

DOI: 10.11766/trxb201903230072

章智, 陈洁, 林金石, 蒋芳市, 葛宏力, 连彬彬, 黎造宇, 黄炎和. 含水率对安溪县花岗岩崩岗土体胀缩特性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 600–609.

ZHANG Zhi, CHEN Jie, LIN Jinshi, JIANG Fangshi, GE Hongli, LIAN Binbin, LI Zaoyu, HUANG Yanhe. Effect of Water Content on Swell-Shrink Characteristics of Collapsed Granite Soil in Anxi County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 600–609.

含水率对安溪县花岗岩崩岗土体胀缩特性的影响*

章 智, 陈 洁, 林金石, 蒋芳市, 葛宏力, 连彬彬, 黎造宇, 黄炎和[†]

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘 要: 崩壁土壤水分变化是导致崩岗发生和发展的主要因素之一。降雨可以导致崩岗崩壁失稳发生崩塌, 降雨过程中土体在不同含水率下的胀缩特性是决定崩壁失稳的关键因素之一。本研究以安溪县典型崩岗崩壁土体为对象, 通过室内无荷膨胀率和线性收缩率试验, 研究不同梯度含水率对崩壁不同土层胀缩特性的影响。结果表明: 不同土层的无荷膨胀率均随初始含水率增大而减小, 线性收缩率则相反。初始含水率与崩壁不同层次土壤无荷膨胀率之间存在着明显的指数递减关系, 各土层拟合所得到的回归方程均可表达为: $\delta_e = ae^{(-\omega/b)} + c$, $R^2 > 0.96$; 初始含水率与崩壁不同层次土壤线性收缩率之间则存在着明显的指数递增关系, 各土层拟合所得到的回归方程均可表达为: $\delta_{sl} = ae^{(\omega/b)} + c$, $R^2 > 0.96$ 。对于同一土层, 膨胀的变化幅度大于收缩的变化幅度。比较不同土层的膨胀和收缩变化幅度发现, 红土层变化幅度最大, 分别较砂土层高 2.58% 和 3.33%, 较碎屑层高 3.61% 和 4.67%。这种不可逆的干湿胀缩现象可能是造成土体产生裂隙进而引起崩壁坍塌的原因, 这对于认识崩壁失稳坍塌原因和崩岗发生机理具有重要意义。

关键词: 花岗岩崩岗; 初始含水率; 无荷膨胀率; 线性收缩率

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Effect of Water Content on Swell-Shrink Characteristics of Collapsed Granite Soil in Anxi County

ZHANG Zhi, CHEN Jie, LIN Jinshi, JIANG Fangshi, GE Hongli, LIAN Binbin, LI Zaoyu, HUANG Yanhe[†]

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: 【Objective】 Change in soil moisture of a collapsed wall is one of the main factors leading to occurrence and development of collapse therein. Rainfall can cause unstability and eventually collapse of the wall. During this process, the swell-shrink characteristics of the solum as affected by soil water content play an important role in mound collapsing. In the past, studies paid most attention to effect of water content on the swelling-shrinkage characteristics only in a single soil layer. 【Method】 With the collapsing mounds or walls typical of Anxi County of Fujian as object, effect of water content on the swell-shrink characteristics of a solum or a mound relative to soil layer was studied via indoor tests on no-loading expansion rate and linear shrinkage rate. 【Result】 Results show that no-loading expansion rate of the soil, regardless of layer, decreased with

* 国家自然科学基金项目(41571272)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571272)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yanhehuang@163.com

作者简介: 章智(1993—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: zhangz0828@163.com

收稿日期: 2019-03-23; 收到修改稿日期: 2019-06-11; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-07-18

increasing initial water content, while linear shrinkage rate was in a reverse trend. Initial water content exhibited an obvious exponential decreasing relationship with soil unloading expansion rate in all soil layers and the relationship could be fitted with a regression equation of $\delta_e = ae^{(-\omega/b)} + c$ with $R^2 > 0.96$. But initial water content did have a significant exponential increasing relationship with linear shrinkage rate of the soil, regardless of soil layer, and the relationship could be fitted with a regression equation of $\delta_{s1} = ae^{(\omega/b)} + c$ with $R^2 > 0.96$ in all soil layers. So initial water content had a good exponential relationship with no-loading expansion rate and linear shrinkage rate. In the same soil layer, the expansion varied more greatly than the shrinkage did in extent. Comparison between soil layers in extent of the variation of expansion and shrinkage rates shows that the red soil layer was 2.58% and 3.33% higher than the sandy soil layer, and 3.61% and 4.67% higher than the detritus soil layer, respectively. 【Conclusion】 These irreversible phenomena of swelling-shrinking might be the main cause to form cracks in the solum, which then eventually lead to soil collapse. This work is of certain important significance to understanding the causes and mechanism of collapsing of mounds.

Key words: Granite collapse; Initial water content; No-loading expansion rate; Linear shrinkage rate

崩岗是发生在南方花岗岩红壤区, 山坡土体在水力和重力复合作用下受到破坏失稳而发生崩塌的一种特殊土壤侵蚀形式和水土流失现象^[1-3]。作为崩岗最重要的组成部分之一, 崩壁是水力和重力复合作用最明显的部位, 也是崩岗失稳崩塌的前提和崩积堆产生的物质来源^[4]。崩岗发育的主要驱动力是降雨, 土体中水分变化是诱发崩壁坍塌的主要因素。在降雨过程中, 雨水通过侧向渗透进入崩壁, 使得崩壁土体因含水率增大而发生膨胀; 降雨结束后, 由于水分快速蒸发, 崩壁土体因含水率减小而发生收缩。水分快速进出崩壁土体, 使其内部因干湿胀缩交替作用而产生裂隙并持续扩大, 从而导致外层土体在水力和重力共同作用下不断崩塌剥落, 加速崩岗发育和水土流失发展^[5-6]。关于土壤胀缩变形问题, 国内外学者已经开展了大量工作^[7-10]。相关研究发现膨胀土的无荷膨胀率随初始含水率增加而降低^[11-12], 膨胀力则相反^[11], 其膨胀程度与时间^[13]、上覆载荷^[14]有关。随着含水率的降低, 土体线性收缩率明显减小^[12]。土体自身失水收缩会引起黏性土内部颗粒的变化, 导致其土体强度降低^[15], 从而改变土体微观结构和内部颗粒排列^[16-17], 最终影响土体胀缩特性。土壤干湿胀缩过程同样会引起土壤容积和孔隙比的变化。土壤膨胀速度远快于收缩速度^[18], 且土壤容积变化速率小于含水率变化速率^[12]。有研究结果表明对于同一种土体, 初始干密度对其缩限几乎没有影响^[19], 含水率是主要影响因素。

目前, 关于土壤胀缩特性的相关研究主要集中在干旱和半干旱地区的膨胀土, 对于亚热带季风气

候条件下的崩岗土(即花岗岩残积风化土)胀缩特性方面的研究较少。就南方花岗岩崩岗区而言, 夏季降雨较多且气候炎热, 水分频繁进出崩壁土体, 在强烈的干湿胀缩交替作用之下引起崩壁崩塌, 而产生崩岗。在这一过程中, 含水率变化是如何影响土体膨胀收缩尚不明晰, 因此需要针对含水率对崩岗土体胀缩特性的影响进行研究。由于福建省安溪县龙门镇洋坑村为典型的南亚热带季风气候区, 是全省崩岗数量最多的地区, 是福建省乃至华南地区受崩岗侵蚀影响最严重的典型区之一。故本研究以福建省安溪县龙门镇洋坑村(118°03'E, 24°57'N)的花岗岩崩岗土体为研究对象, 以不同梯度的初始含水率为控制变量, 开展室内无荷膨胀率和线性收缩率试验, 分析无荷膨胀率和线性收缩率随时间变化规律, 分别建立无荷膨胀率和线性收缩率与初始含水率之间的拟合关系, 比较崩壁不同土层的土壤胀缩特性, 进一步认识崩壁失稳发生崩塌的原因, 对崩岗侵蚀机理的深入研究具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

图 1 所示为研究区内的典型崩岗, 包括崩壁、崩积体、冲积扇和集水坡面等主要组成部分。本研究于 2017 年 12 月 3 日在典型崩岗崩壁上按照土层垂直分布, 自下而上分碎屑层、砂土层和红土层进行采样。在同一崩壁上, 不同土层的厚度、各采样点的具体位置和深度以及各土层的基本特征详见

表 1。在各土层不同深度范围内多点混合取土, 根据实际测量得到的各土层厚度, 分别在各土层内纵向平均分为 3 个具体采样深度范围, 每个具体采样深度范围内采集 3 个重复样, 最终每个采样深度范围内的三个重复样混合为一个混合样, 即为此采样深度的待测土样。各土层分别采集混合样 3 个 (红土层 A1~A3, 砂土层 A4~A6, 碎屑层 A7~A9), 共计 9 个土样, A1~A9 土层深度逐渐加深。将采集到的崩壁不同层次土样自然风干后, 取一部分土

样通过烘干法 (105℃, 8 h) 测定风干土含水率, 剩余土样用碾土棒对大颗粒进行碾压, 通过 2 mm 筛后装袋密封备用。供试土壤理化性质见表 2。

1.2 试验设计

本试验控制干密度为 $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。根据表 2 中崩壁不同层次土壤液塑限数据结果所示, 各土层塑限极大值为 36.85, 出现在红土层中, 极小值为 27.98, 出现在碎屑层中。因此初始含水率设置分别为红土层 15%、20%、25%、30%、35% 五个梯度,

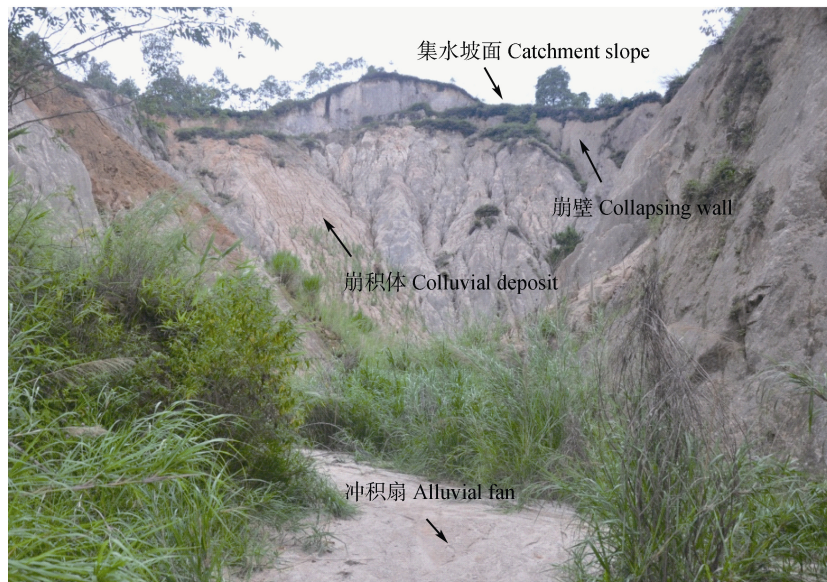


图 1 研究区典型崩岗

Fig. 1 Typical collapse in the study area

表 1 采样层分布信息

Table 1 Information of sampling layers

土层 Soil layers	编号 Serial number	深度 Depth /m	土层特征 The characteristics of soil layers
红土层 Red soil	A1	0~0.3	土壤颜色从肉眼观察呈红色, 质地黏重, 土层紧实; 土壤风化较完全, 多为长石和云母风化物, 粗颗粒石英含量较少, 有一些芒萁和其他植物根系分布其中
	A2	0.3~0.6	
	A3	0.6~0.9	
砂土层 Sandy soil	A4	0.9~2.0	土壤颜色主要是浅红色和灰白色, 间杂一些黑色斑点; 土质比较疏松易散, 含有较大颗粒石英
	A5	2.0~3.1	
	A6	3.1~4.1	
碎屑层 Detritus soil	A7	4.1~4.9	土壤颜色呈现灰白色, 土质松散, 含有大量石英砂, 不完全风化的云母和石英紧密结合, 基本保持了花岗岩的原生结构
	A8	4.9~5.7	
	A9	5.7~6.6	

表 2 供试花岗岩崩岗土体理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of the tested soil

编号 Serial number	容重 Bulk density / (g·cm ⁻³)	塑限 Plastic limit	液限 Liquid limit	CEC / (cmol·kg ⁻¹)	颗粒组成 Particle size composition/%		
					0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm
A1	1.38	32.88	76.83	28.57	69.16	17.64	4.56
A2	1.32	36.85	70.24	28.53	55.57	34.18	6.61
A3	1.29	36.10	78.08	33.27	42.95	47.95	8.23
A4	1.31	30.78	41.55	4.77	58.20	19.35	2.56
A5	1.30	29.58	47.59	3.54	56.48	22.27	2.26
A6	1.33	29.32	47.44	3.26	57.17	24.55	2.52
A7	1.55	27.98	42.66	2.55	64.53	21.23	1.49
A8	1.39	32.89	43.52	2.71	65.85	20.10	1.48
A9	1.43	29.65	45.87	2.83	61.33	21.40	1.99

砂土层和碎屑层初始含水率均为 15%、20%、25%、30% 四个梯度, 膨胀和收缩试验各 39 组处理, 每组试验 3 个重复, 图中数据均以均值和标准差来体现。膨胀试验为有侧限饱和膨胀, 历时 24 h, 数据采集时间步长为 2 s; 收缩试验为无侧限无荷收缩, 历时 96 h, 数据采集时间步长为 60 s。膨胀和收缩试验室内环境条件控制为室温不超过 30℃, 相对湿度 50%~60%。试样制备和试验步骤严格遵守《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999) 和《土工试验规程》(SL237-1999), 同时也参照其他试验手册^[22]。

无荷膨胀率试验装置和线性收缩率试验装置采用南京泰克奥科技有限公司生产的 TKA-PZY-1 型土壤膨胀仪和 TKA-SSY-1 型土壤收缩仪。本试验采用南京泰克奥科技有限公司研发生产的 TKA-DAI-8D 型数据采集盒和 V2.1 型数据采集处理软件, 以数据采集盒为中转设备, 通过数据线将数显式位移传感器 (测量精度为 0.01 mm, 测量误差为 5%, 最大量程为 12.70 mm, 工作温度为 0~40℃)、数据采集盒和电脑端数据采集处理软件连接起来, 准备工作完成后在电脑端软件页面点击“开始”即可自动采集试验数据。改变以往同类试验人工记录耗时费力, 人工判读对数据精度和误差影响较大的弊端; 同时还可以根据试验需要, 设置数据采集时间步长, 可获得精度较高的持续稳定数据, 降低因人工判读而造成的试验误差, 并且能够实时监测膨胀和收缩曲线变化。试验所得数据的有效测量精度

和误差与后续计算分析精度均以数显式位移传感器的测量精度和误差为依据。

2 结果与讨论

2.1 不同水分条件下崩壁土体膨胀特性

为探究崩壁土体膨胀时程规律, 对不同初始含水率条件下崩壁土体 (红土层、砂土层和碎屑层) 试样进行无荷膨胀率试验, 相关试验结果可见无荷膨胀率随时间变化曲线, 如图 2 所示。从图中可知, 崩壁土体无荷膨胀率随时间增加而增大, 在 24 h 左右吸水量达到饱和, 膨胀趋于稳定。试样初始含水率越低, 其无荷膨胀率越大, 反之则无荷膨胀率越小。对于含水率在 15%~35% 的五组不同初始含水率试样, 各土层 24 h 最终膨胀率总体趋势上均表现为红土层最大, 砂土层次之, 碎屑层最小。其中红土层在 15% 初始含水率时的最终膨胀率最大, 其值为 11.64%; 在 35% 初始含水率时的最终膨胀率最小, 其值为 1.13%; 红土层的最大膨胀率与最小膨胀率之间相差 10.30 倍。砂土层和碎屑层的最大膨胀率和最小膨胀率与红土层表现为同样的规律, 均出现在初始含水率梯度的两个极值, 但不同于红土层的是其最大膨胀率和最小膨胀率的差距分别为 19.02 倍和 14.80 倍。此外, 由图 2 还可知, 崩壁土体在不同初始含水率条件下的膨胀时程均有明显规律性, 可将无荷膨胀率变化曲

线分为三个明显的不同阶段，即快速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段和膨胀稳定阶段，这与其他研究者的结论一致^[13, 23]，说明崩壁土体的膨胀程度和延吉盆地的黑土一样，主要是由土体吸水增湿的初期所控制。初始含水率越小，土层深度越浅，膨

胀时程曲线三阶段越明显，特别是快速膨胀阶段；随着初始含水率的增加和土层深度的加深，膨胀过程曲线渐趋平缓，三阶段膨胀变化程度明显渐渐降低。通过比较发现初始含水率越小，其快速膨胀历时越短，快速膨胀速度越快。

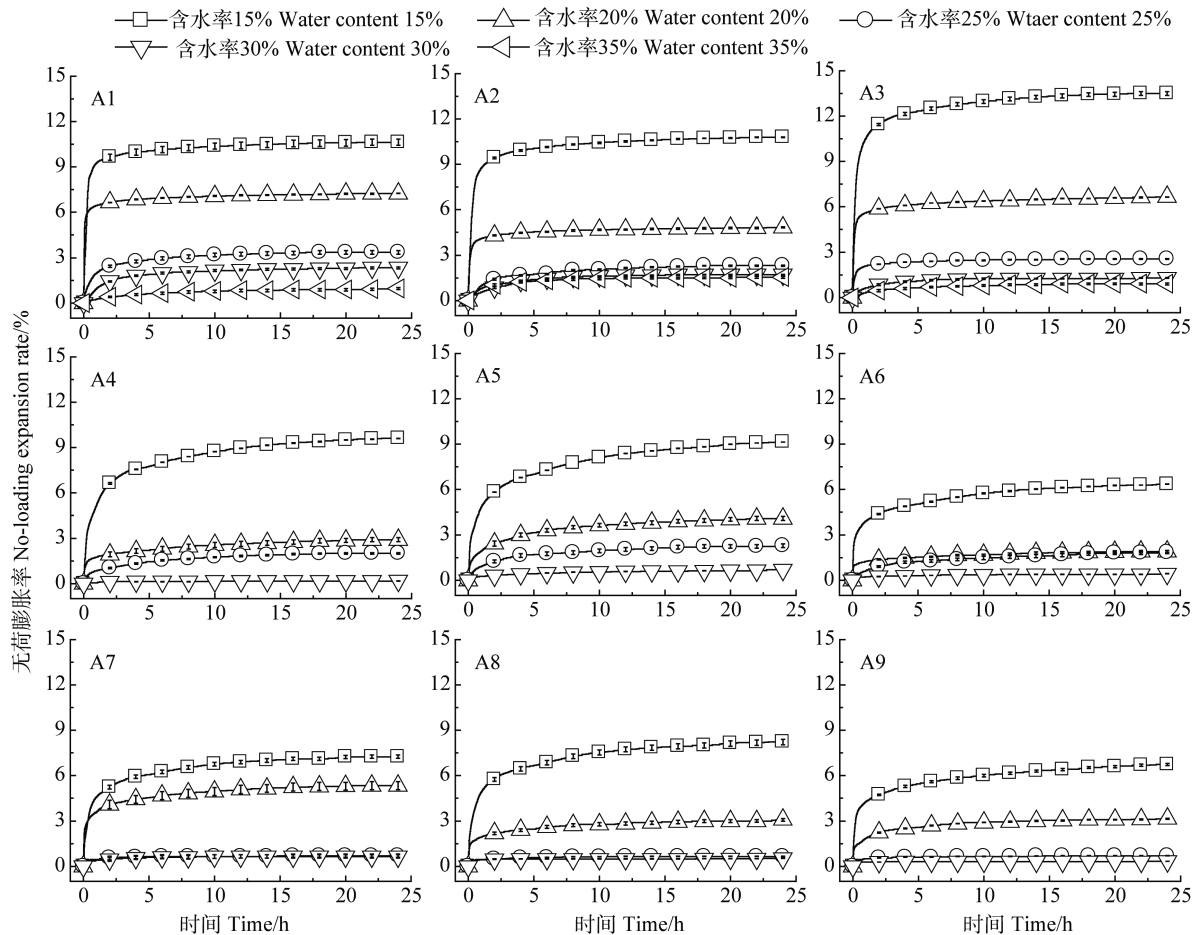


图2 不同初始含水率条件下无荷膨胀率随时间变化曲线

Fig. 2 Temporal variation curve of no-loading expansion rate with initial water content

由图2可知，总体而言大部分膨胀在快速膨胀这一阶段内完成，速度快且明显，大致在膨胀开始后的1 h以内完成，约占最终膨胀量的75%~85%；缓慢膨胀阶段的膨胀量约占最终膨胀量的10%~15%，大致在膨胀开始后的1~5 h时间段；稳定阶段的膨胀量几乎不会发生较大波动，在膨胀曲线上表现为相对平稳，大致在膨胀开始后的5~24 h时间段，其膨胀量不足最终膨胀量的5%。分析原因可知，崩壁不同层次重塑土壤内部因含水率较低而存在相对较多的内部孔隙。当试样遇水时，崩壁土壤吸力大、吸水较快，其膨胀速率也较快，在这一阶段完成绝大部分膨胀变形。不同于膨胀土矿物成分

主要由蒙脱石等亲水性矿物组成，其膨胀变形主要发生在膨胀试验开始后的30 min内^[13]，崩岗土壤的黏土矿物成分不含有蒙脱石^[24]，其膨胀变形主要发生在膨胀试验开始后的1 h内。随着水分含量的增多，土体颗粒间距增大，孔隙中的空气逐渐被水分排挤出，试样吸水速率减缓，无荷膨胀率增幅趋于平缓直至达到稳定状态，崩岗土壤快速膨胀时间大于膨胀土，其最终膨胀率小于膨胀土。

不同土层初始含水率与无荷膨胀率的拟合关系曲线如图3所示，随着初始含水率的增大，红土层、砂土层和碎屑层的无荷膨胀率均呈现出减小的趋势，反之，其无荷膨胀率均表现为增大的趋势。随

着初始含水率的变化, 红土层的无荷膨胀率变幅约为 10%, 砂土层和碎屑层的无荷膨胀率变幅均小于红土层, 分别约为 7.50% 和 6.50%。通过对无荷膨胀率和初始含水率的关系进行回归分析发现, 不同于膨胀土的无荷膨胀率与初始含水率存在着良好的线性关系^[11, 13, 23], 初始含水率对崩壁不同土层无荷膨胀率的影响存在着明显的指数递减关系。这是因为膨胀土由于其矿物成分主要由蒙脱石和伊利石等亲水性黏土矿物组成, 膨胀潜势远大于崩岗土壤, 另一方面则是由于其他研究者的膨胀时间数倍于本

试验的膨胀时间, 所以在含水率和膨胀率的拟合关系上表现出差异性。红土层、砂土层和碎屑层的拟合方程的决定系数 R^2 均大于 0.96, 其拟合所得回归方程均符合以下函数关系:

$$\delta_e = ae^{(-\omega/b)} + c \quad (1)$$

式中, δ_e 为无荷膨胀率, %; ω 为初始含水率, %; a 、 b 和 c 均为回归方程参数, 与土壤初始干密度和土层性质有关。

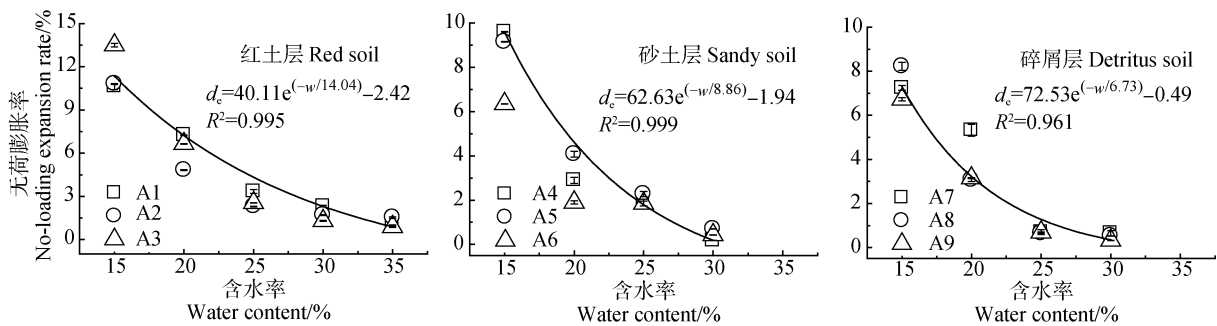


图 3 不同土层初始含水率与无荷膨胀率的拟合关系曲线

Fig. 3 Fitting relationship between initial water content and no-loading expansion rate relative to soil layer

2.2 不同水分条件下崩壁土体收缩特性

通过对不同初始含水率条件下的崩壁土体进行线性收缩率试验, 研究崩壁土体收缩时程规律, 相关试验结果见线性收缩率随时间变化曲线, 如图 4 所示。从图中可知, 崩壁土体的线性收缩率随时间的增加而增大, 最终趋于某一稳定值。试样初始含水率越高, 其线性收缩率越大, 反之则线性收缩率越小。对于含水率在 15%~35% 的五组不同初始含水率试样, 各土层的 96 h 最终线性收缩率整体趋势上均表现为红土层最大, 砂土层次之, 碎屑层最小。其中红土层在 35% 初始含水率时的最终线性收缩率最大, 其值为 5.53%; 在 15% 初始含水率时的最终线性收缩率最小, 其值为 0.23%; 红土层的最大线性收缩率与最小线性收缩率之间相差 24.04 倍。砂土层和碎屑层的最大线性收缩率和最小线性收缩率与红土层表现为同样的规律, 均出现在初始含水率范围的两个极值, 但不同于红土层的是其最大线性收缩率和最小线性收缩率的差距分别为 7 倍和 2.80 倍。此外, 由图 4 还可知, 崩壁土体在不同初始含水率条件下的收缩时程同样具有明显的规律性, 可将线性收缩率变化曲线分为三个明显不同的阶段,

即快速收缩阶段、缓慢收缩阶段和收缩稳定阶段, 这与其他研究者的结论一致^[19, 24], 说明崩壁土体的收缩程度和膨胀土一样, 主要是由土体失水减湿的初期所控制。初始含水率越大, 土层深度越浅, 收缩时程曲线三阶段越明显, 特别是快速收缩阶段; 随着初始含水率的减小和土层深度的加深, 收缩时程曲线渐趋平缓, 收缩变化三阶段明显程度逐渐降低。通过比较发现初始含水率越大, 其快速收缩历时越短, 快速收缩速度越快。

由图 4 可知大部分收缩在快速收缩这一阶段内完成, 速度快且明显, 大致在收缩开始后 5 h 内完成, 约占最终收缩量的 85%; 缓慢收缩阶段的收缩量约占最终收缩量的 10%, 大致对应图中 5~18 h 时间段; 稳定阶段的收缩量几乎不会发生明显波动, 在收缩曲线上表现为平直线, 大致对应图中 18~96 h 时间段, 其收缩量约占最终收缩量的 5%。分析原因可知, 初始阶段土体蒸发损失的是自由水, 而随着土体中的水分不断蒸发散失, 自由水全部损失后结合水也开始逐步散失直至损失殆尽, 在这一过程中, 水膜逐渐变薄, 双电层厚度因此而减小; 同时由于水分散失产生的负孔隙压力迫使土粒之间不断

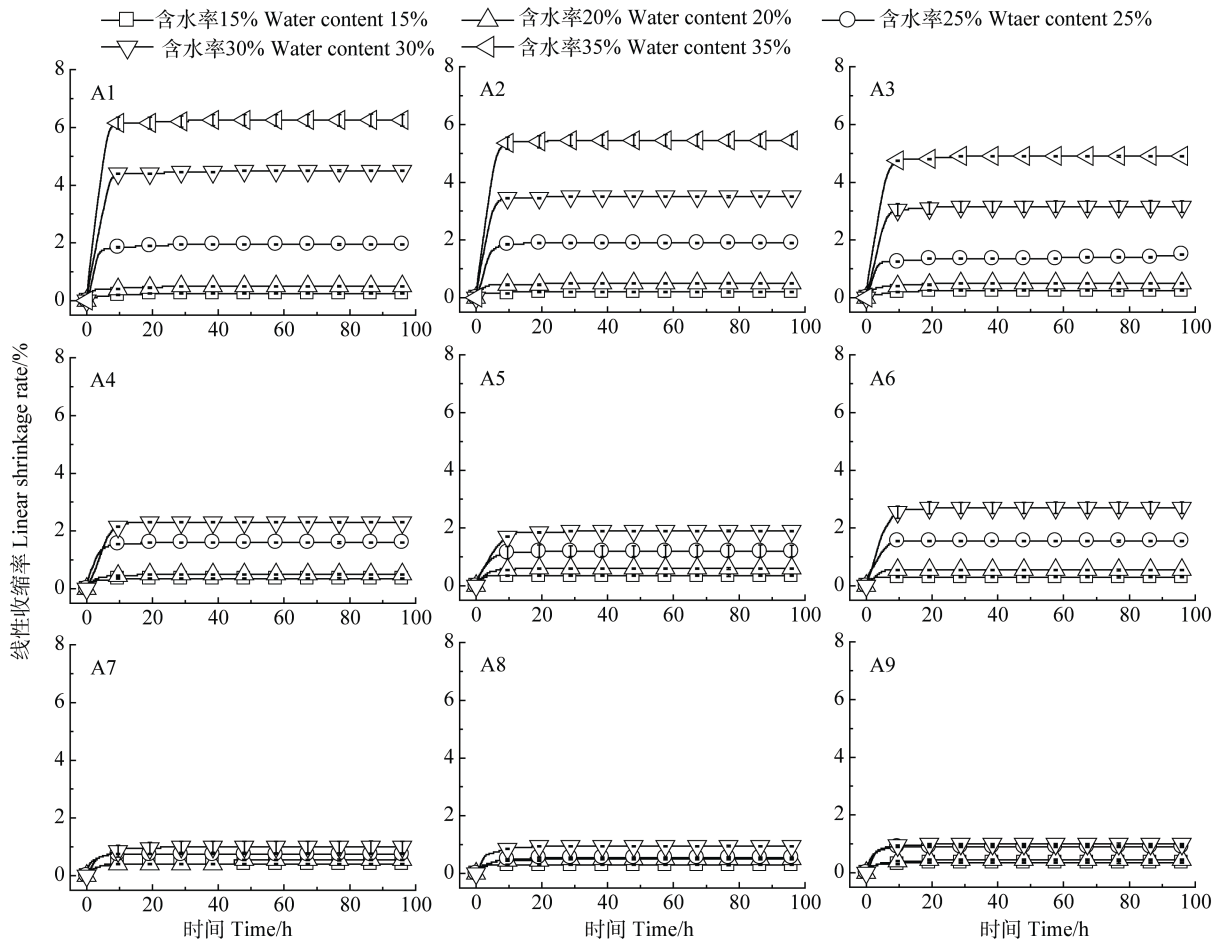


图 4 不同初始含水率条件下线性收缩率随时间变化曲线
 Fig. 4 Temporal variation curve of linear shrinkage rate with initial water content

靠拢距离逐渐缩小，颗粒间的斥力渐大以至于超过负空隙压力，此时土体不再收缩并趋于稳定^[23]。

不同土层初始含水率与线性收缩率的拟合关系曲线如图 5 所示。随着初始含水率的增大，红土层、砂土层和碎屑层的线性收缩率均呈现出增大的趋势，反之，其线性收缩率均表现为减小的趋势。随

着初始含水率的变化，红土层的线性收缩率变幅约为 5%，砂土层和碎屑层的线性收缩率变幅均小于红土层，分别约为 2%和 0.65%。通过对线性收缩率和初始含水率的关系进行回归分析发现，初始含水率对崩壁不同土层线性收缩率的影响存在着明显的指数递增关系，与章李坚等^[24]研究结果一致。红土层、

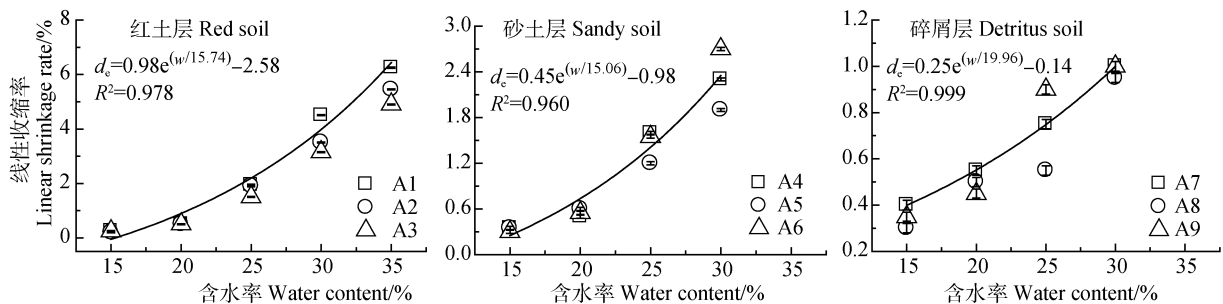


图 5 不同土层初始含水率与线性收缩率的拟合关系曲线
 Fig. 5 Fitting relationship between initial water content and linear shrinkage rate relative to soil layer

砂土层和碎屑层的拟合方程的决定系数 R^2 均大于 0.96, 其拟合所得回归方程均符合以下函数关系:

$$\delta_{sl} = ae^{(\omega/b)} + c \quad (2)$$

式中, δ_{sl} 为线性收缩率, %; ω 为初始含水率, %; a 、 b 和 c 均为回归方程参数, 与土壤初始干密度和土层性质有关。

2.3 不同水分条件下崩壁土体胀缩特性差异

从上述膨胀试验和收缩试验的结果分析可知, 膨胀时程曲线和收缩时程曲线在整体上具有明显的相似性。首先, 膨胀时程曲线和收缩时程曲线的总体变化趋势基本上一致, 均表现为膨胀率和收缩率随着胀缩时间的增大而增大。其次, 在胀缩过程特征上, 膨胀和收缩均可分为明显相似的 3 个阶段, 均经历了从快速胀缩的斜直线至缓慢胀缩的外凸弧线最后至胀缩稳定的平直线的胀缩变化过程; 但膨胀和收缩两个相反过程各对应阶段的历时及其胀缩变形程度具有较大差异, 表现为膨胀速率远快于收缩速率, 最终膨胀量远大于最终收缩量。

崩壁不同土层最终膨胀率和最终收缩率随初始含水率的变化曲线见图 6。从图中可知, 随着初始含水率的增大, 无荷膨胀率随之减小, 线性收缩率随之增大, 具体表现为红土层的最终膨胀率由 11.64% 减小至 1.13%, 砂土层的最终膨胀率由 8.37%

减小至 0.44%, 碎屑层的最终膨胀率由 7.40% 减小至 0.50%; 红土层的最终收缩率由 0.23% 增加至 5.53%, 砂土层的最终收缩率由 0.33% 增加至 2.30%, 碎屑层的最终收缩率由 0.35% 增加至 0.98%。在初始含水率变化范围内, 不同土层的最大无荷膨胀率均表现为红土层最大, 砂土层次之, 碎屑层最小的趋势, 最大线性收缩率也呈现出一致的趋势。对同一土层而言, 膨胀变化幅度均较收缩变化幅度大。其中红土层的膨胀变化幅度为 10.51%, 收缩变化幅度为 5.30%; 砂土层的膨胀变化幅度为 7.93%, 收缩变化幅度为 1.97%; 碎屑层的膨胀变化幅度为 6.90%, 收缩变化幅度为 0.63%。相同土层的膨胀变化幅度和收缩变化幅度同样均为红土层最大, 砂土层次之, 碎屑层最小; 膨胀变幅远大于收缩变幅, 红土层的膨胀变幅为其收缩变幅的 1.98 倍, 砂土层和碎屑层的膨胀变幅分别为其收缩变幅的 4.03 倍和 10.95 倍。通过对比不同土层的胀缩性能发现, 膨胀和收缩之间存在着发展不同步、胀缩变形不均衡, 表现为红土层的膨胀和收缩变化幅度最大, 分别较砂土层高 2.58% 和 3.33%, 较碎屑层高 3.61% 和 4.67%。说明随着土层深度的加深, 表层红土的胀缩性能最大, 砂土层次之, 碎屑层最小, 这与在野外实际观察到的现象是一致的。这种不可逆的胀缩现象可能是造成土体产生裂隙进而引起崩壁坍塌的原因。

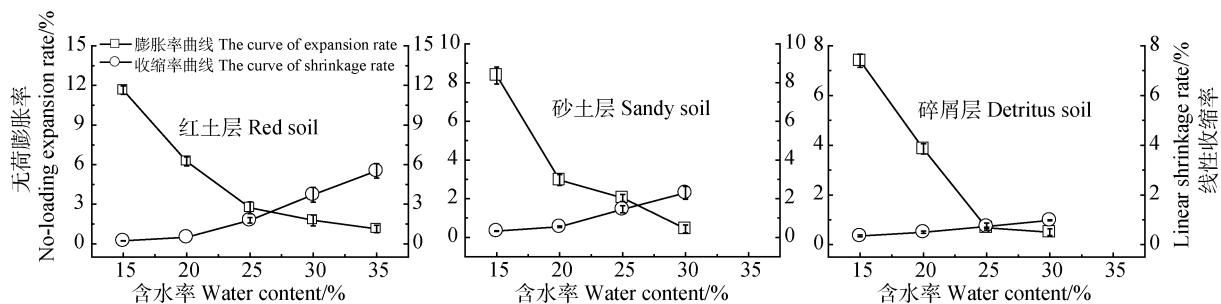


图 6 不同初始含水率条件下各土层最终胀缩率对比图

Fig. 6 Comparison between soil layers in final expansion and shrinkage rate relative to initial water content

有研究认为, 土壤胀缩变形是一对作用相反、能够互逆的过程。从前述膨胀时程曲线和收缩时程曲线中可知, 虽然膨胀曲线和收缩曲线在整体上具有一定的相似性, 但是其膨胀和收缩过程并不是一个完全可逆的过程。数学意义上膨胀过程的逆过程为收缩过程, 即膨胀曲线与收缩曲线为中心对称曲

线。从图 6 中同理可知, 红土层、砂土层和碎屑层所对应的随初始含水率变化的胀缩对比曲线均呈相互交叉状而非中心对称曲线, 这从数学意义上说明膨胀与收缩是一个不可逆的过程。另一个方面, 在初始含水率变化范围内, 红土层的最大胀缩差为 6.11%, 最大膨胀率为最大收缩率的 2.10 倍; 砂土

层的最大胀缩差为 6.07%，最大膨胀率为最大收缩率的 3.64 倍；碎屑层的最大胀缩差为 6.42%，最大膨胀率为最大收缩率的 7.55 倍。由此可说明，膨胀和收缩是不可逆的过程，同时也是不同步和不均衡的。

3 结 论

本试验通过室内无荷膨胀率和线性收缩率试验对安溪县崩岗区崩壁土体胀缩性能进行研究，总体上崩壁土体膨胀和收缩过程具有明显的相似性，均可大致划分为斜直线快速阶段-外凸弧线缓慢阶段-平直线稳定阶段三个不同过程。不同土层的无荷膨胀率均随初始含水率增大而减小，线性收缩率则相反。初始含水率与无荷膨胀率和线性收缩率之间均具有良好的指数关系，其中初始含水率与崩壁不同层次土壤无荷膨胀率之间存在着明显的指数递减关系。不同土层最大无荷膨胀率和最大线性收缩率均表现为红土层最大，砂土层次之，碎屑层最小，说明随着土层深度的增大，崩壁土体的胀缩性能逐渐降低。这种不可逆的胀缩现象是造成土体产生裂隙进而引起崩壁坍塌的原因。本试验以崩壁土体为对象，由于只考虑含水率变化对土壤胀缩特性的影响，仅从一个侧面揭示了崩岗土体的胀缩特性，因此后续还要在此基础上结合土体结构、胶体含量、矿物成分、上部载荷和干密度等内外影响因素进一步研究崩岗土体胀缩特性。

参考文献 (References)

- [1] Wu F Q, Zhang H J. Soil erosion[M]. Beijing: Science Press, 2012: 107—111. [吴发启, 张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 107—111.]
- [2] Lin J S, Zhu G L, Wei J, et al. Mulching effects on erosion from steep slopes and sediment particle size distributions of gully colluvial deposits[J]. *Catena*, 2018, 160: 57—67.
- [3] Jiang F S, Chen P J, Huang Y H, et al. Experimental study on erosion hydrodynamic characteristics of concentrated flow on soil-rock mixed colluvial deposit slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (6): 8—14, 99. [蒋芳市, 陈培济, 黄炎和, 等. 集中水流下土石混合崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (6): 8—14, 99.]
- [4] Wu Z F, Deng N R, Wang J Z. Erosion geomorphology and process in avalanching hill areas[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1999 (4): 10—12. [吴志峰, 邓南荣, 王继增. 崩岗侵蚀地貌与侵蚀过程[J]. 中国水土保持, 1999 (4): 10—12.]
- [5] Zhou H Y, Li H X, Ye Q, et al. Simulation of morphological development of soil cracks in the collapsing hill region of Southern China[J]. *Research of Soil and Water Conservation Research*, 2016, 23 (1): 338—342. [周红艺, 李辉霞, 叶奇, 等. 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (1): 338—342.]
- [6] Xia D. Research on stability of collapsing gully wall in granite region of South China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [夏栋. 南方花岗岩区崩岗崩壁稳定性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [7] Nowamooz H, Mrad M, Abdallah A, et al. Experimental and numerical studies of the hydromechanical behaviour of a natural unsaturated swelling soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46 (4): 393—410.
- [8] Tripathy S, Subba Rao K S. Cyclic swell-shrink behaviour of a compacted expansive soil[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27 (1): 89—103.
- [9] Schäffer B, Schulin R, Boivin P. Shrinkage properties of repacked soil at different states of uniaxial compression[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (6): 1930—1943.
- [10] Wang X L. Research on strength characteristics and constitutive relationship of strongly expansive soft-rock in Yanji basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. [王晓蕾. 延吉盆地强膨胀软岩强度特性及其本构关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.]
- [11] Liu Y Y, Su Y H, Cong W M, et al. Influence of initial water content on swelling characteristics of bentonite[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2017, 38 (5): 51—54, 59, 6. [刘宇翼, 苏运河, 从卫民, 等. 初始含水率对膨润土膨胀特性的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38 (5): 51—54, 59, 6.]
- [12] Huang C Q, Shao M A. Experimental study on soil expansion and shrinkage characteristics during dry and wet alternation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39 (6): 1243—1247. [黄传琴, 邵明安. 干湿交替过程中土壤胀缩特征的实验研究[J]. 土壤通报, 2008, 39 (6): 1243—1247.]
- [13] Zhang L J, Wu X, Zhang Y G, et al. Analysis of expansion characteristics of undisturbed expansive soil under no-load conditions[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2015, 42 (4): 96—100. [张连杰, 武雄, 张耀国, 等. 无荷条件下原状膨胀土膨胀特性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 96—100.]
- [14] Rao X B, Huang B, Wu Y G, et al. Experimental study of expansion characteristics of compacted expansive

- soil[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(2): 211—215. [饶锡保, 黄斌, 吴云刚, 等. 膨胀土击实样膨胀特性试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(2): 211—215.]
- [15] Allam M M, Sridharan. Effects of wetting and drying on shear strength[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1981, 107(4): 421—438.
- [16] Al-Homond A S, Basma A A, Husein Malkawi A I, et al. Cyclic swelling behavior of clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(7): 562—565.
- [17] Robert W Day. Swell-shrink behavior of compacted clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(3): 618—623.
- [18] Li X M, Wang Y H, Xiao H B, et al. Contrastive study on the characteristic of shrink-swell speed for compacted expansive soil [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2003, 25(2): 115—120. [李献民, 王永和, 肖宏彬, 等. 击实膨胀土胀缩速度特性的对比研究[J]. *铁道学报*, 2003, 25(2): 115—120.]
- [19] Wang X E, Tan X H, Xin Z Y, et al. Experimental study on shrinkage properties of expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(S2): 107—114. [汪贤恩, 谭晓慧, 辛志宇, 等. 膨胀土收缩性质的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(S2): 107—114.]
- [20] Hou L Q, Li J H. *Soil mechanics test*[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2012. [侯龙清, 黎剑华. *土力学试验*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]
- [21] Zeng J J, Wen C P, Bai Y Y, et al. Experimental study of impact of initial dry density and water content on free swell ratio of expansive soil[J]. *Journal of Road Construction Machinery and Construction*, 2017, 34(2): 80—84. [曾娟娟, 文畅平, 白银涌, 等. 初始干密度、含水率对无荷膨胀率影响试验[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2017, 34(2): 80—84.]
- [22] Chen J L, Zhou M, Lin J S, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies[J]. *Geoderma*, 2018, 317: 56—66.
- [23] Fan B X, Huang Y, Sun S J, et al. Study on cyclic swell-shrink characteristics of Yunnan laterite [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 120—127. [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.]
- [24] Zhang L J, Guo Y C, Dai C, et al. Experimental study on the effect of water content on the expansion and contraction performance of expansive soil[C]// *Proceedings of the Ninth National Engineering Geology Conference*, 2012. [章李坚, 郭永春, 代聪, 等. 含水率对膨胀土胀缩性能影响的试验研究[C] //第九届全国工程地质大会论文集, 2012.]

(责任编辑: 檀满枝)