

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.017



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 后缘拉张裂缝对土坡稳定性评价的影响研究进展

汤连生, 郑邓衡, 王玉玺, 孙银磊

(中山大学地球科学与工程学院; 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海); 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东珠海 519082)

**摘要:**探索后缘拉张裂缝对土坡稳定性评价的影响有助于边坡稳定性理论的完善。从后缘拉张裂缝对土坡失稳模式及稳定性的影响两方面进行回溯总结, 为建立边坡拉剪耦合破坏稳定评价体系及为崩塌、阶梯状滑坡等失稳模式的判别提供理论依据; 通过室内模型试验对其影响机理进行初探, 发现土坡坡高、坡角及力学参数等因素会直接影响其后缘拉张裂缝起张位置、产状、深度, 从而对土坡稳定性产生重大影响, 最后对目前关于土坡稳定性评价及后缘拉张裂缝研究存在的主要问题进行了总结与评述。

**关键词:**土坡; 边坡稳定; 稳定性评价; 拉张裂缝; 失稳模式

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)04-0039-11

## Impact of back edge tensile cracks on soil slope stability evaluation: State-of-the-art research

TANG Liansheng, ZHENG Dengheng, WANG Yuxi, SUN Yinlei

(School of Earth Science and Engineering; Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai); Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** The impact of back edge tensile cracks on soil slope stability evaluation is explored in this study. This paper mainly summarized the influence of trailing edge tensile cracks on the instability mode, providing a theoretical basis for establishment of slope tensile-shear coupling failure stability evaluation system and identification of instability modes such as collapse and stepped landslide. Moreover, the influence mechanism was preliminarily explored from the results of indoor model testing result, and it was found that the slope height, slope angle and mechanical parameters of soil slope would directly affect the tensile crack initiation position, occurrence and depth of the trailing edge, which would have a significant impact on the slope stability. Finally, the main problems in the current research on soil slope stability evaluation and trailing edge tensile cracks were summarized and reviewed.

**Keywords:** soil slope; slope stability; stability evaluation; tensile crack; instability mode

收稿日期: 2021-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(41877229); 广东省自然科学基金(2018B030311066); 中国博士后科学基金(2019M663241)

作者简介: 汤连生(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程研究, E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn.

Received: 2021-11-13

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 41877229); Natural Science Foundation of Guangdong (No. 2018B030311066); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M663241)

**Author brief:** TANG Liansheng (1963-), professor, doctoral supervisor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn.

土坡失稳是常见的地质灾害隐患,由此引发的滑坡、崩塌会给人们的生命、财产及国家建设带来巨大的损失。土坡发生失稳破坏时,后缘常出现一定深度的拉张裂缝,并伴随着整个失稳过程,其与土坡稳定性及失稳模式密切相关与<sup>[1-2]</sup>(图1)。纵观人类对土坡失稳破坏的认识,边坡稳定性理论经历了长时间的先入为主地将土坡失稳的整个破坏面视为剪切面的主流稳定性分析方法,如经典的Fellenius法、Taylor法、Bishop法、Janbu法及通用条分法等<sup>[3-8]</sup>,目前,人们逐渐对土坡后缘产生拉张裂缝伴随着失稳的整个过程有了一定的认识<sup>[9-10]</sup>。Terzaghi<sup>[11]</sup>最早注意到土坡后缘常出现一定深度的拉张裂缝,指出应重视土坡后缘拉张裂缝对边坡稳定性的影响。然而,这在当时并没有引起学术界的响应和充分重视,贯穿边坡稳定性研究历程的主流思想依旧认为边坡失稳模式为纯剪切破坏,边坡拉剪耦合破坏机理及现象尚未被系统研究,其中的发展规律也尚不明确。如何建立考虑拉张裂缝影响的土坡稳定性评价体系,依旧困扰着学者们。

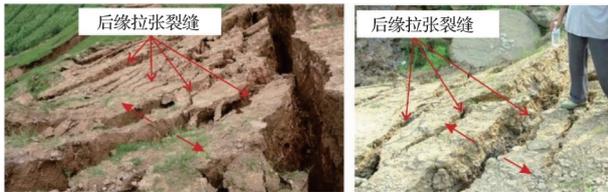


图1 土坡失稳过程中常见的后缘拉张裂缝

Fig. 1 Common back edge tensile cracks in the process of soil slope instability

从现有的研究来看,土坡失稳后缘拉张裂缝产生的原因是多样的,其形成的力学机制除了拉张作用,还包括风化或弱化作用<sup>[12-13]</sup>、湿陷作用<sup>[14-15]</sup>及膨胀作用<sup>[16-17]</sup>。坡体失稳过程中的应力重新分布或压应力向拉应力转换的拉张作用产生的拉张裂缝当属拉张作用,其与外界风化作用、湿陷作用及膨胀作用下产生的裂缝存在本质上差异。目前关于土坡后缘拉张裂缝产生的力学条件及其与土坡坡高、坡角等要素及力学参数之间的量化关系仍然没有明确的结论,研究者多基于已假设的剪切滑动面计算出竖直拉张裂缝的位置及深度,或者通过数值模拟得到最危险滑动面是拉剪耦合破坏面方向性结果<sup>[18-19]</sup>。

许多土坡发生失稳破坏时,都会产生不止一条拉张裂缝,拉张裂缝的位置、产状、深度及数目与土坡的失稳模式(崩塌、多级拉张裂缝阶梯状滑坡等)有着密切的关系,并且后缘拉张裂缝与剪切滑动面之间的相互影响关系对土坡破坏面形状及稳定性评价方法起到关键性作用。

目前,土坡稳定性研究的对象早已不局限于二维简单边坡,越来越多的学者开始对三维土坡的稳定性进行分析,也有学者对土坡内地下水位、土坡中土质等不均一因素进行研究,但对经典理论的回顾、修正及拓展是对这些新理论的一种完善,能为之后的新理论打下基础。因此,笔者通过回顾、总结简单均质二维土坡的稳定性分析方法,尤其是后缘拉张裂缝对土坡失稳模式及稳定性评价的影响,分析目前对于后缘拉张裂缝及土坡稳定性研究存在的问题,并通过简单室内模型试验对其产生的机理进行初探,为进一步研究土坡后缘拉张裂缝的形成过程、起张位置、扩展机制及其拉剪耦合的破坏过程提供参考,有助于岩土力学边坡稳定性理论的完善。

## 1 后缘拉张裂缝对土坡失稳模式的影响

### 1.1 土坡失稳模式研究现状

土坡失稳破坏模式主要分为崩塌和滑坡,其中滑坡又可分为单一后缘拉张裂缝滑坡和多级拉张裂缝的阶梯状滑坡<sup>[20-21]</sup>。在观察土坡失稳的破坏过程中,崩塌与滑坡存在明显不同的表现形式。崩塌破坏常出现在高坡角的土坡中,而观察介于高坡角与低坡角之间的土坡,通常则会发现土坡的阶梯状失稳,且拉张裂缝的发育程度与滑坡体滑动的水平位移量相关<sup>[22-24]</sup>;另外,较深圆弧滑裂面类型的土坡会出现阶梯状的滑坡,而在浅层土坡破坏过程中则不会出现阶梯状滑坡<sup>[25]</sup>。从定性描述角度出发,崩塌与滑坡拥有截然不同的表现形式及概念,其中最明显的两点:一是崩塌体拉张破坏脱离母体,具有倾覆现象,这是崩塌与滑坡之间的决定性差异;二是二者在破坏过程中产生的张裂缝存在本质上的差异,崩塌是拉张应力产生的,滑坡则多是剪切滑动水平位移产生的。罗博宇<sup>[26]</sup>综合对崩塌的研究,从边坡坡度、发生位置、边界及底面特征、运动特征、灾害规模、典型地貌标志以及典型内部结构等角度定性区分了滑坡与崩塌。但是,尽管有了如此区分方式,从定量的理论角度分析,这种定性的区分无法建立不同失稳模式之间的严格理论判据。对于不同的失稳模式来说,土坡表现形式完全不同,特别是不同破坏模式下土坡后缘拉张裂缝的深度以及数目、产状等重要因素。拉张裂缝在崩塌破坏过程中常表现出一个巨大的深度,而在阶梯状滑坡破坏过程中往往表现出多数目,表明二者因拉张裂缝释放的能量明显区别于单一裂缝的滑坡<sup>[27-28]</sup>,因此对于不同的边坡失稳模式应该具有不同的稳定性评价体系,在对土坡进行稳定性评价之前,明

确不同失稳模式下土坡后缘拉张裂缝形成过程中存在的差异性以及对边坡可能发生的破坏形式进行可靠的定量判断十分必要,但目前学术界仍未能给出土质的滑坡与崩塌之间的明确界限,土坡崩塌的稳定性量化评价也只好沿用滑坡的方法。

### 1.2 后缘拉张裂缝对阶梯状滑坡失稳模式的影响

土质边坡失稳后,伴随着拉张裂缝的进一步发展,常会观察到滑坡阶梯现象,该现象多出现在高倾角的土坡上<sup>[29-30]</sup>,如图2所示。由于滑坡体上下各段各块的滑动时间、滑动速度常常不一致,滑坡体表面往往形成一些错台、陡壁,这种微小的地貌称为滑坡台阶或台坎,即为滑坡滑落后形成的宽大平缓的台地,平台的大小与完整程度反映了滑体厚度的大小。



图2 阶梯状滑坡典型失稳图

Fig. 2 Typical instability diagram of stepped landslide

对于土坡失稳后在什么条件下可以形成阶梯滑坡,目前暂无定量评价方法,但学界对阶梯状滑坡与土坡后缘拉张裂缝存在密切联系达成共识。相关研究发现,同一土坡由于不同时期的多次失稳与土坡一次失稳,均可能会形成阶梯状滑坡,虽然二者在形成机理上可能存在本质差异,但每个滑动阶梯均是由裂缝进一步发育而来的,这充分说明了滑坡阶梯与拉张裂缝之间的密切联系<sup>[31-32]</sup>。

诸多学者对于阶梯滑坡形成的诱发条件也存在不同的见解,Peng等<sup>[33]</sup>将由水位上涨而诱发的黑方台黄土滑坡的破坏模式分为5类,在黄土基岩平面滑动这一类型中,发现边坡上有明显的多级阶梯滑坡;Deng等<sup>[34]</sup>在对三峡库区的滑坡进行研究时,发现库区内大型滑坡是由长期重力作用下边坡变形引起的,其中宝塔坪滑坡基岩的节理面被拉伸开裂的数目向滑坡方向增加,这些节理会进一步发育成阶梯滑坡;张江伟等<sup>[35]</sup>在对滑坡进行调查时发现,多期不同深度的滑坡会形成滑坡阶梯,浅层滑坡形成较低的滑坡台坎,较深部的滑坡形成较高一级滑坡台坎,不同滑坡台坎的形成存在先后顺序。上述研究说明:阶梯状滑坡的发生可能受地层结构、初始结构面以及滑裂面深浅等因素的影响。

已有充分证据显示,阶梯滑坡多是由拉张裂缝发育而来,并且伴随多层滑裂面出现的滑坡阶梯可能是滑坡拉张破坏的一种突出现象。因此,对阶梯滑坡的形成机理及规律进行量化研究,将有助于加深对边坡稳定性评价的认识。

### 1.3 后缘拉张裂缝对崩塌失稳模式的影响

崩塌是土坡失稳的一类典型现象,是指在较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚(或沟谷)的地质现象,多发生在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 的斜坡上。崩塌体的运动方式为倾倒、崩落,崩塌体碎块在运动过程中滚动或跳跃,最后在坡脚处形成堆积崩塌倒石锥。崩塌倒石锥结构松散、杂乱、无层理、多孔隙,并且由于崩塌所产生的气浪作用,细小颗粒的运动距离更远一些,因而在水平方向上有一定的分选性,其典型失稳模式如图3所示。



图3 土坡崩塌典型失稳图

Fig. 3 Typical instability diagram of soil slope collapse

崩塌与滑坡破坏作用都较为急剧、短促及强烈,二者均为斜坡上的岩土体遭受破坏而失稳向坡脚方向的运动,常在相同的或近似的地质环境条件下伴生,并且可以相互包含或转化,如大滑坡体前缘的崩塌和崩塌堆载而形成的滑坡。但是,崩塌以垂直运动为主,滑坡以水平运动为主,同时滑坡沿滑动面滑动,滑体的整体性较好,有一定外部形态,而崩塌则无滑动面,堆积物结构凌乱,多呈锥形。另外,对比滑坡有一定的滑动距离而言,崩塌与滑坡最显著的区别在于具有失稳体倾覆现象。

《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)<sup>[36]</sup>将崩塌重新定义为“地质体在重力作用下,从高边坡突然加速崩落或滚落(跳跃),具有明显的拉断和倾覆现象”,这种定义强调土坡失稳的拉断现象,说明在实际工程中,人们已经意识到拉张破坏作用在边坡变形失稳过程中扮演的重要的角色。在土坡发生崩塌前,崩塌体后部常常可以观察到拉张裂缝,裂缝的发展过程与崩塌体的规模密切相关。因此,土坡失稳过程中后缘拉张裂缝可能产生

的位置及深度,对判断土坡是否发生崩塌破坏会起到明确的指示作用。

对于崩塌破坏的发育过程及机理,Lin等<sup>[37]</sup>基于 UDEC 软件和实际地震荷载对具有节理的边坡的崩塌机理进行了研究,并将模拟结果与坡体实际损伤进行对比分析,验证了 UDEC 软件在边坡裂缝发育的崩塌分析中的可行性;秦亚斌<sup>[38]</sup>对河流崩岸进行了研究,考察了坡前水位及地下水位对河岸稳定性的影响,发现河岸崩塌主要经历了水流冲刷、裂隙发育、整体崩塌的过程,可见土坡后缘拉张裂缝的发育是崩塌的一个重要过程;郑光等<sup>[39]</sup>系统调查了贵州某一崩塌现场,追溯了崩塌发生的动力学过程及崩塌机理,并对周边潜在崩塌体进行了分析评估,发现崩塌体首先受到底部开挖影响,而后导致坡体产生拉张裂缝,在长期重力作用下,山体开始变形破碎最后整体失稳。

现有研究表明,崩塌多见于结构性强且坡度较陡的岩体、黄土以及河岸等地区,在崩塌发生之前常伴随着拉张裂缝的出现,了解土坡失稳过程中滑体的运动行为对区分崩塌与滑坡有着重要作用<sup>[40-41]</sup>。在土坡的深层重力变形作用下,顺层平面的稳定状态将会被改变,可能会导致在起伏相对平坦的山地上发生崩塌破坏<sup>[42]</sup>。近年来,学者对崩塌的研究还在继续,更多的崩塌影响因素被发现,但多数研究在预设边坡为崩塌模式下开展。总体来说,崩滑体的运动过程以及,拉张裂缝的大小、产状、位置,都在崩塌与滑坡之间表现出了明显的差异性,如果无法明确二者间拉张裂缝变化规律,也就无法形成崩塌失稳模式下边坡稳定性系数计算及评价的方法。

## 2 后缘拉张裂缝对土坡稳定性评价的影响

### 2.1 土坡后缘拉张裂缝研究现状

土坡发生失稳时,后缘出现拉张裂缝已逐步被诸多案例研究证实,理论研究、模型试验及案例分析均表明土坡后缘拉张裂缝主要源于边坡失稳过程中坡体内的拉张作用<sup>[43-48]</sup>。Lohnes等<sup>[44]</sup>研究发现黄土边坡上层的垂直节理可能是顶部黄土层受拉张作用的结果;冯连昌等<sup>[45]</sup>的土坡后缘裂缝模型试验和 Senior<sup>[46]</sup>基于极限平衡理论开展的研究,都充分表明考虑土体抗拉张过程及其拉张裂缝的形成对土坡稳定性存在巨大的影响;戴自航等<sup>[47]</sup>对土坡拉张力学的分析及数值模拟表明考虑了后缘拉张破坏土坡稳定性的确更差而且拉张裂缝近于直立;许强等<sup>[49]</sup>研究大量滑坡案例表明,滑体整体滑动之

前,其后缘会出现拉张裂缝;Michalowski<sup>[50-51]</sup>引入拉张破坏及拉张截断理论,通过数值模拟研究了拉张裂缝对边坡稳定性分析结果的影响,提出了抗拉张强度为零(拉张截断)的边坡稳定性评价方法。由此可见,学者们强烈地意识到边坡失稳破坏面并非 Taylor 所表述的纯剪滑动面,其后缘较多都伴生一定深度的拉张裂缝。

目前,对土坡拉张破坏面位置及深度确定的理论研究陆续取得一些成果。最早 Terzaghi<sup>[11]</sup>在朗肯土压力理论基础下,根据半无限土体的莫尔圆强度包线与土体的抗剪强度关系,将直立土坡拉张应力为零的位置认定为拉张裂缝的开裂深度;Spencer<sup>[43]</sup>基于平面滑动面的假设,采用平行层间力法获得了与 Terzaghi 一样的直立坡后缘拉张裂缝深度计算公式,但二者一致地认为裂缝深度应为坡体中拉张应力达到零的深度,即视坡体抗拉强度为 0;Terzaghi 等<sup>[52]</sup>在通用条分法理论框架下,推导出了滑面顶部裂缝深度的估算公式,然而其只适用于直立边坡。针对非直立土坡,Chowdhury 等<sup>[53]</sup>提出了任意倾角的简单边坡后缘拉张裂缝深度的估算公式,但基于朗肯半无限空间土压力理论,其拉张裂缝深度与边坡形状无关,这显然不合理;Baker<sup>[54]</sup>运用极限平衡理论框架下变分析法,通过寻找最危险纯剪切滑裂面分析了土坡后缘裂缝的深度,相比前人的研究,考虑了边坡几何形状对拉张裂缝深度的影响,但仅考虑了部分形状的改变以及是否充水对边坡极限高度的影响。同时,目前基于极限平衡原理得到的裂缝深度,其对剪切破坏与裂缝深度是分步考虑的,即先确定最危险纯剪切失稳面并计算该失稳面上的应力分布,进而根据剪切模式下的应力分布确定裂缝深度。这种处理本质上只是对边坡纯剪切破坏模式的一种优化,没有考虑土坡失稳时拉张裂缝破坏过程对边坡稳定性的影响,而且只能得到竖直产状裂缝的深度。

近年来,有不少学者通过极限分析法确定土坡后缘拉张裂缝位置及深度,Michalowski<sup>[55]</sup>预设边坡最危险破坏面由拉张破坏的竖直线与剪切破坏的对数螺旋曲面构成,分别计算了不同性质破坏面的能量耗散,据此探讨了不同类型拉张裂缝对边坡极限高度的影响;Utili<sup>[56]</sup>指出极限平衡法在边坡稳定性分析过程中需要事先假定裂缝的深度和位置的缺点,分析了有水和无水作用下边坡后缘竖直拉张裂缝的位置及深度的临界机制。相比极限平衡方法,极限分析法通过边坡失稳过程中裂缝产生时的能量耗散建立了裂缝形成与边坡失稳之间的联系,此方法对拉张裂缝作了竖直的假设,未考虑土

体的抗拉张强度或抗剪强度对裂缝产状的影响。根据 Michalowski 的研究,在假设边坡拉张裂缝为竖直的情况时,即使假设土体的抗拉张强度为0并出现拉张截断时,其拉张裂缝的产生依然有能量消耗,究其原因主要是垂直的裂缝上依然有剪切作用。根据实际滑坡与室内试验的观察,严格的垂直裂缝较为少见,顺坡向裂缝居多,负角度也偶有出现。土坡材料的抗拉张强度及抗剪强度对土坡失稳后缘拉张裂缝的产状有一定的影响,仅假设边坡失稳面为垂直裂缝与剪切滑动面的组合并不合理。

显然,在土坡失稳过程中,拉张破坏与剪切破坏应是协同伴生、相互影响或耦合开展的,故土坡最危险破坏面是否为竖直拉张破坏面与剪切滑裂面的组合形式,剪切面与拉张面是否存在明确的界限以及裂缝如何起裂、如何发展等诸多问题仍需进一步研究。

## 2.2 后缘拉张裂缝在土坡稳定性评价中的作用

建立土坡拉剪耦合破坏的稳定性评价体系,是将土坡后缘拉张裂缝相关理论与实践结合起来的重要一环。戴自航等<sup>[57]</sup>采用张拉剪切复合破坏准则进行了大量数值分析算例,研究表明,边坡最危险滑动面是由近乎直立的张拉破坏面和近似圆弧或非圆弧的剪切破坏面组合而成的复合滑动面;Utili等<sup>[58]</sup>采用极限分析上限法和伪静态方法,基于对数螺旋线剪切破坏面,以图表的形式给出了后缘拉张裂缝竖直的土坡拉剪耦合破坏的稳定性分析方法;Gao等<sup>[59]</sup>比较了含拉张裂缝边坡稳定性的几种计算方法,将后缘拉张裂缝的形成机制归结为内部能量耗散;刘锋等<sup>[60]</sup>采用极限分析上限法研究了竖直拉张裂缝对边坡稳定性的影响,构建了考虑渗流场作用含垂直拉张裂缝的破坏模式,对比发现裂缝临界深度随着坡率、内摩擦角和黏聚力的增大而增大;Park等<sup>[61]</sup>将拉张截断理论应用于三维状态下的边坡稳定性分析;陈晓冉等<sup>[62]</sup>基于土体的变形参数、单轴抗拉应力和朗肯主动土压力理论,假设拉张裂缝的方向仅为竖向,得到了边坡裂缝深度的上限;Stockton等<sup>[63]</sup>基于极限分析方法开展了各向异性对拉张裂缝和边坡稳定性影响的研究;He等<sup>[64]</sup>采用极限分析上限法研究了三维边坡的裂缝位置和深度对边坡稳定性的影响。上述研究中,拉张截断及严格垂直拉张裂缝的设定可以得到更加保守的边坡评价,一定程度上有助于边坡失稳模式的预测,但这种做法是否符合工程实际,还需要对边坡拉剪耦合破坏及后缘拉张裂缝的本质有更深刻认识。

对于拉剪耦合破坏的研究,学者们主要从极限

平衡法及修正土体强度性质和破坏准则两种方式入手。目前从土体性质入手的分析多是基于数值模拟或试算得到一个定性的结果,未能形成完整的边坡拉剪耦合破坏稳定性分析体系;对于极限平衡法,其本质是对泰勒边坡稳定性分析方法的一种改进,之后的学者多以 Baker 的理论为框架进行微小的调整,该分析方法不仅假设出了最危险拉剪耦合滑裂面,也假设剪切滑裂面上的支持力是线性分布的,这些假设都会使理论结果与实际结果有一定的出入。

相较极限平衡方法,极限分析方法能够从能量耗散的角度协同考虑裂缝与滑裂面的伴生过程。从本质上来说,这种方法假设失稳破坏面为垂直线及对数螺旋曲线剪切面组合,违背了考虑边坡拉剪耦合破坏的初衷,且忽略了边坡材料抗拉强度及其与抗剪强度的组合对拉张裂缝的形成及其发展的影响,其稳定分析结果也与实际情况存在差距。值得注意的是,即使按垂直裂缝情况,是否考虑边坡的抗拉张强度其边坡的稳定系数相差甚大,且可能还与裂缝的产状选择有关,后缘拉张裂缝形成以拉张破坏还是剪切破坏为主导将影响拉张裂缝的产状及深度,并严重影响边坡稳定性系数的计算及潜在失稳破坏面的搜索。

总体来看,无论是 Baker 在极限平衡理论框架下的变分析法研究,还是 Michalowski 基于裂缝为垂直的假设条件的极限分析法,都是基于一个已有的纯剪滑裂面(圆弧滑动面或是对数螺旋面)进行稳定性分析,由此分析出坡体中的拉应力分布,从而得到垂直拉张裂缝的位置及深度,这种根据滑裂面的受力大小求取稳定性系数最小值来反推垂直拉张裂缝的位置及深度做法,只能算是纯剪滑裂面的一种补充和改进。虽然土坡后缘拉张裂缝的确定及拉剪耦合破坏的稳定性分析取得了一定进展,也有学者对拉张裂缝的形成机理进行了初步探讨,但这些基于最危险剪切滑动面来确定垂直拉张裂缝的分析方法只能说明拉剪耦合破坏面的稳定性系数小于纯剪滑动面而已,暂未能从根本上解释拉张裂缝的形成条件、产生机理、扩展机制及其与剪切滑动面之间的相互伴生关系。需要明确的是,土坡后缘拉张裂缝与剪切滑动面并非在破坏的瞬间就完全形成,拉张裂缝有一个扩展的过程,拉张裂缝与剪切滑动面相互伴生的关系不仅说明了拉张裂缝在土坡失稳过程中扮演着重要角色,同时也影响土坡的稳定性<sup>[65-66]</sup>。

### 3 后缘拉张裂缝对土坡稳定性影响的机理

根据大量的野外现场调研工作,发现土坡坡高、坡角及力学参数等因素会直接影响其后缘拉张裂缝起张位置、产状、深度,从而会对土坡稳定性产生重大影响<sup>[63, 67-69]</sup>。相关研究表明,由于拉张裂缝真实存在,边坡更容易以拉剪耦合模式破坏,拉张裂缝的出现会对边坡失稳时的剪切面产生影响,并且由于拉张裂缝受边坡倾角及高度影响,边坡失稳模式存在差异,边坡失稳体不同位置处的稳定性也存在差异。目前关于土坡失稳时后缘拉张裂缝的产生机理尚不明确,研究者难以观察到边坡破坏时拉张裂缝的发展过程,对拉张破坏现象不能产生直观认识,因此首先应以探究单因素(重力)下后缘拉张裂缝的机理为基础,再进一步探究多因素(地震、降雨、人为开挖等)作用下的边坡失稳破坏过程。

前人主要针对是否考虑拉张裂缝对边坡稳定性的影响进行数值分析及理论研究,对于土坡坡高、坡角等因素是如何影响拉张裂缝的产状、位置等问题仍需进一步探讨。基于上述理论分析,采用自行研制单一诱因(重力作用)的土坡失稳室内模型装置,对土坡的失稳过程、失稳现象、拉张破坏过程进行简单的试验研究,初步开展了不同坡高、坡角的室内土坡失稳模型试验,总结土坡后缘拉张裂缝的变化规律,以此初步分析土坡后缘拉张裂缝及其稳定性间的机理关系。

试验装置采用一个立方箱体(100 cm×100 cm×100 cm),此箱体由4块2 cm厚的透明亚克力板拼装而成,其顶部及正面是开放式的。在立方箱体的前侧,使用了两个可旋转的门折页将挡土墙(98 cm×120 cm)安装在立方箱体的底板上,该挡土墙可以确保使用该装置制作的边坡倾角在0°~90°间随意设定。试验所采用试样为花岗岩残积土,天然密度为1.97 g/cm<sup>3</sup>,天然含水率为16.72%,土粒密度为2.54 g/cm<sup>3</sup>,塑性指数为31.4。试验步骤如下:

1) 试验准备:首先在模型箱的内壁和挡土墙上均匀地涂上一层凡士林,减少边坡材料与模型箱、挡土墙之间的摩擦力对实验结果的影响;然后将试验所用重塑土样与水均匀混合,使其含水量达到不饱和的状态,以确保边坡材料均匀低黏聚力。

2) 安装模型箱:挡土墙的底部安装在模型箱的地板上,且可以固定端为轴转动,同时挡土墙的活动端可通过锁扣固定于模型箱箱体的不同位置,进而预设边坡模型的角度;在模型箱的侧壁上设置有销钉插孔,通过销钉和固定杆的组合形式对挡土墙

进行固定。

3) 边坡模型制作:试验箱安装完后,将均质非饱和土样按照预设的模型箱形状进行逐层堆砌,每隔10 cm压实一次,并控制每一层的压力强度,压实次数、压实时间以及材料的堆积速率,当边坡模型达到预定的高度时,打开高速摄像机。

4) 边坡失稳试验:在试验开始之前,施加足够的力预防挡土墙移动,后迅速拔出销钉并卸下固定杆,迅速旋转土墙使其与边坡模型分离,进而引发边坡模型破坏。此时高速摄像机实时记录滑坡过程,记录的破坏现象图像可作为研究滑坡特征的基础数据。

土坡失稳的试验过程如图4~图6所示。结合已知结果分析,发现不同倾角及高度的土坡在破坏过程中存在一定的相似性与差异性。在坡角为55°~75°的土坡中,当挡土墙脱离坡体的瞬间,土坡模型并未立即破坏,而是保持短暂的稳定;挡土墙撤除后,边坡模型顶部率先出现拉张裂缝,坡体其他部分保持完整和轻微变形,被裂缝分离的失稳体前缘上部出现局部下陷及向前蠕动,进而拉张裂缝逐渐变宽,并出现多条裂缝;而后边坡上部坡体继续局部下滑变形,并对坡脚位置有向下压缩作用,此时坡脚出现了轻微局部鼓胀现象;坡脚膨胀达到一定变形极限后,失去稳定性,失稳块体开始整体下滑,在下滑过程中拉张裂缝会逐渐变大并增多,最后出现滑坡阶梯。

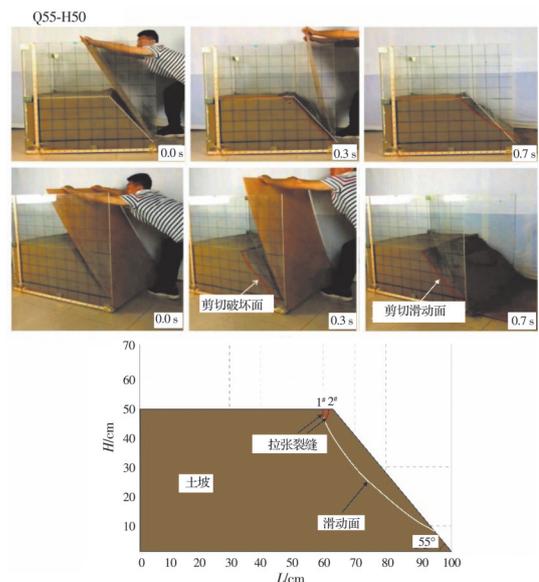


图4 高度为50 cm,倾角为55°的土坡失稳试验连续光学影像  
Fig. 4 Sequential optical images of soil slope instability test with height of 50 cm and inclination angle of 55°

在坡角为90°的土坡中,挡土墙被撤除的瞬间,边坡模型顶部前缘会瞬时出现拉张裂缝;随后边坡

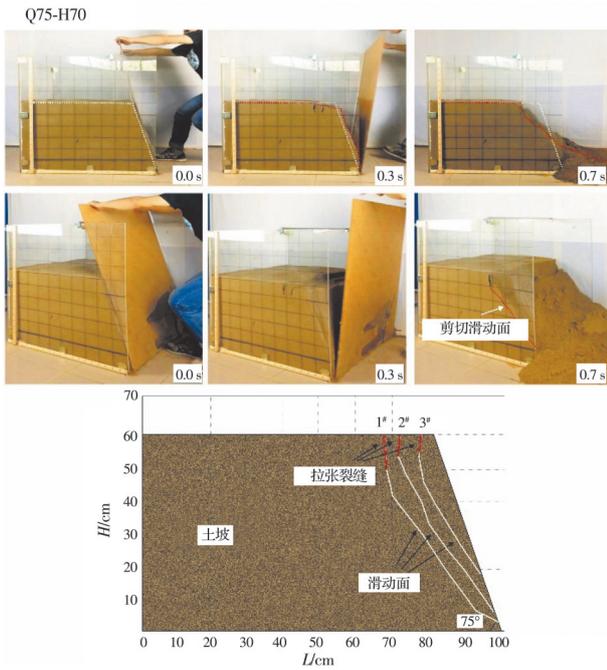


图 5 高度为 60 cm, 倾角为 75° 的土坡失稳试验连续光学影像  
 Fig. 5 Sequential optical images of soil slope instability test with height of 60 cm and inclination angle of 75°

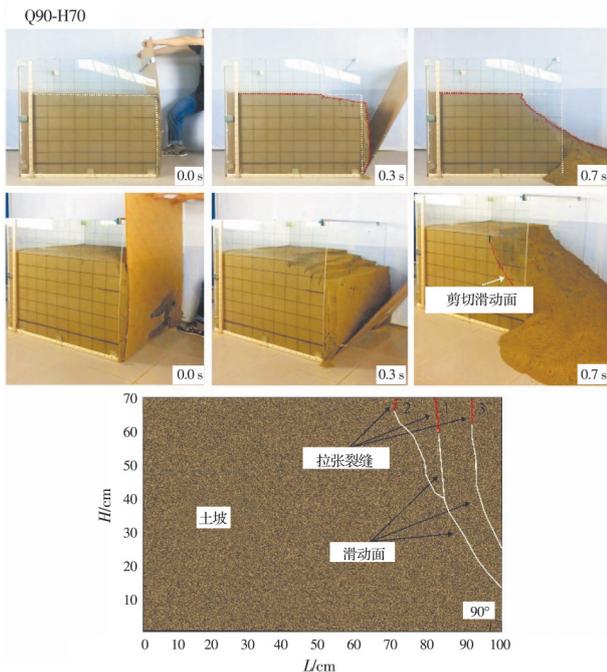


图 6 高度为 70 cm, 倾角为 90° 的土坡失稳试验连续光学影像  
 Fig. 6 Sequential optical images of soil slope instability test with height of 70 cm and inclination angle of 90°

体小幅度水平向前膨胀及垂直向下运动,拉张裂缝数量有所增加;土坡不稳定体整体出现大幅垂直运动,拉张裂缝迅速变宽,坡顶出现明显下沉现象,同时坡脚出现垂直挤压变形并发生剪切破碎;最终滑动体底部触碰到地面并发生破碎,随着滑动体与地面接触面积增大,下滑体会迅速发生整体倾覆现象,类似于自然界中出现的崩塌倾覆。

总体来看,滑动体在迅速向前推移的过程中会逐渐失去完整性。当土坡倾角较小、高度较低时,滑坡产生的滑动面较浅,较薄的滑动体在运动过程中与地面接触的部位会首先失去结构性,同时滑动体在下滑过程中会逐渐变薄,至坡脚位置停止滑动后,仅保留未破碎部分;而土坡倾角较大、高度较大时,滑坡产生的滑动面较深,较厚的滑动体在运动过程中会逐渐出现阶梯滑坡,阶梯滑坡的间距也会逐渐被拉大,同时失稳体的下部也会率先出现破碎,随着失稳体运动距离的增加,其破碎面积也会增大,甚至整个失稳体完全失去结构性,同时靠近滑坡舌位置的滑坡阶梯也会消失,仅保留后缘的部分阶梯滑坡。

通过对不同高度、不同角度的土坡失稳过程的研究,发现滑坡破坏面是由拉张裂缝与剪切破坏面贯通后形成的,即滑坡破坏面的顶部是拉张裂缝,而拉张裂缝以下才是滑动破坏面。土坡坡高、坡角、土质及力学参数等因素是如何影响后缘拉张裂缝的产生,进而影响边坡的稳定性,仍需通过更系统的室内试验及数值模拟等手段进行进一步的研究。

#### 4 存在的主要问题

现有对土坡稳定性评价及后缘拉张裂缝的研究主要存在以下几个主要问题:

1)土坡拉剪耦合稳定评价体系尚未完善,土坡失稳模式定量评价缺乏研究:由于对土坡后缘拉张裂缝产状及影响因素认识的局限性,现有拉剪耦合稳定性评价方法也存在一定的不足,现有研究中对与土坡拉剪耦合失稳模式密切相关的滑坡状阶梯、崩塌现象还认识不足,尚无定量方法对土坡可能产生的失稳模式进行评价。

2)对土坡后缘拉张裂缝产状、深度及影响因素认识不足:现有研究中,无论是极限平衡理论还是极限分析理论,对土坡拉张破坏面的设定均为垂直产状,仅考虑土坡几何参数及材料的抗拉张强度等对其位置及垂直深度的影响,忽视对其产状形态的影响,然而垂直裂缝设定与实际滑坡及模型试验现象存在差异,同时后缘拉张裂缝产状对土坡失稳模式影响巨大,故在土坡拉剪耦合失稳模式及稳定性评价体系的研究中,不能忽视土坡几何形状及抗拉张强度等对后缘拉张裂缝产状的影响。

3)土坡后缘拉张裂缝与剪切滑裂面间的耦合影响被忽视:土坡的拉剪耦合失稳过程是拉张破坏与剪切破坏协同进行耦合发展的过程,剪切面与拉张破坏面也会相互影响,二者不应被分开考虑,或

者分开考虑后需要考察二者之间的相互影响,因此在建立土坡拉剪耦合稳定性评价体系时,应综合考虑拉张裂缝与剪切滑裂面之间的耦合作用,而不能忽视二者间的相互影响。

4)对土坡的失稳过程、拉张破坏过程以及失稳现象认识存在不足:目前实验室所开展的边坡失稳模型试验多是通过施加外力条件诱发滑坡,研究者难以观察到单因素诱发的边坡的破坏过程、破坏现象,故对拉张破坏过程及现象不能产生直观认识,导致对边坡拉-剪耦合破坏机理认识不清,且在对拉张破坏现象进行研究时考虑的影响因素并不全面,致使无法对诸多失稳现象进行合理解释。

## 5 结论与展望

1)土坡的失稳破坏是一个动态发展的过程,拉张裂缝与剪切滑动面并非在破坏的瞬间就完全形成,拉张裂缝有一个发展的过程,且拉张裂缝与剪切滑动面的形成也有先后顺序并相互影响,其相伴生的关系不仅说明了拉张裂缝在边坡失稳破坏过程中扮演着重要角色,同时也对土坡稳定性有着重要影响。

2)不同土坡失稳模式下,后缘拉张裂缝存在明显的差异性,后缘拉张裂缝的形成过程会直接影响剪切破坏面的形状及土坡失稳模式,因此对土坡失稳过程中后缘拉张裂缝的产生及扩展机理、起张位置及深度的系统研究,将有助于对土坡崩塌及阶梯状滑坡等不同失稳模式及其稳定性评价理论的探究,也是建立土坡最危险拉剪耦合破坏面的搜索方法的一次重要尝试。

3)根据室内模型试验研究结果发现,土坡坡高、坡角及力学参数等,会直接影响其后缘拉张裂缝起张位置、产状、深度等,也影响着土坡的失稳模式,从而会对土坡稳定性产生重大影响。现有成果对土坡后缘拉张裂缝的形成过程研究尚不深入,土坡坡高、坡角、土质及力学参数等因素与后缘拉张裂缝之间的逻辑关系仍需通过试验及理论等手段进一步研究。

4)边坡稳定性评价体系的建立,应着重关注失稳过程中后缘拉张裂缝的作用机理及其与之密切相关的土坡失稳模式的判断方法。在对土坡后缘拉张裂缝深度、产状及机理等因素进一步认识的前提下,可结合土坡拉张裂缝扩展与剪切面耦合过程的力学分析方法及其最危险破坏面,建立崩塌、阶梯状滑坡等不同失稳模式的土坡稳定性评价方法,并进一步构建更为完善的土坡拉剪耦合破坏模式体系及稳定性评价分析方法。

## 参考文献

- [1] SHUKLA S K, KHANDELWAL S, VERMA V N, et al. Effect of surcharge on the stability of anchored rock slope with water filled tension crack under seismic loading condition [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(4): 529-538.
- [2] ZHOU Y D, ZHANG F, WANG J Q, et al. Seismic stability of earth slopes with tension crack [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2019, 13(4): 950-964.
- [3] BISHOP A. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes [J]. *Geotechnique*, 1955, 5: 7-17.
- [4] JANBU N. Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1957, 2: 207-212.
- [5] SARMA S K. Stability analysis of embankments assuming parallel interstice forces [J]. *Geotechnique*, 1965, 15 (1): 79-93.
- [6] CHEN Z Y, MORGENSTERN N R. Extensions to the generalized method of slices for stability analysis [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(1): 104-119.
- [7] CHEN Z Y. Random trials used in determining global minimum factors of safety of slopes [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(2): 225-233.
- [8] SARBISHEI S, FAKHER A. Energy-based horizontal slice method for pseudo-static analysis of reinforced walls [J]. *Geosynthetics International*, 2012, 19(5): 370-384.
- [9] 文宝萍. 滑坡预测预报研究现状与发展趋势[J]. *地学前缘*, 1996, 3(1): 86-92.  
WEN B P. The state of the art and trend of the landslide predictions [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(1): 86-92. (in Chinese)
- [10] IVERSON R M, GEORGE D L, ALLSTADT K, et al. Landslide mobility and hazards: Implications of the 2014 Oso disaster [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 412: 197-208.
- [11] TERZAGHI K T. *Theoretical soil mechanics* [M]. London: Chapman and Hall Limited, 1951.
- [12] CHRISTARAS B. Landslides in iliolitic and marly formations: Examples from north-western Greece [J]. *Engineering Geology*, 1997, 47(1/2): 57-69.
- [13] 刘华磊, 徐则民, 张勇, 等. 降雨条件下边坡裂缝的演化机制及对边坡稳定性影响: 以云南省双柏县丁家坟滑坡为例[J]. *灾害学*, 2011, 26(1): 26-29.  
LIU H L, XU Z M, ZHANG Y, et al. Evolutionary mechanism of slope fissures during rainfall and their effect on slope stability: A case study of Dingjiafen landslide in Shuangbo country, Yunnan [J]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(1): 26-29. (in Chinese)

- [14] 王家鼎, 惠泱河. 黄土地区灌溉水诱发滑坡群的研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 305-310.  
WANG J D, HUI Y H. Landslides in crowds induced by irrigated water in loess area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 305-310. (in Chinese)
- [15] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 85-90.  
XU L, DAI F C, KUANG G L, et al. Characteristics and forming mechanisms of the plateau-edge cracks and their significance to loess landslides [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 85-90. (in Chinese)
- [16] AYALEW L, YAMAGISHI H, MARUI H, et al. Landslides in Sado Island of Japan: Part I. Case studies, monitoring techniques and environmental considerations [J]. Engineering Geology, 2005, 81(4): 419-431.
- [17] HALES T C, ROERING J J. Climatic controls on frost cracking and implications for the evolution of bedrock landscapes [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(F2): F02033.
- [18] 张年学, 李晓, 盛祝平. 用拐点原理计算滑坡后沿张裂缝深度的新公式[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 157-163.  
ZHANG N X, LI X, SHENG Z P. The new formula of calculating depth of a tension crack in the upper surface of a sliding slope using inflection principle [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 157-163. (in Chinese)
- [19] EFSTRATIOU C. Tension crack in stability analysis of soil slopes [D]. Limassol: Cyprus University of Technology, 2013.
- [20] 王海江. 边坡失稳的影响因素及破坏模式综述[J]. 山西建筑, 2018, 44(27): 72-73.  
WANG H J. Overview of factors affecting slope instability and failure modes [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(27): 72-73. (in Chinese)
- [21] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
ZHENG Y R, CHEN Z Y, WANG G X. Engineering treatment of slope & landslide [M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [22] 汤连生, 钟明灯, 赵占仑, 等. 滑坡模型试验及滑坡演化规律的分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(5): 75-80.  
TANG L S, ZHONG M D, ZHAO Z L, et al. The model test of landslide and its evolution law analysis [J]. Industrial Construction, 2019, 49(5): 75-80. (in Chinese)
- [23] KIM H K, KIM S S. Slope stability analysis considering multi failure mode [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2011, 14(1): 24-30.
- [24] 张宝龙, 范文. 土-岩混合边坡的破坏模式研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(4): 33-39.  
ZHANG B L, FAN W. Study on failure mode of soil-rock composite slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(4): 33-39. (in Chinese)
- [25] LI Y R, MO P. A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review [J]. Geomorphology, 2019, 340: 67-83.
- [26] 罗博宇. 四川省崩塌灾害特征及防治工程效果评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.  
LUO B Y. The characteristic of collapse and effectiveness evaluation of its prevention and control projects in Sichuan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] LI D Y, YIN K L. Deformation characteristics of landslide with steplike deformation in the Three Gorges Reservoir [C]//2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). April 22-24, 2011, Lushan, China. IEEE, 2011: 6517-6520.
- [28] CHEN A Q, ZHANG D, PENG H, et al. Experimental study on the development of collapse of overhanging layers of gully in Yuanmou Valley, China [J]. Catena, 2013, 109: 177-185.
- [29] 谭福林. 基于不同演化模式的滑坡—抗滑桩体系动态稳定性评价方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.  
TAN F L. Evaluation method for dynamic stability of landslide stabilizing pile system with different evolution modes [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [30] TANG L S, ZHAO Z L, LUO Z G, et al. What is the role of tensile cracks in cohesive slopes? [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(2): 314-324.
- [31] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112.  
XU Q, TANG M G, XU K X, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1104-1112. (in Chinese)
- [32] 郭晓光, 黄润秋, 邓辉, 等. 平推式滑坡多级拉陷槽形成过程及成因机理分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 770-778.  
GUO X G, HUANG R Q, DENG H, et al. Formation and mechanism analysis of multi-level rift trough in translational sliding landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 770-778. (in Chinese)
- [33] PENG D L, XU Q, LIU F Z, et al. Distribution and failure modes of the landslides in Heitai Terrace, China [J]. Engineering Geology, 2018, 236: 97-110.
- [34] DENG Q L, FU M, REN X W, et al. Precedent long-

- term gravitational deformation of large scale landslides in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Engineering Geology*, 2017, 221: 170-183.
- [35] 张江伟, 李小军, 迟明杰, 等. 滑坡灾害的成因机制及其特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(6): 42-49.  
ZHANG J W, LI X J, CHI M J, et al. Analysis of formation mechanism and characteristics of landslide disasters [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6): 42-49. (in Chinese)
- [36] 滑坡防治工程勘查规范: GB/T 32864—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [37] LIN Y D, ZHU D P, DENG Q L, et al. Collapse analysis of jointed rock slope based on UDEC software and practical seismic load [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 31: 441-446.
- [38] 秦亚斌. 崩岸的模型试验及数值模拟分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.  
QIN Y B. The model test and numerical simulation analysis of bank collapsing [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [39] 郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 223-240.  
ZHENG G, XU Q, JU Y Z, et al. The pusacun rockavalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 223-240. (in Chinese)
- [40] 黄强兵, 康孝森, 王启耀, 等. 山西吕梁黄土崩滑类型及发育规律[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(1): 64-72.  
HUANG Q B, KANG X S, WANG Q Y, et al. Types and characteristics of loess landslides and collapses in Lvliang area of Shanxi Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(1): 64-72. (in Chinese)
- [41] 叶万军, 杨更社, 张慧梅, 等. 拉裂-滑移式黄土崩塌的形成机制及其稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3563-3568.  
YE W J, YANG G S, ZHANG H M, et al. Research on formation mechanism and stability of tensile cracking-sliding loess collapse [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3563-3568. (in Chinese)
- [42] PÁNEK T, HRADECKÝ J, MINÁR J, et al. Late Holocene catastrophic slope collapse affected by deep-seated gravitational deformation in flysch: Ropice Mountain, Czech Republic [J]. *Geomorphology*, 2009, 103(3): 414-429.
- [43] SPENCER E. Effect of tension on stability of embankments [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(5): 1159-1173.
- [44] LOHNES R A, HANDY R L. Slope angles in friable loess [J]. *The Journal of Geology*, 1968, 76(3): 247-258.
- [45] 冯连昌, 郎秀清. 滑坡裂缝产生机理的实验研究[J]. *兰州大学学报*, 1980, 16(1): 120-130.  
FENG L C, LANG X Q. Experimental study on the mechanism of landslip crevices [J]. *Journal of Lanzhou University*, 1980, 16(1): 120-130. (in Chinese)
- [46] SENIOR R B. Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes [J]. *Soils and Foundations*, 1981, 21(2): 1-17.
- [47] 戴自航, 卢才金. 边坡失稳机理的力学解释[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(10): 1191-1197.  
DAI Z H, LU C J. Mechanical explanations on mechanism of slope stability [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1191-1197. (in Chinese)
- [48] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1714-1723.  
ZHENG Y R, YE H L, HUANG R Q. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1714-1723. (in Chinese)
- [49] 许强, 董秀军. 汶川地震大型滑坡成因模式[J]. *地球科学*, 2011, 36(6): 1134-1142.  
XU Q, DONG X J. Genetic types of large-scale landslides induced by Wenchuan earthquake [J]. *Earth Science*, 2011, 36(6): 1134-1142. (in Chinese)
- [50] MICHALOWSKI R L. Reply to the discussion by Utili on "Stability assessment of slopes with cracks using limit analysis" [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(7): 826-827.
- [51] MICHALOWSKI R L. Stability of intact slopes with tensile strength cut-off [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(8): 720-727.
- [52] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. *Soil mechanics in engineering practice* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [53] CHOWDHURY R N, ZHANG S. Tension cracks and slope failure [J]. *Thomas Telford*, 1991, 5(2): 27-32.
- [54] BAKER R. Sufficient conditions for existence of physically significant solutions in limiting equilibrium slope stability analysis [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(13/14): 3717-3735.
- [55] MICHALOWSKI R L. Cracks in slopes: limit analysis approach to stability assessment [C]//GeoCongress 2012. March 25-29, 2012, Oakland, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 442-450.

- [56] UTILI S. Investigation by limit analysis on the stability of slopes with cracks [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(2): 140-154.
- [57] 戴自航, 刘志伟, 刘成禹, 等. 考虑张拉与剪切破坏的土坡稳定数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 375-382.  
DAI Z H, LIU Z W, LIU C Y, et al. Numerical analysis of soil slope stability considering tension and shear failures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 375-382. (in Chinese)
- [58] UTILI S, ABD A H. On the stability of fissured slopes subject to seismic action [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2016, 40(5): 785-806.
- [59] GAO Y F, SONG W Z, ZHANG F, et al. Limit analysis of slopes with cracks: Comparisons of results [J]. *Engineering Geology*, 2015, 188: 97-100.
- [60] 刘锋, 芮勇勤, 张春. 坡顶张拉裂缝对边坡稳定性影响 [J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(9): 949-954.  
LIU F, RUI Y Q, ZHANG C. Influence of tension cracks of slope crest on the stability of slope [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2016, 35(9): 949-954. (in Chinese)
- [61] PARK D, MICHALOWSKI R L. Three-dimensional stability analysis of slopes in hard soil/soft rock with tensile strength cut-off [J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 73-84.
- [62] 陈晓冉, 卢玉林, 薄景山, 等. 基于拉剪破坏的边坡后缘张裂缝深度探讨[J]. *水力发电*, 2018, 44(5): 45-49.  
CHEN X R, LU Y L, BO J S, et al. Discussion on the depth of slope posterior crack with tension shear failure review [J]. *Water Power*, 2018, 44(5): 45-49. (in Chinese)
- [63] STOCKTON E, LESHCHINSKY B A, OLSEN M J, et al. Influence of both anisotropic friction and cohesion on the formation of tension cracks and stability of slopes [J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 31-44.
- [64] HE Y, LIU Y, ZHANG Y B, et al. Stability assessment of three-dimensional slopes with cracks [J]. *Engineering Geology*, 2019, 252: 136-144.
- [65] 王志强, 刘高, 韩文峰. 兰临高速公路袁家湾滑坡演化机理[J]. *岩土力学*, 2007, 28(10): 2224-2228.  
WANG Z Q, LIU G, HAN W F. Evolution mechanism of Yuanjiawan landslide in Lanzhou-Lintao expressway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2224-2228. (in Chinese)
- [66] 雍睿, 胡新丽, 唐辉明, 等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 3018-3027.  
YONG R, HU X L, TANG H M, et al. Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 3018-3027. (in Chinese)
- [67] 金继军, 郭长宝, 沈亚麒, 等. 四川茂县周场坪滑坡发育特征与变形监测分析[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 103-113.  
JIN J J, GUO C B, SHEN Y Q, et al. Development characteristics and deformation monitoring analysis of the Zhouchangping landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 103-113. (in Chinese)
- [68] WANG J C, CHEN C. Stability analysis of slope at a disused waste dump by two-wedge model [J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017, 31(8): 575-588.
- [69] 赵占仑. 边坡拉张裂缝及拉-剪耦合破坏模式的评价方法研究[D]. 广州: 中山大学, 2020.  
ZHAO Z L. Research and assessment on tension cracks and tension-shear coupling failure mode of slope [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2020. (in Chinese)

(编辑 胡玲)