

# 三维土工网垫植草护坡效果的影响因素试验研究

肖成志<sup>1,2</sup>, 孙建诚<sup>1,2</sup>, 刘晓朋<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

**摘要:** 采用室外边坡模型正交试验方法, 综合比较分析了土工网垫类型、草籽播种密度、边坡土质、边坡坡度等4个因素对坡面的最终侵蚀模量、浅层土抗剪强度和平均渗透系数3个试验指标的影响显著性, 并给出了各因素对试验指标的敏感性顺序, 进而应用综合加权评分法得出护坡效果最好的试验组合. 分析结果显示, 坡度为1:1.5、网垫型号为EM4、土质为粉质黏土、草籽喷洒密度为预设最大密度时, 边坡侵蚀模量最小、坡面浅层土抗剪强度和渗透系数最佳.

**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:** TU 413.62

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2011)12-1793-07

生态护坡充分利用植物的自组织、自修复能力, 显著提高了边坡的稳定性, 降低工程造价, 有利于维持生态多样性, 符合环保要求, 是边坡工程的重要发展方向, 具有广阔的应用前景. 日本新标准甚至把生态护坡作为护坡工程的基础, 要求在公路边坡保护中优先采用, 在借鉴国外经验的基础上, 开发了纤维土绿化工法和高次团粒 SF 绿化工法, 促进了生态护坡的发展<sup>[1]</sup>. 美国 60% 以上的河岸边坡采用生态护坡技术治理<sup>[2]</sup>. 我国在 1993 年后, 各类土工合成材料结合植草护坡技术被广泛采用, 李和平、张俊云等<sup>[3-4]</sup>介绍了客土喷播技术, 章梦涛等<sup>[5]</sup>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, 取得了一些成果. 许文年等<sup>[6]</sup>开发了植被混凝土边坡绿化技术. 肖衡林等<sup>[7]</sup>系统研究了三维网垫的强度公式, 并理论分析了网垫强度、尺寸、厚度和植被对生态护坡的抗冲刷性能的影响, 阐述了边坡角度、冲刷时间、铺沙量对固土网垫防水冲刷性能的影响. 目前对影响护坡效果的因素如边坡坡度、边坡土质和网垫类型等的综合影响研究却较少. 因此, 本文针对三维网垫植草护坡形式, 综合考虑边坡坡度(A)、边坡土质(C)、三维网垫类型(B)和草数密度(D)等4个主要影响因素, 采用4因素3水平的正交试验, 综合对比分析了各因素对三维土工网垫植草护坡效果的影响力, 提出优化的三维网垫护坡组合形式.

## 1 试验方案与试验材料选择

### 1.1 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, 其产品性能指标如表 1 所示.

表 1 三维土工网垫的物理性能指标

Table 1 Physical properties of 3D-geomat

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

收稿日期: 2009-11-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678032, 50909032); 河北省教育厅项目(2007431); 河北省自然科学基金项目(E2009000054).

作者简介: 肖成志(1976—), 男, 湖北监利人, 博士, 副教授.

1.2 草籽选择及配合比

试验模型边坡中采用混播方式,所用草籽种类为高羊茅、白三叶和黑麦草等3种混播,配比见表2,3种不同配比记为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。

表2 试验用草籽种类及配合比  
Table 2 Types of grass seed and mixing rate

草籽种类	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
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

为对比分析,边坡模型中采用3种不同类型的土体,其相关指标如表3所示。

表3 试验边坡用土的物理性能指标  
Table 3 Physical properties of soil for the model test

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

采用室外模型试验模拟高速公路路基边坡如图1所示。路基边坡三维网垫喷播植草护坡面的边坡高度为0.5 m,每个坡面宽度为0.5 m,上部是模拟自然降雨的喷淋系统。

试验共有12个坡面,1~9号坡面采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,试验总数为9次,共4个影响因素,每个因素水平均为3个,具体影响因素水平见表4。

坡面L、M和N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(无三维网垫)和无防护措施。

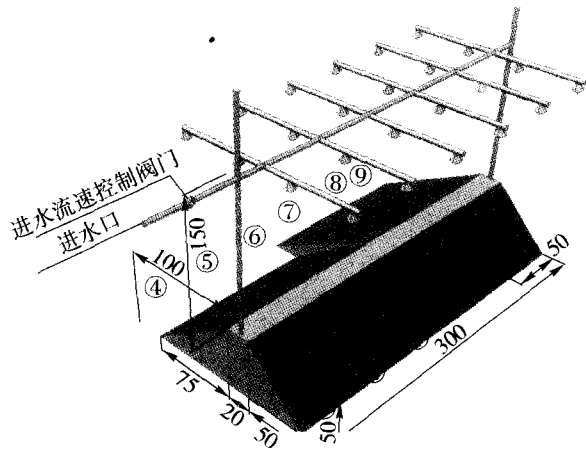


图1 三维网垫护坡试验模型(mm)

Fig.1 Sketch of ecological slope protection by 3D-geomat

表4 影响因素水平  
Table 4 Level of the factors

因素水平	A	B	C	D
I	1:1	EM2	a	$\alpha$
II	1:1.5	EM3	b	$\beta$
III	1:2.0	EM4	c	$\gamma$

1.5 试验主要检测指标

1) 侵蚀模量  $Q(g/(m^2 \cdot h))$

侵蚀模量值是表征单位时间内坡面上单位面积的侵蚀量,是能很好地表征边坡表面抗径流和击溅侵

蚀的重要参数. 其计算式为

$$Q = \frac{W}{ST} \quad (1)$$

式中,  $W$  为被坡面流水冲刷下的土壤颗粒的总干质量 (g);  $S$  为坡面总表面积 ( $\text{m}^2$ );  $T$  为降雨总时长 (h).

待边坡草本植株达 10 ~ 15 cm 高度时, 进行侵蚀模量试验. 试验时, 12 个坡体下面放上集雨槽, 收集模拟降雨时冲刷下来的泥沙浆. 模拟小雨时, 降雨时长为 9 h, 降雨量为 30 mm, 模拟暴雨时, 降雨时长为 20 min, 降雨量亦为 30 mm. 模拟降雨结束后, 测定集雨槽中的干土质量, 2 次试验独立, 间隔时长为 1 周.

### 2) 坡面浅层加筋土体的抗剪强度

三维网垫喷播植草护坡体浅层加筋土是三维网垫和植物根系组成的三维加筋体系组成的复合体, 它们共同受力且协调变形. 研究表明<sup>[1]</sup>, 加筋土与未加筋土的强度曲线可近似地视为平行, 这样可假定土体的内摩擦角在加筋后基本保持不变, 而由于加筋作用使加筋土的“黏聚力”有所增加, 即为似黏聚力, 且似黏聚力可由下式表示

$$\Delta c = \frac{\sigma_3 \sqrt{K_p}}{2} \left[ \frac{\sigma_{1f} - \sigma_1}{\sigma_1 - 2c \sqrt{K_p}} \right] \quad (2)$$

式中,  $K_p = \tan^2 \left[ 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right]$ ;  $\sigma_{1f}$  为加筋土样破坏时的最大主应力;  $\sigma_1$  为无筋土样破坏时的最大主应力;  $\phi$  为无筋土样的内摩擦角;  $c$  为无筋土样的黏聚力;  $\sigma_3$  为对土样施加的围压.

加筋土体抗剪强度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, 由式 (2) 可知, 土体加筋后抗剪强度的提高是由于黏聚力的提高, 故这里的抗剪强度指标只考虑黏聚力变化. 三轴试验土样分别取坡面下深度为 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 处的加筋土体.

### 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, 试验试件分别取自坡面下深度 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 处土体.

## 2 多因素正交试验结果分析

### 2.1 试验结果极差分析

为分析各因素的影响, 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, 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平均侵蚀模量, 就可看出该因素对它的影响. 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分别为 172.82、165.97 和 152.18 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, 可以得到其他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<sup>[8]</sup>.

实测指标侵蚀模量  $Q$ , 分为模拟小雨和模拟暴雨 2 种情况. 由表 5、6 可知, 模拟小雨时, 极差最大值为 153, 对应的影响因素为  $D$ ; 模拟大雨时, 侵蚀模量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. 这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, 其他 3 因素也有相当影响.

抗剪强度  $\tau$  是对沿坡面深度方向分别为 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 范围内的测试值, 由表 6 可知, 深度 0 ~ 5 cm 范围内网垫类型对应的极差值最大, 而 5 ~ 10 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.

实测指标渗透系数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5 正交试验测试结果表  
Table 5 Results of orthogonal tests

试验号	A	B	C	D	Q/	Q/	$\tau/$	$\tau/$	渗透系数	渗透系数
					( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	kPa	kPa	负对数值	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	$\alpha$	224.68	492.29	40.15	37.21	5.34	5.37
2	1:1	EM3	b	$\beta$	188.78	455.10	39.25	43.68	4.04	3.94
3	1:1	EM4	c	$\gamma$	105.01	298.78	58.12	49.35	2.79	2.94
4	1:1.5	EM2	b	$\gamma$	56.90	359.44	51.23	51.23	5.05	2.99
5	1:1.5	EM3	c	$\alpha$	230.50	412.09	41.59	41.59	4.54	4.23
6	1:1.5	EM4	a	$\beta$	110.50	200.89	56.67	46.25	3.36	3.36
7	1:2.0	EM2	c	$\beta$	157.01	427.82	46.01	41.02	4.11	3.54
8	1:2.0	EM3	a	$\gamma$	67.78	143.57	55.32	53.24	3.99	3.02
9	1:2.0	EM4	b	$\alpha$	231.77	439.75	53.66	41.58	3.86	5.94

表6 各参数对各检测指标的极差分析  
Table 6 Range analysis of the factors for measured values

极差来源	各检测指标极差值			
	A	B	C	D
模拟小雨	40	13	36	153
模拟暴雨	91	113	140	181
$\tau(0\sim 5\text{ cm})$	5.83	10.76	2.67	9.76
$\tau(5\sim 10\text{ cm})$	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

## 2.2 试验结果中影响因素的显著性分析

为模拟降雨后坡面的水土流失等指标,对各试验坡面采用  $F$  分布假设检验作进一步的数据方差分析.表7给出了针对试验结果处理后得到的各影响因素的显著性分析情况.

由表7可知,侵蚀模量指标在模拟小雨的情况下,草籽密度、坡度因素满足假设检验  $F \geq F_{0.99}$ ,即两因素对结果的影响为高度显著,土质因素满足假设检验  $F_{0.99} > F \geq F_{0.95}$ 对结果影响显著性,所以因素影响的显著性为  $D > A > C > B$ .当模拟暴雨时,各因素对结果均无显著影响,但由  $F$  值分别为 2.94、4.24 和 6.7,可知,此时侵蚀模量是 3 因素共同作用,甚至坡度也有很大影响,所以因素显著性为  $D > C > B > A$ .产生降雨条件不同影响因素的显著性差异的原因是当降雨强度较小时,雨水主要被植被茎叶截留,不能对地面产生冲击,径流较小,所以主要影响因素是植株密度.而暴雨情况下径流加大,侵蚀模量受到草籽密度、土质和网垫等因素共同作用产生的紊流的强弱的影响.

表7中深度 0~5 cm 范围内土体抗剪强度显示  $B$  因素满足假设检验  $F_{0.99} > F \geq F_{0.95}$ ,即对最终结果影响显著; $D$  因素的显著性假设检验满足  $F_{0.95} > F \geq F_{0.90}$ ,即其对抗剪强度有一定影响,继而判定影响因素显著性为  $B > D > C > A$ .而对 5~10 cm 范围内的实测结果表明, $D$  显著性假设检验满足  $F \geq F_{0.99}$ ,即该因素影响高度显著,从而因素影响的显著性为  $D > A > C > B$ .产生深度不同而影响因素显著性不同的原因是加

筋的成分不同, 0~5 cm 处加筋以网垫为主, 网垫和植物根系耦合作用使得土体强度增大, 而更深处则以植物根系加筋为主, 网垫影响逐渐衰减.

表 7 实测指标影响因素方差与显著性分析表

Table 7 Analysis of variance and significance of influence factors

方差来源	自由度	平方和	均方和	F 值	显著性	
模拟小雨	A	2	2 497.71	1 249	18	**
	C	2	2 087.17	1 044	15	*
	D	2	34 919.82	17 460	250.96	**
	误差项	4	278.3	139		
模拟暴雨	B	2	21 447.25	10 724	2.94	
	C	2	30 985.57	15 493	4.24	
	D	2	49 048.20	24 524	6.7	(*)
	误差项	4	14 632.38	7 316		
$\tau$ 0~5 cm	B	2	223.20	111.60	8.38	*
	C	2	11.99	5.99	0.46	
	D	2	157.51	78.75	5.92	(*)
	误差项	4	53.21	26.60		
$\tau$ 5~10 cm	A	2	15.93	7.97	2.38	
	C	2	4.80	2.40	0.72	
	D	2	194.82	97.41	29.22	**
	误差项	4	13.34	6.67		
平均渗透系数 0~5 cm	B	2	2.99	1.50	26.30	**
	C	2	0.39	0.19	3.43	
	D	2	0.73	0.36	6.39	(*)
	误差项	4	0.23	0.05		
平均渗透系数 5~10 cm	B	2	0.96	0.48	12.76	*
	C	2	0.79	0.40	10.53	*
	D	2	8.07	4.04	107.60	**
	误差项	4	0.15	0.04		

注: 若  $F \geq F_{0.99}$ , 则称因子的影响高度显著, 记为“\*\*”; 若  $F_{0.99} > F \geq F_{0.95}$ , 则称因子影响显著, 记为“\*”; 若  $F_{0.95} > F \geq F_{0.90}$ , 则称因子有一定影响, 记为“(\*)”; 若  $F < F_{0.90}$ , 则称因子无显著影响, 即认为因子的各水平效应为零.

对于平均渗透系数指标, 0~5 cm 的实测结果显示 B 显著性假设检验满足  $F \geq F_{0.99}$ , 所以影响高度显著, D 的显著性假设检验满足  $F_{0.95} > F \geq F_{0.90}$ , 即因子有一定影响, 从而因素影响的显著性为  $B > D > C > A$ . 5~10 cm 的实测结果显示 D 显著性假设检验满足  $F \geq F_{0.99}$ , 即草籽因素影响高度显著, B 和 C 因素对应的 F 值分别为 12.76 和 10.53, 此时假设检验满足  $F_{0.99} > F \geq F_{0.95}$ , 因素的显著性均为影响显著, 从而因素影响的显著性为  $D > B > C > A$ . 各影响因素显著性随深度变化主要是由网垫植草护坡面浅层加筋复合体构成上的差异引起, 而这种加筋复合体渗透性比原有坡面土体的渗透性有所增大, 表明加筋材料对表层土体渗透系数有主要影响.

### 3 综合加权评分法选取试验最优组合

采用综合加权评分法选取试验最优组合需要对各个实测指标设定权重系数<sup>[8]</sup>, 加权系数的大小由指标的重要程度来决定, 指标越重要加权系数越大. 另外, 指标值越小对实际越有利时设该指标权值为负值.

设定  $Q$  权重为  $-40\%$ , 因为试验最主要指标为显著减少  $Q$ .  $\tau$  和渗透系数权重分别为  $30\%$ , 且 3 大指标在 2 种独立情况权重平均分配. 如设  $Q$  权重为  $-40\%$ , 平均  $Q$  权重为  $-20\%$ . 以实测值最大的 9 号坡为 100 分, 由表 5 数据 1 号坡  $Q$ (小雨) 得分 =  $(100 \times 224.68/56.90) \times (-20\%) = -78.97$ . 各项试验指标得分相加即为综合得分, 如 1 号的综合评分为  $-71.64$ , 综合得分代数值最高者为正交试验最佳组合. 综合评分值及其极差分析结果如表 8、9 所示, 由影响因素极差值大小与显著性高低关系可得到试验最佳组合.

如表 8 所示, 综合评分最大的为 8 号坡体, 其组合形式为  $A_3B_2C_1D_3$ , 因此, 8 号坡体在 9 组组合中护坡效果最佳. 由表 9 的极差分析可知总体显著性排序为  $D > C > A > B$ , 另外, 由极差分析理论可知 I、II、III 代数值最大的对应的水平为最佳水平, 即可得总体最优组合为  $A_2B_3C_1D_3$ , 即坡度为 1:1.5、三维网型号 EM4、土质为粉质黏土、草籽喷洒密度为最大密度时(即草籽高羊茅、白三叶和高麦草配比为 4.4:1:4.4).

表 8 综合加权评分法结果分析表  
Table 8 Results on synthetic weighted mark method

编号	试验指标评分						综合评分
	$Q$ (小雨)	$Q$ (暴雨)	$\tau$ (0~5 cm)	$\tau$ (5~10 cm)	渗透系数 (0~5 cm)	渗透系数 (5~10 cm)	
1	-78.97	-68.58	10.36	10.48	27.16	27.91	-71.64
2	-66.36	-63.40	10.13	12.30	21.70	20.15	-65.47
3	-36.91	-41.62	15.00	13.90	15.00	15.00	-19.63
4	-20.00	-50.07	13.22	14.09	27.05	15.31	-0.40
5	-81.02	-57.41	10.73	11.26	24.32	21.58	-70.52
6	-38.84	-27.98	14.63	13.03	18.05	16.02	-5.09
7	-62.22	-59.60	11.87	11.55	22.07	18.11	-58.20
8	-23.82	-20.00	14.28	15.00	21.48	15.41	22.35
9	-81.47	-61.26	13.85	11.72	20.73	30.36	-66.07

表 9 综合加权评分法极差分析表  
Table 9 Range method result on synthetic weighted mark method

因素水平	影响因素				综合评分
	A	B	C	D	
I	-52.25	-43.41	-18.13	-69.41	-334.68
II	-25.34	-37.88	-43.98	-42.92	
III	-33.98	-30.27	-49.45	0.77	
极差 R	26.91	13.14	31.32	70.18	

### 4 结论

1) 三维土工网垫植草护坡土体的  $Q$  受到降雨强度大小影响, 随着降雨量的增大  $Q$  显著增大; 浅层土体  $\tau$  随深度增加而衰减, 并直至坡面土体自身抗剪强度; 平均渗透系数受到浅层土体加筋材料密度和种类的影响显著, 密实的土工网和植物根系都会使渗透系数产生明显增加.

2) 模拟小雨时,  $Q$  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,  $Q$  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 0 ~ 10 cm 的变化,  $\tau$  的主要影响因素由土工网垫变化为草籽密度, 渗透系数主要影响因素也由土工网垫变化为草籽密度。

3) 综合考虑不同降雨强度下  $Q$ 、不同深度处的  $\tau$ 、不同深度处的渗透系数, 可得出最优的护坡组合形式为  $A_2B_3C_1D_3$ , 即坡度为 1:1.5、三维网型号 EM4、土质为粉质黏土、草籽喷洒密度为最大密度(即草籽高羊茅、白三叶和高麦草配比为 4.4:1:4.4)时相比其他坡面的效果最好。

#### 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] 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.
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 239-242.  
ZHANG Jun-yun, ZHOU De-pei, LI Shao-cai. Testing study on planting material for rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 239-242. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 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, 2004, 25(11): 1800-1804. (in Chinese)
- [8] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1995.

## Experimental Study of Influential Factors of Slope Protection Through Grass Jetting on 3D Geomat

XIAO Cheng-zhi<sup>1,2</sup>, SUN Jian-cheng<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-peng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Based on ecological slope protection models through orthogonal tests, the comparative analysis of effects of slope protection is conducted by considering the types of geomat, density of grass seeds, types of soil, and slope gradient on erosion modulus. Shear strength of surface slope soil, permeability coefficient, and the sequencing sensibilities of influential factors are presented. Furthermore, the optimum combination considering various factors is obtained with a general weighted scoring method. Results show that the optimum effect for general consideration on erosion modulus, soil shear strength, and permeability coefficient can be achieved when using the slope gradient of 1: 1.5, EM4 3D geomat, silty clay, and the maximum density of grass seeds.

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

(责任编辑 张苏苹)