

岭澳核电站二期工程基岩爆破安全阈值分析

夏祥¹, 李海波¹, 李俊如¹, 朱莅¹, 刘博¹, 王晓炜²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 中广核工程有限公司, 深圳 518031)

摘要: 核电站基础爆破开挖过程中必须严格控制岩体爆破损伤深度, 确保建基面安全。以广东岭澳核电站二期工程基础爆破开挖为例, 通过现场爆破振动监测、岩体声波试验以及数值模拟, 综合分析了岩体爆炸振动衰减规律和损伤特征, 研究了距爆源一定距离处岩体振动速度与损伤特征的关系, 提出了岭澳核电站二期工程岩体爆炸损伤深度的控制方法, 确定了相应的安全阈值。分析结果表明, 岭澳核电站二期工程基础爆破开挖时, 当距爆源 30 m 处的岩体质点振动速度不超过 5 cm/s 时, 可保证下卧基岩的损伤深度小于 2 m, 确保建基岩完整性。

关键词: 安全阈值; 爆破振动; 损伤; 核电站; 爆破

中图分类号: TU 751.9

文献标识码: A

Research on vibration safety threshold for rock under blasting excavation

XIA Xiang¹, LI Hai-bo¹, LI Jun-ru¹, ZHU Li¹, LIU Bo¹, WANG Xiao-wei²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. China Nuclear Power Engineering Company Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: Damage should be controlled in order to ensure the safety of bedrock under blasting excavation in nuclear power plant. For this case, blasting vibration, sonic wave test and numerical simulation are employed to study the wave attenuation in rock mass and blasting induced damage under blasting excavation at Ling'ao Nuclear Power Station (LNPS) in Guangdong Province of China. The relationship between damage characteristic and peak particle velocity (PPV) at a certain distance from the charge are suggested. The method and the vibration safety threshold to control the damage depth for bedrock under blasting excavation are then presented. It is reported that when the PPV at 30 m from charge is not beyond the safety threshold of 5 cm/s, the damage depth of the bedrock will not exceed 2 m. The method and the safety threshold presented can ensure the safety of bedrock under blasting excavation in the project.

Key words: safety threshold; blast vibration; damage; rock mass; nuclear power station

1 引言

自 1991 年以来, 我国相继建成秦山、大亚湾、岭澳、田湾 4 个核电站, 总装机容量为 900×10^4 kW。为适应我国国民经济建设对能源总量以及能源结构的需求, 2006 年 3 月 22 日, 国务院常务会议审议并原则通过国家《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》, 根据这一发展规划, 今后 15 年里将建设至少 30 座核电机组, 到 2020 年, 运行核电装机容量为 $4\,000 \times 10^4$ kW, 占全国总发电量的 4%, 在建核电装机容量为 $1\,800 \times 10^4$ kW。

一般而言, 核电站均选择相对完整岩体作为核

岛等关键建筑物基础, 以满足核电站主体建筑物在自重以及地震荷载作用下变形要求, 因此核电站基础施工阶段主体建筑物基础大部分采用分层爆破开挖方式进行。由于核电工程对建基面完整性要求很高, 如何控制爆破开挖对保留基岩损伤影响以确保建基面完整是核电工程安全施工的控制因素之一。

目前国内外在爆炸荷载作用下基岩损伤控制方面尚无成熟研究成果, 现有的研究工作主要集中在岩体爆炸荷载以及爆炸振动衰减和损伤特征分析等方面。例如, Chen 等^[1]利用数值计算方法分析了地下球状装药情况下的岩体爆炸荷载特征, 李宁等^[2]通过爆生气体的状态方程以及爆生气体与周围岩体

收稿日期: 2008-01-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.50439030); 国家十一五支撑项目(No.2006BAB04A06)资助。

作者简介: 夏祥, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事岩石动力学方面的工作。E-mail: xia-xiang@163.com

的相互作用分析,得到了单孔爆破情况下完整岩石和包含初始裂隙岩体的爆炸荷载特性。浦锡锋等^[3]分析了花岗岩中强爆炸自由场应力波参数和空腔解耦强爆炸对岩壁的压力,得到了炸药爆炸后岩体中峰值径向应力随比例距离的变化趋势。此外, Korichi Talhi 等^[4]利用砂岩进行了一系列水下爆破实验,对影响爆炸冲击波幅值的各种因素进行了分析, Jacob 等^[5]认为,爆炸冲击压力随炸药长度和半径的增大线性递增,随炸药长径比(炸药高度与直径的比例)增大而减小。

在岩体损伤特征研究方面, Grady 和 Kipp 提出了描述爆炸荷载作用下岩体损伤特征的各向同性损伤模型,即 GK 模型^[6-9]。该模型采用一个标量描述被拉应力激活的硬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。随后 Chen 和 Taylor^[10]引进 O'Connell^[11]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,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。Kuszmaul 在以上 2 个模型的基础上提出了新的 KUS 模型^[12],考虑了高密度微裂纹的荫屏效应,还利用了 Kipp M.E.和 Grady D.E 裂纹激活率及裂纹尺寸的公式,采用了 Chen 和 Taylor 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。Yang R.等^[13]、Liu L.Q.等^[14]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。Hao H.和 Wu C.Q 等^[15]认为,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,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。此外,王在泉^[16]、王志亮^[17]等也采用分形研究等方法对岩体爆炸损伤进行了研究。

在岩体爆炸振动的衰减规律研究方面,基于大量的现场监测成果,国内外研究人员提出了描述岩体振动速度衰减规律的经验公式,如萨道夫斯基公式、兰格弗尔斯公式、欧美公式和日本公式等^[18]。另外, Wu^[19]、Ma^[20]和 Chen^[1]等通过数值模拟研究

了岩体爆炸振动速度的衰减规律,认为爆破地震波在爆源近区的衰减比中、远区要大得多,爆破地震波的传播由于节理的存在具有不可逆性和方向性。

在基岩的安全控制标准研究方面,根据爆前、爆后基岩波速变化率并结合现场振动监测结果,一些学者进行了一些初步工作,如张继春、蔡德所等^[21-22]对三峡工程的弱风化花岗岩底板进行了现场爆破试验,通过爆破前后的岩体声波对比,认为岩体爆破松裂半径为 1.4~2.0 m,松裂深度为 0.2~0.7 m,由此确定临界质点振动速度为 13.8~16.6 cm/s。类似的,黄照平等^[23]根据对白水峪水电站坝区爆破试验数据分析,得到了振动速度的衰减规律,认为将水电站现场残留岩体的临界质点振动速度控制在 3.5 cm/s 以下即可以保证残留岩体的稳定性。

本文以广东岭澳核电站二期工程为例,介绍了核电工程基础爆破开挖控制方法和标准的研究工作,旨在为类似工程提供借鉴。

2 工程概况和研究思路

广东岭澳核电站二期工程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 200×10^4 kW。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等主体结构的岩石基础采用分层爆破方式进行开挖,总计开挖方量为 20 余万立方米,图 1 为核岛基础岩体爆破分层示意图。

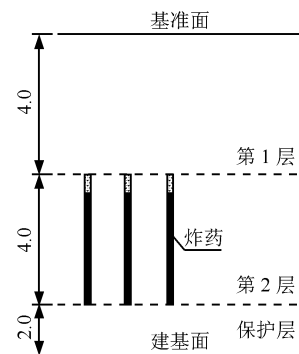


图 1 核岛基坑爆破分层示意(单位: m)

Fig.1 Illustration of the excavating layer of the Nuclear Island foundation pit (unit: m)

由图 1 可以看出,开挖总深度(即地面至建基面深度)为 10 m,第 1 层和第 2 层深度均为 4 m,采用爆破方式开挖,第 3 层深度为 2 m,采用人工凿除方式以保护建基面。考虑到第 1 层爆破开挖时

孔底距建基面深度为 6 m，一般情况下爆破损伤深度不可能达到此范围，因此控制第 2 层爆破开挖损伤深度（2 m）是基础爆破开挖控制的主要内容。考虑到损伤深度与不同爆源距离处质点振动速度的相关性以及安全控制的便利，本文提出以距爆源边缘 30 m 处基岩质点振动速度不超过某一值（安全阈值）来控制爆破开挖垂直向损伤范围确保预留基岩完整性的方法，如图 2 所示。根据这种方法，当 30 m 处质点振动速度小于给确定安全阈值时即可知基岩损伤深度在允许范围内。实际施工时，可以仅仅通过 30 m 处质点振动速度的监控，实现岩体损伤的控制，同时也可以根据场地衰减规律以及装药参数，通过分析 30 m 处质点振动速度值，便捷地调整和优化爆破施工方案。这里设定控制岩体爆炸振动速度的距离为 30 m 有如下两方面的原因：

（1）该距离一般处于爆炸近区和中远区之间的区域，过近则受爆炸飞石和冲击波的影响，不便布设振动传感器；并且距离爆源越近，振动速度对岩体爆炸的各种因素越敏感，数据离散性越大，不易归纳衰减规律。过远则振动速度受岩体节理、地形地貌等影响因素更多，也不利于振动速度控制标准的分析和制定。（2）在爆炸中远区以外的区域，振动频率也是影响岩体爆炸安全的一个因素。而在距爆源较近的区域，这一影响较小，为方便计，本文采用的研究方法忽略了振动频率的影响。

为此，采用现场振动监测、声波实验以及数值模拟相结合的方法，综合分析爆破振动的衰减规律以及基岩损伤特征，建立岩体损伤深度与 30 m 处质点振动速度之间的对应关系，提出基岩爆破安全控制标准。

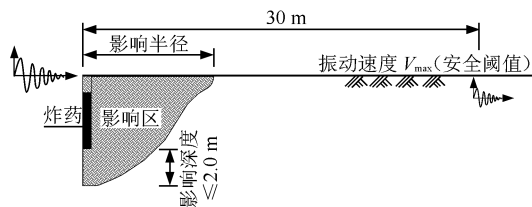


图 2 岩体爆炸振动安全阈值示意
Fig.2 Safety threshold of rock vibration by blasting

3 岩体爆炸荷载

炸药爆炸瞬间产生的对周围岩体的作用力，即岩体爆炸荷载的确定是进行爆炸荷载作用下岩体损伤特征和衰减规律分析的基础和前提。由于受炸药种类、装药方式以及岩体特性等的影响，准确

分析爆炸荷载是目前尚未很好解决的问题。常用的方法包括将等效静荷载乘以动力系数（通常为 1~2 之间）确定^[24]，或者是假定爆炸荷载为三角形脉冲波^[25-26]，荷载峰值根据 Henrych^[27]提出的药包中心处爆轰波产生的初始压力估算。

本文采用广泛应用于爆炸仿真分析的 LS-DYNA 程序计算岩体的爆炸荷载，该程序中的炸药材料可以直接模拟高能炸药的爆炸过程^[21]，数值模拟中，炸药状态方程如下：

$$P_{\cos} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中： P_{\cos} 为由 JWL 状态方程决定的压力； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为与炸药相关的材料常数； V 为相对体积； E_0 为初始比内能，相关参数值见表 1。

表 1 炸药参数
Table 1 Properties of explosive

密度 ρ_0 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	D /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /GPa
1 300	4 000	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

注： D 为爆炸速度。

由于炸药爆炸时近区岩体应变很大，应变率效应明显，爆炸荷载作用下的岩体模型采用包含应变率效应的塑性硬化模型：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}); \\ E_p &= \frac{E_y E_{\tan}}{E_y - E_{\tan}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： σ_0 为岩体的初始屈服应力 (Pa)； E_y 为弹性模量 (Pa)； $\dot{\epsilon}$ 为加载应变率 (s^{-1})； C 和 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数，由材料应变率特性决定的常量； E_p 为岩体塑性硬化模量 (Pa)； E_{\tan} 为切线模量 (Pa)； β 表示各向同性硬化和随动硬化贡献的硬化参数， $0 \leq \beta \leq 1$ ； ϵ_p^{eff} 为岩体有效塑性应变。

根据现场实验结果，广东岭澳核电站二期工程基岩相关力学参数见表 2。

岭澳核电站二期工程施工中，为减小爆炸振动，确保基岩安全，第 2 层爆破时采用单孔单段设计，每次爆破所有爆孔深度与装药深度均相同，因此爆炸计算时最大段药量在数值上等于单孔药量。为此，爆炸荷载数值计算的几何模型如图 3 所示。圆柱形模型半径为 8 m，高 8 m。装药半径和装药

高度按照每次装药量不同调整。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。

表 2 核电站现场岩体基本力学特性参数
Table 2 Properties of rock mass

参数	量值	参数	量值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700	抗压强度 σ_c / MPa	150
杨氏模量 E_0 / GPa	68.69	抗拉强度 σ_{st} / MPa	5.6
泊松比 μ	0.228	Cowper-Symonds 参数 C / s^{-1}	2.5
屈服强度 σ_0 / MPa	75	Cowper-Symonds 参数 P	4.0
切线模量 E_{tan} / GPa	40		

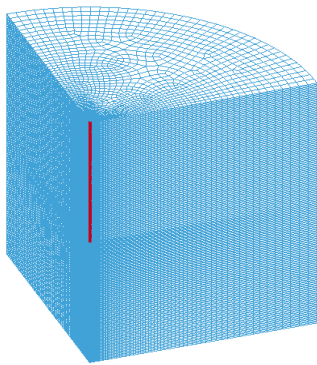


图 3 岩体爆炸荷载数值计算模型

Fig.3 Computational model for rock blasting

图 4 为根据 DYNA 计算得到的装药量为 10 kg 时岩体爆炸荷载时程曲线。可以看出，爆炸荷载峰值约为 400 MPa。根据文献[27]，单孔柱状装药情况下冲击波作用在粉碎区边界上岩体的峰值压力可以由下式计算：

$$P_r = \frac{P_d}{d^3}, \quad P_d = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \frac{2\rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D} \quad (3)$$

式中： P_r 、 P_d 分别为冲击波作用在粉碎区边界和孔壁岩石上的初始冲击压力 (Pa)； ρ 、 ρ_0 分别为岩体和炸药的密度 (kg/m^3)； C_p 为岩体纵波波速，这里

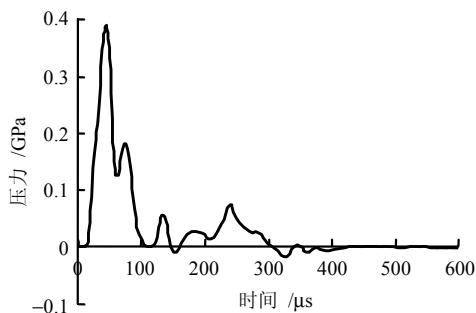


图 4 岩体爆炸荷载曲线

Fig.4 Pressure histories of rock under blasting

取 3 400 m/s； γ 为爆轰产物的膨胀绝热指数，一般取 3； d 为粉碎区半径与装药半径的比例，一般为 1~3 之间，这里取 2.8，其他符号的物理意义和取值同表 2。由式 (3) 可得粉碎区边界岩体的峰值压力 $P_r = 380 \text{ MPa}$ 。数值模拟结果与理论计算结果比较一致。

4 岩体损伤特征

本节根据岩体爆炸荷载的分析结果，采用 FLAC^{3D} 程序的内置 Fish 语言编程计算分析岩体的损伤范围，并与声波实验的结果进行对比，在此基础上综合分析爆炸荷载作用下岩体的损伤特征。

4.1 声波实验

岩体声波实验布置如图 5 所示。爆区外沿直线布置一系列声波孔 (如 1#~4#)，用以测定爆区外岩体损伤半径。爆区内选择若干爆孔超深 1.5~3.5 m (如 5#~8#)，用以测定爆区内岩体的损伤深度。每个测试孔内按 20 cm 间距离测爆破前后岩体的波速变化，确定该点岩体的损伤特征。

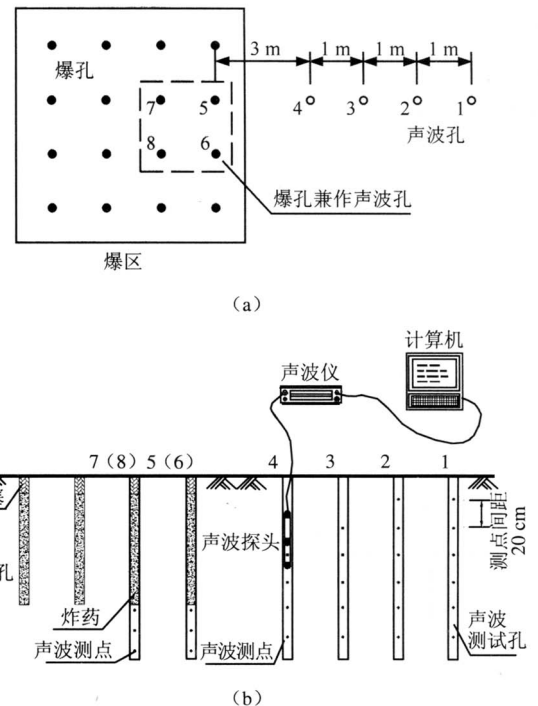


图 5 声波实验布置示意

Fig.5 Arrangement of sonic wave testing

根据我国《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》[28]，以爆前爆后声波波速变化率大于 10% 作为判断标准，本文讨论的岩体损伤范围就是根据这一标准来断定的。当变化率大于 10% 时，认为岩体产生了损伤，符合该条件的区域称为岩体损伤区；当变化率小于 10% 时，岩体损伤可以不考虑。

由声波实验得到的岩体损伤范围如图 6 所示，横坐标和纵坐标分别表示爆孔周围岩体在水平方向和垂直方向的损伤范围，即损伤半径和损伤深度。

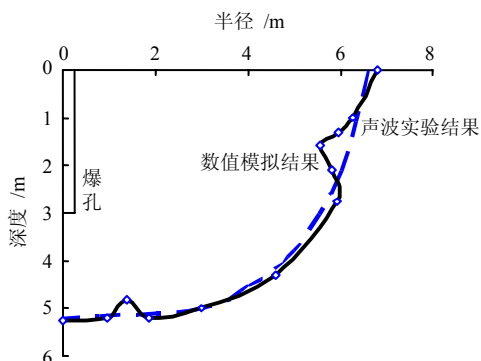


图 6 爆炸荷载作用下的岩体损伤范围
Fig.6 Damage zone of rock under blasting

4.2 岩体损伤特征的数值模拟

本文采用 FLAC^{3D} 分析岩体损伤特征，计算中岩体模型采用莫尔-库仑模型^[29]，岩体损伤采用概率形模型：

$$D_i = p_f = 1 - e^{-C_{di}^2}, \quad i=1, 2, 3 \quad (4)$$

式中： p_f 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 0~1 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：

$$C_{di} = \begin{cases} \alpha_i (\epsilon_i - \epsilon_{cri})^{\beta_i t}, & \epsilon_i > \epsilon_{cri} \\ 0, & \epsilon_i \leq \epsilon_{cri} \end{cases} \quad (5)$$

式中： α_i 、 β_i 为材料常数； ϵ_i 为 i 方向的主应变（拉为正）； ϵ_{cri} 为岩石的临界拉应变； t 为达到临界应变后所经历的时间。根据岭澳核电站二期工程现场勘查报告，岩体损伤计算模型所采用的参数见表 3，其他参数见表 2。

表 3 岩体损伤计算参数
Table 3 Parameters of rock damage

硬化参数		损伤门檻值 D_{min}
$\alpha/10^6$	β	
3.15	2	0.2

爆炸荷载作用下岩体损伤的计算模型和边界条件均与计算爆炸荷载相同。

图 7 为根据图 4 所示的爆炸荷载计算得到的岩

体损伤变量的分布。可以看出，损伤区的最终半径为 6.80 m，损伤深度为 2.26 m，与声波试验的结果接近。从图 6 数值模拟得到的岩体损伤范围与声波试验得到的结果比较可见，岩体损伤深度与损伤半径的比例约为 1:3，与 Zhang^[30]的结果基本一致。

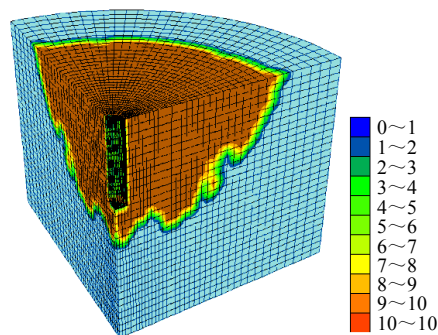


图 7 爆炸荷载作用下的岩体损伤变量的分布
Fig.7 Damage contour of rock under blasting

5 岩体振动衰减规律

本节采用数值计算与现场监测相结合的方法，利用离散元程序 3DEC 模拟了岩体爆炸振动衰减特征，分析了各种装药量情况下的岩体振动速度衰减规律。

5.1 现场振动监测

核电站基础爆破开挖平面如图 8 所示，爆破前在距爆源不同距离处布置若干监测点，记录各监测点的振动速度，得到岩体爆炸振动速度随距离的衰减规律，如图 9 所示。

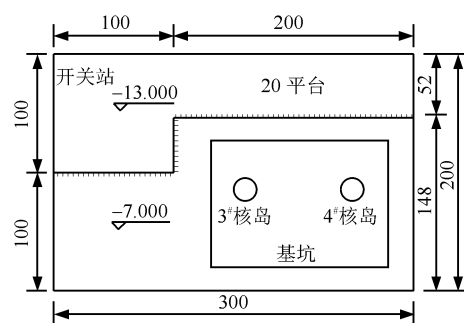


图 8 岭澳核电站核岛基坑平面（单位：m）
Fig.8 Plan of construction site of foundation excavation in LNPS project (unit: m)

5.2 岩体爆炸振动特征数值模拟

采用 3DEC 进行数值模拟，数值模拟中节理采用库仑滑动节理模型^[30]，其相关力学参数见表 4。根据现场地形和地质情况建立的离散元模型如图 10 所示，模型尺寸（长×宽×厚度）300 m×200 m×80 m。为模拟实际情况下的无限区域，模型周围均采

用了粘性边界条件。以上述岩体爆炸荷载(图4)作为输入荷载,施加于爆源周围粉碎区边界。

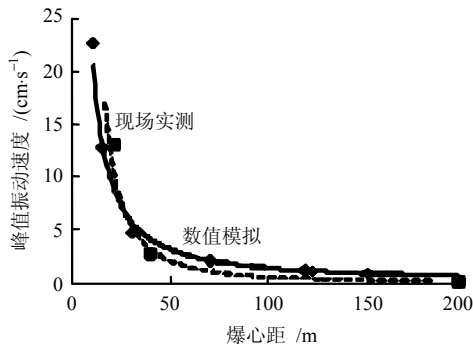


图9 岩体峰值振动速度衰减曲线

Fig.9 Attenuation characteristics of PPV in rock blasting

表4 岩体节理基本参数

Table 4 Properties of rock joints

参数	量值	参数	量值
法向刚度 $K_n / (\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	58	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	35
切向刚度 $K_s / (\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	28	剪胀角 $\psi / (^\circ)$	8
黏聚力 C / MPa	3.5	平均节理间距 s / m	30
抗拉强度 σ_{qt} / MPa	2.1		

计算时记录模型中一系列点的振动速度时程曲线,分析岩体质点峰值振动速度随距离的衰减规律,并与现场实测结果进行了对比,如图9所示,可以看出数值模拟结果与现场监测结果相近,分析结果还表明爆源近区的衰减速度远大于爆源远区,在距爆源40m的范围内峰值振动速度衰减幅度超过总体衰减幅度的90%。

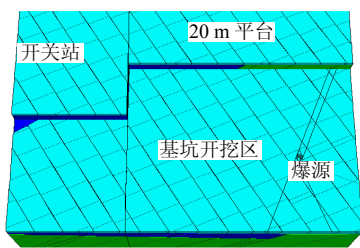


图10 基坑开挖爆破计算模型

Fig.10 Numerical model for rock vibration by blasting

6 岩体爆炸振动安全阈值

重复上述爆炸荷载、岩体损伤和振动衰减的计算步骤,改变爆破装药量,可得到岩体损伤范围和对应的距离爆源30m处质点振动速度,见表5。由表5可以看出,爆炸荷载作用下岩体质点振动速度与损伤区大小表现出良好的相关性。考虑到核电站基础爆破开挖中,对损伤半径没有相关限定,仅限定损伤深度以确保建基面完整性,根据表5的分析结果,拟合岩体的损伤深度和距离爆源30m处质

点振动速度之间关系,如式(6)和图11所示。

$$h_D = 0.35V_{30m} + 0.03 \quad (6)$$

式中: V_{30m} 为距爆源30m处岩体质点峰值振动速度(cm/s); h_D 为岩体的损伤深度(m)。根据图1,第2层爆破开挖时岩体损伤深度规定不超过2m,根据式(6),对应的振动速度安全阈值 $V_{30m} = 5.63 \text{ cm/s}$ 。考虑到一定的安全储备,岭澳核电站二期工程实际工程施工中取5cm/s。实践证明,该控制方法和安全阈值有效地控制爆破损伤影响,保证了核岛基坑下卧基岩的完整性。

表5 岩体爆炸损伤、振动速度结果

Table 5 Computational results of damage extents and vibration velocities

装药量 /kg	峰值振动速度 $/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	损伤区深度 /m	损伤区半径 /m
7.7	4.40	1.64	4.80
15.4	5.23	1.80	6.31
23.1	5.57	2.06	6.50
30.9	6.30	2.26	6.80
38.6	6.40	2.32	7.38
46.3	6.58	2.39	7.67

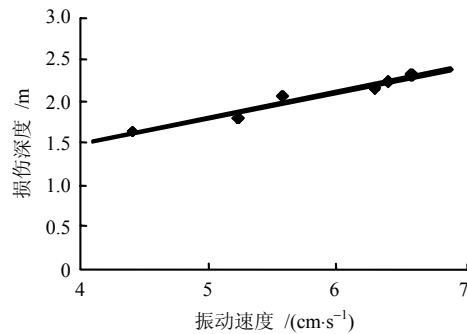


图11 距爆源30m处的岩体振动速度与损伤深度的关系

Fig.11 Relation between damage zone depth and PPV at point 30m away from charge

7 结语

本文以广东岭澳核电站二期工程核岛基础爆破控制为例,提出了距爆源30m处质点振动速度不超过某一阈值控制爆破垂直向损伤的方法,通过爆破振动监测、声波实验和数值模拟,分析爆炸振动衰减规律和岩体损伤特征,建立了岩体损伤深度和距爆源30m处质点峰值振动速度关系,确定了岭澳核电站二期工程基础爆破开挖的安全阈值,即当距爆源30m处岩体质点振动速度 $V_{30m} = 5 \text{ cm/s}$ 时以下,爆炸荷载作用下的岩体损伤深度小于2m。工程应用结果表明,该控制方法和安全阈值有效地控制爆破损伤影响,保证了核岛基坑下卧基岩的完整性。

值得指出的是, 尽管从工程应用角度, 本文提出的控制方法和标准能够满足工程安全的要求, 但是, 为了更准确和科学地分析爆破损伤特征, 实施相关的安全控制, 还需要在初始爆破荷载分析、岩体损伤模型和损伤门槛值的定义、数值模拟得到的损伤特征与声波实验得到的损伤特征比较和分析、安全阈值与岩性及爆破方式等的关联性等方面开展更深入的研究工作, 这也是核电工程基础安全控制下一步研究的主要内容。

参 考 文 献

- [1] CHEN S G, ZHAO J, ZHOU Y X. UDEC modeling of a field explosion test[J]. **International Journal of Blasting and Fragmentation**, 2000, (4): 149—163.
- [2] 李宁, SWOBODA G. 爆炸荷载的数值模拟与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13 (4): 357—364.
LI Ning, SWOBODA G. A numerical model for blast load and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1994, 13(4): 357—364.
- [3] 浦锡锋, 张海波, 田宙, 等. 岩石中强爆炸动力学过程数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (增 1): 5 007—5 012.
PU Xi-feng, ZHANG Hai-bo, TIAN Zhou, et al. Numerical simulation of underground explosion in granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp. 1): 5 007—5 012.
- [4] KORICHI Talhi, BACHIR Bensaker. Design of a model blasting system to measure peak P-wave stress[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2003, 23: 513—519.
- [5] JACOB N, CHUNG Kim YUEN S, NURICK G N, BONORCHIS D, et al. Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads-experiments and predictions[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2004, 30: 1 179—1 208.
- [6] GRADY D E. The mechanics of fracture under high-rate stress loading[C]//Preprints of the William Prager Symposium on Mechanics of Geomaterials Rocks Concretes and Soils. Bazant Z. P., ed. U. S.: Northwestern University, 1983.
- [7] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1980, (17): 147—157.
- [8] GRADY D E, KIPP M E. Dynamic rock fragmentation[C]//Fracture Mechanics of Rock. Atkinson B. K., ed. London: Academic Press, 1987: 429—475.
- [9] KIPP M E, GRADY D E. Numerical studies of rock fragmentation[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1978.
- [10] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Micro-crack induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. **Computer Method in Applied Mechanics and Engineering**, 1986, 55: 301—320.
- [11] BUDIANSKY B, O'CONNELL R J. Elastic moduli of a cracked solid[J]. **International Journal of Solids and Structures**. 1976, 12: 81—97.
- [12] KUSZMAUL J S. A New constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading[C]//Proceedings of 2nd International Symposium on Fragmentation by Blasting, Canada: [s. n.], 1987: 412—423.
- [13] YANG R, BAWDEN W F, KATSABANIS P D. A New constitutive model for blast damage[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1996, 33: 245—254.
- [14] LIU Li-qing, 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.
- [15] HAO H, WU C Q, ZHOU Y X. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models. part I: equivalent material property approach[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35(2): 79—94.
- [16] 王在泉, 华安增. 节理岩体损伤变量确定的分形方法[J]. 岩土力学, 1998, 19 (2): 45—48.
WANG Zai-quan, HUA An-zeng. Fractal method of defining damage variable of jointed rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(2): 45—48.
- [17] 王志亮, 王建国, 李永池. 单临空面岩体中爆破诱发损伤的数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27 (2): 219—227.
WANG Zhi-liang, WANG Jian-guo, LI Yong-chi. Numerical analysis of blast-induced damage in rock mass with single free-face[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 219—227.
- [18] 夏祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究 [博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [19] WU Cheng-qing, HAO Hong, ZHOU Ying-xin. Fuzzy-random probabilistic analysis of rock mass responses to explosive loads[J]. **Computers and Geotechnics**, 1999, (25): 205—225.
- [20] 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.
- [21] 蔡德所, 张继春, 刘浩吾, 等. 圈定岩体爆破损伤范围的声层析成像技术[J]. 岩土工程学报, 1997, 19 (6): 11—15.
CAI De-suo, ZHANG Ji-chun, LIU Hao-wu, et al. Seismic tomography technique for determining damage range in bed rock blasting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(6): 11—15.

- 伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (19): 3 223—3 231.
- CAO Wen-gui, Zhao Ming-hua, Liu Cheng-xue. Study of the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3 223—3 231.
- [6] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法[J]. 水利学报, 2005, 36 (3): 345—349.
- YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, CAO Wen-gui. Method for determining the parameters of statistical damage softening constitutive model for rock[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(3): 345—349.
- [7] 张毅, 廖华林, 李根生. 岩石连续损伤统计本构模型[J]. 石油大学学报, 2004, 28 (3): 37—39.
- ZHANG Yi, LIAO Hua-lin, LI Gen-sheng. A statistical constitutive model for rock continuous damage[J]. **Journal of University of Petroleum** (Edition of Natural Science), 2004, (28): 37—39.
- [8] 杨圣奇, 徐卫亚, 韦立德, 等. 单轴压缩下岩石损伤统计本构模型与试验研究[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (2): 200—203.
- YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, WEI Li-de, et al. Statistical constitutive model for rock damage under uniaxial compression and its experimental study[J]. **Journal of Hohai University** (Edition of Natural Sciences), 2004, 32(2): 200—203.
- [9] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 1985, 107(1): 83—89.
- [10] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 1984, 80(3): 233—245.
- [11] 周维垣, 吴澎, 杨若琼. 节理岩体的损伤模型[M]. 沈阳: 沈阳东北工学院出版社, 1989.
- [12] 曾亚武, 赵震英, 朱以文. 岩石材料破坏形式的分叉分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (7): 948—952.
- ZENG Ya-wu, ZHAO Zhen-ying, ZHU Yi-wen. Bifurcation analysis of failure forms of rock material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 948—952.
- [13] 林卓英, 吴玉山, 关伶俐. 岩石在三轴压缩下脆—延性转化的研究[J]. 岩土力学, 1992, 13 (2, 3): 45—53.
- LIN Zhuo-ying, WU Yu-shan, GUAN Ling-li. Research on the brittle-ductile transition property of rocks under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1992, 13(2, 3): 45—53.
- [14] 叶金汉. 岩石的应力与应变关系曲线与测试技术[J]. 水利学报, 1984 (9): 43—48.
- YE Jin-han. The stress-strain curve and testing techniques of rock[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1984, (9): 43—48.
- [15] 叶金汉. 关于岩体的应力应变曲线和残余强度[J]. 岩土工程学报, 1990, 12 (2): 100—102.
- YE Jin-han. The stress-strain curve and residual strength of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(2): 100—102.

上接第 2951 页

- [22] 张继春. 三峡工程基岩爆破震动特性的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21 (2): 131—137.
- ZHANG Ji-chun. Vibration characteristics of blasting in bed rock mass at Three Gorges Project[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2001, 21(2): 131—137.
- [23] 黄照平, 宋一乐. 爆破震动对残留岩体的影响及控制[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1999, 21 (6): 90—93.
- HUANG Zhao-ping, SONG Yi-le. Effect and control of blast vibration of bed rock[J]. **Journal of Wuhan Automotive Polytechnic University**, 1999, 21(6): 90—93.
- [24] ROSENGREN L. Preliminary analysis of the dynamic interaction between Norra Lanken and a subway tunnel for Stockholm, Sweden[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1993, 8: 429—439.
- [25] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26 (1): 50—56.
- XIA Xiang, LI Jun-ru, LI Hai-bo, et al. UDEC modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 50—56.
- [26] LOW HSIN YU, HAO HONG. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading[J]. **Engineering Structures**, 2002, 24: 189—198.
- [27] JOSEF Henrych. The Dynamics of Explosion and Its Use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [28] 中国水利学会施工专业委员会爆破学组. SL47—94 水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994.
- [29] Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions, Version 2.1 User's Guide[M]. Minneapolis: ITASCA Consulting Group, 2003.
- [30] ZHANG Yong-qiang, HAO Hong, LU Yong. Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading[J]. **International Journal of Engineering Science**, 2003, 41: 917—929.
- [31] Universal Distinct Element Code, Version 3.1 User's Manual[M]. Minneapolis: ITASCA Consulting Group, 1999.