

拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能

肖海^{1,2}, 张千恒¹, 夏振尧^{1,2}, 胡欢¹, 朱庆文¹,
闫茹冰¹, 张伦^{1,2*}, 杨悦舒^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 宜昌 443002)

摘要: 植物根系受拔时存在拔断破坏和拔出破坏两种破坏形式, 而关于根系倾角对根系受拔力学性能和破坏形式的影响尚不清楚。该研究以香根草作为研究对象, 分析不同直径(0.20~1.40 mm)根系单根抗拉性能。并设置不同受拔倾角(0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°)的根系进行单根抗拔试验, 分析不同生长倾角下单根抗拔性能及其破坏形式, 以明确植物根系生长倾角对根系受拔时力学性能和破坏形式的影响。结果表明: 香根草根系的抗拉力和最大抗拔力随根系直径呈幂函数关系增加, 而抗拉强度和抗拔强度则随根系直径呈幂函数关系减小。在受拔倾角为0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°时, 根系受拔力分别为0.48~2.71、0.59~4.16、0.79~4.08、0.95~4.47、1.86~5.39、2.20~6.39和2.95~7.46 N。随着根系受拔倾角的增加, 根系最大抗拔力和抗拔强度增加。植物根系破坏形式受到根系直径和受拔倾角影响, 根系直径越小越可能出现拔断破坏, 而根系受拔倾角越大, 受拔发生拔断破坏的根系数目越多, 被拔断的临界根径越大。研究结果表明根系直径和受拔倾角明显影响根系力学性能及拔断时的破坏形式, 这对深入理解根系固土机理具有重要意义。

关键词: 根系; 力学; 坡面; 破坏形式; 固土; 拉拔; 香根草

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.010

中图分类号: S157.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0091-07

肖海, 张千恒, 夏振尧, 等. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 91-97.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.010 <http://www.tcsae.org>

Xiao Hai, Zhang Qianheng, Xia Zhenyao, et al. Mechanical properties of roots of *Vetiveria zizanioides* as protection slope plants under tensile and pullout conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 91-97. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.010 <http://www.tcsae.org>

0 引言

作为常用的水土保持生物, 植被能拦截降雨、降低雨水侵蚀力, 同时植被根系能够改善土壤理化性质, 增强土体强度, 在边坡生态防护方面有着重要的作用^[1]。植物根系的抗拉特性与根土界面摩擦特性是衡量根系固土性能的重要指标。在根系抗拉特性方面, 目前国内外学者普遍认为根系的抗拉特性与其直径、生长期、根长等因素相关^[2-6]。植物固土作用主要表现为浅细根的加筋作用, 深粗根的锚固作用^[7]。进一步研究表明, 根系与土体间的加筋、锚固作用主要是由于根与土之间存在的摩擦力所导致的结果^[5,8-9], 当根土复合体受到剪切作用时, 根系与土壤产生错动, 在两者的接触界面产生摩擦作用, 将土体所承受的剪应力转化为根系的拉应力, 进而发挥其固土护坡能力^[10-11]。国内外学者主要通过根系拉拔试验研究根土界面摩擦特性, 认为影响根土界面摩擦作用的主要因素有土壤含水率、土壤密度、根系生长期、根

系直径、根系表面粗糙度和根系埋深等^[12-17]。

Ji 等^[18]研究认为在根系拉拔试验破坏过程中, 存在两种破坏形式: 拔断破坏与拔出破坏。当植物根系受到轴向拔出荷载破坏时, 其承受的荷载由根土界面产生的摩擦力所抵抗, 当植物根系所能承受的最大抗拉力小于根土界面所能承受的最大摩擦力时植物根系会产生拔断破坏, 当植物根系最大抗拉力大于最大摩擦力时植物根系会产生拔出破坏。目前国内外主要展开有关根系埋深、加载速率、土壤含水率和土壤压实度对破坏形式造成的影响研究^[3,13,19-21]。这些研究均将植物根系受拔方向控制为垂直或者水平方向, 但实际自然生长时的植物根系会沿着不同的方向生长, 在根土复合体受到荷载作用时沿不同倾角方向生长的植物根系受拔方向也存在较大差异, 可能会对根系抗拔性能和破坏形式造成影响, 而关于根系倾角对根系受拔性能和破坏形式的影响尚未见报道。研究不同受拔倾角下根系力学性能及破坏形式对于全面了解植物根系固土能力有着重要意义。

香根草为禾本科多年生草本植物, 具有适应性广、抗逆性好、抗涝能力强、根系长势迅猛、生长深度大且根系力学性能强等特点, 同时其生长迅速, 种植简便, 广泛分布于中国广东、广西、贵州、浙江、福建等省份, 是一种广泛应用的生态护坡与水土保持植物^[22-23]。因此, 本研究以香根草根系为研究对象进行单根抗拉试验, 并

收稿日期: 2022-03-03 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A2031; 41807068; U2040207);

土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地项目(2021EJD026)

作者简介: 肖海, 副教授, 研究方向为土壤侵蚀与生态防护。

Email: oceanshawctgu@163.com

*通信作者: 张伦, 博士后, 研究方向为根系固土机理与模拟。

Email: lunz@ctgu.edu.cn

开展不同受拔倾角状态的单根抗拔试验, 模拟不同生长方向根系受拔时的受力状态, 比较香根草根系在不同拉拔倾角下的力学性能并分析其破坏形式, 以期根系固土机理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用土壤采自湖北省宜昌市秭归县茅坪镇(110°40'17"E, 31°12'35"N, 海拔 271 m)某橘园, 是三峡库区的代表性紫色土。采集土样前, 将表层 30 cm 腐殖质有机质较高的土层挖开以采集下部土壤, 用于模拟新修坡地有机质含量较低的土壤, 所采集的土壤试样运至三峡大学地质灾害与防治中心风干后备用。采用烘干法测得所采集土壤自然含水率和风干土壤含水率分别为 15.0% 和 5.92%, 环刀法测得土壤容重为 1.35 g/cm³、电位法测得土壤 pH 值为 6.80, 液塑限联合测定法测得液限和塑限分别为 33.70% 和 19.70%, 筛分法测得土壤颗粒级配中 >2.00、>1.00~2.00、>0.50~1.00、>0.25~0.50、0.075~0.25 和 <0.075 mm 颗粒分别占 24.35%、21.80%、18.54%、14.46%、12.45% 和 8.40%。

供试根系为种植于湖北省宜昌市三峡大学室外种植箱中(长、宽、高分别为 100、40、50 cm)培育了 2 a 的香根草根系。香根草地上部分致密, 地下部分根系较为发达。经测定, 根系含水率为 84.06%, 直径最大 2.5 mm, 平均直径 1.5 mm, 含根量达到 6.58 kg/m³。植物植株于 2021 年 4 月采用整株挖掘法挖掘, 挖出后冲洗去根系表面土壤, 随后将根系置于吸水纸上待水渍晾干。然后将晾干后的根系放入保鲜袋, 然后放入冰箱内 4℃ 冷藏环境下保鲜储存, 且于 24 h 内进行试验。

1.2 试验设计及过程

1.2.1 单根抗拉试验设计

1) 抗拉试样制备

剪取顺直、直径变化小、没有破损的香根草根系形成长为 (100±5) mm 的香根草根段, 制备若干不同直径的单根为一组用于单根抗拉试验。制备单根试样时, 用游标卡尺测量根系的两端及中间部分直径, 通过测量直径计算出对应的平均直径, 测量直径与平均直径相差在 0.10 mm 内时, 所取单根试样为合格试样。由于夹具钳口存在应力集中效应, 试验过程中容易出现试样在靠近钳口部分因夹断或根皮脱落等原因造成根系断裂, 故在进行试验时在上下夹具夹口绑上橡胶薄膜, 使橡胶薄膜包裹香根草单根, 以减少根皮脱落或试样被夹断情况。

2) 单根抗拉试验方法

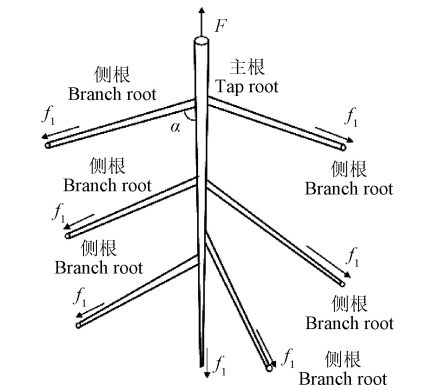
采用量程为 100 N、精度为 0.50% 的艾德堡数显推拉力计 HP-100 进行单根抗拉试验, 测定香根草根系最大抗拉力和抗拉强度。根系受拉前使用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺测量根系两端及中间 3 个位置的直径, 计算 3 个位置的平均直径值作为所测根系的直径。为保证所有平均直径能够有效代表供试根系直径, 本研究仅选择测量直径与平均直径相差在 0.10 mm 内的根系视为合格试样, 超过 0.10 mm 的根系视为不合格试样, 直接舍弃。

试验过程中抗拉试验速率为 10.0 mm/min。为了更准确地测定试样的最大抗拉力与抗拉强度, 所有靠近钳口部分因夹断或根皮脱落等原因造成根系断裂的试验均视为失败, 被拉断部位在中间 1/3 段部位时视为成功。

1.2.2 不同倾角单根抗拔试验设计

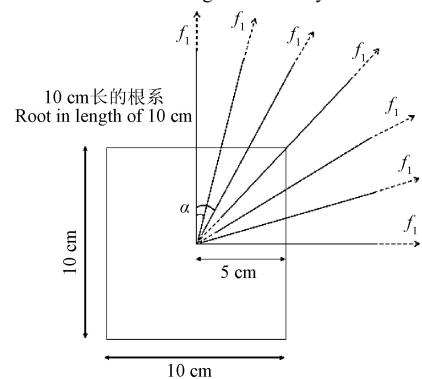
通过称取一定的土样置于托盘中然后将水均匀喷洒在土样上并搅拌均匀, 最后放入保湿缸封闭静置保湿 24 h 使其水分均匀, 制备成设计含水率(自然含水率, 15%)土样。选用根系标准与抗拉试验中标准一致。

试样为重塑土根土复合体, 控制土壤容重为 1.35 g/cm³, 然后按 GB/T 50123-2019《土工试验方法标准》^[24] 重塑制样方法将单根埋置于 100 mm×100 mm×100 mm 的正方形装土盒中心压实, 制备成香根草单根-土复合体, 香根草单根埋置深度为 50 mm。考虑自然条件下, 根系在受拉过程中会存在不同倾角(图 1a), 本研究设置倾角为 0°、15°、30°、45°、60°、75° 和 90° 共 7 个不同的受拔方向(图 1b), 然后通过上述数显推拉力计沿这些受拔方向进行速率为 10.0 mm/min 的拉拔试验。



a. 根系示意图

a. Schematic diagram of root system



b. 单根不同受拔方向示意图

b. Schematic diagram of single root with different pullout angles

注: α 为侧根倾斜角度或受拔倾角, (°); F 为整株香根草所承受的拔出力, N; f_1 为各侧根或各受拔倾角的最大拔出力, N。

Note: α is tilted or pullout angle of branch root, (°); F is pullout force of the whole plant, N; f_1 is the maximum pullout force for branch root or under each pullout angles, N.

图 1 单根抗拔试验设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of single root pullout test

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 22.0 对所采集数据进行处理和分析, 对根系直径与其力学性能进行曲线函数拟合并采用皮尔逊相关系数进行单因素方差分析其显著性, 采

用 Origin 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 香根草单根抗拉力学性能特性

香根草被拉断部位在根系中间 1/3 段即为试验成功判断标准, 计算得到试验成功率为 62% (试验样本 50 个), 试验成功的香根草直径范围为 0.20~1.40 mm, 单根的最大抗拉力和抗拉强度范围分别为 2.21~28.38 N 和 18.89~41.63 MPa。香根草根系直径显著影响最大抗拉力和抗拉强度, 最大抗拉力和抗拉强度分别随着根系直径的增加而增加和减小, 根系直径与最大抗拉力和抗拉强度间的关系均能够很好地用幂函数描述 ($R^2 \geq 0.75$, $P < 0.001$) (图 2)。

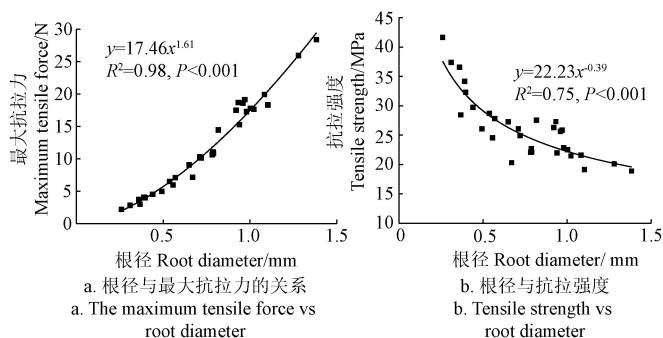


图 2 根径与最大抗拉力和抗拉强度的关系

Fig.2 Relationships between root diameter and maximum tensile force and tensile strength

2.2 根系受拉应力应变关系

分析根系受拉过程中应力-应变关系是研究根系力学性能的重要内容, 也是评估根土复合体力学性能重要依据之一。不同直径香根草根系受拉时应力-应变关系变化规律基本一致, 均呈现斜率随着应变的增加逐渐减小, 且无明显根径减小 (即颈缩) 的现象 (图 3)。

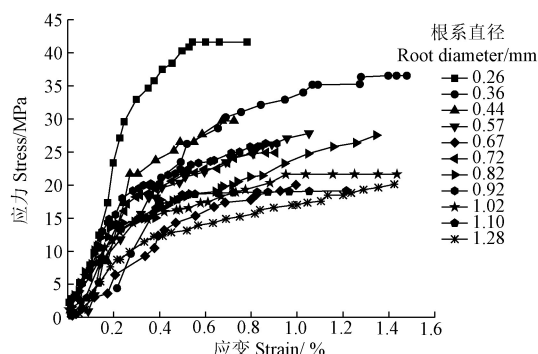


图 3 不同直径单根受拉应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curves of single root with different diameters

由图 3 可知, 整体来说, 根系在受到拉伸破坏时表现出明显的弹塑性材料特征, 根系受拉过程中经历了初期应力随应变呈线性增长至弹性极限的弹性变形阶段, 随后应力随应变曲线斜率开始逐渐减小至接近应力极限的中期塑性变形阶段和最后应变急剧增加, 达到根系应力极限, 根系拉断的后期拉断破坏 3 个阶段。同时, 还可以发现,

根系在弹性变形阶段应力随应变曲线斜率随着根系直径的减小而增加, 表明香根草根系直径越小, 其抵抗变形的能力越强且最大应力 (抗拉强度) 越大, 而相应的极限 (最大) 应变基本在 0.73%~1.48% 之间波动变化, 根系直径对极限应变的影响不明显, 这与其他学者^[25-26]的研究一致。

2.3 受拔倾角对根系最大抗拔力的影响

每种受拔倾角下均进行了 40 次有效抗拔试验, 抗拔试验的根系直径范围为 0.28~2.18 mm。受拔倾角为 0°、15°、30°、45°、60°、75° 和 90° 的根系 40 次试验最大抗拔力范围分别为 0.48~2.71、0.59~4.16、0.79~4.08、0.95~4.47、1.86~5.39、2.20~6.39 和 2.95~7.46 N; 相应的最大抗拔强度范围分别为 0.93~7.80、1.14~6.21、1.29~8.30、1.30~12.59、1.66~9.13、2.10~10.61 和 2.86~18.55 MPa。可见, 在相同的根系直径下, 随着受拔倾角的增大, 香根草根系的受拔力逐渐增加, 根土界面摩擦特性越强 (图 4)。各受拔倾角条件下, 香根草的最大抗拔力和抗拔强度分别随根系直径增大而增加和减小, 幂函数能够很好地描述根系直径与最大抗拔力和抗拔强度间的关系 (表 1)。对根系受拔过程中破坏形式进一步分析表明: 在单根拔出过程中, 根系会出现完全拔出和拔断 2 种破坏形式, 受拔倾斜为 0°、15°、30°、45°、60°、75° 和 90° 条件下被拔断根系数量分别为 0、1、2、3、3、4 和 5 根, 最大直径分别为 0、0.32、0.43、0.43、0.49、0.52 和 0.46 mm。整体来说, 随着根系受拔倾角的增大, 被拔断破坏的根系数目越多, 被拔断的临界根径越大。

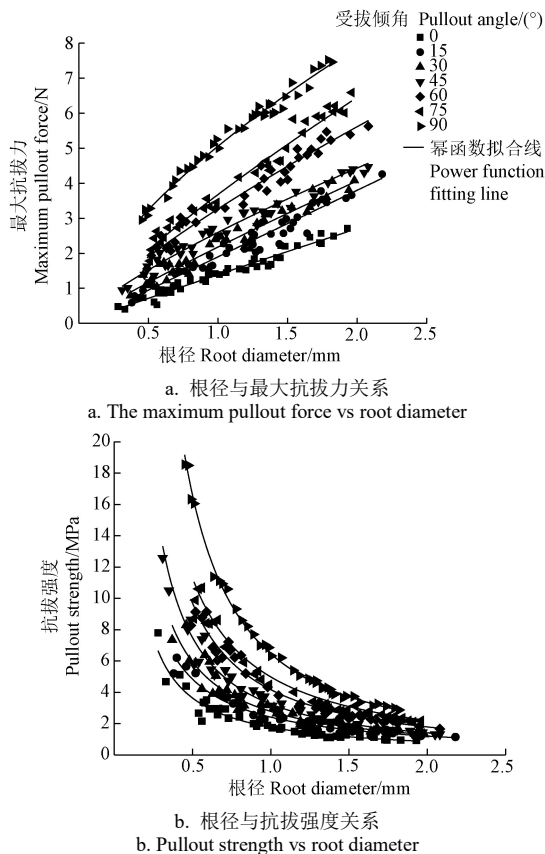


图 4 不同受拔倾角条件下最大抗拔力和抗拔强度与根径的关系
Fig.4 Relationships between the maximum pullout force and pullout strength and root diameter with different pullout angles

表 1 不同受拔倾角条件下最大抗拔力和
抗拔强度与根径的函数关系

Table 1 Function relationships between the maximum pullout
force and pullout strength and root diameter under different pullout
angles

受拔倾角 Pullout angle/(°)	最大抗拔力 Maximum pullout force		抗拔强度 Pullout strength		试验数目 The number of roots for test	拔断数目 The number of tensile failure roots
	拟合方程 Fitted equation	R^2	拟合方程 Fitted equation	R^2		
0	$y=1.39x^{0.96}$	0.95**	$y=1.77x^{-1.04}$	0.93**	40	0
15	$y=1.90x^{1.00}$	0.95**	$y=2.42x^{-1.00}$	0.95**	40	1
30	$y=2.18x^{0.90}$	0.91**	$y=2.78x^{-1.10}$	0.91**	40	2
45	$y=2.60x^{0.77}$	0.88**	$y=3.25x^{-1.21}$	0.97**	40	3
60	$y=3.27x^{0.78}$	0.95**	$y=4.17x^{-1.22}$	0.95**	40	3
75	$y=3.68x^{0.81}$	0.97**	$y=4.69x^{-1.19}$	0.97**	40	4
90	$y=5.06x^{0.64}$	0.99**	$y=6.46x^{-1.36}$	1.00**	40	5

注: **, $P<0.001$ 。x 为根系直径, mm; y 为最大抗拔力(N)或抗拔强度(MPa)。
Note: **, $P<0.001$. x represents root diameter, mm; y represents maximum pullout
force (N) or pullout strength (MPa).

2.4 根系受拔时拉力位移关系

各受拔倾角下根系抗拔力-位移曲线变化规律差异不大, 因此以根系受拔倾角 90°为例分析不同根系破坏形式下抗拔力-位移曲线差异(图 5)。在拔出破坏时, 根系抗拔力随着拔出位移的增加呈现先迅速上升后迅速下降最后缓慢下降直至根系被拔出; 而在拔断破坏时, 根系抗拔力随着拔出位移的增加呈现先迅速上升, 拔断后根系抗拔力迅速减小至 0。拔出破坏是根系破坏的主要形式, 在根系受拔倾角 90°时只有 0.35 mm 根系是拔断破坏形式, 其他各直径根系均为拔出破坏。

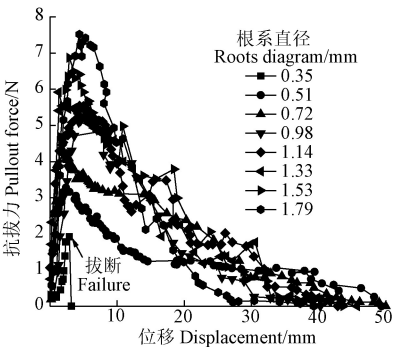


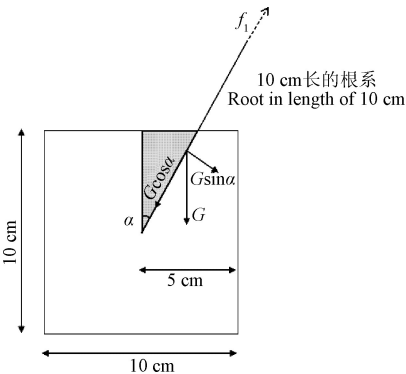
图 5 90°受拔倾角时抗拔力与位移关系图
Fig.5 Diagram of pullout force and pullout displacement with the
pullout angle of 90°

3 讨论

香根草根系最大抗拉力随直径的增大呈幂函数关系增加, 而抗拉强度则随直径的增大呈幂函数关系减小, 这与国内外学者的研究基本一致^[3,5,11,25-29], 已有研究表明根系抗拉强度减小的原因可能与植物根系中的纤维素、木质素含量有关^[30], 随着根系的生长, 根径增加, 根系中的纤维素等含量发生变化, 从而导致根系的抗拉强度降低。本试验所拟合出根系抗拉强度与直径的函数系数为 22.23 (图 2b), 相对于其他研究^[28]香根草的学者拟合函数系数 (32.31) 要小, 即本试验所得到的香根草抗拉

强度小于其他学者研究所得的抗拉强度。这可能与本研究中所用根系生长年限、养护条件与前人研究存在差异有关, 根系生长条件不同其化学成分也会有所差异, 从而影响根系会影响其抗拉强度^[5,28]。余焱等^[29]研究的香根草置于室外坡度为 45°, 长、宽、高分别为 140、140、120 mm 的种植箱中, 且该研究为进行水肥管理自然生长 2 a, 该环境下的香根草需要在保证吸收足够自身生长的水肥养分的同时维持土体的稳定, 其香根草根系最长可达 2 m。而在本研究中, 所用种植箱深度远小于香根草根系生长的长度, 这可能影响了香根草根系的发育, 从而影响了根系力学性能。根系最大抗拔力随直径的增大呈幂函数关系增大, 而抗拔强度则随直径的增大呈幂函数关系减小, 这与张文豪等^[31]的研究结果相似。在其他因素不变时, 随着根直径增大, 根土接触面积也会增大, 增大根与土壤间的摩擦力, 使根系被拔出时产生更大的抗拔力。

在根系直径不变时, 随着受拔倾角的增大, 植物根系的受拔力越大, 这与不同倾角下根系受力作用不同有关。对根系受拔时受力作用进行分析发现(图 6), 随着根系倾角的增加, 根系受到上部土体(阴影部分)的重力 G 逐渐增加, 一方面造成与根系垂直方向的压力分力 ($G\sin\alpha$) 增加, 另一方面造成与受拉方向相反的作用力 ($G\cos\alpha$) 逐渐减小。压力分力增加造成根系与土壤间的摩擦力增加, 从而造成根系抗拔力增加; 而受拉方向相反的作用力减小则从理论上能够减小根系抗拔力, 两者相互作用, 对抗拔力造成影响。在倾角增加时, 可能压力分力增加造成的影响大于受拉方向相反的作用力减小的影响, 造成根系抗拔力随着倾角的增加而逐渐增加。赵东晖等^[20]研究发现植物根系直径相近时, 根系的最抗拔力表现为: 坡下生长方向根系小于水平生长方向根系小于坡上生长方向根系, 分析认为是因为坡上生长方向根系受到的覆土荷载作用大于其他生长方向根系。因此, 不同生长方向的植物根系所承受的土压力不同造成不同生长方向植物根系的抗拔力存在差异。



注: G 为根系上部土体的重力, N; 图中阴影部分代表对根系造成压力的土体。
Note: G is soil gravity above the roots, N; Shaded area represents the soil that
causes pressure on the roots.

图 6 受拔倾角对根土抗拔影响原理
Fig.6 Influence principle of pullout angle on root pullout force

试验过程中发现根系受拔时存在拔断和拔出两种破坏形式, 随着根系倾斜角度的增大, 根系拔断破坏概率

增加, 被拔断的根系数目和根径增加。将植物根系的受拔力与最大受拉力进行比较(图 7)可以发现, 在根系抗拉力与根系抗拔力的拟合曲线存在一个交点(临界值), 根系直径小于此交点时根系抗最大抗拉力小于最大抗拔力, 根系为拔断破坏, 而根系直径大于此交点时, 根系最大抗拉力大于最大抗拔力, 此时根系为拔出破坏。结果分析表明, 随着根系受拔倾角的增加, 被拔断的根系越多且根系直径临界值也逐渐增加, 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 倾角下理论临界根系直径分别为 0.03、0.04、0.07、0.12、0.15、0.16 和 0.30 mm, 被拔断时相应根系所能承受的理论拔断力(图 7 抗拔力和拟合曲线计算的临界交点根系被拔断时对应的根系拔断力)分别为 0、2.78、4.49、4.49、5.54、6.09 和 5.00 N。而被拔断的统计最大直径分别为 0、0.32、0.43、0.43、0.49、0.52 和 0.46 mm, 相应的拔断力分别为 0、0.98、1.09、1.64、1.96、2.26 和 1.94 N。可见, 除倾角为 0° 时未拔断根系, 其他倾角情况下实际拔断的根系最大根径均大于理论值, 且通过计算得到拔断根系直径所对应的实际拔断力均小于理论拔断力。David 等^[32]统计发现大部分根系在拉拔过程中并非在中间断裂, 而是在生长期最小的部位, 根系生长期最小的部位正好靠近根系的端部。本研究在进行单根抗拉试验时以靠近中间的 1/3 段部分破坏时所产生的数据为有效数据, 被拉断部位不靠近中间部分数据已舍弃, 试验过程中也发现植物被拔断的部分正是靠近根尖部位生长期小且薄弱的位置; 同时进行抗拔试验的单根在制备时需将剪除其须根部分, 这些部位会留下薄弱点, 这部分薄弱点在受拔时容易产生应力突变进而导致根系被拔断。

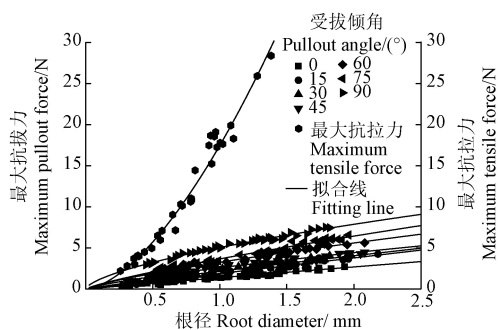


图 7 根系抗拉力与抗拔力比较

Fig.7 Comparison of root tensile force and pullout force

香根草的根系包含向下生长的主根和沿各个生长方向的侧根, 主根能生长至土层 2 m 以下, 具有一定的锚固作用, 而其侧根则可发挥加筋作用。本研究表明根系生长倾角越大, 根系所承受的抗拔力和抗拔强度越大, 被拔断的临界根径越大。已有研究表明, 植物根系在生长过程中会向着土壤水肥更多的地方生长^[33]。因此, 可以考虑利用根系生长过程中的向水肥性, 诱导根系生长方向, 使更多根系朝可更大承受应力的受拔方向生长, 从而提高其受拔时的抗拔力和抗拔强度, 使其发挥更大的固土效果和进一步提高边坡稳定的功能。

4 结 论

1) 香根草根系的最大抗拉力和抗拉强度分别随根径的增大而呈现幂函数关系增大和减小。植物根系在受到拉伸破坏时表现出明显的弹塑性材料特征, 根系受拉初期应力应变关系呈线性增长, 当根系受到的拉伸力超过弹性极限后应力增长逐渐缓慢, 而其应变会显著增长直至根系拉断。

2) 香根草根系最大抗拔力和抗拔强度分别随根系直径的增大而呈现幂函数关系增大和减小。根系最大抗拔力和抗拔强度随着受拔倾角的增加而逐渐增加。

3) 在根系受拔时存在拔断破坏和拔出破坏 2 种破坏形式, 植物根系破坏形式受到根系直径和受拔倾角影响, 根系直径越小越可能出现拔断破坏, 而根系受拔倾角越大, 受拔发生拔断破坏的根系数目越多, 被拔断的临界根径越大。受拔倾角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 条件下被拔断根系数量分别为 0、1、2、3、3、4 和 5 根, 最大直径分别为 0、0.32、0.43、0.43、0.49、0.52 和 0.46 mm。

[参 考 文 献]

- [1] 郭晓朦, 黄茹, 何丙辉, 等. 不同水土保持林草措施对三峡库区土壤理化性质的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(4): 555-563.
Guo Xiaomeng, Huang Ru, He Binghui, et al. Correlation analysis of soil physicochemical properties under different soil and water conservation biological measures in Three Gorges Reservoir Region[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(4): 555-563. (in Chinese with English abstract)
- [2] 宗全利, 陈志康, 蔡杭兵, 等. 典型荒漠植被根系对黏性岸坡侵蚀过程的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 90-98.
Zong Quanli, Chen Zhikang, Cai Hangbing, et al. Effects of typical desert vegetation roots on the erosion process of cohesive riverbank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 90-98. (in Chinese with English abstract)
- [3] 管世烽, 夏振尧, 张伦, 等. 水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 24-28.
Guan Shifeng, Xia Zhengyao, Zhang Lun, et al. Pull-out test of Indigofera amblyantha craib root under horizontal load[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research, 2016, 33(6): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈文乐, 杜鹃, 方迎潮, 等. 泥石流频发区典型乔灌木根系固土效应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 32-39.
Cheng Wenle, Du Juan, Fang Yingchao, et al. Soil reinforcement effect of root systems of typical plants in areas with frequent debris flow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郑明新, 黄钢, 彭晶. 不同生长期多花木蓝根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 175-182.
Zheng Mingxin, Huang Gang, Peng Jing. Tensile-pullout properties of roots of Magnolia multiflora in different growth stages and stability of slope with its root[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(20): 175-182. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周云艳, 钱同辉, 宋鑫, 等. 植物根系长度对生态袋加筋土挡墙稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13):

- 102-108.
Zhou Yunyan, Qian Tonghui, Song Xin, et al. Effects of plant root lengths on stability of ecological bag reinforced retaining wall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- [7] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土的理论基础[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 180-186.
Song Weifeng, Chen Lihua, Liu Xiuping. Review of theories of soil reinforcement by root system in forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 180-186. (in Chinese with English abstract)
- [8] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011, 116: F02007.
- [9] 杨闻达, 王桂尧, 常婧美, 等. 主直根系拉拔力的室内试验研究[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 111-116.
Yang Wenda, Wang Guiyao, Chang Jingmei, et al. Study on pull-out force in taproot by indoor test[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 111-116. (in Chinese with English abstract)
- [10] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 192-198.
Tian Jia, Cao Bing, Ji Jinnan, et al. Biomechanical characteristics of root systems of Hedysarum scoparium and Salix psammophila[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(23): 192-198. (in Chinese with English abstract)
- [11] Tristram C H, Chelcy F M. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42: 803-813.
- [12] 周林虎, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 西宁盆地黄土区 4 种灌木原位拉拔试验[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 236-242.
Zhou Linhu, Hu Xiasong, Liu Changyi, et al. In-situ pull-out test of four shrub plants in Xining Basin of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 236-242. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根-土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1270-1280.
Liu Yabin, Hu Xiasong, Yu Dongmei, et al. Microstructural features and friction characteristics of the interface of shrub roots and soil in loess area of Xining Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1270-1280. (in Chinese with English abstract)
- [14] 傅胤榕, 仇文岗. 土体含水率与根系埋深对银杏树苗抗拉拔性能的影响[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(5): 42-48.
Fu Yinrong, Zhang Wengang. Effects of soil moisture content and root depth on anti-overturning performance of Ginkgo biloba seedlings[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [15] 冯兰茜, 王文龙, 郭明明, 等. 根系密度对黄土塬沟头溯源侵蚀产沙和形态演化过程的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 88-96.
Feng Lanqian, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Effects of root density on gully headcut erosion and morphological evolution process in gully regions of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 88-96. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张超波, 周霞, 李东嵘, 等. 山西土石山区 3 种草本植物根拉拔特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 300-304.
Zhang Chaobo, Zhou Xia, Li Dongrong, et al. Root pullout properties of three slope-protecting herbaceous plants in earth-rock mountain area in Shanxi province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 300-304. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘亚斌, 余冬梅, 付江涛, 等. 黄土区灌木柠条锦鸡儿根-土间摩擦力学机制试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 198-205.
Liu Yabin, Yu Dongmei, Fu Jiangtao, et al. Experimental study on root-soil friction mechanical of Caragana korshinskii Kom, mechanism in loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 198-205. (in Chinese with English abstract)
- [18] Ji X D, Cong X, Dai X Q, et al. Studying the mechanical properties of the soil-root interface using the pullout test method[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15: 882-893.
- [19] 刘小光, 赵红华, 冀晓东, 等. 油松和落叶松根与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(6): 550-556.
Liu Xiaoguang, Zhao Honghua, Ji Xiaodong, et al. Friction characteristics of root-soil interface of Pinus Tabulaeformis and Larix Gmelinii[J]. Tribology, 2012, 32(6): 550-556. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵东晖, 冀晓东, 张晓, 等. 冀西北地区白桦根系-土壤界面摩擦性能[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 124-131.
Zhao Donghui, Ji Xiaodong, Zhang Xiao, et al. Friction performance of root-soil interface of betula platyphylla in northwestern hebei province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(3): 124-131. (in Chinese with English abstract)
- [21] Ji X D, Chen L H, Zhang A. Anchorage properties at the interface between soil and roots with branches[J]. Journal of Forestry Research, 2017, 28(1): 83-93.
- [22] 郭萍, 夏振尧, 高峰, 等. 香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 105-112.
Guo Ping, Xia Zhenyao, Gao Feng, et al. Effects of Vetiveria zizanioides hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李珍玉, 欧阳淼, 肖宏彬, 等. 植物根系生长形态对膨胀土边坡土体抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 181-189.
Li Zhenyu, Ouyang Miao, Xiao Hongbin, et al. Influence of root growth configuration on shear strength of expansive soil slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 181-189. (in Chinese with English abstract)
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 106-108.
- [25] 白璐翼, 刘静, 李雪松, 等. 黑沙蒿单根变形特性研究[J]. 西北农业学报, 2021, 30(4): 591-598.
Bai Luyi, Liu Jing, Li Xuesong, et al. Deformation characteristics of single root of artemisia ordosica species[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(4): 591-598. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李雪松, 刘静, 王博, 等. 黑沙蒿直根的材料力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 353-358.
Li Xuesong, Liu Jing, Wang Bo, et al. Study on the material mechanical properties of straight roots of artemisia ordosica[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 353-358. (in Chinese with English abstract)
- [27] Azade D, Ehsan A, Massimiliano S, et al. Mechanical characteristics of the fine roots of two broadleaved tree

- species from the temperate caspian hyrcanian ecoregion[J]. *Forests*, 2020, 11: 345.
- [28] 欧阳前超, 魏杨, 周霞, 等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 35-41. Ouyang Qianchao, Wei Yang, Zhou Xia, et al. Root tensile properties of the herbaceous plants for slope protection in earth-rocky mountain area, northern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4): 35-41. (in Chinese with English abstract)
- [29] 余燚, 刘思思, 李某明, 等. 红黏土边坡香根草根土复合体的强度特性[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 97-102. Yu Yi, Liu Sisi, Li Mouming, et al. Strength characteristics of vetiver root-soil complex on red clay slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1): 97-102. (in Chinese with English abstract)
- [30] 叶超, 郭忠录, 蔡崇法, 等. 5 种草本植物根系理化特性及其相关性[J]. *草业科学*, 2017, 34(3): 598-606. Ye Chao, Gu Zhonglu, Cai Chongfa, et al. Relationship between root tensile mechanical properties and main chemical components of five herbaceous species[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(3): 598-606. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张文豪, 王桂尧, 胡圣辉, 等. 薄叶山矾根系抗拔力的室内试验研究[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 22-30. Zhang Wenhao, Wang Guiyao, Hu Shenghui, et al. Indoor experimental study on the pull-out force of *Symplocos anomala* Brand root[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(3): 22-30. (in Chinese with English abstract)
- [32] David B, Anthony G B, Lin Z J, et al. Root age influences failure location in grass species during mechanical testing[J]. *Plant Soil*, 2021, 461: 457-469.
- [33] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 基于根系构型的调控提高植物边坡根系固土能力[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3271-3280, 3290. Li Zhenyu, Ouyang Miao, Xiao Hongbin, et al. Improvement of slope soil consolidation capacity of plant root system based on regulation of root architecture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3271-3280, 3290. (in Chinese with English abstract)

Mechanical properties of roots of *Vetiveria zizanioides* as protection slope plants under tensile and pullout conditions

Xiao Hai^{1,2}, Zhang Qianheng¹, Xia Zhenyao^{1,2}, Hu Huan¹, Zhu Qingwen¹,
Yan Rubing¹, Zhang Lun^{1,2*}, Yang Yueshu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Root anchoring in the soil can provide significant resistance for plants to erosion and potential soil shear failure on a slope. Typical failures of plant roots can be found under the pullout and tensile conditions. The pullout angle varies greatly for the different roots, where the root penetrates various directions in the soil. However, the influence of pullout angle on the characteristic of mechanical properties and failure types of plant roots under tensile and pullout conditions can still far from being fully understood so far. Among them, *Vetiveria zizanioides* has been widely used for ecological slope protection, and soil and water conservation, due to its excellent adaptability, strong resistance, and well-developed root system. Taking the *Vetiveria zizanioides* as the study material, a series of tensile and pullout tests were conducted to determine the mechanical properties and failure types of roots. The roots were also planted in a plant groove of 100 cm in length, 40 cm in width, and 50 cm in depth. A single root tensile test was firstly performed on the roots with different diameters (0.20-1.40 mm). A pullout test was used to simulate the root in different directions in the soil, particularly with the different pullout angles (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°). Some parameters were recorded, including the tensile stress-strain curves, the maximum tensile force, and tensile strength for the tensile test, while the pullout force, the pullout displacement curves, the maximum pullout force, and pullout strength for the pullout test. The failure types were identified, according to the resulting relations of the maximum tensile force, tensile strength, the maximum pullout force, and pullout strength to the root diameter. The results indicated that the maximum tensile and pullout force increased, with the increase of root diameter, whereas, the tensile and pullout strength decreased, indicating the power function of the relationships ($R^2 \geq 0.75$, $P < 0.001$). The maximum pullout force increased in the range of 0.48-2.71, 0.59-4.16, 0.79-4.08, 0.95-4.47, 1.86-5.39, 2.20-6.39, and 2.95-7.46 N for the pullout angle of 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°, respectively. The failure type of the root depended mainly on the root diameter and pullout angle. The thinner root was a more likely failure with the pullout failure, while the number of tensile failure roots and the critical root diameter increased with the pullout angle for the tensile failure type. The numbers of tensile failure roots were 0, 1, 2, 3, 3, 4, and 5 for the pullout angle of 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°, respectively, and the corresponding of critical root diameter for the tensile failure type was observed at 0, 0.32, 0.43, 0.43, 0.49, 0.52 and 0.46 mm, respectively. Specifically, the root, suffered the tensile failure, when the root maximum tensile force was smaller than the maximum pullout force, due to the snap during the pullout test, and vice versa, the root suffered the pullout failure, when the root maximum tensile force was higher than the maximum pullout force. Therefore, the influence of root diameter and pullout angle on the failure type of the root was attributed to the increase in the maximum tensile force. As such, the root diameter and pullout angle posed significant effects on the root pulling resistance and root failure type. The finding can provide a strong reference for the mechanism of root reinforce soil, particularly for slope stability, erosion, surface landslides, and geological hazards prevention.

Keywords: roots; mechanics; slopes; failure type; reinforce soil; tensile and pullout effect; *Vetiveria zizanioides*