

岩石损伤统计强度理论研究

A study on damage statistical strength theory for rock

曹文贵, 赵明华, 刘成学

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 本文从岩石微元强度服从 Weibull 分布的角度出发, 建立了模拟岩石破裂全过程的损伤本构模型。在此基础上, 根据岩石屈服或破坏的概念, 重点探讨了利用多元函数求极值的方法建立岩石强度理论的途径, 初步建立了一种新的岩石强度理论即岩石损伤统计强度理论及其建立方法, 与实测结果及其它岩石强度理论比较表明, 具有明显的优越性。

关键词: 损伤; 岩石强度理论; Weibull 分布; 岩石破坏; 多元函数

中图分类号: TU 459; O 346

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)06-0820-04

作者简介: 曹文贵(1963-), 男, 湖南南县人, 博士后, 副教授, 主要从事岩土工程教学和科研工作。

CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue

(Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on that the strength of rock micro-unit obeys the Weibull random distribution, this paper presents a damage constitutive model reflecting the full process of rock failure. Then, the approach of establishing rock strength theory using the method by which the extremum is obtained for pluralistic function is discussed according to the concept of yielding or failure of rock and a rock damage statistical strength theory. A way to establish strength theory of rock have been founded elementarily. It is of obvious superiority compared with practical results and other theories.

Key words: damage, rock strength theory, Weibull random distribution, rock failure, pluralistic function

0 前 言

岩石强度理论一直是岩石力学研究的基本内容, 也是岩体结构工程设计的核心, 尤其是岩体结构工程非线性数值分析与研究的关键之一。目前, 应用于岩土工程设计与研究的强度理论比较多^[1], 如 Mohr-Coulomb 准则、Drucker-Prager 准则和 Mises 准则等。这些破坏准则都存在许多缺陷和不足, 而且其应用范围也具有一定的局限性, 尤其是与工程实测结果存在较大差距, 使岩土工程设计的安全性及经济性得不到可靠的保证, 迫切需要建立能反映岩石破坏本质特点的强度理论, 这正是本文研究的核心内容。

目前, 岩石强度理论大都是基于岩石抗剪强度的概念建立起来的, 换句话说来讲就是岩石中存在的最大剪应力超过抗剪强度即认为破坏, 它无法准确反映岩石中复杂应力状态对强度的影响, 如中间主应力、拉应力、体积应力、最小主应力水平等对岩石强度的影响。虽然, 目前也存在一些强度理论考虑了其中某些因素的影响, 但与实际结果比较表明仍存在较大差距, 其问题的关键在于没有搞清楚岩石破坏的全过程。如果能有效地模拟岩石破坏的全过程, 即建立岩石破坏全过程的应力与应变关系模型, 这时只要能找到岩石破坏点(即峰值点), 岩石的破坏准则就可以很容易地建立起来。

Krajcinovic D^[2]、唐春安^[3]、李晓^[4]和徐卫亚^[5]等从岩石材料内部所含缺陷分布的随机性出发, 利用岩石微元强度服从正态或 Weibull 分布的特点, 建立了模拟岩石破裂全过程的损伤本构关系。曹文贵^[6,7]在此基础上引进新的岩石微元强度的表示方法, 利用微元强度服从 Weibull 分布的特点及统计损伤理论, 建立了反映岩软化和破裂全过程的岩石损伤软化统计本构模型, 并依据岩石三轴试验曲线的特点和 Weibull 分布参数对该模型的影响规律对该模型进行合理修正, 使该模型能较好地反映工程实际, 这为本文的研究奠定了坚实的基础。本文将在此基础上, 根据岩石破坏的概念, 重点探讨利用多元函数求极值的方法建立岩石强度理论的途径, 从而建立一种新的岩石强度理论。

1 岩石破裂全过程模拟的损伤软化统计本构模型

曹文贵^[8]基于 Drucker-Prager 岩石破坏准则表示的岩石微元强度, 利用岩石微元强度服从 Weibull 分布的特点, 建立了反映岩石破裂全过程的损伤软化统计本构模型:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1(1-D) + \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (1a)$$

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金资助项目(20020532008); 湖南大学科学基金和人才基金资助项目
收稿日期: 2004-01-13

$$\sigma_2 = E\varepsilon_2(1-D) + \mu(\sigma_1 + \sigma_3) \quad , \quad (1b)$$

$$\sigma_3 = E\varepsilon_3(1-D) + \mu(\sigma_1 + \sigma_2) \quad , \quad (1c)$$

式中 σ_i 与 ε_i 为名义应力与应变; E 与 μ 为岩石的弹性模量与泊松比; D 为岩石损伤变量或损伤因子, 可以表示为

$$D = 1 - \exp[-(F^*/F_0)^m] \quad , \quad (2)$$

其中: F_0 与 m 为 Weibull 分布参数; F^* 为岩石微元强度, 可以表示为

$$F^* = \alpha I_1^* + (J_2^*)^{1/2} \quad , \quad (3)$$

其中: α 为 Drucker-Prager 破坏准则参数, 即为与黏聚力 C 和内摩擦角有关的参数^[9]; I_1^* 为应力张量的第一不变量; J_2^* 为应力偏量的第二不变量, 分别表示为

$$I_1^* = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \quad , \quad (4)$$

$$J_2^* = [(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_1^* - \sigma_3^*)^2] / 6 \quad , \quad (5)$$

σ_i^* 为名义应力 σ_i 对应的有效应力 利用损伤的定义^[3-8]

$$\sigma_i^* = \sigma_i / (1-D) \quad , \quad (6)$$

以及虎克定律和应变等价性假设^[10]可以将式 (3) 用名义应力与应变表示为

$$F^* = (\alpha I_1 + J_2^{1/2}) E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad , \quad (7)$$

式中

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad , \quad (8)$$

$$J_2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 6 \quad . \quad (9)$$

F_0 与 m 为 Weibull 分布参数, 它们反映了岩石的力学性质。利用文献[8]的方法, 基于文献[11]的试验资料可得:

$$m = \frac{11.01417 + \sigma_3}{1.96644 + 0.3891\sigma_3} \quad , \quad (10)$$

$$F_0 = 110.56674 \ln(\sigma_3 + 8.74961) \quad , \quad (11)$$

式中 σ_3 为假三轴试验围压 (MPa), 上述就是文献[8]建立的岩石损伤软化统计本构模型, 该模型具有如下特点: 充分反映了岩石破裂的全过程, 尤其是岩石的软化特征; 充分反映了岩石强度受应力状态的影响, 围压增大, 岩石强度也随着增大, 这显然是与实际吻合的; 该模型较现有相关研究结果具有较明显的优越性, 计算结果可以较好地反映工程实际, 这为岩石损伤强度理论的建立奠定了坚实基础。

2 岩石损伤统计强度理论的建立

所谓岩石或材料的强度理论, 就是指在破坏时材料内部各应力分量之间的关系。通过前面所述方法, 已经建立起复杂应力状态下反映岩石受压破裂全过程的本构模型, 即岩石破裂全过程的应力与应变关系, 这为岩石损伤统计强度理论的建立奠定了坚实的基础。由于岩石破裂全过程应力应变曲线的极值性, 因此, 可以确定建立岩石损伤统计强度理论的基本思路就是利用上述模型寻找最大主应力或最大剪应力的极

值 (即岩石抗压和抗剪强度) 点, 从而找到此时对应的岩石或材料内部各应力分量之间的关系。具体做法是利用式 (1) 分别进行全微分得到下式:

$$d\sigma_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_2} d\varepsilon_2 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_3} d\varepsilon_3 \quad , \quad (12)$$

然后, 对 σ_1 求极值, 即令

$$\partial \sigma_1 / \partial \varepsilon_1 = 0 \quad , \quad (13)$$

由此即可建立起新的岩石损伤统计强度理论, 具体推导过程简述如下。

式 (7) 表示的岩石微元强度是用 ε_1 表示的, 如果用 ε_2 或 ε_3 表示, 也可将岩石微元强度表示为不同的如下形式:

$$F^* = F_{\varepsilon_1}^* = (\alpha I_1 + J_2^{1/2}) E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad , \quad (14a)$$

$$F^* = F_{\varepsilon_2}^* = (\alpha I_1 + J_2^{1/2}) E \varepsilon_2 / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad , \quad (14b)$$

$$F^* = F_{\varepsilon_3}^* = (\alpha I_1 + J_2^{1/2}) E \varepsilon_3 / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad . \quad (14c)$$

同样, 式 (4) 与 (5) 也可表示为如下不同形式:

$$I_1^* = (I_1^*) \varepsilon_1 = I_1 E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad , \quad (15a)$$

$$I_1^* = (I_1^*) \varepsilon_2 = I_1 E \varepsilon_2 / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad , \quad (15b)$$

$$I_1^* = (I_1^*) \varepsilon_3 = I_1 E \varepsilon_3 / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad , \quad (15c)$$

$$(J_2^*)^{1/2} = (\sqrt{J_2^*}) \varepsilon_1 = J_2^{1/2} E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad , \quad (16a)$$

$$(J_2^*)^{1/2} = (\sqrt{J_2^*}) \varepsilon_2 = J_2^{1/2} E \varepsilon_2 / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad , \quad (16b)$$

$$(J_2^*)^{1/2} = (\sqrt{J_2^*}) \varepsilon_3 = J_2^{1/2} E \varepsilon_3 / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad . \quad (16c)$$

分别对式 (1) 求微分可得

$$d\sigma_1 = H d\varepsilon_1 + H_2 dF_{\varepsilon_1}^* + H_3 dm + H_4 dF_0 + \mu d\sigma_2 + \mu d\sigma_3 \quad (17a)$$

$$d\sigma_2 = H d\varepsilon_2 + H_2 dF_{\varepsilon_2}^* + H_3 dm + H_4 dF_0 + \mu d\sigma_1 + \mu d\sigma_3 \quad (17b)$$

$$d\sigma_3 = H d\varepsilon_3 + H_2 dF_{\varepsilon_3}^* + H_3 dm + H_4 dF_0 + \mu d\sigma_1 + \mu d\sigma_2 \quad (17c)$$

式中:

$$H_2 = -HKL\varepsilon_1 \quad , \quad (18a)$$

$$K_2 = -HKL\varepsilon_2 \quad , \quad (18b)$$

$$L_2 = -HKL\varepsilon_3 \quad , \quad (18c)$$

$$H_3 = -HKN\varepsilon_1 \quad , \quad (19a)$$

$$K_3 = -HKN\varepsilon_2 \quad , \quad (19b)$$

$$L_2 = -HKN\varepsilon_3 \quad , \quad (19c)$$

$$H_4 = -HKP\varepsilon_1 \quad , \quad (20a)$$

$$K_4 = -HKP\varepsilon_2 \quad , \quad (20b)$$

$$L_3 = -HKP\varepsilon_3 \quad , \quad (20c)$$

$$H = E \exp[-(F^*/F_0)^m] \quad , \quad (21a)$$

$$K = (F^*/F_0)^m \quad , \quad (21b)$$

$$L = m / F^* \quad , \quad (21c)$$

$$N = \ln(F^*/F_0) \quad , \quad (21d)$$

$$p = m / F_0 \quad (21e)$$

分别对式 (15) 和 (16) 求微分可得

$$d(I_1^*)\varepsilon_1 = I_{11}d\varepsilon_1 + I_{12}d\sigma_1 + I_{13}d\sigma_2 + I_{14}d\sigma_3 \quad (22a)$$

$$d(I_1^*)\varepsilon_2 = I_{21}d\varepsilon_2 + I_{22}d\sigma_1 + I_{23}d\sigma_2 + I_{24}d\sigma_3 \quad (22b)$$

$$d(I_1^*)\varepsilon_3 = I_{31}d\varepsilon_3 + I_{32}d\sigma_1 + I_{33}d\sigma_2 + I_{34}d\sigma_3 \quad (22c)$$

$$d(\sqrt{J_2^*})\varepsilon_1 = J_{11}d\varepsilon_1 + J_{12}d\sigma_1 + J_{13}d\sigma_2 + J_{14}d\sigma_3 \quad (23a)$$

$$d(\sqrt{J_2^*})\varepsilon_2 = J_{21}d\varepsilon_2 + J_{22}d\sigma_1 + J_{23}d\sigma_2 + J_{24}d\sigma_3 \quad (23b)$$

$$d(\sqrt{J_2^*})\varepsilon_3 = J_{31}d\varepsilon_3 + J_{32}d\sigma_1 + J_{33}d\sigma_2 + J_{34}d\sigma_3 \quad (23c)$$

式中:

$$I_{11} = I_1 E / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (24a)$$

$$I_{21} = I_1 E / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (24b)$$

$$I_{31} = I_1 E / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (24c)$$

$$I_{12} = -(1 + \mu)(\sigma_2 + \sigma_3) E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 \quad (25a)$$

$$I_{22} = (1 + \mu)\sigma_2 E \varepsilon_2 / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 \quad (25b)$$

$$I_{32} = (1 + \mu)\sigma_3 E \varepsilon_3 / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 \quad (25c)$$

$$I_{13} = (1 + \mu)\sigma_1 E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 \quad (26a)$$

$$I_{23} = -(1 + \mu)(\sigma_1 + \sigma_3) E \varepsilon_2 / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 \quad (26b)$$

$$I_{33} = (1 + \mu)\sigma_3 E \varepsilon_3 / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 \quad (26c)$$

$$I_{14} = (1 + \mu)\sigma_1 E \varepsilon_1 / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 \quad (27a)$$

$$I_{24} = (1 + \mu)\sigma_2 E \varepsilon_2 / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 \quad (27b)$$

$$I_{34} = -(1 + \mu)(\sigma_1 + \sigma_2) E \varepsilon_3 / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 \quad (27c)$$

$$J_{11} = J_2^{1/2} E / [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (28a)$$

$$J_{21} = J_2^{1/2} E / [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (28b)$$

$$J_{31} = J_2^{1/2} E / [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (28c)$$

$$J_{12} = \frac{(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] - 6J_2}{6[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_1 \quad (29a)$$

$$J_{22} = \frac{(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] + 6\mu J_2}{6[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_2 \quad (29b)$$

$$J_{32} = \frac{(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] + 6\mu J_2}{6[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_3 \quad (29c)$$

$$J_{13} = \frac{(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] + 6\mu J_2}{6[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_1 \quad (30a)$$

$$J_{23} = \frac{(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] - 6J_2}{6[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_2 \quad (30b)$$

$$J_{33} = \frac{(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] + 6\mu J_2}{6[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_3 \quad (30c)$$

$$J_{14} = \frac{(2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] + 6\mu J_2}{6[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_1 \quad (31a)$$

$$J_{24} = \frac{(2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] + 6\mu J_2}{6[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_2 \quad (31b)$$

$$J_{34} = \frac{(2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] - 6J_2}{6[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 J_2^{1/2}} E \varepsilon_3 \quad (31c)$$

分别对式 (10) 及 (11) 求微分可得

$$dm = m_3 d\sigma_3 \quad (32)$$

$$dF_0 = F_{03} d\sigma_3 \quad (33)$$

分别对式 (14) 求微分可得

$$dF_{ei}^* = F_{i1} d\varepsilon_i + F_{i2} d\sigma_1 + F_{i3} d\sigma_2 + F_{i4} d\sigma_3 \quad (34)$$

其中:

$$F_{ik} = \alpha I_{ik} + J_{ik} \quad (i=1 \sim 3, k=1 \sim 4) \quad (35)$$

将式 (32) ~ (34) 代入式 (17), 并整理可得

$$A_1 d\sigma_1 + A_2 d\sigma_2 + A_3 d\sigma_3 + A_4 d\varepsilon_1 = 0 \quad (36a)$$

$$B_1 d\sigma_1 + B_2 d\sigma_2 + B_3 d\sigma_3 + B_4 d\varepsilon_2 = 0 \quad (36b)$$

$$C_1 d\sigma_1 + C_2 d\sigma_2 + C_3 d\sigma_3 + C_4 d\varepsilon_3 = 0 \quad (36c)$$

式中:

$$A_1 = F_{12} H_2 - 1 \quad (37a)$$

$$B_1 = K_2 F_{22} + \mu \quad (37b)$$

$$C_1 = L_2 F_{32} + \mu \quad (37c)$$

$$A_2 = \mu + H_2 F_{13} \quad (38a)$$

$$B_2 = K_2 F_{23} - 1 \quad (38b)$$

$$C_2 = L_2 F_{33} + \mu \quad (38c)$$

$$A_3 = H_2 F_{14} + H_3 m_3 + H_4 F_{03} + \mu \quad (39a)$$

$$B_3 = K_2 F_{24} + K_3 m_3 + K_4 F_{03} + \mu \quad (39b)$$

$$C_3 = L_2 F_{34} + L_3 m_3 + L_4 F_{03} - 1 \quad (39c)$$

$$A_4 = H + H_2 F_{11} \quad (40a)$$

$$B_4 = H + K_2 F_{21} \quad (40b)$$

$$C_4 = H + L_2 F_{31} \quad (40c)$$

联立式 (36a) ~ (36c) 求解可得 $d\sigma_1$, 再将其与式 (12) 进行比较得到 $\partial\sigma_1/\partial\varepsilon_1$, 最后, 将其代入式 (13) 可得

$$\frac{A_4 B_2 (B_3 C_2 - C_3 B_2)}{M_1 - M_2} = 0 \quad (41)$$

$$M_1 = (A_1 B_2 - B_1 A_2)(B_3 C_2 - C_3 B_2) \quad (42)$$

$$M_2 = (B_1 C_2 - C_1 B_2)(A_3 B_2 - B_3 A_2) \quad (43)$$

可以证明, B_2 及 $(B_3 C_2 - C_3 B_2)$ 都不可能为 0, 考虑到篇幅所限, 这里不给出详细证明, 因此:

$$A_4 = 0 \quad (44)$$

即

$$H + H_2 F_{11} = 0 \quad (45)$$

将式 (24a) 及 (28a) 代入式 (35), 再将式 (21a) 及 (35) 代入式 (45) 可得

$$E \exp[-(F^*/F_0)^m] - E \varepsilon_1 \exp[-(F^*/F_0)^m] \cdot (F^*/F_0)^m (m/F^*) \frac{(\alpha I_1 + J_2^{1/2})E}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} = 0 \quad (46)$$

即:

$$1 - E\varepsilon_1(F^*/F_0)^m(m/F^*) \frac{\alpha I_1 + J_2^{1/2}}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} = 0 \quad (47)$$

将式(14a)代入式(47)式可得

$$1 - (F^*/F_0)m = 0 \quad (48)$$

所以

$$F^* = F_0 m^{-1/m} \quad (49)$$

将式(49)代入式(14a)可得

$$E\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)}{\alpha I_1 + J_2^{1/2}} F_0 m^{-1/m} \quad (50)$$

将式(49)代入式(2),再将式(2)和(50)代入式(1a),并整理可得

$$\alpha I_1 + J_2^{1/2} = F_0 m^{-1/m} \exp(-1/m) \quad (51)$$

上式就是本文基于损伤统计理论建立的岩石损伤统计强度准则。由此可以看出,它与 Drucker-Prager 准则具有极为相似的形式。Drucker-Prager 强度准则是本文建立的岩石损伤统计强度准则的一种特殊情况,因此,可以看出本文提出的岩石损伤强度准则具有更为普遍的意义。

3 计算实例与讨论

利用文献[11]的资料,经过数据处理可得该岩石弹模 $E = 90.0 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.15$,内摩擦角 $\varphi = 31.3039^\circ$,黏聚力 $C = 54.89 \text{ MPa}$ 。就本文提出的岩石损伤统计强度准则与 Mohr-Coulomb 准则^[1]、Drucker-Prager 准则^[9]进行了比较分析,比较分析结果见图1。值得注意的是:图中结果是在假定 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的条件下得到的,与试验条件一致。由此可以看出,本文模型存在如下特点:本文准则与 Drucker-Prager 准则都考虑了体积应力 σ_0 ($\sigma_0 = I_1/3$) 对岩石强度的影响,后者是前者的一种特殊情况。但是,后者计算结果较前者明显趋于保守,这是因为 Drucker-Prager 准则是用以判别材料是否屈服,屈服时并没有达到最大强度,而本文准则是指最大强度,而非屈服的概念,后者与试验结果相差较远,本文结果与试验结果吻合;

在围压 σ_3 较小时,本文准则和 Mohr-Coulomb 准则与试验结果都吻合良好,但是随着 σ_3 的增加,本文准则与 Mohr-Coulomb 准则相差越来越大,而且, Mohr-Coulomb 准则得到的强度明显大于本文得到的结果,主要原因是由于 Mohr-Coulomb 准则是直线型式,不能反映岩石强度莫尔包络线的曲线特点,而本文准则却能反映该特点,说明本文准则更能反映实际;

本文准则不仅同时反映了体积应力 σ_0 、剪应力 $J_2^{1/2}$ 和中间主应力 σ_2 对岩石强度的影响,还反映了最小主应力 σ_3 对岩石强度的影响。

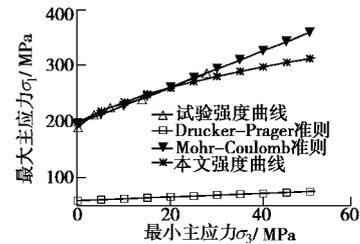


图1 岩石强度曲线比较

Fig. 1 Comparison between various strength curves of rock

4 结论

(1) 本文从岩石损伤的概念出发,从研究岩石破裂全过程模拟方法入手,建立了一种新的岩石强度理论即岩石损伤统计强度理论,这必将对岩石力学的发展产生深远的影响。

(2) 本文提出的岩石损伤强度理论与试验结果及其它强度理论相比,具有较明显的优越性。它不仅同时反映了体积应力 σ_0 、剪应力 $J_2^{1/2}$ 和中间主应力 σ_2 对岩石强度的影响,还反映了最小主应力 σ_3 对岩石强度的影响,深化了人们对岩石强度的认识。

参考文献:

- [1] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986. 45-59.
- [2] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. Int J Solids Structures, 1982, 18(7): 551-562
- [3] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993. 11-30.
- [4] 李 晓. 岩石峰后力学特性及其损伤软化模型的研究与应用[D]. 中国徐州: 中国矿业大学, 1995. 50-69.
- [5] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787-791.
- [6] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628-633.
- [7] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 184-187.
- [8] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3226-3231.
- [9] 张鲁渝, 郑颖人, 等. 有限元强度折减系数计算土坡稳定性的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.
- [10] Lemaitre J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984: 233-245.
- [11] 周维垣, 吴 澎, 杨若琼. 节理岩体的损伤模型[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会教育工作委员会编. 岩石力学新进展[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989. 37-53.