

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.006

吴锐斌, 及金楠, 杨或哲. 不同生长阶段香根草根土复合体的邓肯—张本构模型[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 97-104.

WU Ruibin, JI Jinnan, YANG Yuzhe. Duncan-Chang constitutive model of vetiver root and soil matrix at different growth stages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 97-104.

不同生长阶段香根草根土复合体的邓肯—张本构模型

吴锐斌^{1,2}, 及金楠^{1,2}, 杨或哲^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学山西吉县森林生态系统
国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200)

摘要: [目的] 为研究根土复合体破坏全过程的本构关系。[方法] 以不同生长阶段的香根草(20, 40, 60 天)和红壤的原状根土复合体为对象, 基于邓肯—张模型, 结合三轴试验, 构建根土复合体破坏全过程的应力应变本构关系模型, 并分析模型参数对根系生物量变化的响应。[结果] (1) 邓肯—张本构关系模拟根土复合体力学行为的效果理想, 除个别素土的应变软化现象不能捕捉外, 应力应变曲线、抗剪强度指标的预测值与实测值均表现出高度的相关性($R^2 > 0.91$), 并且能够很好地预测曲线在弹性阶段、硬化阶段和塑性阶段的变化特征。(2) 根土复合体的邓肯—张本构模型参数与根系特征参数相关性较强。随着香根草的生长, 模型参数 c_c 、 φ_c 、 K 、 R_f , 以及初始抗剪强度(E_i)均增大。参数 n 的变化规律略特殊, 素土大于根土组, 而在根土组中, n 仍随着植物的生长而逐渐增大。(3) 香根草根系有效地加固土体。在生长周期内, 生长时间越长, 根系越发达, 根系生物量越大, 土体的抗剪强度和抗剪强度指标(c_i 、 φ_i)也提高得越多。[结论] 建立了基于邓肯—张模型的根土复合体本构关系, 解析根土复合体在浅表层滑坡过程中的力学行为, 为有效防治浅表层滑坡灾害提供理论依据。

关键词: 根系固土; 植物生长; 三轴压缩试验; 邓肯—张模型; 根系特征参数

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)05-0097-08

Duncan-Chang Constitutive Model of Vetiver Root and Soil Matrix at Different Growth Stages

WU Ruibin^{1,2}, JI Jinnan^{1,2}, YANG Yuzhe^{1,2}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forest Ecosystem Studies, National Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: [Objective] To investigate the constitutive relationship governing the entire failure process of root-soil matrixes. [Methods] By employing the Duncan-Chang model and conducting triaxial tests, a stress-strain constitutive relationship model was developed to analyze the entire failure process of the undisturbed root-soil matrixes. Vetiver samples at different growth stages (20, 40, 60 days) were utilized in conjunction with laterite to form root-soil matrixes. Subsequently, the response of model parameters to variations in root biomass was analyzed. [Results] (1) The Duncan-Chang constitutive relationship demonstrated an excellent capability in simulating the mechanical behavior of root-soil matrixes. Despite the inability to capture the strain softening phenomenon of individual soil, the stress-strain curve, predicted shear strength indicators, and measured values exhibit a strong correlation ($R^2 > 0.91$). They effectively predicted the variation characteristics of the curve in the elastic, hardening and plastic stages. (2) The Duncan-Chang constitutive model parameters of root-soil matrixes exhibited a significant correlation with root characteristic parameters. With the growth of vetiver, the parameters c_c 、 φ_c 、 K 、 R_f and initial shear strength E_i all increased. The variation pattern of parameter n was slightly unique, as it was larger in the bare soil group than in the root-soil group.

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-07-10 录用日期: 2024-07-20 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-10-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(32271961)

第一作者: 吴锐斌(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wuruibin@bjfu.edu.cn

通信作者: 及金楠(1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: jinn0402@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

However, within the root-soil group, n gradually increased with plant growth. (3) The vetiver root system effectively reinforced the soil. Throughout the growth period, the longer the growth time, the more developed the root system and the greater the root biomass, the greater improvements in soil shear strength and shear strength indicators (c_t , φ_t) would be. [Conclusion] A constitutive relationship of root-soil matrixs based on the Duncan-Chang model has been established, and this can enhance the understanding of the mechanical behavior of root-soil matrixs in shallow surface landslides, and provide a theoretical basis for effective prevention and control of shallow surface landslide disasters.

Keywords: root system soil fixation; plant growth; triaxial compression test; Duncan-Chang model; root characteristic parameters

Received: 2024-05-15

Revised: 2024-07-10

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-10-30

我国正面临着严重的水土流失问题,每年流失面积超过 200 多万 km^2 ,造成直接经济损失高达上百亿。针对这一严峻形势,加快水土流失治理、改善生态环境、有效保护和合理利用水土资源已成为我国 21 世纪刻不容缓的重大任务。植物根系因其出色的土壤固持特性,自明朝起就被用来稳固边坡,防治水土流失^[1]。近 50 多年来的科学研究证实,根在土层剪切过程中能够抑制相对滑动,不仅能够提高土体的抗剪强度,增强土质边坡稳定性,而且具有较高的生态效益,后期养护成本低^[2-4]。因此,已有研究^[5-7]认为,在加强浅表层滑坡的治理方面,植物措施具有替代传统土木工程措施的巨大潜力,既能实现生态恢复,还能为滑坡治理提供新的解决方案。

长期以来,针对植物根系固土能力的估算及力学模型的提出,是根系固土这一研究领域的“兵家必争之地”^[8]。上世纪 70 年代,以极限平衡理论为基础,已有研究^[2,9]发现,植物根系主要通过提高土壤黏聚力来增强土壤的抗剪强度,提出根系增强土壤抗剪强度的计算理论,即 Wu 模型,该模型也是最早的根系固土力学机制模型之一。Wu 模型认为,植物根系通过根土接触面的摩擦作用把土中的剪应力转换为根的拉应力来提高土的抗剪强度,模型简单、直观、参数少,但是该模型假设了根系在达到抗拉强度的瞬间,全部且同时断裂。随着研究的不断深入,越来越多的学者发现根系并不是同时断裂,而是随着根纤维的强弱逐渐失稳,使得模拟结果常常高估。POLLEN 等^[10]于 2005 年首次将复合材料力学中纤维束理论应用在根土复合体中,构建了根系固土纤维束模型(fiber bundle model),简称为 FBM 模型。FBM 模型认为,根系遵循渐进式的断裂过程,即在承受一定荷载的根系中,当某个单根达到抗拉强度时断裂,它承担的荷载在剩余根系中重新分配,随着荷载增加,根系依次断裂并进行荷载再分配。Wu 模型和 FBM 模

型作为根系固土 2 大力学模型,构建了根土复合体力学分析框架,能够有效地分析根系对土体强度的贡献。但是它们都属于根土强度模型,侧重于分析根土复合体在极限应力状态下的破坏条件和破坏机制,并不能解释根土复合体在受力全过程中的应力和应变规律,而邓肯—张模型^[11]属于本构模型,能够很好地解析出破坏的应力与应变关系。此外,Wu 模型和 FBM 模型都是基于摩尔库仑定律^[12]构建的,通过增加根系黏聚力(c_r)这一附加项来反映植物根系对土体的加强作用,属于一种弱耦合强度模型,在分析植物根系与土体间的相互作用时稍显不足。而邓肯—张模型作为传统的土的本构模型,应用到根土复合体中,可以模拟根土复合体受荷全过程的应力、应变关系,并通过模型参数(如 c_c 、 φ_c 、 K 、 R_f 、 n 等)的变化反映根土间的相互作用规律,属于根土复合体强耦合本构关系模型,该模型的使用为精确模拟土体与根系间复杂的相互作用机制和研究根系固土能力提供了强有力的工具。因此,本研究将基于邓肯—张模型构建根土复合体本构关系,并考虑不同生长阶段的植物由于根系生物量的变化对本构模型参数产生的影响并分析其规律,以理解和预测根土复合体受到应力时的非线性变形行为。

本研究以香根草根系和红壤的原状根土复合体为研究对象,基于三轴压缩试验构建根土复合体邓肯—张本构关系模型,并结合根系生物量分析,探索随着植物生长本构模型参数的变化规律,旨在分析不同生长阶段香根草根系对土体的作用机理,精准评估其加固效果,为生态护坡措施的实施与开展提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本文以香根草 [*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty] 为研究对象。香根草为禾本科,多年生草本植物,根系发达,被广泛用于中国华南、华东、西南等

地水土流失治理。基于香根草的适生环境,本研究将香根草种植于福建红壤中,该土液限为 37.1%,塑限为 14.9%, $\text{pH}\approx 6$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 香根草种植 基于三轴试验的试样尺寸,香根草种植于内径 5 cm,高 10 cm 的环刀中,种植及生长过程中环刀下口用底托保持其稳定。依据王毅^[13]测定的福建红壤干密度约为 1.48 g/cm^3 ,含水率约为 19.5%的标准制备土样,并根据我国《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[14],将相应质量的土样均分为 5 份,分 5 层击实填充于环刀内,每层击实至相应高度后,将表面刨毛,再填充 1 层土料,如此进行,直至第 4 层完成。在表层土料填充的同时,在土样的中心位置埋下 1 颗大小均匀、饱满的香根草种子,同时制备素土组作为对照。试验分为素土组和香根草生长 20,40,60 天的根土组,每组试验设置 3 个重复。每天早晚对素土组和根土组所有试样各浇灌 50 mL 水,并保持充分光照,进行养护。

1.2.2 三轴压缩试验 分别对素土组和 20,40,60 天根土组分别进行三轴压缩试验。试验前将根土组试样的香根草上部茎叶结构剪除,保留原状根土复合体。再将素土和根土复合体试样吸水饱和后,用 GDS 自动三轴试验系统(GDSTAS)分别在 100,200,300 kPa 围压下进行固结不排水(CU)压缩试验,剪切速率为 1 mm/min 。通过试验获得偏差应力—轴向应变曲线,以及黏聚力(c_t)和内摩擦角(φ_t)。

1.2.3 根系特征 把 20,40,60 天的根土复合体从模具中轻轻推出,观察圆柱体土柱外表面的根系分布状况。然后将土从下至上剥离,用毛刷小心去除附着在根系表面的土颗粒。为避免土体被完全剥离后,植物根系失去土体的支撑而坍塌,暂时保留顶部土层,观察根系结构的分布。最后去除顶层土体,取出完整根系,剪去上部茎叶结构后,平铺在纸上,进行观察和记录。

用精度为 0.1 mg 的电子天平称量根系重量,得到不同生长阶段的香根草根系鲜重(m)。将去除上部茎叶的香根草根系用 WinRHIZO—pro 根系扫描系统进行扫描,得到根系长度(l)、表面积(s)、平均直径(d)等特征参数。

1.3 根土复合体本构模型构建

邓肯—张(Duncan-Chang)模型是根据双曲线应力应变关系提出的非线性本构。该模型能够有效地描述土体变形过程中的非线性状态,反映土体变形的弹塑性,参数物理意义明确,可以通过三轴试验获取,应用简便。本文将用邓肯—张模型模拟根土复合体

的应力应变关系,并以素土作为对照,理解和预测在不同生长阶段的根土复合体中受到应力时的非线性变形行为,计算公式为:

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \quad (1)$$

式中: ϵ_1 为轴向应变(%); $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏差应力(kPa); a 、 b 为试验常数,可通过三轴试验拟合。

在常规三轴压缩试验中, $d\sigma_2 = d\sigma_3 = 0$,因而切线模量为

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon_1} = \frac{a}{(a + b\epsilon_1)^2} \quad (2)$$

在剪切的起始点, $\epsilon_1 = 0$, E_i (MPa) 等于初始切线模量 E_i (MPa),有

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (3)$$

即 a 为三轴试验中初始变形模量 E_i 的倒数。在公式(1)中,若 $\epsilon_1 \rightarrow \infty$,则

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}} = \frac{1}{b} \quad (4)$$

亦即

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}} \quad (5)$$

可见, b 为双曲线的渐近线所对应的极限偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$ (kPa) 的倒数。

当应力应变曲线近似于双曲线关系时,依据 15% 应变值确定土的强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$; 当存在峰值点时,取 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{峰}}$,则破坏比(R_f)为

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}} \quad (6)$$

根据初始变形模量(E_i)和围压(σ_3),绘制 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的关系图,由于二者近似呈线性关系,有:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n \quad (7)$$

式中: p_a 为大气压(kPa),近似等于 100 kPa; K 、 n 为模型参数,分别为 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 直线的截距和斜率,可通过公式(7)获取。

根据邓肯—张模型的拟合曲线,获取在围压为 100,200,300 kPa 下所对应的计算抗剪强度,可确定素土及根土复合体的黏聚力预测值(C_c , kPa)和内摩擦角预测值(φ_c , °)。对比实测强度黏聚力(c_t , kPa)和内摩擦角(φ_t , °),评估邓肯—张模型的拟合效果。

1.4 数据统计方法

将根土复合体邓肯—张本构模型参数、模型计算强度及其指标、实测强度及其指标与根系特征参数进行相关性分析,分析不同生长阶段根土复合体邓肯—

张本构模型和根系生物量是否存在关系。统计分析使用 R 软件(R Core Team, New Zealand)实现。

2 结果与分析

2.1 根土复合体本构模型及参数

从拟合曲线与实测曲线的重合度(图 1)来看,除素土组在 300 kPa 围压下剪切过程中出现应力软化,曲线尾部下降,略不符合邓肯一张双曲线模型外,其余各组用邓肯一张模型的拟合效果均较好,相关系数 $R^2 > 0.96$ 。应力—应变曲线可根据变化趋势分为 3 个阶段:弹性阶段、硬化阶段、塑性阶段。曲线在初始

阶段呈弹性变形的特点,应力与应变为直线关系;随后进入硬化阶段,应力增幅逐渐降低,此时已经形成局部剪切破坏面;最后进入塑性阶段,曲线逐渐趋于平稳。随着植物生长和围压增大,曲线在弹性阶段和硬化阶段的变化速率均增快,塑性阶段中达到的平稳高度也相应增加,说明随着植物的生长和围压的增大,根土复合体的变形模量和抗剪强度均增大。由此可见,邓肯一张模型不仅能够较好地反映不同生长阶段根土复合体应力—应变曲线的变化规律,还可以描绘出曲线的峰值,以及土体强度的提升。

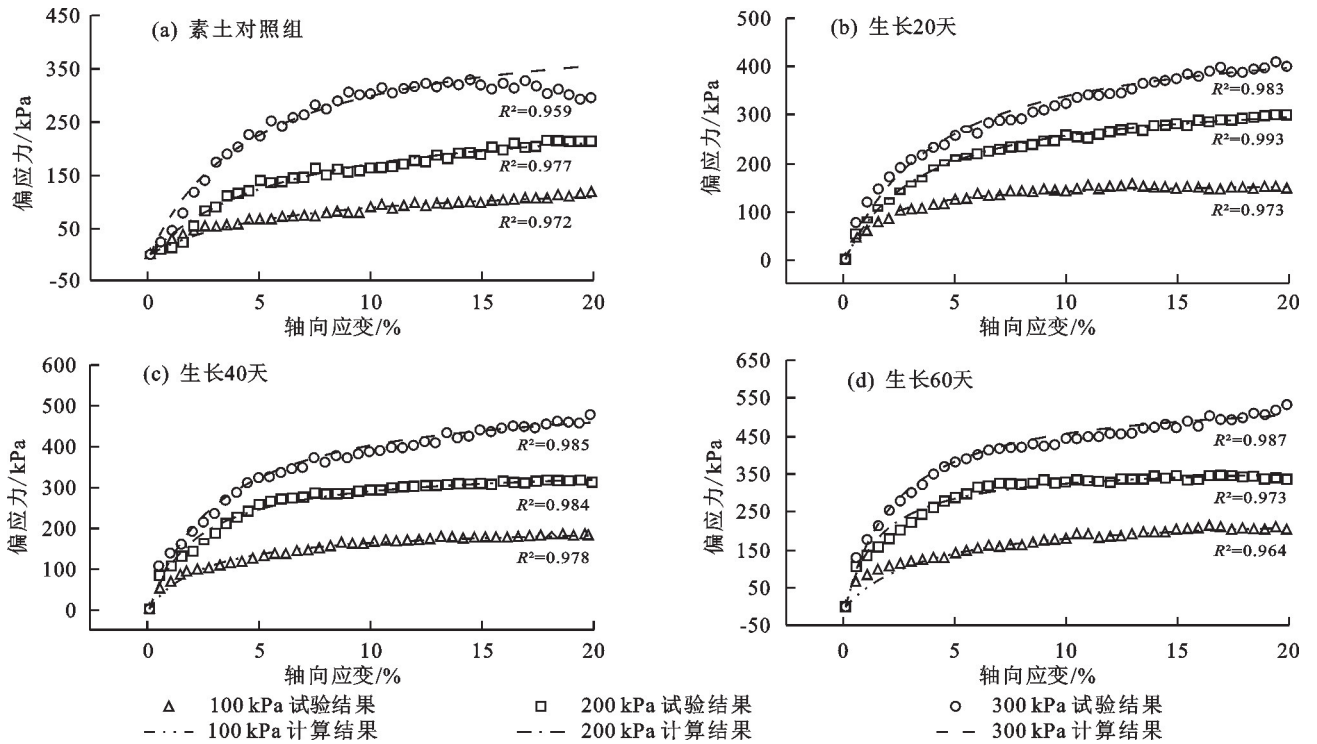


图 1 偏差应力—轴向应变的实测曲线和预测曲线

Fig.1 Measured and predicted curves for deviation stress and axial strain

初始切线模量(E_i)的取值使 $\lg(E_i/p_a)$ 和 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 呈较直观的线性关系(图 2),为邓肯一张模型在根土复合体中的适用性提供必要条件^[15]。由图 2 可知,随着植物的生长,根土复合体的 E_i 增大。同时,随着三轴试验的围压增大, E_i 也呈增大趋势,但当围压从 200 kPa 升高至 300 kPa 时, E_i 变化率较小。

在不同生长阶段、不同围压下邓肯一张模型相关参数的详细数值见表 1。随着香根草的生长,模型参数 c_e 、 φ_c 、 R_f 、 K 均增大。而参数 n 的变化规律特殊,在素土组中,其数值大于根土组;而在根土组内,随着生长阶段的延长, n 的数值逐渐增大。

2.2 不同生长阶段香根草根系特征

由图 3 可知,香根草为须根系草本,根系较为发达,根细且长。当香根草生长 20 天时,根系主要集聚在土体核心区,从距土柱顶面 2 cm 位置处的截面可

见,穿透的根系较少,直径也较细。从剥离土样的整株根系来看,一般只有 1~2 条长约 8 cm 左右的一级根,二级根系长度较短,并且生长的深度较浅,尚未形成有效的根系网络。根系 m 、 l 、 s 和 d 分别只有 13.0 mg、58.6 cm、7.5 cm² 和 0.4 mm。

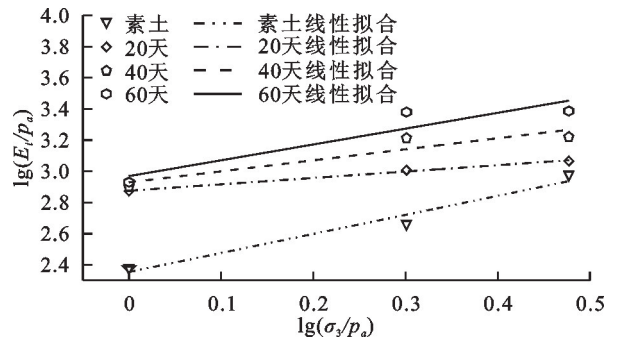


图 2 $\lg(E_i/p_a)$ 和 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的关系

Fig.2 Relationship between $\lg(E_i/p_a)$ and $\lg(\sigma_3/p_a)$

表 1 不同生长阶段邓肯—张本构模型的相关参数

Table 1 Parameters of the Duncan-Chang constitutive model at different growth stages

土壤分组	c_c /kPa	φ_c /($^\circ$)	R_f	K	n
素土	4,648.18	0,285.53	0,746.17	2,353.70	1,221.90
生长 20 天	10,477.70	7,610.11	0,892.71	2,875.93	0,408.91
生长 40 天	11,796.50	11,635.38	0,913.49	2,928.97	0,707.54
生长 60 天	18,711.95	13,877.14	0,928.89	2,969.13	1,015.27

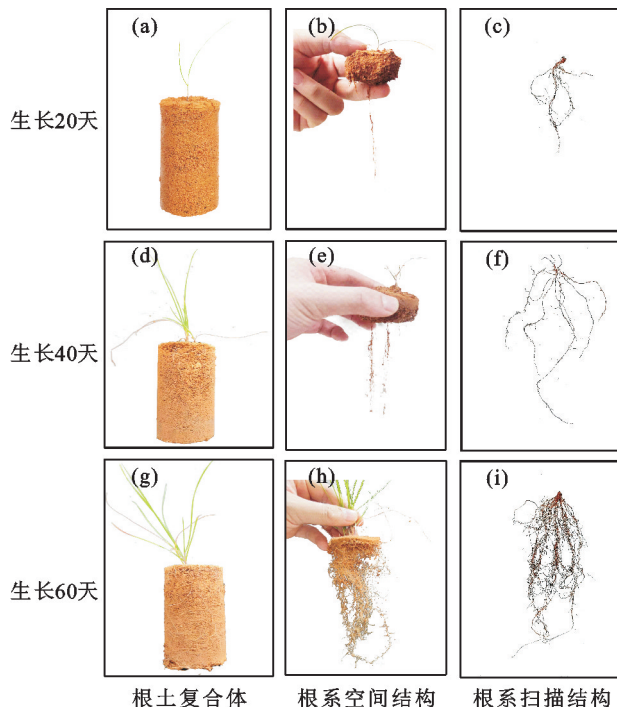


图 3 不同生长阶段根系分布特征示意

Fig.3 Diagram of root distribution characteristics at different growth stages

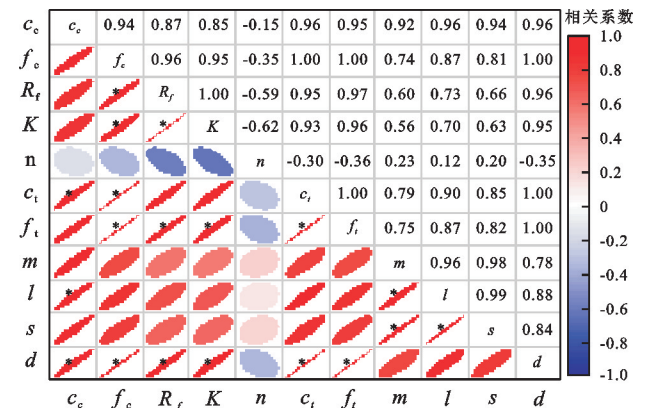
当长到 40 天时,土体的外表面已经开始形成根系网,但仍较稀疏,深度 < 5 cm。从部分剥离的土样可以看出,香根草的分布已经初步形成空间结构,在平面上由几组不同的一级根系同时向下延伸。从整株根系来看,香根草根系相较于 20 天时,已经得到较好的发育,普遍有 3 根以上长度 > 10 cm 的根系,一级根上也生长出一定数量的二级根,但二级根长度基本 < 2 cm,且往横向生长。此时形成的根系网络已经基本成型, m 、 l 、 s 和 d 分别增加 126.9%、225.5%、359.0%和 38.2%。

当生长到 60 天时,土样的外表面已经覆盖有丰富的根系网。此时香根草一级根的长度基本达到 12 cm 以上,通常有一条较长的一级根从土体的中心位置延伸并包围住整个土体,其他一级根先横向生长,在表层形成伞状网络,再向下往深处扩张,形成一个能较为全面将土体包裹起来的密集根系网络。生长 60 天的香根草,除一级根系的长度大于前 2 个试

验组,二级根数量也显著增多,长度也达到 5 cm 以上。此时的根系网络已经能在土体发生剪切时发挥较为显著的抑制作用。在 60 天后,香根草根系的 m 比 40 天时增加 5 倍多, l 增加 120.7%, s 增加 182.7%, d 增加 32.0%。相比于 20~40 天各项根系特征参数的增长幅度而言,40~60 天, m 的增长幅度显著大于前者, l 和 s 的增长速度略有减缓, d 的增加幅度相对较小。

2.3 本构模型参数、实测抗剪强度指标与根系特征参数间的关系

相关性分析热图显示,根土复合体邓肯—张模型参数 c_c 、 φ_c 、 R_f 、 K , 实测强度指标 c_t 、 φ_t , 与根系特征参数 m 、 l 、 s 、 d 基本表现为强正相关性 ($r \geq 0.6$), 而参数 n 与大部分指标相关性不强(图 4)。



注:冷色调表示负相关,暖色调表示正相关,色调冷暖表示相关性高低,颜色越深,表示正/负相关性越高,图形沿对角线对称位置的数值表示相关系数 r ;椭圆长轴指向右上方,表示正相关,指向左上方,表示负相关;椭圆形越扁,表示相关性越显著;*表示相关程度较高 ($p \leq 0.05$)。

图 4 邓肯—张模型参数、实测抗剪强度指标与根系特征参数的相关性

Fig.4 The correlations between Duncan-Chang model parameters, measured shear strength indicators, and root characteristic parameters

3 讨论

传统的 Wu 模型和 FBM 模型都是基于摩尔库伦定律构建的以根系黏聚力为附加项的根土复合体强度模型,只能关注在外荷载作用下的极限应力状态,无法描述根土复合体破坏过程中的应力应变全过程的内在变化规律^[15-16]。邓肯—张模型作为土的本构模型,可以模拟根土复合体受荷全过程的应力、应变关系,并通过多个模型参数的变化反映根土间的相互作用规律,属于强耦合本构关系模型,但是缺少对于根土复合体的应用。因此,本研究将邓肯—张模型应用于根土复合体,建立根土复合体强耦合本构模型,可以理解和预测根土复合体非线性变形行为,并

考虑本构模型参数对根系生物量变化的响应。

以往研究^[17-18]为控制根系在土体中的分布,通过人工埋根,构建重塑的根土复合体进行试验,但是重塑根土复合体经过处理和压实,造成颗粒结构的改变,损失一定程度的力学性能。本试验对原状根土复合体进行研究,保持根土在自然状态下的结构和性质,更接近于实际工程中土壤颗粒间及根土界面的力学性能,并且避免结构扰动造成的影响。

本研究发现,素土与根土复合体邓肯—张模型涉及的试验参数呈明显的规律性。当试验的围压相同时,随着香根草的生长,模型参数 c_c 、 φ_c 逐渐增大,该趋势与实测结果相吻合,计算值和实测值的相关系数(R^2)较高,分别为 0.915 和 0.997,也佐证了邓肯—张模型的拟合效果^[19]。根土复合体的破坏比(R_f)随着植物生长而增大,推测是因为根系网络的存在增加土体的紧密性和整体性,在土体发生剪切时,破裂块体积占据土体的比例比素土高,并且随着植物生长,根系网络更加发达,土体的整体性越强,剪切破坏时的破坏比也越大^[20]。随着植物的生长,根系网络逐渐扩张,根土复合体的弹性模量和抗剪强度随之增大, $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 拟合直线的截距(K)也相应增大^[21]。另外,对于参数 n ,其规律略有变化,素土组的 n 大于根土组,而在根土组中参数 n 随着植物生长而增大^[22]。该现象与土壤孔隙中的含水率有关,素土孔隙中的水分较多,受外部压力挤压容易排出,因此素土的初始切线模量(E_i)随着围压增大而增大的趋势较明显^[23],体现为拟合直线的斜率 n 较大。对于根土复合体而言,由于植物根系挤占部分孔隙,在围压作用下排出的水分较少,因而 E_i 对围压的反应不如素土敏感,表现为 n 小于素土组。但是随着植物生长,根系生物量逐渐增加,根系网络越发完善,由根系所贡献的弹性模量逐渐凸显,亦呈现出 n 随着香根草的生长而逐渐增加。相关性分析亦证明,邓肯—张本构模型除 n 外的其他参数(即 c_c 、 φ_c 、 R_f 、 K)与植物的根系特征参数相关性均较高,说明邓肯—张模型的相关参数可以较好地反映不同生长阶段根土复合体的破坏过程。

在生长周期内,随着植物的生长,香根草根系结构分布变化明显,根系特征参数显著增长,根土复合体的抗剪强度也相应增大,相关性分析进一步佐证根系特征参数和根土复合体抗剪强度存在显著相关性。该结论与前人^[24]所提出的根土复合体抗剪强度随着植物根含量的增加而增加这一结论相符。

总之,在香根草的不同生长阶段,考虑到根土复

合体在破坏过程中及极限平衡状态下,模型的预测值与实测值均表现出较高的相关性,验证了邓肯—张模型对于不同生长阶段的根土复合体具有良好的拟合效果^[25-26]。说明通过邓肯—张模型建立香根草根土复合体的本构模型,通过其参数的变化来反映植物根系对土体的加固作用是可行的^[27]。

4 结论

(1)邓肯—张模型拟合根土复合体应力应变关系的效果理想,除对照试验中个别素土的应变软化现象不能捕捉外,应力应变曲线、抗剪强度指标的预测值都与实测值表现出高度的相关性($R^2 > 0.91$),并且能模拟出曲线在弹性阶段、硬化阶段和塑性阶段的变化特征。

(2)根土复合体的邓肯—张本构模型参数与不同生长阶段的根系特征参数相关性较强。邓肯—张模型参数随香根草的生长呈较强的规律性,随着植物生长,模型参数 c_c 、 φ_c 、 K 、 R_f ,以及初始抗剪强度(E_i)均增大。参数 n 的变化规律略特殊,素土大于根土组,而在根土组中, n 仍随着植物的生长而逐渐增大。

(3)香根草根系有效提高土体的强度。在生长周期内,植物生长时间越长,其根系越发达,根系生物量越大,土体的抗剪强度和强度指标(c_i 、 φ_i)提高得越多。

总之,基于邓肯—张的根土复合体本构关系模型能够较好地模拟预测根土复合体在外荷载作用下的破坏全过程。本研究不仅增加对根土复合体在浅表层滑坡过程中力学行为的认识,也扩大邓肯—张模型在土力学中的适应范围,为根土复合体本构关系的研究奠定基础。

参考文献:

- [1] LEE I W Y. A review of vegetative slope stabilization [J]. Hong Kong Inst Eng, 1985, 13(7): 9-12.
- [2] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.
- [3] 廖博, 刘建平, 周花玉. 含根量对秋枫根—土复合体抗剪强度的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 104-110.
LIAO B, LIU J P, ZHOU H Y. Effects of the influence of root content on the shear strength of root-soil composite of *Bischofia javanica* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 104-110.
- [4] 冷瑜, 曹丽娜, 张振兴, 等. 基于土壤生物工程的小流域侵蚀沟治理研究进展 [J]. 生态科学, 2021, 40(6): 225-232.
LENG Y, CAO L N, ZHANG Z X, et al. Research progress on erosion gully control in small watershed based on soil bioengineering [J]. Ecological Science,

- 2021,40(6):225-232.
- [5] 谢祥荣,陈正发,朱彦贞,等.根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J].水土保持学报,2024,38(2):13-28.
XIE X R, CHEN Z F, ZHU Z Y, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):13-28.
- [6] 骆丕昭,王云琦,李通,等.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[J].水土保持学报,2023,37(6):153-160.
LUO P Z, WANG Y Q, LI T, et al. Effect of soil moisture content on strength characteristics of root-soil complex based on triaxial UU test[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):153-160.
- [7] 黄建坤,王学林,及金楠,等.基于渐近均匀化理论的黄土高原草本植物固土效果模拟[J].农业工程学报,2020,36(9):168-176.
HUANG J K, WANG X L, JI J N, et al. Numerical simulation of root reinforcement for herbs in Loess Plateau based on asymptotic homogenization theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9):168-176.
- [8] MAO Z. Root reinforcement models: Classification, criticism and perspectives[J]. Plant and Soil, 2022, 472(1):17-28.
- [9] WU T H. Investigations of landslides on Prince of Wales Island; Geotechnical engineering report[J]. Civil Engineering Department. Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1976.
- [10] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. Water Resources Research, 2005, 41(7): e07025.
- [11] 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.
- [12] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
LI G X. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [13] 王毅.福建非饱和红土的三轴湿化变形特性研究[D].西安:长安大学,2021.
WANG Y. Study on the triaxial wetting deformation characteristics of unsaturated laterite in Fujian [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [14] 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 夏鑫,姜元俊,苏立君,等.基于界面黏结的含根土抗剪强度极限值估算模型[J].岩土力学,2021,42(8):2173-2184.
XIA X, JIANG Y J, SU L J, et al. Estimation model of limit values of shear strength of root-bearing soil based on interface bonding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8):2173-2184.
- [16] 王贵荣,王凯,袁林,等.紫花苜蓿根系-砂土复合体力学特性[J].西安科技大学学报,2023,43(1):99-108.
WANG G R, WANG K, YUAN L, et al. Mechanical properties of alfalfa root-soil composite [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(1):99-108.
- [17] 杨钊,黄婧.基于 CT 扫描植物根-土复合体直剪试验研究[J].山西建筑,2024,50(9):54-56.
YANG Z, HUANG J. Direct shear test of plant root-soil complex based on CT scanning[J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(9):54-56.
- [18] 张川,谢祥荣,段青松,等.木纤维重构红壤下根系特征对根土复合体抗剪特性的影响[J].农业工程学报,2024,40(4):138-146.
ZHANG C, XIE X R, DUAN Q S, et al. Effects of root characteristics on the shear characteristics of root-soil complex in wood fiber reconstructed red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4):138-146.
- [19] 童国庆,张吾渝,高义婷,等.剪切速率对黄土力学性质及邓肯-张模型参数的影响[J].科学技术与工程,2021,21(22):9517-9525.
TONG G Q, ZHANG W Y, GAO Y T, et al. Effect of shear rate on mechanical properties of loess and Duncan-Chang model parameters [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22):9517-9525.
- [20] 孙谷雨,杨平,刘贯荣.南京地区冻结粉质黏土邓肯-张模型参数试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):2989-2995.
SUN G Y, YANG P, LIU G R. Experimental study on Duncan-Chang model parameters of frozen silty clay in Nanjing area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1):2989-2995.
- [21] 徐小明,常高奇.天津滨海新区土层邓肯-张模型参数研究[J].港工技术,2020,57(2):111-115.
XU X M, CHANG G Q. Study on parameters of Duncan-Chang model for soil layers in Binhai new district of Tianjin [J]. Port Engineering Technology, 2020, 57(2):111-115.
- [22] 李杰,李晨,刘纯利.邓肯-张模型参数计算方法对切线

- 弹性模量影响研究[J].中国水运,2022,22(8):49-51.
- LI J, LI C, LIU C L. Study on the influence of Duncan-Chang model parameter calculation method on tangent elastic modulus[J]. Kunming: China Water Transport, 2022,22(8):49-51.
- [23] 贺登芳. 干湿循环红土的 CD 剪切特性及邓肯—张模型参数研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2022.
- HE D F. Research on CD shear characteristics and Duncan Zhang model parameters of dry wet cyclic red soil [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2022.
- [24] MAHANNOPKUL K, JOTISANKASA A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil [J]. Soils and Foundations, 2019, 59(2): 500-516.
- [25] 尹洪强,洪文彬,张树仁.基于三轴试验的全风化砂岩邓肯—张模型参数研究[J].山西建筑,2022,48(20):105-107.
- YIN H Q, HONG W B, ZHANG S R. Parameters of Duncan-Chang model for fully weathered sandstone based on triaxial test [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(20): 105-107.
- [26] 罗崇亮,余云燕,包得祥,等.基于三轴试验红层泥岩的邓肯—张模型参数研究[J].地震工程学报,2019,41(2):436-444.
- LUO C L, YU Y Y, BAO D X, et al. Duncan—Chang model parameters of red mudstone based on triaxial tests [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 436-444.
- [27] 张雁,何钢华,余朋里.纤维煤矸石改良膨胀土强度特性及邓肯—张模型参数[J].科学技术与工程,2022,22(21):9260-9267.
- ZHANG Y, HE G H, YU P L. Strength characteristics and Duncan-Chang model parameters of expansive soil improved by fiber coal gangue [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9260-9267.
- (上接第 96 页)
- [11] 张娜娜.黄土高原典型草地近地表特征对坡面土壤侵蚀的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- ZHANG N N. Influence of near-surface characteristics of typical grassland on slope soil erosion in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [12] GU C J, MU X M, GAO P, et al. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 716-728.
- [13] QIU D X, GAO P, MU X M, et al. Vertical variations and transport mechanism of soil moisture in response to vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(10): e14397.
- [14] 马雪燕.植被恢复对黄土高原沟壑区产流模式的驱动效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
- MA X Y. Driving effect of vegetation restoration on runoff production pattern in Gully Region of Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土丘陵区不同植被恢复对土壤入渗影响及适宜模型研究[J].水土保持学报,2023,37(2):67-75.
- MA X Y, MU X M, WANG S Y, et al. Study on the effects of different vegetation restoration on soil infiltration and suitable models in the Loess Hilly Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 67-75.
- [16] 穆兴民,顾朝军,孙文义,等.植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J].人民黄河,2019,41(10):31-39.
- MU X M, GU C J, SUN W Y, et al. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau [J]. Yellow River, 2019, 41(10): 31-39.
- [17] 胡彩虹,冉广,荐圣淇.佳芦河流域林草覆被变化对产流机制的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):36-42.
- HU C H, RAN G, JIAN S Q. Effect of forest and grass cover change on runoff mechanism in Jialu River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 36-42.
- [18] 穆兴民,王文龙,徐学选.黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J].水利学报,1999,30(2):71-75.
- MU X M, WANG W L, XU X X. The influence of the soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(2): 71-75.
- [19] 袁建平,蒋定生,文妙霞.坡地土壤降雨入渗试验装置研究[J].水土保持通报,1999,19(1):24-27.
- YUAN J P, JIANG D S, WEN M X. Study on experimental device of soil rainfall infiltration on sloping land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(1): 24-27.