

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.013

基于 Tesseral2D 的水下砂体地震正演计算

谢磊磊,蒋甫玉,常文凯

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 基于水下砂层与围岩的波阻抗差异,应用地震波数值模拟软件 Tesseral2D 建立含有水、粉细砂、砾砂和砾岩的起伏地层模型,在不同的道间距、最小偏移距、子波频率以及不同岩体波速条件下分别对该模型进行正演计算。一般情况下,在震源频率为 400 Hz、最小偏移距为 5 m、道间距为 1 m 或 2 m 时,地震波响应明显、同相轴清晰、干扰波较少,水下地层界面反映良好。进一步结合南京长江第二大桥桥址区的地质资料,建立含有水、淤泥质粉质黏土、粉细砂、砾砂、砂砾卵石和砾岩的水下砂层模型,应用 Tesseral2D 软件对该模型进行正演研究。结果表明,在震源频率为 400 Hz、道间距为 2 m 以及最小偏移距为 5 m 时,地震响应能很好地反映水下各岩层界面,特别是能较明显地圈定水下砂层的厚度和分布范围,为实际水下砂体的地震勘探提供理论依据。

关键词: 水下砂层; Tesseral2D 软件; 地震正演模型; 正演计算; 弹性波方程; 南京长江第二大桥水下地层

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2015)04-0351-05

Tesseral2D-based earthquake forward simulation of underwater sand strata

XIE Leilei, JIANG Fuyu, CHANG Wenkai

(College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the difference of wave impedance between underwater sand strata and rock media, a stratigraphic model of fluctuant strata containing water, fine sand, gravel sand, and conglomerate was established using Tesseral2D software for seismic numerical simulation. Then, the forward calculation with the model was conducted under different channel spacings, least offsets, wavelet frequencies, and wave velocities in rocks. Under normal circumstances with a source frequency of 400 Hz, a least offset of 5 m, and a channel spacing of 1 m or 2 m, the seismic response is significant, with constant phases and less interference waves, which also well reflects the underwater stratum interface. In combination with the geological data from the bridge site area of the Second Nanjing Yangtze River Bridge, a stratigraphic model for underwater sand strata was established, containing water, silty clay, silty sand, gravel pebble, and conglomerate. Forward simulation using Tesseral2D software shows that, with a source frequency of 400 Hz, a channel spacing of 2 m, and a least offset of 5 m, the seismic response can well reflect the underwater interfaces between different rock strata, and determine the thickness and distribution range of underwater sand strata, providing an important theoretical basis for the exploration of underwater sand strata.

Key words: underwater sand stratum; Tesseral2D software; earthquake forward calculation model; forward calculation; elastic wave equation; underwater stratum of Second Nanjing Yangtze River Bridge

砂是一种再生速度缓慢的资源,随着城镇化建设的快速发展,各类基础设施和重大工程建设方兴未艾,作为混凝土细骨料的砂,其需求量与日俱增^[1-2]。因为砂矿资源主要赋藏于水下,所以对水下砂体进行有效

收稿日期: 2014-10-21

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20140844);江苏省地质矿产勘查局科技技改项目(2014-KY-15)

作者简介: 谢磊磊(1989—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事固体地球物理学研究。E-mail: 15240240707@163.com

通信作者: 蒋甫玉,讲师。E-mail: jiangfy@hhu.edu.cn

勘探,探明砂层的储量和分布范围显得尤为重要^[3-4]。目前,对水下砂体的勘察常采用水上钻探和静力触探相结合的方法,但是在水上搭建操作平台时具有危险性,且由于测点布置少、不连续,使其难以确定水下砂体的准确厚度和连续分布范围^[5]。因此,开展快速有效地探测水下砂层的研究是促进我国城镇化建设的一个重要环节。

地震勘探是利用各岩层的波阻抗差异进行勘探的地球物理方法^[6],是地球物理勘探中最重要、最有效的一种方法^[7]。浅层地震勘探具有勘探精度高、分层能力强、所需震源能量和勘测场地要求较小等优点^[8]。目前,浅层地震勘探在城市隐伏断层的勘察^[9]、资源勘查^[10]、岩土工程勘察^[11]、水利工程检测^[12]等领域得到广泛应用。遗憾的是,应用浅层地震对水下砂层厚度和分布范围的勘探,目前国内外还未见相关文献报道。众所周知,地震响应的机理是各岩石的弹性参数存在差异,在分辨率允许的范围内,具有不同波阻抗的岩层之间的界面都将呈现不同的地震波响应^[13]。地震波几乎囊括了地下所有地质体结构特征的信息,但是如何“读懂”这些地震波场信息却是一个长期困扰地震学家的难题^[14]。为了提高野外地震勘探的工作效率,进行室内正演模拟计算以确定观测系统参数显得尤为重要。

本文运用 Tesseral2D 软件建立含有水、粉细砂、砾砂、砾岩的起伏地层模型,通过设置不同的道间距、最小偏移距、子波频率以及岩石弹性参数并进行正演计算,比较不同参数的设置对地震响应的影响。然后结合南京长江二桥桥址区的水下砂体分布情况,建立水下砂层模型并进行正演计算,探讨该模型的波场分布特征。

1 地震正演模拟的基本原理

常规的地震波场正演方法主要有几何射线法和波动方程法,前者可以精确计算地震波的射线路径和旅行时间等运动学特征,但对于一些复杂的地质构造和岩性信息容易产生盲区;波动方程模拟法着重考虑地震波动力学性质,能够更逼真地模拟得到复杂地层的地震波场特征^[15]。考虑水下岩层复杂的赋存状态,本次研究采用基于有限差分法的二维全波场数值模拟软件 Tesseral2D,其基本计算公式如下^[5]:

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

$$U_{m,n}^k = U(m\Delta x, n\Delta z, k\Delta t) \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_{m,n}^k + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m+1,n}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m-1,n}^k + U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{h^2} = \frac{1}{V^2} \frac{U_{m,n}^{k+1} - 2U_{m,n}^k + U_{m,n}^{k-1}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

式中各项符号的意义见文献[5]。

2 水下起伏地层的地震波响应

在野外地震勘探过程中,地震资料采集的效果受到震源频率、道间距、最小偏移距、震源子波频率、岩体弹性参数等因素的影响,这些参数设置合理与否直接决定了地震勘探的成败。为了提高野外勘探的工作效率,有必要进行模拟计算以确定合理的观测系统参数。因此,在模拟计算水下砂层模型之前,应用 Tesseral2D 软件建立水下起伏地层的地质模型(图1)以及各岩土体的弹性力学参数(表1)。

首先探讨道间距分别为 1 m、2 m、3 m 时的地震响应(这里地震记录是指反射面震源生成的相当于零偏移距的地震记录)。由正演计算结果(图2)可知,各地震响应图基本都能反映出各岩层界面,随着道间距逐渐增大,下伏地层的地震响应效果逐渐变差,同相轴变模糊。同时,从观测目标的横向变化来看,当道间距

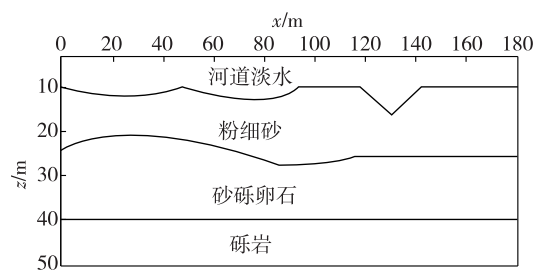


图1 起伏地层模型

Fig. 1 Stratigraphic model of fluctuant strata

为 1 m、2 m 时,岩层起伏形态明显,特别是楔形体反映得很清楚;当道间距为 3 m 时,干扰波增多,下层砾砂的顶界面逐渐变模糊以致无法分辨。

接下来探讨最小偏移距分别取 5 m、10 m、15 m 时的地震响应,正演计算结果见图 3。从图 3 可看出,地震响应基本能反映各岩层界面,但随着偏移距的逐渐增大,下伏地层界面同相轴不明显,难以划分地层。同时,从观测目标的横向变化来看,当最小偏移距为 5 m 时地震响应同相轴清晰、连续,各岩土体层的起伏形态明显;随着偏移距的增大,干扰波增加,地震响应的同相轴逐渐变模糊、不连续,增加了划分地层的难度。

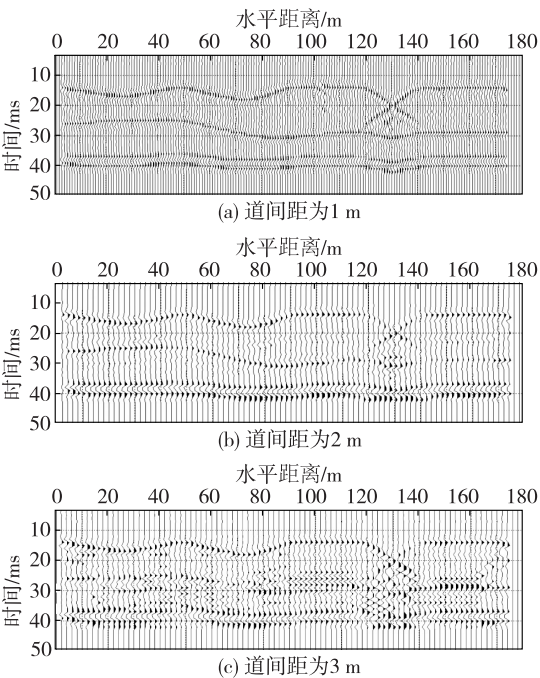


图2 不同道间距的地震映像

Fig. 2 Seismic imagings for different channel spacings

震源子波频率关系着地震勘探的深度和精度,通过设置不同的震源子波频率观察正演计算地震响应的区别,可为实际野外勘探参数的设置提供重要的理论参考。震源子波频率分别设为 300 Hz、400 Hz、500 Hz 时,正演计算结果见图 4。从图 4 可以看出,子波频率为 300 Hz 时,在 70~120 m、140~160 m 处存在干扰波,容易误导成此处有地层分界;子波频率为 400 Hz 时,各岩层界面清晰,同相轴明显;随着子波频率的增大,虽然分辨率增大,但干扰波也增多,而且同相轴变得不清晰。

岩土体波阻抗的大小影响着地震响应的好坏,所以在正演计算中,岩土体弹性参数的设置显得尤为重要。设置各岩土层波速分别相差 700 m/s、500 m/s、300 m/s 时,正演计算结果见图 5。从图 5 可看出,虽然设置的各岩土体波速有差异,但地震响应的各岩土体层的分界面比较清楚,当相邻岩土体波阻抗差异越大,其地震响应越明显,同时干扰波相应增加。

3 水下砂层正演模拟计算

考虑水下砂层的实际赋存情况,本次研究结合南京长江第二大桥桥址区的水下砂体分布状况。该桥址区位于宁镇隆起西段,属于长江河相沉积地层。该区主要为全新统(Q₄)地层,岩性自上而下为淤泥质粉质黏土、粉细砂、砾砂、砂砾卵石。基岩主要为白垩系浦口组(K_{2p})和葛村组(K_{1g})地层,岩性主要为砂砾岩、砾岩及泥岩、砂岩等。

表 1 岩体参数
Table 1 Rock parameters

介质名称	纵波波速/ (m·s ⁻¹)	横波波速/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
河道淡水	1 500	0.25	1 000
淤泥质粉质黏土	900	450	1 485
粉细砂	2 200	1 270	2 086
砾砂	2 700	1 516	2 156
砂砾卵石	3 000	1 730	2 200
砾岩	3 500	2 020	2 275

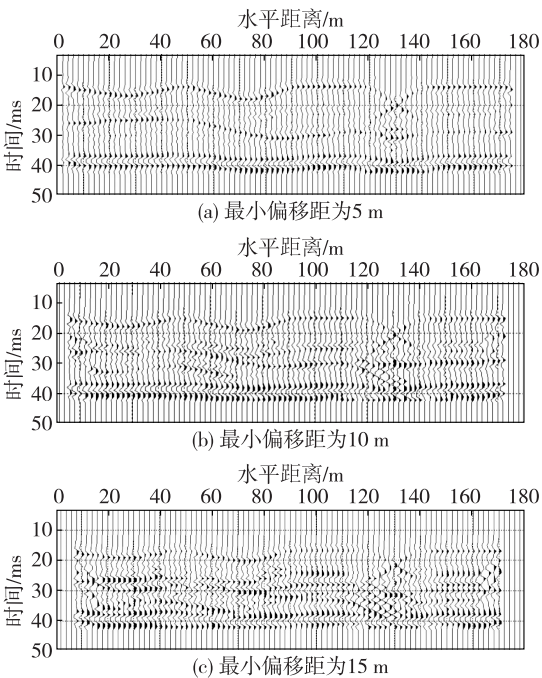


图3 不同最小偏移距的地震映像

Fig. 3 Seismic imagings for different offsets

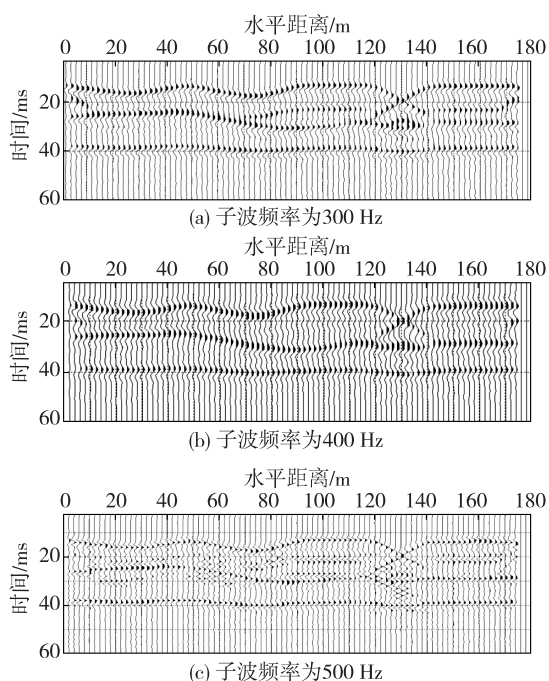


图4 不同子波频率下的地震映像

Fig. 4 Seismic imagings for different wavelet frequencies

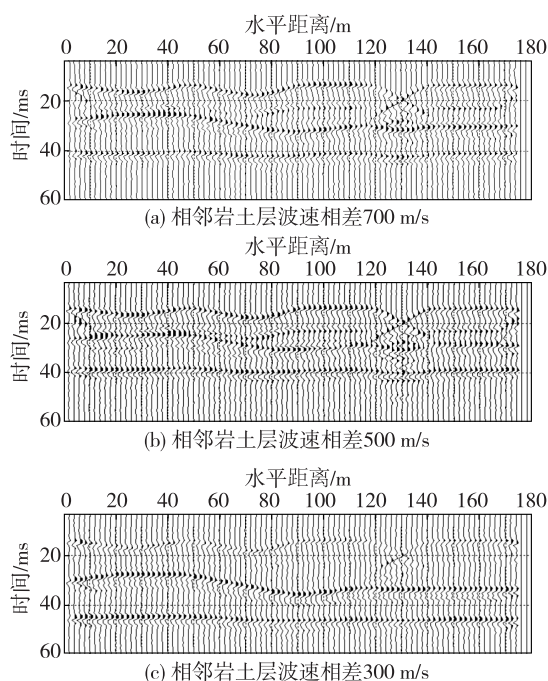


图5 不同波速和密度的地震映像

Fig. 5 Seismic imagings for different wave velocities and densities

综合前文的研究成果,当道间距为1 m或2 m、偏移距为5 m、子波频率为400 Hz、各岩层波速相差500 m/s时地震映像能准确反映出水下各地层的埋深和分布范围。根据钻探和波速测井资料建立自上而下分别为河道淡水、淤泥质粉质黏土、粉细砂、砾砂、砂砾卵石和砾岩的水下砂体模型(图6),正演计算中的各岩层参数见表1。

利用 Tesseral2D 软件对图6模型采用弹性波动方程计算,经直达波切除、叠加、抽道集、取速度谱、动校正等处理,得到正演计算成果(图7)。由图7可知,此次正演模拟很好地划分出水下各岩层的厚度和分布范围。由于薄层、低速的淤泥质粉质黏土层的存在,使粉细砂层顶界面的地震响应不理想,右侧同相轴不清晰;由于 Tesseral2D 软件对边界条件控制不理想,导致左侧0~50 m处和右侧160~180 m处的粉细砂层区域内出现杂波,使整体响应效果变差。随着勘探深度的增加,地震波能量衰减,导致砾岩顶界面响应效果不理想,局部无同相轴响应。

4 结 语

a. 在检波器数量不变的情况下,通过设置不同的道间距、最小偏移距、子波频率及波速,应用 Tesseral2D 软件对典型的起伏地层模型进行正演计算。结果表明,当道间距为1 m或2 m、最小偏移距为5 m、子波频率为400 Hz时,地震响应清晰,同相轴明显,能很好地划分水下各岩层的厚度和分布范围。

b. 结合南京长江第二大桥桥址区的水下砂层分布资料,应用 Tesseral2D 软件建立水下砂层模型并对该模型进行正演计算。结果显示,在道间距为2 m、最小偏移距为5 m、子波频率为400 Hz时,地震响应能很好

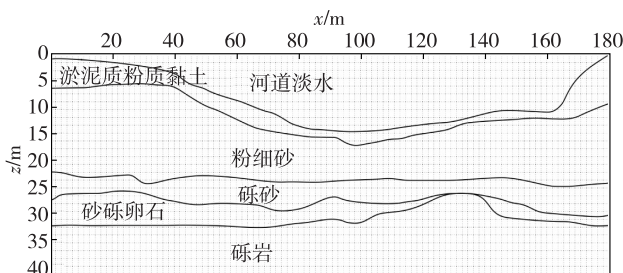


图6 水下砂体模型

Fig. 6 Underwater sand stratum model

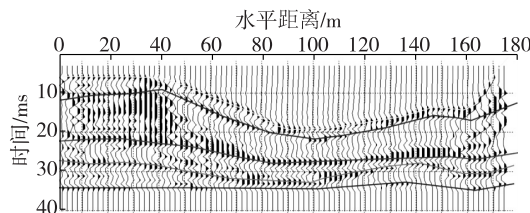


图7 正演计算成果

Fig. 7 Result of forward calculation

地反映水下各岩层的赋存状态,特别是能较明显的圈定水下砂层的厚度和分布范围,可为实际水下砂体的地震勘探提供重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 吴继红. 长江口水域砂矿资源及其合理开发利用[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(6): 156-157. (WU Jihong. The sand mineral resources in the water area of Changjiang estuary and their rational development and utilization[J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2009, 19(6): 156-157. (in Chinese))
- [2] 尹飞龙, 欧阳东, 温喜廉, 等. 海砂与河砂、尾砂作为建筑用砂的比较研究[J]. 混凝土, 2011(12): 73-78. (YIN Feilong, OUYANG dong, WEN Xilian, et al. Comparative study of sea sand, river sand and tailing sand which using as building sand[J]. Concrete, 2011(12): 73-78. (in Chinese))
- [3] 龚士良. 长江口水域砂矿资源及其合理开发与应用[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(3): 335-338. (GONG Shiliang. The underwater placer resources and its rational exploitation in the estuary of Yangtze River [J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23(3): 335-338. (in Chinese))
- [4] 吴彩虹, 范胜华. 水下砂源勘察方法与储量计算研究[J]. 人民长江, 2013, 44(1): 46-56. (WU Caihong, FAN Shenghua. Study of investigation method and reserve estimation of underwater sand sources[J]. Yangtze River, 2013, 44(1): 46-56. (in Chinese))
- [5] 余金煌, 王强, 蒋甫玉. 河湖水下抛石护岸工程综合探测技术研究及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013.
- [6] 李录明, 李正文. 地震勘探原理[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [7] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理 [M]. 3 版. 山东: 中国石油大学出版社, 2009.
- [8] 周天福. 工程物探[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [9] 何正勤, 潘华, 胡刚, 等. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 326-334. (HE Zhengqin, PAN Hua, HU Gang, et al. Study on the seismic exploration method to detect buried fault in the site of nuclear power plant[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 326-334. (in Chinese))
- [10] 薛志恒. 浅层地震勘探在砂岩铀矿勘查中的应用[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 29(增刊): 170-171. (XUE Zhiheng. Application of shallow seismic exploration on sandstone uranium deposits [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Sciences, 2010, 29(Sup): 170-171. (in Chinese))
- [11] 许江, 朱嘉, 张异彪, 等. 平潭海域地震层序及地层层序特征[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 396-402. (XU Jiang, ZHU Jia, ZHANG Yibiao, et al. Characteristics of seismic sequence and stratigraphic sequence in the Pingtan sea area[J]. Progress in Geophys, 2010, 25(2): 396-402. (in Chinese))
- [12] 马海, 刘怀山, 王林辉, 等. 山东桃村水库回填区浅层地震勘探应用效果[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(6): 648-654. (MA Hai, LIU Huaishan, WANG Linhui, et al. Application of shallow seismic exploration method to backfilled areas of Taocun Reservoir in Shandong[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(6): 648-654. (in Chinese))
- [13] 肖开宇, 胡祥云. 正演模拟技术在地震解释中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(4): 459-464. (XIAO Kaiyu, HU Xiangyun. Forward seismic modeling technology in the application of interpretation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(4): 459-464. (in Chinese))
- [14] 朱多林, 白超英. 基于波动方程理论的地震波场数值模拟方法综述[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1588-1599. (ZHU Duolin, BAI Chaoying. Review on the seismic wavefield forward modeling[J]. Progress in Geophys, 2011, 26(5): 1588-1599. (in Chinese))
- [15] 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): 642-650. (WANG Xiwen, QIN Guangsheng, ZHAO Weifeng, et al. The application of forward modeling technique in seismic acquisition design [J]. Progress in Geophys, 2012, 27(2): 642-650. (in Chinese))