

文章编号: 1008-2786-(2015)3-257-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000033

# 植被发育斜坡土体中根-土间隙的导流特性

王帮团<sup>1</sup>, 徐则民<sup>2</sup>, 王帮圆<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学地球科学系, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学土木系, 云南 昆明 650500;

3. 云南地质勘察设计院, 云南 昆明 650041)

**摘 要:** 水分或溶液在土体中的迁移具有空间和时间上的异质性。以植被发育斜坡云南昭通头寨沟和昆明呈贡段家营为研究试验区, 分别运用亚甲基蓝和罗丹明 B 溶液进行了多次染色示踪渗透试验, 发现根-土间隙的导流现象十分明显, 其导流作用很可能已经超过了传统的三类土体大孔隙。然而, 国内外研究者对根-土间隙方面的研究还比较欠缺。为此, 对根-土间隙宽度为 0.5~3.0 mm, 步长为 0.5 mm 流道内单相流体摩擦阻力系数和入渗速度进行了理论计算, 并讨论了在同一流道和不同间隙流道内影响水分下渗速度的因素, 结果表明: 根-土间隙的大小对根-土间隙通道内流体的流动特性有着重要影响, 随着间隙的减小摩擦阻力系数也相应减小; 间隙对流动阻力系数的影响还依赖于  $R_e$  的大小, 其影响随  $R_e$  的减小而减小。在昭通头寨植被发育斜坡土体中, 根-土间隙宽度主要集中在 0.5~1.0 mm, 间隙内水分下渗的速度分布在区间 0.014~0.203 mm/s; 相同面积上, 头寨试验区渗透速率是呈贡段家营试验区的 26.28 倍。由于根-土间隙的存在, 大大地促进了土体水分的快速下渗, 对滑坡孕育的贡献是显著的。

**关键词:** 植被发育斜坡; 滑坡; 降雨入渗; 根-土间隙

**中图分类号:** P642.11, S152.7, TU41

**文献标志码:** A

降雨是滑坡、泥石流发生的主要诱导因素。根据统计资料, 绝大多数的滑坡是发生在降雨期间或降雨之后, 无论是在国外还是国内, 植被发育区成为此类滑坡频发的区域, 且又常常带有突发性, 难于预报和预防, 给国民经济建设及人民生命财产安全带来了巨大的损失。如 1998 年 6 月, 美国 Ohio 东南部发生大量滑坡, 77 号公路滑坡密度为 1 处/km, 滑源区植被根系是滑坡堆积区的主要成分<sup>[1]</sup>。2004-07-18—19, 云南盈江县北部植被覆盖度高达 100% 的支那、盏西、芒璋等乡镇遭受总降雨量高达 301 mm 的特大暴雨袭击, 引发滑坡、泥石流灾害, 造

成 59 人死亡失踪, 直接经济损失 1.59 亿人民币<sup>[2]</sup>。2004 年 12 月, 200 mm 强降雨在意大利 Umbria 植被发育斜坡诱发滑坡 486 处, 最大密度超过 12 处/km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。

显然, 在现实生活中植被发育斜坡区发生滑坡现象普遍存在, 这也给人们造成了严重的生命和财产损失。随着人们对土壤水分下渗与壤中流的关注, 土壤大孔隙及大孔隙流研究越来越成为科学家关注的焦点。典型的几类土体大孔隙有植物根系在生长过程中所形成的孔隙, 包括死亡(腐烂)的根系形成的根系通道和活的根系在生长过程中形成的根

收稿日期(Received date): 2014-06-09; 改回日期(Accepted): 2014-08-02。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1033601); 高等学校博士学科点专项科研基金(20135314110005)。

[The National Natural Science Foundation of China-Yunnan Joint Fund and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China.]

作者简介(Biography): 王帮团(1985-), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要从事水文地质与工程地质方面研究。[Wang Bangtuan(1985-), male, born in Zhaotong, Yunnan, Graduate student, major in hydrogeology and engineering geology research.] E-mail: wangbangtuan0910@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 徐则民(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事滑坡灾害孕育过程方面研究。[Xu Zemin(1963-), male, professor, mainly engaged in the process of landslide disaster preparation.] E-mail: abc5100@188.com

-土间隙;另外,动物的活动通道(蚯蚓洞)、居穴(蚂蚁穴)和土体干缩缝也是土体大孔隙重要的组成部分。

关于上述三类土体大孔隙方面的研究,国内外已有不少研究者投入了大量的精力,做了很多室内外试验,证明了这三类大孔隙在降雨入渗及滑坡孕育等方面的重要性。相比之下,根-土间隙的导流入渗作用并没有得到足够的重视,关于这方面的研究还比较欠缺。本文作者在植被发育斜坡云南昭通头寨沟试验区和昆明呈贡段家营试验区多次进行土体染色示踪渗透试验发现,土体中根-土间隙的导流作用十分明显,这说明根-土间隙在导流入渗、滑坡孕育等方面的贡献和上述三类大孔隙一样重要,其作用甚至可能已经超过了上述三类大孔隙。因此,为了完善土体大孔隙流方面的研究,对根-土间隙的导流特性进行研究显得十分有必要和有意义。

## 1 研究区概况及试验成果展示

### 1.1 研究区概况

1991-09-23T18:18,云南省昭通市盘河乡头寨沟村发生山体巨型滑坡,约 $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,造成216人遇难,7人受伤,灾害造成直接经济损失约1 200万元(据云南省计委国土办)。头寨沟地处云

贵高原乌蒙山系西缘,为金沙江一级支流横江流域的盘河支流流域左岸一条较大的沟谷,植被十分发育,在研究区现场调查发现有31种植物:滇蜡瓣花、大白花杜鹃、滇青冈、云南柳等。

头寨沟试验区地处暖带,为北纬亚热带、暖温带共存的高原大陆季风气候,最热月平均气温 $19.8^\circ\text{C}$ ,最冷月平均温度 $2^\circ\text{C}$ ,年平均气温 $11.6^\circ\text{C}$ 。每年5—9月为雨季,降雨充沛,年一日最大降雨量100~150 mm;10月至翌年4月为旱季,降雨稀少,年日照时数1 250~1 500 h。

### 1.2 试验成果展示

在头寨试验区2号、3号试验点和呈贡段家营小李山试验区分别用亚甲基蓝和罗丹明B配水溶液进行多次染色示踪渗透试验。从开挖剖面观察,在0~100 cm深度土层范围内,几乎所有根系及其周围土体均被染色,特别是在0~30 cm深度范围,染色效果十分明显,即便是在更深层土体中根系已经减少许多,但也有根系被染色的现象,图1给出了头寨部分试验成果。从现场试验观察发现,根-土间隙对土体水分入渗的贡献是十分显著的,这说明在强降雨条件下,根-土间隙的导流作用起到了关键的作用。因此,在研究土体大空隙流时,根-土间隙的导流作用不能被忽视。

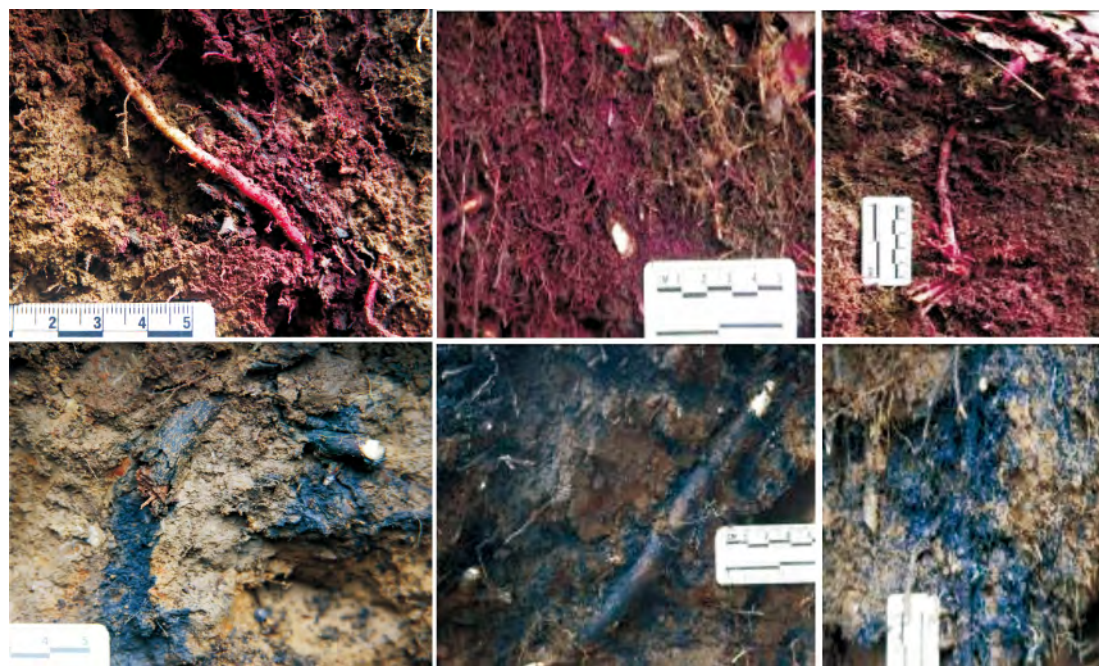


图1 试验成果展示(根-土间隙导流现象)

Fig. 1 Test results show (The phenomenon of soil-root clearance diversion)

2 根-土间隙流道阻力模型

2.1 模型的假设

在根-土体系中,假设植物根系为非透水物质,不考虑水分的径向渗透,根-土间隙流道中水分只能垂直向下迁移,将工程原型沿轴向某一对称轴展开即根-土间隙的二维物理模型(图2)。

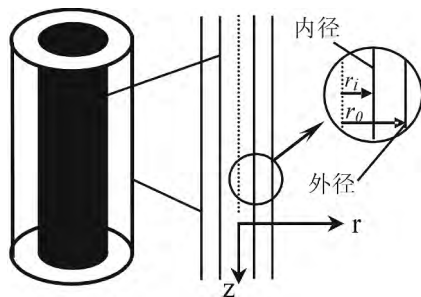


图2 根-土间隙物理模型  
Fig. 2 The physical model of soil-root interstice

假设植被根系垂直向下,将得到垂直于水平面的平行窄缝,其中,非透水物质即为根系表面(实心体)。假设土体是四分之一无限空间体,即向上、向下都是无限延伸的。

2.2 基于达西-魏斯巴赫公式的阻力模型

根据根-土间隙的物理模型(图2),实验段是由两根同心圆管套装而成的环形流道,内管外壁代表根系表皮,外管内壁代表根系周围土体,实验流道的几何参数见表1。为了提高结果的准确性,减小同心环形的偏心度尤为关键,而这也是个很复杂的问题<sup>[4]</sup>。

在表1中,根-土间隙的内径 $d_i$ 为一定值,对

于同一材质套管材料,随着根-土间隙的减小,实测值 $f_{cz}/f_{zd}$ 也随之减小,而理论值却有增大的趋势,但变化不明显。

既有的研究表明,流动摩擦阻力系数一般采用达西-魏斯巴赫公式计算

$$\Delta P = f \cdot \frac{1}{d} \cdot \rho V^2 \tag{1}$$

式中  $\Delta P$ —流体流过通道时的摩阻压降(Pa); $f$ —摩擦阻力系数; $l$ —测压长度(mm); $d$ —通道的直径(mm); $\rho$ —流体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $V$ —间隙内流体的流速( $\text{m}/\text{s}$ )。

摩擦阻力系数与 $R_e$ 相关,即与流体的流动状态(层流或紊流)有关,对于常规尺寸的普通圆管层流充分发展区,流道内流体的摩擦阻力系数按式(2)计算

$$f = 64/R_e \quad R_e < 2320 \tag{2}$$

而在紊流状态下,摩擦阻力系数按公式(3)或(4)计算

$$\begin{cases} f_{z2} = 0.3164 R_e^{-0.25} \\ 4 \times 10^3 < R_e < 3 \times 10^4 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} f_{z3} = 0.184 R_e^{-0.2} \\ 3 \times 10^4 < R_e < 10^6 \end{cases} \tag{4}$$

对于根-土间隙流道层流充分发展区, $\rho u/\partial x = 0$ , $\rho v = 0$ ,其层流流动的动量微分方程及其边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial p}{\partial x} \\ u = 0, \quad r = r_i \text{ 或 } r = r_o \\ u = u_{\max}, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad r = r_{\max} \end{cases} \tag{5}$$

表1 实验流道的几何参数<sup>[5]</sup>  
Table 1 Geometric Parameters of the Test Sections<sup>[5]</sup>

序号 No.	$d_i/\text{mm}$	$d_o/\text{mm}$	$\delta/\text{mm}$	$r_i/r_o$	$f_{cz}/f_{zd}$ 实测值 Measured value	$f_{cz}/f_{zd}$ 理论值 Theoretical value	套管材料 Casing material
1	15.93	22.080	3.075	0.72	1.47	1.497 4	紫铜
2		20.984	2.527	0.76	1.49	1.498 1	紫铜
3		20.001	2.0335	0.80	1.37	1.498 7	紫铜
4		18.969	1.5195	0.84	1.28	1.499 2	紫铜
5		17.914	0.992	0.89	1.23	1.499 7	紫铜
6		17.076	0.573	0.93	1.15	1.499 9	紫铜
7		20.090	2.080	0.79	/	1.498 7	石英玻璃
8		19.320	1.695	0.82	/	1.499 1	石英玻璃
9		17.890	0.980	0.89	/	1.499 7	石英玻璃
10		17.517	0.794	0.91	/	1.499 8	石英玻璃

解方程(5)得

$$\frac{f_{cz}}{f_{z1}} = \frac{(1-\varepsilon)^2 \ln \varepsilon}{(1+\varepsilon)^2 \ln \varepsilon + 1 - \varepsilon^2} \quad (6)$$

式中  $\varepsilon = r_i/r_0$   $r_i$ 、 $r_0$  分别表示根-土间隙内外半径 (mm); 本文实验段几何参数, 内径为 15.93 mm, 外径为 0.1  $\Sigma d_0 = 19.184$  mm, 从而得到内外径之比  $d_i/d_0 = 0.8304$  联立式(2)和(6)解得到摩擦阻力系数的计算式为

$$f_{cz} = \frac{95.94}{R_e} \quad (7)$$

### 2.3 阻力系数 $f$ 随 $R_e$ 的响应

当水分进入根-土间隙时, 首先与两壁形成薄层水膜, 随着时间的推移, 边界层逐渐增厚, 并最终汇集于根-土间隙的中心圈层, 当水分再往前推进, 间隙内的速度分布不再改变而形成充分发展的层流流动。当  $R_e$  达到一定的值后, 就逐渐过渡到紊流区, 在紊流边界层中, 近壁薄层流体内的层流仍占主导地位, 称为层流底层, 经缓冲层过渡到主紊流区, 即为紊流核心(图3)。从图中还可以看出  $f$  对  $R_e$  敏感度随  $R_e$  的增大而减小。

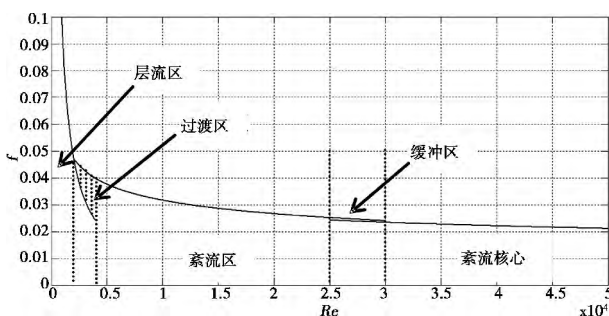


图3 不同流态下阻力特性随  $R_e$  的变化

Fig.3 The change of resistance characteristics with Reynolds number under different flow state

### 2.4 改进的 KAYS 阻力模型

由于流道几何形状不同, 导致不同形状流道所产生的摩擦阻力系数差别也很大, 矩形流道内单相水的摩擦阻力系数不同于圆管, 对于矩形通道内层流流动区, 根据方程(8)可求出阻力系数的解析解<sup>[6]</sup>, 即

$$f = 96/R_e [1 - 1.3553b/a + 1.9467(b/a)^2 - 1.7012(b/a)^3 + 0.9564(b/a)^4 - 0.2537(b/a)^5] \quad (8)$$

式中  $a$  和  $b$  分别表示矩形流道横截面的长与宽,  $R_e$  为雷诺数。

对于根-土间隙流道, 其物理模型如图2所示, 根据表1数据, 改进后模型参数见表2。

表2 改进的模型参数  
Table 2 The improved model parameters /mm

序号 No.	$r_i$	$r_0$	$\delta$	$\pi(d_i + d_0)/2$	$2\delta/(\pi d_i + \pi d_0)$
1	15.930	22.080	3.075	59.676	0.052
2	15.930	20.984	2.527	57.955	0.044
3	15.930	20.001	2.0355	56.412	0.036
4	15.930	18.969	1.5195	54.791	0.028
5	15.930	17.914	0.992	53.135	0.019
6	15.930	17.076	0.573	51.819	0.011

根-土间隙流道层流充分发展区, 不同尺寸流道间隙改进后的模型如下:

$$f = \frac{96}{R_e} [1 - 2.71\delta/(\pi d_i + \pi d_0) + 7.79\delta^2/(\pi d_i + \pi d_0)^2 - 13.61\delta^3/(\pi d_i + \pi d_0)^3 + 15.30\delta^4/(\pi d_i + \pi d_0)^4 - 8.12\delta^5/(\pi d_i + \pi d_0)^5] \quad (9)$$

对于根-土间隙流道, 其间隙尺寸分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 mm 流道, 层流充分发展区, 摩擦阻力特性与雷诺数间的关系为:

$$f_{cz} = \begin{cases} 94.59/R_e & \delta = 0.5 \text{ mm} \\ 93.59/R_e & \delta = 1.0 \text{ mm} \\ 92.50/R_e & \delta = 1.5 \text{ mm} \\ 91.55/R_e & \delta = 2.0 \text{ mm} \\ 90.62/R_e & \delta = 2.5 \text{ mm} \\ 89.72/R_e & \delta = 3.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (10)$$

## 3 模型阻力系数的对比分析

### 3.1 模型一与经验公式的对比

从几何形态的角度, 根-土间隙流道和圆管流道存在很大的差异, 虽两者均属于圆环形流道, 但是, 两者的截面湿润周差异很大, 因而导致了两种流道内水分运动所受到的阻力不同, 即流体在流道内的流速有很大差异。为了对比分析在相同流态下两流道内流体阻力系数, 结合方程(2)和(7), 利用 MATLAB 绘制了两种流道内单相流体阻力特性  $f$  随  $R_e$  的变化曲线如图4。

从图4中可看出, 根-土间隙内单相流体阻力特性呈现出和圆管内单相阻力特性相似的趋势, 阻

力系数均随  $Re$  的增大而减小。另外还可以发现 相对于圆管而言 ,临界雷诺数略滞后 ,这与文献<sup>[7]</sup> 的结果相同。

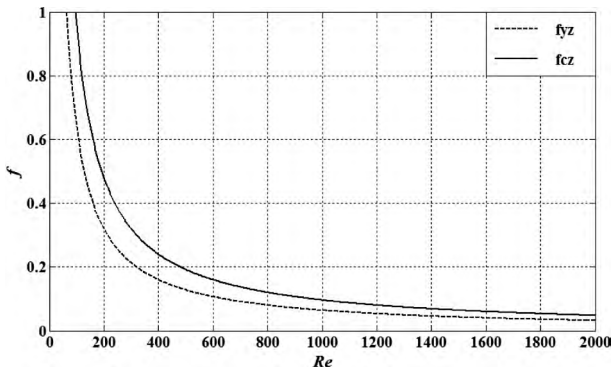


图 4 不同形态流道竖直状态下单向流体阻力特性  
Fig. 4 The characteristics of single-phase flow in the vertical state of different shape channel

在层流区内 ,将阻力系数的实验值与圆管层流经验公式  $f = 64/Re$  值进行对比 ,可看出 ,根-土间隙内单相流动的阻力系数远大于圆管内的阻力系数。原因主要是受到截面湿润周的影响 ,假定根-土间隙通道外环和圆形通道的入口流速  $v$  和当量直径  $D_{hl}$  的值相等 ,根-土间隙内环当量直径为  $D_{h2}$  ,则流道的流动雷诺数  $Re$  也相等 ,那么圆形通道湿润周为  $P_{vs} = \pi D_{hl}$  ,而根-土间隙的湿润周为  $P_{hs} = \pi (D_{hl} + D_{h2})$  。显然 ,在层流区 ,根-土间隙的湿润周大于圆形通道的湿润周 ,且根-土间隙的湿周随窄缝间隙的减小而增大。如果按公式 (2) 计算根-土间隙流道的阻力系数将会产生很大的误差。

而在紊流区内 ,根-土间隙阻力系数实验值与圆管紊流区阻力系数值相差不大 ,这与一些学者研究的结果一致<sup>[8-10]</sup> ,这是因为在紊流区 ,流体内部

存在大量的、无规则的交换混杂运动 ,使流体微团之间的动量交换得到增强 ,从而使横截面上的速度分布趋于均匀截面 ,速度分布不均对通道内摩擦阻力损失的影响也因此减弱 ,因此在紊流区 ,根-土间隙内阻力系数的实验值与圆管经验值相差不大<sup>[11]</sup> 。Brighton 通过实验研究表明 ,当  $6 \times 10^3 < Re < 1.7 \times 10^4$  ,且  $0.0625 < r_i/r_0 < 0.5620$  时 ,摩擦阻力系数与  $r_i/r_0$  无关 ,但是比光滑圆管高约  $0.07 \sim 0.08$ <sup>[12]</sup> 。

总之 ,在研究流道阻力特性时 ,要根据研究的工况选用恰当的计算模型 ,不能一味套用传统的经验计算公式 ,否则将会产生很大的试验误差。就本文研究的工况而言 ,模型一更为适用。

3.2 模型一与模型二的对比

根据表 1 中数据 ,结合模型一和模型二 ,对于不同宽度的根-土间隙流道分别计算出  $f_{cz}/f_{zl}$  的理论值 ,并将其与  $f_{cz}/f_{zl}$  实测值进行对比分析 ,具体数据值见表 3。

从表 3 中数据可看出 ,随着根-土间隙的增大 , $f_{cz}/f_{zl}$  实测值也随之逐渐增大 ,这与模型一和模型二  $f_{cz}/f_{zl}$  理论值存在一定的反差 ,导致这一现象的原因可能是系统本身存在的误差 ,也可能是不可避免的人为因素所致 ,因而为了提高实验数据的精度 ,对实验材料的选择和人为控制方面提出了更高要求。

另外 ,根据两模型计算的理论值和实测值的对比计算  $f_{cz}/f_{zl}$  相对误差 ,尽管在  $\delta = 2.5 \text{ mm}$  和  $\delta = 3.0 \text{ mm}$  时 ,模型二产生的相对误差比模型一的稍大 ,但在根-土间隙为  $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$  范围内 ,模型二产生的相对误差比模型一小  $2 \sim 7$  个百分点。需要指出的是 ,根据多次现场试验观察根-土间隙的尺寸通常在  $0 \sim 1 \text{ mm}$  ,这更加说明了在模拟计算根-土间隙阻力系数时模型二的优势所在。

表 3 两模型理论值与实测值的对比  
Table 3 Comparison between present experiment values and theoretical results of two models

序号 No.	$\delta/\text{mm}$	$f_{cz}/f_{zl}$ 实测值 Measured value	$f_{cz}/f_{zl}$ 理论值(模型一) Theoretical value( Model 1)	相对误差 Relative error	$f_{cz}/f_{zl}$ 理论值(模型二) Theoretical value( Model 2)	相对误差 Relative error
1	0.573 0	1.15	1.499 9	0.35	1.48	0.33
2	0.992 0	1.23	1.499 7	0.27	1.46	0.23
3	1.519 5	1.28	1.499 2	0.22	1.45	0.17
4	2.035 5	1.37	1.498 7	0.13	1.43	0.06
5	2.527 0	1.49	1.498 1	0.01	1.42	0.07
6	3.075 0	1.47	1.497 4	0.03	1.40	0.07



## 4 根-土间隙内流体速度分布

### 4.1 水平状态速度分布

对于土体中横向生长植物根系,它们与周围土体形成水平环形窄缝,和前文假设相同,将根系视为非透水物质,不考虑窄缝内水分的径向渗透。沿轴向展开即为平行板窄缝,假设在水平方向无限延伸。流体在充分发展区中速度  $u$  只是垂直于流动方向的  $y$  坐标(或  $r$ ) 的函数,此时有:

$$\begin{cases} \partial u / \partial x = 0 & \partial^2 u / \partial x^2 = 0 \\ v = 0 & v_r = 0 \end{cases} \quad (11)$$

于是,在二维稳定流动情况下,流体在平行板间充分发展区的动量方程式,可根据纳维埃-斯托克司方程式

$$\rho \frac{Du}{D\tau} = -\frac{\partial p}{\partial x} \mu \nabla^2 u + X \quad (12)$$

化简得

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (13)$$

式中  $Du/D\tau$ —速度对时间的全导数  $X$ —单位容积的体积力在  $x$  方向上的分量  $\tau = \mu du/dy$  ( $N/m^2$ )—剪切力与法向速度梯度成正比  $\partial p/\partial x = 0$ —流体轴向的压力梯度,其在充分发展区为一定值,边界条件为

$$\begin{cases} u_{y=d} = 0 \\ \partial u / \partial y (y=0) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $d$ —平行板的半宽度(mm);  $y$ —从中心线开始计算的距离(mm)。方程(13)为二阶常微分方程式,二次积分并用方程(14)的边界条件确定两个积分常数,从而得到平行板间充分发展区的速度分布为

$$u = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \left( \frac{d^2 - y^2}{2} \right) \quad (15)$$

由于速度分布对称于管中心线,因此,可取横截面积的一半确定平板间按质量的平均速度:

$$u_m = \frac{1}{\rho d} \int_0^d \rho u dy = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{d^2}{3} \quad (16)$$

解上式得

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{3\mu u_m}{d^2} \quad (17)$$

联立方程(15)和(17)解得,在水平平行平板窄缝流道内速度分布如下:

$$\frac{u}{u_m} = \frac{3}{2} \left[ 1 - \left( \frac{y}{d} \right)^2 \right] \quad (18)$$

由方程(18)知,当  $y = d = \delta/2$  时  $\mu = 0$ ,即壁面处流体速度为零;当  $y = 0$  时,即在窄缝中心平面任意点速度最大,此时  $\mu_{\max} = 3u_m/2$ 。

为了研究不同窄缝间隙内流体速度分布,根据方程(18),本文选取间隙  $0 \sim 3$  mm,步长为  $0.5$  mm 的 6 条平板流道,利用 MATLAB 绘制流道速度分布如图 5。

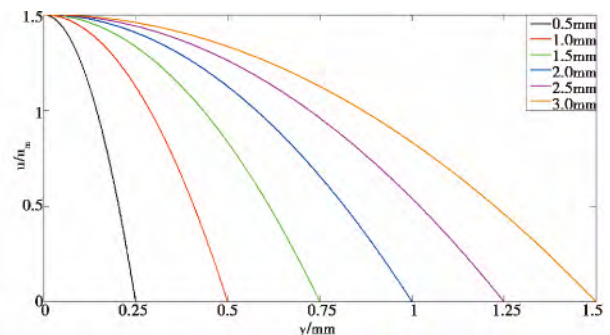


图 5 不同窄缝流道间隙内流体速度分布

Fig.5 The distribution of fluid velocity in the different gap size channel

由图 5 中分析可得出两个结论: 1. 对于同一流道,随着动点向壁面靠近过程中,该点处速度逐渐减小,壁面处速度为零; 2. 对于不同间隙流道的同一位置,流道间隙越大该点处速度也越大,这是因为对于本流道,该点处位置更接近间隙中心,和前文结论一致,间隙中心处速度最大。

根据图 2 中物理模型,沿着间隙的某一轴向展开,即为平板间隙,其当量直径为

$$D_h = 4A_c/U \quad (19)$$

其中  $A_c = \pi(R^2 - r^2)$ ,即根-土间隙横截面的面积为外径圆面积与内径圆面积之差,湿润周边长为  $U = 2\pi(R + r)$ ,化简方程(19)得

$$D_h = 4A_c/U = 2d \quad (20)$$

根据雷诺数方程

$$R_e = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (21)$$

联立方程(18)、(20)和(21)解得

$$u = \frac{3}{2} \left[ 1 - \left( \frac{y}{d} \right)^2 \right] \cdot u_m = \frac{3\mu R_e}{4\rho d} \left[ 1 - \left( \frac{y}{d} \right)^2 \right] \quad (22)$$

式中  $d$ —间隙半宽度  $\rho$ —水的密度  $\mu$ —动力粘性系数。

### 4.2 不同间隙速度分布

根-土间隙中水流速度的大小与雷诺数和流体所处的位置有关,对于同一间隙,在相同的流态下,

越靠近间隙的壁面,流体的速度越小,壁面处流体速度为零。根据方程(22),代入已知参数化简得到根 - 土间隙为 0.5 ~ 3.0 mm 流道内水流速度方程如下:

$$\begin{cases} u = 9.03 \times 10^{-6} R_e (1 - 16y^2) & \delta = 0.5 \text{ mm} \\ u = 4.52 \times 10^{-6} R_e (1 - 4y^2) & \delta = 1.0 \text{ mm} \\ u = 3.01 \times 10^{-6} R_e (1 - 1.78y^2) & \delta = 1.5 \text{ mm} \\ u = 2.23 \times 10^{-6} R_e (1 - y^2) & \delta = 2.0 \text{ mm} \\ u = 1.81 \times 10^{-6} R_e (1 - 0.64y^2) & \delta = 2.5 \text{ mm} \\ u = 1.51 \times 10^{-6} R_e (1 - 0.44y^2) & \delta = 3.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (23)$$

式中  $u$ —根 - 土间隙水流速度(mm/s)  $\delta$ —间隙宽度(mm)。

由方程(23)可知,相同流态时,速度  $u$  是关于变量  $y$  的二次函数,且函数开口向下,即速度  $u$  在区间  $0 \sim \delta$  内有最大值,两壁面处即为函数的两实数根(图 6)。

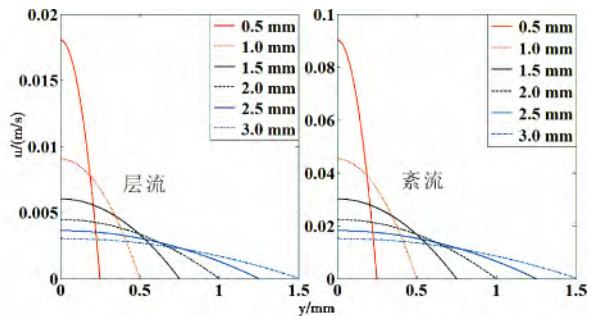


图 6 根 - 土间隙不同位置点速度分布

Fig. 6 The velocity distribution of different points in soil-root interstice

另外,对同一间隙的相同位置点  $y$  而言,速度  $u$  一定且是关于  $R_e$  的正比例函数,此时,取位置  $y = \delta/4$  处水流速度作为该流道速度,并绘制其  $s - t$  图像(图 7)。为了更加直观展现  $u$  随  $R_e$  及  $y$  在空间上的变化,根据方程(23),利用 MATLAB 软件绘制三者间的三维图像(图 8)。本文以根 - 土间隙为 0.5 mm 和 1.0 mm 为例。

无论是对于同一间隙还是不同的根 - 土间隙的层流区或紊流区,间隙内给定的位置点速度  $u$  是关于  $R_e$  的一次函数。在相同的流态下,速度对间隙的变化十分敏感(图 8),间隙宽度为 0.5 mm 和 1.0 mm 流道内,前者速度几乎是后者的两倍。这表明根 - 土间隙内水分下渗速度随间隙的减小而增大。

土体中植被根系主要集中在地表下 0 ~ 30 cm

范围内,在更深层土体中根系密度大幅衰减。根据头寨 2 号和 3 号试验点进行渗透试验发现,在地表下 0 ~ 30 cm 范围内水分的渗透速度范围分别 0.037 ~ 0.136 mm/s 和 0.017 ~ 0.526 mm/s。根据方程(23)计算得到根 - 土间隙为 0.5 ~ 3.0 mm,步长为 0.5 mm 流道内水流速度如表 4 所示。

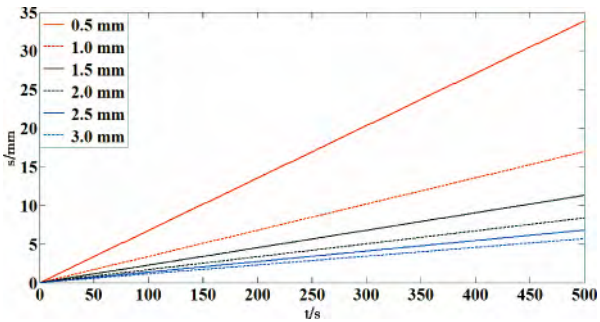


图 7 不同间隙宽度  $s - t$  图像

Fig. 7 The  $s - t$  image of different gap width

根据图 8,同一流道在不同的流态下流道中水分入渗的速度不同,紊流时流体速度比层流时速度大;另外,在相同的流态下随着流道间隙的增加流体的速度逐渐减小,导致这一现象的原因可能是受到湿润周的影响,因为湿润周越大摩擦阻力也越大。通过对头寨 2 号和 3 号试验点现场试验研究发现,在降雨条件良好的情况下,根 - 土间隙的导流作用十分显著,部分试验成果见图 1。另外,将表 4 中试验值与理论计算值进行对比分析知,在 2 号和 3 号试验点土体中根 - 土间隙的大小主要集中在 0.5 mm 和 1.0 mm,这些土体大孔隙对降雨入渗起到了至关重要的作用。

表 4 不同根 - 土间隙流道水流速度

Table 4 The water flow speed in different soil-root interstice

$\delta$ /mm	$u$ 理论值	$u$ 实测值(2#)	$u$ 实测值(3#)
	Theoretical value /(mm/s)	Measured value /(mm/s)	Measured value /(mm/s)
0.5	0.027 ~ 0.203		
1.0	0.014 ~ 0.102		
1.5	0.009 ~ 0.068	0.037 ~ 0.136	0.017 ~ 0.526
2.0	0.007 ~ 0.050		
2.5	0.005 ~ 0.041		
3.0	0.005 ~ 0.034		

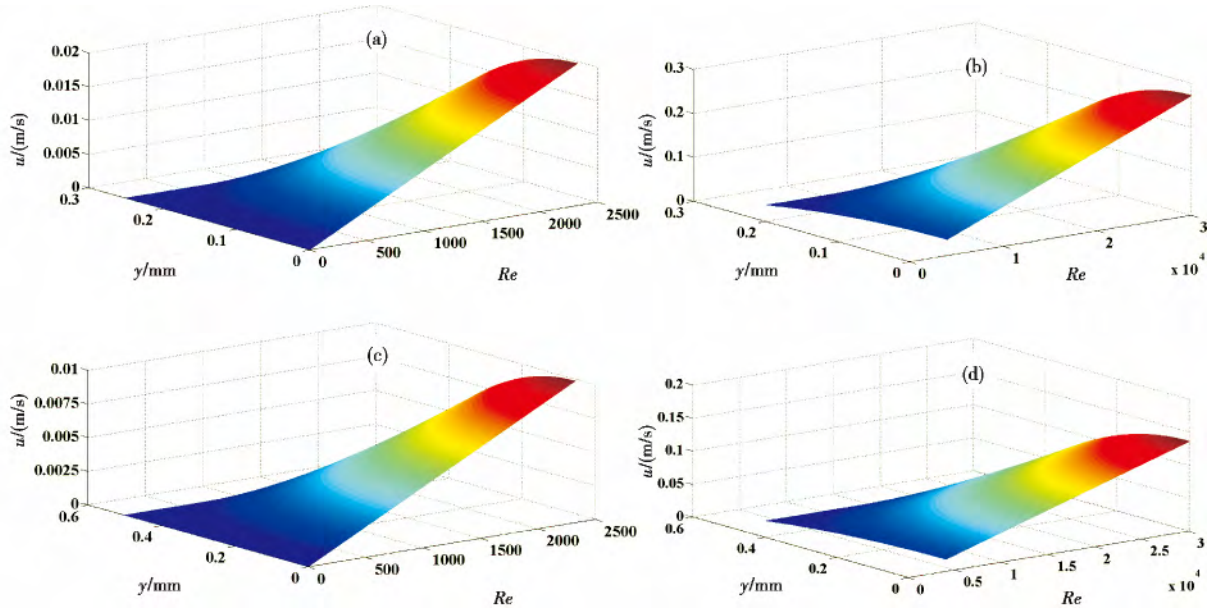


图 8  $u$   $Re$   $y$  三维图像 ( (a)、(b) :  $\delta = 0.5$  mm (c)、(d) :  $\delta = 1.0$  mm )

Fig. 8 The three-dimensional image of  $u$   $Re$   $y$  ( (a)、(b) :  $\delta = 0.5$  mm (c)、(d) :  $\delta = 1.0$  mm )

## 5 根 - 土间隙与强降雨入渗

根据多次现场和室内渗透试验研究发现,云南昭通头寨和呈贡小李山植被发育斜坡区,良好的入渗条件使得地表径流十分微弱。在头寨试验区地表下 0 ~ 20 cm 土层范围内,植被根系质量密度为 26.849 g/kg,渗透率为 0.331 230 cm/s,而呈贡段家营小李山植被的根系密度为 15.341 g/kg,其渗透率为 0.012 605 cm/s,前者的根系质量密度还不到后者的两倍,渗透速率却是后者的 26.28 倍,由此可见,植被根系对水分入渗的影响是十分显著的。对头寨试验区和呈贡试验区相同深度不同根系密度进行双环渗透试验,每个试验区共两个试验点(头寨 1、头寨 2、呈贡 1 和呈贡 2),每个试验点分 3 层进行试验,分别为无挖深、挖深 10 cm 和挖深 60 cm。随着观测时间的增加,渗透速度趋于稳定并最终达到饱和渗透速度,试验结果见图 9 ~ 图 11。

从图 9 ~ 11 中分析可得: 1. 同一土层深度头寨土体渗透速度始终高于呈贡试验区土体渗透速度; 2. 同一试验区土体渗透系数随深度逐渐减小; 3. 头寨试验区土体的饱和渗透速度与初始渗透速度差异很大,而呈贡试验区的饱和渗透速度与初始渗透速度波动不大。导致以上三个结果的原因可能是土体中根系随深度的增加逐渐衰减,相比之下,头寨土体根系衰减强度高于呈贡试验区。徐则民等<sup>[13]</sup>研究

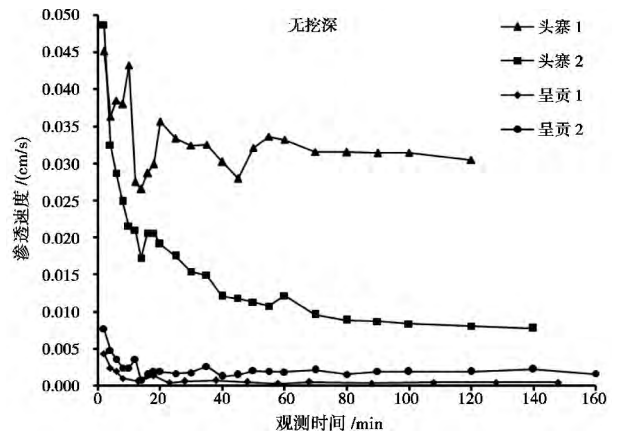


图 9 渗透速度随时间的变化(无挖深)

Fig. 9 The change of seepage velocity with time( No digging)

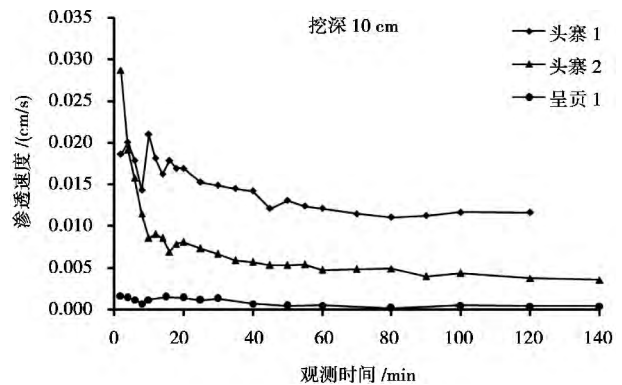


图 10 渗透速度随时间的变化(挖深 10 cm)

Fig. 10 The change of seepage velocity with time( Dig deep 10 cm)



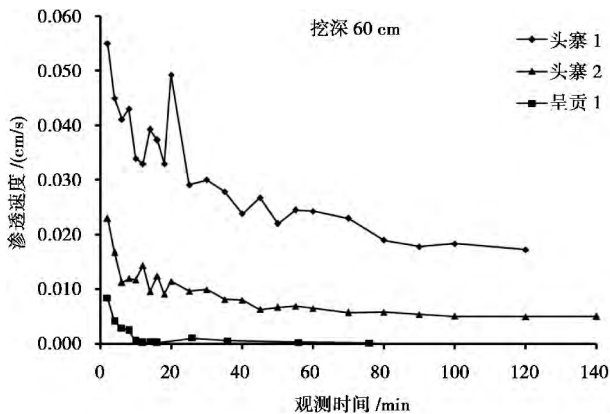


图11 渗透速度随时间的变化(挖深60 cm)

Fig. 11 The change of seepage velocity with time (Dig deep 60 cm)

认为,尽管某些深根性植物的根系可以到达地下5 m,但在这一深度范围,根系总密度都已大幅衰减。在滑面埋深大于4.5 m的深层滑坡的防治方面,其功效是十分有限的。因此,在长时间降雨过程中,植被根系的导流特性很可能成了诱发滑坡、边坡失稳的主要因素。

土体大孔隙占土体孔隙的比例约为0.32%,却可传导90%的土体水流量<sup>[14-15]</sup>。根-土间隙是土体大空(孔)隙系统重要组成部分。在降雨过程中,这些稳定的大空隙内将形成流态复杂、对地下水补给极为重要的优先流,这将加快、加大地下水获得补给的时间及补给量。植被的影响是十分复杂的,植被及其枯落物对降雨的截留及再分配作用不可忽视<sup>[16]</sup>。

植被发育斜坡土体中根-土间隙和前文所述的三类大孔隙一样,均是土体大孔隙系统重要的组成部分。在降雨过程中,这些稳定的大空隙内将形成流态复杂、对地下水补给极为重要的优先流<sup>[17-19]</sup>,根-土间隙的导流作用将加快、加大地下水获得补给的时间及补给量,极大地优化了地下水的补给环境,提高了地下水的径流模量。地下水是斜坡蠕变、滑坡孕育及失稳的最主要的诱发因素<sup>[20]</sup>,这对滑坡的失稳起到了促进作用。

## 6 讨论

本文对头寨植被发育斜坡土体剖面现场调查、试验,并结合作者提出的模型计算得到不同根-土间隙流道阻力特性与 $R_e$ 之间的关系,同时对流道内影响水分下渗速度主要因素进行了初步讨论。结果

表明:相比传统的阻力计算经验公式以及模型一,改进的KAYS阻力模型(模型二)研究根-土间隙流道的阻力特性更贴近实际情况,具有一定的实用性;另外,基于纳维埃-斯托克司方程式二次积分化解得到不同根-土间隙流道内水分下渗速度分布,其结果基于水分动态测量过程,从一定程度上反映了土体水分与根-土间隙的关系。研究发现,头寨植被根系分布在0~100 cm,也有少许分布在100 cm以下范围,而主要集中在0~20 cm。间隙宽度主要集中在0.5~1.0 mm之间,间隙内水分下渗速度主要分布在区间0.014~0.203 mm/s内,计算结果比实测值略低,原因可能是忽视了土体中根系的空间分布,即根-土间隙的连通性,但模型预测的精度还是令人满意的。有学者指出,在土壤非饱和带中的大孔隙连通程度比其孔径大小对土壤水分运动的影响更重要<sup>[21]</sup>。因此,若能把根-土间隙尺寸范围与其平均体积、弯曲程度之间的空间组合形式和其连通程度相结合,共同分析其对土体水分运动的影响,能够从很大程度上反映根-土间隙对导流入渗的贡献。该研究结果仅是一些初步的尝试,但也为土体大孔隙流的研究提供了重要的科学视野,有关根-土间隙导流特性方面的研究还有待进一步深入。

## 7 结论

综上所述,本文基于多次室内外试验数据,研究植被发育斜坡土体中根-土间隙的导流特性,得出以下结论:

1. 根-土间隙单相流动的阻力系数远大于圆管内的阻力系数,原因主要是受到截面湿润周的影响,湿润周越大阻力系数也越大。
2. 根-土间隙大小对流道内单相流体阻力特性的影响与 $R_e$ 有关,间隙大小对流动摩擦阻力系数的影响随 $R_e$ 的减小而减弱。
3. 头寨植被发育区根-土间隙宽度主要集中在0.5~1.0 mm之间,间隙内水分下渗速度主要分布在区间0.014~0.203 mm/s内,这些土体大孔隙对降雨入渗的导流作用十分显著。
4. 对于根-土间隙宽度为0.5~3.0 mm,步长为0.5 mm的流道,相邻两流道流体速度,前者是后者的两倍左右,即在相同的时间内,前者流道内水分下渗的深度是后者的两倍。
5. 在植被发育地区,根-土间隙的存在使得地

表径流十分微弱,土体水分通过根-土间隙能快速下渗。这极大地优化了地下水的补给环境,提高了地下水的径流模量,对滑坡的失稳起到了促进作用。

## 参考文献(References)

- [1] Shakoor A, Smithmyer A J. An analysis of storminduced landslides in colluvial soils overlying mudrock sequenn-ces, southeastern Ohio, USA[J]. Engineering Geology, 2005, 78(3/4): 257-274
- [2] Ma Dongtao, Zhang Jinshan, Feng Zili, et al. Main causes of the landslide debris flow and torrential flood disasters on July 20, 2004 in Yingjiang of Yunnan and the disaster reduction measures[J]. Disaster Science, 2005, 20(1): 67-71 [马东涛, 张金山, 冯自立, 等. 2004. 7. 20 云南盈江滑坡泥石流山洪灾害成因及减灾对策[J]. 灾害学, 2005, 20(1): 67-71]
- [3] Cardinali M, Galli M, Guzzetti F, et al. Rainfall induced landslides in December 2004 in south-western Umbria, central Italy: types, extent, damage and risk assessment[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, 6: 237-260
- [4] Lu Guangyao, Sun Zhongning, Wang Jing, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of flow in a narrow annular duct[J]. Power Engineering, 2005, 25(2): 275-279 [路广遥, 孙中宁, 王经, 等. 窄缝环形流道内流动传热特性的实验研究[J]. 动力工程, 2005, 25(2): 275-279]
- [5] Sun Zhongning, Sun Licheng, Yan Changqi, et al. Experimental investigation of single-phase flow friction in narrow annuli[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 25(2): 123-127 [孙中宁, 孙立成, 阎昌琪, 等. 窄缝环形流道单相摩擦阻力特性实验研究[J]. 核动力工程, 2004, 25(2): 123-127]
- [6] Kays W M. Convective heat and mass trass transfer[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1996: 342
- [7] Wu Yulin, Liu Shuhon. Viscous fluid mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. [吴玉林, 刘树红. 粘性流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.]
- [8] Wambsganss M W, Jendrzecyk J A, France D M, et al. Frictional pressure gradients in two-phase flow in a small horizontal rectangular channel[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1992, 5(9): 40-56
- [9] Mishima K, Hibik I, Nishihara H. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts[J]. Int J Multiphase Flow, 1993, 22(3): 703-712
- [10] Olsson C O, Sunden B. Pressure drop characteristics of small-sized tubes[J]. ASME Paper, 1994, 94(5): 1-12
- [11] Xie Qingqing, Yan Changqi, Cao Xiaxi, et al. Experimental study on single-phase flow characteristics in narrow rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(2): 3-4 [谢清清, 阎昌琪, 曹夏昕, 等. 窄矩形通道内单相水阻力特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(2): 3-4]
- [12] Brighton J A, Jones J B. Fully developed turbulent flow in annuli[J]. J Basic Eng, 1964, 86: 835-844
- [13] Xu Zemin, Huang Runqiu, Tang Zhengguang, et al. Limitations of biotechnical slope protection and contribution of vegetation to deep seated landslide preparation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 439-440 [徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 439-440]
- [14] Moidrup P, Olesen T, Schionning P, et al. Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(8): 94-100
- [15] Moidrup P, Olesen T, Komatsu T, et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases[J]. Soil Sci Am J, 2001, 65(4): 613-623
- [16] Gao Dongdong, Wu Yon, Wang Xiaotong. Water cycle and groundwater recharge of small watershed rainfall process in a mountain forest system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 11-12 [高东东, 吴勇, 王楠楠. 山地森林系统小流域降雨过程水循环与地下水补给[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 11-12]
- [17] Qin Yaodong, Ren Li, Wang Ji. Review on the study of Macropore Flow in soil[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(2): 203-207 [秦耀东, 任理, 王济. 土壤中大孔隙流研究进展与现状[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 203-207]
- [18] Elkadi A I, Rikari J D. Identifying variably saturated water-flow pattern in a steep hillslope under intermittent heavy rainfall[J]. Hydrogeology Journal, 2001, 9: 231-242
- [19] Scanlon B R, Healy W, Cook P G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 18-39
- [20] Shen Zhaoli, Wang Yanxin. Review and outlook of water rock interaction studies[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 127-133 [沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(2): 127-133]
- [21] Shi Hui, Chen Fengqin, Liu Shirong. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 507-512 [石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 507-512]

## The Diversion Characteristics of the Soil-root Interstice on a Vegetated Slope

WANG Bangtuan<sup>1</sup>, XU Zemin<sup>2</sup>, WANG Bangyuan<sup>3</sup>

(1. Department of Earth Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

3. Department of Yunnan Geological Engineering Survey and Design Institute, Kunming 650041, China)

**Abstract:** The moisture or solution migration in soil with heterogeneity in space and time. This paper based on the distribution and vegetation development test area of Touzhai Gully (in Zhaotong of Yunnan, China) and Duanjiaying (in Cheng'gong of Yunnan, China) as the research background. In the experimental area, respectively using methylene blue and rhodamine B solution dyed tracer penetrant test many times and found that the diversion phenomenon is very obvious, the diversion function is likely more important than the traditional three kinds of soil macropore, however, the research of soil-root interstice is relatively lacking at home and abroad. The theoretical calculation was performed to predict the speed of the fluid and the flow characteristics for the developed flow in soil-root interstice with the gap size of 0.5 ~ 3.0 mm, the step length is 0.5 mm. The calculation results are in good agreement with experimental data. In addition, the gap size of the soil-root interstice has great impact upon the flow characteristics. The decrease of the gap size reduces the friction factor, and discussed the influence factors of water infiltration in the same channel and different interstice width. The results show that the higher the Reynolds number, the larger the effect of the gap size upon the friction coefficient during single-phase flowing through the soil-root interstice; the effect of the gap size upon the friction coefficient depends on the Reynolds number and will decrease with the decrease of the Reynolds number. The soil-root interstice width of vegetation development in soil slope are mainly concentrated in 0.5 ~ 1.0 mm in Touzhai, the speed of water infiltration is the range of 0.014 ~ 0.014 mm/s. On the same area, the infiltration rate of Touzhai Gully test area is 26.28 times to Duanjiaying test area. The existence of soil-root interstice greatly promoted the rapid infiltration of the soil moisture, the results show that the contribution of soil-root interstice macropore to the landslide preparation is notable.

**Key words:** a vegetated slope; landslide; rainfall infiltration; soil-root interstice