

冀北地区高羊茅根-土复合体抗剪特性研究

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] 为了研究不同根土面积比及不同含水率对粉质黏土抗剪强度的影响, 本研究通过种植高羊茅并控制剪切面处不同根土面积比, 对加固粉质黏土抗剪强度进行室内直剪试验, 结合试验结果进行机理分析。试验结果表明: 土的抗剪强度及粘聚力随根土面积比的增大而增大。一方面是根系自身存在一定强度, 另一方面是因为根系与土颗粒间存在界面摩擦; 土的抗剪强度及粘聚力随含水率的增大而降低。其中一方面是由于水分起到润滑作用, 降低根系与土颗粒之间的界面摩擦力, 另一方面是因为基质吸力随含水率的增加而减小, 表观粘聚力也随之减小, 土的抗剪强度和粘聚力也相应减小。本研究为确定最优含水率及高羊茅最优种植密度提供了理论支撑, 为稳固浅层滑坡问题提供了解决方案。

[关键词] 根土复合体; 直剪试验; 含水率; 应力-位移曲线

DOI: 10.33142/aem.v5i2.7901

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

Study on Shear Properties of Tall Fescue Root-soil Complex in Northern Hebei

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 study the effect of different root-soil area ratio and different water content on the shear strength of silty clay, this study conducted a direct shear test on the shear strength of reinforced silty clay by planting tall fescue and controlling different root-soil area ratio at the shear plane, and carried out a mechanism analysis based on the test results. The test results show that the shear strength and cohesion of soil increase with the increase of root-soil area ratio. On the one hand, the root itself has certain strength, on the other hand, there is interface friction between the root and soil particles; The shear strength and cohesion of soil decrease with the increase of water content. On the one hand, water plays a role in lubrication, reducing the interfacial friction between roots and soil particles; on the other hand, because the matrix suction decreases with the increase of water content, the apparent cohesion also decreases, and the shear strength and cohesion of soil also decrease accordingly. This study provides theoretical support for determining the optimal moisture content and the optimal planting density of tall fescue, and provides a solution for stabilizing the shallow landslide.

Keywords: root-soil complex; direct shear test; water content; stress-strain curve

引言

我国地大物博, 经济发展迅速, 工程建设范围逐年扩大, 资源过量开发和工程建设导致产生了大量裸露边坡, 加剧了土地荒漠化和水土流失, 增加了崩塌、泥石流及山体滑坡等地质灾害的概率, 植物根系可以改善边坡土壤结构, 增强根土壤的抗蚀性、抗冲性和抗剪切性, 提高边坡的稳定性。植物根系对边坡表层土壤加固作用已成为当前生态环境领域研究的热点。

目前, 国内外学者探索植物根系对土体加固主要集中在根系的力学效应方面。研究表明植物根系可使坡面表层土抗剪强度显著提高, 根系主要通过增强土壤的黏聚力来

提高土壤的抗剪强度。程洪等^[1]为研究植物根系与土壤颗粒黏聚情况与抗剪强度的关系, 选择高羊茅植物盆栽于3种不同土壤基质进行对比。付涛等^[2]为探究不同加筋材料对生态护坡的加固作用机理, 用室内直剪试验方法研究探讨了土工垫与植物根系在不同加筋情况下抗剪强度指标的变化规律。何鑫南等^[3]为研究根系固土护坡的力学机理, 对高羊茅、白三叶、五节芒和荆棘进行根土复合体抗剪强度测定, 证明了植被固土护坡的可行性。Vannoppen等^[4]用根长度密度(RLD)、根重量密度(RWD)来评价根系对土体的抗侵蚀性。但研究发现根重量密度(RWD)影响根系的固持力大小^[5], 根系重量密度与土壤抗剪强度密切相关^[6]。

综上所述,目前学者的研究表明,根系可以通过根系排列、土壤粒径、根土间摩擦等提高土的抗剪强度,但不同根面积比对土体的抗剪切强度有不同的影响,本研究通过改变含水率及根土面积比,研究其对土体抗剪强度及其参数的影响,以期对日后稳固浅层边坡具有理论和现实意义。

1 试验材料与试验方案

1.1 土体的基本物理性质

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》(GB/T 50123-2019)^[7]进行击实试验及液塑限试验,测得粉质黏土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

1.2 试验方法与试验方案

选取高羊茅根系作为研究对象,试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[7]扰动土样的制备程序在自制不锈钢培养容器中(.24m×0.24m×0.24m)来制备试验用土,且培养容器内土体压实度均控制为85%,向容器内土样表面均匀的播撒适量高羊茅种子,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,种子表面盖上约0.5~1cm厚覆土,试样制备具体情况见表2。

表2 试样制备

W(%)	9	12	15	18	9	12	15	18	9	12	15	18	15
编号	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
种子质量	1.8g				3g				4g				
Ar	0.024%				0.042%				0.055%				
压实度	85%												

本文试样生长2个月,为研究根系及含水量对土样抗剪强度特性的影响,将试样含水量控制为9%、12%、15%、18%,依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[7]制作试样,为避免与外界物质交换,将制作完成的试样用保鲜膜包裹。之后进行室内常规直剪试验,直接剪切试验在ZJ型应变控制式直剪仪上进行。

2 试验结果与分析

素土及根面积比为0.055%不同含水量、不同根土面积比的试样在不同法向应力条件下的应力应变曲线如图2~3所示。

2.1 含水率对粉质黏土抗剪强度的影响

由图2~3可以看出,在相同含水量条件下,根土复合体的抗剪强度高于素土,在相同根面积比条件下,抗剪强度随含水量的增加而降低,二者之间呈负相关;土的抗剪强度随含水量的增加而降低,在相同剪切位移条件下,土的剪应力随含水量的增大而减小,含水量增加会降低根

系与土之间的界面剪切强度,原因有二,其一是水分起到了润滑作用,削减了土颗粒与根系之间的连接力,降低了土颗粒与根系之间的摩擦阻力,另一方面是由负孔隙水压力所引起的土体表观摩擦力和基质吸力由于土体的含水率增加而发生改变。

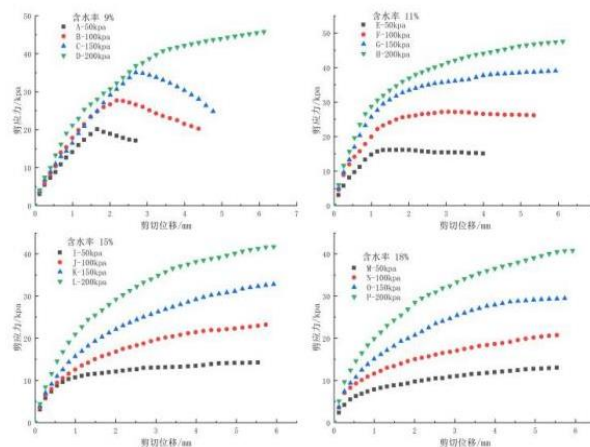


图2 素土试样应力-位移曲线

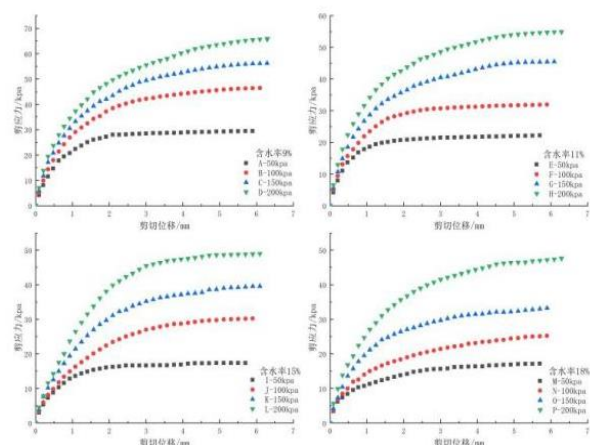


图3 A_{r3}为0.055%试样应力-位移曲线

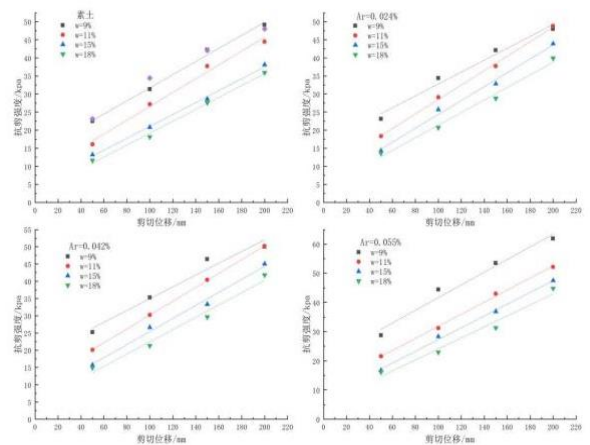


图4 相同含根量下不同含水率抗剪强度线

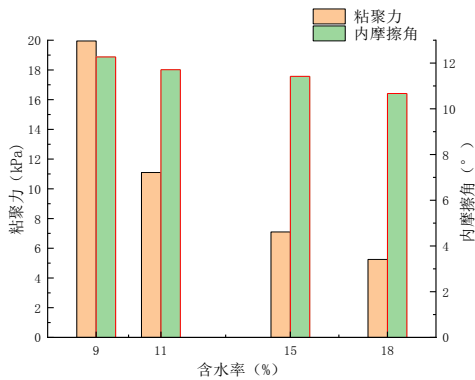


图5 Ar₃不同含水率试样抗剪强度参数

将四组根土复合试样在不同含水量下的抗剪强度进行拟合, 绘制出的抗剪强度线如图4所示。由图可知, 根土复合体的抗剪强度拟合线随含水率的增加而不断下移, 在纵坐标的截距呈不断减小的趋势, 斜率变化不大, 这表明含水率增加对粘聚力影响较大, 对内摩擦角影响不大。

以根土复合体 Ar₃=0.055%为例, 在不同含水率条件下的粘聚力和内摩擦角变化情况如图5所示。由图可知, 根土复合体和素土的粘聚力都随含水率的增大而减小, 原因是含水率增加导致基质吸力减小, 含水率较低时, 基质吸力相对较高, 负孔隙水压力增大, 导致土颗粒间的粘聚力较高, 故土体的抗剪强度也较高。基质吸力随含水量的增加而减小, 土颗粒之间的负孔隙水压力也随之减小, 直至土体饱和时负孔隙水压力消失, 由此产生的结合力也消散, 降低了土体的粘聚力。由于含水量变化, 其内摩擦角在 1°~2° 范围波动, 含水量对内摩擦角的影响效果并不明显。从图5可以看出, 在相同含水量下, 根土复合体的粘聚力高于素土, 含水量越大, 由根系所引起的附加粘聚力随之减小, 这是由于土体内增加了根系, 一方面根系本身存在一定强度, 另一方面根系与土体之间还存在一定的界面摩擦力, 并且由于水含量的增加, 水分起到润滑作用, 根系与土的界面摩擦力减小, 故含水率越低, 由根系引起的附加粘聚力越大, 含水率越高, 根系引起的附加粘聚力越小。

2.2 根土面积比对粉质黏土抗剪强度及其参数的影响

以含水率为9%为例, 在200kpa的竖向压力下, 素土的抗剪强度为47.67kpa, 根面积比为0.024%、0.042%、0.055%的根土复合体抗剪强度依次为52.86kpa、59.27kpa、63.45kpa, 增长幅度分别为10.89%、24.33%、33.1%, 说明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, 原因是由于根土复合体中根系为土体提供了附加剪切阻力, 剪切面处根土面积比越大, 说明剪切面处的根系分布越密集, 当土体受到剪切破坏后, 由于土体中高羊茅根系具有线弹性。剪切过程中, 土体内受剪根系会在一定范围内拉伸, 发生弹性变形。根部的拉应力将通过土和根系之间的界面摩擦转化为

土体的附加抗剪力, 在含根量较低时, 根土复合体抗剪强度增长幅度最小, 原因由于沿剪切面处根土面积比较小, 受剪的主体仍为粉质黏土。

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, 曲线呈现硬化增长型的趋势, 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。

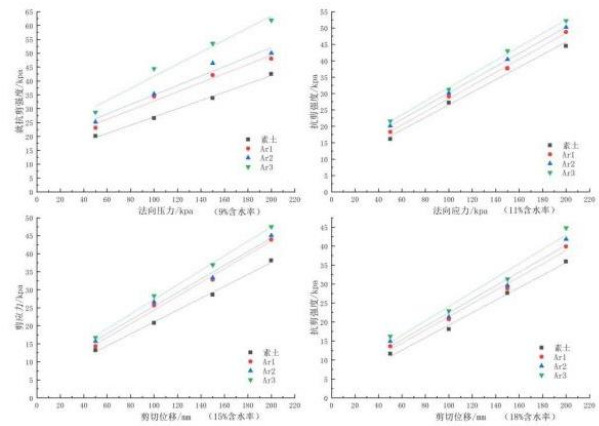


图6 不同根面积比试样抗剪强度线

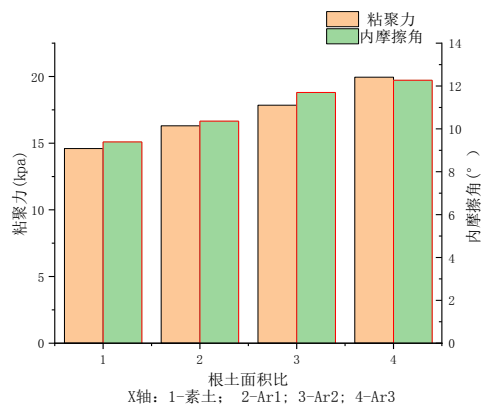


图7 不同含根量试样抗剪强度参数

不同根土复合体试样及素土试样在不同含水率条件下拟合得到的抗剪强度线如图6所示, 根土复合体的抗剪强度拟合线随着根面积比的增大而上移, 纵坐标上的截距也增大, 斜率变化并不明显, 这表明粘聚力随根土面积比的增大而增大, 但根土面积比对内摩擦角的影响较小。

不同根土复合体试样及素土试样在不同含水率条件下粘聚力和内摩擦角如图7所示。从图中可以看出, 根面

积比增量与其引起粘聚力增量呈线性关系。当根面积相对较低时,根-土复合体的粘聚力最接近素土,根面积比越高,黏聚力越大,因为根系能影响土壤周围的区域较小,距离根系较远的土体剪切强度在剪切过程中并没有受到较大影响,而剪切面处根面积比较少,根系未能为土体提供更有效的加筋作用,受剪主体仍为粉质黏土,随着根面积比增加,根系与土颗粒间接触面积增大,增加了土体与根系间在剪切过程中的附加剪切阻力,故剪切面处根土面积比越大,试样的粘聚力越大。内摩擦角随着根系的增加而增大,增大程度并不明显,增大范围为 $1 \sim 3^\circ$,说明根系对内摩擦角的影响不大。

3 结论

本研究通过对粉质黏土的不同根土面积比和素土试样在不同含水率下进行室内直剪试验,研究了抗剪强度与不同含水量的关系以及抗剪强度与不同根土面积比的关系。主要结论如下:

土的含水量会影响土的抗剪强度及黏聚力,土的抗剪强度及粘聚力会随着含水量的增加而减小。其中一方面是由于水分的增加,起到润滑作用,降低根系与土颗粒之间的界面摩擦,降低了土的抗剪强度和粘聚力,另一方面是因为基质吸力随含水率的增加而减小,表观粘聚力也随之减小,故土的抗剪强度和粘聚力也相应减小。

土体的不同根土面积比会影响土体的抗剪强度及粘聚力,土的抗剪强度及粘聚力随根土面积比的增大而增大。一方面,根系本身具有一定强度,增加了根土复合体的抗剪强度及黏聚力。另一方面,由于根系与土壤颗粒之间存在界面摩擦,根系对土壤颗粒界面摩擦的影响相对较小,故土的抗剪强度及黏聚力也会随着根面积比的增大而增大。

当根面积比或含水量一定时,随着土体法向压力的增

加,抗剪强度线与之几乎平行,但截距区别较明显,这表明在一定条件下,根土面积比或含水率的改变对土体内摩擦角变化不大,对土体抗剪强度及粘聚力的影响较为明显。

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]程洪,赵建民,蔡高堂,等.高羊茅根系增强土壤粘聚力的试验研究[J].南昌工程学院学报,2018,37(1):1-8.
- [2]付涛,谭慧明,何良德.土工垫-植物根系加筋土抗剪强度试验研究[J].河南科学,2021,39(9):1424-1430.
- [3]何鑫南,董晨霄,耿嫣然,等.常见护坡植物的根土复合体力学特性分析[J].山西建筑,2021,47(8):68-70.
- [4]Jin Huifang, Shi Dongmei, Zeng Xiaoying, et al. Mechanisms of root-soil reinforcement in bio-embankments of sloping farmland in the purple hilly area China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(10): 2285-2298.
- [5]栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):403-412.
- [6]邢会文,刘静,王林和,等.柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J].摩擦学学报,2010,30(1):87-91.
- [7]GB/T 50123-2019, 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。