

岩体微平面损伤模型的 Abaqus 用户子程序 Vumat 验证

杨盼¹ 陈新¹ 李明耀² 陆瑞全¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 100083 2. 中国科学院力学研究所, 100190)

摘要: 本文探讨岩体微平面损伤模型^[1]在 Abaqus 中的实现。对课题组编制的 Vumat 用户子程序, 采用砂岩三轴压缩试验进行算例验证。算例分析表明, 该模型能表征砂岩的脆延转换宏观力学行为对应的各向异性损伤力学机制。

关键词: 微平面, 本构关系, 数值模拟, Vumat 用户子程序, 损伤变量

一、岩体微平面损伤模型简介

陈新和 Bazant^[1]提出了岩体的微平面损伤模型。二元介质模型, 即将节理岩体的微平面视为由岩石和裂隙面两个力学基元并联而成, 裂隙面力学基元所占的比例 ω 定义为微平面的损伤变量。采用法向不分解、切向分解形式, 对微平面上的岩石和裂隙面两个力学基元的非弹性力学响应进行解耦, 对两个力学基元独立地建立它们在法向拉伸、法向压缩和压剪条件下的微平面应力边界方程, 以及损伤演化方程作为岩体的微平面非弹性损伤本构关系^[1]。

1.1 微平面损伤方程的建立

当岩石和裂隙面基元各自的弹性试应力分别超过上述应力边界时, 保持微平面上两个基元的应变分量不变, 将弹性试应力拉回到应力边界上, 得到本加载步结束时两个基元的最终应力。在几何约束条件下, 岩体的宏观应力张量为微平面上岩体各应力分量的方向积分^[1]:

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{4\pi} \oint 3(\sigma_N^f N_{ij} + \sigma_M^f M_{ij} + \sigma_L^f L_{ij}) dS$$

在微平面上损伤变量定义为裂隙面力学基元所占的比例 w , 损伤变量的烟花即裂隙面基元比例的变化。岩石基元的上述损伤力学机制与它的非弹性变形发展是密切相关的。当体积膨胀应变、微平面法向偏量拉应变和微平面剪应变的非弹性变形对应的损伤演化机制单独存在时, 损伤演化方程可简写为^[2]:

$$\omega = 1 - e^{-(\varepsilon/a)^q}$$

图 1 给出了 a, q 在不同取值下的微平面损伤变量 w 随微平面应变的变化曲线。

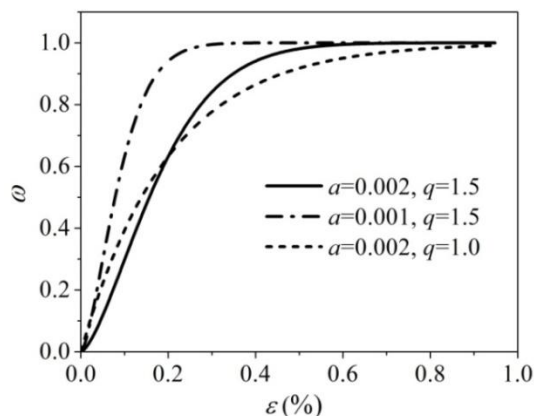
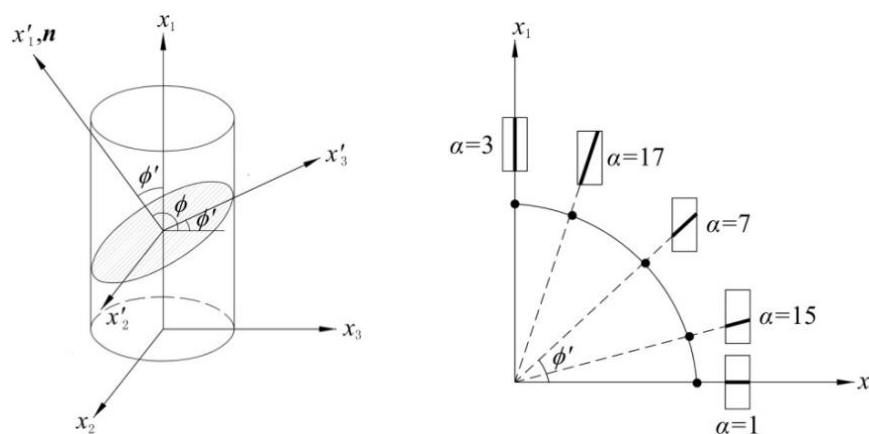


图 1 微平面损伤随应变历史变量的变化曲线^[1]

二、算例验证

2.1 算例

经过研究,编制了基于应力边界的岩体微平面损伤二元介质模型 Fortran 计算程序,利用 Vumat 用户子程序计算非弹性损伤本构关系,为了更好地模拟岩体的非线性力学响应。在整体坐标系 $\alpha x_1 x_2 x_3$ 下,最大压应力和围压分别沿着 x_1 轴和 x_2 轴、 x_3 轴施加。这些微平面的倾向都为 $\theta^{(\alpha)}=0^\circ$, 与 x_1 轴倾角 $\phi^{(\alpha)}=\phi-90^\circ$ 分别为 0° 、 45° 和 90° , 见图 2。

图 2 $\alpha=1$ 、7、3 微平面的方位

本文建立的基本模型如图 3 所示:

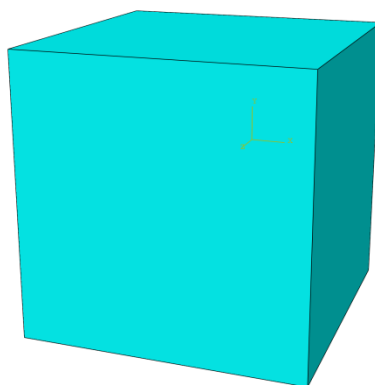


图 4 分别绘出了围压分别为 $p=10$ 、 100 MPa 时的宏观轴向应力随宏观轴向应变, 其中实线为理论解^[1], 散点为 ABAQUS 调用 Vumat 用户子程序计算的结果。

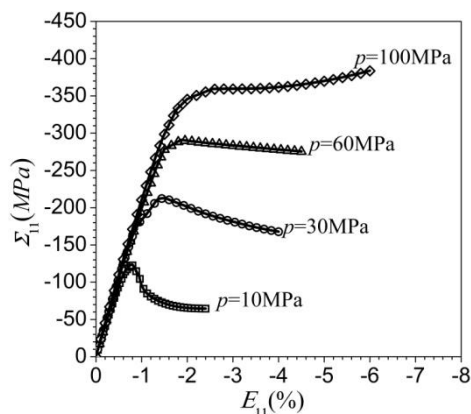


图 4 砂岩三轴压缩试验的宏观轴向应力随宏观轴向应变的变化曲线

图 5 绘出了各围压情况下的 $\alpha=1$ 、7 和 3 微平面的损伤变量即节理连通率随宏观轴向应变的变化曲线。

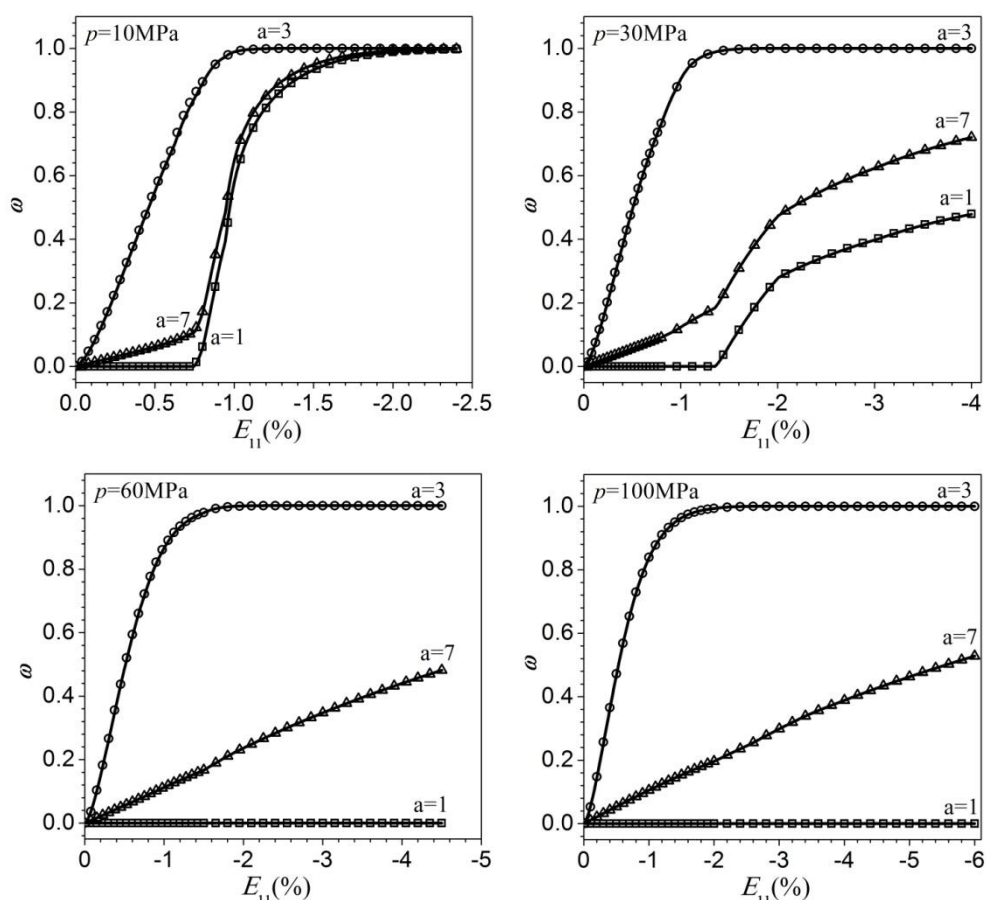


图 5 各微平面上的节理连通率随宏观轴向应变的变化曲线

三、结论

可以看出, 当围压 $p=10\text{MPa}$ 时, 随着轴向压应变的增加砂岩发生应变软化, 通过对比, 明显看出利用 Vumat 用户子程序模拟的结果与理论结果吻合。当围压 $p=100\text{MPa}$ 时, 随着轴向压应变的增加砂岩发生应变硬化。在各围压下, 当宏观轴向应变相同时, 随着微平面倾角 ϕ 的增大, 微平面的损伤变量值增大, 平行于加载轴的 $a=3$ 微平面损伤变量值最大、损伤发展最快, 而垂直于加载轴的 $a=1$ 微平面损伤变量值最小、损伤发展最慢。当围压较高时 (100MPa), 垂直于加载轴的 $a=1$ 微平面无损伤发展, 而缓倾角 $a=7$ 微平面的损伤发展速度显著降低, 说明围压的增大抑制了微平面上损伤的演化。

参 考 文 献

- 1 Chen X, Bažant Z P. Microplane Damage Model for Jointed Rock Masses. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38(14):1431-1452.
- 2 陈新, 杨强, 李德建. 岩体裂隙网络各向异性损伤力学效应研究. 科学出版社, 2016: 311-319