

不同黑麦草种植密度对坡面流的阻力特性影响研究

赵璐, 孙菊英, 张璐, 潘雪倩, 雷孝章

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要:为探究植被覆盖下坡面流的阻力特性,采用理论分析与室内放水冲刷试验相结合的方法,分析了3种不同种植密度、2组坡度下黑麦草对坡面流阻力的影响,并初步探讨了一定条件下柔性植被的形态与坡面水流的相互作用。结果表明,当有植被覆盖时,糙率系数随雷诺数的增加基本呈先增加后减少再增加的趋势;糙率系数并非随密度增大而增大;坡度为 5° 时糙率系数与弗汝德数之间呈良好的幂函数关系,而坡度为 10° 时拟合度并不高;在弗汝德数相同时,糙率系数随着坡度的增加而减少。

关键词:坡面流; 植被密度; 阻力特性; 糙率系数

中图分类号: S157

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.016

赵璐, 孙菊英, 张璐, 等. 不同黑麦草种植密度对坡面流的阻力特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 101-105.

0 引言

土壤侵蚀已成为我国最严重的环境问题之一。其中,水力侵蚀是侵蚀最严重、影响范围最广的土壤侵蚀类型,而源头就是坡面流。一般定义坡面流是由天然降雨在扣除地表入渗、填洼及截留等损失后在重力作用下沿坡面流动的薄层水流,是土壤侵蚀发生的初始动力^[1]。而研究坡面流水动力学特性的核心问题是坡面流阻力,它反映下垫面的组成对坡面水流的影响程度,是掌握坡面流侵蚀过程的理论基础。

近年来,随着生态恢复工程建设,植被覆盖下的坡面薄层水流问题引起越来越多国内外研究学者的关注,并取得了一定的阶段性成果:如Munoz-Carpena等^[2]证实了植被具有增阻缓流的作用,以减小水流对土壤的侵蚀力度。由于坡面流的机理复杂,影响因素较多,目前,对坡面流阻力的研究主要还是借助明渠水流的相关概念和表达方法,如Darcy-Weisbach阻力系数、Manning糙率系数、Chezy系数等。Abrahams^[3]研究表明,有草地覆盖时阻力系数 f 与雷诺数 Re 正相关,而有灌木丛覆盖时二者负相关。李勉等^[4]、王玲玲等^[5]在室内放水冲刷试验下,研究了草被覆盖下坡面流Darcy-Weisbach平均阻力系数与放水流量二者之间的关系。Noarayanan L等^[6]验证了不同水流、植被条件下的Manning糙率系数,认为其是表达和计算坡面流阻力的理想方法。曾玉红等^[7]指出Manning糙率系数更适合描述坡面流阻力。以往的植被覆盖下坡面流阻力特性研究中,大多采用模拟植被进行试验,而天然植被与模拟植被之间仍存在较大差异。为此,在室内定坡水槽放水试验的基础上,人工种植天然植被黑麦草,采用理论分析与试验研究相结合的方法来探讨柔性植被覆盖下坡面流的阻力特性,研究不同黑麦草种植密度下阻力系数的变化规律。

1 试验设计及坡面流参数测定

1.1 试验设计

为了定量描述坡面流的水力特性,设计室内定坡水槽放水试验方案,具体操作如下:

1) 试验在四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室进行。试验水槽由3 mm厚有机玻璃板制作而成,长6 m、宽0.5 m、深0.4 m,选取中间2 m长为试验段。水槽试验系统包括蓄水池、水泵、恒定水头给水箱、放水设备、试验水槽段、循环水管道等装置。水槽上部装有卵石包,使上方来水更加均

收稿日期:2016-04-30

作者简介:赵璐(1991-),女。硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: 512185331@qq.com

通信作者:雷孝章(1965-),男。副教授,主要从事水土保持研究。E-mail: 314129368@qq.com

匀。水箱用于蓄水,待水箱中的水位不变时,可认为其流量一定,水槽内水流为恒定均匀流。放水设备利用三通管调节水流的流量,通过调节阀门大小控制流量范围为0.1~3 L/s。试验水槽装置示意图见图1。

2)采用天然植被进行试验。黑麦草为丛生植物,根系发达,入土较浅,须根主要分布于15 cm表土层中。高30~90 mm,具3~4节,质软叶狭长,深绿色。黑麦草在低山丘陵区种植面积较广,为生态修复工程、水土保持工程主要栽植牧草之一。

3)有机玻璃床面覆盖15~20 cm厚的紫色土壤,再加盖一层卵石防止水流冲刷土壤,然后移植成熟黑麦草,最大株高在90 mm左右。移植方式为间隔分布行带式布置,每2排植株间距约10~12 cm,共15排。试验共设计3种密度,即①(6×5)棵交叉种植,共83棵;②5×4交叉种植,共68棵;③3×2交叉种植,共38棵;为消除卵石影响,布置一组裸坡。具体布置见图2。

4)由四川省遂宁站、升钟站等^[8]水土保持试验观测站的观测资料可知,四川省土壤侵蚀主要来自暴雨、大暴雨及特大暴雨,而且大暴雨及特大暴雨情况下侵蚀较为严重。故试验模拟大暴雨及特大暴雨产生坡面径流的冲刷现象,选取5个流量(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 L/s)进行放水试验。冲刷试验设计测试5°和10°二组坡度,与植被密度和流量的组合试验(2×4×5)共40场冲刷试验。

5)主要测量要素为水温、流量、平均流速及水深。在不同密度及不同坡度下各要素共测5次,再取平均值。水深测点布置于沿坡长方向的10个断面测量。每个观测断面按横向左、中、右3个测点测量径流深。

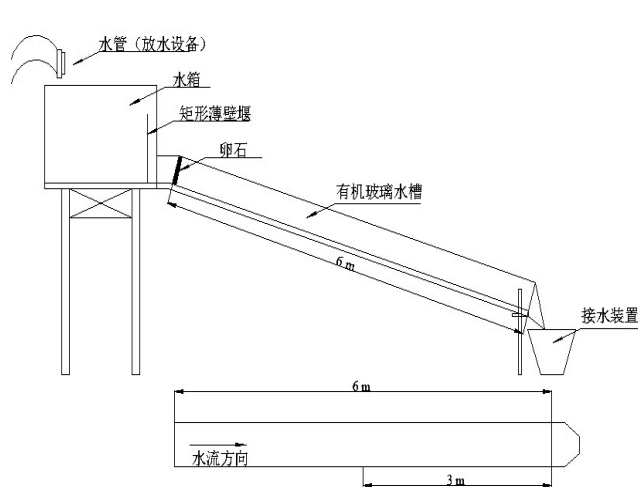


图1 试验装置图

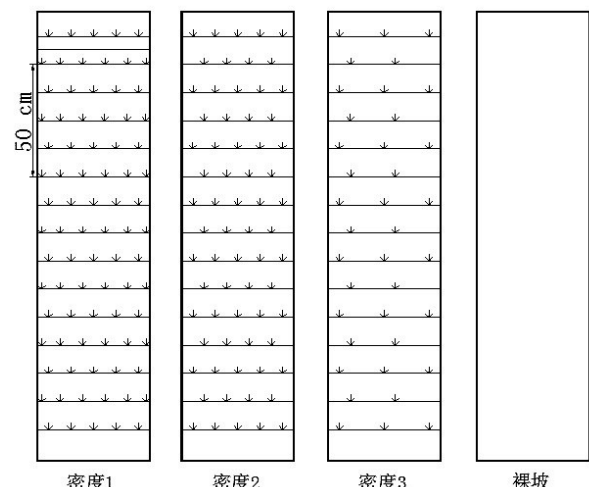


图2 植被密度分布图

1.2 试验方法

试验前先选定一种植被密度,调整水槽坡度,启动水泵,调节阀门先至小流量,待土壤饱和后,再调节阀门获得试验设计流量,等水流稳定后测定水流温度、表面流速、水深等要素。流量用体积法测量;水流表面流速用染色法测定,选取水槽试验段1.5 m为测定区域;水深利用钢尺测量,根据流量和水深可得断面流速。进行一组试验过后,调节流量,重复试验,再改变坡度、植被密度进行相应的试验。

1.3 水力参数计算

坡面流流速、径流深、雷诺数、弗汝德数、Manning糙率系数等水力要素是反映水动力学特征的主要指标,其中坡面流速 U 和径流深 h 是在试验中直接测得的,其他参数可由上述试验结果计算得出。

无量纲参数雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 的计算公式为:

$$Re = \frac{UR}{\nu}, Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

Manning糙率系数 n 的计算公式为:

$$n = \frac{R^{2/3} J^{1/2}}{U} \quad (2)$$

式中: U 为坡面平均流速(m/s); h 为坡面平均径流深(m); R 为坡面平均径流的水力半径(m),可近似 $R \approx h$; ν 为水的运动粘滞系数(cm^2/s),取 $\nu=0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$; g 为重力加速度(m/s^2),取 $g=9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; J 为水力坡度,近似取水槽坡度。

2 植被覆盖下水流阻力特征分析

2.1 Manning糙率系数 n 与雷诺数 Re 的关系

粗糙床面上的坡面流阻力主要由颗粒阻力、形态阻力、波阻力组成^[9],而波阻力是由较大尺度的地表形态变化影响所产生的阻力,而本试验为定床试验,波阻力可忽略不计,故坡面流阻力主要由颗粒阻力、形态阻力(植被覆盖产生的附加阻力)组成。Manning糙率系数是描述床面粗糙度对水流阻滞作用的重要参数。与无植被覆盖坡面水流相比,Manning糙率系数与雷诺数的关系更复杂,其变化趋势与植被形态、密度、布置方式等密切相关。

图3为坡度为5°时的不同植被密度下 n 与 Re 的关系。可以看出,有植被覆盖的Manning糙率系数明显大于无植被覆盖的情况。当坡面为裸坡时,小雷诺数下糙率系数的变化较剧烈,随雷诺数的增加,糙率系数趋近于常数。原因是当坡面只有卵石覆盖时,小流量下雷诺数较小,此时坡面流表现为层流,部分卵石凸起造成水流绕流,颗粒阻力较大;随流量增大雷诺数增大,坡面流转变到过流区,卵石被完全淹没,颗粒阻力逐渐减小并趋于稳定。当有植被覆盖时,糙率系数随雷诺数基本呈先增加后减少再增加的趋势,可能是因为当坡面为卵石与植被共同覆盖下,小雷诺数时,水流为层流,植被的存在减小了断面过水面积,床面不平整度增加,所以糙率系数缓慢增加;而大雷诺数时,对于柔性植被,不同于刚性植被的水流绕流,部分水流会从植物茎叶空隙中穿过,故糙率系数呈减小趋势;当雷诺数继续增大时,坡面流过渡到紊流,水流绕流、穿过植被茎杆,前后两股水流产生碰撞,形成较小的漩涡,导致糙率系数缓慢增加。糙率系数表现为密度2>密度1>密度3,说明糙率系数并非随植被密度增大而增大,可能是由于植被密度增大壅水增大,床面上卵石阻水作用减小,所以在植被与卵石共同作用下植被密度越大,不一定阻水效果越好。坡度为10°时的情况与坡度为5°时的结果基本一致。

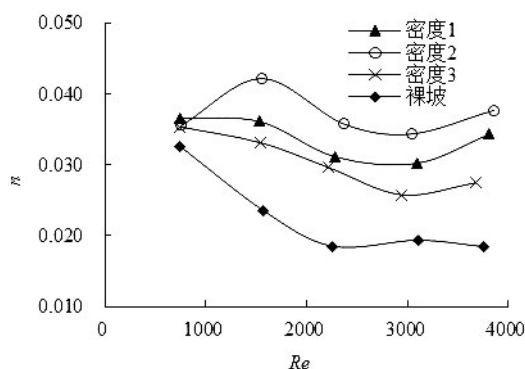


图3 5°坡时不同植被密度下 n 与 Re 的关系

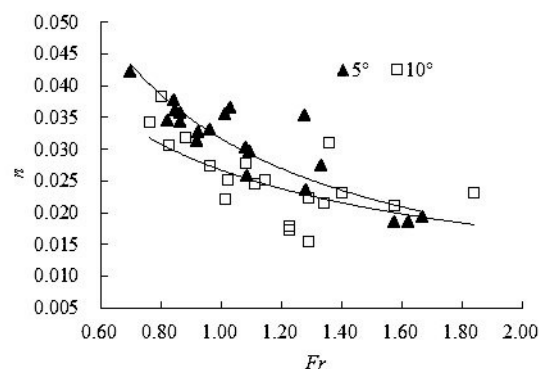


图4 糙率系数和弗汝德数的关系

2.2 Manning糙率系数 n 与弗汝德数 Fr 的关系

弗汝德数 Fr 作为坡面薄层水流中极其重要的判别参数,反映了水流流态的不同。潘成忠等^[10]指出糙率系数与弗汝德数之间存在密切的关系,但没有给出具体的函数关系;而翟艳宾等^[11]证明了二者之间存在较好的幂函数关系。

由图4可知,糙率系数随着弗汝德数的增加而降低,在弗汝德数相同时,糙率系数随着坡度的增加而减少。当坡度为5°时,糙率系数与弗汝德数呈单调递减的幂函数关系,拟合公式为: $y=0.0316x^{-0.879}$, $R^2=0.7848$, 说明二者存在较好的幂函数关系;当坡度为10°时,拟合公式为: $y=0.0267x^{-0.635}$, $R^2=0.3995$, 糙率系数随着弗汝德数的增加而降低,但幂函数拟合度较低,究其原因可能在于以下三点:一是研究方法与前人不同,试验研究采用卵石床面与天然植被耦合作用下的坡面水流,与单纯的模拟植被研究存在较大差异,说明下垫面的构成、复杂程度等会直接影响阻力、流态变化及其两者关系;二是当坡度为10°时,坡面较陡,试验流量较大,水流流态由缓流转变为急流,为防止土壤冲刷采用卵石覆盖,但水流冲刷仍引起小颗粒卵石起动,床面发生了微小变化,从而影响了试验水深测量的准确性,使结果有一定的误差;三是试验只选取2个坡度下进行研究,不排除试验的偶然性。具体原因有待进一步探究。

2.3 Manning糙率系数 n 与水深 h 的关系

一般认为植被产生的阻力沿水深作用于水体。卵石床面和植被的耦合,加剧了植被段内流体微团的相互碰撞、掺混及能量传递,且植被通过其根、茎、叶组成结构不同程度改变了水流的阻力特性,而水流的拖曳

力又改变了植被的形态,这种相互影响使水深的变化更加复杂。因坡度为 10° 时的趋势与 5° 时基本一致,故选取坡度为 5° 时的结果加以分析。

由图5知,当坡面为裸坡条件下,水深较小时,糙率系数随水深的增加而逐渐减小;当水深增加到一定程度时,糙率系数趋于一个稳定值。对于有植被覆盖的情况下,密度1、密度2的水深从开始增长到约为8.5、9.5 mm时,糙率系数随水深增大而增大;之后糙率系数随水深增加而减少,当水深增加到11~12 mm左右时,糙率系数又缓慢增加至稳定状态。

糙率系数呈现这种变化的原因是柔性植被不同于刚性植被的物理特性。试验用草的茎干具有一定的初始韧度,加之根系锚固于土壤中使茎干具有一定的刚度,因而开始时草对水流的阻滞作用随水深增大而增强,符合刚性植被的阻水特点。随水深加深,草的部分茎干在水流拖曳作用下发生弯曲,顺水流方向倒伏于床面,同时草的叶片也在水流的冲刷下重新排列呈较为平顺的状态,加之床面粗化,平整度增大,导致颗粒阻力逐渐减小,因此床面糙率相应减小。当水深进一步增大时,水流的紊动加剧,草的茎干弯曲至极限程度,且草的茎干与叶片弯折处形成较小的漩涡及水跃,使得植被对水流的阻滞作用相对增加,糙率系数进一步增加,最终趋于稳定。

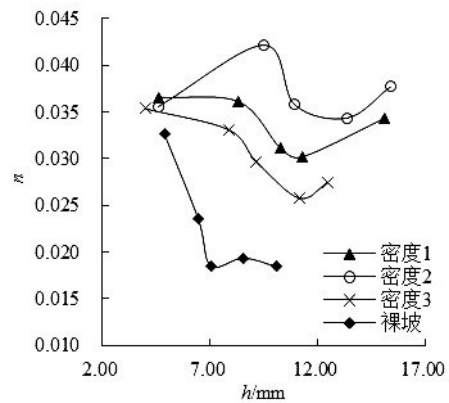


图5 5° 坡时糙率系数 n 和水深 h 的关系

3 结 论

1)糙率系数随雷诺数及水深的变化,与植被种植密度、下垫面复杂程度等密切相关。植被覆盖下糙率系数并非随密度增大而增大,说明在植被与卵石共同作用下植被密度越大,阻水效果不一定越好。说明植被阻水存在一个最理想的密度范围,这可为人工配置植被密度时提供合理依据。

2)糙率系数随着弗汝德数的增加而降低,在弗汝德数相同时,糙率系数随着坡度的增加而减少。当坡度为 5° 时糙率系数与弗汝德数之间呈良好的幂函数关系,而当坡度为 10° 时拟合度并不高,说明坡度较陡、水流较大且床面较复杂的情况下,明渠中糙率系数与弗汝德数之间的幂函数关系可能不适用。

3)通过室内试验模拟坡面流情况,发现坡面铺设卵石与实际天然坡面有一定出入,移栽后植被生长情况也会发生一定变化,因此得到结果与实际情况可能会有不同,加之工况设置较少,使试验结果有一定的局限性,相关结论有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [2] MUNOZ-CARPENA R, PARSONS J E. A design procedure for vegetative filter strips using VFSSMOD-W[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2005, 47(6): 1 933-1 941.
- [3] ABRAHAM A D, PARSON A J, WAINWRIGHT J. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hill-slopes Walnut Gulch, southern Arizona[J]. Journal of Hydrology, 1994(156): 431-446.
- [4] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖下坡面-沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J].水利学报,2007,38(1): 112-119.
- [5] 王玲玲,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖度对坡面流水力学参数的影响及其减沙效应[J].中国水土保持研究,2009,7(1): 80-83.
- [6] NOARAYANAN L, MURALI K, SUNDAR V. Manning's 'n' co-efficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2012, 6(1): 51-62.
- [7] 曾玉红,槐文信,张健,等.非淹没刚性植被流动阻力研究[J].水利学报,2011,42(7): 834-838, 847.
- [8] 四川省水土保持委员会办公室.四川省水土保持实验观测成果汇编[R].成都:四川省水土保持委员会办公室,2010.
- [9] 蒋昌波,隆院男,胡世雄,等.坡面流阻力研究进展[J].水利学报,2012,43(2): 189-197.
- [10] 潘成忠,马岚,上官周平.含沙量对草地坡面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J].水科学进展,2008,19(6):857-862.
- [11] 翟艳宾,吴发启,张一,等.人工模拟粗糙度对坡面流阻力的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(1):93-95.

Study on Resistance Characteristics for Overland flow under Different Density of Flexible Vegetation Cover

ZHAO Lu, SUN Juying, ZHANG Lu, PAN Xueqian, LEI Xiaozhang

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineer, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the method of integrating theoretical analysis with experiment, a series of overland flow experiments were carried out to study the influence of three different coverage and two slope groups of the perennial ryegrass on resistance characteristics of overland flow. The interaction between the form of flexible vegetation and flow was primarily discussed under certain conditions. The experiment results showed that Manning coefficient increased and then decreased and increased finally as the Reynolds number increased with surface coverage of vegetation; Manning coefficient did not increase as vegetation density increased; when the slope was 5° , Manning coefficient decreased with Froude number by good power function, but 10° did not. With the same Froude number, Manning coefficient decreased with the slope increases.

Key words: overland flow; the density of vegetation; resistance characteristics; Manning coefficient

责任编辑:白芳芳