

# 复杂应力状态下岩体强度的各向异性研究

李杭州<sup>1</sup>, 廖红建<sup>1, 2</sup>

(1. 西安交通大学 土木工程系, 陕西 西安 710049; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 岩体中存在着大量的节理裂隙等不连续面, 这些不连续面对岩体的强度起着重要的作用, 岩体可能会沿着这些不连续面发生破坏。在分析中间主应力对岩体强度影响的基础上, 验证统一强度理论, 并在此基础上, 建立可以反映中间主应力变化的强度参数, 同时采用试验对其进行验证。针对含有不连续面的岩体, 分析不连续面上的应力分布, 建立复杂应力条件下的岩体各向异性强度准则, 并针对该强度的特殊情况作简化, 分析适用条件。采用节理岩体的真三轴试验对其验证, 结果表明所建立的各向异性强度准则可以恰当的反映岩体的强度。分析中间主应力, 结构面倾角和走向对岩体强度的影响。

**关键词:** 岩石力学; 各向异性; 岩体强度; 双剪统一强度理论; 不连续面

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)07 - 1397 - 07

## ANISOTROPY OF STRENGTH OF ROCK MASS UNDER COMPLICATED STRESS STATE

LI Hangzhou<sup>1</sup>, LIAO Hongjian<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** Discontinuities are ubiquitous in rock masses. The discontinuities significantly affect the strength of rock masses, which cause the failure of the rock mass along the discontinuities. Based on the analysis of the effect of the intermediate principal stress on the strength of rock mass, a twin shear unified strength theory is illustrated. The unified cohesion and friction angle, which are dependent upon the Lode parameter and the intermediate principal stress parameter  $b$ , are established. The stress distribution on the discontinuities in rock mass is investigated. The anisotropic strength criterion of rock mass is proposed. For the specific case, the proposed strength criterion is simplified. The application condition of the criterion is also analyzed. The polyaxial test results of jointed rock mass are used to verify the proposed criterion. The results indicate that the proposed criterion can well predict the strength of the jointed rock mass. The effects of the intermediate principal stress, inclination and azimuth of the discontinuities on the strength of rock mass are also investigated.

**Key words:** rock mechanics; anisotropy; strength of rock mass; twin shear unified strength theory; discontinuity

## 1 引言

岩体中普遍存在着大量的节理裂隙等不连续

面, 而这些不连续面的存在对岩体强度有着很大的影响。在外荷载作用下, 岩体中的不连续面可能会率先发生破坏扩展, 使得岩体中的节理裂隙贯通, 从而影响整体的稳定性。在分析岩体工程稳定性时,

**收稿日期:** 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50979087); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(xjj20100079); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金资助项目(2008KDZ09)

**作者简介:** 李杭州(1977 -), 男, 博士, 2000年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事岩土的本构模型以及岩土工程数值模拟方面的研究工作。E-mail: lihangzhou77@163.com

目前主要采用 2 种方法: 等效连续介质法和离散法。对于等效连续介质法, 是把岩石块体和不连续面等效成连续介质, 不单独考虑裂隙等不连续面的影响, 如有限元法、边界元和差分法等, 当采用这种方法分析问题, 由于没有单独分析节理裂隙等不连续面对稳定性的影响, 可能在存在不连续面的地方过高评价岩体的稳定性。而离散法是把岩石块体和不连续面分别作为对象进行考虑, 尽量模拟真实情况, 如离散元法等。在地下工程中, 岩体中的不连续面把岩体切割成大量的岩石块体, 当进行地下开挖时, 将会在开挖面的周围形成临空块体, 这些块体在应力的重新分布和重力的作用下, 可能向地下开挖洞室内跨落或滑动, 在这种情况下, 采用离散法分析该工程的稳定性更为合理。在这样的工程中, 由于岩体的结构面对其稳定性起着主要的作用, 为更好的预测和控制该类工程的稳定性, 必须事先掌握影响含有不连续面岩体稳定性的因素。

对于完整岩石而言, 中间主应力对岩石强度的影响已被大量试验所证实和验证<sup>[1~5]</sup>。国内外提出了各种强度准则, 其中最为常用的是莫尔-库仑强度准则。但在莫尔-库仑强度准则中, 只考虑最大和最小主应力的影响而忽略了中间主应力的影响。为此, K. Mogi 等<sup>[2, 4, 6]</sup>针对中间主应力的影响, 提出了一些能够考虑中间主应力影响的强度准则。

对含有不连续面的岩体, 中间主应力对该类岩体强度的影响也有了一些试验研究<sup>[7~9]</sup>, 试验结果表明, 在复杂的应力状态下, 不仅中间主应力的大小影响着岩体的稳定性, 而且不连续面的倾角和走向大小也影响着其稳定性。J. C. Jaeger 等<sup>[10, 11]</sup>分别基于 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度准则考虑了含有一组节理裂隙的岩体强度准则, 使之能够反映岩体强度的各向异性。李杭州等<sup>[12]</sup>则探讨了平面应变情况下岩体的各向异性强度特性。周小平等<sup>[13~15]</sup>分别采用不同的方法引用断裂强度因子对节理岩体的强度进行分析。对于真三维应力状态下岩体各向异性强度的理论研究并不多见, 但在实际工程中, 岩体所处的实际应力状态多数为三维情况, 因此该方面的研究将对工程稳定性的预测和控制起着重要的作用。

本文就是在现有的理论和试验研究基础上, 结合已有的强度准则, 考虑岩石中不连续面的影响, 确定三维应力状态下岩体的各向异性强度准则, 分析其影响因素, 以便为岩体工程的稳定性提供一定的理论依据。

## 2 复杂应力状态下的强度参数

### 2.1 完整岩石强度准则

大量的真三轴试验已经证明对大多数岩石而言, 中间主应力的大小对岩石的强度有着明显的影响。对于不同的岩体其影响特性也不相同, 一些岩体随着中间主应力的增加而一直增加; 一些岩体则随着中间主应力的增大, 其强度增大到一定值后, 随着中间主应力的进一步增大而减小; 而另外一些则是中间主应力对岩石强度的影响不明显。对于完整岩石而言, 岩石的强度特性可以认为是各向同性的。而对于含有节理裂隙等一些不连续面的岩体而言, 由于其不连续面的影响, 岩体的强度特性表现为各向异性。岩体的各向异性也以被一些试验和理论所证实。图 1 为在常规三轴试验条件下岩体强度和节理倾角之间的关系<sup>[16]</sup>。从图 1 可以看出, 由于岩体中存在着不连续面, 岩体的强度表现出较强的各向异性, 即结构面效应。

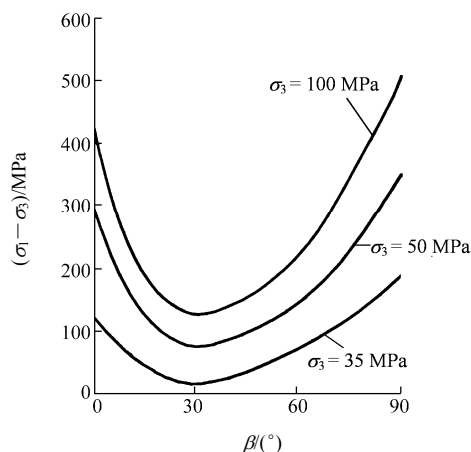


图 1 常规三轴试验下岩体强度和节理倾角的关系<sup>[16]</sup>

Fig.1 Relationships between the strength of rock mass and the inclination of joints under the conventional triaxial compressive experiment<sup>[16]</sup>

在岩土工程中常用的强度准则为莫尔-库仑强度准则, 但该强度准则只考虑最大和最小主应力的影响而忽略中间主应力的影响。因此为建立可以考虑中间主应力影响的岩体各向异性强度准则, 必须确定可以考虑中间主应力影响的岩石强度准则。由俞茂宏<sup>[6]</sup>所提出的双剪统一强度理论可以涵盖多个强度准则, 且其参数的确定比较简单, 近年来得到广泛应用。

双剪统一强度理论定义为: 当作用于双剪单元

体上的2个较大剪应力及其面上的正应力影响函数到达某一极限值时,材料开始发生破坏。其主应力的数学表达式为

(1) 当  $\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$  时, 有

$$F = \frac{1+b}{2} \sigma_1 - \frac{\sigma_3}{2} - \frac{b}{2} \sigma_2 + \sin \varphi \left( \frac{1+b}{2} \sigma_1 + \frac{b}{2} \sigma_2 + \frac{\sigma_3}{2} \right) - (1+b)c \cos \varphi \quad (1a)$$

(2) 当  $\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$  时, 有

$$F = \frac{1}{2} \sigma_1 + \frac{b}{2} \sigma_2 - \frac{1+b}{2} \sigma_3 + \sin \varphi \left( \frac{1}{2} \sigma_1 + \frac{b}{2} \sigma_2 + \frac{1+b}{2} \sigma_3 \right) - (1+b)c \cos \varphi \quad (1b)$$

式中:  $b$  为反映中间主应力作用的系数;  $c$ ,  $\varphi$  为岩土材料的强度参数。

上述双剪统一强度理论的表达式中, 是以拉应力为正, 压应力为负。而在岩土工程中, 经常以压为正, 拉为负, 因此上述统一强度理论可以表示为 (本文中后面所提到的统一强度理论均指的是以拉应力为负, 压应力为正):

(1) 当  $\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$  时, 有

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_1 - \frac{1}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (2a)$$

(2) 当  $\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$  时, 有

$$\frac{1 - \sin \varphi}{(1+b)(1 + \sin \varphi)} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (2b)$$

式(2)所表示的双剪统一强度理论的极限面如图2所示。从图2可以看出, 当中间主应力系数  $b$  取不同值时, 统一强度理论的极限面不同。当  $b=0$  时, 可以简化为莫尔-库仑强度准则, 处于强度理论的下限; 当  $b=1$  时, 简化为双剪强度理论, 为强度理论的上限。当  $0 < b < 1$  时, 极限面处于两者之间, 当  $b$  取该区间的任一值时可以得到不同的强度准则, 且强度极限面处于  $b=0$  和  $b=1$  之间。

## 2.2 强度准则的验证

为进一步验证统一强度理论的正确性, 选用 K. Mogi 等<sup>[2, 5]</sup>的试验结果对统一强度理论进行验证,

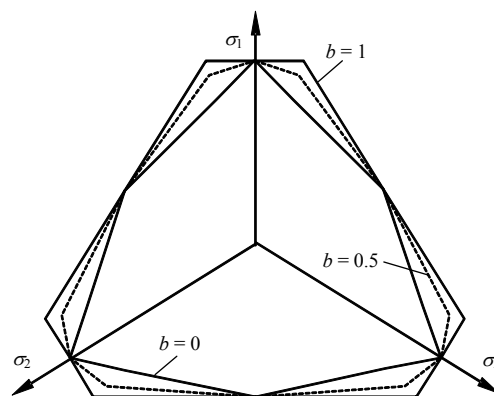


图2 统一强度理论的极限面

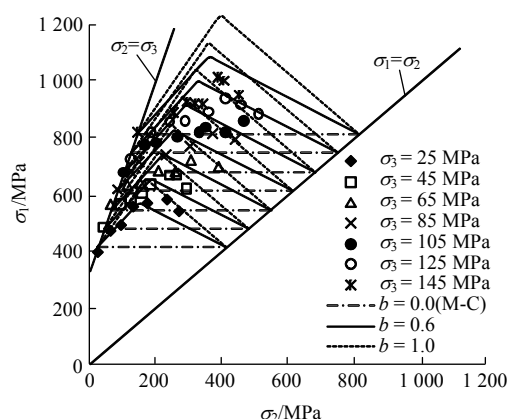
Fig.2 Ultimate envelope of unified strength theory

结果如图3所示。由图3可以看出, 当  $b=0$  时, 即为莫尔-库仑强度准则时, 由于没有考虑中间主应力的作用, 故其强度准则在  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  空间中表现为一水平线。 $b=0.6, 0.7$  和  $0.5$  时, 可以分别恰当的预测白云石, 闪岩和石灰石的强度。为进一步分析比较中间主应力系数  $b$  对岩石强度的影响, 图3也分别给出了当  $b=1$  时的3种岩石强度理论值, 从图中试验结果和理论值的比较可以看出当  $b=1$  时所给出的理论值过高的预测了这3种岩石的强度。应当指出的是: 统一强度理论只能预测对中间主应力影响具有区间效应的岩石强度, 而当岩石的强度一直随中间主应力增大时, 则统一强度理论的应用受到局限。

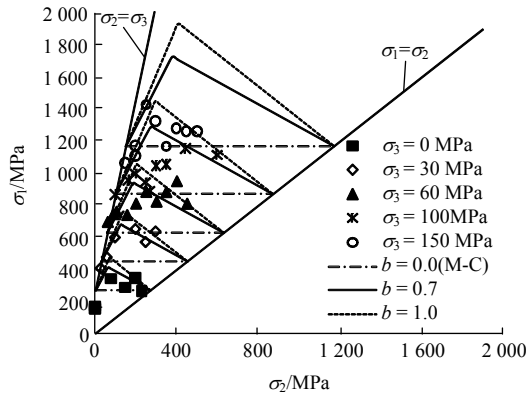
## 2.3 统一强度参数

在岩土工程中, 很多问题是使用莫尔-库仑强度准则来进行解决的, 因此以破坏面上的正应力和剪应力来表示强度准则有时将会更为方便。根据洛德参数的定义, 中间主应力可表示为

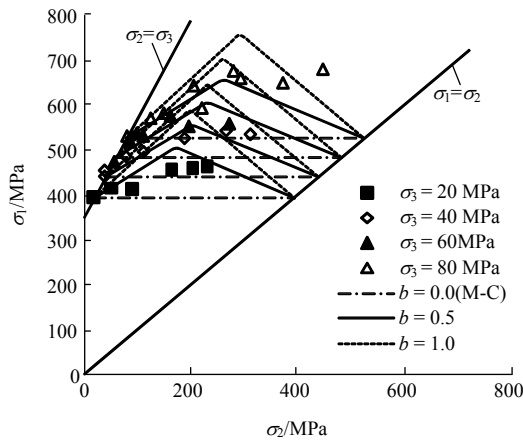
$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu_\sigma \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3)$$



(a) Dunham 白云石



(b) KTB 闪岩



(c) Solenhofen 石灰岩

图 3 统一强度理论与试验结果的比较

Fig.3 Comparison between unified strength and experimental results

把式(3)代入式(2a)及(2b)中, 整理可得

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_1 = c_1 \cos \varphi_1 \quad (\mu_\sigma \leq -\sin \varphi_0) \quad (4a)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi'_1 = c'_1 \cos \varphi'_1 \quad (\mu_\sigma \geq -\sin \varphi_0) \quad (4b)$$

式中:  $\varphi_1$ ,  $c_1$ ,  $\varphi'_1$ ,  $c'_1$  分别为统一强度理论中的内摩擦角强度参数和黏聚力强度参数, 与参数  $b$ ,  $\mu_\sigma$  有关。

(1) 当  $\mu_\sigma \leq -\sin \varphi$  时, 有

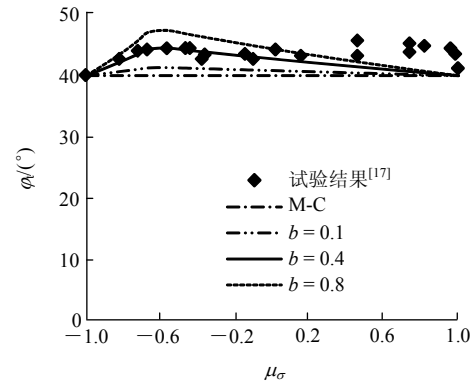
$$\sin \varphi_1 = \frac{2(1+b)\sin \varphi}{2+b-b\sin \varphi - (1+\sin \varphi)b\mu_\sigma} \quad (5a)$$

$$c_1 = \frac{2(b+1)c \cos \varphi}{[2+b-b\sin \varphi - (1+\sin \varphi)b\mu_\sigma] \cos \varphi_1} \quad (5b)$$

(2) 当  $\mu_\sigma \geq \sin \varphi_0$  时, 有

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi'_1 &= \frac{2(1+b)\sin \varphi}{2+b+b\sin \varphi + (1-\sin \varphi)b\mu_\sigma} \\ c'_1 &= \frac{2(b+1)c \cos \varphi}{[2+b+b\sin \varphi + (1-\sin \varphi)b\mu_\sigma] \cos \varphi_1} \end{aligned} \right\} \quad (5c)$$

从式(4)可以看出, 变化后的统一强度理论形式上和莫尔-库仑强度准则形式上一致。而强度参数表示的意义不同。式(5)所表示的统一强度参数可以反映中间主应力的影响, 而只有当  $b=0$  或者  $\mu_\sigma = -1$  时, 才和常规意义上的强度参数一致。图 4 为试验结果<sup>[17]</sup>和统一强度内摩擦角的比较。

图 4 试验结果<sup>[17]</sup>和统一强度内摩擦角的比较Fig.4 Comparison between experimental results<sup>[17]</sup> and unified strength friction angle

### 3 岩体的各向异性

#### 3.1 各向异性强度准则

自然界中的岩体或多或少都存在着节理裂隙等不连续面, 这些不连续面的数目、方位、间距和强度对岩体的强度起着重要的作用, 岩体可能会沿着这些不连续面发生破坏失稳。而在岩石力学中最常见的问题之一就是如何解决层状岩体的强度。如果假定不连续面的强度是由内摩擦角和黏聚力所定义, 那么采用莫尔-库仑强度准则, 包含一组不连续面的岩体强度<sup>[10]</sup>为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \beta) \sin(2\beta)} \quad (6)$$

式中:  $\beta$  为最小主应力和不连续面之间的倾角;  $c_j$ ,  $\varphi_j$  分别为不连续面的黏聚力和内摩擦角。

在三维应力状态下, 对于含有节理裂隙等不连续面的岩体, 任一不连续面上的正应力和剪应力可以采用该不连续面的法向余弦( $l$ ,  $m$ ,  $n$ )和作用该岩

体上的主应力所确定:

$$\sigma_n = l^2 \sigma_1 + m^2 \sigma_2 + n^2 \sigma_3 \quad (7a)$$

$$\tau^2 = l^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2 + n^2 \sigma_3^2 - \sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 l^2 m^2 +$$

$$(\sigma_2 - \sigma_3)^2 m^2 n^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 n^2 l^2 \quad (7b)$$

如果令不连续面的倾角为  $\beta$ , 走向与  $\sigma_1$  之间的夹角为  $\omega$ , 如图 5(a)所示, 则不连续面的法向余弦与不连续面的倾角和走向之间的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} l &= \sin \beta \sin \omega \\ m &= \sin \beta \cos \omega \\ n &= \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

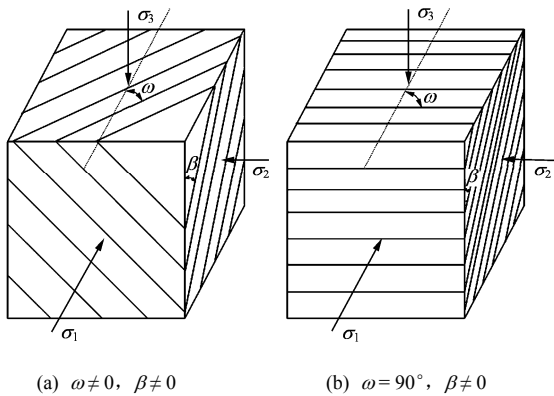


图 5 含有不连续面的岩体

Fig.5 Rock mass with discontinuities

根据式(4)可知, 统一强度参数可以考虑中间主应力的影响, 则在复杂应力状态下岩体的强度准则以正应力和剪应力表示为

$$\tau = c_{eqv} + \sigma_n \tan \varphi_{eqv} \quad (9)$$

式中:  $\varphi_{eqv}$  和  $c_{eqv}$  为复杂应力状态下岩石等效强度参数, 即统一强度参数  $\varphi$ ,  $c$ ,  $\varphi'$ ,  $c'$ 。

结合式(7)和(8), 并代入式(9)则可以得到含有节理的岩体各向异性强度准则:

$$f(c_{eqvj}, \varphi_{eqvj}, \beta, \omega, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (10)$$

式中:  $\varphi_{eqvj}$  和  $c_{eqvj}$  为不连续面的等效强度参数。

由于式(10)所表示的函数比较复杂, 为方便起见, 文中不给出具体的表达形式。式(10)所表示的岩体各向异性强度准则是隐式函数形式, 为求解该公式, 可以采用差分法进行求解, 或者采用 Microsoft Excel 中的内置“目标求解”或者“规划求解”求解器进行求解。

比较式(6)和(10), 可以看出在三维应力状态下含有不连续面的岩体各向异性强度准则不仅和第一

和第三主应力以及不连续面的倾角有关, 而且还和中间主应力, 不连续面的走向以及统一强度参数有关。式(10)可以考虑更多的因素来反映岩体强度。

### 3.2 不连续面平行于中间主应力的岩体各向异性

当图 5(a)中的不连续面的走向和中间主应力平行时, 如图 5(b)所示, 在这种情况下,  $m = 0$ 。则作用在不连续面上的正应力和剪应力可以简化为

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) \quad (11a)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) \quad (11b)$$

在该情况下则式(10)可以简化为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_{eqvj} + \sigma_3 \tan \varphi_{eqvj})}{(1 - \tan \varphi_{eqvj} \cot \beta) \sin(2\beta)} \quad (12)$$

比较式(6)和(12)可以看出, 2 个公式在表达形式上一致, 不同的是在式(12)中采用的是三维应力情况下的强度参数, 从而使得式(12)可以考虑中间主应力的影响。必须指出的是式(12)只适用于不连续面的方向和中间主应力方向平行的情况。

分析式(12)可以看出, 当倾角  $\beta$  接近  $90^\circ$  时, 式(12)将会给出一个较高的  $\sigma_1$  值; 而当该倾角接近于  $0^\circ$  时, 将会给出一个负的  $\sigma_1$  值。只有在  $\varphi_{eqvj} < \beta < \pi/2$  时, 岩体才可能沿着不连续面发生破坏, 否则岩体沿着岩石块体发生破坏, 此时将采用式(4)来评价岩体的强度。因此, 综上所述, 当采用式(12)来评价岩体的强度时, 必须先判断应该选用哪一个强度准则, 即式(4)和(12)选用哪一个。如果式(12)所计算的  $\sigma_1$  值大于式(4)的值, 或者式(12)所计算的  $\sigma_1$  值为负值时, 岩体中的岩块将会发生破坏而非沿着不连续面发生破坏, 此时选用统一强度理论来计算岩体的强度, 否则选用式(12)计算岩体的强度。

### 3.3 试验验证

采用 G. Reik 和 M. Zacas<sup>[7]</sup>的试验结果对本文中所提出复杂应力状态下的节理岩体的强度公式式(10)进行验证, 试验所用试样是由 3 组相互垂直的节理和被其切割的岩块所组成, 试验值和计算结果如图 6 所示。该试验主要研究岩体节理的走向和中间主应力平行岩体的强度特性。因此, 为简化计算, 这里采用式(12)对岩体的强度进行计算。

图 6(a)中的比较是基于莫尔-库仑强度准则得到的强度公式式(6)计算所得, 这种情况下没有考虑

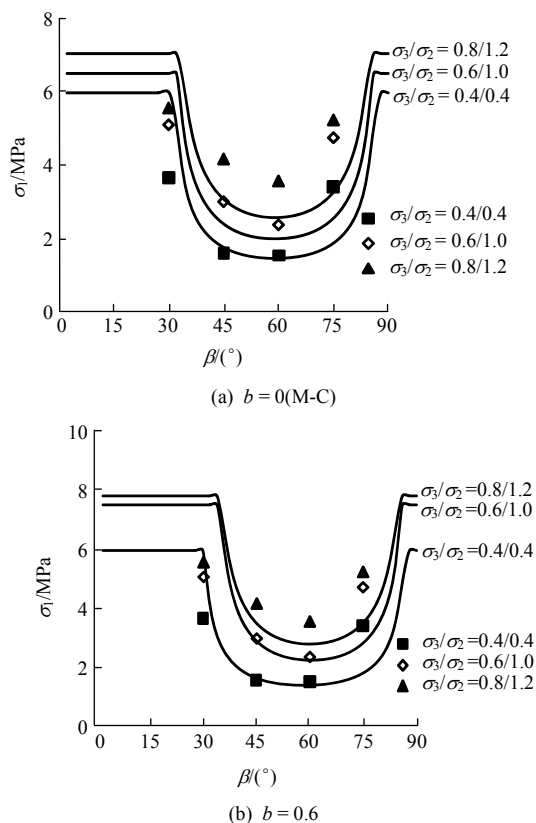


图 6 各向异性强度准则的验证

Fig.6 Verification of the anisotropic strength criterion

中间主应力的影响,从比较结果可以看出,当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,理论值可以较好的预测试验结果,而当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时,式(6)的理论值明显低于试验结果。图 6(b)中的结果是由式(10)或(12)计算所得,从图 6 中可以看出,由于式(10)或(12)中考虑了中间主应力的影响,相比较式(6),当 $b = 0.6$ 时,式(10)或(12)可以较好地预测试验结果。

由图 6 可以看出,在真三轴应力状态下,当 $b \neq 0$ 时,采用本文中所建立的岩体强度公式计算的结果要大于从莫尔-库仑强度准则得到岩体强度的结果,即大于从式(6)所得到的结果。这是因为当不连续面的走向和中间主应力的方向平行时,尽管式(6)和(12)的表达式的形式相同,但在式(12)中引用了可以考虑中间主应力的影响的强度参数,而该强度参数可以反映中间主应力影响,材料的强度参数因所受应力状态的不同而发生改变,如节 2.3 所证实一样,从而使得岩体整体的强度而发生变化。当 $\sigma_2 > \sigma_3$ 时,岩石和节理的强度参数均得到提高,而莫尔-库仑强度准则不能反映这种变化,在这种情况下,不论岩体是沿着节理面还是穿过岩块发生破坏,从本文所建立的岩体的各向异性强度准则得到结果都要比从莫尔-库仑强度准则得到的结果高。

### 3.4 参数分析

从式(10)可以看出,岩体的强度不仅和不连续面的倾角有关,而且还和不连续面的走向,中间主应力等有关。为分析研究各参数对岩体强度的影响,可以通过假定其他参数固定不变,而只变化所要分析的参数来进行分析。

从图 6 还可以看出,岩体的强度随不连续面倾角的变化规律。岩体强度随不连续面倾角的增大而减小,当减小到某一值后,然后随倾角的增大而增大。而且分析的结果表明,岩体强度随不连续面倾角变化所产生最小值的位置和不连续面的统一强度参数有关。

图 7 所示为岩体强度随不连续面走向的变化。从该图中可以看出岩体的强度随着不连续面走向与最大主应力 $\sigma_1$ 之间夹角的增大而减小。K. Mogi<sup>[18]</sup>的试验结果也证实了岩体强度的这种变化规律。

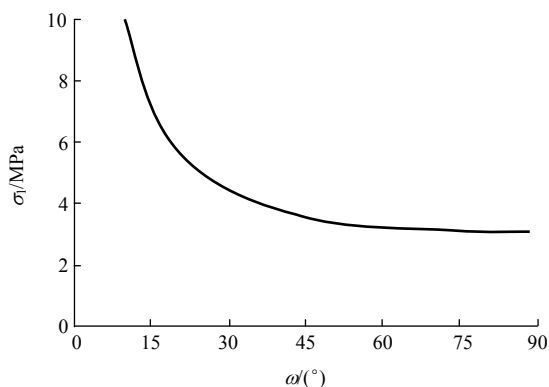


图 7 岩体强度随不连续面走向的变化

Fig.7 Relationship between strength of rock mass and azimuth of discontinuity

图 8 为岩体强度随中间主应力 $\sigma_2$ 的变化关系。

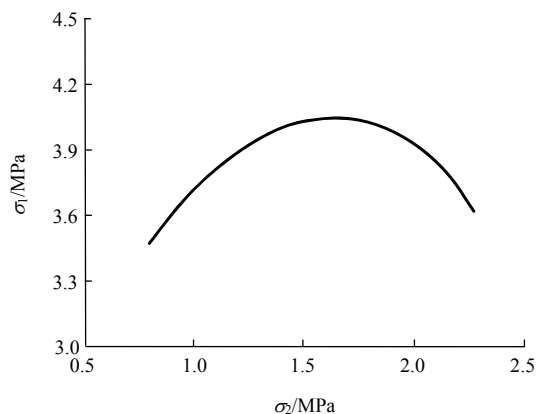


图 8 岩体强度随中间主应力的变化

Fig.8 Relationship between strength of rock mass and intermediate principal stress

从图中的变化可以看出, 岩体强度随中间主应力的变化也具有区间性, 变化规律和采用双剪统一强度理论分析完整岩石强度变化的规律类似。

## 4 结 论

(1) 给出了压应力为正、拉应力为负的双剪统一强度理论数学表达式, 并比较分析了该强度在偏平面上的极限面。采用岩石真三轴试验验证了双剪统一强度理论。

(2) 在统一强度理论中引入洛德参数, 给出了可以考虑中间主应力作用的统一内摩擦角和黏聚力, 并采用真三轴试验对其进行了验证, 结果表明该强度参数可以反映三维应力状态下岩土材料的强度参数变化。

(3) 分析了三维应力状态下岩体结构面的受力情况, 结合双剪统一强度理论, 建立了三维应力条件下岩体各向异性强度准则, 使其可以考虑中间主应力、岩体结构面倾角和走向的影响, 并分析了这些因素对强度的影响规律。采用节理岩体真三轴试验对其进行验证。

(4) 针对节理走向和中间主应力平行的特殊情况对所建立的岩体各向异性强度准则作了简化处理, 并和基于莫尔-库仑所得出的岩体强度进行了比较和分析, 确定适用条件和计算方法。结果表明, 所建立的强度能够更真实的反映岩体的强度。

## 参考文献(References):

- [1] MOGI K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(20): 5 117 - 5 131.
- [2] MOGI K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(5): 1 255 - 1 269.
- [3] 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 Dongjun, GENG Naiguang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1985, 6(1): 72 - 80.(in Chinese))
- [4] LADE P V. Rock strength criteria of the theories and the evidence[C]// HUDSON J A ed. *Comprehensive Rock Engineering*. Oxford: [s.n.], 1993: 255 - 284.
- [5] CHANG C, HAIMSON B. True triaxial strength and deformability of the German Continental deep drilling program(KTB) deep hole amphibolites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B8): 18 999 - 19 013.
- [6] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.(YU Maohong. *Twin shear theory and its application*[M]. Beijing: Science Press, 1998.(in Chinese))
- [7] REIK G, ZACAS M. Strength and deformation characteristic of jointed media in true triaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(6): 295 - 303.
- [8] TIWARI R P, RAO K S. Response of an anisotropic rock mass under polyaxial stress state[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2007, 19(5): 393 - 403.
- [9] SINGH M, RAO K S, RAMAMURTHY T. Strength and deformational behavior of a jointed rock mass[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35(1): 45 - 64.
- [10] JAEGER J C, COOK N G W. *Fundamentals of rock mechanics*[M]. London: Chapman and Hall, 1969.
- [11] HOEK E. Strength of jointed rock masses[J]. *Géotechnique*, 1983, 23(3): 187 - 223.
- [12] 李杭州, 廖红建, 冯夏庭, 等. 基于统一强度理论分析不连续面对岩体强度的影响[J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 1 997 - 2 000.(LI Hangzhou, LIAO Hongjian, FENG Xiating, et al. An analysis of influence of discontinuous plane on strength of rock mass based on unified strength theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 1 997 - 2 000.(in Chinese))
- [13] 周小平, 王建华, 哈秋龄. 压剪应力作用下断续节理岩体的破坏分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1 437 - 1 440.(ZHOU Xiaoping, WANG Jianhua, HA Qiuling. Failure analysis of intermittent jointed rocks under compress-shear stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1 437 - 1 440.(in Chinese))
- [14] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机制及强度特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(6): 635 - 640.(BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rock mass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(6): 635 - 640.(in Chinese))
- [15] 李建林, 孙志宏. 节理岩体压剪断裂及其强度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(4): 444 - 448.(LI Jianlin, SUN Zhihong. Study of crack and strength of joint rock under compression-shear stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(4): 444 - 448.(in Chinese))
- [16] DONATH F A. Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock[C]// JUDD W R ed. *State of Stress in the Earth's Crust*. New York: American Elsevier, 1964: 281 - 297.
- [17] BISHOP A W. Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens[C]// PARRY R H G ed. *Proceedings of Roscoe Memorial Symposium: Stress-Strain Behavior of Soils*. Foulis, Henley-on-Thames: [s.n.], 1971: 3 - 58.
- [18] MOGI K. *Experimental rock mechanics*[M]. London: [s.n.], 2007.