

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.05.019

基于 ASM-IV 对波致海床沉积物再悬浮过程研究

郭磊^{1,2}, 文明征^{1,2}, 单红仙^{1,2}, 刘晓磊^{1,2}, 张少同^{1,2}, 王振豪^{1,2}, 贾永刚^{1,2}

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100)

摘要:波浪是导致沉积物再悬浮发生的主要动力条件之一,通过室内水槽试验利用浊度剖面仪(Argus Surface Meter IV,简称 ASM-IV)研究 15 cm 恒定波高的波浪持续作用下沉积物再悬浮的发生过程,试验过程中确立了黄河三角洲地区水体悬沙浓度与 ASM-IV 所测浊度之间的相关关系,研究了波致海床沉积物再悬浮的发生发展过程,分析计算波致沉积物再悬浮泥沙总量及其通量随时间和空间的变化规律,定量地计算出本次试验中波致悬浮泥沙总量以及液化所导致沉积物再悬浮量及其所占比例。研究发现,波致液化作用是沉积物再悬浮的主要动因,液化悬沙量占总悬沙量的 76.4%,本试验对进一步探讨波浪作用下海床沉积物再悬浮过程具有一定的参考意义。

关键词:沉积物再悬浮;波浪;水槽实验;定量分析;海床液化

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2016)05-0181-08

沉积物再悬浮是海床沉积物运动的普遍物理现象,揭示沉积物再悬浮发生的过程与机制是海洋沉积动力学研究领域中的一个重点和难点问题^[1]。在海岸河口地区,波浪是导致沉积物悬浮的主要动力因素之一。波浪在传播过程中,其周期性的循环荷载使边界层内水土发生相互作用。波浪附加荷载使海底沉积物孔隙水压力不断累积,致使海底沉积物发生变形、剪切破坏、液化等动态变化。海床失稳破坏,使得海底已沉积的沉积物再次悬浮。许国辉等(2011)研究发现波浪作用强烈的区域极易发生海底地貌剧烈变化及海底滑坡、冲刷等地质灾害^[2-3]。另一方面,波致海床沉积物再悬浮对于泥沙的输运过程也发挥着重要作用^[3]。波致沉积物再悬浮浓度变化在海岸泥沙运动中占有重要地位。

黄河三角洲沉积物主要由粉细砂组成,其黏粒含量相对较少。这些沉积物经过快速堆积形成,具有含水量高、土质疏松、强度低等特性。在水动力作用下较易发生剪切破坏甚至液化失稳,导致海床沉积物发生再悬浮。波浪作用下海床表面不断进行着悬沙和底沙的交换,这种交换作用直接影响着海洋水体悬沙浓度的变化。沉积动力学调查中悬浮泥沙含量的测量是一项重要内容^[4]。目前,测量悬浮泥沙浓度的方法主要有重量法、原子吸收法、电泳法

和浊度法等。其中,浊度法因其方便、快捷、准确等优点而备受关注^[5]。光学后向散射仪(OBS)利用光学后向散射原理,通过接收红外辐射散射量监测悬浮物质^[6]。ASM-IV 浊度剖面仪由一系列光学后向散射红外传感器(OBS)组成,每个传感器相距 10 mm,可以准确地测量传感器前方 10 cm 范围内悬浮沉积物的浊度,从而生成一个浊度剖面。

本研究基于室内水槽试验采用 ASM-IV,研究 15 cm 恒定波高的波浪持续作用下,黄河三角洲粉质土海床沉积物再悬浮发生发展过程。观察海底沉积物波致液化前后悬浮泥沙浓度随时间的变化规律,探索悬浮泥沙通量的时空变化,研究波致液化作用对沉积物再悬浮过程的贡献。这对于研究黄河三角洲海岸在波浪作用下沉积物再悬浮过程、海底沉积物的侵蚀与淤积以及波浪对海底地形地貌的改造作用具有一定的参考价值。

1 试验材料与装置

基于 ASM-IV 研究波致海床沉积物再悬浮的发生过程。试验分为两个部分:一是通过建立 ASM-IV 所测浊度与悬浮泥沙浓度之间的相关关系,确定水体悬浮泥沙浓度;二是通过波浪水槽试验研究波致海床沉积物再悬浮的发生过程。试验采用黄河三角洲北部刁口流域叶瓣潮坪沉积物淤泥质粉土。试验用土经过晾晒、人工粉碎、筛选后,采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪分析,粒径级配曲线如图 1 所示,中值粒径 $\Phi(D_{50}) = 43.67 \mu\text{m}$ 。

基金项目:国家自然科学基金项目(41372287);国家重大科研仪器研制项目(41427803)

作者简介:郭磊(1985—),男,博士,主要从事海洋沉积物动力响应与岩土环境工程研究,E-mail:1369014151@qq.com

通讯作者:单红仙(1965—),E-mail:hongxian@ouc.edu.cn

收稿日期:2015-06-03;**改回日期:**2016-01-12. 蔡秋蓉编辑

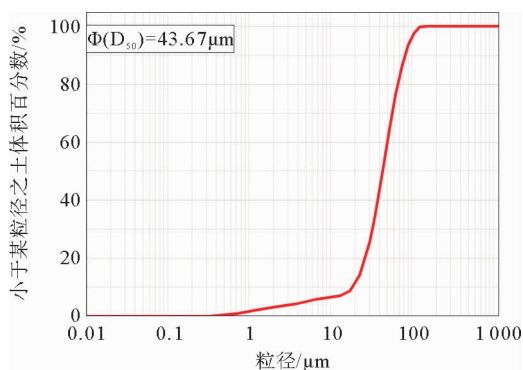


图 1 试验用土粒径分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve for soil samples

悬浮泥沙浓度与浊度之间相关关系的建立采用以下几种设备和仪器:德国 ARGUS 公司生产的 Argus Surface Meter IV (ASM-IV) 浊度剖面测量仪,型号 SN0108,测量量程 0~2 000 FTU (FTU: 浊度单位,表征水的浑浊程度,1 FTU=1 NTU),分辨率 5%,准确度 $\pm 10\%$; Mastersizer 2000 激光粒度仪;分析天平;抽滤设备 (GM-0.33A+1L 溶剂过滤器,滤膜参数为:直径 50 mm,孔径 0.45 μm) 等。

ASM-IV 由 96 个 OBS 传感器组成。在建立悬浮泥沙浓度与浊度之间的相关关系之前必须对这一系列的传感器的一致性进行检验,即保持水体浊度相同的情况下,检测 ASM-IV 各传感器所测 FTU 值是否一致。检验装置如图 2 所示。悬浮泥沙浓度与浊度相关关系的建立采用圆柱形透明水槽,水槽尺寸:壁厚 10 mm,高 800 mm,直径 240 mm (图 3)。在水槽壁内不同高度处固定 3 个导流管,分别对应 ASM-IV 3 个传感器,导管一端引出水槽用于采集水样。

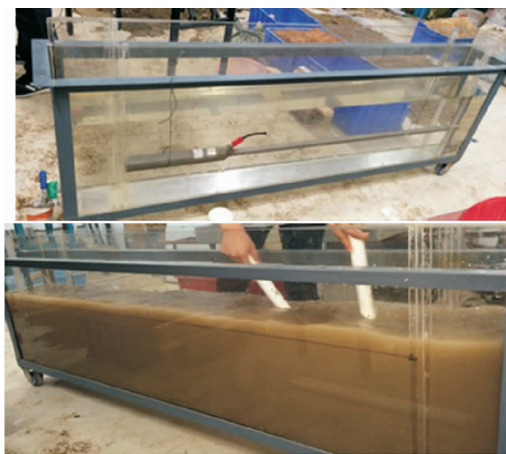


图 2 ASM-IV 一致性检验装置

Fig. 2 Device for conformance testing (ASM-IV)



图 3 悬沙浓度与浊度标定装置

Fig. 3 The calibration device of suspended sediment concentration and turbidity

室内波浪水槽试验在中国海洋大学环境岩土实验室波浪水槽中进行。试验系统包括海床土槽、水槽、造波机组成,水槽长 14 m、宽 40 cm、高 70 cm。在水槽末端为消波段,采用砾石铺设斜坡以消波,防止产生回波干扰试验,水槽试验装置如图 4 所示。

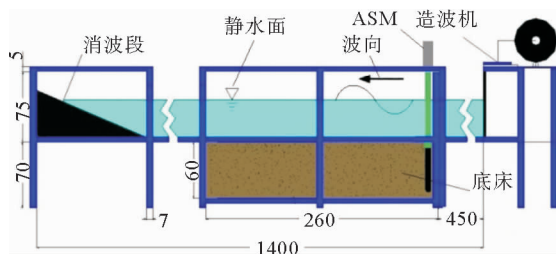


图 4 波浪水槽示意图

Fig. 4 Sketch of the wave flume

2 实验过程与结果

2.1 建立悬浮泥沙浓度与浊度的相关关系

首先将 ASM-IV 水平放置于清水中进行测试,其次,在水槽中加入试验用土充分搅拌均匀待其充分沉降,使同一水平面水体浊度一致时进行测试。分别选取清水测试、浑水测试 1、浑水测试 2 的结果进行线性拟合,拟合结果如图 5 所示,各拟合曲线的相关性见表 1。通过对 ASM-IV 各传感器进行一致性检验发现,各传感器观测结果之间具有很好的一致性。

建立悬浮泥沙浓度与浊度之间的相关关系,在 ASM-IV 采集过程中抽取水样,对水样进行抽滤、烘干获取相应水样的悬浮泥沙浓度。同时,根据取样

时间读取相应传感器对应的浊度值。对数据进一步分析给出悬浮泥沙浓度与浊度的相关关系如图 6 所示。试验给出悬沙浓度与浊度之间转化公式:

$$Y=0.008\ 93X$$
 (1)

其中, Y 为水体悬浮泥沙浓度, X 为水体浊度。

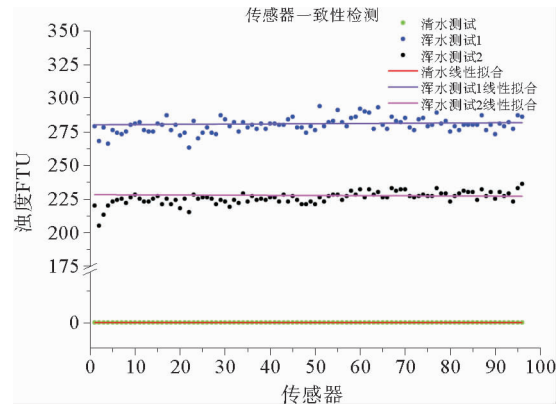


图 5 传感器一致性拟合曲线
Fig. 5 The fitting curve of sensor consistency

表 1 传感器拟合曲线相关性系数
Table 1 The correlation coefficient of the fitting curve of the sensors

	清水测试	浑水测试 1	浑水测试 2
拟合方程	$y=a+b \times x$	$y=a+b \times x$	$y=a+b \times x$
皮尔逊积矩	—	0.871 67	0.874 13
决定系数	—	0.999 63	0.999 51

注:皮尔逊积矩相关系数(Pearson’s r),通常情况下相关系数越接近于 1,相关性越强。决定系数(Adj. R-Square)是 origin 做线性拟合时给出的系数,越接近 1,说明拟合结果越好(其中, a 为线性拟合给出的截距, b 为斜率)

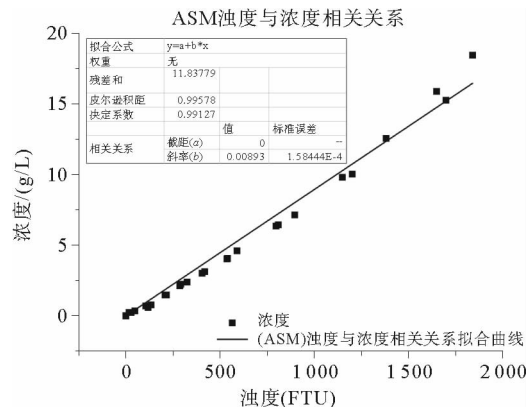


图 6 悬沙浓度与浊度相关关系
Fig. 6 Correlation between suspended sediment concentration and turbidity

2.2 室内水槽模拟试验

试验用土加水充分搅拌均匀后倒入试验水槽中,然后向水槽中加水,加水深度达到 40 cm。试验用土静置处理,充分固结 10 天后土床上部水体高度为 42 cm。此时进行加波试验,试验过程中波浪波高保持 15 cm 不变,波浪荷载持续作用在海底沉积物。在恒定波高作用下测量水体悬浮泥沙浊度,试验过程中 ASM-IV 采集周期为 30 s,单个周期采集时间为 30 s,采集频率为 1 次/s。

ASM-IV 浊度剖面仪实时记录了试验全过程中底床上部水体悬浮泥沙变化情况。根据试验结果绘制沉积物再悬浮泥沙浓度变化剖面图,如图 7 所示(波动水面处悬浮泥沙浓度波动比较大,作图时从自由水面以下 7.5 cm 起)。在波浪持续作用下,海床表层沉积物普遍发生再悬浮,悬浮泥沙逐渐向上扩散,使得整个上部水体含沙量逐渐增高,浓度加大。试验过程中,波浪作用到 3.5 h,海底沉积物发生明显的液化现象(如图 8 所示)。同时,图 7 中波浪作用 3.5 h 后悬浮泥沙浓度急剧增加,与现场观测到的海床液化现象相吻合。波浪作用下,海底沉积物发生液化破坏后,海床表面大量沉积物颗粒发生再悬浮进入水体。被起动的悬浮泥沙通过对流扩散作用不断向上层水体扩散,水体悬沙浓度不断增加并趋于一个稳定的范围。波浪荷载作用停止后,如图 7 所示悬沙浓度快速降低。

3 讨论

3.1 波致沉积物再悬浮机理

沉积物再悬浮是指已沉积的泥沙物质在波、流等水动力作用下再次被悬浮搬运的过程。本试验为非破碎波作用下的泥沙悬浮运动,悬移质泥沙在悬浮过程中主要受到重力作用和紊流作用。Nakata T 研究发现,波致悬浮泥沙浓度梯度在水平方向上的变化要比垂向上变化小得多,因此,可忽略悬浮泥沙在水平方向上的对流与扩散作用,认为扩散作用仅发生在垂直方向上[7-8]。

在现代沉积动力过程研究中,传统的观点认为“波浪掀沙,海流输沙”[9-11]。现场观测结果与室内模拟试验研究发现,波浪荷载一方面对沉积物再悬浮提供剪切力掀动作用,另外波致循环动压力还能够导致海床沉积物发生渗透液化、强度弱化甚至丧失[12-15]。波浪循环荷载的持续作用使海床内部超静

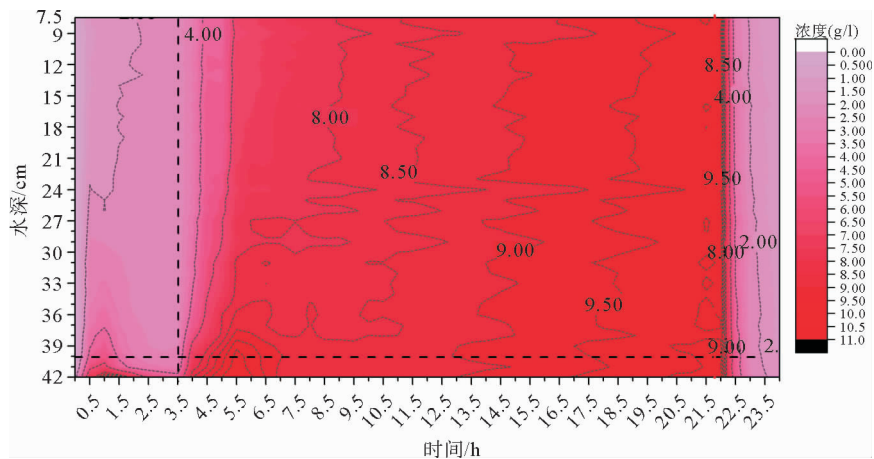


图 7 沉积物再悬浮泥沙浓度变化剖面

Fig. 7 The profile of re-suspension sediment concentration changes with time



图 8 波浪作用下海床土液化渗流现象

Fig. 8 The photo graph of the experimental phenomena

孔隙水压力不断累积。不同深度范围内超静孔压累积程度不同,导致各深度之间产生渗流梯度力(图 9a、9b)。此时海床内部孔隙水在渗透力的作用下向上运动,同时带动海床细颗粒物质沿着渗流通道进入海水中(图 8)。波浪持续作用,超静孔隙水压力不断累积使土体抗剪强度降低,导致海底沉积物发

生液化失稳破坏。失稳破坏的土体随波浪一起发生往复振荡运动,加速了沉积物再悬浮过程^[3]。如图 9d 所示,海床上部液化失稳土体与下部稳定土体之间形成圆弧状振荡界面,为海床内部孔隙水的渗流提供了更为便利的通道,细小颗粒进一步脱离土骨架沿振荡界面发生迁移,产生再悬浮现象。

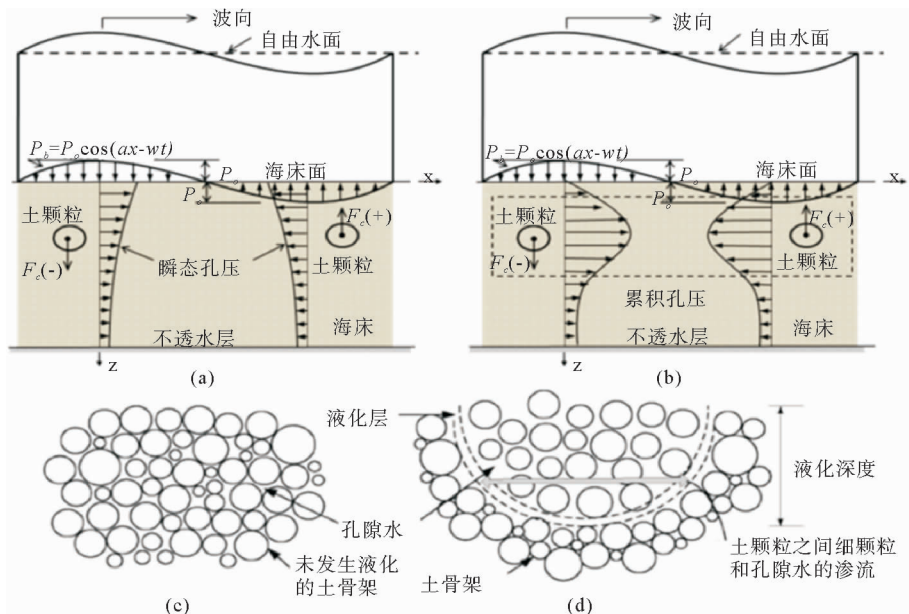


图 9 波浪作用下海床沉积物动力响应概念模型(据参考文献[3, 16])

Fig. 9 The conceptual model of dynamic response of seabed sediment under wave action (refer [3, 16])

3.2 波致沉积物再悬浮量的计算

通过观测液化前、液化后及停止加波后水体浊度的变化,分别绘制水体悬浮泥沙浓度随时间垂向变化图,如图10(10a液化前、10b液化后、10c停止加波后)。图10a所示,在底床土体液化前,海底沉积物在波浪循环剪切力作用下发生再悬浮。在静水面以下4.5 cm到39.5 cm范围内,水体悬浮泥沙浓度变化小,呈均匀分布。静水面以下39.5 cm至底床面,悬浮泥沙浓度出现突增的现象。海床水体悬浮泥沙最终趋于稳定。图10b所示,海底沉积物液化后,上部水体悬浮泥沙含量突然增加,海床表面泥沙浓度增加较快并逐渐向上扩散,最终海床上部水体悬浮泥沙含量趋于稳定。这表明恒定波高作用下海床底沙与悬沙的相互交换已经达到动态平衡。停止加波后悬浮泥沙开始逐渐沉降,图10c所示由于不同高度处悬浮泥沙颗粒的粒径不同,导致悬浮泥沙在不同高度沉降速度有所差异。同时,从图10c可以看出停止加波后前30 min内水体悬浮泥沙沉降速率明显较快,水体悬浮泥沙含量变化快。

试验过程中采用恒定波高波浪持续作用,因此,可认为波浪作用下海底沉积物所受剪切应力为一恒定值。以波浪荷载作用3.5 h为时间节点,研究液化前后悬浮泥沙量的变化。如图10d为液化前后水体悬浮泥沙含量变化图。黑线I表示液化前水体悬浮泥沙含量,该部分悬浮泥沙主要是由于波浪剪切作用所致。红线II表示液化后悬浮泥沙含量,悬浮

泥沙由剪切破坏和液化失稳导致。波致泥沙再悬浮量的计算可以引用以下公式^[3]:

$$F = F_1 + F_2 \quad (2)$$

其中, F 为波致泥沙再悬浮量,包括两部分: F_1 为波致液化引起的悬浮泥沙总量; F_2 表示不考虑波致液化影响时,因波致剪切力作用引起的沉积物再悬浮量。

$$\begin{cases} F_1 = a * b * \sum_{i=1}^n h_i c_i \\ F_2 = a * b * \sum_{i=1}^n h_i c_i \end{cases} \quad (3)$$

其中, a 为水槽长度, b 为水槽宽度, c_i 为某水层悬浮沉积物浓度, h_i 为该沉积物浓度对应水层厚度。计算过程中忽略消波段水槽的影响,将水槽视为长方体,水槽中水体长度为 $a=12$ m,宽度为 $b=0.4$ m,高度为 $h=0.42$ m。计算得波致液化引起的悬浮泥沙总量为 $F_1=14.21$ kg;波致剪切力作用引起的沉积物再悬浮量 $F_2=4.38$ kg。其中,液化作用导致的沉积物再悬浮量所占比例为76.4%。

3.3 波致悬浮泥沙通量变化

悬浮泥沙通量可定义为:已经发生沉积的泥沙物质在水动力作用下再次脱离海床面,这些被悬浮起来的沉积物在单位时间内通过单位水断面面积的量值^[17]。如图11所示为悬浮泥沙总量及其通量随时间变化图。其中,图11a为波浪作用下累计悬浮泥沙总量变化曲线,图11b为每半小时内悬浮泥沙量

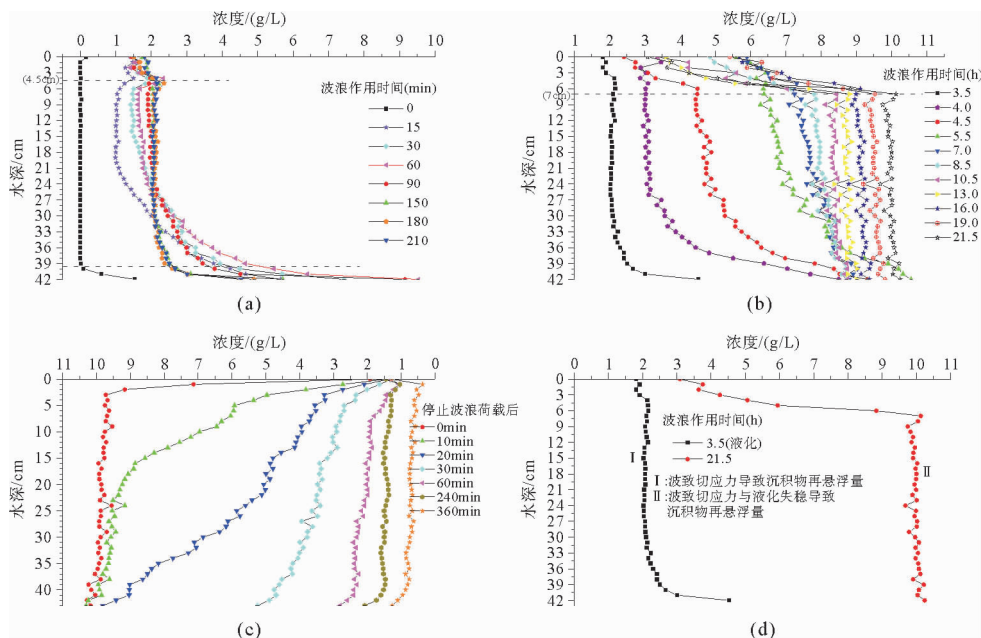


图10 水体悬浮泥沙浓度随时间垂向变化

Fig. 10 The graph of vertical variation in re-suspended sediment concentration

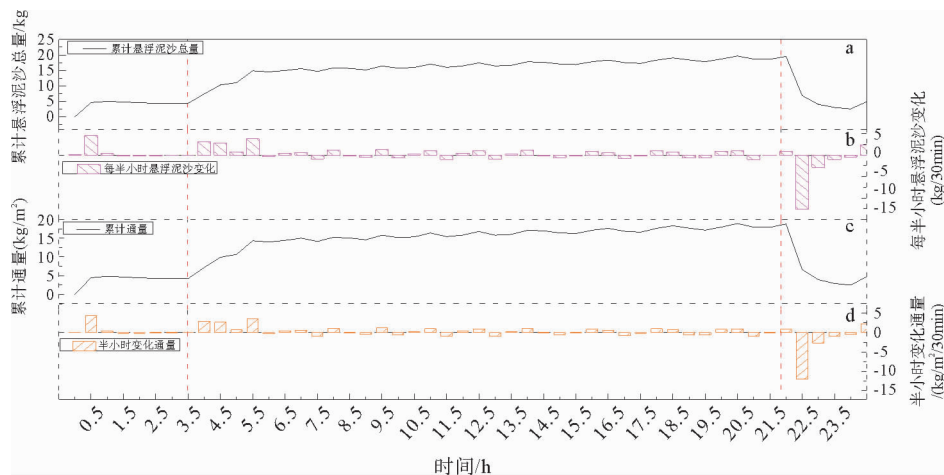


图 11 悬浮泥沙总量及其通量随时间变化

Fig. 11 The variation chart of the total amount of re-suspended sediment and it's flux

的变化情况。图 11c 为累积悬浮泥沙通量曲线,图 11d 为每半小时的悬浮泥沙通量变化。从图 11b、d 每半小时悬浮泥沙含量变化柱状图可以发现,在海床沉积物液化前,悬浮泥沙含量在波致剪切力作用下逐渐增加,最后并趋于稳定,这说明剪切破坏导致的泥沙悬浮与水体泥沙再沉降量达到平衡。波致海床液化后,悬浮泥沙含量在液化后两个小时内持续增加且增加幅度可达 $4 \sim 5 \text{ kg}/30 \text{ min}$ 。之后在波浪循环荷载的持续作用下,海床表面悬沙与底沙不断交换,并趋于平衡状态。波浪作用停止后,再悬浮作用微弱或近乎停止。停止加波后悬浮泥沙颗粒迅速发生沉降,最大沉降通量可达 $12 (\text{kg}/\text{m}^2)/30 \text{ min}$ 。

4 结论

(1) 波致海床沉积物再悬浮主要由两方面造成:一是波浪荷载使海床发生剪切破坏,海床表层沉积物进入上层水体;二是在波浪持续循环荷载下海底沉积物超静孔隙水压力不断累积,海床沉积物趋于液化,液化失稳破坏导致海床沉积物再悬浮。

(2) 在恒定波高波浪作用下(波高 15 cm)沉积物再悬浮可分为两个阶段:一是波浪剪切破坏引起的沉积物再悬浮;二是波致液化引起的沉积物再悬浮。波致再悬浮泥沙量可达 $9.22 \text{ kg}/\text{m}^3$,其中波致液化引起的泥沙悬浮量为 $7.05 \text{ kg}/\text{m}^3$,约占悬浮泥沙总量的 76.4% 。由此可见波致液化在沉积物再悬浮过程中起着重要作用。

参考文献 (References)

- [1] 张存勇. 连云港近岸海域沉积物再悬浮及泥沙动力研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011. [ZHANG Cunyong. Study on sediment resuspension and dynamics in the Lianyungang near shore area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.]
- [2] 许国辉, 孙永福, 于月倩, 等. 黄河水下三角洲浅表土体的风暴液化问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011(2): 37-42. [XU Guohui, SUN Yongfu, YU Yueqian, et al. Storm-induced liquefaction of the surficial sediments in the Yellow River subaqueous delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011(2): 37-42.]
- [3] 郑杰文. 现代黄河三角洲沉积物波浪动力响应过程对其再悬浮控制作用研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013. [ZHANG Jiewen. The role of seabed dynamic response in sediment resuspension under waves in modern Yellow River delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.]
- [4] 毕世普, 周良勇, 刘健, 等. 江苏废黄河口光学后向散射浊度计的沉积物标定[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 123-128. [BI Shipu, ZHOULiangyong, LIU Jian, et al. Sediment calibrations using OBS contsoff abandoned Yellow River mouth of Jiangsu Province[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(4): 123-128.]
- [5] 张占柱, 郑博, 唐晓津, 等. 浊度法测定悬浮液中固体颗粒浓度的研究[J]. 石油炼制与化工, 2011(10): 78-81. [ZHANG Zhanzhu, ZHENG Bo, TANG Xiaojin, et al. Study on the determination of solid concentrations in suspensions by turbidimetry[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011(10): 78-81.]
- [6] 许卫东, 薛元忠. 光学后向散射浊度仪简介及应用研究[J]. 海洋工程, 2001(2): 79-84. [XU Weidong, XUEYuanzhong. Introduction of OBS and its application study[J]. Ocean Engineering, 2001(2): 79-84.]
- [7] 于月倩. 波致粉质土底床液化下水体含沙量垂向分布的试验研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012: 83. [YU Yueqian. Experimental study on vertical distribution of suspended sediment concentration on the liquefied silty bed under storm waves[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 83.]
- [8] Nakato, Tatsuaki, Kennedy, et al. Wave entrainment of sedi-

- ment from rippled beds[J]. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, 1977, 103(1):83-99.
- [9] 陈沈良,张国安,杨世伦,等.长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报, 2004(2):260-266. [CHEN Shenliang, ZHANG Guoan, YANG Shilun, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River estuary and its adjacent waters [J]. Acta Geographica Sinica, 2004(2):260-266.]
- [10] 程义吉,高菁.黄河三角洲孤东海域前缘岸坡演变分析[J]. 人民黄河, 2006(6):22-23,26,80. [CHENGYiji, GAO Jing. Analysis on foreslope evolution of Gudong sea area of the Yellow River delta[J]. Yellow River, 2006(6):22-23,26,80.]
- [11] 李平,朱大奎.波浪在黄河三角洲形成中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2):40-47. [LI Ping, ZHU Dakui. The role of wave action on the formation of the Yellow River delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1997, 17(2):40-47.]
- [12] Lambrechts, Jonathan, Humphrey, et al. Importance of wave-induced bed liquefaction in the fine sediment budget of Cleveland Bay, Great Barrier Reef. Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2010, 89(2):154-162.
- [13] Zheng Jiewen, Shan Hongxian, Jia Yonggang, et al. Field tests and observation of wave-loading influence on erodibility of silty sediments in Huanghe (Yellow River) estuary[J]. China Journal Coastal Res., 2011, 27(4):706-717.
- [14] 郑杰文,贾永刚,刘晓磊,等.黄河三角洲沉积物抗侵蚀性动态变化差异研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1):290-298. [ZHENG Jiewen, JIA Yonggang, LIUXiaolei, et al. Discrepancy of sediment erodibility variation under waves at Yellow River delta [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(s1):290-298.]
- [15] 单红仙,郑杰文,贾永刚,等.黄河口粉质土沉积物侵蚀性动态变化试验研究[J]. 海洋学报, 2009(4):112-119. [SHAN-Hongxian, ZHENG Jiewen, JIA Yonggang, et al. Laboratory study about the influence of dynamic loading on the erosion of silty sediment in the Huanghe estuary in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009(4):112-119.]
- [16] Liu X L, Jia Y G, Zheng J W, et al. Experimental evidence of wave-induced inhomogeneity in the strength of silty seabed sediments: Yellow River delta, China[J]. Ocean Engineering, 2013, 59:120-128.
- [17] 刘辉.黄河水下三角洲沉积物再悬浮通量研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011. [LIU Hui. Research on resuspended flux of sediment in the Yellow River subaqueous delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.]

STUDY ON RE-SUSPENSION PROCESS OF SEABED SEDIMENT INDUCED BY WAVE

GUO Lei^{1,2}, WEN Mingzheng^{1,2}, SHAN Hongxian^{1,2}, LIU Xiaolei^{1,2},
ZHANG Shaotong^{1,2}, WANG Zhenhao^{1,2}, JIA Yonggang^{1,2}

(1. Environmental Geotechnical Engineering Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100;

2. Key Laboratory of Marine Environment Geological Engineering, Shandong Province, Qingdao 266100)

Abstract: Wave is the main factor to initiate sediment resuspension. In this paper, we presented a case of wave-induced sediment re-suspension under the wave of 15cm in height. The equipment of ASM-IV is used to establish the correlation between the suspended sediment concentration and the turbidity measured by ASM-IV. In this article, we quantitatively calculated the total amount of suspended sediment induced by waves, and the part caused by liquefaction as well as their proportion to the total amount. Results indicate that liquefaction induced by waves is the main cause of sediment re-suspension, which accounts for 76.4% of the total. The work provides an important reference to the further study of the wave induced re-suspension.

Key words: sediment re-suspension; waves; flume Experiment; quantitative analysis; liquefaction