

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.007

黄河三角洲凹陷区地震勘探振动特征分析*

王贤武¹, 饶宇^{2,3}, 刘美山³, 张伟⁴, 高峰¹, 刘志芳³, 王凯¹

(1. 青海物产爆破技术服务有限公司, 西宁 810000; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070;
3. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;
4. 中石化石油工程地球物理有限公司 胜利分公司, 东营 257000)

摘要: 地震勘探的振动特性分析是工程安全研究的基础。针对黄河三角洲凹陷区地震勘探震源类型、药柱埋深和药量的不同, 采用现场获得地震勘探振动衰减规律和频率分布特征。研究表明: 勘探炸药埋深越浅, 震源近区地表的振动越大, 振动速度衰减更快, 振动影响范围更小; 一般地, 竖向的振动速度为径向的2~5倍, 切向的5~10倍; 随药量增大和埋深的增加, 萨道夫斯基公式的 α 和 K 值均有所减小; 机械震源振动特性则受到基础硬化程度影响。爆破振动主频率的分布在三个方向差异性明显, 径向主振频率10 Hz以下占比82%, 切向表现为“两头分布多(>50 Hz和<20 Hz)、中间(20~50 Hz)分布少”的特点, 竖向的高频部分(>30 Hz)占比达到68%; 机械震源的主频率在三个方向分布基本一致。

关键词: 地震勘探; 振动衰减; 频率分布; 机械震源

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)03-0040-07

Analysis of Vibration Characteristics of Seismic Exploration in Subsidence Zone of Yellow River Delta

WANG Xian-wu¹, RAO Yu^{2,3}, LIU Mei-shan³, ZHANG Wei⁴, GAO Feng¹, LIU Zhi-fang³, WANG Kai¹

(1. Qinghai Materials Industry Blasting Technology Service Limited Corporation, Xining 810000, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. Shengli Branch, Petroleum Engineering Geophysical Limited Corporation, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Vibration characteristics analysis of seismic exploration blasting is the foundation of engineering safety research. Taking the difference of seismic source type, explosive depth and explosive charge used in the subsidence zone of Yellow River delta into account, the attenuation law of blasting vibration and distribution characteristics of main vibration frequency were obtained through field test. The results showed that if the depth of charge was reduced, the vibration of surface near the seismic source would be increased, the attenuation of vibration velocity would be fasten, and the influence range of blasting vibration would be smaller. In general, the vertical component direction had the maximum peak particle velocity (PPV), which was 2~5 times of the PPV in radial component direction and 5~10 times of the PPV in tangential component direction. With the increase of quantity of charge and exploration depth, the values of K and α in the Sadaovsk formula decreased. The vibration characteristics of mechanical source were affected by the degree of foundation hardening. The main frequency distribution of blasting vibration was obviously different in three directions, 82% main vibration frequencies were below 10 Hz in radial component direction and 68% were over 30 Hz in vertical component direction. In the tangential direction, main vibration frequencies were mostly below 20 Hz and over 50 Hz, and little between 20 Hz and 50 Hz. The main vibration frequency distribution charac-

teristics of the mechanical source were almost consistent in three directions.

Key words: seismic exploration; vibration attenuation; frequency distribution; mechanical source

振动是地震勘探引起的主要危害之一, 随着地震勘探作业范围向城镇推进, 振动所激化的勘探作业和各类建(构)筑物保护之间的矛盾日益突出, 是影响地震勘探工作顺利开展的重要因素。以胜利油田东部探区所处的黄河三角洲凹陷区为例, 地震勘探主要采用震源药柱深井爆炸(井炮)和地面机械震源相结合所进行。为确保勘探资料的质量, 检炮点布置需要满足一定密度且需要尽量降低保护物影响所带来的不规则分布。因此, 地震勘探振动特性的分析对保护物的安全控制和确保勘探顺利实施具有重要意义。

爆破或爆炸的振动特性主要包括振动速度和振动频率两个方面, 众多的学者和工程技术人员对此进行了研究。卢文波通过理论分析研究了主振动频率的衰减规律和影响因素^[1,2]; 胡建华修正了萨道夫斯基公式并进行了多元回归分析^[3]; 严鹏研究了爆破振动的衰减及其与损伤深度的关系^[4]; 陶铁军建立了地震波能量的衰减公式^[5]; 王玉杰获得了地下厂房的振动衰减规律^[6]; 饶宇从滤波角度探讨了预裂爆破的频率分布特性^[7]; 柴修伟探讨了炸药性能对爆破振动衰减的影响^[8]。张加海通过对地震勘探震源药柱爆炸振动的回归分析获得了位移、速度和加速度的衰减规律^[9]; 李云伟根据胶莱地区勘探振动的衰减规律确定了不同岩体下建筑物的安全距离^[10]。杨风威比较了台阶爆破和预裂爆破的振动衰减参数和主振频率等特性不同^[11]; 周俊汝研究了主振频率的衰减及其波动特征^[12]。

当前对振动特性的研究多是以微差爆破为基础, 主要针对岩土爆破和拆除爆破等, 而地震勘探的振动特性因其规模较小往往被忽略。实际上, 地震勘探具有震源类型多(爆破震源药柱和机械震源等)、保护物类别多、涉及到城镇等复杂作业环境、爆炸频次高、振动能量利用率高(尽可能将爆炸能量转换为振动能量)、寻求极限的安全距离以满足勘探精度要求等特征, 往往更加容易引起安全问题, 而地震勘探的振动特性研究是安全控制的基础。针对黄河三角洲凹陷区勘探作业采用不同的震源类

型、震源药柱埋深和药量, 通过现场试验和原位测试方法, 获得了震源药柱和机械震源的振动衰减规律和主振频率分布特征, 研究了埋深和药量对勘探振动特征的影响, 获得了不同类型震源的振动衰减规律, 为地震勘探的安全控制制定提供了依据。

1 地震勘探振动衰减规律

1.1 药柱爆炸振动衰减规律

本地区的地震勘探常采用的单井药量规格有 1 kg、2 kg、4 kg、6 kg 和 8 kg, 同时, 震源一般药柱位于潜水面以下 1 m、3 m、5 m 和 7 m。对于药柱爆炸振动的衰减, 目前常采用萨道夫斯基公式进行回归分析。药量不同导致药柱长度、位置不同, 从而对衰减规律产生影响。同样地, 震源药柱在潜水面以下不同位置也导致衰减规律出现差异。因此, 需要对震源位置和药量多少对地震勘探振动速度衰减的影响进行分析。

$$v = K \left(\frac{Q}{R} \right)^{\alpha} = K \rho^{\alpha} \quad (1)$$

式中: v 为峰值质点振动速度, cm/s; ρ 为比例药量 $\rho = Q^{1/3}/R$; Q 为最大单响药量, kg; $R = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$ 为爆心距, m; K 为与岩石性质、药柱参数、场地条件等有关的衰减系数; α 为振动衰减指数。

现场选取了三个不同试验区进行勘探试验分析, 三个试验区的潜水面深度不相同。其中, 1#地区不同方向的药柱爆炸振动衰减曲线如图 1 ~ 图 4 所示。

根据图 1 可知, 在勘探药量相同情况下, 随着井深减小, 炸药埋深越浅, 在距离震源较近的区域(简称近区, 下同, 具体范围在不同方向存在差异, 一般震源距在 20 m 以内)的质点振动速度峰值越大, 并且振动峰值的衰减速度也更快, 从而出现“近区大远区小”的情况, 其中, 以铅锤向和水平径向尤为明显。炸药埋深越大, 虽然近区振动小, 但衰减慢, 在中远区振动速度反而更大。但当炮孔存在冲孔导致能量外泄时则上述规律是不明显的。

分析图 2 ~ 图 4 可知, 随药量的增加, 振动速度峰值显著增大, 而振动速度峰值在三个方向的数值大小表现为竖向 > 径向 > 切向, 竖向振速峰值一般为径向的 2 ~ 5 倍, 为切向的 5 ~ 10 倍。竖向为三个方向中的主控方向。

收稿日期: 2020-05-28

作者简介: 王贤武(1979-), 男, 工程师、学士, 从事爆破安全相关的工作, (E-mail) 751034172@qq.com。

通讯作者: 饶宇(1990-), 男, 工程师、博士研究生, 主要从事岩土动力学方面的研究工作, (E-mail) raoyuray@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51609017)

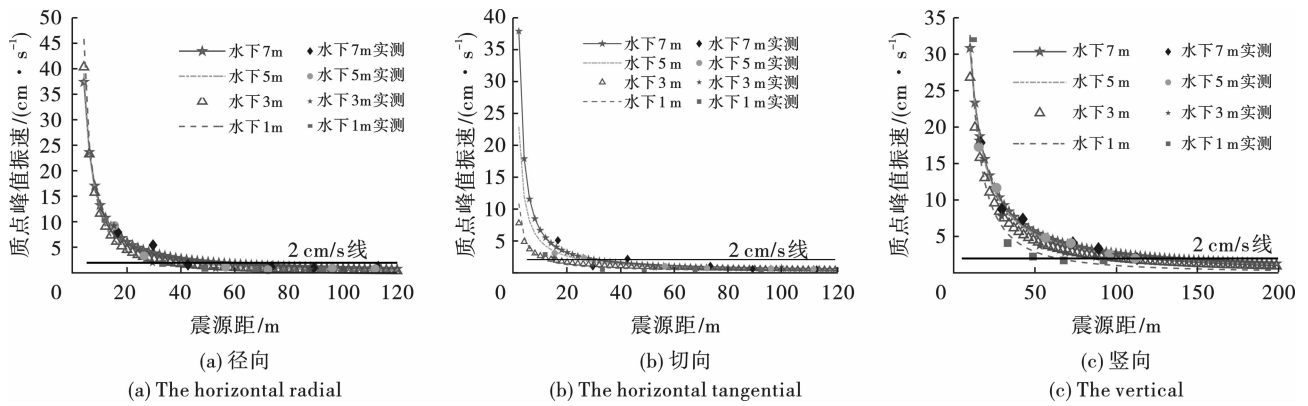


图1 1#地区不同震源深度振动衰减拟合曲线(8 kg)

Fig. 1 PPV attenuation curves with different explosive depth in test area one(8 kg)

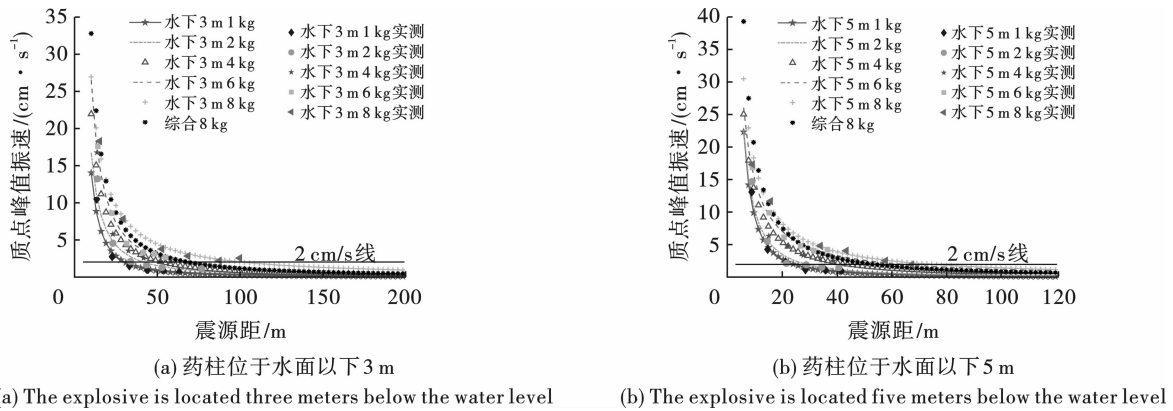


图2 1#地区不同药量竖向振动衰减拟合曲线

Fig. 2 Attenuation curves of vertical PPV with different explosive quantity in test area one

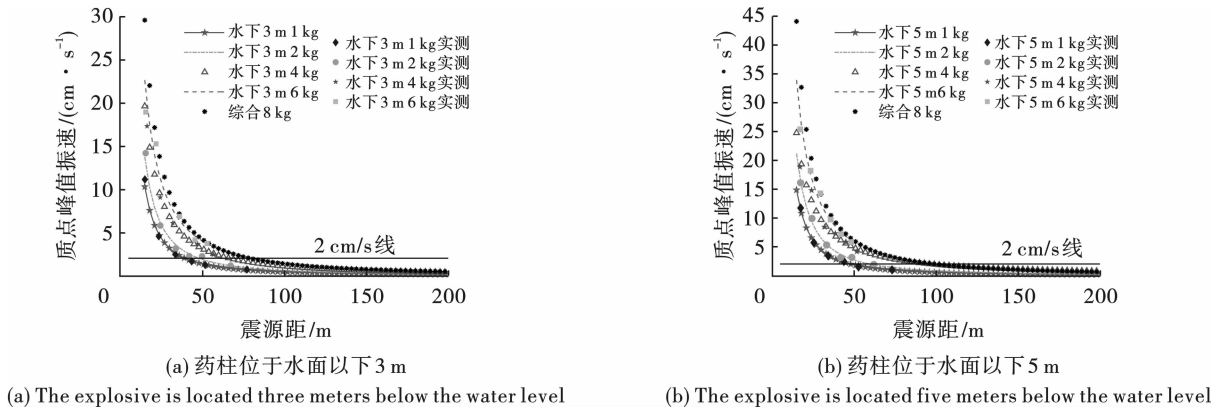


图3 2#地区不同药量竖向振动衰减拟合曲线

Fig. 3 Attenuation curves of vertical PPV with different explosive quantity in test area two

将回归结果汇总至表1可知,药量和埋置深度还影响到振动衰减指数 α 和衰减系数 K ,一般地,随着药量增大和埋深的增加,衰减指数 α 和衰减系数 K 均有所减小。

1.2 机械振动衰减规律

对于地表可控震源而言,其产生的振动衰减规律在数学表达式上与药柱爆炸振动类似,只是在药

柱爆炸振动衰减中,采用最大单段药量来表征输入的振动能量,在地表可控震源中,选择振动出力进行表征,相关的数学表达如式(2)所示。

$$V = K \left(\frac{W^{1/n}}{R} \right)^\alpha = K \rho^\alpha \quad (2)$$

式中: V 为保护对象所在地面质点振动速度,cm/s; ρ 为比例出力, $\rho = W^{1/n}/R$; W 为振动出力值,

kPa; R 为平板(重锤)中心至观测点的距离, 称震源距, m ; K 、 α 分别为平板(重锤)与保护对象间的地

形、地质条件有关的衰减系数和衰减指数; n 为表征振动出力和震源距指数关系的参数。

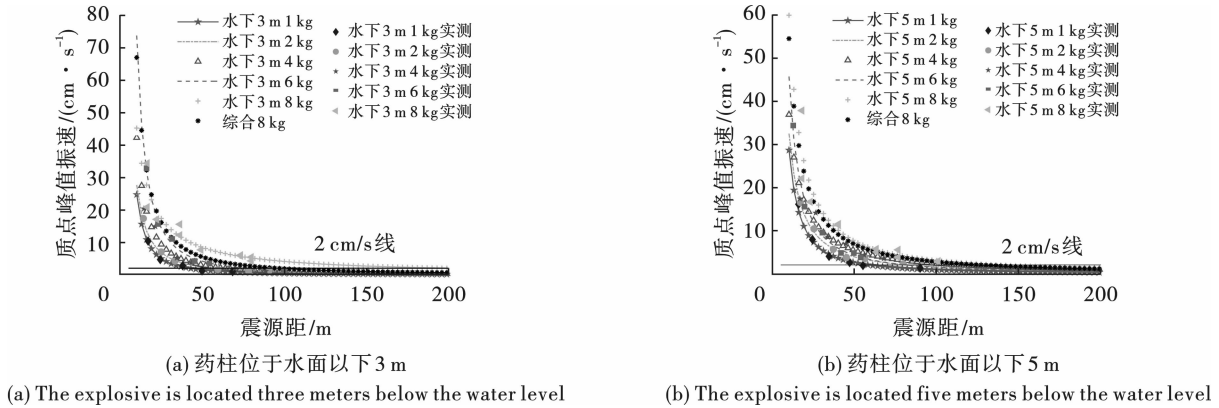


图 4 3#地区不同药量竖向振动衰减拟合曲线

Fig. 4 Attenuation curves of vertical PPV with different explosive quantity in test area three

可控震源与药柱爆炸不同的是, 药柱爆炸很大部分能量实际上用来破碎挤压岩土而非转化为振动, 而可控震源的能量基本都用于引起岩土体的波动。为便于采集资料的分析处理, 一般同一地区震源型号、震源参数相同。因此, 将本地区的震源参数(型号为 WTC5141TZY 车载可控震源、出力设定 70%、扫描长度 23 s, 平均出力 67%) 作为基准值 1, 即式(2)中 W 取值为 1。采用震源车分别在硬化地表、一层砖混民房墙体和土质地基等部位不同距离

的位置进行振动试验, 以此研究机械震源的衰减规律。

分析图 5 可知, 采用当前震源参数的可控震源引起的质点振动速度峰值远小于 1 kg 震源药柱爆炸所引起的质点振动速度峰值, 振动的衰减速度也较爆炸振动慢, 整体上可控震源引起的振动较小。可控震源所引起建(构)筑物的振动小于硬化地表振动, 而硬化地表的振动则明显小于天然软弱土层的振动。

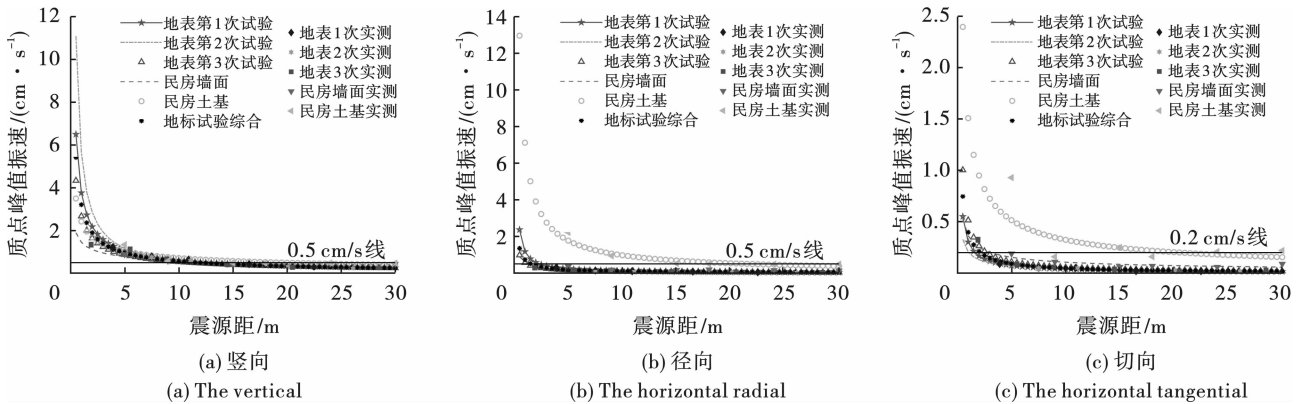


图 5 可控震源引起不同对象的振动衰减拟合曲线

Fig. 5 PPV attenuation curves of different objects by vibroseis

可控震源一般以竖向振动最大, 在混凝土基础、已夯实或硬化的地面采用可控震源进行勘探, 径向和切向振动速度均显著小于铅锤向振动速度。

而在软土基础上, 因为可控震源可能引起近区软质土层的挤压变形, 从而导致软质土基径向振动大于竖向, 这在震源近区尤为明显, 但影响范围较小, 且径向速度衰减比铅锤向速度衰减更快; 因此, 软质土层中, 径向振动速度呈现“近区大、远区小、

衰减快”的现象。

1.3 衰减参数统计

根据 2.1 ~ 2.2 节所述, 采用震源药柱进行勘探作业的振动主控方向为铅锤向, 而采用地面可控机械震源进行勘探作业则视地质条件而定, 一般硬化地表主控方向为铅锤向, 而天然地表和软弱基础主控方向则不同, 在近区为径向, 中远区为铅锤向。黄河三角洲凹陷区地震勘探振动衰减参数统计如表 1

所示。

表 1 黄河三角洲凹陷区地震勘探振动衰减参数统计

Table 1 Attenuation parameters of the Sadaovsk formula by seismic exploration in subsidence zone of Yellow River delta

震源类型	工况		主控方向	比例药量(出力)对数 $\ln \rho$	回归方程常数		相关系数
	地区	装药高度			K	α	
震源药柱	S1	水下 1 m	铅锤向	-3.83 ~ -1.78	365.28	1.50	0.97
		水下 3 m		-4.15 ~ -2.02	338.84	1.45	0.96
		水下 5 m		-4.24 ~ -2.04	350.60	1.36	0.96
		水下 7 m		-4.03 ~ -2.11	169.87	1.06	0.99
		不同深度累计		-4.24 ~ -1.78	271.80	1.32	0.93
	S2	水下 1 m		-3.15 ~ -2.69	314.60	1.30	0.96
		水下 3 m		-4.35 ~ -2.15	776.11	1.62	0.99
		水下 5 m		-3.49 ~ -2.25	645.40	1.42	0.99
		水下 7 m		-3.60 ~ -2.79	180.60	1.21	0.90
		不同深度累计		-4.35 ~ -2.15	815.07	1.59	0.96
	S3	水下 1 m		-3.82 ~ -2.04	392.21	1.15	0.98
		水下 3 m		-4.28 ~ -2.11	621.60	1.45	0.94
		水下 5 m		-4.50 ~ -1.94	434.02	1.29	0.97
		水下 7 m		-3.92 ~ -2.26	598.66	1.39	0.97
		不同深度累计		-4.50 ~ -1.94	562.33	1.39	0.95
三地区合计				-4.50 ~ -1.78	466.35	1.40	0.92
可控震源	硬化地面		铅锤向	-3.35 ~ -0.64	3.21	0.76	0.96
	软弱土体		铅锤向	-3.40 ~ -1.61	2.42	0.53	0.86
			径向	-3.40 ~ -1.61	7.11	0.86	0.93
	1 层砖混民房墙面		铅锤向	-3.40 ~ -1.61	1.45	0.38	0.87

2 主振频率的分布

2.1 震源药柱的主振频率分布

振动的危害主要与振动速度大小、持续时间、频率有关。振动速度越大,对建(构)筑物的危害越

大;主频率越接近于建(构)筑物的自振频率,易形成共振现象,对建筑物的危害大。振动持续时间越长,显然危害越大,但对于地震勘探,振动持续时间基本固定。根据现场实测地震勘探振动监测所得的峰值振速频率数据绘制频率分布图如图 6。

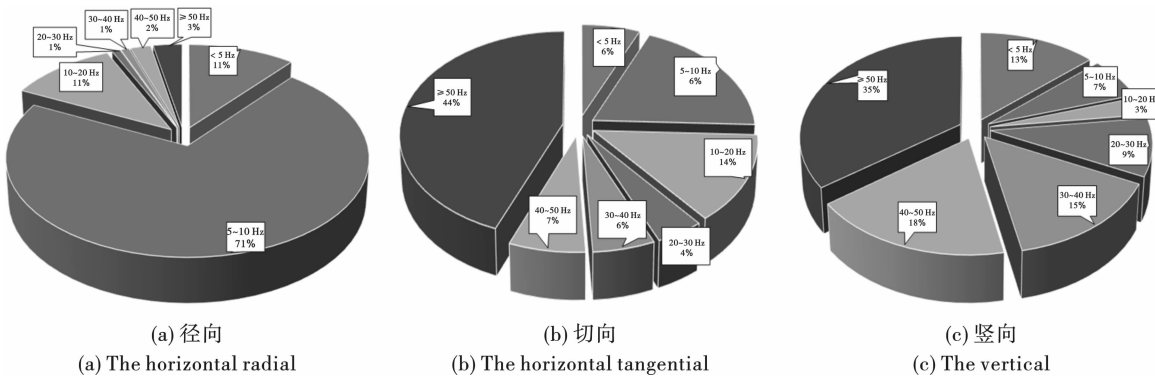


图 6 药柱爆炸振动不同方向主振频率分布

Fig. 6 The distribution of main vibration frequency by explosive seismic blasting in different direction

根据图 6 可知,井炮的主振频率在三个方向上存在较大的差异,径向的主振频率在 10 Hz 以下占到 82%,而切向则表现为“两头 (> 50 Hz 和 <

20 Hz) 分布多、中间 (20 ~ 50 Hz) 分布少”的特点,竖向与切向和径向又显著不同,高频部分 (> 30 Hz) 占比达到 68%。

考虑到竖向为三个方向中的主控方向,竖向主振频率高对保护物的安全性有利。但地震勘探爆破的主振频率分布离散,特别是径向低频、超低频占比高。仅以主振动及其频率对建筑进行安全评价存在

不足,未考虑“低振速且低频率”的情况。

2.2 机械震源的主振频率分布

图7为地面可控震源所引起三个方向的主振频率区间分布图。

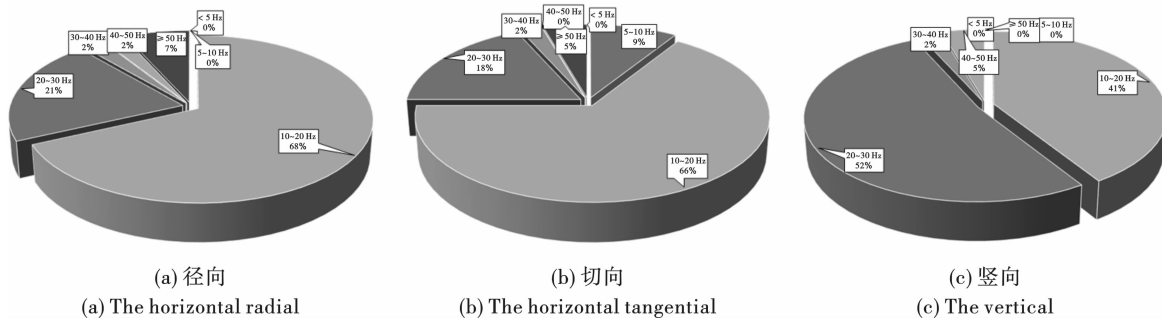


图7 可控震源不同方向主振频率分布

Fig. 7 The distribution of main vibration frequency by vibroseis in different direction

根据图7可知,可控震源的主振频率分布在三个方向上相对固定,主振频率在10~30 Hz之间占到90%以上,竖向主振频率在20~30 Hz之间比例要高于其他两个方向。机械震源主振频率高对建筑物保护总体有利。

3 结论

通过对黄河三角洲凹陷区现场实测的地震勘探振动的衰减规律和频率分布特征进行了分析,获得如下结论:

(1)地震勘探药柱埋深越浅,近区的地表振动越大,而振动速度衰减也更快;药柱埋深越大,中远区的振动速度更大,振动影响范围更广。

(2)勘探爆破竖向质点振动速度峰值最大,一般为径向的2~5倍,为切向的5~10倍;随药量增大和埋深增加,衰减指数 α 和衰减系数 K 均有所减小。

(3)可控震源振动特性受地表硬化程度影响,地表越软则近区引起的振动更大,但衰减速度也更快;一般竖向振动速度最大,但在软土上,径向可产生更大的振动。

(4)震源药柱爆炸的径向主振频率10 Hz以下占比82%,切向主振频率基本分布在50 Hz以上和20 Hz以下,竖向的主振频率在30 Hz以上占比达到68%。机械震源的主振频率分布在三个方向上较为一致,主振频率在10~30 Hz之间占到90%以上。

参考文献 (References)

[1] 卢文波,张乐,周俊汝,等. 爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析[J]. 爆破,2013,30(2):1-6,11.
[1] LU Wen-bo, ZHANG Le, ZHOU Jun-ru, et al. Theoretical

analysis on decay mechanism and law of blasting vibration frequency[J]. Blasting, 2013, 30(2):1-6, 11. (in Chinese)

- [2] 卢文波,周俊汝,陈明,等. 爆破振动主频衰减公式研究[J]. 工程爆破,2015,21(6):1-6,24.
[2] LU Wen-bo, ZHOU Jun-ru, CHEN Ming, et al. Study on attenuation formula of dominant frequency of blasting vibration[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(6):1-6, 24. (in Chinese)
[3] 胡建华,尚俊龙,罗先伟,等. 单孔爆破振动监测与衰减规律多元线性化回归[J]. 振动与冲击,2013,32(16):49-53.
[3] HU Jian-hua, SHANG Jun-long, LUO Xian-wei, et al. Monitoring of single-hole blasting vibration and detection of its attenuation law by using multiple linear regression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16):49-53. (in Chinese)
[4] 严鹏,邹玉君,卢文波,等. 基于爆破振动监测的岩石边坡开挖损伤区预测[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(3):538-548.
[4] YAN Peng, ZOU Yu-jun, LU Wen-bo, et al. Predicting the damage zone of rock slopes under blasting excavation based on vibration monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3):538-548. (in Chinese)
[5] 陶铁军,汪旭光,池恩安,等. 基于能量的爆破地震波衰减公式[J]. 工程爆破,2015,21(6):78-83.
[5] TAO Tie-jun, WANG Xu-guang, CHI En-an, et al. Attenuation formula of blasting seismic wave based on energy theory[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(6):78-83. (in Chinese)
[6] 王玉杰,梁开水,田新邦. 周宁水电站地下厂房开挖爆破地震波衰减规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(22):4111-4114.

- [6] WANG Yu-jie, LIANG Kai-shui, TIAN Xin-bang. Study on redundant regulation of underground digging blasting vibration of zhouning hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(22): 4111-4114. (in Chinese)
- [7] 饶宇, 夏元友, 胡英国, 等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 191-198.
- [7] RAO Yu, XIA Yuan-you, HU Ying-guo, et al. Influence of pre-splitting crack on spectrum distribution characteristics of blasting vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 191-198. (in Chinese)
- [8] 柴修伟. 不同炸药性能对爆破振动效应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 548-552.
- [8] CHAI Xiu-wei. Effects of different explosive properties on blast vibration [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(5): 548-552. (in Chinese)
- [9] 张加海, 王敬绵, 张光德, 等. 炸药震源激发参数与场地质点振动响应关系探讨[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 57-59, 63, 115.
- [9] ZHANG Jia-hai, WANG Jing-jin, ZHANG Guang-de, et al. Relationship between seismic source parameters and particle response [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(2): 57-59, 63, 115. (in Chinese)
- [10] 李云伟. 胶莱地区地震勘探安全距离研究探讨[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(5): 587-594.
- [10] LI Yun-wei. The study of seismic exploration safe distance in Jiaolai area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(5): 587-594. (in Chinese)
- [11] 杨风威, 李海波, 刘亚群, 等. 台阶与预裂爆破岩体振动特征的对比研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1285-1291.
- [11] YANG Feng-wei, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. Comparative study on vibration characteristics of rock mass induced by bench blasting and pre-splitting blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1285-1291. (in Chinese)
- [12] 周俊汝, 卢文波, 钟冬望, 等. 竖向钻孔爆破激发振动波频率的衰减特征[J]. 爆破, 2019, 36(1): 14-20.
- [12] ZHOU Jun-ru, LU Wen-bo, ZHONG Dong-wang, et al. Attenuation characteristics of vibration frequency induced by vertical borehole blasting [J]. Blasting, 2019, 36(1): 14-20. (in Chinese)

英文编辑: 柯波

(上接第25页)

- [6] 金解放, 李夕兵, 邱灿, 等. 岩石循环冲击损伤演化模型及静载荷对损伤累积的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1662-1671.
- [6] JIN Jie-fang, LI Xi-bing, QIU can, et al. Damage evolution model of rock under cyclic impact and influence of static load on damage accumulation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1662-1671. (in Chinese)
- [7] 李裕春. 浅层水中冲击波作用下混凝土墩的动态响应分析[C]//中国力学学会爆炸力学专业委员会、中国土木工程学会防护工程分会. 第七届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 中国力学学会爆炸力学专业委员会、中国土木工程学会防护工程分会: 中国力学学会, 2009: 89-94.
- [7] LI Yu-chun. Dynamic response analysis of concrete pier under shock wave in shallow water [C]//Proceedings of the 7th National Conference on Safety Protection of Engineering Structures. Explosion Mechanics Committee of Chinese Society of Mechanics, Protection Engineering Branch of Chinese Society of Civil Engineering: Chinese Society of Mechanics, 2009: 89-94. (in Chinese)
- [8] 彭亚雄, 吴立, 李春军, 等. 水下钻孔爆破水击波特性及气泡帷幕削压效果研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 38-43.
- [8] PENG Ya-xiong, WU Li, LI Chun-jun, et al. Study on the characteristics of water hammer wave and the effect of air bubble curtain cutting in underwater drilling blasting [J]. Blasting, 2019, 36(1): 38-43. (in Chinese)
- [9] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(9): 1842-1847.
- [9] WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong, et al. Development of new geomechanical model test similar materials [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(9): 1842-1847. (in Chinese)
- [10] 黄彦华, 杨圣奇, 刘相如. 类岩石材料力学特性的试验及数值模拟研究[J]. 实验力学, 2014, 29(02): 239-249.
- [10] HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental and numerical simulation of mechanical properties of rock like materials [J]. Experimental mechanics, 2014, 29(2): 239-249. (in Chinese)
- [11] 高玮, 汪磊, 杨大勇. 基于能量原理的岩石损伤研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S2): 1672-1677.
- [11] GAO Wei, WANG Lei, YANG Da-yong. Study on rock damage based on energy principle [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S2): 1672-1677. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚