

岩质边坡锚固参数正交优化分析及应用

晏鄂川, 吕美君, 李红刚

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 岩质边坡防护的最有效措施就是锚固工程。然而锚固参数(包括锚杆或锚索长度、锚固间距、预应力大小等)的选取至今在理论上未能很好解决,在实际工程中也未体现出合理的优化设计。以云沱段狮子包边坡 2-2' 剖面($K_0+85.7\text{ m}$)为例,运用正交试验设计法分析锚固参数的组合方案,以边坡稳定性系数作为评价指标,分别改变锚固参数,以此分析对边坡稳定性的影响。研究结果表明,对边坡稳定性影响显著的因素由大至小的顺序是:预应力大小、锚固间距、锚杆长度。以此研究结果为该实例的锚固支护参数选取确定了设计方案,最后采用有限差分程序 FLAC3D 进行了锚固效果数值分析验证。

关键词: 锚固参数; 边坡稳定性; 正交试验; 锚固效果

中图分类号: TU45

文献标识码: A

在资源开发和基础设施的建设中,有大量的岩质工程边坡。由于工程规模的不断扩大,岩质工程边坡的高度越来越大,稳定性问题也日益突出。将岩石开挖工作减至最少以及预测岩质边坡的安全度,是土木、地质工程师共同关注的课题。若斜坡陡峻、安全问题又很重要,或者边坡设计明显地影响工程费用的投入时,岩质边坡防护的优化设计就显得至关重要^[1,2]。

在我国,岩质边坡防护的最有效措施就是锚固工程,然而锚固参数(包括锚杆或锚索长度、锚固间距、预应力大小等)的选取至今都没能很好地解决,设计大多停留在经验(规范)的层次上,没能做到合理的优化设计,如何确定这些最优锚固参数就显得尤为重要^[3]。

本文以云沱段(狮子包)边坡 2-2' 剖面($K_0+85.7\text{ m}$)为例,运用正交设计法分析锚固措施的组合方案,采用有限差分程序 FLAC3D 进行数值分析和稳定性评价,研究边坡防护设计后的稳定性变化

情况,为边坡锚固方案优化提供重要依据,以达到优化防护工程设计的目的。

1 边坡的工程地质条件

云沱段(狮子包)边坡位于湖北省巴东县新城(信陵镇)至西壤坡区的沿江路上。东起铜盆溪桥头,西止于云沱赵树岭滑坡段公路拐弯处,总长 368 m,高度 10~50 m。坡体绝大部分近于直立,边坡总体倾向近北(基本为 350°),边坡类型为岩质逆向坡。该边坡各层的地质条件描述如下:①耕植层:黄褐色粉质粘土,厚 30~60 cm;②残坡积层:厚度 0.5~5 m 黄褐色粉质粘土夹碎石,碎石成分为下伏灰岩、泥质灰岩的风化残积物;③三叠系中统巴东组:新鲜为青灰色、黄灰色,风化后为浅黄褐色,中厚、厚层至块状含泥质灰岩、灰岩以及薄层泥灰岩等,坡面主要由该岩层组成,厚度 $>50\text{ m}$ ^[4]。

收稿日期(Received date): 2007-01-11; 改回日期(Accepted): 2007-03-25.

基金项目(Foundation item): 湖北省自然科学基金项目(编号: 2005ABA277) [supported by Nature Science Foundation of Hubei Province(NC 2005ABA277)]

作者简介(Biography): 晏鄂川,男,(1969-)博士,教授,博士生导师。主要从事工程地质、岩土体稳定性评价与利用方面的研究。Email: yecy96970@163.com [YAN E'chuan(1969-) Male Doctor Professor doctoral supervisor. Mainly engaged in research work of engineering geological stability and application of rock and soil mass.]

2 锚固方案正交试验分析

正交设计法作为处理多因素试验的一种科学方法,只要少次数的试验就可从众多的全面试验中,挑选出次数较少而又具有代表性的组合条件,经过简单计算找出较好的条件或最优配方,进一步分析试验结果又能寻出可能最优的试验方案,以及各因素的作用显著水平。近年来正交试验方法在岩土工程界得到了广泛应用。

2.1 边坡稳定计算模型

边坡稳定性计算选取 2—2 剖面 (K0+85.7 m) 进行,该处边坡岩体采用先削坡然后锚索和锚杆加固的方案。锚固措施的主要目的是为了有效地治理边坡开挖后的松弛,主要表现在控制开挖后边坡的松弛变形量、改善坡体应力状态、提高边坡稳定性等,这些都是评价锚固措施的重要指标。为了反映锚固措施对边坡整体的加固效果,选取边坡防护设计后的稳定性系数作为评价指标。

影响锚固效果的因素很多,既有几何参数又有物理力学参数,要作全面的因素分析是很困难的。这里根据重要性及具体情况,选取锚杆长度 L (代码为 A)、间距 s (代码为 B) 和预应力 P (代码为 C) 等三个主要因素进行研究,每个因素各选取四种情况 (四水平)^[5],因素及水平变化的选择情况如表 1 所示。将一次计算作为一次试验,按照不同参数组合进行计算,方案一计算模型见图 1 (限于篇幅,其他方案计算模型未附),数值计算材料值选取见表 2,锚杆弹性模量取 200 GPa,锚杆直径 25 mm。

2.2 试验安排及试验结果

假设各因素间无交互作用,按照所选取的五因素四水平模型的正交表 $L_{16}(4^5)$ 安排试验,只需要进行 16 次试验,为完全试验工作量 $4^3=64$ 次的 1/4,并按表 1 所确定的 4 水平参数,对边坡进行极限平衡分析,试验安排及计算结果见表 3。

表 1 因素及水平取值
Table 1 Range and level of parameters

水平值	锚杆长度 (L/m)	锚杆间距 (s/m)	预应力 (P/kN)
1	6	2.5	0
2	10	3.0	20
3	15	3.5	40
4	20	4.0	60

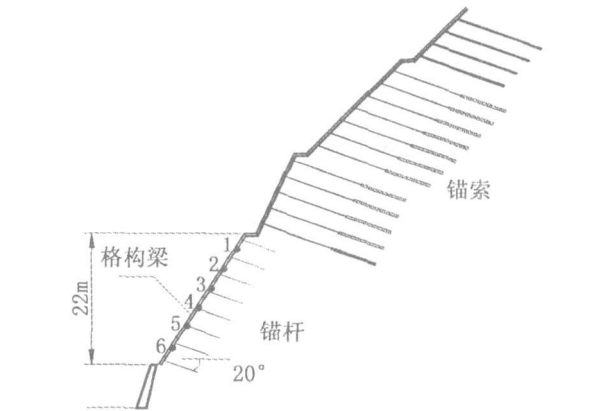


图 1 试验 1 模型及特征点分布示意图
Fig 1 Calculating model of experiment 1

表 2 数值计算岩体材料参数表
Table 2 Mechanical parameter of rock material

岩组	密度 ρ (g/cm^3)	变形模量 E_n (GPa)	泊松比 μ	剪切强度	
				c_m (MPa)	Φ_m ($^\circ$)
泥质灰岩	2.66	8.6	0.32	0.09	28
泥灰岩	2.26	2.2	0.37	0.017	20
灰岩	2.69	11.2	0.37	0.2	42

表 3 结构面计算参数表
Table 3 Mechanical parameter of sliding surface

结构面类型		剪切强度	
类型	壁岩岩性	c_j (MPa)	φ_j ($^\circ$)
层面	灰岩	0.18	30
	泥质灰岩	0.26	25
	泥灰岩	0.14	20
平行坡面 张性节理	灰岩	0.35	35
	泥质灰岩	0.28	28
	泥灰岩	0.21	20

2.2.1 极差分析

这里作了 16 次试验,若直接两两比较是不行的,因为在 16 次试验中没有任何两个是相同的,即没有比较的基础。但是把试验数据组合起来就会发现它们之间的可比性,例如锚杆长度的 1 水平 (A_1) 出现在表 4 中的 1、2、3、4 的 4 个试验中,这 4 个试验的平均边坡稳定性系数为 A'_1 (同理 2、3、4 水平的平均值为 A'_2 、 A'_3 、 A'_4)。此时 A_1 条件下的 4 次试验中,其余各因素取遍所有的水平,而且 A'_i 各水平出现的次数相同,因而具有可比性。所以 A'_i ($i=1, 2, 3, 4$) 之间的差异反映了 4 水平之间的差异;同理可

以计算出 $B'_i(i=1, 2, 3, 4)$ 、 $C'_i(i=1, 2, 3, 4)$ 各因素对指标的影响平均值都列于表 5 中, A 的极差为 $A'_i(i=1, 2, 3, 4)$ 中的最大值与最小值之差。它是评价因素对指标影响大小的重要指标。

表 4 试验安排及结果
Table 4 Result of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	—	—	评价指标
	1	2	3	4	5	稳定性系数
1	1(6)	1(2.5)	1(0)	1	1	1.406
2	1	2(3.0)	2(20)	2	2	1.479
3	1	3(3.5)	3(40)	3	3	1.525
4	1	4(4.0)	4(60)	4	4	1.559
5	2(10)	1	2	3	4	1.505
6	2	2	1	4	3	1.392
7	2	3	4	1	2	1.589
8	2	4	3	2	1	1.503
9	3(15)	1	3	4	2	1.595
10	3	2	4	3	1	1.629
11	3	3	1	2	4	1.382
12	3	4	2	1	3	1.444
13	4(20)	1	4	2	3	1.685
14	4	2	3	1	4	1.554
15	4	3	2	4	1	1.460
16	4	4	1	3	2	1.375

表 5 各因素对指标的影响
Table 5 Differential analysis

水平	稳定性系数		
	A'_i	B'_i	C'_i
1	1.492	1.548	1.389
2	1.497	1.513	1.472
3	1.513	1.489	1.544
4	1.519	1.47	1.615
极差	0.026 4	0.077 4	0.226 3
顺序	3	2	1

按照表 5 第二栏中 A'_i 、 B'_i 、 C'_i 的最大值可以选取 $A_4 B_4 C_4$ 为以边坡稳定性系数为评价指标时的最优参数方案, 该方案是锚杆长度 20 m 锚杆间距 2.5 m 预应力 60 t。这一方案是进行的 16 次试验中没有包括的, 这也证明正交试验设计所得到的结

果是全面的。再从极差来看, A 的极差为 0.026 4 B 的极差为 0.077 4 C 的极差为 0.226 3 可见预应力对计算结果 (边坡稳定性系数) 的影响最大, 而锚杆间距和锚杆长度的大小对计算结果的影响相对小一些, 各因素与稳定性系数关系见图 2。

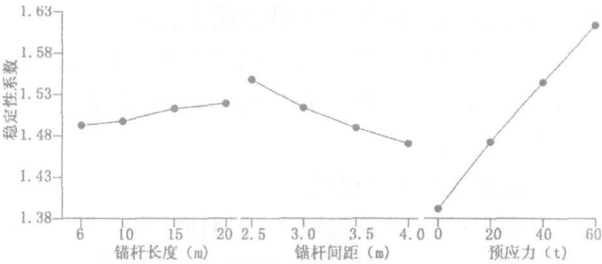


图 2 各因素与稳定性系数的关系
Fig. 2 Relations between stability factor and influence factors

2.2.2 方差分析

直观分析中采用的极差法, 计算量小, 简单易懂。但是没有把试验过程中由于试验条件的改变所引起的数据波动与试验误差所引起的数据波动严格的区分开来, 也没有提供一个标准, 用来判断所考察的因素的作用是否显著, 为了弥补这些不足, 进一步采用方差分析来对各因素的影响程度进行分析, 间接评价最优方案的选取是否恰当。具体方法为假设对某因素 i 当满足下式时, 拒绝因素 i 对结果影响不显著的假设

$$F_i = \frac{S_i / f_i}{S_e / f_e} > F_{1-\alpha}(f_i, f_e)$$

式中 S_i 、 f_i 分别为因素的偏差平方和、自由度, $f_i = r - 1$ (r 为各水平试验数); S_e 、 f_e 分别为误差的偏差平方和、自由度, $f_e = f - \sum_{i=1}^n f_i$, $f = n - 1$ (n 为总试验次数, f 为总偏差平方和 S_T 的自由度)。在一般工程中, $F_i > F_{0.99}$ 时, 为影响特别显著, 用 “**” 标记; $F_{0.99} > F_i > F_{0.95}$ 时, 为影响显著, 用 “*” 标记; $F_{0.95} > F_i > F_{0.90}$ 时, 为有影响, 用 “()” 标记; $F_i < F_{0.90}$ 时, 为影响不显著, 不作标记。本次 F 检验中, 显著水平分别取为 0.01、0.05、0.1, 则 $F_{0.99}(3, 6) = 9.78$, $F_{0.95}(3, 6) = 4.76$, $F_{0.90}(3, 6) = 3.29$ 。试验结果的方差分析表如表 5、表 6。

从表 6 可以看出锚杆预应力对边坡稳定性的影响显著, 锚杆间距显著程度较锚杆预应力要差, 而锚杆长度对边坡稳定性的影响最小。

表 6 方差分析计算
Table 6 Variance analysis

	A锚杆长度	B锚杆间距	C预应力
$K_{\bar{a}}$	5.968 0	6.190 0	5.556 0
$K_{\bar{b}}$	5.989 0	6.054 0	5.888 0
$K_{\bar{c}}$	6.050 0	5.956 0	6.176 0
K_{ij}	6.074 0	5.881 0	6.461 0
K_i	36.243 8	36.255 0	36.350 0
S_i	0.001 8	0.013 0	0.108 0

表中: K_{ij} ——第 i 因素第 j 水平的试验结果指标之和, $i=1, \dots, r$
 y_i ——第 i 次试验结果值。

2.2.3 最优方案的选取

前面通过正交设计的直观分析得出了锚固参数的最优方案,但是这未必是最经济合理的水平。从图 2 中可以看出当锚杆的长度从 10 m 增加到 15 m 时,稳定性系数的提高幅度较大,而当锚杆长度从 15 m 增加到 20 m 时,稳定性系数的变化幅度减小,这说明锚杆长度过长时并不能起到应有的作用^[9]。综合考虑,锚杆长度可选择较经济的水平 15 m 来代替最优水平 20 m。锚杆间距采用较经济的水平 3.0 m 作为优化结果。故最优锚固参数方案为,即锚杆长度 15 m 锚杆间距 3.0 m 预应力 60 t。

表 7 方差分析结果
Table 7 Result of variance analysis

方差来源	平方和 S	自由度 f	均方和 V	F 值	F_{α}	显著性
A	0.0018	3	0.0006	0.57	$F_{0.99}(3, 6)=9.78$	
B	0.0130	3	0.0043	4.11	$F_{0.95}(3, 6)=4.76$	(*)
C	0.1080	3	0.0360	34.18	$F_{0.90}(3, 6)=3.29$	**
误差 e	0.0063	6	0.0011			
总和	0.1291	15				

3 边坡锚固数值模拟

3.1 模型建立

根据地质勘察报告和现场调查,建立如图 3 所示的 FLAC 计算模型,并建立相应的网格,模型的边界条件采用位移边界条件,边坡防护设计如图 4。

3.2 计算结果分析

边坡治理前、后的破坏区如图 5、6 所示,明显看出治理前的塑性区范围很大,边坡脚已经发生剪切破坏,裂隙与滑面基本贯通。所以此边坡必须进行防护才能满足其稳定性。由图 6 可见,边坡采用锚固措施(锚杆长度 15 m 锚杆间距 3.0 m 预应力 60 t)防护后,塑性区明显减少,坡体内未出现拉应力区,发生剪切破坏的区域也明显减小,但是由于坡形的影响,前缘仍有一定的屈服区域。从坡体中的屈服区域可以看出锚固效果较明显。

通过以上分析可知,锚固措施对提高边坡稳定性是可行的,对整个边坡的变形破坏具有控制作用。

4 结 论

1. 锚杆参数对锚杆性能的发挥和锚固效果至关重要。已有的研究表明:当锚杆长度过大时,锚杆的作用效率就大大降低,锚杆长度的选取应以充分发挥锚杆的作用,并获得经济合理的锚固效果为原则。

2. 采用正交设计方法对云沱段边坡锚固参数进行了优化设计,结果表明以边坡稳定性系数为评价指标,主要锚固参数对锚固效果的影响显著性依次为:预应力大小>锚杆间距>锚杆长度,综合考虑得出该段边坡防护的最优锚固参数为锚杆长度 15 m 锚杆间距 3.0 m 预应力 60 t。

3. 经 FLAC3D 数值模拟分析,并对比边坡防护前后可知,锚固可有效地改善原岩体的力学参数,提高锚固区域岩体的强度,可以改变围岩应力分布,减小边坡塑性区范围,明显地提高边坡稳定性。

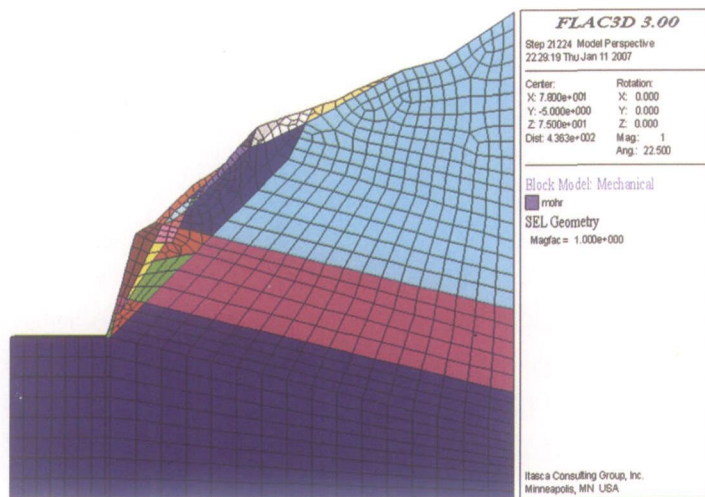


图 3 FLAC计算模型

Fig 3 Gridmodel

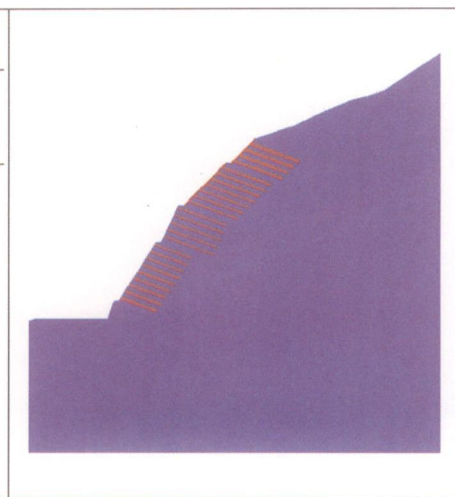


图 4 边坡锚固措施示意图

Fig 4 Schematic plan of anchorage measure

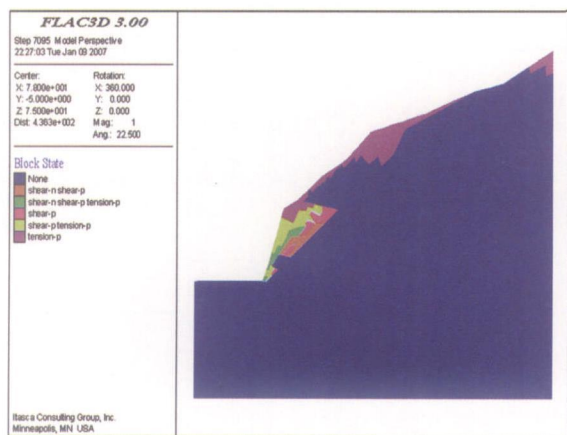


图 5 边坡破坏区图(治理前)

Fig 5 Plastic zone without supporting

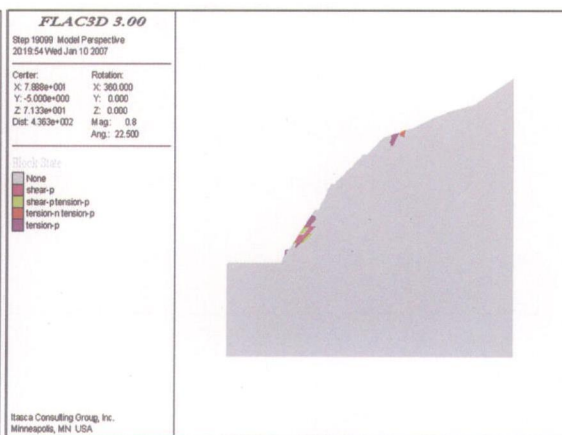


图 6 边坡破坏区图(治理后)

Fig 6 Plastic zone of supporting

参考文献 (References)

- [1] Cheng Lianhui. The using and progress of the Chinese ground anchorage technology [J]. In: The Using and Progress of the Ground Anchorage Technology [C]. Beijing: International Academic Publishers, 1996: 1~5. [程良奎. 中国岩土锚固技术的应用与发展 [J]. 岩土锚固工程技术的应用与发展 [C]. 北京: 万国学术出版社, 1996: 1~5.]
- [2] Cao Xingsong, Zhou Depei. Design of anti slide pile with prestressed anchor rope for high slope of weak rockmass [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(4): 447~452. [曹兴松, 周德培. 软岩高边坡预应力锚索抗滑桩的设计计算 [J]. 山地学报, 2005, 23(4): 447~452.]
- [3] Sun Yuke. Stability Analysis of the Slope Rockmass [M]. Beijing: Science Press, 1988: 218~243. [孙玉科. 边坡岩体稳定性分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 218~243.]

- [4] Tan Juhong, Yan E chuan. Influence and implication of water and fissure on slope stability [J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3): 373~377. [谭桔红, 晏鄂川. 水与裂隙对边坡稳定性的影响分析及工程应用 [J]. 山地学报, 2004, 22(3): 373~377.]
- [5] Jin Liangchao. Optimize Test [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988: 32~44. [金良超. 优化试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 32~44.]
- [6] Zhang Lewen, Wang Nian, Xue Haijun, et al. The using and test research of grouted bolts for the slope reinforcement engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (sup. Pl): 1209~1212. [张乐文, 汪 稔, 徐海滨, 等. 注浆锚杆在边坡加固工程中的应用及试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 1209~1212.]

Orthogonal Analysis and Application on Anchorage Parameters of Rock Slope

YAN E'chuan, LÜ Meijun, Li Honggang

(Engineering Faculty, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Anchorage engineering is the most effective measure to protect rock slopes. However, the choosing of the anchorage parameters such as length, spacing and prestress value etc. was still not well enough resolved theoretically and not designed reasonably in the practical engineering. Take the Shi-zi-bao rock slope as example, firstly orthogonal test design method is adopted to analyze the compound program. Then choose the stability factor as the evaluating indicator, and the anchorage parameters are changed to study the influences on the stability of slope. The calculation results show that the influence sequence (from large to small) of the parameters is: prestress value, spacing and length. Based on the analysis of calculation, the optimum anchorage parameters are chosen for the project. In the last numerical simulation used the Lagrangian difference method FLAC3D is employed to verify the anchorage effect.

Key words: anchorage parameters; stability of slope; orthogonal test; anchorage effect