

水下抛石体探测中地震采集参数的优选

马国栋^{1,2}, 傅建³

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 合肥 230088;
2. 安徽省建筑工程质量监督检测站, 安徽 合肥 230088; 3. 中水淮河安徽恒信工程咨询有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 为了提高地震反射波法采集的地震数据对抛石体的识别能力, 通过地震正演模拟对采样周期、震源主频和炮检距3个地震采集参数对地震数据质量的影响进行研究。结果表明: 采样周期的选择与震源主频有关, 采样频率应大于或等于原始信号最大频率的2倍; 随着震源主频的增大, 地震数据中所能识别抛石体的最小厚度和信噪比逐渐减小; 炮检距影响着抛石体顶、底界面反射波能否区分开来, 从而决定能否获得抛石体的厚度信息, 最大炮检距随震源主频和水深的增大而增大。结合保定圩水下抛石探测实例, 验证了地震正演模拟结果的可靠性。

关键词: 水下抛石体; 地震反射波法; 探测; 正演模拟; 采集参数; 优选

中图分类号: TV221.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2020)01-0081-07

Optimization of seismic acquisition parameters in underwater riprap detection// MA Guodong^{1,2}, FU Jian³
(1. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei 230088, China; 2. Anhui Province Construction Engineering Quality Supervision and Inspection Station, Hefei 230088, China; 3. China Water Huaihe Anhui Hengxin Engineering Consulting Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: In order to improve the riprap identification ability of seismic data collected by seismic reflection method, the influence of three seismic acquisition parameters, including the sampling period, the peak frequency of source seismic wave and the offset on seismic data quality by seismic forward simulation was analyzed. The results show that selection of the sampling period is related to the peak frequency of the source seismic wave, and the sampling frequency should be greater than or equal to two times of the maximum frequency of the original signal. As the peak frequency of the source seismic wave increases, the minimum thickness of the riprap that can be identified and the signal-to-noise ratio of the seismic data decreases gradually. The offset magnitude influences whether the reflected waves at the top and bottom of the riprap can be distinguished, and it also determines whether the riprap thickness can be obtained. As the increase of the peak frequency of the source seismic wave and the water depth, the maximum offset also increases. In addition, the reliability of the seismic forward simulation results was verified by the example of underwater riprap detection in Baoding polder.

Key words: underwater riprap; seismic reflection method; detection; forward simulation; acquisition parameters; optimization

在河湖治理工程中, 为了减少水流对岸坡的冲刷破坏, 水下抛石是护岸工程中较为常见和成熟的方法之一^[1-2]。由于水下环境较为复杂, 同时抛石体具有厚度薄、离散性较大等特点, 使得抛石体的厚度和位置等赋存状态常常发生变化, 因此, 需不定期地对抛石体进行检测^[3-4]。目前, 抛石体检测方法主要有水上钻探法、光电测距法、高密度电法、探地雷达法、地震反射波法等。其中水上钻探法和光电测距法具有效率低、“一孔之见”等缺点; 高密度电法存在体积效应、数据分辨率低等问题, 难以对抛石体的厚度进行准确的识别; 探地雷达法发射天线频率较高, 能量衰减较快, 难以对水深较大区域的抛石体进

行探测^[5-10]。

地震反射波法是通过人工激发震源向地下传播地震波, 当遇到波阻抗差异界面时将产生反射波, 同时在地面采集反射波数据, 并在室内对数据进行一系列的处理后, 可对地下的地质情况进行判识和解译的一种地球物理学方法。其采集到的地震反射波数据信息量较为丰富, 涵盖了地下介质的埋深、构造和岩性等有用的地质信息。目前, 地震反射波法在资源(煤炭、石油、天然气、页岩气等)勘查和工程(水利、公路、铁路、隧道等)勘察中得到了较为广泛的应用^[11-12]。该方法具有连续观测、数据分辨率高等优点, 是抛石体检测中最为常用的方法之一, 能够

对抛石体的赋存状态进行精确的识别^[13]。但在实际的抛石体地震探测中,由于抛石体呈现不规则状,大小不一,离散型较大,易产生绕射波等干扰,降低地震数据的信噪比,使得部分区域难以获得有效的抛石体反射波;抛石体厚度一般较薄,要求震源具有较高的主频,且当水流较大时,垂直于岸坡方向流速大小不一,地震检波器受其影响难以保持直线,使得探测难度相对较大;地震探测的采集参数较多,诸如采样周期、震源主频、炮检距、道间距、炮间距等,且在不同的采集参数下采集到的地震数据,对抛石体的识别能力往往存在较大的差异^[14]。因此,对地震采集参数等影响因素进行研究显得尤为重要。

为了提高地震反射波法对抛石体的识别能力,使其能够真实、准确地反映抛石体的赋存状况,本文通过地震正演模拟并结合实际地震资料对采样周期、震源主频和炮检距3个采集参数进行分析,以期在实际野外地震数据的采集提供参考。

1 地震正演模拟的基本原理

地震正演是根据地震波在地下介质中的传播原理,通过一定的数学方法对所建立的地质模型进行地震合成记录模拟的过程。在实际工程中,通过建立不同类型的观测系统和地质模型进行地震正演模拟,并对地震合成记录进行分析和研究,可为野外数据的采集和室内资料的处理和解释提供理论基础^[15-18]。

目前,地震正演模拟的方法主要分为两类:射线理论法和波动方程法,本文采用波动方程法进行地震波场的数值模拟研究。波动方程法在地震波正演数值模拟中主要包括有限差分法、连续有限元法和谱方法等,其中,有限差分方法是目前理论较为成熟、使用广泛的波动方程正演模拟方法^[19]。该方法首先对地质模型进行网格剖分,然后利用网格点的值来离散化逼近波动方程中的一阶(或二阶)导数,最终得到有限差分方程,求解方程即可得到网格点上的波场值^[20]。

假设二维波动方程可以表示为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + s(x, z, t) \quad (1)$$

式中: $U=U(x, z, t)$ 为声压,与水平坐标 x 、垂直坐标 z 、时间 t 有关; V 为声波在介质中的传播速度; $s(x, z, t)$ 为震源函数。

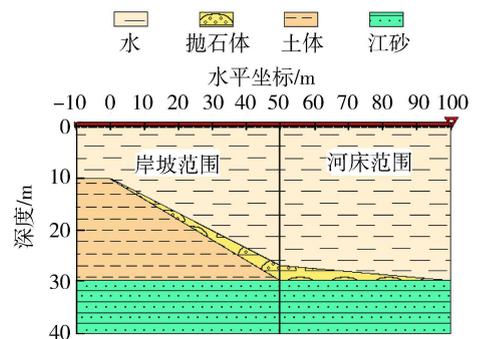
对式(1)进行离散可得二阶波动方程的有限差分形式^[21]:

$$U_{m,n,k+1} = 2U_{m,n,k} - U_{m,n,k-1} + V^2 \frac{\Delta t^2}{a^2} (U_{m+1,n,k} - 2U_{m,n,k} + U_{m-1,n,k} + U_{m,n+1,k} - 2U_{m,n,k} + U_{m,n-1,k}) \quad (2)$$

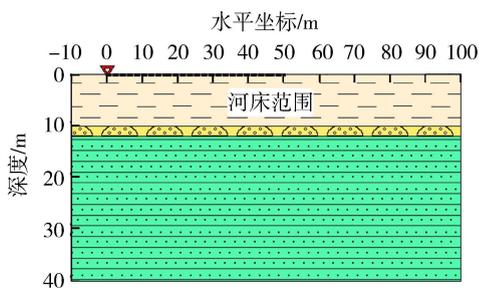
式中: $U_{m,n,k}$ 为在网格点 (m, n, k) 处的声压; a 为网格的大小; Δt 为时间步长。

2 地质模型的建立

参照实际的长江抛石护岸工程,分别以垂直于岸坡和平行于岸坡两个方向建立抛石护岸地质模型1和模型2,如图1(a)(b)所示。地质模型1和模型2在水平方向范围均为 $-10 \sim 100$ m,垂直方向范围均为 $0 \sim 40$ m,由水、抛石体、土体和江砂4种介质组成,同时为了消除绕射波等干扰的影响,将抛石体等效于均质体,具体物性参数见表1。



(a) 地质模型1(垂直于岸坡方向)



(b) 地质模型2(平行于岸坡方向)

图1 抛石护岸地质模型

表1 抛石护岸地质模型物性参数

| 介质 | 纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$) | 横波速度/ ($m \cdot s^{-1}$) | 密度/ ($g \cdot cm^{-3}$) |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 水 | 1500 | 0 | 1.0 |
| 抛石体 | 2000 | 1150 | 1.9 |
| 土体 | 1800 | 800 | 1.7 |
| 江砂 | 2500 | 1350 | 2.2 |

在地质模型1(垂直于岸坡方向)中,在水平坐标 $-10 \sim 50$ m之间,即在岸坡范围内,模型自上而下依次为水、抛石体、土体和江砂,其中土体和抛石体的垂深在 $10 \sim 30$ m之间,抛石体直接分布在回填土之上,抛石体呈楔形状,厚度自上而下由 $0 \sim 3$ m线性变化,江砂的垂深在 $30 \sim 40$ m之间,呈水平层状分布。在水平坐标 $50 \sim 100$ m之间,即在河床范围内,模型自上而下依次为水、抛石体和江砂,抛石体直接分布在江砂之上,抛石体同样呈楔形状,厚度自左向右由 $3 \sim 0$ m线性变化,江砂的垂深在

30 ~ 40 m 之间,呈水平层状分布。

在地质模型 2 (平行于岸坡方向) 中,即在河床范围内,模型自上而下依次为水、抛石体和江砂,3 种介质均呈水平层状分布。

3 地震采集参数影响性分析

通过设置不同的采集参数对图 1 中的抛石护岸地质模型进行地震正演模拟,通过对比分析抛石体顶、底界面的地震反射波来研究采样周期、震源主频和炮检距 3 个地震采集参数对地震数据质量的影响。

3.1 采样周期

为了研究采样周期对地震数据质量的影响,采用自激自收的方式对图 1(a) 中的地质模型 1 进行地震正演模拟,设定震源主频 $f=1000\text{ Hz}$,采样周期 $T_s=0.1\text{ ms}$ 、 0.5 ms 、 0.9 ms ,结果如图 2 所示。

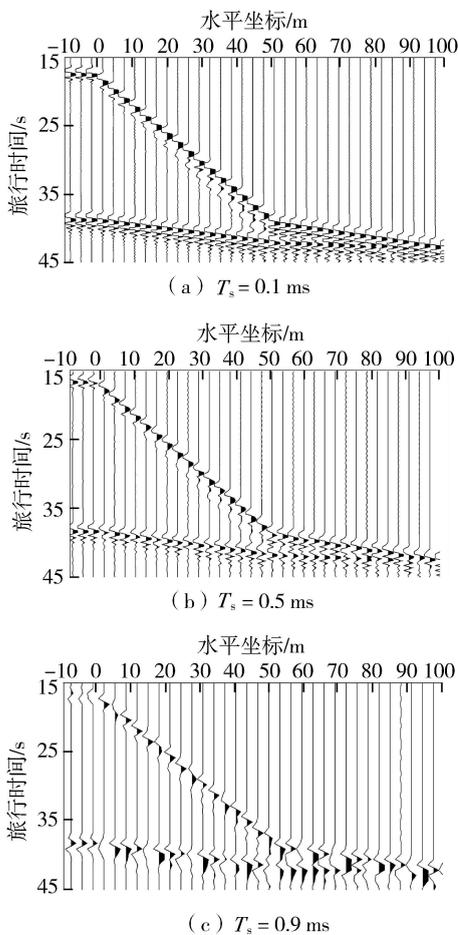


图 2 不同采样周期时地质模型 1 地震响应剖面

图 2 中,通过对比分析发现,各个地震剖面均能反映地质模型 1 的整体形态,但地震数据质量却不尽相同:随着采样周期的增大,地震剖面的分辨率、信噪比和保真度逐渐降低。当采样周期为 0.1 ms 和 0.5 ms 时,地震剖面中同相轴较为连续,能够真实地反映抛石体的整体形态和厚度变化特征;当采样周期为 0.9 ms 时,地震剖面中同相轴较为紊乱,

地震数据已失真,分辨率和信噪比较低,难以从中获取抛石体的形态和厚度变化信息。究其原因,采样周期的选取与震源主频的大小有关,只有在满足式(3)的采样定理时,采样之后的数字信号才能完整地保留原始信号中的地震信息。

$$\begin{cases} T_s = \frac{1}{f_s} \\ f_s \geq 2f_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_s 为采样频率, Hz; f_{\max} 为原始信号的最大频率, Hz。

由式(3)可知,只有当采样频率大于或等于原始信号最大频率的 2 倍时,数字信号才不会失真。当震源主频为 1000 Hz ,采样频率 $f_s \geq 2000\text{ Hz}$, $T_s \leq 1/2000 = 0.5\text{ ms}$ 时,地震数据才不会失真。但采样周期过小会成倍增加地震数据的内存,使工作效率大大降低。因此,在野外地震数据采集时,应依据震源主频的大小合理地选择采样周期。

3.2 震源主频

为了研究震源主频对地震数据质量的影响,同样采用自激自收的方式对图 1(a) 中的地质模型 1 进行地震正演模拟。设定 $f=600\text{ Hz}$ 、 1000 Hz , $T_s=0.1\text{ ms}$,结果如图 3 所示。

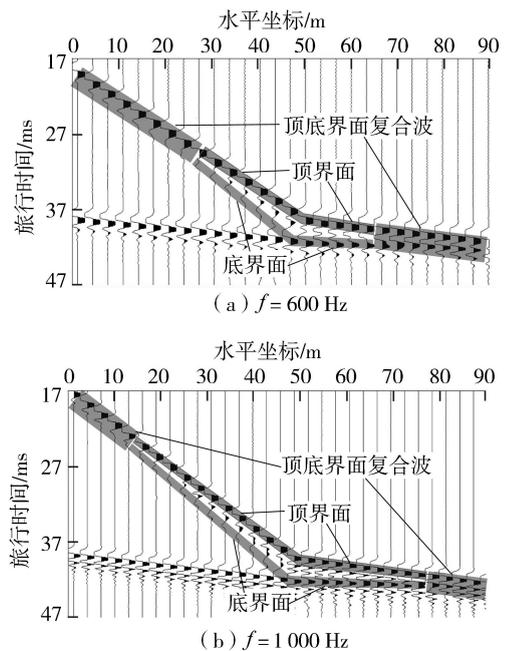


图 3 不同震源主频时地质模型 1 地震响应剖面

图 3 中显示了不同震源主频时,抛石体顶、底界面的地震反射波。反射波相位的正负取决于反射界面反射系数的正负,对于抛石体的顶界面而言,该界面两侧的介质分别为水和抛石体,由于抛石体的波阻抗值大于水,反射系数大于零,故抛石体顶界面反射波为正相位。对于抛石体的底界面而言,在水平坐标 $10 \sim 50\text{ m}$ 范围内,该界面两侧的介质分别为抛石体和

回填土,由于抛石体的波阻抗值大于回填土,反射系数小于零,故抛石体底界面反射波为负相位;在水平坐标 50~90 m 范围内,该界面两侧的介质分别为抛石体和江砂,由于抛石体的波阻抗值小于江砂,反射系数大于零,故抛石体底界面反射波为正相位。

由图 3 可知,在地震剖面的中间范围内,抛石体顶、底界面可清晰的区分开来,据此可根据顶、底界面地震波旅行时差获得抛石体厚度信息。而在地震剖面的两端位置处,顶、底界面反射波难以区分开来,最终形成顶底界面复合波。这是因为该范围内抛石体厚度较薄(图 1(a)),当抛石体厚度小到一定程度时,地震波穿过抛石体的双程旅行时 ΔT 将小于震源子波的延续时间的一半 $\Delta\tau$,即:

$$\Delta T \leq \frac{\Delta\tau}{2} \quad (4)$$

此时,抛石体的顶、底界面反射波形成复合波,难以对其进行识别。

通过对比分析发现:震源主频不同时,地震剖面中所能识别抛石体的最小厚度不同,且随着震源主频的增大而减小。究其原因,由于 $\Delta T = 2h/v$ 、 $\Delta\tau = 1/f$ (其中 h 为抛石体厚度, m ; v 为抛石体纵波速度,一般取 2000 m/s),式(4)可变换成式(5):

$$h \leq \frac{v}{4f} \quad (5)$$

根据式(5)可知,地震数据所能识别抛石体的最小厚度与震源主频 f 的大小存在负相关关系,即震源主频越大,地震垂向分辨率越高。

当震源主频不同时,地震数据的抗干扰能力也不同。因此,为了研究两者之间的关系,对图 3 中的地震响应剖面同时加入 5% 的高斯白噪声,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着震源主频的增大,地震反射波受高斯白噪声的影响逐渐增大,同相轴逐渐变得模糊,地震数据抗干扰能力逐渐变差,信噪比逐渐变小。

通过以上地震正演模拟发现,随着震源主频的增大,地震数据垂向分辨率逐渐增大,但与此同时,其信噪比逐渐变小。因此,在野外地震数据采集时,应依据抛石体整体厚度的大小选择适中的震源主频。

3.3 炮检距

为了研究炮检距对地震数据质量的影响,采用单边放炮、单边接收的方式对图 1(b)中的地质模型 2(设定水深 $H=5 \text{ m}$ 、 10 m 、 15 m 、 20 m)进行地震正演模拟,炮数为 1,炮点位置设在水平坐标 $x=0 \text{ m}$ 处,偏移距为 1 m ,道间距为 1 m ,检波器数为 50, $f=400 \text{ Hz}$ 、 600 Hz 、 800 Hz 、 1000 Hz 、 1200 Hz , $T_s=0.1 \text{ ms}$,部分结果如图 5 和图 6 所示。

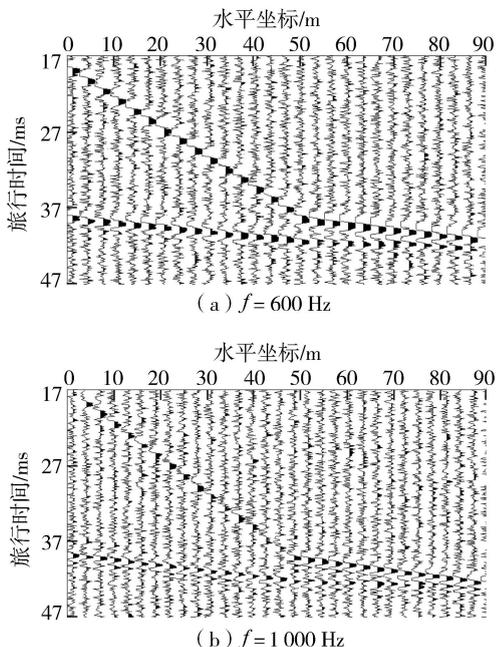


图 4 不同震源主频时加入 5% 高斯白噪声后地震响应剖面

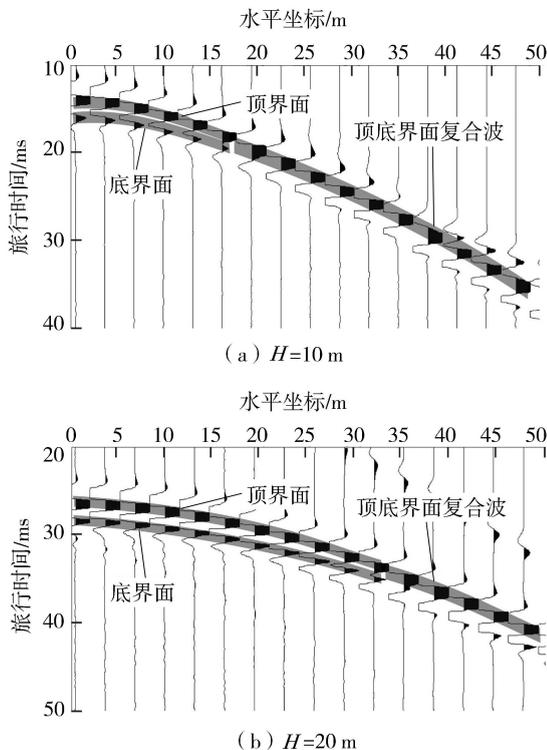


图 5 震源主频为 600 Hz、不同水深时地质模型 2 单炮合成地震记录

图 5 和图 6 显示了不同震源主频和水深时,抛石体顶、底界面的地震反射波。在合成地震记录的左侧范围内,抛石体顶、底界面可清晰的区分开来,可根据顶、底界面地震波旅行时差获得抛石体厚度信息。在合成地震记录的右侧范围内,由于炮检距过大,抛石体顶、底界面反射波旅行时间间隔小于震源子波的延续时间的一半,导致抛石体顶、底界面难

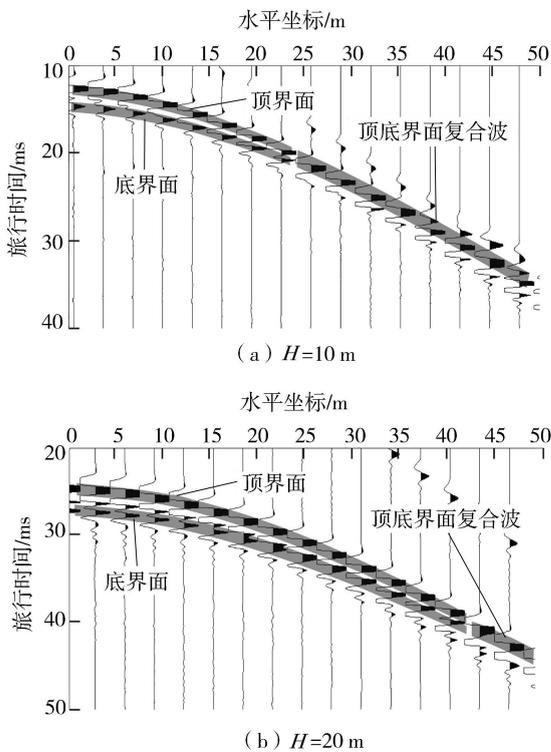


图6 震源主频为1000 Hz、不同水深时地质模型2单炮合成地震记录

以区分,形成顶底界面复合波。

通过对比发现,抛石体顶、底界面在局部小炮检距范围内才能被识别:当震源主频为600 Hz时,10 m和20 m水深对应的界面可被识别的炮检距范围分别为0~18 m和0~34 m;当震源主频为1000 Hz时,10 m和20 m水深对应的界面可被识别的炮检距范围分别为0~24 m和0~44 m。由此可见,抛石体顶、底界面可被识别的炮检距范围与震源主频和水深有关:当震源主频一定时,随着水深的增加,抛石体顶、底界面可被识别的炮检距范围逐渐增大;当水深一定时,随着震源主频的增大,抛石体顶、底界面可被识别的炮检距范围逐渐增大。为了研究最大炮检距与震源主频和水深的关系,对不同震源主频和水深所对应的最大炮检距进行了统计,并对三者进行拟合分析,结果如图7所示。

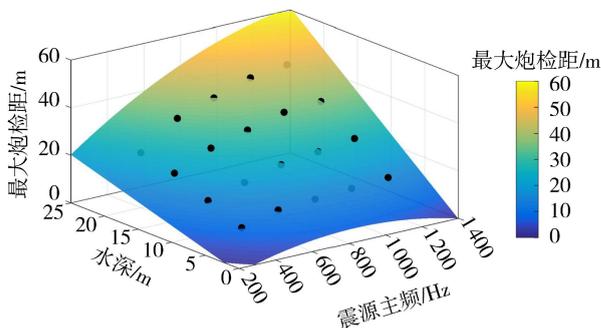


图7 震源主频、水深和最大炮检距拟合分析结果

从图7可以看出,震源主频、水深和最大炮检距

三者具有较好的相关性,相关系数 $R^2 = 0.994$,随着水深和震源主频的增大,最大炮检距逐渐增大,同时得到三者的拟合关系如下:

$$D_{\max} = -7.5 + 0.0315f + 0.628H - 1.875 \times 10^{-5}f^2 + 0.0013fH \quad (6)$$

式中: D_{\max} 为最大炮检距。

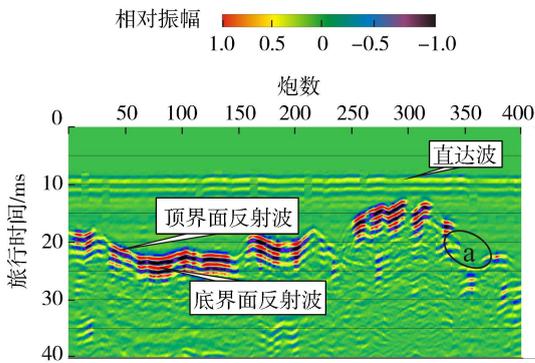
通过以上地震波场数值模拟和拟合分析计算发现,炮检距的大小影响着抛石体顶、底界面反射波能否区分开来,从而影响抛石体厚度信息的获得,而最大炮检距与震源主频和水深直接相关。因此,在野外地震数据采集时,应依据式(6)合理地选择炮检距的范围。

4 保定圩水下抛石体探测

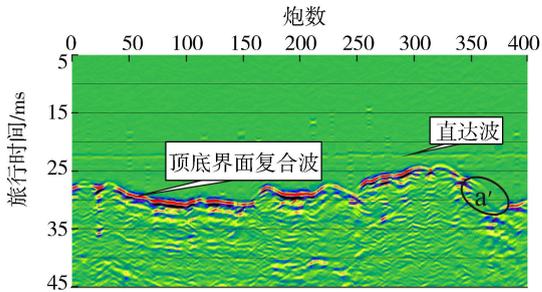
保定圩位于长江干流芜湖市三山区境内,为了查明其水下抛石体的赋存状态,采用地震反射波法进行了相关探测。该区域水深大,抛石体厚度薄,要求震源具有较高的主频,同时水流较大,且垂直于岸坡方向流速大小不一,地震检波器受其影响难以保持直线,探测难度相对较大。因此,在此次探测中,震源采用一种新型的机械式浅水域全自动触发器,该震源具有主频高、频带宽等优点,基本可以满足薄层抛石体的探测;为了减小受水流的影响,将检波器平行于岸坡方向布置(对应于图1(b)中的地质模型2),且用浮球将检波器固定在水下0.5 m的位置处,逆水流探测。检波器数为12,偏移距为10 m,道间距为2 m,采样周期为0.05 ms。

图8(a)和图8(b)分别为炮检距12 m(第2道)和32 m(第12道)的共炮检距道集,图中可清晰地反映出抛石体顶、底界面的反射波、复合波和直达波。通过对共炮检距道集进行频谱分析(图9)发现,其主频 f 为600~1000 Hz,同时结合对采样周期的正演分析结果并根据式(3)可知,0.05 ms采样周期已满足采样定理,使得地震数据具有较高的保真度,抛石体界面同相轴较为连续,地震数据完整地保留了原始信号中的地震信息;结合对震源主频的正演分析结果并根据式(5)可知,地震数据可探测的最小抛石体厚度为0.5 m,具有较高的垂直分辨率。

在图8(a)中,炮检距为12 m,直达波走时为8.7 ms,抛石体顶界面反射波走时为12~22 ms,由此可根据反射定律得到水深 H 在5.3~13.4 m范围内,同时结合主频 f 的大小,根据对炮检距的正演分析结果和式(6)可知,最大炮检距的合理范围在12.7~32.0 m之间。即在共炮检距道集中,当炮检距小于12.7 m时,抛石体顶、底界面反射波可完全区分开;当炮检距在12.7~32.0 m之间时,顶、底界



(a) 炮检距为12 m



(b) 炮检距为32 m

图8 保定圩抛石体检测地震共炮检距道集

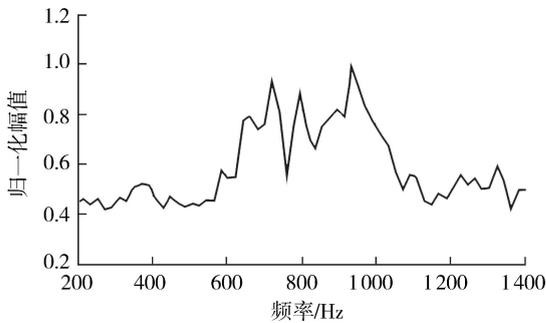


图9 地震数据频谱分析

面反射波可部分区分开;当炮检距大于32.0 m时,顶、底界面反射波完全不可区分开。因此,在图8中,当炮检距为12 m时,抛石体顶、底界面反射波清晰可见,同相轴连续性较好,可根据顶、底界面地震波旅行时差获得抛石体的厚度信息;当炮检距为32 m时,顶、底界面反射波形成复合波,两者无法区分,难以对抛石体的厚度进行识别。据此,通过对以上水下抛石体实际探测结果的分析,验证了地震正演模拟结果的可靠性。

另外,当抛石体离散性较大时,多呈棱角状,在角点位置处易产生绕射波干扰,使得地震数据信噪比较低。例如在图8中的范围a和a'处,由于这两个范围内抛石体离散性较大,产生绕射波干扰,使得抛石体顶、底界面反射波难以识别。

5 结论

a. 采样周期的选择与震源主频有关,为了使地震数据不失真,采样频率应大于或等于原始信号最

大频率的2倍,但采样周期过小会成倍增加地震数据的内存,应依据震源主频的大小合理地选择采样周期。

b. 震源主频影响着地震数据中所能识别抛石体的最小厚度,随着震源主频的增大,所能识别抛石体的最小厚度逐渐减小(垂向分辨率逐渐增大),但与此同时,其信噪比逐渐变小,应依据抛石体整体厚度的大小选择适中的震源主频。

c. 炮检距影响着抛石体顶、底界面反射波能否区分开来,从而决定能否获得抛石体的厚度信息,而最大炮检距随震源主频和水深的增大而增大,应依据震源主频和水深合理地选择炮检距的范围。

参考文献:

- [1] 刘瑛,高甲荣,张金瑞,等. 扦插-抛石联合技术的构建与应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 47-50. (LIU Ying, GAO Jiarong, ZHANG Jinrui, et al. Construction and application of cutting and riprap joint planting technology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(4): 47-50. (in Chinese))
- [2] 李小超,常留红,李凌,等. 水槽混合石料群抛试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 76-80. (LI Xiaochao, CHANG Liuhong, LI Ling, et al. Experimental study on rock group ripraps in a water flume [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 76-80. (in Chinese))
- [3] 余金煌,陶月赞. 小子域滤波在高密度电法图像处理中的应用[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 107-109. (YU Jinhuang, TAO Yuezan. Application of small sub-domain filtering to processing of image made by high-density resistivity method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 107-109. (in Chinese))
- [4] 姚仕明,卢金友. 抛石护岸工程试验研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(1): 16-19. (YAO Shiming, LU Jinyou. Experimental study on riprap protection of slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(1): 16-19. (in Chinese))
- [5] 余金煌,陶月赞. 高密度电法探测水下抛石体正反演模拟研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 333-337. (YU Jinhuang, TAO Yuezan. Research on high density resistivity method's forward and inversion simulation of underwater enrockment [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Sciences), 2014, 37(3): 333-337. (in Chinese))
- [6] 余金煌,陶月赞,王铁强. 应用探地雷达法测量浅水域薄层抛石体厚度[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 214-216. (YU Jinhuang, TAO Yuezan, WANG Tieqiang. Application of ground penetrating radar method in detecting the thickness of rubble enrockment in shallow

- water [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 214-216. (in Chinese))
- [7] 葛双成, 叶可来, 梁国钱, 等. 探地雷达和浅层地震波法在海堤抛石层探测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 71-73. (GE Shuangcheng, YE Kelai, LIANG Guoqian, et al. Application of ground penetrating radar and shallow seismic wave method to detection of riprap layer in a sea dike[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 71-73. (in Chinese))
- [8] 向衍, 盛金保, 刘成栋, 等. 土石坝长效服役与风险管理研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 86-94. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, LIU Chengdong, et al. Research progress in long-term service and risk assessment of earth-rock fill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(5): 86-94. (in Chinese))
- [9] 邓彪, 李红文, 胡雄武. 海堤抛石底界的联合探测方法试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 161-165. (DENG Biao, LI Hongwen, HU Xiongwu. Experimental study on combined detection method for riprap dumping bottom depth limit determination of sea embankment [J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 161-165. (in Chinese))
- [10] 刘红军, 单红仙, 郑建国, 等. 重力式码头水下抛石体加固技术及检测研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 344-348. (LIU Hongjun, SHAN Hongxian, ZHENG Jianguo, et al. Technique for reinforcement of the underwater riprap of gravity-type piers and researches on its effectiveness detection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 344-348. (in Chinese))
- [11] 林孝城. 水域地震反射波法在岩土工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(2): 240-245. (LIN Xiaocheng. The application of marine seismic reflection to the geotechnical engineering investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(2): 240-245. (in Chinese))
- [12] 周竹生, 蒋婵君, 郭有刚. 浅层地震反射波法在隧道工程勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(5): 516-518. (ZHOU Zhusheng, JIANG Chanjun, GUO Yougang. Application of seismic reflected wave method in tunnel engineering investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(5): 516-518. (in Chinese))
- [13] 余金煌, 付强, 谢磊磊, 等. 基于地震映像的河湖水下抛石精准识别方法[J]. 水利水电技术, 2016, 47(5): 124-127. (YU Jinhuan, FU Qiang, XIE Leilei, et al. Method of seismic imaging-based accurate recognition of underwater riprap of rivers and lakes [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(5): 124-127. (in Chinese))
- [14] 王锡文, 秦广胜, 赵卫锋, 等. 正演模拟技术在地震采集设计中的应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 642-652. (WANG Xiwen, QIN Guangsheng, ZHAO Weifeng, et al. The application of forward modeling technique in seismic acquisition design [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 642-652. (in Chinese))
- [15] 黄诚, 桂红兵, 杨飞, 等. 基于模型正演的深层砂泥岩薄互层地震分辨率研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(5): 594-596. (HUANG Cheng, GUI Hongbing, YANG Fei, et al. Study on seismic resolution of deep thin sand and shale interbedded based on seismic forward modeling [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(5): 594-596. (in Chinese))
- [16] 曹卿荣, 李佩, 全敏波, 等. 基于地震正演和属性分析技术预测河道砂体[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 69-74. (CAO Qingrong, LI Pei, TONG Minbo, et al. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(4): 69-74. (in Chinese))
- [17] 徐运筹. 煤矿采空区地震波场的数值模拟研究[J]. 能源与环保, 2018, 40(10): 77-81. (XU Yunchou. Numerical simulation of seismic wave field in goaf of coal mine [J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(10): 77-81. (in Chinese))
- [18] 孙萌思, 刘池洋, 杨阳, 等. 塔里木盆地塔中地区鹰山组碳酸盐岩缝洞型储层地震正演模拟研究[J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 339-349. (SUN Mengsi, LIU Chiyang, YANG Yang, et al. The forward modeling of fracture and cave carbonate reservoirs of the Yingshan formation in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(5): 339-349. (in Chinese))
- [19] 廉西猛, 单联瑜, 隋志强. 地震正演数值模拟完全匹配层吸收边界条件研究综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1725-1733. (LIAN Ximeng, SHAN Lianyu, SUI Zhiqiang. An overview of research on perfectly matched layers absorbing boundary condition of seismic forward numerical simulation [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1725-1733. (in Chinese))
- [20] 张睿璇, 廉西猛. 波动方程法地震波正演数值模拟研究综述[J]. 油气地球物理, 2015, 13(2): 55-58. (ZHANG Ruixuan, LIAN Ximeng. Research on the wave equation methods of the seismic wave forward numerical simulation [J]. Petroleum Geophysics, 2015, 13(2): 55-58. (in Chinese))
- [21] 谢磊磊, 蒋甫玉, 常文凯. 基于 Tesseral2D 的水下砂体地震正演计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 351-355. (XIE Leilei, JIANG Puyu, CHANG Wenkai. Tesseral2D-based earthquake forward simulation of underwater sand strata [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 351-355. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-25 编辑:雷燕)