

DOI: 10.20103/j.stxb.202411072732

聂会, 陈日彬, 豆红强. 基于纤维束模型的毛竹根系强化土体模型研究. 生态学报, 2025, 45(17): - .

Nie H, Chen R B, Dou H Q. Study on root reinforcement model of *Phyllostachys edulis* based on fiber bundle model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

基于纤维束模型的毛竹根系强化土体模型研究

聂 会¹, 陈日彬², 豆红强^{2,*}

¹ 浙江水利水电学院水利工程学院, 杭州 310018

² 福州大学紫金地质与矿业学院, 福州 350116

摘要: 准确量化植物根系对土体的强化作用一直是当前研究的热点, 然而, 现有的根系强化土体模型在描述根系强化土体的内在机制时存在过度简化等问题, 致使其预测精度不高。本文拟以毛竹根系为研究对象, 综合考虑根系的生物特性、荷载分配机制和多种力学破坏模式, 提出直接剪切条件下基于纤维束模型的毛竹根系强化土体模型。为验证该模型的准确性与适用性, 设计并开展了以毛竹根系面积比为变量的根土复合体直接剪切试验, 并结合已有研究成果进行了对比分析。研究结果表明: 相较于已有的 Wu-Waldron 模型与纤维束模型, 本文所建的模型符合直接剪切条件下根系强化土体的物理原理, 所需参数简单并具有明确的物理意义, 可更准确地预测根系对土体的强化作用, 且对于不同植物根系具有良好的适用性。研究成果可为植被覆盖区斜坡稳定性评价奠定一定的理论基础。

关键词: 根土复合体; 根系强化; 力学模型; 直剪试验; 毛竹

Study on root reinforcement model of *Phyllostachys edulis* based on fiber bundle model

NIE Hui¹, CHEN Ribin², DOU Hongqiang^{2,*}

¹ School of Hydraulic Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

² Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

Abstract: Accurate quantification of the root reinforcement has always been a research hotspot. However, the existing root reinforcement model has problems such as oversimplification in describing the internal mechanism of root reinforcement, resulting in low prediction accuracy. Based on this, this paper took the root of *Phyllostachys edulis* as the research object, comprehensively considered the biological characteristics of the root, load distribution mechanism and various mechanical failure modes, and proposed a root reinforcement model based on the fiber bundle model under direct shear conditions. The direct shear test of root-soil composite with the root area ratio of *Phyllostachys edulis* as a variable was designed and carried out, and combined with the existing research results, the accuracy and applicability of the proposed model were verified by comparison. The results showed that compared with the existing models, the model established in this paper conformed to the physical principle of root reinforcement of soil under direct shear conditions, the required parameters were simple and had clear physical meaning, and can more accurately predict the reinforcement effect of roots on soil, and had good applicability for different plant roots. The research results can lay a certain theoretical basis for the calculation of slope stability in vegetation covered areas.

Key Words: root-soil composite; root reinforcement; mechanical model; direct shear test; *Phyllostachys edulis*

基金项目: 福建省自然科学基金(2023J01423); 浙江省自然科学基金(LZJWY22E090007)

收稿日期: 2024-11-07; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: douhq@fzu.edu.cn

毛竹(*Phyllostachys edulis*)作为一种重要的经济作物,在我国东南沿海地区尤其是福建省广泛分布。毛竹根系主要由细长的鞭根构成,其根系具有强大的分蘖能力,能在短时间内迅速扩散并形成密集根系网络。然而受极端降雨作用,毛竹覆盖区的斜坡失稳现象常突发频发,此类问题已引起当地政府的高度重视。众所周知,植被覆盖斜坡的稳定性与植被根系密切相关,因此,如何准确量化毛竹根系对斜坡稳定的贡献是当前亟待解决的关键问题。

目前,国内外研究人员已针对不同类型植物根系(如草本植物、乔木以及灌木等)的固坡机制开展了大量研究^[1,2],尤其在植物根系以其力学特性加固斜坡并防止浅层滑坡的效应方面,亦提出了诸多根系强化土体模型^[3-5]。但是,当前根系强化土体模型预测效果的难点在于,根系对土体的强化作用受根系的几何结构、分布范围和力学特性、根土结合程度等因素的影响,而这些因素却难以测量和量化。Waldron 与 Wu 分别于 1977 年和 1979 年提出了最早的根土复合体强度模型^[6,7]。Wu-Waldron 模型将根系对土壤的强化归结为莫尔-库伦破坏准则中的额外粘聚力:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c_s + c_r \quad (1)$$

其中: τ 与 σ 为根土复合体受到的剪切应力与法向应力; c_s 与 φ 为土体的有效粘聚力与内摩擦角; c_r 为根系强化,即根系为土体附加的粘聚力。

Wu 认为根系对土的加固作用主要来自于根系抵抗土体所传递的剪应力,根系提高的抗剪强度由根系的抗拉强度和根系面积比决定。相较于素土,根系提供的抗剪强度增量为:

$$c_{r,WWM} = k \sum_i \varphi_i t_{u,i} \quad (2)$$

其中: $t_{u,i}$ 表示第*i*条根的抗拉强度; φ_i 表示根系面积比,即第*i*条根系横截面积与剪切面面积之比; k 为模型的根系强化系数,Wu 通过敏感性分析确定该系数为 1.2。然而,众多学者通过试验发现,Wu-Waldron 模型显著高估了根系对土体强度的贡献^[8-9],这与实际情况存在明显差异,具体表现为:①根系的破坏应是渐进的而非同时断裂。一束根系中不同根系的生物特性与力学特性存在差异,因此,根系的实际破坏应是渐进式的,当荷载增加时,首先达到抗拉强度的根系发生破坏,随后荷载被重分布到剩余根系上。Docker 通过根的拉拔测试和根土复合体的直剪试验证实了根系的渐进破坏现象^[10]。②根系具有不同的破坏机制。当根系因被拉拔而与土体发生相对滑动时,其只能发挥根系锚固力对土体强度的贡献,而这显然小于根系锚固良好时对土体强度的贡献。同时,每条根系是仅发挥了抗拔力还是发挥了全部抗拉强度并不确定^[11]。

Pollen 与 Simon 在 Wu-Waldron 模型的基础上,考虑了根系的渐进断裂和根系荷载的重分布,应用材料工业领域的纤维束连续断裂理论提出了纤维束模型(Fiber Bundle Model)^[12]。该模型应用全局载荷分配将施加在根束上的载荷按照一定规则分配到每个根系上,即根系强化值。此时根土复合体相对于素土提高的抗剪强度可表示为:

$$c_{r,FBM} = k'' c_{r,WWM} \quad (3)$$

其中: k'' 表示由于考虑渐进断裂所导致的根土复合体强度减少系数。Comino 等通过原位直剪试验和拉拔试验对比了 Wu-Waldron 模型与纤维束模型的预测精度,根据植物物种不同给出了不同的 k'' (0.40—0.99)^[13]。总体来说,纤维束模型是对 Wu-Waldron 模型的重大改进,但其仍然存在一些问题,如仅考虑根系的断裂破坏,而忽略了根系的滑动破坏。而后,Schwarz 又提出了根束模型^[14],其将根系强化值作为根系位移的函数,并假设在破坏过程中所有根系都被拉长相同的长度。本质上讲,根束模型是将根系抗拉强度、弹性模量和长度作为直径的函数,综合考虑了根系直径随根长的变化、根系曲折度、土壤的性质与根-土界面摩擦以确定根系的破坏形式^[15]。但有必要指出的是,根束模型是由植物根系位移驱动的,其适合描述土中根系受拉破坏的情况,难以适用于剪切条件下的根系破坏情况。

鉴于此,本文拟以毛竹根系为研究对象,基于植物根系加固土体的原理,综合考虑根系的生物特性、荷载分配机制和多种力学破坏模式,提出直接剪切条件下基于纤维束模型的毛竹根系强化土体模型;设计并开展根土复合体的直剪试验,并结合已有试验结果,藉此验证本文所提模型的准确性与适用性。研究成果可为植

被覆盖区的斜坡稳定性评价奠定理论基础,有助于植被护坡技术的推广应用。

1 根系生物力学特性的描述

在总结大量学者对植物根系研究的基础上^[16,17],本文假设植物根系具有线弹性,其力学和几何特性满足与根系直径的幂函数关系,同时为消除不同数据量纲之间的差异,对其进行归一化处理,即:

$$\frac{E_r}{E_0} = \left(\frac{d_r}{d_0}\right)^{\beta_E} \frac{L_r}{L_0} = \left(\frac{d_r}{d_0}\right)^{\beta_L} \frac{t_{r,u}}{t_{r,u,0}} = \left(\frac{d_r}{d_0}\right)^{\beta_t} \quad (4)$$

式中: d 为植物根系的直径; β_E 、 β_L 与 β_t 为表征根系特性的系数,分别对应根系的弹性模量、长度与抗拉强度; E_0 、 L_0 与 $t_{r,u,0}$ 为 d_0 对应的弹性模量、根长与抗拉强度。在已有毛竹的研究中,多项研究也揭示了其根系几何特性与力学特性之间的联系。课题组前期对毛竹根系进行了室内单根拉拔强度试验,测定的毛竹根径与抗拉强度的关系为:

$$t_{r,u} = 24.24d_r^{0.43} \quad (5)$$

式中: $t_{r,u}$ 为毛竹根系的抗拉强度, d_r 为毛竹根系直径。可见,该式为幂函数形式,符合前述假设。

2 纤维束模型中的荷载分配规律

2.1 已有方法

纤维束模型是由根系应力驱动,根系应力计算的关键在于如何确定不同根系之间的荷载分配。现有文献通常将根系直径作为控制荷载分布的变量,纤维束模型则在过去的十几年中发展出了诸多包含不同形式、机制与参数的模型,但通常情况下,两条根系的拉力可用式(6)描述^[18]:

$$\frac{F_i}{F_j} = \left(\frac{d_i}{d_j}\right)^{\beta_F} \quad (6)$$

式中: β_F 为表征荷载分布关系的系数。纤维束模型及围绕其改进的众多模型几乎都围绕着 β_F 的取值展开讨论,具体为:

$\beta_F = 0$: 无论根系直径如何,荷载由每条根系平均分配。

$\beta_F = 1$: 由 Pollen 和 Simon 提出^[12],纤维束模型假设荷载分布与根直径成线性比例。

$\beta_F = 2$: 由 Thomas 等提出^[19],认为荷载分布与根面积成线性关系,即每条根受到相同的拉应力。

$\beta_F = 2 + 0.5\beta_F$: 由 Ji 等提出^[20]。

2.2 直接剪切条件下新的荷载分配系数

Ji 基于能量准则提出了一种根系荷载分配方法^[20],该模型假设初始长度为 L 的根系拉长 u 所需的功或能量,其分布与根的横截面积成比例,即:

$$W = \frac{1}{A} \int_{x=0}^u F(x) dx \quad (7)$$

式中: F 为根系所受的拉力。对于线弹性的根系,拉应力沿着根系全长均匀分布,则式(7)可改写为:

$$W_r = \frac{Fu}{2A} \quad (8)$$

又有:

$$F = AE\varepsilon = AE \frac{u}{L} = A \sqrt{\frac{2EW_r}{L}} \quad (9)$$

此时,对于两条不同直径的根系 i 和 j ,其拉力之比为:

$$\frac{F_i}{F_j} = \frac{A_i \sqrt{\frac{2E_i W_{r,i}}{L}}}{A_j \sqrt{\frac{2E_j W_{r,j}}{L}}} = \left(\frac{d_i}{d_j}\right)^{2+0.5\beta_E} \left(\frac{W_{r,i}}{W_{r,j}}\right)^{0.5} \quad (10)$$

不同于早期纤维束模型中简单的荷载分配方案,基于能量准则的纤维束模型在一定程度上更符合真实情况,通常也有着更准确的预测。在此基础上,本文则针对常见的浅层滑坡中根系受剪破坏的情况确定荷载分配系数。

有别于 Wu 的方法, Waldron 在其模型中提供了一种在直接剪切条件下求解根的拉应力的方法^[7]:

$$t_r = \sqrt{\frac{4\tau_i E_r}{d}} \sqrt{\sqrt{u_s^2 + h^2} h} \quad (11)$$

式中: τ_i 为根土界面的摩擦力; u_s 为土体的位移; h 为剪切区厚度; t_r 为根系拉应力; E_r 为根系弹性模量。

那么,对于在直接剪切条件下受拉的两个不同根系 i 和 j ,则有:

$$\frac{t_i}{t_j} = \left(\frac{d_i}{d_j}\right)^{0.5\beta_E-0.5} \left(\frac{\tau_i}{\tau_j}\right)^{0.5} \quad (12)$$

又因单个根系承受的最大拉力为:

$$F_u = \frac{\pi d^2 t_{r,u}}{4} \quad (13)$$

则有:

$$\frac{F_u}{F_0} = \left(\frac{d_r}{d_0}\right)^{2+\beta_i} \quad (14)$$

其中, F_0 为直径 d_0 的根系承受的最大拉力,于是有:

$$\beta_r = 0.5\beta_E - 0.5 + 2 = 0.5\beta_E + 1.5 \quad (15)$$

2.3 根系破坏形式的数学描述

在荷载作用下,根土复合体中的受拉根系常处于如下三种状态:

(1)受拉状态。此时根系受到剪切带两侧不同方向的根土界面摩擦,但根系的两端不会发生位移,也并未发生滑移与断裂破坏。此时根系的受力情况如图 1 所示。

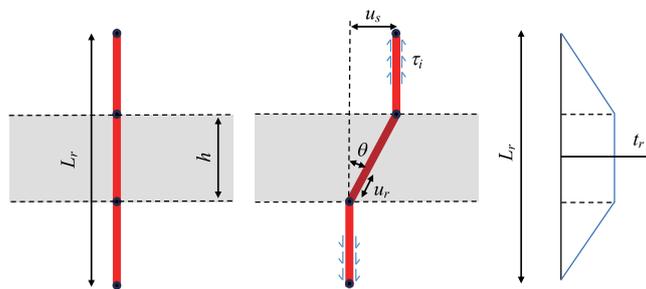


图 1 单根模型及受力状态

Fig.1 Single-root model and state of stress

此时有:

$$t_r = \sqrt{\frac{4r_i E_r h}{d}} \sqrt{\sec\theta - 1} \quad (16)$$

化简后可以得到:

$$t_r = \sqrt{\frac{4r_i E_r}{d}} \sqrt{\sqrt{u_z^2 + h^2} - h} \quad (17)$$

式中: τ_i 为根土界面的摩擦力; u_s 为土体的位移; h 为剪切区厚度; t_r 为根系拉应力; E_r 为根系弹性模量。

(2) 滑移状态。在根土复合体中, 应力由根土界面摩擦传递, 当根土结合不够紧密时, 根土界面摩擦力较小, 或是根系长度较短时, 根系应力会在到达极限滑移应力后停止增加。在这种情况下, 根系并不发生断裂, 而是整体随着土体进一步被剪切而发生滑移。

根系滑移和根系断裂是根系破坏的两种主要形式, 滑动根系的数量与其在所有根系中所占比例是影响根系峰值强化的决定性因素。滑动的根系愈多, 实际的根系强化作用将较 Wu-Waldron 模型的预测值愈低。事实上, 早在 1981 年, Waldron 在其模型的基础上考虑了根系的滑移破坏机制^[21], 即土体变形使得根系发生滑移时, 沿着根系全长的界面摩擦力均被调动, 继续对根系强化做出贡献, 此时根系传递的最大拉力为:

$$t_{r,s} = \frac{2\tau_i L_r}{d_r} \quad (18)$$

式中: τ_i 为单根根-土界面剪切强度; L_r 为根长; τ_i 被定义为单根的抗拔力与根系表面积之比^[22]。然而, 由于侧根的影响难以被消除和估计, 单根拉拔试验被认为难以严格测量根-土界面剪切强度。考虑到根土界面的抗剪强度与土壤抗剪强度成正比, 可从理论上近似推算出界面抗剪强度^[23]。

对单根而言, $t_{r,s}$ 与 $t_{r,u}$ 分别是其由受拉状态向滑移状态与断裂状态转变的界限, 但两种破坏状态不会同时存在, 而是由二者的大小关系决定。而对于受拉状态下的根系, 其所受拉应力的上限应是:

$$t_{r,\max} = \min(t_{r,u}, t_{r,s}) \quad (19)$$

(3) 断裂状态。当根系所传递的拉应力超过了根系的抗拉强度 ($t_r > t_{r,u}$) 此时根系将发生断裂, 其所提供的根系强化也下降至接近于 0。Schwarz 在根束模型中提出了断裂概率参数 f_b , 以描述在某个根系位移 u_r 下根系仍未断裂的概率^[24]。

$$f_b = e^{-\left[\frac{u_r}{\lambda}\right]^\kappa} \quad (20)$$

其中: κ 和 λ 为 Weibull 分布函数的参数, 利用 Weibull 分布函数的数学表达式可将其改写为应力形式, 即:

$$t_{r,u} = \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \quad (21)$$

$$f_b = e^{-\left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \frac{t_r}{t_{r,u}}\right]^\kappa} \quad (22)$$

当 κ 趋于无穷时, 有:

$$f_b = \begin{cases} 1; & t_r \leq t_u \\ 0; & t_r > t_u \end{cases} \quad (23)$$

可见, 上述符合荷载超过根系抗拉强度时根系断裂的一般规律。但需注意的是, 式(22)是基于根束模型假设所得的, 其适用于根系受拉拔状态的情况。若要令该式能用于直接剪切条件下的根系强化预测中, 则需要调整 k' , 并将根系应力 t_r 与根土复合体的位移 u_s 联系起来, 即把式(17)代入式(22)进行计算, 使得两种方法耦合。此时, 根系强化的公式可以表示为:

$$c_r = k' \sum_i \varphi_i t_i f_b \quad (24)$$

可见, 式(24)通过添加独特设置的 t_r 与 f_b , 分别将根的不同破坏机制纳入根系强化土体模型之中, 符合直接剪切条件下根系强化土体的物理原理。

2.4 模型求解

将以上模块耦合并集成到纤维束模型中, 便可计算给定根土复合体参数下每条根系的根系应力 t_r 和断裂参数 f_b 。而后, 对所有根系求和, 即可得到当前的根系强化值 c_r , 如式(25)所示。

$$c_r = \sum_i \varphi_i t_i f_b (\sin\theta + \cos\theta \tan\varphi') \tag{25}$$

图 2 即为基于纤维束模型的毛竹根系强化土体模型的计算流程图。

5 试验与验证

5.1 室内试验验证

5.1.1 试验设计

为验证本文所提模型的合理性,拟设计并开展毛竹根系的根土复合体直剪试验。该试验以福州市永泰县某竹林斜坡为依托,根据地面调查及勘探揭露,地层为滑坡堆积层(厚 1.5-2.5 m)、碎石层、砂土状强风化凝灰岩层、碎块状强风化凝灰岩层以及中风化凝灰岩层,其中毛竹根系主要分布于滑坡堆积层。由于该斜坡土壤中含有碎石,直接剪切试验宜采用重塑土样。试验用土由野外取得,并通过 2mm 筛进行重塑制样;植物根系则直接采用斜坡上挖取的毛竹根系。试验用土的含水率为 20%,干密度为 1.33g/cm³。图 3 即为毛竹根系现场调查及其开挖剖面图。根据野外调查情况,毛竹鞭根主要存在于 0—60cm 的土层范围内,根系交错纵横,直径范围多在 1—4mm 之间,部分主根根系直径可达 3—5cm。基于此,本次试验选取毛竹鞭根的根系直径在 1—4mm 之间,主要目的是针对不同根系面积比 RAR (root area ratio) 的根土复合体试样与素土试样进行直接剪切试验。

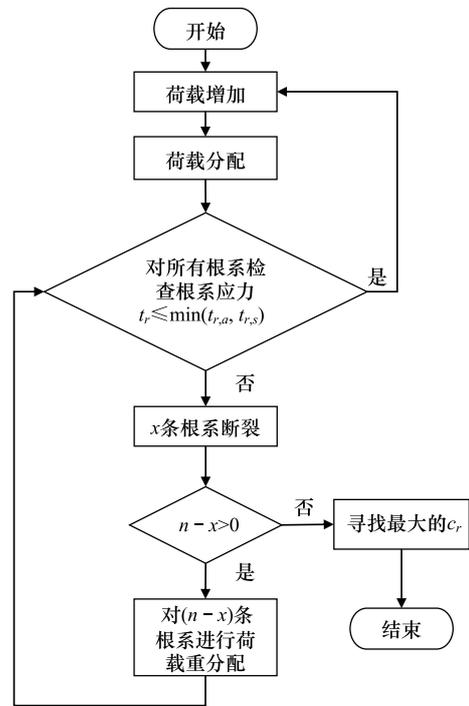


图 2 计算流程图

Fig.2 Flowchart for calculation



图 3 毛竹根系现场调查及其开挖剖面图

Fig.3 Field investigation of Phyllostachys edulis root system and its excavation profile

5.1.2 试验方法

将取回的土体放置在烘箱中烘干一昼夜,并通过 2mm 筛进行筛选。称取所需重量的过筛干土,将其平铺

在不锈钢方盘内,用喷雾器喷洒适量水,并且不断搅拌,直至满足所需含水率。将制备好的重塑土装入密封袋中,并密封保存一昼夜,使得含水率均匀分布。开始制样时,将野外采回的毛竹根系修剪为长 2cm,使用游标卡尺测量修剪后根系的直径。按照所需根系面积比,将根系垂直安置在直剪试样装样器中间,然后加入所需质量的重塑土并用千斤顶一次压实。图 4 为直接剪切试验所使用的毛竹根系。



图 4 直接剪切试验使用的毛竹根系

Fig.4 Root system of *Phyllostachys edulis* used in direct shear test

试验所采用的剪切仪为 ZJ-D 型应变控制式直剪仪。将制作好的试样放入直剪仪剪切盒中,根据土工试验方法标准,调节剪切速率为 0.8mm/min 进行不排水快剪试验,分别对不同根土面积比的根土复合体试样以及素土试样进行剪切试验。

5.1.3 试验结果

在直剪试验中,测读每发生 0.2mm 的剪切位移时所对应的测力计读数,并计算对应的抗剪强度值。根据记录的数据做出各个试样的抗剪强度-剪切位移关系曲线。试验中各个试样的抗剪强度如表 1 所示。

表 1 根土复合体直接剪切试验统计表

Table 1 Statistics of direct shear tests on root-soil composite

试样编号 Sample number	根系面积比 Root area ratio/%	垂直压力 Vertical pressure/kPa	抗剪强度 Shear strength/kPa	试样编号 Sample number	根系面积比 Root area ratio/%	垂直压力 Vertical pressure/kPa	抗剪强度 Shear strength/kPa
素土 I Plain soil I	0	100	63.88	含根土 V Rooted soil V	0.13	100	69.16
素土 II Plain soil II	0	200	106.47	含根土 VI Rooted soil VI	0.18	100	72.62
素土 III Plain soil III	0	300	136.50	含根土 VII Rooted soil VII	0.21	100	74.44
素土 IV Plain soil IV	0	400	183.82	含根土 VIII Rooted soil VIII	0.25	100	78.26
含根土 I Rooted soil I	0.25	100	78.81	含根土 IX Rooted soil IX	0.26	100	79.72
含根土 II Rooted soil II	0.26	200	120.67	含根土 X Rooted soil X	0.30	100	85.36
含根土 III Rooted soil III	0.27	300	156.16	含根土 XI Rooted soil XI	0.34	100	87.36
含根土 IV Rooted soil IV	0.25	400	200.75				

拟合素土与根系面积比 RAR 约为 0.25% 的毛竹根土复合体的垂直压力-抗剪强度拟合曲线,结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 试样莫尔-库伦强度参数

Table 2 Specimen Mohr-Coulomb strength parameters

试样名称 Sample name	线性拟合关系式 Linear fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	粘聚力/kPa Cohesion	内摩擦角/(°) Internal friction angle
素土 Plain soil	$y=0.390x+25.205$	0.993	25.205	21.30
根土复合体 Root-soil composite	$y=0.401x+38.770$	0.998	38.770	21.85

进一步的,选取所有垂直压力为 100kPa 时的素土与根土复合体试样试验结果制作根系面积比-抗剪强度散点图,如图 6 所示。

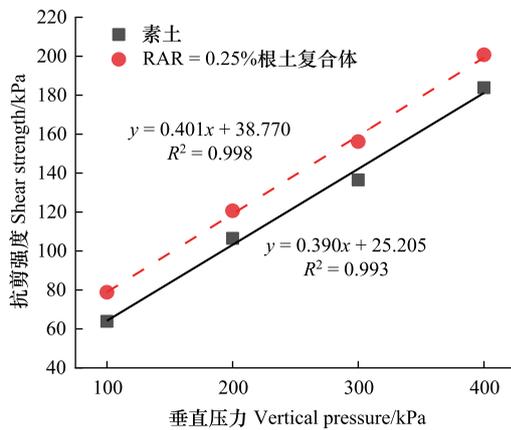


图 5 垂直压力与抗剪强度关系曲线

Fig.5 Vertical pressure versus shear strength curve

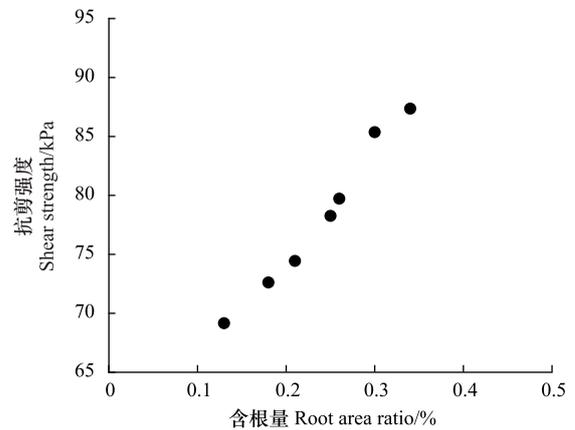


图 6 试样根系面积比-抗剪强度散点图

Fig.6 Scatter plot of root area ratio-shear strength of sample

5.1.4 分析与讨论

(1) 根系提高根土复合体抗剪强度的机理

由图 5 可知,当根系面积比 RAR 为 0.25%时,根土复合体的抗剪强度趋势线与素土的几乎平行。且计算表明,毛竹根土复合体内摩擦角的增量仅为 0.54° ,而其趋势线的截距明显增大,增量为 13.565 kPa。显然,试验结果表明:①根土复合体的抗剪强度也符合莫尔-库伦定律,即满足 $\tau = \sigma \tan \phi + c$;②毛竹根系提高根土复合体抗剪强度的作用相当于给土体附加了粘聚力 c_r ,根系在土体变形时通过根土界面摩擦传递应力,限制土体的变形,从而提高土体的抗剪强度。RAR 约为 0.25%的根土复合体平均提高的抗剪强度为 13.565kPa。

(2) 根系面积比对根系强化作用的影响

由图 6 可知,在根系面积比 $RAR < 0.34\%$ 时,根系强化与根系面积比呈明显的正相关关系。随着根系面积比增加,抗剪强度由素土 ($RAR = 0$) 的 63.88 kPa 增加到 $RAR = 0.34\%$ 时的 87.36 kPa,表明根系面积比是影响根系峰值强化的一个重要因素,符合模型的基本假设。

5.2 与已有成果的对比较证

由于一般植被的根系中超过 80%的生物量分布在深度 400—500mm 的土层中^[25],该部分拟通过 Liang 等关于植物根系对斜坡的加固效果的根土复合体原位直剪试验,验证本文模型的预测精度与对其他植物根系的适用性。

Liang 等针对柳树 (*Salix babylonica*)、黑麦草 (*Lolium perenne*) × 羊茅 (*Festuca ovina*) 和金雀花 (*Parochetus communis*) 等研究了根系加固土体的效果,进行了一系列直接剪切试验^[26]。试验使用岩土离心机来模拟原位土体应力状态,选用的根系具有不同的结构特性(图 7),土壤由 71%的砂土、19%的粉砂和 10%黏土组成,干密度为 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 。种植 2-3 个月,充分饱和后在自由重力下排水 48 小时,然后在 100mm、200mm、300mm、400mm 处进行剪切,剪切盒直径为 150mm,剪切速率为 1mm/min。试验中表征根系生物力学特性的参数整理如表 3 所示,其中 κ 是 RBM 所需的 Weibull 分布形状参数,用以描述根的抗拉强度特性。为方便对比,本研究将测定的毛竹根系参数亦附在表中。

表 4 给出了不同植物根系在不同根系面积比下剪切深度为 100mm 处的直剪实验结果。其中,所取的根土复合体抗剪强度为剪切位移较大时(40mm)的最大值。同时,为便于对比验证,选取前述 100kPa 垂直压力下的两组毛竹试验数据。



图 7 试验选取的植物根系

DFig.7 Three plant root systems were selected for experiment (来源:Liang et al.2017.)

表 3 不同植物的根系生物特性

Table 3 Root biological properties of different plants

物种名 Species name	$t_{r,u}$	β_t	R^2	κ
柳树 <i>Salix babylonica</i>	10.80	0.0291	0.383	1.81
黑麦草×羊茅 <i>Lolium perenne</i> × <i>Festuca ovina</i>	6.25	-0.655	0.485	2.46
金雀花 <i>Parochetus communis</i>	22.80	0.0697	0.385	2.13
毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	24.24	0.43	0.93	2.82

表 4 不同植物根系的直剪试验结果

Table 4 Direct shear test results of different plant roots

物种名 Species name	根系面积比/% Root area ratio	抗剪强度/kPa Shear strength	素土抗剪强度/kPa Shear strength of plain soil	根系强化/kPa Root Reinforcement
柳树 <i>Salix babylonica</i>	0.302	10.59	2.79	7.8
黑麦草×羊茅 <i>Lolium perenne</i> × <i>Festuca ovina</i>	0.059	9.07	2.79	6.28
金雀花 <i>Parochetus communis</i>	0.211	14.70	2.79	11.91
毛竹 I <i>Phyllostachys edulis</i> I	0.18	72.62	63.88	8.74
毛竹 II <i>Phyllostachys edulis</i> II	0.21	74.44	63.88	10.56

进一步的,整理不同的预测模型与试验所测定的根系强化之间的差异,汇总如表 5 所示。同时,图 8 给出了针对不同植物根系并基于不同模型的根系强化预测值与实测值之比的柱状图。

表 5 根系强化试验值与不同模型的预测值差异

Table 5 Difference between experimental and model predictions of peak root reinforcements

物种名 Species name	试验实测根系 强化/kPa Experimentally measured root reinforcement	Wu-Waldron 模型 预测 ($k' = 1.2$) Wu-Waldron model prediction	纤维束模型 预测 ($\beta_f = 1$) Fiber bundle model prediction	本文模型预测 Model prediction in the paper
柳树 <i>Salix babylonica</i>	7.80	30.99	10.77	9.64
黑麦草×羊茅 <i>Lolium perenne</i> × <i>Festuca ovina</i>	6.28	7.04	5.17	5.72
金雀花 <i>Parochetus communis</i>	11.91	44.94	12.33	11.29
毛竹 I <i>Phyllostachys edulis</i> I	8.74	67.41	13.95	9.32
毛竹 II <i>Phyllostachys edulis</i> II	10.56	82.30	16.21	9.88

由图 8 所示,Wu-Waldron 模型在预测黑麦草×羊茅的峰值强化时较为准确,而在预测柳树、金雀花和毛竹

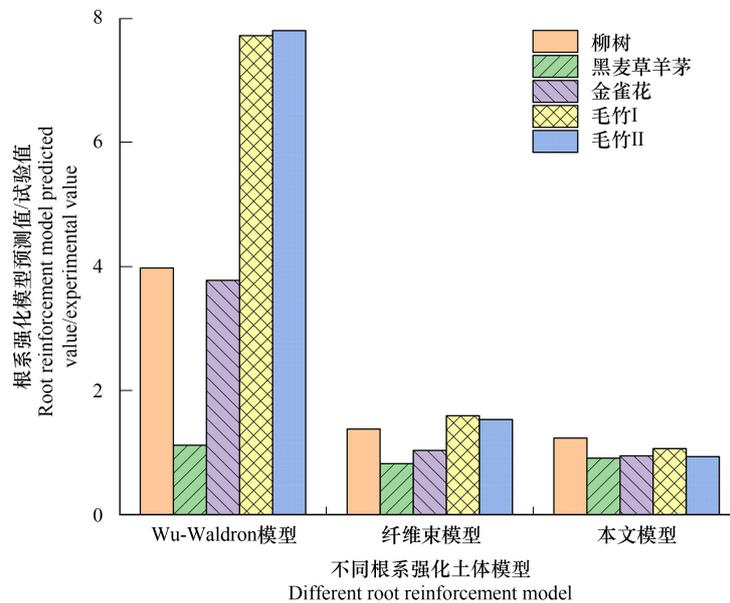


图 8 不同模型的根系强化预测与试验值之比柱状图

Fig.8 The histogram of the ratio of root strength predictions to test values for different root reinforcement models

的根系强化时出现较大误差,该模型的预测值相比试验实测值平均高估了 387.5%。相比之下,纤维束模型的预测较为准确,其预测值比实测值高估 27.4%。而本文模型的预测值与实测值仅相差 1.9%。同时,针对不同植物,纤维束模型预测的标准差为 0.298,本文模型的标准差为 0.121,表明相较于纤维束模型,本文模型对根系强化的预测具有更广泛的适用性。

最后,表 6 为本文模型计算所需参数的汇总表。由表可知,本文提出的模型所有参数均易获得且具有明确的物理意义,使得模型具有更强的兼容性和适用性。

表 6 模型计算所需参数

Table 6 Parameters required for model calculation

参数分类 Parameter classification	参数名 Parameter name	获取方式 Acquisition method
根系的生物与力学特性参数 Biological and mechanical parameters of root system	根系直径 d_r	直接测定
	根系面积比 RAR	直接测定
	根系长度 L_r	直接测定
	根系抗拉强度 $t_{r,u}$	室内拉拔试验获取
	根系弹性模量 E_r	室内拉拔试验获取
土的力学特性参数 Mechanical parameters of soil	根系强度 Weibull 分布参数 κ	室内拉拔试验获取
	内摩擦角 φ	室内直剪试验获取
	粘聚力 c	室内直剪试验获取
	剪切区高度 h	$h \approx 8D_{50}$
	根土界面抗剪强度 τ_i	$\tau_i \approx c$
纤维束模型设置 Fiber bundle model settings	荷载分配系数 β_F	根据文中式(15)计算

6 结论

(1) 为准确预测毛竹根系强化土体的作用,提出了一种基于纤维束模型的毛竹根系强化土体模型。该模型综合考虑了根系的生物特性、荷载分配系数和力学破坏模式(滑动破坏与断裂破坏),符合根系强化土体的

物理原理,所需参数易获取且具有明确的物理意义。

(2) 设计并开展了以毛竹根系面积比为变量的根土复合体直接剪切试验,以及与已有试验成果行对比验证发现,该模型能较好地符合根土复合体直接剪切试验结果,相较于已有的 Wu-Waldron 模型与纤维束模型,本文所建模型可提供更准确的根系强化土体效果预测。同时,其预测结果符合根系加强土体的物理规律;且相比已有模型,对不同植物根系具有更高的适用性。

(3) 必须指出的是,本文对根-土界面性质、根系的几何特性等因素关注较少,设计的试验尚无法考虑三维根系结构,建议后续借助更为先进的技术与工具予以探索。同时,该模型还未考虑到根系增加土体吸力的水文效应,实现根系-土体-水体三相耦合的根系强化土体模型还需进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Xiao T, Li P, Fei W B, Wang J D. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: a perspective review. *Science of The Total Environment*, 2024, 906: 167524.
- [2] 张欣, 王博, 刘铁军, 郭建英, 王虎刚, 杨振奇. 半干旱矿区典型灌木根系固土力学及疲劳性能的差异性. *水土保持通报*, 2022, 42(6): 47-53, 87.
- [3] Mao Z. Root reinforcement models: classification, criticism and perspectives. *Plant and Soil*, 2022, 472(1): 17-28.
- [4] 胥子凡, 易文. 基于 Griffith 断裂准则的根系固土力学模型. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(6): 167-174.
- [5] 夏鑫, 姜元俊, 苏立君, MEHTAB Alam, 李佳佳. 基于界面黏结的含根土抗剪强度极限值估算模型. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2173-2184.
- [6] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on prince of Wales island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [7] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(5): 843-849.
- [8] Bischetti G B, Chiaradia E A, D'Agostino V, Simonato T. Quantifying the effect of brush layering on slope stability. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3): 258-264.
- [9] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, Hallett P D. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3): 276-284.
- [10] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology*, 2008, 100(3/4): 401-418.
- [11] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 2007, 69(3): 197-205.
- [12] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 2005, 41(7): 2004WR003801.
- [13] Comino E, Marengo P, Rolli V. Root reinforcement effect of different grass species: a comparison between experimental and models results. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 60-68.
- [14] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F2): 2010JF001753.
- [15] Cohen D, Schwarz M, Or D. An analytical fiber bundle model for pullout mechanics of root bundles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F3): F03010.
- [16] Bischetti G B, Chiaradia E A, Epis T, Morlotti E. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 71-89.
- [17] 张乔艳, 唐丽霞, 潘露, 黄同丽, 陈龙. 喀斯特地区灌木根系力学特性及 WU 模型适用性研究. *长江科学院院报*, 2020, 37(12): 53-58.
- [18] Meijer G J. A generic form of fibre bundle models for root reinforcement of soil. *Plant and Soil*, 2021, 468(1): 45-65.
- [19] Thomas R E, Pollen-Bankhead N. Modeling root-reinforcement with a fiber-bundle model and Monte Carlo simulation. *Ecological Engineering*, 2010, 36(1): 47-61.
- [20] Ji J N, Mao Z, Qu W B, Zhang Z Q. Energy-based fiber bundle model algorithms to predict soil reinforcement by roots. *Plant and Soil*, 2020, 446(1): 307-329.
- [21] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots. *Soil Science*, 1981, 132(6): 427-435.
- [22] Ennos A R. The anchorage of leek seedlings: the effect of root length and soil strength. *Annals of Botany*, 1990, 65(4): 409-416.
- [23] Stokes A, Atger C, Bengough A G, Fourcaud T, Sidle R C. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 1-30.
- [24] Schwarz M, Giadrossich F, Cohen D. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(11): 4367-4377.
- [25] 吴静, 盛茂银. 我国喀斯特植被根系生态学研究进展. *植物科学学报*, 2020, 38(4): 565-573.
- [26] Liang T, Bengough A G, Knappett J A, MuirWood D, Loades K W, Hallett P D, Boldrin D, Leung A K, Meijer G J. Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge. *Ecological Engineering*, 2017, 109: 207-227.