锚固岩体力学性质的研究

麦倜曾 张玉军

(西南交通大学)

摘要

本文通过模型试验,初步探索了在软弱围岩中粘接型锚杆长度及密度的改变,对岩体力 学性质影响的规律。在特定条件下,得出了岩体强度、变形特征值及锚杆等效支护力与锚杆 长度、密度的经验关系式,找出了合适的锚杆长度,并提出了锚固岩体简单的本构方程。

一、前 言

作者认为,岩体被锚杆加固后,其强度和变形特征均有明显提高,并且这一提高与锚 杆的长度、间距密切相关。为了证实这一点,并从定量上表示岩体的力学性质和锚杆参数 的关系,作者设计了本文中的模型试验,想通过改变软弱围岩中锚杆长度与根数(间 距),考察岩体力学性质即强度、变形、C、Φ、E等值的变化规律。分析锚杆的作用机 理,找出效果较佳的锚杆参数,并提出模拟岩体的力学模型。

二、加载装置与相似材料

(一)试验块体和加载装置

本试验的锚固试体是相当于从一铁路隧道洞侧"取出"的,该试体的所处部 位 及 形状,尺寸见图1、图2

为了较真实地模拟岩体的受力状态,设计了如图3的加载装置。



本文于1986年6月收到

(二)相似材料

根据试验条件,定几何相似比 $C = \frac{1}{10}$ 容重相似比 $C_{\gamma} = 1$,可得应力相似比

$$\mathbf{C}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{\mathrm{L}} \cdot \mathbf{C}\boldsymbol{\gamma} = \frac{1}{10}$$

试体的尺寸为30×30×40厘米

1、围岩:采用砂:胶=3:1,强弱胶比(石膏:碳酸钙)=0.7:0.3,用水量= $\frac{1}{7}$,缓 疑剂(柠檬酸)掺量= $\frac{1}{10000}$

2、粘接剂:采用石膏:水=1:1

围岩及粘接剂的物理力学指标见表1。

表1

相似材料的物性值

力学指标	抗压强度	抗拉强度	弹性模量	泊桑系数	内聚力	内摩 擦 角	容重
	σ_{t}	σ _c	E	μ	C	Φ	Y
	(公斤/ 厘米 ²)	(公斤/ 厘米 ²)	(公斤/ 厘米 ²)		(公斤/ 厘米 ²)		(克/ 厘米 ³)
围岩	6.08	0.54	2.33×10^3	0.4	0.91	56.8°	1.8
粘接剂	9.14	2.21	1.15×10 ⁴	0.38	2.25	37.6°	

3、锚杆:用直径为4毫米,壁厚为0.5毫米的紫铜管作为模拟锚杆。由试验得出这种 铜管的破坏抗拉强度为48公斤/毫米²,屈服极限为24公斤/毫米²,弹性模量为1.25×10⁶ 公斤/厘米²。

三、试验过程及结果

(一)试体制做

将相似材料拌和后,填入模具内, 同时埋入φ8的铜棍以预留出锚杆孔眼。 待一定 时间后,抽出铜棍,将锚杆(铜管)粘以石膏浆插入。24小时后拆模, 试体自然放置。 锚杆的参数及布置见表2。

(二)试验

试体满5天龄期后,将其放入加载装置内,在200吨压力机上加载。测定试体自由面 位移,锚杆中应变(制做了若干根量测锚杆),试体破坏荷载值,描绘自由面破坏形态, 观察锚杆破坏形状。

(三)破坏荷载及位移

表2			试 体	锚杆布	X		
锚杆根数	1	3	4	5	9	16	25
布置图	0						
间距e(厘米)	30	20	15	10.6	10	8	6
锚杆长 <u>L</u> L=20厘米 e	0.67	1	1.33	1.89	2	2.5	3.33
锚杆长 <u>L</u> L-30厘米 e	1	1.5	2	2.83	3	3.75	5
锚杆长 <u>L</u> L=40厘米 e	1.33	2	2.67	3.77	4	5	6.67

注:"〇"表示量测锚杆

表3

各试体破坏荷载

根数 长度(厘米)	1	3	4	5	6	16	25
20	14	15 12.5	17	17	22	34.5 28.75	42 35
30	16	19.1 15.92	22.8	28 23.33	35 29.11	40	52 43.33
40	16 13.33	21.7	25	32	38.2 31.83	45	57

注:无锚杆试体破坏荷载为13.5吨。表中上方数字以吨计,下方数字以公斤/厘米² 计。

表4

试体破坏时位移

根数 长度(厘米)	1	3	4	5	9	16	25
20	9.3	8.5	7.69	7.3	12	9.2	14.8
30	3.9	12.9	6.0	10.3	9.1	14.7	19
40	6.3	12	6.1	13.2	10.1	13.9	15.4

注:表中数字以毫米计,无锚杆时为11.7毫米。

13.5吨荷载时各试体位移

根数 长度厘米	1	3	4	5	9	16	25
20	7.4	5.5	2.8	1.8	1.3	0.7	0.19
30	1.8	2.8	1.9	0.75	0.8	0.3	0.2
40	2.4	2.3	1.3	0.7	0.5	0.3	0.25

注:所得位移值是几个测点的均值,以毫米计。

(四)典型的试体荷载位移曲线及锚杆中轴力分布变化图。

见图4、图5、图6。

图	4	約	试	驗	勬	搌
<u> </u>	-	69			312	200

P(T)	5	10	15	20	25	30	34.5
锚头	0.05	0.12	0.26	0.39	0.88	2.17	4.43
自由面	0.17	0.36	0.81	1.98	3.27	5.64	9.2
1	4.8	21.4	37.7	54.8	68.1	41.6	104.2
2	15.4	30.1	53.2	22.3	54.5	111.9	165.4
3	6.3	15.7	26.2	76.1	114,7	139.5	136.8



图 4

注: 表中锚头和自由面项指二者的位移值,系由电阻式位移计读数换算而来,阿拉伯数字项指三个应变片测值换算成的锚杆三点轴力值。位移单位为毫米,轴力单位为公斤。 图 5、图 6 的表格意义同此。

表6

试体破坏时锚杆中最大時力值

根数 长度(厘米)	1	3	4	5	9	16	25
20	40	19 3	182	101	246	165	96
30	57	64	163	172	228	204	233
40	67	65	147	160	210	221	257

笜	4	牂
211	·т	æ

			图 5	的	试验	数批	圣			
P(T)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	52
	0.03	0.12	0.26	0.37	0.71	1.78	2.86	4.40	8.92	14.35
自由面	0.10	0.17	0.37	0.50	2.19	3.54	4.18	6.79	12.47	19.0
1	6.4	26.7	20.7	17.4	40.1	60.1	71.3	82.1	136.7	165.4
2	10.2	24.3	25.8	23.8	56.8	75.3	109.2	124.8	189.3	233.2
3	18.3	10.2	19.5	35.9	37.5	42.6	94.7	112.6	153.1	195.3
4	8.7	25.6	23.4	26.0	30.4	16.7	38.6	50.9	101.8	150.5
5	4.6	20.1	16.3	21.7	23.5	26.4	21.5	15.7	78.6	92.8
<u>,</u>										·····
	5	10	1	5	20	25	3(3 5	38.2
锚头	0.03	0.14	0	25	0.41	0.83	1.5	36	2.32	2.86

	5	10	15	20	25	30	35	38.2
锚头	0.03	0.14	0.25	0.41	0,83	1,36	2.32	2.86
自由面	0.13	0.31	0.59	1.38	2.07	3.41	6.23	10.1
1	2.3	4.7	7.6	11.3	14.2	24.8	40.9	53.4
2	6.7	3.1	21.7	30.2	48.3	103.5	124.7	165.4
3	5.4	9.8	31.1	72.8	91.3	130.7	155.4	210.2
4	10.2	15.3	20.1	55.8	75.8	109.4	124.7	191.3
5	7.1	18.5	15.8	35.7	60.3	61.6	86.4	149.5
6	3.9	7.6	10.0	23.4	35.6	37.1	61.9	82.7





注:表中数字以公斤计。

(五)、试体破坏形态 绘出30厘米锚杆试体破坏时自由面素描。

四、试验分析

(一)锚杆长度、密度对岩体强度的影响

1试体的破坏荷载与锚杆长度、密度的关系

由表3看出,三种长度锚杆试体大致有一种锚杆从短到

长,密度逐次减小一级,而破坏荷载却相近的关系,这说明长 图7 而稀与短而密的锚杆都可以发挥同样的作用。当锚杆长度不变,而密度变化时,试体破环 荷载为不加锚杆的1~4倍;而当锚杆密度相同,长度改变时,不同长度锚杆试体的破环 荷载提高的幅度却很不一样,锚杆长度由20厘米增加到30厘米,破坏荷载提高14%~64%, 而锚长由30厘米增加到40厘米时,破坏荷载仅提高0~18%,可见,并不是锚杆越长,试 体承载能力越大(按比例)。

2试体的变形与锚杆长度、密度的关系

由图8。几条典型荷载一位移曲线看出,随着锚杆长度、密度的增加,试体的荷载一 位移曲线逐渐变陡,近似屈服极限(表7)不断提高,并且弹、塑性分界变得不太明显,

表7

试体的近似屈服荷载(吨)

根数 长度 (厘米)	1	3	4	5	9	16	25
20	4	7.8	10	9.8	10	16	18
30	10	9	10	10	14	17	19
40	8	8	9.8	13	15	17.5	21

注:不加锚杆试体在约5.5吨时屈服。



根据表5,可拟合出三种长度锚杆试体在13.5 吨荷载时位移值*U**—*N*(锚杆根数)关系式

 $U* = \frac{A}{N} \begin{pmatrix} A = 9.5 & 20 \ {\basel{eq:update} 20 \ {\basele} 20 \ {\base$

由表5可见,设置锚杆对限制围岩自由面的径 向位移的作用是明显的。当洞室埋深一定,地压为 常数的情况下,随着锚杆长度、密度的增加,相对

图 8 几条典型的荷载一位移曲线 于不加锚杆的洞边最终位移(本试验是破坏时极限 情况)逐渐减少。值得注意的是,20厘米锚杆的密度由1根到25根时,在13.5吨荷载时位 移值由7.4毫米减少到0.19毫米,后者约为前者的2.6%,而40厘米锚杆相应的情况为;1





根时位移2.4毫米,25根时为0.25毫米,后者为前者的10.4%,并由表5看出,当40厘米锚杆的密度为5、9、16、25根时,位移减少很慢,位移值均较小,而20厘米锚杆在相应密度时,位移减少仍较明显,但位移值较大。30厘米锚杆与40厘米锚杆对应的位移值差不多,这说明,对限制围岩位移来说,短锚行向非图主要取决于密度,而长锚杆更多的"靠"长度,当长锚杆密度为一定后,再加密,对限制围岩变形的作用就不太明显了。

(二)锚杆中轴力、剪应力分布及对试体强度的影响

由图 4 — 6 看出, 锚杆中轴力的分布, 大致为锚杆中间大, 两头小, 这与实际情况是符合的。对锚杆轴力的分布, 可大致将其认为是按二次抛物线分布, 最大值在杆体中点。

$$P = N_{\text{max}} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2} \right)$$

由剪应力和轴力的关系式 $\tau_x = \frac{1}{\pi d} \cdot \frac{dp}{dx}$, 可得

$$\tau_{x} = -\frac{1}{\pi d} \cdot \frac{8 x N_{max}}{l^2}$$

1---锚杆长度,

N_max一轴力最大值,

d-锚杆直径。

由于这一剪应力的存在,使围岩近似处于三向应力状态,为使问题简化,将各根锚杆



图 9 错杆中轴力分布很定 图10 锚杆中剪应力分析 中受力情况看成一样的,将这一剪应力"移植"到锚杆端部的岩面上去成为σ₈,其算式为

$$\sigma_{3} = \int_{0}^{L/2} \frac{n}{s} \tau_{\lambda} \cdot \pi \cdot d \cdot dx = -\frac{8N_{m+x}n}{Sl^{2}} \int_{0}^{L/2} x dx = -\frac{nN_{m+x}}{S}$$

n-试体中锚杆数,

S一试体自由表面积。

由于 σ_3 的存在,使试体莫尔圖右移,提高了安全度,现画出各试体的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 应力圆(图11)。

由锚杆轴力的分布,也可判断试体中松弛区的范围。拿30、40厘米锚杆来看,其最大轴力大致在离自由面20~30厘米之间,可以认为试体松弛区为半个试体长,即20厘米,因而也就可解释,20厘米锚杆由于尚在松弛区,无法与完好岩区发生联系,故作用发挥不充分,而30厘米锚杆有¹3的长度伸入到了完好岩区,"拉"住了松弛区的岩体,作用就很明



[112、"承载环"的"嵌套"与"销匠"

显。如果说,20、30 厘米锚杆都能将洞室周围松动 岩土加固成"承载环",那么,20 厘米锚杆形成的"承 载环"只是"嵌套"在完好岩体内,而30 厘米锚杆形 成的"承载环"则是"销固" 在完好岩体内 (图 12)。40 厘米锚杆长度一半虽都在完好岩区内,但 破坏荷载并没有较30 厘米锚杆的提高很多,所以锚 杆长度以穿过松弛区伸入完好区为好,但不宜伸入 过多,作者认为锚杆长度以1.5倍松弛区厚度较好。

用最小二乘法,可拟合出三种长度锚杆试体的 破环荷载P_{m→x}、C、E及锚杆等效支护力σ₃与锚杆 长度及根数的关系式,可统一表示成

 $Z = a + bn^m$, 具体各项见表8。



 $-\sigma_{3}$ 应力图

表8

锚杆长度L	Z	a	Ь	m	备注
L = 20 厘米 L = 30 厘米 L = 40 厘米	P _{max} , P _{max} , P _{max} ,	12.21 7.27 9.24	1.23 9.16 9.19	$\frac{1}{\frac{1}{2}}$	单位; 吨
L = 20 厘米 L = 30 厘米 L = 40 厘米		1.34 0.808 0.795	0.165 1.111 1.255	$\frac{1}{\frac{1}{2}}$	单位: 公斤/厘米 ²
L = 20厘米 L = 30厘米 L = 40厘米	$ \begin{array}{c} ^{1}/E_{1} \\ E_{2} \\ E_{3} \end{array} $	0.178 2.447 2.038	0.197 1.181 1.635	-1 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	单位: 10 ³ 公斤/厘米 ²
L = 20 厘米 L = 30 厘米 L = 40 厘米	б ₃ ,1 б ₃ ,2 б ₃ ,3	0.05 - 0.321 - 0.542	0.196 0.258 0.298	1 1 1	单位: 公斤/厘米 ² n≥3时用

注: n一锚杆根数。

(三)试体破坏状态的考察

在试验中看到,试体无锚杆时,弹、塑性分界点(近似的)较明显,而安装了锚杆后 就不太明显。从荷载一位移曲线来看,变形过程大致可分为弹性阶段—荷载、位移近似成 正比;准弹性阶段—荷载增长率趋于变小,但荷载继续增长;塑性阶段—荷载增长很慢, 位移急剧变大,带有锚杆的破坏荷载为无锚杆的1~4倍,当试体接近破坏时, 位移 加 快,锚杆出露部分逐渐变岩面"淹没"了。

从素描看出, 锚杆较稀时, 试体破坏后自由面大块坍落, 裂缝粗大较错, 而锚杆密集 时, 试体破坏后, 自由面仍较平整光滑, 除了面上、下边缘(应力集中引起的)破坏较显 著外, 面中部只出现了一些细裂缝, 这表明, 锚杆稀时, 会在锚杆之间引起局部破坏, 故 为防止这种现象, 锚杆应有一定密度, 若采用长而稀的锚杆, 应在长锚杆之间布置一些短 锚杆, 长、短交错, 既可提高岩体强度, 又可防止锚杆间的局部破损。

从破**坏**试体中取出的锚杆来看, *n*≥5后, 30、40厘米的量测锚杆都从中部 切 口 处 断 了,断口呈明显的"颈缩"现象,而20厘米量测锚杆只有*n*=9时从中间切口处断开,这表 明当锚杆密度较大时,长锚杆比短锚杆作用更好。

(四)力学模型的建立

根据各试体的荷载一位移曲线形状,可将该种锚固岩体的本构关系理想化为如图
 13。取荷载一位移曲线出现较明显"弯折"处应力为σ,对应的ε作为ε,σ。以下σ-ε
 关系为线性的,取原点弹性模量,σ=Eε。σ、以上,σ
 σ-ε关系为一抛物线。

$$\sigma = A \sqrt{\varepsilon - B} + c \quad (u)$$

$$E(\varepsilon) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{A}{2\sqrt{\varepsilon - B}} \quad (b)$$

在单向压缩状态下有 $\sigma_1 = E\varepsilon_1$ (即 $\sigma = E\varepsilon$)。 本试验中 $\sigma_1 = -\frac{E\varepsilon_3}{J_{\bullet}.56}$,



图13 试体σ--E曲线

因为 $\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_3}{2-56}$ (取绝对值,并认为在弹、塑性变形中此关系维持不变)。

A、B、C三个常数是这样定下的:将(σ 、 ε _s)、(σ _{max})代入式(a)、(b),并认为在(σ _s, ε _s)点弹模连续,故可得

$$\left(\begin{array}{c} \sigma_{s} = A \quad \int \overline{\varepsilon_{s} - B} + C \\ \sigma_{max} = A \int \overline{\varepsilon_{max} - B} + C \\ E = -\frac{A}{2 \quad \int \overline{\varepsilon_{s} - B}} \end{array} \right)$$

σ,--取表7值算得。 E-原点弹模。

联立解之,	可求出三常数。	表9是各试体的E、	$\sigma_{\rm s}$,	ε _s ,	Α,	B_{γ}	C诸值。
- * .							

表9

根数		0	1	3	4	5	9	16	25
20	E	2.24	2.71	3.89	4.26	4.50	5.55	5.63	5.10
	σ.,	4.58	3.33	6.50	8.33	8.17	8.33	1 3. 33	15.00
	8 .	2.05	1.13	1.63	1.97	1.79	1.50	2.37	2.95
	A	31.54	45.86	33 .33	34,53	36.24	45.96	86.17	86.63
	B	1.71	0.78	1.55	0,75	1.71	1 .3 9	1,97	2.50
	C	3.99	2.36	5.71	7.98	7.81	7.85	11.68	13.16
30	E	2.24	5.05	4.31	4.36	5.81	6.60	6.98	8.18
	σ,	4.58	8.33	7.5	8.33	8.33	11.67	14.17	15.83
	£ .	2.05	1.66	1.75	1.91	1.43	1.77	2.02	1.93
	A	31.54	43.18	36.89	79.38	76.70	97.26	80.88	100.66
	В	1.71	1.55	1,62	1.39	1.16	1.43	1.82	1,70
		3.99	7.87	7.10	6.52	7,06	9,88	13,00	14.28
40	E	2.24	3.41	3.82	5.53	5.87	7.67	9.0	9.69
	σ.	4.58	6.67	6.67	8.17	10.83	12.50	14.58	17.50
	ε	2.05	1.97	1,75	1.48	1.84	1.62	1.62	1.80
	A	31.54	45,75	5.1.40	89.46	70.86	99.44	98.59	123.65
	B	1.71	1.66	1.43	1.07	1.62	1.36	1.43	1.55
	C	3.99	5.60	5,70	6.36	9.76	10.89	13.23	15.53

注: E的单位是10³公斤/厘米²; A、B、C、 σ _s的单位是公斤/厘米²; ε _s、B的单位是 10⁻³。

2认为材料的破坏符合莫尔一库仑准则,其C、ø值由前面经验公式得出。

五、结 论

根据试验结果可得出以下结论:

1、随着锚杆长度、密度的增加,围岩的强度持续提高,其各项物性指标p。、C、 φ、E及锚杆作用产生的σ。皆是锚杆长度、密度的函数。 2、随着锚杆长度、密度的增加,相对于一定围岩压力,岩体位移与锚 杆根 数 成 反 比。

3、砂浆锚杆的轴力随荷载增大而增大。为简化计算,可将锚杆轴力分布看成二次抛物线型,并可将锚杆剪力转化为作用在岩面上的σ₃。

4、从三种长度锚杆对围岩强度、变形的影响,锚杆中轴力分布考察,认为在一般情况下, 要达到同样的支护效果,长而稀和短而密的锚杆都是可行的。也看出30、40厘米锚 杆作用相近,所以锚杆也不宜过长,其密度随坑道埋深而加大。为避免长而稀锚杆之间局 部破裂,可实行长、短锚杆相间设置。

5、该种锚固岩体的本构方程为

 $\begin{vmatrix}
 \sigma = E \varepsilon & \varepsilon \ge \varepsilon, \\
 \sigma = A \int \overline{\varepsilon - B} + C & \varepsilon > \varepsilon, \\
 其破坏符合莫尔—库仑准则。$

Research of The Bolted Rocks Statical Behavior

Mai Tizeng Zhang Yujun

(Southwestem Jiaotong University)

Abstract

In this paper, on basis of model experiments, the authors tentatively studied the altering regularity of the statical behavior of rock mass influened by chang the length and spacing of grouted rock bolts in soft rock. Under specific conditions, empirical formulas were tiven to show the relation between the characteristic values (including ørenigth and deformation) of rock and the length and spacing of grouted lsock bolts, and that between the equivalent supporting force and the length and spacing of grouted rock bolts. Thus obtained the proper ength of grouted rock bolts. Finally, a simple stress—strain curve (i.e. the constitutive equation) of bolted rock of this kind was suggested.