

复杂环境水下控制爆破工程影响效应测试分析^①

刘更宁¹, 汤连生^{1,2}, 戚玉亮³, 桑海涛^{1,2}

(1. 中山大学 地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广东 广州 510440)

摘要:结合某沉管隧道沉管段基槽开挖工程,采用爆破动态效应的现场测试、理论分析等综合手段,探索水下爆破水中冲击波和爆破地震波动对邻近建筑物的动态效应特性。研究表明:(1)与地震波的峰值压力值相比,浅水条件下钻孔爆破水中冲击波压力值较小,传播速度也没有地震波快,特定情况下,在考量岸边堤岸及岸边建筑物的稳定性时可以忽略水冲击波的影响;(2)对于不同区域爆破施工来说,应根据其距离被保护对象的远近,选择各允许最大药量中的最小值作为最大爆破控制药量。研究成果对类似工程具有一定的借鉴意义。

关键词:水下控制爆破;沉管隧道;爆破震动效应

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1037-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1037

Tests and Analyses of the Effect of Underwater Controlled Blasting Projects in Complex Environments

LIU Geng-ning¹, TANG Lian-sheng^{1,2}, QI Yu-liang³, SANG Hai-tao^{1,2}

(1.School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
2.Guangdong Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
3.Guangzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: As the effects of blasting vibrations from underwater construction blasting have increasingly gained attention, it is particularly important to conduct research to examine the behavior of underwater blasting vibrations. This paper combines the major foundation trench excavation projects of the immersed tube section in immersed tunnel engineering with indoor and outdoor testing of the bedrock, field tests of the dynamic blasting effects, theoretical analysis, and other comprehensive means to explore the effect of dynamic characteristics of underwater explosion shocks on adjacent land buildings and riverside embankments. The results show that (1) compared with the peak pressure value of a seismic wave, shock wave pressures of drilling blasting in water are small under the shallow water conditions and their propagation speeds are not faster than seismic waves, and therefore, when considering the stability of the embankment and shore buildings, the effects of water shock waves can be ignored under certain circumstances; and (2) concerning blasting constructions in different regions, the maximum blast should be the minimum of each of the allowed maximum doses based on the distances from the blasting point to the protected objects. The above results will provide an important reference for similar projects.

① 收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572277); 全国高等学校博士学科专项科研基金项目(20120171110031); 广东省自然科学基金项目(2015A030313118); 广东省科技计划项目(2008B030303009)

作者简介: 刘更宁, 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事地质工程、基坑工程等方面的研究。E-mail: 839770608@qq.com。

通信作者: 汤连生, 男, 教授, 博导。E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn。

Key words: underwater controlled blasting; immersed tunnel; blasting vibration effect

0 引言

大规模的水下爆破实践是从第二次世界大战后开始的。为了疏通河道、开挖运河、兴建港口、修筑水坝等大型工程需要,欧美等国开始研究水下爆破技术。另外海洋工程、海港建设、水底沉埋式隧道基坑开挖也极大地促进了水下控制爆破技术的发展。水下船舶工程爆破、耐水压雷管和耐水压炸药、导爆管和无线遥控起爆、气泡帷幕等技术的应用,使水下复杂环境条件下的爆破工程得以顺利进行。

Snay^[1]详细阐述了将爆炸相似律运用于水下爆炸时的基本前提和使用方法,并指出这种方法存在的局限性。在无限水介质和半无限水介质水下爆炸情况下,通过运用爆炸相似律,Gaspin^[2]分析了获得相同冲击波压力-时间曲线时爆深与装药能量之间的关系。孙承纬^[3]基于渐近分析理论和爆轰冲击波动力学的工作,对发散爆轰传播规律的认识不断深化,提出了一些有效的理论方法,从而为更精确的爆轰数值模拟技术,尤其是爆轰驱动等效应的精确计算开辟了新的道路。

进入二十一世纪后,杨溢等^[4]在对预裂爆破的地震效应进行多因素灰色关联分析的基础上,指出水平和垂直向的震速均与药量、炮孔深度和测点距离有密切关系,其中影响最大的是药量。沈蔚等^[5]运用灰色关联理论,结合工程实践经验,在众多影响震动强度的因素中分析指出:最大装药量对爆破地震波的振动峰值和主频有着主要的影响作用。吴子泉等^[6]对爆破地震效应测试及打桩振动测试数据的研究,发现 K 值与假定药量大小有关, A 值及相关系数与药量无关,药量对反演结果无任何影响。张雪东等^[7]率先在国内利用离心模拟试验,研究了水下爆破冲击荷载在原型应力条件下对结构的影响。

总结以上的研究进展可以发现,由于水下爆破效应问题较复杂,目前主要从水下爆破理论分析、数值模拟和物理模拟进行研究。从上世纪中期开始,水下爆破效应的研究取得了长足的进展,但大多集中在水下爆破产生的水中冲击波的破坏效应方面,水下爆破产生的爆破震动效应研究较少。现有的研究仅提出了一些针对特定工程的减震措施,并没有真正揭示水下爆破震动的规律。随着水下爆破施工所造成的爆破震动影响越来越受到重视,开展水下爆破震动规律的研究显得尤为必要。本文结合某沉管隧道沉管段基槽开挖工程,采用爆破动态效应的现场

测试、理论分析等综合手段,探索水下爆破水中冲击波和爆破地震波动对邻近建筑物的动态效应特性。

1 工程概况

选取亚洲最大的变截面沉管隧道作为研究对象,其中沉管段与岸上段连接处为变截面管段,在国内尚属首创。根据隧道所在河段的水文地质等要求,由于部分岩面较高,设计隧道沉管段水下基槽的开挖施工方案采用水下爆破成槽(基槽长 340 m,宽 37.4~45.36 m,基床的平均最大水深 7.68 m,深基槽在水下开挖的深度达 15 m)。基槽底主要是全风化粉砂岩、全风化砂砾岩,强风化粉砂岩、强风化砂砾岩,平均厚度约 0.5 m。隧道沉管段基槽在平面上全部处于直线上,在纵断面上处于一个“V”型坡上,基槽底宽 35.4~43.36 m,基槽平均炸礁岩层厚度 5 m,临时系泊位炸礁岩层厚度 0.6 m。

根据资料,施工区周围环境比较复杂,爆破区离教堂、封门、围堰和两岸的堤岸比较近,对爆破控制的要求较高。本工程土石方开挖总量 99 225 m³;其中基槽、临时系泊位水下石方爆破工程量 94 825 m³,垫块基坑开挖工程量 4 400 m³。

2 爆破振动监测系统

本次施工区域平面图如图 1,试爆区域位于 E2 区的 1# 试爆区。中间阴影部分为试爆区。试爆区域为 12 m×12 m 的正方形范围,此区域平均岩层厚度 3.7 m,采用一次爆破至底标高。

2.1 爆破布孔及用药量

本次试验在 E2 管节上游垫块坑实施爆破,并作为试验研究的爆源,6 孔 1 段。试爆区域共分 4 次试爆,依次试爆第七排孔,第五、六排孔,第一、二排孔和第三、四排孔。孔距 $a=2.4$ m,排距 $b=2$ m,孔径 $d=105$ mm,超钻深度=1.5~1.8 m。平行堤岸线进行炮孔布置,排间孔位呈梅花形错开。采用潜孔冲击钻,一次性钻至设计标高(加超钻深度)。炸药型号及其性能参数见表 1。各次试爆的爆破参数见表 2。

表 1 2 号岩石乳化炸药性能参数
Table 1 Performance parameters of No.2 rock emulsion explosive

型号	爆速/(m·s ⁻¹)	作功能力/mL	殉爆距离/cm
直径 90 mm、 长度 500 mm、 每条重 3 kg	≥3 000	≥320	≥3

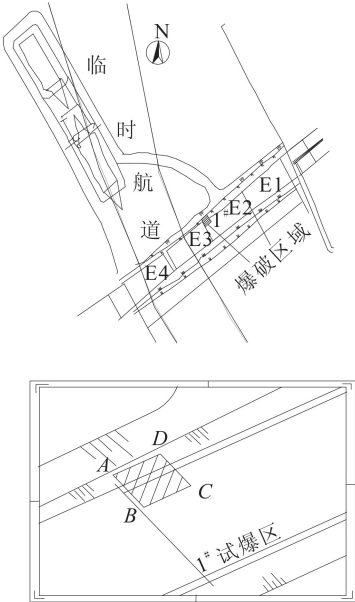


图 1 试爆区布置图

Fig.1 Layout of the test blasting area

表 2 各次试爆的爆破参数					
Table 2 Blasting parameters for each test blasting					
试爆	排号	总药量/kg	单响最大药量/kg	微差/ms	段别
第一次	7	120	120	0	1
第二次	5,6	192	96	880	2
第三次	1,2	240	120	350	2
第四次	3,4	192	96	340	2
合计		744			

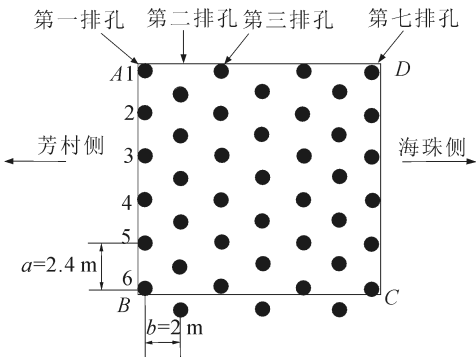


图 2 1#爆区域布孔图

Fig.2 Hole arrangement in 1# test blasting area

2.2 监测点布置

根据监测目的,本次爆破共布置了 17 个振动监测点(图 3),29 个传感器,9 台数据采集记录仪。测点说明:在基坑基础面上堤岸内布置了 6 个测点;8 个监测点布置于水下 3.5 m 深的位置,以便研究水下冲击波规律,通过停放在主航道上的二条测试船

安放;珠江堤岸芳村一侧的水警码头处布置了 1 个水下冲击波监测点,教堂及信义路 12 号危房各布置了 1 个爆破震动监测点。

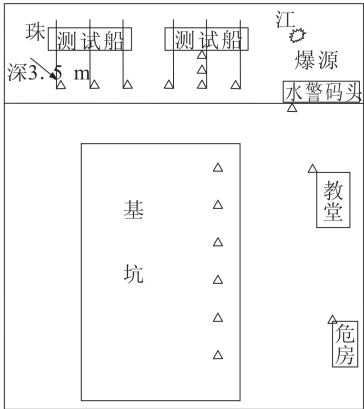


图 3 爆破监测点布置图

Fig.3 Layout of the monitoring points

3 爆破振动监测结果分析

3.1 水下钻孔爆破作用下的水中冲击波分析

珠江主航道及芳村堤岸水中冲击波测点振动记录波形图如图 4 和图 5 所示。

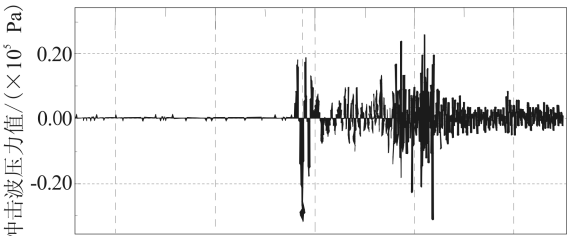


图 4 珠江主航道水冲冲击波测点振动记录波形图(最大冲击波压力值 0.295×10^5 Pa)

Fig.4 Vibration waveform of underwater blast waves recorded by the measuring points in main channel of the Pearl River (The maximum Pressure of blast waves is 0.295×10^5 Pa)

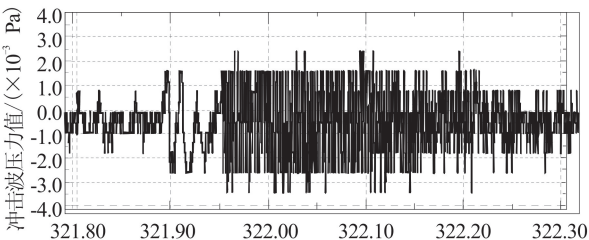


图 5 芳村堤岸水冲冲击波测点振动记录波形图(最大冲击波压力值 0.0016×10^5 Pa)

Fig.5 Vibration waveform of underwater blast waves recorded by the measuring point in the Fangcun embankment (The maximum pressure of blast waves is 0.0016×10^5 Pa)

本次冲击波水压力峰值监测结果见表 3。在珠江主航道上的冲击波峰值压力为 0.295×10^5 Pa,而在靠堤岸的芳村水警码头处为 0.0016×10^5 Pa,遵循随着测点与爆心直线距离的增加冲击波的峰值压力逐渐减小的规律。但由于芳村水警码头靠近岸边(尽管两者与爆源距离相差不大),冲击波压力值降低相差两个数量级,因此水下钻孔爆破对远区的堤岸影响不大。与地震波的峰值压力值相比,水中冲击波较小,而且水中冲击波的传播速度没有地震波快,两者不会同时传递至岸边,因此在考量岸边堤岸及岸边建筑物的稳定性时可以忽略水冲击波的影响。

表 3 冲击波水压力峰值监测结果

Table 3 Monitoring results of the peak water pressure of blast waves				
监测位置	测点数	与爆源 的距离/m	冲击波峰值 压力值/ Pa	备注
珠江主航道	8	114	0.295×10^5	200 kg<药量< 1 000 kg 时铁船 安全距离 150 m
芳村水警码头	1	192	0.0016×10^5	

表 4 四次试爆的各监测点最大监测数据

Table 4 The maximum monitoring data for each monitoring point in the four test explosions						
位置	观测内容	爆心距 R/m	18 号单响最大药量 96 kg/(cm·s ⁻¹)	19 号单响最大药量 120 kg/(cm·s ⁻¹)	20 号单响最大药量 96 kg/(cm·s ⁻¹)	规范允许最大 值/(cm·s ⁻¹)
基坑	地震波振速	218	0.846	1.015	0.494	5
教堂	地震波振速	220	-	1.03	0.943	2
危房	地震波振速	320	0.195	0.21	0.075	1

速度经验公式:

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

式中: v 为地震动质点最大速度(cm/s); Q 为炸药量(kg); R 为爆心距(m); K 、 α 分别为与岩石特性等因素有关的常数,岩土质 $K=150\sim250$, $\alpha=1\sim2$ 。

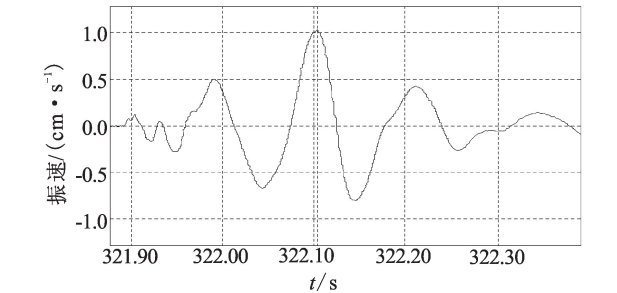


图 6 教堂测点震动记录波形图(最大振速 1.03 cm/s)
Fig.6 Vibration waveform recorded by the measuring point in the church (The maximum velocity is 1.03 cm/s)

利用表 4 的数据对萨道夫斯基公式进行拟合,可以得到该爆破工程相关岩土体参数 $K=200\sim$

由波形图可知,在峰值压力之后形成不规则杂、乱的波形,主要是由于地形和岩石介质的不均匀性使得冲击波在传播过程中多次发生折射、反射及绕射而产生的综合效应。本次试验由于是浅水钻孔爆破,炸药大部分能量以压缩、破碎和振动的形式作用于岩土介质,爆炸能量分配到水中冲击波部分远小于半无限介质水中爆炸的情况;另外由于各小药包起爆时间存在微差,以及试验场地地形变化等因素造成的误差,使得各钻孔爆破形成的冲击波不会同时到达,存在一定的时差,没有产生叠加效应;考虑到诸多影响因素,通过实验的方法来获得一定条件下的水中钻孔爆破冲击波经验数据较为现实。

3.2 水下钻孔爆破作用下的地震波分析

本次爆破试验中各测点爆破的结果数据见表 4。基坑、教堂、危房测点振动记录波形图如图 6~8 所示。

根据苏联萨道夫斯基^[8]提出的地震动最大振动

210, $\alpha=1.4\sim1.5$,由此计算得到的震动波速较大,主要原因是堤岸材料上部是由土质材料构成的,所以震动波速相对较大。

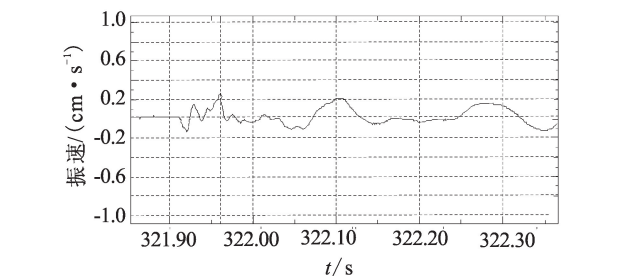


图 7 危房测点振动记录波形图(最大振速 0.21 cm/s)
Fig.7 Vibration waveform recorded by the measuring point in dilapidated houses (The maximum velocity is 0.21 cm/s)

通过对现场监测的结果分析,影响建筑物振动的因素首先是地震波幅值和频率。当建筑物的频率与爆破地震波频率相近时,易引起自振,建筑物对地震波响应强烈,反之较弱;当建筑场地地基土波速和其他条件都相同时,若地基土比较好,爆破地震波频率高,相应波长较短,因此建筑物对地震波速度响应

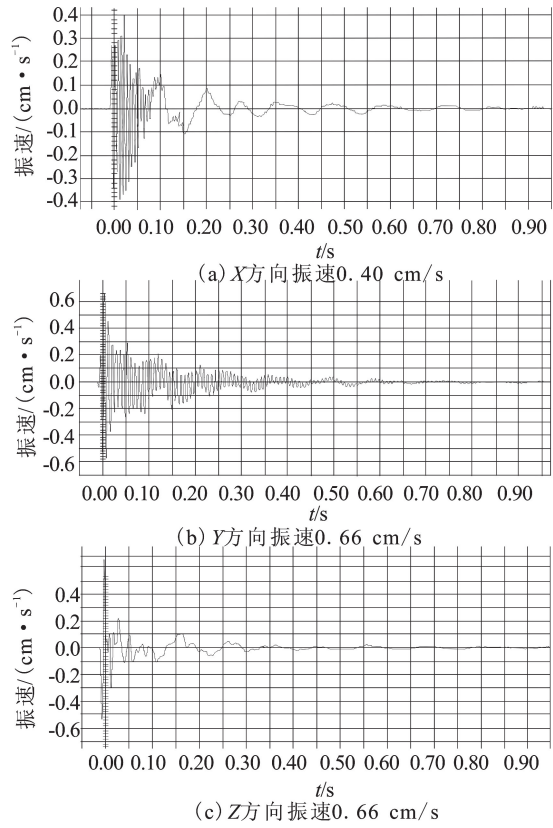


图 8 基坑典型测点振动记录波形图
Fig.8 Vibration waveform recorded by typical measuring points in the foundation pit

比较弱;反之,若地基土较差,爆破地震波频率低,建筑物对地震波速度响应比较强;脉冲爆炸持续时间越短,对建筑物影响越小。

另外,根据试验拟合的萨道夫斯基经验公式,可以计算出距离不同基槽施工爆破点的危房、教堂、基坑等建构筑物所允许的最大单次爆破药量。将最大单次爆破药量控制在各建筑物距离爆破点要求范围内进行爆破施工,即能够保证沉管基槽爆破开挖安全。按《爆破安全规程》标准,一般砖房、非抗震的大型砌块及预制构件房屋、框架建筑的安全振速为 2~4 cm/s,对于危房,按照土窑洞、土坯房、毛石房屋的 1.1~1.5 cm/s 标准执行,取 1.1 cm/s;教堂具有一定的文物价值,而且建设年代较早,材料老化,选取安全振速 2.0 cm/s 作为控制标准;基坑作为钢筋混凝土结构的安全振速为 4.2~5 cm/s,为安全起见本次取 4.2 cm/s 作为控制标准。危房离基槽施工爆破点最近距离为 150 m,根据萨道夫斯基经验公式计算出危房最近距离允许的最大装药量为 43.73 kg。教堂离基槽施工爆破点最近距离为 50 m,根据萨道夫斯基经验公式计算出教堂最近距离允许的最

大装药量为 5.83 kg。基坑离基槽施工爆破点最近距离为 35 m,根据萨道夫斯基经验公式计算出基坑最近距离允许的最大装药量为 9.81 kg。由于每次爆破的允许最大药量取决于不同保护对象的安全控制振动速度,而基坑、教堂、危房的爆破控制振动速度是不一致的,因此每次爆破的允许最大药量是不同的。对于不同区域爆破施工来说,应根据其距离被保护对象的远近,选择各允许最大药量中的最小值作为最大爆破控制药量。在距离芳村堤岸 25~35 m 的爆破范围内,其安全控制振速由芳村堤岸确定;而在距芳村堤岸 35~160 m 范围内,其安全控制振速由教堂确定。

4 结论

通过爆破动态效应的现场测试和理论分析,研究某沉管隧道沉管段基槽开挖工程中水下爆破冲击波和爆破地震波动对邻近建筑物的动态效应特性,所得结论如下:

- (1) 水中爆炸冲击波在微秒级时间内增大到峰值压力,随后随时间呈指数衰减规律下降。与地震波的峰值压力值相比,浅水条件下钻孔爆破水中冲击波压力值较小,而且水中冲击波的传播速度也没有地震波快,两者不会同时传递至岸边,因此本次爆破施工时,考虑岸边堤岸及岸边建筑物的稳定性时可以忽略水冲击波的影响。
- (2) 对于不同区域爆破施工来说,应根据其爆破点距离被保护对象的远近,选择规范允许最大药量中相应的最小值作为最大爆破控制药量。本次试验根据拟合的爆破振动速度公式,在距离芳村堤岸 25~35 m 的爆破范围内,其安全控制振速由芳村堤岸确定;而在距芳村堤岸 35~160 m 范围内,其安全控制振速由教堂所确定。

参考文献(References)

[1] Snay H G.The Scaling of Underwater Explosion Phenomena [R].AD0271468, 1962.

[2] Gaspin J B.Estimation of Geoacoustic Parameters of the Ocean Bottom by Inversion of Reflectionless Data[D].Victoria: University of Victoria,1995.

[3] 孙承伟.爆轰传播研究的近代进展[J].爆轰波与冲击波,1997,(3):1-22.

SUN Cheng-wei.The Recent Progress in the Study of Detonation Propagation[J].Explosion and Shock Waves,1997(3):1-22.(in Chinese)

by a Lined Cylindrical Cavity in a Poroelastic Half-plane[J]. Computers and Geotechnics,2009,36(5):773-786.

[11] M A Biot.Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media[J].Journal of Applied Physics,1962,33(4):1482-1498.

[12] G S Erjanov,S M Aitaliev,L A Alekseeva.Dynamics of Tunnels and of Buried Pipelines[M].Alma-Ata,1989.

[13] M Abramowitz, I A Stegun. Handbook of Mathematical Functions[M].Dover New York,1972.



(上接 1041 页)

[4] 杨溢,张智宇,庙延钢,等.灰色关联分析在预裂爆破震动分析中的应用[J].云南冶金,2001,30(5):1-3.
YANG Yi,ZHANG Zhi-yu,MIAO Yan-gang,et al.Application of Gray Association Analysis for Analysing Vibration in Pre-splitting Blasting[J].Yunnan Metallurgy,2001,30(5):1-3.(in Chinese)

[5] 沈蔚,徐全军,黄文华,等.用灰色关联分析法确定爆破震动参数的主要影响因素[J].工程爆破,2002,6(4):6-13.
SHEN Wei,XU Qaun-jun,HUANG Wen-hua,et al.Determination of Main Influencing Factors on Blasting Vibration Parameters by Grey Correlation Analysis[J].Engineering Blasting,2002,6(4):6-13.(in Chinese)

[6] 吴子泉,姜早峰,王成虎,等.爆破地震效应数据处理影响因素初步研究[J].西北地震学报,2004,26(1):62-65.
WU Zi-quan,JIANG Zao-feng,WANG Cheng-hu,et al.Primary Research on Effect Factors for the Processing Blasting Vibration Data[J].Northwestern Seismological Journal,2004,26(1):62-65.(in Chinese)

[7] 张雪东,侯瑜京,梁向前,等.水下爆破对大坝影响的离心模拟试验研究[J].西北地震学报,2011,33(增刊1):234-236.
ZHANG Xue-dong,HOU Yu-jing,LIANG Xiang-qian,et al.Centrifuge Modeling Research on the Influence of Underwater Blasting on a Dam[J].Northwestern Seismological Journal,2011,33(Supp1):234-236.(in Chinese)

[8] 李翼祺,马素贞.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992.
LI Yi-qi,MA Su-zhen.The Dynamics of Explosion[M].Beijing: Science Press,1992.(in Chinese)