

根—土复合体强度及其非线性特性试验研究

李鹏程¹, 钟彩尹¹, 何博¹, 肖学沛², 吴礼舟³

(1.成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2.四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 3.重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘要: [目的] 研究根—土复合体的非线性破坏准则,并结合不同含根量($G=0.12\%$, 0.24% , 0.36%)、不同含水率($w=13.22\%$, 16.22% , 19.22%)条件下根—土复合体强度,开展根—土复合体非线性特性研究,为生态水土防治工作提供科学参考。[方法] 采用 GDS 三轴仪开展了根—土复合体的固结不排水三轴试验,获得根—土复合体应力—应变曲线及抗剪强度指标。[结果] 素土与根—土复合体应力—应变关系曲线为硬化型。含根量与根—土复合体峰值强度成正比关系,但含水率对其峰值强度的影响表现出反比关系。当 $G=0.36\%$ 时,根—土复合体峰值强度的最大增幅为 70.1% ;当 $w=13.22\%$ 时,根—土复合体峰值强度最大增幅为 86.7% 。根—土复合体非线性破坏准则在正应力低于临界应力时呈非线性,在正应力高于临界应力时呈线性。 c , k 为根—土复合体非线性破坏准则中描述根系作用的关键参数,其中 c 与含根量和含水率均成正比关系, c 越大,根系对根—土复合体强度的贡献程度越大; k 与含根量成反比,与含水率成正比, k 越小,根—土复合体强度包线的非线性化特征越明显。[结论] 含根量(G)和含水率(w)对根—土复合体强度有显著影响。素土与根—土复合体的应力—应变关系曲线均呈硬化型,且根—土复合体的硬化程度明显高于素土,表明根系的加入能够同时增大土体的强度和刚度。

关键词: 根—土复合体; 含根量; 含水率; 强度; 非线性破坏准则

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0095-09

中图分类号: TU411.7

文献参数: 李鹏程, 钟彩尹, 何博, 等. 根—土复合体强度及其非线性特性试验研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 95-103. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20221012.001; Li Pengcheng, Zhong Caiyi, He Bo, et al. Experimental research on strength of root-soil composites and their nonlinear characteristics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 95-103.

Experimental Research on Strength of Root-Soil Composites and Their Nonlinear Characteristics

Li Pengcheng¹, Zhong Caiyi¹, He Bo¹, Xiao Xuepei², Wu Lizhou³

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: [Objective] A nonlinear failure criterion of root-soil composites and the nonlinear characteristics of root-soil composites was studied combining with the strength of root-soil composites under three root content conditions ($G=0.12\%$, 0.24% , and 0.36%) and three moisture content conditions ($w=13.22\%$, 16.22% , and 19.22%). [Methods] The GDS triaxial apparatus was used to conduct consolidated-undrained triaxial tests to obtain the stress-strain curves and shear strength parameters of root-soil composites. [Results] Unreinforced soil and root-soil composite stress-strain curves exhibited characteristics of hardening. Additionally, moisture content was negatively correlated with the peak stress of rooted soil, while root content was positively correlated. Under the condition of $G=0.36\%$, 70.1% was the maximum increase of peak strength of the root-soil composite. When $w=13.22\%$, the peak strength of the root-soil composite increased by a maximum of 86.7% . The nonlinear failure criterion of root-soil composites was nonlinear when the normal stress was lower than the critical stress, and linear when the normal stress was higher than the critical stress. The key parameters that described the effect of roots in the nonlinear failure criterion were c and k . c had a

收稿日期: 2022-07-01

修回日期: 2022-08-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原东缘地形急变带山地生态—水文过程与山地灾害互馈机制及灾害风险调控”(41790432); 国家自然科学基金面上项目“川藏铁路地形急变带非饱和堆积物非线性入渗演化及失稳研究”(42271183)

第一作者: 李鹏程(1997—), 男(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。Email: lipengcheng970507@163.com。

通讯作者: 肖学沛(1978—), 男(汉族), 江西省吉安市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事公路地质勘察与设计工作。Email: xiaoxuepei@schdri.com。

positive correlation with root content and moisture content. The contribution of roots in rooted soil shear strength increased with increasing c . Moreover, k was positively correlated with root content and negatively correlated with moisture content. The smaller the value of k , the more obvious the nonlinear characteristic of the strength envelope of the root-soil composite. [Conclusion] The strength of root-soil composites is greatly influenced by root content and moisture content. The stress-strain relationship curves of both unreinforced soil and root-soil composite showed a hardening type, and the hardening degree of the root soil composite is significantly higher than that of unreinforced soil, indicating that the addition of roots can simultaneously increase the strength and stiffness of the soil.

Keywords: root-soil composite; root content; moisture content; strength; nonlinear failure criterion

滑坡是一种普遍的地质灾害,对人类和社会造成了巨大的威胁,因此边坡防治刻不容缓^[1-2]。目前,植物根系对边坡强度的增强作用已得到了证实^[3-5],且随着人们对生态环境保护的愈发重视,植被护坡工程亦在国内外获得了广泛的应用,并发展迅速^[6-9]。植物根系在自然界呈现空间三维分布,具有良好的机械力学性能,并且抗拉强度高,能够有效增大土体的强度^[10-12]。此外,植物具有其他纤维材料所不具备的生物效益,作为一种可持续发展的材料和护坡固土方式得到了高度关注^[13-14]。植物根系对土体的增强作用主要体现在强度加固方面^[15-16]。为了分析植物对边坡土体强度的影响,国内外学者做了大量的试验研究。李建兴等^[17]开展了不同种类草本植物对土体抗剪强度影响程度的研究,发现不同草本植物根—土复合体抗剪强度均高于素土。祁兆鑫等^[18]利用直剪试验研究了根—土复合体在不同深度处的抗剪强度,并证实了草本植物能有效保护浅层边坡。吕春娟等^[19]利用三轴试验探究了根径对根—土复合体强度的影响,发现根—土复合体强度与根径成正比。Guo 等^[20]基于三轴试验提出了广义等效围压的概念,将根系对土体的增强作用等效为作用于根—土复合体的围压增量。Meng 等^[21]研究了根系长度对根—土复合体抗剪强度的影响,发现根系对土体的加固作用与单根长度有显著正相关关系。为了量化根—土复合体的强度,大多数学者主要基于草本植物、根系形态、根系分布方式等方面开展了一系列原位及室内试验研究,并取得了可观的研究成果。但是,对涉及到根—土复合体非线性破坏准则的研究还较少。此外,自然环境条件对根系生长情况影响较大,对量化根系对土体强度的增强作用以及建立适用的根—土复合体非线性破坏准则模型提出了严峻的挑战。目前,学者们通常采用莫尔—库伦线性破坏准则来研究根—土复合体抗剪强度^[17,21-22],但线性破坏准则往往会高估岩土体的强度,且土体破坏包线具有非线性特征^[23]。有学者提出采用广义非线性强度准则描述土体非线性特征^[24],但仅通过三轴试验无法获取全部参数。因此,提出参数易获取的非线性破坏准则来描

述根—土复合体的破坏特征具有重要的现实意义。为了建立根系土的非线性破坏准则,并开展根—土复合体强度及其非线性特性的研究,本文将进行灌木根系的 GDS 三轴固结不排水试验以探讨含根量(G)及含水率(w)对根—土复合体抗剪强度的影响。通过三轴试验所获得的偏应力—应变关系曲线,分析根—土复合体峰值强度的变化规律,展开含根量和含水率对根—土复合体强度的研究。本研究成果将对生态水土防治起到一定的参考价值和实际意义。

1 材料与方法

1.1 取样区概况

试验取样于四川省都江堰市龙池镇,其地理位置为 $30^{\circ}01'N$, $103^{\circ}35'E$,该地区地质复杂,主要自然灾害包括山体滑坡、泥石流等。该地区属于亚热带湿润季风气候,气候温和,日照时长较短,年平均气温为 $12.2^{\circ}C$ 。高频的阴雨天气使得该地区有充沛的降雨量,年平均降雨量可达 $1\,134.8\text{ mm}$,5—9 月为降雨高发期。降雨特点为波动大,雨强度高,暴雨频发,为水土流失、滑坡等地质灾害的发生提供了条件^[25]。取样区土壤整体呈棕褐色,夹杂有少量灰白色固体颗粒。植被覆盖度较高,植物种类丰富,且以林木、灌木类植物为主,灌木类植物中小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)分布较为广泛。

1.2 试验材料

为使研究土体能有效反映根系生长范围内的土体特征,本文参考了刘亚斌等^[26]的取样方法,结合取样区植物的生长情况进行取样。由于取样区地表覆盖有较厚腐质层,为了避免杂质对土体性质的影响,取样时对地表 10 cm 厚土层进行了挖去处理(该深度内根系分布较少),并向下开挖至无根系处,故土壤取样于研究区植被覆盖地表以下 $10\text{—}60\text{ cm}$ 处,该深度范围即为根系主要生长范围。此外,在植被覆盖区选取生长情况良好的植物,在距其根茎 10 cm 处向下开挖 60 cm 深的土壤剖面,深度每增加 15 cm ,用尺寸(高度 \times 直径)为 $20.0\text{ mm}\times 61.8\text{ mm}$ 的环刀取样用于研究不同深度处的含根量。土壤为粉质黏土,根据

烘干法测得其天然状态下的初始含水率为 19.218%。试验土体干密度为 1.628 g/cm³,最优含水率为 16.22%,塑限为 15.4%,液限为 31.5%,塑性指数为 16.1,比重为 2.71。

试验选择取样区广泛分布的灌木植物小叶女贞 (*Ligustrum quihoui*) 作为研究对象,采用全挖法挖取 100 株(1 a 生,植株高度为 80~90 cm)带回实验室。小叶女贞主根明显,侧根延伸范围广,侧根长度范围为 5~25 cm。植物根径范围为 0.5~4.5 mm,以 0.5~2.5 mm 为主,且 1.5 mm 左右的根系数量最多,故本文选取根径为 1.5 mm 左右的侧根根系作为试验材料。由于主根长度较长,为了便于根系存放,对主根进行了截断处理。植物根系如图 1 所示。

2 试验方法

本文于 2022 年 2 月 16 日至 3 月 5 日采用根—土复合体重塑试样开展室内三轴试验。结合滑坡推力和取样深度的影响,本次试验围压设置为 200,600 和 1 000 kPa。

由于土中不同深度范围内的根系含量不同,根据环刀取样所得土体含根量,将含根量(G)设为 0.12% (3 根),0.24% (6 根)和 0.36% (9 根)。根据取样处土体含水率情况,同时结合试验所测土样最优含水率与天然含水率值,将含水率(w)设为 13.22%,16.22% 和 19.22%。为了便于分析根系对土体强度的增强作

用,本文采用垂直分布方式布根(图 2)。本次试验采用的应变控制式 GDS 三轴仪最大轴压可加至 2 000 kPa。试验过程中采用固结不排水条件。

将土样配制为试验目标含水率后,参照《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》^[27],采用分层压实的方法制样,试样尺寸(高度×直径)为 100.0 mm×50.0 mm。三轴试验组别设置详见表 1。每组试验重复 3 次,并取其偏应力的平均值作为试验值。

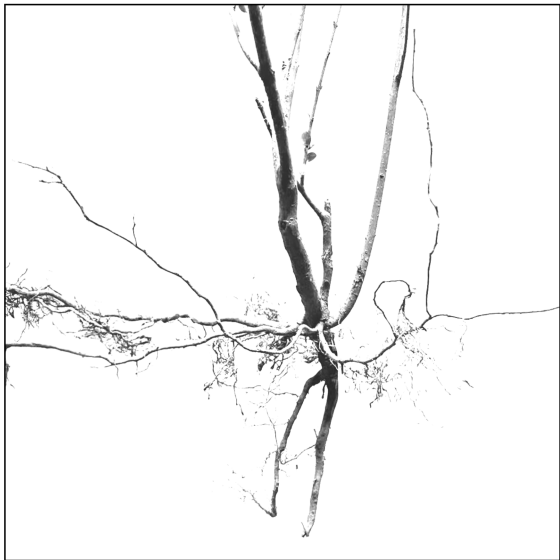


图 1 小叶女贞根系分布图

Fig.1 Root distribution of *Ligustrum quihoui*

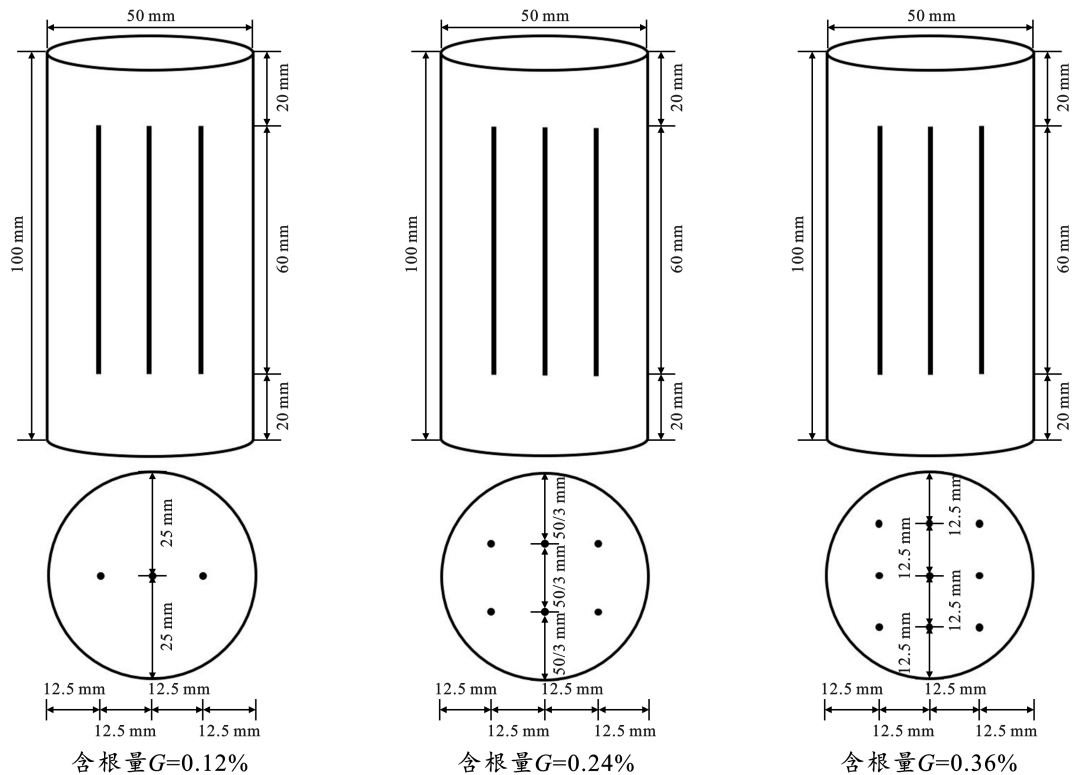


图 2 三轴试样根系布置

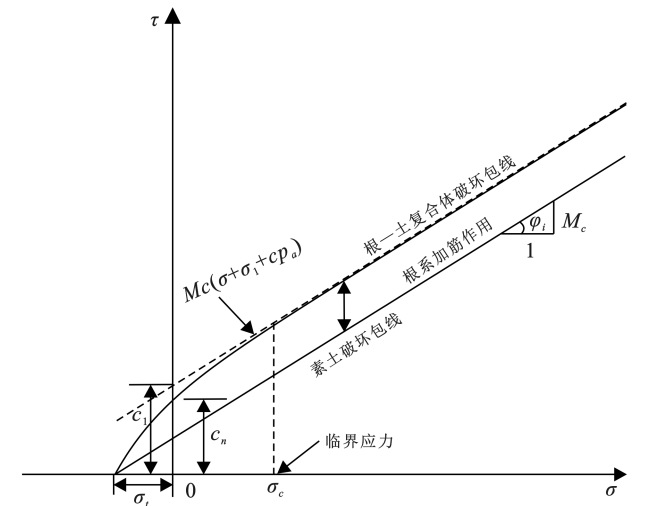
Fig.2 Root arrangement of triaxial samples

表 1 三轴试验设计

Table 1 Design of the triaxial test

试样类型	含根量 $G/\%$	含水率 $w/\%$	组别编号
素土	—	13.22	ST ₁
		16.22	ST ₂
		19.22	ST ₃
根—土复合体	0.12	16.22	RT ₁
	0.24	16.22	RT ₂
	0.36	16.22	RT ₃
	0.36	13.22	WT ₁
	0.36	16.22	WT ₂
	0.36	19.22	WT ₃

剪切速率为 0.1 mm/min^[23], 试样轴向应变达到 20% 时停止试验, 取峰值应力作为试样的峰值强度 (σ_f)。若未记录到峰值应力, 取应变为 15% 时对应的应力作为峰值强度。已有研究^[26-28]表明, 根系对土体破坏时的内摩擦夹角影响较为薄弱。假设根—土复合体内摩擦角与素土内摩擦角一致, 通过修正纤维加筋土破坏准则^[29]来研究根—土复合体的强度特征 (图 3)。



注: M_c 为素土破坏时的应力比; c 为非负常数; φ_i 为素土包线倾角; σ_t 为素土抗拉强度; σ_c 为临界应力; c_l 为根—土复合体线性破坏准则黏聚力; c_n 为根—土复合体非线性破坏准则黏聚力。

图 3 根—土复合体破坏准则

Fig.3 The failure criterion of root-soil composite

其破坏准则为:

$$\tau = M_c f(\theta) [(\sigma + \sigma_t) + g_c] \tag{1}$$

$$g_c = c p_a \left[1 - \exp \left(-k \frac{\sigma + \sigma_t}{p_a} \right) \right] \tag{2}$$

式中: τ 为试样剪应力 (kPa); M_c 为素土破坏时的应力比; 中主应力大小对土体破坏影响可采用插值函数 $f(\theta)$ 来表示, 当处于三轴压缩状态时 $f(\theta) = 1$; σ 为正应力 (kPa); σ_t 为素土的抗拉强度 (kPa); g_c 为

描述根—土复合体强度的函数; c, k 均为非负常数, c 反映根系对土体强度的增强作用, k 则控制临界应力的大小; p_a 为参考压力值, 取 101 kPa。

当 $g_c = c p_a$ 时, 公式 (2) 则为根—土复合体的线性破坏准则:

$$\tau = M_c f(\theta) (\sigma + \sigma_t + c p_a) \tag{3}$$

τ, σ 的表达式如下^[27]:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi_i \tag{4}$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \varphi_i \tag{5}$$

式中: σ_1 为大主应力 (kPa); σ_3 为小主应力 (kPa); φ_i 为素土包线倾角 ($^\circ$)。

从图 3 可知, 存在一个临界应力 (σ_c) 使得根—土复合体强度包线分为两部分: 当根—土复合体正应力小于临界应力时, 其强度包线呈非线性, 此时根—土复合体中根系主要发生滑移; 当根—土复合体正应力大于临界应力时, 其强度包线呈线性, 且倾角与素土强度包线一致。此时, 根—土复合体中根系主要发生屈服^[30]。图 3 中 c_n 为根—土复合体非线性破坏准则中的黏聚力 (kPa), c_l 为公式 (3) 中根—土复合体线性破坏准则中的黏聚力 (kPa)。

3 结果与分析

3.1 应力—应变关系曲线

图 4—6 分别展示了素土和根—土在不同含水率条件下的应力—应变曲线。图 4 表明在不同含水率条件下, 随着应变的增大, 素土偏应力在各级围压下均呈现出增大的趋势。在相同围压条件下, 含水率愈大, 素土的应力—应变曲线愈平缓。对比图 6 可以发现, 根—土在不同含水率条件下的应力—应变曲线表现出和素土应力—应变曲线一致的变化趋势。且随着含水量的增大, 素土偏应力表现为: $\sigma_{(ST_1)} > \sigma_{(ST_2)} > \sigma_{(ST_3)}$, 根—土复合体偏应力表现为: $\sigma_{(WT_1)} > \sigma_{(WT_2)} > \sigma_{(WT_3)}$ 。图 5 展示了根—土在不同含根量条件下的应力—应变曲线。在不同含根量条件下, 随着应变的增大, 根—土的偏应力在各级围压下均呈现出增大的趋势。在相同围压条件下, 含根量愈大, 根—土的应力—应变曲线愈陡, 且随着含根量的增大, 根—土复合体偏应力表现为: $\sigma_{(RT_1)} < \sigma_{(RT_2)} < \sigma_{(RT_3)}$ 。此外, 素土与根—土复合体的应力—应变曲线形式一致。图 4—6 表明, 根系的加入并未影响土体应力—应变曲线的形式, 素土与根—土复合体应力—应变曲线均表现出应变硬化的特征。且根—土复合体的硬化程度高于素土的硬化程度, 表明根系显著增强了土体的强

度与刚度。在加载初期,随着应变的增大,素土与根—土复合体的应力水平均较低。在应变相对较小时(低于 5%),偏应力随着应变的增加而迅速增大。

而后随着应变的继续增长,偏应力增长速度逐渐减小。且在相同含根量或含水率条件下,围压越低,偏应力增长越慢。

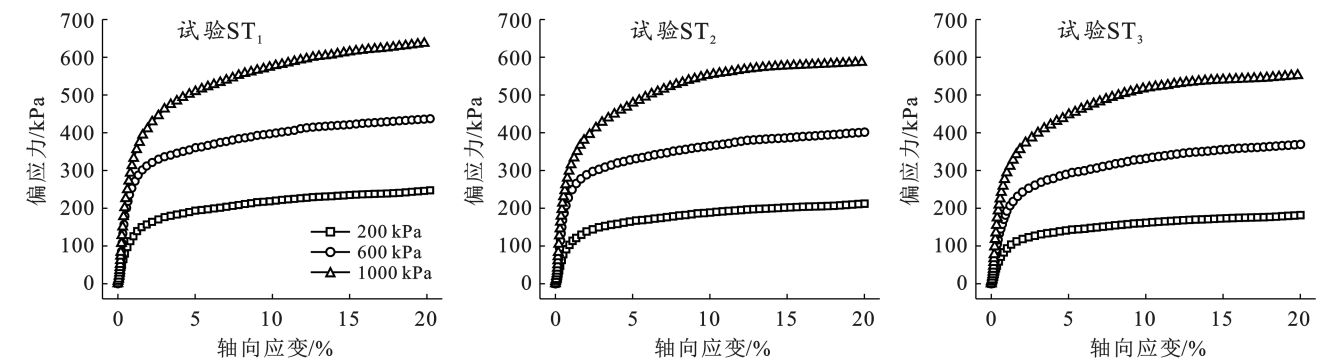


图 4 不同含水率条件下素土的应力—应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of unreinforced soil under different moisture conditions

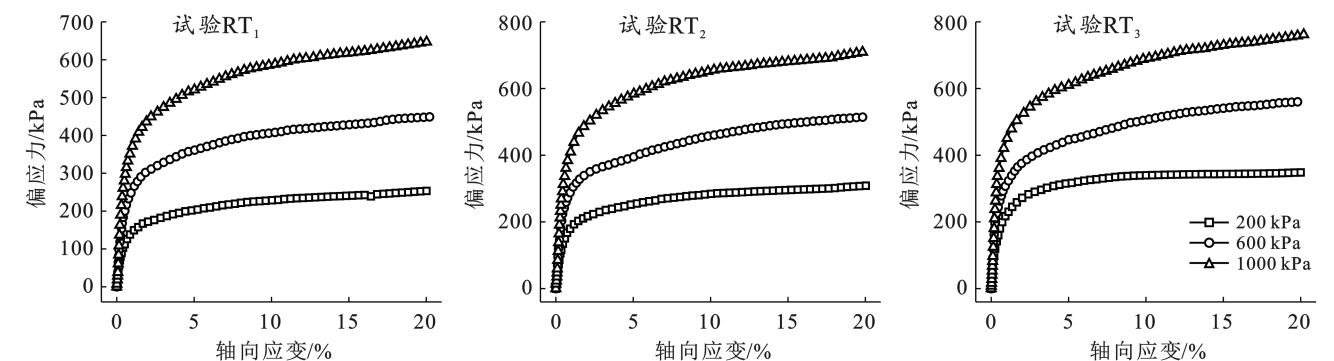


图 5 不同含根量条件下根—土复合体的应力—应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of root-soil composite under different root content conditions

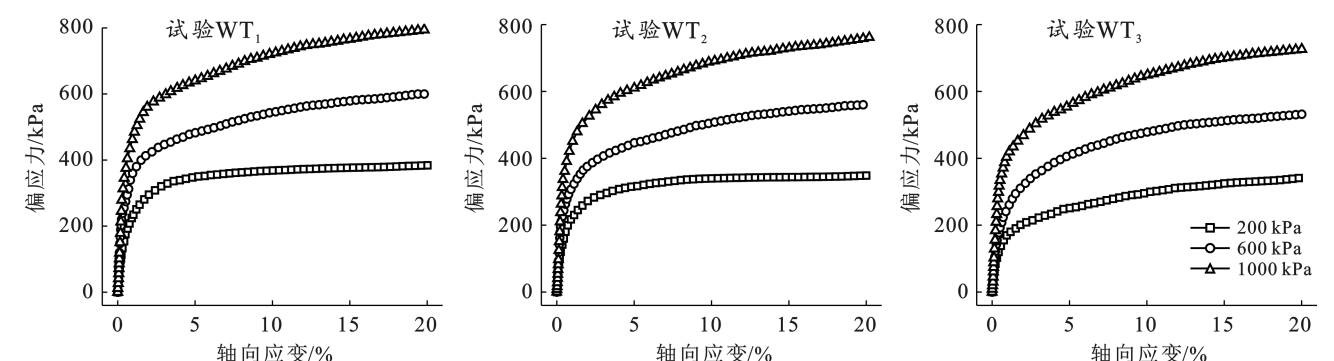


图 6 不同含水率条件下根—土复合体的应力—应变曲线

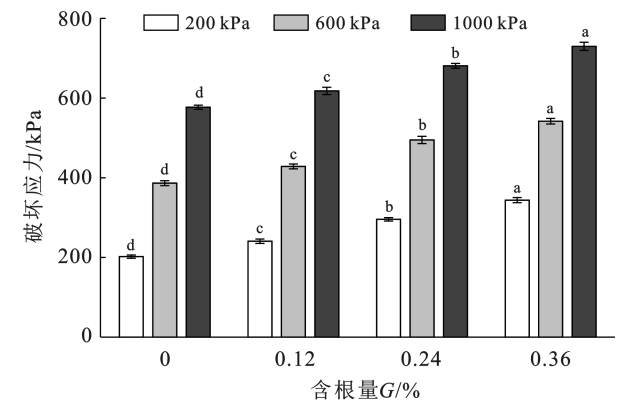
Fig.6 Stress-strain curves of root-soil composite under different moisture conditions

3.2 不同含根量对根—土复合体强度的影响

图 7 表明,相同围压不同含根量条件下不同小写字母表示偏应力之间具有显著性差异($p < 0.05$)。在相同围压条件下,试样含根量越大,根—土复合体的峰值强度越大。即根—土复合体峰值强度与含根量成正比,峰值强度从大到小依次为: $\sigma_{f(RT_3)} > \sigma_{f(RT_2)} > \sigma_{f(RT_1)} > \sigma_{f(ST_2)}$ 。根—土复合体峰值强度较素土峰值

强度的增幅表现为:当围压为 200 kPa 时,增幅为 19.1% ($G=0.12\%$)—70.1% ($G=0.36\%$);当围压为 600 kPa 时,增幅为 10.9% ($G=0.12\%$)—40.2% ($G=0.36\%$);围压为 1 000 kPa 时,增幅为 7.1% ($G=0.12\%$)—26.5% ($G=0.36\%$)。在相同含根量、不同围压条件下,根—土复合体峰值强度与围压成正比。但随着围压的增大,根—土复合体峰值强度较素

土峰值强度的增幅却有所降低,表明围压对根系土强度的增强作用是有限的。



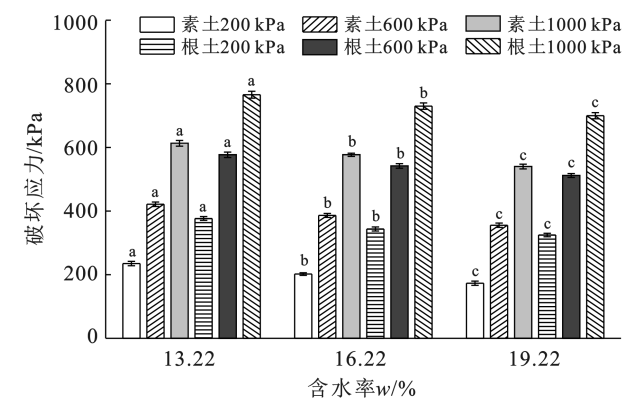
注:不同小写字母表示同一围压不同含根量条件下试样破坏应力之间具有显著性差异($p<0.05$)。

图 7 不同含根量条件下试样峰值强度变化规律

Fig.7 Variation law of peak strength of samples under different root content conditions

3.3 不同含水率对根—土复合体强度的影响

图 8 表明,相同围压不同含水率条件下不同小写字母表示偏应力之间具有显著性差异($p<0.05$)。围压相同时,含水率越大,素土与根—土复合体的峰值强度越小,峰值强度从大到小依次为: $\sigma_f(w=13.22\%)>\sigma_f(w=16.22\%)>\sigma_f(w=19.22\%)$ 。素土和根—土复合体峰值强度:当围压为 200 kPa 时,分别降低了 14.0%,10.0%($w=16.22\%$)和 26.4%,18.1%($w=19.22\%$);当围压为 600 kPa 时,分别降低了 8.3%,6.9%($w=16.22\%$)和 15.6%,13.2%($w=19.22\%$);围压为 1 000 kPa 时,分别降低了 5.9%,5.3%($w=16.22\%$)和 11.9%,10.8%($w=19.22\%$)。但根系对土体强度的增强作用仍然显著。根—土复合体峰值强度较素土峰值强度的增幅表现为:当围压为 200 kPa 时,增幅为 62.4%($w=13.22\%$)—80.7%($w=19.22\%$);当围压为 600 kPa 时,增幅为 38.1%($w=13.22\%$)—42.0%($w=19.22\%$);当围压为 1 000 kPa 时,增幅为 25.8%($w=13.22\%$)—27.4%($w=19.22\%$)。在相同围压条件下,含水率越大,土体孔隙大多数被水充满,土颗粒间的咬合程度降低,土体强度越低。此时,根—土复合体峰值强度较素土峰值强度的增幅随含水率的增大而增大,表明土体强度受根系影响的程度与含水率成正比关系。含水率相同时,围压与根—土峰值强度成正比关系。相比于素土,根系土峰值强度较其的增幅却随之减小,表明围压越低,根系对土体强度的增强作用越显著。



注:不同小写字母表示同一围压不同含水率条件下试样破坏应力之间具有显著性差异($p<0.05$)。

图 8 不同含水率条件下试样峰值强度变化规律

Fig.8 Variation law of peak strength of samples under different moisture conditions

3.4 根—土复合体的非线性破坏

根据试验数据得 $\sigma_{t(ST_1)} = 295.28 \pm 11.77$ kPa, $\sigma_{t(ST_2)} = 229.43 \pm 12.25$ kPa, $\sigma_{t(ST_3)} = 176.53 \pm 10.52$ kPa, $M_{c(ST_1)} = 0.195 \pm 0.003$, $M_{c(ST_2)} = 0.193 \pm 0.002$, $M_{c(ST_3)} = 0.190 \pm 0.002$ 。根—土复合体强度参数详见表 2。根—土复合体非线性强度包络线如图 9 所示。表 2 表明,在相同含水率($w=16.22\%$)条件下, c 与含根量成正比, k 与含根量成反比。在相同含根量($G=0.36\%$)条件下,随含水率的增大, c, k 均随着含水率的增大而增大。所有试验组中, c, k 最大值分别为 3.40,0.63,最小值分别为 0.80,0.37。此外,根—土试样黏聚力与含根量成正比,与含水率成反比。且相同组别下, $c_n < c_m < c_l$ 。 c_n 比 c_m 降低了 5.2%~21.8%, c_n 比 c_l 降低了 5.6%~27.9%。由图 9 可知,临界应力表现为: $\sigma_{c(RT_1)} < \sigma_{c(WT_3)} < \sigma_{c(RT_2)} < \sigma_{c(RT_3/WT_2)} < \sigma_{c(WT_1)}$ 。此外,临界应力越大,根—土复合体破坏包络线的非线性化越强。

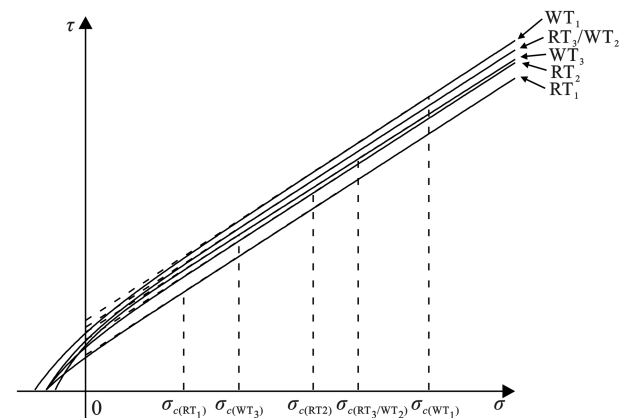


图 9 根—土复合体非线性强度包线

Fig.10 Nonlinear strength envelope of root-soil composite

表 2 根—土复合体强度参数
Table 2 Strength parameters of root-soil composite

指 标	含根量			含水率		
	RT ₁	RT ₂	RT ₃	WT ₁	WT ₂	WT ₃
<i>c</i>	0.80±0.08 ^c	2.18±0.06 ^b	3.32±0.03 ^a	3.24±0.03 ^c	3.32±0.03 ^b	3.40±0.01 ^a
<i>k</i>	0.63±0.02 ^a	0.52±0.01 ^b	0.44±0.01 ^c	0.37±0.02 ^c	0.44±0.01 ^b	0.49±0.02 ^a
<i>c_n</i> (kPa)	56.96±1.46 ^c	74.75±0.66 ^b	85.21±2.24 ^a	99.36±2.75 ^a	85.21±2.24 ^b	71.17±2.64 ^c
<i>c_l</i> (kPa)	60.34±1.54 ^c	87.09±1.06 ^b	108.89±1.42 ^a	122.45±2.26 ^a	108.89±1.80 ^b	98.69±1.78 ^c
<i>c_m</i> (kPa)	60.08±1.57 ^c	82.82±2.91 ^b	102.23±2.21 ^a	117.40±1.57 ^a	102.23±2.21 ^b	91.05±1.37 ^c

注:*c* 为反映根系对土体强度增强作用的非负常数;*k* 为控制临界应力大小的非负常数;*c_n* 为根—土复合体非线性破坏准则的黏聚力;*c_l* 为公式(3)中根—土复合体线性破坏准则的黏聚力;*c_m* 为莫尔—库伦破坏准则的黏聚力;表中数据代表平均值±标准误差(*n*=3);不同含根量或含水率条件下相同行不同小写字母表示相关参数与含根量或含水率间存在显著性差异(*p*<0.05)。

4 讨论

根系发挥对土体的加筋作用主要依赖于根系与土体间作用力的传递,而根—土界面间力的传递与根—土界面的强度相关^[30]。根—土复合体应力—应变曲线表明,根系发挥其对土体的加筋作用一般会经历两个阶段:①根—土复合体受力初期,应变和应力水平较小,导致根—土界面强度较小,根系对土体的加筋作用较弱,但随着应变的发展,应力水平提高,根—土界面强度迅速加强,根系对土体的加筋作用进一步发挥;②当应变增大至一定程度时,根—土界面强度逐渐稳定,根系开始持续稳定地发挥其对土体的加筋作用。此外,通过对比素土与根—土复合体的应力—应变曲线发现,根—土复合体应力—应变曲线比素土应力—应变曲线更陡,表明根系的加入提高了土体强度的同时也增大了土体的刚度^[16,20]。

根—土复合体强度与含根量成正比,表现为: $\sigma_{f(RT_3)} > \sigma_{f(RT_2)} > \sigma_{f(RT_1)} > \sigma_{f(ST_2)}$ 。根土间的接触面积随含根量的增大而增大,使得根—土界面的摩擦锚固作用显著提高^[21]。其次,含根量增大,土体密实度增大,土粒间的紧密接触增大了土粒间的咬合力,土体强度也随之加强。同时,含根量增大,则有更多的根系穿过土体的剪切破坏面,根系对土体受力的传递与分散作用更强,对土体的约束作用也加强^[6,31]。

根—土复合体的强度随含水率的增大而降低,表现为: $\sigma_{f(WT_1)} > \sigma_{f(WT_2)} > \sigma_{f(WT_3)}$,与 Lian 等^[22]研究结果一致。水的润滑作用会削弱根—土界面的摩擦锚固力,导致根系拔出阻力降低^[32]。此外,含水率的变化会影响根—土复合体中根系滑移和屈服的比例,从而影响根系对土体的加固作用^[33]。含水率增大,使土粒表面结合水膜增厚,削弱了试样内部土粒间及根土间的接触^[34]。孔隙水的增多,增大了孔隙水压力,降低了有效应力及土颗粒之间的咬合力,导致根—土

强度下降^[35]。值得注意的是,本文重塑根—土复合体强度与含水率成反比的变化规律与朱锦奇等^[34]关于重塑根—土复合体强度随含水率的增加呈先增大后减小的规律有所不同。原因在于不同土体间性质存在差异,且土体强度变化规律与土壤颗粒级配和结构相关^[16]。此外,根系种类和分布方式的不同也会导致含水率对根—土复合体强度的影响程度有一定差别。

不同含根量和不同含水率条件下,根—土复合体峰值强度较素土峰值强度的增幅均与围压成反比。低围压时,土颗粒间的孔隙被逐渐挤压,使得根—土复合体中土颗粒间及根土间接触逐渐紧密,根系土的峰值强度也会得到显著提高^[20]。但随着围压的继续增大,土体和根土界面变得过于密实,根系的滑移受到限制,使得根系本身的抗拉性能难以充分发挥,故在高围压条件下,根系土峰值强度较素土峰值强度的增幅较小。相同含水率条件下表现为: $c_{(RT_3)} > c_{(RT_2)} > c_{(RT_1)}$ 。这表明含根量越高,根系参与承担荷载的部分越多,根系对土体强度的贡献越大,*c* 值越大。同时, $k_{(RT_1)} > k_{(RT_2)} > k_{(RT_3)}$ 且 $\sigma_{c(RT_1)} < \sigma_{c(RT_2)} < \sigma_{c(RT_3)}$ 表明,含根量越高,*k* 值越小,根—土复合体中根系达到屈服时所需的临界应力越大,根—土复合体展示越强的非线性破坏特征。相同含根量条件下, $c_{(WT_1)} < c_{(WT_2)} < c_{(WT_3)}$,表明当含水率较高时,根系对土体强度的贡献更显著,这与奚灵智等^[36]研究结果一致。根—土复合体中根系与土体协同承载与变形,高含水率使土体发生软化,导致土体承载能力降低^[22]。此时,根系在高含水率根—土试样中承担荷载的比例增大。因此,含根量相同时,含水率越大,*c* 值越大。同时, $k_{(WT_1)} < k_{(WT_2)} < k_{(WT_3)}$ 且 $\sigma_{c(WT_1)} > \sigma_{c(WT_2)} > \sigma_{c(WT_3)}$,表明含水率越高,*k* 值越大,根—土复合体中根系到达屈服时所需的临界应力越小,根—土复合体强度的非线性破坏特征就越弱。即较高的 *k* 值,会使得破坏包线在较低的应力水平上趋于线性化,这与加

筋土的研究结果一致^[29]。此外, c_n 与含根量成正比, 与含水率成反比。且 c_n 与 c_l, c_m 相比均有所减小, 表明线性破坏准则往往会高估根系土的强度^[24]。

由于根—土界面强度受到根—土复合体有效约束(素土抗拉强度与主应力之和, 即 $\sigma_t + \sigma$) 的影响^[29], 本文所提出的根—土复合体非线性破坏准则遵循两个特点: ①随着有效约束的减小, 根—土复合体破坏包络线要收敛于素土的破坏包络线。低应力条件下, 根—土复合体的破坏由根土相对滑移控制。此时, 根系对土体的加固效果随有效约束的减小而减小。在有效约束为零的极端条件下, 根—土复合体剪应力为 0。②有效约束较高时, 根—土复合体破坏包络线呈线性, 且斜率与素土破坏包线一致。高有效约束条件下, 根—土复合体的破坏由根系的屈服控制。此时, 根系对土体的加筋作用将达到最大, 使得根—土复合体破坏包络线与素土包络线平行。

5 结论

(1) 素土与根—土复合体的应力—应变关系曲线均呈硬化型, 且根—土复合体的硬化程度明显高于素土, 表明根系的加入能够同时增大土体的强度和刚度。

(2) 含根量的增大有利于增大根—土间接触面积、土体密实度和穿过土体剪切破坏面的根系数, 从而提高根—土复合体的强度。在相同含水率条件下, 根—土复合体峰值强度与含根量成正比。且含根量为 0.36% 时, 各级围压下根系土峰值强度较素土峰值强度的增幅均最大。

(3) 含水率的增大会削弱根—土界面摩擦阻力和土颗粒间的咬合力并增大孔隙水压力, 从而导致根—土复合体强度的降低。在相同含根量条件下, 根—土复合体峰值强度与含水率成反比。且含水率为 19.22% 时, 各级围压下根系土峰值强度较素土峰值强度的增幅均最大。

(4) 本文提出的根—土复合体的非线性破坏准则分为非线性部分和线性部分。非线性破坏准则中描述根系对土体强度增强作用的参数 c 与含根量和含水率均成正比, 控制临界应力大小的参数 k 则与含根量成反比, 与含水率成正比关系, 且低 k 值意味着根—土复合体破坏包线的显著非线性特征。此外, 根—土复合体非线性破坏准则遵循两个特点: ①在有效约束减小的条件下, 根—土复合体破坏包络线要逐渐收敛于素土的破坏包络线; ②在有效约束较高的条件下, 根—土复合体破坏包络线呈线性, 且斜率与素土破坏包线一致。

(5) 根—土复合体非线性破坏准则中黏聚力 c_n 与含根量成正比, 与含水率成反比。此外, c_n 与 c_m, c_l 相比最大减幅分别为 21.8% 和 27.9%, 表明线性破坏准则往往会高估根—土复合体的黏聚力。

[参 考 文 献]

- [1] Wu Lizhou, Selvadurai A P S, Zhang Limin, et al. Poro-mechanical coupling influences on potential for rainfall-induced shallow landslides in unsaturated soils [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 98: 114-121.
- [2] Li Shaohong, Luo Xiaohui, Wu Lizhou. A new method for calculating failure probability of landslide based on ANN and convex set model [J]. *Landslides*, 2021, 18: 2855-2867.
- [3] 杨路, 杜峰, 秦晶晶, 等. 黄土区 3 种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 295-300, 310.
- [4] 钟彩尹, 李鹏程, 马滔, 等. 根—土复合体的三轴试验及其强度分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 97-104.
- [5] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1290-1300.
- [6] 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.
- [7] Yildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Assessment of plant-induced suction and its effects on the shear strength of rooted soils [J]. *Geotechnical Engineering*, 2019, 172(6): 507-519.
- [8] 张家明, 陈积普, 杨继清, 等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 1-7.
- [9] 许桐, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 柴达木盆地 4 种盐生植物根系力学特性及根—土复合体抗剪强度研究 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 101-110.
- [10] 王程, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 黄河源区六种草本植物根系抗拔力特征及其影响因素研究 [J]. *草地学报*, 2023, 31(01): 157-165.
- [11] Alam S, Manzur T, Borquist E, et al. In-situ assessment of soil-root bonding strength to aid in preventing soil erosion [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105140.
- [12] Feng Song, Liu Hongwei, Ng C W W. Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 118: 103335.
- [13] 颜哲豪, 谌芸, 刘泉宏, 等. 喀斯特坡地 2 种地埂篱根—土复合体抗剪和抗冲性能综合评价 [J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1811-1820.
- [14] Su Lijun, Hu Bingli, Xie Qijun, et al. Experimental

- and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11): 2784-2795.
- [15] 孙庆敏, 葛永刚, 陈攀, 等. 汶川典型植物根—土复合体抗剪强度影响因素评价[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 58-65.
- [16] Li Pengcheng, Xiao Xuepei, Wu Lizhou, et al. Study on the shear strength of root-soil composite and root reinforcement mechanism [J]. *Forests*, 2022, 13(6): 898.
- [17] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 144-152.
- [18] 祁兆鑫, 余冬梅, 刘亚斌, 等. 寒旱环境盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1438-1448.
- [19] 吕春娟, 陈丽华, 陈卫国, 等. 根土复合体的抗剪特性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 13-19.
- [20] Guo Ping, Xia Zhenyao, Liu Qi, et al. The mechanism of the plant roots' soil-reinforcement based on generalized equivalent confining pressure [J]. *Peer J*, 2020, 8: e10064.
- [21] Meng Suyun, Zhao Guoqing, Yang Yuyou. Impact of plant root morphology on rooted-soil shear resistance using triaxial testing [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(10): 1-13.
- [22] Lian Baoqin, Peng Jianbing, Zhan Hongbin, et al. Mechanical response of root-reinforced loess with various water contents [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 193: 85-94.
- [23] 方薇. 一种非饱和土的非线性抗剪强度包络壳模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2601-2609.
- [24] Sun Chaowei, Chai Junrui, Luo Tao, et al. Nonlinear shear-strength reduction technique for stability analysis of uniform cohesive slopes with a general nonlinear failure criterion [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(1): 06020033.
- [25] 马煜, 余斌, 李彩侠, 等. 汶川强震区群发性泥石流特征研究: 以四川省都江堰龙池“8·13”群发泥石流为例[J]. *灾害学*, 2014, 29(3): 218-223.
- [26] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3): 471-481.
- [27] 中华人民共和国建设部. GB/T50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [28] 刘益良, 刘晓立, 付旭, 等. 植物根系对低液限粉质黏土边坡浅层土体抗剪强度影响的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(3): 384-390.
- [29] Gao Zhiwei, Zhao Jidong. Evaluation on failure of fiber-reinforced sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(1): 95-106.
- [30] 王磊, 朱斌, 李俊超, 等. 一种纤维加筋土的两相本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1326-1333.
- [31] 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.
- [32] 付江涛, 余冬梅, 李晓康, 等. 柴达木盆地盐湖区盐生植物根—土复合体物理力学性质指标概率统计分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(8): 1696-1709.
- [33] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture [J]. *Catena*, 2007, 69: 197-205.
- [34] 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.
- [35] Liu Yabin, Hu Xiaosong, Yu Dongmei, et al. Influence of the roots of mixed-planting species on the shear strength of saline loess soil [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(3): 806-818.
- [36] 奚灵智, 王龙威, 王颖, 等. 植被根系固土抗剪强度试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4): 84-89.