

# 藁草根系纤维土渗透和崩解性能试验

王凤池<sup>1</sup>,秦美琦<sup>2</sup>,李 栋<sup>2</sup>,孙 琪<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 以藁草为研究对象,研究藁草根系纤维土的渗透性和崩解性能,探究植物根系对土体性能的影响。**方法** 通过变水头渗透试验,分析各影响因素对根系纤维土渗透性能的影响;通过室内崩解试验,分析各影响因素对根系纤维土崩解性能的影响。**结果** 根系纤维含量越多,渗透性能越强;风干处理的根系纤维土的渗透性能高于浸水处理;土的含水率越高,渗透系数越低;根系纤维不同分布形态下的渗透性取决于渗透路径的长短。根系纤维的含量越多,根系纤维土抵抗浸水崩解性能越强;根系纤维长度越长,崩解速度越缓慢;在根系纤维分布方式不同时,根系纤维抵抗崩解的能力不同,从大到小的排列顺序依次为个字形、人字形、偏形、竖直形。**结论** 土体中的植物根系纤维可以提高土的渗透性和抗崩解能力。

**关键词** 根系纤维土;藁草根系;渗透性试验;室内崩解试验

中图分类号 TU391 文献标志码 A

## Experimental Study on Permeability and Disintegration Performance of Carex Root Fiber Soil

WANG Fengchi<sup>1</sup>, QIN Meiqi<sup>2</sup>, LI Dong<sup>2</sup>, SUN Qi<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The purpose of this paper is to explore the influence of plant roots on soil performance, this paper takes carex as the research object to study the permeability and disintegration performance of carex root fiber soil. The methods is influence of various factors on the permeability of root fiber soil was analyzed through the variable head permeability test. The effect of various factors on the disintegration performance of root fiber soil was analyzed through laboratory disintegration test. The results show that the more the root fiber content, the stronger the permeability; the permeability of the air-dried root fiber soil is higher than that of the water immersion treatment; the higher the soil moisture content, the lower the permeability coefficient; the permeability under different root fiber distribution forms depends on the permeability The length of the path. The more root fiber content, the stronger the resistance of root fiber soil to disintegration in water; the longer the length of root fiber, the slower the disintegration speed; when

收稿日期:2020-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51678374)

作者简介:王凤池(1970—),男,教授,博士,主要从事复合地基、桩基等方面研究。

the root fiber distribution mode is different, the ability of root fiber to resist disintegration is different, from large to The small arrangement order is glyph, herringbone, offset, vertical. The conclusion is that the presence of root fiber can improve the permeability and anti-disintegration ability of soil.

**Key words:** root fibrous soil; carex root; permeability test; laboratory disintegration test

工程建设中大面积的开山、筑堤等破坏了坡体原有的地表情况,更是对生态环境的平衡造成了破坏<sup>[1]</sup>。传统的防护方法主要有喷射混凝土、设置挡墙等。传统方法对当地的生态多样性影响较大,违背了绿色生态的发展趋势<sup>[2]</sup>,因此植被防护的方法应运而生。植物的根系纤维与土体密切的结合,弥补了传统工程防护的缺陷,既实现了对边坡土体的加固,减少水土的流失,又达到了保护自然环境的目的。

植物护坡技术距今已发展多年,并且在国外起步较早,20世纪90年代的中后期,在各国学者的推动下,植物护坡技术得以迅速发展。A. S. Dhakal<sup>[3]</sup>通过观察被砍伐后的植被对根系强度的影响,分析了不同的森林管理对坡的长期影响以及对滑坡的影响。A. K. Leung<sup>[4-5]</sup>以七叶草和铁苏为研究对象,采用双环入渗试验,分析其根系对所处坡体的影响。周红贵<sup>[6]</sup>采用变水头渗透试验,以高羊茅根系为研究对象进行渗透试验,得出在高羊茅根系的生长区域的30 cm内,复合土体的渗透系数大于素土的渗透系数;此外,还通过根土复合体室内崩解试验分析对比了素土、絮状根系土、稻秸秆根系土、草加稻秸秆根系土的崩解量。李雄威<sup>[7]</sup>以膨胀土为研究对象,采取原位渗透试验进行渗透性能测试,试验证明植物根系的存在能够加强土体的渗透性能。邓仁贵等<sup>[8]</sup>研究了林木根系对坡面土体的崩解性能的影响。李家春等<sup>[9]</sup>采用崩解仪开展浸水崩解试验,通过研究发现,含水量、压实度和崩解速率之间存在内在相关性。周德培<sup>[10]</sup>、方华<sup>[11]</sup>、单炜<sup>[12]</sup>、王文生<sup>[13]</sup>、戚国庆<sup>[14]</sup>、陈开圣<sup>[15]</sup>等从水文和力学机制角度全面总结了植被对边坡稳定的各种影响:植物可以有效防止坡面冲

刷、截留降雨,植物根系对土坡起锚固、加筋作用,植物蒸腾耗水降低孔隙水压力、增加土的抗剪强度。

研究分析根系纤维土的渗透和崩解性能试验,能大力促进植物固土护坡的发展需要,为植物固土护坡提供更有力的试验证据。基于此,笔者选取藁草为研究对象,以藁草根系纤维含量、根系纤维土的处理方式、试验用土含水率以及根系纤维分布形态为控制变量,研究根系纤维土的渗透性能和抗崩解性能,并分析其原因,研究结果表明根系纤维的存在可以提高土体的渗透性能和抗崩解性能。

## 1 试验

### 1.1 试件制备

试验选用沈阳建筑大学校园内生长茂盛的藁草,如图1所示。



图1 藁草

Fig. 1 Carex

经过测量,藁草的根系长度主要集中在10~15 cm,直径主要集中在0.3~0.6 mm。试验用土选择沈阳本地土,依据《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019)<sup>[16]</sup>,最大干密度为1.948 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为11.72%,液限指数为29.47,塑限指数为16.21。

### (1) 渗透性试验试件

为研究根系纤维土的渗透性, 笔者采用控制变量的方法研究多个影响因素下的根系纤维土的渗透性能的变化。试验所涉及的影响因素包括: 藁草根系纤维的含量、根系纤维的处理方式、试验用土的含水率以及根系纤维的分布形态。藁草根系纤维的含量分别选取 0 根、10 根、15 根、20 根和 25 根。对试验的根系纤维进行处理, 得到新鲜根系、风干 2 h、风干 4 h、浸水 2 h 和浸水 4 h 根系纤维进行试验。

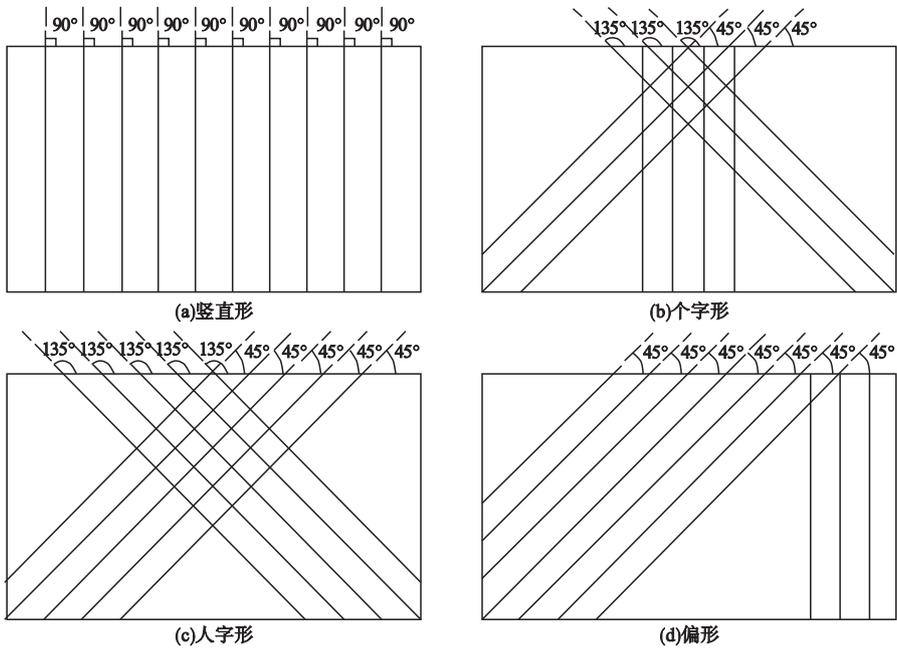


图2 根系纤维分布形态

Fig. 2 Root fiber distribution pattern

### (2) 室内崩解试验试件

崩解试验分别以藁草根系纤维含量、根系纤维长度以及根系纤维的分布方式为影响因素, 研究其对根系纤维土的室内浸水崩解性能的影响。藁草根系纤维的含量与分布方式同上。对试验的根系纤维进行处理, 得到 1 cm、2 cm、3 cm 和 4 cm 的根系纤维。利用 4 cm 环刀进行取样, 将根系均匀插入土中, 以控制试块内根系分布密度。将环刀上下两端表面切平。

#### 1.2 根系纤维土渗透性试验

渗透试验在研究土的渗透特性时是必不

可少的, 渗透系数正是衡量土的特性的重要指标之一。因此, 笔者将从多个影响因素的角度下, 利用变水头渗透试验, 分析根系纤维土的渗透性能。渗透性试验使用南京土壤仪器厂的 TST-55 型渗透仪如图 3 所示。在装有试样的环刀外壁涂抹一层薄薄的凡士林, 将环刀缓慢的推入渗透仪的套筒中。在渗透仪的套筒内, 先后放入滤纸、透水石、止水垫圈和仪器上盖, 拧紧螺丝至不漏气、不漏水的密封状态。将渗透仪的进水口与变水头的进水管相互连接。将排气管的夹子打开, 当从排气管中流出的水不带有气泡时, 将

排气管的夹子夹好,使水从下到上的饱和试样。当排气管出现水流流出时,即认为渗透试样已经达到饱和状态,此刻开始测定测压管读数。将测压管充水到需要的高度,取下测压管与供水瓶之间连接的夹子,按下秒表,开始计时,记录水头  $h_1$ , 经过时间  $t_1$  后,记录水头  $h_2$  和时间  $t_2$ , 并用温度计测量出水口水的温度,记录下来(要求每次测定水头差大于 10 cm), 如此连续 2~3 次, 再将测压管水位回声到所需高度, 再次记录读数, 前后共测量 9 次, 试验终止。

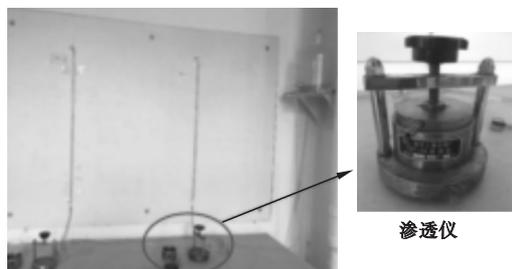


图3 渗透试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of penetration test device

### 1.3 根系纤维土室内崩解试验

本试验装置参考文献[17]中的试验装置,用自制的简易室内崩解试验装置,如图4所示。

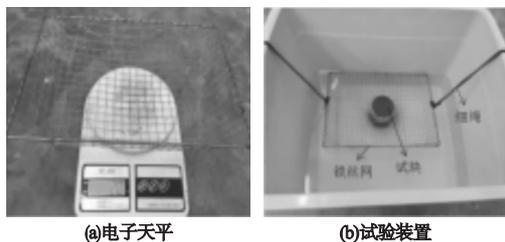


图4 崩解试验装置

Fig. 4 Disintegration test device

试验所用工具有整理箱、铁丝网盘、环刀、细绳、秒表、温度计和电子天平。用细绳将铁丝网盘两端和整理箱两端连接固定,使铁丝网盘呈水平状态,将制备好的试样放置在铁丝网盘上;将测量好温度的自来水倒入整理箱中,使水位刚好没过试验土样表面,并且保证每次试验水位高度相同;水位没过试验土样的瞬间,按动秒表,每 2 分钟,将铁丝

网盘连同试件共同水平端出,迅速利用电子天平测量铁丝网盘与试样整体的重量,记录数据;称量后立即水平放入水中,继续按照上述方法,每两分钟进行测量,记录试验数据,直至土体完全崩解。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 根系纤维土渗透性能研究

#### 2.1.1 根系纤维含量对根系纤维土抗渗性的影响

不同藎草根系纤维含量下根系纤维土的渗透系数如图5所示。

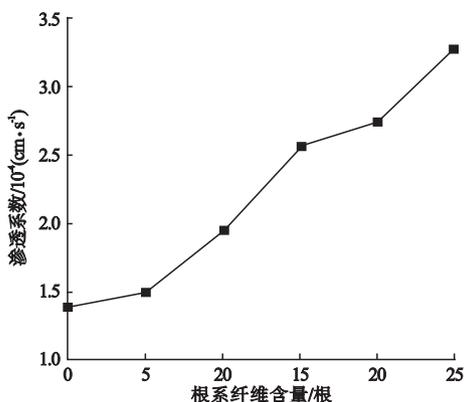


图5 根系纤维土渗透系数与根系纤维数量的关系

Fig. 5 The relationship between the permeability coefficient of root fibrous soil and the number of root fibers

通过图5可以看出,加入藎草根系纤维的根系纤维土的饱和渗透系数均比素土(未加入根系纤维的土)的饱和渗透系数大。并且随着根系纤维的增多,渗透系数增幅也逐渐增大,增幅 7.7%~134.8%。当根系纤维含量达到 25 根时,渗透系数最大,增幅达到 134.8%。由此可以说明,藎草根系纤维可以显著提高根系纤维土的渗透性能。主要原因是根系纤维的存在改变了土体原有的结构,藎草根系纤维在与土体黏结的同时,对密实的土体也有一定的分散作用,使土体与根系纤维接触处产生孔隙,极易引起土质发生疏松的现象,由此增大了根系纤维土的孔隙率和透水性,进而较大程度地改变了土体的

渗透性能。随着根系纤维含量增多,根系纤维对土体产生的孔隙作用就愈发明显,导致其透水性逐渐加强。

### 2.1.2 根系纤维处理方式对根系纤维土抗渗性能的影响

根系纤维处理方式主要包括新鲜根系纤维、风干2 h、风干4 h、浸水2 h和浸水4 h根系纤维。根据根系纤维土变水头渗透试验,得到的试验数据结果如图6所示。为绘图方便,采用XX表示新鲜根系纤维,FG表示风干根系纤维,JS表示浸水根系纤维。

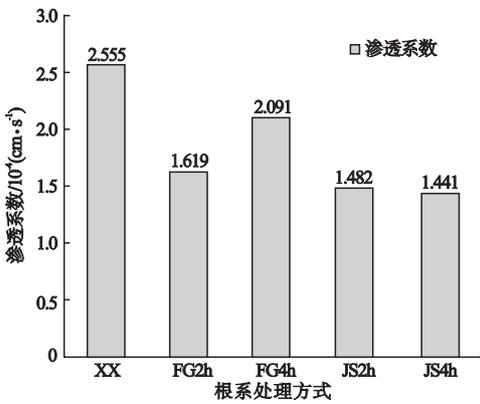


图6 根系纤维土渗透系数与根系纤维处理方式的关系

Fig. 6 The relationship between the permeability coefficient of root fiber soil and the treatment mode of root fiber soil

通过图6可以发现,根系纤维处理方式不同,相对应的根系纤维土的渗透系数也不相同。新鲜根系纤维的根系纤维土的渗透系数最高,其次是风干的根系纤维,最后是浸水处理后的根系纤维。主要原因在于藁草的根系纤维在风干以及浸水状态下,根系纤维的含水率处于不平衡状态,会产生吸水等现象,而新鲜根系纤维的含水率已经达到稳定平衡状态,因此该种情况下根系纤维土的渗透性能最好。风干处理的根系纤维的含水率,随着风干时间的推移,其含水率逐渐降低,进行渗透试验时,风干根系纤维自身会先吸取水分,当水分吸取饱和后,水分开始渗入土中;而浸水的根系纤维,其含水率已经接近饱和,

因此其渗透性能最差。

### 2.1.3 土的含水率对根系纤维土抗渗性能的影响

试验用土的各种含水率下的根系纤维土的渗透系数情况如图7所示。

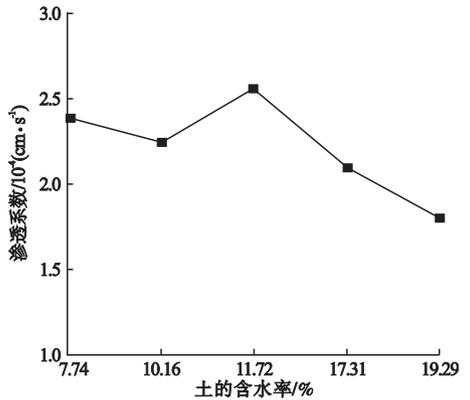


图7 根系纤维土渗透系数与根土的含水率的关系  
Fig. 7 The relationship between permeability coefficient of root fibrous soil and moisture content of root soil

土的含水率不同对于植物根系纤维土的渗透系数的影响亦不相同。试验所选取的土的含水率分别为7.74%、10.16%、11.72%、17.31%和19.29%。当土的含水率低于11.72%时,随着土的含水率的升高,根系纤维土的渗透系数逐渐降低;当土的含水率高于11.72%,随着土的含水率的升高,根系纤维土的渗透系数逐渐降低;其中在含水率为11.72%时渗透系数达到最大。主要原因是土的含水率增大时,其根系纤维土的孔隙度减小,渗流通道变窄,结合达西定律可知,在水力坡度相同时,根系纤维土的渗透系数随着渗透的速度的变化而变化。本试验中,渗流的总水量相同,渗流通道变窄后,渗流速度变慢,因此渗透系数逐渐降低。而在最优含水率情况下,对应的干密度最大,此时,土孔隙中完全没有水的存在,因此该情况下,在水流入渗时,根系纤维土吸收水分子速度最快。

### 2.1.4 根系纤维分布形态对根系纤维土抗渗性能的影响

试验所用的根系纤维均为新鲜根系,根

系纤维含量均为 15 根,试验用土的含水率均为 11.72%。根系纤维土的渗透系数与根系纤维的分布形态的关系如图 8 所示。

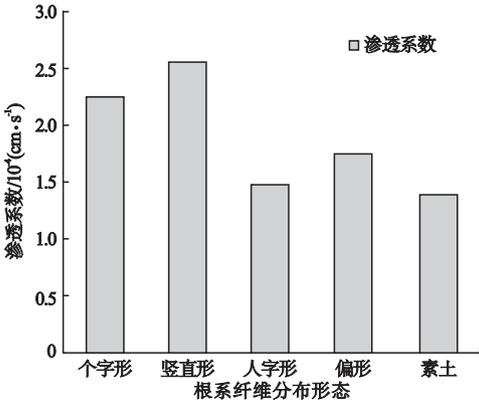


图 8 根系纤维土的渗透系数与根系纤维的分布形态的关系

Fig. 8 The relationship between permeability coefficient and distribution pattern of root fiber soil

根系纤维分布形态无论如何变化,其根系纤维土的渗透系数皆比素土的渗透系数大。与素土作对照,得出各种根系纤维分布形态下,20℃平均渗透系数增幅在 7.9% ~ 83.2%。按照由大到小的顺序排列依次为竖直形、个字形、偏形、人字形。根据达西定律可知,在水力坡度  $i$  相同时,根系纤维土的渗透系数  $k$  随着渗透速度  $v$  的变化而变化,渗透的速度越快,其渗透系数越大;同理,渗透速度越慢,其渗透系数越小。在本试验中,根系纤维的分布形态不同改变了渗流路径的大小,渗流路径越长,其渗流速度越慢,相对应的渗透系数便越小;同理,渗流路径越短,其渗流速度越快,相对应的渗透系数越大。由上至下,垂直距离最短,故竖直根系为渗流最短路径。

### 2.2 根系纤维土崩解性能研究

#### 2.2.1 根系纤维含量对根系纤维土崩解性能的影响

笔者采用崩解速度这一指标来衡量根系纤维含量对根系纤维土崩解的影响程度。不同根系纤维含量(0 根、10 根、15 根和 20 根)对根系纤维土崩解性能的影响如图 9 和图

10 所示。

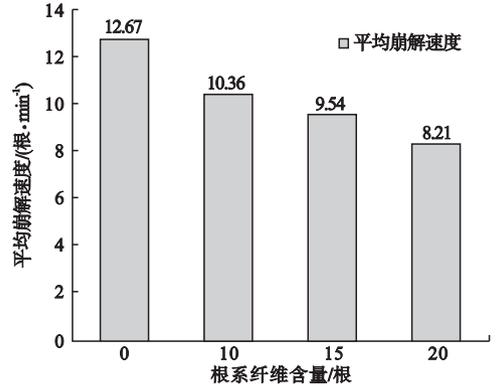


图 9 根系纤维含量与平均崩解速度的关系  
Fig. 9 Relationship between root fiber content and average disintegration rate

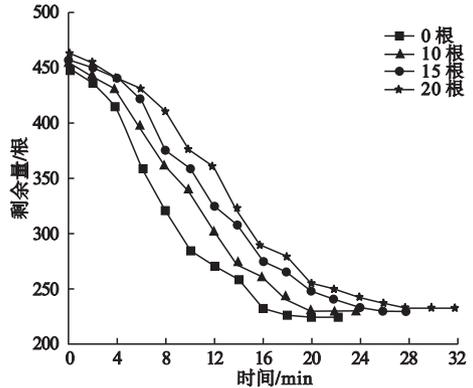


图 10 根系纤维含量不同时的崩解剩余量与时间的关系

Fig. 10 Relationship between disintegration residue and time with different root fiber contents

从图 9 中可以看出,随着根系纤维的增多,根系纤维土的崩解速度越来越低,当根系纤维含量为 0 根时,根系纤维土的崩解速度为 12.67 根/min,当根系纤维含量为 20 根时,根系纤维土的崩解速度为 8.21 根/min。从图 10 可以得出,根系纤维土在每两分钟内的崩解变化率随着时间的推移而变化,崩解变化率的绝对值最小为 0.43%,最大为 13.25%,具体变化为先小后大,然后变小,最终为 0%。

综上所述,根系纤维含量越多,根系纤维土每分钟的崩解量即崩解速度越慢,说明根系纤维的存在可以有效提高根系纤维土的抗

崩解性,主要原因在于根系纤维的存在,能够很大程度上增强根系纤维土内部的联结力,进而阻碍了根系纤维土的崩解。

### 2.2.2 根系纤维长度对根系纤维土崩解性能的影响

不同根系纤维长度对根系纤维土崩解性能的影响如图 11 和图 12 所示。

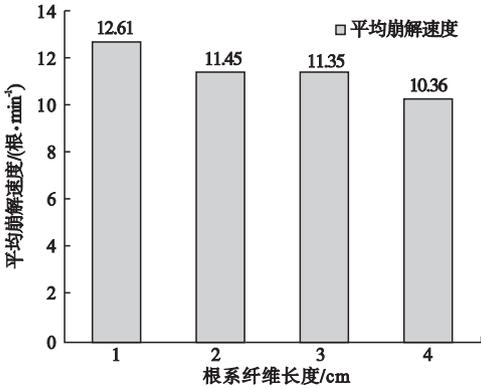


图 11 根系纤维长度与平均崩解速度的关系

Fig. 11 Relationship between root fiber length and mean disintegration rate

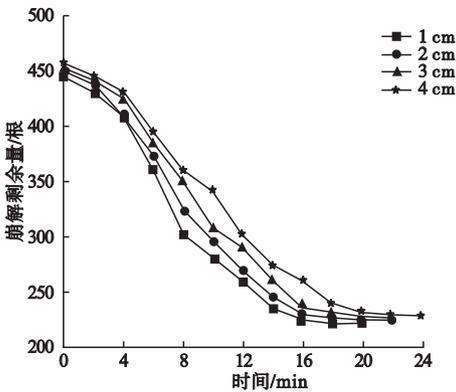


图 12 根系纤维长度不同时崩解剩余量与时间的关系

Fig. 12 Relationship between time and calving residue of root fibers with different length

从图 12 中可以看出,随着时间的推移,不同根系纤维长度下的根系纤维土的崩解情况不同,但所有根系纤维长度下的根系纤维土的崩解剩余量均呈下降趋势。根系纤维长度越长,根系纤维土的平均崩解速度越小,即每分钟根系纤维土的崩解量越少,根系纤维

土的崩解剩余量越多,其抗崩解能力越强。因为根系纤维长度越长,其与土颗粒的黏结力越大,因此存在加固土体、抵抗崩解、防止水土流失的作用。

### 2.2.3 根系纤维分布方式对根系纤维土崩解性能的影响

不同根系纤维分布方式的平均崩解速度和崩解剩余量与时间的关系如图 13 和图 14 所示。其中,SZ 代表竖直形,PX 代表偏形,RX 代表人字形,GZ 代表个字形。

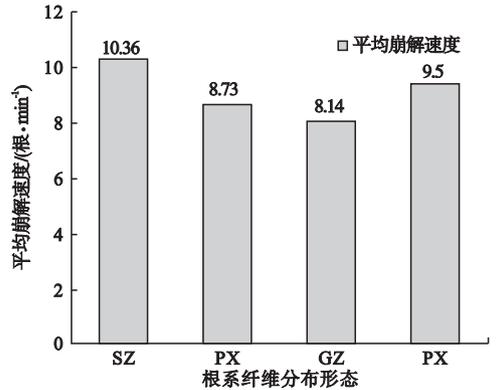


图 13 根系纤维分布方式与平均崩解速度的关系

Fig. 13 The relationship between the distribution pattern of root fibers and the mean disintegration rate

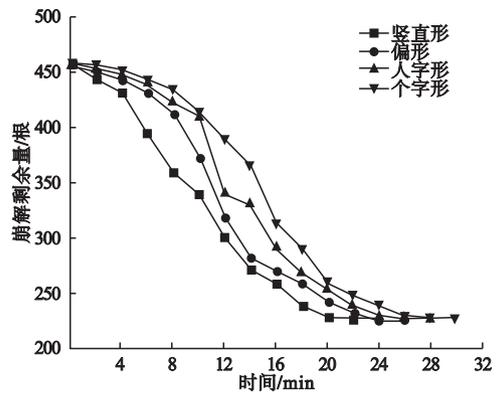


图 14 根系纤维分布方式不同时崩解剩余量与时间的关系

Fig. 14 The relationship between the residual amount of disintegration and time in different distribution modes of root fibers

从图中可以看出,根系纤维分布方式不

同时,根系纤维土的崩解情况不同,崩解所用时长也不相同,但崩解趋势大致相同。也可以看出4种根系分布形态的根系纤维土的平均崩解速度由小到大依次为个字形根系纤维,人字形根系纤维,偏形根系纤维,竖直形根系纤维。平均崩解速度越小,崩解量越少,抗崩解能力越强。主要原因在于根系纤维在土中以不同的形态进行分布,构成不同的网格,与土体紧密联结,增强了土颗粒与根系纤维之间的摩擦力与黏结力,提高了根系纤维土的抗崩解能力。

### 3 渗透与崩解的关系

土的崩解破坏机理是由于土体浸水以后,由于土的吸水作用会将土颗粒包围成水膜,破坏了土颗粒之间的胶结黏聚力,而且未排出的空气随着水膜的增大受到压缩,导致孔隙内气压增大,产生应力集中现象,使土体发生崩解破坏<sup>[18-21]</sup>。从试验中可以看出,由于根系纤维的存在使水可以顺着根系纤维渗透,其渗透系数变大,而且根系纤维使土颗粒之间产生了更好的黏联作用。这一现象延缓了水膜的形成,减少了封闭压缩的气体,从而减缓了土颗粒之间的胶结黏聚力丧失的速度。随着根系纤维含量的增多,渗透系数也随之变大,孔隙内封闭的气泡体积变小,根系纤维与土颗粒的黏结及摩擦力也增大,因此土体的平均崩解速度降低,崩解剩余量也增多。

### 4 结论

(1)在其他试验影响因素相同的情况下,随着根系纤维含量的增多,根系纤维土的渗透性能逐渐增大;风干处理的根系纤维的根系纤维土的渗透性能要高于浸水处理的根系纤维土;试验用土的含水量越高,根系纤维土的渗透系数越低;此外,根系纤维不同分布形态下的渗透性能不同,从小到大排列顺序依次为人字形、偏形、个字形、竖直形。

(2)根系纤维含量增多的同时,减慢了根系纤维土的崩解速度,提高了根系纤维土的抗崩解性能;根系纤维长度越长,崩解破坏所用的时长越长,崩解速度越缓慢,则其抗崩解能力越强;此外,在根系纤维分布方式不同时,根系纤维抵抗崩解的能力不同,从大到小的排列顺序依次为个字形、人字形、偏形、竖直形。无论何种方式下的崩解,最终崩解剩余量均趋于定值,因土体全部崩解脱落,剩余量仅为根系纤维。

(3)根系纤维的存在提高了土体的渗透性能,进而提高了土体的抗崩解能力。

### 参考文献

- [1] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉:中国地质大学,2010.  
(ZHOU Yunyan. Study on mechanism of soil reinforcement by roots and slope protection technology[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2010.)
- [2] 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.  
(WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2017,39(1):1-47.)
- [3] DHAKAL A S, SIDLE R C. Long-term modelling of landslides for different forest management practices [J]. Earth surface processes & land forms,2003(28):853-868.
- [4] LEUNG A K, GARG A, COO J L, et al. Effects of the roots of cynodon dactylon and schefflera heptaphylla on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. Hydrological processes, 2015, 29 ( 15b ): 3342-3354.
- [5] KWAN L A, ANKIT G, WANG-WAI N C. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil [J]. Engineering geology,2015,193(a):183-197.
- [6] 周红贵. 草类根系加筋土力学特性及水稳定性室内试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.  
(ZHOU Honggui. Laboratory study on mechanical properties and water stability of reinforced soil with straw roots [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2017.)
- [7] 李雄威,孔令伟,郭爱国. 植被作用下膨胀土渗透和力学特性及堑坡防护机制[J]. 岩土力

- 学,2013,34(1):85-92.  
(LI Xiongwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J]. Rock and soil mechanics,2013,34(1):85-92.)
- [8] 邓仁贵,宋文杰,彭杰帅. 林木根系对坡面土崩解特性的影响[J]. 人民长江,2018,49(19):100-104.  
(DENG Rengui, SONG Wenjie, PENG Jieshuai. The influence of tree root system on the disintegration characteristics of slope soil[J]. Yangtze river,2018,49(19):100-104.)
- [9] 李家春,田伟平. 工程压实黄土崩解试验研究[J]. 重庆交通学院学报,2005(5):74-77.  
(LI Jiachun, TIAN Weiping. Experimental study on disintegration of engineering compacted loess[J]. Journal of Chongqing jiaotong university, 2005(5):74-77.)
- [10] 周德培,张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003.  
(ZHOU Depei, ZHANG Junyun. Vegetation slope protection engineering technology[M]. Beijing:China Communications Press,2003.)
- [11] 方华,林建平. 植被护坡现状与展望[J]. 水土保持研究,2004,11(3):283-285.  
(FANG Hua, LIN Jianping. Slope vegetation: present situation and its prospect[J]. Research of soil and water conservation,2004,11(3):283-285.)
- [12] 单炜,王福亮. 公路植物护坡水文与力学效应的理论研究[J]. 森林工程,2007,23(6):43-46.  
(SHAN Wei, WANG Fuliang. Research on hydrology effect and mechanical effects of highway slope protection with vegetable[J]. Forest engineering,2007,23(6):43-46.)
- [13] 王文生,杨晓华,谢永利. 公路边坡植物的护坡机理[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):26-30.  
(WANG Wensheng, YANG Xiaohua, XIE Yongli. Mechanism of biotechnical protection for highway slope[J]. Journal of Chang' an university(natural science edition), 2005,25(4):26-30.)
- [14] 戚国庆,胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(11):2220-2225.  
(QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protecyion with vegetation[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006,25(11):2220-2225.)
- [15] 陈开圣,殷源. 公路边坡植物防护机理研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2011,28(3):119-123.  
(CHEN Kaisheng, YIN Yuan. Research on the mechanism of highway slope plant protection[J]. Journal of Guizhou university(natural sciences),2011,28(3):119-123.)
- [16] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GBT50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.  
(Ministry of Water Resources the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GBT50123—2019[S]. Beijing:China Planning Press,2019.)
- [17] 周欢. 絮状草根及稻秸秆与土复合体的物理力学特性试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2016.  
(ZHOU Huan. Experimental study on physical and mechanical properties of soil complex with rice straw and flocculent roots[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.)
- [18] 张抒,唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1668-1674.  
(ZHANG Shu, TANG Huiming. Experimental study on disintegration mechanism of unsaturated granite residual soil[J]. Rock and soil mechanics,2013,34(6):1668-1674.)
- [19] 张巨松,张添华,朱桂林,等. 透水路面路基性能的实验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(6):961-964.  
(ZHANG Jusong, ZHANG Tianhua, ZHU Guilin, et al. Experimental research of roadbed of porous road[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2007,23(6):961-964.)
- [20] 郭凯,苗航,周静海. 氧化石墨烯对再生混凝土气体渗透性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):692-698.  
(GUO Kai, MIAO Hang, ZHOU Jinghai. Effect of graphene oxide on gas permeability of recycled concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2019,35(4):692-698.)
- [21] 张华,吴争光. 封闭气泡对土壤渗透性影响的研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2009,31(4):52-56.  
(ZHANG Hua, WU Zhengguang. A review on effect of entrapped air on soil permeability[J]. Journal of China three gorges university:(natural sciences),2009,31(4):52-56.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)