

文章编号: 1001- 2486(2008) 06- 0089- 05

分段计算方法在模拟爆炸应力波传播中的运用*

严波¹, 曾新吾²

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对爆炸加载下岩石响应的不同特点以及动力有限元和传统地震波模拟方法的局限性, 提出了一种分段计算的数值模拟方法。该方法在空间上将所模拟的区域划分为非弹性段和弹性段, 非弹性段内采用动力有限元计算方法, 弹性段内采用传统的地震波方法, 不同段之间以节点位移为边界条件。不同算法的数值模拟结果验证了分段计算方法用于模拟爆炸荷载产生地震波的有效性和正确性。

关键词: 分段计算; 正确性; 有效性; 爆炸应力波; 数值模拟

中图分类号: O382 **文献标识码:** A

An Application of Subsection Calculating Method in Simulating of Blasting Stress Wave

YAN Bo¹, ZENG Xin-wu²

(1. College of Basic Education for Officers, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A subsection calculating numerical simulating method is presented, based on the different dynamic responses of rock under blasting and the different limitations of dynamic finite element algorithms and traditional numerical simulating algorithms of seismic wave. The subsection calculating method divides the simulating region into an elastic region in which dynamic finite element algorithms are applied and an inelastic region in which traditional numerical simulating algorithms are applied while displacement is applied to the boundary conditions between different regions. The numerical simulating results indicate that the subsection calculating method is correct and effective in numerical simulations of seismic wave in rock under blasting.

Key words: subsections calculating; correction; efficiency; stress waves; numerical simulating

在正演模拟爆炸震源激发的地震波的辐射模式中, 爆炸源附近岩石响应为非弹性、高应变率的动态响应。岩石中传播的压力很高, 表现为对地震波的辐射有直接影响的冲击波或弹塑性波; 同时, 爆炸源附近岩石的地质结构和几何结构等也是影响地震波辐射的重要影响因素^[1]。随着爆心距的增大, 岩石处于弹性区, 压力逐渐减小, 应力波表现为近似的弹性波。弹性区域内, 采用传统的地震波数值模拟方法(如差分法^[2]、有限元法^[3]、边界元法^[4]和伪谱法^[5]等), 在有限的计算资源下, 能得到数千米甚至上百千米位置上我们感兴趣的地震波, 但传统的地震波模拟方法对爆炸对岩石的加载进行了简化, 很难与真实的爆炸加载情况一致; 动力有限元方法是能有效模拟地下爆炸中非弹性区冲击波和弹塑性波的传播方法之一, 且能考虑局部地质结构、几何结构等对地震波的影响, 爆炸加载条件与真实情况比较一致, 但在有限的计算资源下, 由于岩石非弹性区动力有限元网格精度的要求(单元的特征尺度过大就不能模拟冲击波的传播)和计算时间步长的限制, 一般只能得到数百米或几千米范围内的地震波。

本文提出了动力有限元方法与传统的地震波数值模拟方法相结合的分段计算方法, 并通过不同算法的模拟对分段算法的正确性和有效性进行了初步的探讨。

* 收稿日期: 2008- 05- 13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40574056)

作者简介: 严波(1973-), 男, 讲师, 博士生。

1 基本思想

分段计算方法基本思想是:将爆炸加载下材料的响应区域划分为非弹性区和弹性区,不同区域采用不同的模拟方法,在得到合理的地震波辐射模式下尽量提高算法的有效性。

分段计算方法在空间上将所研究的区域划分为两个部分,如图 1 所示。其中有水平短线的区域主要为岩石的非弹性响应区;有斜实线的区域为岩石的弹性响应区域。非弹性响应区中的黑圆点表示爆炸加载源。两个区域之间的黑实线表示区域的边界位置,该边界到爆炸源中心的距离大于或等于岩石的弹性边界(弹性边界可以根据经验公式或实验确定)。

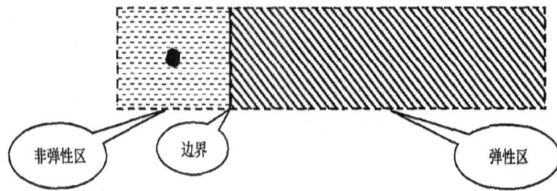


图 1 分段计算的区域划分

Fig. 1 The partition of region for subsection calculating

分段计算方法在不同区域上采用不同的模拟方法:首先采用非线性动力有限元对非弹性区岩石进行模拟,得到边界上质点的位移—时间历史;再将边界上质点的位移—时间历史作为弹性区计算的边界条件,采用传统的地震波模拟方法进行计算,如图 2 所示。

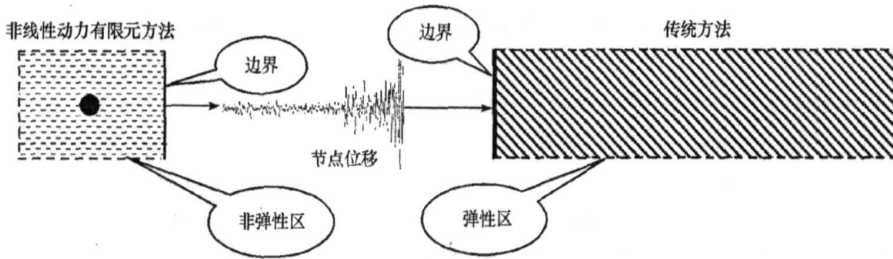


图 2 分段计算的模拟方法

Fig. 2 The numerical simulating method for subsection calculating

非弹性响应区中岩石本构和几何结构对地震波的辐射模式有直接的影响。需要用岩石的爆炸损伤本构来表征非弹性响应区岩石的冲击压缩特性、非弹性变形(非弹性体积变形、非弹性剪切变形等)、裂缝成核和发展、损伤的演化。同时,非弹性响应区的范围与弹性区相比很小,如千吨级的地下爆炸中岩石弹性区域的半径仅为几十米。再者,该区域内传播的应力波表现为冲击波、弹塑性波,为了模拟这些应力波的转化过程,要求建立比较细致的模型。因此,该区域适合用非线性动力有限元方法来模拟岩石的响应。通过模拟可以得到包含了爆炸源、岩石本构和几何结构等信息的边界条件——边界位置上质点的位移—时间历史。

将上述的质点的位移—时间历史作为边界条件,施加在弹性区对应的边界上,然后选择合适的地震波模拟方法对岩石弹性区内地震波辐射模式进行模拟。高频地震波随距离衰减很明显,低频地震波成为地震波的主要辐射模式,因此,所建模型的要求可以比非弹性区模型低,如有限元模型单元特征尺度可以根据感兴趣的地震波频率确定。

2 方法的验证

以微装药的填实爆炸为实例,通过分段计算与一次性计算结果比较进行验证。

2.1 有限元模型

模拟的实例为微装药的填实爆炸。球形装药 PENT 的质量为 0.1g,岩石为花岗岩。实验研究^[9]表

明: 爆心距 40mm 为岩石弹性边界位置。采用两种不同的计算方法进行模拟: 一次性计算和分段计算。一次性计算在岩石的全部区域采用非线性动力有限元, 岩石的半径取为 80mm, 炸药球半径为 0.25cm, 如图 3 所示。图(a) 中岩石中间的黑实线表示弹性边界。为了能够模拟炸药附近岩石中冲击波的传播, 越靠近爆炸源, 岩石的网格尺度越小, 模型中最小的网格特征长度为 0.02cm。随着冲击波在岩石中衰减为弹塑性波, 网格的特征长度也逐渐增大, 如图 3(b) 所示, 模型中的 77857 和 77852 为岩石弹性区域内的两节点。

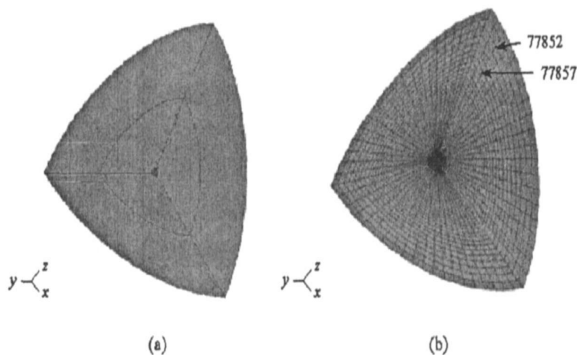


图 3 一次性计算的有限元模型

Fig. 3 The model of finite element for one-off calculating

分段计算中将所研究的岩石划分为非弹性区和弹性区, 如图 4(a) 和(b) 所示。非弹性区有限元模型中, 岩石的半径取为 40mm, 球面上设置无反射边界, 炸药球半径为 0.25cm, 八分之一模型如图 4(a) 所示, 采用非线性动力有限元计算得到爆心距为 40mm 的弹性边界位置节点的位移—时间历史; 弹性区有限元模型中, 岩石的半径取为 40~ 80mm 的区域, 如图 4(b) 所示。弹性区采用有限元方法。模型中 17852 和 17857 是和方法一中节点 77852 和 77857 位置对应的两节点。

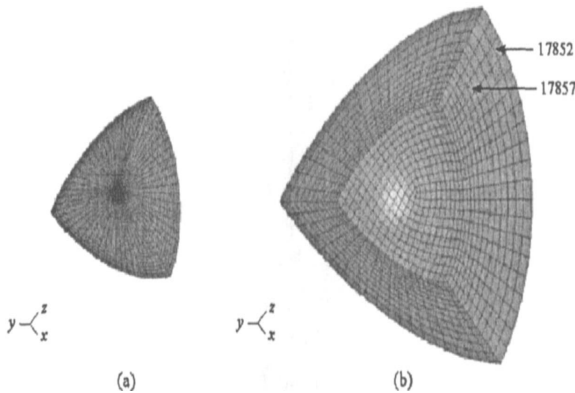


图 4 分段计算的有限元模型

Fig. 4 The model of finite element for subsection calculating

2.2 材料的本构

两种方法均采用 JWL 方程来表征 PENT 爆轰产物的压力—体积—能量关系。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

其中, P 为压力, 单位为 Mbar; E 为能量密度; V 为爆轰产物体积与未发生爆轰炸药体积之比, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为 JWL 方程系数。对于 PENT, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 分别为 6.253Mbar、0.239Mbar、5.25、1.60 和 0.28。

花岗岩采用 HJC 本构模型^[8]。参照文献[9]给出了花岗岩 HJC 本构模型参数。

2.3 模拟结果与分析

分别采用一次性计算与分段计算对两个不同位置质点的速度历史进行了模拟, 一次性计算中的两

质点用节点 77852 和 77857 标记, 分段计算中的两质点用节点 17852 和 17857 标记。两个不同位置上质点(图 3(b)中 77852 与图 4(b)中的 17852 为第一个位置; 图 3(b)中 77857 与图 4(b)中的 17857 为另一个位置)的 x 和 z 方向的速度历史曲线分别如图 5 和图 6 所示, 其中实线为一次性计算结果, 虚线为分段计算结果, 起跳早的为 z 方向的速度(P 波速度), 起跳晚的为 x 方向的速度(S 波速度)。从图 5 和图 6 可以看出: 起跳早的实线和虚线从起跳时间、峰值、脉宽等都吻合相当好, 表明分段计算和一次性计算得到的 P 波速度具有很好的一致性; 起跳晚的实线和虚线的起跳时间、峰值、脉宽等也都吻合得相当好, 表明分段计算和一次性计算的 S 波速度同样具有很好的一致性; 由于模型的对称性, y 方向的速度均为 0。因此, 在弹性区内一次性计算与分段计算得到的 P 波和 S 波速度具有很好的一致性。

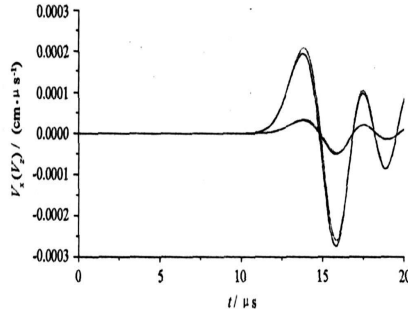


图 5 质点 77852 和 17852 的 x 、 z 速度

Fig. 5 The velocities of x and z directions of particles 77852 and 17852

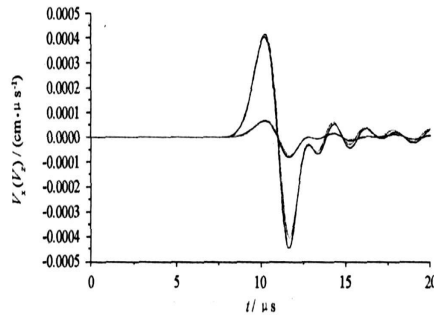


图 6 质点 77857 和 17857 的 x 、 z 速度

Fig. 6 The velocities of x and z directions of particles 77857 and 17857

一次性计算自炸药爆炸开始。分段计算中的第二段计算是以第一段计算得到的位移时间历史作为边界条件进行的。最终得到对应位置节点的一致性模拟结果, 说明采用位移边界条件能表征爆炸源区域岩石的本构特点和几何特征。因此, 从方法上讲, 以质点位移为边界条件的分段计算能够正确地模拟岩石弹性区域内地震波的传播。

从占用的计算资源看: 采用一次性算法的模型单元总数为 37 600 个, 而分段算法中第一段模型单元总数为 31 600 个, 第二段模型中单元总数为 6000 个; 可见, 采用分段计算方法可以有效地降低计算资源的需求。本算例中所取的岩石弹性区域不大, 当需要模拟感兴趣的、一般在近区或远区的地震波波形时, 岩石弹性区域的单元数目可能和非弹性区域单元相当甚至还要多, 在这样的情况下, 分段计算方法在对计算资源的需求上就更显出其优越性。

一次性算法和分段计算的耗时如表 1 所示。

表 1 计算耗时

Tab. 1 The time consumed in calculating

	总时间	非弹性区耗时	弹性区耗时
分段计算	1214s	1078s	136s
一次性计算	1758s	1078s	680s
对比值(%)	69.3	100	20.1

从总时间看:在相同的计算机上进行模拟,一次性算法与分段算法总耗时分别为 29min 18s 和 20min 14s,总时间对比值为 69.3%,分段算法省时近三分之一;弹性区耗时分别为 11min 20s 和 2min 16s,对比值为 20.1%,分段算法耗时只有一次性算法的五分之一。所研究的岩石弹性区域越大,弹性区计算所需节约的时间越多。

3 结论

(1) 针对岩石爆炸下响应特点以及非线性动力有限元和传统地震波模拟方法的局限性,提出了分段计算方法。

(2) 分段计算方法将岩石划分为非弹性区和弹性区,非弹性区采用非线性动力有限元方法,弹性区采用传统的震波模拟方法,非弹性区和弹性区依靠边界上质点位移传递数据。

(3) 模拟结果表明:以质点位移为边界条件的分段计算的方法在模拟岩石弹性区域内地震波的传播中是正确的。

(4) 分段计算能节约弹性区内计算时间和计算资源,方法是有效的。所模拟的区域越大,分段计算越能体现其优越性。

参考文献:

- [1] Bungum H, Kvaerna T, Mykkeltveit S, et al. Energy Partitioning for Seismic Events in Fennoscandia and NW Russia[C]//Proceedings of the 26th Seismic Research Review- nuclear Explosion Monitoring: Trends in Nuclear Explosion Monitoring. LA- UR- 04- 5801, 2004, 1: 394- 404.
- [2] Alteman Z S, Loewenthal D. Seismic Wave in a Quarter and Three Quarter Plane[J]. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 1970, 20: 101- 126.
- [3] Zienkiewicz O C. The Finite Element Method[M]. Third Edition. London: McGraw-hill, 1977.
- [4] 张光莹, 曾新吾. 伪谱法模拟各向异性/非均匀介质中弹性波的传播[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(3): 18- 22.
- [5] 韩开锋, 曾新吾. Hudson 理论中裂隙参数的适用性研究[J]. 石油物探, 2006, 45(5): 435- 440.
- [6] 王占江. 岩土中填充与空腔解耦爆炸的化爆模拟实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [7] Dobratz B M, Crawford P C. LINL Explosives Handbook, Properties of Chemical Explosive and Explosive Simulations[R]. UCRL- 52997, 1981.
- [8] Holmquist T, Johnson G, Cook W. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rate and High Pressures[C]//The 14th Int. Symp. Ballistics, 1995: 591- 600.
- [9] 鞠杨, 环小丰, 等. 损伤围岩中爆炸应力波动的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 136- 142.