

基于不同声波频率的底泥探测技术研究

张 杰^{1,2}, 张坤军^{1,2}, 陈佳兵^{1,2}, 李京兵^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘 要: 声学技术是水下勘探的主要技术手段, 研究典型工况下主要声学设备声波频率与其底泥穿透能力的关系, 将为改进底泥分层探测方案和声学设备的选取提供技术依据。本文在典型水域(滨海、河道、水库)应用不同声波频率进行定点底泥穿透深度试验, 并在同一点利用定深采样钻采集底泥柱状样, 以 5~10 cm 间隔分层并检测每层含水率, 以含水率为指标对底泥进行分类, 最后, 对底泥柱状样本和声波底泥穿透深度结果进行对比分析。结果表明, 12~33 kHz 频段声波可穿透河床到达浮泥、流泥层。在滨海水域中, 低频声波可穿透部分淤泥层, 且频率越低, 穿透深度越大。12 kHz 频率的双频换能器相比 24 kHz 和 33 kHz 具有更强的穿透能力, 可满足对浮泥、流泥及部分淤泥层的探测。

关键词: 底泥探测; 声波频率; 穿透深度

中图分类号: P715.5

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2020)02-0053-05

底泥是河湖库塘等水域底部淤积土的总称, 主要为淤泥土。淤泥土类是指在静水或缓慢的流水环境中沉积, 或伴有生物化学作用形成的粘性土, 其天然含水量大于液限, 天然孔隙比大于或等于 1.0^[1]。通常, 当河湖库塘淤积存量较大时, 它将直接影响水环境质量、行洪能力和通航安全, 因此对底泥进行探测调查, 对于海岸工程、水利工程等基础设施建设具有重要意义。目前, 底泥探测方法主要有静力触探法、钻孔取样法、声学探测法和放射线测量法^[2]。静力触探法、钻孔取样法受限于单点测定, 无法进行连续测量, 在效率和作业成本上具有很大劣势。声学探测法具有低成本、高效率、高精度的优点, 是目前水下勘探和调查中应用最为广泛的探测方法^[3]。声波相较于电磁波在水中的衰减程度最小^[4], 将其应用于近海、江河、湖泊的底泥探测有助于提高作业效率与精度, 为海洋工程建设、港口航道清淤、水利工程建设等提供基础技术支撑^[5]。

底泥探测一直是水下底质探测领域的一个难

题, 国外相关文献研究资料较少, 国内研究人员主要利用声学设备进行淤泥厚度的探测。谢津平^[2]利用 Silas 系统实现对太湖湖底淤泥密度的划分, 进而测量了太湖湖底淤泥量; 张惟河等^[6]将侧扫声呐和浅地层剖面仪相结合, 探索在淤泥厚度和密度较大的科伦坡进行淤泥测量的方法, 结果表明, 该方法对于表层厚度较小的淤泥分辨能力较弱; 张俊等^[7]利用双频测深仪与泥沙溶重测试仪配合使用, 对长江口深水航道地区的底部淤泥质土分布情况进行了实验室测试和实地验证测试研究, 结果表明低频(33 kHz)声波相较高频(210 kHz)声波具有更强的穿透力, 但在遇到 14 kN/m³ 的重土时也无法穿透; 郭发滨等^[8]通过对双频测深仪的声波透射信号的分析 and 地质取样资料的对比, 验证了利用双频测深仪进行海底浅层物质类型判别的可行性; 王宝成等^[9], 柯颢等^[10]在水库利用双频测深仪实现了水底淤泥厚度的测量, 并验证了测量结果的准确性; 杨姗^[11]采用 SES-96 参量阵测深-浅地层剖面仪实现了港池的

收稿日期: 2019-10-30

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2016IM020100-4)

作者简介: 张杰(1985-), 男, 工程师, 主要从事海洋物理探测应用研究工作。E-mail: zhangjie@zjwater.gov.cn

浮泥清淤测量。目前,国内研究人员对声学设备的不同声波频率与其底泥穿透能力间的关系研究较少,本文将通过实例数据进行对比分析,研究两者间的相互关系,为典型水域(滨海、河道、水库)的底泥探测提供技术参考。

1 数据与方法

1.1 技术原理

声波由发射换能器发射穿过水体触及河床时,因为声阻率在水体中和水底界面的不同,造成了声波的反射,由接收换能器接受反射波,通过测定声波在水中的传播时间^[12],按式(1)计算反射界面相对于换能器的距离(H):

$$H_{1,2,\dots,n} = \frac{1}{2} \nu t_{1,2,\dots,n} \quad (1)$$

式中: $t_{1,2,\dots,n}$ 表示各反射界面对应的声波传播时间; ν 表示声波传播速度。

高频声波受散射衰减影响大,穿透力弱,遇到河床容易产生反射,低频声波在软质水底中传递则相对复杂,其受散射衰减影响较小,且其能量远大于高频声波,因而具有更强的穿透性,能穿透松软底泥并产生反射,所以低频声波在垂直水底方向可出现多个反射波。测定不同反射波在地层内的传播时间,可确定每一层的厚度^[13],如图1所示。到达分界面的声波能量与到达该分界面之前的声波的衰减有关,反射能量大小由反射系数决定,反射系数 R 为:

$$R = \frac{\rho_2 \nu_2 - \rho_1 \nu_1}{\rho_2 \nu_2 + \rho_1 \nu_1} \quad (2)$$

式(2)中: $\rho_1 \nu_1$ 、 $\rho_2 \nu_2$ 分别表示上、下两层介质密度和声速的乘积(即声阻率),当相邻两层介质存在一定声阻率量差,就容易形成反射界面^[13]。在一定范

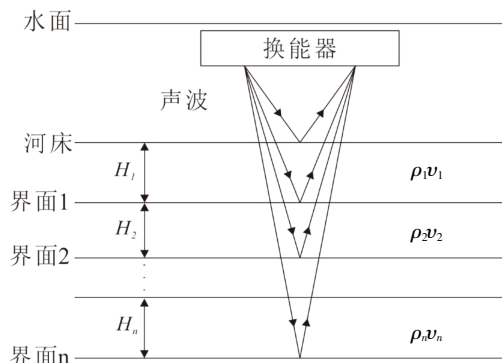


图1 声学探测设备工作原理示意图

围内,底泥的天然含水率 ω 与密度 ρ 和声速 ν 存在关联性,通常当含水率越大时,密度和声速越小,当含水率越小时,密度和声速越大^[14]。本文采用含水率作为综合反映各底泥分层密度和声速变化的指标。

1.2 试验数据采集

本文分别在滨海(浙江省舟山市金塘岛灰鳖洋附近)、河道(浙江省杭州市区中河附近)、水库(浙江省新昌县长诏水库),利用不同频率声学设备进行定点底泥穿透试验数据的采集。

底泥主要由淤泥土类组成,淤泥土类根据孔隙比或含水量分为淤泥质土、淤泥、流泥、浮泥。淤泥土类的分类见表1^[1]。本文选择12 kHz,24 kHz,33 kHz和200 kHz共4组声波频率进行底泥穿透试验,各声波频率对应的声学设备见表2。以200 kHz频率作为测深参考基准,计算各频率测深数据与200 kHz频率测深数据的差值,即为各频率声波穿透深度,并采用测深杆校核仪器200 kHz测深数据,校核结果显示,测深杆读数与仪器200 kHz高频测深读数误差误差不超过3 cm。每次试验均选择河床平坦、底泥状态稳定的水域,根据测点水深情况统一确定测深仪换能器安装方式,将双频测深仪(频率12/200 kHz,24/200 kHz,33/200 kHz)换能器垂直安装,对同一点进行深度数据采集,之后对同一地点利用定深采样钻采集底泥柱状样,并在实验室按5~10 cm间隔分层对采集的底泥柱状样进行含水率检测。

表1 淤泥土类的分类

指标	天然含水率	孔隙比 e	密度范围
分类	$\omega/\%$		$/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
浮泥	$\omega > 150$	/	1.0~1.2
流泥	$85 < \omega \leq 150$	/	1.2~1.5
淤泥	$55 < \omega \leq 85$	$1.5 < e \leq 2.4$	1.5~1.8
淤泥质土	$36 < \omega \leq 55$	$1.0 < e \leq 1.5$	> 1.8

表2 试验参数及设备

声波频率/kHz	设备型号
200	Odom Echotrac MK III 双频测深仪
33	Odom Echotrac MK III 双频测深仪
24	Odom Echotrac MK III 双频测深仪
12	Odom Echotrac MK III 双频测深仪

2 试验结果

2.1 底泥柱状采样检测结果

表3为舟山市金塘岛灰鳖洋附近底泥柱状样

室内试验结果。根据所取的底泥样品目力鉴别,底泥整体呈灰黄色,表部 10 cm 左右含水率极高,明显沁水呈油脂光泽,12 cm 以下局部含条带状黑色有机物,厚度 0.2~0.5 cm 左右,其中 50~55 cm 处有机质含量高,底泥颗粒细腻、手感粘糊,随着深度增加,硬度明显有所增加。根据室内试验结果,0.5 m 以上主要以流泥为主,0.5 m 以下主要以淤泥为主,且均为超软土($\omega>70\%$ 以上)。

表 3 滨海淤泥室内试验结果

序 号	土样 编号	顶部标高 H/m	底部标高 H/m	含水率 $\omega/\%$	土的分类 (JTJ/T 320-96)
1	JC1-1	0.00	0.10	113.9	流泥
2	JC1-2	0.10	0.14	79.6	淤泥
3	JC1-3	0.12	0.18	95.2	流泥
4	JC1-4	0.20	0.24	93.8	流泥
5	JC1-5	0.24	0.30	94.4	流泥
6	JC1-6	0.30	0.40	82.0	含腐质淤泥
7	JC1-7	0.40	0.50	85.3	流泥
8	JC1-8	0.50	0.58	76.2	淤泥
9	JC1-9	0.58	0.64	68.9	淤泥
10	JC1-10	0.60	0.70	74.9	淤泥
11	JC1-11	0.70	0.75	77.8	淤泥

表 4 为杭州市区中河附近底泥柱状样室内试验结果。根据目力鉴别,底泥整体为灰色夹黑色有机物,沉积粒径较细,有气孔,比较松软。土层 0~0.25 m 为污染底泥层,以灰黑色为主,土质非常松软,土性以浮泥为主,含较多腐殖质,有腐臭味;0.25~0.60 m 为污染过渡层,灰色夹条带状黑色有机物,具明显层理,有气孔,比较松软,土性以流泥为主;0.60~0.95 m 为无污染层,主要以灰黄色为主,具层理,局部有孔洞,土性以流淤泥为主。总体上土层为超软土。

表 4 河道泥室内试验结果

序 号	土样 编号	顶部标高 H/m	底部标高 H/m	含水率 $\omega/\%$	土的分类 (JTJ/T 320-96)
1	1-1	0.00	0.08	267.9	浮泥
2	1-2	0.08	0.18	203.1	浮泥
3	1-3	0.18	0.28	198.0	浮泥
4	1-4	0.28	0.38	130.0	流泥
5	1-5	0.38	0.43	127.7	流泥
6	1-6	0.43	0.50	100.8	流泥
7	1-7	0.50	0.60	120.7	流泥
8	1-8	0.60	0.70	95.7	流泥
9	1-9	0.70	0.80	79.9	淤泥
10	1-10	0.80	0.90	78.1	淤泥

表 5 为新昌县长诏水库底泥柱状样室内试验结果。根据目力鉴别,底泥整体为灰色夹黑色有机物,沉积粒径较细,有气孔,比较松软。土层 0~0.30 m 为污染底泥层,以灰黑色为主,土质非常松软,土性以浮泥为主,含较多腐殖质,有腐臭味,表层含絮状悬浮物质;0.30~1.00 m 为污染过渡层,灰色夹条带状黑色有机物,具明显层理,有气孔,比较松软,土性以流泥为主。

表 5 水库底泥室内试验结果

序 号	土样 编号	顶部标高 H/m	底部标高 H/m	含水率 $\omega/\%$	土的分类 (JTJ/T 320-96)
1	1-1	0.00	0.10	355.22	浮泥
2	1-2	0.10	0.20	215.53	浮泥
3	1-3	0.20	0.30	163.43	浮泥
4	1-4	0.30	0.40	139.01	流泥
5	1-5	0.40	0.50	112.10	流泥
6	1-6	0.50	0.60	101.42	流泥
7	1-7	0.60	0.70	100.84	流泥
8	1-8	0.70	0.80	99.94	流泥
9	1-9	0.80	0.90	98.74	流泥
10	1-10	0.90	1.00	90.01	流泥

2.2 测深数据结果

选取 12 kHz,24 kHz,33 kHz 3 组频率声波的部分测深数据样本,以 200 kHz 测深数据为基准,分别计算各低频测深数据与它的差值,进行样本统计,即得到 12 kHz,24 kHz,33 kHz 声波相对于 200 kHz 声波的穿透深度(见表 6)。

表 6 各试验区底泥穿透深度

试验区域	深度/m	频率/kHz		
		33	24	12
滨海	穿透深度	0.09~0.17	0.14~0.29	0.59~0.69
	平均穿透深度	0.14	0.21	0.64
河道	穿透深度	0.04~0.06	0.11~0.17	0.56~0.57
	平均穿透深度	0.05	0.14	0.57
水库	穿透深度	0.13~0.24	0.32~0.48	0.55~0.96
	平均穿透深度	0.18	0.42	0.70

在滨海水域,33 kHz 声波穿透底泥深度约 0.09~0.17 m,平均值为 0.14 m;24 kHz 声波穿透底泥深度约 0.14~0.29 m,平均值为 0.21 m;12 kHz 声波穿透底泥深度约 0.59~0.69 m,平均值为 0.64 m。

在河道区域,33 kHz 声波穿透底泥深度约 0.04~0.06 m,平均值为 0.05 m;24 kHz 声波穿透底泥深度约 0.11~0.17 m,平均值为 0.14 m;12 kHz 声波穿透底泥深度约 0.56~0.57 m,平均值为 0.57 m。

在水库区域,33 kHz 声波穿透底泥深度约 0.13~0.24 m,平均值为 0.18 m;24 kHz 声波穿透底泥深度约 0.32~0.48 m,平均值为 0.42 m;12 kHz 声波穿透底泥深度约 0.55~0.96 m,平均值为 0.70 m。

各试验区底泥穿透深度与柱状样检测结果对比见图 2~图 4。图中 3 处垂向黑色虚线分别对应含水率数值 55、85 和 150,分别为文献[1]中淤泥质土、淤泥、流泥、浮泥之间的分类界限,红色曲线为底泥柱状样分层检测得出的底泥含水率与底泥穿透深度关系曲线。

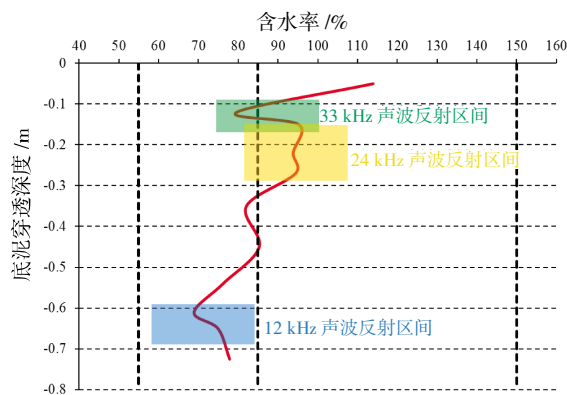


图2 滨海底泥穿透深度与柱状样检测结果对比

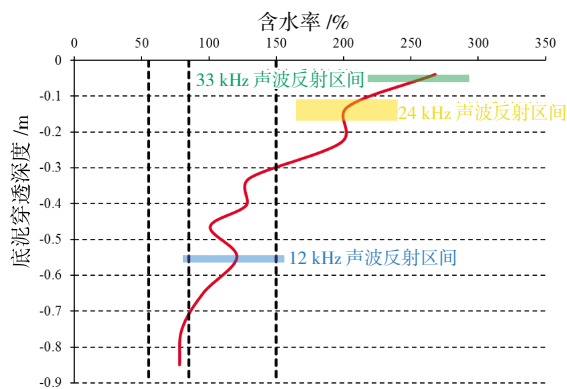


图3 河道底泥穿透深度与柱状样检测结果对比

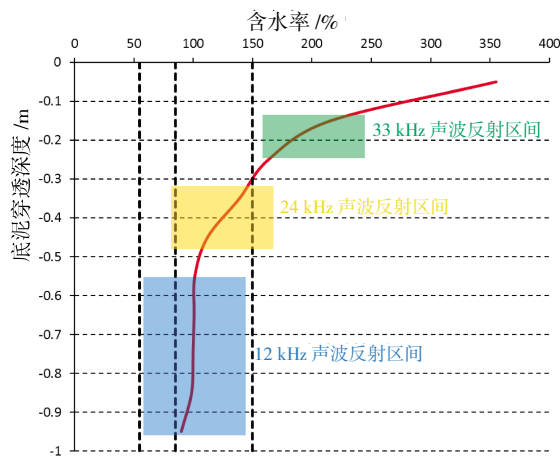


图4 水库底泥穿透深度与柱状样检测结果对比

3 分析与讨论

分析图 2~图 4 可知,滨海区域底泥含水率位于 70%~120%之间,总体变化幅度较小,但分层之间含水率波动较大。河道区域底泥含水率位于 70%~270%之间,总体变化幅度较大,但分层之间含水率波动相对较小。水库区域底泥含水率位于 90%~360%之间,总体变化幅度较大,但曲线较平滑,表明分层之间含水率几乎无波动。而含水率又与界面声阻率相关,进而直接影响不同分层间的反射系数,对声学设备在不同水域底泥探测的结果产生影响。

通过实验数据可以发现,在不同区域,同一频率声波的反射区间所对应的底泥含水率差异较大,在滨海区域对应的底泥含水率最低,水库区域次之,河道区域最高。在同一区域,随着声波频率的降低,声波反射区间对应的底泥含水率也相应减小,说明声波频率越低,其穿透能力越强。

4 总结

本文利用不同频率的声波在 3 种典型水域进行底泥穿透试验,以实例数据对比分析了在不同区域不同频率声波的穿透能力,可以看到,随着声波频率的降低,其底泥穿透能力随之增强,符合声波物理原理。12~33 kHz 频段声波可穿透河床到达浮泥、流泥层,在滨海水域中可穿透部分淤泥层。

滨海水域垂直方向上底泥含水率在分层之间波动最大,水库中底泥含水率在分层之间波动最小,因此声学设备更容易在滨海水域中获得清晰的反射层理,河道次之,在水库中则不明显。对于水底下底泥探测作业,12 kHz 频率的双频换能器相比 24 kHz 和 33 kHz 具有更强的穿透能力,可满足浮泥、流泥及部分淤泥层的探测。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. JTJ/T 320-96. 疏浚岩土分类标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] 谢津平. 应用 Silas 技术测量太湖湖底淤泥[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [3] 王景强. 海底底质声学原位测量技术和声学特性研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2015.
- [4] 吴自银, 阳凡林, 罗孝文. 高分辨率海底地形地貌——探测处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [5] 潘国富. 声学方法进行海底沉积物遥测分类: 综述[J]. 海洋技术, 1997, 16(1): 16-21.
- [6] 张惟河, 梁思明, 杨仁辉. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在表层淤泥探测中的应用[J]. 港工技术, 2014, 51(5): 86-91.
- [7] 张俊, 顾亚平, 查雨, 等. 双频测深仪对淤泥层测定的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002(S2): 492-493.
- [8] 郭发滨, 刘忠臣. 双频测深仪在海底浅层物质分类中的应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 46-48.
- [9] 王宝成, 左训青, 车兵. 不同频率回声测深仪测量水库淤泥的初步研究[J]. 人民长江, 2006(12): 84-88.
- [10] 柯颢, 杜鹏飞, 罗旭. 双频测深技术在水库淤积测量中的应用[J]. 浙江水利科技, 2018, 46(3): 74-76.
- [11] 杨姗. 影响疏浚过程中水深测量的水下浮泥探测方法研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(3): 124-125.
- [12] 王志红, 刘吉波, 张伟虎, 等. 水深测量技术在航道工程中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(2): 66-68.
- [13] 陈钧, 万军, 施卫星. 双频测深仪测深研究[J]. 海洋测绘, 2008, 28(6): 70-73.
- [14] 江晓益, 陈式华, 陈星, 等. 浙江滨海流泥的探测及其沉积特性分析[J]. 浙江水利科技, 2012(6): 8-10.

Study on the Sediment Detection Technology Based on Different Acoustic Frequencies

ZHANG Jie^{1,2}, ZHANG Kun-jun^{1,2}, CHEN Jia-bing^{1,2}, LI Jing-bing^{1,2}

1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, Zhejiang Province, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Hydraulics Disaster Prevention and Mitigation, Hangzhou 310020, Zhejiang Province, China

Abstract: Acoustic technology is the main technical means for underwater detection. The relationship between the acoustic frequency of the main acoustic equipment and its penetration capacity of bottom sediment under typical working conditions is studied in this paper, in order to improve the scheme of bottom sediment stratification detection and to provide a technical basis for the selection of acoustic equipment. In this paper, the penetration depth test of fixed-point bottom sediment is conducted in typical waters (coastal, river and reservoir) with different acoustic frequencies, and the sediment samples are collected at the same point by using a depth-keeping sampling drill. The stratification is carried out at intervals of 5-10 cm and the moisture content of each layer is measured, then the bottom sediment is classified according to the moisture content. Finally, the results of columnar samples and those of acoustic sediment penetration depth are compared and analyzed. The results show that the sound waves in the frequency range of 12-33 kHz can penetrate the river bed to reach the fluid mud and flowing mud layer. In the coastal waters, low frequency acoustic wave can penetrate part of the silt layer, and the lower the frequency, the greater the penetration depth. The dual-frequency transducer with 12 kHz frequency has stronger penetrating power than the dual-frequency transducer with 24 kHz and 33 kHz frequency, and can be used to detect fluid mud, flowing mud and some silt layers.

Key words: bottom detection; acoustic frequencies; penetration depth