

干湿循环对崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的影响

卫杰¹, 张晓明^{1,2}, 张鹤³, 陈梦兰¹, 杨彩迪¹, 牛玉华¹

(1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;
3. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对发育于花岗岩出露区的崩岗土体易受干湿循环影响导致大量崩壁失稳等问题, 通过开展一系列室内无侧限抗压强度试验, 研究崩岗不同层次土体在干湿循环作用下无侧限抗压强度的变化规律, 并且建立了在崩岗不同层次土体深度比和干湿循环次数共同影响下的无侧限抗压强度模型。结果表明: 表土层、红土层、斑纹层、碎屑层在第1次干湿循环后无侧限抗压强度衰减幅度最大, 分别为26%, 15%, 40%和49%; 在第2~4次干湿循环后无侧限抗压强度衰减幅度逐渐减小; 在第5次干湿循环后无侧限抗压强度基本保持不变; 随着干湿循环次数的增加, 崩岗不同层次土体无侧限抗压强度总体表现为表土层>红土层>斑纹层>碎屑层; 在不同干湿循环次数下, 崩岗不同层次土体的应力-应变曲线总体上呈应变软化型且应变为2%时达到峰值, 但红土层在3次干湿循环时的应力-应变关系曲线局部波动性较强; 无侧限抗压强度模型中预测值与实测值之间具有显著($R^2=0.91$)的相关关系, 该模型在预测干湿循环对通城地区崩岗不同层次土体无侧限抗压强度影响中具有较高的应用价值。

关键词: 干湿循环; 无侧限抗压强度; 应力-应变关系; 崩岗

中图分类号: S152.9; TU411.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)05-0107-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.018

Effects of Wet and Dry Cycle on Unconfined Compressive Strength of Different Layer Soils in Collapsing Gully

WEI Jie¹, ZHANG Xiaoming^{1,2}, ZHANG He³, CHEN Menglan¹, YANG Caidi¹, NIU Yuhua¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation, Middle and Lower Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture, Wuhan 430070; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on issues like instability of collapsing gully wall caused by the development of granite exposed areas which vulnerable to the impact of wet and dry cycles, by a series of unconfined compressive strength test, we determined variation patterns of the unconfined compression strength under wet and dry cycle at different layer soils in collapsing gully, and established a predictable model of unconfined compressive strength combined of soil depth ratio and dry wet cycles at different levels of soil collapse. The results showed that: The unconfined compression strength at surface soil layer, red soil layer, speckle layer, detritus layer decreased most after 1st wet and dry cycle, of 26%, 15%, 40% and 49%, respectively; the decrease slowed down after the 2nd to the 4th wet and dry cycle; the unconfined compression strength remained stable after the 5th wet and dry cycle; with the increase of wet and dry cycles, the unconfined compression strength of dilapidated granite at different soil level generally performed as surface soil layer>red soil layer>speckle layer>detritus layer; under different wet and dry cycle times, the stress-strain relation curve tended to soften and reached the peak at 2% strain, but at red soil layer, the fluctuation tended to be intense after the 3rd wet and dry cycle; the predicted value of the unconfined compression strength correlated with measured value significantly ($R^2=0.91$), the model had certain value forecasting wet and dry cycles on unconfined compressive strength of different layer soils in collapsing gully in Tongcheng areas.

Keywords: wet and dry cycles; unconfined compressive strength; stress-strain relation curve; collapsing gully

收稿日期: 2016-05-09

资助项目: 国家自然科学基金(青年基金)(41201271); 华中农业大学“国家级大学生创新创业训练计划”(105042016015); 华中农业大学“大学生科技创新基金(SRF)”(2016076)

第一作者: 卫杰(1990—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事崩岗稳定性研究。E-mail: weijie82027@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

崩岗是指在水力和重力的综合作用下,山坡土(石)体受破坏而崩坍和受冲刷的侵蚀现象,属于水力—重力复合侵蚀类型^[1]。崩岗广泛分布在广东、福建、江西和湖北等地。目前对崩岗崩壁不同层次土体力学特性的研究已引起国内学者的广泛关注。林金石等^[2]研究不同剪切方式下崩岗红土层抗剪强度随水分变化规律,结果表明在三轴剪切试验和直剪试验中黏聚力和内摩擦角随水分变化趋势基本一致,但具体试验结果存在一定的差异;陈晓安等^[3]研究花岗岩地区崩岗侵蚀与岩土力学性质的关系,结果表明土壤压缩性大、抗剪强度低的岩土力学性质决定了崩岗的大规模发育;魏玉杰等^[4]研究崩岗体剖面不同层次土壤的收缩特性,结果表明崩岗土体收缩过程受土壤质地及土壤基质吸力的综合影响;林敬兰等^[5]研究水分对崩岗不同层次土体抗剪强度的影响,结果表明在较低水分含量时,随着水分增加抗剪强度增强,在水分含量超过一定值后,抗剪强度随水分增加而迅速下降;张晓明等^[6]研究湖北通城崩岗不同层次土体的抗剪强度衰减机理,结果表明土壤黏聚力和内摩擦角随干湿变化呈非线性衰减趋势。以上学者仅在崩岗侵蚀区土体抗剪强度、压缩性、收缩性等方面进行研究,但在崩岗土体无侧限抗压强度特征方面鲜有报道。

崩岗土体在无侧向约束的条件下,抵抗轴向压力发生剪切破坏的极限强度称为无侧限抗压强度,是反映土体力稳性的重要指标之一。作为中国南方花岗岩地区水土流失的一种特殊类型,典型崩岗主要发育于热带、亚热带地区的花岗岩出露区,现实中会产生剧烈的干湿循环变化(如雨旱交替),引起崩岗土体强度衰减、稳定性降低,进而导致大量崩岗失稳,致使崩岗侵蚀发生、发展^[7]。因此,进行干湿循环作用对崩岗侵蚀区土体无侧限抗压强度影响的试验研究,不仅对崩岗稳定性评价、侵蚀机理的发展具有重要意义,也是科学开展崩岗侵蚀治理的工程实践需要。

本文以湖北省咸宁市通城县崩岗崩壁不同层次土体为研究对象,通过一系列干湿循环作用下的无侧限抗压强度试验,探讨了崩岗土体无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化规律,并对变化的机理进行分析。同时,建立了干湿循环作用下崩岗不同层次土体无侧限抗压强度预估模型,为研究崩岗发生机理和预防治理工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样

研究区位于湖北省东南部咸宁市通城县的湘、鄂、赣 3 省交界处,该县崩岗数量达 1 100 多处,占湖北省崩岗总数的 47%,是崩岗集中分布的典型区域。全县四季分明,属于亚热带季风气候,光照适中,雨量充沛,平均气温为 16.7 ℃,年平均降水量 1 512.8

mm,多年平均径流深 795 mm,无霜期 260 d。覆盖植被类型为常绿阔叶与落叶阔叶混交林为主。土壤类型为棕红壤,结构比较松散^[8]。

经过野外调查,于 2014 年 8 月在通城县五里镇五里社区(116°46′26″E,29°12′39″N)的典型崩岗发生区进行采样,该崩岗属于瓢型崩岗,侵蚀沟 1 条,沟道长 17 m,沟口宽 2.9 m,崩壁高 9 m,崩岗面积 126 m²。根据崩岗崩壁剖面自上而下按照不同深度比 $\lambda = h/h'$ (式中: h 表示取样深度分别为 0.17,2.27,7.25,8.75 m; h' 表示崩壁高为 9 m)分为 4 个土壤层次:表土层(含根)、红土层(少或无根)、斑纹层(红土层至半风化层的过渡层,呈现红白相间的状态)和碎屑层(白色)。用环刀(20 cm²×5 cm)取原状土,采样后迅速将环刀试件放入塑封袋内密封包装,并在崩壁 4 层土壤最典型的中部采集代表性土壤约 1 kg 左右放入自封袋内,最后将采集的散状土样放入取样袋内,风干后按基本性质分析要求粉碎过筛,其中过 1 mm 孔径作为化学分析之用,过 2 mm 孔径作为物理分析之用。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,游离氧化铁采用 DCB 法,机械组成采用筛分法结合移液管法,以上试验 3 次重复^[9]。

1.2 试验仪器与试样制备

试验仪器:南京土壤仪器有限公司生产的应变控制式无侧限压力仪(型号 YYW-2),仪器主要指标为:轴向剪切速率 2.4 mm/min,最大测力 0.6 kN,量力环系数 $C = 2.4 \text{ N}/0.01 \text{ mm}$ 。剪切至轴向应变为 15% 结束,各个试验应于 8~10 min 完成。

试样制备:将风干土样混匀碾碎后经过孔径为 2 mm 的筛,按照野外调查结果,用预定的制样含水率和干密度计算制样所需的湿土质量,搅拌均匀后用保鲜袋密封并置于保湿缸内 24 h,以便土体中的水分均匀分布。重塑土试样分为 4 层装置,即每层土体质量为总质量的 1/4,将保湿后的土体倒入三瓣桶中并锤击,使土颗粒相对密实;每装完一层先用直尺测量其高度,每层高度为总高度的 1/4,确保试样直径为 39.1 mm,高度为 80 mm。合计制样:4 层土×4 次重复+4 层土×5 次干湿循环×4 次重复=96 个。

1.3 试样干湿循环过程

为了更好地模拟通城县五里镇五里社区的实际环境,试验根据该区域年平均降水、蒸发量选定试样干湿循环所经历的含水率(设定 ω_{\max} 为饱和含水率, $\omega_{\min} = 10\%$),控制实验室温度为 20 ℃ 左右。具体操作:(1) 增湿过程:将试样用真空泵抽真空方法进行饱和^[10],使其含水率达到 ω_{\max} ,完成后密闭静置 24 h,即为一次增湿过程。(2) 干燥过程:将抽气饱和后的试样在室内自然风干,在此过程中反复称重并计算含水率,直至达到最小含水率 ω_{\min} ,完成后静置 24 h,即为一次干燥过程。(3) 经过上述步骤后试样完成

了一次干湿循环,重复以上步骤可完成多次干湿循环作用。结合试验过程中干湿循环后试样无侧限抗压强度的实际变化情况,崩岗4层土体试样分别进行0~5次干湿循环过程。

1.4 数据处理

根据试验所得数据,计算第*i*次干湿循环作用后试样的无侧限抗压强度 q_{ui} ,并绘制试样的应力—应变关系曲线。

$$q_{ui} = \frac{\sigma_i}{A_a} \quad (1)$$

式中: σ_i 为第*i*次干湿循环作用后试样所受的极限轴向应力(kPa); A_a 为校正后的试样横断面积(mm²)。

采用Microsoft Excel 2010和Origin 9.0软件对试验数据进行处理、作图以及SPSS19.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 崩岗不同层次土壤基本性质

从表1可以看出,崩岗不同层次土壤基本性质有

表1 崩岗不同层次土壤基本性质

土壤层次	含水率/ %	容重/ (g·cm ⁻³)	游离氧化铁/ (g·kg ⁻¹)	黏粒 含量/%	粉粒 含量/%	砂粒 含量/%
表土层	20.16±1.97 a	1.37±0.05 a	26.99±0.27 c	38.18±1.04 c	29.53±0.91 b	32.28±0.92 b
红土层	24.25±0.42 b	1.36±0.03 a	35.71±0.49 d	45.57±1.31 d	31.12±1.02 b	23.31±0.93 a
斑纹层	27.57±0.19 c	1.39±0.01 ab	22.21±0.36 b	34.81±0.95 b	24.17±0.98 a	41.02±1.01 c
碎屑层	26.06±0.69 bc	1.44±0.03 b	15.71±0.23 a	22.89±0.83 a	33.46±1.01 c	42.46±0.89 c

注:数据采用Duncan检验,同列相同字母表示差异不显著($P<0.05$)。

2.2 干湿循环作用下无侧限抗压强度变化规律

从图1中可以看出,崩岗4层土体的无侧限抗压强度均随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减,直至最后趋于稳定。其变化规律大致可分为3个阶段:(1)急速衰减,主要集中在干湿循环1次时,该阶段4层土体的无侧限抗压强度衰减幅度最大,均达到了15%以上。这是因为试样在较短时间内制成,土壤颗粒之间的排列可能并不是很稳定,在干湿循环作用下,颗粒会产生重新排列以达到内部的平衡,而这种平衡会改变土体中孔隙的大小和形状,同时由于局部某些黏粒会吸附于大颗粒上,也会改变土体的孔隙^[11],而孔隙是影响基质吸力的主要因素;另一方面,试样在增湿干燥过程中产生大量的裂隙,使得土体中的胶结物质遭到破坏^[12-16],其胶结作用而形成的加固凝聚力降低。因此试样本身对土壤颗粒的侧向约束作用减弱,同时,在第1次干湿循环后,试样裂隙发育的数量最多,因而导致了此阶段内无侧限抗压强度的急剧衰减,其中碎屑层的无侧限抗压强度衰减幅度最大,达到了49%。(2)减速衰减,主要集中在干湿循环2~4次,此阶段随着干湿循环次数的增加,4层土体的无侧限抗压强度衰减幅度逐渐减小,表土

一定的差异。土壤颗粒组成变化规律为从红土层开始随着采样深度的增加,砂粒含量不断增加,而黏粒含量则不断减少,主要原因是在径流冲刷作用下,水分不断把表土层土壤的细颗粒带到红土层,同时表土层和红土层风化程度强,受到外界条件(温度、生物等)影响较大,促进了花岗岩土壤中长石等容易风化的矿物分解,导致黏粒含量有增加的趋势。黏粒含量高的土壤粘结性好,持水性能强,排水性能差,在雨后很长一段时间内能够保持较高的含水量。砂粒含量高导致土壤结构松散,透水性较好,但抗蚀抗冲能力较差。从崩岗土层总体来说,表土层和红土层土壤粘重致密,不易被侵蚀,而斑纹层和碎屑层松散、粘结性弱、水稳性差,一旦被破坏暴露,在地表径流和重力的共同作用下,极易崩坍形成崩岗。此外,游离氧化铁指标也存在差异,即红土层明显高于其他3个土壤层次,主要是因为表土层径流的冲刷作用、斑纹层长期的水分运动和碎屑层剧烈的风化作用,导致了游离氧化铁的大量流失。

层、斑纹层和碎屑层在第2,3,4次干湿循环后,衰减幅度远小于第1次的干湿循环后无侧限抗压强度的衰减幅度(26%,40%和49%)。这是因为第1次干湿循环后,所剩下的小部分胶结物质因“失活”对土体的无侧限抗压强度影响不大,因此无侧限抗压强度衰减幅度减小。但红土层的衰减幅度却略小于第1次干湿循环后无侧限抗压强度的衰减幅度(15%),这是由于红土层黏粒含量高,其特殊的双电层结构,具有很强的吸水性;同时红土层中游离氧化铁含量高,会在土壤颗粒表面形成“包膜”,能吸附土水体中的负离子,水膜厚度也随之增加,颗粒之间的胶结作用减弱^[17-18],使得红土层的衰减幅度较表土层、斑纹层和碎屑层高。(3)衰减稳定,主要集中在第5次干湿循环时,此时4层土体的无侧限抗压强度已经基本稳定,衰减幅度很小,试样的残余强度值也较小,即干湿循环的继续进行对无侧限抗压强度的影响很小。这是因为当干湿循环幅度较大时,试样会形成一条主裂隙,同时次生裂隙呈网格状分布,经过前面2个阶段的干湿循环后,裂隙的发展进入稳定阶段,无侧限抗压强度衰减稳定。因此,在崩岗治理过程中可以通过改善土壤质地和结构、减缓增湿干燥过程中水分的剧

烈变化,从而减少干湿交替天气中土体裂隙的产生、提高土体稳定性。

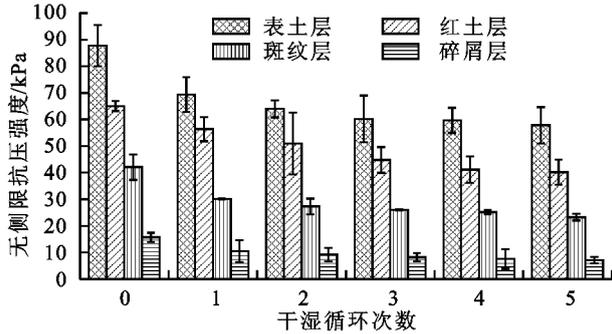


图 1 无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化规律

2.3 干湿循环作用下试样的应力—应变关系曲线

从图 2 可以看出,在不同干湿循环次数下,崩岗 4 层土体的应力—应变曲线总体上呈应变软化型,且由上升、下降、平缓 3 段组成。上升段对应的应力随应变的增加呈线性增加,且增加的速度基本相当,当应变达到某一临界值(2%)时,应力达到峰值;下降段对应的应力随应变增加而迅速降低,这是因为试样在达到抵抗破坏的极限应力后,继续增加外部荷载使试样产生大量的裂隙,由于裂隙的存在,造成了大的土团粒分解,破坏了试样的整体性,因而强度迅速降低;平缓段对应的应力随着应变的增加基本保持不变,在 5 次干湿循环后,红土层、斑纹层和碎屑层的试样残余强度均达到最小,分别为 6.80 kPa, 2.27 kPa, 1.17 kPa, 但表土层的试样残余强度并未达到最小值,这

可能与表土层中残留的植物碎屑有关。因此,在实际的水土保持工程中,应做好崩岗的防水、排水等有关措施,防止因为干湿循环作用而导致崩岗岩土无侧限抗压强度衰减。此外,尽管干湿循环过程中崩岗 4 层土体的应力—应变关系曲线变化趋势明显,但红土层的应力—应变关系曲线在第 3 次干湿循环时局部波动性较强,这可能因为:干湿循环作用下,红土层结构出现非均匀性损伤,进而产生非均匀裂隙,使得强度特性存在明显的尺寸效应,特别是其不可逆的体积收缩导致土体中存在大量的宏观裂隙^[19]。而本文所制备的试样已经小于裂隙土体的特征单元,导致土体的非均匀性损伤信息无法被该尺寸试样完全包含,使得结果具有一定的随机误差。

从图 2 还可看出,在不同干湿循环次数下崩岗 4 层土体的峰值强度总体表现为表土层 > 红土层 > 斑纹层 > 碎屑层,这可能与各土层的质地类型和物质成分有关。在崩岗各土层中,表土层由于含有一定量的植物碎屑以及较多的黏粒;红土层中虽然黏粒含量高,但孔隙发达,在干湿循环作用下水分首先通过孔隙入渗,致使土粒内部产生不均匀应力;碎屑层由于风化不完全,粗颗粒含量高,土体较为疏松,土粒之间的咬合力较小;而斑纹层介于红土层和碎屑层之间,其峰值强度也介于二者之间。因此,在今后崩岗土体边坡稳定性评价和土壤侵蚀预测中应考虑不同层次土体强度的差异性。

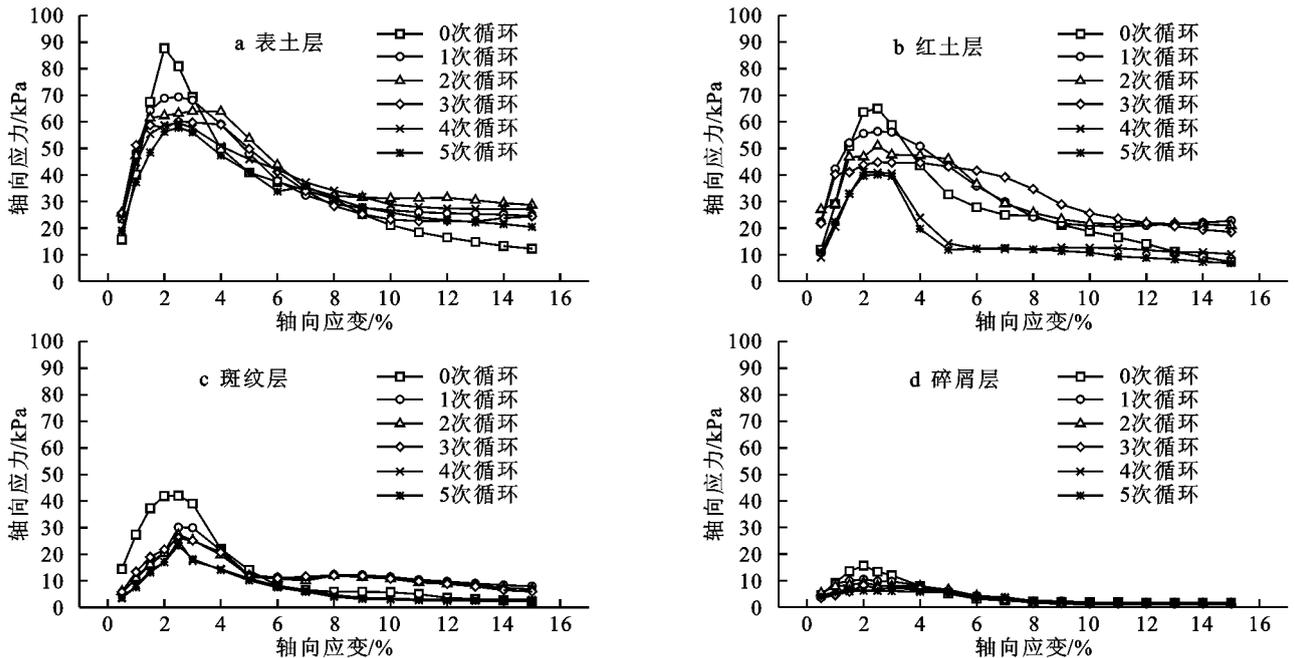


图 2 干湿循环作用下不同层次土体的应力—应变关系曲线

2.4 干湿循环影响的无侧限抗压强度预估模型的建立

结合无侧限抗压强度试验结果,对无侧限抗压强度与干湿循环次数进行拟合,其结果如表 2 所示。可以看出,在崩岗不同层次土体中,无侧限抗压强度 q_{ui}

与干湿循环次数 i 之间均满足较好的指数函数关系:

$$q_{ui} = a \cdot \exp(-bi) + c \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为受崩岗不同层次土体深度比 λ 影响的系数, a 、 b 、 c 的取值如表 3 所示。

表 2 不同层次土体无侧限抗压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	$y=29.21 \exp(-0.91x)+58.35$	0.99
红土层	$y=32.54 \exp(-0.31x)+32.57$	0.99
斑纹层	$y=17.52 \exp(-x)+24.39$	0.98
碎屑层	$y=8.32 \exp(-0.83x)+7.27$	0.98

表 3 崩岗不同层次土体深度比下的 a 、 b 、 c 取值

不同层次 土体深度比 λ	拟合参数			
	a	b	c	R^2
0.02	29.21	0.91	58.35	0.99
0.25	32.54	0.31	32.57	0.99
0.81	17.52	1.00	24.39	0.98
0.97	8.32	0.83	7.27	0.98

利用最小二乘法原理,得出拟合参数与深度比 λ 的有关函数,其决定系数 R^2 均在 0.9 以上,具体数学表达式为:

$$a = -48.8\lambda^2 + 25.9\lambda + 28.5 \quad R^2 = 0.99 \quad (3)$$

$$\ln b = 0.5(\ln \lambda)^2 + 2.6 \ln \lambda + 1.8 \quad R^2 = 0.93 \quad (4)$$

$$c = -11.4 \ln \lambda + 14.9 \quad R^2 = 0.91 \quad (5)$$

简化公式(4)可得:

$$b = 6\lambda^{2.6+0.5\ln \lambda} \quad (6)$$

将公式(3)、公式(5)和公式(6)代入公式(2)中,得到考虑干湿循环影响下崩岗不同层次土体的无侧限抗压强度预估模型为:

$$q_{ui} = (-48.8\lambda^2 + 25.9\lambda + 28.5) \cdot \exp((-6\lambda^{2.6+0.5\ln \lambda})i) + (-11.4 \ln \lambda + 14.9) \quad (7)$$

式中: $\lambda=0.02, 0.25, 0.81, 0.97$; $i=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 。

为了进一步验证最终建立的预估模型的精确性,将计算参数 λ 、 i 代入公式(7)中,得到了无侧限抗压强度的预测值,并以此为纵坐标,以无侧限抗压强度试验所得实测值为横坐标,得到预测值与实测值之间的散点图关系式: $y=0.98x+0.15$, $R^2=0.91$,可以看出无侧限抗压强度预测值与实测值有显著的相关关系,这说明通过模型所得预测值与实测值较为接近,因此建立的预估模型具有较高的精确性。

3 结论

(1) 崩岗不同层次土体的无侧限抗压强度均随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减,直至最后趋于稳定,其变化规律大致分为 3 个阶段:急速衰减,减速衰减,衰减稳定,即表土层、红土层、斑纹层、碎屑层在第 1 次干湿循环后无侧限抗压强度衰减幅度最大,分别为 26%, 15%, 40% 和 49%,在第 2~4 次干湿循环后无侧限抗压强度衰减幅度逐渐减小,在第 5 次干湿循环后无侧限抗压强度基本保持不变;随着干湿循环次数的增加,崩岗 4 层土体无侧限抗压强度总体表现为表土层 > 红土层 > 斑纹层 > 碎屑层。因此,在崩岗综

合治理过程中应考虑不同层次土体强度的差异性。

(2) 在不同干湿循环次数下,崩岗不同层次土体的应力—应变关系曲线总体上呈应变软化型,呈“单峰”变化趋势。此外,由于干湿循环作用下造成土体的非均匀性损伤,进而产生非均匀裂隙,导致红土层的应力—应变曲线在第 3 次干湿循环时出现局部波动性,使得红土层无侧限抗压强度特性存在一定的尺寸效应。

(3) 崩岗不同层次土体无侧限抗压强度与干湿循环次数之间均呈较好的指数函数关系,且通过考虑崩岗不同层次土体深度比和干湿循环次数的共同影响,建立了无侧限抗压强度的预估模型。本文提出的预估模型仅适用于通城地区崩岗不同层次土体,后期还需在使用和实践中进一步验证和改进。

参考文献:

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 80-82.
- [2] 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.
- [3] 陈晓安, 杨洁, 熊永, 等. 红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1175-1181.
- [4] 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.
- [5] 林敬兰, 黄炎和, 张德斌, 等. 水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 55-58.
- [6] 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.
- [7] 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, 34(S2): 299-305.
- [8] 卫杰, 张晓明, 丁树文, 等. 黄麻纤维加筋条件对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 59-63.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [11] 袁志辉. 干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [12] Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. Applied Clay Science, 2011, 52(1): 69-77.
- [13] Take W A, Bolton M D. Seasonal ratcheting and softening in clay slopes, leading to first-time failure[J]. Géotechnique, 2011, 61(9): 757-769.
- [14] Li J H, Zhang L M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface[J]. Engineering Geology, 2011, 123(4): 347-358.