

# 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究

周红艺, 李辉霞, 叶 奇, 吴国威

(佛山科学技术学院 空间信息与资源环境系, 广东 佛山 528000)

**摘 要:** 为了研究崩壁裂隙发育对崩壁稳定性的影响, 试验采集了广东德庆崩岗侵蚀区的崩壁不同部位土样, 对其进行脱湿作用下的裂隙发育演变规律室内试验研究, 试验中采用烘干法模拟脱湿过程, 在脱湿过程中, 定时定位对土样进行称重、拍照, 以记录裂隙发育情况, 利用 ArcGIS 软件对裂隙照片进行矢量化处理, 提取裂隙的各种几何要素, 进行裂隙度计算来分析裂隙发育情况。结果表明: 不同部位土体裂隙发育程度达到相对稳定时的土壤含水量和时间不同, 其中崩壁顶部( $B_1$ )土体最先产生裂隙和达到稳定状态, 其次是中部( $B_2$ ), 最后是下部( $B_3$ ); 不同崩壁土体的裂隙面积密度、长度密度和连通性指数都随着含水率的减少而增大, 达到最大值之后保持稳定, 变化趋势一致。正是由于崩壁土体裂隙的发育程度不一, 在到达稳定的时间和含水量的不同, 从而导致崩壁土体各部位受力不均, 土体强度产生差异, 从而最终导致在雨季崩壁失稳而发生崩岗。

**关键词:** 华南花岗岩; 崩岗; 土壤裂隙; 模拟

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0338-05

## Simulation of Morphological Development of Soil Cracks in the Collapsing Hill Region of Southern China

ZHOU Hongyi, LI Huixia, YE Qi, WU Guowei

(Department of Spatial Information and Resources or Environment, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China)

**Abstract:** The collapsing hill is a specific form of soil erosion in the granite red soil region of South China, especially in Guangdong Province. It is one of the most important indications of serious soil erosion. We reported regular changes on surface morphology of soil cracks with decreasing water in three different parts of soil body, the top of collapsing wall ( $B_1$ ), the middle of collapsing wall ( $B_2$ ), the bottom of collapsing wall ( $B_3$ ) through simulation experiments. In this study, we took overhead photos of the sample frame using a digital camera. The images were further processed by ArcGIS to quantificationally analyze the statistical law of crack morphology. Meanwhile, a dynamic description method based on normal distribution was proposed to depict the morphology of shrinkage cracks on soil surface. It showed that crack area density, length density, and connectivity index all increased with decrease of moisture content and remained stable after reaching their maximums, but the time to reach their maximums and the soil moisture after reaching their maximums varied in different parts of soil body. Cracks were first developed in  $B_1$  specimen, and then in  $B_2$ , and finally in  $B_3$ , and the same order was found in reaching their stability. Crack area density of  $B_1$  specimen was the biggest compared with those of  $B_2$  and  $B_3$  specimen throughout the drying process. The difference in crack development, the time to reach stability, and soil moisture content will result in uneven load-carrying in different parts of soil body in collapsing wall, and finally result in collapsing hill in rainy season.

**Keywords:** granite red soil region of Southern China; collapsing hill; soil cracks; simulation experiment

华南花岗岩发育的红壤风化壳是崩岗侵蚀母体, 研究表明: 崩岗与裂隙息息相关, 裂隙成为了边坡崩塌和直接产生重力侵蚀的重要因子, 崩岗发育完全受裂隙所控制, 华南花岗岩红壤风化壳裂隙是崩岗侵蚀

所特有的成因之一<sup>[1]</sup>。崩岗的侵蚀过程主要是通过崩壁的崩塌作用来完成, 没有崩壁的崩塌便没有崩岗的演变和崩岗地形的发育, 即崩壁的崩塌是整个崩岗演变过程中最活跃的部分, 也是崩岗运动的物质来

源<sup>[2-3]</sup>。研究认为崩壁土体裂隙发育是起不稳定性的重要原因:一方面,暴露于空气中的崩壁土体极易失水收缩。其次,由于土体是热的不良导体,夏季高温季节,崩壁外层土体受热力影响而产生膨胀收缩的程度较内部土体更大,不均匀的应力极易产生密集的破坏性裂隙<sup>[3]</sup>。在土壤裂隙方面的研究,多数研究还集中在膨胀土和农田土壤裂隙发育方面,较多学者对裂隙发育的定量化指标选择和如何利用图像技术进行量化进行了大量的试验研究和探讨<sup>[4-7]</sup>,最终提出较为公认的裂隙形态特征指标<sup>[8-13]</sup>:如裂隙面积密度、长度密度和裂隙分支角度为基本参数的裂隙形态特征体系,该体系可有效度量裂隙的形态及连通性,但仍需结合其他传统数学指标进一步形象化;但是对于不同土壤类型和土体断面层次的裂隙发育规律还缺乏比较研究,特别是对崩岗崩壁土体裂隙发育演化规律的研究至今仍鲜有报道,同时,从裂隙图像提取裂隙信息的技术仍不甚完善。为此,笔者通过室内试验模拟崩壁土体裂隙发育规律研究,尝试采用 GIS 矢量化技术对裂隙图像进行处理,根据提取的相关裂隙信息,对华南花岗岩崩壁土体裂隙开展演化规律进行探索,为下一步定量评价裂隙发育对风化壳稳定性、崩塌堆积量的影响,揭示崩壁边坡失稳破坏机制,同时,也为崩岗侵蚀治理措施提供科学依据。

1 试验方案

1.1 供试土体

研究区位于广东省肇庆市德庆县,德庆县地处广东省中西部,属低纬度地区,气候温和,热量丰富,雨量充沛,无霜期长,据德庆县气象站资料,年平均气温 21.5℃,年平均降雨量 1 516.5 mm,年平均日照时数为 1 848 h。在广东省德庆县深涌水土保持监测站设立的定位观测点,在现有的 39 个崩岗中,选定其中 1 个较为活跃的崩岗进行崩壁土样采集,采集崩

壁上部(B<sub>1</sub>)、中部(B<sub>2</sub>)和下部(B<sub>3</sub>)三个层次土样。取样地布设于德庆县马墟镇的东南部深涌水土保持监测站 1 号拦砂坝丘陵坡地,坐标位置 110°50′26″E, 23°10′29″N,海拔高度 132 m,植物群落主要为木荷—岗松—芒萁群落以及其他杂草,土壤类型为赤红壤。该崩岗属弧形崩岗,侵蚀沟 2 条,崩壁后壁高 5 m,平均深度 3 m,沟口宽 1.8 m,沟道最大宽度 5.2 m,崩岗面积 136 m<sup>2</sup>,沟道长 16 m,边壁高 3.6 m。所取样品来至崩壁的上部(B<sub>1</sub>)、中部(B<sub>2</sub>)和下部(B<sub>3</sub>),采用 2 mm 的筛子筛掉根系和杂质。土体颗粒分析中,粒径>2 mm 的土体颗粒用筛析法测定,≤2 mm 的土体颗粒用美国 Microtrac 公司的 S3500 系列激光粒度分析仪测定(最小测试粒径为 0.02 μm),游离氧化铁测定采用二亚硫酸钠—柠檬酸钠—重碳酸钠(DCB)法,土壤容重采用环刀法,土壤有机碳用重铬酸钾法测定。每个土样重复三次,测定数据取其平均值,所得的土体理化性质见表 1。

1.2 试验方案

试验土体风干后过 2 mm 筛到直径为 24.1 cm 的不锈钢盆容器里面,土层原始厚度为 30 mm,加水至饱和状态。本次试验采用低温(80℃)烘干法模拟土体脱湿过程,烘干过程中,分别于试验开始后 1 h, 2 h 及以后每隔 20 min 将土样取出称重并对土样顶面进行拍照(共历时 22 h),含水率用电子天平测定。用有效像素为 1 010 万的松下 DMC-LX7 数码相机拍照,为保证裂隙图像拍摄距离、位置以及环境的一致性,采用固定机位和光源拍摄裂隙发育情况。三个试验土体种类均设有 3 个重复,测试结果取均值。为保证裂隙图像拍摄距离、位置及环境的一致性,以保证拍摄的距离及土样位置一致,同时拍摄时遮挡住一切外界光源,仅用日光灯进行照明,以保证拍摄环境一致。采用固定机位和光源拍摄裂隙发育情况,特别制作一个能固定相机及土样的架子。

表 1 土体基本理化性质

土体 层次	干容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	有机质含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	游离氧化铁/ (g·kg <sup>-1</sup> )	含量/%		
				黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.05~0.002 mm)	砂粒(0.05~2 mm)
B <sub>1</sub>	1.58	7.67	10.52	10.54	75.39	14.07
B <sub>2</sub>	1.43	2.16	21.16	14.48	78.01	7.51
B <sub>3</sub>	1.47	2.45	15.76	6.62	69.42	23.96

1.3 照片处理方法和测量参数<sup>[7-8]</sup>

照片处理采用专业 GIS 图像处理软件 Erdas 8.7 进行几何纠正、采用 ArcGIS 进行数字化、拓扑,最后进行裂隙的周长、面积等的提取及分析(图 1),并计算裂隙数字化图形进行各裂隙面积、周长统计,并根据各形态指标值的计算公式,获得各裂隙的形态特

征指标值。

1.4 测量参数<sup>[7-8]</sup>

- (1) 不同时刻下试样的质量含水率(以下含水率均为质量含水率)。测量土壤含水率采用称重法。
- (2) 单条裂隙的面积 A<sub>i</sub> 和长度 L<sub>i</sub>。单条裂隙定义为相邻两节点之间的裂隙。将中心线图 and 轮廓线

图导入到 ArcGIS 中,应用软件的测量功能统计裂隙的长度和面积。

(3) 裂隙的节点个数  $N_n$ ,连接裂隙条数  $N_e$ ,单连接裂隙条数  $N_s$  和未连接裂隙条数  $N_u$ 。

(4) 裂隙网络连通性指数  $K^{[7,14]}$ ,计算公式如下:

$$K = \frac{N_n}{N_e + N_n} = \frac{N_n}{N_s + N_n} \quad (1)$$

式中: $N_e$ ——单连接裂隙的端点数; $N_s$ ——单连接裂隙条数; $N_n$ ——节点个数; $N_n$ ——节点个数; $N_e$ ——单连接裂隙的端点数; $N_s$ ——单连接裂隙条数。

(5) 裂隙面积密度  $P_A$  和长度密度  $P_L$ ,计算公式<sup>[7,14]</sup>:

$$P_A = \frac{\sum A_i}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$P_L = \frac{\sum L_i}{A_0} \quad (3)$$

式中: $P_A$ ——裂隙面积密度(%); $P_L$ ——裂隙长度密度( $\text{mm}^{-1}$ ); $A_i$ ——第  $i$  条裂隙的面积( $\text{mm}^2$ ); $L_i$ ——第  $i$  条裂隙的长度(mm); $A_0$ ——研究区域土壤总面积( $\text{mm}^2$ )。

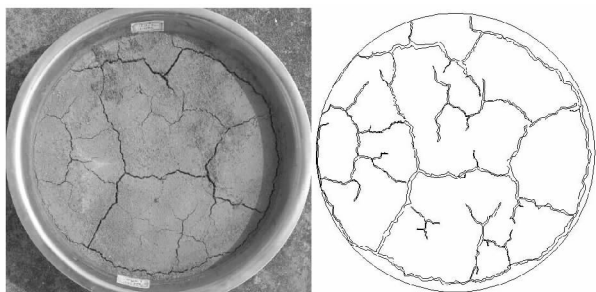


图 1 裂隙图像处理过程图

## 2 结果与分析

我们常能观测的裂隙仅限于土壤表面的二维形状,因此,许多研究学者采用裂隙的长度和面积来表征裂隙的特征<sup>[6,10,14]</sup>。本文研究在前人研究的基础上,拟从裂隙面积密度、裂隙长度密度和裂隙连通性指数三个方面来反映裂隙形态发育程度的指标。从我们观察的试验情况来看,在脱湿 2 h 20 min 的时候崩壁上部( $B_1$ )最先产生裂隙,其次是崩壁中部( $B_2$ )在 2 h 40 min 的时候有裂隙出现,崩壁下部( $B_3$ )在 3 h 后产生裂隙,下面分别分析各个层次土体裂隙发育和脱湿情况的关系。

### 2.1 裂隙面积密度的发育规律

裂隙面积密度与含水率的关系如图 2 所示。由图 2 可以看出:崩壁不同部位土体的裂隙面积密度都随着土体含水率的减少而逐渐变大,变化规律一致,裂隙面积密度与含水量的关系可以选用三次曲线方程拟

合,其方程均达到极显著水平,决定系数  $R^2$  均在 0.98 以上(表 2)。但是不同部位裂隙面积密度达到最大值时的土壤含水量却不尽相同,崩壁中部( $B_2$ )土体含水量在 8.2% 时裂隙面积密度最先达到最大值并保持了稳定,其次是崩壁上部( $B_1$ )土体含水量在 7.36% 时裂隙面积达到最大值后稳定,最后是崩壁下部( $B_3$ )土体含水量在 7.04% 时裂隙面积达到最大值后就保持稳定,其顺序是  $B_2 > B_1 > B_3$ 。崩壁不同部位的面积密度稳定值各不相同:中部( $B_2$ )土体的裂隙面密度最大,其次是崩壁上部( $B_1$ ),最后是崩壁下部( $B_3$ )土体,其顺序是  $B_2 > B_1 > B_3$ 。裂隙面积密度不同部位的差异与熊东红等<sup>[8]</sup>研究表明土体黏粒含量与裂隙发育程度存在强的正相关结论基本一致,本研究中的崩壁中部( $B_2$ )土体黏粒含量最高,其最终试验结果的面密度是最大的。在实际情况下,由于崩壁土体上下部位含水量的不同,在上中下土层间形成一个上低下高的含水梯度,由于土体渗透特性的差异,崩壁土体很难在短时间内将含水量梯度自我平衡,所以在含水量空间梯度差异的作用下,崩壁土体会出现上部受拉,下部土体受压的应力分布情况,当上部拉应力超过土块抗拉强度时,裂隙便随之产生,含水量的不同和裂隙的产生,可以影响土体的强度,从而发生不同部位土体强度的差异而发生崩岗。

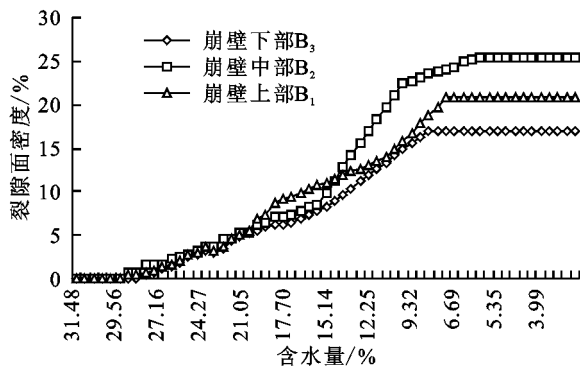


图 2 裂隙面积密度与含水率关系

### 2.2 裂隙长度密度的发育规律

裂隙长度密度和含水率的关系如图 3 所示,崩壁不同部位土体的裂隙长度密度都随着土体含水率的减少而逐渐变大,变化规律一致,裂隙长度密度与含水量都可以选用三次曲线方程拟合裂隙长度密度与含水率的关系,其方程均达到极显著水平,决定系数  $R^2$  均在 0.92 以上(表 2)。 $B_1$  在含水量为 18.78% 左右时,长度密度达到最大值后保持稳定, $B_2$  和  $B_3$  分别在 20.24%, 18.06% 时长度密度达到最大值后并保持稳定,之后,随着含水量的减少,裂隙只是宽度拓宽,面积增大。从图 3 中可以看出,崩壁不同部位的土体的裂隙长度最大值有所差异,从上部土体向下部土体递减( $B_1 > B_2 > B_3$ )。说明上部土体裂隙发育程度比下部土体更充分。

表 2 试土体的裂隙形态发育与含水量的回归方程

崩壁土体	指标(Y)	R <sup>2</sup> 系数值	回归方程	显著性概率值
崩壁上部(B <sub>1</sub> )	面积密度	R <sup>2</sup> =0.9930	$y=-0.0003x^3+0.028x^2-0.1876x+0.3727$	<0.0001
	长度密度	R <sup>2</sup> =0.9488	$y=-4E-07x^3-8E-05x^2+0.0096x-0.0423$	<0.0001
	连通性指数	R <sup>2</sup> =0.9544	$y=9E-06x^3-0.0015x^2+0.077x-0.2927$	<0.0001
崩壁中部(B <sub>2</sub> )	面积密度	R <sup>2</sup> =0.9840	$y=-0.0005x^3+0.0482x^2-0.6302x+2.3146$	<0.0001
	长度密度	R <sup>2</sup> =0.9685	$y=6E-07x^3-0.0002x^2+0.0109x-0.0431$	<0.0001
	连通性指数	R <sup>2</sup> =0.9520	$y=2E-06x^3-0.0008x^2+0.0592x-0.2615$	<0.0001
崩壁下部(B <sub>3</sub> )	面积密度	R <sup>2</sup> =0.9903	$y=-0.0003x^3+0.028x^2-0.252x+0.6662$	<0.0001
	长度密度	R <sup>2</sup> =0.9269	$y=2E-06x^3-0.0002x^2+0.0119x-0.0491$	<0.0001
	连通性指数	R <sup>2</sup> =0.9583	$y=-2E-06x^3-0.0003x^2+0.0441x-0.2107$	<0.0001

注:X 代表水分含量(%),Y 代表裂隙发育指标(%)。

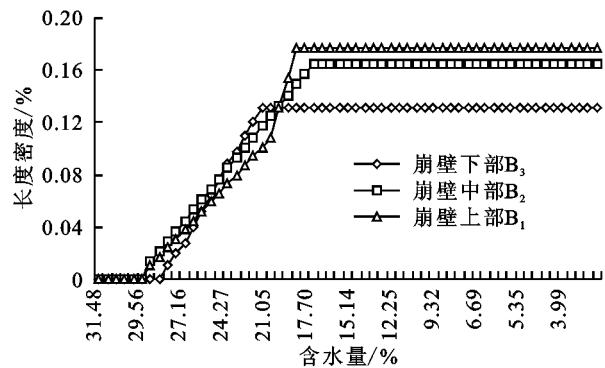


图 3 裂缝长度密度与含水率关系

2.3 连通性指数与含水率关系

从图 4 可以看出,崩壁不同部位土体的裂隙连通性指数都随着含水率的减少而逐渐变大,变化规律一致,裂隙连通性指数与含水量都可以选用三次曲线方程拟合,其方程均达到极显著水平,决定系数  $R^2$  均在 0.95 以上(表 2)。崩壁上部土体  $B_1$  从一开始出现裂隙之后连通性指数迅速增大,在含水率为 20.24% 左右达到最大值并且稳定。中部土体  $B_2$  试样出现裂隙后连通性指数增长较快,在 16.74% 左右达到最大值并且稳定,下部土体  $B_3$  试样出现裂隙后连通性指数增长较慢,在 12.68% 左右达到最大值并且稳定。裂隙连通性指数反映了试样裂隙网络的形成过程, $B_1$  试样的裂隙网络形成时间较短,而后随着含水率的减少而较快达到稳定,其裂隙网络不变,只是裂隙宽度的增加, $B_3$  裂隙网络形成时间较长。对于  $B_1$ ,由裂隙所切割而成的区块比较完整,即裂隙之间形成的网络连通性较好,稳定时其值为 0.942,而  $B_3$  被裂隙切割而成的区块则比较破碎,存在比较多的单连接裂隙,裂隙之间形成的网络连通性较差,稳定时其值为 0.843。在连通性指数达到稳定时裂隙网络已基本形成,由此可看出连通性指数能够反映不同部位类型裂隙发育的特点,这样说明上部土体相对下部土体来说更容易形成裂隙。因此,在崩岗治理中更要注意上部

土体的植被覆盖,保持其含水量的相对稳定来减少裂隙发育,从而降低崩岗发生的可能。

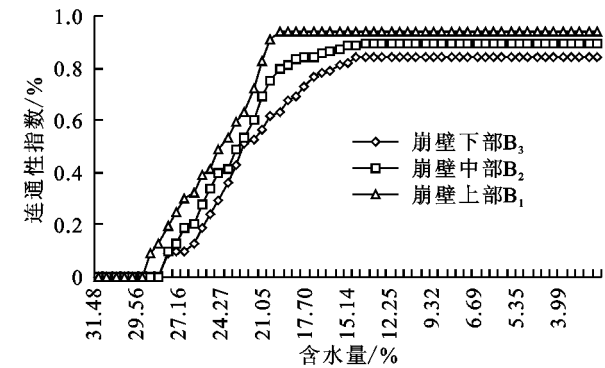


图 4 连通性指数与含水率关系

3 结论

通过试验表明,华南花岗岩风化壳土体在脱湿过程中容易产生裂隙,崩壁不同部位土体裂隙发育的程度不尽相同,崩壁裂隙的发育使得崩壁土体完整性受到破坏,不同部位土体裂隙发育程度的差异使得崩壁土体的强度特征会发生变化,从而使得崩壁土体各个方向受力不均而极易发生崩塌。不同崩壁土体的裂隙面积密度、长度密度和连通性指数都随着含水率的减少而增大,达到最大值之后保持稳定,变化趋势一致。裂隙面积密度、长度密度和连通性指数与含水率的三次曲线拟合方程均达到极显著水平,决定系数均大于 0.92。不同部位土体的变化程度有所不同,其规律共同说明上部土体  $B_1$  更容易产生裂隙,而且裂隙发育的程度比下部土体更为充分,在长度密度和连通性指数方面均是上部土体最大。这说明在华南花岗岩土体崩岗治理过程中更需要考虑到上部土体的植被恢复才能有效防止崩岗的发生。不同部位土样(崩壁顶部  $B_1$ ,崩壁中部  $B_2$ ,崩壁下部  $B_3$ )的裂隙面积密度随着含水率的减少而增大,不同部位的土体在达到裂隙面积稳定的时间和含水量是不同的,分别在含水量为

18.78%, 20.24%, 18.06%左右达到最大值后保持稳定;长度密度和连通性指数也都是随着含水率的减少而增大,崩壁不同部位(顶部  $B_1$ , 中部  $B_2$  和下部  $B_3$ )试样的连通性指数随着含水率的减小而增大,分别在含水率为 20.24%, 16.78% 和 12.68% 左右达到最大值并且稳定,最大值分别为 0.942, 0.892, 0.843, 反映了崩壁不同部位下土体干缩裂隙网络的形成过程和连通性的实际情况。以上结果说明不同部位土样的裂隙发育情况是有所不同的,正是由于不同部位的开裂情况不同,裂隙度影响了土体的强度特性,最终导致崩壁的坍塌而发生崩岗,下一步应研究裂隙发育程度对崩壁土体强度的定量影响。

本研究重点探讨了土体水分不断衰减条件下,崩壁不同部位土体的裂隙形态发育变化,限于条件,对不断增大的裂隙面积对土体水分蒸发散失的速率和土体强度的影响没有深入探讨;随裂隙发育深度的增加,其裂隙内表面积不断增大,导致土体整个蒸发面积的增大,必然对土体水分蒸发的速率和土体强度产生影响,如何量化土体裂隙发育深度以及其对土体强度的影响,有待下一步深入揭示;裂隙发育受土体岩土性质的影响,下一步应分析岩土性质对崩壁裂隙发育的影响;今后还应采集稳定型崩岗崩壁土体进行对比试验,分析稳定型和活动型崩壁裂隙发育的差异及其对土体渗透性能和强度特性的影响。

崩壁裂隙的存在一方面破坏了土体的整体性,引起土体整体强度的降低;另一方面增大了土体的渗透性,为雨水入渗和水分蒸发提供了良好的通道,使得气候对土体的影响深度进一步向土体内部发展。在降雨入渗条件下,流水迅速渗入土体内部,引起孔隙水压力上升,基质吸力减小,土体强度下降,崩壁自重增加,兼之崩壁下部洞穴的存在,崩壁失稳加剧,最终导致崩壁上部土体崩坠或滑入沟底,并在以后的降雨中,被径流带走。至此,沟岸后退完成了一个轮回。但是关于崩壁裂隙发育是如何影响土体的渗透性和强度?裂隙发育程度对崩壁的稳定性和崩壁侵蚀量的定量关系如何?等等这一系列问题都还没有看到新的研究进展,而这些问题恰恰是揭示崩岗发生机理的重要数据和参数。因此,笔者认为从崩壁土体裂隙发育程度入手,研究崩壁土体的裂隙发育及其对渗透

特性、土体强度的影响和机理,定量评价裂隙发育对崩壁稳定性、崩塌堆积量的影响,是今后研究崩岗侵蚀机理的一个重要方向。

#### 参考文献:

- [1] 周红艺,李辉霞. 华南花岗岩风化壳裂隙发育对崩岗侵蚀的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 352-354.
- [2] 李思平. 崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 29-35.
- [3] 吴志峰,王继增. 华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 31-35.
- [4] 张家俊,龚壁卫,胡波,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729-2734.
- [5] 易顺民,黎志恒,张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 38-42.
- [6] 袁俊平,殷宗泽,包承纲. 膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(6): 27-30.
- [7] 张展羽,朱文渊,朱成立,等. 农田土壤表面干缩裂缝的随机分布统计特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 119-124.
- [8] 熊东红,杨丹,李佳佳,等. 元谋干热河谷区退化坡地土壤裂隙形态发育的影响因子[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 102-108.
- [9] 唐朝生,施斌,刘春,等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1186-1193.
- [10] Xiong Donghong, Lu Xiaoning, Xian Jishen, et al. Selection of judging indicators for surface morphology of soil crack under different development degrees in Yuanmou arid-hot valley region[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008, 13(3): 363-368.
- [11] Vogel H J, Hoffmann H, Roth K. Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results, and morphological quantification [J]. Geoderma, 2005, 125(3/4): 203-211.
- [12] Young I M, Crawford J W. The analysis of fracture profiles of soil using fractal geometry[J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30(3): 291-295.
- [13] Baer J U, Kent T F, Anderson S H. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks[J]. Geoderma, 2009, 154(1/2): 153-163.
- [14] 刘春,王宝军,施斌,等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1383-1388.