

文章编号: 1001-1455(2010)01-0027-06

红沿河核电站基岩爆破的控制标准^{*}

夏祥¹, 李海波¹, 张大岩², 王新远³, 李俊如¹

(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. 中国电力投资集团公司, 北京 100032;

3. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: 以辽宁红沿河核电站核岛基础爆破开挖为例, 分析了核岛基础不同区域的岩体力学特性以及各层开挖时岩体允许损伤深度的差异, 指出必须根据实际情况提出岩体爆炸振动控制方法和标准。在此基础上, 基于爆破振动监测和声波实验, 分析了岩体爆破振动以及损伤特征, 建立了核岛基础爆破开挖时岩体损伤深度与振动速度之间的经验公式, 提出了不同区域、不同允许损伤深度的情况下岩体爆炸振动速度控制标准。研究表明, 通过监测距爆源一定距离处的岩体质点振动速度控制爆炸损伤深度的方法是合适和有效的。

关键词: 爆炸力学; 安全标准; 爆破; 爆破振动; 损伤; 核电站

中图分类号: O384

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

水电、核电等工程在进行基岩爆破开挖时, 炸药爆炸产生的冲击波将造成下卧岩体不同程度的损伤, 影响下卧岩体力学性能, 危及工程安全。为此, 必须严格控制爆破施工, 确保爆破荷载作用下下卧岩体损伤在允许的范围内。目前, 关于爆破荷载作用下岩体损伤控制方面的研究主要集中在爆炸振动在岩体中的传播规律及岩体损伤特征的分析方面。

基于现场监测和数值分析, 有了描述描述振动速度衰减规律的萨道夫斯基公式、兰格弗尔斯公式^[1], WU Cheng-qing 等^[2]、G. W. Ma 等^[3]和 S. G. Chen 等^[4]进一步分析了爆源近区和远区的爆破振动衰减规律以及节理对爆破振动的影响。在爆炸荷载作用下岩体损伤特征的研究方面, 夏祥等^[5]、李俊如等^[6]和朱传云等^[7]根据水利行业标准 SL 47-94《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》, 通过分析岩体爆后与爆前声波波速的变化率分析了爆破荷载作用下岩体损伤区特征。D. E. Grady 等^[8]、L. M. Taylor 等^[9]、J. S. Kuszmaul^[10]和 LIU Li-qing 等^[11]基于提出的爆炸动荷载作用下岩体损伤模型, 研究了岩体损伤区的形成和发展规律。另外, 张继春^[12]和蔡德所等^[13]对三峡工程的弱风化花岗岩底板进行了现场爆破实验, 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; 黄照平等^[14]对白水峪水电站坝区爆破实验数据进行综合分析, 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 以下即可保证残留岩体的稳定性。

在核电工程基岩爆破安全控制方法和标准方面, 文献[1]中对岩体损伤深度和爆破振动衰减规律进行了系统分析, 初步提出了通过控制距爆源一定距离处的岩体质点峰值振动速度控制岩体损伤深度的方法和标准, 在广东岭澳核电站基础开挖爆破控制中取得了很好效果, 该控制方法如图 1 所示。根据该方法, 当距爆源 30 m 处的岩体质点峰值振动速度不超过安全阈值 5.0 cm/s 时, 可保证爆破开挖时岩体损伤深度小于规定值 2 m, 满足下卧基岩保护的要求^[6]。

* 收稿日期: 2008-09-22; 修回日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809070, 50439030)

作者简介: 夏祥(1976—), 男, 博士, 助理研究员。

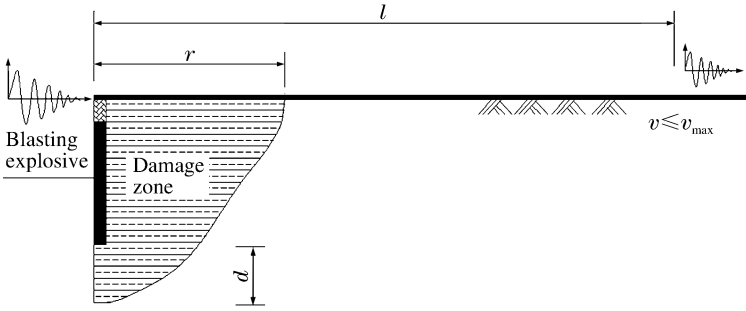


图1 基础爆破开挖影响范围控制示意图

Fig. 1 Damage control method in bedrock blasting excavation

虽然文献[1]中初步提出了岩体爆炸损伤的控制方法和标准,但是当岩性条件以及爆破开挖方式发生改变时,上述控制标准不能适应工程的要求。为此,本文中以辽宁红沿河核电站基础爆破开挖工程为例,以爆破振动监测和爆前爆后岩体声波实验为基础,研究核岛内不同区域岩体损伤范围和振动速度关系,确定在不同岩体特征以及允许损伤深度的情况下质点振动速度的控制标准。

2 红沿河核电站工程简介

辽宁红沿河核电站基础爆破开挖现场岩体主要为中风化和微风化花岗岩。根据基础开挖施工方案,核岛基础岩体采用分层爆破方式进行,各层底标高见图2。可见,在进行第2层开挖时,为保护下卧基岩的完整性,允许的最大损伤深度不能超过第3层(保护层)的厚度,即1.15 m。进行保护层开挖时,为减小爆炸对建基面岩体的冲击,爆孔底部0.25 m的高度用柔性填塞物装填,因此第3层爆破时允许的岩体最大损伤深度不超过0.25 m。为此,必须根据爆破施工方案制定岩体分层爆破控制标准。

另外,红沿河核电站核岛区1和核岛区2的岩体力学指标见表1。表中, ρ 为密度, E_d 为静弹性模量, G_d 为静剪切模量, μ 为泊松比, σ_c 为抗压强度, σ_{st} 为抗拉强度, ϕ 为摩擦角, C 为粘聚力, c_1 为纵波波速, c_2 为横波波速, ξ 为阻尼比。可见基坑内各区域岩体力学性能相差较大。因此,对于不同区域,岩体爆炸安全控制标准也应分别取值。由文献[1],控制标准确定为距爆源30 m处的岩体振动速度。

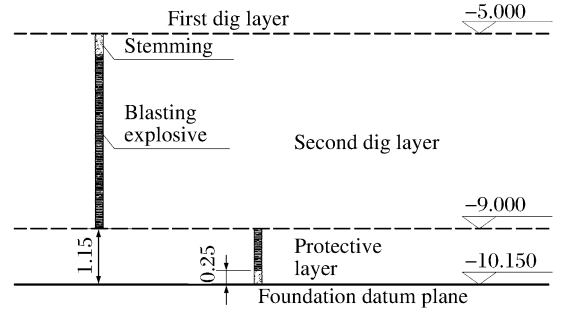


图2 核岛基础爆破分层示意图

Fig. 2 Dig layer of the nuclear island pit for Hongyanhe nuclear power plant

表1 红沿河核电站岩体力学参数

Table 1 Mechanical properties of rock mass for Hongyanhe nuclear power plant

核岛区	$\rho/(t/m^3)$	E_d/GPa	G_d/GPa	μ	σ_c/MPa	σ_{st}/MPa	$\phi/(^\circ)$	C/MPa	$c_1/(km/s)$	$c_2/(km/s)$	$\xi/\%$
1	2.56	11.2	5.2	0.24	53.3	3.04	43	8.4	4.90	2.90	6.6
2	2.55	9.6	4.7	0.28	43.6	2.58	32	7.4	4.25	2.20	7.7

结合红沿河核电站的实际情况,基岩爆破时进行核岛内不同区域的岩体声波实验,同时监测30 m处质点振动速度,根据声波实验得到的岩体损伤范围与质点振动速度之间的关系,分析制定各层各区域的岩体爆炸振动控制参数。

3 声波实验

根据SL 47-94,采用岩体声波波速在爆破前后的变化率判定爆破荷载作用下岩体的破坏程度

$$\eta = 1 - \frac{c}{c_0} \quad (1)$$

式中: c_0 为岩体爆前声波波速; c 为岩体爆后声波波速。同时,规范规定,当 $\eta > 10\%$ 时,可以判定岩体力学性能受爆破影响大。

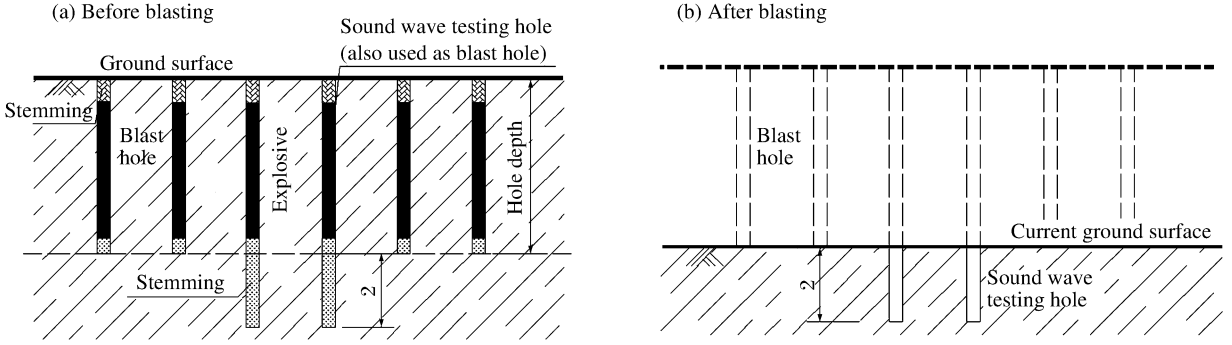


图 3 声波实验布置示意图

Fig. 3 Arrangement of sonic wave testing holes

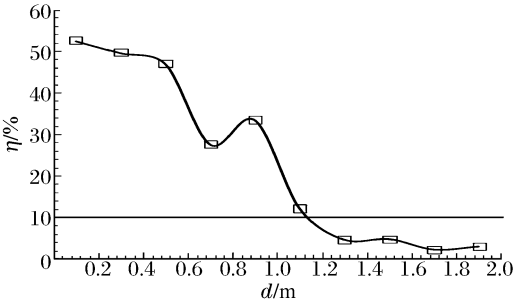


图 4 声波孔测试结果

Fig. 4 Sonic wave speed of rock mass with depth

根据上述思路,在核岛区 1、2 各开挖层分别进行爆破前后的岩体波速实验,实验布置如图 3 所示。爆区内选择若干爆孔超深约 2 m,兼作声波测试孔。爆前量测声波测试孔各测点波速,然后将孔底超深部分填充至爆孔设计深度,与其他爆孔同时起爆。爆后清理孔底充填物,对测试孔超深部分进行爆后声波测试,统计爆前爆后岩体波速变化率,从而确定岩体的损伤特征。

图 4 为典型的声波波速变化曲线,图中, $\eta = 10\%$ 时的孔深即为该测试孔处的岩体损伤深度。

4 岩体爆炸振动监测

爆破振动测点及监测站布置如图 5 所示。每次爆破前,在距爆源不同距离处布设若干测点,监测各测点的振动速度,分析场区爆破振动衰减规律。图 6 为距爆源 30 m 处的岩体振动速度曲线。

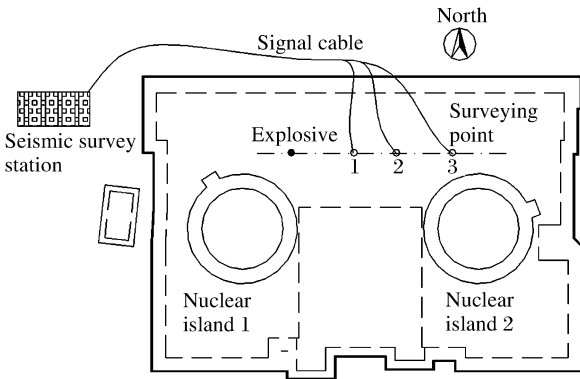


图 5 测点及测站布置

Fig. 5 Monitoring system of blast vibration

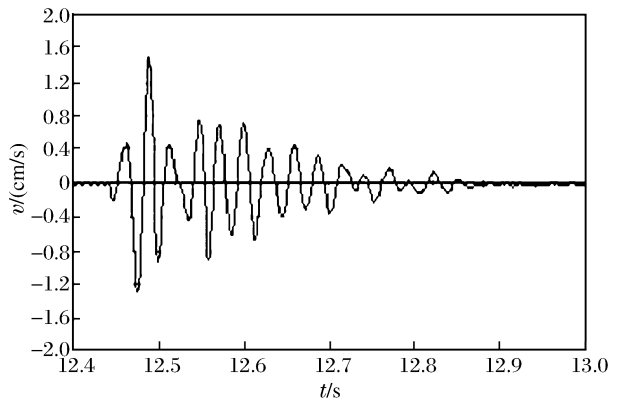


图 6 现场监测得到的岩体质点振动速度

Fig. 6 Velocity histories of rock mass by blasting

5 岩体爆炸振动控制参数

表 2~3 分别为核岛区 1、2 各次爆炸实验对应的装药量、距爆源 30 m 处的岩体损伤深度 d 和质点振动速度 v 的结果。表中, Q 为总装药量, q 为段装药量。由表可见,当总装药量和最大段装药量增大时,岩体振动速度和损伤深度也增大,但是他们之间的函数关系并不明显。例如,当总装药量或段装药

量相同时,岩体振动速度和损伤深度也存在一定差异。这是由爆破技术、装药方式等因素的不同形成的。相反地,质点振动速度和损伤深度之间却有比较明显的单调函数关系,见图 7。因此通过监测距爆源一定距离处的岩体振动速度控制爆炸损伤深度的方法是可行的。

表 2 核岛区 1 岩体的爆炸损伤、振动速度结果

表 3 核岛区 2 岩体的爆炸损伤、振动速度结果

Table 2 Results of damage zone depth and vibration velocity in nuclear island 1

Table 3 Results of damage zone depth and vibration velocity in nuclear island 2

Q/kg	q/kg	d/m	v/(cm/s)
48	3.9	0.31	1.42
168	3.9	0.36	1.49
264	9.2	1.10	2.60
300	22.8	1.57	3.37
215	25.8	1.87	4.23

Q/kg	q/kg	d/m	v/(cm/s)
72	3.6	0.26	1.15
288	4.2	0.71	1.38
288	9.2	1.15	1.68
192	9.2	1.40	1.95
360	9.2	1.45	2.16
312	16.2	1.65	2.47

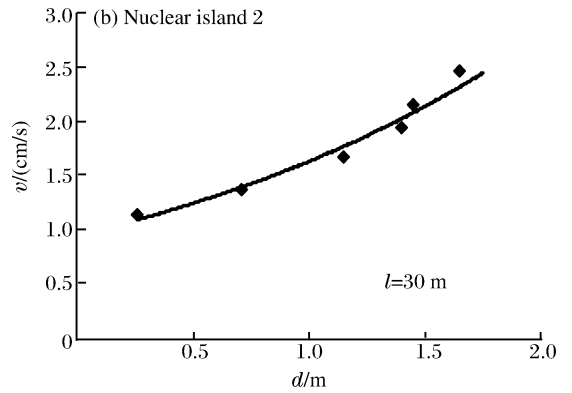
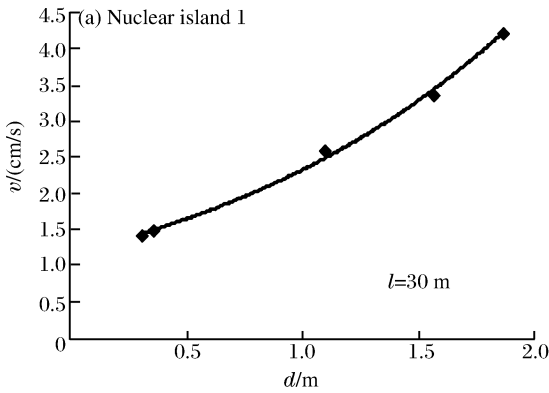


图 7 核岛区岩体振动速度与损伤深度的关系

Fig. 7 Relationship between vibration velocity and damage zone depth in nuclear islands

核岛区 1、2 岩体振动速度与损伤深度之间的关系可以分别用经验公式拟合

$$v_1 = 1.16e^{0.69d} \tag{2}$$

$$v_2 = 0.96e^{0.54d} \tag{3}$$

式中: v_1 、 v_2 分别为核岛区 1、2 距爆源 30 m 处岩体质点振动速度,cm/s; d 为岩体的损伤深度,m。核岛区允许的损伤深度为 1.15 m 和核岛区底层保护层允许的损伤深度为 0.25 m 时,核电站基岩爆破控制参数见表 4。

表 4 红沿河核电站基岩爆破控制参数

Table 4 Control parameters of blast vibration at Hongyanhe nuclear power plant

区域	d/m	v/(cm/s)	
		计算结果	实际取值
核岛区 1	1.15	2.58	2.5
核岛区 2	1.15	1.78	1.5
核岛区 1 保护层	0.25	1.38	1.0
核岛区 2 保护层	0.25	1.10	1.0



图 8 核岛区基础爆破开挖成形图

Fig. 8 The bedrock of nuclear island after blasting excavation

基于上述的控制方法和标准,对核岛基础爆破开挖进行了长期跟踪监测。通过振动速度监测结果控制爆破药量,优化爆破网络,核岛基岩力学性能保持良好,成形完美,见图8。该控制方法和标准可以有效控制开挖爆破对基岩的损伤影响,确保保留基岩的安全。

6 结 论

以辽宁红沿河核电站一期工程核岛基础爆破为依托,根据核岛区岩体特性和爆破开挖分层情况,进行了声波实验和岩体爆炸振动监测,分析了岩体振动速度和损伤区特征,提出了适合工程特殊情况的岩体爆破振动控制方法和标准。

(1)爆炸荷载作用下的岩体振动速度和损伤区大小均随装药量增大而增大,但对应关系并不明显;相反地,岩体振动速度与损伤深度存在单调的函数关系。因此,通过监测岩体振动速度来控制爆炸损伤深度的方法是合适的。

(2)在核电站等工程中进行基础爆破时,考虑到岩性以及爆破开挖方式的差异,爆破振动控制标准应分层、分区分别取值。红沿河核电站的工程应用表明,该控制方法和标准可以有效控制开挖爆破对基岩的影响,确保保留基岩的安全。

参考文献:

- [1] 夏祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2006.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] XIA Xiang, LI Jun-ru, LI Hai-bo. Study on blast-induced damage extent in bedrock in nuclear power station project [C]. Zhou Y X. *Rock Mechanics and Rock Engineering: 4th Asian Rock Mechanics Symposium*. Singapore, 2006: 240.
- [6] 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(增刊1):4674-4678.
LI Jun-ru, XIA Xiang, LI Hai-bo, et al. Study on blast-induced damage extent in bedrock excavation at a nuclear power station project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005,24(supple 1):4674-4678.
- [7] 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 Chuan-yun, LU Wen-bo. Blasting safety criterion for the rock wall between temporary shiplock and shiplift in three gorges project[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998,18(4):375-380.
- [8] Grady D E, Kipp M E. Dynamic rock fragmentation[C]// Atkinson B K. *Fracture Mechanics of Rock*. London: Academic Press, 1987:429-475.
- [9] 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.
- [10] Kuszmaul J S. A New constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading[C]// *International Symposium on Rock Fragmentation Blasting*. Keystone, Canada, 1987:412-423.
- [11] LIU Li-qing, Katsabanis P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1997,34(2):217-231.
- [12] 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 Sanxia project[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001,21(2):131-137.
- [13] 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.

[14] 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.

Safety threshold of blasting-induced rock vibration for Hongyanhe nuclear power plant *

XIA Xiang¹, LI Hai-bo¹, ZHANG Da-yan², WANG Xin-yuan³, LI Jun-ru¹

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;*

2. China Power Investment Corporation, Beijing 100032, China;

3. China Nuclear Power Engineering Company Ltd, Shenzhen 518031, Guangdong, China)

Abstract: By taking the blasting excavation of the Hongyanhe nuclear power plant foundation for example, the mechanical properties of the rock mass were analysed in the different regions of the nuclear islands, and the damage depth differences of the rock mass were discussed for different layers under excavation. It was pointed out that the control method and safety threshold should be brought forward by the practical rock blasting. Based on blasting vibration surveying and sound wave testing conducted in construction site, the relationship between damage zone size and peak particle velocity was investigated for the rock mass at a given distance from the centre of the charging area, and the corresponding empirical formula was established. Accordingly, the safety threshold of blasting vibration was given for the different rock strata in nuclear islands and the different excavation scheme was determined with the different allowable damage depth. Results prove that the method and threshold are applicable to hold the damage depth of rock and to ensure the integrity of the bedrock under blasting excavation.

Key words: mechanics of explosion; safety threshold; blasting; blasting vibration; damage; nuclear power plant

* Received 22 September 2008; Revised 10 December 2008

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50809070,50439030)

Corresponding author: XIA Xiang, xia-xiang@163.com