

干湿循环下常春藤根系对云南红土的阻裂效应

朱维伟¹,冯国建¹,谭洋洋²

(1.昆明学院建筑工程学院,云南昆明 650214;2.昆明学院美术与艺术设计学院,云南昆明 650214)

摘要:为研究常春藤根系对云南红土经历干湿循环作用后裂缝扩展的效应,为边坡生态防护提供参考依据,取典型云南红土土料和常春藤根系,配制一定含水率的云南红土,分别制作纯红土击实试样和不同根系掺量的混合土击实试样,试样压实系数为94.4%。在室内用喷淋和自然风干的方式模拟工程中的红土经历多次降水与蒸发这一干湿循环过程,对经历1—8次循环次数的试样进行裂缝宽度测定并对各组试样的平均最大裂缝宽度值进行统计分析。结果表明:纯红土试样在经历第1次干湿循环后即有微裂缝发育,经历多次干湿循环后,裂缝宽度逐渐增大,在第4次干湿循环后最大裂缝达到毫米级宽度,第6次干湿循环后裂缝扩展趋于稳定;掺10%和20%根系时,第1次干湿循环后就显示出明显的阻裂效应;掺30%根系时,在第4次干湿循环后才显示出较弱的阻裂效应;第8次干湿循环后,掺10%、20%和30%根系试样的平均最大裂缝宽度为纯红土试样的17%、17%和82%,统计分析表明,20%掺根量时阻裂效果最优。

关键词:云南红土;干湿循环;常春藤根系;阻裂效应

中图分类号:Q947 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0107-05

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2022.02.015



红土是富含铁质的母岩在湿热气候条件下经历风化、微团粒化及成土3个完整的作用过程后形成的以红色为基色的土体^[1]。云南是我国红土最为发育的地区之一。云南红土是一种特殊土,虽然云南各地红土的性质不完全相同,但均具有黏粒含量高、液限高、天然孔隙比大、渗透系数低、膨胀性较弱而收缩性较强等特点^[2-4]。随着一大批铁路、高速公路项目的开工,云南面临大量的红土边坡工程问题,施工完成的红土边坡必然经历干湿循环这一往复过程。在当前提倡生态护坡的背景下,研究典型护坡植物根系在干湿循环效应下对云南红土的阻裂效应十分必要。

赵贵刚等^[5]采用自来水浸泡增湿、低温脱湿的方

法,朱维伟^[6]采用自来水喷淋、自然风干的方法对云南红土试样进行了研究,结果表明,经历干湿循环后,云南红土将有裂缝发育,裂缝会随循环次数的增加而扩展,进而可能产生严重的水土流失乃至边坡失稳。冯国建^[7]、Liffena^[8]、Joanne^[9]等测试了植物根系的力学性能,表明植物根系本身具有较高的抗拉及抗剪强度。在一定含根量下,根土复合体的抗剪强度高于素土^[10-11],植物根系对边坡浅层有一定的加固效应^[12]。因云南红土具有膨胀性弱而收缩性强的土体特性,研究常用护坡植物根系的阻裂效应尤其重要,而这方面目前还鲜有研究。

鉴于此,本研究通过一种相对简单合理的室内重塑土试验,模拟云南红土经历自然界降水和蒸发的往复过程,以期直观反映纯云南红土及掺常春藤根系的根系—红土混合土在干湿循环过程中裂缝的发生与扩展现象,阐释常春藤根系对红土裂缝扩展的约束效应,同时讨论常春藤根系对干湿循环后云南红土的阻裂机制。研究结果将对云南红土防护工程提供理论参考。

1 材料和方法

取云南红土土料风干并碾碎,取典型护坡植物常

收稿日期:2021-04-07;修回日期:2021-04-14

基金项目:云南省基础研究计划面上项目(202101AT070144);云南省教育厅科学研究基金项目(2021J0717)

作者简介:朱维伟(1981-),男,云南石屏人,博士,副教授,主要从事公路边坡工程的研究。

E-mail:zwswfc@126.com

春藤(*Hedera nepalensis*)根系。控制根系占击实筒的体积分数,以体积分数为0%(纯红土)、10%、20%、30%作为含根量控制标准,配制云南红土、根系的混合土(拌和均匀),将混合土投入击实筒中,按重型II—1试验方法^[13]将混合土击实。击实完成后,用钢丝锯截取混合土样,每种含根量截取3个样本,进行8次干湿循环,并用裂缝观测仪观测每次干湿循环后各样本的

表1 红土土壤物理性质

Table 1 Basic physical properties of lateritic soil

天然湿密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土粒相对密度 G_s	土壤含水率 $\omega/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P
1.76	2.64	29.2	52.0	28.0	25

纯红土试样制备:本次试验土壤含水率 $\omega=21\%$ 制备土料,将备好的土料密封于塑料袋中闷料 24 h,以保证土壤含水率均匀。然后将土料置于击实筒(内径 100 mm,高 127 mm)中击实,击实后的土体干密度 $\rho_d=1.53 \text{ g/cm}^3$,相应的压实系数为 94.4%。用千斤顶缓慢将击实筒中的土样升起,再用钢丝锯小心截取厚度为 20 mm 的土饼试样,按此方法共制备纯红土试样 3 个。

含根系的混合土制备:将常春藤根系洗净后自然风干 8 h,测定根系密度;将根系剪短,控制每根根系的长度不超过击实筒内径的 2/3,根系直径不超过 2 mm;按体积分数为 10%、20%、30%作为含根量控制标准,配制云南红土与常春藤根系的混合土,将混合土拌和均匀,投入击实筒中击实。用千斤顶缓慢将击实筒中的混合土体升起,再用钢丝锯小心截取厚度为 20 mm 的土饼试样,按此方法共制备混合土试样 9 个。考虑到击实过程会破坏击实筒中的表层根系,击实完成后,击实筒中上部 5 cm 高范围内的混合土弃用。

考虑到红土工程对象在自然中不可能经历绝对的“干”和“湿”的循环效应,本次试验的干湿循环也不是绝对的“干”和“湿”,而是在实验室内模拟云南红土在自然界中的增湿与脱湿过程。本次采用“干”的控制标准为:将土饼试样置于实验室内自然风干 48 h。“湿”的控制标准为:(1)用带针的注射器吸水后缓慢喷淋至试样表面(针头至试样表面距离 1 cm,喷淋速度控制为 0.5 mL/s),使试样表面被水覆盖,试样将水吸收后继续喷淋,直至 5 min 后水面不下降;(2)若试样表面

最大裂缝宽度,对数据进行分析后评价常春藤根系对云南红土干湿循环裂缝扩展的约束效应。

试验所取红土土料干燥时呈棕色,浸水后呈红褐色。其颗粒组成为黏粒占 41.25%,粉粒占 47.93%,砂粒占 10.82%,土壤物理性质指标见表 1。由标准击实试验确定的最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.62 g/cm^3 ,最佳含水率 ω_{op} 为 17.8%。

喷淋的水在 5 min 内被吸完,则喷淋至试样底部有自由水渗出。

2 结果与分析

纯红土试样经历 2,4,8 次干湿循环后,其表面发展的裂隙清晰可见。所有纯红土试样在经历第 1 次干湿循环后即有环形微裂缝发育,经历多次干湿循环后,裂缝宽度逐渐增大,初期形成的环形裂缝逐渐向周边放射,在第 4 次干湿循环后最大裂缝达到毫米级宽度。第 8 次干湿循环后裂缝扩展趋于稳定,宽度不再增加(图 1)。

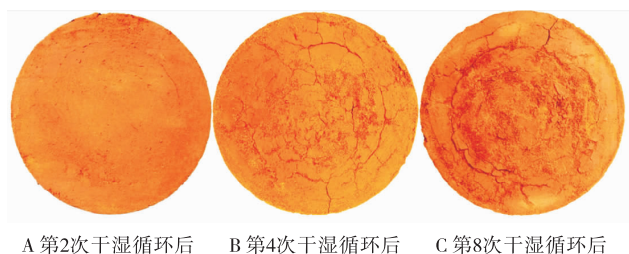


图1 纯红土试样裂缝扩展

Fig. 1 Crack expansion of pure laterite samples

掺常春藤根系的混合土经历 2,4,8 次干湿循环后的裂缝扩展情况表明,常春藤根系可以有效地约束云南红土的裂缝扩展,根系较高的抗拉强度承受了较大的胀缩应力。掺入常春藤根系后,混合土试样在干湿循环的裂缝形态完全不同于纯红土试样,多呈不规则的短裂缝,不再出现明显的环形裂缝,其机制可能是由于根系的占位,改变了试样脱湿过程中的收缩轴,即试样不再是整体沿中心均匀地收缩(图 2)。

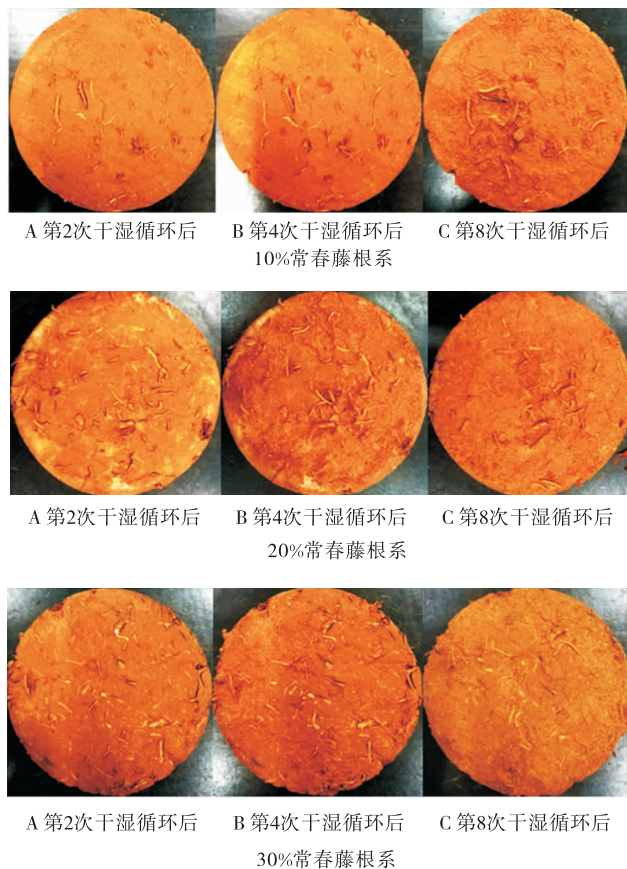


图 2 掺常春藤根系的混合土试样裂缝扩展

Fig. 2 Crack expansion of composite soil samples mixed with *hedera nepalensis* root systems

用 100 倍裂缝观测仪读取各试样的最大裂缝宽度, 可得试样在经历 0—8 次干湿循环后的平均最大裂缝宽度及其变化趋势, 掺 10% 和 20% 常春藤根系时, 从第 1 次干湿循环后就显示出阻裂效应; 而掺 30% 常春藤根系时, 在第 4 次干湿循环后才显示出阻裂效应。经历第 8 次干湿循环后, 掺 10%、20% 和 30% 根系试样的平均最大裂缝宽度为纯红土试样的 17% (0.29 mm/1.68 mm)、17% (0.29 mm/1.68 mm) 和 82% (1.37 mm/1.68 mm) (图 3)。

用 SPSS 软件对图 3 中的 4 组数据进行非参数检验。从 4 组的平均秩次判断, 3 个掺根系组的平均最大裂缝宽度均小于纯红土组, 而 10%、20% 根系组裂缝宽度较小, 30% 根系组裂缝宽度较大。掺 20% 常春藤根系组对试样裂缝扩展的约束效应最显著 (表 2)。

3 讨论

干湿循环下纯红土试样的裂缝发展过程如下: 第 1 次干湿循环过程为裂缝发育期, 纯红土试样的增湿

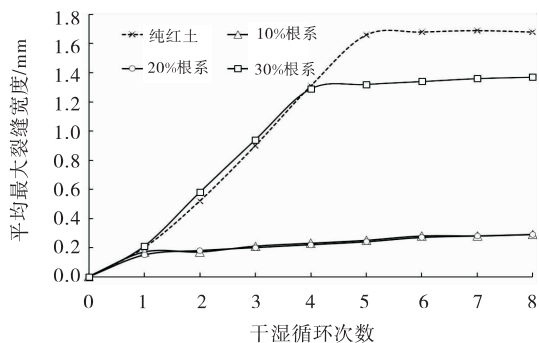


图 3 干湿循环后试样的平均最大裂缝宽度

Fig. 3 Average maximum crack width of samples after dry-wet cycle

表 2 四组试样最大裂缝宽度非参数检验结果

Table 2 Nonparametric test results of maximum crack width of four groups of samples

检验统计量	数值	组别	平均秩次
N(样本)	8	纯红土组	3.62
Chi-square(卡方)	20.462	10%根系组	1.75
Df(自由度)	3	20%根系组	1.25
Asymp. Sig.(近似 P 值)	0.000	30%根系组	3.38
Exact Sig.(精确 P 值)	0.000		
Point probability(点概率)	0.000		

只在原样的孔隙间发生, 增湿效应使红土吸水, 脱湿效应在于迁出孔隙中的水分, 但仍会造成红土的含水率不同, 软化红土颗粒间的连接, 以致试样出现微裂缝。第 2—4 次干湿循环过程为裂缝扩展期, 经历过裂缝发育过程后, 纯红土试样吸水增湿的主要效应在于增大红土颗粒间的水膜厚度, 引起红土膨胀开裂; 脱湿的主要效应在于减小红土颗粒间的水膜厚度, 引起红土的失水收缩开裂, 微裂隙逐渐发展成宏观裂缝。第 5 次干湿循环以后为裂缝稳定期, 纯红土试样吸水增湿的主要作用是充填裂缝; 脱湿的主要作用在于减小裂缝中红土颗粒间的水分。

试验结果表明, 不同含根量对云南红土干湿循环后的裂缝扩展具有不同的约束效应。掺 10% 和 20% 常春藤根系均能显著约束云南红土干湿循环后的裂缝扩展, 且二者的约束效应几乎相同。在经历第 8 次干湿循环后, 掺 10% 和 20% 根系试样的平均最大裂缝宽度仅为纯红土试样的 17%。一方面, 植物根系有较高的抗拉强度^[8,14], 随机分布在土样中, 在红土吸湿膨胀和脱湿收缩过程中分担了较高的胀缩应力, 且不至大规模地破坏红土颗粒间的原样联结; 另一方面, 笔者将常春藤根系与黄茅、狗牙根等根系进行了表面光滑程

度对比,发现常春藤根系表面较粗糙^[15],能与红土颗粒形成较好的摩擦联结,根土复合体的整体性较强。掺30%常春藤根系亦能约束云南红土的裂缝扩展,但这种阻裂效应明显弱于10%或20%掺量,可能的机制是过多的根系大规模地切断了原样红土颗粒间的有效联结,使根土混合体的整体性变弱,反而降低了其阻裂能力。文献^[16]的研究也认为根系增强土体强度存在最优含根量。因此,不能也没必要一味地追求高密度种植。

试验揭示了纯红土试样随干湿循环次数的增加而出现的裂缝产生与扩展现象,也揭示了常春藤根系对红土的阻裂效应。本研究采用的试验方法,仍存在着一些不合理的因素,如制样过程中的人为扰动、试样尺寸偏小、将根系与红土一起进行了压实处理等。另外,有研究表明,实际根土复合体中的毛细根系及其生物活性对土体的加筋效应优于人为添加在土中的根系^[17]。但是,本研究的试验方法具有试样尺寸、密实程度、含水率等容易控制的优点。考虑到目前云南红土开裂及根系阻裂研究的实际困难,笔者采用的方法还是值得推荐。该试验方法使得借助常规试验仪器,研究植物根系对云南红土经历干湿循环后裂缝扩展的约束效应成为可能,从而为云南红土工程问题分析提供相对合理有效的依据。而一些研究表明,根系形态^[18-19]以及细胞壁成分^[20]等也会影响固坡效应,因此,今后可多学科联合,深入研究不同植物根系及其分布形态对云南红土在不同干湿循环控制条件以及大尺寸试样条件下裂缝扩展约束效应。

4 结论

1)使用一种较合理的简单试验方法,测试了干湿循环过程中纯云南红土以及掺常春藤根系的混合土的最大裂缝宽度。试验反映了纯云南红土以及掺根系的混合土在干湿循环过程中裂缝的发生、扩展现象。

2)干湿循环条件下,含根量会影响常春藤根系对云南红土的阻裂效应。掺10%和20%常春藤根系时,从第1次干湿循环后就显示出明显的阻裂效应;而掺30%常春藤根系时,在第4次干湿循环后才显示出较弱的阻裂效应。

3)第8次干湿循环后,掺10%、20%和30%常春藤根系试样的平均最大裂缝宽度为纯红土试样的17%、17%和82%,统计分析表明,20%掺根量时阻裂

效果最优。

参考文献:

- [1] 黄英,符必昌. 红土化作用及红土的工程地质性质研究[J]. 岩土工程学报,1998,20(3):40-44.
- [2] 刘振波,易声义,胡志东. 云南红粘土工程特性及岩土工程问题[J]. 云南电力技术,2005,33(4):44-47.
- [3] 袁绚. 云南红粘土的工程特性及其应用[J]. 南昌水专学报,2002,21(1):59-62.
- [4] 何晓民,苏华,颜惠和,等. 昆明新国际机场红粘土工程特性研究[J]. 人民长江,2008,39(24):49-52.
- [5] 赵贵刚,黄英,张浚枫,等. 干湿循环下云南红土裂缝发展研究[J]. 水土保持学报,2017,31(2):157-165.
- [6] ZHU W W. The effect of dry-wet cycle on crack propagation and shear strength index of Yunnan laterite in China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019,17(4):7881-7889.
- [7] GENET M, STOKES A, SALIN F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005,278(1-2):1-9.
- [7] 冯国建,朱维伟,杜俊,等. 狗牙根根系抗拉性能试验[J]. 北方园艺,2016(5):80-82.
- [8] LIFFENA T, GURNELL A M, O'HARE M T, et al. Bio-mechanical Properties of the Emergent Aquatic Macrophyte Sparganium Erectum: Implications for Fine Sediment Retention in Low Energy Rivers[J]. Ecological Engineering, 2011,37(11):1925-1931.
- [9] JOANNE E N. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England [J]. Plant and Soil, 2005,278(1-2):43-53.
- [10] 冯国建,沈凡,李丽蓉,等. 根土复合体抗剪强度试验研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(7):129-133.
- [11] 郑启萍,徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(2):225-228.
- [12] 冯国建,朱维伟. 草本植物根系对边坡浅层稳定性影响研究[J]. 草原与草坪,2015,35(4):23-26.
- [13] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG E40-2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [14] Xia Wang, Miao-Miao Hong, Zheng Huang, et al. Bio-mechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions[J]. Soil & Tillage Research, 2019,189:148-157.

- [15] Weiwei Zhu, Guojian Feng, Jun Du. Restricted Effect of Two Plant Root Systems on the Crack Expansion of China Yunnan Laterite under Dry-wet Cycle[J]. Design Engineering, 2021(1):1-10.
- [16] 栗岳洲, 付江涛, 余冬梅, 等. 寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7):1370-1383.
- [17] 王桂尧, 周欢, 夏旖琪, 等. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2):234-241.
- [18] 吴鹏, 谢鹏成, 宋文龙, 等. 基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5):139-142.
- [19] 嵇晓雷, 夏光辉, 张海亚. 紫穗槐根系形态与固土护坡效应研究[J]. 湖北林业科技, 2016, 45(1):16-19.
- [20] 李义强, 伍红燕, 宋桂龙, 等. 岩石边坡坡度对胡枝子和紫花槐根系形态特征的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(2):23-29.

Anti-cracking effect of *hedera nepalensis* roots on Yunnan laterite under wetting and drying cycles

ZHU Wei-wei¹, FENG Guo-jian¹, TAN Yang-yang²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Kunming University, Kunming 650214, China;

2. School of Fine Art & Design, Kunming University, Kunming 650214, China)

Abstract: In order to study the constraint effect of *hedera nepalensis* roots on crack propagation in Yunnan laterite after wetting and drying cycles, and to provide a reference for the slope ecological protection, the typical Yunnan laterite and *hedera nepalensis* root system are selected to prepare Yunnan laterite with a certain moisture content for research. The compacted pure laterite samples and compacted mixed soil samples with different root content are made respectively. The compacting coefficient for both pure and mixed samples is 94.4%. In the laboratory, spray and natural air drying were used to simulate the drying and wetting cycle of laterite in engineering, and the crack width of samples with 1~8 cycles was measured and the average maximum crack width of each sample was statistically analyzed. The results show that there are microcracks in the pure laterite samples after the 1st dry-wet cycle. The crack width increases gradually after several dry-wet cycles. The maximum crack width reaches millimeter level after the 4th dry-wet cycle, and the crack expansion tends to be stable after the 6th dry-wet cycle. When 10% and 20% of root system is mixed, it shows obvious crack resistance effect after the 1st dry-wet cycle; when 30% of root system is mixed, it shows weak crack resistance effect after the 4th dry-wet cycle. After the 8th dry-wet cycle, the average maximum crack widths of the samples with 10%, 20% and 30% root systems are 17%, 17% and 82% respectively of those of the pure laterite samples. The results of statistical analysis show that the crack resistance effect is the best when the root content is 20%.

Key words: Yunnan laterite; drying and wetting cycle; *hedera nepalensis* root system; crack resistance effect