

地形地貌对爆破振动波传播的影响实验研究

唐海¹, 李海波¹, 蒋鹏灿², 王晓炜², 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. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124)

摘要: 爆破振动波在岩土介质中的传播规律主要受岩体介质特性以及装药参数的影响, 但在地形起伏较大的情况下, 地形地貌对爆破振动波传播具有非常大的影响。结合广东岭澳核电站二期工程爆破负开挖振动监测, 分析凹、凸形地貌对爆破振动波的传播影响。分析结果表明: 凹形地貌对爆破振动波具有衰减效应, 其衰减系数不仅与其宽度和深度有关, 还与最大段药量和爆源距有关; 凸形地貌不仅对爆破振动波具有放大效应, 而且放大效应具有方向性, 振动速度垂直向较水平向放大效应明显; 凸形地貌对振动波的放大系数随相对高程增大而增大, 而随爆源比例距离增大而减小。另外, 凸形地貌的放大效应还与岩性、岩石构造和节理发育程度有关。

关键词: 爆破工程; 地形地貌; 传播规律; 衰减系数; 放大效应; 实验研究

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)09 - 1817 - 07

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF TOPOGRAPHY ON PROPAGATION OF BLASTING WAVES

TANG Hai¹, LI Haibo¹, JIANG Pengcan², WANG Xiaowei², LI Junru¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Guangdong Nuclear Power Station Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China)

Abstract: The law of propagation of vibration wave of blasting is mostly affected by property of rock material and parameters of explosive loadings, whereas the topography affects greatly propagation of vibration wave under condition of a variety of terrains. Many explosion tests are carried out in the second period engineering project in Ling'ao Nuclear Power Station, Guangdong Province. The dissemination of vibration wave of blasting is analyzed in concave or protruding topography. The results show that the concave landforms have great effects on decreasing scale of vibration wave of blasting. It is found that the attenuation coefficient of vibration wave in concave landform is relative to its width and depth and to charge weight per delay interval and explosive distance. The protruding topography can enhance scale of vibration wave of blasting. The amplification effect is related to orientation in protruding topography, and that the vertical vibration velocity is amplified more than that of the horizontal vibration. The amplified coefficient of vibration wave blasting is augmented with relative altitude, but decreases with the scale distance of explosive in protruding topography. In addition, the scale effect of protruding landform is also related to property of rock mass, and the structure of rock and the growth of cranny.

Key words: blasting engineering; topography; law of propagation; attenuation coefficient; amplification effect; experimental study

收稿日期: 2007 - 01 - 31; **修回日期:** 2007 - 04 - 21

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

作者简介: 唐海(1973 -), 男, 博士, 1997年毕业于湘潭工学院资源工程系采矿工程专业, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: tanghai001@21cn.com

1 引言

爆破是土石方开挖的主要施工手段。在土石方爆破开挖过程中，炸药在岩土介质中爆破时除了对介质做功消耗能量外，一部分能量以波的形式向外传播，形成爆破振动波。一般而言，爆破振动波在岩土介质中的传播规律主要受岩体介质特性以及装药参数影响，但是，在地形起伏较大的情况下，地形地貌对爆破振动波的传播具有非常大的影响。

目前这方面的工作主要集中在一些初步实验和探讨性的理论分析工作方面，缺乏深入、系统的分析成果。例如，李海波和李廷芥^[1]通过振动监测表明，爆破振动波经过凹形地貌后，其速度峰值衰减系数为 30%~60%，作者视凹形地貌为广义的沟槽，认为沟槽对振动的衰减取决沟深 H 与波长 λ 之比， H/λ 之比越大衰减就越大。朱振海和杨永琦^[2]通过爆破动光弹实验定性表明，凹形地貌深度对爆破振动波的衰减影响大，而凹形地貌的宽度对其影响则不大。S. Spyros 和 R. Fotis^[3]用有限元程序模拟爆破振动波在障碍物地形中的传播，得出凸形地质点振动大，而凹形地质点振动小。Q. Zhang 等^[4]通过现场实验发现：爆破振动波通过凹形地貌时，其速度峰值衰减系数为 4.7%~87.0%，衰减程度与凹形地貌尺度有关；爆破振动波通过凸形地貌时，其速度峰值放大。方向等^[5]认为凹形地貌的减震率可达 30%~50%，但随着爆源距的增加，减震效果逐渐减弱。洪桐萱^[6]用不同的台阶形式代表凹、凸形地貌，用有限差分法模拟二维波的传播，分析了波与台阶形式的相互作用，波的散射引起台阶上拐角位移(无论是水平还是垂直位移)主峰和原始波同位，间断的存在使上拐角的振动大大加强。而下拐角则相反。李维学等^[7, 8]运用工程实例分析了爆破振动波的衰减与凹形地貌及地质构造有关。周同龄等^[9, 10]都认为，凸形地貌相对高差对爆破振动有很大的影响，预测爆破振动需要加上高度影响因子：高差为正，地震效应增大，反之降低。舒大强等^[11]运用二维有限动力计算程序，分析了爆破振动对凸形地貌中岩质边坡稳定性的影响，发现边坡坡度为 1:2 时，边坡放大效应出现，而坡度比 1:2 缓时，放大效应消失，另外边坡放大效应还与岩体软弱结构分布状况有关。F. Masahiko 和 N. Masayoshi^[12]，J. W. Dally 和 L. David^[13]分别用有限差分法和动光

弹实验分析了瑞利波经过凸形台阶时，随 h/λ (台阶高度与波长之比)增加，质点振动强度越大(台阶上拐点与下拐点强度比较)。崔志刚等^[14, 15]用解级数的数学法分析得出凸形地貌放大效应与入射波波长、凸形地貌尺寸有关。

本文结合广东岭澳核电站二期工程爆破负开挖振动监测，通过现场实验较系统地研究了凹、凸形地貌对质点振动速度峰值的影响规律，分析了凹形地貌对爆破振动速度峰值的衰减效应同凹形地貌深度、宽度以及爆源距之间的关系；同时，探讨了凸形地貌对爆破振动速度峰值的放大效应同高程差、爆源距以及岩性之间的关系，旨在为深入研究地形地貌对爆破振动传播规律提供现场实验资料。

2 工程概况及现场实验概述

广东岭澳核电站二期工程厂址位于广东省深圳市东南 75 km 处，设计总装机容量为 2×10^6 kW，布置在岭澳核电站一期工程 1[#]，2[#]机组以东约 340 m 处。厂址区处于陆海交汇地带，地形以台地剥蚀地形和堆积地形为主，台地主要由角岩和花岗岩组成。

为加快工程进展，二期工程基础爆破负开挖分多处进行，在基坑中形成了多处凹或凸形地貌。为弄清地形地貌对爆破振动波传播特性的影响，更准确地研究爆破振动波的衰减规律，利用负开挖期间基坑形成的凹或凸形地貌进行了多次现场实验研究。

爆破实验振动测点布置情况如图 1 所示。凹形地貌时，布置多个测点，其中一个测点放在背爆源一侧的凹形沟槽边，主要用于分析凹形地貌对爆破振动波的衰减特征，其余测点放在靠爆源的凹形沟槽一侧，主要用于分析无地形地貌影响时爆破振动波的衰减规律。凸形地貌时，布置 2 个测点，一个

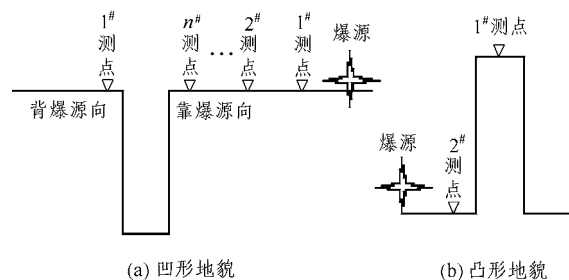


图 1 振动测点布置

Fig.1 Arrangement of vibration monitoring points

测点放在凸形台阶上拐角, 另一测点放在凸形台阶下拐角。测点与爆源中心大致在一条直线上, 每个测点分别布置垂直向和水平向 2 个速度传感器。

实验中, 爆破孔径均为 76 mm, 孔深均为 1.5 m, 炮孔排距和孔距均为 1.5 m; 炸药为 MDH 型乳化炸药, 爆速为 3 200 m/s。

3 凹形地貌实验结果及分析

表 1 列出了 4 次凹形地貌爆破实验中的各测点的速度峰值($V_{\text{垂}}, V_{\text{水}}$)、爆源距(R)和每次爆破的最大段药量情况。通常情况下, 岩体质点振动速度 v 与药量 Q 、爆源距 R 的关系由萨道夫斯基公式给出:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: K, α 分别为爆破振动波衰减系数与衰减指数; $\sqrt[3]{Q}/R$ 为比例距离。

为了消除爆破实验过程中爆破参数等对实验结果的影响, 分析无凹形地貌影响下爆破振动波的衰减规律, 由靠爆源向各测点的实测振动速度值按

式(1)回归计算得到各次实验的 K, α (见表 2)。各次实验背爆源向测点振动速度计算值由回归所得的萨道夫斯基公式求得。凹形地貌对振动速度的衰减系数 η 的计算结果见表 2。其计算公式如下:

$$\eta = \frac{V_{\text{计}} - V_{\text{测}}}{V_{\text{计}}} \quad (2)$$

式中: $V_{\text{计}}$ 为背爆源向测点振动速度计算值(cm/s), $V_{\text{测}}$ 为背爆源向测点振动速度实测值(cm/s)。

从表 1, 2 的分析结果可以看出, 无论是测点的垂直向还是水平向速度的实测值都小于计算值, 在所进行的 4 次实验中, 衰减系数范围为 30%~60%。因此, 凹形地貌对爆破振动波的传播具有明显的衰减作用, 这与李海波等^[1~6]所得的结论相同。

3.1 凹形地貌宽度和深度对衰减系数的影响分析

从表 1, 2 中的第 2~4 次实验结果比较可以看出: 3 次实验中的凹形地貌深度相同, 宽度略有增加, 衰减系数亦随宽度略有增加。从第 1~4 次实验结果比较可以看出: 第 1 次实验中的凹形地貌深度比其他 3 次实验的深度大, 而宽度则小于其他 3 次实验的宽度, 但衰减系数最大。因此, 可以看出深

表 1 凹形地貌的实验结果

Table 1 Experimental results in concave physiognomy

试验编号	岩性	最大段药量/kg	凹形地貌(深×宽)/(m×m)	方向	测点编号	特性参数		
						R/m	$V_{\text{垂}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{水}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	花岗岩, 构造简单, 裂隙发育程度低, 岩石完整性较好	27.6	4×6	背爆源	1 [#]	110.0	0.162	0.112
				靠爆源	1 [#]	90.1	0.582	0.387
				靠爆源	2 [#]	67.8	0.785	0.478
				靠爆源	3 [#]	46.8	1.640	1.260
2	花岗岩, 构造简单, 裂隙发育程度低, 岩石完整性较好	8.4	3×14	背爆源	1 [#]	57.6	0.522	1.062
				靠爆源	1 [#]	41.4	1.420	2.790
				靠爆源	2 [#]	34.8	2.030	3.070
				靠爆源	3 [#]	24.5	3.360	4.970
3	花岗岩, 构造简单, 裂隙发育程度低, 岩石完整性较好	38.4	3×16	背爆源	1 [#]	190.0	0.268	0.218
				靠爆源	1 [#]	166.1	0.478	0.434
				靠爆源	2 [#]	122.3	1.010	0.751
				靠爆源	3 [#]	70.8	1.650	1.350
4	花岗岩, 构造简单, 裂隙发育程度低, 岩石完整性较好	7.8	3×20	背爆源	1 [#]	71.0	0.255	0.152
				靠爆源	1 [#]	46.8	0.505	0.804
				靠爆源	2 [#]	32.0	0.776	1.170
				靠爆源	3 [#]	24.0	1.810	4.630
				靠爆源	4 [#]	16.0	3.090	5.610
				靠爆源	5 [#]	11.0	4.000	7.980

表2 凹形地貌对振动速度衰减效应分析结果

Table 2 Effect of concave physiognomy on the attenuation of vibration velocity

试验编号	方向	场地衰减系数		$V_{\text{计}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{测}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	衰减系数 $\eta/\%$
		K	α			
1	垂直向	126.5	1.60	0.400	0.162	59
	水平向	180.0	1.84	0.241	0.112	54
2	垂直向	187.8	1.61	0.862	0.522	39
	水平向	83.0	1.14	1.834	1.062	43
3	垂直向	132.0	1.39	0.450	0.268	40
	水平向	79.2	1.30	0.390	0.218	44
4	垂直向	170.0	1.67	0.432	0.255	41
	水平向	61.8	1.51	0.278	0.152	45

度对衰减系数影响较大。

3.2 爆源距对凹形地貌衰减系数的影响分析

沟槽可视为凹形地貌的具体形式，为弄清凹形地貌衰减系数与爆源距之间的关系，选择在将要开挖的核岛环行沟槽(深 3.5 m，宽 8 m)两侧进行了多次爆破实验。沟槽开挖前，布置 5 个测点，沟槽形成后，改为布置 4 个测点在沟壁边(见图 2)，各次实验中，测点均布置在同一水平线上。

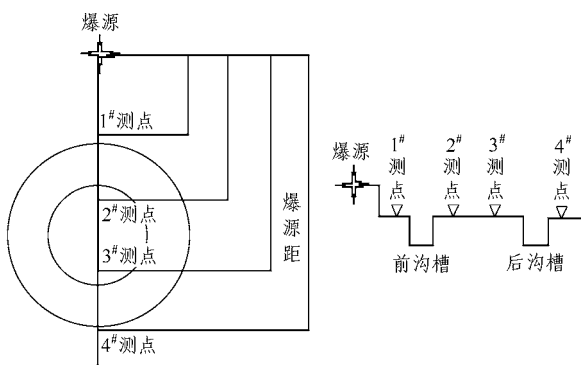


图2 环形沟槽测点布置图

Fig.2 Arrangement of vibration monitoring points on annular ditch

1[#], 2[#]测点之间的沟槽为前沟槽; 3[#], 4[#]测点之间的沟槽为后沟槽。环形沟槽开挖前、后爆破实验结果分别见表 3, 4。由于 1[#], 3[#]测点仅起对比 2[#], 4[#]测点数值作用，故未在表 4 中列出。

运用式(1)对表 3 的数据进行回归，得到爆破振

表3 环形沟槽开挖前爆破实验结果

Table 3 Experimental results before annular ditch excavation

试验编号	最大段药量 /kg	测点编号	特性参数		
			R/m	$V_{\text{垂}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{水}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	1.0	1 [#]	8	1.514 0	1.751 0
		2 [#]	22	0.103 2	0.121 2
		3 [#]	36	0.070 5	0.051 2
		4 [#]	48	0.042 1	0.032 8
		5 [#]	60	0.032 8	0.012 6
2	1.5	1 [#]	15	1.315 2	1.401 2
		2 [#]	41	0.081 0	0.119 7
		3 [#]	63	0.051 5	0.032 2
		4 [#]	76	0.038 9	0.016 9
		5 [#]	93	0.012 1	0.009 7
3	2.0	1 [#]	22	0.263 5	0.412 8
		2 [#]	36	0.126 7	0.287 3
		3 [#]	50	0.090 2	0.062 4
		4 [#]	60	0.076 9	0.055 8
		5 [#]	76	0.047 4	0.036 7
4	2.5	1 [#]	22	0.451 2	0.517 4
		2 [#]	35	0.292 4	0.315 7
		3 [#]	55	0.102 3	0.016 8
		4 [#]	89	0.048 9	0.031 9
		5 [#]	107	0.010 5	0.008 6

表4 环形沟槽开挖后爆破实验结果

Table 4 Measured results of vibration monitoring points on annular ditch

试验编号	最大段药量 /kg	测点编号	特性参数		
			R/m	$V_{\text{垂}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{水}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	3.2	2 [#]	55	0.058 7	0.026 4
		4 [#]	82	0.027 6	0.013 5
2	3.2	2 [#]	95	0.021 8	0.010 2
		4 [#]	131	0.013 2	0.006 5
3	4.1	2 [#]	68	0.041 2	0.016 0
		4 [#]	105	0.019 3	0.008 0
4	1.8	2 [#]	78	0.021 4	0.011 5
		4 [#]	115	0.011 4	0.005 9
5	1.8	2 [#]	49	0.053 0	0.026 5
		4 [#]	83	0.019 6	0.010 6
6	4.1	2 [#]	148	0.010 6	0.004 3
		4 [#]	185	0.008 0	0.003 5

动衰减公式如下：

$$V_{\text{垂}} = 108.12 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.9738} \quad (3)$$

$$V_{\text{水}} = 381.43 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.3783} \quad (4)$$

式中: $V_{\text{垂}}$ 为测点垂直向振动速度峰值(cm/s), $V_{\text{水}}$ 为测点水平向振动速度峰值(cm/s)。

根据式(3), (4)可以得到 2#测点, 4#测点的垂直向和水平向的振动速度计算值, 根据式(2)可以得到每次实验 2#, 4#测点的衰减系数值, 如表 5 所示。

表 5 环形沟槽各测点振动速度衰减效应分析结果

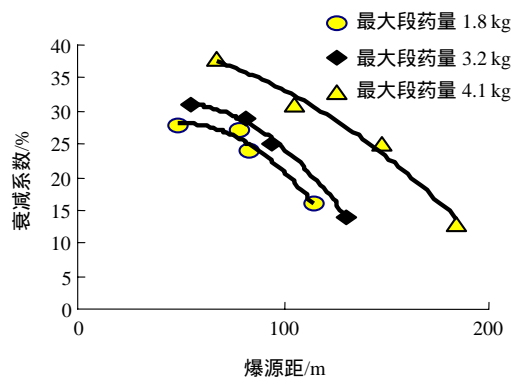
Table 5 Analytical results of vibration velocity attenuation of measured points on annular ditch

试验 编号	方向	前沟槽			后沟槽		
		2#测点振动速度 /(cm·s ⁻¹)		衰减 系数 η/%	4#测点振动速度 /(cm·s ⁻¹)		衰减 系数 η/%
		计算值	实测值		计算值	实测值	
1	垂直向	0.085 3	0.058 7	31	0.038 8	0.027 6	29
	水平向	0.070 0	0.026 4	62	0.026 9	0.013 5	50
2	垂直向	0.029 0	0.021 8	25	0.015 4	0.013 2	14
	水平向	0.019 0	0.010 2	46	0.008 8	0.006 5	26
3	垂直向	0.066 1	0.041 2	38	0.028 0	0.019 3	31
	水平向	0.051 2	0.016 0	69	0.018 2	0.008 0	56
4	垂直向	0.029 3	0.021 4	27	0.013 6	0.011 4	16
	水平向	0.019 2	0.011 5	40	0.007 6	0.005 9	22
5	垂直向	0.073 4	0.053 0	28	0.025 9	0.019 6	24
	水平向	0.058 0	0.026 5	54	0.016 6	0.010 6	36
6	垂直向	0.014 2	0.010 6	25	0.009 2	0.008 0	13
	水平向	0.008 0	0.004 3	46	0.004 7	0.003 5	26

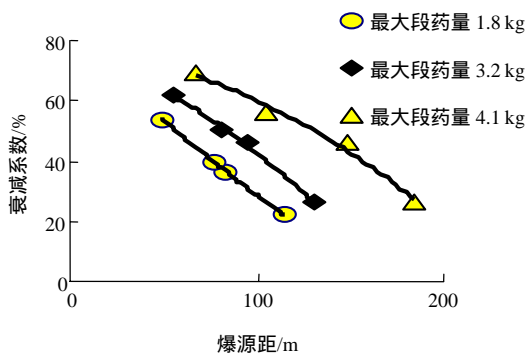
图 3 列出了不同最大段药量情况下, 测点的衰减系数随爆源距的衰减规律, 从图中可以看出: 在不同最大段药量下, 随着爆源距的增加, 无论是测点的垂直向还是水平向, 衰减系数均逐渐变小; 爆源距相同时, 衰减系数随最大段药量增加有增加的趋势。

4 凸形地貌实验结果及分析

利用核岛负开挖形成的凸形地貌, 进行了 11



(a) 垂直向



(b) 水平向

图 3 衰减系数随爆源距的衰减规律

Fig.3 Attenuation rule of attenuation coefficients with blast distances

次爆破实验, 其测点布置见图 1 所示。表 6 列出了凸形地貌的实验结果。

从表 6 中可以看出, 凸形地貌对爆破振动波的传播具有明显的放大作用, 在进行的 11 次实验中, 放大系数范围为 1.12~6.18, 与周同龄等^[9-11]的结果基本相同。同时, 测点垂直向的放大系数大于水平向的放大系数。

下面以垂直向放大系数为例, 讨论凸形地貌对爆破振动波放大效应的影响因素。对比第 2, 8 次实验可以看出, 最大段药量、岩体结构和节理发育等几乎一致, 相对高差大的第 8 次实验, 放大系数大。对比第 3, 4 次实验可以看出, 相对高差接近, 放大系数也很接近。第 5~11 次实验的相对高差范围为 7~11 m, 放大系数范围为 2.6~6.2, 而第 2, 3, 4, 7 次实验的相对高差范围为 2.0~4.5 m, 其放大系数范围为 1.5~2.0, 可见相对高差较大, 其放大系数也大。这与周同龄和李玉寿^[9]认为相对高差对爆破振动有很大影响的结论相似。

表 6 凸形地貌的实验结果

Table 6 Experimental results in protruding physiognomy

试验 编号	岩性	测点 编号	最大段药量 /kg	高程 差/m	垂直向		水平向		爆源距 /m	爆源比例距离 /(kg ^{1/3} ·m ⁻¹)
					振动速度 峰值 /(cm·s ⁻¹)	放大 系数	振动速度 峰值 /(cm·s ⁻¹)	放大 系数		
1	新鲜开挖出的角岩, 岩石节理较发育	1 [#]	17.4	3.0	-	-	2.060	1.84	34.0	0.076 0
		2 [#]			-	-	1.120	-	35.0	0.074 0
2	新鲜开挖出的角岩, 岩石节理较发育	1 [#]	9.0	2.0	2.450	1.40	-	-	22.0	0.095 0
		2 [#]			1.750	-	-	25.0	0.083 0	
3	1 [#] 测点为风化的花岗岩, 节理较发育; 2 [#] 测点 为新鲜的花岗岩, 完整性好	1 [#]	13.8	4.2	1.440	1.96	0.848	1.69	65.4	0.037 0
		2 [#]			0.733	-	0.502	-	65.4	0.037 0
4	1 [#] 测点为风化的花岗岩, 节理较发育; 2 [#] 测点 为新鲜的花岗岩, 完整性好	1 [#]	15.6	3.8	0.409	1.97	0.297	1.41	62.9	0.040 0
		2 [#]			0.208	-	0.211	-	60.2	0.042 0
5	回填硬土, 裂隙发育	1 [#]	9.0	10.8	0.289	2.78	0.232	1.71	92.3	0.023 0
		2 [#]			0.104	-	0.136	-	94.7	0.022 0
6	测点未移, 岩性同第 5 次实验	1 [#]	19.8	10.8	0.271	2.58	0.259	1.22	117.6	0.023 0
		2 [#]			0.105	-	0.212	-	120.0	0.022 5
7	风化的花岗岩, 节理发育, 完整性差, 结构 较破碎	1 [#]	9.3	2.5	1.700	1.50	1.120	1.35	44.0	0.048 0
		2 [#]			1.130	-	0.830	-	41.0	0.051 0
8	新鲜角岩, 结构较完整	1 [#]	9.0	9.0	1.010	2.89	0.914	1.75	66.0	0.031 5
		2 [#]			0.349	-	0.521	-	65.0	0.032 0
9	新鲜角岩, 结构较完整	1 [#]	20.4	9.0	0.316	2.70	0.342	2.00	130.0	0.021 0
		2 [#]			0.117	-	0.171	-	125.0	0.022 0
10	花岗岩, 结构完整	1 [#]	28.8	7.3	0.593	6.18	0.755	5.81	187.0	0.016 4
		2 [#]			0.096	-	0.130	-	186.0	0.016 5
11	测点未移, 岩性同第 10 次实验	1 [#]	28.2	7.3	0.507	4.30	0.868	4.02	136.0	0.022 4
		2 [#]			0.118	-	0.216	-	137.0	0.022 2

注: 表中的高程差是指 1[#]测点相对 2[#]测点的相对高程差; 放大系数指的是 1[#]测点振动速度与 2[#]测点振动速度之比。

图 4 为放大系数随爆源比例距离的衰减规律, 可见随着爆源比例距离的增加, 放大系数有减小的趋势。

对比第 5, 6, 9, 10, 11 次实验可以看出, 爆源比例距离基本一致, 岩体结构完整的第 10, 11 次实验测点的放大系数最大, 岩体结构较完整的第 9 次实验放大系数次之, 结构破碎、完整性差的回填硬土上的第 5, 6 次实验放大系数最小。对比第 3, 4 次实验发现, 岩体结构完整性及岩石发育程度几乎一致, 放大系数相同。同样的情况也存在于第 8, 9 次实验。

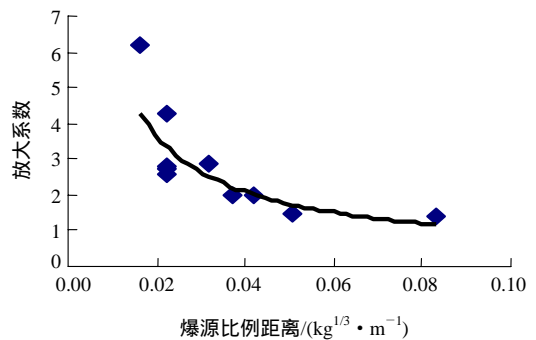


图 4 放大系数随爆源比例距离的衰减规律

Fig.4 Attenuation rule of enlarged coefficient with scale distance of explosive

5 结 论

本文结合广东岭澳核电站二期工程基础爆破负开挖形成的凹、凸形地貌,在现场爆破实验的基础上,系统地分析了地形地貌对爆破振动波传播的影响,得出了如下结论:

(1) 凹形地貌对爆破振动波有明显的衰减作用。爆破振动波衰减与凹形地貌宽度和深度有关,但深度比宽度更能影响爆破振动波的衰减;随爆源距的增加,测点垂直向和水平向的振动速度衰减系数均减小,但是水平向衰减幅度大,爆源距相同时,最大段药量大,衰减系数也大。

(2) 凸形地貌对爆破振动波垂直向的放大效应大于水平向,放大效应具有方向性;凸形地貌相对高差越大,放大效应越明显;随相对高差的增加,垂直向放大系数变大;随爆源比例距离的增加,测点振动放大系数减小。

(3) 凸形地貌放大效应还与岩性有关。结构完整、节理不发育的岩体比结构破碎、节理发育的岩体的放大系数大。

参考文献(References):

- [1] 李海波,李廷芥.地质地貌构造对爆破振动波的影响分析[C]//中国土木工程学会防护工程学会第六次学术年会论文集.[S.l.]:[s.n.],1998:500-504.(LI Haibo, LI Tingjie. Analysis of blasting vibration wave effect of geologic physiognomy and structure[C]//Proceedings of the 6th Conferences on Defence Engineering of China Civil Engineering Society. [S.l.]: [s.n.], 1998: 500-504.(in Chinese))
- [2] 朱振海,杨永琦.沟槽对建筑物减震作用的动光弹研究[J].爆炸与冲击,1989,9(1):55-60.(ZHU Zhenhai, YANG Yongqi. Research on effect decreasing quake of groove on the building with dynamic photo elasticity[J]. Explosion and Shock Wave, 1989, 9(1): 55-60.(in Chinese))
- [3] SPYROS S, FOTIS R. Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(6): 407-417.
- [4] ZHANG Q, BAI C H, LIU Q M, et al. Experimental research on amplitude change of blasting seismic wave with topography[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 9(3): 237-242.
- [5] 方向,高振儒,李的林,等.降低爆破地震效应的几种方法[J].爆破器材,2003,32(3):22-26.(FANG Xiang, GAO Zhenru, LI Delin, et al. Several methods of reducing ground vibration effects from blasting[J]. Explosive Materials, 2003, 32(3): 22-26.(in Chinese))
- [6] 洪炯莹.波的传播及其与介质间断相互作用的数值模拟研究[J].岩土力学,1987,8(3):21-29.(HONG Minxuan. Numerical simulation research of effect of wave dissemination and medium gap[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 21-29.(in Chinese))
- [7] 李维学,张方春,宋友文.工程爆破现场测试的几个技术问题[J].煤矿爆破,1998,(1):19-20.(LI Weixue, ZHANG Fangchun, SONG Youwen. Several technical questions of local test on engineering blasting[J]. Coal Blasting, 1998, (1): 19-20.(in Chinese))
- [8] 易长平,许红涛,卢文波,等.河道对爆破地震波传播规律的影响分析[J].长江科学院院报,2003,20(增):5-7.(YI Changping, XU Hongtao, LU Wenbo, et al. Influence of riverway on transmission of blasting seismic wave[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(Supp): 5-7.(in Chinese))
- [9] 周同龄,李玉寿.反映高程的爆破震动公式及其应用[J].江苏煤炭,1997,(4):21-22.(ZHOU Tongling, LI Yushou. Application of blasting vibration formula related to highness[J]. Jiangsu Coal, 1997, (4): 21-22.(in Chinese))
- [10] 胡刚,吴云龙.爆破地震振动控制的一种方法[J].煤炭技术,2004,23(4):104-106.(HU Gang, WU Yunlong. A new method of the control of the earthquake vibration caused by explosive[J]. Coal Technology, 2004, 23(4): 104-106.(in Chinese))
- [11] 舒大强,何蕴龙,董振华.岩质高边坡开挖爆破震动荷载及其对边坡稳定性影响的研究[J].工程爆破,1996,2(4):39-43.(SHU Daqiang, HE Yunlong, DONG Zhenhua. Research on vibration load from excavation blasting and its influence on stability of rock high-slope[J]. Engineering Blasting, 1996, 2(4): 39-43.(in Chinese))
- [12] MASAHIKO F, MASAYOSHI N. Finite difference analysis of Rayleigh wave transmission past an upward step change[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, 74(3): 893-911.
- [13] DALLY J W, DAVID L. A photoelastic analysis of propagation of Rayleigh waves past a step change in elevation[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(2): 539-563.
- [14] 崔志刚,邹永超,刘殿魁.SH波对圆弧形凸起地形的散射[J].地震工程与工程振动,1998,18(4):8-14.(CUI Zhigang, ZOU Yongchao, LIU Diankui. Scattering of plane SH-wave by a cylindrical hill of circular-arc cross section[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(4): 8-14.(in Chinese))
- [15] 袁晓铭,廖振鹏.任意圆弧形凸起地形对平面SH波的散射[J].地震工程与工程振动,1996,16(2):1-13.(YUAN Xiaoming, LIAO Zhenpeng. Scattering of plane SH waves by a cylindrical hill of circular-arc cross-section[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 1-13.(in Chinese))