

文章编号:1673-9469(2010)02-0030-03

基于 Mohr 准则的岩石损伤本构模型及其修正研究

蒋维¹, 邓建¹, 司庆超²

(1.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083;2.河北工程大学 资源学院,河北 邯郸 056038)

摘要:基于 Mohr 准则,重新定义了岩石微元强度。考虑岩石微元强度服从随机分布的特点,结合损伤力学理论和统计强度理论,建立了三轴压缩条件下岩石损伤本构模型。为使建立的模型更具一般性,分析了模型参数与围压的关系,并据此对模型参数进行合理修正,从而建立出完整的岩石损伤本构模型。与试验结果比较,所建模型可以灵活地模拟各级围压下岩石破裂过程的全应力应变关系,尤其是应变软化特性。同时,该模型形式简单,应用方便,接近工程实际。

关键词:岩石破裂; Mohr 准则; 微元强度; 损伤; 本构模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Study on the constitutive model and its modifying for rock damage based on Mohr criterion

JIANG Wei¹, DENG Jian¹, SI Qing-chao²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Center South University, Hunan Changsha 410083, China;

2. College of Natural Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: Based on Mohr criterion, the rock micro-unit strength is redefined. Considering the characteristic that the strength of rock micro-unit is of stochastic distribution, using damage mechanics theory and the statistical strength theory, a damage constitutive model is established under rock triaxial compression test. To form a more general damage constitutive model, the relationship between model parameters and confining pressure is discussed and from which the model parameters are modified. Accordingly, a complete damage constitutive model is established. Contrast with triaxial compression test results, this model can well simulate the relation of stress-strain during the full process of rock failure under the various levels of confining pressure, especially the characteristic of strain softening. Besides, this model is simple and convenient to apply, capable of having properties approaching the actual situation of engineering projects.

Key words: rock failure; Mohr criterion; micro-unit strength; damage; constitutive model

岩石是一种天然地质材料,其内部包含各种随机分布的缺陷,在外载荷作用下,这些缺陷将繁衍和发展,岩石内部结构的力学性能也将连续发生变化。岩石破裂过程中的全应力应变关系研究一直是岩石力学与工程研究的重点。目前,岩石损伤本构模型的研究主要包括唯象学方法和统计学方法。前者引进内部变量从宏观上对损伤问题进行分析,后者以统计学为工具,假设岩石微元物理力学性能服从某种随机分布,推导出岩石损伤演化方程和损伤本构模型。采用第二种方法建立

岩石损伤本构模型的关键在于岩石微元强度的确定。自 D. Krajcinovic 等人将连续损伤理论与统计强度理论有机结合提出一统计损伤模型以来,许多学者^[1-6]均在这方面进行了研究,初步建立了各种岩石损伤本构模型。

在岩土领域中广泛采用了 Drucker-Prager 准则和 Mohr-Coulomb 准则,这两个准则把 Mohr 圆包络线近似为直线。在较小应力范围内,把 Mohr 圆包络线近似为线性,误差不大,但是在高应力条件下,应力范围变化很大,如果将 Mohr 圆包络线

近似为直线可能造成较大误差^[7]。而 Mohr 准则是岩石在各种应力状态下强度特征的真实逼近,它能较准确地反映岩石的强度条件。本文拟在前人研究的基础上,利用经典的 Mohr 准则,重新定义岩石微元强度,建立起三轴压缩条件下岩石损伤本构模型。为使建立的模型更具一般性,分析了模型参数与围压的关系并据此对模型参数进行了合理修正,从而建立起完整的岩石损伤本构模型,与试验结果比较显示了所建模型的正确性。

1 损伤本构模型的建立

1.1 损伤本构模型及损伤变量

利用 Lemaitre 应变等价性假说,建立岩石损伤本构关系如下^[1-2]:

$$[\sigma^*] = [\sigma]/(1 - D) = [E][\varepsilon]/(1 - D) \quad (1)$$

式中 $[\sigma^*]$ —有效应力矩阵; $[\sigma]$ —名义应力矩阵; $[E]$ —岩石材料弹性矩阵; $[\varepsilon]$ —应变矩阵; D —岩石损伤变量。

假定破坏前岩石微元服从虎克定律,即微元具有线弹性性质。

$$\varepsilon_1 = [\sigma_1^* - \mu(\sigma_2^* + \sigma_3^*)]/E \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1(1 - D) + \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

假设岩石微元破坏概率随岩石微元强度 F 的分布密度为 $P[F]$,定义损伤变量为^[3]。

$$D = \int_{-\infty}^F P(x) dx \quad (4)$$

1.2 岩石微元强度

岩石微元强度的确定是建立损伤演化本构方程的关键。Mohr 准则是岩石在各种应力状态下强度特征的真实逼近,它能较准确地反映岩石的强度条件。为了应用方便,常采用各种不同形式的曲线来逼近试验结果所作出的 Mohr 包络线,抛物线是常见的一种。

二次抛物线型 Mohr 准则的一般方程为^[8]

$$\tau_n^2 = \lambda(\sigma_n + H) \quad (5)$$

式中 H —单轴抗拉强度; λ —常数, $\lambda = \frac{\sigma_c^2}{2(\sigma_c + 2H)}$;
 σ_c —单轴抗压强度。

利用主应力表示的二次抛物线型 Mohr 准则,

选择材料的抗剪强度为随机变量,重新定义岩石微元强度 F

$$F = \sqrt{\lambda\left(\frac{\sigma_1^* + \sigma_3^*}{2} - \frac{\lambda}{2} + H\right)} \quad (6)$$

由式(1)、式(3)得

$$F = \sqrt{\frac{\lambda E \varepsilon_1}{2} \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} \right] - \frac{\lambda}{2} + H} \quad (7)$$

1.3 岩石损伤演化方程

岩石内部含有大量复杂分布的缺陷,在变形的过程中,这些缺陷将进一步劣化,这个过程用损伤演化来描述。以往的研究^[1-6]均采用 Weibull 分布或正态分布作为岩石微元强度的概率模型,取得了较好的效果。张明^[9]通过对岩石类材料破坏过程分析中采用的 Weibull 分布、正态分布、类 Weibull 分布所作的讨论和剖析,建议在准脆性材料损伤分析中采用对数正态分布,并建立了采用对数正态分布时的一维弹性损伤模型。

利用对数正态分布表示岩石微元强度的概率模型为

$$P(F) = \frac{1}{F S_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln F - F_0}{S_0}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中 F_0 、 S_0 —对数正态分布参数。

由式(4)和式(8)可得岩石损伤演化方程为

$$D = \int_{-\infty}^F \frac{1}{x S_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - F_0}{S_0}\right)^2\right] dx \\ = \Phi\left(\frac{\ln F - F_0}{S_0}\right) \quad (9)$$

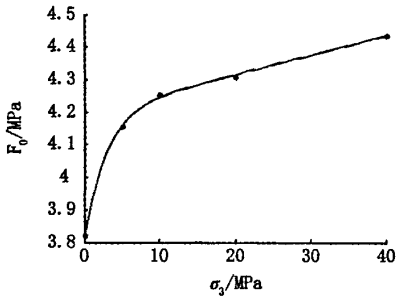
式中 $\Phi\left(\frac{\ln F - F_0}{S_0}\right)$ —标准正态分布函数。

对岩石微元强度与正态分布变量进行线性拟合可求得模型参数 F_0 、 S_0 的值,代入式(3)和式(9)即可得到三轴压缩条件下的岩石损伤本构模型。

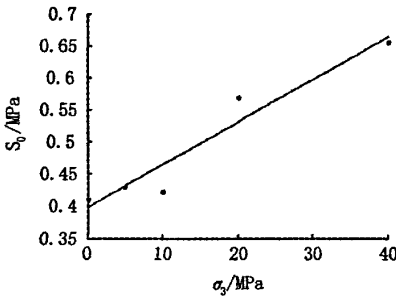
2 模型修正

按上述方法建立的模型,只是某一特定围压下岩石本构关系的反映,无法模拟不同围压下多条试验曲线的综合情况,为使建立的模型更具一般性,有必要对模型进行修正。

分析模型参数 F_0 、 S_0 与围压 σ_3 的关系,分别以模型参数 F_0 、 S_0 为纵坐标,围压 σ_3 为横坐标,由此得到 F_0 、 S_0 与围压 σ_3 的关系如图 1 所示。



(a) F_0 与 σ_3 的关系



(b) S_0 与 σ_3 的关系

图1 参数 F_0, S_0 与围压 σ_3 的关系
Fig.1 The curve of F_0, S_0 vs σ_3

对 F_0 与围压进行拟合,可得如下方程

$$F_0 = 4.2 \exp(0.001365\sigma_3) - 0.3787 \exp(-0.3417\sigma_3) \quad (10)$$

相关系数为 0.9975。

对 S_0 与围压进行拟合,可得如下方程

$$S_0 = 0.3981 + 0.006636\sigma_3 \quad (11)$$

相关系数为 0.9272。

由此,可求得任意围压下的模型参数值,代入式(3)和式(9)即可得到修正的岩石损伤本构模型。

3 试验验证

为了验证本文模型的正确性,引用文献[10]的岩石试验资料,其中:岩石弹性模量 $E = 93.5\text{MPa}$,泊松比 $\mu = 0.2$,取岩石抗拉强度 $H = 10\text{MPa}$, $\lambda = 30.7$ 。按上述方法将求得的各级围压下的参数值代入式(3)和式(9)即可得到不同围压下岩石统计损伤本构模型,将其与试验曲线对比,结果见图2。

由图2可以看出,所建模型与试验曲线吻合良好,可以很好地模拟各级围压下岩石破裂过程的全应力应变关系,说明所建模型是正确的。同时,该模型真实地反映了岩石应变软化特性、岩石强度随围压变化等特性,能较好地模拟工程实际。

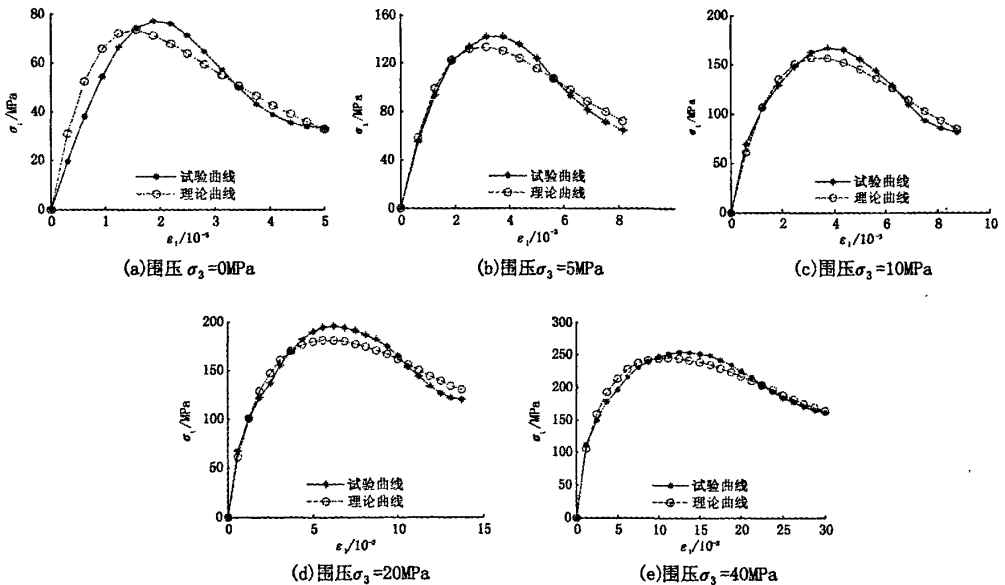


图2 理论曲线与试验曲线的比较

Fig.2 The comparison of theoretically curve and testing curve

主桥结构进行试验模态分析,4.1和4.2部分分别列出了试验模态分析结果(包括模态较典型阶次的频率,阻尼和振型)和有限元模态分析结果,通过所列出的实验分析结果和有限元分析结果可知其吻合程度良好。模态试验中各阶振型实测频率值与理论频率值比较如表1所示。

5 结论

通过振动频率、振型、阻尼等模态参数的比较,可看出实测各振型频率比理论值稍大,说明了东江大桥主桥的抗扭刚度、竖弯刚度等物理参数良好;但从识别的结果来看,环境振动实验分析结果遗漏了一些模态,这也说明实际工作中这些模态没有被激励起来;有限元计算与模态试验的比较结果验证了东江特大桥有限元模型的有效性,为该桥建立结构健康监测系统和进行结构状态评估提供分析的基础。

参考文献:

- [1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996.
- [2] REN W X, ZHONG Z H. Output - only modal parameter identification of civil engineering structures [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 17(3-4):429-444.
- [3] WILSON J C, LIU T. Ambient vibration measurements on a cable - stayed bridge [J]. Earthquake Engineering of Structural Dynamics, 1991(20): 723 - 747.
- [4] CHANG C C, CHANG T Y P, ZHANG Q W. Ambient vibration of long - span cable - stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2001, 6(1):46 - 53.
- [5] REN W X, PENG X L, LIN Y Q. Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable - stayed bridge [J]. Engineering Structures, 2005, 27(4): 535 - 548.
- [6] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社, 2004.

(责任编辑 刘存英)

(上接第32页)

4 结论

利用经典的 Mohr 准则,得到岩石微元强度新的表示方法,结合损伤力学理论和统计强度理论,建立了三轴压缩条件下的岩石损伤本构模型。模型曲线与试验曲线吻合良好,可以灵活地模拟各级围压下岩石破裂过程的全应力应变关系,尤其是应变软化特性。模型形式简单,应用方便,接近工程实际。

参考文献:

- [1] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993.
- [2] 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(16):628 - 633.
- [3] 曹文贵,张升. 基于 Mohr - Coulomb 准则的岩石损伤

统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1):43 - 47.

- [4] 友卿. 岩石强度的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 23 - 27.
- [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] 李杭州,廖红建,盛谦. 基于统一强度理论的软岩损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1331 - 1336.
- [7] 余成学,刘杰. 基于 Mohr 强度理论的双参数抛物线型屈服准则[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(1):31 - 34.
- [8] 赵彭年. 松散介质力学[M]. 北京:地震出版社, 1995.
- [9] 张明,李仲奎,苏霞. 准脆性材料弹性损伤分析中的概率体元建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4282 - 4288.
- [10] 曾亚武,赵震英,朱以文. 岩石材料破坏形式的分叉分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7):4282 - 4288.

(责任编辑 刘存英)

基于Mohr准则的岩石损伤本构模型及其修正研究

作者: [蒋维](#), [邓建](#), [司庆超](#), [JIANG Wei](#), [DENG Jian](#), [SI Qing-chao](#)
 作者单位: [蒋维, 邓建, JIANG Wei, DENG Jian \(中南大学, 资源与安全工程学院, 湖南, 长沙, 410083\)](#), [司庆超, SI Qing-chao \(河北工程大学, 资源学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#)
 刊名: [河北工程大学学报 \(自然科学版\)](#) 
 英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
 年, 卷(期): 2010, 27 (2)
 被引用次数: 1次

参考文献(10条)

1. [唐春安](#) [岩石破裂过程中的灾变](#) 1993
2. [曹文贵](#); [方祖烈](#); [唐学军](#) [岩石损伤软化统计本构模型之研究](#) 1998(16)
3. [曹文贵](#); [张升](#) [基于Mohr-Coulomb准则的岩石损伤统计分析方法研究](#)[期刊论文]-[湖南大学学报\(自然科学版\)](#) 2005(01)
4. [友卿](#) [岩石强度的损伤力学分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1999(01)
5. [徐卫亚](#); [韦立德](#) [岩石损伤统计本构模型的研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(06)
6. [李杭州](#); [廖红建](#); [盛谦](#) [基于统一强度理论的软岩损伤统计本构模型研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2006(07)
7. [余成学](#); [刘杰](#) [基于Mohr强度理论的双参数抛物线型屈服准则](#)[期刊论文]-[武汉大学学报\(工学版\)](#) 2008(01)
8. [赵彭年](#) [松散介质力学](#) 1995
9. [张明](#); [李仲奎](#); [苏霞](#) [准脆性材料弹性损伤分析中的概率体元建模](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005(23)
10. [曾亚武](#); [赵震英](#); [朱以文](#) [岩石材料破坏形式的分叉分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(07)

本文读者也读过(10条)

1. [岳洋](#). [YUE Yang](#) [基于不同分布的岩石损伤本构模型的比较](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2010, 36(24)
2. [许江](#). [李树春](#). [刘延保](#). [李克钢](#). [XU Jiang](#). [LI Shuchun](#). [LIU Yanbao](#). [LI Kegang](#) [基于Drucker-Prager准则的岩石损伤本构模型](#)[期刊论文]-[西南交通大学学报](#)2007, 42(3)
3. [杨圣奇](#). [徐卫亚](#). [苏承东](#). [YANG Sheng-qi](#). [XU Wei-ya](#). [SU Cheng-dong](#) [考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#)2005, 24(24)
4. [周建廷](#). [刘元雪](#). [ZHOU Jian-ting](#). [LIU Yuan-xue](#) [岩土各向同性损伤本构模型](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2007, 29(11)
5. [金玉](#). [王向东](#). [徐道远](#). [李同春](#) [基于无损弹塑性模型的混凝土损伤定量分析](#)[期刊论文]-[河海大学学报\(自然科学版\)](#)2003, 31(6)
6. [张安康](#). [陈士海](#). [杜荣强](#). [魏海霞](#). [ZHANG An-kang](#). [CHEN Shi-hai](#). [DU Rong-qiang](#). [WEI Hai-xia](#) [岩石类材料的能量基率相关弹塑性损伤模型](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)2010, 31(z1)
7. [张莱](#). [陆桂华](#). [ZHANG Lai](#). [LU Gui-hua](#) [基于应变状态的岩石损伤演化模型](#)[期刊论文]-[河海大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 38(2)
8. [蒋维](#). [邓建](#). [JIANG Wei](#). [DENG Jian](#) [基于对数正态分布的岩石损伤统计分析方法研究](#)[期刊论文]-[南华大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 24(2)
9. [曹文贵](#). [张升](#). [赵明华](#). [CAO Wen-gui](#). [ZHANG Sheng](#). [ZHAO Ming-hua](#) [基于新型损伤定义的岩石损伤统计本构模型探讨](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)2006, 27(1)
10. [张尧](#). [杨林德](#). [熊良宵](#). [ZHANG Yao](#). [YANG Lin-de](#). [XIONG Liang-xiao](#) [基于双剪统一强度准则的岩石损伤本构模型](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2008, 25(3)

引证文献(2条)

1. 傅鹤林, 刘运思, 李凯, 伍毅敏, 董辉 裂隙损伤岩体在渗流作用下的边坡稳定性分析[期刊论文]-中国公路学报 2013(4)
2. 朱建明, 程海峰, 姚仰平 基于SMP准则的破裂岩统计损伤软化模型及其应用研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2013(z2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb201002009.aspx