

岩石中间主应力效应的理论分析

徐德欣

(中国民用航空西南管理局, 四川 成都 610202)

摘 要: 广泛地查阅了国内外参考文献, 比较全面系统地收集了九种岩石真三轴压力试验资料, 并对其进行了深入细致的理论分析。结果表明, 岩石中普遍存在着中间主应力效应, 增大中间主应力值可以提高岩石的极限抗压强度, 且提高的程度因岩石种类、小主应力值大小等因素的不同而在 14% 至 44% 范围内变化。对现有的岩石强度理论进行了细致的分析, 并以各种岩石强度理论特别是八面体剪应力强度理论和双剪应力强度理论为基础, 结合试验资料, 推荐了一个既应用方便、又与试验数据吻合性好的六参数强度准则: $\tau_{13} = b_0 + b_1 \sigma_m + b_2 u_o^2 + b_3 u_o^2 + b_4 u_o^3 + b_5 \tau_{12}$ 。

关键词: 中间主应力效应; 岩石强度理论; 强度准则

中图分类号: TU45

文献标识码: A

1 中间主应力效应

过受力物体内部任意一点的应力状态均可由三个主应力表示, 即大主应力 σ_1 , 中间主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 。中间主应力效应即 σ_2 效应, 是指中间主应力 σ_2 对岩石极限抗压强度的影响效应。

关于中间主应力效应的理论探讨从 20 世纪 30 年代就已经开始了^[1], 特别是随着真三轴压力试验机的不断研制成功^[2] 和大量岩石真三轴压力试验成果的发表^[1, 3~ 10], 研究者们越来越认识到中间主应力对岩石极限抗压强度的影响具有一定的规律性, 并为此对中间主应力效应进行了深入细致的研究。

日本的茂木清夫 (Mogi) 从 60 年代开始, 经过十多年的研究, 研制了东京大学型真三轴压力试验机, 并得出了一系列试验成果, 为中间主应力效应的研究做出了积极的贡献^[8~ 10]。他对大理岩、白云岩、粗面岩、花岗岩等多种岩石进行了真三轴压力试验, 得出了岩石极限抗压强度随中间主应力变化的曲线。但由于所施加的中间主应力值的变化范围不

够, 所以他把岩石极限抗压强度随中间主应力值变化的规律归结为不断提高的曲线, 这一结果为后来进一步的研究所补充。我国学者张金铸、林天健、许东俊、耿乃光、高延法、陶振宇、李小春等人也利用真三轴压力试验机对大冶大理岩、稻田花岗岩、拉瓦西花岗岩、软弱砂岩、中细砂岩、红砂岩等多种岩石进行了一系列的岩石真三轴压力试验, 并对试验成果进行了分析和总结, 对中间主应力效应的研究也做出了积极的贡献。通过对这些试验成果的分析, 我们得到以下结论:

1. 岩石中普遍存在着中间主应力效应, 中间主应力效应可使岩石的极限抗压强度提高。

2. 中间主应力效应具有区间性, 即在 σ_3 为定值的情况下, 岩石的极限抗压强度随着 σ_2 值的增加刚开始是逐步提高的, 当其达到某一峰值后, 随着 σ_2 值的增加而下降。

3. 随着 σ_3 值的增加, $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 曲线不断上升, 曲线峰值 σ_{1max} 不断提高。

4. 中间主应力效应对不同种类岩石的极限抗压强度影响程度不同。对于硬质岩石, $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 时的强度略高于 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 时的强度, 而对于软质

收稿日期 (Received date): 2002- 12- 08; 改回日期 (Accepted): 2003- 03- 10。

作者简介 (Biography): 徐德欣 (1970-), 男 (汉族), 辽宁盖县人, 工学硕士, 工程师, 主要从事岩土工程研究。Email: dx_xu@ 163. com. [XU De-xin (1970-), male, from Gaixian Liaoning, engineering master, engineer, major research fields on rock and soil mechanics. Email: dx_xu@ 163. com.]

岩石, 则可能出现 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 时的强度低于 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 时的强度的情况。

5. 中间主应力效应对岩石极限抗压强度的影响程度还与小主应力 σ_3 值的大小有关。在 σ_3 值一定的情况下, $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 的曲线变化是不同的。

2 岩石强度理论

由上述分析可见, 中间主应力效应对岩石的极限抗压强度有很大的影响。因此, 探索建立一个能够反映中间主应力效应的、与岩石真实极限强度变化规律吻合性好的强度准则具有重要的实用意义。

2.1 岩石强度理论介绍

关于岩石强度理论的研究, 人们很早就开始了。当岩石处于简单受力情况时, 岩石的危险点处于简单受力状态(如拉伸和压缩处于单向受力状态, 剪切处于纯剪状态等), 则岩石强度可以由简单的试验来决定, 这时强度条件的建立较容易。

但是岩石在外荷载作用下常处于复杂应力状态, 许多试验研究指出: 岩石强度及其在荷载作用下的性状与岩石的应力状态有很大关系, 在单向受力状态不表现出脆性的岩石在三向应力状态下可以具有塑性性质, 同时它的强度也有极大的提高。

关于岩石在复杂应力状态下是怎样破坏的, 基于对引起岩石危险状态的原因作不同的假设和各种试验资料, 众多研究者提出了许多理论, 从最早的最大正应力强度理论开始, 一直到现在还有新的强度理论不断地被提出。

由于岩石性能的复杂性, 各个历史时期试验条件的限制以及研究者的认识能力等原因, 研究者们提出的岩石强度理论各有不同的适用性和优缺点, 下面按历史顺序就是否考虑中间主应力效应列表介绍主要的强度理论(见表 1)。

表 1 主要的岩石强度理论

Table 1 The main strength theories of rock

岩石强度理论	中间主应力效应	文献
最大正应力强度理论(Rankine 理论)	未考虑	[11]
最大剪应力强度理论(H. Tresca 理论)	未考虑	[11]
八面体剪应力强度理论(VonMises 理论)	考虑	[11]
莫尔-库伦强度理论(Mohr-Coulomb 理论)	未考虑	[11]
格里菲斯强度理论(Griffith 理论)	未考虑	[11]
双剪应力强度理论	考虑	[12]

由表可见, 只有八面体剪应力强度理论和双剪应力强度理论考虑了中间主应力效应的影响, 而其它几种强度理论均未考虑这种影响, 因此它们对岩石真实强度变化规律的描述是不完善的。在下面将详细介绍上述考虑了中间主应力效应的两种强度理论, 并以它们为基础来探索建立新的岩石强度准则。

2.2 八面体剪应力强度理论和双剪应力强度理论

2.2.1 八面体剪应力强度理论

以八面体单元为模型, 认为岩石破坏的危险状态与八面体剪应力 τ_8 有关, 并考虑了岩石的静水压力 σ_m 效应和中间主应力效应, 许多人为此提出了多种形式的八面体剪应力强度理论(准则)。其中主要有:

1. 冯·米赛斯强度准则(1913 年)
强度准则形式

$$\tau_8 \leq \tau_s$$
$$\tau_8 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$
$$\tau_s = \frac{\sqrt{2}}{3} R \quad (2)$$

式中 R 为岩石单向受力时达到危险状态的主应力(kPa)。

2. 茂木清夫进一步发展冯·米赛斯强度准则而提出的如下形式的破坏准则(1971 年)^[8, 9]

$$\tau_8 = f(\sigma_1 + \sigma_3)$$

或

$$\tau_8 = f(\sigma_1 + \sigma_2 + a\sigma_3) \quad (3)$$

3. 高延法、陶振宇提出的强度准则

$$\tau_8 = f(\sigma_m) + f(u_\sigma) \quad (4)$$

式中 $u_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 是洛德参数。

进一步假定 τ_8 是 σ_m 和 u_σ 的二次函数, 而提出了以下 4 种形式的八面体剪应力强度准则

$$\text{GT-1} \quad \tau_8 = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2 + b_3u_\sigma + b_4u_\sigma^2 \quad (5)$$
$$\text{GT-2} \quad \tau_8 = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2 + b_3u_\sigma \quad (6)$$
$$\text{GT-3} \quad \tau_8 = b_0 + b_1\sigma_m + b_2u_\sigma \quad (7)$$
$$\text{GT-4} \quad \tau_8 = b_0 + b_1\sigma_m \quad (8)$$

2.2.2 双剪应力强度理论

该理论首先由西安交大的俞茂宏教授提出。以十二面体单元为模型, 假定当作用于单元体上的两个较大主剪应力以及相应的正应力函数达到某一极限值时, 岩石发生破坏。数学表达式

$$F = \tau_{13} + \tau_{12} + \beta(\sigma_{13} + \sigma_{12})$$

$$= C \text{ (当 } (\tau_{12} + \beta\sigma_{12}) \geq (\tau_{13} + \beta\sigma_{23}) \text{ 时)} \quad (9)$$

$$F' = \tau_{13} + \tau_{23} + \beta(\sigma_{13} + \sigma_{23})$$

$$= C \text{ (当 } (\tau_{12} + \beta\sigma_{12}) < (\tau_{13} + \beta\sigma_{23}) \text{ 时)} \quad (10)$$

$$\text{式中 } \tau_{13} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2},$$

$$\sigma_{23} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}, \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \sigma_{13} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

β 和 C 由岩石的抗拉极限强度 R_t 和抗压极限强度 R_c 确定, 即

$$\beta = \frac{R_c - R_t}{R_c + R_t}, \quad C = \frac{2R_c R_t}{R_c + R_t}$$

高延法、陶振宇对上述理论的数学表达式进行了简化 (取 $\beta = 0$), 并认为 C 是岩石静水压力 σ_m 的二次函数, 而将上式化为

$$\tau_{13} + a\tau_{12} + b_0 + b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2 = 0 \quad (\tau_{12} \geq \tau_{23}) \quad (11)$$

$$\tau_{13} + a\tau_{23} + b_0 + b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2 = 0 \quad (\tau_{12} < \tau_{23}) \quad (12)$$

同时对上式又进一步简化, 提出了下列 4 种形式的双剪应力强度准则

$$\text{GT-5 } \tau_{13} = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2 + b_3\tau_{12}$$

$$\text{(当 } \tau_{12} < \tau_{23} \text{ 时, 取 } \tau_{12} = \tau_{23}) \quad (13)$$

$$\text{GT-6 } \tau_{13} = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2 + b_3\tau_{12}$$

$$\text{(当 } \tau_{12} < \tau_{23} \text{ 时, 取 } \tau_{12} = \tau_{23}) \quad (14)$$

$$\text{GT-7 } \tau_{13} = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\tau_{12} \quad (15)$$

$$\text{GT-8 } \tau_{13} = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\tau_{23} \quad (16)$$

基于对各强度理论所做的假定的不同, 上述各种形式的八面体剪应力强度理论和双剪应力强度理论在应用上各有优缺点。例如, 冯·米赛斯强度准则只适用于拉压强度相等的材料, 而岩石是拉、压强度不相等的材料; 文献[8]提出的破坏条件未能给出 $f(\sigma_1 + \sigma_3)$ 或 $f(\sigma_1 + \sigma_2 + a\sigma_3)$ 的确切形式, 在实际工程中是很难应用的; 文献[13]提出的双剪应力强度理论考虑了中间主应力效应, 但应用时需做判别, 比较麻烦。文献[3]对以上两种强度理论各提出了 4 种简化形式, 并推荐了两种三参数强度准则, 即

$$\tau_8 = b_0 + b_1\sigma_m + b_2u_\sigma$$

$$\tau_{13} = b_0 + b_1\sigma_m + b_2\tau_{23}$$

虽应用方便, 但由于其用来进行回归分析的岩石真三轴压力试验数据不多, 故代表性不强, 且回归分析得到的复相关系数 R 较低^[3]。综上所述, 建立一个既应用方便, 又符合岩石极限强度变化律的强度准则具有重要意义。

通过对上述各种形式强度准则的分析, 作者发现上述研究者认为对岩石强度有影响的因素主要

有: 在八面体剪应力强度理论中有 τ_8 、 u_σ 、 σ_m ; 在双剪应力强度理论中有 τ_{13} 、 τ_{12} 、 τ_{23} 、 σ_m 、 σ_{12} 、 σ_{23} 、 σ_{13} 等。因此作者综合上述各强度理论的特点, 以上述两种强度理论为基础, 进一步探索建立新的强度准则。

3 综合的多参数强度准则

作者在对文献[3]关于两种强度理论所提出的 8 种简化形式强度准则的分析中发现, 这些强度准则都考虑了静水压力 σ_m 的影响, 但对于罗德常数 u_σ 的影响, 只在八面体剪应力类强度准则中考虑, 而在双剪应力类强度准则中却未考虑, 试验资料的分析证实, u_σ 对岩石强度有重要影响, 因此作者将 u_σ 的影响也考虑到双剪应力类强度准则中去, 而提出了以下形式的综合多参数强度准则

$$\tau_{13} + a\tau_{12} + \sum_{i=0}^n b_i \sigma_m^i + \sum_{j=0}^k c_j u_\sigma^j = 0 \quad (\tau_{12} \geq \tau_{23}) \quad (17)$$

$$\tau_{13} + a\tau_{23} + \sum_{i=0}^n b_i \sigma_m^i + \sum_{j=0}^k c_j u_\sigma^j = 0 \quad (\tau_{12} < \tau_{23}) \quad (18)$$

为应用方便, 其中 n 、 k 取值 ≤ 3 , 并进一步简化, 得到 36 种强度准则^[13], 其中文献[3]关于双剪应力强度理论所提出的 4 种简化形式强度准则已包括在内。在下述各节中作者将利用国内外岩石真三轴压力试验资料对上述各强度准则进行回归分析, 从而找出一个能比较真实反映岩石极限强度变化规律的强度准则。

4 国内外岩石真三轴压力试验数据统计及分析

4.1 试验数据统计

作者通过广泛地查阅国内外文献资料, 收集了九种岩石在不同试验条件下进行真三轴压力试验得到的试验数据, 具体见文献[1, 3, 4, 6, 8]。

4.2 中间主应力效应影响分析、区间性分析

通过对试验数据分析可见, 中间主应力对岩石的极限抗压强度有影响, 影响程度因岩石种类、小主应力内值的大小等因素的不同而在 14% ~ 44% 范围内变化。随着小主应力 σ_3 值的增大, 不同种类岩石的中间主应力效应影响系数呈不同的变化趋势。如稻田花岗岩的中间主应力效应影响系数 a 是随着小主应力 σ_3 值的增加, 呈上升趋势, 而红砂岩的中间主应力效应影响系数 a 是随着小主应力 σ_3 值的增加呈下降趋势。

此外, 还发现中间主应力效应区间性系数也因岩石种类, 小主应力值大小等因素的不同而在 0.12 ~ 2.87 范围内变化。随着小主应力值的增加, 各种岩石的中间主应力效应区间性系数一般呈增大趋势。亦即随着 σ_3 值的增加, 为提高岩石极限抗压强度而增加 σ_2 值的范围变大了。

5 强度准则的回归分析

5.1 参与回归分析的强度准则及方法

为了与文献[3]中关于两种强度理论提出的八种强度准则相比较, 作者在利用九种岩石真三轴压力试验数据对上述 32 种强度准则进行回归分析时, 也将同时对文献[3]中关于两种强度理论提出的八种强度准则进行回归分析, 这样进行回归分析的强度准则共有 40 种。

根据各强度准则中 τ_{13} 、 τ_8 与 τ_{12} 、 τ_{23} 、 σ_m 、 u_σ 等之间的关系, 作者采用了多元回归方法对各系数进行估计并对回归效果给出检验。

5.2 回归成果分析

通过对上述 40 种强度准则进行回归得到的复相关系数成果^[13]的分析, 可以看出(表 2):

1. 40 种强度准则对全体试验数据的回归效果都显著, 且随着参数的增加, 回归效果呈提高趋势。

2. 强度准则中除 GT- 3, GT- 4, GT- 7, GT- 8 对个别种类岩石试验数据的回归效果较差一些外, 其余强度准则对各种岩石试验数据的回归效果显著。

3. 与文献[3]中提出的 GT 系列强度准则相比, 作者提出的 X 系列强度准则对岩石试验数据的回归效果更显著一些。由表中数据可以看出, 复相关系数均有所提高。

4. 由表中数据可见, 洛德参数 u_σ 在强度准则中起重要作用, 随着 u_σ 幂次的提高, 复相关系数变大, 而文献[1]中的双剪应力类强度准则却没有考虑 u_σ 的作用。

5. 在以上 40 种强度准则中, 作者提出的 x- 31 ($\tau_{13}= b_0+ b_1\sigma_m + b_2\sigma_m^2+ b_3\sigma_m^3+ b_4u_\sigma+ b_5u_\sigma^2+ b_6u_\sigma^3+ b_7\tau_{12}$) 回归效果最好, 但其参数较多, 作者提出的 x- 22 ($\tau_{13}= b_0+ b_1\sigma_m + b_2u_\sigma+ b_3u_\sigma^2+ b_4u_\sigma^3+ b_5\tau_{12}$) 回归效果也比较显著, 且参数不多, 相对应用而言, x- 22 更优一些, 作者推荐强度准则 x- 22 作为岩石强度准则。

表 2 回归分析得到的复相关系数 R 成果表											
Table 2 The results of coefficient R of compound correlation obtained by regressive analysis											
强度 准则 编号	参数 个数	复相关系数 R									
		全体 数据 193 组	山口 大理岩 23 组	大冶 大理岩 20 组	粗面岩 37 组	稻田 花岗岩 13 组	拉瓦西 花岗岩 19 组	白云岩 28 组	软弱 砂岩 28 组	中细 砂岩 28 组	红砂岩 28 组
GT- 1	5	0.9781	0.9980	0.9940	0.9966	0.9958	0.9886	0.9878	0.9671	0.9961	0.9882
GT- 2	4	0.9765	0.9957	0.9928	0.9938	0.9837	0.9866	0.9781	0.8775	0.9959	0.9762
GT- 3	3	0.9754	0.9902	0.3846	0.9864	0.9703	0.9858	0.9765	0.7599	0.9950	0.9690
GT- 4	2	0.9601	0.9468	0.9275	0.9433	0.7747	0.9011	0.8251	0.7516	0.9546	0.8184
GT- 5	4	0.9907	0.9946	0.9639	0.9922	0.9464	0.9592	0.9307	0.9254	0.9989	0.9882
GT- 6	4	0.9934	0.9953	0.9936	0.9924	0.9982	0.9959	0.9854	0.8403	0.9989	0.9980
GT- 7	3	0.9934	0.9947	0.9935	0.9902	0.9982	0.9957	0.9851	0.7896	0.9988	0.9980
GT- 8	3	0.9814	0.9917	0.9860	0.9881	0.9952	0.9885	0.9773	0.7280	0.9945	0.9934
X- 22	6	0.9943	0.9994	0.9960	0.9989	0.9996	0.9981	0.9970	0.9870	0.9996	0.9992
X- 31	8	0.9944	0.9999	0.9963	0.9991	0.9999	0.9991	0.9993	0.9997	0.9996	0.9993

为了将强度准则 x- 22 与文献[3]中推荐的 GT- 3、GT- 8 两强度准则进行比较, 作者利用回归计算得到的三种强度准则对山口大理岩, 稻田花

岗岩、软弱砂岩等三种岩石试验数据进行求解, 得到最大主应力理论解, 并计算累积误差。三种强度准则部分岩石试验数据回归成果见表 3 所示, 比较计

算成果见表 4。

表中 σ_c^0 为由回归参数求出的岩石单轴抗压强度(kPa), σ_c 为岩石单轴抗压强度(kPa), $\varepsilon = \frac{1}{n} \sum \frac{|\sigma_1^i - \sigma_1^{\varepsilon}|}{\sigma_1^{\varepsilon}}$ 为累积误差, σ_1^i 为由回归参数求出的最大主应力值(kPa), σ_1^{ε} 为由试验得到的最大主应力值

(kPa), N 为各种岩石数量。
由上述数据可以看出: 强度准则 $x-22$ 对岩石试验数据的拟合程度最好, 与实际岩石强度曲线基本吻合, 除了对山口大理岩求出的单轴抗压强度较差外, 其余计算出的结果均比由强度准则 $GT-3$, $GT-8$ 计算得到的结果好。

表 3 三种强度准则部分岩石试验数据回归成果表
Table 3 The regressive results of part of the experimental data of rock of three kinds of strength rules

强度准则	岩石种类	数据量	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	统计量			显著性
									R	F	$F_{0.99}$	
GT-3	山口大理岩	23 组	12 6497	0 5983	- 24 62				0.9902	500.16	5.85	显著
	稻田花岗岩	13 组	36 8949	0 6716	- 65.1969				0.9703	80.41	7.56	显著
	软弱砂岩	14 组	198 6336	0 1401	- 0.2534				0.7599	7.52	7.21	显著
GT-8	山口大理岩	23 组	28 1082	0 7534	- 0.2337				0.9917	594.95	5.85	显著
	稻田花岗岩	13 组	46 5906	1.0451	- 0.6445				0.9952	512.25	7.56	显著
	软弱砂岩	14 组	19 5486	0 2207	- 0.0979				0.7280	6.2	7.21	不显著
X-22	山口大理岩	23 组	27.8308	0 5296	- 8.0116	- 10.6466	9.0747	0.2891	0.9994	2839.06	4.34	显著
	稻田花岗岩	13 组	43 782	0 5849	- 3.3584	- 10.7733	9.2916	0.4192	0.9996	1627.34	7.46	显著
	软弱砂岩	14 组	12 8704	0 1154	9 0094	- 1.1033	- 0.6873	0.7364	0.9870	60.39	6.63	显著

表 4 由回归参数求出的单轴抗压强度和累积误差
Table 4 The results of single-axial compressive strength and cumulative error obtained by regressive parameter

强度准则	岩石种类					
	山口大理岩		稻田花岗岩		软弱砂岩	
	σ_c^0/σ_c	ε	σ_c^0/σ_c	ε	σ_c^0/σ_c	ε
GT-3	0.909	0.045	1.964	0.138	1.236	0.038
GT-8	0.753	0.054	1.463	0.091	1.309	0.049
X-22	0.601	0.032	01.351	0.049	1.045	0.016

6 结论

由上述各节的讨论与分析, 得到以下结论:
1. 通过对收集到的国内外岩石真三轴压力试验数据的分析发现, 各种岩石都存在着中间主应力效应, 中间主应力效应可使岩石的极限抗压强度提高。
2. 中间主应力效应具有区间性, 即在小主应力 σ_3 为定值的情况下, 岩石压强度随着中间主应力 σ_2 值的增大刚开始是逐步提高的, 当其达到某一峰值时, 又随着中间主应力 σ_2 值的增大而下降。中间主应力效应区间性系数因岩石种类、小主应力 σ_3 值大小等因素的不同而在 0.12~ 2.87 范围内。一般随

着 σ_3 值的增加呈上升趋势。
3. 中间主应力效应对岩石极限抗压强度的影响程度也与岩石种类、小主应力 σ_3 值的大小等因素有关, 在 14%~ 44% 范围内变化。随着小主应力 σ_3 值的增加, 不同种类岩石的中间主应力效应影响系数呈不同的变化趋势。
4. 在利用国内外岩石真三轴压力试验数据对 40 种强度准则进行的回归分析中发现, 洛德参数 u_0 在强度准则中起重要作用, 而文献[3]中的双剪应力强度理论却没有考虑 u_0 的影响。
5. 以各种岩石强度理论特别是八面体剪应力强度理论和双剪应力强度理论为基础, 结合对国内外九种岩石真三轴压力试验数据的分析, 推荐了一个反映中间主应力效应的、与软硬质岩石真实极限

强度变化曲线拟合得比较好的六参数强度准则

$$\tau_{13} = b_0 + b_1 \sigma_m + b_2 u \sigma + b_3 u \sigma^2 + b_4 u \sigma^3 + b_5 \tau_{12}$$

其特点是:

(1) 应用方便。可直接由岩石真三轴压力试验数据建立该准则。

(2) 与岩石试验数据吻合性好, 与文献[3] 推荐的两种三参数强度准则相比, 复相关系数高, 回归效果显著。

参考文献(References):

- [1] Laboratory of 330 Design Institute, Primary Experimental Study of non-equal Triaxial Strength of Middle Thin Gritstone. *Rock and Soil Mechanics*, 1979, (1): 47~ 61. [三三〇设计院研究室. 中细砂岩不等压三轴强度的初步试验研究[J]. 岩土力学, 1979, (1): 47~ 61.]
- [2] Xu Dong-Jun etc, Manufacture of RT3 Rock High Pressure Triaxial Instrument. *Rock and Soil Mechanics*, 1990, (2). [许东俊等. RT3 型岩石高压真三轴仪的研制[J]. 岩土力学, 1990, (2).]
- [3] Gao Yan-Fa, Tao Zhen-Yu, Test and Analyse of the True Triaxial Pressure Experiment of the Rock Strength Rule. *Journal of Rock and Soil Engineering*, 1993, (4): 26~ 22. [高延法, 陶振宇. 岩石强度准则的真三轴压力试验检验与分析[J]. 岩土工程学报, 1993, (4): 26~ 22.]
- [4] Xu Dong-Jun, Geng Nai-Guang, Rule of the Rock Change along with the Mid-principal Stress. *Journal of Solid Mechanics*, 1985, (1): 72~ 80. [许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, (1): 72~ 80.]
- [5] Zhang Jin-Zhu, Lin Tian-Jian, Pressure State and Destructive Property of the Rock in Triaxial Experiment. *Journal of Mechanical*, 1979, (2): 99~ 105. [张金铸, 林天健. 三轴试验中岩石的压力状态和破坏性质[J]. 力学学报, 1979, (2): 99~ 105.]
- [6] Li Xiao-Chun, Xu Dong-Jun, Incidence and Rule of the Mid-principal Stress upon the Rock Strength. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, (1): 9~ 16. [李小春, 许东俊. 中间主应力对岩石强度的影响程度和规律[J]. 岩土力学, 1991, (1): 9~ 16.]
- [7] Xu Dong-Jun, Mechanical Property of High Hole Flaccid Gritstone under General Triaxial Stress. *Rock and Soil Mechanics*, 1982, (1): 13~ 25. [许东俊. 高孔隙软弱砂岩在一般三轴应力状态下的力学特性[J]. 岩土力学, 1982, (1): 13~ 25.]
- [8] Mogi K. (author), Xu Dong-Jun (translator), Flow and Destroy of the Rock under the General Triaxial Compress. *Rock Mechanical*, 1980, (1): 1~ 14. [茂木清夫著(许东俊译). 一般三轴压缩下岩石的流动和破坏[J]. 岩石力学, 1980, (1): 1~ 14.]
- [9] Mogi K., Fracture and Flow of Rocks, *Tectonophysics*, (1972) **13**, 541 ~ 568.
- [10] Mogi K., Igarashi K. and Mochizuki H., Deformation and Fracture of Rocks under General Triaxial Stress State-Anisotropic Dilatancy. *J. Metamorphic Sci. Japan*, 1978, 27: 148~ 154.
- [11] Xu Zhi-Ying, Rock Mechanical. Beijing: Water Press, 1985. [徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985.]
- [12] Yu Mao-Hong. New System of Strength Theory. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992. [俞茂宏. 强度理论新体系[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.]
- [13] Xu De-Xin, the Exploration on Control of the Rock Mass Stress State. Master Degree Paper of Sichuan Union University. [徐德欣. 岩体应力状态的增压调控探索[D]. 成都: 四川联合大学硕士学位论文.]

The Theoretical Analysis of the Mid-principal Stress of Rock

XU De-xin

(Southwest Regional Administration of civil aviation of china, Chengdu, Sichuan 610202 China)

Abstract: Internal and external reference documents are extensively consulted, the true triaxial pressure experimental data of 9 kinds rocks are collected in a comparatively overall and systematic way, and are theoretically analysed in a thoroughgoing and painstaking way. The results show that the mid-principal stress effect generally exists in rock, the compressive ultimate strength of rock will be enhanced with the increase of the value of the mid-principal stress, and its enhancement degree varies with the kind of rock and the value of the third-principal stress from 14 percent to 44 percent. The existing strength theories of rock are also painstakingly analysed, and based on these theories of rock, especially on the octahedron shear stress strength theory and the twin shear stress strength theory, a six-parameter strength rule is proposed, $\tau_{13} = b_0 + b_1 \sigma_m + b_2 u \sigma + b_3 u \sigma^2 + b_4 u \sigma^3 + b_5 \tau_{12}$, which can be easily used and can much fit to the experimental data.

Key words: mid-principal stress effect; strength theory of rock; strength rule