

岩质边坡生态护坡中基材选择试验分析

卢敦华^{1,2}, 王星华¹

1. 中南大学土木工程博士后流动站, 长沙 410075

2. 河南工程学院环境工程系, 郑州 451191

摘要 生态防护技术是一种新型的边坡护坡技术, 而对于护坡基材的选择是其关键问题。通过室内试验, 考虑水、土壤、水泥和有机质与粗纤维的混合物等四种成分在基材中的作用, 利用正交分析方法, 确定各因素作用对试验指标影响的主次关系, 找出对应于试验指标的最优工艺条件和最佳配比方案, 得到: ① 要使试验获得的 7 d 强度值最大, 可选取最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_2D_4$, 即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 220 g 和水 1 200 g; ② 要使试验获得的 14 d 强度值和 28 d 强度值最大, 可选取它们的最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_2D_3$, 即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 220 g 和水 1 100 g。得到的结果可为工程实践提供指导。

关键词 生态护坡; 基材; 正交试验; 优化

中图分类号 TU459, Q948.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)03-0051-05

Selection of Substrate in Ecological Protection Technique of Rock Slope

LU Dunhua^{1,2}, WANG Xinghua¹

1. *Postdoctoral Research Station, Central South University, Changsha 410075, China*

2. *Department of Environment Engineering, Henan Institute of Technology, Zhengzhou 451191, China*

Abstract In ecological protection technique of rock slope, as a new slope protection technique, the selection of substrate is the most important. The laboratory tests are carried out to determine the influencing factors of water, soil, cements, and compound material of organic matter and fiber. The orthogonal analysis method is used to evaluate the primary and secondary relations to the index. At last, the optimal scheme and optimal technological condition for the influencing factors are proposed, which show that, (1) in order to obtain the maximum strength of 7 day lasting test, the optimal combination of each factor is $A_2B_2C_2D_4$, that is 120 g for cements, 820 g for soil, 220 g for compound material of organic matter and fiber, and 1 200 g for water; (2) in order to obtain the maximum strength of 14 days lasting test and 28 days lasting test, the optimal combination of each factor is $A_2B_2C_2D_3$, that is 120 g for cements, 820 g for soil, 220 g for compound material of organic matter and

fiber, and 1 100 g for water.

Keywords ecological protection technique; substrate; orthogonal analysis method; optimal

0 引言

生态防护技术是一种新型的边坡护坡技术^[1-5], 生态植被的茎叶能拦截雨滴, 使雨滴击打坡面的机会大大降低, 减小了击溅侵蚀强度^[1]。此外, 生态植被根系具有很好的固土能力, 增强了浅层土的抗剪强度, 具有浅层加固作用^[6]。对于岩质边坡来说, 由于岩石硬度较大, 土壤成分少, 其中的营养成分不能满足植物生根发芽的需要。以往岩质边坡处治中, 由于未能较好地解决这个问题, 很少采用生态植被技术护坡。随着深入研究, 发现在岩质边坡上采用生态植被技术对其进行保护是可行的, 而且该技术对于长期的边坡稳定和防止侵蚀十分有效。但是, 要使采用的生态植被技术进行护坡, 首先必须解决其基材选择的问题。基材的选择是岩质边坡生态护坡工程成败的关键, 具有重要的现实意义。本文通过室内试验, 利用正交分析方法, 探讨了基材中各种配料的优化组合, 为工程实践提供指导。

1 试验方案

由于不同边坡地质条件岩体物理化学性质不同, 所要求的基材成分种类也不完全相同^[7], 根据文献[8~9]可知, 水、土壤、水泥和有机质与粗纤维的混合物 4 种成分在基材中起着最重要的作用。为了在较短的时间内把试验做好, 为现场施

收稿日期: 2008-09-16

基金项目: 中南大学博士后科学基金项目(200737); 河南工程学院博士基金项目(07089)

作者简介: 卢敦华, 教授, 研究方向为岩土工程, 电子信箱: ludunhua2009@126.com

工提供指导,在室内试验时主要考虑上述 4 种因素,试验采用正交设计^[10-12]。正交设计是利用正交表安排试验方案,并且利用数理统计原理对所取得的试验数据进行分析处理。

正交设计的第一步是选取正交表,正交表是根据组合理论,按照一定的规律构造成的矩形表格。正交表实际上是满足一些条件的矩阵。一般记成 $L_n(r^m)$,其中 L 表示正交表, n 表示正交表的行数,即试验次数; m 表示正交表的因素数,即试验至多可以安排的因子数; r 表示每一个因素所考虑的水平数。在基材选择室内试验中考虑水、土壤、混凝土和有机质与粗纤维的混合物 4 个因素对于基材的影响,采用正交试验设计方法进行设计,对于每种因素拟考虑 4 个水平,不考虑其因素的交互作用,见表 1。

表 1 因素水平内容表(单位:g)

Table 1 Factor levels

因素 水平	水泥(A)	土壤(B)	腐植质混 合物(C)	水(D)
1	90	750	180	900
2	120	820	220	1 000
3	150	890	260	1 100
4	180	960	300	1 200

2 试验过程及试验结果

首先将所取的土壤粉碎,用 2.5 mm 的筛子过筛,除去粗颗粒,然后用天平按照正交试验设计称取每一试验号中所需的水泥、土、腐植质混和物(每次试验所取的各种成分的量如表 2 所示),将它们充分搅拌均匀后量取所需的水加入其中,进行充分的搅拌。搅拌完成后,将混和物填充入 4 cm×4 cm×

表 2 试验成分数量表(单位:g)

Table 2 Compositions in differents factor levels

试验号	水泥量	土	腐植质 混合物	水	总量	水泥所占 比率/%
1	90	750	180	900	1 920	4.69
2	90	820	220	1 000	2 130	4.23
3	90	890	260	1 100	2 340	3.85
4	90	960	300	1 200	2 550	3.53
5	120	750	220	1 100	2 190	5.48
6	120	820	180	1 200	2 320	5.17
7	120	890	300	900	2 210	5.43
8	120	960	260	1 000	2 340	5.13
9	150	750	260	1 200	2 360	6.36
10	150	820	300	1 100	2 370	6.33
11	150	890	180	1 000	2 220	6.76
12	150	960	220	900	2 230	6.73
13	180	750	300	1 000	2 230	8.07
14	180	820	260	900	2 160	8.33
15	180	890	220	1 200	2 490	7.23
16	180	960	180	1 100	2 420	7.77

4 cm 的模子里,2 d 成型后,将模子拆除,然后将试样放在水中养护。每一组试验分别制备 3 d、7 d、14 d 和 28 d 的试样,每一组试样制备平行试验 3 份,即每一个试验号所标示的试验组需制备试样 12 个。试验试样制备好后,在第 3 天、第 7 天、第 14 天、第 28 天分别用无侧限抗压仪测定其强度,测得的强度原始数据如表 3 所示。

表 3 试验所得的原始数据(单位:kPa)

Table 3 Result of the tests

试验号	3 d				7 d				14 d				28 d			
1	36	34	33	68	69	71	115	114	114	119	118	119				
2	43	45	42	75	78	76	120	124	120	126	127	124				
3	38	37	35	62	65	64	91	94	90	101	103	100				
4	46	47	44	70	69	74	97	95	99	106	109	112				
5	110	106	109	160	160	161	168	212	217	264	235	279				
6	154	161	158	166	164	164	175	177	175	189	195	192				
7	56	54	57	68	73	74	84	80	81	98	105	118				
8	31	29	28	37	40	38	60	56	69	70	82	84				
9	15	16	18	24	22	24	29	28	29	35	37	40				
10	40	46	44	52	51	53	75	71	72	91	99	94				
11	39	40	41	66	64	63	74	73	74	85	83	84				
12	23	20	22	25	24	25	29	27	29	38	37	37				
13	25	24	25	29	31	29	37	38	40	46	44	45				
14	66	57	48	73	72	75	80	82	82	88	88	86				
15	31	28	47	91	95	97	110	113	112	130	130	132				
16	47	43	42	56	58	55	79	81	81	117	115	120				

表 6 3 d 换算强度均值极差分析结果表
Table 6 Extreme difference analysis for the 3 days average strength

试验号	因素				3 d 强度 均值/kPa
	A	B	C	D	
	列数				
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	74.28
2	1	2	2	2	94.58
3	1	3	3	3	80.03
4	1	4	4	4	99.67
5	2	1	2	3	236.44
6	2	2	1	4	344.11
7	2	3	4	1	121.49
8	2	4	3	2	64.02
9	3	1	3	4	35.65
10	3	2	4	3	94.58
11	3	3	1	2	87.30
12	3	4	2	1	47.29
13	4	1	4	2	53.84
14	4	2	3	1	124.40
15	4	3	2	4	77.12
16	4	4	1	3	96.03
K_1	348.56	400.21	601.72	367.46	$T=1730.83$
K_2	766.06	657.67	455.43	299.74	
K_3	264.82	365.94	304.1	507.08	
K_4	351.39	307.01	369.58	556.55	
$\bar{K}_1$	87.14	100.05	150.43	91.87	
$\bar{K}_2$	191.52	164.42	113.86	74.94	
$\bar{K}_3$	66.21	91.49	76.03	126.77	
$\bar{K}_4$	87.85	76.75	92.40	139.14	
$\bar{R}$	125.31	87.67	74.4	64.2	

和。可以看出,对于 3 d 强度影响最大的是 A 因素,即水泥含量,其极差值 $\bar{R}=125.31$ 。影响 3 d 强度因素主次依次为:A→B→C→D。要使试验获得的 3 d 强度最大,可选最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_1D_4$,即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 180 g 和水 1 200 g。同理,对 7 d、14 d、28 d 的换算强度均值分别进行极差分析,分析结果见表 7~表 9。

从表 7 可以看出,对于 7 d 强度影响最大的也是 A 因素,即水泥含量,其极差值 $\bar{R}=147.53$ 。影响 7 d 强度因素的主次依次为:A→B→C→D。在表 7 中可以看出,要使试验获得的 7 d 强度值最大,可以选取最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_2D_4$,即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 220 g 和水 1 200 g。从表 8 和表 9 可以看出,对于 14 d 强度和 28 d 强度影响最大的也是 A 因素,即水泥含量,其极差值 $\bar{R}$ 分别为 171.69 和 209.34。影响 14 d 强度因素的主次依次为:A→C→B→D,而影响 28 d 强度因素的主次依次为 A→C→D→B。在表 8 和表 9 中可以看出,要使试验获得的 14 d 强度值

表 7 7 d 换算强度均值极差分析结果表
Table 7 Extreme difference analysis for the 7 days average strength

试验号	因素				7 d 强 度均值/kPa
	A	B	C	D	
	列数				
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	151.32
2	1	2	2	2	166.60
3	1	3	3	3	138.95
4	1	4	4	4	154.96
5	2	1	2	3	349.93
6	2	2	1	4	359.39
7	2	3	4	1	156.41
8	2	4	3	2	83.08
9	3	1	3	4	50.93
10	3	2	4	3	113.49
11	3	3	1	2	140.41
12	3	4	2	1	53.84
13	4	1	4	2	64.75
14	4	2	3	1	160.05
15	4	3	2	4	205.88
16	4	4	1	3	122.95
K_1	611.83	616.93	774.07	521.62	$T=2470.94$
K_2	948.81	799.53	776.25	454.84	
K_3	358.67	641.65	433.01	725.32	
K_4	553.63	414.83	489.61	771.16	
$\bar{K}_1$	152.96	154.23	193.52	130.41	
$\bar{K}_2$	237.20	199.88	194.06	113.71	
$\bar{K}_3$	86.97	160.41	108.25	181.33	
$\bar{K}_4$	138.41	103.71	122.40	192.79	
$\bar{R}$	147.53	96.17	85.81	79.08	

及 28 d 强度值最大,可选取它们的最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_2D_3$,即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 220 g 和水 1 100 g。

4 结论

通过室内试验,考虑水、土壤、水泥和有机质与粗纤维的混合物 4 种成分在基材中的作用,利用正交分析方法,确定各种因素及其交互作用对试验指标影响的主次关系,得到:① 要使试验获得的 7 d 强度值最大,可以选取最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_2D_4$,即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 220 g 和水 1 200 g;② 要使试验获得的 14 d 强度值及 28 d 强度值最大,可以选取它们的最有力各因素水平组合 $A_2B_2C_2D_3$,即水泥 120 g、土壤 820 g、腐殖质混合物 220 g 和水 1 100 g。通过本次试验,使基材的营养成分充分满足植物生根发芽的需要,为生态植被根系能够提供足够的固土能力奠定了良好的基础。

表 8 14 d 换算强度均值极差分析结果表

Table 8 Extreme difference analysis for the 14 days average strength

试验号	因素				14 d 强度 均值/kPa
	A	B	C	D	
	列数				
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	249.53
2	1	2	2	2	264.81
3	1	3	3	3	200.06
4	1	4	4	4	211.70
5	2	1	2	3	211.70
6	2	2	1	4	383.39
7	2	3	4	1	178.24
8	2	4	3	2	134.59
9	3	1	3	4	62.57
10	3	2	4	3	158.60
11	3	3	1	2	160.78
12	3	4	2	1	61.84
13	4	1	4	2	83.66
14	4	2	3	1	177.51
15	4	3	2	4	243.71
16	4	4	1	3	175.33
K_1	926.1	830.08	969.03	667.12	
K_2	1 130.54	984.31	1 004.68	634.84	
K_3	110.95	195.70	143.68	242.08	
K_4	170.05	145.87	158.05	225.34	
$\bar{K}_1$	231.53	207.52	242.26	166.78	
$\bar{K}_2$	282.64	246.08	251.17	160.96	
$\bar{K}_3$	110.95	195.70	143.68	242.08	
$\bar{K}_4$	170.05	145.87	158.05	225.34	
$\bar{R}$	171.69	100.21	107.49	81.12	

表 9 28 d 换算强度均值极差分析结果表

Table 9 Extreme difference analysis for the 28 days average strength

试验号	因素				28 d 强度 均值/kPa
	A	B	C	D	
	列数				
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	258.99
2	1	2	2	2	274.27
3	1	3	3	3	221.16
4	1	4	4	4	237.89
5	2	1	2	3	566.00
6	2	2	1	4	419.04
7	2	3	4	1	233.53
8	2	4	3	2	171.69
9	3	1	3	4	81.48
10	3	2	4	3	206.61
11	3	3	1	2	183.33
12	3	4	2	1	81.48
13	4	1	4	2	98.21
14	4	2	3	1	190.61
15	4	3	2	4	285.18
16	4	4	1	3	256.08
K_1	992.31	1 004.68	1 117.44	764.61	
K_2	1 390.26	1 090.53	1 206.93	727.5	
K_3	552.9	923.2	664.94	1 249.85	
K_4	830.08	747.14	776.24	1 023.59	$T=3765.55$
$\bar{K}_1$	248.08	251.17	279.36	191.15	
$\bar{K}_2$	347.57	272.63	301.73	181.88	
$\bar{K}_3$	138.2	230.80	166.24	312.46	
$\bar{K}_4$	207.52	186.79	194.06	255.90	
$\bar{R}$	209.34	85.84	192.24	130.58	

参考文献 (References)

- [1] 方华. 植被护坡现状与展望[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 21-23.
Fang Hua. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 21-23.
- [2] 蔡婧, 李小平, 陈小华. 河道生态护坡对地表径流的污染控制[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1326-1334.
Cai Jing, Li Xiaoping, Chen Xiaohua. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(7): 1326-1334.
- [3] 付芳, 解志刚, 徐超. 膜袋混凝土与生态护坡相结合在北方河道护岸中的应用[J]. 内蒙古水利, 2008(3): 133-134.
Fu Fang, Xie Zhigang, Xu Chao. *Inner Mongolia Water Resources*, 2008 (3): 133-134.
- [4] 刘荣桂, 万炜, 颜庭成. 淹水区生态型护坡设计及抗冻融性能分析[J]. 江苏大学学报, 2006, 27(1): 71-74.
Liu Ronggui, Wan Wei, Yan Tingcheng. *Journal of Jiangsu University*, 2006, 27(1): 71-74.
- [5] 刘惠锋, 黄锦. 河南宝泉电站上山公路边坡生态防护施工技术 [J]. 人民长江, 2005, 36(6): 8-9.
Liu Hui Feng, Huang Jing. *People's Yangtze River*, 2005, 36(6): 8-9.
- [6] 卢敦华, 王星华. 植被根系系统加固破碎岩坡的作用机理分析 [J]. 科技导报, 2007, 25(23): 55-58.
Lu Dunhua, Wang Xinghua. *Science and Technology Review*, 2007, 25 (23): 55-58.

- [7] 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.
Zhou Depei, Zhang Junyun. Slope vegetation engineering technique[M].
Beijing: China Communication Press, 2003.
- [8] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡植物选型设计研究 [J]. 水土保持学报, 2002(4): 163-165.
Zhang Junyun, Zhou Depei. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002(4):
163-165.
- [9] 翟冰云, 石英坤, 淦洪. 喷播绿化与保水剂 [J]. 林业科技, 2000, 25(4):
43-44.
Zhai Bingyun, Shi Yingkun, Gan Hong. *Forest and Technology*, 2000, 25
(4): 43-44.
- [10] 吴贵生. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 冶金出版社, 1997.
Wu Guisheng. Test design and data dealing [M]. Beijing: Metallurgy
Press, 1997.
- [11] 陆璇. 应用统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
Lu Xuan. Application statistic [M]. Beijing: Tsinghua University Press,
1999.
- [12] 栾军. 现代试验设计优化方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
Luan Jun. Optimal method for modern test design [M]. Shanghai:
Shanghai Jiaotong University Press, 1995.

(责任编辑 岳臣)