

基于三轴 UU 试验的土体含水率对根土复合体强度特性的影响

骆丕昭^{1,2}, 王云琦^{1,2}, 李通^{1,2}, 祁子寒^{1,2}, 何相昌^{1,2}, 李克文^{1,2}

(1 北京林业大学水土保持学院重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站, 北京 100083; 2 北京林业大学水土保持学院重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要: 为研究自然边坡其强度特性随含水率的变化规律。通过设计不同体积含水率(20%, 27%, 35%, 40%, 45%)和 2 种含根量(RAR=0.1%, 0.3%)的重塑土进行不固结不排水三轴试验, 以研究含水率对土体破坏方式、抗剪强度和初始切线模量的影响。结果表明: (1) 试样破坏模式多为剪切变形和剪胀变形, 在含水率为 20%, 27% 时, 出现明显剪切贯穿面破裂带, 其余含水率下表现为剪胀变形; (2) 含水率对根土复合体抗剪强度主要体现在黏聚力上, 含水率从 20% 升至 45% 时, 2 种含根量的根土复合体黏聚力分别降低 67%, 72%; 含水率低于 35% 时, 可用对数关系表示, 随含水率升高, 黏聚力明显降低; 含水率达到 35% 以上时, 可用线性关系表示, 黏聚力下降速度减缓; 含根量增加, 抗剪强度提高; (3) 不同含根量和围压下根土复合体初始切线模量与含水率关系可以用线性关系拟合, 含水率从 20% 升至 45% 时, 2 种含根量的根土复合体初始切线模量平均分别降低 43% 和 47%。综合考虑土体弹塑性和植物因素对土体位移或变形的影响, 可提高边坡稳定性计算精度。研究结果可为植物边坡以及水土保持植被建设治理提供科学参考, 丰富根系固土领域的科学理论。

关键词: 根土复合体; 含水率; 破坏模式; 抗剪强度; 初始切线模量

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0153-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.020

Effect of Soil Moisture Content on Strength Characteristics of Root-soil Complex Based on Triaxial UU Test

LUO Pizhao^{1,2}, WANG Yunqi^{1,2}, LI Tong^{1,2}, QI Zihan^{1,2}, HE Xiangchang^{1,2}, LI Kewen^{1,2}

(1. Three-gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Jinyun Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to study the variation of strength characteristics with moisture content of natural slopes. The influence of moisture content on soil failure, shear strength and initial tangent modulus was carried out by designing reconstituted soil with different volume moisture content (20%, 27%, 35%, 40%, 45%) and two root content (RAR=0.1%, 0.3%). The results showed that: (1) The specimen rupture mode was mostly shear deformation and shear expansion deformation, and when the moisture content was 20% and 27%, the obvious shear penetration surface fracture zone appeared, and the rest of the moisture content was shear deformation. (2) The effect of moisture content on the shear strength of the root soil complex was mainly reflected in the cohesion, and when the moisture content increased from 20% to 45%, the cohesion of the two kinds of root-soil complex decreased by 67% and 72%; when the moisture content was lower than 35%, it could be expressed by logarithmic relationship, and the cohesion decreased significantly with the increase of moisture content; when the moisture content reached more than 35%, it could be expressed by linear relationship, and the decline rate of cohesion slowed down; the shear strength increased with the increase of root content. (3) The relationship between the initial tangential modulus and the moisture content of the root-soil complex under different root content and confining pressure could be fitted by linear

收稿日期: 2023-04-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(31971726)

第一作者: 骆丕昭(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: luopizhao@163.com

通信作者: 王云琦(1979—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

relationship, and when the moisture content increased from 20% to 45%, the initial tangential modulus of the two root-soil complex with root content decreased by 43% and 47% on average. Comprehensively considering the influence of elastic-plasticity and plant factors on soil displacement or deformation, the accuracy of slope stability calculation could be improved. The research results can provide scientific reference for the management of plant slope and soil and water conservation vegetation construction, and enrich the scientific theory in the field of root soil consolidation.

Keywords: soil-root composite; moisture content; failure mode; shear strength; initial tangent modulus

植物加固边坡是有效的地质灾害防治手段^[1]。植被的固土护坡机理可归结为 2 个方面。从力学角度出发,植物根系的笼络穿插起到加筋或锚固的作用,可以提高边坡土体抗剪强度^[2-5];从水文角度出发,植物通过改变土体含水率来影响边坡稳定性^[6-9]。根—土复合体将植物根系的力学效应和水文效应与土体本身的抗压特性相结合,有效地限制土体的相对滑动,达到加固边坡的作用。

植物根系能增强土体强度已成为大家的共识^[10-13],尤其是对土体黏聚力有较大贡献^[14-16],对土体强度的加强作用常被称为根系的附加黏聚力,Lian 等^[17]通过制作含根土三轴压缩试验表明,根系插入显著提高土体抗剪强度;徐华等^[18]对根系形态研究表明,根—土复合体抗剪强度增加主要是由黏聚力引起,且根系形态越复杂,根系能够调动土体抵抗剪切变形的范围越大;王元战等^[19]通过对原状和重塑根—土复合体三轴剪切试验发现,根系显著提高土体黏聚力,且随含根量增加而增大最终趋于稳定。因此,在对植物边坡稳定性分析时往往将根系增加的强度统一按照黏聚力来给根土材料赋值进行计算,强度等效的处理方法一方面没有关注到应力应变的本质,忽略变形的本质;另一方面,对土体在变饱和过程的根土力学特性描述不够详细。程平等^[20]在对根土复合体的非线性破坏准则中说明根系能够抑制轴向变形,初始切线模量随围压和含根量增大而增大;朱锦奇等^[21]在对根系固土能力随含水率变化的研究发现,根系的加固作用随含水率升高而大幅降低。尽管如此,但在进行边坡稳定性分析时仍可以得到相对合理的安全系数,是因为计算边坡稳定时通常采用的是极限平衡法,该模型仅需要塑性参数黏聚力和摩擦角进行计算,不用关心变形问题^[22],土体及根系引起的弹性指标和实际土体应变也不用参与计算,仅考虑自然含水率下的塑性参数来评估边坡稳定性,可能导致对边坡变形^[23]、位移和破坏模式^[24]的计算不够准确,低估土体变形的能力。

因此,本文基于摩尔—库伦强度理论^[25]、邓肯—张双曲线理论^[26],通过设定不同含水率和含根量条件下的不排水三轴试验探究土体含水率对根系固土

能力的影响,揭示根—土复合体弹塑性的变化规律,以为根系固土护坡研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集与试验方法

研究区位于重庆市北碚区缙云山自然保护区(29°41'N,106°17'E),土地总面积为 7 600 hm²。试验于 2022 年 7—9 月进行土样采集,利用电动取土钻在 0—30 cm 土层取样,试验前去除土体表层腐殖质、平整土地,试验后将土样密封带回实验室,将土样风干、碾碎、过筛去除生物和砾石杂质,液塑限联合测定仪测得塑限和液限含水率分别为 27% 和 39%。根系选取课题组培育的 1 年生香根草,香根草苗种植于 40 cm×40 cm×40 cm 尺寸的钢盒中,植株采用整体挖掘法,埋置于原含水率的湿土带回,密封置于 4℃ 冷藏备用,使用前冲洗去根系表面土体,筛选和剪取平均直径为 0.8~1.0 mm,长度 8 cm 的根段,试样制作参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[27],配置土体干密度为 1.60 g/cm³,体积含水率分别为 20%,27%,35%,40% 和饱和含水率 45% 的试样,密封 24 h 使含水率均匀,含水率参考水土特征曲线^[28]在转化阶段内取值;根系土样参照杨璞等^[29]制作方法,试样直径为 50 mm,高度为 100 mm(图 1);三轴试验采取不固结不排水(UU)方案,严格按照规程进行装样及剪切,实验剪切加载速率设置为 0.1 mm/min,围压设置分别为 100,200,300 kPa 剪切至 20% 应变,优先取峰值应力为强度值,无峰值取应变为 15% 对应的强度为破坏强度。试样根系直径为 0.8~1.0 mm,利用根截面积比(RAR)来确定含根量,通过计算钢盒中 RAR 设计 2 个根系含量梯度(0.1%,0.3%)。RAR 为根—土复合体剪切面上根系横截面积和土体横截面积的比值,计算公式为:

$$RAR = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \pi d_i^2 / 4}{A} \quad (1)$$

式中:RAR 为根面积比(%); n 为所需单根数量; A_r 为根的横截面积(mm²); A 为剪切面面积(mm²); d_i 为根径(mm)。

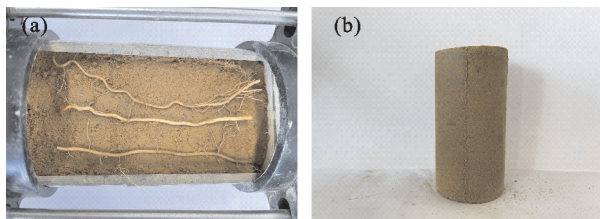
1.2 抗剪强度和弹塑性的测定

抗剪强度采用广义摩尔—库伦(mohr-coulomb)

极限强度理论,计算公式为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为极限偏差应力 (kPa); c 为土体的黏聚力 (kPa); φ 为内摩擦角 ($^\circ$)。



注:(a)为分层单向放置土体和根系;(b)为制作完成土样。

图 1 试验制作过程

土样弹性模量 (E) 是衡量土体产生弹性变形的重要指标,在土体的应力—应变曲线中,第 1 阶段为弹性变形阶段,用曲线直线段斜率来表示,其值越小表明在相同的变形条件下,土体被破坏可能性越大。弹塑性参数计算采用邓肯—张双曲线模型计算,根据该模型,对应力—应变曲线进行坐标转化,得到转化曲线 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 应为直线,用该直线在 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 轴上的截距 (a) 来计算初始切线模量,计算公式为:

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (3)$$

式中: ε_1 为轴向应变 (%); a 、 b 为反映土体的特征参数, a 的倒数为应力—应变关系的初始切线模量,主要表示由围压引起的压硬性影响; b 的倒数表示应力—应变曲线的渐进值,反映土体的抗剪强度。

2 结果与分析

2.1 含水率与含根量对破坏模式的影响

试样破坏模式一般存在剪切、剪胀和剪缩 3 种模式,在此次试验中观测到剪切和剪胀 2 种破坏模式。由 $RAR=0.3\%$ 围压为 300 kPa 不同含水率的剪切试样 (图 2) 可知,剪切破坏模式主要发生在低围压和含水率为在 20%, 27% 时,试样出现明显的贯穿剪切破坏面,角度大概为 $45^\circ + \varphi/2$, 含根量为 0.3% 相比含根量为 0.1% 的试样剪切带和位移均较小;剪胀破坏模式主要出现在高围压和含水率达到 35% 以上时,是典型的塑性变形,剪切后试样中部鼓出,轴向变短,没有明显的断裂面。高含根量相比低含根量试样鼓出变形较小,说明土体在相同的地质条件时,土体破坏模式与土体含水率和含根量有关。

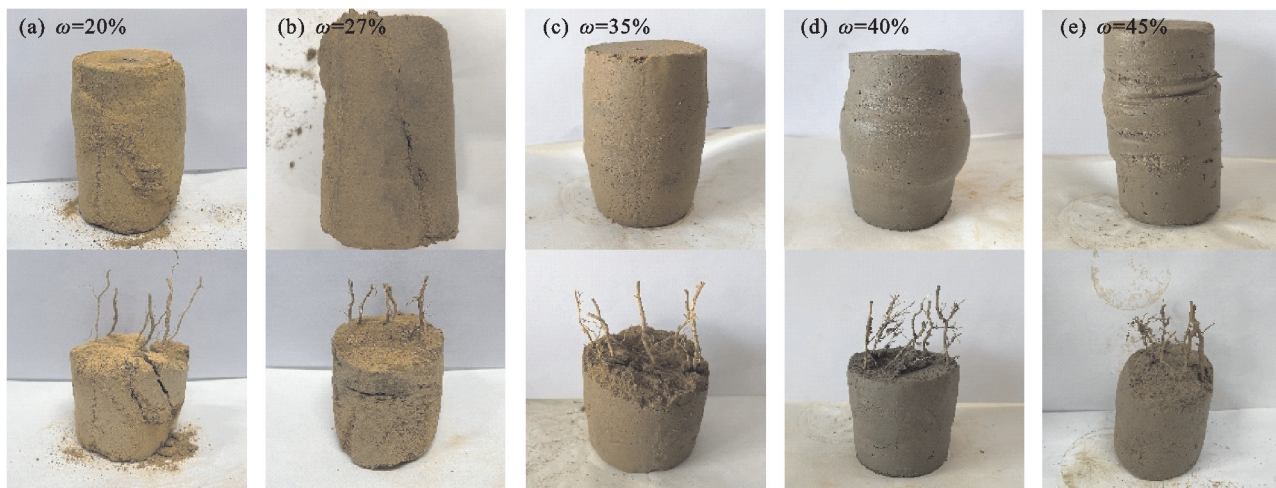


图 2 不同含水率下剪切破坏示意

通过分析根土复合体应力—应变曲线 (图 3) 发现,在不同含水率和含根量下并无表现明显规律,含水率为 20% 时, $RAR=0.1\%$ 在围压为 100 kPa 和 $RAR=0.3\%$ 在围压为 300 kPa 表现为微弱的应变硬化和理想塑形趋势,其余情况都表现为应变软化型;含水率为 27% 时,应力—应变曲线均表现为应变软化型;含水率为 35%, 40% 时,仅在 $RAR=0.1\%$ 和围压为 100, 200 kPa 时,表现为明显的应力软化现象,其余均表现为理想塑性到应变硬化趋势;含水率为 45% 的土样应力—应变曲线均表现为应变硬化。应力—应变曲线能够反映土体剪切破坏过程,通过分析不同含根量和不同含水率条件下根土复合体的应力—应变曲线可知,随着围压和含根量增加,剪切破坏时应变逐渐降低,而随着含水率增加,

应变逐渐上升,说明围压、含根量和土体含水率对土体位移存在影响。通过分析应力—应变曲线峰值偏应力可知,随着围压和含根量增加,峰值强度上升,从同一含水率下不同含根量的应力—应变曲线可以看出,试样含根量增多,试样应力—应变曲线在弹性变形阶段的变化范围和直线斜率增大;峰值强度随着含水率增加不断下降,试样在弹性阶段的斜率随含水率增加明显降低。含水率为 20% ~ 27% 时,应力—应变曲线峰值相差不大,而含水率达到 35% 之后峰值明显降低,意味着当土体含水率在达到塑限含水率后,土体强度明显降低,而当土体含水率接近液限含水率,土体的应力—应变曲线定义的破坏点强度差距再次变小,土体接近极限强度。

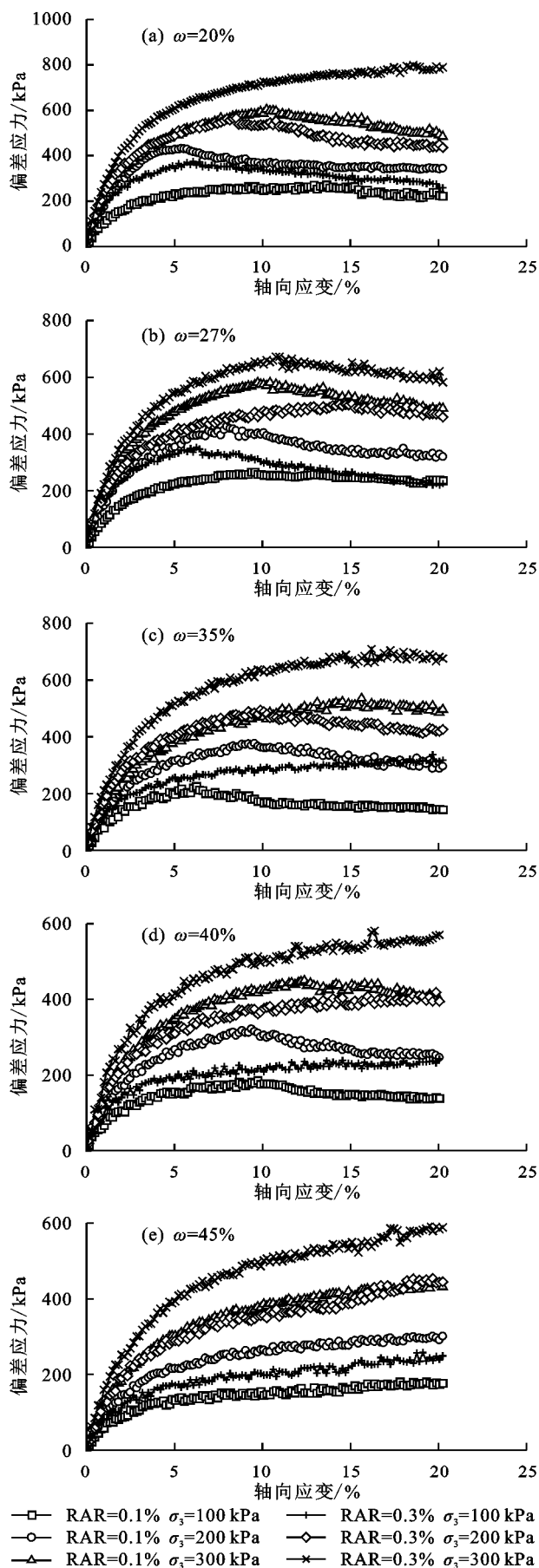


图 3 不同含水率应力—应变曲线

2.2 含水率与含根量对黏聚力与内摩擦角的影响

根据试样所得到的各个根土复合体的应力—应

变曲线,利用强度包络线计算得到不同含水率和含根量的黏聚力和内摩擦角(图 4)可知,2 种含根量下随着含水率增加,黏聚力均逐渐降低,含水率从 20% 增加到饱和含水率 45% 时,黏聚力分别降低 67%, 72%;含根量从 0.1% 提升至 0.3% 时,黏聚力相比增大 35%~82%,但内摩擦角并无明显变化规律。

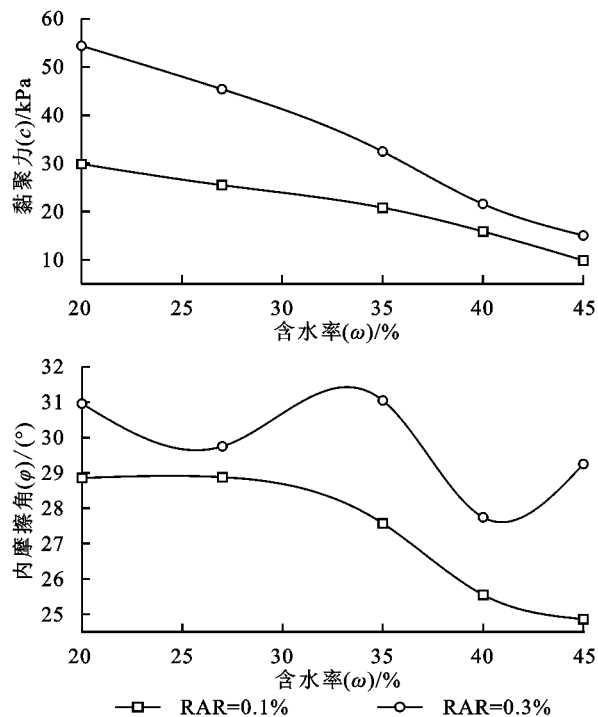


图 4 黏聚力和内摩擦角与含水率关系

利用摩尔—库伦强度理论计算得到不同含水率、含根量的极限偏差应力(表 1),试样的极限偏差应力随含水率的增加而降低,随围压和含根量的增加而增大,可知在含根量相同时,土体含水率(ω)是影响试样极限偏差应力($\sigma_1 - \sigma_3$)_f的重要因素。

表 1 不同含根量、含水率的极限偏差应力

RAR/%	围压/kPa	20%	27%	35%	40%	45%
0.1	100	264.64	247.31	211.73	184.94	161.21
	200	430.69	414.81	369.24	314.90	286.83
	300	595.32	580.39	514.56	449.04	408.19
0.3	100	373.45	346.02	303.64	230.12	222.17
	200	565.77	506.49	489.37	384.41	387.49
	300	756.60	672.17	670.30	535.41	550.26

为更加直观表达不同含水率和围压对根土复合体抗剪强度的影响规律,建立围压—抗剪强度—含水率之间的关系(图 5),当空间的某一点处于曲面以下时,则处于该点状态下的土体未受到破坏;恰好位于曲面上时,则处于该点状态下的土体受力处于平衡状态;处于曲面以上时,则处于该点状态下的土体已经受到剪切破坏。

2.3 含水率与含根量对初始切线模量的影响

通过分析根土复合体初始切线模量与含水率的关系(图 6)可知,根土复合体的初始切线模量随着含

水率上升而降低,土体含水率从 20% 升到 45% 时,2 种不同含根量的根土复合体的初始切线模量分别平均降低 43%,47%;而含水率从 20% 升到 35% 或者接近 40% 时,降低的幅度明显大于含水率从 40% 升至 45%。分析降低幅度最大的是含根量为 0.3%,围压为 300 kPa 含水率从 20% 升到 27% 时,初始切线模量降低 24%,幅度最小的是含根量为 0.3%,围压为 100 kPa 含水率从 20% 升到 27% 时,仅降低 3.6%。分析含根量从 0.1% 提升到 0.3% 时,初始切

线模量的增量整体上随含水率的增加呈先升高后降低趋势,其中含水率为 35% 时,初始切线模量在不同围压下平均升高 54%,增幅最低的含水率为 45%,平均增量为 38%,但含水率为 27%、围压为 300 kPa 时,仅仅增加 18%,远低于其他含水率处理。分析围压从 100 kPa 升到 200 kPa 时,随着含水率提高初始切线模量平均提升 44%,其中 27% 含水率提高 62%,围压从 200 kPa 升到 300 kPa 时平均提升 30%,其中 40% 的含水率提高 40%。

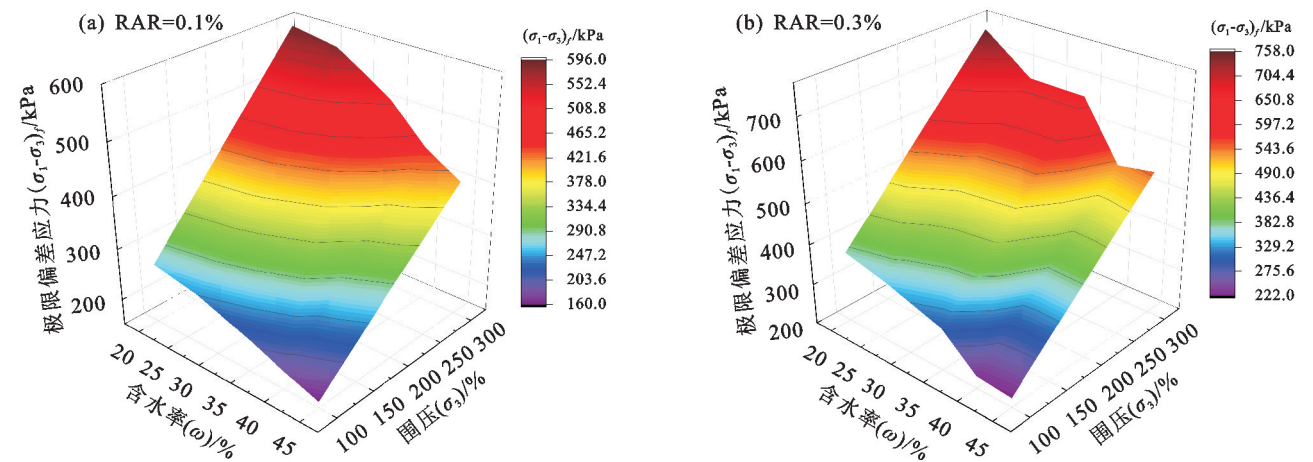


图 5 根土复合体摩尔-库伦破坏包络面

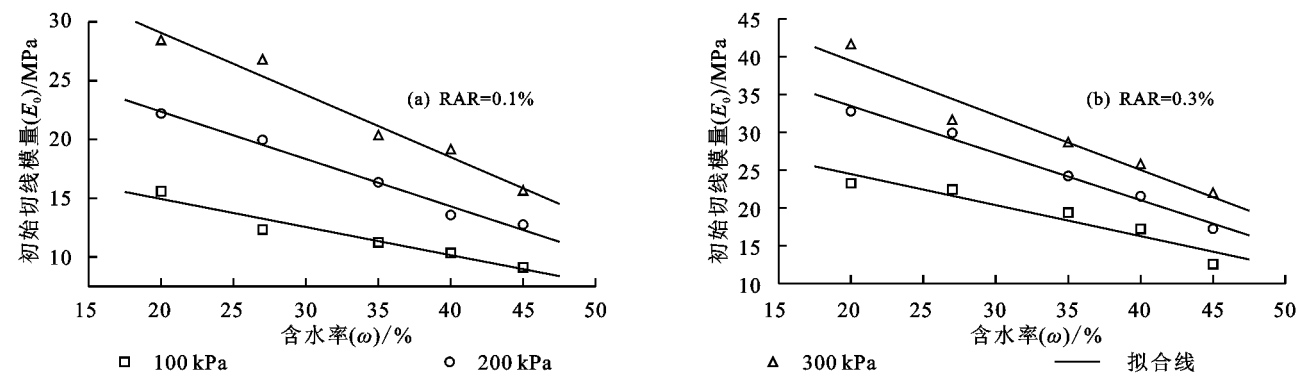


图 6 初始切线模量与含水率关系

通过对初始切线模量与含水率数据和图 6 分析可知,初始切线模量与含水率可用线性函数关系表示,部分研究人员在对黄土研究中,认为二者之间存在幂函数关系,在此次试验结果对比认为线性关系拟合更好,不同含根量和围压下根土复合体初始切线模量随含水率的变化规律见表 2。

表 2 曲线拟合公式

RAR/%	围压/kPa	拟合曲线	R^2
0.1%	100	$E_i = -0.2388\omega + 19.710$	0.9438
	200	$E_i = -0.5292\omega + 39.654$	0.9699
	300	$E_i = -0.4025\omega + 30.408$	0.9857
0.3%	100	$E_i = -0.4104\omega + 32.703$	0.9076
	200	$E_i = -0.6225\omega + 45.947$	0.9882
	300	$E_i = -0.7215\omega + 53.908$	0.9403

为更直观反映不同含水率、含根量和围压对根土

复合体初始切线模量的影响,建立含水率—围压—初始切线模量关系图(图 7)。围压增幅对切线模量的影响主要表现在不同含水率下的增幅差异较大,认为是围压对根土复合体在不同含水率条件下有不同表现性质,含水率低于 27% 时,高围压对土体有压损效应,初始切线模量的增幅降低;含水率高于 35% 时,根土复合体结构破坏,围压起到维稳作用,初始切线模量增幅变大。

3 讨论

在此次试验中观察到剪切和剪胀 2 种模式,而对于未出现剪缩破坏模式的试样可能与土体密度有关^[30]。对剪胀破坏试样,从剪切完成的试样可知,中间部位有明显变形,但是并没有出现明显剪切带,试样在剪切过程中变形仍是连续的^[31],而对于剪切破

坏模式的试样通常认为,在土样不排水的试验中剪切带出现在应力峰值前^[32],剪切带形成的位置与孔隙水压力发展趋势有关^[33]。含水率对土体破坏模式影响表现在土体变饱和过程中,破坏模式由剪切向剪胀发展,通过对比加入不同根系的有剪切带的破坏土样,0.1%含根量下破坏剪切带比0.3%含根量更明显,也被破坏得更彻底(图8),说明根系加入一定程度上阻碍土体变形能力,影响土体孔隙水压力发展。通过分析应力—应变曲线,与荆鲜雨等^[34]在黄土抗剪强度与含水率的关系研究结论相似,在含水率为20%和40%时,均出现应力软化,前者因为含水率低,有明显的应力下降,试

样内部结构出现破坏,而导致孔隙水压力低或没有孔隙水压力;后者接近饱和,在围压和剪切作用下孔隙水压力明显升高,而围压稳定,孔隙水压力也逐渐稳定,但偏差应力仍会慢慢升高直到峰值后下降,表现应力软化现象。结合破坏模式与应力—应变曲线来看,土体含水率接近塑限含水率时,土样处于硬塑状态,随外部荷载和变形加大,碎散土颗粒增大摩擦系数,应力—应变关系呈现应变硬化;随着含水率逐渐增大,土样重新处于可塑状态^[35],当受到较大的竖向应力时,土样出现鼓胀变形,随着变形加大,土体吸收应变能,应力应变呈现应变硬化。

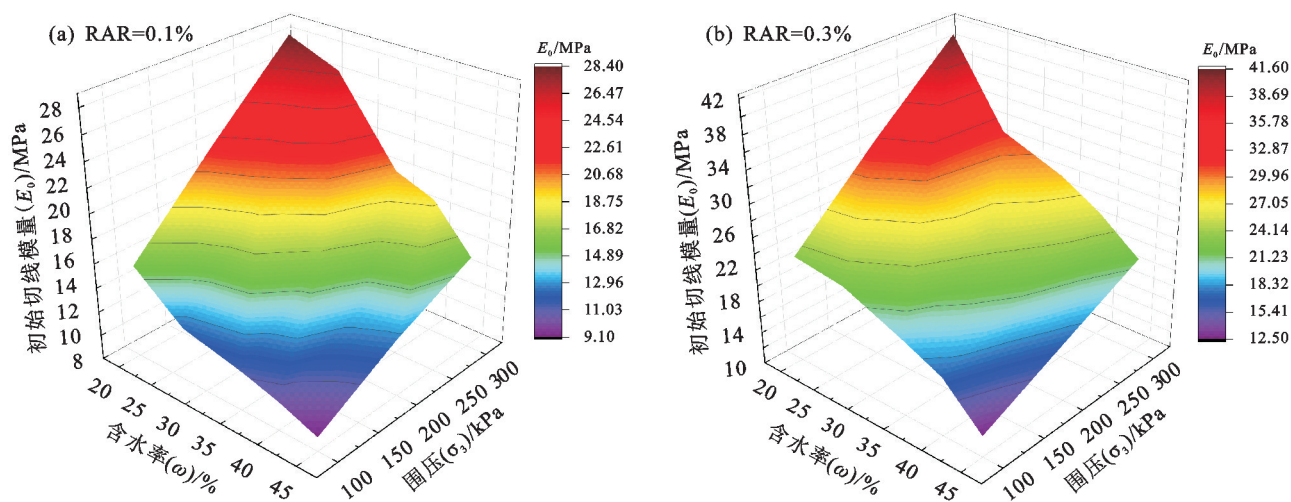


图7 含水率—围压—初始切线模量关系

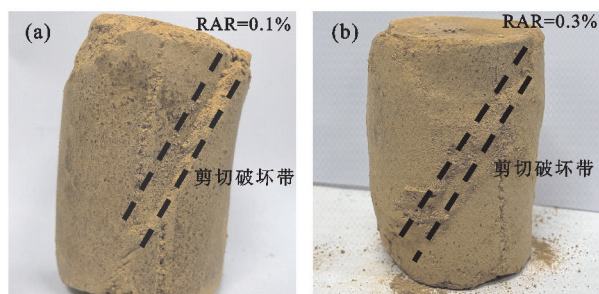


图8 含水率为20%土体破坏剪切带

含水率对根土复合体弹塑性特性变化的研究结果并不多见,根系与土壤颗粒之间的摩擦力和根系的抗拉作用能够限制土体位移。对于相同含根量试样,土体在变饱和过程中抗剪强度下降,与Tengbeh^[36]早期的研究结果一致。当土体含水率接近饱和后,土样抗剪强度和切线模量将不再随含水率增加而明显下降,通常认为土体抗剪强度随含水率升高而降低,是因为土体黏聚力变化,该现象可采用**bishop**和**fredlund**非饱和抗剪强度理论来解释,前者建立在有效应力的基础上,后者建立在多相连续介质力学基础上,虽然原理不同,但二者在衡量含水率或基质吸力引起的土体强度变化的效果是统一的,基质吸力随含水率增大而降低,与含水率近似为对数关系^[37],

因此,将含水率低于液限时的黏聚力用对数函数表示(图9);再者当土体含水率接近饱和后,在剪切作用下土体孔隙水压力的上升抵消一部分外力,而水无法承担剪应力,从而导致作用在土骨架上的应力不再续上升。但对此解释却忽略根—土弹性参数在含水率的变化过程对土体强度的影响,土体含水率从20%升到45%,2种不同含根量试样的初始切线模量分别平均降低43%和47%,可见在土体强度稳定性分析中并不可忽视,但这一现象并未在已有固土模型中得到体现,对根系弹性效应失效描述也不具备。胡其志等^[38]根系加筋土的力学研究表明,根系通过改变试样鼓胀破坏的位置,使土体的侧向变形更小;Li等^[39]在根系分布方式上对根土复合体弹塑性的研究表明,根系的柔韧性改善土体弹塑性能,但过高的含根量使土体更容易发生塑形变形,不易恢复土体结构,根系弹性效应降低土体黏性,提高土体内摩擦角,但土体含水率的升高又进一步降低根系与土颗粒之间的摩擦力和根系的抗拉作用,且在高含水率下土体可能未达到极限抗拉状态而根系已经滑脱失效^[40],也是根土复合体弹塑性参数随含水率降低的主要原因。

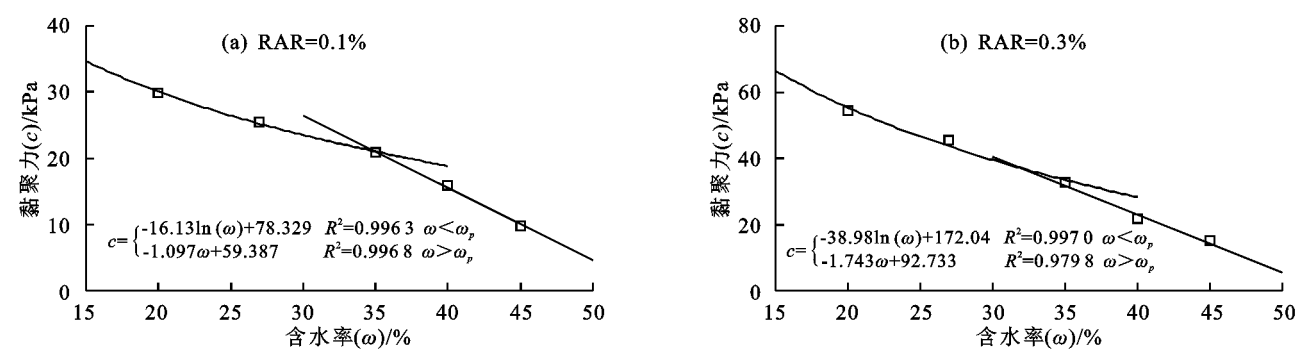


图 9 含水率与黏聚力关系

根土复合体的弹塑性受土体含水率和含根量影响,含水率变化破坏土体的结构性和根系黏结力,同时根系又提高土体稳定性。但在当前植物边坡稳定分析时,通常仅考虑土体常含水率下的塑性参数(黏聚力、内摩擦角)来计算土体的安全系数和抗剪能力,而对于变饱和过程中土体的弹塑性参数的综合应用时却极少用到,而根土复合体弹塑性特性受含水率影响在土体发生位移或变形的能力上有明显变化,在土体变饱和过程中,土体发生位移或变形能力逐渐增强,根系的加入又提高土体破坏时的偏应力和土体的延性^[41],在一定程度上抵制土体发生位移或变形能力,当考虑土体含水率和弹性参数后,可以对根系固土能力给出更为客观的解释,提高边坡稳定性计算精度。

4 结论

(1)土体破坏模式主要有剪切和剪胀 2 种模式,根系能够抵制土体变形,含水率接近塑性含水率时,应力—应变关系发展模式为弹性变形—塑性应变硬化—峰值—应变软化—残余强度,含水率接近饱和时,应力—应变关系均为应变硬化,没有出现峰值,2 种应力—应变关系对应 2 种破坏模式。

(2)含水率对根土复合体抗剪强度的影响主要在于黏聚力,含水率越高,黏聚力越低,对内摩擦角并无影响,二者之间可以用二次函数关系表示,含水率达到 35% 以上时,抗剪强度不再明显随含水率增加而降低;含根量增加提高抗剪强度,对应的黏聚力和内摩擦角也随之提高。

(3)不同含根量和围压下根土复合体初始切线模量与含水率的关系可以用线性关系拟合,围压和含水率对土体表现有压损和压硬作用,含根量对土体初始切线模量存在影响。

(4)在研究植物边坡稳定性中,应综合考虑土体弹塑性和植物因素对土体位移或变形的影响,以提高边坡稳定性计算精度。

参考文献:

[1] Stokes A, Norris J E, Van Beek L P H, et al. How

vegetation reinforces soil on slopes[M]. Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions, Dordrecht: Springer, 2008: 65-118.

[2] Zhu H, Zhang L M, Xiao T, et al. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85: 84-89.

[3] Giadrossich F, Schwarz M, Cohen D, et al. Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests[J]. Plant and Soil, 2013, 367(1): 391-406.

[4] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4): e04035.

[5] 李云鹏, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山不同林地土壤剪切破坏特性及影响因素研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1074-1080.

[6] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J]. Plant and Soil, 2014, 377(1): 43-61.

[7] 左学龙. 基于弹性本构关系的根—土复合体力学特性试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.

[8] Zhu H, Zhang L M, Garg A. Investigating plant transpiration-induced soil suction affected by root morphology and root depth [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 103: 26-31.

[9] Kim J H, Fourcaud T, Jourdan C, et al. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(10): 4897-4907.

[10] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.

[11] Wu T H, Watson A. In situ shear tests of soil blocks with roots [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(4): 579-590.

[12] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22

- (11):6-9.
- [13] Day R W. Surficial slope failure: A case study[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1993, 7(4):264-269.
- [14] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J].中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.
- [15] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2074-2081.
- [16] Jiang Y J, Alam M, Su L J, et al. Effect of root orientation on the strength characteristics of loess in drained and undrained triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2022,296:e106459.
- [17] Lian B Q, Peng J B, Zhan H B, et al. Mechanical response of root-reinforced loess with various water contents[J]. Soil and Tillage Research, 2019,193:85-94.
- [18] 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.
- [19] 王元战,刘旭菲,张智凯,等.含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1405-1410.
- [20] 程平,李鹏程,钟彩尹,等.根土复合体根系依赖的力学特性及非线性破坏准则研究[J/OL].长江科学院院报:1-9[2023-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20221213.1610.008.html>.
- [21] 朱锦奇,苏伯儒,王云琦,等.荆条根系的固土功能随土壤含水率的变化[J].林业科学,2020,56(6):202-208.
- [22] Lu N, Godt J W. Hillslope hydrology and stability [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [23] 李元松,王玉,朱冬林等.边坡稳定性评价方法研究现状与发展趋势[J].武汉工程大学学报,2021,43(4):428-435.
- [24] 王玉平,曾志强,潘树林.边坡稳定性分析方法综述[J].西华大学学报(自然科学版),2012,31(2):101-105.
- [25] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [26] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [28] Zhu J Q, Mao Z, Wang Y Q, et al. Soil moisture and hysteresis affect both magnitude and efficiency of root reinforcement[J]. Catena, 2022, 219: e106574.
- [29] 杨璞,向志海,胡夏嵩,等.根对土壤加强作用的研究[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(2):305-308.
- [30] 周跃峰,谭国焕,甄伟文.原状黄土剪缩性测试与理论分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):1242-1249.
- [31] 李艳霞.黄土三轴剪切变形形态试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [32] 董建国,李蓓,袁聚云,等.上海浅层褐黄色粉质粘土剪切带形成的试验研究[J].岩土工程学报,2001,23(1):23-27.
- [33] 李蓓,董建国.上海粘性土剪切带形成的机理分析[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(6):648-652.
- [34] 邢鲜丽,李同录,李萍,等.黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J].水文地质工程地质,2014,41(3):53-59,97.
- [35] 齐剑峰,张成兵,宋雪琳,等.滑带土含水率与力学参数关系试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(7):91-94,100.
- [36] Tengbeh G T. The effect of grass roots on shear strength variations with moisture content [J]. Soil Technology, 1993, 6(3):287-295.
- [37] 习羽.基于常规试验的非饱和黄土强度参数的研究及应用[D].西安:长安大学,2014.
- [38] 胡其志,周勇,马强,等.根系与格栅复合加筋土的力学特性试验研究[J].长江科学院院报,2022,39(10):109-115.
- [39] Li Y P, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Effects of root spatial distribution on the elastic-plastic properties of soil-root blocks[J]. Scientific Reports, 2017, 7: e800.
- [40] 王余靖,周利军,王云琦,等.直剪试验中土体含水率对根系失效方式的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(2):43-51.
- [41] 朱俊涛,刘杰,罗凯,等.加筋红土三轴试验与数值模拟研究[J].公路交通科技,2022,39(7):55-65,83.