

张家口地区高羊茅根系对浅层边坡的力学固土研究

阮梦柯^{1,2,3} 刘杰^{1,2,3} 刘嘉璐^{1,2,3} 王万梅^{1,2,3} 张喆^{1,2,3}

1 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075031

2 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心, 河北 张家口 075031

3 河北建筑工程学院土木工程学院, 河北 张家口 075031

[摘要] 为了建立根土复合体抗剪强度极限值估算模型, 本研究通过高羊茅根系拉拔试验研究, 基于室内直剪试验测定的根土复合体抗剪强度参数对 Wu 模型进行修正, 并通过修正后的 Wu 模型确定高羊茅根系附加黏聚力的增长情况。结果表明: 不同土体及不同植被的 θ 值不同, θ 值与法向压力及含水率有关, 且 θ 角度的变化随根面积比的增大而增大; 夹角系数 k 随含水率的增高先增大后减小, 其峰值点也会随含水率的增大而提高; 平均拉拔强度与高羊茅根系直径呈现幂函数关系; 根土复合体抗剪强度破坏趋势和素土大致相同, 剪应力略高于素土。本研究为快速量化根土复合体的抗剪强度及评估植被稳固浅层边坡稳定性提供了理论支撑, 为稳固浅层滑坡问题提供了解决方案。

[关键词] 植被护坡; 直剪试验; 拉拔试验; Wu 模型

DOI: 10.33142/ec.v6i4.8058

中图分类号: U416.14

文献标识码: A

Study on Mechanical Soil Fixation of Tall Fescue Roots on Shallow Slope in Zhangjiakou Area

RUAN Mengke^{1,2,3}, LIU Jie^{1,2,3}, LIU Jialu^{1,2,3}, WANG Wanmei^{1,2,3}, ZHANG Zhe^{1,2,3}

1 Hebei Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance, Zhangjiakou, Hebei, 075031, China

2 Technical Innovation Center for Transportation Infrastructure Engineering in Cold Regions of Hebei Province, Zhangjiakou, Hebei, 075031, China

3 Hebei Institute of Architecture Civil Engineering, Zhangjiakou, Hebei, 075031, China

Abstract: In order to establish an estimation model for the shear strength limit of root soil composite, this study conducted a pull-out test of tall fescue roots, modified Wu's model based on the shear strength parameters of root soil composite measured through indoor direct shear tests, and determined the growth of additional cohesion of tall fescue roots through the modified Wu's model. The results show that the values of different soil and vegetation are different, and the θ values are related to the normal pressure and water content, and the change of θ angle increases with the increase of root area ratio; The included θ angle coefficient k first increases and then decreases with the increase of water content, and its peak point will also increase with the increase of water content; There is a power function relationship between the average pulling strength and the root diameter of tall fescue; The failure trend of the shear strength of the root soil composite is approximately the same as that of the plain soil, and the shear stress is slightly higher than that of the plain soil. This study provides theoretical support for rapidly quantifying the shear strength of root soil composites and evaluating the stability of vegetation stabilized shallow slopes, as well as providing solutions to the problem of stabilizing shallow landslides.

Keywords: vegetation slope protection; direct shear test; pullout test; Wu model

引言

近年来, 气候极端、地震扰动和人类工程建设的影响导致了滑坡、水土流失等灾害频发, 对生命和财产造成巨大损失, 同时加剧生态环境的退化, 导致了生态环境的失衡。植被通过蒸散和截留的方式, 可以有效减少坡面的地表径流侵蚀, 降低土体孔隙水压力, 稳固边坡土体, 从而提高浅层边坡的稳定性^[1]。因此, 植被护坡技术受到了众多学者和相关部门的广泛关注和应用。然而, 现有生态护坡技术的应用在一定程度上优于理论研究, 对生态护坡技术的指导、实施及对植被边坡稳定性评估缺乏理论依据。

植物根系力学固土作用受破坏时穿过剪切面植被根系

的数量^[2]、剪切面与植被根系的夹角^[3]、植被根系力学特性、根-土作用界面的黏结情况等^[4-5]多种因素影响。因此, 分析和量化植被根系的力学固土作用是当前研究难点, 国内外学者也对此进行了许多研究。Wu 等^[6]在库仑定律基础之上建立了计算模型-Wu 模型, 此模型主要用于预测植物根系对土体的附加抗剪强度, 由于 Wu 模型参数较为简单及其适用性较强, 故被广泛用于预测不同工况下植物根系的力学固土作用。然而 Wu 模型假设条件之一在土体破坏时穿过破坏面的根系全部达到最大抗拉强度且同时断裂, 这一假设高估了模型中植物根系对土体的附加抗剪强度, 此外, 目前学者对修正 Wu 模型的研究主要针对不同植被的模型修正系数^[7]及考虑

破坏时植被根系受剪变形来修正模型参数,并未充分考虑不同土体及不同植被的 θ 值及不同含水率对Wu氏模型影响。

综上所述,从土体中根系稳固边坡的力学机理出发,在量化模型中需要考虑不同含水量和根系实际受剪变形情况对Wu模型的影响,为了防止模型应用时根土复合体抗剪强度被高估,有必要在Wu模型参数较为简单、适用性较强的基础上,建立更为准确的根土复合体抗剪强度估算模型。本文以高羊茅根系为研究对象,在不同含水率、不同根面积比下进行室内直剪试验,得到素土及根土复合体的抗剪强度、根系对土体所产生的附加抗剪强度。通过根系拉拔试验,以Wu模型为基础,建立根土复合体抗剪强度极限值预测模型。将建立的预测模型计算值与直剪结果进行对比,验证预测模型的合理性。此外,分析了预测模型参数的获取。本研究为快速量化根系对土体的附加抗剪强度提供了参考依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 高羊茅特性

高羊茅属于冷季型多年生草本植物,高温胁迫会对高羊茅造成各种危害,降低植物根部活力、叶绿素含量及抗氧化酶活性等^[8]。张家口市位于河北省西北部,地处京津冀经济圈和冀晋蒙的交汇点。张家口地区四季分明,昼夜温差较大,春季较为干燥,多风沙,冬季较为寒冷漫长,属温带大陆性半干旱季风气候^[9]。故选取高羊茅根系作为本文的研究对象。

1.1.2 土体的基本物理力学性质

试验土样取自河北省张家口市某建筑工地,按照《土工试验方法标准》^[8]进行击实试验及液塑限试验,测得土样的基本物理参数见表1。

表1 土样的基本物理参数

最大干密度	最优含水率	液限	塑限	塑性指数	土样类别
1.79g/cm ³	14.5%	29.7%	18%	11.7	粉质黏土

试验方案及步骤

1.2.1 根土复合体试样制备及试验方法

高羊茅培育及根土复合体试样制备见图1。



图1 根土复合体试样制备

试验按照《土工试验方法标准》^[8]扰动土样的制备程序在自制不锈钢培养容器中,按照85%压实度来制备试验用土。向容器内土样表面通过播撒高羊茅种子的质量来控制根土复合体试样剪切面处的根土面积比。为了控制各组试样的含水率,采用滴水法制作出不同含水率的原状土样,试样含水率分别控制为9%、11%、15%、18%。

直剪试验完成后,清查剪切面处根系,根土复合体每个环刀内的平均植物株数分别约为80株、120株、170株,为分析根系对粉质黏土抗剪特性的影响,试验结束后取得剪切面处的根系计算根土面积比,即根横截面积与土体剪切面积的比值(%)。

1.2.2 根系采集及根系拉伸试验

在电子多功能材料拉拔仪进行试验,其中弹簧测力仪测量程为0~20N,精度为0.01N。根系标距4cm。用橡胶膜包裹住根系的两端,以防止拉力机夹具对根系的损坏为消除夹具的影响,以断裂位置在1/3~1/2处为有效试验。按公式(1)对单根抗拉强度进行测定:

$$P = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: P为根系的抗拉强度(MPa);

$F_{\max}$ 为根系正常断裂时弹簧测力计的读数(N);

D为根系被拉断时断裂处的直径(mm)。

在不同的直径下,根系的抗拉强度是不同的,用公式(2)来计算高羊茅根系的平均抗拉强度:

$$T_r = \frac{\sum P_i n_i a_i}{\sum n_i a_i} \quad (2)$$

式中: n_i —第i级根系的数量;

a_i —第i级根系的平均截面面积(mm²);

P_i —第i级根系的抗拉强度(MPa)。

2 结果与分析

2.1 根系抗拉特性分析

研究植物稳固浅层边坡的关键是研究植物根系的抗拉性能,高羊茅根系直径与最大抗拉力的关系如下图2所示。由图可知,高羊茅的根系直径会显著地影响其最大抗拉力,根系直径不同时,其最大抗拉力会有较大的差异,即根系最大抗拉力随根系直径的增大而增大。尤其当根径大于0.1mm时,根系最大抗拉力值的增长明显变快,此时二者关系接近于幂函数增长,故将高羊茅根系抗拉力与根系直径利用Origin软件进行回归分析,回归结果见表2。

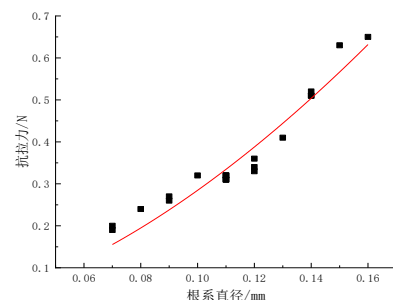


图2 高羊茅根系直径与抗拉力的关系

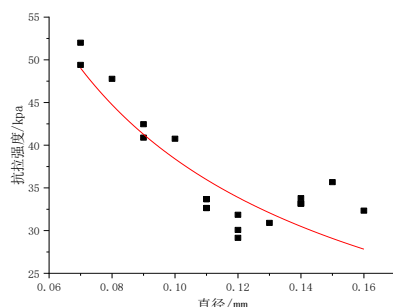


图3 高羊茅根系直径与抗拉强度的关系

表2 高羊茅根系直径与最大抗拉力的回归方程

回归方程	相关系数	有效样本个数
$F_{\max}=14.18143D^{1.69757}$	$R^2=0.93155$	21

高羊茅根系直径与最大抗拉强度的关系如下图3所示。根系拉拔强度 T 是单根最大拉拔力和根系横截面积之比。研究植物根系抗拉强度是根系固土机制的重要组成部分。由图3可知,高羊茅的根系直径范围为0.07~0.16 mm,拉拔强度为29.15~49.40 MPa,平均拉拔强度36.304 MPa;试样根系的平均拉拔强度随直径的增大而减小,平均拉拔强度与直径呈幂函数关系。高羊茅的根系直径会显著地影响其抗拉强度,根系直径不同时,其抗拉强度会有较大的差异,即根系最大抗拉力随根系直径的增大而减小。平均拉拔强度与直径呈幂函数关系。将高羊茅根系抗拉强度与根系直径利用Origin软件进行回归分析,回归结果见表3。

表3 高羊茅根系直径与最大抗拉力的回归方程

回归方程	相关系数	有效样本数	平均抗拉强度/MPa
$T=7.92633D^{-0.68526}$	$R^2=0.76383$	21	36.304

2.2 根土复合体抗剪强度

用室内常规直剪仪对根土复合体抗剪强度进行直剪试验。在法向应力相同条件下,根土面积比越大,土的抗剪强度越强。低含水率根土复合体在低法向应力剪切作用下应变软化现象更为显著,低含水率在高法向应力条件下及高含水率条件下,根土复合体试样的应力-位移曲线呈广而宽的形状,曲线呈硬化增长型的趋势,这种趋势的出现是由于根-土连接的连续性并未遭到破坏致使根系继续作用产生附加剪切阻力,或根系在剪切过程中未发生全部断裂,在土体中未发生断裂的根系仍能够继续提供附加剪切阻力,此外,根土复合体在低法向应力条件下对屈服点剪应力影响显著,和素土破坏趋势大致相同,剪应力略高于素土,表明根系的加筋作用在较小的竖向应力条件下不能充分发挥其作用,更多取决于粉质黏土自身的性质。

3 Wu模型适用性

3.1 模型建立

3.1.1 Wu模型介绍

Wu模型是Wu(1979)、GrayandLeiser(1982)早期提出的根-土力学机制理论模型。由于其参数简单、计算

简易、原理清晰等优点被广泛地运用于含根土力学参数的估计。但由于其原理假定土体发生破坏时,土体内所有根系在同一时间断裂从而过高地估计了根系对土体的加固作用。因此,基于试验对Wu模型提出一个合理的修正系数具有定的研究意义。

3.1.2 Wu模型计算参数

基于库伦原理,高羊茅根系单根提供的附加抗剪强度为:

$$c_r = t_r A_j / A_s (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi) = R_\theta t_r RAR_a = 1.2 t_r RAR_a \quad (3)$$

式中: t_r 为单根抗拉强度(kPa); A_j 为单根横截面积(m^2); A_s 为土体剪切面积(m^2); θ 为单根变形后与剪切面法向夹角($^\circ$); RAR_a 为单根的根面积比(%); R_θ 为表征根系变形角度的因子,对 θ 和 ϕ 分别在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 和 $25^\circ \sim 40^\circ$ 的区间内变化不敏感,其值为0.92~1.316。

3.2 含水率对Wu氏模型的影响

不同土体及不同植被的 θ 值不同, θ 为单根变形后与剪切面法向夹角,故 θ 值与法向压力及含水率有关。对于冀北地区高羊茅与粉质黏土的根土复合体试样,通过室内直剪试验,得出 θ 值范围在,夹角系数 k 用来反映根系与滑动面间夹角的潜在关系,表示为:

$$k = \sin \theta + \cos \theta \tan \phi \quad (4)$$

直剪试验中,高羊茅根土复合体 θ 值不仅与竖向压力有关,还与试样含水率有关, θ 值变化范围如表4。

表4 根系受剪后 θ 值变化情况

根面积比 (%)	含水率 (%)	$k = \sin \theta + \cos \theta \tan \phi$	$\phi (^\circ)$	θ 角度范围
0.03	9	$0.461 < k < 0.606$	10.38	$17.7^\circ < \theta < 27.4^\circ$
	12	$0.495 < k < 0.638$	10.31	
	15	$0.487 < k < 0.63$	10.21	
	18	$0.47 < k < 0.615$	10.09	
0.042	9	$0.486 < k < 0.691$	11.11	$18.9^\circ < \theta < 33.2^\circ$
	12	$0.514 < k < 0.716$	11.03	
	15	$0.503 < k < 0.706$	10.69	
	18	$0.492 < k < 0.697$	10.30	
0.055	9	$0.563 < k < 0.767$	11.92	$21.1^\circ < \theta < 36.3^\circ$
	12	$0.553 < k < 0.759$	11.71	
	15	$0.548 < k < 0.755$	11.49	
	18	$0.536 < k < 0.744$	11.04	

由表4可知,当根面积比为0.03%时, θ 角度的变化范围为 $17.7^\circ \sim 27.4^\circ$,当根面积比为0.042%时, θ 角度的变化范围为 $18.9^\circ \sim 33.2^\circ$,当根面积比为0.055%时, θ 角度的变化范围为 $21.1^\circ \sim 36.3^\circ$,由此可知 θ 角度的变化随根面积比的增大而增大,二者呈正相关的关系。由室内直接剪切试验可知,内摩擦角随含水率的增高而逐渐降低,夹角系数 k 不仅与剪切夹角 θ 有关,与根土复合体的黏聚力也有关,由表4可知,夹角系数 k 随含水率的

增高先增大后减小，在根面积比为 0.03%及根面积比为 0.042%时，夹角系数 k 在含水率为 12%条件下达到峰值，在根面积比为 0.055%时，夹角系数 k 在含水率为 15%条件下达到峰值。故由此可知 θ 角随根土面积比的增大而增大，夹角系数 k 的峰值点也会随含水率的增大而提高。

3.3 基于直剪试验的模型验证

通过直剪试验测试含根土的抗剪强度，同时通过根系拉拔试验及根土复合体室内剪切试验获取模型计算参数，将测试结果与估算模型及 Wu 模型的计算结果进行对比，从而验证模型的合理性及先进性。

依据 Wu 氏模型，本文预测模型依据：

$$C_r = k'' k \sum_{j=1}^n T_{rj} \frac{A_{rj}}{A} \quad (5)$$

式中： k'' 为基于直剪试验的 Wu 氏模型修正系数，为根土复合体直剪试验中强度增强实测值与 Wu 模型预测值的比值。估算模型计算参数如表 5 所示。

将表 5 中的计算参数代入本文建立的估算模型及 Wu 模型中计算根土复合体的抗剪强度，两种计算模型的不同体现在根系提供的土体附加强度不同，即根土复合体含与素土的抗剪强度差值不同，因此，得到模型计算的根土复合体抗剪强度参数及根土复合体直剪试验实测强度参数，将根系提供的土体附加强度实测值与估算模型计算值区间及 Wu 模型计算值进行对比，结果如表 5 所示，得出基于直剪试验的 Wu 氏模型修正系数在 0.151~0.431 范围内，且修正系数随含水率的增大先减小后增大。

表 5 模型计算参数

根面积比 (%)	含水率 (%)	内摩擦角 (°)	黏聚力 (kPa)	直剪增量 (kPa)	k 取值	预测增量 (kPa)	修正系数
0.03	9	10.38	15.20	1.6	0.53	6.4	0.25
	12	10.31	9.55	1.04	0.57	6.9	0.151
	15	10.21	6.29	1.75	0.56	6.8	0.257
	18	10.09	3.65	1.84	0.54	6.5	0.283
0.042	9	11.11	17.73	4.31	0.59	10.0	0.431
	12	11.03	10.59	2.63	0.62	10.5	0.25
	15	10.69	6.54	3.05	0.61	10.3	0.296
	18	10.30	4.25	2.69	0.60	10.1	0.266
0.055	9	11.92	20.28	5.41	0.67	14.8	0.366
	12	11.71	13.51	3.64	0.66	14.6	0.249
	15	11.49	8.17	4.05	0.65	14.4	0.281
	18	11.04	4.82	3.64	0.64	14.2	0.256

4 结论

(1)试样根系的平均拉拔强度随直径的增大而减小，平均拉拔强度与直径呈幂函数关系。根系最大抗拉力随根

系直径的增大而减小。平均拉拔强度与直径呈幂函数关系，平均抗拉强度为 36.304kpa；(2)在法向应力相同条件下，根土面积比越大，土的抗剪强度越强。根土复合体在低法向应力条件下对屈服点剪应力影响显著，和素土破坏趋势大致相同，剪应力略高于素土；(3) θ 角度的变化随根面积比的增大而增大，二者呈正相关的关系；(4)夹角系数 k 不仅与剪切夹角 θ 有关，与根土复合体的黏聚力也有关，夹角系数 k 随含水率的增高先增大后减小，其峰值点也会随含水率的增大而提高。

基金项目：河北省高等学校科学技术研究重点项目，微型桩-植被协同护坡的边坡模型计算研究(ZD20220126)，2022 年河北省建设科技研究指导性计划项目，寒冷地区城市公路坡面防护设施全生命周期实施模式及效能评估研究(2022-2106)。

【参考文献】

- [1]吴美苏,周成,王林,等.根系和裂隙对土体水力和力学特性影响数值模拟[J].岩土力学,2019,40(1):519-526.
 - [2]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.
 - [3]孔纲强,文磊,刘汉龙,等.植物根系分布形态及含根复合土强度特性试验[J].岩土力学,2019,40(10):3717-3723.
 - [4]李本锋,朱海丽,谢彬山,等.黄河源区河岸带高寒草甸植物根-土复合体抗拉特性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(2):424-432.
 - [5]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.
 - [6]WALDRON LJ,DAKESSIAN. Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance[J]. Soil Science Society of America Journal,1982,46(5):894-899.
 - [7]文伟,李光范,胡伟,等.草本植物根系对土体的加筋作用模型修正[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):4211-4217.
 - [8]杨雨薇,刘大林,王琳.高羊茅对高温胁迫应答机制的研究进展[J].草学,2022,264(1):15-22.
 - [9]韩润峰.张家口市水文气象预警技术的运用和发展[J].河海大学.2018(第六届)中国水利信息化技术论坛论文集.[出版者不详],2018(2):6.
 - [10]GB/T50123-2019,土工试验方法标准[S].
- 作者简介：阮梦柯(1992-),女,河南开封人,硕士,助教,主要研究方向为生态护坡;通信作者:阮梦柯(1992-),女,河南开封人,硕士,助教,主要研究方向为生态护坡。