

复杂岩石中的建筑物
学术会议论文

编号:

锚固岩体力学性质的研究

麦 倜 曾 张 玉 军

西南交通大学

复杂岩石中的建筑物
学术会议论文

编号:

锚固岩体力学性质的研究

麦 倜 曾 张 玉 军

西南交通大学

一、前 言

在地下工程实践中，人们已经认识到系统配置的灌浆锚杆能显著地改善软弱洞室围岩的力学性质。但是，由于锚杆作用机理尚未彻底了解清楚，所以人们在确定锚杆的两个重要参数：长度和间距时，不得不在很大程度上靠经验。

实际上，由于锚杆的存在，显著地提高了岩石的强度及变形特征，简单地说，就是被扰动岩石的 E 、 C 、 ϕ 等值提高了，这在用于分析锚杆——围岩体系力学行为的有限元程序中是应该正确反映的，但目前只是把锚杆作为一维杆单元，考虑在离散化模型中，或仅靠锚杆与岩石的不同弹模来反映锚杆的影响，或凭经验，大概定一个提高的岩石的 E 、 C 、 ϕ 等指标来计算，结果，不是锚杆的作用极微小，就是计算数据离实际相差很远。

基于上述问题，为搞清锚杆作用机理，建立完善锚杆支护理论，在生产中更好的利用锚杆支护，很有必要进行锚固岩体力学性质的研究。从当前锚杆的研究趋势来看，人们已注意到了这个方面的探讨，如日本的土屋敬曾作过用锚杆加强岩块的试验。他在模拟岩体中采用了不同的锚杆间距及有、无垫板等，得出破坏荷载与锚杆密度及荷载与位移的关系曲线，作出了相应的结论，但目前此类试验还进行的很少，国内尚处于开始阶段。本文试图通过模拟试验，考察在软弱围岩中锚杆长度与根数（间距）的改变，岩体力学性质即强度、变形、 C 、 ϕ 、 E 等值的变化规律，找出锚固效果最佳的锚杆参数，并提出模拟岩体的力学模型。

一、前言

在地下工程实践中，人们已经认识到系统配置的灌浆锚杆能显著地改善软弱洞室围岩的力学性质。但是，由于锚杆作用机理尚未彻底了解清楚，所以人们在确定锚杆的两个重要参数：长度和间距时，不得不在很大程度上靠经验。

实际上，由于锚杆的存在，显著地提高了岩石的强度及变形特征，简单地说，就是被扰动岩石的 E 、 C 、 ϕ 等值提高了，这在用于分析锚杆——围岩体系力学行为的有限元程序中是应该正确反映的，但目前只是把锚杆作为一维杆单元，考虑在离散化模型中，或仅靠锚杆与岩石的不同弹模来反映锚杆的影响，或凭经验，大概定一个提高的岩石的 E 、 C 、 ϕ 等指标来计算，结果，不是锚杆的作用极微小，就是计算数据离实际相差很远。

基于上述问题，为搞清锚杆作用机理，建立完善锚杆支护理论，在生产中更好的利用锚杆支护，很有必要进行锚固岩体力学性质的研究。从当前锚杆的研究趋势来看，人们已注意到了这个方面的探讨，如日本的土屋敬曾作过用锚杆加强岩块的试验。他在模拟岩体中采用了不同的锚杆间距及有、无垫板等，得出破坏荷载与锚杆密度及荷载与位移的关系曲线，作出了相应的结论，但目前此类试验还进行的很少，国内尚处于开始阶段。本文试图通过模拟试验，考察在软弱围岩中锚杆长度与根数（间距）的改变，岩体力学性质即强度、变形、 C 、 ϕ 、 E 等值的变化规律，找出锚固效果最佳的锚杆参数，并提出模拟岩体的力学模型。

二、加载装置与相似材料

§ 2-1 试验块体和加载装置

本试验的岩块试体是相当于从直墙式洞室的侧部取出的，其顶面荷载简化为均匀分布。

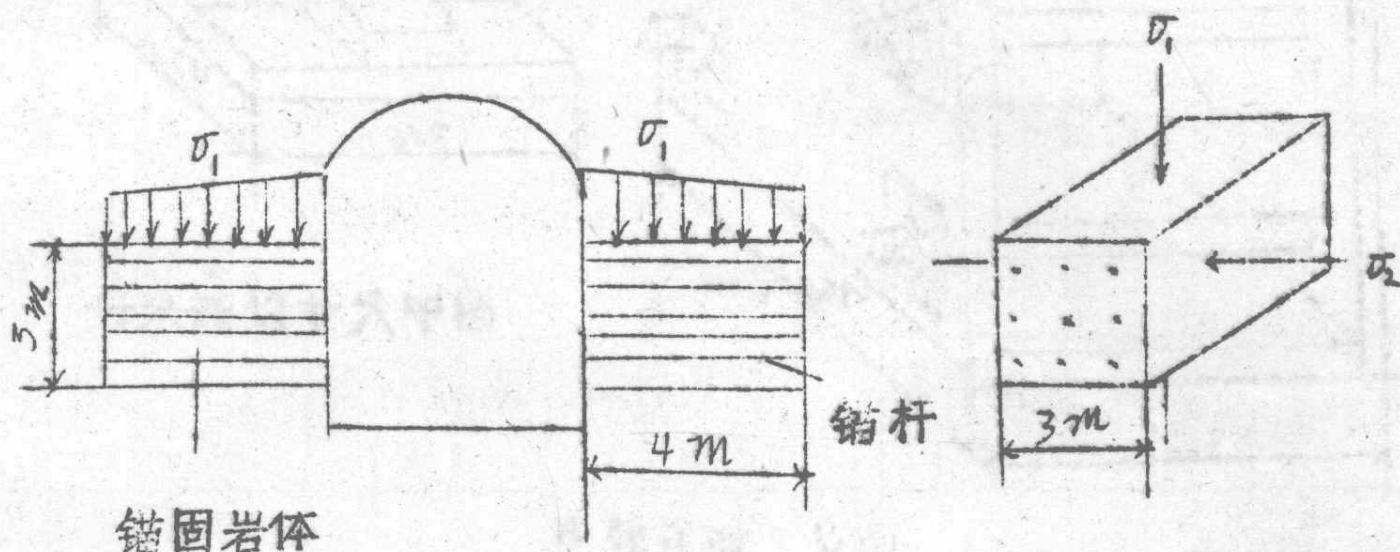


图 1 洞室及锚杆设置

图 2 试体

为了较真实的模拟体的受力状态，设计了如图 3 的加载装置。在试体的上、下、左、右四个面与钢板间放入厚度为 1 毫米的聚四氟乙烯板，以减少摩擦，将该装置放在 200 吨压力机上加荷。

~3~

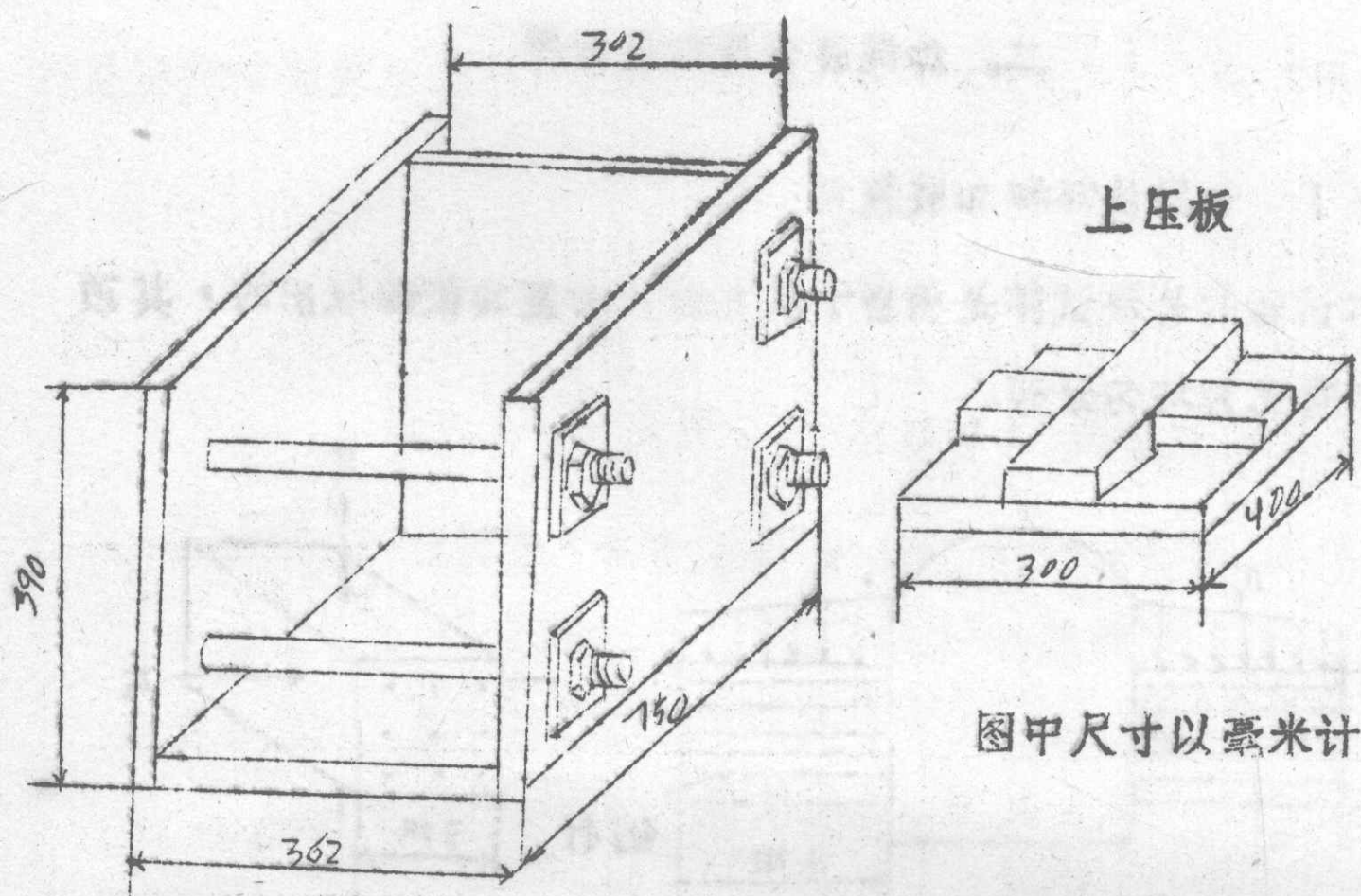


图3 加载装置

§ 2-2 相似材料

根据试验条件，定几何相似比 $C_L = 10$ ，容重相似比 $C_\nu = 1$ ，
可得应力相似比 $C_\sigma = C_\nu \cdot C_L = 10$ 。

试体的尺寸为 $30 \times 30 \times 40$ 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 = 1/7，缓凝剂（柠檬酸）掺量 = 1/10000。

砂——细度模数 20~40 的石英砂

石膏——细度模数 160 的石膏粉

碳酸盐——重质碳酸钙粉

$\mu = \frac{r_{\text{胶}}}{r}$
(1870 微米)

用 $7.07 \times 7.07 \times 7.07$ 厘米试块及八字模试块测定抗压及抗拉强度。

用 $7.07 \times 7.07 \times 14.14$ 厘米试块测定弹性模量及泊桑比，并设相似围岩材料的破坏符合莫尔——库仑准则，其强度线为一直线，故由抗压强度 σ_t 和抗拉强度 σ_c 可定出 C 、 φ 值

$$C = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_t \cdot \sigma_c}, \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma_t - \sigma_c}{2 \sqrt{\sigma_t \cdot \sigma_c}} \right)$$

结果见表 1。

表 1 围岩相似材料物性数据

	试件龄期 (天)	试件尺寸 (厘米 ³)	试件块数 (块)	平均值
抗压强度 σ_t (公斤/厘米 ²)	5	7.07^3	15	6.08
抗拉强度 σ_c (公斤/厘米 ²)	5	八字模块	15	0.54
弹性模量 E (公斤/厘米 ²)	5	$7.07^2 \times 14.14$	5	2.33×10^3
泊桑系数	5	$7.07^2 \times 14.14$	5	0.4
C (公斤/厘米 ²)				0.91
φ				56.8°

(2) 粘接剂：采用石膏：水 = 1 : 1，其物性指标见表 2

表2 粘接剂物性数据

	试件龄期 (天)	试件尺寸 (厘米 ³)	试件块数 (块)	平均值
抗压强度 σ_t (公斤/厘米 ²)	5	7.07 ³	9	9.14
抗拉强度 σ_c (公斤/厘米 ²)	5	八字模块	9	2.21
弹性模量 E (公斤/厘米 ²)	5	7.07 ² × 14.14	3	1.15 × 10 ⁴
泊桑系数	5	7.07 ² × 14.14	3	0.38
C (公斤/厘米 ²)				2.25
φ				37.6°

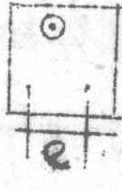
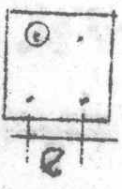
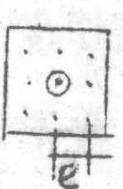
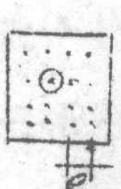
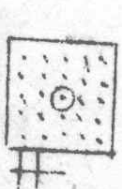
(3) 锚杆：设真实锚杆直径为 25 毫米，长度分别为 2、3、4 米，弹模为 2.1×10^6 公斤/厘米²。观用直径为 4 毫米，壁厚为 0.5 毫米的柴铜管作模拟锚杆。由试验得出这种铜管的破坏抗拉强度为 48 公斤/毫米²，弹模为 1.25×10^6 公斤/厘米²。

三、试验过程及结果

§ 3—1 试体的制做

每个试体用料：石英砂 石膏 碳酸钙 水 柠檬酸
公斤 54 12.6 5.38 10.24 7.17 克

表3 试体锚杆布置

		1	3	4	5	9	16	25
布置图								
间距(厘米)		30	20	15	10.6	10	8	6
20厘米	$\frac{L}{e}$	0.67	1	1.33	1.89	2	2.5	3.33
30厘米	$\frac{L}{e}$	1	1.5	2	2.83	3	3.75	5
40厘米	$\frac{L}{e}$	1.33	2	2.67	3.77	4	5	6.67

注：“⊙”表示量测锚杆。

§ 3—2 锚杆的制做与安置

将 $\phi 4$ 的铜管截为21、31、41厘米长度。量测锚杆是在截好的铜管上，每隔一定距离，用线切割机割出一个15毫米长，2毫米深的“窗口”，将 1×1 毫米的电阻应变片用502胶水贴入，引线用 0.1 毫米直径的漆包线焊接上，为绝缘，用胶带纸将两个接线头隔开包裹好，漆包线从管的一端导出，最后“窗口”用割下的铜管片再粘台上，管子两端用防潮剂糊堵好。以石膏：水=1：1的石膏浆，将锚杆孔眼灌满，把锚杆插入。24小时后折摸，自然放置。

§ 3—3 试验

试体满5天龄期后，将其放入加载装置内，拧紧螺杆帽，使钢板紧紧夹住试块，不得在侧向产生位移。量测锚杆的引线接到预调平衡箱上，贴有补偿片的铜管埋设在一小试件内，用电阻式位移计

量测试体自由面的位移。用200吨压力机加载，荷载经过刚度很大的上压板较均匀地传到试体顶面上。锚杆内的应变和电阻式位移计的读数在YJ—16应变仪上读出，荷载数在压力机的读数盘上读出，加载速度为1吨/分钟。试体破坏后，拍摄或素描自由面的破坏形态。最后从破坏试体中取出锚杆观察其形状。

§ 3—4 破坏荷载及位移

表 4 各试体破坏荷载

根数 长度 _{cm}	1	3	4	5	9	16	25
20	14 11.67	15 12.5	17 14.17	17 14.17	22 18.33	34.5 28.75	42 35
30	16 13.33	19.1 15.92	22.8 19	28 23.33	35 29.11	40 33.33	52 43.33
40	16 13.33	21.7 18.08	25 20.83	32 26.67	38.2 31.83	45 37.5	57 47.5

注：

(1) 无锚杆试体破坏荷载为 13.5 吨 ($\sigma_{\max} = 11.25$ 公斤/厘米²)；

(2) 表中斜线上方数字为破坏荷载 (吨)，下方数字为最大应力 (公斤/厘米²)；

(3) 破坏荷载指压力机读数盘指针开始回退时荷载读数。

表5 试体破坏时位移

长度 cm \ 根数	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。

表6 13.5吨荷载时各试体自由面位移

长度 cm \ 根数	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	2.0	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。

§ 3—5 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—6

表7 试体破坏时锚杆中最大轴力值

单位：公斤

长度 cm \ 根数	1	3	4	5	9	16	25
20	40	193	182	101	246	165	96
30	57	64	163	172	228	204	233
40	67	65	147	160	210	221	257

注：假定锚杆切口处和完整段应力一样，杆中轴力为应力乘以完整段截面积。

§ 3—6 试体破坏形态

绘出 30 厘米锚杆试体破坏时自由面素描。

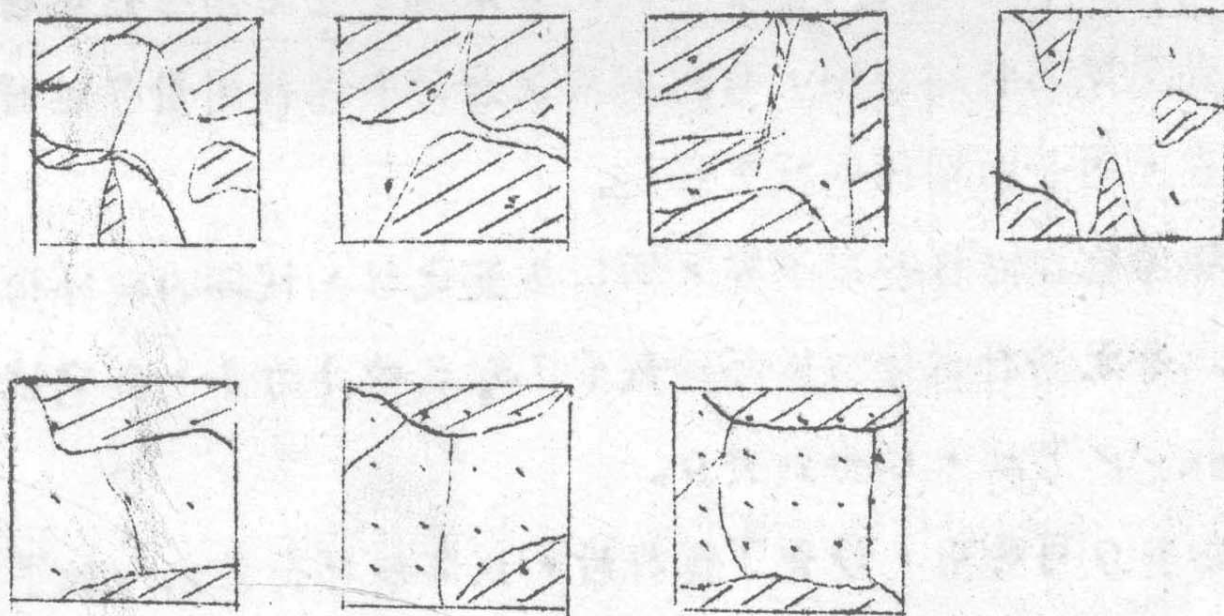


图 7

四、试验分析

§ 4-1 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

在 $P_{\max}$ (破坏荷载) —— n (锚杆根数) 坐标系中, 作出各 ($P_{\max}$, n) 点 (图), 用最小二乘法进行曲线拟合, 得三种长度锚杆试体的 $P_{\max}$ — n 关系式

$$20 \text{ 厘米锚杆 } P_{\max, 1} = 12.21 + 1.23n$$

$$30 \text{ 厘米锚杆 } P_{\max, 2} = 7.27 + 9.16n$$

$$40 \text{ 厘米锚杆 } P_{\max, 3} = 9.24 + 9.19n$$

由表 4 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, 即表 8 中每一虚线所示。这说明, 对于提高围岩承载能力来说, 长而稀与短而密的锚杆都可以发挥同样的作用, 考虑到单位岩体中锚杆用量与钻眼工作量的节省, 用长而稀的锚杆更好些。

现考察在锚杆长度不变, 而密度变化时, 试体的破坏荷载变化情况。令无锚杆试体的破坏荷载 (13.5 吨) 为 1, 其它试体的就为 $P_{\max} / P_{\text{无}}$, 可得到表 9。

由表 9 可看出, 设置了锚杆后, 试体破坏荷载都增加了, 最大可为不加锚杆的 3~4 倍。

再考察在锚杆密度相同, 而长度不同时试体破坏荷载变化情况。设 20 厘米锚杆试体的破坏荷载为 1, 得表 10。

表 8

根数 长度 cm	1	3	4	5	9	16	25
20	14	15	17	17	22	34.5	42
	20	60	80	100	180	320	500
	16	19.7	22.8	28	35	40	52
30	30	90	120	150	270	480	750
	16	21.7	25	32	38.2	45	57
40	40	120	160	200	360	640	1000

注：每大格中上格为破坏荷载（T），下格为试体中锚杆总长度（厘米）。

表 9

根数 长度 cm	0	1	3	4	5	9	16	25
20	1	1.04	1.11	1.26	1.26	1.63	2.56	3.11
30	1	1.19	1.41	1.69	2.07	2.59	2.96	3.85
40	1	1.19	1.61	1.85	2.31	2.83	3.33	4.22

表 10

根数 长度 cm	1	3	4	5	9	16	25
20	1	1	1	1	1	1	1
30	1.14	1.27	1.35	1.64	1.59	1.16	1.24
40	1.14	1.45	1.47	1.88	1.72	1.30	1.31

由上看出，当密度相同时，锚杆长度由20厘米增加到30厘米，破坏荷载提高约14%~64%，而锚杆长度由30厘米增加到40厘米时，破坏仅提高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 C 、 φ 、 E 值的求算

不加锚杆试体由于处于双向应力状态，其破坏荷载为13.5吨，即 $\sigma_1 = 11.25$ 公斤/厘米²，比单轴受压试块的 $\sigma_1 = 6.08$ 公斤/厘米² 提高了，这主要是 σ_2 参与作用的结果。应用莫尔——

库仑准则，其 c 、 φ 值也变大，若令 φ 不变，仍为 56.8° ，则可得
不加锚杆试体的 $c' = 1.69$ 公斤/厘米²。

对各试体，设 φ 值不变， $\varphi = 56.8^\circ$ ，则可得 $\sigma_t = 0.09\sigma_c$ ，
 $c = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t} = 0.15\sigma_c$ 见表 11。由计算可见，若假定 φ 值

表 11 $\varphi = 56.8^\circ$ ， c 值

根数 长度 cm	1	3	4	5	9	16	25
20	1.75	1.88	2.13	2.13	2.75	4.31	5.25
30	2.0	2.37	2.88	3.50	4.38	5.0	6.5
40	2.0	2.63	3.12	4.0	4.75	5.63	7.13

不变，随锚杆长度密度的增加， c 值提高的就相当可观。

用最小二乘法拟合曲线，得三种长度锚杆试体的 $c-n$ 关系式

$$20 \text{ 厘米锚杆 } c_1 = 1.34 + 0.165n$$

$$30 \text{ 厘米锚杆 } c_2 = 0.808 + 1.111\sqrt{n}$$

$$40 \text{ 厘米锚杆 } c_3 = 0.795 + 1.255\sqrt{n} \quad \varphi = 56.8^\circ$$

单位：公斤/厘米²

$c-n$ 与 $P_{\max}-n$ 关系式是同形式的，因为 $\sigma_c = P_{\max}/s$ ，
 s 为试体顶面积，故 $c-n$ 式可用 $P_{\max}-n$ 式来推求。

不考虑 σ_t ，试体受力如图，有弹性力学公式