

弹塑性围岩砂浆锚杆支护问题的估算法

汤 伯 森

(株洲工学院包装工程系)

提 要

本文从现场量测资料出发,拟定锚杆应变深度曲线的数学模型,据此求解锚杆的应力与位移。将锚杆对围岩的反力简化为轴对称径向体积力,根据莫尔-库仑屈服条件求解锚固区径向应力。将锚固区视为承载结构,按照传统支护的围岩变形公式确定锚杆支护的围岩变形。以轴对称解为基础,考虑围岩的周向非均匀变形,从锚杆与其轴线处围岩的应力应变关系入手,建立锚杆与围岩的变形协调条件,提出了求解砂浆锚杆支护问题的基本方程。

一, 前 言

虽然各种地下工程早已普遍使用砂浆锚杆,但人们至今还不能确切地解释砂浆锚杆的支护原理。文献[1]首先提出这个问题,但仅限于讨论锚杆的应变深度曲线。文献[2]用能量法研究这个问题时,没有深入分析锚杆与围岩的相互作用,未能取得令人满意的结果,解得的锚杆最大侧面剪应力在孔口端,这与理论上要求的边界条件相矛盾。文献[3]未考虑原岩应力,难以说明砂浆锚杆的支护效果。笔者认为,研究砂浆锚杆支护问题既要对锚杆进行受力分析,又要探索锚杆对围岩变形的影响,而且还要考虑锚杆与围岩在原岩应力作用下的变形协调条件。本文循此思路,采用半理论半经验的估算法,就问题提出初步意见。

二、锚杆的应力与变形

在工作面安装锚杆后,围岩继续变形,并对锚杆侧面产生剪应力 τ 。此时,锚杆产生伸长应变 ϵ ,横截面产生拉应力 σ 和轴向位移 v 。取一锚杆微元 dx ,其位移、应变和应力应满足下列方程^[1,2]

$$\epsilon = -\frac{dv}{dx} \quad \sigma = E\epsilon \quad \tau = \frac{D}{4} \frac{d\sigma}{dx} \quad (1)$$

式中 x 为锚杆横截面至洞周的距离; D 为锚杆直径; E 为锚杆弹性模量; ϵ 以伸长为正; v 以向心为正。

为求得式(1)中包含的 σ , τ , ϵ 和 v 四个未知函数,我们从现场量测资料(图1)出发^[1],拟定锚杆应变深度曲线的数学模型,将 ϵ 转化为已知函数,作为对砂浆锚杆进行受力分析的依据。无支护围岩应变深度曲线为二次双曲线。锚杆变形处于弹性阶段时,其应力与应变为

线性关系。因此,要求 $\varepsilon-x$ 曲线为连续光滑曲线,而且在孔底附近为凹曲线。锚杆孔口端为自由面。因此,要求 $x=0$ 时, $\sigma=0$, $\tau=0$, $x=x_0$ 时, $\varepsilon=\varepsilon_M$ (锚杆最大伸长应变)。因此,要求 $\varepsilon-x$ 曲线在 x_0 附近为凸曲线。根据上述要求,当锚杆变形处于弹性阶段时,取

$$\varepsilon = \varepsilon_M \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 \exp \left[-\frac{2}{x_0} (x - x_0) \right] \quad (2)$$

图1表明方程(2)的曲线(虚线)接近现场量测曲线(实线),两者的变化规律是相同的。

将式(2)代入(1),分别求得其余的三个未知函数

$$\sigma = \sigma_M \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 \exp \left[-\frac{2}{x_0} (x - x_0) \right] \quad (3)$$

$$\tau = \frac{D\sigma_M}{2x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right) \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) \exp \left[-\frac{2}{x_0} (x - x_0) \right] \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = 0.43 \frac{D\sigma_M}{x_0} \quad (x = 0.29x_0)$$

$$\tau_{\min} = -0.15 \frac{D\sigma_M}{x_0} \quad (x = 1.71x_0)$$

$$v = v_0 - \frac{x_0 \sigma_M}{4E} \left\{ 5 - \left[2 \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{x}{x_0} \right) + 1 \right] \exp \left[-\frac{2}{x_0} (x - x_0) \right] \right\} \quad (5)$$

式中 $\sigma_M = E\varepsilon_M$, 为锚杆最大拉应力, 因为 $x=x_0$ 时, $\sigma=\sigma_M$, 所以 x_0 又是最大锚杆应力 σ_M 所在截面的坐标; v_0 是该截面的轴向位移。

根据式(3)、(4)和(5)绘制的 $\sigma-x$ 曲线, $\tau-x$ 曲线和 $v-x$ 曲线如图2所示。

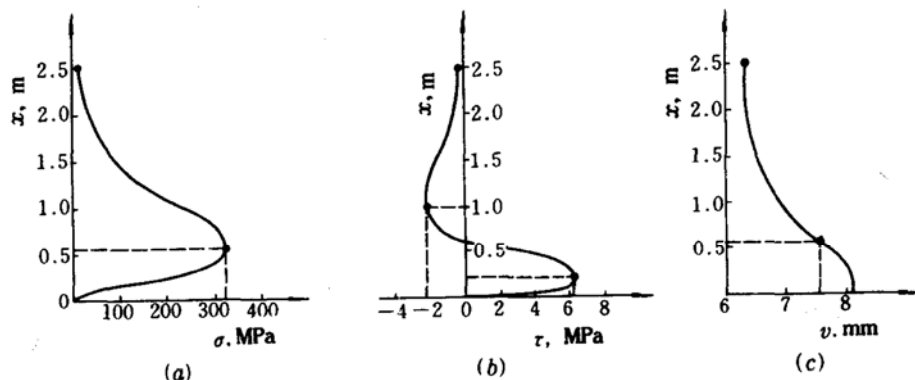


图2 锚杆的应力与位移

三, 围岩的应力与变形

(一) 围岩的轴对称应力与变形

1. 锚杆的附加体积力

锚杆反作用于围岩的线分布力(图3)为

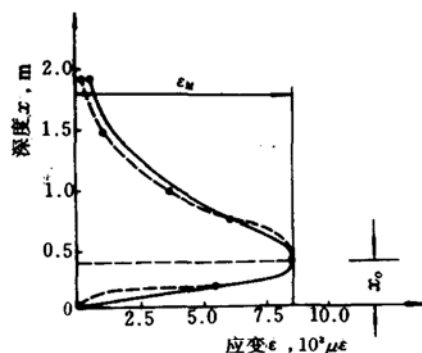


图1 量测曲线与数学模型

$$T = -\pi D \tau \quad (6)$$

式中 τ 和 T 均以向心力为正, 负号表示两者方向相反。

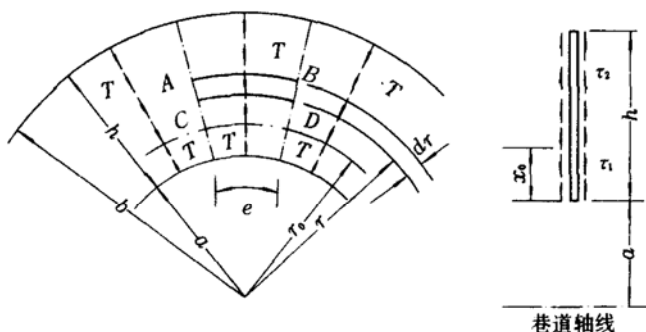


图3 锚杆与围岩的相互作用

自图3中的锚固区内取一单元体ABCD, 以 r 表示它到巷道中心的距离, 以 dr 表示它的厚度。锚杆反作用于此单元体的径向集中力为

$$dQ = T dr = -\pi D \tau dr \quad (7)$$

此单元体的体积

$$dV = \frac{r}{a} e t dr \quad (8)$$

式中 e 和 t 分别为锚杆的周向和轴向间距。

将线分布力 T 简化为轴对称的径向体积力 K_r , 即

$$K_r = \frac{dQ}{dV} = -\left(\frac{\pi a D}{e t}\right) \frac{\tau}{r} \quad (9)$$

以 F_M 表示锚杆最大拉力, 则锚杆名义支护抗力为

$$p_0 = \frac{F_M}{e t} = \frac{\pi D^2 \sigma_M}{4 e t} \quad (10)$$

以 r_0 表示锚杆 σ_M 处截面至巷道中心的距离。注意, $x = r - a$, $x_0 = r_0 - a$ 。将式(4)、(10)代入式(9), 得

$$K_r = -\frac{2ap_0}{(r_0 - a)^3} (r - a) \left(\frac{r_0}{r} - 1\right) \exp\left[-2\left(\frac{r - r_0}{r_0 - a}\right)\right] \quad (11)$$

2. 锚固区的径向应力

锚固区的径向应力 σ_r , 周向应力 σ_θ 和径向体积力 K_r 应满足平衡微分方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + K_r = 0 \quad (12)$$

以 c 和 φ 分别表示塑性区平均粘结力和内摩擦角。根据莫尔-库仑屈服条件^[4]有

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma_\theta &= -\xi(\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi) \\ \xi &= \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \end{aligned} \quad (13)$$

将式(11)、(13)代入式(12), 得

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \xi \frac{\sigma_r}{r} = \frac{1}{r} \xi c \operatorname{ctg} \varphi + \frac{2ap_0}{(r_0 - a)^3} (r - a)$$

$$\times \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \exp \left[-2 \left(\frac{r - r_0}{r_0 - a} \right) \right] \quad (14)$$

确定积分常数的边界条件为 $(\sigma_r)_{r=a}=0$ 。

由式(14)和边界条件解得锚固区径向应力为

$$\sigma_r = (\sigma_r)_h + c \operatorname{ctg} \varphi \left[\left(\frac{r}{a} \right)^\xi - 1 \right] \quad (15)$$

$$(\sigma_r)_h = \beta(r) p_0 \quad (16)$$

$$\beta(r) = \frac{2a r^\xi}{(r_0 - a)^3} \int_a^r \left(\frac{r-a}{r^\xi} \right) \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \exp \left[-2 \left(\frac{r - r_0}{r_0 - a} \right) \right] dr$$

式(15)右边第二项是无支护的围岩应力, 所以 $(\sigma_r)_h$ 是锚杆引起的附加应力。式(16)中的 $\beta(r)$ 可用数值积分法计算。锚杆附加应力 $(\sigma_r)_h$ 的变化规律如图7。

3. 锚固区的径向位移

锚固区实质上是支撑深部围岩的承载结构(图4)。以 b 表示锚固区半径, 锚固区反作用于深部围岩的支护抗力为

$$p_i = (\sigma_r)_{r=b} = \beta(b) p_0 + c \operatorname{ctg} \varphi \left[\left(\frac{b}{a} \right)^\xi - 1 \right] \quad (17)$$

图4和传统支护的围岩变形计算简图完全一样。所以, 只要以 b 替代传统支护围岩变形公式中的巷道半径, 就可以求得锚杆支护的塑性区半径

$$R = b \left[(1 - \sin \varphi) \frac{P_0 + c \operatorname{ctg} \varphi}{p_i + c \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (18)$$

弹塑性分界面的径向位移

$$u_R = \frac{1 + \mu}{E_r} R \sin \varphi (P_0 + c \operatorname{ctg} \varphi) \quad (19)$$

式中 P_0 为原岩应力, E_r 和 μ 分别为岩体的弹性模量和泊松比。

一般来说, 锚杆置于围岩的塑性区内。假设塑性区体积不可压缩, 便可以导出围岩稳定后的洞周总位移

$$u'_a = \frac{R u_R}{a} = \frac{1 + \mu}{a E_r} R^2 \sin \varphi (P_0 + c \operatorname{ctg} \varphi) \quad (20)$$

锚杆安装后的洞周位移

$$u_a = u'_a - u''_a \quad (21)$$

锚杆安装时的洞周位移 u''_a 可以取实测值, 也可以按照工作面“空间效应”的计算方法确定

[4]。

锚固区的径向位移

$$u = \frac{R u_R}{r} = \frac{a u_a}{r} \quad (22)$$

锚固区的径向应变

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = -\frac{a u_a}{r^2} \quad (23)$$

4. 锚杆对围岩变形的影响

图5表明, 锚固区径向应力是由两个部分构成的, 一是无支护的围岩应力(虚线), 二是

锚杆附加应力(阴影部分)。 σ_r 是连续的。因此,深处围岩的应力随锚固区应力的增加而提高。弹塑性分界面的应力 σ_R 是常量。所以,深处围岩应力的提高可以促使弹塑性分界面向巷道中心移动,减小塑性区半径,因而减小了围岩变形。这就是砂浆锚杆可以提高围岩稳定性的原因。

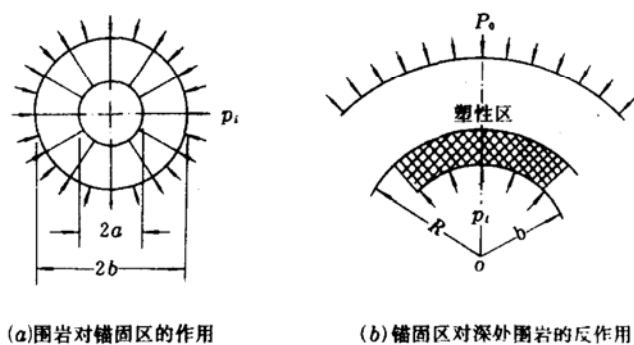


图4 砂浆锚杆支护围岩变形计算简图

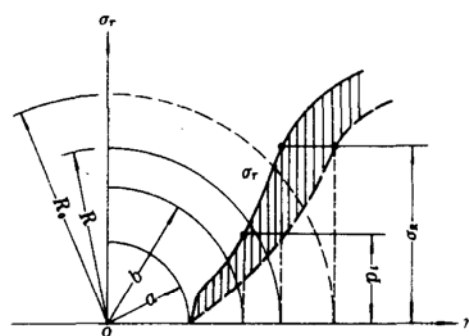


图5 砂浆锚杆支护的力学机理

(二) 围岩的周向非均匀应力与变形

图4中的T实际作用于锚杆轴线处,因此锚固区的应力与变形沿周向是非均匀分布的(图6)。锚固区周向非均匀应力与变形相当复杂,目前还没有弹塑性解析解,现参考文献[5]对这个问题作一些估计。

1. 围岩的周向非均匀应力

假设周向非均匀径向应力按余弦规律变化,将式(15)表达的 σ_r 理解为它的平均值。以 $\Delta\sigma_r$ 表示它的波动幅度。 $\Delta\sigma_r$ 是锚杆引起的,所以它只与锚杆附加应力 $(\sigma_r)_h$ 有关。

在 $a-r_0$ 区间内,按照余弦变化规律,有

$$\Delta\sigma_r = (\sigma_r)_h = \beta(r)p_0 \quad (24)$$

在 r_0-b 区间内,由于各杆附加应力的叠加与扩散,因而假设 $\Delta\sigma_r$ 按双曲线规律衰减,即

$$\Delta\sigma_r = \frac{r_0}{r} \beta(r)p_0 \quad (25)$$

周向非均匀应力的波动幅度 $\Delta\sigma_r$ 随 r 的变化如图7所示。

2. 围岩的周向非均匀应变

图6中的实线 aa 和虚线 $a'a'$ 分别表示锚杆安装时和安装后的围岩变形。将式(22)表达的 u 理解为锚固区非均匀径向位移的平均值,以 $(u)_{\theta=0}$ 表示锚杆轴线处的围岩径向位移,以 Δu 表示周向非均匀径向位移的波动幅度,则

$$(u)_{\theta=0} = u - \Delta u \quad (26)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{\theta=0} = \frac{du}{dr} - \frac{d}{dr}\Delta u \quad (27)$$

式(27)左边是锚杆轴线处的围岩径向应变 $(\varepsilon_r)_{\theta=0}$,右边第一项是式(23)表达的 ε_r ,第二

项是周向非均布径向应变的波动幅度 $\Delta\epsilon_r$, 故

$$(\epsilon_r)_{\theta=0} = \epsilon_r - \Delta\epsilon_r \quad (28)$$

3. 周向非均匀应力与应变的关系

根据式(13)和塑性区体积不可压缩的假设, 塑性区的周向应力和轴向应力分别为

$$\sigma_\theta = (1 + \xi)\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi \quad \sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (29)$$

塑性区的静水应力为

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) = \frac{1}{2}[(2 + \xi)\sigma_r + \xi c \operatorname{ctg} \varphi] \quad (30)$$

塑性区径向应力偏量为

$$S_r = -\frac{\xi}{2}(\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi) \quad (31)$$

塑性区径向应变偏量为

$$e_r = \epsilon_r \quad (32)$$

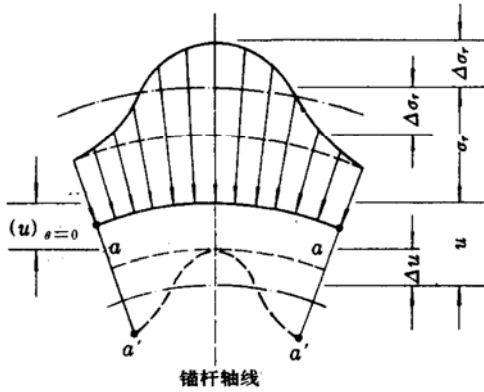


图6 围岩的非均匀应力与变形

根据全量理论^[6], s_r 和 e_r 有如下关系

$$e_r = \frac{3\epsilon_i}{2\sigma_i} S_r \quad (33)$$

式中 σ_i 和 ϵ_i 分别为所在点的应力强度和应变强度。将式(31)、(32)代入(33), 得

$$\epsilon_r = -\frac{3\epsilon_i}{4\sigma_i} \xi(\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi) \quad (34)$$

将非均匀径向应力 σ_r 表示为

$$\sigma_r = \Delta\sigma_r + (\sigma_r - \Delta\sigma_r) \quad (35)$$

将式(28)、(35)代入(34)。则得

$$\Delta\epsilon_r + (\epsilon_r)_{\theta=0} = -\frac{3\epsilon_i}{4\sigma_i} \xi \Delta\sigma_r - \frac{3\epsilon_i}{4\sigma_i} \xi [(\sigma_r - \Delta\sigma_r) + c \operatorname{ctg} \varphi] \quad (36)$$

从图6可以看出, $\Delta\sigma_r$ 和 $\Delta\epsilon_r$ 为非均布成分, $(\sigma_r - \Delta\sigma_r)$ 和 $(\epsilon_r)_{\theta=0}$ 为均布成分。因为 $\Delta\epsilon_r$ 是 $\Delta\sigma_r$ 引起的, 所以从式(36)中取

$$\Delta\epsilon_r = -\frac{3\epsilon_i}{4\sigma_i} \xi \Delta\sigma_r \quad (37)$$

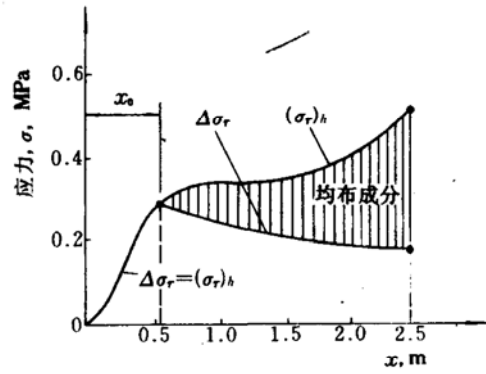


图7 锚杆的附加应力与应力波动幅度

由式(34)和(37)得

$$\Delta \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_r \Delta \sigma_r}{\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi} \quad (38)$$

式(38)表明, 只要对围岩非均匀应力的变化规律作出估计, 就可以根据轴对称解对围岩的非均匀应变作出估计。

4. 洞周和孔底周向非均匀径向位移的波动幅度

以 r_0 为基准, 将 $\Delta \varepsilon_r$ 对 r 积分, 则由式(38)得

$$(\Delta u)_a = \int_{r_0}^a \Delta \varepsilon_r dr = \int_{r_0}^a \frac{\varepsilon_r \Delta \sigma_r dr}{\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi} \quad (39)$$

$$(\Delta u)_b = \int_{r_0}^b \Delta \varepsilon_r dr = \int_{r_0}^b \frac{\varepsilon_r \Delta \sigma_r dr}{\sigma_r + c \operatorname{ctg} \varphi} \quad (40)$$

五、锚杆与围岩的变形协调条件

(一) 锚杆 σ_M 截面的轴向位移

图8中的实线和虚线分别表示锚杆安装时和安装后围岩实际变形。从 T 的方向判断, 锚杆安装后的洞周线凸向巷道中心, 孔底周线凸向围岩深处, 两者变形方向相反。由于围岩变形是连续的, 因此锚固区内必有一中性面(其半径为 r_0), 通过锚杆的 σ_M 截面(T 的反向点)。中性面始终为圆形, 不产生非均匀变形, 故锚杆 σ_M 截面的轴向位移 v_0 等于围岩中性面的轴对称径向位移 u_0 。于是, 由式(22)求得

$$v_0 = u_0 = \frac{au_a}{r_0} \quad (41)$$

(二) 锚杆的最大伸长应变

锚杆与其轴线处的围岩变形相同。因此, 锚杆的应变 ε 等于其轴线处围岩的非均匀径向应变 $(\varepsilon_r)_{\theta=0}$ (图6), 即

$$\varepsilon = -(\varepsilon_r)_{\theta=0} \quad (42)$$

注意, 锚杆以伸长为正, 围岩以伸长为负。因为中性面通过锚杆 σ_M 截面, 故 $r = r_0$ 时, $\varepsilon = \varepsilon_M$ 。将式(16)、(23)、(24)代入(38), 求得中性面处围岩非均匀径向应变的波动幅度

$$\Delta \varepsilon_r = - \frac{au_a r_0^{-2} \beta(r_0) p_0}{\beta(r_0) p_0 + c \operatorname{ctg} \varphi \left(\frac{r_0}{a} \right)^\xi} \quad (43)$$

将式(23)、(28)、(43)代入(42), 求得锚杆的最大伸长应变

$$\varepsilon_M = \frac{au_a}{r_0^2} \left[1 - \frac{\beta(r_0) p_0}{\beta(r_0) p_0 + c \operatorname{ctg} \varphi \left(\frac{r_0}{a} \right)^\xi} \right] \quad (44)$$

(三) 锚杆 σ_M 截面的位置坐标

在 $a - r_0$ 区间, 围岩凸向巷道中心(图8), $u > v$ 。在 $r_0 - b$ 区间, 围岩凸向深处, $u < v$ 。

除中性面外, 锚杆与围岩有相对位移 $(u-v)$ (图9)。因为 $v=(u)_{\theta=0}$ (图6), 所以有

$$u-v=\Delta u \quad (45)$$

本文对围岩周向非均匀变形的分析比较粗糙, 难以要求式(45)在锚杆轴线上处处成立, 而只能要求等号两边的变化规律基本相同。因此, 取洞周和孔底两处相对位移的比值等于这两处围岩非均匀径向位移波动幅度的比值, 即取

$$\frac{u_a-v_a}{u_b-v_b}=\frac{(\Delta u)_a}{(\Delta u)_b} \quad (46)$$

建立相对位移与围岩非均匀变形的协调条件。只有当 r_0 取某个特定值时, 方程(46)才能成立, 所以它控制锚杆 σ_M 截面的位置。

将 $r=b$ 代入式(22), 可以求得 u_b 。将 $x=0$ 和 $x=h$ 分别代入式(5), 可以求得 v_a 和 v_b 。由式(39)和(40)可以求得 $(\Delta u)_a$ 和 $(\Delta u)_b$ 。

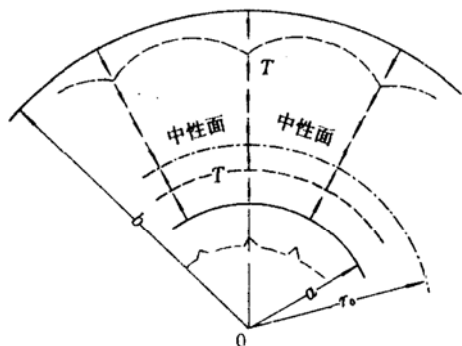


图8 锚杆安装后围岩的变形

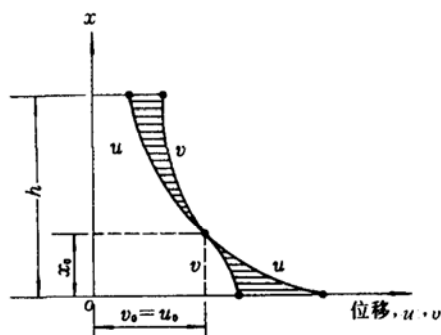


图9 锚杆与围岩的相对位移

六、求解砂浆锚杆支护问题的基本方程组

已知巷道半径、原岩应力、围岩力学性质、锚杆的长度、直径、间距及其弹性模量, 求解锚杆和围岩的应力与变形, 分析砂浆锚杆的支护效果, 这就是我们所说的砂浆锚杆支护问题。只要求得 x_0 和 σ_M (或 r_0 和 p_0), 砂浆锚杆支护问题就迎刃而解。

将 $\sigma_M=E\varepsilon_M$ 代入式(10), 得

$$\varepsilon_M=\frac{4etp_0}{\pi D^2 E} \quad (47)$$

将式(47)代入(44), 并与式(46)联立, 就得到求解 r_0 和 p_0 这两个基本未知量的基本方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{4etp_0}{\pi D^2 E} &= \frac{au_a}{r_0^2} \left[1 - \frac{\beta(r_0)p_0}{\beta(r_0) + c \operatorname{ctg} \varphi \left(\frac{r_0}{a} \right)^\varepsilon} \right] \\ \frac{u_a-v_a}{u_b-v_b} &= \frac{(\Delta u)_a}{(\Delta u)_b} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

[算例] 某矿有一圆形水平巷道, 其半径 $a=3\text{m}$, 采用砂浆锚杆支护。已知巷道埋深 H

$=400\text{m}$, 岩层容重 $\gamma=27\text{kN/m}^3$, 侧压系数 $\lambda=1$, 原岩应力 $P_0=10.80\text{MPa}$, 塑性区平均粘结力 $c=0.45\text{MPa}$, 内摩擦角 $\varphi=35^\circ$, 岩体弹性模量 $E_r=8.68\text{GPa}$, 泊松比 $\mu=0.3$, 锚杆长度 $h=2.5\text{m}$, 直径 $D=25\text{mm}$, 周向间距 $e=0.78\text{m}$, 轴向间距 $t=0.80\text{m}$, 钢材的弹性模量 $E=200\text{GPa}$, 锚杆安装时洞周位移的实测值 $u''_a=2.95\text{mm}$ 。试求锚杆和围岩的应力与变形, 并分析锚杆的支护效果。

1. 基本未知量的求解

据基本方程组(48)试算, 确定基本方程组的解为 $r_0=3.58\text{m}$, $p_0=0.26\text{MPa}$ 。有关函数的数值计算列于表1。表1中的 $f(r)$ 为式(16)中的被积函数。

表1 有关函数的计算

x (m)	r (m)	$f(r)$ ($10^{-3} \times \text{m}^{-1.69}$)	$\beta(r)$ (—)	σ_r (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	ε_r (10^{-3})	$\Delta\varepsilon_r$ (10^{-3})	Δu (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.18
0.30	3.30	2.69	0.63	0.35	0.16	2.43	0.40	0.13
0.58	3.58	0.00	1.09	0.67	0.28	2.11	0.45	0.00
0.90	3.90	-0.63	1.21	0.97	0.26	1.78	0.20	-0.12
1.20	4.20	-0.44	1.24	1.26	0.24	1.53	0.17	-0.19
1.50	4.50	-0.22	1.32	1.60	0.22	1.33	0.13	-0.23
2.00	5.00	-0.06	1.59	2.30	0.20	1.08	0.07	-0.28
2.50	5.50	-0.01	2.02	3.16	0.18	0.89	0.05	-0.30

2. 锚杆应力与变形的计算

计算结果如下: σ_M 截面的位置坐标 $x_0=0.58\text{m}$; 最大伸长应变 $\varepsilon_M=1.65\%$; 最大拉应力 $\sigma_M=330\text{MPa}$; 最大与最小的侧面剪应力 $\tau_{\max}=6.12\text{MPa}$, $\tau_{\min}=-2.13\text{MPa}$; 孔口端轴向位移 $v_a=8.11\text{mm}$; σ_M 截面轴向位移 $v_0=7.54\text{mm}$; 孔底端轴向位移 $v_b=6.36\text{mm}$ 。

锚杆拉应力 σ , 侧面剪应力 τ 和横截面轴向位移 v 随深度 x 的变化规律如图2。

3. 围岩应力与变形的计算

计算结果列于表2。 $(\sigma_r)_h-x$ 曲线如图7。

表2 围岩应力与变形计算

项 目	应 力				变 形	
	围岩应力 $\sigma_r(\text{MPa})$		锚杆附加应力 $(\sigma_r)_h(\text{MPa})$		塑性区半径 R	洞周总位移 u'_a
	中性面处	孔底处	中性面处	孔底处	R (m)	u'_a (mm)
有支护	0.67	3.16	0.28	0.53	6.04	11.95
无支护	0.39	2.63	0	0	6.38	13.33
支护效果	76%	20%	—	—	-5%	-10%

七、结 论

1. 本文选用的锚杆应变深度曲线的数学模型形式简单, 连续光滑, 接近现场量测曲线, 能满足锚杆孔口端的边界条件, 其凹凸变化能适应锚杆与围岩的变形特性。

2. 本文将锚杆对围岩的反力简化为轴对称的径向体积力, 解出了锚固区的径向应力, 建议了一个估算砂浆锚杆支护的围岩变形的办法, 这对研究砂浆锚杆支护的力学机理是有益的。

3. 本文以轴对称解为基础, 考虑围岩的周向非均匀变形, 从锚杆与其轴线处围岩的应力应变关系入手, 提出锚杆与围岩的变形协调条件。这种研究方法符合弹塑性力学的基本原理。

4. 砂浆锚杆支护属接触应力问题, 在尚无精确的解析解的情况下, 本文提出的解题方法对研究砂浆锚杆的支护原理是有一定的现实意义的。

5. 本文提出的方法只适用于轴对称问题。文中对围岩周向非均匀应力与变形的分析比较粗糙。这个问题还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 孙学毅, 开巷后围岩径向应变规律及砂浆锚杆受力分析, 地下工程, 1983年第2期。
- [2] 张德兴, 砂浆锚杆和喷射混凝土支护的受力分析, 岩土工程学报, Vol.7, No.4, 1985年, pp.24—33。
- [3] 李锡润、金银东, 有预张力的粘结式锚杆, 岩土工程学报, Vol.9, No.1, 1987年, pp.40—52。
- [4] 于学馥、郑颖人等, 地下工程围岩稳定分析, 煤炭工业出版社, 北京, 1983年, pp.133—379。
- [5] 科茨, D.F., 岩石力学原理, 冶金工业出版社, 北京, 1978年, pp.220—228。
- [6] 庄懋年、马晓士等, 工程塑性力学, 高等教育出版社, 1983年, 北京, pp.73—77。

The Estimation of Grouting Rod Support Strength in Elasto-Plastic Surrounding Rock

Tang Bosen

(Zhuzhou Institute of Technology)

Abstract

This paper describes the mathematical model of the strain of grouting rod according to measuring data in situ. The stress and displacement of the grouting rod can be calculated by this model. The radial stress of the surrounding rock can be solved by means of Mohr-Coulomb yield condition if the reaction of the rod on the surrounding rock is assumed to be symmetric radial action. The deformations of the grouting rod support are determined according to the conventional deformation formula of the supporting structure consider the peripheric deformation of the surrounding rock is non-uniform but symmetric to axis by the deformation of grouting rod being consistent with that of surrounding rock, the basic equations of grouting rod support was put forward.