

[文章编号] 1004-0609(2002)05-1021-06

统一强度理论及其在巷道围岩弹塑性分析中的应用^①

胡小荣, 俞茂宏

(1. 西安交通大学 土木系, 西安 710049)

[摘 要] 应用统一强度理论对岩石在三轴压缩载荷下的强度特性进行了理论分析, 并将分析结果与已有实验结果作了对比。研究表明, 统一强度理论能较全面地反映岩石的各种强度特征。另外, 还应用统一强度理论对静水压力条件下的圆形巷道围岩进行了弹塑性分析, 分析表明, 与 Mohr-Coulomb 强度理论结果相比, 巷道轴向应力和强度理论中的参数 b 对巷道围岩塑性区半径、应力分布及径向位移等均有影响。

[关键词] 统一强度理论; 岩石强度; 巷道围岩; 弹塑性分析

[中图分类号] TU 4

[文献标识码] A

目前, 井巷工程中巷道围岩的弹塑性分析通常都采用单剪强度准则如 Mohr-Coulomb 强度准则、Hoek-Brown 强度准则等^[1~4]。虽然巷道围岩的弹塑性分析可以视为平面应变问题, 但实际上围岩是处于三轴应力状态。由于单剪强度准则只能考虑到最大主应力和最小主应力的作用而完全忽略中间主应力的影响, 故在力学分析时就只考虑了巷道断面上的应力, 而没有考虑到轴向应力的作用。然而, 大量的岩石三轴实验已经证明, 岩石的强度和破坏不仅与最大和最小主应力有关, 还与中间主应力密切相关, 即存在所谓的中间主应力效应^[5~10]。于是, 人们又提出了一些含有中间主应力的岩石强度准则, 文献[11~13]对此作了较全面介绍。我国俞茂宏自 1985 年起基于双剪的概念相继提出了材料的双剪强度理论和统一强度理论, 并在一些领域得到了应用^[14~16]。本文作者应用该强度理论对岩石在三轴压缩载荷下的强度特性以及静水压力条件下圆形巷道围岩的弹塑性分析作了探讨。

1 统一强度理论简介

在主应力空间内, 3 个主剪应力及其作用面上的法向正应力分别为

$$\begin{aligned}\tau_{13} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \sigma_{13} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \\ \tau_{12} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad \sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \\ \tau_{23} &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \quad \sigma_{23} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2},\end{aligned}\quad (1)$$

由式(1)可知 $\tau_{13} = \tau_{12} + \tau_{23}$, 其中, τ_{13} 为最大主剪应力, τ_{12} 和 τ_{23} 之间有一个为中间主剪应力, 另一个为最小主剪应力。考虑了最大和中间主剪应力的统一强度理论表达式为

$$\text{当 } \tau_{12} - \beta\sigma_{12} \geq \tau_{23} - \beta\sigma_{23},$$

$$F = \tau_{13} - \beta\sigma_{13} + b(\tau_{12} - \beta\sigma_{12}) = K \quad (2-1)$$

$$\text{当 } \tau_{12} - \beta\sigma_{12} \leq \tau_{23} - \beta\sigma_{23},$$

$$F' = \tau_{13} - \beta\sigma_{13} + b(\tau_{23} - \beta\sigma_{23}) = K \quad (2-2)$$

式中 b 为中间主剪应力及其作用面上的法向正应力对材料破坏的影响程度; β, K 为材料参数, 可通过拉压试验得出。若规定压应力为正, 拉应力为负, 则上式的主应力表达式为

$$\text{当 } \sigma_2 \leq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1 + \alpha},$$

$$F = \alpha\sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b} = \sigma_t \quad (3-1)$$

$$\text{当 } \sigma_2 \geq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1 + \alpha},$$

$$F' = \frac{\alpha}{1 + b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_t \quad (3-2)$$

式中 α 为材料单轴强度拉压比; σ_t 为材料的单轴抗拉强度。

对于外凸型强度理论而言, b 的取值范围为 $[0, 1]$, 当 $b = 0$ 时, 统一强度准则退化成 Mohr-Coulomb 强度准则, 它界定了统一强度准则的下限; 当 $b = 1$ 时, 统一强度准则退化成双剪强度准则, 它界定了统一强度准则的上限。当 $0 < b < 1$ 时, 统一强度准则可分别与现有的其它强度准则作直线近似^[16]。

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59779028)

[收稿日期] 2001-11-26; [修订日期] 2002-02-05

[作者简介] 胡小荣(1964-), 男, 副教授, 博士。

2 岩石强度特性的统一强度理论分析

对于岩石类材料而言,若式(3-1), (3-2)用主应力、岩石内聚力 C_0 、岩石内摩擦角 φ 表示则为

$$\begin{aligned} \text{当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi, \\ F = \sigma_1(1 - \sin \varphi) - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b}(1 + \sin \varphi) = \\ 2C_0 \cos \varphi \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi, \\ F' = \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1 + b}(1 - \sin \varphi) - \sigma_3(1 + \sin \varphi) = \\ 2C_0 \cos \varphi \end{aligned} \quad (4-2)$$

令 $\sigma'_1 = \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1 + b}$, $\sigma'_3 = \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b}$, 则上式可写成

$$\begin{aligned} \text{当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi, \\ F = \sigma_1(1 - \sin \varphi) - \sigma'_3(1 + \sin \varphi) = 2C_0 \cos \varphi \end{aligned} \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi, \\ F' = \sigma'_1(1 - \sin \varphi) - \sigma_3(1 + \sin \varphi) = 2C_0 \cos \varphi \end{aligned} \quad (5-2)$$

由于式(5-1), (5-2) 都有类似于以下 Mohr-Coulomb 强度理论的表达式:

$$\sigma_1(1 - \sin \varphi) - \sigma_3(1 + \sin \varphi) = 2C_0 \cos \varphi \quad (6)$$

因此,可以依据式(4-1), (4-2) 在 $\sigma\tau$ 平面上作出判断岩石是否发生破坏的应力莫尔圆(如图1所示)。

由统一强度理论所作出的岩石破坏应力莫尔圆

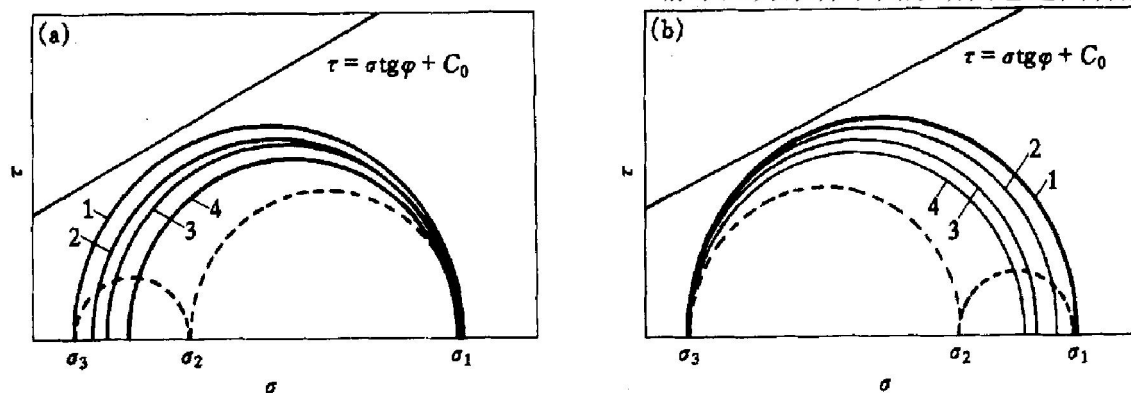


图1 统一强度准则在 $\sigma\tau$ 平面上的岩石破坏条件

Fig. 1 Failure conditions of unified strength theory in $\sigma\tau$ plane

(a) $-\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$; (b) $-\sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$

Circle 1— $b=0$; Circle 2— $b=2$; Circle 3— $b=1/3$; Circle 4— $b=1$;

可知,岩石的强度具有如下特征:

1) 中间主应力在一定程度上可使岩石强度得以提高,其效果表现为判断岩石破坏的应力莫尔圆缩小了;

2) 中间主应力效应具有区间性, σ_3 固定不变时,若 σ_2 在 $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$ 区间变化,抗压强度 σ_1 随 σ_2 的增加而增加,若 σ_2 在区间 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$ 变化,抗压强度 σ_1 随 σ_2 的增加而又从最高值逐步减小;

3) σ_3 增加,岩石强度也会增加;

4) 岩石强度和中间主应力效应与统一强度理论中的参数 b 有关, b 值越大,中间主应力效应就越显著, $b=0$ 时,中间主应力对岩石强度无影响。

图2所示是根据式(4-1), (4-2) 并假定岩石内聚力 $C_0=20$ MPa、内摩擦角 $\varphi=30^\circ$, σ_3 分别等于 30, 60, 90, 120 MPa 的计算结果所作出的岩石抗压强度在不同 σ_3 时 σ_2 效应曲线。该曲线所反映的岩石强度变化规律与文献[8~10]中的实验结果比较一致。由此可知,统一强度理论能较好地反映岩石在三轴压缩状态下的强度特性,这是单剪强度理论无法做到的。

3 统一强度理论在巷道围岩弹塑性力学分析中的应用

3.1 应力状态分析

静水压力条件下圆形断面巷道围岩的弹塑性力

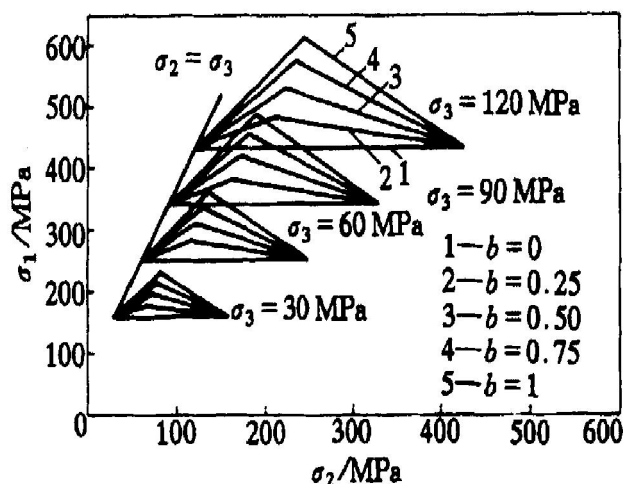


图2 根据统一强度理论所作的岩石抗压强度在不同 σ_3 时 σ_2 效应曲线

Fig. 2 Effective curves of σ_2 to compressive strength σ_1 under different σ_3

学分析可以看成是平面应变问题, 若采用 Mohr-Coulomb 强度理论, 就只能考虑到巷道断面上径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 的作用。而采用统一强度理论, 则不仅可以考虑到上述两个应力, 还可考虑到巷道轴向应力 σ_z 的作用。由于 σ_r , σ_θ , σ_z 三者相互正交, 可以认为是 3 个主应力。假定塑性区围岩体应变 $\varepsilon_v = 0$, 则塑性区内的径向应力 $\sigma_r^{(p)}$ 、切向应力 $\sigma_\theta^{(p)}$ 和轴向应力 $\sigma_z^{(p)}$ 存在以下关系

$$\sigma_z^{(p)} = \frac{1}{2}(\sigma_r^{(p)} + \sigma_\theta^{(p)}) \quad (7)$$

由于在巷道周边围岩中, 切向应力 $\sigma_\theta^{(p)}$ 最大, 径向应力 $\sigma_r^{(p)}$ 最小, 由上式可知, 在塑性区内 3 个主应力的大小为 $\sigma_1 = \sigma_\theta^{(p)}$, $\sigma_2 = \sigma_z^{(p)}$, $\sigma_3 = \sigma_r^{(p)}$, 且满足 $\sigma_2 > \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin\varphi$ 的条件。故在进行塑性区应力计算时, 采用统一强度准则的式 (4-2), 得

$$\frac{\sigma_\theta^{(p)} + b\sigma_z^{(p)}}{1+b}(1-\sin\varphi) - \sigma_r^{(p)}(1+\sin\varphi) = 2C_0\cos\varphi \quad (8)$$

3.2 塑性区应力

将式 (7) 代入式 (8) 有

$$\sigma_r^{(p)} - \sigma_\theta^{(p)} = -(K_1\sigma_r^{(p)} + K_2) \quad (9)$$

式中

$$K_1 = \frac{4(1+b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}, \quad K_2 = \frac{4C_0(1+b)\cos\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)} \quad (10)$$

不考虑体积力时, 平面应变问题的平衡方程为

$$\frac{\partial\sigma_r^{(p)}}{\partial r} + \frac{\sigma_r^{(p)} - \sigma_\theta^{(p)}}{r} = 0 \quad (11)$$

将式 (9) 代入式 (11) 得

$$\frac{1}{K_1}\ln(\sigma_r^{(p)}K_1 + K_2) = \ln r + C \quad (12)$$

由边界条件 $r = r_0$, $\sigma_r^{(p)} = p_i$ (p_i 为支护力) 可得

$$C = \frac{1}{K_1}\ln(p_iK_1 + K_2) - \ln r_0 \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 并由式 (9), (7) 得

$$\sigma_r^{(p)} = (p_i + \frac{K_2}{K_1})(\frac{r}{r_0})^{K_1} - \frac{K_2}{K_1} \quad (14)$$

$$\sigma_\theta^{(p)} = (p_i + \frac{K_2}{K_1})(1 + K_1)(\frac{r}{r_0})^{K_1} - \frac{K_2}{K_1} \quad (15)$$

$$\sigma_z^{(p)} = (p_i + \frac{K_2}{K_1})(1 + \frac{K_1}{2})(\frac{r}{r_0})^{K_1} - \frac{K_2}{K_1} \quad (16)$$

将式 (10) 代入式 (14), (15), (16) 有

$$\sigma_r^{(p)} = (p_i + C_0\text{ctg}\varphi)(\frac{r}{r_0})^{\frac{4(1+b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}} - C_0\text{ctg}\varphi \quad (17)$$

$$\sigma_\theta^{(p)} = (p_i + C_0\text{ctg}\varphi)\left[\frac{2+b+2\sin\varphi+3b\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}\right] \cdot (\frac{r}{r_0})^{\frac{4(1+b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}} - C_0\text{ctg}\varphi \quad (18)$$

$$\sigma_z^{(p)} = (p_i + C_0\text{ctg}\varphi)\left[\frac{2+b+b\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}\right] \cdot (\frac{r}{r_0})^{\frac{4(1+b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}} - C_0\text{ctg}\varphi \quad (19)$$

3.3 塑性区半径及巷道径向位移

静水压力条件下, 塑性区边界 $r = R_0$ 处的应力与原岩应力 p 存在以下关系^[1]:

$$\sigma_r^{(p)}|_{r=R_0} = \sigma_\theta^{(p)}|_{r=R_0} = 2p \quad (20)$$

上式结合式 (9) 知, 在 $r = R_0$ 处

$$\sigma_r^{(p)}|_{r=R_0} = \sigma_{R_0}^{(p)} = \frac{2p - K_2}{2 + K_1}, \quad \sigma_\theta^{(p)}|_{r=R_0} = \frac{2(1 + K_1)p + K_2}{2 + K_1} \quad (21)$$

由式 (14), (21) 得塑性区半径 R_0 为

$$R_0 = r_0 \left[\frac{2(p + K_2/K_1)}{(2 + K_1)(p_i + K_2/K_1)} \right]^{1/K_1} \quad (22)$$

$$R_0 = r_0 \left[\frac{2+b}{2+b+b\sin\varphi} \cdot \frac{p + C_0\text{ctg}\varphi(1-\sin\varphi)}{p_i + C_0\text{ctg}\varphi} \right]^{\frac{(2+b)(1-\sin\varphi)}{4(1+b)\sin\varphi}} \quad (23)$$

及支护力 p_i 为

$$p_i = \left(\frac{2+b}{2+b+\sin\varphi} \right) (p + C_0 \operatorname{ctg}\varphi) \cdot$$

$$(1 - \sin\varphi) \left[\frac{r_0}{R_0} \right]^{\frac{4(1-b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}} - C_0 \operatorname{ctg}\varphi \quad (24)$$

又塑性区边界 $r = R_0$ 处围岩的径向位移为^[1]

$$u_{R_0} = \frac{(p - \sigma_{R_0}^{(p)}) R_0}{2G} \quad (25)$$

式中 G 为剪切模量。根据体应变 $\varepsilon_v = 0$ 得塑性区围岩径向位移为

$$u_r = \frac{p - \sigma_{R_0}^{(p)}) R_0^2}{2Gr} \quad (r \leq R_0) \quad (26)$$

将式(21), (22) 代入得

$$u_r = \frac{K_1 p + K_2}{2(2 + K_1)G} \left[\frac{2(p + K_2/K_1)}{(2 + K_1)(p_i + K_2/K_1)} \right]^{\frac{2}{K_1}} \cdot$$

$$\frac{r_0^2}{r} \quad (27)$$

若用单轴抗压强度 $R_c = \frac{2C_0 \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$ 及压拉比 $\xi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ 表示, 则式(17), (18), (19), (23), (24) 可写成

$$\sigma_r^{(p)} = \left(p_i + \frac{R_c}{\xi - 1} \right) \left[\frac{r}{r_0} \right]^{\frac{2(1+b)(\xi-1)}{2+b}} - \frac{R_c}{\xi - 1}$$

$$\sigma_\theta^{(p)} = \left(p_i + \frac{R_c}{\xi - 1} \right) \left[\frac{2\xi + 2b\xi - b}{2+b} \right] \cdot$$

$$\left[\frac{r}{r_0} \right]^{\frac{2(1+b)(\xi-1)}{2+b}} - \frac{R_c}{\xi - 1}$$

$$\sigma_z^{(p)} = \left(p_i + \frac{R_c}{\xi - 1} \right) \left[\frac{\xi + 1 + b\xi}{2+b} \right] \left[\frac{r}{r_0} \right]^{\frac{2(1+b)(\xi-1)}{2+b}} - \frac{R_c}{\xi - 1}$$

$$R_0 = r_0 \left[\frac{2b}{\xi + 1 + b\xi} \cdot \frac{R_c + p(\xi - 1)}{R_c + p_i(\xi - 1)} \right]^{\frac{2+b}{2(1+b)(\xi-1)}}$$

$$p_i = \left[\frac{2b}{\xi + 1 + b\xi} [R_c + p(\xi - 1)] \cdot \right.$$

$$\left. \left[\frac{r_0}{R_0} \right]^{\frac{2(1+b)(\xi-1)}{2+b}} - \frac{R_c}{\xi - 1} \right] \quad (r_0 \leq r \leq R_0)$$

3.4 弹性区围岩应力及径向位移

对于 $r \geq R_0$ 处的弹性区围岩, 其应力及径向位移为^[1]

$$\sigma_r^{(e)} = p \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \sigma_{R_0}^{(p)} \frac{R_0^2}{r^2} \quad (28)$$

$$\sigma_r^{(e)} = p \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) - \sigma_{R_0}^{(p)} \frac{R_0^2}{r^2} \quad (29)$$

$$u_r^{(e)} = \frac{(p - \sigma_{R_0}^{(p)}) R_0^2}{2Gr} \quad (30)$$

3.5 结果分析

图3所示是根据如下参数: $C_0 = 30$ MPa, $\varphi = 30^\circ$, $p = 300$ MPa, $p_i = 10$ MPa, $r_0 = 2$ m 所得的计算结果。

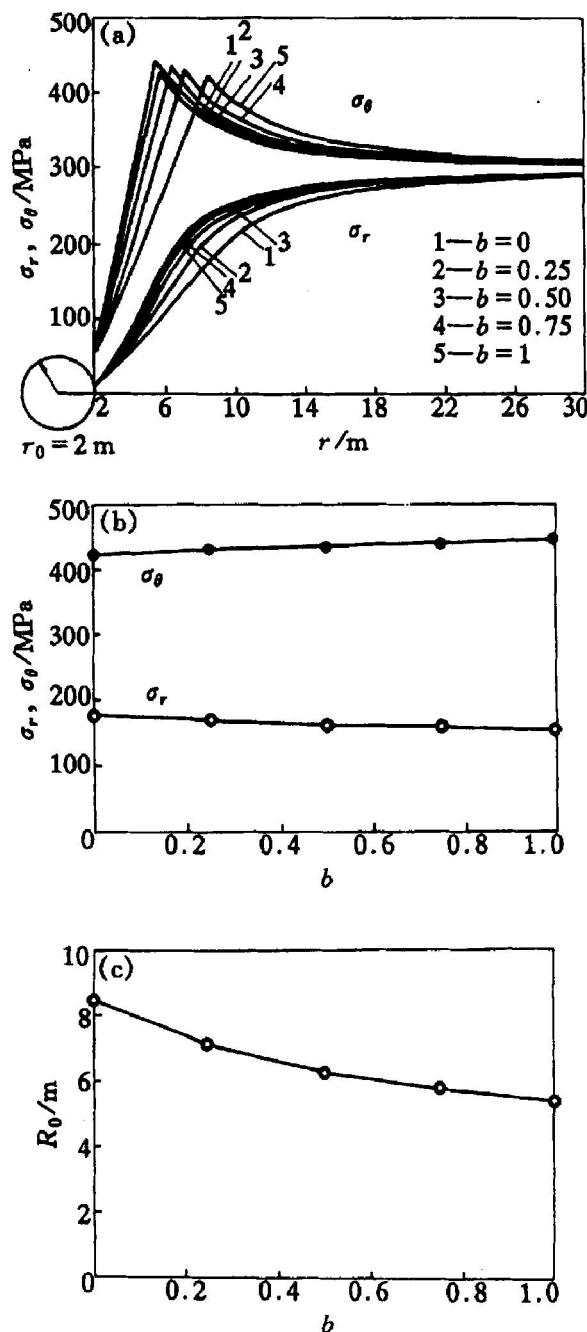


图3 统一强度理论中 b 取不同值时的巷道围岩弹塑性分析结果

Fig 3 Elastoplastic results for wall rock analyzed by unified strength when b is changed

- (a) —Influences of b on stress distributions in wall rock and radius of plastic zone;
 (b) —Influences of b on stresses of interface between elastic and plastic zone;
 (c) —Influences of b on radius of plastic zone

从中可以看出: 围岩径向应力随 b 增大而增大; 切向应力在塑性区随 b 增大而增大, 在弹性区随 b 增大而减小; 塑性区半径随 b 增大而减小; 在弹塑性交界处, 径向应力随 b 增大而减小, 切向应力随 b 增大而增大。由此可知, 统一强度理论中的参数 b 对围岩的弹塑性力学行为有一定影响, 它是反映巷道轴向应力对巷道围岩强度和破坏影响的一个综合指标。

4 结论

1) 通过采用统一强度理论对岩石在三轴压缩载荷下的强度特性分析与实验结果作比较, 可以看出, 统一强度理论能较全面地反映岩石的各种强度特征, 特别是中间主应力效应的影响。

2) 通过对静水压力条件下圆形巷道围岩进行弹塑性分析可知, 统一强度理论与 Mohr-Coulomb 强度理论结果相比, 巷道轴向应力和强度理论中的参数 b 对巷道围岩塑性区半径、应力分布及径向位移均有一定影响。

3) 岩石强度准则的选取对岩石力学和工程的计算有较大影响, 选用符合岩石自身实际的强度准则则是正确进行岩石工程力学分析的基础。

[REFERENCES]

[1] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983. 12.
YU Xue-fu, ZHENG Ying-ren, LIU Hua-heng, et al. Stability Analysis to the Rock-Wall in Underground Engineering [M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1983. 12.

[2] Carranza-Torres C, Fairhurst. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 15 (2): 187- 123.

[3] Martin C D, McCreath D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels [J]. Can Geotech J, 1999, 36: 136- 151.

[4] Martin C D, Read R S, Martin J B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1997, 34(7): 1065- 1073.

[5] Mogi K. Effect of intermediate principal stress on rock failure [J]. J Geophys Res, 1967, 72: 5117- 5131.

[6] Mogi K. Failure and flow of rocks under high triaxial compression [J]. J Geophys Res, 1971, 76: 1255- 1269.

[7] Michelis P. Polyaxial yielding of granular rock [J]. J Eng Mech ASCE, 1985, 111(18): 1 049- 1 066.

[8] 张金涛, 林天健. 三轴实验中岩石的应力状态和破坏性质 [J]. 力学学报, 1979, 2: 99- 105.
ZHANG Jin-tao, LIN Tian-jian. Stress conditions and variations of rupture characteristics of a rock as shown by triaxial tests [J]. Acta Mechanica Sinica, 1979, 2: 99- 105.

[9] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力的变化规律 [J]. 固体力学学报, 1985, 6(1): 72- 80.
XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1985, 6(1): 72- 80.

[10] 李小春, 许东俊. 双剪应力强度理论的试验验证/拉西瓦花岗岩强度特性的真三轴实验研究 [R]. 中科院武汉岩土所, 岩土报告 (90) 52 号.
LI Xiao-chun, XU Dong-jun. Experimental Verification of the Twin Shear Strength Theory - True Triaxial Test Research of Strength of Lawaxi Granite [R]. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Research report (Rock and Soil) (90) 52.

[11] Sheorey P R. Empirical Rock Failure Criterion [M]. Rotterdam: AA Balkema, 1997. 153- 162

[12] Andreev G. Brittle Failure of Rock Material-Test Results and Constitutive Model [M]. Rotterdam: AA Balkema, 1995. 281- 298

[13] 俞茂宏, 刘凤羽. 一个新的普遍形式的强度理论 [J]. 土木工程学报, 1990, 23(1): 34- 40.
YU Mao-hong, LIU Feng-yu. A new general strength theory [J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23 (1): 34- 40.

[14] 俞茂宏, 何丽南, 宋凌宇. 双剪强度理论及其推广 [J]. 中国科学 (A 辑), 1985, 28(12): 1 113- 1 120.
YU Mao-hong, HE Li-nan, SONG Ling-yu. Twin shear theory and its generalization [J]. Scientia Sinica (Series A), 1985, 28(12): 1 113- 1 120.

[15] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1- 10.
YU Mao-hong. Unified strength theory and its application for rock and soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1- 10.

[16] 俞茂宏. 双剪理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 6. 187- 246.
YU Mao-hong. Twin Shear Theory and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 1998. 6. 187- 246.

Unified strength theory and its application in elasto-plastic analysis to tunnel

HU Xiao-rong¹, YU Mao-hong¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] The characteristics of rock strength under triaxial compressive stress is analyzed by the unified strength theory. The results show that the unified strength theory can deliberate many aspects of the rock strength. In addition, the elasto-plastic analysis using the unified strength theory is also devoted to the wall rock of tunnel with circular cross-section under static hydraulic pressure. The results show that the axial stress parallel to the tunnel and the parameter b in unified strength theory have significant effects on the radius of plastic zone, the magnitude of stresses and the displacement of the wall rock of tunnel, comparing with theory of Mohr-Coulomb.

[Key Words] unified strength theory; strength of the rock; wall rock of the tunnel; elasto-plastic analysis

(编辑 朱忠国)