

文章编号:1006-2106(2002)01-0047-08

家竹箐隧道与岩体力学(上)

——库伦侧压理论与摩尔应力圆的应用

符华兴*

(中铁工程五局集团公司, 贵阳 550003)

提 要: 南昆线家竹箐隧道是首座由我国自行设计施工的强挤压型隧道。它涵盖的力学比较全面,在设计和施工中,充分体现了岩体力学指导设计和施工的原则,从而取得了成功。本文述理与写实并重。叙述了岩体力学的一些重要公式的全过程,通过家竹箐隧道的具体施工实例,加以阐明。并对经典学说多所评述,对岩体力学在应用中有所创新,对普及岩体力学在工程应用方面提供了参考。

关键词: 家竹箐隧道; 岩体力学; 库伦侧压理论; 摩尔应力圆

中图分类号: U451 **文献标识码:** A

我国南昆线家竹箐隧道有长 390 m 的一段,于 1995 年至 1996 年施工期间曾在煤系地层发生了强挤压大变形,因而在我国隧道史上成为第一座强挤压型隧道,揭开了该类工程在我国的序幕,也引发了该类工程对岩体力学的依存关系和一些值得探讨的问题。

本文力图以现代岩体力学及在施工中新体会为本,以家竹箐隧道为实例来说明问题。即对岩体力学对照已有的施工实例来加以阐述、肯定和评论。这是因为岩体力学尚是一门前进发展中的科学,通过家竹箐隧道既可肯定某些方面又可指出尚存疑义的某些方面。

文中提出一些新的见解,较系统地叙述并发挥了家竹箐隧道有关的岩体力学部分,以实例来说明对这些部分的应用,并对公式的推导有所阐述。

1 塑性系数与库伦被动侧压系数

在岩体力学中有一个重要的系数,叫塑性系数,它的表达式为:

$$K_p = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}, \quad \phi \text{ 为岩、土的内摩擦角。}$$

在土壤力学中,也有一个重要的系数,叫库伦被动侧压系数,它的表达式为:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$

两者型式不一,但却殊途同归,表达的是同一回事。其中 $(1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi) = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$ 可证明

如下。 $\because \sin 90^\circ = 1$, 则 $(1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi) = (\sin 90^\circ + \sin\phi)/(\sin 90^\circ - \sin\phi)$ 。用三角函数和差化积公式,即:

$$\sin\alpha \pm \sin\beta = 2\sin \frac{\alpha \pm \beta}{2} \cos \frac{\alpha \mp \beta}{2}, \text{ 可得:}$$

$(\sin 90^\circ + \sin\phi)/(\sin 90^\circ - \sin\phi) = 2\sin(45^\circ + \phi/2) \cos(45^\circ - \phi/2)/2\sin(45^\circ - \phi/2) \cos(45^\circ + \phi/2)$ 。如图 1 的直角三角形表示 $\angle a$ 与 $\angle b$ 的关系,



图 1 直角三角形

若 $\angle a = 45^\circ + \phi/2$, 则 $\angle b = 45^\circ - \phi/2$, 而有 $\tan(45^\circ + \phi/2) = \frac{bc}{ac}$, 故得 $(1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi) = \tan(45^\circ + \phi/2) \tan(45^\circ - \phi/2) = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$ 。

此外,由三角学可知: $\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan\alpha + \tan\beta}{1 - \tan\alpha \tan\beta}$, 通过演算,代入 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\beta = \phi/2$, 再两边平方,亦可证明 $\tan^2(45^\circ + \phi/2) = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$ 。

经过反复证明,结果是:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)。$$

反复证实是为了对至关重要的塑性系数 K_p 即库伦被动侧压系数加深认识。在以后的叙述中还要添加的恒等式是原始侧向力 σ_x 与原始竖向地应力 σ_y 之

比。

本文以力 K_p 表示塑性系数,以 K_e 表示弹性系数,而 $K_e = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 。

2 摩尔(莫尔)应力圆在岩体力学中的应用

2.1 用于强挤压条件下的地下洞室,以确定岩、土的内摩擦角 ϕ ,从而确定塑性系数 K_p

洞室的强挤压是指洞室的埋深比较深,而洞室的覆盖却较弱,没有强度足够的地层来抵御挖洞之后产生的强挤压力的一种物理现象。挤压的程度往往与埋深和围岩强度有关。它既不同于因为围岩具有较高的强度而发生的岩爆现象,也不同于因围岩物理的或化学的特性所产生的围岩膨胀现象。它具有原始地应力挤压现象,且深受库伦被动侧压即塑性系数的影响,往往使侧面挤压的水平方向地应力 σ_x 大于竖向地应力 σ_y 。此处 $\sigma_y = \gamma H$, γ 为围岩容重, H 为洞室埋深。而塑性系数或库伦被动侧压系数在此处被定义为 σ_x/σ_y ,因此使该系数又增加一项恒等式,即:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \sigma_x/\sigma_y \quad (1)$$

其中关键的内摩擦角 ϕ 可用下述应力圆(b)确定:

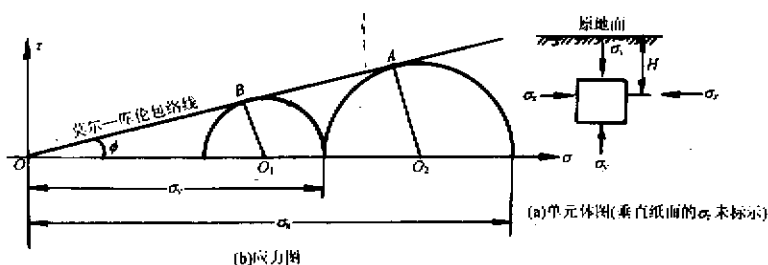


图2 由原始地应力构成的应力圆求取 ϕ 值的方法

设在围岩中取单元体(a),当其位于弹性区时, σ_y 为最大主应力, O_1 表示弹区的应力圆;当其向挖洞方向移动时, σ_x 变为最大主应力, O_2 为塑性区的应力圆, σ_y 转变为最小主应力。此二圆的公共切线 OA 称为摩尔—库伦包络线,而 $\angle AOO_2$ 即为内摩擦角 ϕ 。现用图2的应力圆求 ϕ 。设 A 、 B 为包络线在二圆上之切点,由图2知

$$\sin\phi = AO_2/OO_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)/[\sigma_y + (\sigma_x - \sigma_y)/2] = (\sigma_x - \sigma_y)/(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2)$$

这样内摩擦角 ϕ 就全以地应力 σ_x 和 σ_y 表达出来,因此要求地应力必须量测准确。

例1 家竹箐隧道的强挤压段用软包体法较准确地测得地应力数据 $\sigma_x = 16.09 \text{ MPa}$, $\sigma_y = \gamma H = 22 \times 390 \times 0.001 = 8.58 \text{ MPa}$ 。如忽略粘结力 C ,试用应力圆法求

取内摩擦 ϕ 。

解: 用公式(2), $\sin\phi = (16.09 - 8.58)/(16.09 + 8.58) = 0.3044$ 则 $\phi = 17.75^\circ$ 。因而也印证了(1)式即:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + 17.75^\circ/2) = \frac{1 + \sin 17.75^\circ}{1 - \sin 17.75^\circ} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{16.09}{8.58} = 1.88$$

需要说明的是忽视粘结力 C 一方面因为软弱围岩的 C 值比较小,如家竹箐隧道, C 值约为 $0.5 \sim 0.65 \text{ MPa}$ 之间;另一方面忽视它会使 ϕ 增大,从而加大 K_p 值而偏于安全。还须说明的是已如上述要准确地量测地应力而不得以工程类比等粗略方法去确定 ϕ 值;更不能把远大于1的数值牵强地把 K_p 系数说成等于1或接近于1。例如家竹箐隧道按工程类比Ⅱ类围岩可以说成是 $\phi \approx 30^\circ$,但于 K_p 值却会被误定为 $K_p = 3$ 。这是要引起高度注意的,也就是说要维护数学的严肃性,如(2)式是一连圈的恒等,决非类比所能粗略代替。因为 ϕ 值在岩、土力学中举足轻重,故补述此段以表重视。

家竹箐隧道是在正洞和平导相距为 25 m 的平导中再挖侧坑,用软色体法测定地应力 σ_x 和 σ_y 。这显示抽样地点的埋深与洞室实体的一致性,以及符合抽样地点约在开挖圆半径 r_a 的 $5 \sim 6$ 倍之间即弹塑性交接面处的要求。因而样品具有较强的代表性。对决定塑性区范围和松弛区对锚杆的作用力等都有指导作用。

例2 奥地利的陶恩公路隧道已精确地量测到内摩擦角 $\phi = 21^\circ$, 平均埋深 $H = 800 \text{ m}$, 平均岩体容重 $\gamma = 27 \text{ kN}$, 为强挤压洞室,求原始地应力。

解: 先求常驻地应力 $\sigma_y = \gamma H = 27 \times 800 \times 0.001 = 21.6 \text{ MPa}$ 然后应用(2)式得:

$\sin 21^\circ = (\sigma_x - 21.6)/(\sigma_x + 21.6)$, 即 $\sigma_x = 29.341/0.6416 = 45.73 \text{ MPa}$ 。足见陶恩在埋深和强挤方面都比家竹箐大。从塑性系数方面言, $K_p = 45.73/21.6 = \sigma_x/\sigma_y$ 也比家竹箐大。这里再一次证明了 $\tan^2(45^\circ + 17.75^\circ/2) = \sigma_x/\sigma_y = 21.2 = K_p$ 的恒等概念。新奥法创始人勒布西维兹曾在该洞主持施工,费了很大周折才用径向长锚杆把强挤压治住。以后在阿尔贝格和日本的惠那山等强挤压隧道中相继以同法取得成功,今又在我国家竹箐隧道在理论和实践方面都得以更为完整的方式出现,从而有“沉舟侧畔千帆过”之势。

2.2 用于弹塑性条件下区分塑性系数 K_p 和弹性系数 K_e

如图3设在弹塑性分界处作应力圆 O_1 , σ_y 为竖向

常驻地应力, σ_x 为水平地应力, 与之相应的圆周角为 α_p 和 α_e , 则有:

$\alpha_p = \beta + \phi$, $\alpha_p + \beta = 90^\circ$ (A 为包络线在 O_1 上之切点), 令此二式左右相加消去 β , 可得:

$$\alpha_p = 45^\circ + \phi/2 \quad (3)$$

称式(3)为塑性状态时的对数螺线角。同样还可得

$$\alpha_e = 45^\circ - \phi/2 \quad (4)$$

称式(4)为弹性状态时的对数螺线角。

此二螺线角在岩、土力学中至关重要。因为它是区分地下洞室或地面土工建筑物塑性(被动侧压)破坏和弹性破坏的要素。因为岩体力学曾指出地下洞室的破坏型式多为对数螺线型破坏, 该二圆周角正好说明了这一点, 将在下款中作进一步叙述。此二角正好与库伦的两侧压系数即 $\operatorname{tg}^2(45^\circ \pm \phi/2)$ 相对应。但到目前为止, 除土壤力学已有明确的区分外, 教科书和有关资料中, 在介绍岩体力学时都只叙述了其中的 $\alpha_e = 45^\circ - \phi/2$ 而把 $\alpha_p = 45^\circ + \phi/2$ 遗忘了。由此引发的误导将导致大数小算、洞塌人亡的危险。因此须在下款中着重加以说明。

2.3 对数螺线角在洞室开挖中的应用

由图 3 知 α_p 与 α_e 为应力圆 O_1 与摩尔—库伦包络线 OA 间的破裂角, 岩体力学把由该角在围岩中行进所构成的轨迹称之为对数螺线。如图 4 所示, 以开挖圆竖半径 OM 为始线作圆心角 α_p 和 α_e , 使 $\alpha_p = 45^\circ + \phi/2$ 和 $\alpha_e = 45^\circ - \phi/2$, 它们的终边为幅线 OB 并交开挖圆

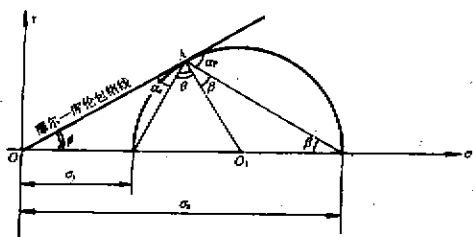
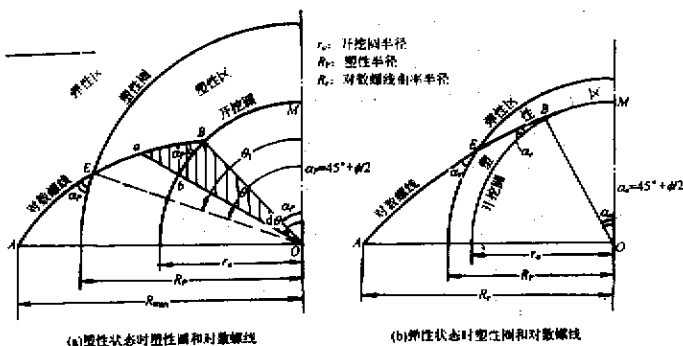


图 3 弹塑性交界面上的应力图



万方数据

图 4 塑性圈和对数螺线及微面积的标示

表 1 塑性区对数螺线角 α_p 与弹性区对数螺线角 α_e 的比较表

塑性区对数螺线角 α_p	弹性区对数螺线角 α_e
1. 螺线角 $\alpha_p = 45^\circ + \phi/2$, 它是塑性系数或库伦被动侧压系数 $K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \phi/2)$ 中的基数。	1. 螺线角 $\alpha_e = 45^\circ - \phi/2$, 它是弹性状态下或库伦主动侧压系数 $K_e = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2)$ 中的基数。
2. 对数螺线大部行进于塑性区, 而在洞室的拱脚处伸出一腿, 形成该部位的应力集中。	2. 螺线大部行进于弹性区, 在洞室的顶部因为局部塑性区的存在而形成该部位应力集中。
3. 洞室的侧面部位因为有大于 1 的 K_p 系数存在, 而使侧压力加大, 故该部的支护需要特别加强。	3. 因为 K_e 总是小于 1, 故洞室的侧面部位无须加强, 甚至有时无须支护, 而只须护顶。

于 B 点, 然后以与开挖圆 γ_a 及其同心圆的交角皆为 α_p 或 α_e 的各点如 $B, E \dots$ 等的连线所成的曲线如 AB 即为对数螺线。为了弄清两种状况下的对数螺线性质及区别其用途, 除了图 4 的表达外, 特列表 1 说明以资加深理解。并从以下几方面来说明它的应用。

2.3.1 对数螺线的方程

在图 4(a)中取微三角形 aOB , 按以上叙述知 $\alpha_p = \angle aBb = 45^\circ + \phi/2$, 设 $ab = d\gamma$, $Bb = ds$, $ao = \gamma$, 则有:

$$\operatorname{tg} \alpha_p = d\gamma/ds, \because ds = \gamma d\theta, \therefore \operatorname{tg} \alpha_p = \frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{d\theta}, \text{变量分离后 } \operatorname{tg} \alpha_p d\theta = d\gamma/\gamma. \text{ 两边积分得:}$$

$\int d\gamma/\gamma = \int \operatorname{tg} \alpha_p d\theta$, 即 $\ln \gamma = \theta \operatorname{tg} \alpha_p + c$, c 为积分常数, 代入初始条件: 当 $\theta = \alpha_p$ 时, $\gamma = \gamma_a$, 得:

$$\ln \gamma_a = \alpha_p \operatorname{tg} \alpha_p + c, \text{ 得 } c = \ln \gamma_a - \alpha_p \operatorname{tg} \alpha_p. \text{ 代入原式得}$$

$\ln \gamma - \ln \gamma_a = (\theta - \alpha_p) \operatorname{tg} \alpha_p + c$, 即 $\ln \frac{\gamma}{\gamma_a} = (\theta - \alpha_p) \operatorname{tg} \alpha_p$. 意及对数函数的基本性质, 知:

$$\gamma = \gamma_a \exp(\theta - \alpha_p) \operatorname{tg} \alpha_p, \text{ 即 } \gamma = e^{(\theta - \alpha_p) \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \gamma_a \quad (5)$$

此即对数螺线的方程, 也就是 AB 曲线上任一点曲率半径的计算公式。因为它由对数函数所构成, 故称之为对数螺线。将 θ 由 α_p 至 $\pi/2$ 代入任一角值, 即可得出相应的曲率半径 γ 值。

例 3 家竹箐隧道的开挖半径 $\gamma_a = 5.12 \text{ m}$, 塑性半径 $R_p = 10.12 \text{ m}$, 内摩擦角 $\phi = 17.75^\circ$ 。如图 4, 求塑性区半径圈与对数螺线 AB 交点 E 处所对圆心角 θ_1 和最大螺线半径 R_{\max} 。

解: 由式(5) $\gamma = \gamma_a \cdot e^{(\theta - \alpha_p) \operatorname{tg} \alpha_p}$, 由图 4 知在 E 处螺线半径与塑性圈半径相等, 即 $\gamma = R_p = 10.12 \text{ m}$, 以之代入(5)式, 得 $10.12 = 5.12 e^{(\theta_1 - 53.875^\circ) \operatorname{tg} 53.875^\circ}$, 得 $\theta_1 = 82.4^\circ$ 式中 $\alpha_p = 45^\circ + \phi/2 = 45^\circ + 17.75^\circ/2 = 53.875^\circ$ 。最大螺线曲率半径发生在水平位置即起拱线处。仍由(5)式, 得 $R_{\max} = 5.12 e^{(90^\circ - 53.875^\circ) \operatorname{tg} 53.875^\circ} = 5.12 \times 2.3723 = 12.15 \text{ m}$ 。

公式(5)亦适于弹性状态,只须将 α_p 换成 α_e 即可。如家竹箐隧道如为弹性状态,则 $\alpha_e = 45^\circ - 17.75^\circ/2 = 36.125^\circ$ 。

2.3.2 洞室围岩中用以计算围岩作用于支护的作用力之作用面积

如将图 4 中的(a)进一步明朗细致,并绘出如图 5 的代表性锚杆 l_1 和 l_2 的分区域力作用图。图中以对数螺线角 α_p (或称破裂角)的幅线 OC 为分区的分界线。把 BC 以上 l_1 锚杆作用的部位 $BCGM$ 作为竖向受拉区, BC 以下 l_2 锚杆作用的部位 $AECBF$ 作为水平受拉或受剪区。这样就要算出 BC 上下的相关力的作用面积,从而算出作用力的大小。而 l_1 和 l_2 是区域中的代表性锚杆,代表受力状况。

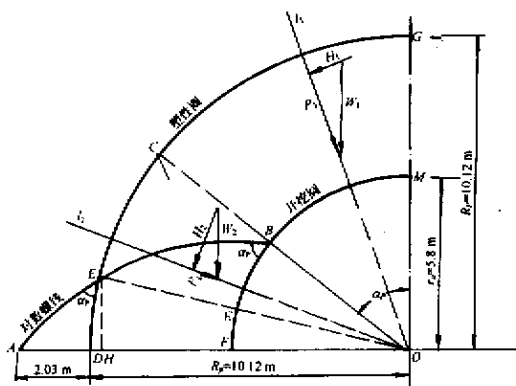


图 5 锚杆分区域受力简图

(1) BC 以上区域,可忽视作用于锚杆的剪力 H_1 ,而仅计及锚杆的竖向拉力 W_1 。受拉力面积 $BCGM = \frac{\alpha_p}{360} \pi (R_p^2 - \gamma_a^2)$, 对于家竹箐隧道而言:

$$BCGM = \frac{53.875}{360} \pi (10.12^2 - 5.12^2) = 35.825 \text{ m}^2.$$

为塑性区受拉。
(2) BC 以下区域,分两种情况计算:①剪力 H_2 ,可忽视锚杆的拉力 P_2 。②因为该部位是洞室的侧面,受库伦侧压理论影响,已为全面侧面挤压所涵盖,故应使竖向力 W_2 乘以侧压系数 K ,对于家竹箐隧道来说应乘以被动侧压系数(塑性系数) K_p ,使之成为水平受拉。竖向力 W_2 来源有二,一为塑性区面积,一为对数螺线区面积两部分组成。其计算方法有两种:见图 5,一为塑性面积 $DCBF$ + 螺线面积 AED ,另一为螺线面积 $AEBF$ + 塑性面积 ECB 。前者较简单,后者较复杂,然皆须通过积分求算其中的螺线部分。今特将螺线部分的积分法陈述如下:

取图 4 中(a)的微三角形 αOB 进行积分:

$$dA = \Delta \alpha OB = \frac{1}{2} \gamma dS, \therefore dS = \gamma d\theta, \text{故 } dA = \frac{1}{2} \gamma^2 d\theta.$$

由式(5) $\gamma = \gamma_a e^{(\theta - \alpha_p) \text{tg} \alpha_p}$, 则:

$$dA = \frac{1}{2} \gamma_a^2 e^{2(\theta - \alpha_p) \text{tg} \alpha_p} d\theta. \text{ 两边积分得:}$$

$$A = \frac{1}{2} \gamma_a^2 \int_{\theta}^{\alpha_p} e^{2(\theta - \alpha_p) \text{tg} \alpha_p} d\theta = \frac{\gamma_a^2}{4 \text{tg} \alpha_p} [e^{2(\theta - \alpha_p) \text{tg} \alpha_p}]_{\theta}^{\alpha_p} \\ = \frac{\gamma_a^2}{4 \text{tg} \alpha_p} [e^{2(\theta - \alpha_p) \text{tg} \alpha_p} - e^0] = \frac{\gamma_a^2}{4 \text{tg} \alpha_p} [e^{2(\theta - \alpha_p) \text{tg} \alpha_p} - 1]$$

(6)

式中只有 θ 是变数,给 θ 以任何由 $\alpha_p \sim \pi/2$ 之值,即可得出任何位置处的对数螺线所包面积。唯作用面积须扣除开挖圆部位的相应面积。现以家竹箐隧道为例,叙述其力作用力面积算法如下:

先用较简方法计算:见图 5:

$$DCD = \frac{90 - 53.875}{360} \pi (10.12^2 - 5.12^2) = 24.022 \text{ m}^2. \text{ 再按式(6)计算螺线面积 } AEO, \text{ 根据例 3, 已算出圆心角 } EOG = 82.4^\circ, \text{ 则}$$

面积 $AED = ABO - EBO - DEO$ 其中:

$$ABO = \frac{5.12^2}{4 \text{tg} 53.875^\circ} [e^{2(90^\circ - 53.875^\circ) \text{tg} 53.875^\circ} - 1] = 22.136 \text{ m}^2$$

$$EBO = \frac{5.12^2}{4 \text{tg} 53.875^\circ} [e^{2(82.4^\circ - 53.875^\circ) \text{tg} 53.875^\circ} - 1] = 13.932 \text{ m}^2$$

$$DEO = \frac{90^\circ - 82.4^\circ}{360^\circ} \pi 10.12^2 = 6.792 \text{ m}^2$$

$$\therefore AED = 22.136 - 13.932 - 6.792 = 1.412 \text{ m}^2, \text{ 则下部总面积 } AECO = DCO + AED = 24.022 + 1.412 = 25.434 \text{ m}^2.$$

如不用积分,则可用 $DCO + \Delta AED$ 算出,图 5 中的虚线 EH 为 ΔAED 之高,按螺线定义, $\angle AED = \alpha_p$, 而底边 $AD = R_{\max} - R_p = 12.15 - 10.12 = 2.03 \text{ m}$, 于是面积:

$$AECO = DCO + \Delta AED = 24.022 + \frac{1}{2} (12.15 - 10.12)^2 \text{ctg } 53.875^\circ = 24.022 + 1.504 = 25.526 \text{ m}^2, \text{ 相差仅在小数点后第二位以后。家竹箐隧道适逢差数之微,而其他状况可能欲遇其大呢!? 还是让我们来相信牛顿和莱布尼兹吧!}$$

当然还可利用较为复杂的方法,如在图 5 中的 BE 以下作用力面积尚可用

$$AECBF = ECB + AEBF, \text{ 而多次使用积分式(6)和加减,亦可算出结果为 } 25.434 \text{ m}^2, \text{ 此处不赘。}$$

例举较多方法主要是为了相互核对。数多则繁,图杂则紊,为了弄清此款,须端详的看图,潜心的计算。

家竹箐隧道经历的是塑性破坏,如果是弹性状态,上述方法仍可应用,只须将 α_p 换成 α_e 即可。

2.3.3 塑性状态下作用力的计算与长锚杆支护的关系

(1)由图5知对数螺线角 α_p 把围岩分成两部分。幅线 OC 的上部,因为塑性圈内围岩松弛而产生竖向向下的松弛压力 W_1 ,使该部位的代表性锚杆 l_1 主要受拉,而可以忽视锚杆的剪力 H_1 而仅考虑其承受拉力 P_1 ,把 W_1 看成是 P_1 ,如是可决定该区域的锚杆数为:

$$N_1 = W_1 / P_s \quad (7)$$

式中 $W_1 = CGMB$ 松弛区内围岩容重, P_s = 每根锚杆的屈服拉力。至于 OC 以下部位,即 $AECBF$ 部位,锚杆受力面积除了塑性面积 $DCBF$ 外,还要考虑螺线面积 AED 。锚杆应按抗剪和受塑性影响产生的水平拉力两种情况考虑,视何种情况控制设计而定。兹将两种情况分述如下:

(2)如图5,如将该区域的重力 W_2 分解为与 l_2 锚杆垂直的切力 H_2 与平行的力 P_2 ,因所在位置的影响,则知该部位锚杆的力主要为切(剪)力 H_2 。则可近似地把 W_2 当成 H_2 。则问题趋于逼真而简化,锚杆为剪力控制,锚杆数为:

$$N_1 = W_2 / T, T \text{ 为每根锚杆的抗剪强度} \quad (8)$$

因为钢材的抗剪强度较抗拉强度低,故不应忽视(8)式的存在。

(3)又因为 OC 以下乃洞室的侧面,在塑性围岩强挤压状况下,更应注意塑性状态的被动挤压作用。这里很自然地要引用到库伦的侧压理论。本来库伦理论从来也没有限制过只适用于地表而不适用于地下洞室,而以往人们却局限地把它仅应用于地表。虽然许多地下工程已经明显地表达出了库伦理论的指导意义的存在(这在以下的实例中还要述及),但却从来没有看到用过这种理论来阐述它。本文却从实践检验真理和真理指导实践入手,首次用它来解决家竹箐隧道的强挤压问题。

以土壤力学而言,它的应用很简单,只须把竖向的岩土重力乘以塑性系数(被动侧压系数)即 $W_2 \times K_p$,在乘以 K_p 之后,其效用是把原来是竖向作用的 W_2 变为水平方向,方向起了变化,这是一;其二因 K_p 是大于1的塑性系数(被动侧压系数),这样使水平力增大了 K_p 倍,力的大小变了,即力的要素起了根本性变化。当然这时的锚杆也成为水平受拉,这样锚杆数为:

$$N_2' = W_2 \cdot K_p / P_s \quad (9)$$

以上两情况如 $N_2' > N_2$,则(9)式控制设计,否则为(8)式控制。

上述(7)、(8)、(9)三式为材料强度控制。但锚杆行进于围岩之中,靠什么来产生反作用力呢?即锚杆要把松弛圈拉住或支撑住,靠什么来握住锚杆呢?靠的是锚杆与围岩之间的粘结力。设弹性区内围岩与锚杆之间

的粘线强度为 T ,锚杆的直径为 d ,则锚入弹性区的长度为:

$$l_x = (P_s, T) / \pi d \tau = W_1 / \tau \pi d N_1 \text{ (竖向受拉)} \quad (10)$$

$$l_x' = W_2 \cdot K_p / \tau \pi d N_2' \text{ (水平受拉)} \quad (11)$$

$$l_x'' = W_2 / \sigma \pi d N_2 \quad (12)$$

式中 σ 为弹性区围岩容许挠拔应力。

再看图5,锚杆的全长为:

$$l_1 = (R_p - \gamma_a) + l_x \quad (13)$$

$$l_2 = (R_{\max} - \gamma_a) + l_x' \cdots \text{水平受拉} \quad (14)$$

$$\text{或 } l_2 = (R_{\max} - \gamma_a) + l_x'' \cdots \text{受剪} \quad (15)$$

这里需说明是抗挠力 σ ,因为松弛区内锚杆受剪力影响产生下压的趋势,而埋入弹性区内的锚杆则往上挠,所以抗挠力就可近似地等于锚杆与围岩间的粘结力 T ,即(11)与(12)式中的分母应相等,也就是说如果设计被(11)式控制,就不要再计算(12)式了,因为(11)式比(12)式大了 K_p 倍。

因为把可以用圆等代的截面贴切的用圆代替,会对计算带来很多方便,所以图5表示的是家竹箐隧道的等代圆。实际上它是马蹄形隧道,其开挖面积为

$$82.46 \text{ m}^2, \text{则可换算成圆半径 } \gamma_a = \sqrt{\frac{82.46}{n}} = 5.12 \text{ m}.$$

例4 家竹箐隧道的许多资料已在图5中列出。按部拉划分的分区作用力面积已在2.3.2中求出为上部 $A = 35.825 \text{ m}^2$,下部为 $A = 25.434 \text{ m}^2$ 。施工使用了 $\phi 32 \text{ mm}$ 的长锚杆,其屈服强度为每根 $P_s = 250 \text{ kN}$;锚杆抗剪强度可取 $T = 0.7 P_s = 0.7 \times 250 = 175 \text{ kN}$;围岩容重 $\gamma = 22 \text{ kN}$;参考有关资料,围岩与锚杆的粘着力经强制注浆后可按 $T = 0.35 \text{ MPa}$ 计算,试设计此长锚杆。

解: (1)先确立上区域的锚杆设计。锚杆数:

$$N_1 = W_1 / P_s = A \gamma / P_s = 35.825 \times 22 / 250 = 788.15 / 250 = 3.15 \text{ 根, 用 4 根, 再按式(13)决定锚杆长度 } l_1 = (R_p - \gamma_a) + l_x = (10.12 - 5.12) + \frac{788.15}{0.35 \times 3.1416 \times 3.2 \times 4 \times 0.1} = 5.00 + 5.60 = 10.60 \text{ m}$$

然后对锚杆进行初步排列,以后还可能稍作调整。该部位弧长 $\widehat{BM} = \frac{\alpha_p}{180} \pi \gamma_a = \frac{53.875}{180} \times 3.1416 \times 5.12 = 4.81 \text{ m}$ 锚杆环向间距为 $\alpha_1 = \frac{4.81}{4-1} = 1.6 \text{ m}$;纵向间距 $b_1 = 1.0 \text{ m}$ 。

(2)下区域:

①先检算抗剪,按(8)式:

$$N_2 = W_2 / T = A_2 \gamma / T = 25.434 \times 22 / 175 = 3.19 \text{ 根, 用 4 根}.$$

②水平受拉检算,按(9)式:

$N_2' = A_2 \gamma K_p / P_s = 25.434 \times 22 \times 1.88 / 250 = 1051.95 / 250 = 4.2$ 根, 实用 5 根。

结果 $N_2' > N_2$, 故下部锚杆为水平受拉控制。再决定锚杆长度: 按(14)式

$l_2 = (R_{\max} - \gamma_a) + l_x' = (12.15 - 5.12 + 1051.95 / 0.35\pi \times 3.2 \times 5 \times 10 = 7.03 + 5.98 = 13.00$ m。该部位弧长为:

$\widehat{FB} = \frac{90^\circ - 53.875^\circ}{180^\circ} \pi \times 5.12 = 3.23$ m。锚杆排列为:

环向 $a_2 = 3.23 / (5 - 1) = 0.81$ m。考虑接近 OC 的上区域仍有影响, 故使此部锚杆稍稍排稀, OC 上部锚杆稍稍加密, 故令:

$a_2 = 0.9$ m, 而 $a_1 = 1.5$ m。核对总弧长:

$\widehat{FM} = 3 \times 1.5 + 4 \times 0.9 = 8.1$ m, 而计算总弧长为:

$\widehat{FM} = \frac{90}{180} \pi \times 5.12 = 8.04$ m。尚差 6 cm, 稍更改, 即可符合要求。而 b_2 仍取 1.0 m。

由上述计算表明, 本来上部锚杆长度应取 $l_1 = 10.6$ m, 而实际上家竹箐隧道都把它做成了 13 m。即顶部过分地用了与下部等长的锚杆, 致使每延米断面的锚杆总长多用了 21.6 m, “寸杆寸金”, 应该说是一项不必要的浪费。

这里在计算下部 l_2 锚杆时, 不考虑 OC 以上部位围岩的应力再分布, 是因塑性围岩中挖洞时往往考虑先护顶, 即顶部的锚杆先施工, 故可不考虑对下部产生的应力重分布作用。

马蹄形隧道边墙较长, 正是侧压水平应力的承受部位, 比照 l_2 布置锚杆。

2.3.4 对上述锚杆设计方法的评论

(1) 尽管对锚杆的作用和设计方法有多种, 然而本文如图 5 所示比较形象地提出了浅显易懂的方法, 纵令以单根去替代某一区内群锚的性质, 然而它却是充分的。尤其当千变万化的岩体很难是均质时, 这种代替给人以“难得糊涂”之感。从乱石堆中抽出一定的代表杂乱粗放的形象而不是一根根地逐一精解, 有时可令人神会而且清醒。

(2) 通过分析和演算, 可见对数螺线角 α_p 之重要。它将洞室受力状况分成两部分: 上部竖向受拉, 下部如非剪力控制则为平受拉。区分的依据是应力圆图 3, 区分的原理是摩尔和库伦理论。特别要提出的塑性状态要用 α_p , 弹性状态时要用 α_e , 切切不可混用。如果用错, 将使结果尾大不掉, 数字效果可相差几倍或十数倍, 地表则可造成墙倒房垮, 地下则可造成洞坍人亡, 影响巨大, 作者已在现场实例中深受体会与教训。要始终记起被动和主动两侧压系数的区别。如家竹箐隧道, 如按塑性状态, 则 $K_p = \tan^2(45^\circ + 17.75^\circ/2) = 1.88$; 如按弹性状态, 则 $K_e = \tan^2(45^\circ - 17.75^\circ/2) = 0.53$ 。如误用为 K_e , 则将使水平侧压力少算 $1.88/0.53 = 3.55$ 倍, 岂不险哉?! 因为它们的不同, 使弹性围岩有时只需采取护顶支护, 而塑性围岩除了护顶之外还要特别加强侧面支护。虽然从来没见到过库伦侧压理论运用于地下洞室, 但经过家竹箐隧道的实践, 确实体会到运用的伟大意义。再用它来解释世界地下工程史已发生的一些问题, 都能用库伦侧压理论作出完满的解答。如图 6 几座世界上知名强挤压型隧道, 就能充分地说明这一点。

其中阿尔贝格隧道稍晚于陶恩隧道施工, 然而很

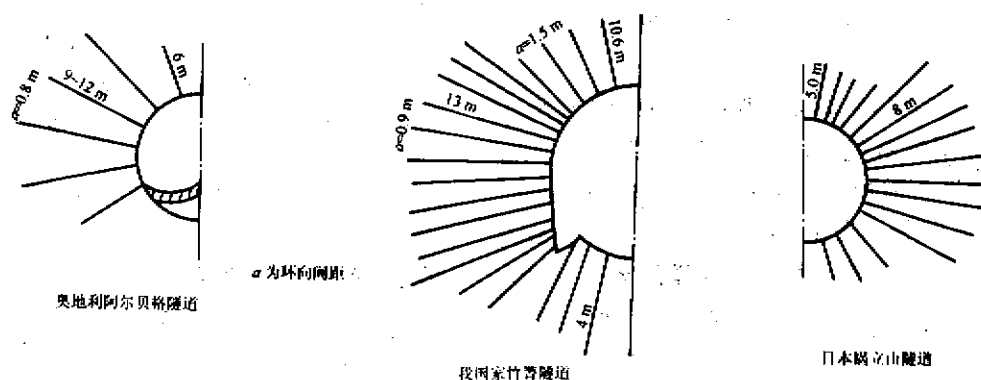


图 6 三座典型侧面强挤压型隧道而加长了锚杆支护的半立面图(示意)

快接收了陶恩侧面强挤压的教训, 在侧面采用了此顶部长 1.5~2.0 倍的长锚杆; 而家竹箐和日本的锅立山两隧道却为典型地体现了库伦侧压理论与实践结构的完整性。其中家竹箐隧道除了顶部锚杆保守地采用了与边侧等长之外, 其侧面使用的 13 m 长的锚杆完全

符合库伦的被动侧压理论。这也是先有工程实践再升华为理论原则的实例。物体落地本来是常事, 万有引力一直存在于自然之中, 只是因偶尔一次的苹果落地引发了人的思维才发现了它; 塑性侧面强挤压的机理也已经是存在库伦侧压理论之中, 如今被本文初次引用

只是说明实践中存在着事物机理,而且提议在今后的工程实际中要应用它,推广它,不让工程走弯路走错路,这是本文的初衷。“学而不思则罔,思而不学则殆”。对已有的工程实践加深学习,对已有的基础理论结合工程实践加深学习;对其中发生问题加强思考,比如说强挤压型洞室为什么往往侧面的支护需要更强一些,这样才会产生新思路,发现新问题。所举三例,铁证如山,说明这种做法的正确性。

(3)在以往的施工实践中,当遇到塑性围岩使拱脚部位特别感到不稳定时,往往会使用锁口长锚杆或“大脚板”拱脚去实现平衡。这也可从已述的图 5 中对剪切破坏的描述得到解释:对数螺线在拱脚部位伸出一腿,与松弛区一道在拱脚处形成特别应力集中区,因而形成特别的形变压力而使支护需要特别加强。本文仅考虑了其面积力而把它加算在塑性面积中,而其实际作用力远非如此,有待今后进一步开发。

本文以应力圆作指导,提出来对弹、塑性两种状态应有“泾渭分明”的选择和对待,最重要的是沟通了理论与实践的鸿沟,使库伦理论在地下工程中得到应用,这是本文的一大收获。原理通了,道理明白了,就能一通百通,使好多做过的工程得到理论上的解释,使正要做的工程得到理论上的指导,理论与实践结合,做到豁然开朗。

2.4 不忽视粘结力 C 的应力圆

如图 7,应力圆 O_1 和摩尔—库伦包络线表达的是最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 及其与粘结力 C 之间的关系。这样同样可获得内摩擦角 ϕ 与诸力素之间的关系式为:

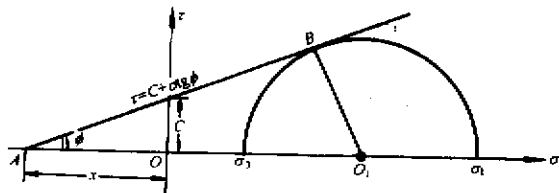


图 7 不忽视粘结力 C 的 ϕ 值计算简图

$\sin\phi = BO_1/AO_1$, 而 $BO_1 = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, $AO_1 = x + (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 即 $\sin\phi = (\sigma_1 - \sigma_3)/2/[x + (\sigma_1 + \sigma_3)/2]$ 。

$\because x = C \cdot \operatorname{ctg}\phi$, $\therefore \sin\phi = (\sigma_1 - \sigma_3)/(2C \cdot \operatorname{ctg}\phi + \sigma_1 + \sigma_3)$ (16)

式中的 σ_1 和 σ_3 坐标均自 O 点算起。

例 5 由试验资料知家竹箐隧道的 $\sigma_1 = \sigma_x = 16.09$ MPa, 和 $\sigma_3 = \sigma_y = 8.58$ MPa, $C = 0.5$ MPa, 试比较计入 C 与不计入 C 对 ϕ 角的影响。

解: 计入 C 时按(16)式知:

$\sin\phi = (16.09 - 8.58)/(16.09 + 8.58 + 2 \times 0.5 \operatorname{ctg}\phi)$, 解之得 $\phi = 15.4^\circ$ 。结果与不计入 ϕ 的例 1 比较减少 2.35° , 用于计算塑性系数 $K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + 15.4^\circ/2) = 1.72$, 较不计入 C 时减少 $1.88 - 1.72 = 0.16$, 故不计入 C 时偏于安全一面。

2.5 应力圆用于塑性状态条件下, 表示切向应力 $\sigma_{\theta p}$ 、径向应力 $\sigma_{r p}$ 和围岩单轴极限压强 R_c 之间的关系

设由这些关系作出的应力圆如图 8 则由此得出的塑性条件为:

$$\sin\phi = EC_2/AC_2 = (\sigma_{\theta p} - \sigma_{r p})/(\sigma_{\theta p} + \sigma_{r p} + 2x) \quad (17)$$

但 $\sin\phi = DC_1/AC_1 = R_c/2/(x + R_c/2) = R_c/(2x + R_c)$ 。则有

$(2x + R_c/2)\sin\phi = R_c$ 。于是可得:

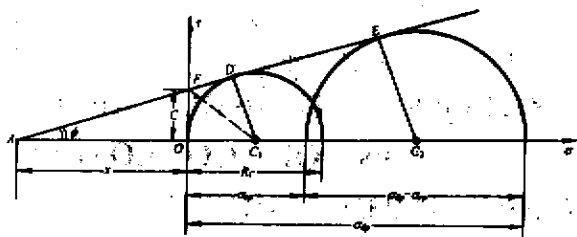


图 8 塑性状态下用应力圆表达的切向应力、径向应力和围岩极限压强之间的关系

$$x\sin\phi = R_c(1 - \sin\phi)/2, \text{ 即 } x = \frac{1}{2}R_c(1 - \sin\phi)/\sin\phi \quad (18)$$

式(18)显示了围岩单轴压强与内摩擦角 ϕ 之间的关系。因 x 与粘结力 C 有关, 故可获解其间的连锁关系, 将(18)式代入(17)式后得:

$\sin\phi = (\sigma_{\theta p} - \sigma_{r p})/[\sigma_{\theta p} + \sigma_{r p} + R_c(1 - \sin\phi)/\sin\phi]$, 即:

$\sigma_{\theta p} - \sigma_{r p} = (\sigma_{\theta p} + \sigma_{r p})\sin\phi + R_c(1 - \sin\phi)$, 移项得:

$\sigma_{\theta p}(1 - \sin\phi) - \sigma_{r p}(1 + \sin\phi) - R_c(1 - \sin\phi) = 0$ 。进行变量分离可得:

$$\frac{\sigma_{\theta p} - R_c}{\sigma_{r p}} = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \phi/2), \text{ 故得:}$$

$$\sigma_{\theta p} = K_p \sigma_{r p} + R_c \quad (19)$$

(19)式的意义是塑性状态条件下, 切向应力等于塑性系数与径向应力之乘积再加上围岩极限压强。

由图 8 尚得出粘结力 C 、围岩单轴极限压强 R_c 和内摩擦角 ϕ 三者之间的关系, 即:

$\angle OFC_1 = \angle DFC_1 = \frac{1}{2}(180^\circ - \angle AFO) = \frac{1}{2}[180^\circ - (90^\circ - \phi)] = 45^\circ + \phi/2$, 而 $\angle OC_1F = 90^\circ - \angle OFC_1 = 45^\circ - \phi/2$ 。在 $\angle OFC_1$ 中, 有: $\operatorname{tg}\angle OC_1F = OF/OC_1$, 因 $FO = C$ 及 $OC_1 = R_c/2$, 故:

$$\operatorname{tg}(45^{\circ}-\phi/2)=\frac{C}{\frac{1}{2}R_c}, \text{ 即 } 2C=R_c/2\operatorname{tg}(45^{\circ}-\phi/2) \quad (20)$$

式(20)已将三者之间的关系表达无遗。

例 6 家竹箐隧围岩极限压强 $R_c=1.7 \text{ MPa}$ 计及 C 时内摩擦角 $\phi=15.4^{\circ}$, 试决定 C 值; 又如不计及 C 之 $K_p=1.88$, 径向应力 $\sigma_{\gamma p}=1.5 \text{ MPa}$, 求切向应力 $\sigma_{\theta p}$ 。

解: 按式(20), $C=R_c\operatorname{tg}(45^{\circ}-\phi/2)/2=1.7[\operatorname{tg}(45^{\circ}-15.4^{\circ}/2)]/2=0.65 \text{ MPa}$ 。按(19)式 $\sigma_{\theta p}=K_p\sigma_{\gamma p}+R_c=1.88\times 1.5+1.7=4.52 \text{ MPa}$ 。

2.6 应力圆小结

摩尔应力圆和库伦理论是如此的重要。当应用到塑性系数如何在地下洞室中发挥作用时, 就好像摩尔和库伦两位大师在神圣地作具体指导——要用应力圆

JIAZHUQING TUNNEL AND THE ROCK MECHANICS, PART I: APPLICATION OF COULOMB'S LATERAL PRESSURE THEORY AND MOHR'S STRESS CIRCLE

FU Hua-xing

China Railway Fifth Engineering Bureau (Group) Co.

Abstract: The Jiazhuqing Tunnel in Nanning-Kunming Railway is a kind of strong pressured tunnel which was the first tunnel designed and constructed by our country. During its design and construction, the principles of rock mechanics were reflected fully for guiding the design and construction, so as to obtain successful effect. The whole process for applying several important formulas of rock mechanics are descibed in this paper, and are expounded through the practical construction works of the Jiazhuqing Tunnel. Some traditional theories are described and evaluated also, and there are new ideas on application of the rock mechanics. It provides reference for the popularization of rock mechanics on the engineering applications.

Key words: Jiazhuqing Tunnel; rock mechanics; Coulomb's lateral pressure theory; Mohr's stress circle

(上接第 46 页)

DENG Yi-ming

The Fourth Survey & Design Institute of China Railway

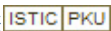
Abstract: The Yuanliangshan Tunnel is the key wroks for the whole Yu-Huai Railway. The complex karst hydrogeology of the Maoba Syclic Structure controls the degree of difficulty for the tunnel design and construction. Through analysing the key to the difficult problems about the Tunnel's data, the author put forward some humble opinions for reference.

Key words: features of Maoba Synclinc Structure; difficult problems of karst hydrogeology; humble opinions

和侧压理论才能获取完美的解答。我国的地质学家李四光也已经应用它解答了不少地质力学难题。只要精心运用, 他总会那样言简意赅和图文并茂地给出明确解答, 而其内涵却又那样明白和宽广, 无论地表或地下工程均能适用; 其光照又是那样永恒, 自从发明到现在都在闪烁着光辉。时至今日, 土木工程界仍觉他星光灿烂而无“明日黄花”之感; 它不像某些学说或假定只能红及一时, 过时即感不适。比如说海姆假定, 18 世纪末曾红及一时, 然而到了现代, 因为当时立说面太窄狭而与它背逆的工程现象增多了, 就显现出偏颇而别扭, 甚至引用过他假设而派生的一些公式都使人感到生硬而不自由。

这里要再一次说明的是本文引用了库伦的侧压理论于塑性围岩之中, 并以实例作为铁证来印证其正确性, 并希望在今后类似工程中得到推广应用。(待续)

应用

作者: [符华兴](#)
作者单位: [中铁工程五局集团公司, 贵阳, 550003](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF THE RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2002(1)
被引用次数: 3次

本文读者也读过(10条)

1. [刘东升](#), [张浪](#), [刘山文](#), [杨凯](#), [LIU Dong-sheng](#), [ZHANG Lang](#), [LIU Shan-wen](#), [YANG Kai](#) Mohr-Coulomb准则屈服概率解析[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#)2008, 4(2)
2. [张浪](#), [刘东升](#), [刘山文](#), [杨凯](#), [ZHANG Lang](#), [LIU Dongsheng](#), [LIU Shanwen](#), [YANG Kai](#) 基于Mohr-Coulomb准则深埋球形洞室的弹塑性分析[期刊论文]-[后勤工程学院学报](#)2007, 23(4)
3. [黄锋](#), [付挺](#), [Huang Feng](#), [Fu Ting](#) 经验强度准则在岩体破坏中的应用[期刊论文]-[石材](#)2006(8)
4. [薛志成](#), [马强](#), [李石磊](#), [XUE Zhi-cheng](#), [MA Qiang](#), [LI Shi-lei](#) 摩尔-库仑等面积圆屈服准则及工程应用[期刊论文]-[低温建筑技术](#)2006(2)
5. [赵福君](#), [杜蓬娟](#), [ZHAO FU-jun](#), [DU PENG-juan](#) 考虑地基固结效应的储罐力学性能分析[期刊论文]-[大连民族学院学报](#)2008, 10(5)
6. [朱泽奇](#), [曾亚武](#) 层状岩体单轴压缩强度及剪切破坏面研究[期刊论文]-[岩土工程界](#)2005(4)
7. [邹金锋](#), [李亮](#), [杨小礼](#), [邓宗伟](#), [ZOU Jin-feng](#), [LI Liang](#), [YANG Xiao-li](#), [DENG Zong-wei](#) 基于非线性Mohr-Coulomb强度准则下锚索极限抗拔力研究[期刊论文]-[岩土工程学报](#)2007, 29(1)
8. [段斌](#), [何江达](#), [李莉](#), [DUAN Bin](#), [HE Jiang-da](#), [LI Li](#) 关于岩土材料塑性屈服准则中材料参数取值条件的研究[期刊论文]-[红水河](#)2005, 24(3)
9. [鲁祖统](#), [龚晓南](#) Mohr-Coulomb准则在岩土工程应用中的若干问题[期刊论文]-[浙江大学学报\(工学版\)](#)2000, 34(5)
10. [冯文娟](#), [据晓科](#), [邹正盛](#), [Feng Wenjuan](#), [Ju Xiaodong](#), [Zou Zhengsheng](#) 地下洞室开挖卸荷围岩稳定性研究[期刊论文]-[路基工程](#)2009(4)

引证文献(3条)

1. [朱聪玲](#), [丁海娟](#), [陈振](#) 工字型横梁的莫尔应力圆组合图形与应力分析[期刊论文]-[农机化研究](#) 2004(4)
2. [肖万明](#), [周亦涛](#), [路维](#) 木寨岭铁路隧道斜井大变形的控制技术探讨[期刊论文]-[国防交通工程与技术](#) 2011(5)
3. [张文强](#), [王庆林](#), [李建伟](#), [高攀](#) 木寨岭隧道大变形控制技术[期刊论文]-[隧道建设](#) 2010(2)

引用本文格式: [符华兴](#) 家竹箐隧道与岩体力学(上)——库伦侧压理论与摩尔应力圆的应用[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2002(1)