

喷锚支护位移监控理论分析与工程实例

孙学毅

(柳州欧维姆工程有限公司 柳州 545005)

摘要:文中首先分析了巷道围岩的空间效应和时间效应在支护时对改善围岩受力状态的作用。

文中指出,巷道围岩吸水软化强度降低的场合相当于高应力作用下流变情况。流变的结果导致围岩和支护结构的变形或破坏。根据傅作新教授提出的求解线性流变体静力学分类思路按线性流变学第一定理得出高应力作用下圆形巷道径向流变位移公式。并通过在工程中应用获得了令人满意的结果。

关键词:空间效应 时间效应 线性流变 Poytin-Thomson模型

1. 前言

地下工程施工挖去一部分岩体,引起围岩应力重新分布,这种应力重分布使设计者面临围岩变形的问題。

现场量测和理论计算表明,围岩的变形在施工过程中存在工作面开挖空间效应和开挖之后的时间效应。为了保证地下工程安全使用支护往往是必不可少的,支护的目的是维持围岩的极限平衡状态。近二十年,随着地下工程的发展,喷锚支护应用日趋广泛。喷锚支护明显的特点是支护与围岩共同作用,由于原岩的荷载并不很清楚,岩体特性研究的也不充分,所以由这些荷载引起的围岩变形不能准确地进行计算,因而由围岩与支护共同变形而产生的作用力就很难确定。

随着生产的发展,近些年国内外开始采用“位移监控”指导设计和施工。本文根据已有的研究成果^{[1]-[9]},首先分析了线弹性围岩的空间效应,线粘弹围岩的空间、时间效应以及吸水软化粘弹围岩变形规律,进而对喷锚支护位移监控设计基本原则进行归结。最后通过工程实例来说明如何根据位移监控来指导设计和施工。

2. 线弹性围岩的空间效应

假定:受二向等压的圆形巷道。

2.1 无支护时,围岩应力、位移分量为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= P_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ \sigma_\theta &= P_0 \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ U &= \frac{P_0 r_0^2}{2Gr} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.2 有支护时,围岩应力、位移分量为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= P_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + P_1 \frac{r_0^2}{r^2} \\ \sigma_\theta &= P_0 \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - P_1 \frac{r_0^2}{r^2} \\ U &= \frac{r_0^2}{2Gr} (P_0 - P_1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:

P_0 - 原始应力,取 $P_0 = \gamma H$;

γ - 岩体容重;

H - 巷道所处深度;

r_0 - 巷道开挖半径;

r - 点的极径座标;

σ_r - 径向应力;

σ_θ - 切向应力;

U - 径向位移;

$P_1 = \frac{P_0 r_0 K_c}{2G + r_0 K_c}$, 支护抗力;

$K_c = \frac{2G_c (r_0^2 - r_1^2)}{r_0 [(1 - 2\mu_c)r_0^2 + r_1^2]}$, 喷射混凝土支护

刚度系数;

r_1 - 支护后巷道半径;

G_c - 混凝土剪切模量;

μ_c - 混凝土泊松系数;

G - 围岩剪切模量。

2.3 工程应用举例

某工地有一土洞, $r_0=300\text{cm}$, $r_1=290\text{cm}$, $P_0=5.4\text{kg/cm}^2$, $G=375\text{kg/cm}^2$, $G_c=85690\text{kg/cm}^2$, $\mu=1/3$, $\mu_c=0.167$, $C=1\text{kg/cm}^2$, $\phi=30^\circ$ 。

应用上式算得:

无支护时, $\sigma_r=0, \sigma_\theta=2P_0$

有支护时, $K_c=23.4\text{kg/cm}^2, \sigma_r=0.9P_0, \sigma_\theta=1.1P_0$

图1为有支护和无支护壁围岩莫尔应力圆。

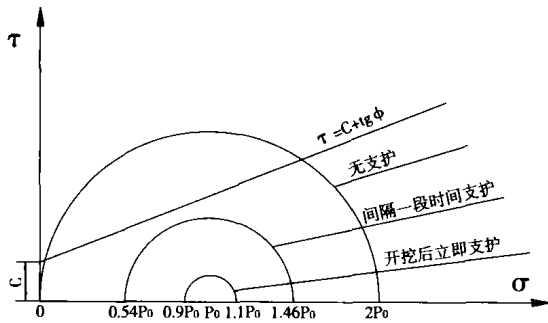


图1 洞周壁面莫尔应力圆

从图1可以看出, 无支护洞壁围岩已发生破坏(应力圆与强度线相交), 开挖之后立即支护时洞壁围岩莫尔应力远离强度线, 即围岩仍处于弹性状态。从这个实例中我们可以看出, 开洞后立即支护是必要的。它可以改变围岩受力状态, 使其稳定。

由于开挖是一个渐进过程, 开挖过程中围岩应力和位移都受开挖面的约束, 称这一现象为空间效应。对于线弹性围岩, 圆形巷道三维有限元分析表明在掘进工作面处弹性位移仅释放掉0.25U, 在1/4洞径距离处释放掉0.5U, 在1倍洞径距离处位移释放0.9U, 在距工作面1.5~2倍洞径处空间效应消失。

上述分析已被现场实测所证实。我们在梅山铁矿巷道进行过空间效应的观测。该巷道距地表面200米, 巷道平均半径 $r_0=200\text{cm}$, 围岩单轴抗压强度大于 500kg/cm^2 。显然开巷后围岩处于弹性状态, 不计流变作用理论计算弹性位移为0.8mm。我们在1/4倍洞径处开始测量, 测到2.5倍洞径处位移值为0.36mm, 以后基本不变, 这说明理论分析与事实基本相一致。

仍然用上例考虑空间效应进行分析:

设支护前围岩已释放位移 $U_0=0.4U$ 时

$$P_i = \frac{2GK_c}{2G + K_c r_0} \left(\frac{r_0 P_0}{2G} - U_0 \right) \quad (3)$$

将 P_i 值代入(2)式算得:

$$\sigma_r=0.54P_0, \sigma_\theta=1.46P_0$$

利用图1, 可知此时洞壁莫尔应力圆仍然在强度曲线之内, 即围岩仍处于弹性状态。从上面的分析可以得出如下结论:

围岩处于线弹性状态时, 支护必须及早进行, 开挖之后立即喷一层混凝土, 或安装锚杆利用开挖面的空间效应抑制围岩受力状态, 这对围岩稳定是非常必要的。

3. 线粘弹围岩支护分析

从前面的分析可知, 离工作面1.5~2倍洞径距离线弹性空间效应已经消失。但对于软弱围岩仍然存在着粘弹变形。若开巷后立即喷射混凝土或安设锚杆支护, 向围岩提供抗力利用线弹性空间效应把围岩受力状态限定在弹性范围, 然后进一步考虑围岩的流变特性, 在此情况下我们可以近似地用Poytin-Thomson模型来描述岩体随时间增加变形的情况。

根据工程实践, 一般情况支护时弹性位移已释放0.4U。由于设置支护, 围岩的应力和位移都与支护有关。根据厚壁筒受均外压公式, 喷层受径向力为:

$$P_i^e = K_c (U_{r0} - 0.4U) \quad (4)$$

式中:

U_{r0} - 巷道壁围岩流变位移

$$U = \frac{P_0 r_0}{2G_0}$$

将(4)式进行拉氏变换, 得

$$\tilde{P}_i^e = K_c \left(\tilde{U}_{r0} - 0.4 \frac{U}{S} \right)$$

根据围岩位移弹性解

$$U_r = \frac{r_0^2 (P_0 - P_i)}{2G_0 r} \quad (6)$$

则围岩位移粘弹性解的拉氏变换为

$$\tilde{U}_r = \frac{r_0^2 (\tilde{P}_0 - \tilde{P}_i)}{r \left(\frac{2G_\infty + 2G_0 n r e_1 S}{1 + n r e_1 S} \right)} \quad (7)$$

式中:

S - 变换常数;

G_0 - 围岩瞬时剪切变形模量;

G_∞ - 围岩长期剪切变形模量;

$n r e_1$ - 围岩延迟时间。

由于 $r \rightarrow \infty$ 处围岩应力变换为

$$\tilde{P}_0 = \frac{P_0}{S(1 + \eta_{rel}S)} \quad (8)$$

$r = r_0$ 处围岩应力变换为

$$\tilde{P}_i = K_c (\tilde{U}_{r_0} - 0.4 \frac{u}{S}) - \frac{2G_0 \eta_{rel}}{(1 + \eta_{rel}S)} \quad (9)$$

并利用轴对称情况，则(7)式可写成

$$\tilde{U}_r = \frac{r_0^2}{r(2G_0 + r_0 K_c)} \left[\frac{P_0 + 0.4K_c U}{\alpha} \left[\frac{1}{S} - \frac{1}{S + \frac{\alpha}{\eta_{rel}}} \right] + \frac{0.4K_c U + \frac{2G_0 U}{r_0}}{S + \frac{\alpha}{\eta_{rel}}} \right] \quad (10)$$

反演之，得

$$U_r = \frac{r_0^2}{r} \left[\frac{P_0 + 0.4K_c U}{2G_\infty + K_c r_0} \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{\eta_{rel}} t} \right) + \frac{0.4U + \frac{2G_0 U}{r_0}}{2G_0 + r_0 K_c} \cdot e^{-\frac{\alpha}{\eta_{rel}} t} \right] \quad (11)$$

式中：

$$\alpha = \frac{2G_\infty + K_c r_0}{2G_0 + K_c r_0}$$

当 $r \rightarrow \infty$ ，在洞周 $r = r_0$ 处

$$U_{r_0} = \frac{P_0 + 0.4K_c U}{2G_\infty + K_c r_0} \quad (12)$$

从上述分析可以看出，为了抑制围岩变形使围岩稳定，利用围岩的开挖效应是很重要的。由于围岩存在着流变特性，往往使一次支护结构不能承受较大的流变位移，这时就需要应用“位移监控”，根据位移流变曲线确定第二次支护的时间。

上述分析已被工程实践所证实。我们对张家注矿区小官庄铁矿16米²断面的粘土质砂岩巷道进行了现场位移监控分析，结果如下。

该巷距地表500米深，岩体平均容重23KN/m³，岩石单轴抗压强度290kg/cm²，取围岩抗压强度227kg/cm²。巷道平均半径 $r_0=230$ cm，巷道开挖后紧跟工作面喷12cm厚混凝土封闭支护。

喷层 $G_c=10.4 \times 10^4$ kg/cm²， $\mu_c=0.25$

围岩 $G_\infty=7.6 \times 10^4$ kg/cm²。

开挖后若不支护时，在洞周处由(1)式得 $\sigma_r=0$ ， $\sigma_\theta=234$ kg/cm²。取围岩的单轴抗压强度作为屈服判据，即 $\sigma_s=227$ kg/cm²，洞周围岩主应力差 $\sigma_\theta - \sigma_r=234$ kg/cm² ($> \sigma_s$)，已进入塑性状态。

从而看出，对于软弱围岩巷道紧跟工作面支护，利用空间效应向围岩提供必要的抗力可以把围岩控制在弹性状态。当考虑围岩的流变变形时，支护与围岩将进一步相互作用，支护内力将进一步增高，围岩受力状态将进一步得到改善，但此时第一次喷射混凝土支护结构往往不能承受

这种变形，工程中采用二次喷射混凝土支护。

4. 吸水软化粘弹围岩变形与支护受力分析

4.1 吸水软化粘弹围岩给修建地下工程带来的麻烦最大。为了对巷道长期稳定性作出评价，必须知道巷道的变形规律，依此分析支护结构受力。由此，我们必须根据实验资料确定岩石流变的物理方程，并通过实测的流变曲线求出方程中参数。

吸水软化围岩强度降低，相当于高应力作用下流变情况。流变的结果最终将导致材料和结构的破坏。

根据现场实测资料和室内实验分析，我们选定下列流变模型和物理方程来描述吸水软化围岩变形规律(图2、图3)。

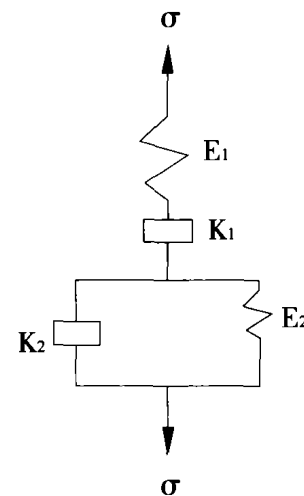


图2 吸水软化粘弹围岩流变模型

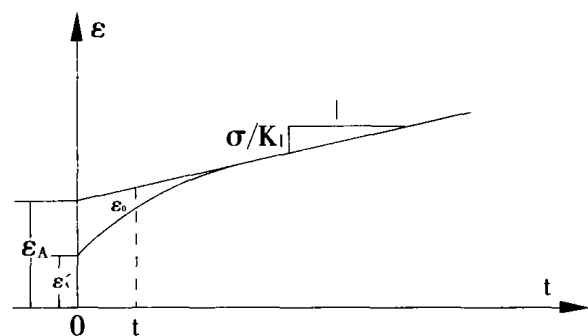


图3 吸水软化粘弹围岩在常应力作用下应变规律

图3的物理方程为：

$$K_2 \varepsilon + E_2 \varepsilon = \frac{K_2}{E_1} \sigma + \left(1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{K_2}{K_1} \right) \sigma + \frac{E_2}{E_1} \sigma \quad (13)$$

在常应力下，应变方程为：

$$\varepsilon(t) = \sigma \left[\left(\frac{1}{E} + \frac{t}{K_1} \right) + \left(\frac{1}{E_2} - \frac{t}{K_2} \right) e^{-E_2 t / K_2} \right] \quad (14)$$

分析式(13)、(14)可知, 时间t很大时, 吸水软化围岩在常应力作用下, 变形具有稳定不变的速率 $\varepsilon = \sigma / K_1$, 可见所选的物理方程能描述吸水软化粘弹围岩的变形规律。

假定由实验已测得单向受力下的吸水软化粘弹围岩应变规律如图(3)所示, 当t=0时, 由(14)式得瞬时应变 $\varepsilon_0 = \sigma / E_1$, ε_0 值可由图量得, 由此

$$E_1 = \sigma / \varepsilon_0 \quad (a)$$

当时间t很大时, 可以略去(14)式右端的第四项, 然后求得流变曲线的渐近线在纵轴上的截距 ε_A

$$\varepsilon_A = \sigma \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (b)$$

由于 σ 、 E_1 已知, 而 ε_A 可从图(3)量得, 由式(b)可求得 E_2 。

流变曲线的渐近线斜率K等于

$$K = \sigma / K_1 \quad (c)$$

利用上式可以求出 K_1 。为了决定第四个参数 K_2 , 在曲线上量出任意时刻t的流变曲线与渐近线纵坐标的差值 ε_q

$$\varepsilon_q = \frac{\sigma}{K_2} e^{-E_2 t / K_2}$$

对上式两边取对数

$$\text{Lg } \varepsilon_q = \text{Lg} \left(\frac{\sigma}{K_2} \right) - \frac{E_2 t}{2.3 K_2} \quad (d)$$

在半对数纸上绘 $\text{Lg } \varepsilon_q$ 与时刻t的关系直线, 量取直线斜率, 可以求出 K_2 的值。

4.2 工程应用举例

我们仍然以张家洼矿区小官庄铁矿粘土质砂岩巷道为例。该巷道距地表面450米, 断面13米²。现场测得围岩吸水条件下径向位移与时间曲线如图4所示。

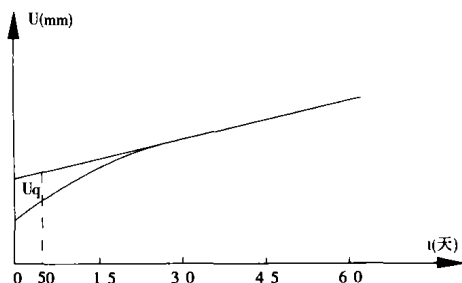


图4 巷道周边围岩径向位移---时间曲线

根据傅作新教授提出的求解线性流变体静力学分类思路, 把问题归结为一类线性流变力学问题。按线性流变力学第一定理(9), 我们把图4的流变位移曲线表成下式

$$U_r(t) = \text{Pro}(1 + \mu) \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{t}{K_1} \right) + \left(\frac{1}{E_2} - \frac{t}{E_2} \right) e^{-E_2 t / K_2} \right] \quad (15)$$

围岩吸水软化, 测得泊松系数 $\mu \approx 0.35$, 岩体容重 $\gamma = 2.34$ 吨/米³, 取原岩应力 $P = \gamma H = 105$ kg/cm², 巷道平均半径 $r_0 = 203$ cm。由(15)和图4得

$$\frac{\text{Pro}(1 + \mu)}{U_0} = \frac{105 \times 203 \times 1.35}{0.14} = 205537.5 \text{ kg/cm}^2$$

作曲线的渐近线, 求得斜率 $K = 0.6$ cm/150天及 $U_A = 1.55$ cm, 则

$$E_2 = \frac{1}{\frac{U_A}{\text{Pro}(1 + \mu)} - E_1} = \frac{1}{\frac{1.55}{28775.25} - \frac{1}{205537.5}} = 20408 \text{ kg/cm}^2$$

在图(4)中量取不同t值时流变曲线与渐近线纵坐标差值 U_q , 由

$$U_q = \frac{\text{Pro}(1 + \mu)}{E_2} e^{-E_2 t / K_2}$$

取对数得

$$\text{Lg } U_q = \text{Lg} \left(\frac{\text{Pro}(1 + \mu)}{E_2} \right) - \frac{E_2 t}{2.3 K_2}$$

在半对数纸上绘 $\text{Lg } U_q$ 与时刻t的关系直线, 量取直线斜率求得

$$K_2 = 733126.88 \text{ kg} \cdot \text{天} / \text{cm}^2。$$

验算: 由求得的流变参数, 取t=300天, 依(15)式算得 $U_r = 2.15$ cm, 实测值 $U_r = 2.25$ cm。

流变曲线的参数求出后, 我们就可根据流变位移公式求得任意时刻巷道周边径向位移。我们知道喷射混凝土支护层直径的变化率等于环向应变, 即 $\varepsilon_t = U(t) / r_0$, 把 ε_t 与喷层极限应变进行比较就可求出喷层破坏时间。

参考文献

- 1、刘宝琛: 喷射混凝土支护的作用机理.《金属学报》第15卷第三期1979年
- 2、朱维申: 粘弹-塑性岩体中衬砌与围岩的共同作用问题.《岩土力学》1979年1期
- 3、陶振宇: 水工建设中的岩石力学问题.水利电力出版社 1976年
- 4、孙学毅: 软弱或破碎岩体中巷道锚喷支护分析.《金属学会第一次岩石力学会议论文集》冶金工业出版社 1981年
- 5、侯学渊: 弹性地层中的圆形结构.《地下工程》1981年10期
- 6、于学馥、郑颖人、方正昌: 地下工程围岩稳定性分析.煤炭工业出版社 1983年
- 7、郑颖人、刘怀恒、顾金才: 均质地层锚喷支护理论与设计.《岩土工程学报》1981年1期
- 8、方正昌: 圆形隧道变形地压的弹塑性粘解.《地下工程》1982年
- 9、傅作新: 工程徐变力学.水利出版社 1985年