

干湿循环作用下崩岗土体抗拉强度的衰减性分析

冯延云, 张晓明, 丁树文, 李柏润

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 针对干湿循环影响下崩岗土体崩壁出现失稳等问题, 通过开展室内单轴抗拉试验, 研究了湖北通城地区不同干湿循环作用下崩岗土体抗拉强度的变化规律。结果表明: 崩岗土体的抗拉强度随着干湿循环次数的增加逐渐衰减, 最后逐渐趋于稳定, 且不同层次土壤的抗拉强度衰减主要集中在前3个干湿循环周期, 表土层、红土层、过渡层和砂土层抗拉强度衰减比例分别达到90%, 82%, 83%, 90%, 且不同层次土壤的抗拉强度总体表现为过渡层>红土层>表土层>砂土层。并通过考虑崩岗不同层次土体深度和干湿循环次数的共同影响, 建立了抗拉强度衰减预估模型, 且抗拉强度模型预测值与实测值有较高的相关关系($R^2=0.97$), 该模型对研究崩岗不同层次土体抗拉强度衰减机制具有指导意义。

关键词: 干湿循环; 抗拉强度; 崩岗; 衰减模型

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0168-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.026

Analysis of Attenuation of Tensile Strength of Collapsing Soil Under the Action of Dry and Wet Cycles

FENG Yanyun, ZHANG Xiaoming, DING Shuwen, LI Bairun

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

Abstract: Aiming at the instability of the collapsing gully wall under the influence of dry-wet cycling, we studied the change rule of the tensile strength of the collapsing soil under the different dry and wet cycles in Tongcheng area of Hubei Province through the indoor uniaxial tensile test. The results showed that the tensile strength of the collapsing soil gradually decreased with the increasing of the number of dry-wet cycles, and finally tended to be stable, and the attenuation of tensile strength of different layers of soil mainly concentrated on the first three dry-wet cycles. The attenuation ratio of tensile strength of topsoil, laterite, transition layer and sandy soil layer reached 90%, 82%, 83% and 90%, respectively, and the tensile strength of different layers of soil followed the order of transition layer > laterite layer > topsoil layer > sandy layer. By considering the influence of the depth of different layers and the number of dry-wet cycles, the prediction model of tensile strength attenuation was established, and the prediction value of tensile strength model had a high correlation with the measured value ($R^2=0.97$). The model had guiding significance for the study of the attenuation mechanism of tensile strength of different layers of soil.

Keywords: wet-dry cycle; tensile strength; collapse; attenuation model

由于土壤长期暴露在外界自然环境中, 总是遭受着各种风化作用, 干湿循环作为风化过程的一部分, 对土壤的性质起着至关重要的作用^[1-2]。水分条件的周期性变化(如雨水、霜、水气运动、地下水升降变化等), 是导致许多水土保持工程措施(如斜坡防护工程、鱼鳞坑、淤地坝等其他水土保持工程)在施工或生产运行期间可能受到破坏影响的一个重要因素。同时干湿循环变化也会导致土壤或者岩石发生变质, 导

致众多自然灾害发生, 例如山体滑坡、土体塌陷、工程地基变形等^[3-6]。因此干湿循环作用对土壤力学性质的影响越来越被人们所关注。

崩岗是中国南方花岗岩地区的一种特殊的水土流失现象, 指山岗的坡面从山脚到山顶发生严重崩塌的一种土壤侵蚀作用, 侵蚀危害仅次于滑坡和泥石流灾害^[7]。崩岗土壤长期在降雨和蒸发的作用下处于饱和与非饱和的交替变动状态, 其物理力学性质是一

收稿日期: 2019-11-17

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: 冯延云(1994—), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事崩岗土体稳定性研究。E-mail: fengyanyun9965@163.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

个动态的变化过程。近年来,岩土与崩岗侵蚀研究人员关于干湿循环效应下崩岗土体特性也做了很多的研究。结果表明,崩岗土体经过多次干湿循环作用后,总体表现出强度降低和变形增大的特点。如张晓明等^[8]对干湿效应下崩岗岩土抗剪强度的衰减分析研究中指出,抗剪强度指标随干湿效应变化呈非线性衰减,强度峰值以前符合线性递增规律,而在峰值以后符合一阶指数衰减规律;刘昌鑫等^[9]在干湿循环对崩岗土体稳定性的影响的研究中指出,随着干湿循环次数的增加,土体的抗剪强度不断衰减,裂隙发育,各层次土体崩解性不断增强;卫杰等^[10]对干湿循环下崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的研究中指出,随着干湿循环次数增加,崩岗土壤无侧限抗压强度呈减少趋势,且衰减幅度逐渐减少,最后逐渐保持不变;魏玉杰等^[11]研究崩岗体剖面土壤的收缩特性认为,崩岗体剖面土壤收缩过程受土壤质地和土壤基质吸力共同影响;张晓明等^[12]在研究干湿效应下崩岗岩土不均匀沉降变形规律中指出,干湿效应造成崩岗岩土产生不均匀沉降,导致花岗岩风化残留在岩土中节理进一步张开形成裂隙。以上对干湿循环下的崩岗土体力学性质的研究主要集中在抗剪强度、崩解特性、抗压强度、土体变形和压缩特性等方面,未对干湿循环作用下崩岗土体抗拉强度衰减性开展相关的研究。因此,为了全面评价崩岗结构的安全性和稳定性,控制崩岗防治工程项目的危害性,有必要对干湿循环作用下崩岗土壤抗拉强度的衰减进行研究。

本研究采用试制的单轴竖向抗拉试验装置,通过设置不同干湿循环试验处理,对湖北通城地区崩岗崩壁不同层次土壤进行了抗拉试验。研究了干湿循环对崩岗土抗拉强度的影响,通过数理统计的方法分析了干湿循环对抗拉强度的显著性,并考虑崩岗不同层次土体深度和干湿循环次数的共同影响,建立了抗拉强度衰减预估模型,揭示干湿循环作用下崩岗土体的衰减机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样

研究区位于湖北省咸宁市通城县,地处湘、鄂、赣3省交界处,东西最长约45 km,南北最宽约40.5 km,全县土地总面积约为1 172 km²。该区属亚热带季风气候,全年四季分明,光照适中,年平均温度为16.7℃,年平均降水量1 215.8 mm,多年平均径流深795 mm,无霜期260 d^[13]。该县崩岗数量高达1 000多处,是崩岗典型集中分布区域,该地区崩岗主要由花岗岩节理发育,在气候及其外界条件综合影响下,呈现为山顶圆滑、地面破碎、水土流失较严重的地貌景观。该地区植被主要为常绿阔叶与落叶阔叶混交林。

本试验所用崩岗土样于2019年4月在湖北省咸宁市通城县五里镇进行采集,该崩岗形态为典型的瓢型崩岗,内部有沟道1条,平均深度为5 m,沟道最大宽度5.7 m,崩岗面积约126 m²。边壁高3.4 m。植物种类有铁芒萁、马尾松和其他杂草,植被盖度为35%,土壤类型为棕红壤,结构松散^[12]。根据崩岗崩壁土壤剖面颜色特征(从红到浅红)、不同深度(0.17, 0.49, 2.1, 3.1 m)自上而下进行层次划分,分别为表土层、红土层、过渡层和砂土层^[14]。原状土试样采用标准环刀(5 cm×20 cm)取得,将取好的环刀样品迅速用保鲜膜包裹并进行编号,再用透明胶带紧密缠绕,然后放入预备的塑封袋内。在各层典型中部代表性土壤处采集约2 kg左右土样放入自封袋内带回,将其置于实验室木盘上均匀摊平为薄薄的一层,放在室内通风处阴干,拣去较大杂质石粒和动植物残体等,根据物理、化学基本性质分析要求对风干土样进行研磨过筛,其中过1 mm孔径用于化学分析,过2 mm孔径用于物理分析。土壤基本性质按照常规方法测定:自然含水率采用烘干法,容重采用环刀法,土粒相对密度采用比重瓶法,机械组成采用筛分法结合移液管法,以上试验均进行3次重复^[15-16]。结果见表1。

1.2 试验装置与试样制备

试验仪器采用单轴抗拉试验装置,主要由荷载框架和抗拉模具2部分组成。荷载框架是由温州山度仪器有限公司生产的SJY—500试验机台和SH—100拉力计组成(图1(a))。拉力计量程为2—500 N,示值误差±0.5%。拉力计通过用RS232串口通讯线与电脑连接,利用拉力计配套软件S—H Test进行数据接收,得到拉伸过程中的荷载变化。抗拉模具分别为2个上部带弯钩和螺丝的直径为50 mm、厚度为1 mm硬铁片(不易变形,重量轻,与粘合剂易粘结),将其用粘合剂牢固地与室内制作的重塑土样粘结(图1(b)),模具上半部与拉力计的弯钩相连接,下半部通过螺丝与试验机台连接,由于土壤的抗拉力较小,为了保证土样进行均匀拉伸,试验过程中设定试验机台恒定拉伸速率为(0.5 mm/min)进行垂直缓慢拉伸试验^[14]。

将采回的野外风干土样均匀混合碾碎后过孔径2 mm的筛,按照不同层次土壤的天然干密度制备试样,将过筛后的土样与计划的蒸馏水混合配制初始含水量的土样,为了确保试样的均匀性和重复性,样品制备过程中,将制备完成的混合土壤置于容器中储存并密封24 h,使水分和土壤充分均匀混合。拉伸试样采用三轴饱和制样器制备,首先在三轴仪饱和器筒壁周围涂抹凡士林薄层,减少土壤颗粒与筒壁的摩擦力,防止试样粘在筒壁造成取样困难,然后根据预先

计划控制的土壤含水量,分 4 层采用静压力法等高度压实制成试样,且加入每 1 层时将上 1 层表面刨毛,使土层与土层之间结合更紧密。将制备的试样脱模,与抗拉模具进行粘结,待粘合剂强度达到测试要求,放置在抗拉仪器上进行测试。由于土体抗拉强度值较小,试验过程中其他因素也可能带来的误差影响不可避免,因此每项试验都进行了 3 组平行试验,以保证试验结果的可靠性,并且保证拉伸过程中土柱的断裂面距离上表面在区间 3~5 cm 内为有效,否则视为试验数据无效。

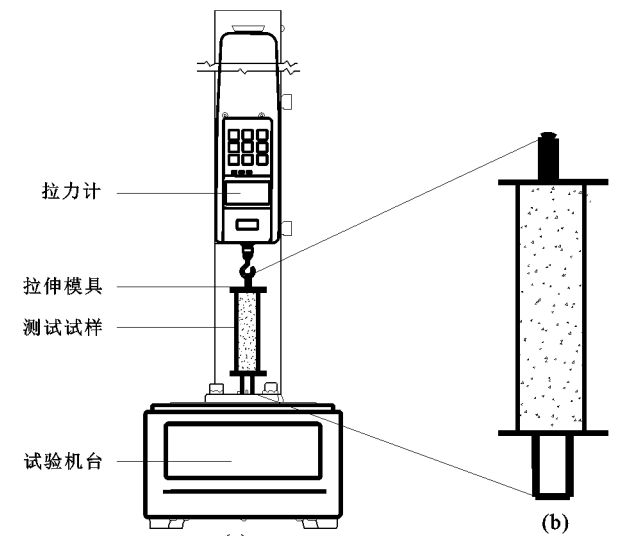


图 1 试拉强度试验装置

1.3 试验过程与方案

一般来说,干湿循环包括 2 个过程,即湿润(从干燥到饱和状态)和干燥(从饱和到干燥状态)过程。根据采样地土体含水率的测试结果,试验的干湿循环幅度控制在 10%~饱和,并选定含水率 20%为试验控制点,分别进行 0,1,2,3,4 次干湿循环试验处理(图 2,图 3)。

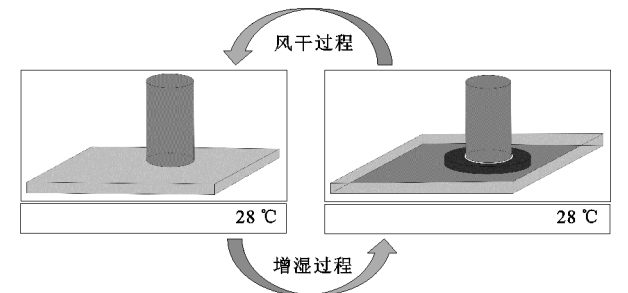


图 2 干湿循环处理示意

在试验开始之前,先进行了初步预试验,以确定试样在增湿和风干过程中达到特定含水量所需的时间(图 4)。

$$\omega = \frac{m_{\theta} - m_d}{m_d} \tag{1}$$

式中: ω 为试样的含水量(%); m_{θ} 和 m_d 分别为试样的湿质量和干质量(g)。

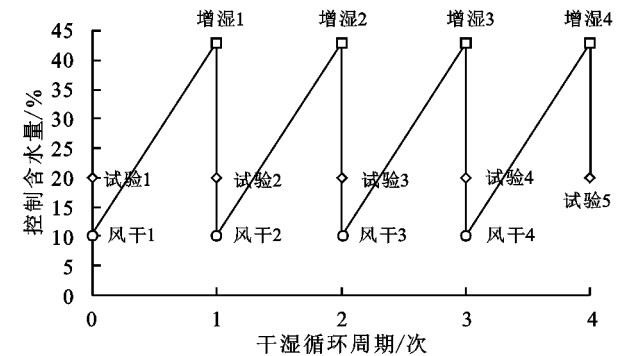


图 3 干湿循环过程示意

为了保证试验数据的精准性,同一干湿循环次数下需要 3~4 个试样。为了较真实地模拟野外实际土体所处的环境,试样干燥过程采用自然风干,温度为开放室内温度,相对误差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;增湿过程采用水膜转移法;试样的含水率控制采用称重法。风干过程采用室内风干法,选取同一批试样中的 1 个放于天平上进行含水率测定,直到试样含水率接近控制含水率时,将其他的试样也开始逐个称重,待土样达到试验要求则停止处理,然后进行单轴抗拉试验,其他试样则进行下一次干湿循环过程,直至所有计划干湿循环结束。

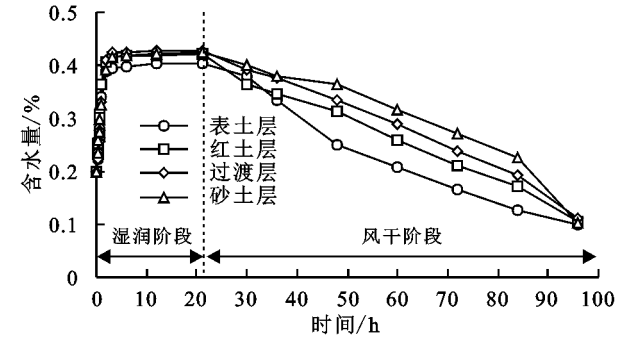


图 4 单次干湿循环中各土层土壤含水量随时间(t)的变化曲线

1.4 数据处理

试样整个拉伸过程中,土体经过拉伸阶段进入强化阶段后,试样拉断时所承受的峰值拉应力 F ,即:通过测得的轴向载荷 N 减去抗拉模具和试样的上半部的重量 W ,再除以断面面积 S 。试样的抗拉强度或者极限强度 σ_t (kPa) 计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{N - W}{S} \tag{2}$$

对于进行干湿循环试验的不同层次崩岗土壤,同一干湿循环次数下重复试验为 3 次,计划共进行 60 次抗拉试验。制作土样与模具粘贴后对试样表面进行凡士林处理,防止试验过程中水分蒸发。为了检验水分散失影响,在试验过程中测试了土样的实际含水量,并与试验计划值进行了比较。观察水分变化,如果对试验结果影响较小,可以忽略不计。

采用 Microsoft Excel 2016 和 OriginPro 9.0 软件对试验数据进行处理、作图和方程拟合;SPSS 18.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 崩岗不同层次土壤基本性质

崩岗土体由于其特殊的非均质土体结构,在垂直层次上土壤基本性质具有一定差异性。由表 1 可知,土壤颗粒含量随着采样深度的增加而改变,从表土层到过渡层,砂粒含量不断减小,黏粒含量不断增加。

表 1 崩岗不同层次土壤基本性质

土壤层次	土体深度/m	天然含水量/%	容重/ (g·cm ⁻³)	土粒相对密度/ (g·cm ⁻³)	土壤机械组成		
					砂粒含量/% (>0.05 mm)	粉粒含量/% (0.05~0.002 mm)	黏粒含量/% (<0.002 mm)
表土层	0.17	19.5	1.36	2.53	40.47	23.91	34.42
红土层	0.49	21.0	1.33	2.54	38.77	24.45	36.08
过渡层	2.10	22.7	1.38	2.58	34.85	23.85	41.28
砂土层	3.10	23.3	1.41	2.56	54.95	29.55	15.10

2.2 拉伸过程中断裂面高度

为了保证抗拉试验过程中的数据的真实可靠性,对试验过程中的拉伸断裂面位置进行了统计(表 2),由于所制土样的高度为 8 cm,试验计划的断裂面的高度在距离上表面为 3~5 cm 范围内为符合要求,且试验过程中断裂面发生的位置不在制样过程中的分层面上,也不在模具和土样的黏结处,即为符合试验的计划要求。本次试验中土柱断裂面的位置在距离上表面 3.22~4.85 cm 的范围内,测试的土壤抗拉强度数据符合试验预期计划要求。

表 2 不同层次土体拉伸断面高度统计

干湿循环周期	单位:cm			
	表土层	红土层	过渡层	砂土层
0	3.22	3.80	4.85	4.50
1	3.80	4.13	3.81	3.69
2	4.59	4.44	3.73	4.26
3	3.72	3.28	3.77	3.29
4	3.88	3.81	4.67	4.48

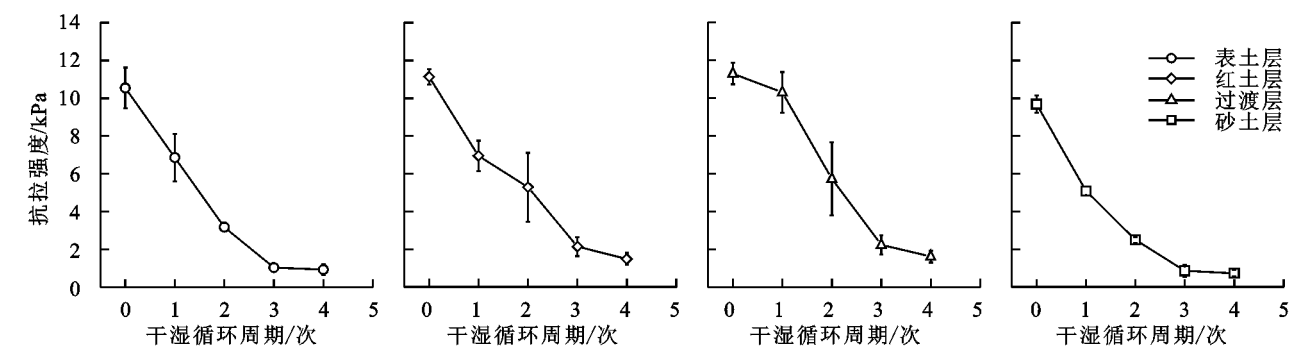


图 5 不同干湿循环下土壤抗拉强度变化规律

在非饱和砂土抗拉强度的研究中表明,非饱和土的抗拉强度主要受到颗粒尺寸、颗粒接触角、颗粒间距和饱和度的影响^[17]。对于崩岗土体来讲,不同层次土壤的抗拉强度随干湿循环周期的变化而发生改变,主要是因为土体中含水率反复增减变化影响了内部结构力变化,造成土壤的抗拉强度衰减的原因主要

而从过渡层到砂土层,砂粒含量增加了约 1 倍,黏粒含量减少了约 3 倍。崩岗的垂直分层构造中,表土层、红土层和过渡层土壤黏粒含量高,黏结性强,不易被侵蚀破坏。而砂土层松散、黏结性弱、水稳性差,在地表径流和重力的共同作用下,容易发生冲刷侵蚀和跌水冲掏,极易造成崩岗土体上部整体发生崩塌。

2.3 干湿循环次数与崩岗抗拉强度的关系

通过对不同干湿循环下不同层次崩岗土体进行抗拉强度试验,得到了崩岗不同层次土壤的抗拉强度折线图(图 5)。由图 5 可知,崩岗土体的抗拉强度均随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减,最后逐渐趋于稳定,整个衰减过程大致可分为 2 个阶段,分别为快速衰减阶段和稳定阶段。第一,快速衰减阶段。随着干湿循环周期逐渐增加,各层土壤的抗拉强度值快速衰减,且衰减幅度较大,此阶段主要集中在前 3 次干湿循环周期,表土层、红土层、过渡层和砂土层土壤前 3 次干湿循环周期后抗拉强度分别衰减 90%,82%,83%,92%,整个衰减的过程重要集中化在前 3 次干湿循环周期,说明抗拉强度的衰减主要集中在第 1 个阶段。第二,稳定阶段。干湿循环后土壤的衰减过程主要集中在前 3 次周期内完成,到第 4 次周期,抗拉强度值衰减幅度减弱,逐渐趋向于一个稳定值,稳定值为初始值的 10%左右。

有 2 个方面:第一,对于崩岗土壤来讲,原土壤结构中颗粒之间的位置相对紧密,排列方式相对有序,反复的干湿循环作用下,土体内部易溶性盐及其他胶结物质会发生溶蚀,水膜厚度也随之增加,颗粒之间的胶结作用减弱^[18-19],使得原有的土壤结构发生了改变,土壤颗粒排列相应发生了重新组合,进而导致了土壤

颗粒间黏聚力减弱甚至消失;同时,土壤胶结物质的溶蚀造成了土体的中小孔隙向中大孔隙的发展,且小孔隙也是影响基质吸力的主要因素,导致了土体内部由基质吸力和毛细力形成的颗粒间吸附作用降低;土体的抗拉强度也随之降低;另一方面,反复的干湿循环作用使得土体内部颗粒中的溶解物质发生散失,土颗粒间的黏结作用降低,较小的土壤颗粒之间发生分离,并使得部分小颗粒吸附于大颗粒上,土体内部颗粒表面由于长期溶蚀变得更加平整,土体颗粒形状变的更加圆润^[20]。导致土体内部中大孔隙数量增多,土体基质吸力减小,从而造成土体吸附强度的降低,最终使得土体的抗拉强度降低。

同一干湿循环下不同层次崩岗土壤的抗拉强度也具有明显的差异,抗拉强度总体表现为过渡层>红土层>表土层>砂土层,且随着干湿循环周期延长,各层次土壤的抗拉强度衰减比例也存在着明显差异(图 6),抗拉强度衰减过程主要发生在前 3 次干湿循环周期内,经历完 3 次干湿循环周期后,表土层和砂土层土壤的抗拉强度值衰减约为整体的 90%,红土层、过渡层的土壤抗拉强度值分别衰减约为 80%,而在 4 次干湿循环后,表土层和砂土层衰减大约 1%,红土层、过渡层衰减大约 8%,而造成各土层土壤抗拉强度的差异性主要与各土层的质地类型和其他土壤组成物质有关。土壤颗粒组成是影响土壤抗拉的重要因素。颗粒组成中黏粒含量高的土壤,黏结力越强,在一定程度上使土壤形成团状结构体,其抗拉能力也越高。对于黏性土壤,黏粒本身具有巨大的表面能和吸附能,在湿润时起黏结作用,土粒或者凝聚体黏结在一起,并且黏土颗粒半径较小,这样使得单位面积内土壤颗粒间接触数目增多,土颗粒间接触距离较短,导致颗粒间的作用力较大,导致抗拉强度较大。对于砂土层土壤,土壤颗粒半径较大,比表面积较小,土颗粒间相互作用力较小,土粒之间黏结能力弱,因而,抗拉强度较小,并且砂土层的分化以物理风化为主,大颗粒之间缺乏胶结物质,土体变得十分松散,所以抗拉强度小于其他土层。同时,对于崩岗不同层次的土壤,土壤中化学组成物质也不同,崩岗地貌是花岗岩风化的结果,随着风化程度的不同,崩岗不同土壤层次体之间表现出不同的物理特征,在垂直结构上,有机质含量下降,土壤毛管孔隙度增加^[14],土壤颗粒之间的黏结力逐渐减小,土壤之间的咬合作用也逐渐下降,从而导致不同层次土体抗拉强度的差异性特征。

2.4 干湿循环对抗拉强度影响的显著性分析

崩岗不同层次土壤的抗拉强度随着干湿循环周期的增加呈现逐渐衰减的趋势,最后逐渐趋于稳定。

为了更好地描述干湿循环作用对崩岗不同土层土壤抗拉强度的衰减的影响,引入数据统计的方法进行说明干湿循环对土体抗拉强度的影响,利用 SPSS 18.0 软件对不同干湿变化(0~4)下抗拉强度 σ_t 进行单因素方差分析,计算结果见表 3。

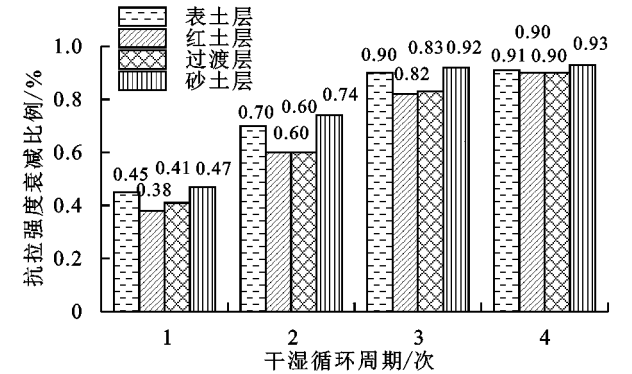


图 6 不同干湿循环下不同层次崩岗土壤抗拉强度衰减比例

表 3 干湿循环对抗拉强度单因素方差分析

指标	方差来源	离差平方和 SS	自由度 df	平均平方	F 值	显著性
抗拉强度 σ_t	组间	236.299	4	59.075	70.890	0
	组内	12.500	15	0.833		
	总数	248.799	19			

注:显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

表 3 中数据统计分析结果中显著性值小于 0.05,说明不同干湿循环周期对抗拉强度 σ_t 的影响是显著的。为了进一步探究不同干湿循环处理之间的相互影响,对不同干湿循环周期之间的抗拉强度 σ_t 进行多重比较分析(表 4)。由表 4 可以看出,前 3 次干湿循环周期之间具有明显的显著影响,第 3 次和第 4 次干湿循环处理之间无显著影响,分析结果可以进一步说明干湿循环下抗拉强度的衰减过程主要集中在前 3 个周期,随后干湿循环的影响逐渐减小,而土体的抗拉强度也降低为较小值,甚至逐渐消失。同时也可以说明干湿循环过程从第 3 次之后进入的稳定阶段,各土层土壤的抗拉强度逐渐维持到一定的恒值。

表 4 干湿循环次数之间的多重比较分析

干湿循环次数(I)	干湿循环次数(J)	抗拉强度 σ_t	
		均值差 (I-J)	Sig
0	1	4.37025 *	0
	2	6.39580 *	0
	3	8.99908 *	0
	4	9.37850 *	0
1	2	2.02555 *	0.007
	3	4.62883 *	0
	4	5.00825 *	0
2	3	2.60328 *	0.001
	4	2.98270 *	0
3	4	0.37942	0.565

注: * 均值差的显著性水平为 0.05。

3 干湿循环作用下崩岗土壤抗拉强度衰减预估模型

在实际野外调查中,如果通过每次试验,获得给定干湿循环周期后土壤的力学性能是不现实的。因此,需要建立 1 个抗拉强度衰减预估模型,用于预测干湿循环周期后崩岗土壤的抗拉强度。表 5 为不同干湿循环下的抗拉强度衰减值(其中 σ_t^i 表示第 i 次干湿循环后抗拉强度值)。

表 5 不同干湿循环次数下崩岗土壤的抗拉强度衰减值					
土壤层次	抗拉强度衰减值 $\Delta\sigma_t^i/\text{kPa}$				
	$\Delta\sigma_t^0$	$\Delta\sigma_t^1$	$\Delta\sigma_t^2$	$\Delta\sigma_t^3$	$\Delta\sigma_t^4$
表土层	10.54	3.63	3.73	2.14	0.34
红土层	11.14	4.20	2.65	2.18	0.66
过渡层	10.90	4.77	2.63	2.21	0.86
砂土层	9.69	4.60	2.59	1.64	0.35

从表 5 可以发现,随着干湿循环周期的增加,崩岗各层次土壤的抗拉强度衰减值呈逐渐减小趋势,为了更好地预测干湿循环后崩岗土壤的抗拉强度,结合统计的抗拉强度衰减值结果,对数据进行拟合(表 6)。

表 6 不同层次土体抗拉强度与干湿循环次数拟合方程			
土层	拟合方程	决定系数	
表土层	$\sigma_t^i/\sigma_t^0=0.659-e^{-0.215i}$	0.95	
红土层	$\sigma_t^i/\sigma_t^0=0.744-e^{-0.172i}$	0.97	
过渡层	$\sigma_t^i/\sigma_t^0=0.690-e^{-0.153i}$	0.98	
砂土层	$\sigma_t^i/\sigma_t^0=0.599-e^{-0.211i}$	0.95	

从表 6 可知,崩岗各土层土壤抗拉强度衰减值与干湿循环次数 i 之间均满足较好的指数函数关系:

$$\sigma_t^i/\sigma_t^0=\mu\cdot e^{\lambda i}\tag{3}$$

式中: μ 为常数; λ 为衰减系数,表示通过不同干湿循环作用下抗拉强度的相对损失率; σ_t^0 为干湿循环 0 次下崩岗土壤的抗拉强度。 μ 、 λ 受崩岗不同层次崩岗土体深度 h 影响, μ 、 λ 、 σ_t^0 的取值见表 7。

表 7 崩岗不同层次土体不同深度下的 μ 、 λ 取值				
不同层次 土体深度 h/m	拟合参数		σ_t^0	R^2
	μ	λ		
0.17	0.659	-0.215	10.54	0.95
0.49	0.744	-0.172	11.14	0.97
2.10	0.690	-0.153	10.90	0.98
3.10	0.599	-0.211	9.69	0.95

利用最小二乘法原理,得到拟合参数与深度 h 的有关函数,并且拟合度相对较高,具体数学表达式为:

$$\mu=-0.04h^2+0.11h+0.66\quad R^2=0.86\tag{4}$$

$$\lambda=-0.03h^2+0.10h-0.22\quad R^2=0.94\tag{5}$$

$$\sigma_t^0=-0.50h^2+1.30h+10.46\quad R^2=0.96\tag{6}$$

将公式(4)、公式(5)和公式(6)代入公式(3)中,得到不同干湿循环周期影响下崩岗不同层次土体的

抗拉强度预估模型为:

$$\sigma_t^i=(-0.04h^2+0.11h+0.66)\cdot e^{(-0.03h^2+0.10h-0.22)i}\cdot (-0.50h^2+1.30h+10.46)\tag{7}$$

式中: $h=0.17,0.49,2.1,3.1;i=0,1,2,3,4$ 。

为了进一步验证建立的预估模型的精确性,将计算参数 h 、 i 代入公式(7)中,得到了抗拉强度的预测值,将其作为纵坐标,将抗拉强度试验所得实测值为横坐标,得到抗拉强度预测值与实测值之间的散点图($R^2=0.97$),说明通过经验模型所得预测值与实测值较为接近,因此,建立的预估模型可以较精确预测崩岗土体不同干湿循环条件下抗拉强度值。但是该模型也存在一定的局限性,由于该衰减模型是以通城崩岗土体为基础建立的,所以现适用于通城地区崩岗土壤的抗拉强度衰减性分析,如果要用于其他地区的崩岗土体,还需要进一步的试验验证与改进。

4 结论

(1)崩岗侵蚀区红土发育于花岗岩,受干湿变化影响显著。崩岗土体抗拉强度随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减,最后逐渐趋于稳定,整个变化过程大致可分为 2 个阶段:快速衰减阶段和稳定阶段。崩岗抗拉强度衰减过程主要发生在前 3 次干湿循环周期内,前 3 次干湿循环周期结束后,表土层和砂土层土壤的抗拉强度值衰减约为整体的 90%,红土层、过渡层的土壤抗拉强度值分别衰减约为 80%。

(2)利用数据统计的方法得出干湿循环对崩岗土壤抗拉强度的影响是显著的,且前 3 次周期之间存在着显著影响,第 3 次和第 4 次干湿循环周期之间不存在显著影响。

(3)通过考虑崩岗不同层次土体深度和干湿循环次数的共同影响,建立了抗拉强度的预估衰减模型,且抗拉强度模型预测值与实测值有较高的相关关系($R^2=0.97$)。

崩岗土体由于反复干湿循环作用,造成土体抗拉强度呈现不可逆的衰减特征,具体表现为土体内部抗拉裂隙迅速发育,从而进一步促进了崩岗侵蚀的发生发展。因此,未来可以考虑对土壤抗拉裂隙发育规律和量化指标的研究,将有助于揭示崩岗侵蚀机理。

参考文献:

[1] Momeni A, Hashemi S S, Khanlari G R, et al. The effect of weathering on durability and deformability properties of granitoid rocks[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2017,76:1037-1049.

[2] Zhou Z L, Cai X, Chen L, et al. Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone[J].Engineering Geology,2017,220:1-12.

- [3] Ma D, Rezaia M, Yu H S, et al. Variations of hydraulic properties of granular sandstones during water inrush: Effect of small particle migration[J]. *Engineering Geology*, 2016, 217: 61-70.
- [4] Ma D, Zhou Z L, Wu J Y, et al. Grain size distribution effect on the hydraulic properties of disintegrated coal mixtures[J]. *Energies*, 2017, 10(5): 612-629.
- [5] Ma D, Xin C, Zhou Z L, et al. Experimental investigation on hydraulic properties of granular sandstone and mudstone mixtures[J]. *Geofluids*, 2018(5): 1-13.
- [6] Zhou Z L, Xin C, Ma D, et al. Dynamic tensile properties of sandstone subjected to wetting and drying cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 215-232.
- [7] 张萍, 查轩. 崩岗侵蚀研究进展[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 170-172, 176.
- [8] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 241-245.
- [9] 刘昌鑫, 潘健, 邓羽松, 等. 干湿循环对崩岗土体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 253-258.
- [10] 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.
- [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] 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坍机制[J]. *岩土力学*, 2013(增刊 2): 299-305.
- [13] 丁树文, 蔡崇法, 张光远. 鄂东南花岗地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J]. *南昌工程学院学报*, 1995(增刊 1): 50-54.
- [14] 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.
- [15] Hillel D. *Fundamentals of soil physics* [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Lu N, Wu B, Tan C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 144-154.
- [18] Zemenu G, Martine A, Roger C. Analysis of the behavior of a clay soil under cyclic water stress. [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(3): 421-436.
- [19] Tang C S, Cui Y J, Shi B, et al. Desiccation and cracking behavior of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 111-118.
- [20] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(6): 2445-2453.

(上接第 167 页)

- [7] 丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6480-6493.
- [8] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. *土壤与作物*, 2015, 4(4): 145-150.
- [9] 史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 270-279.
- [10] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 125-130, 172.
- [11] 韦杰, 史炳林, 李进林. 紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 153-160.
- [12] 花可可, 魏朝富, 任镇江. 土壤液限和抗剪强度特征值及其影响因素研究: 基于紫色土区[J]. *农机化研究*, 2011, 33(6): 105-110.
- [13] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength [J]. *Catena*, 2011, 87: 60-69.
- [14] García A J H, Jaime Y N M. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship [J]. *Revista Científica Udo Agrícola*, 2013, 12(2): 324-337.
- [15] 倪九派, 袁天泽, 高明, 等. 土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 72-77.
- [16] Trauner L, Dolinar B, Mišić M. Relationship between the undrained shear strength, water content, and mineralogical properties of fine-grained soils [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5(4): 350-355.
- [17] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 1003-1008.
- [18] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红粘土抗剪强度的水敏性研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(1): 17-22.
- [19] 胡斐南, 魏朝富, 许晨阳, 等. 紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 107-114.
- [20] 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.
- [21] 王健, 刘旦旦, 张鹏辉. 土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 65-68.
- [22] 林敬兰, 黄炎和, 张德斌, 等. 水分对崩岗土体抗剪特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 55-58.