

# 干湿效应下崩岗土体的裂隙演化及收缩变形规律

王佳妮<sup>1</sup>, 张晓明<sup>2</sup>, 丁树文<sup>2</sup>, 王云琦<sup>1</sup>, 段晓阳<sup>2</sup>, 杨清杰<sup>2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070)

**摘要:** 为提高崩岗土体稳定性,抑制崩壁崩塌。试验共设计 6 次干湿循环,利用工业相机对脱湿过程中崩岗 4 层土进行定时定点拍照并结合数字图像处理技术,研究干湿效应下崩岗土体的裂隙演化及收缩变形规律。结果表明:(1)脱湿过程中土体形态变化顺序为轴向收缩、径向收缩和裂隙发育;(2)表面裂隙率与液限、塑性指数、黏粒含量呈显著正相关关系,4 层土中表面裂隙率最大值为过渡层 18.78%,最小值为砂土层 5.41%,崩岗土体剖面上两者为相邻土层,较大差异性会严重破坏崩岗的稳定性;(3)随干湿循环的进行,径向收缩不再发生,轴向收缩、表面裂隙率、裂隙平均宽度逐渐减小,裂隙总长度、裂隙总条数、裂隙交点个数、被分割的土块个数先增加后减小,各参数均在第 3 次干湿循环后趋于稳定,4 层土中过渡层受干湿循环影响最大,砂土层最小。研究结果可为在降雨—蒸发反复交替过程中崩岗发生机理研究提供科学依据。

**关键词:** 崩岗; 干湿循环; 裂隙; 收缩

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2022)02-0114-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.015

## Crack Evolution and Shrinkage Deformation Rules of Benggang Soil Under Dry-Wet Cycles

WANG Jiani<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>2</sup>, DING Shuwen<sup>2</sup>, WANG Yunqi<sup>1</sup>, DUAN Xiaoyang<sup>2</sup>, YANG Qingjie<sup>2</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.School of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

**Abstract:** In order to improve the stability of Benggang soil, prevent Benggang wall collapse, an experiment was conducted to study the crack evolution rules and shrinkage deformation rules of Benggang soil under the effect of Dry-Wet (D-W) cycles. A total of six D-W cycles were designed for the experiment, in which the four layers of soil were photographed at a fixed time and fixed site by using industrial cameras during the dehumidification process and in combination of digital image processing technology. Results showed as follows: (1) In the process of dehumidification, the sequence of soil morphology changes was: axial shrinkage, radial shrinkage, and crack development. (2) There was an obvious positive correlation between shrinkage cracking degree and liquid limit, plastic index and clay content. The maximum value of shrinkage cracking degree in the four layers of soil was 18.78% for the transition layer, and the minimum value was 5.41% for the sandy layer. The two soil layers were adjacent to each other on the section of the Benggang, and their great difference caused the terrible influence on the stability of Benggang. (3) As the D-W cycles, the radial shrinkage phenomenon no longer occurred. The rate of axial shrinkage, the rate of surface cracks, and the average width of the cracks gradually decreased. The total length of the cracks, the total number of crack strips, the number of crack intersections, and the number of lumps initially increased, then decreased, all parameters stabilized after the 3rd D-W cycles. Among the four soil layers, the transition layer was the most affected by D-W cycles, and the sandy layer was the smallest. These results could provide a scientific basis for the study on the mechanism of Benggang occurrence during the rain-evaporation cycles.

**Keywords:** Benggang; dry-wet cycles; crack; shrinkage

收稿日期: 2021-08-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771307, 41201271); 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2017522/KY); 2020 年湖北省大学生创新创业训练项目(S202010504045); 华中农业大学 2021 年大学生科技创新基金项目(2021096)

第一作者: 王佳妮(1997—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事崩岗土体稳定性研究。E-mail: 798603101@qq.com

通信作者: 张晓明(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 主要从事崩岗及土壤侵蚀研究。E-mail: zxm\_huanong@mail.hzau.edu.cn

自然环境中在降雨—蒸发的交替变化下,崩岗土体产生膨胀收缩现象并衍生大量的裂隙,降低土体的抗剪强度,破坏土体的稳定性,加速崩塌的发生。为抑制崩岗侵蚀的发生,国内学者们<sup>[1-8]</sup>针对崩岗土体的力学特性,如抗剪强度、渗透特性、固结特性、抗拉特性、无侧限抗压强度等方面做过大量的研究。对崩岗土体裂隙性以及胀缩性的研究方面,张晓明等<sup>[9]</sup>研究表明,在干湿循环效应下,崩岗土体内会衍生大量的裂隙,引起土体不均匀沉降;刘昌鑫等<sup>[10]</sup>研究表明,崩岗土体裂隙比的增加主要发生在第 2 次干湿循环;魏玉杰等<sup>[11]</sup>对崩岗不同土层进行收缩试验表明,红土层与过渡层收缩变化明显,砂土层较为缓和,且土壤黏粒含量与轴向收缩率呈正相关。对崩岗土体的裂隙性与胀缩性研究较少,且对裂隙发育与收缩变形分别单独进行研究,自然环境中两者是同时发生且相互影响的,因此需要进一步同时研究崩岗土体的裂隙发育与收缩变形,并探讨两者之间的关系。

国内外针对胀缩性与裂隙性的研究多集中于膨胀土,总结胀缩变形与裂隙产生的原因在于:一是其主要矿物成分为蒙脱石与伊利石,具有极强的亲水特性;二是土体中的黏粒通过胶结作用形成团聚体,团聚体内存在孔隙,当水分子进入孔隙时土体膨胀,当干燥失水时孔隙缩小造成土体收缩<sup>[12]</sup>;三是脱湿过程中黏粒之间形成水化膜,产生张拉力,当张拉力大于抗拉强度时,裂隙产生<sup>[13]</sup>。易顺民等<sup>[14]</sup>、唐朝生等<sup>[13]</sup>研究表明,自然条件下裂隙看起来分布杂乱无章且发育随机,但经过野外统计和室内试验发现其具有较好的分形特性,且存在较强的时序性。对于胀缩变形、裂隙发育的影响因素,学者们从土体结构(初始干密度<sup>[15]</sup>、含水率<sup>[16]</sup>等)、土质因素(黏粒含量<sup>[17]</sup>、矿物含量<sup>[18]</sup>等)、外界环境因素(温度<sup>[19]</sup>、湿度<sup>[20]</sup>、界面粗糙度<sup>[21]</sup>、边界约束<sup>[22]</sup>等)、土体尺寸(厚度<sup>[23-24]</sup>、表面积<sup>[25]</sup>等)等方面进行试验研究,初步揭示了膨胀土的裂隙发育规律。自然条件下降雨—蒸发的反复交替是土体膨胀收缩与裂隙发育的促使因素,因此有必

要对干湿效应进行研究。

学者们对于收缩变形与裂隙发育规律的研究多集中于膨胀土,对崩岗土体的研究较少。因此本文以湖北省通城县的典型崩岗土体为研究对象,对 4 层土进行室内干湿循环试验,通过工业相机记录脱湿过程中裂隙发育、土体收缩的动态过程,采用数字图像处理技术对裂隙参数、收缩参数定量化分析,研究干湿效应下崩岗不同土层的裂隙发育与收缩变形规律,以及两者之间的相互影响关系,对进一步研究崩岗失稳机理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用土样取自湖北省咸宁市通城县五里镇的瓢型崩岗(113°46'26''E, 29°12'39''N),该崩岗发育完整,崩壁边高约 3.38 m,面积达 126 m<sup>2</sup>,植被覆盖度约为 35%。在野外进行采样时依据崩壁剖面土壤颜色、土壤深度对土层进行划分。表土层,取样深度 0.05—0.17 m,土体呈现暗红色,根系肉眼可见,表层有稀疏的植被,土粒质感细腻,具有较好的结构性;红土层,取样深度 0.17—0.49 m,土体为红色,根系分布较少,土粒质感细腻,结构紧实;过渡层,取样深度 0.49—2.10 m,土壤颜色呈现淡红色至灰白色,没有植物根系,有轻微的砂质干,结构比较松散;砂土层,取样深度 2.10—3.10 m,土体颜色呈现灰白色,无植物根系,颗粒不均一,砂质感较强,结构松散。

采取原状土时,提前在环刀内壁薄涂一层凡士林,环刀采用规格为  $\Phi 50.46 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,在每层中部各取 3 个原状土,并迅速用保鲜膜包裹,做好密封措施。原状土主要用于测量土壤的自然含水率、干密度和毛管孔隙度。在每层中部用铁锹采集大量的土壤放入麻袋中运回实验室,进行室内试验,包括有机质含量测量、液塑限测量、矿物含量组成、颗粒组成、干湿循环试验等。4 层土的基本物理性质、颗粒组成见表 1 和表 2。

表 1 崩岗 4 层土的基本物理性质

土层	干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	毛管 孔隙度/%	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH	液限 ( $W_L$ )/%	塑限 ( $W_P$ )/%	塑性指数 ( $I_P$ )	矿物含量/%		
								高岭石	水云母	过渡矿物
表土层	1.38	36.96	21.05	4.67	45.90	29.33	16.57	94.51	3.22	2.27
红土层	1.35	36.12	12.56	4.78	47.69	29.59	18.10	94.06	3.91	2.03
过渡层	1.39	39.84	10.55	5.35	50.12	31.52	18.60	90.83	5.86	3.31
砂土层	1.41	42.26	8.86	5.81	39.98	34.43	5.55	92.31	5.80	1.89

### 1.2 试样制备

将采回的土风干碾碎过 2 mm 筛后混合均匀,将土样均匀加水为过饱和泥浆状态,密封在容器内静置 24 h 后,抽去表面清液,将泥浆试样缓缓倒入培养皿

( $D=15 \text{ cm}$ ,  $H=1.6 \text{ cm}$ )中,轻轻晃动培养皿使试样平整,共设计 12 个试样(4 层土 $\times$ 3 组重复)。并从剩余泥浆中取 3 个土样采用烘干法测量含水率,其平均值即为土样的初始含水率,以此方法测量 4 层土的初

始含水率分别为 38.03%, 40.97%, 42.88%, 33.11%。

表 2 崩岗 4 层土的颗粒组成 单位: %

土层	黏粒含量 ( $<0.002$ mm)	粉粒含量 ( $0.05\sim 0.002$ mm)	砂粒含量 ( $2\sim 0.05$ mm)	土壤 分类
表土层	36.62	26.11	37.27	黏壤土
红土层	39.36	27.73	32.91	黏壤土
过渡层	43.63	26.10	30.27	壤土
砂土层	15.99	30.44	53.57	砂土

### 1.3 试验方法

在温度和湿度都相对恒定的室内(温度  $(24 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $(65 \pm 2)\%$ )进行干湿循环试验, 脱湿过程采用同一风速的低风速风扇置于试样同一侧加速水分的蒸发, 并保证每个试样间距为 10 cm, 保证其不受其他风扇的影响。在脱湿初始阶段, 每隔 4 h 进行定时定点称重拍照; 当开始产生收缩或者裂隙时, 时间间隔缩短至 2 h; 当裂隙发育稳定后, 时间间隔增加至 6 h 至脱湿结束。称重是用于记录水分蒸发过程, 计算土体含水率的变化情况。拍照装置见图 1。相机采用 500 万像素的工业相机, 将试样放置在图像校正板上保证每次拍摄位置和角度相同, 上方相机用于记录裂隙发育及径向收缩, 侧方相机用于记录轴向收缩, 使用黑布进行遮蔽避免其他光源的影响。

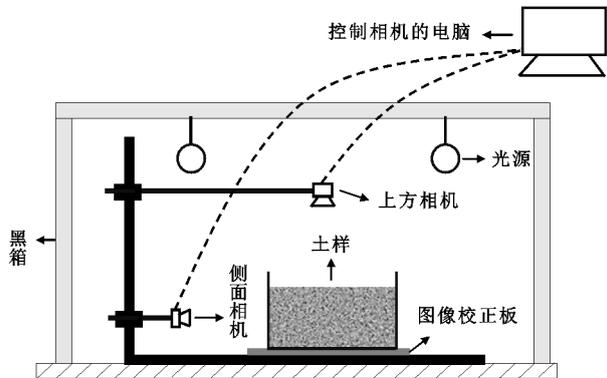


图 1 试验拍照装置示意

增湿采用气压喷壶分 4 次进行喷水<sup>[26]</sup>, 计算脱湿过程蒸发的水量, 前 3 次等量均匀喷水, 第 4 次的喷水量为称重计算前 3 次喷水过程中蒸发或损失的水量, 喷水结束, 含水量为土体的初始含水率。每次喷水 10 min 后进行拍照称重, 喷水过程中尽可能不破坏土体结构, 土体表面不产生积水。试验先对过饱和泥浆进行脱湿后进行增湿, 此为 1 次干湿循环试验, 共进行 6 次干湿循环。

数字图像处理: 先使用 Photoshop 软件对图片进行裁剪, 修正由于光源影响造成的颜色不均问题, 使用 ImageJ-Fiji 软件对图片进行灰度转换、二值化、去噪、骨架化等处理, 进行裂隙参数提取分析。裂隙参数包括表面裂隙率、裂隙总长度、平均宽度、裂隙条数、交点个数和土块个数。通过 ImageJ-Fiji 的比例尺设置功能

将像素值转化为实际值, 进行径向收缩面积、开裂面积、裂隙总长度、裂隙平均宽度、径向收缩率和轴向收缩率的测量。在脱湿过程中同时使用游标卡尺对同一试样的 3 个不同方向进行高度测量, 取其平均值, 用于与轴向收缩率的图像处理结果进行对比修正。

裂隙参数: 以往的研究<sup>[27]</sup>中, 定义表面裂隙率为裁剪掉边缘效应产生的径向收缩, 仅计算裂隙面积与土样初始表面积的占比, 这样计算的缺点在于忽略了脱湿初期裂隙的酝酿过程。因此, 本文定义裂隙范畴包含径向收缩区域, 表面裂隙率为径向收缩面积与开裂面积之和与土样初始表面积之比。参数表达式为:

$$\delta_{sc} = \frac{S_{sc}}{S} = \frac{S_s + S_c}{S} \quad (1)$$

式中:  $\delta_{sc}$  为表面裂隙率(%);  $S_{sc}$  为径向收缩面积与开裂面积之和( $\text{cm}^2$ );  $S$  为土样初始表面积( $\text{cm}^2$ );  $S_s$  为径向收缩面积( $\text{cm}^2$ );  $S_c$  为开裂面积( $\text{cm}^2$ )。

收缩参数中轴向收缩率  $\delta_{as}$ 、径向收缩率  $\delta_{rs}$  的表达式:

$$\delta_{as} = \frac{D - D_s}{D} \quad (2)$$

$$\delta_{rs} = \frac{H - H_s}{H} \quad (3)$$

式中:  $D$  为土样初始直径(cm);  $D_s$  为收缩后的土样直径(cm);  $H$  为土样初始高度(cm);  $H_s$  为收缩后的土样高度(cm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 单次脱湿下土体的裂隙发育

对 4 层土(3 组重复)第 1 次脱湿结束的裂隙参数进行统计分析(表 3)发现, 各土层 3 组重复试验的裂隙参数几乎没有产生较大差异。以表土层为例, 统计 3 个重复试样的干缩开裂终止图(图 2)发现, 其裂隙形态相似, 均具备环形裂隙, 不同之处在于裂隙产生部位不一致。在定量分析裂隙参数中  $S_{1-1}$ 、 $S_{1-2}$ 、 $S_{1-3}$  的表面裂隙率分别为 12.99%, 12.85%, 13.20%, 变异系数为 1.11%; 裂隙总长度分别为 94.52, 92.71, 93.43 cm, 变异系数为 0.80%; 裂隙平均宽度分别为 0.24, 0.24, 0.24 cm, 变异系数为 0; 裂隙条数分别为 15, 14, 14, 变异系数为 3.29%; 裂隙交点个数分别为 10, 9, 9, 变异系数为 5.05%; 被分割的土块个数分别为 6, 5, 6, 变异系数为 8.32%。所以对于相同配置的土样, 虽然裂隙的产生具有随机性, 但仅仅体现在裂隙产生部位上, 其他裂隙参数仍具备相似性。

4 层土的表面裂隙率与裂隙平均宽度的关系一致, 表现为过渡层 > 红土层 > 表土层 > 砂土层, 与土体中黏粒含量的关系相同; 而其裂隙总长度、裂隙条数、交点个数、被分割的土块个数中, 过渡层、红土层、表土层相差

不大,砂土层最小,表明过渡层表面裂隙率大于其他土层,主要贡献来源于裂隙宽度。而过渡层与砂土层在

崩岗垂直剖面上属于相邻土层,两者裂隙性的较大差异性破坏土体稳定性,造成崩塌的发生。

表 3 第 1 次脱湿结束后 4 层土的裂隙参数统计

土层	土样	表面裂隙率 ( $\delta_{sc}$ )/%	裂隙总长度 ( $L$ )/cm	裂隙平均 宽度( $W_a$ )/cm	裂隙条数 ( $N$ )	裂隙交点 个数( $M$ )	被分割的 土块个数( $Z$ )
表土层	S <sub>1-1</sub>	12.99	94.52	0.24	15	10	6
	S <sub>1-2</sub>	12.85	92.71	0.24	14	9	5
	S <sub>1-3</sub>	13.20	93.43	0.24	14	9	6
	变异系数/%	1.11	0.80	0	3.29	5.05	8.32
红土层	S <sub>2-1</sub>	18.16	98.70	0.33	16	10	5
	S <sub>2-2</sub>	17.58	96.46	0.32	16	9	5
	S <sub>2-3</sub>	18.06	95.47	0.33	17	11	6
	变异系数/%	1.41	1.41	1.44	2.89	8.16	8.84
过渡层	S <sub>3-1</sub>	18.78	93.13	0.36	14	9	4
	S <sub>3-2</sub>	19.54	95.84	0.36	15	9	4
	S <sub>3-3</sub>	19.07	95.41	0.35	15	9	4
	变异系数/%	1.64	1.25	1.32	3.21	0	0
砂土层	S <sub>4-1</sub>	5.41	72.09	0.13	6	4	3
	S <sub>4-2</sub>	5.06	69.84	0.13	5	4	3
	S <sub>4-3</sub>	4.99	69.94	0.13	5	4	3
	变异系数/%	3.57	1.47	0	8.84	0	0

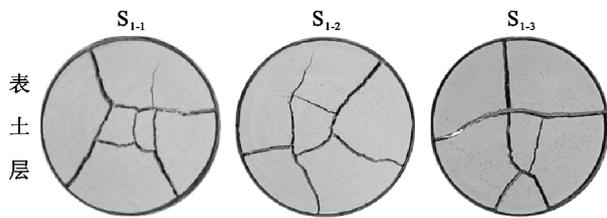


图 2 表土层的干缩开裂终止图

由于前面分析重复试样的裂隙参数具有相似性,因此 4 层土分别选取 1 个代表试样 S<sub>1-1</sub>、S<sub>2-1</sub>、S<sub>3-1</sub>、S<sub>4-1</sub>,运用 SPSS 软件对表面裂隙率与 4 层土的基本物理性质、颗粒组成进行相关分析(表 4),表明液限、塑性指数、黏粒含量与表面裂隙率均存在显著正相关关系,砂粒含量与表面裂隙率存在显著负相关关系。塑性指数越大,土壤颗粒越细,黏粒的亲水矿物含量

越高。而在脱湿过程中,表层土体与风、空气等外界因素直接接触,水分蒸发快,而下部土体由于水分蒸发迁移路径长以及吸力的产生,水分蒸发慢,致使土体形成上低下高的含水率梯度。而黏粒之间的黏结作用,以及黏粒之间的间隙较小,均会阻碍下部土体的水分蒸发,进一步加大上下含水率梯度,形成受力不均的拉张应力场,当某一处的拉张力大于其抗拉强度时,裂隙产生<sup>[28]</sup>。因此,黏粒含量的增加进一步加大表面裂隙率,砂粒的作用则与之相反。液限与表面裂隙率呈现显著正相关关系,可能是因为液限越大,土体由液态转化为可塑状态所需含水率越大,同时说明在脱湿过程中土体更易由过饱和状态转化为可塑状态,产生拉张力也越容易。

表 4 表面裂隙率与 4 层土的基本物理性质、颗粒组成相关分析统计

指标	干密度	毛管孔隙度	有机质含量	液限	塑限	塑性指数	高岭石含量	水云母含量	过渡矿物含量	黏粒含量	粉粒含量	砂粒含量
$P$	0.282	0.346	0.860	0.022	0.290	0.043	0.949	0.770	0.388	0.034	0.222	0.016
$r$	-0.718	-0.654	0.140	0.978*	-0.710	0.957*	-0.510	-0.230	0.612	0.966*	-0.778	-0.984*

注: $P$  为显著性值; $r$  为相关性系数;\* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

### 2.2 单次脱湿下土体的收缩特性

在二维条件下,对 4 层土(3 组重复)第 1 次脱湿结束的收缩参数进行统计分析(表 5)发现,各土层 3 组重复试验的收缩参数几乎没有产生较大差异。以表土层为例,其 S<sub>1-1</sub>、S<sub>1-2</sub>、S<sub>1-3</sub> 的轴向收缩率分别

为 19.50%,19.98%,19.46%,变异系数为 1.20%;径向收缩率分别为 4.13%,3.95%,4.35%,变异系数为 3.94%。所以对于相同配置的土样,其收缩特性具有相似性。

由于重复试样的收缩参数具有相似性,因此 4 层

土分别选取 1 个代表试样  $S_{1-1}$ 、 $S_{2-1}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{4-1}$ ，将脱湿过程中其径向收缩率( $\delta_{rs}$ )、轴向收缩率( $\delta_{as}$ )进行对比分析(图 3)。随脱湿的进行，径向收缩率呈“S”形增大，轴向收缩率随“厂”形增大，与范本贤等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。4 层土的轴向收缩约在含水率 30% 时，急速增长阶段结束，此时径向收缩才开始产生。4 层土的开裂含水率分别为 24.96%、26.15%、29.47%、22.36%，此时径向收缩急速阶段结束，表明脱湿过程

中土体形态变化顺序为轴向收缩、径向收缩、裂隙发育。脱湿结束时 4 层土的径向收缩率分别为 4.13%、5.51%、5.68%、2.39%，轴向收缩率分别为 19.50%、30.63%、18.13%、10.00%，轴向收缩率大于其径向收缩率，表明脱湿过程中土体在垂直面上的收缩变形大于其水平面上的收缩变形，且 4 层土之间径向收缩率为过渡层>红土层>表土层>砂土层，轴向收缩率为红土层>表土层>过渡层>砂土层。

表 5 第 1 次脱湿结束后 4 层土的收缩参数统计

单位：%

收缩参数	表土层				红土层				过渡层				砂土层			
	$S_{1-1}$	$S_{1-2}$	$S_{1-3}$	变异系数	$S_{2-1}$	$S_{2-2}$	$S_{2-3}$	变异系数	$S_{3-1}$	$S_{3-2}$	$S_{3-3}$	变异系数	$S_{4-1}$	$S_{4-2}$	$S_{4-3}$	变异系数
$\delta_{as}$	19.50	19.98	19.46	1.20	30.63	28.79	29.84	2.20	18.13	16.94	19.75	6.30	10.00	11.95	10.78	7.35
$\delta_{rs}$	4.13	3.95	4.35	3.94	5.51	5.59	5.47	0.90	5.68	5.02	5.41	5.04	2.39	1.95	2.08	8.62

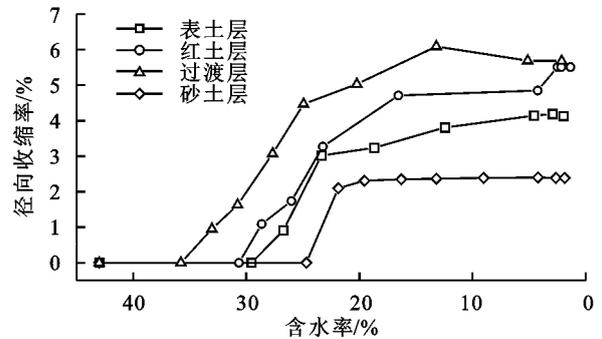
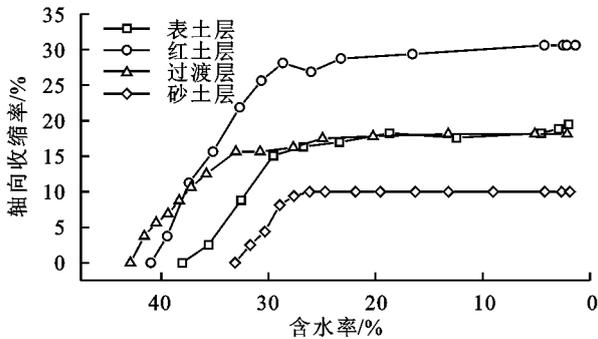


图 3 径向收缩率、轴向收缩率随含水率变化

运用 SPSS 软件对 4 层土( $S_{1-1}$ 、 $S_{2-1}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{4-1}$ )的基本物理性质、颗粒组成与土体径向收缩率、轴向收缩率进行相关分析(表 6、表 7)，液限、黏粒含量与土体径向收缩率呈显著正相关关系，砂粒含量与径向收缩率呈显著负相关关系，土体干密度与轴向收缩率

呈显著负相关关系。

黏粒含量、砂粒含量、液限对径向收缩的作用机理与对收缩开裂一致，而干密度越大，土体越紧实，脱湿过程中土壤颗粒在轴向上的位移受到限制，致使轴向收缩率越小。

表 6 径向收缩率与 4 层土的基本物理性质、颗粒组成相关分析统计

指标	干密度	毛管孔隙度	有机质含量	液限	塑限	塑性指数	高岭石含量	水云母含量	过渡矿物含量	黏粒含量	粉粒含量	砂粒含量
$P$	0.291	0.369	0.899	0.025	0.316	0.055	0.921	0.803	0.382	0.043	0.244	0.023
$r$	-0.709	-0.631	0.101	0.975*	-0.684	0.945	-0.079	-0.197	0.618	0.957*	-0.756	-0.977*

表 7 轴向收缩率与 4 层土的基本物理性质、颗粒组成相关分析统计

指标	干密度	毛管孔隙度	有机质含量	液限	塑限	塑性指数	高岭石含量	水云母含量	过渡矿物含量	黏粒含量	粉粒含量	砂粒含量
$P$	0.005	0.102	0.726	0.360	0.181	0.239	0.504	0.388	0.969	0.304	0.549	0.270
$r$	-0.995**	-0.898	0.274	0.640	-0.819	0.761	-0.496	-0.612	-0.031	0.696	-0.451	-0.730

### 2.3 干湿效应下土体的裂隙发育

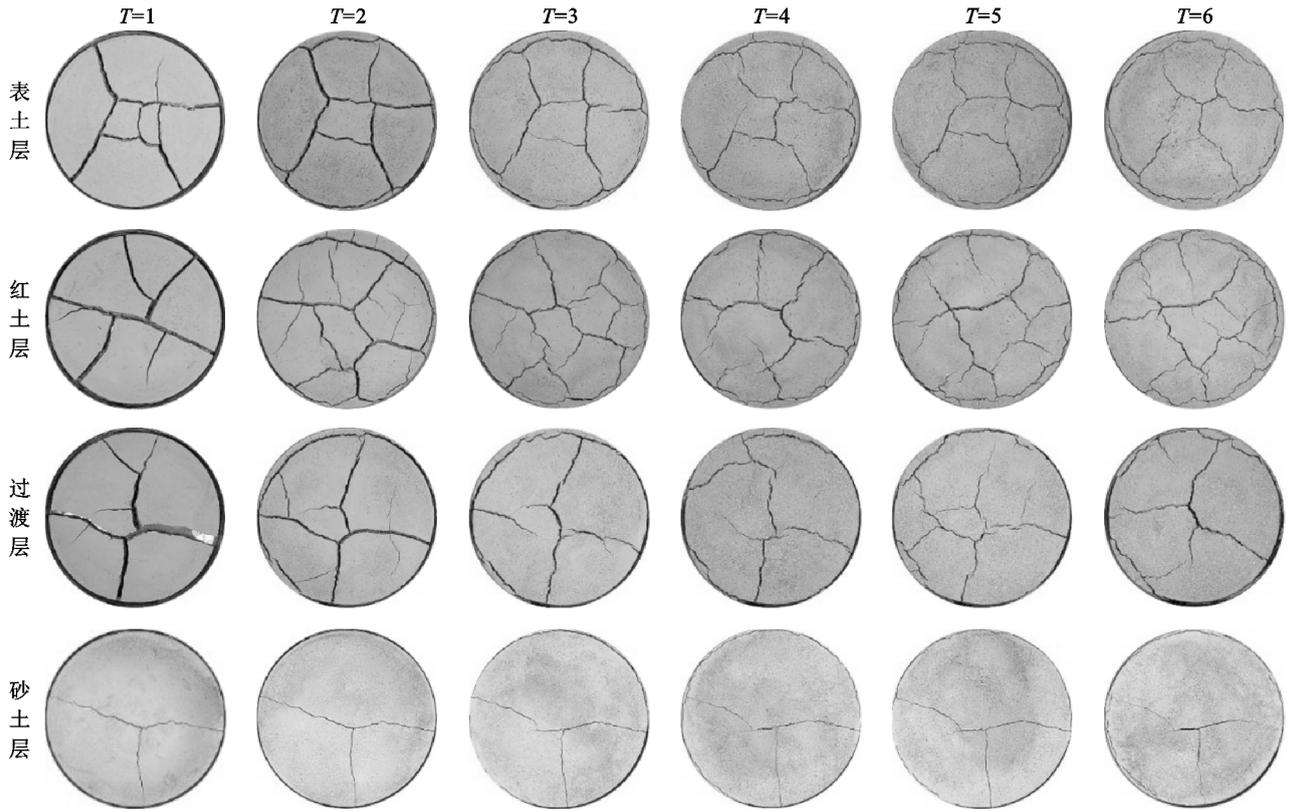
选取 4 层土代表试样  $S_{1-1}$ 、 $S_{2-1}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{4-1}$  进行干湿循环试验，对干湿循环过程中每次脱湿结束的干缩开裂图进行统计(图 4)，可以看出，随着干湿循环的进行，表土层、砂土层的裂隙骨架、裂隙形态基本未改变，而红土层、过渡层的裂隙形态趋于复杂化，在前 3 次循环中主裂隙骨架未改变，同时产生许多新生裂隙，在后 3 次干湿循环中，基本没有存在主裂隙，裂隙形态改变较严重，且 4 层土的裂隙宽度、径向收缩明

显减小。

对 4 层土的开裂含水率( $w_c$ )进行统计(表 8)。第 1 次脱湿中，4 层土的开裂含水率分别为 24.96%、26.15%、29.47%、22.36%。根据冯延云等<sup>[6]</sup>的研究，4 层土的抗拉强度为过渡层>红土层>表土层>砂土层，随着脱湿的进行，抗拉强度先逐渐增大后逐渐减小再趋于稳定，且表土层、红土层、过渡层在含水率为 24.40% 左右达到峰值，砂土层在 25.80% 左右达到峰值。将拉张力与抗拉强度结合分析，以过渡层为

例,可分为 5 个阶段:(1)含水率在 42.88%~29.47%,随着脱湿的进行,土体产生拉张力,抗拉强度也逐渐增大,但此时拉张力小于抗拉强度;(2)在含水率为 29.47%时,拉张力大于抗拉强度,裂隙产生;(3)含水率在 29.47%~24.40%,拉张力与抗拉强度仍在增加,拉张力大于抗拉强度,裂隙延伸、拓宽;(4)含水率在 24.40%~15.50%,拉张力增大,抗拉强度减小,裂隙拓宽、延伸;(5)含水率在 15.50%~2.26%,拉张力与抗拉强度趋于稳定,裂隙发育稳定。4 层土之间,

表土层、红土层、过渡层均在抗拉强度达到峰值之前裂隙就已产生,砂土层在抗拉强度达到峰值之后裂隙才产生,表明脱湿过程中表土层、红土层、过渡层拉张力的增大速度远大于砂土层。而表土层、红土层、过渡层中,抗拉强度、开裂含水率均为过渡层>红土层>表土层,过渡层抗拉强度最大,说明它需要产生更大的拉张力土体才能开裂,而过渡层的开裂含水率也最大,说明它的拉张力最早大于抗拉强度,也表明过渡层的拉张力增大速度最快。



注:  $T$  为干湿循环次数。

图 4 干湿循环效应下 4 层土的干缩开裂

随着干湿循环的进行,  $w_c$  逐渐减小在  $T=3$  后逐渐趋于稳定,这是因为第 1 次脱湿过程中裂隙周围土体结构已经被破坏,而增湿过程只是土体吸水膨胀,裂隙宽度逐渐缩小,当其减小至裂隙两边土体贴近时,造成肉眼所见的裂隙愈合,但其并不能恢复土壤颗粒之间的黏结作用<sup>[29]</sup>。所以再次进行脱湿时,下部土体水分沿着裂隙部分蒸发,使上下含水率梯度减小,开裂含水率也逐渐减小。但由于干湿循环作用的有限性,开裂含水率趋于稳定。4 层土之间由  $T=1$  至  $T=3$  开裂含水率的减少值分别为 1.30%, 1.70%, 2.01%, 0.40%,这与其裂隙开裂面积有关,过渡层收缩开裂面积最大,因此增湿后再进行脱湿时,其下部土体水分蒸发的途径更多一些,土体上下含水率更难形成大梯度差值,则其再次脱湿时所需的开裂含水率值相对更小,造成 4 层土中过渡层的开裂含水率减小值更大。

表 8 干湿循环效应下 4 层土的开裂含水率 ( $w_c$ )

土层	单位: %					
	$T=1$	$T=2$	$T=3$	$T=4$	$T=5$	$T=6$
表土层	24.96	24.08	23.66	22.96	22.46	22.03
红土层	26.15	25.45	24.46	24.56	24.98	24.45
过渡层	29.47	28.05	27.46	27.21	27.94	27.41
砂土层	22.36	22.12	21.96	21.56	21.46	21.81

### 2.4 干湿效应下的裂隙参数定量化分析

图 5(a)~图 5(f)为表面裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度、裂隙总条数、裂隙交点个数、被分割的土块个数随干湿循环的变化。表面裂隙率与裂隙平均宽度的变化趋势基本一致。随着干湿循环的进行逐渐减小,表土层在  $T=4$  后趋于稳定,红土层、过渡层、砂土层在  $T=3$  后趋于稳定,其中 4 层土由  $T=1$  至  $T=2$  表面裂隙率分别减小 4.60%, 8.75%, 9.35%, 1.01%, 平均宽度分别减小 0.1, 0.2, 0.2, 0.02

cm,各土层之间变化幅度均为过渡层>红土层>表土层>砂土层;由  $T=2$  至  $T=3$  表面裂隙率分别减小 2.42%,2.51%,2.20%,1.42%,平均宽度分别减小 0.04,0.03,0.02,0.04 cm,各土层之间减小幅度差别不明显。表明第 2 次干湿循环对土体的干缩开裂影响最大,且 4 层土之间受干湿循环的影响最大的是过渡层,砂土层最小。

每层土的裂隙总长度、裂隙条数、交点个数、土块个数变化趋势基本一致。表土层随着干湿循环的进行,各裂隙参数先缓慢增加,在  $T=3$  时达到最大值,后有轻微减小,并在  $T=4$  后趋于稳定,表明表土层

在前 3 次干湿循环的作用下,裂隙逐渐延伸、相交,并衍生新裂隙,在第 4 次干湿循环时某些部位裂隙愈合致使各参数减小。红土层与过渡层的变化一致,各裂隙参数先缓慢增加,在  $T=2$  时达到最大值,后大幅度减小,在  $T=3$  后趋于稳定。砂土层的各裂隙参数基本未发生改变,处于无波动状态。总结各土层均在  $T=3$  后趋于稳定,在  $T=3$  之前均有涨幅。根据冯延云等<sup>[5]</sup>的研究,因为随着干湿循环地进行,各土层抗拉强度逐渐衰减在  $T=3$  后趋于稳定,使脱湿过程中拉张力大于抗拉强度,裂隙更容易产生,裂隙总长度、裂隙条数、交点个数、土块个数均有涨幅。

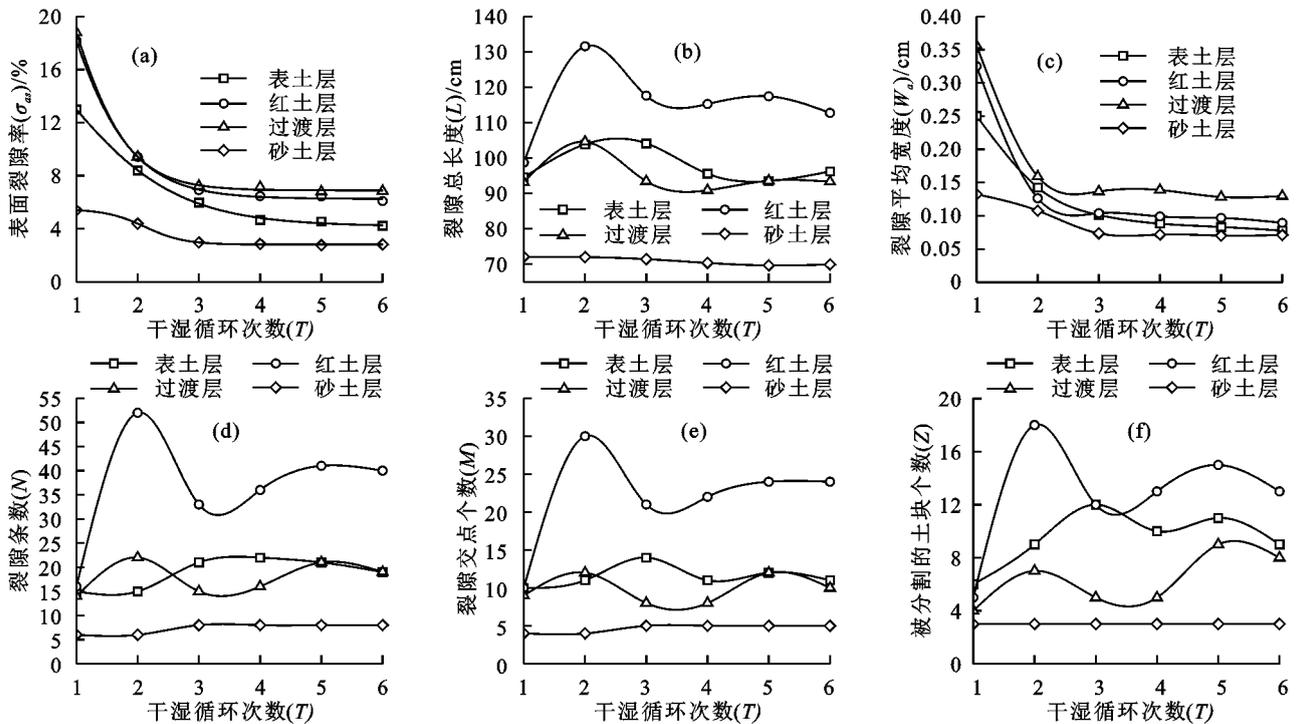


图 5 4 层土的裂隙参数随干湿循环的变化

## 2.5 干湿效应下的收缩参数量化分析

由图 2 可以看出,随着干湿循环的进行,其径向收缩现象已经不存在,土体边缘以由径向收缩转变为边缘裂隙。这可能是由于增湿过程中土块边缘土体在水的作用下崩解、堆积在径向收缩区域内,与土块分离,属于边缘闲散土壤颗粒,因此不对径向收缩率进行研究。在二维条件下,对土体表面裂隙率(图 5 (a))与轴向收缩率(图 6)进行对比分析。水平面上,表面裂隙率随干湿循环逐渐减小,在  $T=3$  时趋于稳定;垂直面上,轴向收缩率随干湿循环逐渐减小,在  $T=4$  时趋于稳定。由  $T=1$  进行到  $T=6$ ,4 层土的表面裂隙率减小量分别为 8.76%,12.46%,11.98%,2.63%,轴向收缩率减小量分别为 3.50%,9.71%,7.51%,3.01%,4 层土的表面裂隙率的变化量均大于其轴向收缩率的变化量,干湿循环对表面裂隙率的影响大于其轴向收缩。在 4 层土中,表面裂隙率的变化量为过渡层~红土层>表土层>砂土层,轴向收缩率的变化

量为红土层>过渡层>表土层>砂土层,这是因为表面裂隙率主要影响因素为黏粒含量,轴向收缩率的主要影响因素为土体的干密度。

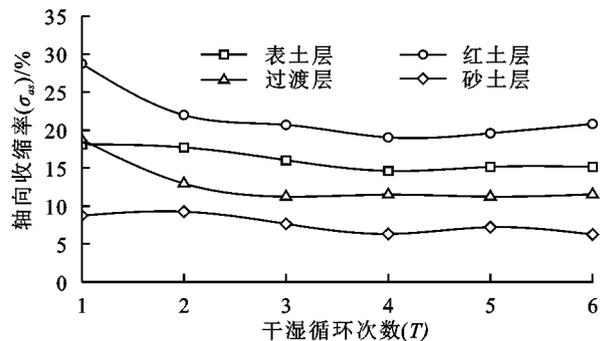


图 6 4 层土的轴向收缩率随干湿循环的变化

## 3 结论

(1)对于相同配置的土样,裂隙发育的随机性仅体现在发育部位上,其他裂隙参数、收缩参数仍具备相似性。单次脱湿条件下,4 层土裂隙发育程度为过

过渡层>红土层>表土层>砂土层,且过渡层表面裂隙率最大的主要贡献来源于裂隙平均宽度。

(2)随着干湿循环的进行,表土层、砂土层裂隙形态基本未改变,红土层、过渡层整体趋于复杂化。各土层的表面裂隙率、裂隙平均宽度逐渐减小,裂隙总长度、裂隙条数、交点个数、土块个数先增大后减小,各参数均在第 3 次干湿循环后趋于稳定。

(3)土体的收缩特性在干湿循环作用下是不可逆的。随干湿循环的进行,径向收缩现象逐渐消失,轴向收缩率逐渐减小,在第 4 次干湿循环后趋于稳定。其中干湿循环对水平面上表面裂隙率的影响大于其垂直面上的轴向收缩率。

(4)过渡层的径向收缩率为最大值 5.68%,红土层的轴向收缩率为最大值 30.63%,径向收缩率与液限、黏粒含量呈显著正相关关系,轴向收缩率与土体干密度呈显著负相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
- [2] 冯舒悦,王军光,文慧,等.赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究[J].土壤学报,2020,57(1):71-83.
- [3] 詹振芝,黄炎和,蒋芳市,等.砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):85-90,95.
- [4] 汪和青,刘伟平.崩岗区岩土固结特性试验研究[J].南昌大学学报(工科版),2016,38(1):28-31,78.
- [5] 冯延云,张晓明,丁树文,等.干湿循环作用下崩岗土体抗拉强度的衰减性分析[J].水土保持学报,2020,34(3):168-174.
- [6] 冯延云,张晓明,朱丽丽,等.初始含水率对崩岗土体抗拉特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):41-49.
- [7] 杨彩迪,牛玉华,张晓明,等.添加砾石对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响[J].农业工程学报,2020,36(24):118-124.
- [8] 卫杰,张晓明,张鹤,等.干湿循环对崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):107-111,118.
- [9] 张晓明,丁树文,蔡崇法,等.干湿效应下崩岗岩土不均匀沉降变形规律与崩壁崩塌机制[J].岩土力学,2013,34(增刊 2):299-305.
- [10] 刘昌鑫,潘健,邓羽松,等.干湿循环作用对崩岗土体稳定性的研究[J].水土保持学报,2016,30(6):253-258.
- [11] 魏玉杰,吴新亮,蔡崇法.崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J].农业机械学报,2015,46(6):153-159.
- [12] 范本贤,黄英,孙书君,等.云南红土的循环胀缩特性研究[J].水土保持学报,2018,32(2):120-127,133.
- [13] 唐朝生,施斌,崔玉军.土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J].岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423.
- [14] 易顺民,黎志恒,张延中.膨胀土裂隙结构的分形特征及意义[J].岩土工程学报,1999,21(3):294-298.
- [15] Corte A, Higashi A. Experimental research on desiccation cracks in soil. Research Report[A]. U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment[C]. Illinois, USA, 1960.
- [16] 王东伟,唐朝生,李胜杰,等.膨胀土干缩变形特性试验研究[J].高校地质学报,2019,25(5):756-765.
- [17] Albrecht B A, Benson C H. Effect of desiccation on compacted natural clays[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,1271:67-75.
- [18] Omid G H, Thomas J C, Brown K M. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner[J].Water, Soil and Soil Pollution, 1996,89:91-103.
- [19] 唐朝生,崔玉军,施斌,等.膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J].岩土工程学报,2012,34(12):2181-2187.
- [20] Rodriguez R, Sanchez M, Ledesma A, et al. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste [J].Canadian Geotechnical Journal,2007,44:644-658.
- [21] 曾浩,唐朝生,刘昌黎,等.控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应[J].岩土工程学报,2019,41(3):544-553.
- [22] 袁权,谢锦宇,任柯.边界约束对膨胀土干缩开裂的影响[J].工程地质学报,2016,24(4):604-609.
- [23] Nahlawi H, Kodikara J K. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layer[J].Geotechnical and Geological Engineering,2006,24:1641-1664.
- [24] 骆赵刚,汪时机,杨振北,等.膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(10):1922-1930.
- [25] Prat P C, Ledesma A, Lakshmikantha M R. Size effect in the cracking of drying soil[A]. In Proceedings of the 16<sup>th</sup> European Conference of Fracture [C]. Springer,2006.
- [26] 李文杰,张展羽,王策,等.干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J].农业工程学报,2015,31(8):126-132.
- [27] 叶万军,万强,申艳军,等.干湿循环作用下膨胀土开裂和收缩特性试验研究[J].西安科技大学学报,2016,36(4):541-547.
- [28] 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.
- [29] 曹玲,王志俭,张振华.降雨一蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):413-421.