

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0453-06

三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析

肖成志^{1,2}, 孙建诚^{1,2}, 李雨润^{1,2}, 刘晓朋¹

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300132; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300132)

摘 要: 基于水力学和河流动力学的基本原理, 利用坡面糙率和拦污栅模型分别模拟三维土工网垫和坡面植被作用, 建立了三维土工网垫和坡面植被引起的坡面沿程水头损失和径流局部水头损失计算式, 并建立三维土工网垫植草护坡时坡面径流速度计算表达式, 将颗粒启动速度引入分析坡面土颗粒流失初始的启动流速, 进而通过坡脚流速和坡面土颗粒启动流速的对比分析和通过分析坡角、植株密度、网垫和植被类型对坡脚流速的影响来研究三维土工网垫植草护坡的防径流冲刷特性。结果表明, 坡脚流速随坡角增大而增大; 网垫类型对坡脚流速影响不明显, 但同无护坡时相比网垫能显著降低坡脚流速; 坡脚流速随植株和叶部倾角增加而变小, 且随植株密度增大而减少, 并在考虑不同边坡土质的颗粒启动速度与坡脚流速相等时计算得到护坡所需的植株最小密度。

关 键 词: 三维土工网垫植草; 生态护坡; 坡脚流速; 土颗粒启动流速; 水头损失; 径流

中图分类号: TV 223.4

文献标识码: A

Mechanism analysis of ecological slope protection against runoff erosion by grass jetting on 3D geomat

XIAO Cheng-zhi^{1,2}, SUN Jian-cheng^{1,2}, LI Yu-run^{1,2}, LIU Xiao-peng¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China;

2. Technology and Research Center of Civil Engineering of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

Abstract: Combining with theories of hydraulics and river dynamics, numerical expressions of head loss resulting from different types of 3D geomat with roughness and local head loss of runoff resulting from grass are given respectively; and then formula calculating runoff velocity of slope surface for grass jetting on 3D geomat and toggling velocity of soil aggregate based on the theory of river dynamics are established. Furthermore, on the basis of calculation results, comparative analyses are made to examine effects of slope angles, types of 3D geomat, types of grass, and density of grass on runoff velocity of slope toe. The results show that the runoff velocity of slope toe increases with increase of slope angle; and types of 3D geomat do not affect significantly on runoff velocity, but can lower remarkably runoff velocity compared with non-slope protection; runoff velocity of slope toe decreases with increase of inclination angle for base and leaf of grass. In addition, the minimum density value of grass can be achieved by supposed to be equal of toggling velocity for soil and runoff velocity of slope toe. The results about mechanism of grass jetting on 3D geomat could be used to guide project practices.

Key words: grass jetting on 3D geomat; ecological slope protection; runoff velocity of slope toe; toggling velocity of soil aggregate; head loss; runoff

1 引 言

作为新型的护坡形式, 生态护坡技术在一些发达国家或地区得到成功的使用, 如美国 60% 以上的河岸边坡采用生态护坡技术治理, 日本新标准甚至将生态护坡作为护坡工程的基础而优先推荐使

用^[1]。这种护坡技术充分利用边坡地形、土质或地区气候等特点, 借助植物的自组织和自修复能力, 在边坡表面按一定的组合方式形成一层植被, 利用植物的生长活动达到根系加筋、蒸腾排水、茎叶防冲蚀、防坡面径流入渗的目的。而且, 坡面形成的茂盛地表植被以及浅层盘根错节的根系, 可以有效

收稿日期: 2009-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50909032); 河北省自然科学基金项目 (No. E2009000054); 河北省教育厅项目 (No. 2007431)。

第一作者简介: 肖成志, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事土工合成材料及其岩土力学基本理论与数值分析等方面的科研和教学工作。

E-mail: xiaochengzhi2@sina.com

抑制雨水对边坡的侵蚀、减小孔隙水压力和土体自重[2]。因此,国内外工程研究人员在实践与理论研究的基础上提出了一系列生态防护技术。欧美国家最初常采用活枝捆垛、树枝扦插和压条、绿篱等方法防止边坡受雨水侵蚀,并随后推出了液压喷播技术和网植草护坡方法[3]。基于欧美国家的实践经验,日本推出了纤维土绿化工法和高次团粒 SF 绿化工法[1],在很大程度上促进了生态护坡的发展。国内在边坡生态护坡方面的应用研究相对较晚,自从 1993 年引入土工材料植草护坡技术后,各类土工材料结合植草护坡技术开始在道路边坡工程中得到应用,王钊[4]和李和平等[5]较早介绍了边坡客土喷播植草护坡技术;章梦涛等[6]以土体为主要材料,硅酸盐水泥为粘结材料开展了喷混植生的室内外试验;许文年[7]开发了植被混凝土边坡绿化技术;肖衡林等[8]研究了网垫强度和类型及植被对护坡的抗冲刷性能。但相比生态护坡在工程实践中的应用而言,当前在生态护坡机制方面的研究相对较少。鉴于此,结合水力学与河流动力学中的基本理论,本文研究三维土工网垫植草护坡防坡体径流冲刷的机制研究。

2 三维土工网垫植草防径流冲刷机制分析

为了研究三维土工网垫植草护坡防径流冲刷机制,对护坡坡体作出如下基本假设:①边坡土体颗粒存在一个最小启动速度 v_c 。②坡面沿程水头损失和植被造成的局部水头损失相互独立且互不影响。③由于坡面三维土工网垫和植草的因素,假定坡体流体处于紊流粗糙区,流速呈现如图 1 所示的阶梯型变化趋势。④三维土工网垫植草护坡坡面的草体覆盖率为 100%,且植被沿整个坡面均匀分布,如图 2 所示。

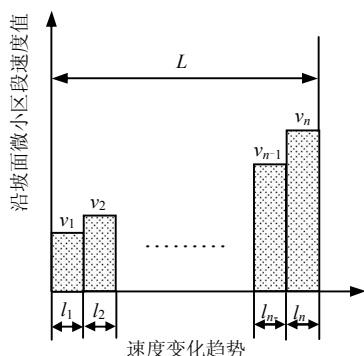


图 1 护坡体径流速度变化

Fig.1 Changing model of surface runoff velocity

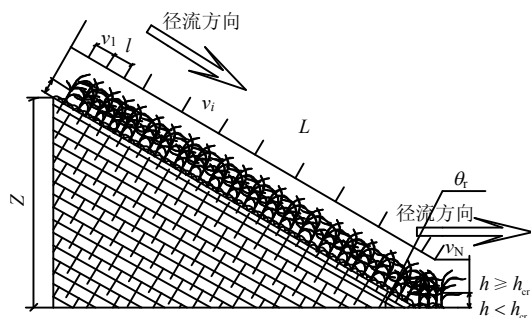


图 2 三维网垫喷播植草护坡体径流模型剖面

Fig.2 Profile of runoff model of grass jetting on 3D geomat

2.1 护坡坡面土体颗粒的启动速度公式

考虑到边坡抗冲刷效果受边坡岩土材料的物理性质差异的影响,这里对不同边坡土质颗粒的典型颗粒直径,采用张谨瑞[9]提出的颗粒受到水流冲刷时存在一个最小的启动速度计算式,即

$$v_c = \left(\frac{h}{D_m} \right)^{0.14} \cdot \sqrt{17.6 D_m \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{D_m^{0.72}}} \quad (1)$$

式中: h 为径流深度 (m); D_m 为边坡典型土颗粒直径 (m); γ_s 、 γ_w 分别为土体天然重度、水重度 (kN/m^3)。

2.2 三维网垫植草护坡工程中水头损失计算

2.2.1 三维土工网垫引起的坡面沿程水头损失

溅蚀、面蚀和沟蚀是边坡工程常见的 3 种雨水侵蚀类型。当采用三维土工网垫植草护坡时,考虑到网垫与密布的植被根系紧密交织,有助于根系更均匀和紧密地合为一体,形成牢固的三维土工网垫、植被和土体的紧密复合体,因此,沟蚀基本上不会在坡面上发育。此外,由于坡面植草的叶部遮挡,溅蚀也不是网垫植草护坡时主要的坡面破坏方式,因此,这里重点考虑的径流冲刷破坏方式为面蚀。

计算坡面沿程水头损失时,采用水力学中应用较多的 Chezy 公式[10],即

$$h_f = \frac{\eta^2 v^2}{R^{4/3}} L \quad (2)$$

式中: v 为坡面上微小段内紊流的近似恒定速度 (m/s); η 为坡面糙率,表征水流通过处边界形状和粗糙程度的量纲为一的综合系数,主要受三维土工网垫类型的影响,由出露地表相对值加权平均得到,见表 1; R 为水体的水力半径,分析时认为坡面水体为明渠流体, R 取为坡面的径流深度 h (m); L 坡体长度 (m)。

表1 网垫类型对坡面糙率 η 的影响
Table 1 Roughness η varied with type of 3D geomat

网垫类型	网垫拉伸强度 /(kN/m)	网垫层数 /层	裸露地表相对值 Δ /cm	η
EM2	0.8	2	0.35~0.45	0.024
EM3	1.4	3	0.40~0.55	0.029
EM4	2.0	4	0.55~0.70	0.031
EM5	3.6	5	0.65~0.85	0.034

由假设③、④可知，沿坡面水流速度在两微小区域的交界处发生变化，则可利用式(2)求出水流通过图2中的每横排植株后整个坡面沿程水头损失为

$$H_f = \sum_{i=1}^N \frac{\eta^2 l_i}{R^{4/3}} v_i^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\eta^2 l}{R^{4/3}} v_i^2 \quad (3)$$

式中： H_f 为雨水流经整个坡面后的沿程水头损失(m)； $l_1 = l_2 = \dots = l_i \dots = l_N = l$ 为图2所示坡面上相邻两排植物间的间距(m)； N 为长 L 的坡面上植株横排数，且满足^[1]：

$$N = L \sqrt{\rho_g} \quad (4)$$

式中： ρ_g 为坡面上的草本植株密度(株/平方米)。

2.2.2 坡面植被引起的坡面水流局部水头损失

考虑采用三维土工网垫植草护坡坡面时坡面植株自上而下成横排排列，如图3所示。为计算水流通过每横排植株时的水头损失，利用水力学中拦污栅模型^[11]可得单个横排植株的局部水头损失：

$$h_j = K \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \sin \left(\alpha \frac{v_i^2}{2g} \right) \quad (5)$$

式中： h_j 为水流通过单个横排植株时的水头损失(m)； s 为植株(茎或叶)的宽度(m)； b 为植株(茎或叶)的间距(m)； α 、 β 分别为植株茎部和叶部倾角($^\circ$)； K 为拦污栅条形状系数，这里指植株的茎、叶形状，因茎、叶截面差异，植物上部取2.42，下部取1.67^[11]； g 为重力加速度(m/s^2)。

利用式(5)可得坡面上植株横排数为 N 时整个坡面局部水头损失：

$$H_j = \sum_{i=1}^N K \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \frac{v_i^2}{2g} \sin \alpha \quad (6)$$

式中： H_j 为植被引起的总的坡面局部水头损失(m)，其他符号意义同上。

工程实践表明，当护坡面土体、植被与土工网垫复合体形成后坡面植被覆盖率接近100%，且因茎、叶截面差异而在二者层面间存在一个概率性的

临界高度 h_{cr} ，当坡面径流深度大于 h_{cr} 时， s/b 值要根据植物分蘖特性适当调整，则坡面局部水头损失可表示为

$$\left. \begin{aligned} H_{j1} &= 1.67 \frac{\left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \sin \alpha}{2g} \sum_{i=1}^N v_i^2, & (h \leq h_{cr}) \\ H_{j2} &= 2.42 \frac{\left(\frac{s}{b} \kappa \right)^{4/3} \sin \beta}{2g} \sum_{i=1}^N v_i^2, & (h \geq h_{cr}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： κ 为草本植物分蘖系数，一般在2~8之间取值； κ 、 α 、 β 值均为与植被种类有关的参数； h_{cr} 值与坡面植被种类相关，常用值可取 $h_{cr} = 2 \text{ cm}$ 左右^[1]，则坡面植被引起的总的坡面局部水头损失为

$$H_j = H_{j1} + H_{j2} = \left(1.67 \frac{\left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \sin \alpha}{2g} + 2.42 \frac{\left(\frac{s}{b} \kappa \right)^{4/3} \sin \beta}{2g} \right) \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad (8)$$

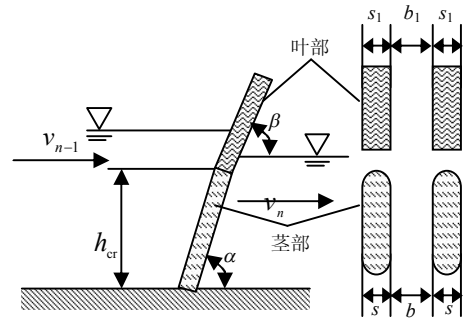


图3 坡面植株的截流拦污栅模型

Fig.3 Schematic model of water screen for grass

2.3 三维土工网垫植草护坡的坡面总水头损失

考虑到坡面植被对雨水的缓冲作用，设定径流初始速度为0，当坡面径流深度大于 h_{cr} ，则沿坡面植被引起的总的局部水头损失为式(8)，结合式(3)可得三维网垫植草护坡时坡面总水头损失为

$$H_w = H_f + H_j = \lambda \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad (9)$$

式中： λ 为引入的总水头损失系数，且 λ 为

$$\lambda = \frac{\eta^2 L}{R^{4/3}} + 1.67 \frac{\left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \sin \alpha}{2g} + 2.42 \frac{\left(\frac{s}{b} \kappa \right)^{4/3} \sin \beta}{2g} \quad (10)$$

当边坡没有生态防护时，由于坡面无植被引起

的局部水头损失, 因此, 总水头损失系数 λ 可简化为

$$\lambda = \frac{\eta^2 L}{R^{4/3}} \quad (11)$$

如图 2 所示, 边坡水流从开始下流到第 1 排植株时的速度为 v_1 , 这个过程满足能量转化方程, 即

$$z_1 = \frac{\zeta v_1^2}{2g} + \lambda v_1^2 \quad (12)$$

考虑到坡面水流处于紊流粗糙区, 故 ζ 值可取 1.2。依次类推, 可以得到从 v_1 一直到 v_N 时坡面上每个长度为 l 的微小区段上存在表达式:

$$z_i + \frac{\zeta v_{i-1}^2}{2g} = \frac{\zeta v_i^2}{2g} + \lambda_i v_i^2, \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

由假设④可知, 坡面上相邻两植株横排间高差为

$$z_1 = z_2 = \dots = z_i \dots = z_N = l \sin \theta = b \sin \theta \quad (14)$$

$$\lambda_N = \frac{\eta^2 l}{R^{4/3}} + 1.67 \frac{\left(\frac{s}{b}\right)^{4/3} \sin \alpha}{2g} + 2.42 \frac{\left(\frac{s}{b} \kappa\right)^{4/3} \sin \beta}{2g} \quad (15)$$

综合式 (13)~(15), 利用数学迭代法并采用计算机编程求解, 通过变化与坡体、网垫和植被相关的变量 η 、 l 、 s/b 、 κ 、 α 和 θ , 可计算得不同条件的坡脚流速 v_N , 该流速为坡面上径流最大流速。

将坡脚流速 v_N 与式(1)中土颗粒启动速度 v_c 比较分析发现, 当 $v_N < v_c$ 时, 则护坡坡面土颗粒不被启动, 坡面土体不会因冲刷而流失; 当坡脚流速 $v_N \geq v_c$ 时, 边坡坡面土颗粒将因水流而启动, 因此坡体会受到不同程度的冲刷破坏。

3 护坡坡面径流流速及其影响因素分析

3.1 坡面糙率 η 对坡脚流速 v_N 的影响

以边坡坡角 $\theta = 45^\circ$ 、坡高 $Z = 5$ m 的三维土工网垫植草护坡为例来分析糙率对坡脚流速的影响。此时, 坡面长 $L = 5\sqrt{2}$ m, 沿坡面的植株横排数 N 为 1 000, 且考虑到一般坡面草本植株的直径为 0.005 m 左右, 则 $s/b = \sqrt{2}/2$, 草本植物分蘖系数 $\kappa = 4$, 植株倾角 $\alpha = 45^\circ$, 植株叶部倾角 $\beta = 30^\circ$, 坡面径流深度取 $h = 0.03$ m, $z_1 = z_2 = \dots = z_N = 0.005$ m,

利用上述参数并由式 (13)~(15) 得到网垫类型及其对应的不同坡面糙率 η 时相应的坡脚流速 v_N , 如表 2 所列。由表 2 可知, 在其他参数不变时, 坡面糙率 η 对坡脚流速 v_N 影响不明显, 但采用三维土工网垫护坡时坡脚流速要明显小于边坡无护坡时, 表明网垫能有效降低坡脚流速, 从而有效地防止坡面冲刷现象。

表 2 坡面糙率 η 值对坡脚处径流流速的影响

Table 2 Effect of roughness η on runoff velocity of slope toe

坡角 $\theta / (^\circ)$	坡长 L / m	三维网垫类型	坡面糙率 η	v_N / (cm/s)
45	$5\sqrt{2}$	EM2	0.024	15.07
		EM3	0.029	15.01
		EM4	0.031	14.98
		EM5	0.034	14.93
		无三维网垫	0.018	15.16

3.2 边坡坡角 θ 对坡脚流速的影响(θ 斜体)

取坡面长 $L = 5\sqrt{2}$ m、 $s/b = \sqrt{2}/2$ 和坡面植株分蘖系数 $\kappa = 4$, 且护坡坡面径流深度 $h = 0.03$ m, 坡面糙率 $\eta = 0.029$, 植株宽度 $s = 0.005$ m, 则 $l = b = \sqrt{2}z_i$, 并通过坡角 θ 的变化来分析对坡脚流速 v_N 的影响, 如图 4 所示。由图可知, 边坡坡脚流速随着坡角增加逐渐增大, 且无护坡时坡脚流速的变化趋势比采用三维土工网垫植草时更加明显, 相同条件下采用三维土工网垫植草护坡处理后, 坡脚流速仅为无护坡时边坡坡脚流速的 1/22 左右。分析网垫植草护坡时坡角对坡脚流速的影响发现, 坡角小于 30° 时, 坡脚流速随坡角增大差距变化明显; 而坡角大于 70° 时在公路护坡中实际意义不大, 因此, 工程实践中采用三维土工网垫植草护坡的适宜边坡坡角为 $30^\circ \sim 70^\circ$ 。

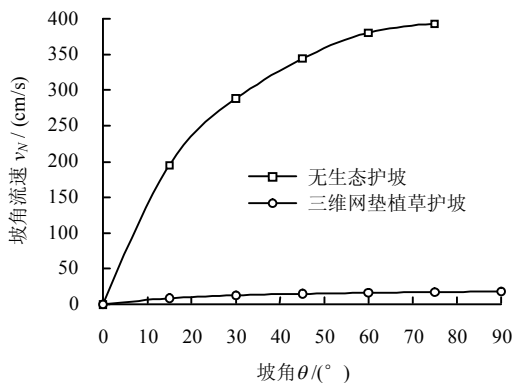


图 4 边坡坡角 θ 对坡脚流速的影响

Fig.4 Runoff velocity of slope toe varied with slope angle

3.3 坡面植被类型对坡脚流速的影响

通过考虑坡面植被类型及其坡面上植被的向光特性对植株茎部和叶部倾角 α 和 β 的影响, 以此利用倾角 α 和 β 的变化来分析植被类型对坡脚流速的影响。针对坡角 θ 为 45° 和坡高为5 m的边坡, 取 $s/b = \sqrt{2}/2$, $\kappa = 4$, $h = 0.03$ m, $L = 5\sqrt{2}$ m, $\eta = 0.029$, $s = 0.005$ m, $z_i = 0.005$, 则坡脚流速随 α 和 β 的变化如表3所列。由表可知, 坡脚流速 v_N 随着植株倾角 α 和 β 的增大而显著减小。因此, 当网垫护坡坡面植被选用刚性较大、茎叶不易弯曲的草种护坡时效果会更明显, 坡面植草的种类应尽量选用植株体低矮, 且分蘖强烈的植物种类, 将增加植草护坡的效果。

表3 边坡植被类型对坡脚流速的影响
Table 3 The effect of types of plant on runoff velocity of slope toe

α / $^\circ$	β / $^\circ$	无生态护坡 v_N / (cm/s)	三维网护坡 v_N / (cm/s)
90	90	344.3	11.03
60	45	344.3	12.86
45	30	344.3	15.01
30	15	344.3	20.67
15	0	344.3	51.50

3.4 植株密度(s/b)对坡脚流速 v_N 的影响

以坡角 θ 为 45° , 坡高为5 m, $\kappa = 4$, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $h = 0.03$ m, $\eta = 0.029$ 和 $L = 5\sqrt{2}$ m时为例, 分析植株密度即 s/b 比值的变化对坡脚流速的影响, 如图5所示。

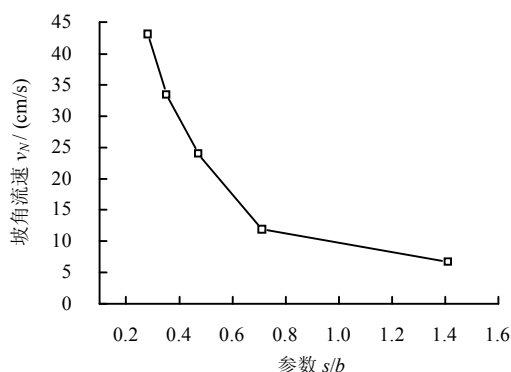


图5 植株密度(s/b)对坡脚流速的影响

Fig.5 Runoff velocity of slope toe varied with s/b

由图5可知, 坡脚流速随 s/b 的增大而逐渐减小, 即护坡坡面植被密度越大时, 植株间距越小, 则坡脚流速相应减小。因此, 在确定护坡坡面土质条件后, 利用式(1)可确定坡面土颗粒启动流速, 此时考虑临界条件即土颗粒的启动速度 v_c 与坡脚

流速相等, 则由式(4)获得坡脚流速小于或等于坡面土颗粒启动速度时, 坡面最小植株密度 $(\rho_g)_{\min} = 11\ 250$ 株/ m^2 。因此, 坡面不发生冲刷现象的植株密度应大于或等于 $(\rho_g)_{\min}$ 。

3.5 三维土工网垫护坡坡面草籽喷洒密度的控制

为了工程实践需要, 针对三维土工网垫植草护坡给出了坡体常用土质条件和地区降雨条件下坡脚流速达到土颗粒启动速度时, 坡面的最小植株密度控制值。

以坡角 θ 为 45° 、坡高为5 m的三维土工网垫植草护坡为例, 坡面植草种类采用比较广泛的草种即高羊茅, 其植物分蘖系数 κ 为4, 植株倾角 α 为 45° , 叶部倾角 β 为 30° , $h_{cr} = 0.02$ m; 坡面糙率 $\eta = 0.029$, $s = 0.005$ m。针对选定的反映降雨强度的径流深度 h 、特定土质(土质典型粒径定义为筛分通过百分率为5%时, 所剩土体颗粒的最小粒径)的情况下, 当临界状态时坡面土颗粒启动速度和坡角流速相等, 计算出护坡坡面植株横排数 N 和坡面植株最小密度 $(\rho_g)_{\min}$, 如表4所列。

当植株最小密度已知时, 通过干粒重、发芽率等参数, 即可确定边坡植物种子的喷洒量。由表4可知, 随着坡面土体中细粒成份增多, 坡面植株最小密度 $(\rho_g)_{\min}$ 的减小; 考虑到雨量大小引起径流深度 h 的不同, 当 h 相对较小或 $h < h_{cr}$ 时, 草本植株分蘖少, 使得坡面水流因植株引起的水流水头损失减小, 进而坡脚流速增大, 则要起到护坡作用的植株最小密度 $(\rho_g)_{\min}$ 也相应增大, 因此, 在实践中护坡体坡面土质应尽可能采用黏性土。另外, 砾类土虽然启动速度也较大, 但考虑到砾质边坡渗透系数大不利于边坡深层稳定性、且平原地区砾质原材料不易获得, 故工程实践中除山区公路外, 一般边坡较少采用砾类土体, 因此, 三维土工网垫植草可以被广泛应用于道路土质边坡上。

4 结 论

(1) 基于水力学和河流动力学的基本原理, 分别利用坡面糙率和拦污栅模型来模拟三维土工网垫和坡面植被作用, 并建立了三维土工网垫和坡面植被引起的坡面沿程水头损失和径流局部水头损失计算式, 由此建立三维土工网垫植草护坡时坡面径流速度计算表达式, 并将颗粒启动速度引入分析坡面土颗粒流失初始的启动流速, 进而通过坡脚流速和坡面土颗粒启动流速的对比分析三维土工网垫植草护坡的防径流冲刷特性。

(2) 三维土工网垫植草护坡时坡脚流速与坡角、

表 4 三维土工网垫植草护坡坡面径流深度 h 和浅层土质对坡面最小植株密度的影响
Table 4 The minimum values of density under different depths and types of soils

径流深度 h /m	土代号	土的名称	粒组含量 /%	细粒土名称	典型粒径 D_m /mm	颗粒启动速度 v_c /(cm/s)	植株最小密度 /(株/平方米)
0.03	SF	含细粒土质砂	5~15		0.156 0	18.68	14 865
	SC	黏土质砂	>15	细粒为黏土	0.016 0	38.21	3 855
	SM	粉土质砂	≤50	细粒为粉土	0.075 0	20.56	12 109
	GF	含细粒土质砾	5~15		2.350 0	38.00	3 855
	GC	黏土质砾	>15	细粒为黏土	0.016 0	38.20	3 855
	GM	粉土质砾	≤50	细粒为粉土	0.075 0	20.56	12 109
	C	黏质土			0.016 0 0.037 5	38.20 26.05	3 855 7 690
0.02	SF	含细粒土质砂	5~15		0.156 0	17.65	20 000
	SC	黏土质砂	>15	细粒为黏土	0.016 0	36.09	8 889
	SM	粉土质砂	≤50%	细粒为粉土	0.075 0	19.43	17 772
	GF	含细粒土质砾	5~15		2.350 0	35.90	8 570
	GC	黏土质砾	>15	细粒为黏土	0.016 0	36.09	8 889
	GM	粉土质砾	≤50	细粒为粉土	0.075 0	19.43	17 772
	C	黏质土			0.016 0 0.037 5	36.09 24.61	8 889 14 867
0.01	SF	含细粒土质砂	5~15		0.156 0	16.02	18 255
	SC	黏土质砂	>15	细粒为黏土	0.016 0	32.73	8 113
	SM	粉土质砂	≤50	细粒为粉土	0.075 0	17.63	17 307
	GF	含细粒土质砾	5~15		2.350 0	32.58	7 692
	GC	黏土质砾	>15	细粒为黏土	0.016 0	32.73	8 113
	GM	粉土质砾	≤50	细粒为粉土	0.075 0	17.63	17 307
	C	黏质土			0.016 0 0.037 5	32.73 22.32	8 113 13 836

三维土工网垫类型、坡面植被类型和植株密度密切相关。坡脚流速随坡角增大而增大；网垫类型对坡脚流速影响不明显，但与无护坡时相比网垫能显著降低坡脚流速；坡脚流速随植株和叶部倾角增加而变小，且随植株密度增大而减少，坡面宜采用植被刚性较大、茎叶不易弯曲的草种护坡。

(3) 当三维土工网垫植草护坡坡面土体为细粒成份较多的黏性土时，坡面土颗粒启动速度较大，此时护坡所需植株最小密度值最小，因此，建议在实际工程中，三维土工网垫植草护坡坡面土体应尽量采用黏性土。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 扈萍, 宋修广, 吴登高. 高速公路边坡植草护坡的根固效应试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 442—444.

HU Ping, SONG Xiu-guang, WU Deng-gao. Experimental research on reinforcement mechanism of expressway slope protection with greensward[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 442—444.

[3] 安保昭. 坡面绿化施工方法[M]. 周庆桐译. 北京: 人民交通出版社, 1988.

[4] 王钊. 国外土工合成材料的研究应用[M]. 香港: 现代知识出版社, 2002.

[5] 李和平, 张瑞强, 张文秀, 等. 水力喷播技术引进及试

验研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 27—30.

LI He-ping, ZHANG Rui-qiang, ZHANG Wen-xiu, et al. Introduction and research of hydroseeding technology[J]. **Bulletin of Soil and Water Conservation**, 1999, 19(2): 27—30.

[6] 章梦涛, 付奇峰, 吴长文. 岩质坡面喷混快速绿化新技术浅析[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 65—66.

ZHANG Meng-tao, FU Qi-feng, WU Chang-wen. Analysis of the “ON” spray vegetation method in fastly greening the rock slopes[J]. **Research of Soil and Water Conservation**, 2000, 7(3): 65—66.

[7] 许文年, 王铁桥, 叶建军. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J]. 水利水电技术, 2002, 33(7): 35—37.

XU Wen-nian, WANG Tie-qiao, YE Jian-jun. Applied study of greening technology on rock slope protection[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2002, 33(7): 35—37.

[8] 肖衡林, 王钊, 张晋锋. 三维土工网垫设计指标的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1800—1804.

XIAO Heng-lin, WANG Zhao, ZHANG Jin-feng. Study on the design indexes of three dimensional geomat[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 25(11): 1800—1804.

[9] 邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[10] GERARD GOVERS, RAFAEL GIMÉNEZ, KRISTOF VAN OOST. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments modeling and field observations[J]. **Earth Science Reviews**, 2007, 84: 87—102.

[11] 孙东坡. 水力学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007.