

干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响

王佳妮¹, 马 戎^{1,2}, 张晓明¹

(1.华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 渗透是崩壁降雨重分布的关键且直接影响其重力侵蚀过程。试验设计 6 次干湿循环,通过进行崩壁 4 层土壤的饱和和渗透试验并结合数字图像处理技术,研究了干湿循环效应下崩壁 4 层土的裂隙演化规律及其对土层饱和和渗透性能的影响。结果表明:(1)随干湿循环次数的增加,表土层和红土层裂隙发育明显,裂隙率逐渐增加后趋于稳定,过渡层和砂土层几乎没有产生裂隙;表土层在第 3 次循环后裂隙几乎发育完全,裂隙率达到 3.50%,形态纤细且破碎,而红土层在第 1 次循环后裂隙骨架基本定型,随着干湿循环的进行,裂隙宽度不断增大至一定程度时不再发生变化;(2)4 层土壤渗透系数大小为砂土层>过渡层>红土层>表土层,表土层和红土层渗透系数随干湿循环的进行逐渐增加后趋于稳定,过渡层一直比较稳定,砂土层逐渐减小后趋于稳定;(3)土壤裂隙率与渗透系数之间存在二次函数关系,裂隙发育对土壤渗透性能的影响先增大后减小。研究结果可为降雨入渗—重分布下崩壁失稳机理研究提供科学依据。

关键词: 崩岗; 干湿循环; 饱和和渗透系数; 裂隙

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0090-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.013

Effect of Fissure Development of Collapsed Soils on Their Permeability Under Dry-wet Cycle

WANG Jiani¹, MA Xu^{1,2}, ZHANG Xiaoming¹

(1.School of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Infiltration is critical to the redistribution of rainfall in a collapsed wall and directly affects its gravity erosion process. In this study, the experiment designed six dry-wet cycles, and through saturated infiltration experiments of four layers of soil fissures and digital image processing technology, the evolution of four layers of soil fissures under the effect of dry-wet cycles and its influence on saturated soil permeability of each soil layer were studied. The results showed that: (1) With the increasing of the wet and dry cycles, the fissures in the topsoil layer and the laterite layer developed obviously, the fissure rate gradually increased and then tended to be stable, while the transition layer and sand layer had almost no fissures. The fissures of the topsoil were almost completely developed after the third cycle, and the fissure rate reached 3.50%. The fissures were slender and broken. However, for the laterite, after the first cycle, the fissures were basically fully fixed, the fracture width would remain unchanged when it increased to a certain extent with the progress of the dry-wet cycle. (2) The soil permeability coefficient of the four layers followed the order of sandy soil layer > transition layer > laterite layer > topsoil layer. With the increasing of the number of wet and dry cycles, the permeability coefficients of the topsoil layer and the laterite layer gradually increased and then tended to be stable, the transition layer was relatively stable, and the sand layer gradually decreased and then tended to be stable. (3) There was a quadratic function relationship between the soil fissure rate and the permeability coefficient. The impact of fissure development on soil permeability increased first and then decreased. The results could provide a scientific basis for the study of the mechanism of wall collapse instability under rainfall infiltration and redistribution.

Keywords: Benggang; dry-wet cycle; permeability coefficient; fissures

收稿日期:2020-07-23

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)

第一作者:王佳妮(1997—),女,山西运城人,硕士研究生,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

崩壁崩塌是崩岗形成的最关键过程,而裂隙的发育影响崩壁土体的入渗特性,从而对崩壁崩塌产生作用。因此,研究裂隙与入渗的关系,对于揭示崩壁崩塌机理具有一定意义。国内外学者针对膨胀土的裂隙发育、土体开裂对其渗透性能的影响进行了大量的干湿循环试验。已有研究^[1-3]基于土水相互作用和土力学对南京地区下蜀裂隙的发育机理进行了解释;也有研究^[4-5]表明,干燥过程中土体内部产生的裂隙对其导水率具有控制作用;李雄威^[6]研究表明,广西南宁膨胀土的裂隙率与其初始渗透系数之间呈现良好的相关性;鄢卫平^[7]研究表明,南宁外环膨胀土的饱和渗透系数随表面裂隙率的增加而增加,两者之间具有良好的对数关系;Boyntjon 等^[8]研究表明,土体的渗透系数随裂隙的产生成倍的提升;Albrechtd 等^[9]研究表明,干湿循环次数对膨胀土渗透系数产生影响的原因在于脱湿过程中土体内部裂隙的产生;张锐等^[10]对合肥膨胀土进行研究发现,影响渗透性性能的关键因素在于贯穿裂隙的形成;张家俊等^[11]对南阳膨胀土进行渗透试验发现,贯通裂隙的长度是影响渗透性能的主要因素;已有研究^[12-13]采用有限元数值模拟方法进行分析发现,随裂隙深度的加深,裂隙对入渗的影响逐渐增大。国内外学者对裂隙发育与土体渗透性能之间关系的研究大多集中于膨胀土,而由于崩壁 4 层土壤的岩土特性差异明显,致使在降雨—蒸发的反复过程中各层次的裂隙发育及渗透特性也具有明显的分层,因此对崩壁 4 层土体进行研究具有一定的必要性。国内学者针对崩壁 4 层土体的水分

表 1 崩岗不同层次土壤的基本性质

土壤 层次	含水率/%	容重/ (g·cm ⁻¹)	黏粒含量 (<0.002 mm)/%	粉粒含量 (0.002~0.05 mm)/%	砂粒含量 (0.05~2.00 mm)/%	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)
表土层	20.16±1.97a	1.37±0.05a	38.18±1.04c	29.53±0.91b	32.28±0.92b	16.95
红土层	24.25±0.42b	1.36±0.03a	45.57±1.31d	31.12±1.02b	23.31±0.93a	11.63
过渡层	27.57±0.19c	1.39±0.01ab	34.81±0.95b	24.17±0.98a	41.02±1.01c	7.28
砂土层	26.06±0.69bc	1.44±0.03b	22.89±0.83a	33.48±1.01c	42.46±0.89c	5.49

注:表中数据为平均值±标准差;数据采用 Duncan 检验,同列不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$)。

1.2 试验方法

1.2.1 干湿循环试验 本次试验采用低温(70℃)烘干法^[11]模拟脱湿过程,烘干时间约为 8 h,并分别于 2,5,8 h 时定点拍照。脱湿后进行饱和过程,表土层和红土层黏性土壤采用真空抽气饱和法,过渡层和砂土层砂性土壤采用沙盘浸水饱和法。以上 2 个步骤为 1 次干湿循环,共完成 6 次干湿循环。对每次饱和后的土样进行饱和和渗透试验。

1.2.2 饱和渗透试验 采用《土工试验方法标准 GB/T 50123—2019》^[17]中提供的饱和渗透试验方法,对于表土层和红土层黏性土层进行变水头渗透试

验,对于过渡层和砂土层砂性土层进行常水头渗透试验。具体操作步骤为:

验,对于过渡层和砂土层砂性土层进行常水头渗透试验。具体操作步骤为:

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验在湖北省通城县五里镇的典型崩岗进行采样,采样区为红棕壤,植被覆盖度为 35%左右,土壤结构松散。将崩壁剖面自上而下划分为 4 个层次:表土层、红土层、过渡层和砂土层,在每层土壤的中部采集代表性土壤约 5 kg 左右放入自封袋带回实验室,各层次土壤的基本性质见表 1,基本性质的测量试验均进行 3 次重复。将采集回来的土样风干碾碎过 2 mm 筛后混合均匀,制样干密度和含水率控制为 1.35 g/cm³ 和 20%,采用分层击实法制成直径 6.18 cm,高 4.0 cm 的重塑土样。

验,对于过渡层和砂土层砂性土层进行常水头渗透试验。具体操作步骤为:

(1)变水头渗透试验。在容器套筒内壁涂抹 1 层薄凡士林,将环刀试样推入套筒;拧紧带有透水板的上下盖螺丝,连通渗透容器和水头装置,排除气泡;在水头作用下静置一段时间,待出水口溢出水时开始测定;当水头管水位充水至需要高度时,关止水夹,记起始水头 h_1 ,开始计时,经过时间 t 后,记终止水头 h_2 ;再将水头水位升至所需高度,重复以上操作 6 次,试验终止。同时测量试验开始时和结束时的水温,取平均值。渗透系数计算公式为:

$$K_T=2.3\frac{aL}{At}\log\frac{h_1}{h_2}\tag{1}$$

式中: K_T 为水温 $T\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样的渗透系数(cm/s); a 为变水头管截面积(cm); L 为渗径(cm); A 为试样的截面积(cm^2); t 为时间(s); h_1 为开始时水头高度(cm); h_2 为终止时水头高度(cm)。

(2)变水头渗透试验。在容器套筒内壁涂抹1层凡士林,将环刀试样推入套筒;连通渗透仪器和水头装置,当水位缓缓上升至溢水孔,关止水夹;降低调节管口,使位于水样上部1/3处,造成水位差;开始计时,用量筒接取经一定时间的渗透水量,重复1次;测量进水与出水处的水温,取平均值;再降低调节管口至试样中部及下部1/3处,重复以上操作进行测定。渗透系数计算公式为:

$$K_T=\frac{QL}{AHt}\tag{2}$$

式中: K_T 为水温 $T\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样的渗透系数(cm/s); Q 为时间 $t\text{ s}$ 内的渗透量(cm^3); L 为渗径(cm); A 为试样的截面积(cm^2); H 为水头高度(cm); t 为时间(s)。

(3)温度校正:计算标准温度下的渗透系数公式为:

$$K_{20}=K_T\frac{\eta_T}{\eta_{20}}\tag{3}$$

式中: K_{20} 为水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样的渗透系数(cm/s); η_T 为 $T\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水的动力黏滞系数($10^{-6}\text{ kPa}\cdot\text{s}$); η_{20} 为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水的动力黏滞系数($10^{-6}\text{ kPa}\cdot\text{s}$)。其中 η_T/η_{20} 与温度的关系见图1。

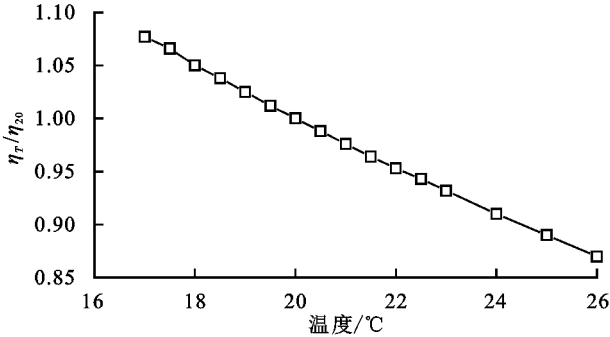


图 1 不同温度下 η_T/η_{20} 的变化趋势

1.2.3 ImageJ 图像处理 采用 ImageJ 进行裂隙率的测定。具体步骤为:打开需要分析的照片,先进行灰度转换,选择恰当的阈值进行二值化,然后对图片进行去噪处理,最后进行颗粒分析,得到土样的裂隙率。

2 结果与分析

2.1 干湿循环下土体的裂隙发育

使用工业相机对裂隙照片进行定时定点拍照,并采用 ImageJ 进行裂隙率变化情况分析。由图2可知,从整体来看,表土层、红土层、过渡层、砂土层的裂隙率最大值分别为4.20%,3.02%,0.42%,0.33%,表土层和红土层裂隙发育更为明显,而过渡层和砂土层几乎没有产生裂隙或肉眼难以分辨。这是因为表土层与红土层的黏粒含量高达38.2%与45.6%左右,黏粒粒径较小,能够有效填充土粒之间的间隙,干燥过程中土体上部水分蒸发,而下部水分难以向上进行填充,造成上下含水率梯度较大,土样上部受拉应力作用,下部受重力压力作用,当拉应力大于自身的抗拉强度时裂隙产生。

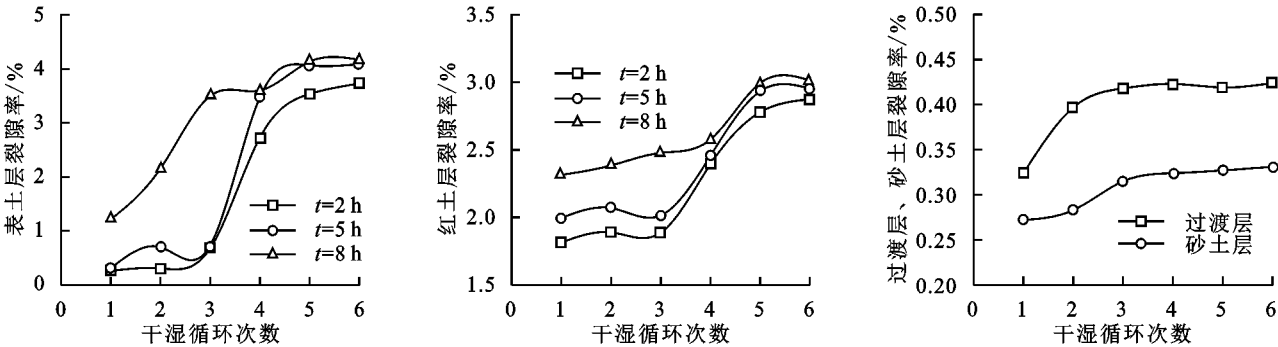
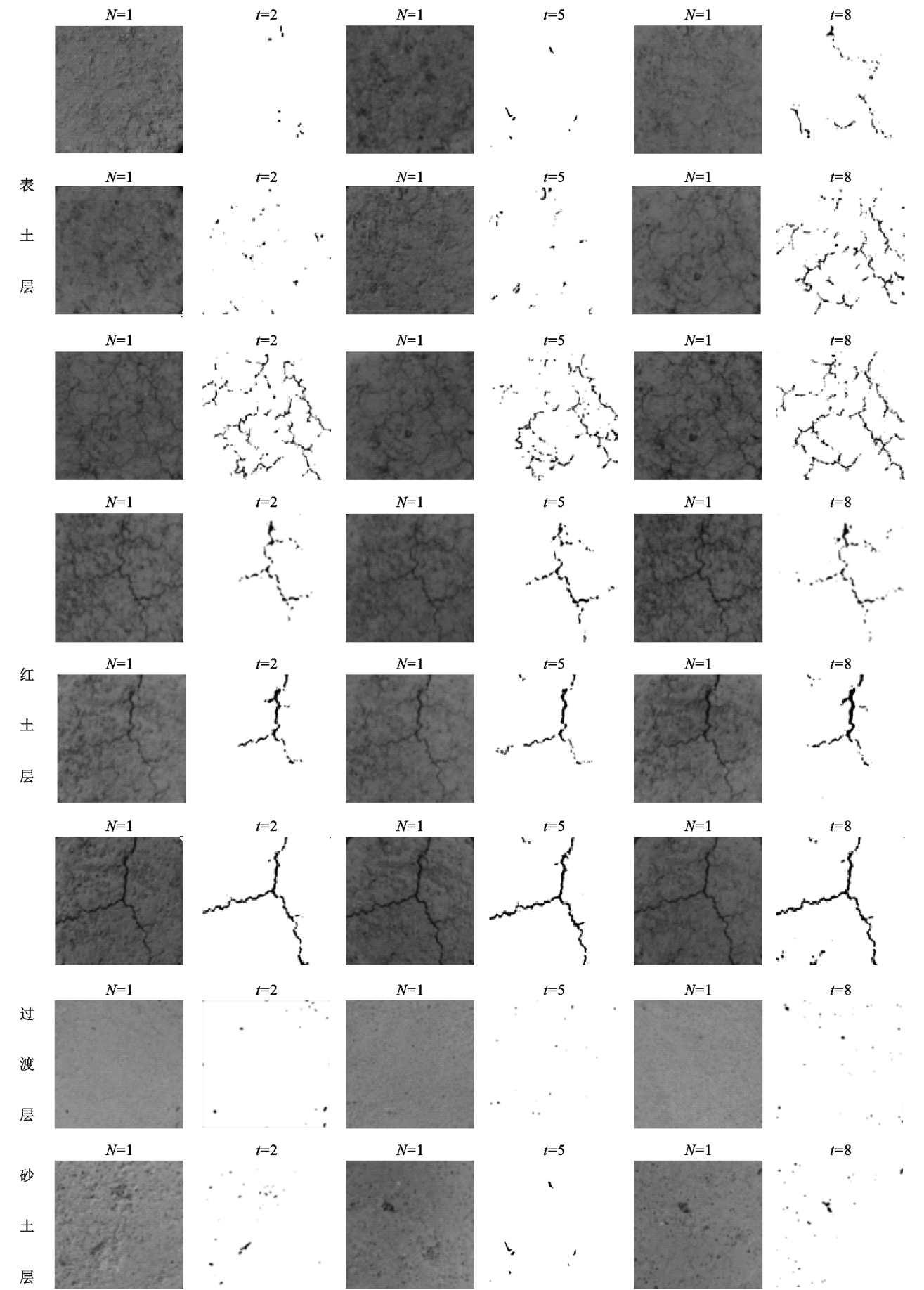


图 2 裂隙率随干湿循环的变化曲线

随着干湿循环的进行,4层土裂隙率的变化趋势相同,均为先增加后逐渐趋于稳定,但表土层的波动幅度明显大于红土层,过渡层和砂土层的波动幅度不明显。红土层在第1次干湿循环后,裂隙率达到2.32%,占完整裂隙发育的76.78%,说明此时裂隙已基本发育完全,从图3可以看出,红土层的裂隙发育简单,在第1次循环后裂隙骨架已基本固定,之后裂隙率增大的原因在于裂隙长度和宽度的扩张。而表土层在第3次干湿循环后,裂隙率达到3.50%此时裂

隙才基本发育完全,裂隙形态纤细且分布紧密复杂,之后裂隙率的增大主要体现在细微裂隙的产生上,而张家俊等^[11]在对南阳膨胀土进行干湿循环时发现,裂隙的发育主要体现在裂隙总面积和裂隙长度的增加上,裂隙率增大的原因不同可能是因为土质不同,膨胀土与崩岗表土层的颗粒组成、矿物组成有区别^[18]。后几次的干湿循环对裂隙的发育没有产生很大的影响,可见干湿循环的作用有限,当到达一定数值时,裂隙便不再发育。



注： N 为干湿循环次数（次）； t 为烘干时间（h）。

图 3 干湿循环下的裂隙发育动态过程

在单次脱湿过程中,随着烘干的进行,4 层土裂隙率均呈现增大的趋势,但每次烘干过程中表土层的裂隙率变化幅度仍大于红土层,且表土层在第 3 次干湿循环的第 5~8 h 内裂隙快速发育,而红土层在第 1 次干湿循环的第 1 h 内裂隙骨架已基本定形。这是因为自然条件下,降雨、径流等过程把表土层的黏性颗粒带到红土层累积起来,同时表土层风化程度强,且容易受到外界条件(温度、生物等)影响,导致表土层黏粒含量低且分布不均匀,黏粒含量较低及颗粒分布的不均匀,也会影响其烘干过程中土体上下含水率梯度的变化,进而影响裂隙发育的速度。

可以看出,不论是表土层还是红土层,当裂隙发育后,再次进行饱和烘干时,裂隙的开裂仍然发生在原有裂隙的基础上,且开裂迅速。这说明裂隙产生后重新饱和,肉眼可见的裂隙愈合并不等同于土壤结构恢复完全,因为裂隙的产生破坏了土体的抗拉强度及裂隙两边土壤颗粒的联接强度,因此再次进行烘干时,此处为薄弱区,首先开裂,所对应的烘干时间也大大缩短。

2.2 干湿循环下土体的渗透性能变化

土壤渗透性能的强弱对崩岗发育具有直接的影

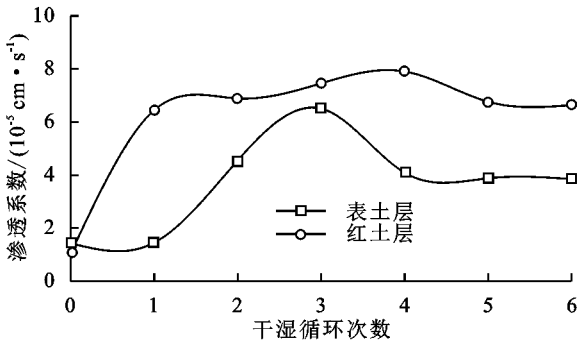
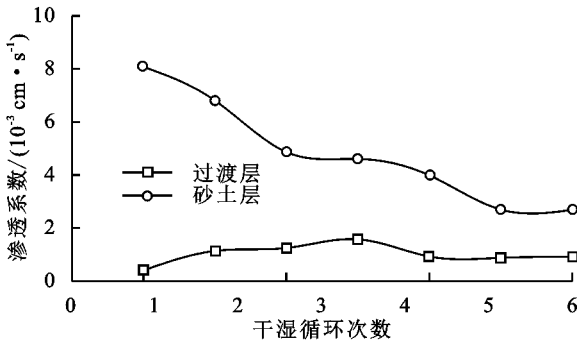


图 4 干湿循环下的渗透系数变化曲线

随着干湿循环的进行,表土层和红土层渗透系数的变化规律与其裂隙率变化相似,先增加后逐渐趋于稳定,在第 3 次循环后,表土层渗透系数达到最大值 6.51×10^{-5} cm/s,其裂隙也在第 3 次循环时快速发育;在第 4 次循环后,红土层渗透系数达到最大值 7.91×10^{-5} cm/s,其裂隙也基本发育完全,可见裂隙的发育与土体的渗透性能之间存在一定的关系,每次饱和后的渗透系数增大也证实了前面的饱和过程中裂隙愈合并不意味着裂隙消失^[19];而表土层在第 4 次循环时,渗透系数从 6.51×10^{-5} cm/s 下降至 4.09×10^{-5} cm/s,红土层在第 5 次循环时,渗透系数从 7.91×10^{-5} cm/s 下降至 6.77×10^{-5} cm/s,因为前几次的干湿循环作用,对土体的破坏造成了累积效应,土壤颗粒之间的联接能力减弱,团聚体等大颗粒被分解为小颗粒,在进行饱和时填充进入裂隙,阻塞了水分下渗,从而降低了裂隙对于

响。由于各层次土壤的团聚状况、有机质含量、土体结构等因素不同,致使其渗透性能也呈现分层现象,且干湿循环过程中产生的裂隙也会对土体的渗透系数产生一定的影响。

从图 4 可以看出,过渡层、砂土层的渗透系数比表土层、红土层大 2 个数量级,原因在于过渡层与砂土层土壤质地疏松,砂粒含量达到 41.02% 与 42.46%,孔隙大,在土层中可形成许多大大小小的孔道,给水分入渗提供优先通道,进而导致渗透时间缩短,提高了渗透速率,这也证实了武敏等^[20]的研究结论,在其他条件相同时,水分入渗过程中最先达到稳定状态的是粉砂质土壤,其次是壤质土壤,最后是黏质土壤。表土层的初始渗透系数大于红土层,因为红土层结构紧实,黏粒含量大,对水分的下渗产生阻碍作用。4 层土壤渗透系数之间的较大差异使其红土层与过渡层之间产生弱透水层,增加崩壁的不稳定性,造成崩岗的发育。而林敬兰等^[15]对福建崩岗土进行双环渗透试验发现,红土层的渗透性能优于砂土层和碎屑层,可能是因为土体团聚体的含量、有机质含量不同等,后续可将两地的渗透性能差异进行下一步对比研究。



渗透性能的影响,使渗透系数下降。
红土层渗透系数最大值大于表土层,红土层初始渗透系数却小于表土层,红土层裂隙率小于表土层,但红土层的裂隙宽度及裂隙长度大于表土层,说明裂隙参数中长度和宽度对渗透系数的影响更大。然而,干湿循环的作用有限,渗透系数随干湿循环次数的增加而增加的幅度和程度都有一定的尺度,这与裂隙发育规律相同。

在很短的时间内过渡层、砂土层的渗透系数达到稳定。过渡层从初始渗透系数 0.41×10^{-3} cm/s 增大到 1.14×10^{-3} cm/s 后均在 1.00×10^{-3} cm/s 上下波动,说明烘干时即使肉眼看不到裂隙,其土体内部也可能产生细微裂隙,影响其渗透性能;砂土层从初始饱和渗透系数 8.08×10^{-3} cm/s 开始逐渐减小,直至第 5 次循环时开始趋于稳定,表明干湿循环作用破坏

了砂土层的透水性能,造成其渗透系数降低。

2.3 裂隙发育对渗透性能的影响

从裂隙发育、渗透性能分析过程中,可以看出两者之间存在一定的关系,由于本次试验过渡层与砂土层的裂隙发育不明显,因此未对其裂隙发育与渗透性能之间的关系进行分析,但是室外崩岗实际上过渡层与砂土层也会有明显的裂隙发育,室内试验存在制样不均匀以及增湿脱湿过程中周围环境的影响,致使本次试验这 2 层土裂隙发育不明显。在以后的研究中可以再次针对性地对这 2 层土进行研究。对表土层和红土层的裂隙率与渗透系数之间进行拟合,结果见图 5。可以看出,裂隙率与渗透系数之间存在明显的二次函数关系,且拟合度较高。具体表达式为:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

式中: y 为试样的渗透系数; x 为试样的表面裂隙率; a 、 b 、 c 为拟合参数。

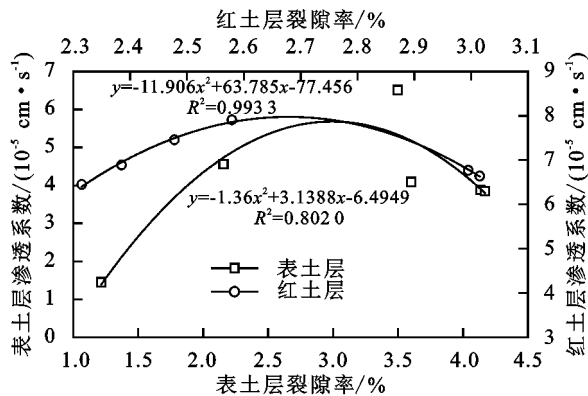


图 5 表土层、红土层土壤裂隙率与渗透系数的关系曲线

由图 5 可知,裂隙率可以较好地表征土壤的渗透性能。在前几次干湿循环过程中,裂隙率对其渗透性能的影响较大,渗透系数随着裂隙的发育而逐渐增大,而当干湿循环进行到一定程度后,裂隙不再发育,渗透系数变化幅度逐渐减小,裂隙率对土壤渗透性能的影响变小,土壤渗透性能受其他因素的影响变大,比如土壤的孔隙度、土壤质地、团聚体含量等^[21]。裂隙发育对渗透性能的影响先增大后减小,中间存在 1 个临界值,后续有必要对此临界值进行进一步的研究。

3 结论

(1)4 层土烘干后的裂隙率最大值关系为表土层>红土层>过渡层>砂土层。表土层在第 3 次干湿循环时裂隙迅速发育后逐渐趋于稳定,裂隙形态纤细破碎;红土层在第 1 次干湿循环后时裂隙骨架基本定型,随着干湿循环的进行,裂隙不断扩张和加深。但到一定程度后,干湿循环对裂隙发育不再有影响,裂隙发育停止。

(2)砂土层和过渡层的饱和渗透系数比红土层和表土层大 2 个数量级,造成弱透水层的形成加速崩岗

的发育。表土层、红土层渗透系数的变化规律与裂隙率整体上呈现相似性,随着干湿循环的进行,先逐渐增大后趋于稳定;但渗透系数在达到峰值后会有稍有减小后趋于稳定,主要是因为土体的破坏造成孔隙阻塞从而影响其渗透性能。砂土层渗透系数逐渐减小表明干湿循环作用破坏其透水性能。

(3)在干湿循环作用下,土壤的裂隙率与其渗透系数之间存在二次函数关系: $y = ax^2 + bx + c$,且裂隙参数中长度和宽度对渗透系数的影响更大。

参考文献:

- [1] 唐朝生,施斌,刘春.膨胀土收缩开裂特性研究[J].工程地质学报,2012,20(5):663-673.
- [2] 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.
- [3] Tang C S, Shi B, Cui Y J, et al. Experimental evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils [J].Engineering Geology,2010,1014(3/4):261-266.
- [4] Konrad J. Embankment stability on anisotropic soft clays [J]. Canadian Geotechnical Journal,1979,16:295-308.
- [5] Konrad J M, Ayad R. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation [J].Canadian Geotechnical Journal,1997,34(4):477-488.
- [6] 李雄威.膨胀土湿热耦合性状与路堑边坡防护机理研究[D].武汉:武汉岩土力学研究所,2008.
- [7] 鄢卫平.湿干循环下膨胀土开裂与渗透性能试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
- [8] Boyntjon S S, Daniel D E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay [J].Journal of Geotechnical Engineering,1958,114(4):465-478.
- [9] Albrecht B A, Benson C H. Effect of desiccation on compacted natural clays [J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,1271:67-75.
- [10] 张锐,黄明.干湿循环对合肥地区膨胀土渗透特性的影响[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2014,22(3):43-46.
- [11] 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.
- [12] 袁俊平.非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D].南京:河海大学,2003.
- [13] 袁俊平,殷宗泽.考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J].岩土力学,2004,25(10):1581-1585.
- [14] 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.
- [15] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等.崩岗土体的渗透性能机理研究[J].水土保持学报,2013,27(2):53-26.

- [9] 王洪德,徐小明,余冬立.砾石覆盖对海涂围垦区粉砂土坡面土壤可蚀性影响试验研究[J].排灌机械工程学报,2019,37(6):498-503.
- [10] Kouselou M, Hashemi S, Eskandari I, et al. Quantifying soil displacement and tillage erosion rate by different tillage systems in dryland northwestern Iran[J]. Soil Use and Management,2018,34(1):48-59.
- [11] Zhao X N, Wu P T, Chen X L, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China [J].Soil Research,2013,51(1):50-58.
- [12] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.
- [13] 蔡强国,朱远达,王石英.几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J].水科学进展,2004,15(1):12-18.
- [14] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J].土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [15] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.
- [16] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J].Soil and Tillage Research,2016,155:429-436.
- [17] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- [18] 郑良勇,李占斌,李鹏,等.稀土元素示踪坡面次降雨条件的侵蚀过程[J],农业工程学报,2010,26(3):87-91.
- [19] 章文波,谢云,刘宝元.降雨侵蚀力研究进展[J].水土保持学报,2002,16(5):43-46.
- [20] 刘金涛,李晓鹏,陈喜,等.间歇降雨中土壤含水量分布及其对入渗的影响[J].水土保持学报,2009,23(5):96-100.
- [21] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
- [22] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征[J].中国农业科学,2009,42(4):1299-1305.
- [23] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.
- [24] 王辉,平李娜,潘景副,等.溶质施放部位对红壤坡面溶质迁移特征的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):7-11.
- [25] Zhang Y, Zhao D F, Lin J S, et al. Impacts of collapsing gullies on the dynamics of soil organic carbon in the red soil hilly region of southeast China [J].Catena, 2020,190:104547.
- [26] Zhao Q H, Li D Q, Mu N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope [J].Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2015,229(2):609-621.
- [27] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [28] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [29] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.
- [30] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].水土保持学报,2018,32(3):10-15.
- [31] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.
- [32] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究,2009,16(4):52-54,59.
- [33] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [34] 金鑫,谢斯琴,宋颖,等.人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程[J].水土保持学报,2017,31(5):19-24.

(上接第 95 页)

- [16] 张燕,黄炎和,林金石,等.崩岗不同土层渗透差异及其影响因素研究[J].水土保持研究,2014,21(3):37-40.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [18] Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology,2018,101(3/4):204-217.
- [19] 曹玲,王志俭,张振华,等.降雨—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.
- [20] 武敏,范昊明,刘爽,等.SAR,EC 与水温对辽西褐土入渗速率的影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):276-279.
- [21] 崔颖,缪林昌.非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(7):2007-2012.