

大理岩破坏过程的三维细观弹塑性损伤模拟研究

赵吉坤¹, 张子明², 刘仲秋², 王立鹏²

(1. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2. 河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了考虑岩石细观局部塑性变形, 基于应变空间理论导出细观弹塑性损伤模型, 采用有限元计算方法实现岩石三维破裂过程的数值模拟。提出细观破坏单元网格消去法, 利用位移加载来实现岩石逐渐破裂过程; 模拟二维、三维大理岩三点弯曲梁弹塑性损伤破坏试验, 得到岩石非线性应力-应变曲线和不同载荷阶段弹塑性损伤破裂演化系列图像; 分析细观非均匀性对岩石宏观破裂力学行为的影响。试验研究表明, 三维破裂比二维破裂更为复杂, 本文所建模型可以有效地模拟岩体的三维破坏过程。

关键词: 数值模拟; 弹塑性损伤; 大理岩; 破坏过程

中图分类号: TD853.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1309-07

作者简介: 赵吉坤(1977-), 男, 山东茌平人, 博士, 副教授, 主要从事岩石及混凝土细观损伤与断裂的数值模拟研究。E-mail: jikunzhao_2006@163.com。

3D numerical simulation of elasto-plastic damage and failure process of marble rock

ZHAO Ji-kun¹, ZHANG Zi-ming², LIU Zhong-qiu², WANG Li-peng²

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Department of Mechanical Engineering, College of Civil Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to consider local plastic deformation of rocks on mesoscopic level, a constitutive model of elasto-plastic damage based on the incremental theory was deduced in strain space, and the failure elements deleting method was used to simulate crack propagation in program so as to explicitly show the extension of the cracks in rocks. By following a simple elasto-brittle constitutive relation, the complete progressive failure of 3D rock was obtained. Finally, three-point bending beam experiments were conducted. Complete nonlinear stress-strain curves as well as fracture images during the damage evolution process were obtained. It was by the numerical simulation results shown that 3D failure process was much more complicated than 2D failure process. The proposed model was a useful and effective tool to simulate the failure process of heterogeneous materials.

Key words: numerical simulation; elasto-plastic damage; marble rock; failure process

0 引言

岩石材料本身的非均匀性, 使其断裂破坏过程复杂化, 如何对这种复杂的损伤断裂过程进行研究, 一直是研究者多年来的研究课题。国内外很多学者在裂纹扩展及其导致岩体破坏方面做了大量实验研究^[1-3]。随着计算机技术的发展, 在传统的理论分析和实验研究的基础上, 数值模拟技术被用来模拟岩石的破坏过程, 研究岩石的破坏机制。边界元方法^[4]在模拟裂纹扩展方面有成功的应用, 并且考虑了岩体受压后裂纹面闭合的问题。此外, 也有些学者利用无网格方法^[5]和流形元方法^[6]研究裂纹扩展问题。朱万成、唐春安等^[7]利用弹性损伤本构方程开发出 RFPA^{2D} 软件。这些研究大多局限于二维领域和使用较为简单的本构模

型。岩石作为一种准脆性材料, 从宏观上说它没有明显的塑性变形, 但细观上则有局部塑性变形。因此, 假定岩石细观单元满足弹性损伤本构是不完善的。如何体现岩石塑性变形以及向更为复杂的本构模型拓展, 并清晰模拟裂纹扩展是国内外研究者共同面对的问题。

本文由应变空间出发, 导出增量形式的弹塑性损伤本构模型, 并将这一本构模型在自编程序中得以实现; 从细观尺度出发, 建立大理岩三点弯曲梁二维、三维细观数值试样, 分别进行相应的弹塑性损伤破坏

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50379004)

收稿日期: 2007-05-21

过程数值模拟, 将其与文献[8]的试验结果进行对比分析; 为进一步验证本文建立的模型, 数值模拟了大理岩偏三点弯曲梁破坏过程, 并与文献[9]试验结果做了比较。笔者在数值模拟中提出了破坏单元网格消去法, 清晰模拟了裂纹扩展问题, 解决了有限元模拟裂纹扩展的难题。

1 岩石弹塑性损伤本构方程的建立

在应力空间中描述弹塑性损伤本构关系有着很大的局限性, 它仅适用于强化材料, 因为对于软化段, 无论是加载还是卸载, 均为 $d\sigma < 0$, 所以难以由 $d\sigma$ 判别加载还是卸载, 所以在应力空间考虑弹塑性损伤本构是无法实现的; 但如果在应变空间内, 不管是强化还是软化, $d\varepsilon > 0$ 表示加载, $d\varepsilon < 0$ 表示卸载, 这样就有可能在应变空间内给出对强化、损伤软化适用的本构关系; 并且对于像岩石以及混凝土这样具有明显非线性、软化特性、弹塑性耦合特性的材料, 采用应变空间的塑性力学模型比采用应力空间的塑性力学模型优越。

岩石材料的损伤力学模型包括 Mazars 损伤模型、Loland 模型和统计损伤模型。根据损伤力学理论以及塑性理论, 可以得出在应变空间内考虑弹塑性损伤的本构关系^[10-12], 假定三维应力状态下混凝土及岩石细观单元在损伤段的总变形包括弹性变形和塑性变形两部分, 弹性变形服从广义虎克定律, 应力可以写为

$$\sigma = (1 - W) D_0^e : (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (1)$$

式中 D_0^e 为未损伤状态下的弹性四阶张量; W 为损伤变量; ε 为总的变形张量, 一般分解为弹性应变张量 ε^e 和塑性应变张量 ε^p 两部分, 即 $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$ 。

1.1 弹塑性损伤增量本构推导

在文中假设损伤仅引起材料刚度的劣化, 应变增量可看成由可逆应变增量与不可逆应变增量组成, 其中可逆应变增量为弹性应变增量; 不可逆应变增量由塑性应变增量和损伤应变增量组成。在加载过程中, 材料劣化和出现塑性变形时, 应变增量可分解为

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^f,$$

式中, $d\varepsilon_{ij}^e$ 为弹性应变增量, $d\varepsilon_{ij}^p$ 为塑性应变增量, $d\varepsilon_{ij}^f$ 为损伤演化引起的材料劣化应变增量。

当应力达到最大值之后, 随着位移载荷的不断施加, 变形继续增加, 这时应力将下降, 即为应力软化的损伤阶段; 本文将混凝土及岩石损伤状态变量表示为二阶张量, 称为损伤张量。设损伤张量为各向同性的, 即

$$W_{ij} = W \delta_{ij}。$$

由于损伤的出现和发展使弹性模量劣化而引起的应变分量增量 $d\varepsilon_{ij}^f$ 由下式决定:

$$d\varepsilon_{ij}^f = \frac{\partial C_{ijkl}^e}{\partial W_{mn}} dW_{mn} \sigma_{kl}, \quad (2)$$

在完全卸除应力时, ε_{ij}^f 完全消失, 因而在增量意义下它是弹性的, 但在增量意义上却是不可逆的。

由于通过试验确定的屈服条件多用应力表示, 为此将应变屈服函数用应力屈服函数表示, 由于 $f(\sigma, \sigma^p, k) = f(D^e(\varepsilon - \varepsilon^p), D^e \varepsilon^p, k) \equiv F(\varepsilon, \varepsilon^p, k)$ 。

经换算可以得到应力空间和应变空间的各变量偏导数之间的关系

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} &= D^e \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \\ \frac{\partial F}{\partial \varepsilon^p} &= D^e \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^p} - \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right), \\ \frac{\partial F}{\partial k} &= \frac{\partial f}{\partial k}. \end{aligned} \right\}$$

由广义正交法则(殷有泉和曲圣年, 1982)可知

$$d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^f = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3)$$

其中 f 是屈服函数, 而屈服条件为

$$f = f(\sigma, \sigma^p, W_{ij}) = 0,$$

可取损伤变量的演化方程为

$$dW_{ij} = M_{ijkl} d\varepsilon_{kl}^p. \quad (4)$$

式中, 四阶张量 M_{ijkl} 是塑性应变和损伤张量的函数, 应该根据实验资料和某些理论上的考虑来确定。在此取 $M_{ijkl} = \beta \delta_{ij} \delta_{kl}$, β 为应力张量不变量的函数。

将式(4)代入式(2), 可得

$$d\varepsilon_{ij}^f = \frac{\partial C_{ijkl}^e}{\partial W_{mn}} \sigma_{kl} M_{mnpq} d\varepsilon_{pq}^p, \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)得到塑性应变增量为

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda K_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}, \quad (6)$$

$$K_{ijkl} = \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{\frac{\partial C_{ijmn}^e}{\partial W_{pq}} \sigma_{mn} M_{pqkl}}{1 + \frac{\partial C_{stmn}^e}{\partial W_{pq}} \sigma_{mn} M_{pqst}}, \quad (7)$$

式(7)中, 四阶张量 K_{ijkl} 称为损伤耦合张量。由于刚度的损伤劣化, 塑性应变率不再与屈服面正交, 式(6)代表非正交的流动法则(相当于非关联流动法则)。将式(6)代入式(4), 得损伤张量的演化方程

$$dW_{ij} = d\lambda M_{ijkl} K_{klmn} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}. \quad (8)$$

在塑性应变演化方程式(6)和损伤变量演化方程式(8)中的特定常数 $d\lambda$ 可以通过加载时的一致性条件

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}^p} d\sigma_{ij}^p + \frac{\partial f}{\partial W_{ij}} dW_{ij} = 0$$

来确定, 可得

$$\begin{aligned} d\lambda &= \frac{1}{A+B} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl}, \\ A &= \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} > 0, \\ B &= -\frac{\partial f}{\partial W_{ij}} M_{ijkl} K_{klmn} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}^p} D_{ijkl}^e K_{ijmn} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}. \end{aligned}$$

根据式(6)、(7)和式(3)得到弹塑性损伤本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} - d\lambda D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}},$$

在加载时 $d\lambda > 0$, 在卸载和中性变载时 $d\lambda = 0$, 而加卸载准则是

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} \begin{cases} > 0, & \text{加载,} \\ = 0, & \text{中性变载,} \\ < 0, & \text{卸载.} \end{cases} \quad (9)$$

由于应力空间的加-卸载准则不能处理非稳定材料的加-卸载准则, 此函数为

$$l_1 = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\sigma.$$

因为在应变空间中, 加载时, 应变增量指向屈服面外侧; 卸载时, 应变增量指向屈服面内侧。这样在应变空间加-卸载准则函数为

$$l_2 = \frac{\partial F}{\partial \epsilon} d\epsilon.$$

经换算可以得到岩石材料软化段的加-卸载准则函数为

$$l_2 = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl},$$

上式即为式(9)的具体表达式。

现在引用 Macauley 括号 $\langle \rangle$, 它的含义是

$$\langle x \rangle = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases}$$

此时 $d\lambda$ 表示为

$$d\lambda = \frac{1}{A+B} \left\langle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} \right\rangle,$$

则它适用加载, 卸载和中性变载的所有情况, 此时混凝土及岩石细观单元弹塑性本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} - \frac{1}{A+B} D_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \left\langle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} D_{pqkl}^e d\epsilon_{kl} \right\rangle. \quad (10)$$

仅考虑加载情况可以得到弹塑性损伤增量形式

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} - \frac{1}{A+B} D_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} D_{pqkl}^e d\epsilon_{kl} \\ &= D_{ijkl}^{epf} d\epsilon_{kl}. \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $D_{ijkl}^{epf} = D_{ijkl}^e - D_{ijkl}^{pf}$ 称为弹塑性损伤刚度矩阵; D_{ijkl}^e 为有效弹性刚度矩阵; D_{ijkl}^{pf} 称为塑性损伤刚度矩阵。

为将上述模型用于岩石材料, 必须首先确定应变空间的加载函数 f 和应变空间的塑性势函数 g 的具体表达式。由于损伤的出现, 塑性变形率与屈服面是非正交的, 而最后得到的本构矩阵具有对称性。在本文中只取屈服函数即可满足, 对于岩石材料采用非关联流动法则。

屈服函数取为应力空间 Drucker-Prager 屈服准则的形式, 即

$$f = aI_1 + \sqrt{J_2} - k = 0.$$

式中 I_1 为应力张量的第一不变量; J_2 为应力偏张量的第二不变量; a 和 k 是损伤变量 W 的函数。

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_{kk}, \\ J_2' = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}, \end{cases}$$

从而可以得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} &= a\delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2J_2^{1/2}}, \\ A &= \frac{6Ea^2}{1-2\nu} + \frac{E}{1+\nu}, \\ B &= \frac{3a^2\beta(H' - a'\sigma_{mn})E^2}{E^2 + (1-2\nu)E'\sigma_{mn}}. \end{aligned}$$

1.2 损伤演化

采用基于等效塑性应变为变量的损伤模型, $W=0$ 对应无损伤状态, $W=1$ 对应完全损伤状态, $0 < W < 1$ 对应不同程度的损伤状态, 其损伤变量定义为

$$W = \begin{cases} 0, & \bar{\epsilon}^p < \bar{\epsilon}_0^p, \\ \frac{\bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}_0^p}{\bar{\epsilon}_f^p - \bar{\epsilon}_0^p}, & \bar{\epsilon}^p \geq \bar{\epsilon}_0^p. \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\bar{\epsilon}_0^p$ 为损伤等效塑性应变门槛值, 其值一般取为弹性极限应变的 1.5 倍; $\bar{\epsilon}^p$ 为当前等效塑性应变; $\bar{\epsilon}_f^p$ 为破坏时的等效塑性应变。

由于岩石在加卸载过程中存在一定的不可恢复的塑性变形, 因此本文从应变空间出发, 推导出了弹塑性损伤本构, 相比弹性损伤本构更深入地考虑了细观单元塑性引起的非线性性质, 能够考虑到岩石卸载过程中产生的不可恢复的塑性变形, 具有较强的适用性。

1.3 实现细观单元弹塑性损伤本构

为了将推导出的弹塑性损伤本构应用于细观尺度单元, 必须满足细观尺度下单元小尺寸; 另外细观单元材料性质是由 Fortran 语言中随机函数 ran() 随机产生。在此为了描述材料性质的非均匀性, 假定岩石试

样细观单元的力学性质满足 Weibull 分布, 该分布的概率密度函数为

$$g(u)=\frac{m}{u_0}\left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1}\exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right].\quad (13)$$

式中 u 为满足该分布的随机变量 (如强度、弹性模量、泊松比等); u_0 为与随机变量均值有关的参数; m 为确定 Weibull 分布概率密度函数形状的参数, 反映了数值模型中材料结构的均质性, 在其他条件相同的情况下, m 值越大, 试样的宏观力学参数越大。

利用 Fortran 语言编写增量形式的弹塑性损伤计算程序, 深入考虑岩石细观单元塑性引起的非线性性质, 各细观单元的破坏时等效塑性应变在计算程序中为其极限弹性应变的 5 倍, 当然这个参数需要结合相关的试验数据进行确定。

1.4 破坏单元网格消去模拟裂纹扩展

细观单元随着受载的不断施加, 先后经历弹性、塑性、损伤 (拉伸或剪切损伤)、破坏 (损伤度为 1) 与裂纹扩展的整个破坏过程。笔者通过自编 Fortran 程序在计算过程中, 提出破坏单元网格消去法模拟裂纹扩展问题; 在程序中由状态变量数组控制, 当单元的损伤变量等于 1 时, 认为该单元破坏而失去承载能力, 将该单元网格在计算程序中删除。该方法的实现为有限元模拟裂纹扩展开辟出新途径。

为了直观显示该方法模拟裂纹开展的优越性, 建立三相复合材料, 边长为 0.1 m 的正方体试件, 下端固定, 上端受均匀压应力; 在此将该模型简化为平面应力问题分析, 试件含一种夹杂直径为 0.081 m, 假定夹杂形状为圆形; 力学参数如表 1 所示, 在此细观单元不服从 Weibull 分布。采用位移加载, 0.0015 mm/步, 弹塑性损伤破坏过程如图 1 所示。

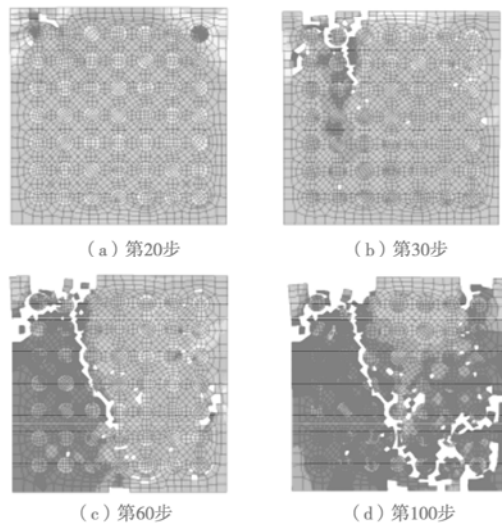


图 1 复合材料单轴压缩破坏过程
Fig. 1 Failure process of composites

从图 1 可以看出, 随着载荷的不断增加, 大量界

面单元和基体单元出现损伤破坏并发展成为裂纹, 破坏单元网格消去后, 逐渐贯通而形成宏观裂纹带。此图清晰地显示了破坏单元网格的逐渐消去过程, 直到试件发生失稳断裂。

表 1 复合材料力学参数
Table 1 Mechanical parameters of composites

类型	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
夹杂	55.5	0.16	66	6
界面	25	0.16	22	2
基体	26	0.22	27.5	2.5

该算例再现了裂纹清晰扩展过程, 证明本文的破坏单元网格消去法模拟裂纹开裂的优越性和合理性。

2 算例分析

采用同文献[8]相同的大理岩力学参数及试件尺寸, 文献[8]中试验所用大理岩来自中国北京房山县。本文使其力学参数服从 Weibull^[13]分布, 弹性模量均值为 27.78 GPa, 抗拉强度均值为 9.46 MPa, 其均质度 m 为 3; 泊松比为 0.283, 其均质度 m 为 100。大理岩三点弯曲梁试样跨度为 203.2 mm, 高度为 76.2 mm, 厚度为 38 mm, 裂缝的初始长度为 20 mm; 分别建立细观尺度下二维数值试样与三维数值试样, 数值模拟采用位移加载, 每步加载 0.0015 mm; 分别进行相应地弹塑性损伤破坏数值模拟, 数值模拟结果同文献[8]试验结果相当吻合, 且与理论分析是一致的。

2.1 二维大理岩三点弯曲梁破坏试验

将此问题简化为平面应力分析, 大理岩二维试样共 3826 个节点, 3679 个单元, 试样的平面几何形状及其受力条件如图 2 所示; 弹塑性损伤破坏过程如图 3 所示, 加载点的载荷位移曲线如图 4 所示。

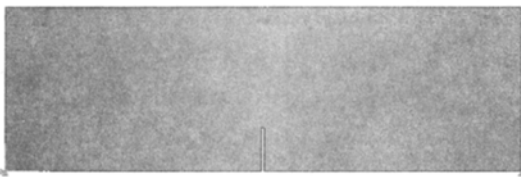


图 2 大理岩二维试样受力图
Fig. 2 Two-dimensional loaded marble rock specimen

从图 3 可看出, 在二维大理岩三点弯曲梁数值模拟过程中, 加载初期大理岩试样上部受压应力作用, 并在加载位置附近产生压应力集中, 试样下侧受拉应力作用; 在位移载荷不断增加的过程中, 在预制裂纹的周围附近区域首先出现塑性区, 塑性单元达到损伤阈值, 导致拉伸损伤的产生, 进而产生微裂纹; 这些微裂纹方向平行于加载方向, 但并非所有的裂纹均进一步扩展破坏, 而是位于预制裂纹尖端周围出现渐进破坏, 由于大理岩材料本身非均匀性的影响, 随载荷

的增加裂纹曲折地向加载点扩展, 最终形成主要破坏裂纹, 导致大理岩试样失去承载能力, 图3(e)进行了破坏试样的整体放大, 清晰地显示了断裂断口形态。

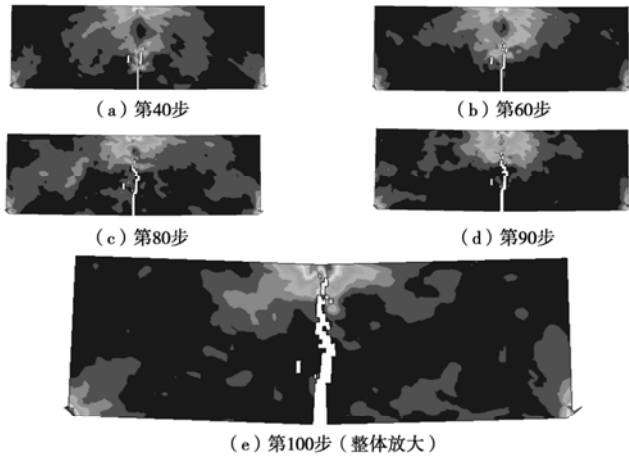


图3 二维大理岩三点弯曲细观弹塑性损伤破坏过程

Fig. 3 Meso elasto-plastic damage and failure process in three-point bending beam experiment of 2D marble rock

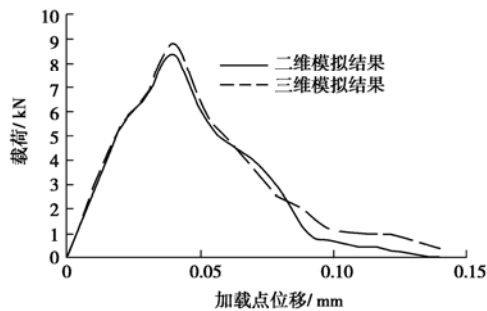


图4 岩石试样载荷位移曲线

Fig. 4 The load vs. displacement of rock specimen

2.2 三维大理岩三点弯曲梁破坏试验

三维大理岩三点弯曲梁试样几何形状及其受力条件如图5所示; 该三维试样共26460个节点, 23231个单元; 加载点的载荷位移曲线如图4所示, 弹塑性损伤破坏过程如图6所示。

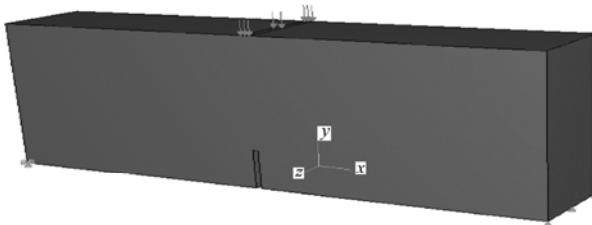


图5 大理岩三维试样受力图

Fig. 5 Three-dimensional loaded marble rock specimen

从图4所示的二维及三维载荷位移曲线比较可以得出, 二维与三维细观尺度模型在弹性阶段具有较好的吻合, 然而三维数值试样得到的峰值载荷要大于二维试样的峰值载荷, 并且在损伤软化阶段, 三维试样表现出更为明显的非线性, 这是由于三维单元数目的增多使得材料非均匀性在空间分布上更为离散, 这是

二维平面应力简化模型难以弥补的缺陷, 所以三维问题的数值模拟更加贴切实际问题。因此, 采用相同均质度的二维与三维岩石试样, 厚度方向划分单元的疏密程度会影响两者的计算结果。

从数值模拟结果(图6)可以看出, 由于在加载过程中, 预制裂纹尖端应力的奇异性与拉应力集中, 预制裂纹尖端周围首先出现塑性区, 进而变为损伤区, 从破坏机理上单元首先围绕模型中最弱材料云母开始破坏, 亦有在云母内部出现的裂纹; 随着荷载增加, 破坏单元的数目逐渐增多, 裂纹由一系列的破坏单元组成, 这些裂纹连贯而形成宏观裂纹。二维试样破坏过程(图3)与三维试样破坏过程(图6)比较得出, 二维裂纹表现出曲折性; 三维裂纹在空间上是一个很不规则的曲面, 三维破裂的模拟结果更加符合岩石加载破坏的实际情况。

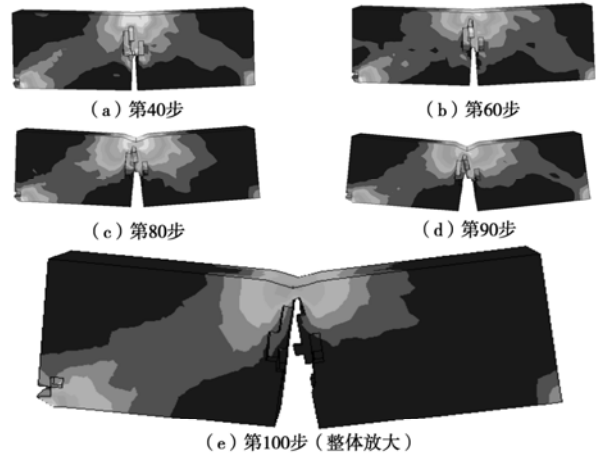


图6 三维大理岩三点弯曲细观弹塑性损伤破坏过程

Fig. 6 Meso elasto-plastic damage and failure process in three-point bending beam experiment of 3D marble rock

2.3 大理岩偏三点弯曲梁破坏试验

Xeidakis^[9]进行了大理岩的偏三点弯曲试件的裂纹扩展试验研究, 得出了预制裂纹处于不同位置时的裂纹扩展路径。为了便于把本节的数值模拟结果与Xeidakis的试验结果进行比较, 这里按照原文中M2试样的几何和力学参数建立数值模型。试样的跨度为180 mm, 高度为40 mm, 宽度为20 mm, 裂缝的初始长度 a 为8 mm, 裂缝与试样中轴线的距离为 L_1 , 在此分别取 L_1 为10, 20, 30, 40 mm, 建立了二维及三维大理岩偏三点弯曲梁数值试样, 进行相应的弹塑性损伤破坏数值模拟, 模拟结果与文献[9]作了相应的比较, 进一步证明了该模型的正确性。

为了模拟实际材料的非均匀性, 大理岩强度和弹性模量的均质度 m 均取3, 用一种Weibull分布来表达该试样的非均匀性, 各力学参数的Weibull分布参数如表2所示。

三维大理岩偏三点弯曲梁试样几何形状及其受力条件和弹塑性损伤破坏如图7所示; 该三维试样共

157353 个节点, 145260 个单元; 加载点的载荷位移曲线如图 8 所示。数值模拟采用位移控制的增量加载方式, 每步加载位移为 0.0025 mm。

表 2 岩石试样的 Weibull 分布参数

Table 2 Parameters of Weibull distribution for rock specimen					
	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa	泊松比	内摩擦角	黏聚力/MPa
大理岩	94.0	387.3	0.34	32	6.4

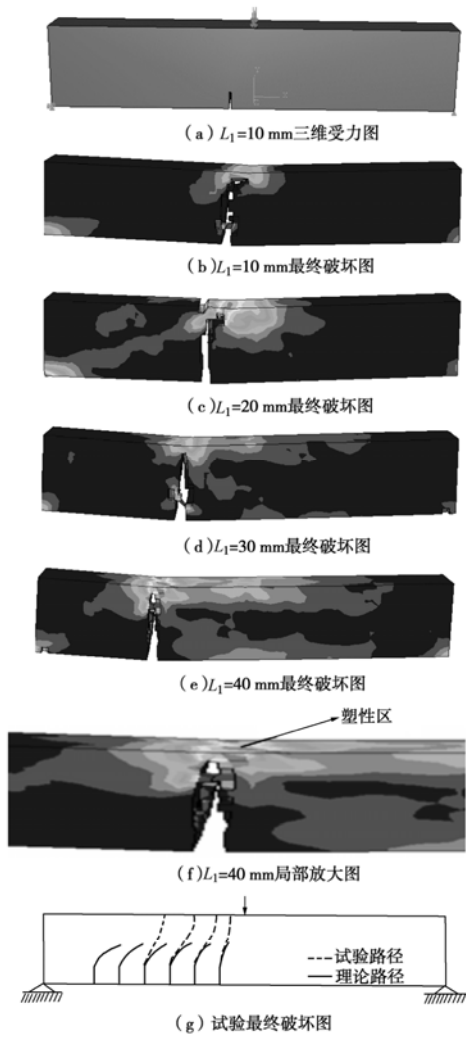


图 7 不同预制裂纹位置时裂纹扩展破坏图

Fig. 7 Extension and failure of cracks at different positions

从图 7 可以看出, 在这 4 组三维岩石偏三点弯曲梁破坏过程中, 载荷施加的初始阶段, 预制裂纹附近首先出现塑性区, 进而达到损伤阈值最后破坏, 裂纹首先向着试样上端加载点方向起裂, 随着载荷的不断增大, 裂纹逐渐扩展弯向与加载方向平行, 该结论及峰值载荷与文献[9]试验结果非常吻合。由于试样材料性质的非均匀性, 裂纹局部呈现曲折性。由于大理岩材料的非均匀性对于裂纹萌生部位及其局部扩展路径具有特别大的影响, 在数值模拟中“裂纹初裂角”以及“裂纹扩展角”与试验结果存在一定差异, 所以没有出现试验结果 (图 7 (g)) 所发生地明显偏折。研

究发现, 裂纹的尖端始终处于拉应力集中状态, 并且随着裂纹的扩展, 拉应力集中不断释放并且转移到新的裂纹尖端, 因此可以认为即使裂纹尖端处于 I-II 混合型应力状态, 从细观角度来看, 拉应力也仍然是裂纹扩展的主要动力。

数值模拟得到的 4 个试样峰值载荷与 L_1 关系曲线以及试样不同 L_1 情况下载荷 - 位移曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出, 随着预制裂纹与试样中心距离 L_1 的增大, 宏观载荷 - 位移曲线的峰值载荷不断增加, 产生的失稳破坏也更加明显, 但不是比例关系, 这种失稳的明显效果主要通过载荷 - 位移曲线 (图 8 (b)) 体现出来的。数值模拟得到的变化趋势与文献[9]实验结果表现出较好的一致性, 若细观单元采用弹性损伤 [14], 不考虑细观单元塑性变形, 得到的结果与试验结果偏差较大 (图 9); 为更好说明考虑塑性变形的重要性, 图 7 (f) 对 L_1 为 40 mm 试样破坏图进行了局部放大, 该图清晰显示出断面的塑性区; 因此, 证明了考虑细观单元塑性变形的必要性, 从而验证了本文所提出方法的正确性和适用性。

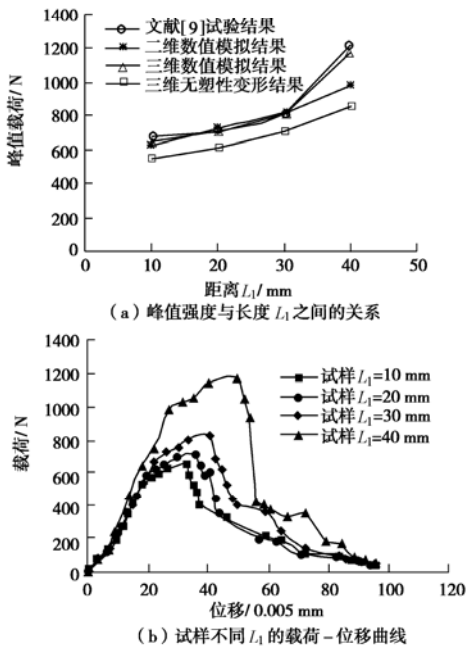


图 8 不同情况下试样载荷比较曲线

Fig. 8 The comparison load of peak under different conditions

3 结 语

(1) 采用 Weibull 函数分布来描述岩石细观单元的强度和弹性模量等力学性质, 将细观力学方法与数值计算方法有机地结合起来, 通过考虑非均匀性特点研究岩石的非线性力学行为, 是一种运用连续介质力学方法解决非连续介质力学问题的新型数值分析方法。通过引入由应变空间导出的弹塑性损伤细观单元本构模型, 提出破坏单元网格消去法, 研究发现, 该

方法在模拟裂纹扩展时, 单元尺寸不影响裂纹的扩展路径; 建立了岩石破裂过程模型, 在此基础上应用 Python 和 Fortran 语言编制数值模拟软件。

(2) 模拟了二维、三维大理岩三点弯曲梁和三点偏梁弹塑性损伤破坏的力学试验, 得到了岩石破裂过程中的非线性应力-应变曲线和不同载荷阶段的三维损伤破裂演化图片, 分析了细观非均匀性对岩石宏观破坏力学行为的影响。许多岩石力学和工程问题往往都是三维的, 三维破裂的模拟结果更加符合岩石加载破坏的实际情况。数值模拟结果表明, 岩石破坏是一个损伤不断产生和宏观裂纹形成的过程。在岩石破裂过程中, 细观单元属性的渐进式变化对宏观力学行为产生较大影响。因此, 从细观非均匀性与宏观力学行为 2 个层次考察岩石破裂过程, 将有助于深入了解损伤和破裂机制。

参考文献:

- [1] 刘红岩, 秦四清, 等. 岩石冲击破坏的数值流形方法模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 587 - 593. (LIU Hong-yan, QIN Si-qing, et al. Simulation of impact failure of rock by numerical manifold method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 587 - 593. (in Chinese))
- [2] MAGHOUS S, CREUS G J. Periodic homogenization in thermoviscoelasticity: case of multilayered media with ageing[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, **40**(4): 851 - 870.
- [3] NAGAI Kohei, SATO Yasuhiko, UEDA Tamon. Mesoscopic of failure of mortar and concrete by 2D RBMSM[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, **2**(3): 359 - 374.
- [4] SHEN B, STEPHANSSON O. Numerical analysis of mined mode I and mode II fracture propagation[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1993, **30**(7): 861 - 867.
- [5] BELYTSCHKO T, KRONGAUZ Y, ORGAN D, et al. Meshless method: an overview and recent development[J]. Comput Methods Appl Mech Engg, 1996, **13**(9): 3 - 47.
- [6] 王水林, 葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, **16**(5): 405 - 410. (WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Application of manifold method in simulating crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, **16**(5): 405 - 410. (in Chinese))
- [7] 朱万成, 唐春安, 等. 偏三点弯曲岩石试件中裂纹扩展过程的数值模拟[J]. 东北大学学报, 2002, **23**(6): 592 - 595. (ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, et al. Numerical modeling of crack propagation in rocks under the condition of three-point bending[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2002, **23**(6): 592 - 595. (in Chinese))
- [8] 杨同, 王宝学, 等. 岩石弯曲拉伸试验研究[J]. 勘察科学技术, 2004, **6**: 3 - 6. (YANG Tong, WANG Bao-xue, et al. Study on bending tensile tests of rock samples[J]. Investigation Science and Technology, 2004, **6**: 3 - 6. (in Chinese))
- [9] XEIDAKIS G S, SAMARAS I S, ZACHAROPULOS D A, PAKALIAKIS G E. Trajectories of unstably growing cracks in mixed mode I-II loading of marble beam[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, **30**(1): 19 - 33.
- [10] 周小平, 张永兴, 朱可善. 单轴拉伸条件下细观非均匀性岩石本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(3): 87 - 93. (ZHOU Xiao-ping, ZHANG Yong-xing, ZHU Ke-shan. A study on the complete stress-strain relation for mesoscopic heterogenous rocks under uniaxial tensile loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(3): 87 - 93. (in Chinese))
- [11] 杨强, 陈新, 周维垣. 岩土材料弹塑性损伤模型及变形局部化分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3577 - 3583. (YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Wei-yuan. Elasto-plastic damage model for geomaterials and strain localization analyses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3577 - 3583. (in Chinese))
- [12] 葛修润. 岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时 X 射线 CT 扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 1 - 20. (GE Xiu-run. Deformation control law of rock fatigue, real-time X-ray CT scan of geotechnical testing, and new method of stability analysis of slopes and dam foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 1 - 20. (in Chinese))
- [13] 梁正召, 唐春安, 等. 岩石三维破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 931 - 936. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 931 - 936. (in Chinese))
- [14] 李海波, 张天航, 邵蔚, 等. 三轴压缩情况下岩石变形特征的滑移型裂纹模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3119 - 3124. (LI Hai-bo, ZHANG Tian-hang, SHAO Wei, et al. Simulation of deformation behavior of rock material under triaxial compression based on sliding crack model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3119 - 3124. (in Chinese))