansion adjustment, and rapid expansion and penetration of failure bands/fissures. (3) The tip of steep fissure at the back undergoes a tensile-shear mixed initiation and expands downward due to the pushing action induced by initial fissure slip deformation, while the tip of gently inclined fissure at the front undergoes tensile initiation and expands upward due to the traction induced by initial fissure slip deformation. The propagation rates of fissures increase exponentially with the increasing length of fissures. (4) The fissure propagation modes change with the evolution of slope deformation and fissure propagation. The steep fissure at the back starts to propagate in tensile-shear mixed mode and turns to propagate in shear mode, and finally shears out near the slope toe. The gently inclined fissure at the front firstly propagates in tensile mode and then transforms to shear mode, and finally intersects with the failure zone at the back.

Keywords: transparent model experiment; slope with controlling fissure; visualization technology; deformation evolution; fissure propagation

1 引 言

裂隙岩体边坡广泛分布于我国西南山地与峡谷地形区域，其变形破坏通常受控于坡体中发育的长大裂隙（主控裂隙）[1]。例如，2010 年关岭滑坡[2]、2014 年小坝滑坡[3]和 2017 年普萨滑坡[4]等。主控裂隙岩体边坡灾害发生时一般具有突然性、高速性和巨大破坏性等特征，难以及时预警，然而在灾害的孕育期具有较为明显的外部表现特征，即岩体破裂在边坡后缘或坡面形成较为明显的破裂带和岩体破裂过程中伴随的边坡缓慢渐增变形[5-6]。因此，研究主控裂隙边坡灾害孕育期的变形破坏演化机制对于边坡失稳预警和滑坡治理具有重要意义。

主控裂隙边坡变形破坏演化机制的研究一般包括边坡应力分布与演化机制、坡体变形发展模式、主控裂隙扩展模式、岩桥断裂与边坡破坏等几个方面，常用的研究方法有理论分析[7-9]、物理模型试验[10-12]、数值模拟[13-15]和地质调查[6, 16]等。例如，周云涛[8]和唐红梅等[9]基于断裂力学原理分析了岩质边坡在自重、裂隙水压力和地震等作用下坡体主控裂隙起裂与扩展的力学机制；Hou [14]、Zhang[15]等基于数值模拟研究了主控裂隙作用下边坡变形破坏渐进演化过程和边坡破坏模式；Chen [6]、Zhu[16]等基于现场地质调查结果分析了峡谷地形区域岩质边坡主控裂隙形成机制与裂隙扩展模式。上述基于理论分析、数值模拟和地质调查的研究对于揭示主控裂隙边坡变形累积和破坏演化过程发挥了重要作用，然而破坏演化过程和最终变形破坏模式通常需通过物理模型试验加以验证。

物理模型试验因其具有影响因素可控制、试验结果较可靠、试验成本较低等优势，成为研究主控裂隙边坡变形破坏演化机制的重要手段。黄润秋等[12, 17]基于声发射、应变计等监测技术获得了室内裂隙岩质边坡岩桥内部能量释放、应力状态和位移数据，揭示了荷载作用下岩桥应力和能量累积过程以及岩桥的变形破坏过程。Chen[10]、Tang[11]等采用底摩擦加载系统开展了三段式边坡变形破坏的物理模型试验，分析了边坡后缘拉裂隙破裂扩展机制及前缘剪切弱带对岩桥断裂扩展的影响机制。黄达等[18-19]基于室内物理模型试验和离散元模拟，研究了不同倾角主控裂隙岩质边坡中岩桥的破裂演化过程，认为岩桥破裂模式主要为张拉贯通破坏和张−剪混合贯通破坏。Lin 等[20]针对锦屏水电站左岸边坡开展了室内缩尺模型试验，认为高陡边坡在反倾主控裂隙处容易出现弯曲变形及拉张扩展，在顺倾主控裂隙处容易出现剪切变形和剪切扩展。上述物理模型试验主要采用天然岩土体或其相似材料开展，并结合声发射、应变计、CT、X 射线等测量技术实现了对边坡模型表面或者坡体内部某些特定点的测量，再现了边坡表面或内部局部变形破坏演化过程。然而，现有的研究在边坡内部全断面的变形发展、破裂扩展的时空演化过程的观测与分析方面仍然较为缺乏。

近年来，随着透明材料配置技术、高清图像解析技术和高速连续拍照技术的发展，由熔融石英砂、无定形硅胶粉和有机混合溶液等原材料配置的透明岩土相似材料[21-24]逐渐被应用于边坡物理模型试验研究。例如，采用透明相似模型试验技术，Sui 等[25]研究了边坡在库水涨落作用下的变形累积过程和滑动破坏范围；Bathurst 等[26]研究了土工格栅等支护结构失效对后缘土体的变形及内部破裂带扩展的影响机制；Maghsoudi 等[27]研究了振动诱发的边坡变形和加速度响应规律以及剪切带的扩展演化规律；Wei 等[28]研究了黏土边坡后缘超载作用下坡面变形随边坡内部破裂带扩展演化的响应规律。透明相似模型试验技术具有内部可视化以及全断面、非侵入变形测量的优点，可实现对试验过程中坡体内部任意剖面的位移场的观测和分析，可以利用该技术对主控裂隙边坡内部变形累积和裂隙扩展的过程和演

化机制进行研究。

本文基于透明相似模型试验技术，在自研设备上开展主控裂隙边坡内部变形破坏演化的全断面、全过程研究，以揭示其内部变形破坏的演化机制。首先，以透明胶结土[29]为坡体相似材料、以透明 PET 树脂薄片为裂隙材料制作了主控裂隙边坡模型，采用自研的加载设备对边坡模型后缘进行伺服加载，并通过激光发射器和 CCD 相机等设备对边坡加载过程中内部断面的颗粒位置进行准连续的数字图像采集；其次，采用粒子图像测速（particle image velocimetry，简称 PIV）技术[30]对采集的数字图像进行解析，得到边坡加载过程中内部全断面变形场/应变场和破裂带扩展的准连续演化数据；最后，分别以变形速率场和应变速率场为边坡变形和破裂演化的表征量，以无裂隙边坡变形破坏过程为参照，对比分析后缘陡倾角主控裂隙边坡和前缘缓倾角主控裂隙边坡内部变形和裂隙扩展的时空演化机制。

2　主控裂隙边坡透明相似模型试验

2.1　透明相似材料

试验采用的透明相似材料为文献[29]所述透明胶结土，该材料通过将粒径为 0.5～1.0 mm 的熔融石英砂（骨架）、纳米级疏水性气相二氧化硅粉（胶结剂）、15#白油和正十二烷的混合矿物油（孔隙液）按一定配比进行混合、压实、饱和处理后制备而成，在非饱和条件下该材料呈白色半透明状，在饱和条件下完全透明，见图 1。试验采用的透明相似材料配比方案与文献[29]表 1 中 G4 组材料一致，经过充分搅拌、分层压实后，得到的透明相似材料的物理力学特性见表 1。

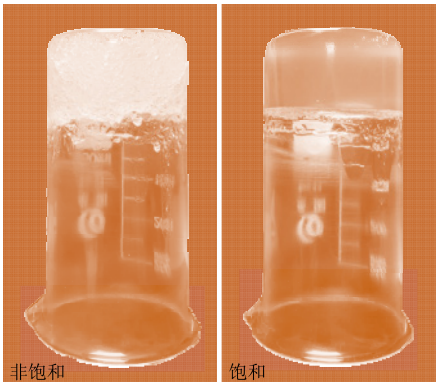


图 1　试验采用的透明相似材料[29]

Fig.1　Transparent similar material used in experiments[29]

表 1　试验采用的透明相似材料物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of transparent similar material used in experiments

材料成分含量/ (g·cm^{-3})			密实度	饱和	密度	黏聚力	内摩擦角	弹性模量	最大弹性应变率
熔融石英砂	二氧化硅粉	混合矿物油	/ %	状态	/ (g·cm^{-3})	/ kPa	/ (°)	/ MPa	
1.135	0.079	0.256	92	饱和	1.47	47	39	30	0.01

2.2　试验设备与试验步骤

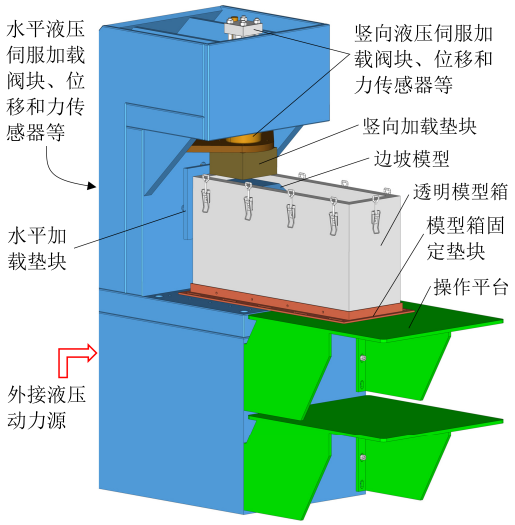
试验在自研的边坡模型加载设备上开展。该试验装置包括水平液压加载系统（本次试验未启用）、竖向液压加载系统及计算机控制系统，可实现对边坡水平和竖向偶联伺服加载，见图 2(a)。此外，根据基于透明土的可视化模型试验技术原理[31-32]，为了在加载过程中对边坡内部变形破坏情况进行数字图像记录，需要的试验设备还包括透明模型箱、激光发射器、自动摄像系统等，各部件的空间排布情况见图 2(b)。其中，透明模型箱采用亚克力玻璃制作，满足试验所需的高透明度和高强度的要求，模型箱盖上盖板后具有良好的气密性，可通过抽真空来使边坡模型达到饱和透明；边坡模型通过透明模型箱底部垫块固定于加载设备的操作平台上，且可根据不同的加载条件更换所需的模型箱类型。试验采用的激光发射器配备一字线棱镜，发出的激光是宽度为 1 mm、波长为 532 nm 的线激光；激光发射器工作功率为 2～10 W，试验中为了使边坡模型激光“切片”具有较高的亮度和清晰度，需将激光发射器功率调至 5 W 左右。自动摄像系统由高速 CCD 相机和图像采集软件组成，可以实现对被拍摄物体的高速、连续数字图像采集。

采用图 2 所示设备开展主控裂隙边坡内部变形破坏的模型试验，主要步骤如下：

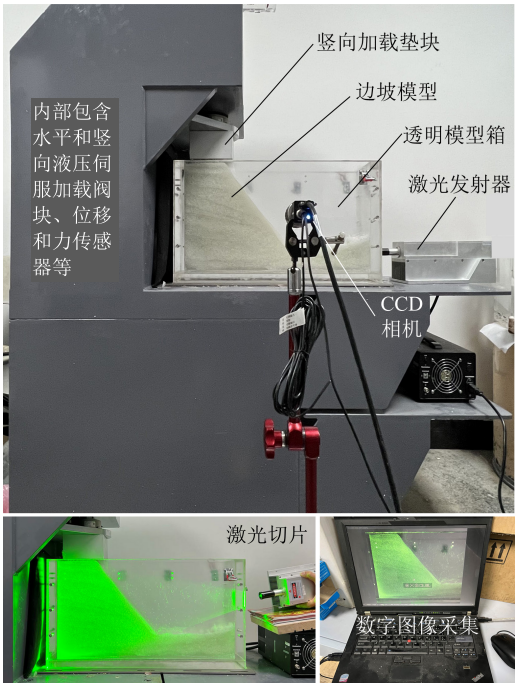
（1）边坡模型制作：①根据 2.1 节中的材料配比方案制作透明相似材料；②将透明相似材料按一定质量放入透明模型箱中并分层压实至设定的密实度（约为 92%），每次压实高度不超过 5 cm，压实下一层时需将上一层表面刮毛；③待模型箱中相似材料压实填充至设定高度后，将适量孔隙液倒入模型箱中，盖上模型箱盖板后抽出模型箱内空气，使孔隙液缓慢渗入模型材料内部以使模型材料达到完全饱和（透明）；④根据边坡几何形状对模型箱内压实的透明模型材料进行切割，从而得到透明边坡模型。

（2）边坡裂隙的制作：在模型材料分成压实填充的过程中，根据设定的裂隙位置埋入 PET 树脂薄

片，以此作为边坡初始裂隙。本文采用的 PET 树脂薄片厚度约为 0.3 mm，表面光滑，透明度高，将其埋入边坡模型中不会影响对边坡内部变形破坏的观测。



(a) 示意图



(b) 实体图

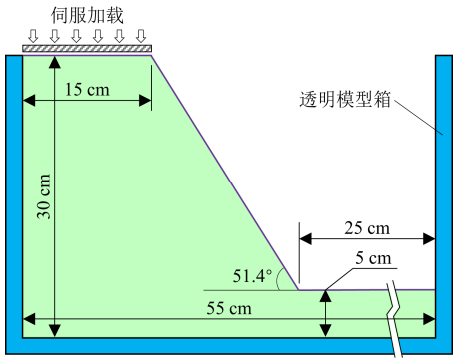
图 2 边坡透明相似模型试验设备

Fig.2 Equipment for transparent physical model experiments

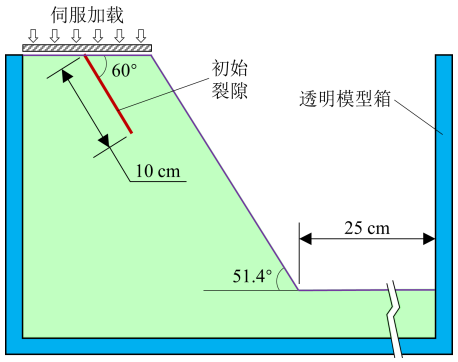
（3）边坡模型加载与数据采集：①将装有边坡模型的透明模型箱固定在加载设备的操作平台上，以保证加载过程边坡模型始终保持平稳；②调整激光发射器和 CCD 相机位置，以保证加载过程中采集的数字图像具有足够的清晰度；③启动边坡模型加载设备，使其以设定的位移加载速率对边坡后缘进行液压伺服加载，加载时采用 CCD 相机全程采集边坡模型颗粒移动的数字图像。

2.3 试验方案

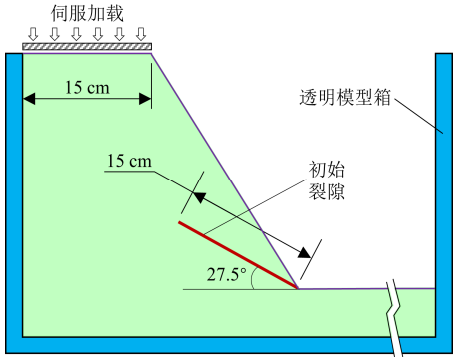
研究人员通过对关岭滑坡[2]、小坝滑坡[3]和普萨滑坡[4]等多起大型主控裂隙边坡失稳破坏前后的地质调查与分析揭示，岩质边坡的主控裂隙通常分布在边坡后缘或前缘，且后缘的主控裂隙通常呈陡倾角分布，而前缘的主控裂隙大多呈缓倾角分布[19]。基于此，为了探究主控裂隙边坡变形破坏机制，以无裂隙完整边坡（见图 3(a)）为参照，选取含后缘陡倾角和前缘缓倾角这两种典型主控裂隙（见图 3(b)和 3(c)）的边坡为研究对象开展模型试验研究。边坡模型的几何尺寸、裂隙迹长及分布位置、边坡模型加载的边界条件见图 3。



(a) 无裂隙边坡（参照）



(b) 后缘主控裂隙边坡



(c) 前缘主控裂隙边坡

图 3 模型试验方案

Fig.3 Schemes of physical model experiments

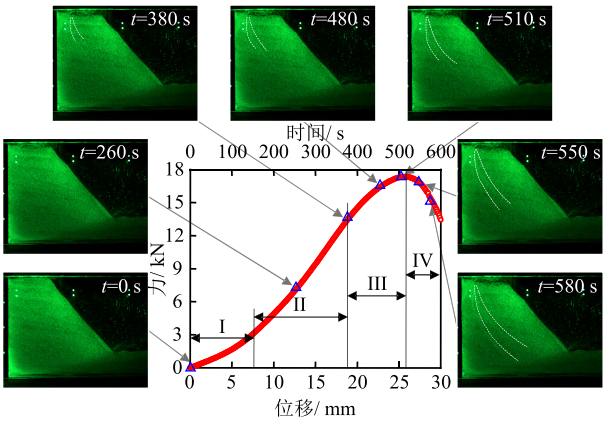
3　边坡模型加载与破坏过程

以 3 mm/min 的恒定位移加载速率对图 3 所示的 3 种边坡模型进行加载，得到边坡后缘位移−力响应曲线及不同加载时刻边坡破坏发展情况，见图 4。从 3 个边坡模型后缘位移−力响应曲线中可以看出，在边坡模型后缘加载位移匀速增加的过程中，加载力先后经历缓慢加速增加、近似匀速增加、缓慢减速增加、快速下降等阶段，边坡后缘位移−力响应曲线存在明显的拐点；根据拐点的分布位置及其对应的边坡破裂的发展情况，可将加载过程分为 4 个阶段，即阶段 I～IV。不同主控裂隙边坡在不同阶段具有不同的位移−力响应与破坏特征。

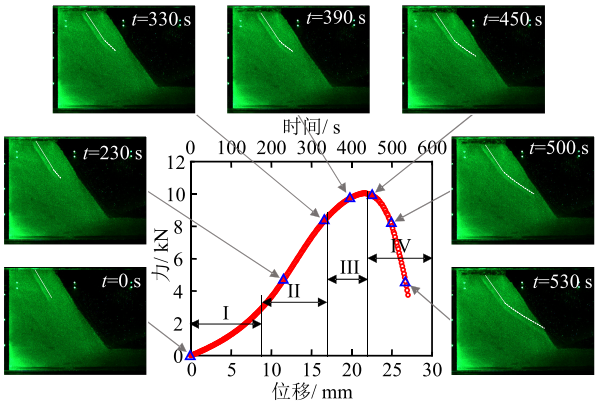
无裂隙边坡不同加载阶段的特征表现为（见图 4(a)）：①阶段 I：加载力随着加载位移的匀速增加而缓慢加速增加，在此过程中后缘坡体被逐渐压密，但边坡内部未形成明显的破裂带；②阶段 II：加载力随着加载位移的增加而近似匀速增加，边坡后缘因受挤压而逐渐萌生出破裂带；③阶段 III：加载力随着加载位移的增加而缓慢减速增加，后缘破裂带沿坡面向下渐进扩展，并且随着破裂带长度的增加，边坡后缘加载力逐渐达到峰值；④阶段 IV：随着后缘加载位移的持续增加，加载反力越过峰值点后快速下降，该阶段的破坏特征为破裂带快速扩展，并最终从坡趾附近剪出。

后缘主控裂隙边坡（图 4(b)）和前缘主控裂隙边坡（图 4(c)）与无裂隙边坡（图 4(a)）相比，三者加载过程的位移−力响应曲线在形态上较为相似，所不同的是前二者加载过程各阶段的持续时间相对较短，且加载力的峰值相对较小。例如，无裂隙边坡加载位移为 26 mm（加载时长 $t=510$ s）时加载力达到峰值 16.8 kN，而后缘主控裂隙边坡和前缘主控裂隙边坡加载位移分别为 22 mm（$t=440$ s）和 24 mm（$t=480$ s）时加载力达到峰值，分别为 9.9 kN 和 13.7 kN。

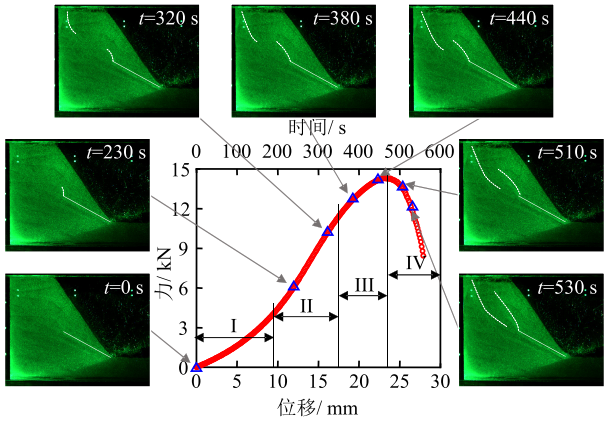
然而，在边坡加载过程的破坏演化特征方面，后缘主控裂隙边坡（图 4(b)）和前缘主控裂隙边坡（图 4(c)）与无裂隙边坡（图 4(a)）相比具有显著的差异，表现为：①初期起裂扩展特征不同：在加载第 I 阶段，后缘主控裂隙边坡开始沿裂隙面向下缓慢变形、起裂扩展，前缘主控裂隙边坡开始沿坡面向上缓慢变形、起裂扩展，到加载第 II 阶段，在后缘主控裂隙和前缘主控裂隙的尖端均出现了显著的扩展段；②中期破裂扩展方向不同：在加载第 II 和第 III 阶段，后缘主控裂隙向坡面下部渐进扩展，而前缘主控裂隙向边坡后缘渐进扩展；③后期破坏形态不同：到加载第 IV 阶段，后缘主控裂隙和前缘主控裂隙均沿加载中期既定扩展方向快速扩展，最终后缘主控裂隙从坡面下部（坡趾附近）剪出，而前缘主控裂隙与后缘破裂区域贯通，形成不同的边坡破坏形态；④受加载条件的限制，前缘主控裂隙边坡加载过程中，边坡后缘出现了一条向初始裂隙方向渐进扩展的剪切破裂带，该破裂带的扩展过程与无裂隙边坡中破裂带的扩展过程相似。



(a) 无裂隙边坡（参照）



(b) 后缘主控裂隙边坡



(c) 前缘主控裂隙边坡

图 4　边坡位移−力响应曲线及破坏发展过程

Fig.4　Displacement-force response curves and failure development processes of slopes

4 边坡变形演化机制

采用 PIV 技术（技术原理参见文献[30]）识别边坡加载全过程记录的数字图像，得到不同时刻边坡位移场、应变场等与变形相关的数据。文献[30]介绍了 2 种粒子图像解析算法，即“跳跃式”和“连续式”算法。其中，“跳跃式”算法以初始（$t=t_0$）数字图像作为后续（$t=t_n$，n 为某一时刻）所有数字图像分析的参照，而“连续式”算法则以前一张（$t=t_{n-1}$）数字图像作为后一张（$t=t_n$）数字图像分析的参照。考虑到边坡模型变形相对较大，本文采用“连续式”算法对边坡剖面粒子位移情况进行解析，得到不同时刻边坡内部的位移速率场和应变速率场数据，并以此为依据，分析边坡的变形和破坏演化过程。

4.1 无裂隙边坡（参照）

以不同时刻坡体变形速率为表征量，分析无裂隙边坡加载过程的变形演化规律，见图 5。由图可知：①在加载初期（[0, 380 s]），边坡后缘与坡肩附近首先发生变形，其中后缘坡体以竖向变形为主，坡肩附近以沿坡面向下的变形为主，该阶段的变形速率相对于加载全过程而言较小，见图 5(a)和 5(b)；②随着加载位移的增加（(380 s, 510 s]），边坡变形逐渐由后缘沿坡面向下传递，坡体竖向与水平变形分量均显著增大；在变形的推动作用下，在边坡后缘和中部出现一条显著的弧形错动变形带，其分布位置与边坡破裂带的分布位置（见图 4(a)）基本吻合；边坡潜在滑体随破裂带的发展而逐渐形成，边坡变形亦随之不断发展，在坡面附近以水平变形为主，在破裂带处以沿破裂带两侧错动变形为主，见图 5(c)和 5(d)；③在加载后期（(510 s, 580 s]），边坡破裂带两侧的错动变形速率逐渐增大，表明剪切带两侧发生快速的剪切变形，而潜在滑体也因此表现出沿坡面向下的整体滑动变形，见图 5(e)和 5(f)。

4.2 后缘主控裂隙边坡

图 6 展示了后缘主控裂隙边坡不同加载时刻坡体的变形发展情况。由图可知：①在加载初期（[0, 330 s]），后缘陡倾角主控裂隙两侧出现明显的滑移特征，裂隙尖端因受到裂隙滑移引起的推移作用而出现沿裂隙面向下滑移的趋势，见图 6(a)和 6(b)；②随着变形沿裂隙面向下传递（(330 s, 450 s]），裂

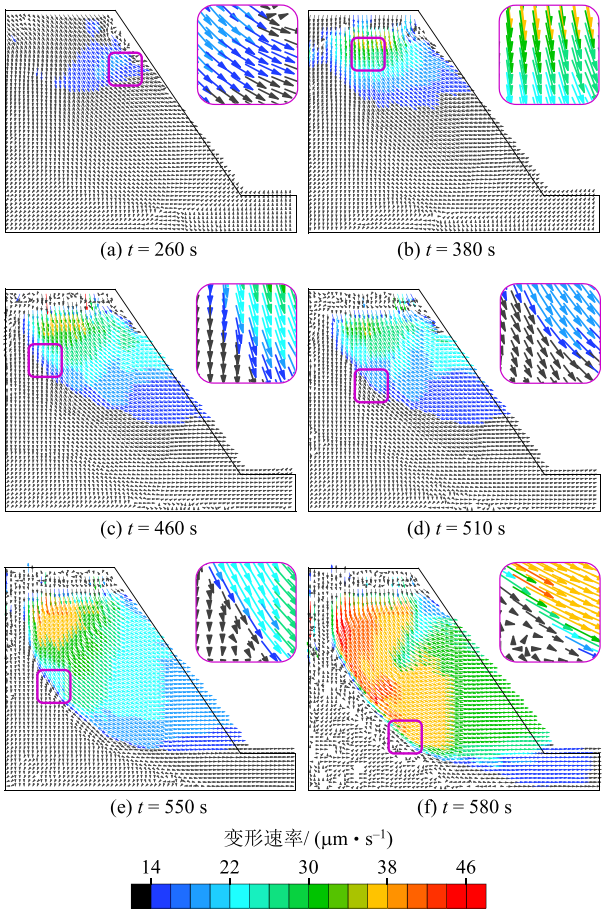


图 5 无裂隙边坡变形发展过程

Fig.5 Deformation development processes of slope without controlling fissures

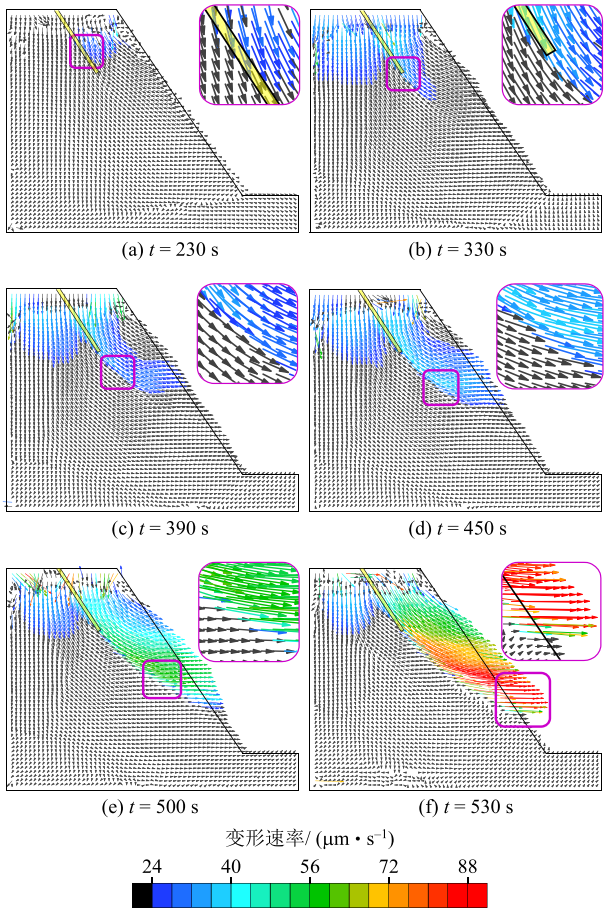


图 6 后缘主控裂隙边坡变形发展过程

Fig.6 Deformation development processes of slope with a controlling fissure at the back

隙尖端位移速率量值不断增大，位移速率矢量的方向不断调整，在边坡上部逐渐形成一条沿坡面发展的错动变形带，形成潜在滑体，见图 6(c)和 6(d)；③在加载后期（(450 s, 530 s]），潜在滑体的整体变形速率量值不断增大，变形速率的方向逐渐旋转指向坡面，说明潜在滑体整体表现为水平方向的位移速率分量占比增大，其中潜在滑体前缘和错动变形带处的变形速率的增加幅度最为显著，见图 6(e)和 6(f)。

4.3　前缘主控裂隙边坡

图 7 为前缘主控裂隙边坡不同加载时刻坡体变形发展情况。由图可知：①在加载初期（[0, 230 s]），边坡变形主要分布在后缘加载区附近，变形矢量方向近似竖直向下，表明该阶段边坡主要发生压密变形，这一变形特征与无裂隙边坡加载初期的变形基本一致，见图 7(a)；②随着加载位移的增大（(230 s, 320 s]），前缘缓倾角主控裂隙发生蠕滑变形，牵引后缘加载面与主控裂隙面之间的坡体整体沿坡面向下缓慢移动，形成潜在滑体，见图 7(b)；③在加载的中期和后期（(320 s, 530 s]），潜在滑体变形速率不断增大，整体表现为沿初始裂隙向下滑动变形；此外，受加载方式和前缘主控裂隙的影响，在边坡后缘逐渐出现一条向前缘主控裂隙尖端发展的变形错动带，见图 7(c)～7(f)。

5　边坡破裂带/裂隙扩展演化机制

5.1　无裂隙边坡（参照）

在边坡破坏演化分析的数值模拟和模型试验中，通常采用不同时刻坡体应变速率作为边坡破裂带/裂隙扩展演化过程的表征量[6, 14, 27]。图 8 给出了无裂隙边坡不同加载时刻的应变速率场，用以分析破裂带扩展演化过程。由图可知：①边坡加载初期（[0, 380 s]）整体应变速率较低，应变速率较大部位主要分布在坡肩附近；随着加载位移的增加，边坡后缘破裂带开始萌生，见图 8(a)和 8(b)；②边坡加载中期（(380 s, 510 s]），破裂带随着加载位移增大逐渐形成并不断向下扩展，初步形成弧形破裂带，见图 8(c)和 8(d)；③边坡加载后期（(510 s, 580 s]），破裂带随着后缘加载位移的增大而快速扩展，最终形成一条贯通后缘和坡趾的圆弧状破裂带，见图 8(e)和 8(f)。

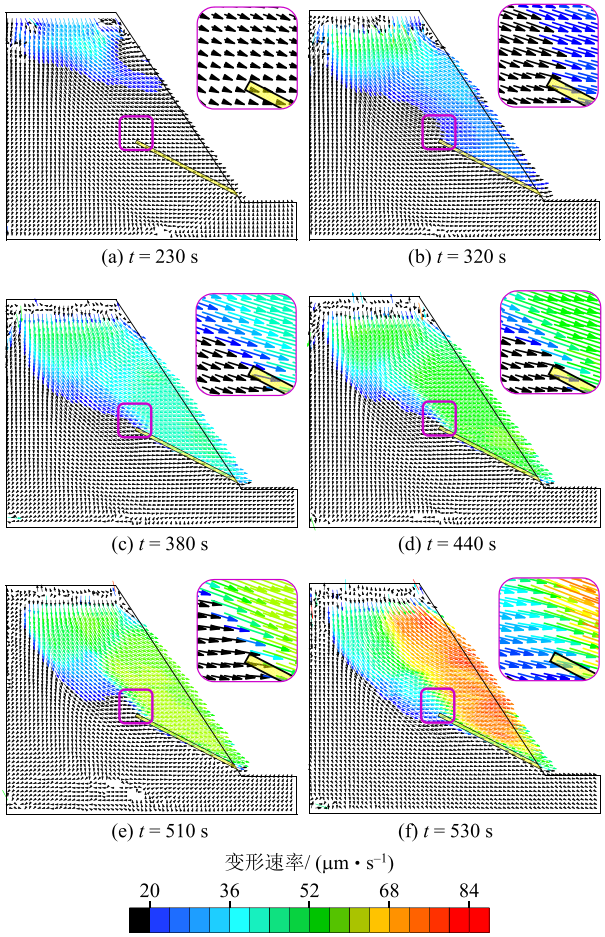


图 7　前缘主控裂隙边坡变形发展过程

Fig.7　Deformation development processes of slope with a controlling fissure at the front

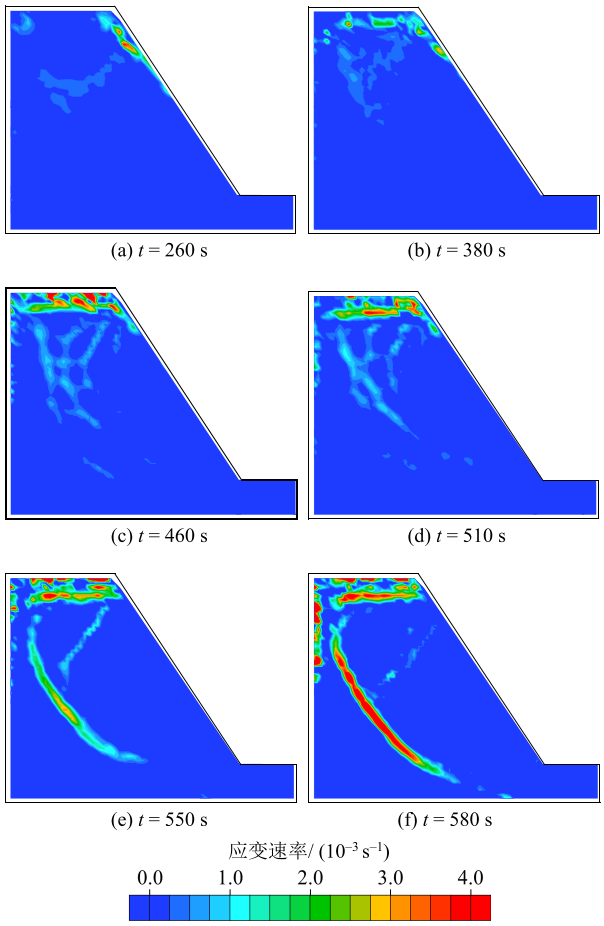
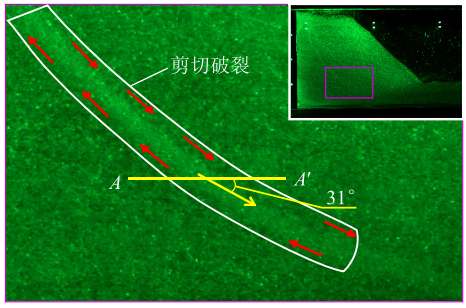


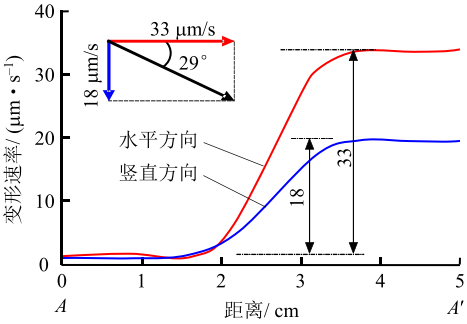
图 8　无裂隙边坡破裂带扩展演化过程

Fig.8　Failure band evolution processes of slope without controlling fissures

图 9 展示了无裂隙边坡加载后破裂带形态与破裂带 A - A' 断面两侧的变形分布情况，用于分析边坡破裂扩展类型。由图可知：①无裂隙边坡破裂带呈圆弧状，破裂带的倾角变化平缓，宽度分布均匀，破裂带两侧边界较为平滑，见图 9(a)；②破裂带 A - A' 断面两侧水平变形差值约为 33 μm/s，竖向变形差值约为 18 μm/s，据此可计算出破裂带处变形矢量的方向约为水平向下偏转 29°（图 9(b)），与破裂带倾角 31° 较为接近（图 9(a)），表明破裂带两侧主要发生平行于破裂带方向的变形；③根据 Huang 等[19]总结的不同类型破裂带形态和变形矢量特征，可判断边坡破坏类型为剪切破坏。



(a) 破裂带整体扩展形态



(b) 破裂带 A-A'断面变形分布（t= 580 s）

图 9 无裂隙边坡破裂带扩展模式

Fig.9 Failure band expansion mode of slope without controlling fissures

5.2 后缘主控裂隙边坡

图 10 展示了后缘主控裂隙边坡加载条件下裂隙扩展演化过程。由图可知：①边坡加载初期（[0, 330 s]）整体应变速率较低，应变速率较大部位主要分布在坡肩和后缘初始裂隙面附近，边坡裂隙尖端未发生起裂扩展，见图 10(a)、10(b)；②在加载中期（(330 s, 450 s]），后缘主控裂隙尖端随着加载位移的增加逐渐起裂扩展，且随着裂隙向下扩展，裂隙处应变速率逐渐增加，见图 10(c)和 10(d)；③在加载后期（(450 s, 530 s]），后缘主控裂隙逐渐扩展至坡面下部（坡趾附近），形成贯通的破裂带，贯通后的破裂带剪切速率显著增大，表明边坡发生了整体滑动破坏，见图 10(e)和 10(f)。

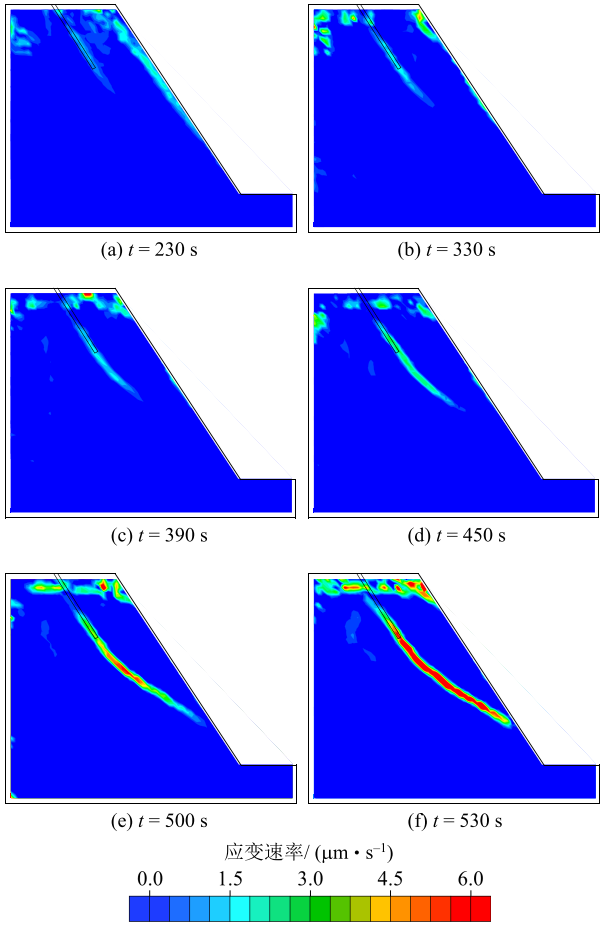
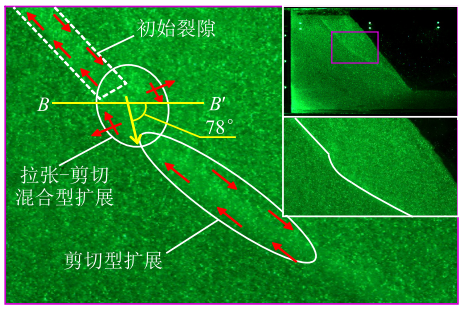


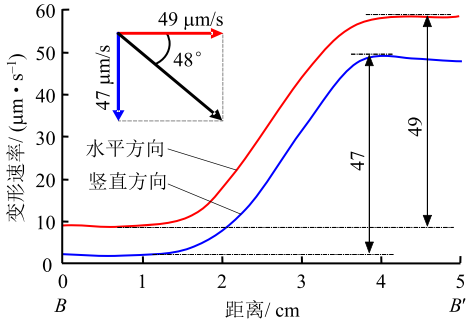
图 10 后缘主控裂隙边坡裂隙扩展演化过程

Fig.10 Failure band evolution processes of slope with a controlling fissure at the back

图 11 展示了后缘主控裂隙坡加载后裂隙形态与裂隙 B - B' 断面两侧的变形分布情况，用于分析边坡裂隙扩展类型。由图可知：①边坡后缘初始裂隙在加载作用下两侧颗粒发生错动位移，裂隙两侧边界较为平滑，裂隙宽度分布均匀，表明初始裂隙主要发生剪切滑移，见图 11(a)；②初始裂隙尖端扩展段呈微张形态，裂隙两侧边界呈小锯齿状，裂隙扩展角度与后续扩展段相比略微偏大，见图 11(a)；裂隙 B - B' 断面两侧水平变形差值约为 49 μm/s，竖向变形差值约为 47 μm/s，据此可计算出裂隙处变形矢量的方向约为水平向下偏转 48°（图 11(b)），与裂隙（倾角为 78°）夹角为 30°（图 11(a)），表明裂隙两侧同时存在平行和垂直于裂隙面的变形；根据裂隙的破坏模式和裂隙两侧的变形特征，判断裂隙的扩展破坏类型为拉张-剪切混合型；③裂隙后续扩展段的边界形态与无裂隙边坡破碎带（见图 9）较为相似，表明其扩展破坏类型为剪切型，扩展破坏细节不再赘述。



(a) 破裂带整体扩展形态



(b) 裂隙 *B*-*B*′断面变形分布（*t* = 530 s）

图 11　后缘主控裂隙边坡裂隙扩展模式

Fig.11　Failure band expansion mode of slope with a controlling fissure at the back

5.3　前缘主控裂隙边坡

图 12 为前缘主控裂隙边坡加载作用下裂隙扩展演化过程。

由图 12 可知：①在加载初期（[0, 230 s]），边坡应变速率较大部位主要分布在后缘加载面附近，前缘初始裂隙处的应变速率较小，裂隙无起裂扩展的迹象；②在加载中期（(230 s, 320 s]），前缘初始裂隙处的应变速率逐渐增大，裂隙尖端开始起裂并逐渐向上扩展，在此过程中，受加载驱动的影响，边坡后缘逐渐形成一条破裂带并向前缘裂隙尖端扩展，扩展模式与无裂隙边坡破裂带扩展模式相似；③在加载后期（(320 s, 530 s]），边坡前缘裂隙和后缘破裂带均快速扩展，最终前缘裂隙向上扩展至坡顶贯通，后缘破裂带向下扩展与前缘初始裂隙贯通。

图 13 展示了前缘主控裂隙边坡加载后裂隙形态与裂隙 *C* - *C*′ 断面两侧的变形分布情况，用于分析边坡裂隙扩展类型。由图可知：①边坡加载后前缘初始裂隙两侧边界平滑、裂隙宽度分布均匀，表明初始裂隙仅发生剪切滑移，见图 13(a)；②初始裂隙尖端呈张开形态，裂隙扩展段两侧边界呈锯齿状，破裂边界清晰，裂隙的扩展角度较大，扩展方向与加载方向近似平行，见图 13(a)；裂隙 *C* - *C*′ 断面两侧水平变形差值约为 43 μm/s，竖向变形差值约为 10 μm/s，据此可得裂隙处变形矢量的方向约为水平向下偏转 13°（图 13(b)），与裂隙扩展方向（水平

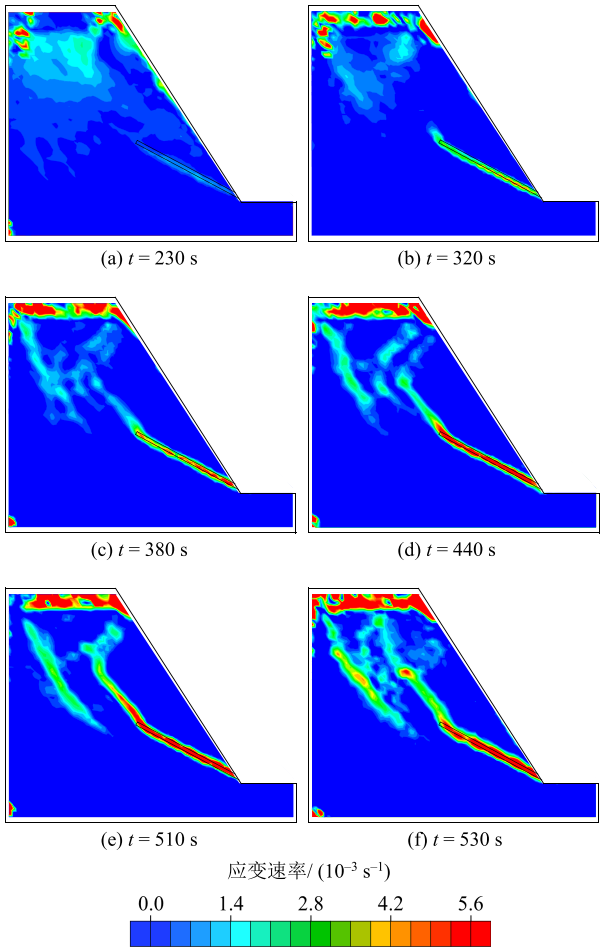
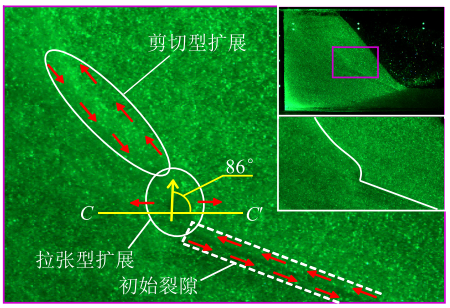
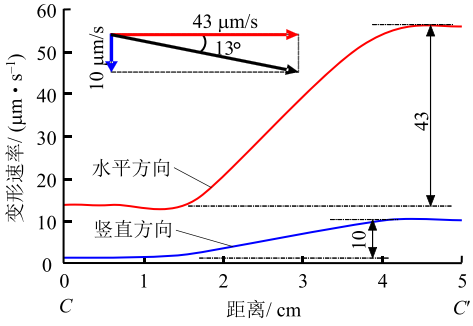


图 12　前缘主控裂隙边坡裂隙扩展演化过程

Fig.12　Failure band evolution processes of slope with a controlling fissure at the front



(a) 破裂带整体扩展形态



(b) 裂隙 *C*-*C*′断面变形分布（*t* = 530 s）

图 13　前缘主控裂隙边坡裂隙扩展模式

Fig.13　Failure band expansion mode of slope with a controlling fissure at the front

向上偏转 86°，见图 13(a)）近似垂直，表明裂隙两侧主要发生垂直于裂隙面的拉张变形；根据裂隙的破坏形态和裂隙两侧的变形特征，判断裂隙的扩展破坏类型为拉张型；③裂隙后续扩展段的破坏形态与无裂隙边坡破碎带的形态相似，表明其主要发生剪切型扩展，扩展破坏细节不再赘述。

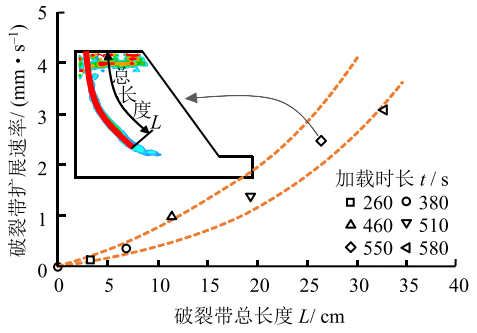
6 讨 论

前人已通过物理模型试验对边坡变形破坏演化机制开展了大量研究[33-34]，通常认为：边坡表面破裂带的分布位置、几何形态和扩展路径、扩展速率等特征可以表征边坡变形与破坏的发展阶段，同时也可以根据边坡表面变形与破坏信息预测边坡破裂带扩展趋势和判别失稳类型，从而进一步预测其稳定性。本文在此基础上，基于透明相似模型试验技术将边坡变形破坏演化机制的试验研究内容从边坡表面延伸至边坡内部，以期进一步揭示边坡变形破坏的时空演化机制。

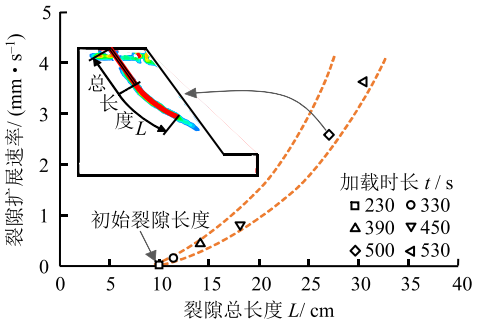
从第 3～5 节的分析中可以看出，边坡变形与破裂扩展关联密切：一方面，变形的累积促使边坡破裂带萌生/裂隙起裂并扩展；另一方面，破裂带/裂隙的扩展使边坡形成潜在滑体，从而影响边坡的变形模式。此外，从图 4～13 可以定性地看出，边坡内部变形和破裂带/裂隙扩展速率均随时间（加载位移）的增加而加速增加，这一变形发展过程与前人对边坡“初始变形、等速变形、加速变形和快速变形”的变形过程[34]的认识基本一致，表明边坡内部变形和外部变形具有一致性。而在边坡裂隙扩展速率方面，由于传统模型试验中难以观测到内部裂隙发展情况，相关研究较为缺乏。对此，图 14 给出了破裂带/裂隙扩展速率与破裂带/裂隙长度的对应关系，用于进一步讨论边坡裂隙扩展速率在边坡变形破坏演化过程中的变化规律。

（1）无裂隙边坡（图 14(a)）：在后缘匀速位移加载的作用下，随着破裂带长度的增加，破裂带的扩展速率初期缓慢增加（[0, 380 s]）、后期后快速增加（(510 s, 580 s]），破裂带的扩展速率随破裂带长度的增加近似呈指数型增长。

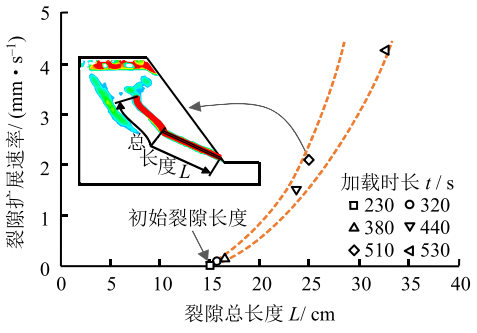
（2）后缘主控裂隙边坡（图 14(b)）：在加载初期（[0, 330 s]），后缘主控裂隙尖端几乎不发生起裂扩展；在加载中期（(330 s, 450 s]），裂隙逐渐起裂扩展，扩展速率随着裂隙长度的增加而缓慢增大；在加载后期（(450 s, 530 s]），裂隙扩展速率快速增长，最终形成近似指数增长型的裂隙扩展速率-裂隙扩展长度曲线。



(a) 无裂隙边坡（参照）



(b) 后缘主控裂隙边坡



(c) 前缘主控裂隙边坡

图 14 边坡破裂带/裂隙扩展速率演化规律

Fig.14 Evolution laws of expansion rates of failure bands/fissures in slopes

（3）前缘主控裂隙边坡（图 14(c)）：在加载初期（[0, 230 s]），前缘主控裂隙尖端扩展速率为 0，即裂隙不发生起裂扩展；在加载中期（(230 s, 320 s]），裂隙逐渐起裂扩展，扩展速率随着裂隙长度的增加而缓慢增大；在加载后期（(320 s, 530 s]），裂隙扩展速率随裂隙扩展长度的增加近似呈指数型增长。

从边坡裂隙扩展演化过程（图 10 和图 12）、裂隙扩展模式（图 11 和图 13）和裂隙扩展速率（图 14）3 个方面整体来看，边坡主控裂隙的起裂扩展演化过程经历了 4 个阶段。后缘主控裂隙边坡变形破坏演化过程为：后缘初始裂隙剪切滑移变形累积→初始裂隙尖端拉张-剪切混合型起裂并向下缓慢扩展→裂隙扩展类型转为剪切型并向下加速扩展→裂隙向下扩展贯通致使边坡破坏。前缘主控裂隙边坡变形破坏演化过程为：前缘初始裂隙剪切滑移变形累积→

初始裂隙尖端拉张型起裂并向上缓慢扩展→裂隙扩展类型转为剪切型并向上加速扩展→裂隙向上扩展贯通致使边坡破坏。

7　结　论

本文采用基于透明相似材料的可视化模型试验技术开展了主控裂隙边坡变形破坏演化的模型试验研究，分析了边坡加载过程的位移-力响应规律和不同时刻边坡变形破坏的时空演化机制，并分别以位移速率和应变速率为表征量，探讨了边坡内部变形和裂隙扩展的破坏机制。得到如下结论与认识：

（1）采用自研的边坡透明相似模型试验设备可以清楚地观察到无裂隙边坡加载过程中内部变形累积、后缘局部破裂萌生、后缘破裂带向下扩展、最终形成贯通性破裂面的累进性变形破坏过程，表明所采用的试验方法可以有效地模拟、观测边坡内部演化过程，可作为揭示边坡内部变形破坏演化机制的一种可靠试验手段。

（2）主控裂隙边坡与常规无裂隙边坡在后缘加载作用下的位移-力响应规律相似，按照曲线拐点位置和对应的变形破坏特征可分为变形累积、破裂带萌生/初始裂隙起裂、裂隙扩展调整、裂隙快速扩展贯通等 4 个阶段。

（3）后缘和前缘主控裂隙在外力作用下首先发生沿初始裂隙面的滑移变形，随着变形的累积，后缘陡倾角裂隙尖端因受推移作用而发生拉张-剪切混合型起裂并向下扩展，前缘缓倾角裂隙尖端因受牵引作用而发生拉张型起裂并向上扩展；裂隙扩展速率和潜在滑体变形速率均随着裂隙扩展长度的增加而呈指数型增长。

（4）裂隙扩展类型随边坡变形与裂隙扩展的演化而不断调整，后缘陡倾角裂隙由初始拉张-剪切混合型扩展转化为剪切型扩展并最终从坡趾附近剪出，前缘缓倾角裂隙由初始拉张型扩展转化为剪切型扩展并最终与后缘破裂区贯通。

参 考 文 献

[1] HUANG R Q. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China[J]. **Landslides**, 2009, 6(1): 69-81.

[2] KANG Y, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Application of InSAR techniques to an analysis of the Guanling landslide[J]. **Remote Sensing**, 2017, 9(10): 1046.

[3] LIN F, WU L Z, HUANG R Q, et al. Formation and characteristics of the Xiaoba landslide in Fuquan, Guizhou, China[J]. **Landslides**, 2018, 15(4): 669-681.

[4] FAN X M, XU Q, SCARINGI G, et al. The “long” runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report[J]. **Landslides**, 2019, 16(1): 139-154.

[5] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525-1544.

[6] CHEN Z, ZHOU H F, YE F, et al. The characteristics, induced factors, and formation mechanism of the 2018 Baige landslide in Jinsha River, Southwest China[J]. **Catena**, 2021, 203: 105337.

[7] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性断裂力学计算方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, 32(4): 434-437.
CHEN Hong-kai, XIAN Xue-fu, TANG Hong-mei. Stability analysis method for perilous rock by fissure mechanics[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2009, 32(4): 434-437.

[8] 周云涛. 三峡库区危岩稳定性断裂力学计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 495-499.
ZHOU Yun-tao. A method for calculating the stability of unstable rocks on Three Gorges Reservoir by fissure mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 495-499.

[9] 唐红梅, 周福川, 陈松, 等. 高烈度下双裂缝主控结构面危岩的断裂破坏机制分析[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(6): 645-655.
TANG Hong-mei, ZHOU Fu-chuan, CHEN Song, et al. Fissure mechanism of unstable rock with double-crack control discontinuity subjected to high earthquake intensities[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2021, 42(6): 645-655.

[10] CHEN G Q, TANG P, HUANG R Q, et al. Critical tension crack depth in rockslides that conform to the three-section mechanism[J]. **Landslides**, 2021, 18(1): 79-88.

[11] TANG P, CHEN G Q, HUANG R Q, et al. Brittle failure of rockslides linked to the rock bridge length effect[J]. **Landslides**, 2020, 17(4): 793-803.

[12] 黄润秋, 陈国庆, 唐鹏. 基于动态演化特征的锁固段型岩质滑坡前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 521-533.
HUANG Rui-qiu, CHEN Guo-qing, TANG Peng.

Precursor information of locking segment landslides based on transient characteristics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(3): 521-533.

[13] CHEN C H, WANG C L. A fissure mechanics stability analysis of a rock slope with a tensile crack[J]. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 12(3): 1-8.

[14] HOU Y L, CHIGIRA M, TSOU C Y. Numerical study on deep-seated gravitational slope deformation in a shale-dominated dip slope due to river incision[J]. **Engineering Geology**, 2014, 179: 59-75.

[15] ZHANG K, CAO P, MENG J J, et al. Modeling the progressive failure of jointed rock slope using fissure mechanics and the strength reduction method[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2015, 48(2): 771-785.

[16] ZHU L, HUANG R Q, YAN M, et al. Distribution and mechanism of gently dipping fissures subjected to river incision: a case study from Nujiang River, China[J]. **Journal of Mountain Science**, 2018, 15(1): 211-224.

[17] HUANG R Q, CHEN G Q, GUO F, et al. Experimental study on the brittle failure of the locking section in a large-scale rock slide[J]. **Landslides**, 2016, 13(3): 583-588.

[18] 黄达, 张晓景, 顾东明. “三段式”岩石滑坡的锁固段破坏模式及演化机制[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1601-1609.
HUANG Da, ZHANG Xiao-jing, GU Dong-ming. Failure pattern and evolution mechanism of locking section in rock slope with three-section landslide mode[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(9): 1601-1609.

[19] HUANG D, ZHONG Z, GU D M. Experimental investigation on the failure mechanism of a rock landslide controlling by a steep-gentle discontinuity pair[J]. **Journal of Mountain Science**, 2019, 16(6): 1258-1274.

[20] LIN P, LIU X L, ZHOU W Y, et al. Cracking, stability and slope reinforcement analysis relating to the Jinping dam based on a geomechanical model test[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2015, 8(7): 4393-4410.

[21] LENG X L, WANG C, PANG R, et al. Material preparation and geotechnical properties of transparent cemented soil for physical modeling[J]. **Frontiers in Materials**, 2021, 8: 740388.

[22] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.
KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(6): 1140-1146.

[23] 李元海, 林志斌, 秦先林, 等. 透明岩体相似材料物理力学特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 977-982.
LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin, QIN Xian-lin, et al. Study of development of transparent rock mass for physical similarity experiment and its mechanical properties[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2015, 44(6): 977-982.

[24] ISKANDER M G, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(3): 262-273.

[25] SUI W, ZHENG G S. An experimental investigation on slope stability under drawdown conditions using transparent soils[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2018, 77(3): 977-985.

[26] BATHURST R J, EZZEIN F M. Geogrid and soil displacement observations during pullout using a transparent granular soil[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2015, 38(5): 673-685.

[27] MAGHSOUDI M S, CHENARI R J, FARROKHI F. A multilateral analysis of slope failure due to liquefaction-induced lateral deformation using shaking table tests[J]. **SN Applied Sciences**, 2020, 2(8): 1-11.

[28] WEI L T, XU Q, WANG S Y, et al. The morphology evolution of the shear band in slope: insights from physical modelling using transparent soil[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2020, 79(4): 1849-1860.

[29] 冷先伦, 王川, 庞荣, 等. 透明胶结土材料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2059-2068.
LENG Xian-lun, WANG Chuan, PANG Rong, et al. Experimental study on the strength characteristics of a transparent cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2059-2068.

[30] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2016, 53(5): 727-739.

下转第 **1308** 页