

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0279-04

含预制裂纹的水泥砂浆试块在爆炸载荷作用下损伤特征的数值模拟

刘 军, 赵长冰

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 把能够体现岩体在冲击载荷作用下的响应特点及损伤演化的各向异性特征的损伤模型嵌入到有限元软件中, 模拟了含有预制裂纹的水泥砂浆试块在爆炸载荷作用下的损伤特征。模拟结果表明, 在爆炸近区产生一个损伤“重灾区”, 并可根据模拟结果确定“重灾区”及爆炸损伤的范围, 模拟结果与试验结果基本一致。模拟方法可以为岩土工程中经历过爆炸损伤岩体的稳定性研究提供理论依据。

关 键 词: 水泥砂浆试块; 预制裂纹; 爆炸载荷; 损伤演化; 损伤模型; 数值模拟

中图分类号: O 347.1

文献标识码: A

Numerical simulation of damage characteristics of cement mortar block with prefab cracks under blast loading

LIU Jun, ZHAO Chang-bin

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A damage model that can reflect characteristics of impact load and anisotropic damage evolution has been embedded into FEM software; and the damage characteristics of cement mortar block with prefab cracks under blasting have been simulated. The results of research indicate that a serious damage zone exists nearby blasting hole. The range of the serious damage zone can be determined by the simulating results. The simulating results are similar to the one from test. So, the method proposed can provide theoretical evidences for stability analysis of rock that has been disturbed by blast loading in geotechnical engineering.

Key words: cement mortar block; prefab cracks; blast loading; damage evolution; damage model; numerical simulation

1 引 言

岩土工程施工中广泛采用爆破技术, 而爆破作用在需要破碎开挖岩体的同时也对后部需要保留的岩体造成损伤。无论何种控制爆破方式, 炸药爆炸的冲击载荷都在破坏确定范围的岩土介质的同时也对邻近需要保护的岩体产生强烈扰动(损伤), 在上覆岩层的压力作用下受损岩体损伤进一步加剧, 使得岩层的承载力以及稳定性降低, 因此围岩稳定性的评价一定要考虑爆破等冲击载荷引起的损伤, 该问题的研究已成为矿山采掘工程以及边坡工程中迫切需要解决的问题。

岩石材料在爆炸载荷下的损伤机理是一个非常复杂的力学问题, 涉及到冲击载荷的加载率、岩石的破裂及移动方式、地震波的传播规律等诸多方面

的研究, 尽管国内外的许多学者对此开展了大量的研究工作, 但由于问题的复杂性而研究并不深入, 这些研究大体可分为两类, 即建立在现场调查基础上的统计方法和建立在力学模型基础上的数值计算方法。统计方法主要是通过对现场爆破的大量调查, 测出爆破后距爆源不同距离处的反映岩体损伤程度的物理量(如声速等)的分布, 并由此划分出不同的损伤带^[1-4]。统计方法比较直观, 便于应用, 但由于缺乏理论基础及在不同的条件下具有较大的离散性, 难以令人信服。

建立在力学模型基础上的数值方法, 考虑了冲击载荷下岩石材料的动态本构关系及强度准则, 从理论上分析岩石材料在冲击载荷下的损伤特征^[5, 6], 但是, 由于力学模型的复杂性以及模型参数难于确定, 在工程应用中有一定的难度。笔者等以裂纹参

数构造的二阶对称张量作为损伤变量, 建立了一个可以描述岩石材料在冲击载荷作用下损伤演化特征的力学模型^[7-9], 并对单孔台阶爆破进行了仿真模拟, 模拟结果与实际结果相似。

本文利用文[7~9]提出的损伤模型, 针对含有预制裂纹的水泥砂浆试块, 应用 ABAQUS 有限元软件, 模拟水泥砂浆试块在爆炸载荷作用下的损伤演化过程, 模拟结果与试验结果一致。

2 损伤模型

损伤模型的建立充分考虑了岩体在冲击载荷作用下的响应特点及损伤演化的各向异性特征。假定岩体内部含有大量随机分布的 Griffith 裂纹, 对每一组相互平行或近似平行的裂纹, 采用一个以裂纹参数构造的二阶对称张量作为损伤变量, 并以 Rice^[10]的“正交结构理论”为基础, 结合断裂力学中的裂纹扩展准则, 推导损伤面。因为“正交结构理论”可以用来描述高加载率下的与应变率相关的力学行为, 也可以用于描述冲击过程。采用 Swoboda 与 Yang 等的研究成果^[11-13], 推导损伤的演化方程。关于本文所采用损伤模型详细介绍参见文[7~9]。

3 数值计算

浇筑的水泥砂浆试块见图 1, 网格的划分见图 2, 网格的尺寸为 2 cm, 采用六面体单元, 单元总数为 9 375, 节点总数为 10 816。水泥砂浆试块的材料参数见表 1。采用乳化炸药, 用有限元软件含能材料模块模拟炸药的爆轰过程, 以便为试块的力学分析提供载荷, 炸药采用 JWL 状态方程, 状态方程参数见文[13]。计算时间为 15 ms, 时间步长为 1 μs, 采用自适应网格, 试块与地面的接触面定义为固定边界。只分析爆炸后保留部分的损伤变化情况, 所以只输出炮孔后部的损伤场, 在炮孔后部每

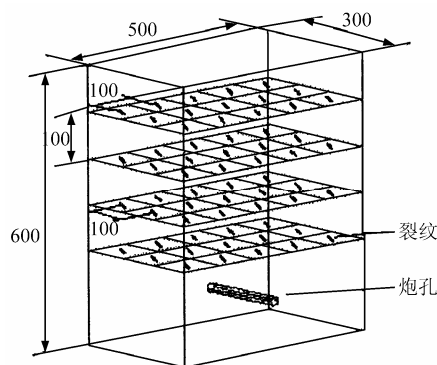


图 1 预制裂纹及炮孔的位置(单位: mm)

Fig.1 The locations of prefab cracks and blast hole (unit: mm)

隔 10 cm 取一个剖面, 输出结果的 5 个剖面位置见图 3。在试块中布置了初始裂纹 (图 1), 初始损伤张量为^[11, 12]

$$\Omega_0 = \begin{bmatrix} 8.333 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

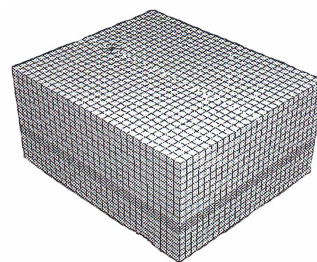


图 2 水泥砂浆试块的网格划分

Fig.2 The lattice of cement mortar block

表 1 水泥砂浆试块的材料参数

Table 1 Parameters of cement mortar

E/MPa	μ	K	R_0/MPa	g/MPa	$\rho_0/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
50 000	0.25	1.0	50	50	2.7

注: E 为弹性模量; μ 为泊松比; K 为依赖于材料的常数^[11]; g 为一个假设的非负的材料常数^[12]; R_0 为材料的初始损伤门槛值^[11]; ρ_0 为砂浆试块的密度。

4 计算结果及分析

输出试块在计算时间终了时刻的损伤张量的最大主值分量的等值线图如图 3 和图 4 所示。图 4(a)~4(d)中的 4 个剖面的损伤轮廓图中在爆破近区 (10 cm 内), 损伤在垂直面内的分布主要集中在对应于药包的位置附近, 其中 1-1 剖面上“损伤核”为 1 个, 其位置与装药位置相对应, 在 2-2, 3-3, 4-4 三个剖面中, 损伤的分布呈现出 2 个“损伤核”, 但各个“损伤核”之间的数值梯度变化不大, 出现多个“损伤核”的原因可能是因为计算误差、模型的简化及爆破参数、水泥砂浆试块的材料参数选取的误差等因素造成的。从损伤的数值上看, 在爆破近区损伤的分布梯度较为明显, 在中远区损伤的分布逐步趋向于均匀。

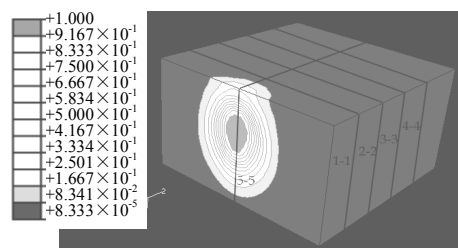


图 3 输出结果的 5 个剖面

Fig.3 5 sections for results output

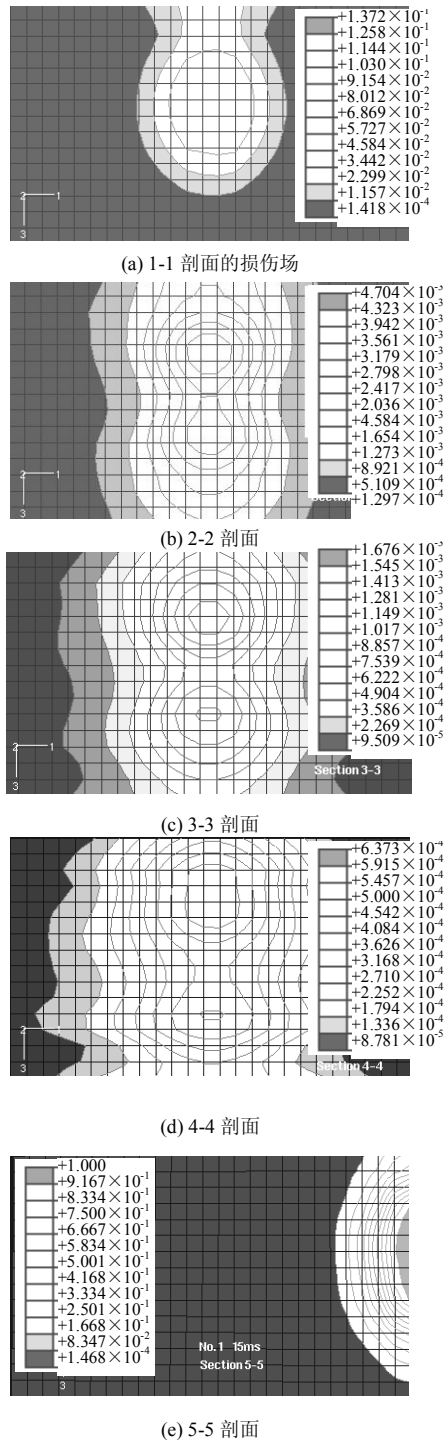


图 4 剖面的损伤场

Fig.4 The damage field of section

从径向剖面的损伤轮廓图 4(e)可以发现,在爆破近区损伤值较大,随着距爆源距离的增加,损伤值急剧下降,这说明在爆破近区,存在着一个损伤的“重灾区”。径向剖面中,由于损伤数值的变化梯度很大,远区的损伤数值无法区分,为了便于区分及确定损伤“重灾区”的范围,对试块的径向剖面采用 X - Y 图的形式来表示损伤的变化梯度,即在图 4(e)中,用 2 表示的方向作为 X 轴(见图 3 中的坐

标约定),在该方向上把在一条直线上的单元作为一个单元组,这样的单元组共有 15 个, X 轴表示距炮孔的距离, Y 轴表示单元组中每个单元的损伤张量的最大主值,这样可得到 15 条曲线,每条曲线分别对应于炮孔不同深度处单元组的损伤值,见图 5 与图 6。损伤急剧变化的位置至炮孔间的距离减去破坏区长度,就是损伤“重灾区”的范围,可以看出在炮孔后部 9.5 cm 处损伤值发生突变,这个区域就是损伤“重灾区”的范围。

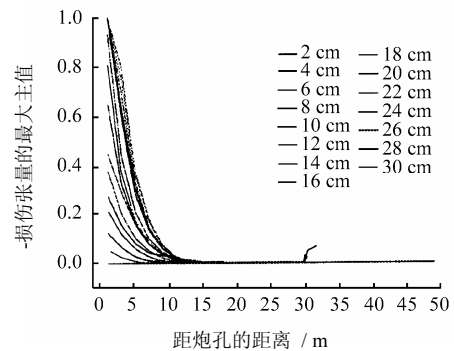
图 5 5-5 剖面损伤梯度的 X - Y 图Fig.5 X - Y curve of damage gradients from section 5-5

图 6 试块爆破后取芯照片

Fig.6 The picture of drilling sampling after blast

考虑 ABAQUS 软件的计算精度及损伤模型的假设条件,认为当初始损伤值与计算值相差小于 5 % 时(损伤张量的最大主值)即认为没有受到爆炸冲击作用的影响,根据这个原则可以确定损伤范围为 40 cm。

爆破前后分别在试块上钻取芯样,见图 6。爆破前在试块右上角部位钻取一个芯样,爆破后分别在炮孔后 10, 15, 40 cm 钻取 3 个芯样。由于爆炸载荷会导致试块发生损伤,因而爆破前后芯样的声波速度和单轴抗压强度会有所不同,可以通过测试爆破前后芯样的声波速度和单轴抗压强度的变化来验证模拟结果的可靠性,见图 7 与图 8。从图中可

发现, 爆源后 10 cm 处芯样与爆破前芯样的声速和单轴抗压强度相差很大, 且 10 cm 后逐渐接近于爆破前芯样的声速和单轴抗压强度, 因而损伤“重灾区”的范围约为 10 cm 左右。在距爆源 40 cm 左右处爆破前后芯样的声速和单轴抗压强度逐步趋于一致, 所以爆炸损伤范围约为 40 cm。这与数值模拟的结果是一致的。

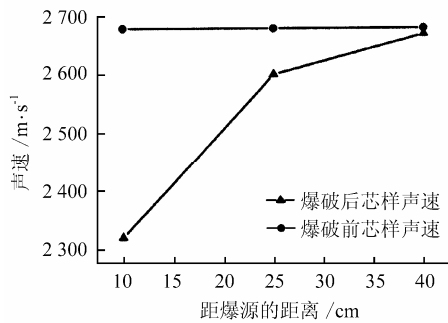


图 7 芯样的声波测试结果

Fig.7 The curve of velocity of sound wave of bore-hole core before and after blast

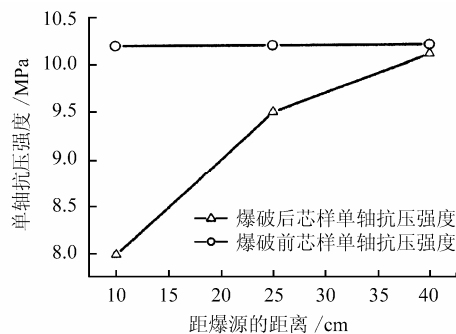


图 8 芯样的单轴抗压强度

Fig.8 Compression strength of bore-hole core before and after blast

5 结 语

本文把文[7~9]介绍的损伤模型嵌入 ABAQUS 有限元软件中, 对爆炸载荷下的水泥砂浆试块的损伤演化特征进行了模拟分析, 表明数值模拟的结果反映了冲击载荷下水泥砂浆试块损伤演化的基本特征, 其与试验结果基本吻合, 可以通过模拟结果确定爆破近区损伤的“重灾区”及爆炸载荷导致的损伤范围。本文的模拟方法可以用来分析经历爆炸载荷扰动岩体的损伤程度, 并根据损伤“重灾区”及损伤范围, 对岩体稳定性进行评价及采取相应的维护措施。

参 考 文 献

- [1] Oriard L L. Influence of blasting on slope stability: State-of-the-art[A]. **Third International Conference of stability in Surface Mining**[C]. Vancouver: Brawner, 1981.
- [2] Roger Holmberg, Kenneth Maki. Case examples of blasting damage and its influence on slope stability[A]. **Third International Conference of Stability in Surface Mining**[C]. Vancouver: Brawner, 1981.
- [3] Charles E. Glass. Influence of earthquakes on rock stability[A]. **The Third International Conference of Stability in Surface Mining**[C]. Vancouver: Brawner, 1981.
- [4] Roger Holmberg, Per-Anders Persson. Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage[A]. **The Tunnelling 1979-Meeting**[C]. London: Austrep, 1979.
- [5] Grady D E, Kipp M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract**, 1980, 17(1): 147—157.
- [6] Chen E P. Non-local effects on dynamic damage accumulation in brittle solids[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1999, 23(1): 1—21.
- [7] 刘军. 岩体在冲击载荷作用下的各向异性损伤模型及其应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(4): 635—640.
- [8] LIU Jun. Anisotropic damage model and its application to rock materials under impact load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 635—640.
- [9] 刘军, 王树仁, 高全臣. 单孔台阶爆破中保留岩体损伤特征的数值模拟[J]. **爆炸与冲击**, 2003, 23(3): 241—247.
- [10] LIU Jun, WANG Shu-ren, GAO Quan-chen. Numerical simulation of rock remain damage characteristics under single hole bench blast[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2003, 23(3): 241—247.
- [11] 刘军. 岩石材料在冲击载荷下的各向异性损伤模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2002.
- [12] Rice J R. Inelastic constitutive relations for solids: an integral variable theory and its application to metal plasticity[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1971, 19(1): 433—455.
- [13] Swoboda G, Yang Q. An energy-based model of geomaterials— I : formulation and numerical results[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1999, 36(2): 1 719—1 734.
- [14] Swoboda G, Yang Q. An energy-based model of geomaterials — II : Deduction of Damage Evolution Laws[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1999, 36(2): 1 735—1 755.
- [15] Yang Q, Zhou W Y, Swoboda G. Micromechanical identification of anisotropic damage[J]. **International Journal of Fracture**, 1999, 98(5): 55—76.