

DOI: 10.11779/CJGE20221037

# 不同干密度条件下植被土干缩开裂特性试验研究

谷英东, 程青\*, 唐朝生, 施斌

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 植物护坡的干缩开裂现象十分常见。为了探究植被土的干缩开裂特性, 开展了一系列室内干燥试验, 设置了4种不同干密度(1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup>)的植被土试验组和裸土对照组试样, 定时测量试样质量并监测其表面裂隙发育过程, 采用自主研发的CIAS系统, 对土体裂隙进行定量分析。试验结果表明: ①随着干密度的增大, 植被土蒸散速率逐渐降低。②在相同干密度的条件下, 植被土的失水速率比裸土慢, 并且产生裂隙时的临界含水率小于裸土产生裂隙时的临界含水率。③植被土的裂隙发育过程与干密度密切相关, 随着干密度的增加, 裂隙网络形态形成时对应的含水率越高。④与裸土相比, 在相同干密度条件下, 植被可以降低土体表面裂隙率和裂隙平均宽度, 增加土体裂隙密度。  
**关键词:** 黏性土; 干缩开裂; 干密度; 植被

中图分类号: TU43; S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2420-09

**作者简介:** 谷英东(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程有关研究。E-mail: guyingdong@smail.nju.edu.cn.

## Desiccation cracking behavior of vegetated soil with various dry densities

GU Yingdong, CHENG Qing, TANG Chaosheng, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Desiccation cracking in vegetated slopes is a common phenomenon. In order to investigate the desiccation cracking characteristics of a vegetated soil, a series of desiccation tests are carried out in this study. The vegetated and bare soil groups with four different dry densities (1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup>) are selected. The weight of each soil sample is regularly measured, and the development of surface cracks is monitored. A self-developed system CIAS is adopted to quantitatively analyze the surface crack pattern during the drying process. The experimental results show that: (1) The evapotranspiration rate of the vegetation soil decreases with the increase in the dry density. (2) Compared with the bare soil, the vegetated soil sample has a slower water loss rate and a smaller critical water content under a certain dry density. (3) The dry density has a significant influence on the desiccation cracking behavior of vegetated soils. The larger the dry density, the larger the water content corresponding to the formation of the crack network pattern. (4) With a given dry density, the vegetated soil has a smaller surface crack ratio and an average crack width, but a larger crack density compared with the bare soil.

**Key words:** clayey soil; desiccation cracking; dry density; vegetation

## 0 引言

近年来,随着人们对可持续发展的日益关注,“绿色边坡”的防护作用越来越受到人们的重视。植物作为环境友好型材料,具有低投入、易养护、绿色环保等优点。研究表明,植物根系的加筋作用可以增强土体的力学强度;植物蒸腾能增加土体吸力,从而降低土体渗透系数且增加土体强度<sup>[1]</sup>。因此,植被具有提高浅层土质边坡的稳定性和防止地表侵蚀的功能。

然而,以往有关植被在边坡工程应用中的研究,大多只关注植被带来的有利作用。在大气-植被-土体相互作用下,植物护坡的干缩开裂现象十分常见<sup>[2]</sup>。裂隙的发育会严重破坏土体的整体性,显著弱化土体的力学性质,加速土体的风化侵蚀,为雨水入渗提供

优势通道进而加速边坡失稳<sup>[3]</sup>。近年来,国内外学者围绕土体干缩开裂的形成机理和影响因素等开展了大量的研究。对于干缩开裂的机制,目前学界普遍接受的观点是在蒸发过程中吸力产生并诱导土体内部形成张拉应力,当张拉应力超过土体抗拉强度时裂隙便会产生<sup>[4]</sup>。影响裂隙发育的因素主要有两个方面:①土体自身因素,包括土样尺寸<sup>[5]</sup>、干密度<sup>[6]</sup>、黏土矿物含量<sup>[7]</sup>、土体微观结构等<sup>[8]</sup>;②外部环境因素,包括温度与湿度<sup>[9]</sup>、边界条件<sup>[10]</sup>等。然而,上述有关土体

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42172290, 42230710, 41925012);

江苏省自然科学基金项目(BK20221250)

收稿日期: 2022-08-22

\*通信作者(E-mail: chengqing@nju.edu.cn)

表 1 下蜀土基本物理性质  
Table 1 Physical properties of Xiashu soil

相对质量 密度 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	最优含水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	界限粒径含量/%		
						>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
2.73	36.5	19.5	17	16.5	1.7	2	67	31

干缩开裂的研究对象大多为裸土试样。在实际绿色边坡工程中, 上覆植被会影响土体的工程性质, 前期基于裸土试样取得的研究成果难以用于指导工程实践。目前关于植被土干缩开裂的过程及机理并不清楚, 难以做出准确的评价。

为此, 针对具有不同干密度的植被土试样开展室内干缩开裂试验, 并设置裸土对照组。对所有试样开展全过程含水率监测, 定时捕捉土体表面裂隙发育形态图像并进行定量分析, 研究了不同干密度条件下植被土的蒸散特性、裂隙演化和发育过程以及终态裂隙网络特征, 并探讨了植物根系对土体干缩开裂的影响机理, 相关研究结果将对认识植被土干缩开裂规律以及植被护坡设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验所采用的黏性土为南京地区下蜀土, 其基本物理性质如表 1 所示。植被采用百慕大草, 俗称狗牙根草, 具有抗旱性强、发芽率高等特点。

1.2 试样制备

将取回的土样烘干粉碎并过 2 mm 筛, 配置土样至目标含水率 (16.5%), 将配置好的土样装入密封袋密封 48 h, 使土体内部水分均匀。根据 4 个目标干密度 (1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup>), 采用分层压实法制备土样。试验所用亚克力模具尺寸为 200 mm×200 mm×30 mm。裸土试样分 3 次均匀压实, 每次压实高度为 5 mm, 压实后试样总高度为 15 mm。植被土试样, 压实两次至试样高度为 10 mm 后, 在土体表面按照 24 g/m<sup>2</sup> 的播种密度 (单位面积上播撒草种的质量) 进行均匀播中 (约 209 颗草种)。接下来, 喷洒一定质量的水用于种子萌发并记录, 继续填土并压实至试样高度为 15 mm。制样完成后, 在所有试样表面定时定量浇水, 养护 21 d 后, 修剪草叶至草长为 50 mm。

1.3 试验方法

试验设有植被土试验组 (编号分别为 G-1.3, G-1.4, G-1.5, G-1.6) 和裸土对照组 (编号分别为 B-1.3, B-1.4, B-1.5, B-1.6), 每组各试样分别对应干密度为 1.3~1.6 g/cm<sup>3</sup>, 每个试样均设有平行样。试验采用的装置如图 1 所示, 将养护完成的所有试样饱和至含水率为 45%, 然后置于精度为 0.01 g 的电子天平上持续干燥, 在四周布置均匀光照以确保植物充分生长, 在

距离试样表面 40 cm 处固定一高清相机来定时捕捉试样表面裂隙发育图像。整套实验装置置于控温控湿环境室 ( $T=30\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH}=50\pm2\%$ ) 中, 每隔 4 h 测定一次试样质量并记录, 当试样质量在 24 h 内基本保持不变时 (质量波动小于 0.1 g), 则认为干燥过程结束。

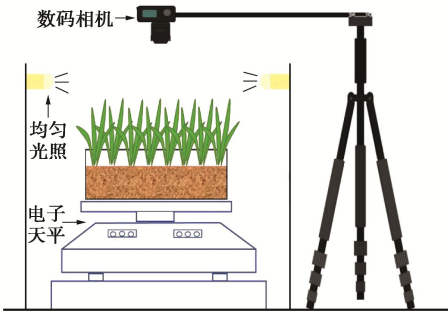


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

本文相关试验参数及植物参数如表 2 所示。植物发芽率定义为草种发芽数量与播撒草种数量之比。本试验采用的草种自然发芽率为 85.0%, 无土条件下 (水培) 的发芽率为 94.0%。可以发现, 随着试样干密度的增加, 发芽数和发芽率均有小幅度下降。这是由于当土体颗粒排列密实时, 孔隙减少导致植物生长空间受限, 且土样中赋存的氧气含量减少, 从而抑制了种子的萌发。

表 2 试验参数

Table 2 Details of experimental programme

试样编号	压实干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	种植密度/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	发芽数/ 棵	发芽率/ %
G-1.3	1.3	24	182	87.1
G-1.4	1.4	24	177	84.7
G-1.5	1.5	24	176	84.2
G-1.6	1.6	24	168	80.4

1.4 裂隙图像处理技术

本文采用了课题组自主研发的 CIAS (岩土体裂隙图像处理与定量分析系统, 免费获取地址 <https://es.nju.edu.cn/climatengeo/main.htm>), 该软件已被国内外百余位学者运用于土体干缩裂隙分析、岩石裂隙分析等<sup>[11-12]</sup>。具体操作流程、原理以及参数定义可参考相关文献 [6, 10]。

2 试验结果与讨论

2.1 蒸发/蒸散特性

图 2 给出了不同干密度植被土与裸土试样含水率随时间变化曲线。对于裸土而言，在蒸发初期，试样含水率随时间呈线性递减。随着干燥的进一步进行，曲线逐渐趋于平缓，最终到达残余含水率（5%左右）。随着裸土干密度逐渐增大，曲线下降陡势逐渐变缓，到达残余含水率所经历的时间越长，分别为 205，224，246，263 h。

与裸土相比，植被土的水分散失主要由土体自身水分蒸发及植物蒸腾两部分组成，称为蒸散作用<sup>[1]</sup>。如图 2 所示，在蒸散初期，含水率随时间快速线性下降，随着干燥的持续进行，蒸散曲线由倾斜逐渐变为水平，此时植被土蒸散过程进入末期。当植被土干密度从 1.3 g/cm<sup>3</sup> 增加到 1.6 g/cm<sup>3</sup> 时，曲线斜率逐渐变小，到达残余含水率所经历的时间分别为 220，243，270，273 h，比相同干密度裸土试样的干燥过程耗时更长。这主要是由于植物根系占据了一部分土体孔隙体积，限制了土体内部水分向大气中散失<sup>[13]</sup>。另一方面，植物因自身代谢作用，根系会分泌黏胶质、苹果酸、多糖素等化学物质<sup>[14]</sup>，能够促进土体形成团聚体，从而减少水分的散失<sup>[8]</sup>。换句话说，植物起到了“保水”作用。此外，从图 2 中可以看出 G-1.5 与 G-1.6 试样水分散失曲线基本重合，说明此时干密度对植被土水分散失影响不明显。

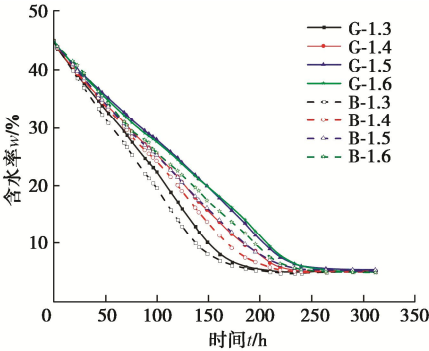
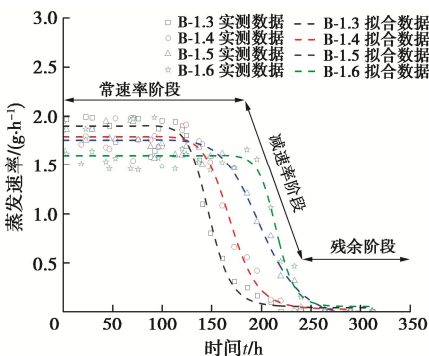


图 2 不同干密度植被土与裸土含水率随时间变化曲线

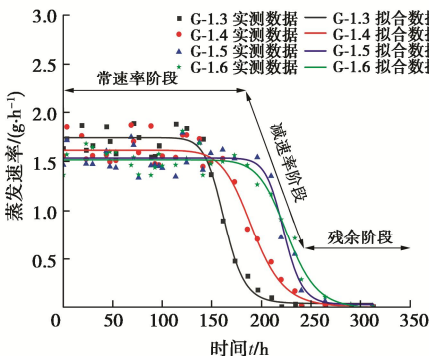
Fig. 2 Drying-induced evolution of water content of bare and vegetated soil samples with various dry densities

本文进一步计算了各试样的蒸发/蒸散速率，如图 3 所示。就裸土而言，可以将水分散失过程分成常速率阶段、减速率阶段以及残余阶段 3 个主要阶段，图 3 (a) 中以 B-1.6 为例描述了上述 3 个区间的区分范围，以上现象与唐朝生等<sup>[13]</sup>研究成果一致。表 3 展示了各试样蒸发/蒸散试验有关数据，干密度为 1.3~1.6 g/cm<sup>3</sup> 的裸土试样在常速率阶段蒸发速率分别为 1.94，1.74，1.70，1.59 g/h，分别持续了 113，140，149，188 h。可以看到，随着干密度的增加，裸土常速率阶段蒸发速率显著下降，总降幅达 18.0%，且持续时间逐渐

增加。



(a) 裸土蒸发速率



(b) 植被土蒸散速率

图 3 不同干密度裸土蒸发与植被土蒸散速率随时间变化曲线

Fig. 3 Drying-induced evolution of evaporation rate/evapotranspiration rate in bare and vegetated soil samples with various dry densities

表 3 各试样常速率阶段与减速率阶段试验数据  
Table 3 Test data of all samples at constant and decreasing rate stages

试样编号	常速率阶段蒸发/(g·h <sup>-1</sup> )	常速率阶段持续时间/h	减速率阶段斜率/(Δ(g/h)·Δt <sup>-1</sup> )	减速率阶段持续时间/h
B-1.3	1.94	113	-0.037	92
B-1.4	1.74	140	-0.035	84
B-1.5	1.70	149	-0.029	97
B-1.6	1.59	188	-0.054	75
G-1.3	1.73	132	-0.037	88
G-1.4	1.60	155	-0.010	88
G-1.5	1.53	199	-0.039	71
G-1.6	1.51	180	-0.026	93

对于植被土而言，同样可将其水分散失分为上述 3 个阶段。在常速率阶段，植被土蒸散速率分别为 1.73，1.60，1.53，1.51 g/h，该阶段分别持续 132，155，199，180 h。可以看到，植被土蒸散速率与干密度呈负相关关系，总降幅达 12.7%。植被土干密度为 1.3~1.5 g/cm<sup>3</sup> 时，常速率阶段持续时间逐渐增加，而当干密度为 1.6 g/cm<sup>3</sup> 时，G-1.6 试样进入减速率阶段要早于 G-1.5 试样，这可能是由于土体干密度较大时，土体颗粒中孔



隙较小, 赋存氧气空间变少, 植物根系出现氧“胁迫”现象, 一方面会导致植物蒸腾作用减弱<sup>[15]</sup>, 另一方面虽然在干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的试样中根系发育不充分, 但在氧“胁迫”的条件下, 植物根系会加大脱落酸等化学物质的释放<sup>[16-17]</sup>, 导致土中水分子浓度增大, 土体失水速率会略微降低<sup>[18]</sup>。而后两个阶段, 植被土蒸散特性与裸土蒸发特性基本一致。此外, 与裸土相比, 在常速率阶段植被土蒸散速率略小于裸土蒸发速率, 干密度由低到高, 该速率与裸土相比分别降低了 10.8%, 7.5%, 10.0%, 5.0%; 当干密度小于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时, 由于植被的保水性, 植被土水分散失进入减速率阶段相比于裸土具有滞后性。而当干密度等于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时, 一方面由于根系氧“胁迫”现象, 加大了植

物根系化学物质释放, 使土体水分浓度增加, 降低了土体失水速率; 另一方面相比于裸土, 植被土中由于根系的存在会产生额外吸力<sup>[1]</sup>, 吸力对水分子的逃逸有一定的约束作用, 降低土体表面的蒸汽压, 使土-气界面的蒸汽压梯度减小, 从而降低水分散失速率<sup>[13]</sup>, 因此植被土水分散失进入减速率阶段早于裸土。

## 2.2 干缩裂隙产生及发育特性

图 4 (a) ~ (d) 给出了干燥过程中不同干密度条件下各裸土试样裂隙发育情况。通过对比前后时刻捕捉的裂隙图像, 可以获得该试样出现裂隙的临界含水率区间。对于本文所测试的裸土试样, 出现第一条裂隙时的临界含水率约为 28%~30%, 该值略低于同种黏性土泥浆样干缩开裂的临界含水率<sup>[10]</sup>。这主要是

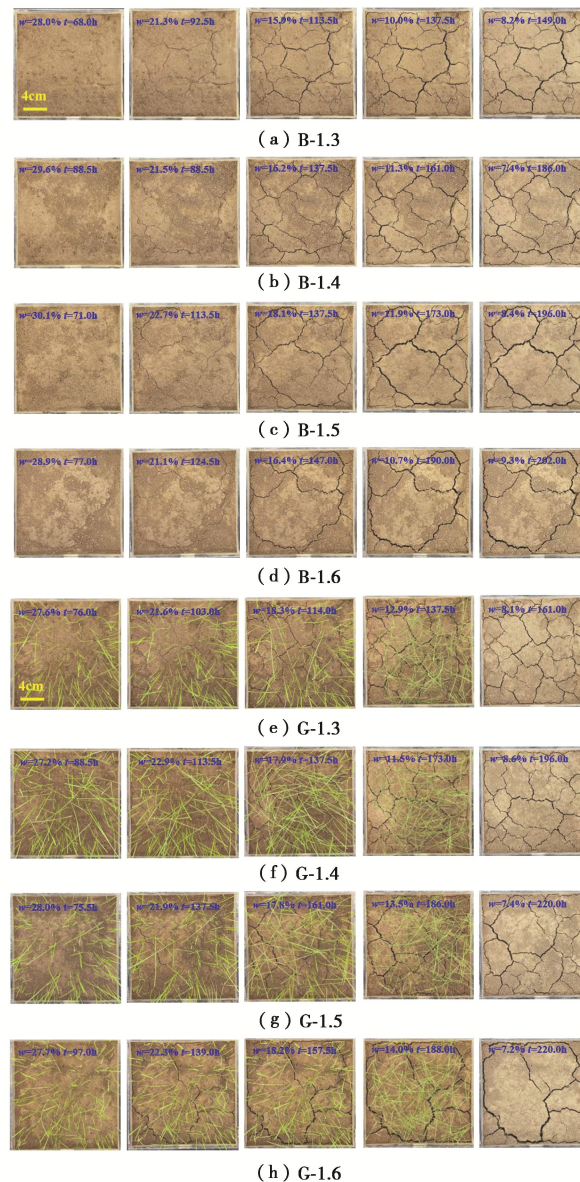


图 4 干燥过程中不同干密度下各裸土试样与植被土试样裂隙发育情况

Fig. 4 Crack propagation in bare and vegetated soil samples with various dry densities during drying process

由于本文采用的压实土样与前人采用的泥浆土样具有不同的微观结构。泥浆样是分散结构, 而最优含水率下压实的土样具有团聚体结构, 黏土颗粒间孔隙尺寸比团聚体之间的孔隙尺寸小<sup>[19]</sup>。根据 Young-Laplace 方程, 孔隙直径越小, 土体吸力越大, 土体中能够保留的水分越少, 因此压实土样发生开裂时的临界含水率较低于泥浆样<sup>[8]</sup>。

从图 4 (a), (b) 中可以发现, 当土体干密度较低时, 裂隙从多点同时产生, 且大多呈现  $120^\circ$  左右的交角。而当土体干密度较高时, 如图 4 (c), (d) 裂隙发育具有较明显的阶段性, 体现为主裂隙形成后, 次裂隙垂直于主裂隙发育。随着含水率的进一步降低, 裂隙在“尖端”引导下逐渐延伸。当含水率继续降低至 17% 左右时, 裂隙网络几何形态基本形成, 此后试样含水率虽在不断减小, 但裂隙网络几何形态基本不再发生变化, 仅在宏观上表现为部分裂隙的加宽现象。

为了更好地定量分析干燥过程中裂隙发育情况, 选取各组具有代表性的裂隙图像利用 CIAS 系统进行处理, 获得了裂隙密度  $D_{sc}$  (单位面积土体上裂隙的总长度), 表面裂隙率  $R_{sc}$  (单位面积土体上裂隙的总面积) 随含水率的变化曲线, 相关结果如图 5 所示。图 5 (a) 展示了干燥过程中裸土裂隙密度  $D_{sc}$  的变化情况。可以看出, 各裸土试样在试验前期, 裂隙密度随含水率的降低快速线性增长, 在裂隙图像中即表现为裂隙的不断延伸加长。B-1.3, B-1.4, B-1.5, B-1.6 试样裂隙密度分别在含水率为 10.1%, 12.7%, 15.3%, 13.8% 达到基本稳定。此时, 裂隙网络几何形态已经基本形成。而后, 土体表面主要是一些细微裂隙的延长, 几乎不再影响土体裂隙网络几何形态。图 5 (b) 描述了各裸土试样表面裂隙率随含水率的变化, 同样地, 土体表面裂隙率在裂隙发育初期随着含水率的降低快速增长, 对于 4 种不同干密度的裸土试样, 曲线分别在含水率达到 9.5%, 10.2%, 12.5%, 16.3% 时趋于平缓。说明在本文所研究的干密度范围内, 干密度越大, 表面裂隙率达到基本稳定时的含水率越高。结合裂隙密度变化特征, 对于 B-1.3, B-1.4, B-1.5 来说, 裂隙密度的稳定早于表面裂隙率的稳定, 说明裂隙网络几何形态率先形成, 此时裂隙基本不再延长, 而后仅有部分裂隙加宽现象产生, 这与裂隙图像有较好的对应。对于干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的裸土试样, 不同的是, 当含水率小于 16.3% 时, 主裂隙会随着干燥进一步加宽, 同时仍存在局部细微小裂隙的发育。

对于植被土而言, 其表面裂隙发育过程如图 4 (e) ~ (h) 所示。与裸土相比, 植被土出现第一条裂隙时的临界含水率约为 27%, 略小于对应干密度下裸土试样的临界含水率, 这主要是由于植物根系的存在, 在土体中产生加筋作用, 根-土复合物会增加土体的黏聚力, 提升了土体抗拉强度<sup>[20]</sup>。与裸土相比, 在裂隙发育初期, G-1.3, G-1.4, G-1.5 试样裂隙同样呈多点同时产生的态势。不同的是, 植被土的裂隙发育起点显著多于裸土, 这可能由于是植物根系的生长导致土体小孔扩张造成的, 由于植物生长导致其挤压周围土体, 最终植物附近的土体达到被动极限平衡状态, 从而产生裂隙<sup>[21]</sup>。随着干燥的进一步进行, 在多个裂隙发育点的引导下, 裂隙不断延长, 当含水率达到 14% 左右, 土体裂隙网络几何形态基本形成, 早于相应干密度下裸土试样, 而后随着含水率持续降低, 土体裂隙不断加宽直至干燥过程结束。当干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时, 从图 4 (h) 中可以看到, 在含水率为 22.3% 时, G-1.6 试样的裂隙发育已具雏形, 当含水率达到 18% 左右时, 裂隙逐渐加宽, 当含水率降至 12% 时, 裂隙发育已经稳定。总体上看, G-1.6 裂隙发育速度明显快于 G-1.3, G-1.4, G-1.5 以及相应干密度下裸土试样。

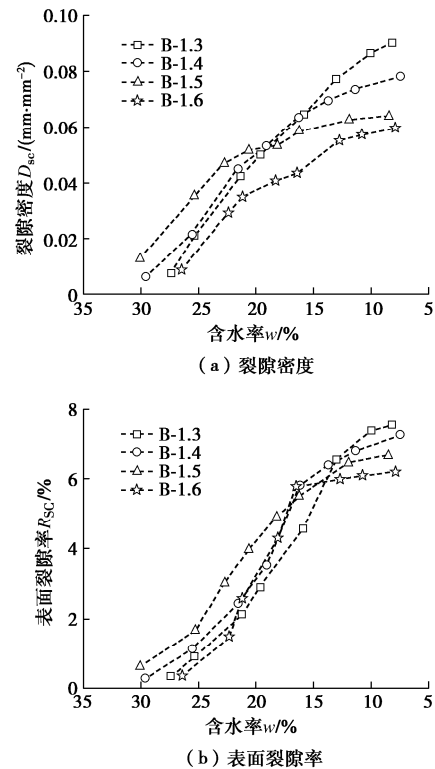


图 5 不同干密度下裸土裂隙定量指标随含水率变化曲线  
Fig. 5 Drying-induced evolution of quantitative crack indices in bare soil samples with various dry densities

图 6 展示了不同干密度条件下植被土裂隙密度

$D_{sc}$ 、表面裂隙率  $R_{sc}$  随含水率变化曲线。根据图 6(a), 总体来讲, 各植被土试样裂隙密度在前期随着含水率的降低快速增长, 而后到达某一含水率时, 曲线开始转折并趋于平缓。对于干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的植被土, 初期裂隙密度增长速率显著高于其他试样, 说明其裂隙延伸快于其余植被土试样, 且其在含水率较高时(约为 17.5%) 曲线趋于平缓, 代表其裂隙几何形态在高含水率时已基本形成, 这与图 4(h) 所反映的现象一致。图 6(b) 描述了植被土表面裂隙率随质量含水率的变化曲线。对于 G-1.5, G-1.6 试样, 曲线存在明显的转折(对应质量含水率分别为 14.1%, 17.5%), 结合图 4(g), (h), 说明在曲线转折前表面裂隙率的增加主要体现在裂隙的延伸, 而当转折后表面裂隙率的增加主要体现在裂隙的加宽。而对 G-1.3, G-1.4 试样来说, 由于土体较为疏松, 在裂隙网络几何形态形成后仍有微小裂隙产生, 故曲线不存在明显转折。

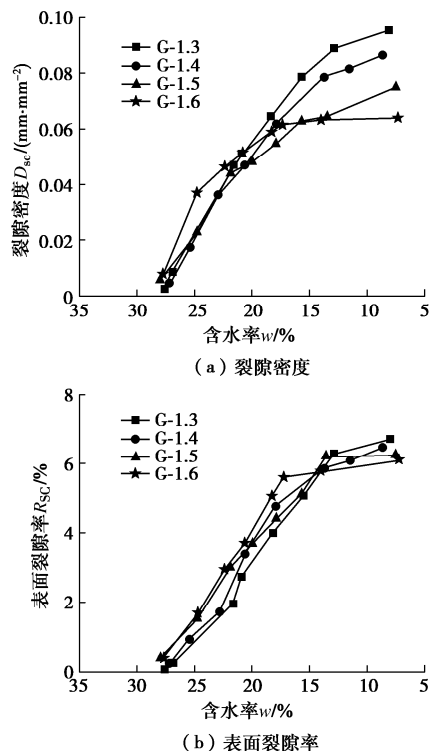


图 6 不同干密度下植被土裂隙定量指标随含水率变化曲线

Fig. 6 Drying-induced evolution of quantitative crack indices in vegetated soil samples with various dry densities

为了对比不同干密度植被土与裸土裂隙发育特征, 选取 G-1.3, B-1.3 及 G-1.6, B-1.6 号试样分别作为较低压实干密度以及较高压实干密度的代表, 如图 7 所示, 当干密度为  $1.3 \text{ g/cm}^3$  时, 二者表面裂隙率随着干燥的进行线性增加。在含水率为 27.0%~22.5% 区间内, 裸土的表面裂隙率略高于植被土, 而后植被土表面裂隙率增长速率高于裸土。当含水率在 22.5%~

15.0% 内时, 植被土的表面裂隙率逐渐高于裸土。随着试样的进一步干燥, 裸土的表面裂隙率增长速率逐渐降低, 植被土表面裂隙率逐渐低于裸土, 直至稳定, 最终植被土表面裂隙率相比于裸土降低了 11.0%。初期植被土与裸土裂隙密度随着含水率的降低呈线性增加, 整个过程中植被土的裂隙密度均大于裸土。当干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时, 如图 7(b), 曲线整体变化趋势与图 7(a) 一致。不同的是, 在干燥初期, 植被土与裸土的表面裂隙率与裂隙密度发育速度基本相同, 且到达稳定阶段后, 植被土与裸土的裂隙指标差值逐渐变小(小于 1%), 说明在高干密度条件下植被对土体裂隙的影响不明显。此外对于较高干密度的试样, 裂隙发育曲线的转折越明显, 说明在高干密度条件下, 植被土与裸土裂隙发育具有明显阶段性。

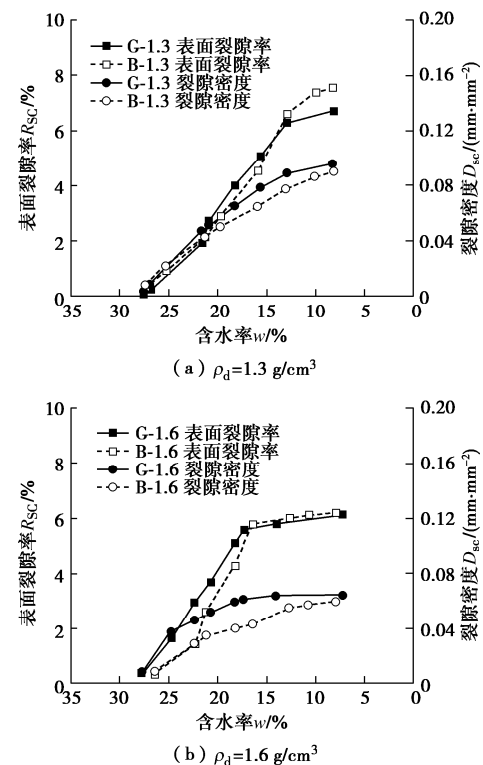


图 7 相同干密度下植被土与裸土裂隙定量指标随含水率变化对比曲线

Fig. 7 Comparison of evolution in surface crack ratio and crack density between vegetated and bare soils

## 2.3 终态裂隙网络特征

图 8 给出了各试样干燥结束后的最终裂隙形态图像。从图 8 中可以看出, 随着干密度的增加, 裸土试样裂隙发育程度越低, 土样表面较为完整(图 8(a)), 植被土与裸土呈现出大致相同的特征(图 8(b))。在干密度相同的条件下, 由于植被的存在, 土体裂隙明显增加, 表面较为破碎。随着干密度的增大, 裸土与植被土试样裂隙差异逐渐不明显。

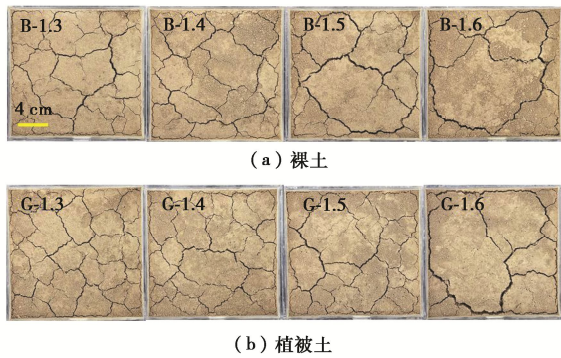


图8 不同干密度下各试样最终裂隙发育形态

Fig. 8 Final crack patterns of all samples with various dry densities

图9(a)~(d)分别植被土与裸土最终裂隙形态定量描述指标随干密度变化的关系。结合图9(a)可知, B-1.3, B-1.4, B-1.5, B-1.6 试样最终表面裂隙率分别为 7.55%, 7.24%, 6.65%, 6.16%。可以看到, 裸土表面裂隙率随着干密度的增加呈单调递减, 降幅达 18.4%。这是由于土体抗拉强度由颗粒间的黏聚力大小决定, 黏聚力受到土颗粒之间水桥或水体而产生的毛细力的影响。当干密度增加时, 土体孔隙尺寸会减小, 致团聚体和颗粒之间的有效接触点更多, 液桥数量增加, 土体抗拉强度得以提高<sup>[6, 22]</sup>, 裂隙的发育程度变低。G-1.3, G-1.4, G-1.5, G-1.6 试样最终表面裂隙率分别为 6.72%, 6.46%, 6.24%, 6.13%, 与裸土有相同的降低趋势, 总降幅达 8.8%。以上结果表明, 在相同干密度条件下, 植被的存在可以降低土体表面裂隙率。一方面, 植物根系的存在, 会在土体中产生加筋作用, 提升土体抗拉强度。另一方面, 植物根系会占据土体内大部分孔隙, 降低土体在干燥过程中的收缩空间。当干密度从 1.3 g/cm<sup>3</sup> 增大至 1.6 g/cm<sup>3</sup> 时, 植被对土体表面裂隙率的降低值分别为 11.0%, 10.8%, 6.2%, 0.5%, 说明随着干密度的不断增加, 植被对土体表面裂隙率的影响逐渐减小。因为随着干密度的增加, 植被根系发育受阻, 土体内部实际根密度较小<sup>[23]</sup>。图9(b)表明, 植被土与裸土裂隙密度均随着干密度的增高而降低。在相同干密度条件下, 植被的存在提高了土体裂隙密度, 导致土表更加破碎, 在干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 时, 植被对裂隙密度的影响最为明显, 增幅达 17.6%。同上文所述, 这是由于植被根系的生长使得土体内部球孔产生扩张, 土体在植物根系的挤压下达到被动极限平衡状态, 使得裂隙多点发育, 进而导致土体表面更加破碎, 裂隙发育更加完全<sup>[21]</sup>。此外, 土块平均面积同样可以反映土体破碎程度。当干密度较高时, 土体裂隙发育不完全, 裂隙密度较小,

土块较为完整, 其平均面积较大(图9(c))。对于裂隙平均宽度而言, 如图9(d)所示, B-1.3, B-1.4, B-1.5, B-1.6 试样裂隙平均宽度分别为 0.83, 0.93, 1.04, 1.03 mm, 基本随着干密度的增大而增大。G-1.3, G-1.4, G-1.5, G-1.6 裂隙平均宽度分别为 0.70, 0.75, 0.83, 0.96 mm, 与干密度呈正相关关系。在相同干密度条件下, 植被土裂隙平均宽度低于裸土。同样地, 当干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 时, 植被对裂隙平均宽度的影响最大。

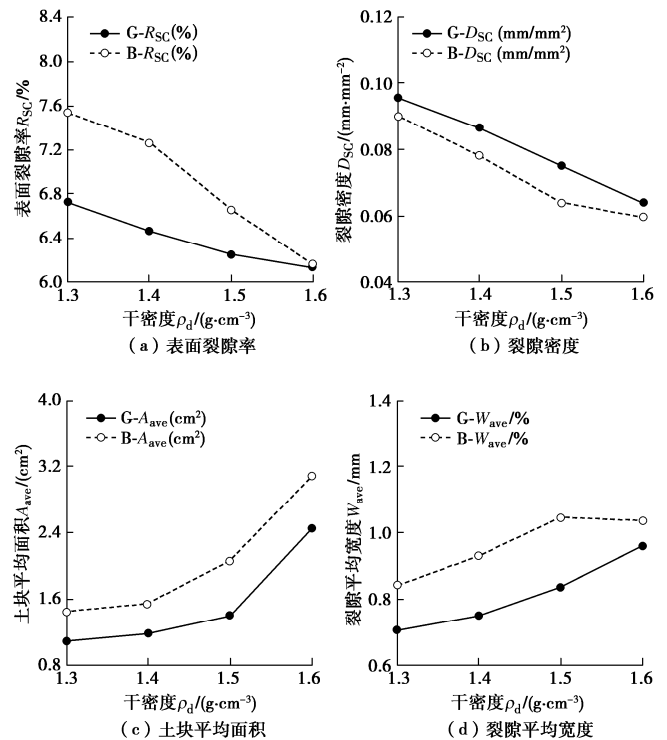


图9 裸土与植被土终态裂隙定量指标随干密度变化曲线

Fig. 9 Effects of dry density on quantitative indices of final crack pattern in bare and vegetated soils

### 3 结 论

本文针对植被土的干缩开裂现象开展了试验研究, 探究了不同干密度条件下植被土在干燥过程中裂隙的发育规律和演化机理, 并与裸土试样进行对比, 得到 6 点结论。

(1) 植被土蒸散速率随着土体干密度的增大逐渐降低。高干密度植被土水分散失阶段所需时间长, 且进入残余阶段晚于低干密度植被土。

(2) 植被土由于植物的保水作用, 在相同干密度的条件下, 常速率阶段的失水速率低于裸土, 且进入减速阶段的时间相比于裸土具有滞后性, 残余阶段持续时间短于裸土。

(3) 在相同干密度的条件下, 植被土产生裂隙时



的临界含水率小于裸土产生裂隙时的临界含水率。

(4) 植被土裂隙网络几何形态形成时对应的含水率随着干密度的增加而逐渐增大。

(5) 当土体干密度较低时, 植被土裂隙发育速度快于裸土, 裂隙网络几何形态发育完成时间早于裸土; 当土体干密度较高时, 植被土与裸土的裂隙发育速度差异小。

(6) 与裸土相比, 在相同干密度条件下, 植被的存在可以降低土体表面裂隙率和裂隙平均宽度, 但会增加土体裂隙密度。

### 参考文献:

- [1] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 1-47. (NG W W. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 1-47. (in Chinese))
- [2] BORDOLOI S, NI J J, NG C W W. Soil desiccation cracking and its characterization in vegetated soil: a perspective review[J]. Science of the Total Environment, 2020, **729**: 138760.
- [3] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 454-459. (YIN Zongze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 454-459. (in Chinese))
- [4] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, **101**(3/4): 204-217.
- [5] 骆赵刚, 汪时机, 张继伟, 等. 膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(10): 1922-1930. (LUO Zhaogang, WANG Shiji, ZHANG Jiwei, et al. Thickness effect on crack evolution of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(10): 1922-1930. (in Chinese))
- [6] TIAN B G, CHENG Q, TANG C S, et al. Effects of compaction state on desiccation cracking behaviour of a clayey soil subjected to wetting-drying cycles[J]. Engineering Geology, 2022, **302**: 106650.
- [7] MITCHELL J K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. New York: Wiley: 1976.
- [8] CHENG Q, TANG C S, ZENG H, et al. Effects of microstructure on desiccation cracking of a compacted soil[J]. Engineering Geology, 2020, **265**: 105418.
- [9] 刘观仕, 陈永贵, 曾宪云, 等. 环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 260-268. (LIU Guanshi, CHEN Yonggui, ZENG Xianyun, et al. Effects of ambient air humidity and temperature on crack development of compacted expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 260-268. (in Chinese))
- [10] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 544-553. (ZENG Hao, TANG Chaosheng, LIU Changli, et al. Effects of boundary friction and layer thickness on desiccation cracking behaviors of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 544-553. (in Chinese))
- [11] WAN Y, WU C X, XUE Q, et al. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, **654**: 576-582.
- [12] 陈宾, 周乐意, 赵延林, 等. 干湿循环条件下红砂岩软弱夹层微结构与剪切强度的关联性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1633-1642. (CHEN Bin, ZHOU Leyi, ZHAO Yanlin, et al. Relationship between microstructure and shear strength of weak interlayer of red sandstone under dry and wet cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(5): 1633-1642. (in Chinese))
- [13] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(6): 875-881. (TANG Chaosheng, SHI Bin, GU Kai. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(6): 875-881. (in Chinese))
- [14] 李勇, 黄小芳, 丁万隆. 根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响[J]. 华北农学报, 2008, **23**(增刊 1): 182-186. (LI Yong, HUANG Xiaofang, DING Wanlong. Root exudates and their effects on plant rhizosphere soil micro-ecology environment[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, **23**(S1): 182-186. (in Chinese))
- [15] AROCA R, PORCEL R, RUIZ-LOZANO J M. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, **63**(1): 43-57.
- [16] ANGELIKA M, BOAMFA ELENA I, LAARHOVEN LUCAS J J, et al. Organ-specific analysis of the anaerobic primary metabolism in rice and wheat seedlings. I: dark ethanol production is dominated by the shoots[J]. Planta, 2006, **225**(1): 103-114.



- [17] 张治宏, 杨诗卡, 韩超, 等. 环境胁迫对水生植物根系分泌小分子量有机酸(LMWOAs)的影响特征[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 462-471. (ZHANG Zhihong, YANG Shika, HAN Chao, et al. Effects of environmental stress on characteristics of low molecular weight organic acids secreted by macrophyte roots[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(2): 462-471. (in Chinese))
- [18] 张少文, 张玻华, 刘洁颖, 等. 盐分对土壤蒸发影响的试验及其数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2015, **34**(5): 1-5. (ZHANG Shaowen, ZHANG Bohua, LIU Jieying, et al. Effect of salinity on soil evaporation and its simulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, **34**(5): 1-5. (in Chinese))
- [19] DELAGE P, AUDIGUIER M, CUI Y, et al. Microstructure of a compacted silt[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**: 150-158.
- [20] 徐华, 袁海莉, 王歆宇, 等. 根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(5): 926-935. (XU Hua, YUAN Haili, WANG Xinyu, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(5): 926-935. (in Chinese))
- [21] 郑俊杰, 鲁燕儿, 陈保国. 拉压模量不同的剪胀土体中的球孔扩张问题[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(5): 675-680. (ZHENG Junjie, LU Yaner, CHEN Baoguo. Spherical cavity expansion in dilatant soils with different tension and compression moduli[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(5): 675-680. (in Chinese))
- [22] WIJAYA M, LEONG E C. Modelling the effect of density on the unimodal soil-water characteristic curve[J]. Géotechnique, 2017, **67**(7): 637-645.
- [23] NG C W W, LEUNG A K, WOON K X. Effects of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(3): 311-321.

## 第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会通知

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会 (IS-Macau 2024) 将于 2024 年 6 月 14 日—17 日在中国澳门特别行政区举行。本次会议由澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 (IoTSC)、土木与环境工程系与国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC204 共同举办。大会主席为澳门大学周万欢教授、东南大学徐涛副教授; 副主席为剑桥大学 Giulia Viggiani 教授; 秘书为澳门大学管铮博士。研讨会的主题为“智慧城市隧道与地下空间建设”, 具体包括: 软土基本性质; 本

构与数值模型; 软土地基处理新技术; 大数据、人工智能和机器学习在隧道和地下工程中的应用; 地下基础设施韧性与可持续发展; 隧道与地下施工智能监测与可视化技术; 观测法在地下工程中的应用; 现场案例研究。

大会组委会诚邀业界专家学者、工程技术人员、管理人员和企业代表等拨冗莅临, 共襄盛会!

会议网站: <https://is-macau2024.skliotsc.um.edu.mo>

咨询邮箱: [ismacau2024@um.edu.mo](mailto:ismacau2024@um.edu.mo)。

(会议组委会)