

文章编号:1673-9469(2008)03-0023-03

基于双剪统一强度准则的岩石损伤本构模型

张尧,杨林德,熊良宵

(同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:基于岩石微元强度概率分布理论,以双剪统一强度准则作为分布参量,建立了岩石损伤统计本构模型,并采用极值解法确定模型的参数。通过对理论曲线与试验曲线进行对比,证明所建立的模型可以很好的反映岩石的应力-应变曲线。通过对参数 b 、 m 、 F_0 的讨论,发现 b 值对峰值前应力-应变曲线无明显影响,但对峰值后的软化阶段有所影响; m 值的大小对峰值后的脆性有影响; F_0 值的大小对峰值应力或岩石强度有影响。

关键词:双剪强度准则;岩石损伤;本构模型;微元强度参数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Study on the statistical model of rock damage based on twin shear unified failure criterion

ZHANG Yao, YANG Lin-de, XIONG Liang-xiao

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By using the form of new rock micro-unit strength based on Twin Shear unified failure criterion, which satisfies weibull random distribution, a statistical damage constitutive model was developed. The parameters have been gotten by using the method for calculating the extremity of function according to the extremity characteristics of rock deformation curve. Comparison with the result of triaxial compression tests shows that this model can reflect well the relationship between stress and strain of rock. Through the discussion on parameters b , m and F_0 in the constitutive damage model, it is found that the change of b has no effect on the pre-peak deformation curve and some effect on the post-peak softening phase; the value of m has some effect on the post-peak brittleness; the value of F_0 has effect on the peak stress or rock strength.

Key words: twin shear criterion; rock damage; constitutive model; micro-unit strength parameter

统计损伤力学是研究岩石破裂过程的有效方法,目前对岩石损伤本构关系的研究主要有两条途径:其一是以试验为基础,假定岩石在荷载作用下损伤变量和应力应变服从某种关系,从而建立损伤本构模型;其二是从岩石微元强度随机分布的特点出发,建立损伤变量和应力应变状态的关系,从而建立岩石损伤本构方程。利用第二种方法建立反映岩石损伤模型,其关键在于岩石微元强度的确定,已有很多学者基于不同的强度准则确定岩石微元强度,从而建立岩石损伤统计模型。

如曹文贵^[1]基于 Drucker-Prager 准则确定了微元强度,并建立了三维岩石损伤演化方程和岩石损伤软化本构方程。随后又从探讨基于 Mohr-Coulomb 准则的新的岩石微元强度表示方法,建立了反映岩石破裂全过程的损伤软化统计本构模型^[2]。李杭州^[3]基于统一强度理论,在考虑洛德参数的基础上,得到随洛德参数和中间主应力系数变化的材料统一强度参数,并假定软岩微元强度分布统计概率,定义软岩的统计损伤变量,依据统一强度理论建立三轴应力状态下软岩的损伤统

收稿日期:2008-05-19

基金项目:雅砻江水电开发联合研究基金(50639090)资助

作者简介:张尧(1982-),男,吉林长春人,硕士研究生,从事岩石力学方面的研究。

计本构模型。

本文拟以双剪统一强度准则为基础,通过重新定义岩石微元强度,建立岩石损伤统计本构模型,包括采用极值法确定模型的参数,及讨论对应力-应变曲线的影响因素。

1 双剪统一强度理论

俞茂宏通过考虑作用于双剪单元上的全部应力分量及其对材料破坏的不同影响,建立了一个新的统一强度理论^[4]。其数学表达式为

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

$$(F > F')$$

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

$$(F \leq F')$$

式中 b - 反映中间主剪应力作用的权系数; β - 反映正应力对材料破坏的影响系数; k - 材料的强度参数。

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

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

当 $\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha}$ 时,有

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

式中 α - 材料单轴强度拉压比; σ_1 - 材料的单轴抗拉强度。

当 $b = 0$ 时,统一强度准则退化成为 Mohr - Coulomb 强度准则,它界定了统一强度准则的下限;当 $b = 1$ 时,统一强度准则退化为双剪强度准则,它界定了统一强度准则的上限。

2 统计损伤变量与统计损伤模型

2.1 统计损伤变量

利用 J. Lemaitre 应变等价性假说,可以建立如下岩石损伤的本构关系:

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

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

由于岩石是一种非均匀受力材料,内含大量随机分布的空隙、空洞、界面等缺陷,在外荷载作用下,岩石微元的破坏是随机的,本项研究拟将发生破坏的微元数 N_f 与微元总数 N 的比例定义为损伤变量 D ,即 $D = N_f/N$ 。设岩石微元的破坏概率随岩石微元强度 F^* 的分布密度为 $P[F^*]$,则可将岩石统计损伤变量表述为

$$D = \int_{-\infty}^{F^*} P[x] dx \quad (2)$$

2.2 岩石微元强度的确定

本文拟基于双剪统一强度理论,提出岩石微元强度 F 的表示方法:

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

$$F^* = \sigma_1^* - \frac{\alpha}{1 + b}(b\sigma_2^* + \sigma_3^*) =$$

$$\frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} \left[\sigma_1 - \frac{\alpha}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

当 $\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha}$ 时,有

$$F^* = \frac{1}{1 + b}(\sigma_1^* + b\sigma_2^*) - \alpha\sigma_3^* =$$

$$\frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} \left[\frac{1}{1 + b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 \right]$$

2.3 岩石统计损伤演化方程的建立

本文研究的基本假定如下:

1) 假定材料性质在宏观上各向同性,其损伤亦为各向同性。

2) 岩石微元强度破坏前服从虎克定律,具有线弹性性质。

3) 各微元强度服从 Weibull 分布,其概率密度函数为

$$P[F^*] = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^m \right]$$

式中 F^* - 岩石微元强度; m 与 F_0 - Weibull 分布参数,它们反映岩石材料的力学性质。

代入式(2)中有

$$D = 1 - \exp \left[- \left(F^*/F_0 \right)^m \right] \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),则可得到岩石损伤本构方程为

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^m \right] + \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

2.4 模型参数 m 和 F_0 的确定

考虑到峰值应力及其应变这两个指标在试验中易于得到,因此可根据它们满足的条件^[5-6]:

① $\varepsilon = \varepsilon_c$, $\sigma = \sigma_c$; ② $\varepsilon = \varepsilon_c$, $d\sigma/d\varepsilon = 0$, 将式(4)代入上述条件,可得^[7]

$$m = \frac{1}{-\ln \left\{ \left[\sigma_c - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \right] / E\varepsilon_c \right\}} \quad (5)$$

$$F_0 = m^{\frac{1}{m}} F^* \quad (6)$$

3 试验验证

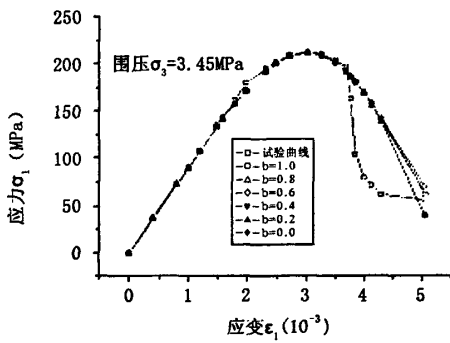
为了验证本文模型的合理性,引用文献[8]的

岩石三轴试验资料:岩石弹性模量 E 为 90.0MPa,泊松比 μ 为 0.15,内摩擦角 φ 为 31.3039°。首先利用式(5)计算得到 m 值,后按式(6)计算得到 F_0 值。现取围压为 3.45MPa 和 6.9MPa 的情况进行分析,将不同 b 值下计算得到的模型参数列于表 1 和 2。

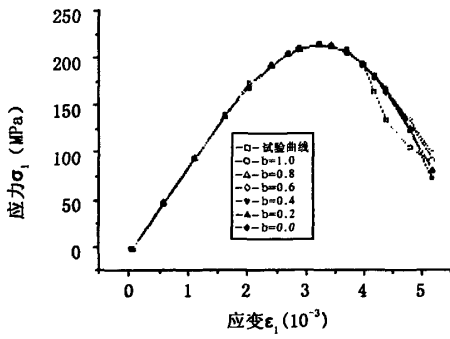
表 1 模型参数

Tab.1 Model parameters

σ_3 /MPa	m	b	F_0 /MPa
3.45	3.846	0.0	389.07
		0.2	325.18
		0.4	279.54
		0.6	245.31
		0.8	218.69
		1.0	197.37
6.9	3.447	0.0	435.26
		0.2	364.70
		0.4	314.30
		0.6	276.50
		0.8	247.09
		1.0	223.57



(a) 围压 $\sigma_3=3.45$ MPa



(b) 围压 $\sigma_3=6.9$ MPa

图 1 试验曲线与理论曲线的比较

Fig.1 Comparison between experimental and theoretical curves

由图 1 可知:(1)两种围压情况下,理论曲线与试验曲线均吻合较好,在峰值前理论值与试验值基本一致,说明本文建立的模型是合理的。(2)同一围压下, b 值的变化对峰值前应力-应变曲线无明显影响,但对峰值后的软化阶段有所影响。

为了分析参数 F_0 和 m 对理论曲线的影响,取围压为 6.9MPa 和 $b=1.0$ 时,分别研究 F_0 和 m 的变化对理论曲线的影响,由图 3 可知:(1)当围压、 b 值和 m 值不变时,不同 F_0 值的理论曲线形状差异不大, F_0 值越大,岩石峰值应力也越大,说明岩石强度越大。(2)当围压、 b 值和 F_0 值不变时,随着 m 值的增大,峰值后的曲线将变陡,脆性增强,随着 m 值的减小,峰值后的曲线将变缓,延性增强。

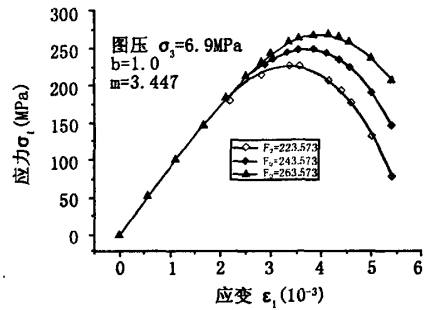


图 2 F_0 对岩石本构模型的影响

Fig.2 The effect on constitutive model of the parameter F_0

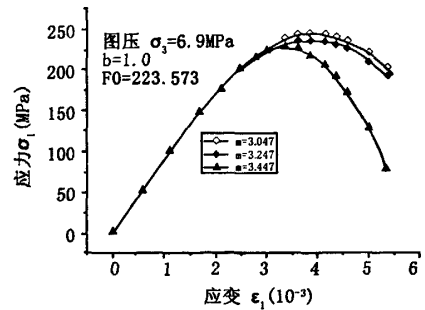


图 3 m 对岩石本构模型的影响

Fig.3 The effect on constitutive model of the parameter m

4 结论

通过理论结果与试验结果进行对比,发现理论曲线与试验曲线比较吻合,说明本文建立的模型是合理的。同时,通过对参数 b 、 m 、 F_0 的讨论,发现 b 值对峰值前应力-应变曲线无明显影响,但对峰值后的软化阶段有所影响;(下转第 45 页)

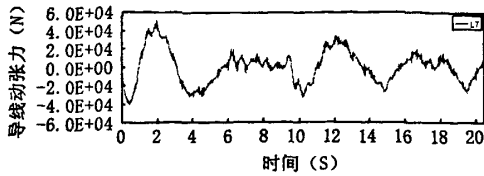


图8 导线动张力时程

Fig.8 Time of dynamic tension of lead wire

3 结束语

以台风“麦莎”作用下某输电塔结构为工程背景,反演给出了输电塔在台风作用下的风荷载分布和导线的动张力时程,证实了基于缩聚串联多自由度模型的荷载反演方法的工程实用性,为进一步研究输电塔的风荷载提供了一个有力的工具。

(上接 25 页) m 值的大小对峰值后的脆性有影响, m 值越大,脆性越强, m 值越小,延性越强; F_0 值的大小对峰值应力有影响, F_0 值越大,峰值应力越大,岩石强度越高。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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): 44 - 47.
- [3] 李杭州,廖红建,盛谦. 基于统一强度理论的软岩损

(上接第 41 页)

参考文献:

- [1] GARBA J A, FANSON J L. Adaptive structures for precision controlled large space systems[J]. Journal of Intel Mater Syst Strut, 1992, 3(2): 348 - 366.
- [2] HAFTKA R T, ADELMAN H M. Selection of actuator locations for static shape control of large space structures by heuristic integer programming [J]. Computers & Structures, 1985, 20: 575 - 582.
- [3] KIM Y, JUNKINS J L. Measure of controllability for actuator placement [J]. Journal of Guidance Control, and Dynamics, 1991, 14(5): 895 - 902.

参考文献:

- [1] 李杰. 生命线工程抗震 - 基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126 - 131.
- [3] 谢强,张勇,李杰. 华东 500kV 以上 5237 线输电线路风致倒塔事故的调查分析[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 59 - 63.
- [4] 敖翔. 空间框架结构时域参数识别与荷载反演研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [5] 何涛,谢强,赵昕,等. 高压输电塔结构风荷载反演与导线动张力反演研究[R]. 同济大学生命线工程研究所, 上海: 同济大学, 2005.

(责任编辑 刘存英)

伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1331 - 1336.

- [4] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 廖华林. 基于 Mohr - Coulomb 准则的岩石损伤统计本构模型[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6): 85 - 87.
- [6] 刘成学, 杨林德, 曹文贵. 岩石统计损伤软化本构模型及其参数反演[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 453 - 457.
- [7] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 345 - 349.
- [8] 耶格 J C, 库克 N G W, 中国科学院工程力学研究所译. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

(责任编辑 刘存英)

- [4] JUNKINS J L, KIM Y. Introduction to dynamics and control of flexible structures [M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.
- [5] 徐小胜, 于登云, 曲广吉. 模态价值分析在航天器模型降阶中的应用研究[J]. 中国空间科学技术, 2003, 12(6): 1 - 6.
- [6] 郑骥. ANSYS 在压电智能板振动主动控制中的应用[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(2): 14 - 16.
- [7] 曹丽雅, 高瑞贞, 袁伟泽, 等. 基于能力最小准则确定压电片位置及仿真[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(1): 21 - 24.

(责任编辑 闫纯有)

基于双剪统一强度准则的岩石损伤本构模型

作者: [张尧](#), [杨林德](#), [熊良宵](#), [ZHANG Yao](#), [YANG Lin-de](#), [XIONG Liang-xiao](#)
 作者单位: [同济大学, 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海, 200092](#)
 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): 2008, 25 (3)
 被引用次数: 2次

参考文献(8条)

1. 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(06)
2. 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)
3. 李杭州;廖建红;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)
4. 俞茂宏 [双剪理论及其应用](#) 1998
5. 廖华林 [基于Mohr-Coulomb准则的岩石损伤统计本构模型](#)[期刊论文]-[石油钻采工艺](#) 2005(06)
6. 刘成学;杨林德;曹文贵 [岩石统计损伤软化本构模型及其参数反演](#)[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#) 2007(03)
7. 杨明辉;赵明华;曹文贵 [岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法](#)[期刊论文]-[水利学报](#) 2005(03)
8. 耶格 J C;库克 N G W;中国科学院工程力学研究所 [岩石力学基础](#) 1983

本文读者也读过(10条)

1. [刘奉银](#), [俞茂宏](#), [殷建华](#), [周成](#), [LIU Feng-yin](#), [YU Mao-hong](#), [YIN Jian-hua](#), [ZHOU Cheng](#) [双剪统一强度研究的扭转试验应力路径与控制](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#)2005, 24(14)
2. [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, 21(7)
3. [王利](#), [王正一](#), [WANG Li](#), [WANG Zheng-yi](#) [长壁回采围岩破损规律的数值模拟研究](#)[期刊论文]-[河南理工大学学报\(自然科学版\)](#)2009, 28(4)
4. [王衍斌](#), [WANG Yan-bin](#) [双剪强度准则在Mohr应力空间中的表述](#)[期刊论文]-[水电站设计](#)2009, 25(3)
5. [廖建红](#), [韩波](#), [丁春华](#), [程殊伟](#), [Liao Hongjian](#), [Han Bo](#), [Ding Chunhua](#), [Cheng Shuwei](#) [复杂应力状态下土体有效强度指标的确定](#)[期刊论文]-[西安交通大学学报](#)2001, 35(5)
6. [韦立德](#), [杨春和](#), [WEI Li-de](#), [YANG Chun-he](#) [压剪应力条件下各向异性岩石损伤本构模型和渗流模型\(I\):理论模型](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)2006, 27(3)
7. [岳洋](#), [YUE Yang](#) [基于不同分布的岩石损伤本构模型比较](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2010, 36(24)
8. [阳建红](#), [周敬恩](#), [刘朝丰](#), [YANG Jian-hong](#), [ZHOU Jing-en](#), [LIU Chao-feng](#) [基于环境压强下NEPE固体推进剂双剪强度准则](#)[期刊论文]-[固体火箭技术](#)2007, 30(3)
9. [李树春](#), [许江](#), [李克钢](#), [LI Shu-chun](#), [XU Jiang](#), [LI Ke-gang](#) [基于初始损伤系数修正的岩石损伤统计本构模型](#)[期刊论文]-[四川大学学报\(工程科学版\)](#) 2007, 39(6)
10. [俞茂宏](#), [管月稳](#), [张永强](#), [胡小荣](#) [岩石材料模型发展100年回顾](#)[会议论文]-2000

引证文献(2条)

1. [邱康](#), [陈勉](#), [金衍](#) [基于统计损伤的井壁坍塌压力模型](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2011(7)
2. [龚禽](#), [曲文峰](#), [行鹏飞](#), [赵奎](#) [岩石损伤理论研究进展](#)[期刊论文]-[铜业工程](#) 2011(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjkjxyxb200803007.aspx