

文章编号:1000-582X(2010)08-096-07

三维土工网垫植草护坡性能试验

肖成志^{a, b}, 孙建诚^{a, b}, 刘熙媛^{a, b}, 刘晓朋^a

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

摘要:通过边坡模型正交试验,在不同降雨强度下分析了网垫类型、草籽密度、土质和坡度等4个因素对三维网垫植草护坡性能的影响。结果表明,坡面侵蚀模量在模拟小雨时受影响因素显著性高低顺序为草籽密度、坡度、土质和网垫类型,而暴雨时网垫类型对侵蚀模量的影响明显增加,且采用三维网垫植草护坡时坡面侵蚀模量相比无护坡时减少了5倍左右,三维网垫植草护坡抗冲刷效果明显;由网垫、根系和土组成的坡面浅层加筋土复合体的等效黏聚力随深度的增加总体上呈逐渐减少的趋势,且二者之间呈现三次曲线变化关系;坡面采用厚度大的网垫和植物根系密度较大时都会使坡面浅层土的渗透系数增加。

关键词:三维土工网垫;生态护坡;边坡;侵蚀模量;正交试验

中图分类号: TU476

文献标志码: A

Experimental study of properties of slope protection through grass jetting on 3D geomat

XIAO Cheng-zhi^{a, b}, SUN Jian-cheng^{a, b}, LIU Xi-yuan^{a, b}, LIU Xiao-peng^a

(a. Technology and Research Center of Civil Engineering;

b. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, P. R. China)

Abstract: Based on ecological slope protection models by orthogonal tests, comparative experimental study of properties of slope protection through grass jetting on 3D geomat considered types of 3D geomat, density of grass seeds, types of soil and slope gradient are conducted under different rain intensity. The results show that the sequence of sensibilities for erosion modulus is density of grass seeds, slope gradient, types of soil and 3D geomat under the condition of simulating light rain, geomat can play a remarkable role to erosion modulus under the condition of simulating rainstorm, the erosion modulus for slope protection by grass jetting 3D geomat reduces 5 times than non-protection natural slope. Equivalent cohesion of soil-grass-geomat compound decreases with the increase of depth, and curvilinear regression between equivalent cohesion and depth is cubic polynomial expression. Permeability coefficient of surface soil tends to increase with thicker geomat and bigger density of grassroots.

Key words: 3D geomat; ecological slope protection; slope; erosion modulus; orthogonal tests

收稿日期:2010-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678032);河北省教育厅项目(2007431)

作者简介:肖成志(1976-),男,河北工业大学博士,副教授,主要从事土工合成材料及其加筋结构特性的研究,
(E-mail) xiaochengzhi2@sina.com。

边坡失稳破坏的一个重要诱因是降雨对边坡的冲刷,为此国内外在初期常采用混凝土板块、浆砌片石和锚喷支护等形式护坡^[1]。然而这些措施不仅不能恢复植被,反而破坏了自然景观,不利于工程对环保的要求,且施工复杂、相对造价高。因此,边坡植草生态护坡形式应运而生。研究表明,边坡浅层植物根系在提高土壤抗冲刷能力方面作用明显,且抗冲刷能力与植物根系发育程度密切关系^[2-3]。然而,单纯采用植草或种植灌木护坡,因缺乏工程防护在雨量且持续时间长时容易在坡面形成冲沟,不能有效地保护边坡^[4]。三维网垫植草护坡作为新型的生态护坡形式,通过将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,形成牢固的三维网垫、植被和土体的紧密复合体,对坡面浅层土体起到加筋作用,具有很好的水土保持和生态环境保护的作用^[5]。相比而言,国内在三维网垫植草护坡性能的机理研究较少,王钊等^[6]较早绍了客土喷播技术,章梦涛等^[7]以土体为主要材料,硅酸盐水泥为粘结材料进行了喷混植生室内和现场试验,并取得了一些有益结果。许文年等^[8]开发了植被混凝土边坡绿化技术。此外,Wei等^[9]采用试验深入研究了植物根系对生物护坡的机理和作用,肖衡林等^[10]系统研究了三维网垫的强度公式,并分析了网垫强度、网垫尺寸和厚度及植被对护坡的抗冲刷性能。但目前对于影响护坡效果的因素如坡度、土质和网垫类型等综合性能研究却较少。鉴于此,针对三维网垫植草护坡形式,采用正交试验方法,综合考虑边坡坡度、土质、网垫类型和植草密度等 4 个主要影响因素,并采用极差分析各影响因素对三维网垫植草护坡性能的影响程度,进而分析各因素对浅层土体的侵蚀模量、等效黏聚力和渗透系数的影响。

1 试验方案与试验材料

1.1 试验中三维土工网垫类型

试验采用 EM2、EM3 和 EM4 等 3 种绿色三维土工网垫,其产品性能指标参数如表 1 所示。

表 1 三维土工网垫的物理性能指标

网垫类型	EM2	EM3	EM4
单位面积质量/(g·m ⁻²)	220	260	350
平均厚度/mm	10	12	14
纵、横向拉伸强度/(kN·m ⁻¹)	0.8	1.4	2.0
规格宽度/m	2.0	2.0	2.0

1.2 草籽种类及其配合比

边坡模型试验采用的草籽为高羊茅、白三叶和黑麦草,采用混播方式,且草籽配比如表 2 所示。

表 2 试验用草籽种类及配合比 g/m²

草籽种类	α	β	γ
高羊茅	15	24	35
白三叶	4	6	8
黑麦草	15	24	35

1.3 边坡模型试验所用土质

为了对比分析需要,边坡模型中采用三类土体,土体的相关物理性质指标如表 3 所示。

表 3 试验边坡用土的物理性能指标

土体编号	试验用土	塑性指数 I _P	液限 W _L /%	土质描述
a	粉质黏土	13.5	37.4	粉-黏类土
b	黏性土	19.4	35.1	密实黏土,高塑性
c	砂性土	6.7	24.6	细砂质亚砂土,易冲刷

1.4 室外试验模型及试验方案

采用模型试验模拟路基边坡。模型边坡三维网垫植草护坡高度为 0.5 m,每个坡面宽度为 0.5 m,上部模拟自然降雨的喷淋系统。

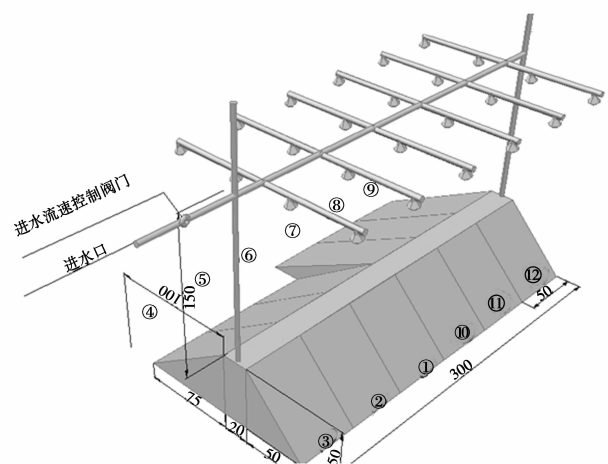


图 1 三维网垫护坡试验模型示意图

试验共 12 个坡面,其中 1-9 号坡面采用 L₉(3⁴) 正交表安排试验,如表 4 所示,试验总数为 9 次,共 4 个影响因素,各 3 个因素水平。另外,10、11 和 12 号坡面为相对正交试验的对比试验,分别为三维网

垫植草护坡、纯植草护坡(不使用三维网垫)和无防护措施。

表 4 边坡模型正交试验表

实验号	坡度 (A)	网垫类型 (B)	土质 (C)	草籽配比 (D)
1	1:1.0	EM2	a	α
2	1:1.0	EM3	b	β
3	1:1.0	EM4	c	γ
4	1:1.5	EM2	b	γ
5	1:1.5	EM3	c	α
6	1:1.5	EM4	a	β
7	1:2.0	EM2	c	β
8	1:2.0	EM3	a	γ
9	1:2.0	EM4	b	α

1.5 试验主要检测指标

1.5.1 侵蚀模量 $Q(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h})$

侵蚀模量值是表征单位时间内坡面上单位面积的侵蚀量,是能够很好表征边坡表面抗径流和击溅侵蚀的重要参数,其计算式为

$$Q = M/ST, \quad (1)$$

式中: M 为被坡面流水冲刷下的土壤颗粒的总干重量, g ; S 为坡面总表面积, m^2 ; T 为降雨总时长, h 。

待模型边坡植株高度达 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 时,进行侵蚀模量试验。试验时各个坡体下面放上集雨槽,用以收集模拟降雨时冲刷下来的泥沙浆。试验在降雨总量恒定时测定 3 种降雨强度下坡面侵蚀模量值。模拟降雨强度分别为:1)小雨:降雨时长为 9 h ,单位时间降雨量 $3.3 \text{ mm}/\text{h}$;2)中雨:降雨时长为 3 h ,单位时间降雨量 $3.3 \text{ mm}/\text{h}$;3)暴雨:降雨时长为 20 min ,单位时间降雨量 $33 \text{ mm}/\text{h}$ 。

1.5.2 模型护坡体浅层加筋复合土体的等效黏聚力

三维网垫喷播植草护坡体浅层土是网垫、根系和土组成的加筋复合体,它们共同受力且协调变形。研究表明^[1],加筋作用使加筋土的“黏聚力”有所增加,即等效黏聚力,且等效黏聚力可由下式计算

$$\Delta c = \frac{\sigma_3 \sqrt{K_p}}{2} \left[\frac{\sigma_1 f - \sigma_1}{\sigma_1 - 2c \sqrt{K_p}} \right], \quad (2)$$

式中: $K_p = \tan^2[45^\circ + \frac{\phi}{2}]$; σ_{1f} 为加筋土样破坏时的最大主应力; σ_1 为无筋土样破坏时的最大主应力; ϕ 为无筋土样的内摩擦角; c 为无筋土样的黏聚力; σ_3

为对土样施加的围压。

等效黏聚力的测定采用应变控制式三轴压缩试验机,压缩剪切过程为不排水不固结试验。用于正交试验分析时三轴试验土样分别取自坡面下深度为 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 和 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 处的加筋土体进行试验分析。

1.5.3 加筋土体的渗透系数 k

三维网垫喷播植草护坡土体的渗透性能是反映护坡效果好坏的重要指标,文中采用变水头试验方法测定护坡土体的渗透系数,正交试验试件分别取自坡面下深度 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 和 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 处土体。

2 多因素正交试验结果分析

为了分析各因素的影响,对一个指定因素在某水平所对应的结果取平均值,即为该水平所对应的指标。文中某一影响因素的每个水平分别对应 3 组试验,取某一水平 3 组试验所对应的检测指标如模拟小雨时侵蚀模量平均值表达为 $Q_a(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。这样,该水平的 3 个试验中,其他因素各个水平出现的概率是一样的,从整体上可以认为其他因素对侵蚀模量影响是相同的。因此,比较 3 个水平所分别对应的 Q_a ,就可以看出该因素对侵蚀模量的影响。例如坡度的 3 个水平 $1:1$ 、 $1:1.5$ 和 $1:2.0$ (见表 5)分别对应的模拟小雨时侵蚀模量平均值 Q_a 分别为 172.82 、 165.97 、 $152.18 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。可见坡角越小,坡面上侵蚀模量越小。依此类推,可以得到其它因素各水平的对应指标极差值,如表 6 所示。

指标的最大值与最小值之差称为极差,极差越大,说明该因素的水平改变对试验结果影响也越大。极差最大的因素也就是最主要的因素,极差较小的因素为较次要的因素^[11]。

实测指标侵蚀模量 Q ,分为模拟小雨和模拟暴雨两种情况。由表 5 和表 6 可知,对于模拟小雨时,可以清楚看到极差值 R 最大值为 153,对应的影响因素为草籽密度;对模拟大雨时,侵蚀模量 Q_b 的极差值出现较大分化,除草籽密度因素外,土质和网垫类型也有较大的极差值,说明小雨情况下影响侵蚀模量的因素主要是草籽密度,而暴雨情况下除草籽密度有最大影响外,其它三因素也有相当影响。

抗剪强度 τ 是对沿坡面深度方向分别为 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 和 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 范围内的测试值,可表 6 可知深度 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 范围内网垫类型对应的极差值最大,而 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 范围内草籽密度对应的极差最大,说明影响护坡浅层土体抗剪强度的关键因素随坡面深度变化而变化。

表 5 正交试验测试结果表

影响因素	试验号	坡度 (A)	网垫类型 (B)	土质 (C)	草籽 密度 (D)	侵蚀模量/ (g/m ² ·h)		抗剪强 度(kPa)		渗透系数 负对数值	
						模拟小雨	模拟暴雨	(0~5 cm)	(5~10 cm)	(0~5 cm)	(5~10 cm)
	1	1:1	EM2	a	α	224.68	492.29	40.15	37.21	5.34	5.37
	2	1:1	EM3	b	β	188.78	455.10	39.25	43.68	4.04	3.94
	3	1:1	EM4	c	γ	105.01	298.78	58.12	49.35	2.79	2.94
	4	1:1.5	EM2	b	γ	56.90	359.44	51.23	51.23	5.05	2.99
正交试验	5	1:1.5	EM3	c	α	230.50	412.09	41.59	41.59	4.54	4.23
	6	1:1.5	EM4	a	β	110.50	200.89	56.67	46.25	3.36	3.36
	7	1:2.0	EM2	c	β	157.01	427.82	46.01	41.02	4.11	3.54
	8	1:2.0	EM3	a	γ	67.78	143.57	55.32	53.24	3.99	3.02
	9	1:2.0	EM4	b	α	231.77	439.75	53.66	41.58	3.86	5.94

实测指标渗透系数 k 分别指沿坡面深度方向上 0~5 cm 和 5~10 cm 处的试验值,由表 6 可知,在 0~5 cm 深度,土工网垫的使用类型是影响加筋土体平均渗透系数的主要因素,而在 5~10 cm 深度,草籽密度成为影响加筋土体平均渗透系数的主要因素。

表 6 各参数对各检测指标的极差分析

检测指标	各检测指标极差值			
	坡度	网垫类型	土质	草籽密度
	(A)	(B)	(C)	(D)
侵蚀模量(小雨)	40	13	36	153
侵蚀模量(暴雨)	91	113	140	181
抗剪强度(0~5 cm)	5.83	10.76	2.67	9.76
抗剪强度(5~10 cm)	2.94	3.02	1.58	11.15
渗透系数(0~5 cm)	0.33	1.78	0.18	0.28
渗透系数(5~10 cm)	0.64	0.35	0.72	2.19

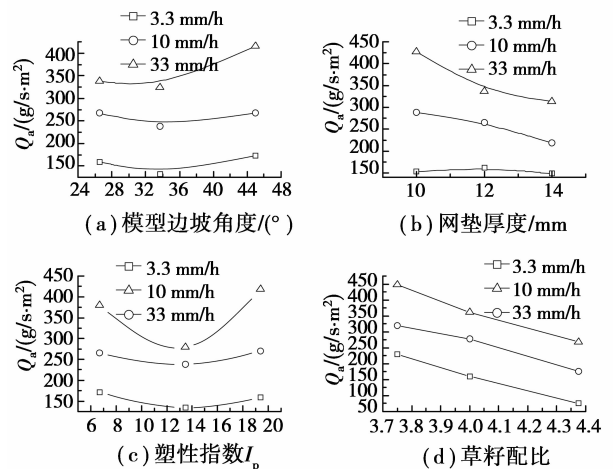


图 2 坡面侵蚀模量随影响因素的变化关系

420 g/s·m²降低到 320 g/s m²,减少趋势明显;降中雨和小雨时,网垫类型对坡面平均侵蚀模量影响不明显。

由图 1(c)可知,在 3 种不同降雨强度下,平均侵蚀模量变化是塑性指数 I_p 最大的黏性土,其原因为小雨时雨水多被坡面植物叶面截留,坡面侵蚀方式以击溅侵蚀为主,饱和黏性土不易被侵蚀,而随着降雨强度增大,侵蚀方式逐渐变为径流侵蚀,而黏性土颗粒粒径偏小,颗粒最小启动速度也偏小且容易被流水启动冲走,故侵蚀模量明显增大。而对于塑性指数 I_p 较小的砂性土质边坡而言,坡面土体在击溅和径流冲刷侵蚀下,都极易被侵蚀带走。

由图 1(d)可知,在图示 3 种降雨强度下,随着草籽播种密度的加大,平均侵蚀模量都几乎都呈线性减小。因此,理论上草籽播种密度应该是在条件

3 三维网垫植草护坡性能分析

3.1 坡面侵蚀模量与影响因素相关性分析

针对 3 种不同降雨强度,分别考虑了坡度、网垫类型、土质和草籽密度对平均侵蚀模量 Q_e 的影响,如图 1 所示。由图 1(a)可知,3 种降雨强度下,随坡角增大平均侵蚀模量 Q_e 总体上呈增大趋势,且边坡越陡 Q_e 增长越明显。另外,坡角 33.69 度即坡度为 1:1.5 时平均侵蚀模量相对较小,表明坡度在 1:1.5 时的三维网垫植草护坡的抗侵蚀效果好

由图 1(b)可知,3 种降雨强度下平均侵蚀模量受网垫类型影响的变化趋势有所不同。降暴雨时 Q_e 随着网垫的厚度增加,平均侵蚀模量从

允许的情况下尽量增加。

3.2 降雨强度对侵蚀模量的影响

选取三维网垫植草防护的 6 号坡体和无防护措施的 12 号边坡为研究对象,在先前的 3 种降雨强度基础上,追加 7 种降雨强度即 3、6、9、12、15、18、21、24、27、30 mm/h 等共 10 组降雨强度进度试验,不同降雨强度下 2 个坡面侵蚀模量的变化如图 2 所示。由图可知,2 个坡面的侵蚀模量随降雨强度的增大而增大,但是相比之下,采用三维网垫护坡的坡体,增大的趋势明显减弱,且模拟最大降雨强度时的侵蚀模量为最小降雨强度时的 2 倍左右,而对于没有护坡的裸露坡体直接接受雨水的击溅和径流侵蚀,随降雨强度增大,侵蚀模量增大明显,模拟最大降雨强度时的侵蚀模量为最小降雨强度时的 10 倍左右。可见由于三维网植草护坡的防护的作用,可以很好的减少强降雨情况下的水土流失量,起到很好的控制边坡侵蚀和水土流失的作用。

3.3 浅层加筋土等效黏聚力

为了分析不同深度处坡面浅层加筋复合体的等效黏聚力,对各个模型边坡分别在 2.5、7.5、12.5、17.5 和 22.5 cm 等 5 个深度处取样分析,并将等效

黏聚力试验值与由公式(2)得的理论值进行对比分析,结果如表 7 所示。由表 7 可知,随着坡面草籽配比提高即草籽密度增大,浅层土的等效黏聚力明显增加,即随着草籽播种密度的增大,植物根系密度增大,土体浅层稳定性也会相应增强。

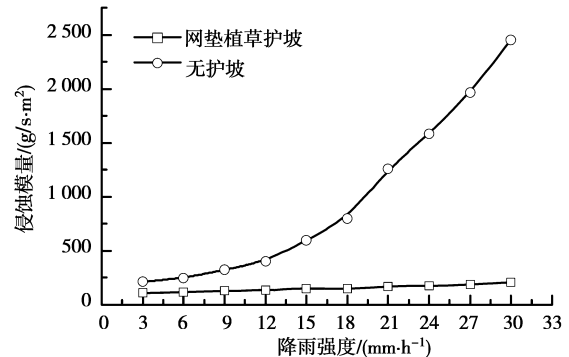


图 3 降雨强度对侵蚀模量的影响

由表 7 可知,由于坡面浅层的三维网垫和植物根系的加筋作用,使筋土复合体的黏聚力明显提高,且随着网垫厚度、抗拉强度和层数的增加,浅层加筋土复合体的等效黏聚力提高程度更大。

表 7 各试验坡体浅层土体等效黏聚力的理论计算与实测值

试验号	坡度	网垫类型	土质	草籽密度	Δc /kPa (2.5 cm)		Δc /kPa (7.5 cm)		Δc /kPa (12.5 cm)		Δc /kPa (17.5 cm)		Δc /kPa (22.5 cm)	
					试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算
1	1:1	EM2	a	α	20.15	15.60	17.21	16.30	11.51	18.58	6.79	15.16	4.05	5.46
2	1:1	EM3	b	β	16.25	12.66	20.68	11.82	12.82	14.48	9.41	12.47	5.18	5.50
3	1:1	EM4	c	γ	45.12	25.69	36.35	29.54	28.47	23.71	21.33	16.43	10.01	1.54
4	1:1.5	EM2	b	γ	28.24	19.20	27.01	20.80	19.02	22.12	13.89	14.44	9.78	9.01
5	1:1.5	EM3	c	α	28.59	23.01	26.99	18.06	21.11	24.67	16.90	18.77	2.05	6.80
6	1:1.5	EM4	a	β	36.68	29.95	26.25	23.96	18.93	29.76	13.30	20.18	9.83	5.49
7	1:2	EM2	c	β	33.01	19.49	28.02	16.08	20.64	17.60	16.54	15.07	4.50	1.25
8	1:2	EM3	a	γ	35.33	25.10	33.25	22.08	24.66	22.10	18.34	15.53	14.35	4.86
9	1:2	EM4	b	α	30.66	20.67	18.59	13.05	11.10	15.95	7.94	7.17	3.76	8.29

另外,坡面浅层筋土复合体在深度为 2.5 cm 和 7.5 cm 范围内,理论计算所得等效黏聚力明显小于试验所得值;而在深度为 12.5、17.5 和 22.5 cm 范围内时,总体上理论计算值和试验值实测值大小基本一致。而在该深度范围内发现第 3 号和 8 号坡体的实测值要高于理论计算值。而 3 号和 8 号坡体草籽喷洒量最大,因而实测值应该更能准确表现草本植物根系有助于坡面筋-土复合体强度的增大。

3.4 浅层土等效黏聚力随深度的变化

正交试验各坡面等效黏聚力 Δc 随深度的变化如图 4 所示。由图可知,护坡浅层土的 Δc 随深度 H 的增加总体上呈现逐渐减少的趋势,当沿坡面深度为小于 5 cm 时,加筋土由于受到三维网垫和植物根系的作用,等效黏聚力显著提高。当沿坡面深度在大小 5 cm 时,等效黏聚力开始衰减并最终趋于稳定。由浅层土等效黏聚力与深度之间的回归关系曲线可知, Δc 与深度 h 间呈三次曲线变化关系,即

$$\Delta c = K_0 + K_1 H + K_2 H^2 + K_3 H^3, \quad (2)$$

式中: K_0 、 K_1 、 K_2 和 K_3 是与坡度、草籽配比、土质和网垫类型相关的量,其拟合值如表 8 所示。

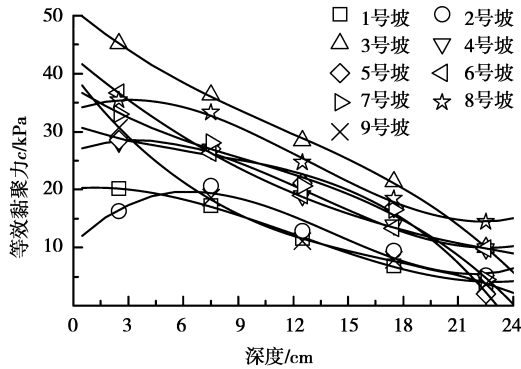


图 4 浅层土等效黏聚力随深度的变化

表 8 等效黏聚力随深度变化的拟合曲线参数

试验号	K_0	K_1	K_2	K_3	R^2
1	20.201 5	0.261 6	-0.114 5	0.003 1	0.999 4
2	10.503 2	3.185 4	-0.323 5	0.007 6	0.951 7
3	51.252 7	-2.690 4	0.114 2	-0.003 3	0.999 5
4	26.598 2	1.196 7	-0.202 7	0.005 1	0.992 7
5	31.159 0	-1.116 9	0.088 0	-0.004 2	0.989 4
6	42.963 3	-2.691 0	0.068 3	-0.000 6	0.999 8
7	37.677 67	-2.017 02	0.107 8	-0.003 7	0.991 6
8	33.684 2	1.234 8	-0.225 4	0.005 9	0.996 7
9	39.952 3	-4.158 1	0.197 4	-0.003 7	0.999 1

3.5 浅层土的渗透系数受网垫和草籽配比的影响

图 5 所示为坡面浅层土的渗透系数随网垫类型和草籽配比(或密度)的变化关系。由图可知,除了浅层 2.5 cm 处的表层土体渗透系数与其它深度的变化趋势不尽相同外,其它深度范围内渗透系数的变化趋势基本相同。由图 5(a)可知,因网垫分布的深度一般在 0~5 cm 范围内,所以可以认为只有 2.5 cm 处的关系曲线能够反映实际情况,其它深度处的曲线存在不同程度的误差。从 2.5 cm 深度处渗透系数的变化曲线可知,随着网垫加密和加厚,渗透系数在对数曲线上是线性增大的,其它深度范围内渗透系数主要是受根系密度的影响。

由图 5(b)可知,除了 2.5 cm 深度处因网垫影响而数据有误差外,其它深度处的曲线符合实际,显然,随着草籽喷洒量的增大,在半对数坐标上渗透系数逐渐增大,并最终趋于稳定。

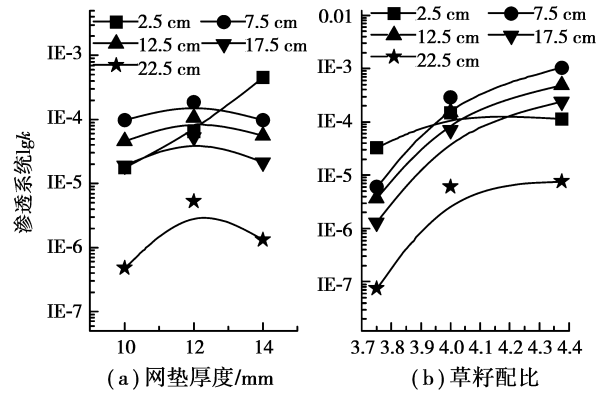


图 5 渗透系数随影响因素的变化关系

4 结 论

1) 侵蚀模量在模拟小雨时受影响因素显著性高低分别为草籽密度、坡度、坡面土质和网垫类型,而模拟暴雨时,侵蚀模量受影响因素显著性高低则分别为草籽密度、坡面土质、坡度和网垫类型;随深度从零到 10 cm 的变化,浅层土的抗剪强度的主要影响因素由三维网垫变为草籽密度,渗透系数主要影响因素也由三维网垫变化为草籽密度。

2) 对于三维网垫植草护坡形式,模拟大降雨强度时的侵蚀模量为最小降雨强度时的 2 倍左右,而对于没有护坡的裸露坡体,随降雨强度增大,侵蚀模量增大明显,模拟最大降雨强度时的侵蚀模量为最小降雨强度时的 10 倍左右,表明采用三维网垫植草护坡抗冲刷效果明显。

3) 浅层土的等效黏聚力随深度的增加总体上呈逐渐减少的趋势,且二者之间呈现三次曲线变化关系。另外,浅层土的渗透系数受浅层土体加筋材料密度和种类的影响明显,厚度大的网垫和植物根系密度大都会使渗透系数增加。

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] 安保昭. 坡面绿化施工方法[M]. 北京:人民交通出版社, 1988.
 [3] 肖衡林,李纲林. 坡面生态工程现状剖析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008, 35(11): 213-216.
 XIAO HENG-LIN, LI GANG-LIN. Analysis of slope eco-engineering present state[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2008, 35(11): 213-216.
 [4] 毛伶俐. 生态护坡中植被根系的力学分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.

- [5] 肖成志, 刘晓朋, 孙建诚. 三维网垫喷播植草护坡防径流冲刷的机理研究[J]. 人民长江学报, 2009, 40(19): 93-96.
XIAO CHENG-ZHI, LIU XIAO-PENG, SUN JIAN-CHENG. Research on mechanism of runoff-erosion prevention by 3-D mat planting grass for slope protection[J]. Yangtze River, 2009, 40(19): 93-96.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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 Resource and Hydropower Engineering, 2002, 33(7): 35-37.
- [9] SHAN W, SUN Y Y, WANG Q, et al. Mechanism of biotechnical slope protection for highway slope and anchorage effect of deep-rooted plants[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(11): 59-60.
- [10] 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.
- [11] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

(编辑 陈移峰)

(上接第90页)

- [12] 张青文, 陈仲林, 胡英奎. 道路照明反应时间测定仪的研制与应用[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(6): 72-75.
ZHANG QING-WEN, CHEN ZHONG-LIN, HU YING-KUI. The development and application of the reaction time instrument for road lighting [J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(6): 72-75.
- [13] 中华人民共和国建设部. CJJ 45-2006 城市道路照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [14] ANSI/IESNA RP-8-00. American National Standard Practice For Roadway Lighting[S]. New York, 2000.
- [15] 李景色, 李铁楠. 修订我国《城市道路照明设计标准》中的几个问题(之一)[J]. 照明工程学报, 2004, 15(1): 38-42.
LI JING-SE, LI TIE-NAN. Some problems about revising the 《Standard for Lighting Design of Urban Road》[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2004, 15(1): 38-42.
- [16] 杨春宇, 郑文崇, 陈士群. 夜景亮度及建筑材料光反射特性与照明节能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 90-94.
YANG CHUN-YU, ZHENG WEN-CHONG, CHEN SHI-QUN. Light reflecting characteristics of building materials and energy saving of nightscape luminance[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(5): 90-94.

(编辑 陈移峰)