

冻融时间和含水率对紫穗槐加筋黄土抗剪强度的影响

陈智锋¹, 李辉², 蒋宁山², 刘成奎^{3,4}

(1.青海大学 土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2.青海大学 土木工程学院, 青海 西宁 810016; 3.青海省建筑材料科学研究院有限责任公司, 青海 西宁 810016; 4.青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: [目的] 研究紫穗槐根系在不同含水率和不同融化时间对土体加固作用, 为季冻区紫穗槐固土效应提供设计依据。[方法] 以取自西宁市黄土为研究对象, 用室内三轴试验方法研究紫穗槐根系—土复合体的应力应变及强度特性, 探讨在不同解冻时间和不同含水率下紫穗槐根系—土复合体抗剪强度指标变化规律, 并通过 SEM 电镜扫描试验从微观的角度评价紫穗槐根系的加固机理。[结果] 紫穗槐根系在不同含水率时有不同的加筋情况, 在低含水率和高含水率加筋作用更加明显; 在冻融前后紫穗槐根系的加筋作用体现在当土体受到荷载作用时, 紫穗槐根系会束缚土颗粒之间的移动, 增大土颗粒之间的咬合以及增大根系和土颗粒之间的接触面, 从而增大内摩擦角; 通过电镜扫描试验可以看出, 紫穗槐根系可以抑制土体中的裂隙产生与发展, 从而增大土体的整体性。[结论] 紫穗槐根系在不同地区均能起到加筋作用。不同含水率会存在不同的最佳含根量, 紫穗槐根系的固土作用体现在增大土体的内摩擦角, 增加土体的整体性。

关键词: 根—土复合体; 微观结构; 抗剪强度; 冻融过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0043-07

中图分类号: TU375.4

文献参数: 陈智锋, 李辉, 蒋宁山, 等. 冻融时间和含水率对紫穗槐加筋黄土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 43-49. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230423.001; Chen Zhifeng, Li Hui, Jiang Ningshan, et al. Effects of freeze-thaw time and moisture content on shear strength of loess reinforced with *Sophora japonica* roots [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 43-49.

Effects of Freeze-thaw Time and Moisture Content on Shear Strength of Loess Reinforced with *Sophora Japonica* Roots

Chen Zhifeng¹, Li Hui², Jiang Ningshan², Liu Chengkui^{3,4}

(1.School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2.School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 3.Qinghai

Building Construction Materials Research Institute Limited Liability Company, Xining, Qinghai 810016, China;

4.Key Laboratory of Plateau Green Building and Ecological Community in Qinghai Province, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] The reinforcing effects of *Sophora japonica* roots on soil at different water contents and different thawing times were studied in order to provide a design basis for the soil consolidation effect of *Sophora japonica* in the monsoon freeze zone. [Methods] The stress-strain and strength characteristics of the root-soil composite of the *Sophora japonica* root system were determined using the indoor triaxial test method. The shear strength index of the *Sophora japonica* root-soil composite was determined under different thawing times and different moisture contents. [Results] The reinforcing effect of the *Sophora japonica* root system at different water contents was most obvious at low and high water contents. The reinforcing effect of the *Sophora japonica* root system before and after freezing and thawing was reflected in the fact that the *Sophora japonica* root system bound the movement between soil particles when the soil received a load, increased the occlusion between soil particles, and increased the contact surface between the roots and soil particles, thus increasing the angle of internal friction. The electron microscope scanning test

收稿日期: 2022-06-25

修回日期: 2022-09-05

资助项目: 青海省科技厅项目“高寒黄土边坡融水降水致灾机理及混种植被协同护坡研究”(2020-ZJ-718); 青海省科技厅项目“废弃混凝土再生微粉泡沫混凝土抗冻性能研究”(KLF-2020-007)

第一作者: 陈智锋(1997—), 男(汉族), 广东省广州市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程防灾减灾。Email: 894998219@qq.com。

通讯作者: 李辉(1973—), 男(汉族), 河南省驻马店市人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程防灾减灾工作。Email: 365329508@qq.com。

showed that the *Sophora japonica* root system inhibited the generation and development of cracks in the soil, thus increasing the integrity of the soil. [Conclusion] The *Sophora japonica* root system can result in a reinforcing effect in all areas. There are different optimal root contents for different water contents. The solidification effect of the *Sophora japonica* root system is reflected by the increase in internal friction angle of the soil body, increasing the structural integrity of the soil.

Keywords: root-soil composite; microstructure; shear strength; freeze-thaw process

黄土是一种独特的大孔隙土体,广泛分布于我国季节性冻土分布区域内^[1]。而在全球变暖的背景下,西宁市的平均气温自 1961 年开始呈现出升温的变化情况^[2],意味着对于西宁黄土冻土区出现冻土退化,从而形成土体的开裂以及剥蚀现象发生对生态环境造成一定的影响^[3-4]。而灌木根系作为一种经济又环保的防治措施,既能固结土壤在土体起到加筋作用,又能在土体表面处有效的防止水土流失等地质灾害的发生,同时起到美化环境绿化生态等重要作用,在建设和保护生态环境中起到不可或缺的作用。目前,国内外学者已经开展了大量植被应用于植物护坡技术的研究,李珍玉^[5]、徐华^[6]、王元战^[7]、Yuan^[8]和 Schwarz^[9]等从根系在土壤中的空间造型、分布、层次结构、根系方向和含根量上研究固土能力;胡夏嵩^[10]、余芹芹^[11]和曹磊^[12]等研究了寒旱地区特有的草本和灌木类型根系对土体的加固作用,得出不同的植物根系有着不同的加固能力,混种植被的固土能力比单一植被的固土能力要强;路建国^[13]和晏长根^[14]研究了土体中含冰量的情况对土体强度影响,发现初始含水率会影响冻结时土体的含冰量,从而使土体的强度发生改变;刘亚斌^[15]运用 SEM 扫描电镜试验从微观的角度分析出加筋材料的表面粗糙程度可以增大土体之间的摩擦特性,同时可以增大土颗粒之间拉结作用;王恒星^[16]和李云鹏^[17]研究了根系在冻融环境下的加筋情况,研究得出根系均能加固土体强度起到抵抗冻融的作用。综上所述,国内外学则对于常温下根—土复合体的抗剪强度已经有了一定的研究,但对于冻融作用下的根—土复合体的抗剪强度研究尚不够深入,大部分集中于冻融循环次数对于根—土复合体强度的影响规律^[16],但对于融化时土体温度升高,植物根系在孔隙冰和水相体变化中所起到的加筋作用研究少且不明确。同时由于外部环境的补水或者出现的水分迁移现象而导致的含水率不同^[18],从而影响土体的抗剪强度^[19],因此有必要对不同含水率下素土和根—土复合体在不同解冻时间下的强度变化进行研究。本文通过采用扫描电镜观察的方法分析根系抵抗冻融的能力,从微观孔隙的角度解释灌木根系在冻融状态下的对土体宏观力学性质影响的机理。将不同解冻时间和含水率下根—土复合体的抗剪强度指

标与素土抗剪强度指标进行对比,从机理上分析根—土复合体在融化作用下抗剪强度指标的变化规律。研究成果对于春季升温回暖,具有季节性冻融性黄土地区的植被防灾减灾机理分析具有重要意义。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

本试验所用土采样地位于西宁市城北区某一施工现场,土质类型为黄土。根据西宁市春季昼夜温差大,气候干旱等特点,本文选用的植物为灌木植物紫穗槐作为植被对象,紫穗槐根状茎粗壮,生于荒地、路旁、山坡草地。紫穗槐根系发达,入土深度可达 1 m 以上,须根稠密而发达,呈伞状分布,这不仅是它极强的抗性和适应性的有力保证,也使其具有很强的固土保水能力,是防风固沙、保持水土的优良植被。喜欢干冷气候,能在降水量 200 mm 左右地区生长,对土壤要求不严,对西宁地区昼夜温差大,气候干旱适应能力强。根系的挖取,选择两年生紫穗槐,此时紫穗槐根系茂密发达,有很好的加固土体的效果。

1.2 样品制备

课题组分别于 2022 年 3 月中下旬前往研究区采集试验所需样品,此时为春季冻融频繁季节,昼夜温差大。为了保证室内根—土复合体三轴试样接近试验区实际情况,本试验对试验区种植的紫穗槐根系含量进行原位测定。根据紫穗槐生长情况采用大环刀(体积为 500 cm³)制取紫穗槐根系原状土试样共取 5 个。清除表面多余植被,利用电子秤将范围内的土体和紫穗槐根系分别称量质量,测得其根—土复合体的密度 1.48 g/cm³。同时采用清水将多余的土体清洗干净,将紫穗槐根系洗净备用,然后将洗净过后的紫穗槐根系放在托盘自然风干 1 h,等待根系表面水分蒸发完毕后,采用螺旋测微器测量主根和须根根系直径,统计其自然生长条件下根系基本特征结果详见表 1。

表 1 紫穗槐根系基本特征统计结果

Table 1 Statistical results of basic characteristics of root system of purple locust

类型	根径范围/mm	平均根径/mm	根系密度/%
主根根系	1.28~2.39	1.63±0.1	0.11
须根根系	0.36~1.16	0.78±0.08	0.036

在试样制作的过程中控制紫穗槐根系的根系直径、长度和根系质量等因素对加筋强度产生影响,对种植区紫穗槐根系进行基本特征统计。即统一选择主根根系长度为 30 mm,主根直径为 1.5~1.8 mm,须根根系直径为 0.7~0.9 mm。对取回的土样放置 105 °C 温度条件下烘箱烘干 24 h,然后过孔径为 2 mm 的标准土壤筛,同时选用一部分素土根据《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》测得所取土样的基本物性指标详见表 2。为确保室内制作三轴试样的试验结果与实际情况相符,因此在制样过程中保持土体密度与紫穗槐种植区保持一致。从覃绮平^[20]研究表明,路基含水率范围一般为 8%~20%,因此在试样制备过程中,以 3% 的间隔设置,用喷壶将蒸馏水均匀喷洒素土且充分搅拌均匀,使得素土的含水率为 10%,13%,16% 和 19%,用保鲜膜密封浸润一夜后备用。将须根和土体均匀混合,为拌和均匀,用三轴静压仪器分 3 层压实,接触面用小刀刮毛;在第 2 层时放入须根混合土,同时垂直布置主根,再使用静压器压实;然后再在其上放入最后一层须根混合土,重复以上步骤。同时制作相同含水率的素土试样用作对比试验。

表 2 试验用土基本物性指标

Table 2 Basic physical properties of the test soil

参数	量值	参数	量值
土类	黄土	相对质量密度 G	2.70
最大干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.74	最优含水率 $\omega / \%$	15.4
液限 $\omega_L / \%$	28	塑限 $\omega_P / \%$	15
塑性指数 I_p	13	天然含水率 $\omega / \%$	12.4

1.3 试验方案

为防止冻融循环过程中水分蒸发从而影响含水率发生变化,将制备的三轴试样都用保鲜膜包裹再放入塑料袋中密封,然后将三轴试样放入可控温度的冻融箱,一个密封袋视为一个封闭的循环系统。因为青海西宁的春季回暖平均气温在 $-15 \sim 15$ °C,基于此情况,本次试验设计冻结温度为 -15 °C,使试样恒温度冻结 12 h;然后再设置融化温度为 15 °C,使试样在该温度下恒温融化 0,4,8 和 12 h,其中融化 0 h 即为完全冻结试样。选取未冻融试样和经历不同融化时间(0,4,8 和 12 h)试样装入压力室中,控制围压为 50,100,150 和 200 kPa,进行常规三轴不固结不排水剪切试验。本次试验在青海大学 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪上进行,剪切速率为 0.08 mm/min,以轴向应变的 16% 为终止试验标准,

校核所得应力—应变曲线。对比不同融化时间、不同含水率下根土复合体和素土的应力应变曲线的变化,分析根系在不同融化时间情况下的加固能力。

2 试验结果与分析

2.1 不同融化时间下应力—应变特征变化规律

通过对素土试样跟根土复合体试样进行不同融化时间的冻融试验后,利用三轴剪切试验仪进行了三轴剪切试验,得到了不同融化时间的素土和根土复合体试样的应力应变曲线,为节省篇幅,在此只列出 $p=100$ kPa 和 $p=200$ kPa 时和融化时间为 0,4 和 8 h 的应力应变曲线(图 1—2)。从图 1—2 可以看出,在经历不同融化时间后,在 100 kPa 围压下剪切的素土和根—土复合体,其应力应变关系曲线类型在低含水率的情况下呈现为应变软化型以及应变稳定型,随着含水率的升高而呈现应变稳定型和应变硬化型,同时剪切强度会随着含水率的增加而降低,这是因为随着含水率的增加,土体中的黏聚力和内摩擦角均下降^[19-21]。而在 200 kPa 围压下的素土和根—土复合体,其应力应变曲线类型均为应变硬化型,可以看出应力应变曲线的类型跟围压相关,会随着围压的增大曲线的类型呈现出应力硬化型和应力稳定型,围压越高可以增大土体的应变硬化程度这一点和马巍^[22]研究的具有相似规律。通过分析图 1—2 的应力应变图像,可以看出当应变较小($<2\%$),素土和根—土复合体的应变关系曲线很接近,随着轴向应变的逐渐增大,素土和根—土复合体的应力—应变关系曲线的距离才逐渐加大最终趋向于一定值,说明紫穗槐根系在轴向应变较大的时才比较明显。当应变达到一定值后,在大应变条件下,根—土复合体的主应力差值比素土的主应力差值有显著提高,反映了根—土复合体的强度和抵抗变形的能力有所增强。对于不同的含水率和围压均可以看出,根土复合体的抗剪强度相对素土的增幅,会随着含水率的升高而呈现出先降低后升高的现象。以 100 kPa 围压下 10%,13% 和 19% 含水率为例,在不同融化时间下 10% 含水率的根土复合体抗剪强度相对于素土分别增长 15.1%,17.33%,17.89%。而对于 13% 含水率的根土复合体抗剪强度相对于素土增长率仅为 5.78%,5.86%,7.02%。而到了 19% 含水率根—土复合体的抗剪强度相对于素土增长率为 11.0%,8.35%,9.70%。这说明对于不同含水率来说存在不同的最佳含根量,本文所选的含根量在低含水率和高含水率的情况发挥加筋作用更加明显。

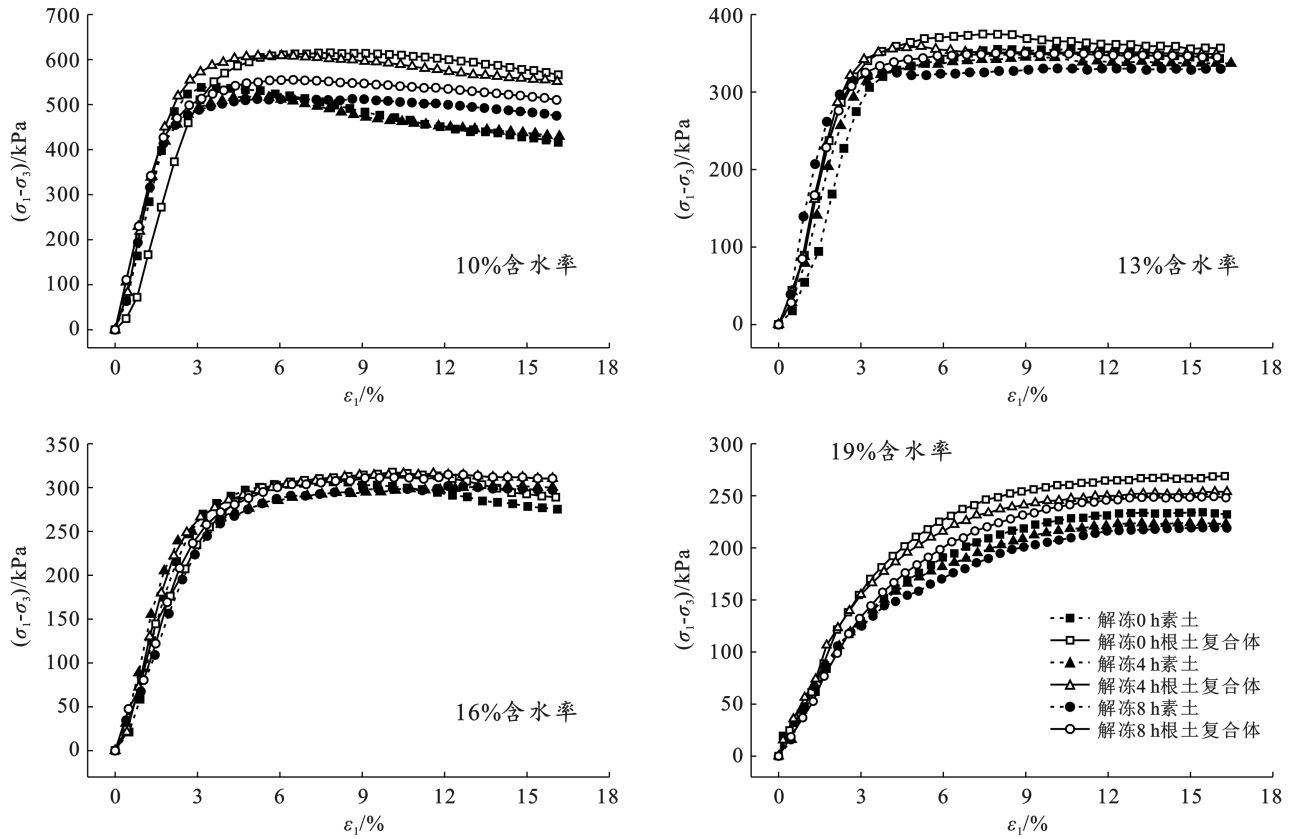


图 1 100 kPa 围压下不同含水率和不同融化时间下的应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves for different water content and different melting time under 100 kPa perimeter pressure

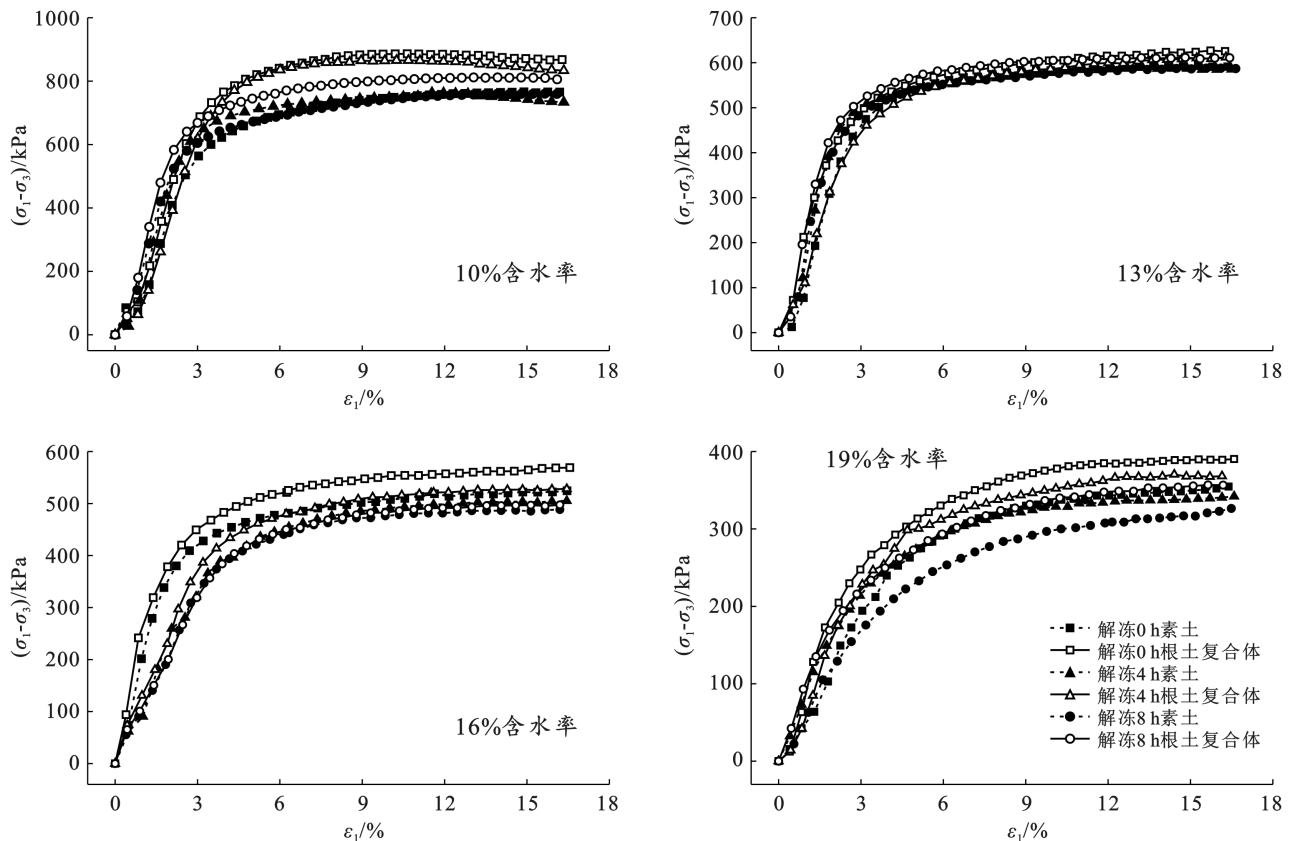


图 2 200 kPa 围压下不同含水率和不同融化时间下的应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves at different water content and melting time under 200 kPa perimeter pressure

2.2 不同融化时间下对黄土抗剪强度的影响

土的抗剪强度是土的重要力学性质之一,工程设计中常用的抗剪强度参数为土体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,这两个参数跟土体的结构密切相关,特别是在首次冻融时,土体间的颗粒会因为水颗粒的转化成冰颗粒产生冻胀现象,同时在融化时由冰颗粒到水颗粒的转化而产生融沉现象,这两种现象会对土体孔隙特征发生了明显的变化,破坏土颗粒原有的胶结力,从而影响土骨架以及土颗粒之间的接触点发生变化。对于同一组试样,通过绘制不同围压下摩尔应力圆破坏应力圆的包线可得抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着含水率的增加,黏聚力和内摩擦角均下降,这一规律跟何平^[21]研究相似。通过对比素土和根—土复合体的曲线可以看出,根系对于黏聚力的影响并不大,而对于内摩擦角的影响则更大。同时随着解冻时间的增加,黏聚力会显著下降,下降幅度为 46%~58%,而内摩擦角则缓慢上升,上升幅度为 11.4%~20.1%。由图 3 所示,随着解冻时间的增加素土和根—土复合体黏聚力会随着解冻时间的增加,而逐渐减少,在完全解冻时跟黏聚力会比未经过冻融循环的试样要低。这是

因为冻结黏聚力由 3 个部分构成^[23],即初始黏聚力,毛细黏聚力以及冰胶结黏聚力。当土体温度处于完全冻结时,孔隙冰具有胶结作用使得黏聚力增大,同时土中基质吸力增大,毛细黏聚作用增强而整体的黏聚力增加。随着解冻时间的增加土体中的孔隙冰量降低,冰的胶结作用越低,导致黏聚力减少。但素土和根—土复合体的黏聚力两者之间相差不大,因为紫穗槐根系在土体中对黏聚力和胶结力影响微乎其微,更多产生的影响在内摩擦角。对比图 3 解冻 12 h 和常温的图像,得出在冻融循环 1 次对各组含水率试样破坏强度的劣化效应非常显著,含水率越低劣化幅度越显著。这是因为在完全冻结时^[24],在冻结面会产生冰透镜体对周围的土颗粒和孔隙产生挤压的冻胀力。随着不断融化时,冰颗粒融化成水颗粒产生的迁移力,不断地破坏着试样。增加的液相水会将试样内部大颗粒不断分解为若干小颗粒,致使颗粒间接触点增多,同时随着水分的迁移和重分布会对孔隙内壁产生冲刷和磨蚀。紫穗槐根系在土颗粒破碎的过程中会增大和土颗粒之间的接触点,使得土颗粒和紫穗槐根系的实际接触面积变大,因此摩擦强度会变大。

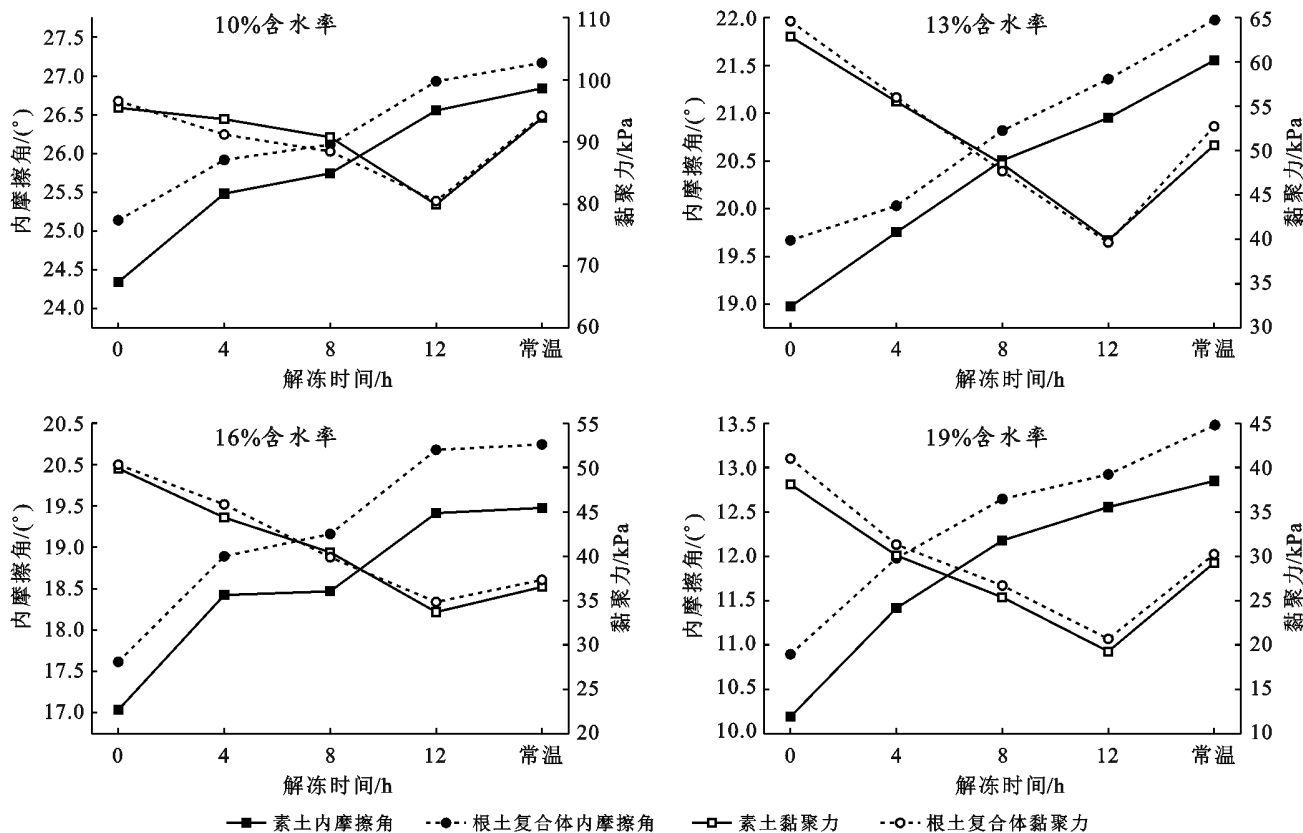


图 3 黏聚力和内摩擦角变化曲线

Fig.3 Cohesion and internal friction angle change curve

2.3 不同解冻时间下根—土复合体和素土微观分析

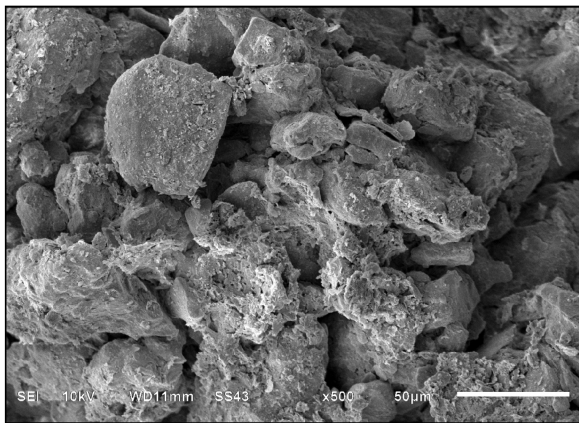
选取解冻时间为 0 h 和 8 h 的根土复合体和素土试样,采用真空冷冻干燥仪在低温真空的条件下干燥 24 h,这样可以使土块既干燥又保持原有形态结构,同时避免因为冰融化破坏孔隙特征。进行 500 倍扫描电镜试验(图 4)。

从图 4a 观察分析土体在解冻 0 h 时处于完全冻结状态可知,素土颗粒之间架空形成较大孔隙,接触形式更多为点接触,根土的微观结构则大颗粒形成的架空孔隙较少,这是因为孔隙水在冻结的过程中会有体积膨胀的现象,破坏原有的孔隙结构从而影响土体的结构性和完整性。

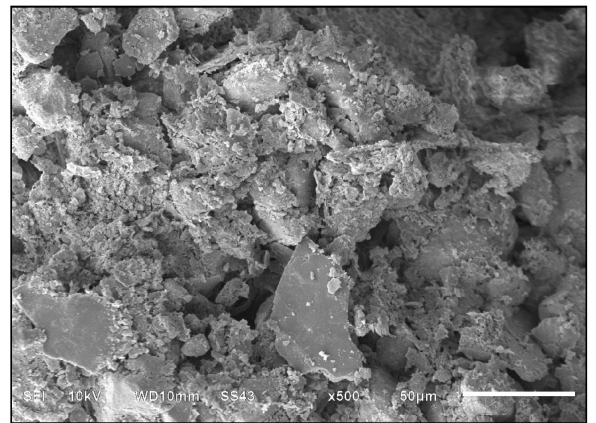
从图 4b 可以看出,而随着解冻时间的增加,冰颗粒逐渐变为水颗粒,土颗粒在其自身重力作用下使得颗粒之间变得更加密实,骨架颗粒之间的接触形式从点接触更多地变为了面接触,孔隙面积在不断减少。而对比图 4c 和图 4d 根土复合体的微观结构可以得到,

紫穗槐根系会限制颗粒的位移,使得颗粒的整体性会更好且更加密实,大孔隙比起素土会更少。根—土复合体与素土相比,在不同的融化时间下土体的整体性相对较好,其裂隙的宽度、长度以及数量明显小于素土。

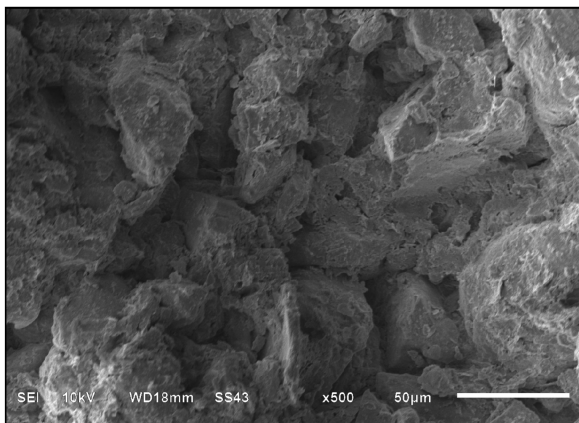
如图 5 所示,随着解冻时间的增加,土体中的孔隙冰会逐渐转化成孔隙水,土颗粒由于自身重力作用大颗粒会破坏为细碎颗粒,使得土颗粒之间的接触点增多,因此内摩擦角会随着解冻时间的增加而增大。紫穗槐根系在解冻的过程中,可以包裹土颗粒从而减少土颗粒之间的错动提高了土颗粒发生位移的阻力,当土样在荷载作用下发生破坏时,土颗粒产生相对滑动趋势时,此时土颗粒包裹住纤维,使得土颗粒之间呈现咬合的作用,增强土体的摩擦力。紫穗槐根系会受到拉力,分担一部分外部荷载,这使得外力通过根系不断传递到各个方向,能有效约束土体的位移,抑制裂隙的形成和使得内摩擦角会逐渐增大,因此根—土复合体的内摩擦角比素土要大。



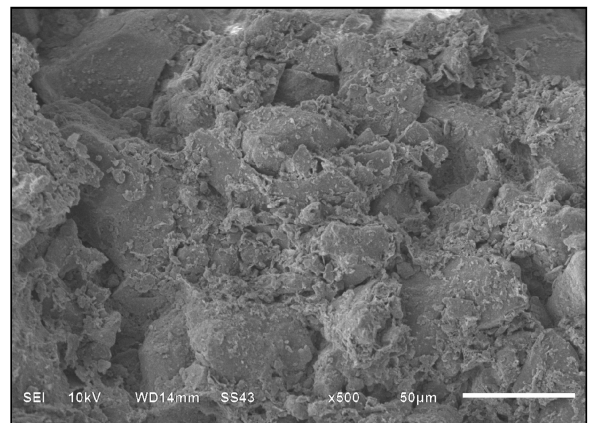
a 解冻0h素土



b 解冻8h素土



c 解冻0h根土复合体



d 解冻8h根土复合体

图 4 素土和根土复合体扫描电镜图

Fig.4 Scanning electron microscope image of vegetation soil and root soil complex

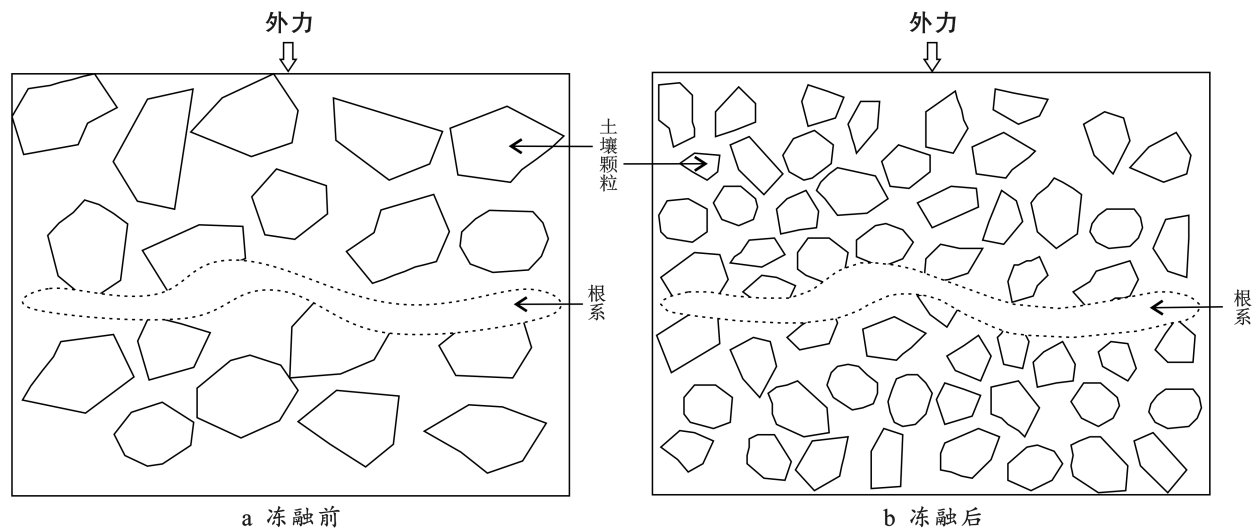


图 5 融化作用下根系作用机理示意图

Fig.5 Mechanism diagram of root system action under melting action

3 结论

(1) 在不同围压和不同含水率下均能看出根—土复合体试样的抗剪强度大于素土试样,紫穗槐根系可以起到抵抗冻融的作用。对于不同含水率的根—土复合体是存在不同的最佳含根量,对于本文试验的所用的含根量,在 10% 和 19% 的含水率加筋作用会更加明显,而在 13% 和 16% 两者接近最佳含水率 15.4% 的则加筋作用不明显。

(2) 紫穗槐根系对土体中的黏聚力影响不大,对内摩擦角影响较为明显。随着解冻时间的增加孔隙冰变为孔隙水的相体变化会影响冻结力和土体之间的孔隙,从而使土体之间内摩擦角 φ 逐渐升高,而黏聚力 c 逐渐下降。紫穗槐根系通过增大根系与土颗粒之间的摩擦,束缚土颗粒之间的错动,因此根—土复合体的内摩擦角大于素土。

(3) 扫描电镜试验可以看出,紫穗槐根系可以增强土体之间的咬合,在完全冻结时被孔隙冰的膨胀作用挤压从而束缚土颗粒之间的移动,减少土体之间的孔隙,增大土体之间的内摩擦角 φ 。同时紫穗槐根系可以在冻融的过程中可以减少土体之间的孔隙生长和发育,让土体整体性更好更加密实。

通过三轴试验以及扫描电镜试验可以看出,在季冻区春季融冰期,随着气温不断回暖,出现冰体融化出现水分迁移和重分布的现象,土体含水率升高破坏土体的强度,但种植紫穗槐植物依旧能发挥出加固土体的用处,对表层土体的滑移具有一定的抑制作用。

[参 考 文 献]

[1] 梅马巍,王大雁.中国冻土力学研究 50 年回顾与展望

[J].岩土工程学报,2012,34(4):625-640.

[2] 梅朵,高原,马艳,等.近 50 年青海西宁气温变化特征 [J].干旱气象,2013,31(1):100-106.

[3] 李艳,金会军,温智,等.多年冻土区斜坡稳定性研究综述 [J].冰川冻土,2022,44(1):203-216.

[4] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.

[5] 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.

[6] 徐华,袁海莉,王歆宇,等.根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2022,44(5):926-935.

[7] 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.

[8] Yuan-jun J, Alam M, Li-Jun S, et al. Effect of root orientation on the strength characteristics of loess in drained and undrained triaxial tests [J]. Engineering Geology, 2022, 296:106459.

[9] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4):F04035.

[10] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):613-620.

[11] 余芹芹,乔娜,卢海静,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):3216-3223.

[12] 曹磊,马海天才.不同草本植物根系力动力学及抗压力特征研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):164-170.

(下转第 59 页)

- 征及影响因素[J].宁夏农学院学报,2004,25(4):62-66.
- [8] 王志强,刘宝元,王旭艳,等.黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J].农业工程学报,2007,122(11):77-83.
- [9] 彭舜磊,梁亚红,陈昌东,等.伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测[J].水土保持研究,2013,20(4):29-33.
- [10] Wilk S A, Eló P, Paulo T S, et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration [J]. Soil & Tillage Research, 2018,175(2):84-89.
- [11] Maria I Y, Israel C S, Humberto G R, et al. Effects of land use change and seasonal variation in the hydro-physical properties in Vertisols in Northeastern Mexico [J]. Soil Use and Management, 2019,35(3):143-145.
- [12] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [13] 傅渝亮,费良军,聂卫波,等.基于 Green-Ampt 和 Philip 模型的波涌灌间歇入渗模型研究[J].农业机械学报,2016,47(9):194-201.
- [14] Abdulkadir A, Wuddivira M N, Abdu N, et al. Use of Horton infiltration model in estimating infiltration characteristics of an Alfisol in the Northern Guinea Savanna of Nigeria [J]. Journal of Agricultural Science and Technology A, 2011,1(10):47-64.
- [15] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [16] 宋爱云,董林水,刘世荣,等.不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗特征及影响因素[J].水土保持研究,2018,25(3):41-45.
- [17] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [18] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- [19] 党宏忠,周泽福,赵雨森,等.祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J].林业科学研究,2006,19(1):39-44.
- [20] 何艺玲,傅懋毅.人工林林下植被的研究现状[J].林业科学研究,2002,15(6):727-733.
- [21] 焦若禹,宋孝玉,赵新凯,等.黄土沟壑区黑麦草植被冠层与根系坡面水沙效益及水力特性[J].干旱区地理,2022,45(1):208-218.
- [22] 赵文智,刘鸽.干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):243-249.
- [23] 李民义,张建军,王春香,等.晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):125-131.
- [24] Bates J D, Svejcar T S, Miller R F. Litter decomposition in cut and uncut western juniper woodlands [J]. Journal of Arid Environments, 2007,70(2):222-236.
- [25] 席彩云,余新晓,徐娟,等北京密云山区典型林地土壤入渗特征[J].北京林业大学学报,2009,31(5):42-47.
- [26] 金建新,桂林国,尹志荣,等.宁夏典型土壤持水性能及收缩特性[J].水土保持研究,2017,24(4):279-283.

(上接第 49 页)

- [13] 路建国,张明义,张熙胤,等.冻融过程中未冻水含量及冻结温度的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1803-1812.
- [14] 晏长根,王婷,贾海梁,等.冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响[J].岩石力学与工程学报,2019,38(6):1252-1260.
- [15] 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.
- [16] 王恒星,杨林.冻融作用下草本植物根系加固土体试验研究[J].冰川冻土,2018,40(4):792-801.
- [17] 李云鹏,李劲松,张利东,等.季冻区公路边坡植物根系对冻融作用的影响[J].水土保持通报,2020,40(2):134-139.
- [18] 王铁行,罗少锋,刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):2378-2382.
- [19] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [20] 覃绮平.土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D].陕西 西安:长安大学,2005.
- [21] 何平,程国栋,杨成松,等.非饱和冻土的强度分析[J].冰川冻土,2002,24(3):260-263.
- [22] 马巍,吴紫汪,盛煜.围压对冻土强度特性的影响[J].岩土工程学报,1995,17(5):7-11.
- [23] 刘振亚,刘建坤,李旭,等.毛细黏聚与冰胶结作用对非饱和粉质黏土冻结强度及变形特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1551-1559.
- [24] 刘宽,叶万军,景宏君,等.季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):192-197.