

# 广东岭澳核电站爆破开挖岩体损伤特征研究

夏祥<sup>1</sup>, 李俊如<sup>1</sup>, 李海波<sup>1</sup>, 刘博<sup>1</sup>, 周青春<sup>1</sup>, 赵坚<sup>2</sup>, 刘亚群<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 瑞士联邦理工大学 岩石力学研究所, 瑞士 洛桑 CH-1015)

**摘要:** 为控制爆炸荷载作用下岩体的损伤范围, 在岭澳核电站二期工程现场进行了爆前、爆后岩体声波测试, 得到岩体的损伤范围。以此为基础, 根据爆炸荷载作用下岩体损伤发展规律, 基于概率形式定义损伤变量, 利用有限元程序 LS-DYNA 和有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup> 相结合的方法, 对现场基岩爆破产生的岩体损伤范围进行数值模拟, 并与现场岩体声波实验结果进行比较, 确定爆炸荷载作用下岩体损伤阈值  $D_{cri} = 0.2$ , 由此得到了岩体损伤范围随装药量的变化规律。结论认为, 在柱状装药情况下, 岩体损伤范围随装药量的增大而增大; 爆炸荷载作用下的岩体损伤区深度小于损伤区半径, 二者比例约为 1:3。

**关键词:** 岩石力学; 岩体损伤; 损伤区; 爆破

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2007)12-2510-07

## STUDY ON DAMAGE CHARACTERISTICS OF ROCK MASS UNDER BLASTING LOAD IN LING'AO NUCLEAR POWER STATION, GUANGDONG PROVINCE

XIA Xiang<sup>1</sup>, LI Junru<sup>1</sup>, LI Haibo<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, ZHOU Qingchun<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>2</sup>, LIU Yaqun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Institute of Rock Mechanics, Switzerland Federation University of Science and Technology, Lausanne CH-1015, Switzerland)

**Abstract:** Sonic wave tests have been conducted in the construction site of Ling'ao Nuclear Power Station(LNPS) in Guangdong Province, China. Based on the change rate of sound wave speed before and after blasting, damage zone size of surrounding rock has been determined. On the other hand, a statistics-based damage variable of rock mass has been proposed based on micromechanics. Damage zone size of rock mass under blasting is thus studied using a hybrid LS-DYNA and FLAC<sup>3D</sup> scheme. It is reported that the numerical simulation results agree well with the site monitoring results, and the damage threshold for the rock in site of LNPS,  $D_{cri}$ , is 0.2. The variation of damage zone size with charge weight has been analyzed by numerical simulations. It is observed that the rock damage zone size increases with charge weight. Damage zone depth of rock mass under blasting is less than damage zone radius. The damage zone radius is approximately 3 times of the damage zone depth.

**Key words:** rock mechanics; rock mass damage; damage zone; blast

## 1 引言

岩体爆破是大型水利、核电工程基础开挖必不可少的施工手段。在爆破开挖过程中, 炸药爆炸产

生的振动将造成周围岩体和下卧基岩不同程度和范围的损伤, 影响基岩的完整性和工程安全。正确分析爆炸荷载作用下基岩特征进而采取合理的控制方式是工程中关注的问题。针对这一问题, 国内外学者通过现场监测和数值模拟进行了大量的工作。例

**收稿日期:** 2007-05-15; **修回日期:** 2007-07-19

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412705); 国家自然科学基金资助项目(50439030)

**作者简介:** 夏祥(1976-), 男, 2006年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 主要从事岩体动力学方面的研究工作。E-mail: xia-xiang@163.com

如, 朱传云和卢文波<sup>[1]</sup>、李俊如等<sup>[2]</sup>分别通过爆前、爆后岩体声波波速的变化率量测了爆炸荷载作用下岩体的损伤范围。

一般认为, 岩体的宏观缺陷与岩石细观损伤的存在具有密切关系, 而损伤变量的定义是岩体宏观结构特征和力学性能与细观损伤相联系的纽带, 是岩体损伤力学定量分析的前提<sup>[3~7]</sup>。基于以上认识, 国内外学者对岩体在爆炸荷载作用下的损伤模型和损伤特征进行了相关研究。代表性的成果有美国 Sandia 国家实验室提出的岩体损伤模型, 如 NAG-FRAG 模型和 BCM 模型等<sup>[8, 9]</sup>。D. E. Grady 等<sup>[10~13]</sup>提出了岩石爆破的各向同性损伤模型, 即 GK 模型。该模型采用一个标量描述被拉应力激活的钱币状裂纹所引起的岩石刚度的劣化, 同时假定这些裂纹数服从双参数的 Weibull 分布。他们采用该模型模拟了爆炸荷载作用下油页岩的动态断裂和破碎, 并根据能量平衡准则得到了与应变率有关的碎块平均尺寸表达式。随后 L. M. Taylor 等<sup>[14]</sup>引进 B. Budiansky 和 R. J. O'Connell<sup>[15]</sup>的有效体积模量和泊松比与裂纹密度的关系表达式和 Grady 给出的碎块尺寸表达式, 对爆炸荷载作用下基岩的损伤分布特征进行了分析, 提出了 TCK 模型, 并将损伤变量以率形式耦合到动态本构方程中, 研究了岩石在体积拉伸荷载下的动态响应。J. S. Kuszmaul<sup>[16]</sup>在以上两种模型的基础上提出了新的 KUS 模型, 该模型考虑了高密度微裂纹的荫屏效应, 即微裂纹周围产生应力释放的材料能够重叠, 在裂纹的激活率中考虑了损伤引起的减少。该模型还利用了 M. E. Kipp 和 D. E. Grady 裂纹激活率及裂纹尺寸的公式, 采用了 L. M. Taylor 等<sup>[14]</sup>的裂纹密度、有效体积模量及有效泊松比之间的关系, 在本构关系中引入了损伤随时间的变化率这一参数。B. J. Thorne 等<sup>[17]</sup>在 KUS 模型的基础上考虑了激活裂纹数可能引起岩石体积的变化, 并通过采用不同的损伤变量定义, 提高了模型在大裂纹密度条件下的适应性。

上述模型都是以裂纹密度  $C_d$  来联系岩体的宏观缺陷和细观损伤, 即通过裂纹密度来定义岩体的损伤变量。R. Yang 等<sup>[18]</sup>、L. Q. Liu 和 P. D. Katsabanis<sup>[19]</sup>对以上模型在裂纹密度的分布及损伤变量的定义方面进行了修正, 认为只有在体积应变大于某一临界体积应变后裂纹才能扩展, 并考虑作用时间对裂纹密度的影响, 在定义损伤变量时引入了断裂概率的概念, 从数据统计的角度研究了岩体损伤区的形成和发展。H. Hao 等<sup>[20]</sup>认为在加载过程中岩体的各向异性累积损伤可以看作是材料的等效强度和刚度的

持续劣化, 用三个方向上的主拉应变的指数函数表示, 提出了岩体在爆炸荷载作用下的各向异性损伤模型, 并计算了爆孔周围岩体损伤区范围。类似的工作参见 Y. Q. Zhang 等<sup>[21~23]</sup>的研究。

对于岩体损伤的门槛值, 由于各学者所采用的损伤变量的定义和损伤模型的差别, 取值缺乏一致性。理论研究方面, 目前主要根据统计断裂力学进行损伤的定义和损伤门槛值的确定<sup>[14, 19]</sup>。如 W. F. Bawden 等<sup>[24, 25]</sup>认为岩体在爆炸荷载作用下损伤门槛值为 0.22, L. Q. Liu 和 P. D. Katsabanis<sup>[19]</sup>确定为 0.632, 而 B. J. Thorne 等<sup>[17]</sup>认为 0.693。在实际工程应用方面, 损伤定义主要根据爆前、爆后的声波波速变化率确定, 并以爆前、爆后波速变化率等于 10% 作为损伤门槛值<sup>[1, 26]</sup>。

本文以广东岭澳核电站二期基岩爆破开挖工程声波实验为依据, 根据现场岩体力学特性和装药参数, 利用莫尔-库仑模型和 FLAC 程序内嵌的 FISH 语言编制计算代码, 对爆炸荷载作用下的岩体损伤特征进行了数值模拟, 并与现场声波实验进行了对比, 分析了岩体的损伤范围随装药量的变化趋势。

## 2 岭澳核电站工程简介

广东岭澳核电站厂址位于深圳市东南 45 km, 大亚湾核电站东北方向 1~2 km 的沿海地带。设计总装机容量为  $360 \times 10^4$  kW, 分两期进行。核电站地形以台地剥蚀地形和堆积地形为主, 场区基岩未发现断裂, 主要由角岩和花岗岩组成。

根据设计要求, 需对二期工程的核岛(NI)、常规岛(CI)、联合泵站(PX)等主体结构的岩石基础采用爆破方式进行开挖, 总计开挖方量约  $20 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。炸药采用 2 号岩石乳化炸药, 柱状装药。为保证下卧基岩的完整性, 每次爆破时必须对炸药爆炸产生的岩体损伤范围进行控制。根据岭澳核电站现场的实际情况, 规定爆破产生的岩体损伤深度最大不超过 2 m。因此, 在工程实际中, 必须结合现场实验和数值分析对爆炸荷载作用下的岩体损伤范围进行研究。

## 3 声波实验

岩体声波实验布置如图 1 所示。爆区外沿直线布置一系列声波孔(1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>), 用以测定爆区外岩体损伤半径。爆区内选择若干爆孔超深约 2 m(5<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>), 用以测定爆区内岩体的损伤深度。每个测试孔内按

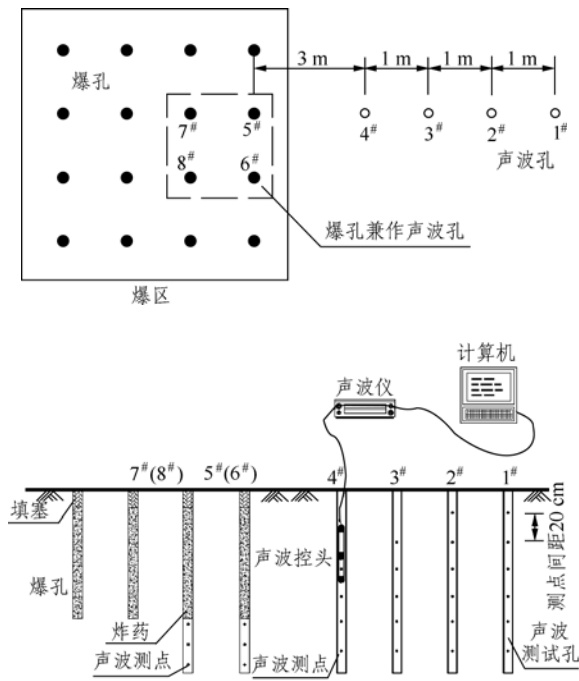


图 1 声波实验布置示意  
Fig.1 Arrangement of sonic wave test

20 cm 间距布置测点，测量爆破前、后岩体的波速变化，从而确定该点岩体的损伤特征。变化率大于 10% 即为达到破坏状态，反之认为岩体没有损伤<sup>[2]</sup>。声波实验得到的岩体损伤范围如图 2 所示。

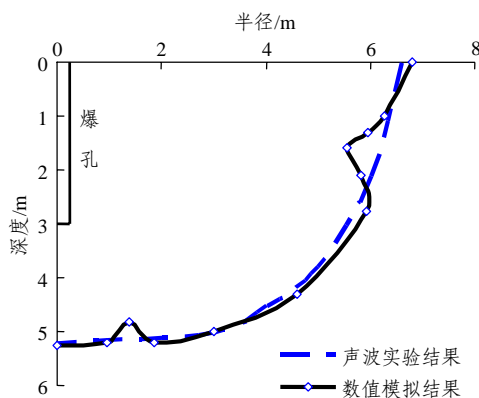


图 2 爆炸荷载作用下的岩体损伤范围  
Fig.2 Damage zone of rockmass under blasting load

## 4 数值计算模型

数值分析时采用了 ANSYS/LS-DYNA 和 FLAC<sup>3D</sup> 两种程序相结合的方法。通过 DYNA<sup>[27]</sup> 计算炸药爆炸后作用于周围岩体的压力，以此作为爆炸荷载传递到 FLAC<sup>3D</sup> 的岩体损伤模型中，研究在爆炸荷载作用下岩体损伤特征的变化规律。

### 4.1 炸药状态方程

LS-DYNA 程序可以直接模拟高能炸药的爆炸过程。炸药点火后体积膨胀，产生压力传递给周围介质。任意时刻爆源内一点的压力<sup>[18]</sup>为

$$p = Fp_{\text{eso}}(V, E) \tag{1}$$

$$F = \begin{cases} \frac{2(t_n - t_1)DA_{e\text{max}}}{3v_e} & (t_n > t_1) \\ 0 & (t_n \leq t_1) \end{cases} \tag{2}$$

$$p_{\text{eso}} = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_{0s}}{V} \tag{3}$$

式中： $p$  为爆炸压力(Pa)； $F$  为炸药的化学能释放率； $D$  为炸药爆速(m/s)； $t_n$ ， $t_1$  分别为当前时间和炸药内一点的起爆时间(s)； $A_{e\text{max}}$  为炸药单元横截面积最大值； $v_e$  为炸药单元体积； $p_{\text{eso}}$  为由 JWL 状态方程决定的压力(Pa)； $E$  为单位体积比内能(Pa)； $A$ ， $B$ ， $R_1$ ， $R_2$ ， $\omega$  均为与炸药相关的材料常数； $V$  为相对体积； $E_{0s}$  为初始比内能(Pa)。

岭澳核电站二期工程使用的炸药为 2 号岩石乳化炸药，炸药基本参数和 JWL 状态方程参数列于表 1。

表 1 炸药基本参数及 JWL 状态方程参数

Table 1 Parameters of explosive and JWL state equation							
密度 $\rho_0$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	爆速 $D$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$A$ /GPa	$B$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_{0s}$ /GPa
1 300	4 000	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

### 4.2 岩石计算模型

#### (1) 爆炸荷载作用下的岩体计算模型

炸药爆炸时近区岩石应变很大，应变率效应明显，采用包含应变率效应的塑性硬化模型：

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \tag{4}$$

$$E_p = \frac{E_0 E_{\text{tan}}}{E_0 - E_{\text{tan}}} \tag{5}$$

式中： $\sigma_0$  为岩石的初始屈服应力(Pa)； $E_0$  为杨氏模量(Pa)； $\dot{\epsilon}$  为加载应变率( $\text{s}^{-1}$ )； $C$  和  $P$  为 Cowper-Symonds 应变率参数，由材料应变率特性决定，参考 R. Yang 等<sup>[18]</sup>所做的岩体在不同应变率下的应力时程曲线和应力 - 应变关系的成果，分别取  $2.5 \text{ s}^{-1}$  和  $4.0$ ； $E_p$  为岩体塑性硬化模量(Pa)； $E_{\text{tan}}$  为切线模量(Pa)； $\beta$  为表示各向同性硬化和随动硬化贡献的硬化参数， $0 \leq \beta \leq 1$ ； $\epsilon_p^{\text{eff}}$  为岩石有效塑性应变，按下式定义：

$$\varepsilon_p^{\text{eff}} = \int_0^{t_a} d\varepsilon_p^{\text{eff}} \quad (6)$$

$$d\varepsilon_p^{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} \quad (7)$$

式中:  $t_a$  为发生塑性应变累计时间(s),  $\varepsilon_{ij}^p$  为岩体塑性应变偏量分量。

岩石的动态抗压强度随加载应变率的提高而增大, 一般地, 可近似用下式统一表达岩石动态抗压强度与静态抗压强度之间的关系<sup>[28]</sup>:

$$\sigma_{cd} = \sigma_c \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_c$  为岩石的单轴静态抗压强度(Pa)。工程爆破中, 岩石的加载应变率  $\dot{\varepsilon}$  为  $10^0 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ <sup>[29]</sup>。爆源附近应变率较高, 可取  $\dot{\varepsilon} = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ , 这里取  $10^4 \text{ s}^{-1}$ 。对于岩体的动态抗拉强度, 由于缺乏相应的实验和理论分析数据, 也近似取为

$$\sigma_{td} = \sigma_{st} \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{st}$  为岩石的单轴静态抗拉强度(Pa)。

根据以上分析及广东岭澳核电站二期工程岩石力学实验结果, 并参考类似研究成果, 计算采用的岩石物理力学参数如表 2 所示。

表 2 计算采用的岩石物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock used in calculation

密度 $\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	杨氏 模量 $E_0$ (GPa)	泊松 比 $\mu$	初始屈 服应力 $\sigma_y$ /MPa	切线模 量 $E_{tan}$ (GPa)	抗压 强度 $\sigma_c$ (MPa)	静态抗 拉强度 $\sigma_t$ /MPa	Cowper-Symonds 参数 $C/s^{-1}$	$P$
2 700	38.38	0.228	75	40	150	5.6	2.5	4.0

### (2) 岩体损伤计算模型

岩体损伤计算模型采用 FLAC<sup>3D</sup> 中的莫尔 - 库仑模型<sup>[30]</sup>。R. Yang 等<sup>[18-20, 31, 32]</sup>研究认为, 可以通过概率形式表示岩体裂纹和损伤的扩展过程。岩体中的等效体积拉应变是决定微裂纹是否激活和扩展的重要参考指标; 当岩体承受的荷载小于其静力强度时, 岩体不会发生破坏; 只有外荷载增大到超过静力强度后岩体中的裂纹才开始扩展。另一方面, 如果岩体承受大于其静力强度的荷载, 但荷载作用时间足够短, 岩体也不会发生破坏。所以爆炸荷载作用下的岩体损伤是应力和荷载作用时间的函数:

$$D_i = p_i = 1 - e^{-C_{di}^2} \quad (i=1, 2, 3) \quad (10)$$

式中:  $p_i$  为岩体损伤破坏的几率;  $C_{di}$  为  $i$  方向的裂纹密度, 表示单位体积包含的裂纹数。可以看出, 损伤参数  $D_i$  取值在 0 和 1 之间, 分别对应于完整、

无损材料和裂纹充分发展的材料。当岩体完整, 微裂隙没有被激活时, 裂纹密度  $C_{di} = 0$ , 损伤破坏几率为 0; 另一方面, 当岩体裂隙充分扩展后,  $C_{di}$  趋向无穷大, 岩体损伤接近为 1, 丧失承载能力。裂纹密度定义如下:

$$C_{di} = \begin{cases} \alpha_i (\varepsilon_i - \varepsilon_{cri})^{\beta_i} t & (\varepsilon_i > \varepsilon_{cri}) \\ 0 & (\varepsilon_i \leq \varepsilon_{cri}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\alpha_i, \beta_i$  均为材料常数;  $\varepsilon_i$  为  $i$  方向的主应变(拉为正);  $\varepsilon_{cri}$  为相对应的临界拉应变;  $t$  为达到断裂应力所经历的时间。对各向同性损伤, 式(11)中主应变变为岩体等效拉应变:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle^2} \quad (12)$$

式中:  $\langle \varepsilon_i \rangle$  表示当方括号中的变量大于 0 时有效,

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{|\varepsilon_i| + \varepsilon_i}{2}。$$

对于材料常数  $\alpha_i, \beta_i$  和  $\varepsilon_{cri}$ , 可以通过岩体单轴抗拉实验近似确定<sup>[18-20, 31, 32]</sup>。岩体临界拉应变计算如下:

$$\varepsilon_{cri} = \frac{1-2\nu}{E_i} \sigma_{sti} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{sti}$  为岩体在  $i$  方向上的静态抗拉强度,  $E_i$  为岩体材料的等效弹性模量。由式(11)可知, 将  $i$  方向上对应于岩体开裂应力的拉应变和裂纹密度分别记为  $\varepsilon_{fi}$  和  $C_{dfi}$ , 则对应于岩体开裂应力的裂纹密度为

$$C_{dfi} = \alpha_i (\varepsilon_{fi} - \varepsilon_{cri})^{\beta_i} (t_i - t_{ci}) \quad (i=1, 2, 3) \quad (14)$$

式中:  $t_i$  为岩体由初始状态达到开裂应力所需要的总时间,  $t_{ci}$  为由开裂应力对应的应变状态达到临界状态时间, 二者分别表示如下:

$$t_i = \frac{\varepsilon_{fi}}{\dot{\varepsilon}_i} \quad (i=1, 2, 3) \quad (15)$$

$$t_{ci} = \frac{\varepsilon_{cri}}{\dot{\varepsilon}_i} \quad (i=1, 2, 3) \quad (16)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}_i$  为岩体单轴拉伸应变率。从而有

$$C_{dfi} = \alpha_i (t_i \dot{\varepsilon}_i - t_{ci} \dot{\varepsilon}_i)^{\beta_i} (t_i - t_{ci}) \quad (i=1, 2, 3) \quad (17)$$

所以岩体由临界损伤状态到破裂状态的时间为

$$t = t_i - t_{ci} = \left( \frac{C_{dfi}}{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{1+\beta_i}} \dot{\varepsilon}_i^{-\frac{\beta_i}{1+\beta_i}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (18)$$

岩体破裂应力与对应的应变之间的关系可以写作:

$$\sigma_{fi} = \frac{E_i(1-D_{fi})}{1-2\nu} \varepsilon_{fi} \quad (i=1, 2, 3) \quad (19)$$

式中:  $D_{fi}$  为材料破坏时的损伤变量。

根据式(13), (18), (19)得岩体损伤的率相关本构方程为

$$\sigma_{fi} = (1 - D_{fi})\sigma_{sti} + \frac{E_i(1 - D_{fi})}{1 - 2\nu} \left( \frac{C_{dfi}}{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{1+\beta_i}} \dot{\epsilon}^{\frac{1}{1+\beta_i}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (20)$$

岩体动态抗压强度大约等比于应变率的三次方根<sup>[12, 19, 33]</sup>,  $\beta$  值可取 2。对于给定的  $D_{min}$  和  $C_{df}$ , 参数  $\alpha_i$  可以根据岩体爆破实验的爆破漏斗大小试算确定。

本文岩体损伤计算模型使用的主要相关参数如表 3 所示。

表 3 岩体损伤计算参数

Table 3 Calculation parameters of rock damage

$\alpha/10^6$	$\beta$	静态抗拉强度	杨氏模量	损伤门槛值	泊松比 $\nu$
		$\sigma_{st}/\text{MPa}$	$E_0/\text{GPa}$	$D_{min}$	
3.15	2	5.6	38.38	0.2	0.228

### 4.3 数值计算几何模型

爆炸荷载数值计算模型如图 3 所示。模型中圆柱直径为 10 m, 高 8 m。装药半径为 25 mm。边界条件设为透射边界以减小边界应力波反射的影响, 反映爆源周围岩体的实际受力状态。相应地, 爆炸荷载作用下岩体损伤的计算模型如图 4 所示。模型尺寸和边界条件均与计算爆炸荷载的模型尺寸相同。

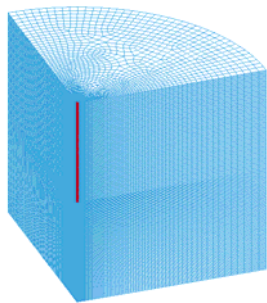


图 3 岩体爆炸荷载数值计算模型

Fig.3 Computational model of rock under blasting load

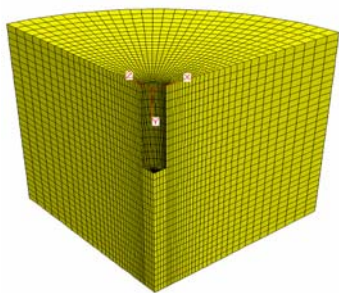


图 4 爆炸荷载作用下岩体损伤计算模型

Fig.4 Numerical model for rock damage under blasting load

## 5 岩体损伤计算结果及分析

图 5 为 DYNA 计算得到的装药量为 29.7 kg 时的岩体爆炸荷载曲线。图 6 为根据图 5 所示的爆炸荷载计算得到的岩体损伤变量的分布。从图中可以看出, 当损伤变量值为 0.2 时, 损伤区的最终半径为 6.80 m, 损伤深度为 2.26 m, 与在岭澳核电站二期工程现场声波实验得到的结果接近, 所以据此确定岭澳核电站岩体损伤门槛值为 0.2, 该值与按声波波速变化率推导出的临界损伤变量值  $D_{crit} = 0.19$  也很接近<sup>[2]</sup>。图 2 为在损伤门槛值  $D = 0.2$  的情况下计算得到的损伤范围示意图, 并与声波实验得到的结果的比较。

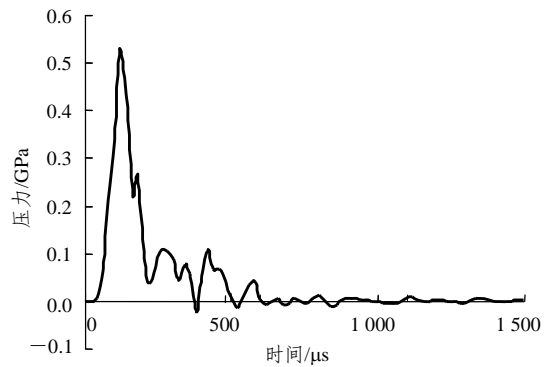


图 5 岩体爆炸荷载曲线

Fig.5 Blasting load curve acting on rock mass

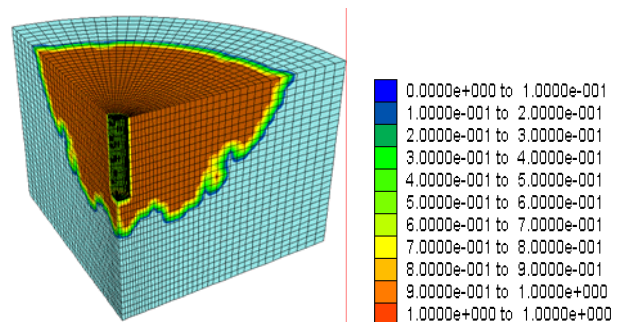


图 6 爆炸荷载作用下的岩体损伤变量的分布

Fig.6 Distribution of rock mass damage under blasting loading

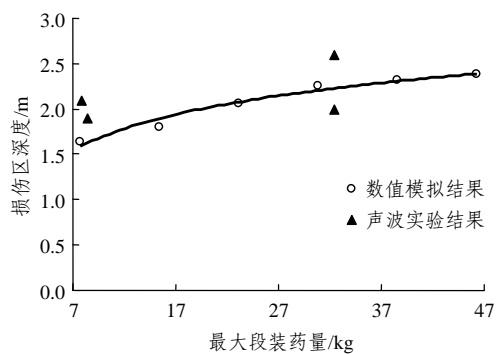
改变模型中的爆炸荷载大小, 可以得到在其他各种装药量情况下的岩体爆炸荷载, 导入岩体损伤模型中, 得到一系列岩体损伤半径和损伤深度结果, 见表 4。从表中可以看出, 爆孔以下损伤区的深度小于损伤区的半径, 并且损伤区半径与损伤区深度的比例约为 3 : 1<sup>[14, 21]</sup>。

表 4 损伤区范围与最大段药量的关系

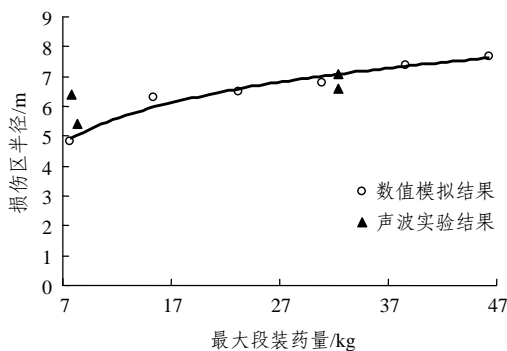
Table 4 Relation between damage zone sizes and the maximum charge weight per delay interval

最大段装药量/kg	损伤区深度/m	损伤区半径/m
7.7	1.64	4.80
15.4	1.80	6.31
23.1	2.06	6.50
30.9	2.26	6.80
38.6	2.32	7.38
46.3	2.39	7.67

由表 4 即可绘出爆炸荷载作用下岩体损伤区随最大段装药量的变化曲线, 如图 7 所示。图 7(a) 为岩体损伤区深度随最大段装药量的变化规律, 图 7(b) 为损伤区半径随最大段装药量的变化曲线, 并分别与现场岩体声波实验得到的变化规律进行了比较。从图中可以看出, 岩体损伤区范围随最大段装药量增大而增大, 但增长幅度逐渐减小。



(a) 损伤区深度



(b) 损伤区半径

图 7 损伤区大小随最大段药量的变化

Fig.7 Variation of damage zone sizes with the maximum charge weight per delay interval

## 6 结 论

为研究爆炸荷载作用下岩体的损伤分布特征, 在岭澳核电站二期工程现场进行了一系列声波实

验, 得到了岩体的损伤区域范围。以此为基础, 根据爆破施工所采用的炸药基本参数和现场岩体的物理力学特性, 采用动力计算有限元程序 DYNA 和有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup> 相结合的方法, 利用 FISH 语言编程计算了爆炸荷载作用下的岩体损伤特征, 分析了不同装药量情况下岩体损伤区大小与装药量的关系, 并与现场声波实验结果进行了比较, 得到如下结论:

(1) 在柱状装药情况下, 爆炸荷载作用下岩体损伤区深度小于损伤区半径, 损伤区半径与损伤区深度的比例约为 3:1。

(2) 岩体损伤区范围随最大段药量增大而增大, 增长幅度逐渐减小。

(3) 在岭澳核电站二期工程现场, 根据岩体声波测试与数值分析对比的结果确定的岩体损伤门槛值为 0.2。

## 参考文献(References):

- [1] 朱传云, 卢文波. 三峡工程临时船闸与升船机中隔墩爆破安全判据的研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(4): 375 - 380.(ZHU Chuanyun, LU Wenbo. Blasting safety criterion for the rock wall between temporary shiplock and shiplift in the Three Gorges Project[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(4): 375 - 380.(in Chinese))
- [2] 李俊如, 夏 祥, 李海波, 等. 核电站基岩爆破开挖损伤区研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 674 - 4 678.(LI Junru, XIA Xiang, LI Haibo, et al. Study on blast-induced bedrock damage extension for a nuclear power station project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 674 - 4 678. (in Chinese))
- [3] 高文学, 刘运通, 杨 军. 脆性岩石冲击损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 153 - 156.(GAO Wenxue, LIU Yuntong, YANG Jun. A study on shock damage model of brittle rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 153 - 156.(in Chinese))
- [4] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, 12(1): 1 - 30.
- [5] 凌建明. 节理裂隙岩体损伤力学研究中的若干问题[J]. 力学进展, 1994, 25(2): 257 - 264.(LING Jianming. Some problems on damage mechanics of jointed rock mass[J]. Advances in Mechanics, 1994, 25(2): 257 - 264.(in Chinese))
- [6] VALLIAPPAN S, MURTI V, ZHANG W H. Finite element analysis of anisotropic damage mechanics problems[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(6): 1 061 - 1 071.
- [7] 杨延毅. 裂隙岩体非线性流变性状与裂隙损伤扩展过程关系研究[J]. 工程力学, 1994, 11(2): 81 - 90.(YANG Yanyi. The underlying relationship between nonlinear rheological property of fissured rocks

- and damage development[J]. *Engineering Mechanics*, 1994, 11(2): 81 - 90.(in Chinese)
- [8] 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 岩体中爆炸与冲击下的破坏研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(4): 385 - 389.(WANG Mingyang, QI Chengzhi, QIAN Qihu. Studies on failure of rock under explosion and impact[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001, 20(4): 385 - 389.(in Chinese))
- [9] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤模型及评述[J]. *工程爆破*, 1999, 5(3): 71 - 75.(YANG Xiaolin, WANG Shuren. Review on damage model of rock blasting[J]. *Engineering Blasting*, 1999, 5(3): 71 - 75.(in Chinese))
- [10] GRADY D E. The mechanics of fracture under high-rate stress loading[C]// BAZANT Z P ed. *Preprints of the William Prager Symposium on Mechanics of Geomaterials: Rocks Concretes and Soils*. Evanston, USA: Northwestern University, 1985: 129 - 155.
- [11] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(2): 147 - 157.
- [12] GRADY D E, KIPP M E. Dynamic rock fragmentation[C]// ATKINSON B K ed. *Fracture Mechanics of Rock*. London: Academic Press, 1987: 429 - 475.
- [13] KIPP M E, GRADY D E. Numerical studies of rock fragmentation[R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 1978.
- [14] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1986, 55(3): 301 - 320.
- [15] BUDIANSKY B, O'CONNELL R J. Elastic moduli of a cracked solid[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1976, 12: 81 - 97.
- [16] KUSZMAUL J S. A new constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading[C]// *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Columbia, USA: [s.n.], 1987: 412 - 423.
- [17] THORNE B J, HOMMER P J, BROWN B. Experimental and computational investigation of the fundamental mechanisms of cratering[C]// *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Brisbane, Australia: [s.n.], 1990: 26 - 31.
- [18] YANG R, BAWDEN W F, KATSABANIS P D. A new constitutive model for blast damage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(3): 245 - 254.
- [19] LIU L Q, KATSABANIS P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 217 - 231.
- [20] HAO H, WU C Q, ZHOU Y X. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with an-isotropic continuum damage models. part I: equivalent material property approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35(2): 79 - 94.
- [21] ZHANG Y Q, HAO H, LU Y. Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2003, 41(9): 917 - 929.
- [22] 鞠杨, 夏昌敬, 谢和平, 等. 爆炸荷载作用下煤岩巷道底板破坏的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3 664 - 3 668.(JU Yang, XIA Changjing, XIE Heping, et al. Numerical analysis of rupture of subfloor of coal mine tunnel subjected to blasting loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3 664 - 3 668.(in Chinese))
- [23] 刘运通, 高文学. 爆炸荷载下岩石损伤的数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 789 - 792.(LIU Yuntong, GAO Wenxue. Numerical simulations of rock damage under explosion loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 789 - 792.(in Chinese))
- [24] BAWDEN W F, KATSABANIS P D, YANG R. Blast damage study by measurement and numerical modeling of blast damage and vibration in the area adjacent to blast hole[C]// Bawden W F, Archibald J F ed. *Innovative Mine Design for the 21st Century*. Proceedings of the International Congress on Mine Design. Ontario, Canada: [s.n.], 1993: 23 - 26.
- [25] YANG R, TURCOTTE R. Blast damage modeling using ABAQUS/explicit[C]// *User's Conference Proceedings*. [S.l.]: [s.n.], 1994: 1 - 3.
- [26] 张继春. 三峡工程基岩爆破振动特性的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(2): 131 - 137.(ZHANG Jichun. Vibration characteristics of blasting in bed rock mass at the Three Gorges Project[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(2): 131 - 137.(in Chinese))
- [27] CHEN S G, ZHAO J, ZHOU Y X. UDEC modeling of a field explosion test[J]. *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 2000, 4(2): 149 - 163.
- [28] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 151 - 155.(LI Xibing, GU Desheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University Press, 1994: 151 - 155.(in Chinese))
- [29] 单仁亮. 岩石冲击破坏力学模型及其随机性研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 1997.(SHAN Renliang. *Mechanical model for shock failure of rock and its randomness analysis*[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 1997.(in Chinese))
- [30] Itasca Consulting Group Inc.. *Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions*(Version 2.1) user's guide[R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc., 2003.
- [31] HAO H, WU C Q. Scaled-distance relationships for chamber blast accidents in underground storage of explosives[J]. *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 2001, 5(1/2): 57 - 90.
- [32] MA G W, HAO H, ZHOU Y X. Modeling of wave propagation induced by underground explosion[J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 22(3/4): 283 - 303.
- [33] HAO H, MA G W, ZHOU Y X. Numerical simulation of underground explosions[J]. *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 1998, 2(5): 383 - 395.