

# 加锚节理面抗剪性能研究

葛修润 刘建武

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

## 提 要

本文通过室内模拟试验和理论分析,着重探讨了锚杆对节理面抗剪性能的影响,以及杆体阻止节理面发生相对错动的“销钉”作用机制,提出改进了的估算加锚节理面抗剪强度公式。试验结果表明:加锚节理面的抗剪强度随剪切位移的增加而增大。试验和理论分析都表明,即使不大的剪切位移就已使杆体的抗剪作用得到充分发挥。试验研究还充分显示出锚杆倾角对加锚节理面抗剪强度的重大影响。

本文在给出了用于描述加锚节理面抗剪性能的分析模型和理论分析方法的基础上,导出了计算锚杆最佳安装角的公式。用此算式求得的最佳安装角与实验结果十分吻合。本文还分析了当前在有限元分析中经常使用的一些锚杆单元模型的不足之处,并指出了改进的方向。

## 一、前 言

锚杆对岩体的支护作用可大致概括为三方面:

1. 提高围岩自身的支撑能力,例如层状岩体经过施锚后形成的一种“组合体”,比原层状岩体具有更高的承载能力;
2. 对围岩提供集中支护力,从而改善岩体的应力状态;
3. 具有足够长度的锚杆将不稳定的岩块与稳固的岩体相连,可以改善稳定性,减少崩塌,滑动或掉块的危险性。

沿全长度锚固的水泥砂浆锚杆是应用最广的。它具有施工简单、成本低、锚固作用耐久可靠等优点。值得指出的是,由于锚杆通过水泥砂浆沿全长度与围岩结合在一起,围岩的变形必然要与锚杆的变形协调,从而有效地增强了围岩自身的支撑作用。对于节理和层面发育的岩体,这种粘结式锚杆更具有优越性。它不但增强了这些弱面的抗张能力,更为重要的是改善了这些弱面的抗剪性能,从而在总体上改善了节理岩体的强度。

当今对岩体工程问题作有限元分析时通常采用二结点或三结点的杆单元作为锚杆模型。这种轴力杆式的锚杆单元主要有两个缺点,一是只计及杆体的轴力而未计及杆体本身的抗剪作用;二是杆体各区间(即各杆单元交接处)转角不能协调,这个缺点在用这种模型去模拟穿过节理面的锚杆时就更为突出。

为了探讨粘结式锚杆对节理面抗剪性能的影响和作用机制,建立更加合理的锚杆单元模型,开展加锚节理面抗剪性能的试验研究和理论探讨是十分必要的。

## 二、粘结式锚杆对节理面抗剪强度的影响

粘结式锚杆增强节理面抗剪性能的效应，已为国际岩石力学界所重视，很多单位开展了有关这种增强效应和机制的试验研究和理论探讨<sup>[1]</sup>。

穿过节理面的锚杆在节理面附近的区段内的应力分布见图 1。

粘结式锚杆(无预应力时)对节理面抗剪性能的影响大致可归纳如下三个方面：

1. 由于节理面两壁的相对位移导致锚杆轴向拉力( $T_b$ )的增长，而轴向力相对于节理面的法向分量通过摩擦效应将为节理面提供附加的抗剪能力；
2.  $T_b$ 的平行节理面的分量，将作为节理面抗剪能力的一个组成部分；
3. 粘结式锚杆可以借助于杆体本身的抗剪能力限制节理面的相对错动，这种效应可称之为“销钉”作用。

施加预应力的粘结式锚杆还有另一作用，即预应力导致节理面摩擦阻力的增大。

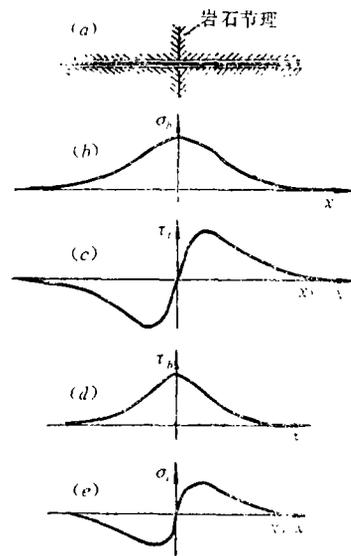


图 1 粘结式锚杆应力分布示意图(据文献[1]) (a)岩石锚杆 (b)杆体拉应力 (c)胶结面剪应力 (d)杆体剪应力 (e)胶结面法向应力

## 三、加锚节理面抗剪强度的估算公式

我们借鉴了国外某些算式并加以改进，提出估算加锚节理面抗剪强度的公式

$$\tau_{bj} = \tau_j + \tau_{bd} + \tau_{bt} + \tau_{bs} \quad (1)$$

- 式中
- $\tau_j$ ——节理面本身的抗剪强度；
  - $\tau_{bd}$ ——由杆体“销钉”作用引起的换算抗剪强度；
  - $\tau_{bt}$ ——由杆体轴向力相对节理面的法向分量引起的换算抗剪强度；
  - $\tau_{bs}$ ——由杆体轴向力相对节理面的切向分量引起的换算抗剪强度。

它们可分别用下列公式求得

$$\left. \begin{aligned} \tau_j &= c_j + \sigma_j \operatorname{tg} \phi_j \\ \tau_{bd} &= \tau_b \cdot \eta (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi_j) \\ \tau_{bt} &= \sigma_b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi_j \cdot \eta \\ \tau_{bs} &= \sigma_b \cdot \cos \alpha \cdot \eta \end{aligned} \right\} (2)$$

- 式中
- $\sigma_b$ ——锚杆轴向应力(以拉应力为正)；
  - $\tau_b$ ——锚杆横截面上的平均剪应力；
  - $\sigma_j$ ——节理面平均法向应力；
  - $c_j$ ——节理面粘结力；
  - $\phi_j$ ——节理面摩擦角；
  - $\alpha$ ——锚杆安装角或称倾角，系节理面剪切位移方向与同一侧锚杆的夹角；

$\eta$  ——锚杆横截面与含单根锚杆的节理面的面积比。

#### 四、加锚节理面抗剪性能的试验研究方法

加锚节理面抗剪性能的试验研究是采用直剪试验, 试验设备为剪切流变仪, 其原理图见图2。

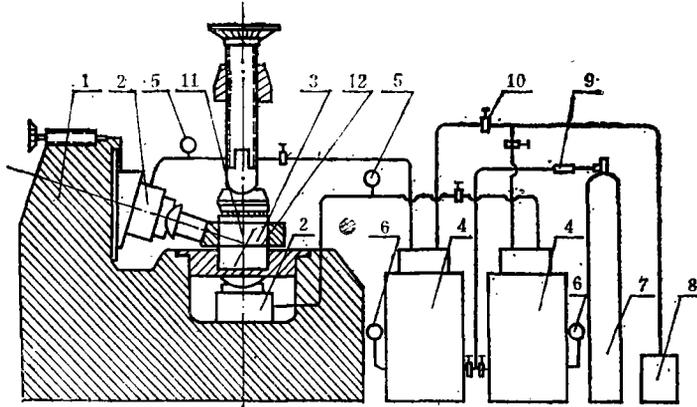


图2 剪切流变仪工作原理图

1 剪切仪 2 扁千斤顶 3 试件 4 稳压器 5 油压表 6 气压表  
7 气源 8 油泵 9 减压阀 10 阀门 11 锚杆 12 节理面

试件用水泥、砂及细石子浇注, 在试样上下两半之间预留有“节理面”, 中央埋设有直径为5mm的圆钢筋, 用以模拟锚杆。锚杆安装角 $\alpha$ 分别为 $90^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $30^\circ$ 。节理面剪切面积为 $197 \times 195 \text{mm}^2$ ,  $\eta$ 值约为 $1/2000$ 。这样制备的试样, 与实际工程中在每平方米面积上作用有一根直径为25mm的锚杆的情形等价。由于混凝土是一种人工石料, 而插入的钢筋又与锚杆材料接近, 因此所得的试验结果对原型将有直接的参考作用。“节理面”分光滑和粗糙两类, 后者是在光面上用人工凿毛方法处理的。

#### 五、加锚节理面剪切—位移特性分析

按锚杆倾角 $\alpha$ 将试件分为四组, 每组试样一般为四个。每一试件都采用逐级加荷卸荷方式。同组各试件的第一级荷载的 $\sigma$ 值是不相同的,  $\sigma$ 值的变动范围在 $0.5 \sim 3.0 \text{MPa}$ 之间。四组试件的剪切—位移曲线分别见图3~6。图7为 $\alpha = 45^\circ$ 时的逐级加荷的剪切位移曲线。 $\alpha$ 角相同但节理面粗糙度不同时的加锚节理面剪切位移特性之对比参见图8~10。

分析加锚节理面的剪切位移特性曲线, 可以得出如下一些有规律性的特征:

1. 不论 $\sigma$ 如何变动,  $\alpha$ 如何变化, 节理面施锚后的剪切—位移曲线具有“塑性”流动的状态, 并具有“硬化”的征状。但这并不是通常所指的“塑性流动”的概念, 而是节理面加锚后由于锚杆对节理面抗剪性能的增强作用所致。总的说来, 节理面加锚后呈现出韧性增强的剪切性能。

2. 试验表明, 加锚节理面的剪切位移超过1mm以后剪切强度仍然在增长。而未加锚的节理面的剪切—位移性能与此有很大差别, 见图11。

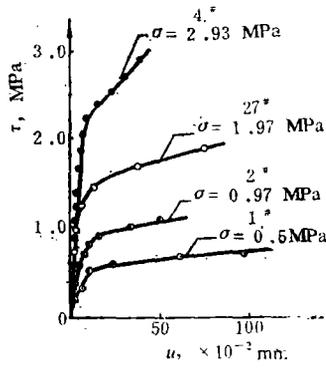


图3  $\alpha = 90^\circ$ 时的剪切-位移曲线族

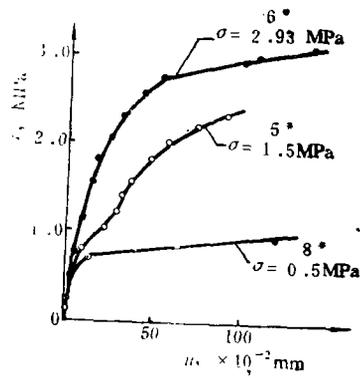


图4  $\alpha = 60^\circ$ 时的剪切-位移曲线族

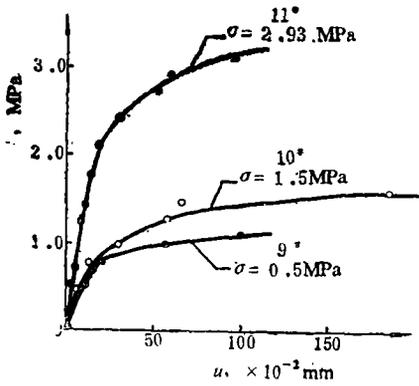


图5  $\alpha = 45^\circ$ 时的剪切-位移曲线族

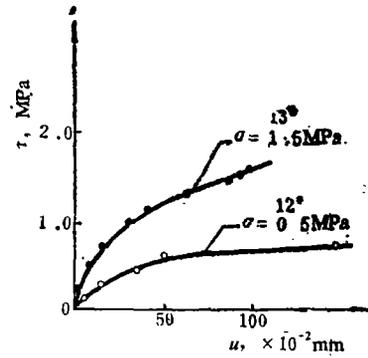


图6  $\alpha = 30^\circ$ 时的剪切-位移曲线族

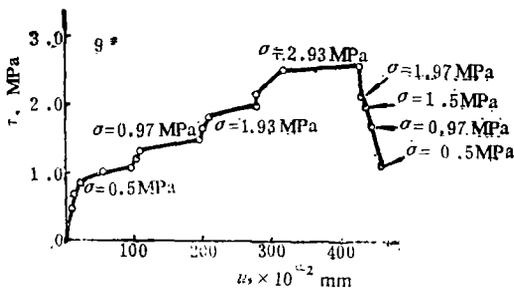


图7  $\alpha = 45^\circ$ 时的逐级加荷剪切-位移曲线

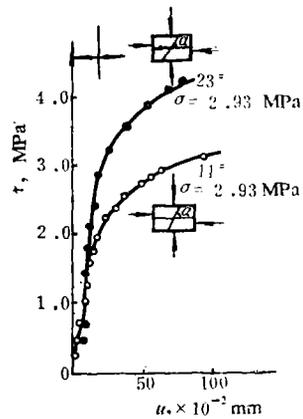


图8 两种加锚节理面剪切-位移曲线之对比( $\alpha = 45^\circ, \sigma = 2.93\text{MPa}$ )

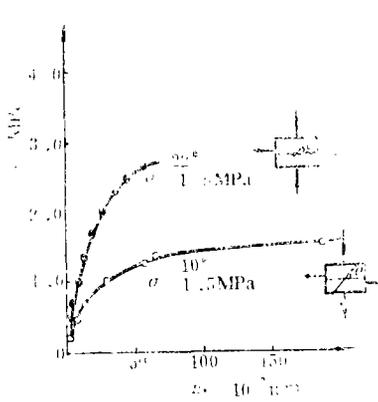


图9 两种加锚节理面剪切-位移曲线之对比( $\alpha = 45^\circ, \sigma = 1.5\text{MPa}$ )

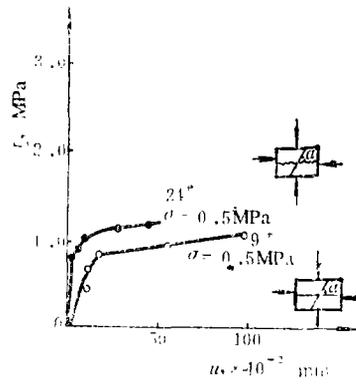


图10 两种加锚节理面剪切-位移曲线之对比( $\alpha = 45^\circ, \sigma = 0.5\text{MPa}$ )

3. 在屈服“前区”加锚节理面的切向刚度高于未加锚固的节理面的切向刚度。

4. 加锚节理面“屈服”前区的切向刚度与锚杆倾角有关。当 $\alpha$ 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变动时， $\alpha = 90^\circ$ 时的切向刚度最大，随着 $\alpha$ 的减小，切向刚度减小。

5. 试验表明，加锚节理面发生“屈服”时的剪切位移量 $u_Y$ 大致是在 $0.05 \sim 0.15\text{mm}$  范围之内。为了便于推广到原型，采用归一化值。“屈服”时的剪切位移与锚杆直径之比  $u_Y/d$  约为  $0.001 \sim 0.03$ 。

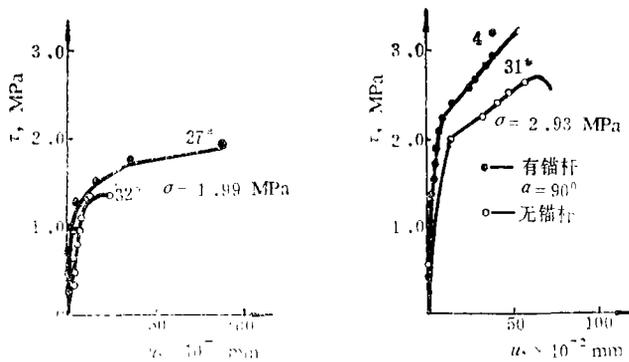


图11 有锚杆与无锚杆节理面的剪切-位移曲线

## 六、加锚节理面抗剪强度特性与锚杆倾角的关系

$\alpha$ 角不同时加锚节理面的抗剪强度线如图12所示。无锚杆加固的节理面的强度线并列在同一图上。在我们的试验条件下，当 $\alpha = 60^\circ$ 时，剪切强度最高。 $\alpha = 45^\circ$ 时次之。 $\alpha = 90^\circ$ 和 $\alpha = 30^\circ$ 的结果基本相同，它们都比 $\alpha = 45^\circ$ 为小。无锚杆节理面的抗剪强度最低。

图13给出了锚杆倾角与抗剪力比值 $F_\alpha/F_{90}$ 的关系。图中 $F_{90}$ 代表 $\alpha = 90^\circ$ 时的抗剪力， $F_\alpha$ 为倾角等于 $\alpha$ 时的抗剪力。

实验表明，法向应力愈高则锚杆倾角的影响愈小。但不论法向应力为何值，在我们的试

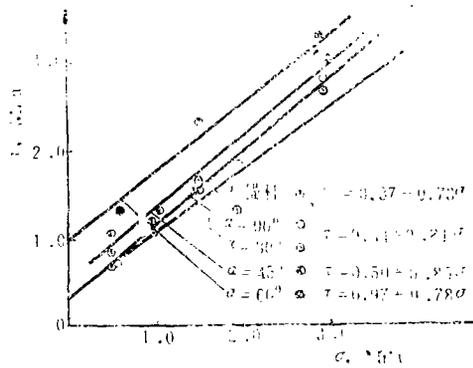


图12 加锚节理面的抗剪强度

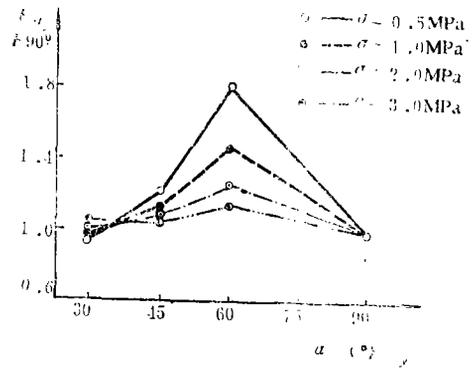


图13 加锚节理面抗剪强度与锚杆倾角的关系

验条件下，当  $\alpha$  为  $60^\circ$  左右时抗剪性能增强效应最大。

通常可以认为，比较适宜的锚杆安装角可以在  $45^\circ \sim 75^\circ$  范围内选择。例如，对于滑坡体的加固，可以根据滑面的倾角采用水平向或近于水平向的锚杆加固是适宜的。这不仅便于施工而且比在垂直滑动面方向上施加锚杆更能发挥加锚面的抗剪能力(图14(a))。对地下洞室的洞壁岩体的加固也可采用类似的原则(图14(b))。对于层状岩石如果阻止层面之间的离层是主要的，或者是沿层面间的滑移方向不好确定时，则在垂直层面方向上施锚也是适宜的(图14(c))。

图12中对应于不同  $\alpha$  角的库仑强度线虽然并不完全平行，但为了简化起见也可将锚杆对节理面抗剪性能的增强作用近似地看作增加了“粘结力”。对于  $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$  及  $90^\circ$  的情况此值约为  $0.15 \sim 0.20 \text{MPa}$ 。而对于  $\alpha = 60^\circ$  此值则更大。

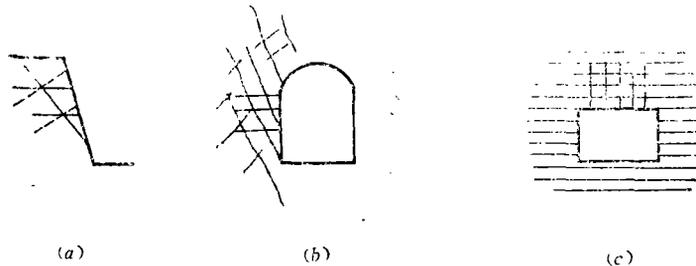


图14 施锚方向示意图

### 七、加锚节理面的强度-位移特性

图15给出了剪切位移分别为  $0.05, 0.1$  和  $0.2 \text{mm}$ ，以及剪切位移在  $0.4 \sim 1 \text{mm}$  的各试件近于剪坏时的剪切强度线  $D, C, B, A$ 。相应于  $0.05 \text{mm}$  剪切位移的剪切强度线  $D$  基本上就是屈服强度线。这四条强度线明显地反映了剪切强度随剪切位移而增长的趋势。

上述情况是指从一组试件的试验中得出的强度线而言。但是对于同一个试件的逐级加荷试验，则随着剪切位移的不断增长其强度增长率有下降的趋势。这是因为随着剪切位移之增长经过较长距离的磨剪，剪切面将变得更为光滑，磨擦角减小。图16给出了第20号试件(具)

有人工凿毛的节理面)经逐级加荷和剪切后逐步接近于光面的抗剪强度线。由此可见,用单个试件进行“单块法”试验时得到的抗剪强度一般说来是偏低的,特别是摩擦系数较由常规试验方法对一组试件进行单次剪切所得的摩擦系数为小。

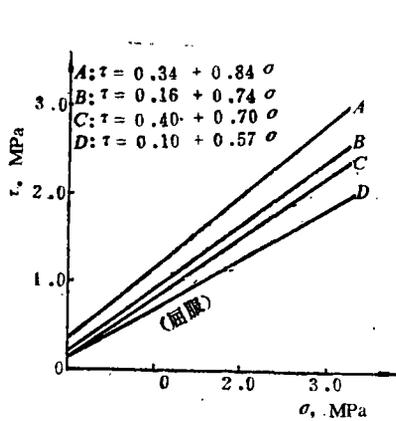


图15 α = 90°时的剪切强度与剪切位移关系

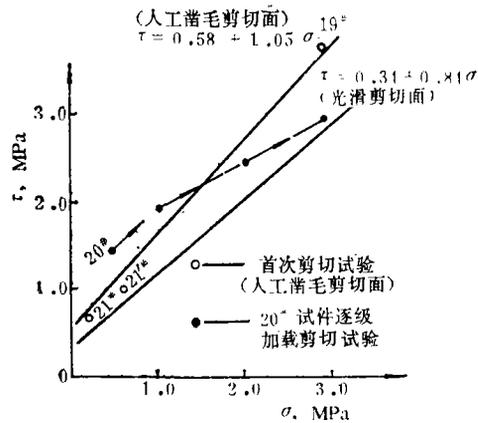


图16 α = 90°时的逐级加荷的剪切特性

### 八、关于锚杆变形问题

加锚节理面抗剪强度特性之增强是以锚杆在剪切过程中发生变形为前提的。

我们对已进行过试验的试件进行剖析,取出钢筋,对它自身的剪切变形情况进行量测。这种模拟锚杆的变形情况见图17,量测结果见表1。

表1 模拟试件锚杆变形特征表

试件号 (*)	锚杆倾角 (°)	节理面性状	逐级加荷后的 累计剪切位移 (mm)	δ(mm)	h(mm)
1	90	光面	4.3	15左右	15左右
6	60	光面	4.0	17左右	15左右
9	45	光面	5.0	18左右	15左右
12	30	光面	4.1	20左右	10左右
20	90	粗糙面	4.0	15左右	15左右
24	45	粗糙面	15.0	22左右	15左右

在取出钢筋后发现,虽然经过比较大的剪切位移,但“锚杆”与试件之间的联接仍然是相当完好的,只是在靠近节理面的部分有破坏现象。钢筋的剪切变形主要发生在位于节理面附近的区段。埋设钢筋的圆孔在节理面附近已成椭圆状。钢筋发生明显的剪切变形的区段的长度δ约为15~22mm,即为钢筋直径的3~4倍。垂直高度h约为直径的2~3倍。

钢筋与孔壁的相互作用和变形问题是相当复杂的。但在节理面附近钢筋和孔壁及胶结层界面上作用有很大的挤压应力,部分胶结料和孔壁被挤碎,那种认为钢筋仅在节理面厚度范围内发生剪切变形的看法显然是不合理的。试验表明,杆体将在一个相当大的区段内(约为

钢筋直径的 3~4 倍的区段内) 发生明显的剪切变形。由于孔壁材料以及胶结材料的抗挤压能力远远大于抗拉能力, 所以挤压破碎带的范围不会很大, 它将小于由于杆体的拉伸而形成的在胶结材料中的环向破裂带范围。锚杆与孔壁的相互作用模式可参见图 18。

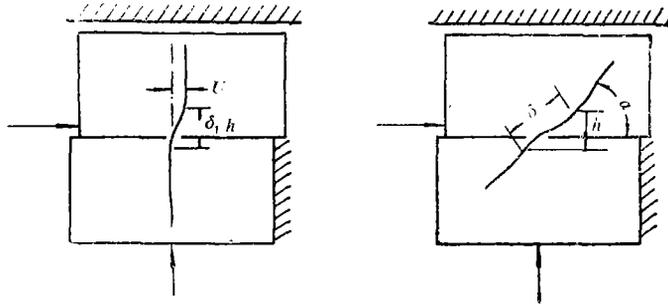


图 17 锚杆变形示意图

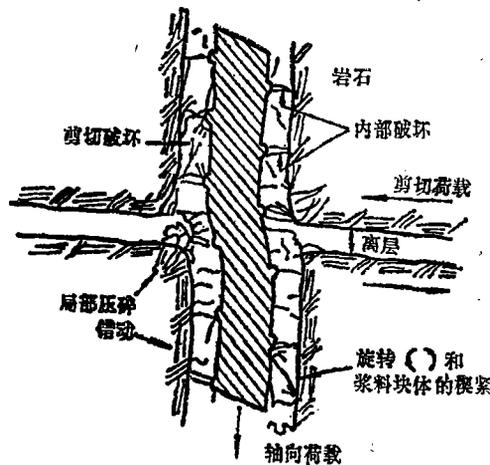


图 18 锚杆与孔壁相互作用示意图(据文献[5])

### 九、加锚节理面锚杆抗剪作用机制的分析模型

给出这一分析模型(图 19)的目的是为了探讨锚杆的“销钉”作用机制。为了简化, 这一分析模型主要是考虑锚杆垂直节理面这一基本情况。

设杆体的剪切模量为  $G$ , 杆体对应于节理面上、下面的相对剪切位移量为  $u$ 。剪切变形段的长度为  $\delta$  (由于是垂直节理面, 所以  $\delta = h$ )。杆体直径为  $d$ , 截面积为  $S$ 。在  $\delta$  区段内杆体最大剪应力应发生在与节理面相一致的截面上, 其平均剪应力为  $\bar{\tau}$ 。

$\delta$  区段内杆体各截面上的平均剪应力分布与杆体和孔壁的接触条件有关。为了简化分析, 采用三种不同的分布形态(如图 19(a)、(b)、(c)所示)。一般说来, 其分布情况呈曲线状, 但这可以用上述三种基本情况加以衡量。

基于杆的剪切变形, 图 9 模拟加锚节理面抗剪性能模型理论, 通过推导, 可得出如下关系式

$$u = \frac{A \cdot \beta}{G} \bar{\tau} \cdot \delta \tag{3}$$

式中  $A$ ——与杆体截面形状有关的剪切系数。对于圆截面实心杆体， $A = \frac{4}{3}$

$\beta$ ——杆体内剪应力分布形状系数对于图19所示的

(a)形分布:  $\beta = 1$

(b)形分布:  $\beta = \frac{3}{4}$

(c)形分布:  $\beta = \frac{1}{2}$

对于其他的凸形分布形式:  $1 \leq \beta \leq \frac{1}{2}$

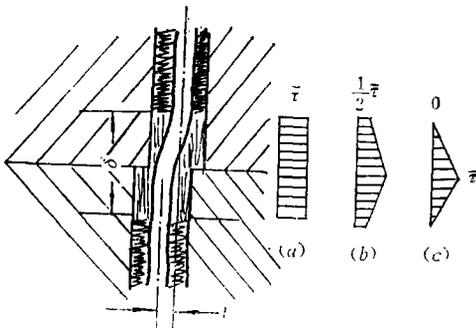


图19 模拟加锚节理面抗剪性能模型

式中  $\sigma_y$ ——杆体材料单轴拉伸时的屈服强度

现在将实验情况进行验算

从实验资料取  $\delta = 4d = 20\text{mm}$ , 取图19(a)形分布时的  $\beta = 1.0$ ,  $G = 87000\text{MPa}$ , 则对于  $\sigma_y = 250\text{MPa}$ , 可求得  $u_0 = 0.33\text{mm}$ ;  $u_0/d \approx 0.0066$ . 若取  $\sigma_y = 400\text{MPa}$ , 则求得  $u_0 = 0.053\text{mm}$ ;  $u_0/d \approx 0.0106$ . 若采用图19的(b)形或(c)形分布则  $u_0$  将小于上述计算值。

由此可见, 对于拉伸屈服值为250~400MPa的锚杆, 当剪切位移达到锚杆直径的1/150~1/100时, 杆体内的最大剪应力即已达到屈服值。这与实验中得到的观测值基本吻合。锚杆强度愈高, 则  $u_0$  值大。

通过上述的理论探讨并结合实验结果的分析可以认为

1. 从各组试验的剪切位移曲线看, “屈服”点大致在0.05~0.15mm的范围内。因此在加锚节理面呈现“屈服”性状之前, 锚杆的剪应力就已经处于屈服的临界状态了。换句话说, 在加锚节理面剪切位移曲线近于线性增长的区段, 锚杆就已经在充分发挥“销钉”作用。那种认为只有经过较大的剪切错动后才能发挥锚杆“销钉”作用的说法不一定是合适的。

2. 加锚节理面过“屈服”点后有形似强化的阶段, 可能是杆件轴向拉力进一步增长和杆体材料处于受剪而呈现加工硬化的缘故。

3. 对于拉伸屈服强度为250MPa左右的锚杆, 当处于塑性极限状态时, 仅锚杆的销钉作用(不计锚杆轴力引起的抗剪阻力)可为  $\eta = 1/2000$  的加锚节理面提供约为0.10~0.15MPa的“粘结力”。如锚杆的强度高, 则其增强效应就更为显著。由此可见, 仅“销钉”作用这一增

根据公式(3)我们可以对锚杆的抗剪作用机制作如下分析:

沿节理面方向的截面上的最大剪应力达到屈服值时的位移值记为  $u_0$ 。截面上的最大应力值为  $\tau_m$ , 可按下式计算:

$$\tau_m = \bar{\tau} \cdot A \tag{4}$$

对于圆截面实心钢质杆体, 可采用米塞斯屈服准则, 得到

$$u_0 = \frac{\beta}{\sqrt{3} G} \sigma_y \cdot \delta \tag{5}$$

强效应, 对于改善岩体工程中的弱面性能已起到明显的加固作用。

根据前述的一些研究结果可以看出, 目前在有限元分析中所采用的二结点或三结点轴力式杆件元用以模拟锚杆的作法并不是很适宜的。特别是用锚杆加固节理岩体时, 锚杆本身受剪的问题是必须要考虑的。上述的一些研究结果为研究新的锚杆模型提供了实验和理论基础, 有关有限元中的锚杆单元模型我们将另文叙述。在有限元分析中除了用特定的适宜的锚杆模型来模拟锚杆作用外也可采用另一途径, 即不模拟每根具体的锚杆而只是将施加锚杆后得到改善的节理面和岩体的新的力学性能反映到计算中去。例如, 对于加锚节理面的  $c$  值, 可以在考虑到锚杆的密度、杆材性质、胶结情况等因素后对节理面的  $c$  值予以适当的提高。

## 十、锚杆的最佳安装角问题

就一些文献看<sup>[1~6]</sup>, 关于锚杆的最佳安装角(倾角)目前并没有统一的认识, 也缺乏一种合理的最佳安装角的估算公式。比较流行的是取  $\alpha = 90^\circ$ , 但这并不是最佳的安装角, 它应该小于  $90^\circ$ 。但也有人认为, 倾角愈小则抗剪能力愈强。国外发表的一些实验结果, 由于锚杆型式, 杆材性质以及节理面性质各不相同, 因此其结果也各不相同(图20)。看来研究一种合理的估算锚杆最佳安装角的公式不仅在理论上有意义, 对于工程问题也有实用价值。我们基于本文的公式(1)对倾角  $\alpha$  取极值:

$$\frac{\partial \tau_{b1}}{\partial \alpha} = \frac{\partial \tau_{bd}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \tau_{bt}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \tau_{bs}}{\partial \alpha} = 0 \quad (6)$$

经整理后可得到最佳安装角  $\alpha_{opt}$  的估算公式如下:

$$\alpha_{opt} = f(\tau_b, \sigma_b, \phi) = \text{tg}^{-1} \frac{\tau_b + \sigma_b \text{tg} \phi}{\sigma_b - \tau_b \text{tg} \phi} \quad (7)$$

此公式表明锚杆的最佳安装角不仅与节理面自身的摩擦角有关, 而且与锚杆内的轴向应力剪应力值有着密切的关系。

锚杆的应力随着加锚节理面的工作状态而变动。对节理面施锚的目的是为了改善节理面的力学性能。施锚的重要作用之一, 是为了限制节理面发生过大的剪切错动。前面已经论述过, 杆体在节理面发生较小的剪切位移时即已进入屈服状态。只有考虑到这一特点, 同时在设计锚杆安装角时还考虑到杆体处于屈服状态的计算才是合理的。因此可以利用最佳安装角的一般计算公式(7)并采用米塞斯屈服准则, 可以得出考虑杆体处于屈服状态时的最佳安装角公式:

$$\alpha_{opt} = f(\phi) = \text{tg}^{-1} \frac{1 + \sqrt{3} \text{tg} \phi}{\sqrt{3} - \text{tg} \phi} \quad (8)$$

根据实验结果, 未施锚的节理面的  $\text{tg} \phi$  等于 0.73, 将此值代入式(8), 得到  $\alpha_{opt} = 66^\circ$ 。

我们曾经进行了四组实验, 其  $\alpha$  角分别为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $90^\circ$  实验结果表明在这四组安装角中以  $\alpha = 60^\circ$  时的抗剪强度最高, 这与根据公式(8)求得的  $\alpha_{opt} = 66^\circ$  的结果是很吻合的。

由公式(8)可以看出, 节理面的摩擦角愈小, 则  $\alpha$  角愈小。当  $\phi = 0^\circ$  时,  $\alpha_{opt} = 30^\circ$  所以锚杆安装角在任何情况下都不应小于  $30^\circ$ 。当节理面的摩擦系数大时, 则  $\alpha$  角也大, 例如当  $\phi$

= 60°时,  $\alpha_{opt} = 90^\circ$ 。而大于90°的安装角一般说来是不可取的。

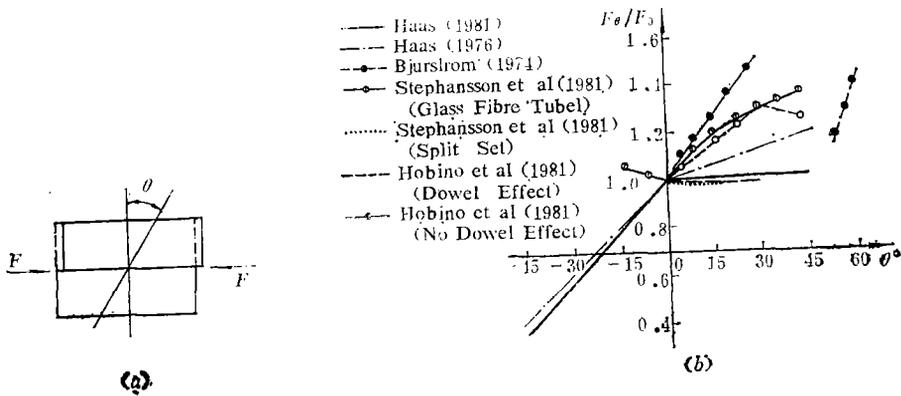


图20 关于锚杆倾角与强度关系的一些试验结果(据文献[1])

在考虑锚杆在受剪时达到屈服状态的前提下可以给出估算 $\alpha_{opt}$ 的简便公式:

$$\alpha_{opt} = 30^\circ + \phi \tag{9}$$

式中  $\phi$  ——节理面的摩擦角(以度表示),  $\phi \leq 60^\circ$

当 $\phi > 60^\circ$ 时 $\alpha_{opt}$ 的取值为 $90^\circ$ 。

当然,在工程实践中确定锚杆安装角时,可以在上述最佳安装角估算值的左右变动,因为在施工中还需考虑到具体工程条件及施工难易程度等因素。因此,比较合适的方法是在考虑前述的最佳安装角的基础上,因地制宜地根据工程实际情况来确定最合适的锚杆安装角。

本研究工作得到水利电力部成都勘测设计院的支持和财政资助。成勘院的杜开武工程师和楼叔英工程师对本研究工作给予了很大的帮助;本所中心试验室吴玉山、林卓英、谢开容、潘汉洪、徐一凡、唐清、关玲俐等同志大力协助完成了试验任务,特在此一并深表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Gerrard, C., Rock Bolting in Theory-A Keynote Lecture, "Rock Bolting", 1983, pp.1-32.
- [2] Larsson, H. & Olofsson, T., Bolt Action in Jointed Rock, "Rock Bolting" 1983, pp.33-46.
- [3] Ludvig, B., Shear Tests on Rock Bolts, "Rock Bolting", 1983, pp.113-123.
- [4] Barton, N. & Bakhtar, K., Bolt Design Based on Shear Strength, "Rock Bolting", 1983, pp.367-376.
- [5] Snyder, V. W., Analysis of Beam Building using Fully Grouted Roof Bolts, "Rock Bolting", 1983, pp.187-194.

[注] "Rock Bolting"系国际会议文集, 全称是: Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, 1983, Stockholm, A.A.Balkema, 1984.

## Study on the shear Resistance Behaviour of Bolted Rock Joints

*Ge Xiurun, Liu Jianwu*

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica, wuhan)

### Abstract

The Grouted rock bolts have a wide application in the geomechanical engineering. Besides the advantages such as simplicity of construction, low cost, durability and reliability of anchorage, this type of adhesive rock bolts effectively enhances the tension and shear resistance on weak plane in rock masses with developed joints, and hence improves the strength of jointed rock masses.

On the basis of laboratory simulation tests, theoretical research has conducted, the emphasis of which has been laid upon the influence of bolts on the shear resistance behaviour of bolted joints, the mechanism of the bolts' "dowel" effect to prevent the joints from dislocating, and an improved formula derived for evaluating the shear strength of bolted rock joints. The tests have shown that the shear strength of bolted rock joints is closely related to shear displacements. Both experimental and theoretical analyses have indicated that the "dowel" effect of the bolts is fully developed even in the presence of very small shear displacements. The influence of the bolt inclination on the shear resistance behaviour of the joints is evidently reflected in the testing results. In this paper, analysis models and theoretical analysis methods for description of bolted rock joints are presented, and thereby a formula for calculating the optimum bolt inclination is derived, the value of which obtained with this formula is entirely conformable to the test results. Therefore it seems that this formula will play a positive role in guiding the design of the layout for bolts. Also, shortcomings in the models of bolt elements commonly used in the current FEM analysis are discussed and the opinion for the further improvement is suggested.