

# 含水率与加筋率对加筋土崩解特性影响的试验研究

沙琳川<sup>1,2</sup>, 王桂尧<sup>1</sup>, 李斌<sup>2</sup>, 周欢<sup>3</sup>, 张红日<sup>1,4</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 贵州省质安交通工程监控检测中心有限责任公司;  
3. 武汉二航路桥特种工程有限责任公司; 4. 广西交通科学研究院)

**摘要:**针对边坡生态防护所采用的稻秸秆加筋土,通过崩解试验研究不同加筋率与含水率对加筋土崩解特性的影响规律。试验采用烘干的方法改变6种加筋(稻秸秆)率(加筋率为:0~0.5%)试样的含水率,然后进行崩解试验。结果表明:①试样的崩解量和崩解速率与试样的初始含水率和稻秸秆掺加比例有关,试样的崩解量和崩解速率随着试样的初始含水率的降低而增加;②初始含水率对试样的崩解性起决定性影响,稻秸秆掺加比例对试样崩解现象影响不大。当初始含水率高时,试样成“鳞片状”崩解;当初始含水率低时,试样先是细小颗粒以粉状掉落,试样成“块状”崩解。

**关键词:**边坡生态防护;稻秸秆加筋土;崩解特性;含水率;加筋率

为解决边坡施工完成后坡面植被尚未生长或生长早期的雨水冲刷问题,研究人员提出了采用稻秸秆加筋土进行边坡防护的全生态方法。花岗岩残积土具有易崩解的特性,导致其所形成的边坡在开挖后需要及时防护,而防护层的水稳定性好坏直接关系到防护的效果。因此,有必要研究含水率和加筋率对加筋土体崩解特性的影响规律。

将加筋土用于工程防护已有很长的历史,I. R. Mcibor研究了白杨树根系的力学性能,证明了其根系可以加固土体,从而提高坡面的稳定;Chia-Cheng Fan通过原位直剪试验总结了土的含水率和根的面积率对根系土抗剪强度的影响;唐朝生和施斌等研究了聚丙烯纤维提高土体抗剪强度的作用机理;钱叶琳等分析了黄麻纤维对膨胀土的加筋机理;石茜通过试验对比分析指出稻秸秆对盐渍土的加筋效果优于麦秸秆。关于土体崩解特性及坡面土体侵蚀研究方面,如张抒等通过自制的崩解仪器对非饱和残积土进行崩解试验,从含水率与压实度方面,通过微观分析得出对非饱和残积土崩解性起控制性因素的是孔隙气压和基质吸力;李家春等通过对黄土的崩解试验,研究表明压实度和含水量对黄土崩解速率的影响可以用有效空隙率来表示,并可用于预测压实土的崩解速率;张泽等通过

研究天然和风干状态下冷生亚黏土的崩解形态特征,并得出崩解形态与崩解速率有着紧密的对应关系;刘子壮等以黄土高原边坡4种护坡植物为研究对象,通过研究植物根系在土体中的分布以及根系的抗拉、原状土的抗压和抗崩解等力学指标的规律,得出土层深度和土层中根系的含量是影响土体崩解速率的主要因素;肖宏彬探索了混合种植林草的边坡土体的初始含水量、边坡坡度及有效根密度对边坡土体抗崩解能力的影响。

以上可以看出:目前有关加筋土在工程上的应用以研究强度特性为主,而对强度特性以外的研究较少;在崩解方面大多数学者研究的是土体崩解特性,而关于加筋土崩解特性的研究仅开展了一些初步研究,且对影响加筋土崩解特性的因子研究较少。该文为进一步验证稻秸秆加筋土护坡方法的实际适用性,通过试验研究不同初始含水率和加筋率条件下稻秸秆防护层的崩解特性,从而为该方法的使用和设计提供依据。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

试验用土取自长沙市某施工现场,土样取回后根

收稿日期:2019-10-21(修改稿)

基金项目:2019年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(编号:2019KY1338);广西科学研究与技术开发计划项目(编号:桂科攻1598009-4);广西交通科学研究院科技项目(编号:KJ2014-014)

作者简介:沙琳川,男,硕士研究生,工程师.E-mail:617240444@qq.com

据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》对其基本物理性质进行测定,结果如表 1 所示。

表 1 试验土样的基本参数

最优含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	相对密度	塑限/%	液限/%
14.8	1.85	2.72	15.1	34.2

试验所用的加筋体采用农田中去除根部的稻秸秆,根据文献[2],为保证试验结果的可对比性,在稻秸秆制样时去掉稻秸秆顶部与茎叶,稻秸秆每段长 3 cm,将制做的 30 kg 稻秸秆进行混合均匀备用。根据 20 组随机样本分类称重统计结果,可将稻秸秆按直径分为粗秆、中粗秆、中细秆和细秆 4 个等级,其直径范围分别为 0.43~0.58、0.34~0.42、0.22~0.33 和 0.14~0.21 mm,4 个等级的稻秸秆分别约占总质量的 28.4%、24.3%、15.0%和 32.3%。

采用上述土体与稻秸秆混合制成的加筋土体进行室内崩解试验,尚需确定具体的试样制备与剪切试验方案。

1.2 试验仪器

试验仪器采用自行设计制作的崩解试验仪器(图 1)进行浸水崩解试验,其包括玻璃缸(便于观察崩解试验现象)、网板、吊架、电子天平等。电子天平量程为 2 000 g,精度为 0.1 g,用于记录网板上剩余试样的重量;网板采用直径 2 mm 的钢丝交织成 8 mm×8 mm 的网格板,通过细线连接吊架,架设于电子天平上,实时记录试样的质量;玻璃缸长 2 000 cm、宽 15 cm、高 30 cm,上端开口,每次试验时应保证水面在同一位置;数显式温度计用于测量试验时水温,保证每次试验时水温约为 20 ℃。

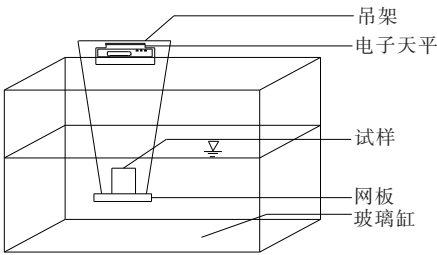


图 1 试验装置图示

1.3 试验方案

该文主要研究含水率与加筋率对加筋土崩解性的影响规律,因此,试验方案主要涉及不同含水率和不同加筋率的试样制备问题。根据已有加筋率取值状况,该文主要探讨 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%

共 6 种加筋工况,并通过改变稻秸秆掺入量来实现。含水率主要通过烘干的方法模拟现场工况,以此体现稻秸秆加筋土在使用过程中的崩解特性。

试验以含水率和稻秸秆掺加比例为控制变量,研究含水率与稻秸秆掺加比例对土样崩解性的影响。崩解试样控制含水率和稻秸秆掺加比例见表 2。

表 2 崩解试样变量参数

含水率		稻秸秆掺加比例					%
27.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
23.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
18.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
13.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
8.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
7.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	

具体的试验步骤如下:

(1) 首先在 30 cm×20 cm×10 cm 的泡沫盒子中配制高 6 cm 的稻秸秆掺加比例为 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%的饱和泥浆,并记录整体试样的重量及此时的含水率,用来监测试样的含水率。

(2) 将配制好的泥浆放入 40 ℃烘箱中,该文初步定为 6 h 取一次样,试样的大小经加工后形成 5 cm×5 cm×5 cm 的立方体。其中试样的稻秸秆掺加比例不同,相同时间内各个试样的含水率变化不同,为保证试样的含水率相同,采取以下方法控制:对土样每 1 h 称重一次,以监测试样的含水率变化情况,当接近 6 h 取样时,选取土样中最低的含水率作为此组崩解试验的基准含水率,剩余的土样待其含水率降至此基准值时,再对剩下的土样取样进行崩解试验。

(3) 采用图 1 试验装置进行崩解试验,采用电子天平记录试样在水中崩解 60 min 的剩余质量。

2 稻秸秆加筋土室内崩解试验结果

由已有研究可知:评价黏性土的指标一般采用崩解时间、崩解现象和崩解速率 3 个方面进行表征:① 崩解时间:指试样完全崩解所需的时间;② 崩解现象:试样在崩解过程中出现的各种状况;③ 崩解速率:崩解过程中土样的质量损失与原土样质量的比值与时间的关系。

通过预试验结果可知当试样含水率较高时,试样崩解量较小,所以将崩解时间限定为 60 min,比较在 60 min 内试样在水中崩解的变化规律。进行完崩解

试验后,从 60 min 内试样的崩解率、崩解现象和崩解速率 3 个指标入手,分析初始含水率和稻秸秆掺加比例对崩解性的影响。

2.1 初始含水率和稻秸秆掺加比例与崩解时间关系

在 40 ℃ 的烘干条件下,每隔 6 h 对不同掺加比例的土体进行取样,然后将其制成 5 cm×5 cm×5 cm 的立方体进行崩解试验。

对 6 个不同初始含水率的试样进行崩解试验,其结果见图 2。从图 2(a)可以得出稻秸秆掺加比例为 0 的试样(素土样)随着含水率不断下降,相同时间内崩解量不断增加,崩解过程较快,其中在 60 min 内完全崩解的土样的初始含水率为 7%、8%和 13%。初始含水率为 7%试样完全崩解的时间最短,在 25 min 左右时完全崩解,其崩解过程大致分为两个阶段:第 1 阶段为快速崩解阶段,第 2 阶段为崩解减缓阶段。由于土

样是在烘干条件下改变含水率,在此种条件下土样水分蒸发较为快速,水分在土样中快速蒸发后会留下孔隙通道。当含水率较低的素土试样进行崩解试验时,由于土内的基质吸力较大,土体的吸水能力较强,外界水在基质吸力的作用下沿着孔隙通道进入土中,此时原有孔隙中的空气随着水的渗入而被不断地压缩,孔隙气压(斥力)不断增大,当孔隙气压大于土颗粒间的有效应力(吸力)时,原有试样的结构性会发生破坏。这时在崩解量的曲线上表现为快速上升,为快速崩解阶段。但随着土中渗入的水不断增多,土体的饱和度越来越大,土体内的基质吸力不断变小,且孔隙气压逐渐变大与外界气压平衡,因此土体的崩解速度开始变慢,直到试样完全停止崩解,所以在后期试样崩解开始减缓。从 3 个完全崩解试样可以看出崩解时间随着初始含水率的降低而减少。

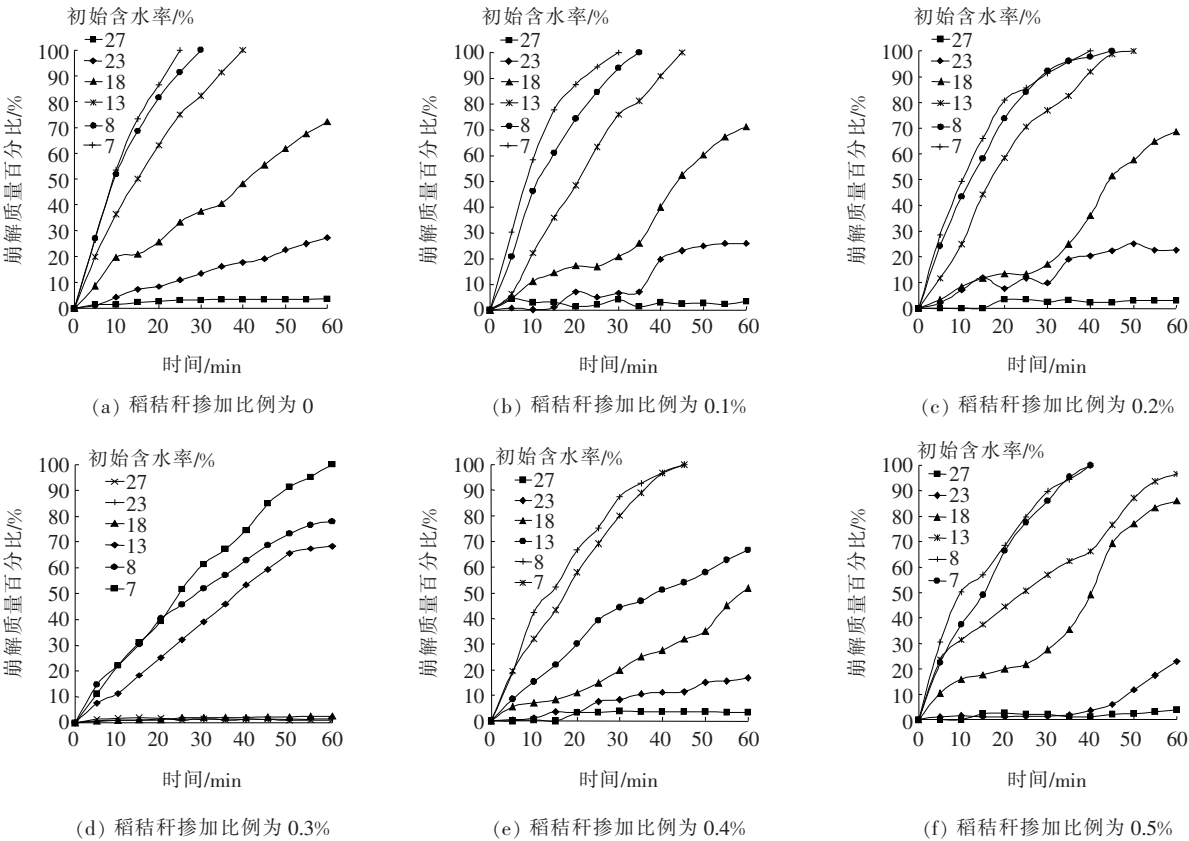


图 2 不同稻秸秆掺加比例和初始含水量与崩解时间的关系

而剩余 3 个未崩解的试样,其崩解量也与试样的初始含水率有关,基本上也遵循着在相同的时间下试样随着初始含水率降低崩解量增加。

试验得到的素土试样崩解结果与张泽研究得到的含水率对亚黏性土崩解特性规律相同,土样的崩解性与土样的初始含水率有关,基本上遵循试样初始含水

率越低则崩解时间越短这一规律。

从图 2(b)~(f)可知:从整体上看稻秸秆掺加比例相同的试样,其崩解量也与初始含水率有关,基本符合初始含水率越低其在相同时间内的崩解量就越大。当初始含水率相同时,再从稻秸秆掺加比例来看,试样的崩解性与稻秸秆掺加比例有关,基本上呈现出随着



稻秸秆掺加比例增多,其在相同时间内的崩解量呈现出先减小后增大趋势,且在稻秸秆掺加比例为0.3%时达到最小值。这主要是因为随着稻秸秆的掺加比例不断增大,其稻秸秆在土中的比表面积增大,稻秸秆与土颗粒间的摩擦增大,土体的有效应力增加,也就是抵抗水进入土体所产生的孔隙气压力(斥力)变强,所以崩解量减少。但当稻秸秆的掺加比例继续增加,稻秸秆增大了土体的孔隙度,由于孔隙度过大引起崩解时孔隙气压增大抵消了其对有效应力的增加量,而且过多的稻秸秆会搭建出一个含有少量土甚至是无土的空间,使试样的结构性遭到破坏,甚至会导致其在相同时间的崩解量大于不添加稻秸秆的试样。

2.2 初始含水率和稻秸秆掺加比例与崩解现象关系

(1) 首先对稻秸秆掺加比例相同、初始含水率不同的试样进行对比。稻秸秆掺加比例为0.4%的试样,初始含水率为23%和13%时崩解现象见图3。



(a) 初始含水率为23%



(b) 初始含水率为13%

图3 稻秸秆掺加比例为0.4%不同初始含水率土的崩解现象

由图3(a)可知:

在初始含水率较高时试样由“外”到“内”以鳞片状掉落,且由于试样含水率较高,其基质吸力较小,吸水能力差,外界进入孔隙中的水较少,外界水的进入引起的孔隙气压较小,所以含水率较高时崩解量较少。

由图3(b)可知:由于试样在烘干的条件下改变试样的含水率,在一个较短的时间内试样含水率迅速减少,其水分蒸发过程中会在土样的内部留下较多的裂隙。当进行崩解试验时,由于试样的含水量降低,孔隙中含水量减少,基质吸力升高,土样吸水的能力变强,

当外界水浸入试样的孔隙后,孔隙中原有的空气被挤压,随着外界水不断浸入土体,试样表面开始有气泡冒出,并伴有细小颗粒不断下落,然后试样由整块试样分裂成几个大块,接着再由几个大块分裂出若干个次级小块,直至崩解结束。

比较发现:试样的崩解现象与试样的初始含水率有关,初始含水率决定试样的崩解现象。

(2) 对初始含水率相同、稻秸秆掺加比例不同的试样进行对比。初始含水率为7.0%,稻秸秆含量分别为0和0.1%的试样崩解试验结果见图4。



(a) 稻秸秆掺加比例为0



(b) 稻秸秆掺加比例为0.1%

图4 初始含水率为7.0%不同稻秸秆掺加比例土的崩解现象

由图4(a)可知:在崩解过程中水沿着原水分蒸发时留下的裂隙通道进入土中,原有土中的空气被浸入的水分挤压,此时试样的表面有气泡不断冒出,试样表面的颗粒成粉状掉落,随后表面有小块掉落,试样的体积不断缩小,直至完全崩解。在崩解过程中水槽中的水在不断变浑浊,后期无法观察试样的崩解现象。

由图4(b)可知:其崩解试验现象与稻秸秆掺加比例为0的试样类似,不同点在于试样表面的颗粒成粉状不断掉落后,与土相结合的稻秸秆在土颗粒掉落后,便上浮在水面。

比较发现:稻秸秆掺加比例对试样崩解现象影响不是非常明显。

综上,含水率对试样的崩解现象有决定性作用,而稻秸秆掺加比例对试样的崩解现象影响不大。

2.3 初始含水率和稻秸秆掺加比例与崩解速率的关系

通过对不同初始含水率、不同稻秸秆掺加比例试

样进行崩解试验后,发现其崩解速率与崩解量的结果相对应。不同稻秸秆掺加比例的试样在不同初始含水率下的试样崩解速率的关系如图 5 所示。

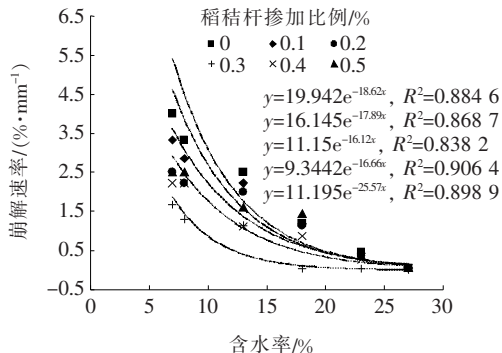


图 5 土样的崩解速率与初始含水率的关系图

由图 5 可得:① 在试样的稻秸秆掺加比例相同时,随着含水率的增大其崩解速率不断减少;② 当试样在初始含水率相同时,随着稻秸秆掺加比例的增大其崩解速率呈现出先减小后增大的规律,并在掺加比例为 0.3% 时崩解速率取得最小值;③ 不同稻秸秆掺加比例试样的崩解速率随着初始含水率的增加呈指数衰减:  $y = Ae^{-bx}$  (其中  $A$  和  $b$  是关于试样稻秸秆掺加比例的拟合系数,  $R^2$  均大于 0.81, 拟合效果较好)。

### 3 试验结果分析与讨论

根据上述试验结果,可以将所有试样分为两组,第 1 组为初始含水率  $< 23\%$  的试样;第 2 组为初始含水率  $\geq 23\%$  试样。从图 2(a)~(f) 以及图 5 可以看出:试样在初始含水率低于  $23\%$  时,无论稻秸秆的掺加比例是多少,其崩解量和崩解速度基本上都有明显的提高,含水率越低试样崩解得越完全;而当试样含水率高于  $23\%$  时,试样基本不发生崩解。由此可得试样崩解量随着初始含水率的增大而减小的规律,可将初始含水率  $23\%$  定义为此次试验用土的一个“界限含水率”,当试样初始含水率大于“界限含水率”时,土样基本不发生崩解,而低于这个“界限含水率”时,试样开始快速崩解。这个“界限含水率”可以用来作为衡量土崩解性的变化指标。

对不同初始含水率和不同稻秸秆掺加比例试样的崩解现象进行对比可得,初始含水率对试样的崩解现象具有决定性的影响,而稻秸秆掺量对试样崩解现象的影响并不大。当含水率较高时试样是由“外”向“内”以“鳞片状”一层一层剥落;当含水率较低时,试样先是

细小颗粒以粉状下落,然后试样先分裂为几个大块,然后再分裂成次一级的小块,直至试样崩解完成。

### 4 结论

(1) 试样的崩解量和崩解速率与试样的初始含水率和稻秸秆掺加比例有关,试样的崩解量和崩解速率随着试样的初始含水率的降低而增加。

(2) 初始含水率对试样的崩解性起决定性影响,稻秸秆掺加比例对试样崩解现象影响不大。当初始含水率较高时,试样成“鳞片状”崩解;当初始含水率较低时,试样先是细小颗粒以粉状掉落,试样成“块状”崩解。

(3) 不同稻秸秆掺加比例试样的崩解速率随着初始含水率的增加呈指数衰减:  $y = Ae^{-bx}$ , 将初始含水率  $23\%$  定为此次试验用土的“界限含水率”。

### 参考文献:

- [1] 张红日,王桂尧,沙琳川.一种稻秸秆泥皮护坡材料及抗冲刷试验研究[J].公路交通科技,2017(1).
- [2] 王桂尧,沙琳川,曹文贵,等.加筋率对稻秸秆加筋土开裂特性的试验研究[J].水文地质工程地质,2017(5).
- [3] I. R. Mcivor, G. B. Douglas, S. E. Hurst, et al. Structural Root Growth of Young Veronese Poplars on Erodible Slopes in the Southern North Zealand [J]. Agroforest Syst, 2008, (72): 75—86.
- [4] Chia—Cheng Fan, Chih—Feng Su. Effect of Moisture Content on the Deformation Behavior of Root—Reinforced Soils Subjected to Shear [J]. Plant Soil, 2009, (324): 57—69.
- [5] 唐朝生,施斌,刘春,等.影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J].水利学报,2007(10).
- [6] 钱叶琳,王洁,吕卫柯,等.黄麻纤维加筋土的强度特性及增强机理研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016(2).
- [7] 石茜.稻草加筋滨海盐渍土的强度与变形特性[D].兰州大学博士学位论文,2011.
- [8] 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(6).
- [9] 李家春,崔世富,田伟平.公路边坡降雨侵蚀特征及土的崩解试验[J].长安大学学报(自然科学版),2007(1).
- [10] 张泽,马巍,赵淑萍,等.天然与风干状态下冷生亚黏土的崩解形态特征[J].冰川冻土,2014(1).
- [11] 刘子壮,高照良,杜峰,等.黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J].水土保持学报,2014(4).
- [12] 肖宏彬,贺茜,李珍玉,等.根系对边坡土体抗崩解能力影响的试验研究[J].中南林业科技大学学报,2015(5).