

## 波浪作用下浮泥悬扬浓度特性研究<sup>\*</sup>

张睿智,陈 科,喻国良,胡天群

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

**摘 要:**为研究不同波浪环境下,水底浮泥层产生泥沙悬扬后其浓度的分布特性,使用浊度计测定浊度的方法确定水体中泥沙的浓度,并在水槽实验中改变水深、浮泥厚度及造波机的频率和振幅,观察水槽中悬浮泥沙浓度的变化情况,获得水深、波浪频率、波幅以及浮泥厚度对底床泥沙悬扬的影响,分析泥沙浓度的垂向分布特征等。实验结果显示,水深对底床泥沙悬扬的影响最为显著,其他实验参数的影响均不十分显著。同时,通过垂向输沙平衡的分析,得到一个可描述泥沙垂向浓度分布的理论公式,并利用水槽实验结果进行验证。对比结果显示,理论公式所得曲线与实验结果曲线变化趋势一致,部分工况下,理论值稍稍偏大。

**关键词:**浮泥;悬扬;浊度;波浪要素;输沙公式

**中图分类号:**TV142<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.03.002

浮泥是淤泥质海岸及河口地区的一种泥沙运动形态,悬移质、推移质与浮泥的共同作用,会引起航道淤积、海岸与河口演变等物理过程,而浮泥的悬扬对河口地区的地形、地貌的演变有着重要影响<sup>[1-2]</sup>。

对于海岸及河口浮泥悬扬的成因,大致存在两类研究。一类研究针对潮流对浮泥悬扬的影响,例如刘建华等<sup>[3]</sup>和徐琦琳等<sup>[4]</sup>的研究。另一类则侧重于波浪对浮泥悬扬的作用,例如 Mason 等<sup>[5]</sup>发现,在近海区域海啸波浪作用会引起床面上水压快速降低,导致孔隙压力梯度的快速变化,增加泥沙的不稳定性,在局部激发间歇性的泥沙液化现象,使底泥产生明显的运动。苗丽敏等<sup>[6]</sup>认为风暴事件中淤泥质海岸悬沙浓度和悬沙输运的剧烈变化的根本动力机制是风暴把巨大能量传递给近岸水体,进而显著增大波浪流联合作用产生的底床剪切应力,从而导致细颗粒泥沙再悬浮。Sheremet 等<sup>[7]</sup>实地考察了受飓风袭击后的美国阿查拉亚湾,其实测结果显示湾内出现了一个泥跃层,其成因被认为是由飓风引起的波浪所引发的大量泥沙悬扬。程永舟等<sup>[8]</sup>分析了波浪作用下床面泥沙颗粒所受的主要作用力,通过水槽试验研究了不同波浪参数作用下孔隙水压力梯度对泥沙起动的影响,其试验结果表明,波浪渗流力对海床细颗粒泥沙的起动有着重要作用。洪柔嘉等<sup>[9]</sup>根据天津新港的研究,提出了一个计算浮泥悬扬流速的公式,并认为 8~25 cm/s 是产生浮泥悬扬的临界流速范围。郭龙先<sup>[10]</sup>采用水槽实验和现场实测相结合的方法,研究了不同

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-04-23

作者简介:张睿智(1991-),男,硕士研究生,主要从事河口海岸泥沙实验方面研究. E-mail: rauphan@hotmail.com

(王 燕 编辑)

的压力脉动对底床泥沙悬扬的影响,分析了垂向浊度分布及相应的脉动水压力,其结果表明:风生波浪造成的压力脉动与浮泥悬扬间存在密切的联系。

综上所述,波浪作用对浮泥悬扬的影响可以归为在表面波作用下,底部的压力场产生波动响应,引起床底附近的水质点往复运动产生剪切作用使底泥发生悬扬。然而,波浪要素(波幅和波频)、浮泥层厚度及水深等参数如何对浮泥悬扬产生影响目前尚不十分清楚。鉴于此,本文在水槽实验中改变水深、浮泥层厚度及造波机的频率和振幅,观察水槽中泥沙浓度的变化情况,获得水深、波浪频率、波幅以及浮泥层厚度对底床泥沙悬扬的影响,分析泥沙浓度垂向分布特征等;同时,通过一维垂向输沙平衡公式的推导,结合泥沙粒径分析,得到可描述泥沙浓度垂向分布的理论公式,并通过水槽实验结果对理论模型进行验证。

## 1 实验设置

实验水槽及相关设备的设置由图 1 所示,主要实验设备包括:波浪水槽、造波机、消波装置、浮泥层、波高仪及取样装置。



图 1 实验水槽的纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal diagram of the experimental flume

本实验在长 11 m, 宽 1 m, 深 1 m 的波浪水槽内进行。水槽一端安装自制造波机, 另一端安装消波设备。将距离造波机 2.5~5.5 m 处的水槽段划为实验观测段。先将水槽里面水放至一定深度, 然后用有机玻璃挡板横插在 2.5 和 5.5 m 处, 使其形成一个相对封闭的水体。预先用搅拌机配制好不同含水率和流化程度的泥浆, 然后将泥浆缓慢地、小量多次地倒入实验段, 并用平板找平。制作泥浆的泥沙取自杭州湾奉贤海岸边滩, 通过振筛法获得其级配曲线(图 2), 其中值粒径约为 0.07 mm。

水槽工作段底部的浮泥层由前述泥浆经长时间沉淀形成, 通过平板找平使其具有均匀的厚度。浮泥层的长度约为 300 cm, 宽度为 100 cm。将取样点水平位置设置在位于水槽中部、距离试验观测段末端 20 cm 处。采用特制的虹吸取样装置, 在 8 个高度进行同时取样, 取样点分别位于距离底床面 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.5, 9.0, 13.5 和 18.0 cm 处, 构成一个垂向测量断面。在同一观测断面上利用固定装置固定一个波高仪, 以测量该断面处水面高度的变化过程。

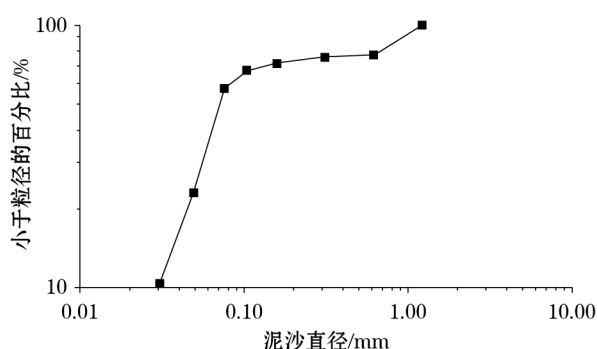


图2 泥沙颗粒级配

Fig. 2 Grain size distribution of the sediment

为判断波浪作用下浮泥悬扬的程度,需要测定水体中的泥沙含量,为此本文采用浊度仪测量水体浊度,再换算求得泥沙浓度。一般而言,当水体中含有胶体状态的或悬浮的微粒时,将出现浑浊现象,其浑浊的程度称为浊度,其单位为度(NTU)。当1 L 纯水中含有1 mg 的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )时,所产生的浑浊程度为1 度。本研究中所用的浊度仪以钨卤素灯为光源,制造一束红色激光穿过待测样品,散光光量由一个传感器接收,直透光光量则由另一个传感器接收。传感器将两种光信号分别转化为电信号,利用比较电路及处理器,将比较数值转换为浊度 NTU 值。待测水样由前述的特制虹吸装置获得,在测量前还须将水样摇匀后注入专用试管中。为减小外界干扰,浊度仪的读数与记录工作均在样品室中进行。

实验采用两种不同的水深,分别是 24 和 18 cm。每种水深中,造波机分别采用两种振幅,分别为 2 和 5 cm。同时,造波机也采用两种波动频率,分别为 90 和 70 r/min。上面各种工况分别在两种不同厚度的浮泥下面进行,厚度分别为 3 和 5 cm。具体实验的工况组合和波浪要素如表 1 所示。

表1 水槽实验中的实验参数

Table 1 Experimental parameters for the flume experiments

| 工 况 | 浮泥层厚度<br>/cm | 水深<br>/cm | 波幅<br>/cm | 波频<br>/Hz | 波长<br>/m | 波速<br>/m · s <sup>-1</sup> | 底部最大<br>流速<br>/m · s <sup>-1</sup> | 摩阻流速<br>/m · s <sup>-1</sup> |
|-----|--------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 工况一 | 3            | 18        | 5         | 1.500     | 0.65     | 0.975                      | 0.171                              | 0.012                        |
| 工况二 | 3            | 18        | 5         | 1.167     | 0.95     | 1.108                      | 0.246                              | 0.017                        |
| 工况三 | 3            | 18        | 2         | 1.500     | 0.65     | 0.975                      | 0.068                              | 0.005                        |
| 工况四 | 3            | 18        | 2         | 1.167     | 0.95     | 1.108                      | 0.098                              | 0.007                        |
| 工况五 | 5            | 24        | 5         | 1.500     | 0.67     | 1.005                      | 0.100                              | 0.007                        |
| 工况六 | 5            | 24        | 2         | 1.500     | 0.67     | 1.005                      | 0.040                              | 0.003                        |
| 工况七 | 5            | 18        | 2         | 1.167     | 0.95     | 1.108                      | 0.098                              | 0.007                        |
| 工况八 | 5            | 18        | 5         | 1.167     | 0.95     | 1.108                      | 0.246                              | 0.017                        |

## 2 研究结果

### 2.1 浊度变化特性

工况一中水体浊度在不同时刻随高度变化及不同高度随时间变化的情况如图 3 所示。由图 3b 可知,当  $T=0$  s 时,8 个取样位置浊度的平均值为 1.57 NTU,最大与最小的浊度值相差仅 0.64 NTU;在加载波浪 5 min 后,8 个取样位置所形成垂向断面的平均浊度达到最大值,为 114.49 NTU;浊度的最高点为床面上 0.5 cm 处,为 530 NTU;波浪加载 120 min 后断面浊度趋向于稳定,平均浊度为 78.19 NTU。最大值和最小值相差 67.9 NTU。距离床面最近(0.5 cm)处的浊度变化最大;离床面越远,浊度变化越小。结果表明,波浪作用后,达到稳定状态的水体浊度垂向分布总趋势具有一定规律,即离床面越近,达到稳定状态时的泥沙浓度越大。

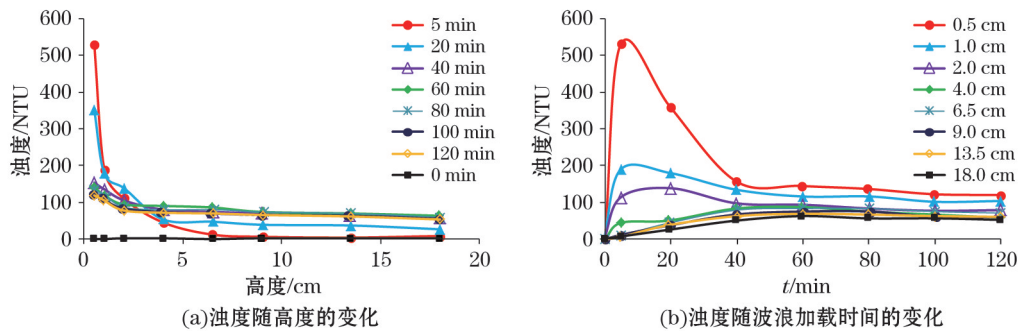


图 3 工况一的浊度分别随高度和波浪加载时间的变化

Fig. 3 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 1

工况二、三和四的浊度随高度和波浪作用时间的变化分别见图 4、图 5 和图 6。由图可知,这些工况下浊度变化的最大值虽有所不同,但变化趋势与工况一十分类似,即离床面越远,浊度变化越小,而离床面越近,达到平衡状态时的泥沙浓度越大。

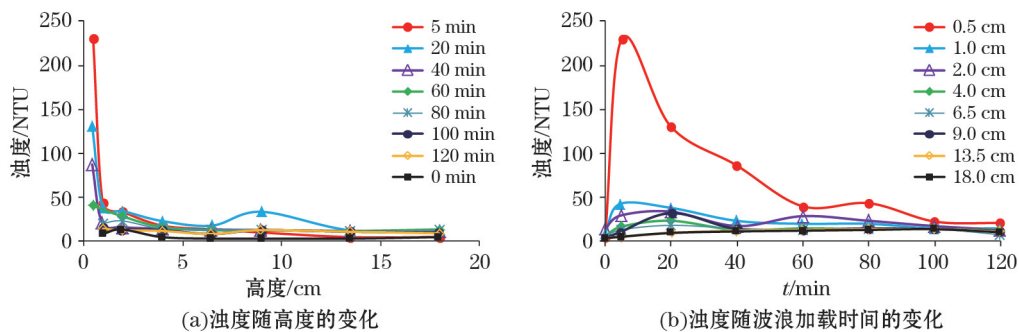


图 4 工况二的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 4 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 2

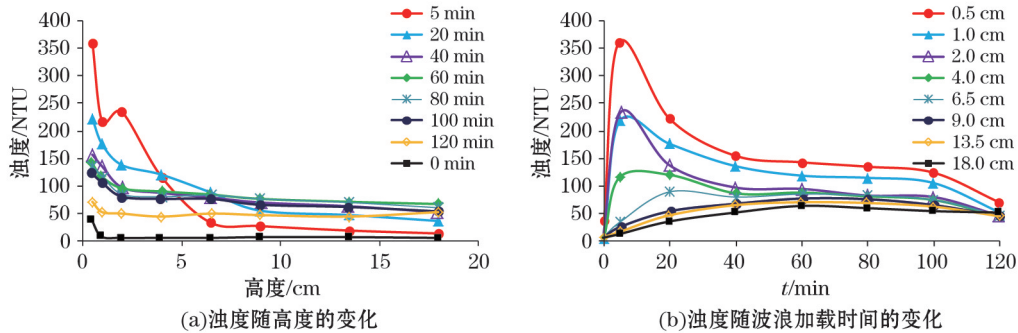


图5 工况三的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 5 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 3

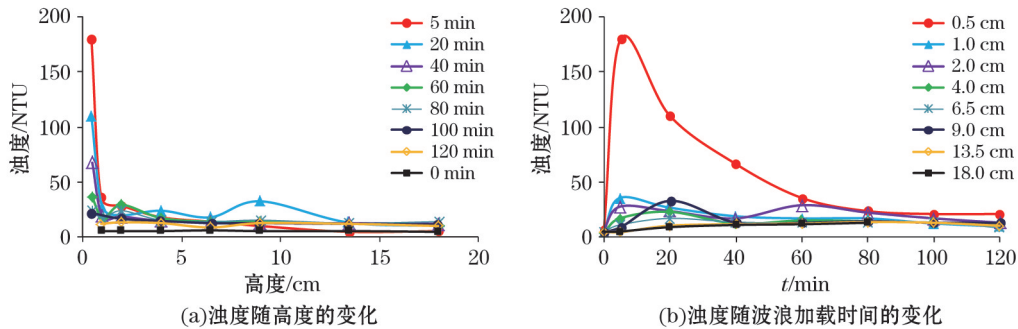


图6 工况四的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 6 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 4

图7和图8分别给出了工况五和工况六的情况,这两者的变化趋势与工况一至工况四有明显的差异。在工况五中,8个取样位置初始时刻浊度的平均值为7.01 NTU,最大与最小的浊度值相差2.21 NTU;在加载波浪5 min后,8个取样位置所形成垂向断面的平均浊度达到其最大值,浊度的平均值为7.22 NTU;浊度的最高点为初始时刻床面上0.5 cm处,为8.45 NTU;波浪加载120 min后断面浊度趋向于稳定,平均浊度为6.88 NTU。最大值和最小值相差0.92 NTU。

工况六中,初始时刻的断面平均浊度为7.02 NTU,最大值和最小值相差1.53 NTU;在加载波浪110 min后,断面的平均浊度达到了最大值,平均浊度为7.31 NTU;浊度的最高点为70 min后时刻床面上2 cm处,为7.9 NTU;波浪加载120 min后断面浊度趋向于稳定,平均浊度为7.28 NTU。最大值和最小值相差1.37 NTU。

由此可见,工况五与工况六中的浊度相较于工况一至工况四至少小了一个量级,浊度变化规律不明显;每个位置的浊度变化都很小。此时的大致趋势:离床面较远处的浊度越来越大,离床面越近处的浊度越来越小,整个断面的浊度分布有平均化的趋势。

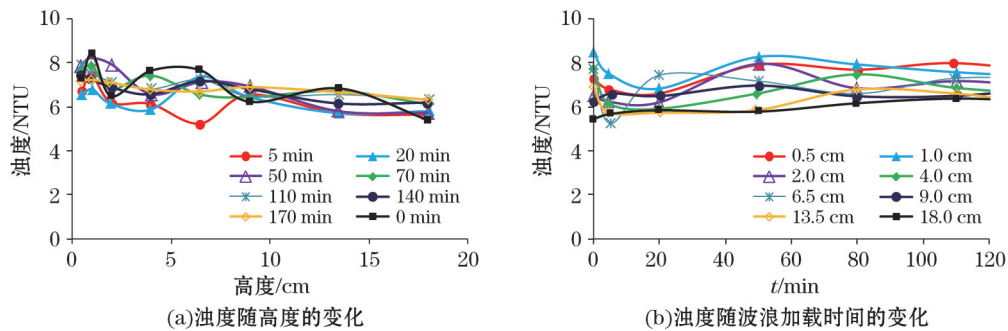


图 7 工况五的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 7 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 5

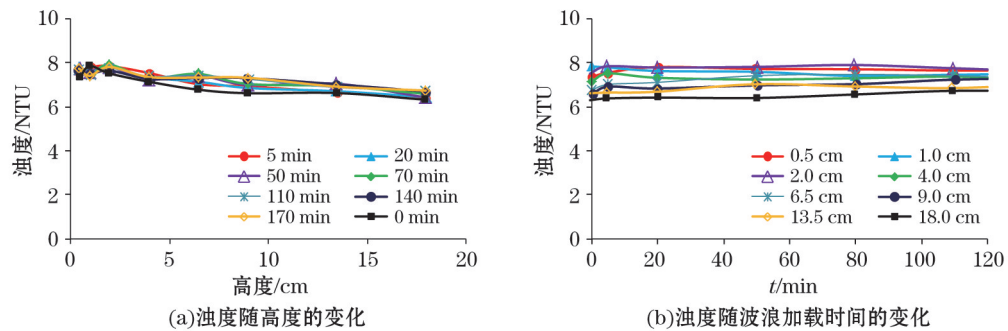


图 8 工况六的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 8 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 6

图 9 和图 10 给出了工况七与工况八的情况,显然两者的变化规律与工况一至工况四接近而与工况五和六不同。由此,考察所有工况的参数可知,工况五和六与其他工况的最大不同在于其水深为 24 cm,而其他工况水深均为 18 cm。结果表明,水深可能是影响浊度变化的一个重要参数。

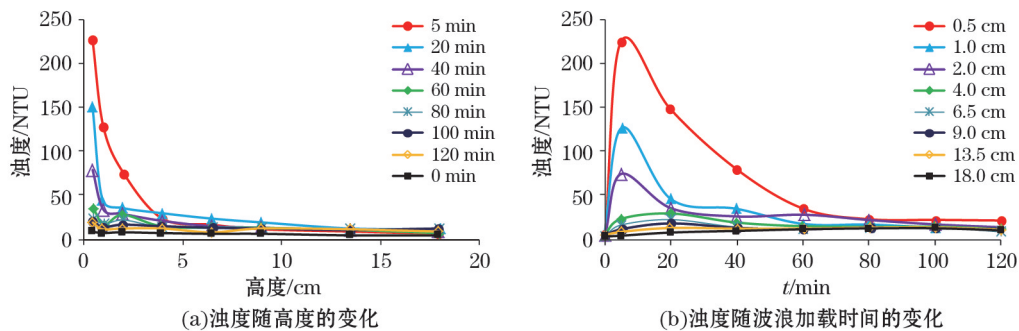


图 9 工况七的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 9 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 7



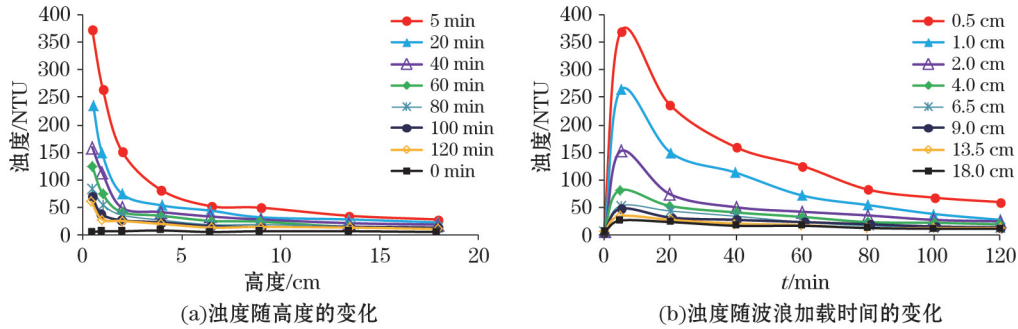


图10 工况八的浊度分别随高度和波浪加载时间变化

Fig. 10 Changes of the turbidity with the height and the wave loading time respectively in Case 8

由实验结果可知,工况五和工况六的浊度变化与其他工况有着较大的差异,而这两个工况的共通点在于其水深较深,为24 cm。这里以工况六为例进行分析:对比工况六(水深24 cm,波幅2 cm,波长0.67 m)和工况四或七(水深18 cm,波幅2 cm,波长0.95 m)的情况,虽然水深变化仅6 cm(减少25%),但相对波高由1/9减少到1/12(减少25%),波陡由0.029 8减少为0.021(减少30%),尤其是水深与波长之比由0.358减少到0.189,虽然均为深水波(大于1/20),但水深与波长之比的变化幅度达47.1%。因此,底床的切应力大小差别很大,从而使得泥沙的悬扬情况完全不同。

## 2.2 泥沙垂向分布理论模型

由实验结果可知,波浪引起浮泥悬扬后,水体中的泥沙浓度经过一定时间的变化后,其垂向分布趋于稳定,本文在此进一步从理论上分析垂向分布。首先,最基本的泥沙输沙平衡公式为

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[\bar{u}c] + \frac{\partial}{\partial y}[\bar{v}c] + \frac{\partial}{\partial z}[(\bar{w} - \omega_s)\bar{c}] = -\frac{\partial}{\partial x}[\bar{u}'c'] - \frac{\partial}{\partial y}[\bar{v}'c'] - \frac{\partial}{\partial z}[\bar{w}'c'], \quad (1)$$

式中, $u, v, w$ 分别为 $x, y, z$ 方向的速度; $\bar{\phantom{x}}$ 为其下的平均值; $'$ 为其下的脉动值; $\omega_s$ 为泥沙沉降速度, $c$ 为泥沙浓度。

对于恒定、二维、均匀水流,从时间平均的角度来看,式(1)可简化为

$$\frac{\partial}{\partial z}[\bar{w}'c'] - \omega_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

式(2)表示由脉动引起的向上悬扬的悬沙通量(第一项)和由重力引起的向下的悬沙通量(第二项)在数值上是相等的。第一项中的 $\bar{w}'c'$ 表示的是悬移泥沙的雷诺通量(Reynolds flux),它表征竖直方向上,泥沙在紊流的作用下,从高浓度向低浓度混合的趋势。在垂线方向上的不同位置上, $\bar{w}'c'$ 跟所在位置的泥沙浓度梯度有关系,可以有如下关系:

$$\bar{w}'c' = -v_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}, \quad (3)$$

式中, $v_s$ 为泥沙的紊动扩散系数,与所在位置和速度等有关,即 $v_s = v_s(u, z)$ ,式(2)可以变成:

$$v_s(u, z) \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \omega_s \bar{c}. \quad (4)$$

理论上讲,该式沿垂线积分即可得到垂线泥沙浓度分布。水体间的相互混合是水体

单元相互掺混的过程,包括分子扩散、紊动扩散、剪切离散等,紊动扩散往往是占主要地位的动力,且可以近似认为泥沙垂向扩散系数与水流动量交换中的紊动涡度  $\epsilon$  成正比,即  $\nu_s = \alpha\epsilon$ 。 $\epsilon$  的取值可以采用 Kajiura 假设<sup>[11]</sup>,有  $\epsilon = \kappa U_* (h - z)$ ,故有:

$$\nu_s = \alpha\kappa U_* (h - z), \quad (5)$$

式中, $\kappa$  为卡门常数,这里取  $\kappa = 0.4$ ;  $h$  为水深;  $U_*$  为摩阻流速,有  $U_* = (u_{*c}^2 + u_{*w}^2)^{\frac{1}{2}}$ ,本文只考虑波浪作用,故认为  $u_{*c} = 0$ 。

式(4)中,泥沙的沉降速度  $\omega_s$  在垂线上不是一个固定值。在自然环境中,水体中的泥沙颗粒大小必然是不均匀的,在波浪的作用下悬浮起来的泥沙也是不均匀的。通过实验观测发现,在水体上部细颗粒泥沙的相对含量较高,造成水体上部的泥沙中值粒径较小,沉降较慢;在水体下部粗颗粒泥沙的含量较高,泥沙中值粒径较大,沉降较快。因此可近似假设:

$$\omega_s = \omega_B \cdot \frac{z}{h} + \omega_T \cdot \frac{h - z}{h}, \quad (6)$$

其中, $\omega_B$  为底部的泥沙沉降速度; $\omega_T$  为顶部的泥沙沉降速度。

以中值粒径的沉降速度  $\omega_M$  及系数  $a_1, a_2$  改写式(6),令  $\omega_B = a_1 \omega_M, \omega_T = a_2 \omega_M$ ,可得:

$$\omega_s = \omega_M \left( \frac{a_1 z + a_2 h - a_2 z}{h} \right). \quad (7)$$

将式(5)和式(7)代入式(4)积分,可得:

$$S = S_a \cdot \left( \frac{1}{h - z} \right)^{\frac{a_1 \omega_M}{\alpha \cdot \kappa \cdot U_*}} \cdot \exp \left[ - \frac{\omega_M (a_1 - a_2) z}{\alpha \cdot \kappa \cdot U_* \cdot h} \right], \quad (8)$$

式中, $S_a$  为平均含沙量,取为  $z = 0.02h$  处的泥沙浓度。

式(8)中有 2 个未知量,其一为中值粒径的沉降速度  $\omega_M$ ,可由张瑞瑾<sup>[12]</sup>公式获得:

$$\omega_M = \sqrt{(13.95\nu/D)^2 + 1.09RgD} - 13.95\nu/D, \quad (9)$$

式中, $R = 1.65$ ;  $\nu$  为运动黏性系数。

式(8)中另一未知量为由波浪引起的摩阻流速  $U_*$ 。Bijker<sup>①</sup> 提出的水流挟沙能力公式中,单向流剪切力及摩阻流速可由波流共同作用下的剪切力及摩阻流速代替,即可得到波流共同作用下的输沙公式。其中,波浪作用下的摩阻流速为

$$U_* = u_{w*} = \sqrt{\tau_m / \rho}. \quad (10)$$

波浪作用下的瞬时剪切应力  $\tau_m$  为

$$\tau_m = \frac{1}{2} \rho f_w u_m^2 \cos^2 \sigma. \quad (11)$$

式(10)可化为

$$U_* = u_{w*} = \sqrt{f_w / 2} \cdot u_m \cos \sigma. \quad (12)$$

式(11)中的  $f_w$  为波浪摩阻系数,取 0.01;  $u_m$  为底部波浪质点运动最大水平流速,其表达式为

$$u_m = \frac{\pi h}{T} \frac{1}{\sinh(2\pi h/L)}, \quad (13)$$

①BIJKER E W. Littoral drift as function of waves and Current. Proceedings of the 11th Coastal Engineering Conference. London, UK. 1968:415-435.



式中,  $T$  为波浪周期;  $L$  为波长。

代入可得摩阻流速为

$$U_* = u_{w*} = \sqrt{f_w/2} \cdot \frac{\pi h}{T} \frac{\cos \sigma t}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (14)$$

由此, 联合式(8)、式(9)与式(14)可得泥沙垂向浓度的表达式。

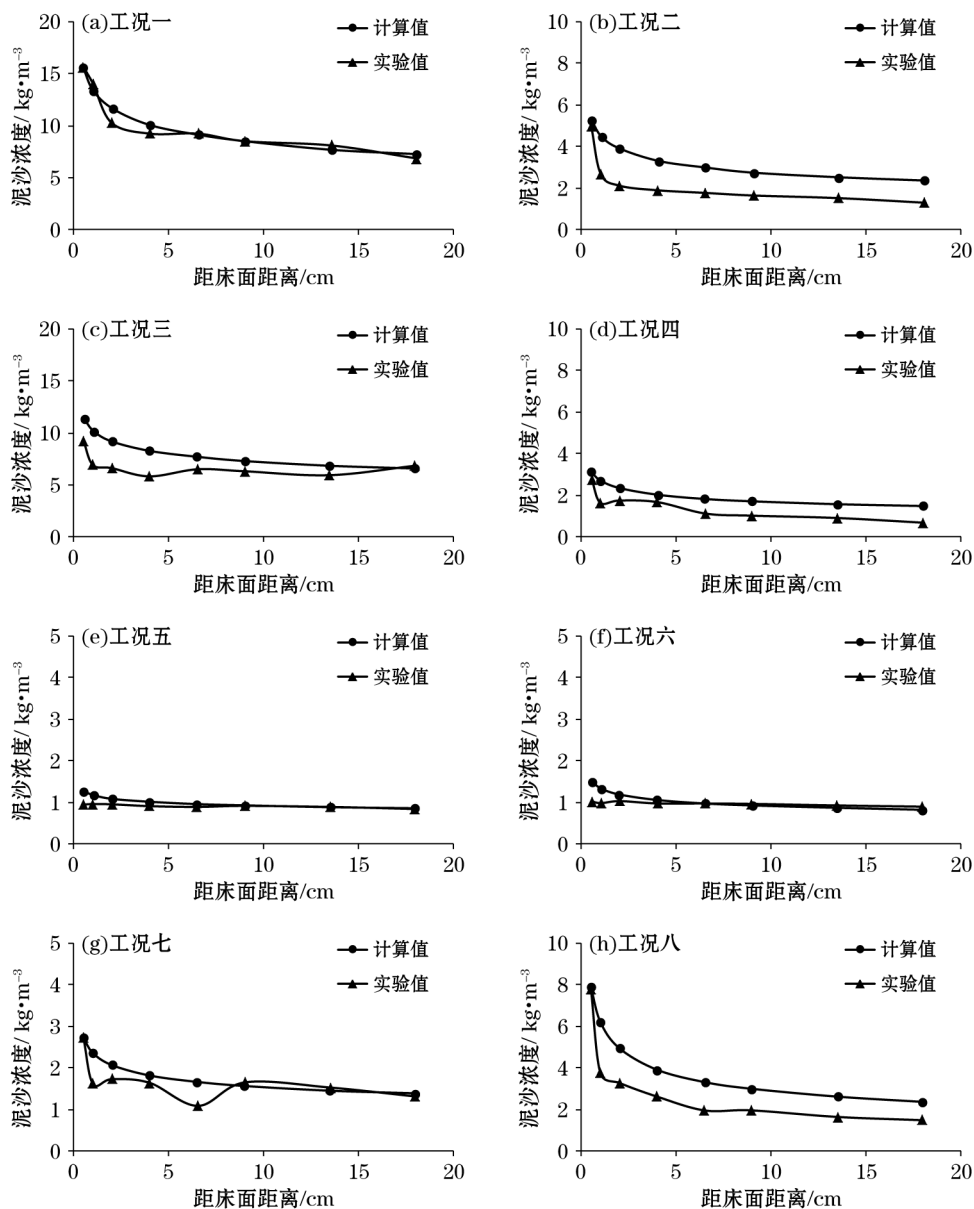


图 11 工况一至工况八的含沙量垂线分布计算值与实测值的比较

Fig. 11 Comparison between the calculated and the measured vertical distributions of the sediment concentration in Case 1~8

在本次水槽实验中,每个工况最后一次测量时泥沙浓度变化属于稳定状态,将其作为波浪作用下浮泥起扬的浓度。将此工况中测得的浊度数据全部转换为泥沙浓度,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。公式(8)中的 $a_1, a_2$ 为系数,与泥沙级配有关,可根据图2所示级配曲线中的分选系数,令 $a_1 = d_{85}/d_{15} = 15, a_2 = d_{15}/d_{85} = 1/15$ ,并将其代入式(8)中,以此计算泥沙垂向浓度分布,并将计算值与实验数据相比较,所得结果如图11所示。

由图11可知,在工况一、五、六和七中理论与实验结果基本相符,在工况二、三、四和八中,理论值较实验值偏大,但两者趋势一致,其偏差量在可接受的范围之内。因此,整体上来看,理论分析与实验结果的吻合情况较好,理论结果应具有一定的实用价值。

### 3 结 论

本文在水槽试验中,通过造波机产生的波浪,在实验工况中改变波浪频率、波浪幅度、浮泥层厚度及水槽水深等实验条件,探讨了多种工况条件下波浪引起浮泥悬扬后的泥沙浓度的垂线变化特性。

研究结果表明,水深对泥沙浓度的变化具有重要影响,在一个较浅水深(18 cm)条件下,从随时间变化来看,近底层(0.5 cm)的浓度变化最大,离床面越远,浓度随时间的变化越小;从随高度变化来看,离床面越近,达到平衡状态的泥沙浓度越大。而在一个较大的水深(24 cm)条件下,泥沙浓度的变化趋势与前者并不相同,其浓度变化规律不明显,每个位置的浓度变化都很小,大致趋势为:离床面较远处的浓度相对越来越大,离床面越近处的浊度相对越来越小,整个断面的浓度分布有平均化的趋势。其他参数,如波频、波幅、浮泥层厚度等也对浮泥悬扬有一定影响,会改变浓度值的大小。

进一步的探讨中,在考虑悬浮泥沙颗粒级配对泥沙扩散系数影响的基础上,提出了泥沙浓度垂线分布公式,对比分析了8个工况下的理论计算与实验测量值,理论计算与实验值的变化趋势相符,偏差量在可接受的范围内。因此,本文所获得的结果具有一定的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] YANG Y P, LI Y T, SUN Z H, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(1): 129-142.
- [2] 徐福敏, 曹玉洁. 边抛疏浚浮泥对河口地区航道淤积的影响[J]. 泥沙研究, 2004(4): 52-56.
- [3] 刘建华, 陈沈良, 杨世伦, 等. 长江口门附近海域潮周期内悬沙质量浓度变化及其动力机制探讨[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2): 188-199.
- [4] 徐琦琳, 高抒, 王文昊, 等. 典型潮汐水道悬沙浓度的潮控机理模拟分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 646-655.
- [5] MASON B, YE H. Sediment response to tsunami loading: mechanisms and estimates[J]. Geotechnique, 2014, 64(2): 131-143.
- [6] 苗丽敏, 杨世伦, 朱琴, 等. 风暴过程中潮滩悬沙浓度和悬沙输运的变化及其动力机制[J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 158-167.
- [7] SHEREMET A, MEHTA A J, LIU B, et al. Wave-sediment interaction on a muddy inner shelf

- during Hurricane Claudette[J], *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(1-2):225-233.
- [8] 程永舟, 蒋昌波, 潘昀, 等. 波浪渗流力对泥沙起动的影响[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2):256-262.
- [9] 洪柔嘉, 应永良. 水流作用下的浮泥起动流速试验研究[J]. *水利学报*, 1988(8):49-55.
- [10] 郭龙先, 喻国良. 压力脉动对浮泥悬扬影响的实验研究[J]. *海岸工程*, 2012, 31(2):21-30.
- [11] KAJIURA K. A model of the bottom boundary layer in water waves[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1968, 46:75-123.
- [12] 张瑞瑾. 论重力理论兼论悬移质运动过程[J]. *水利学报*, 1963(3):11-23.

## Characteristics of the Suspension Concentration of Bottom Fluid Mud Under the Actions of Different Waves

ZHANG Rui-zhi, CHEN Ke, YU Guo-liang, HU Tian-qun

(*School of Naval Architecture, Civil and Ocean Engineering,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract:** In order to obtain the distribution characteristics of the concentration of bottom fluid mud resuspension caused by the actions of different waves, the sediment concentration in the water is determined by using the method for turbidity determination with a turbidimeter. By changing the water depth, the fluid mud thickness and the frequency and amplitude of the wave maker in the flume experiments, the variations of the concentration of the suspended sediment in the flume as well as the influences of the water depth, wave frequency and amplitude and fluid mud thickness on the resuspension of the bottom sediment are all observed, and then the vertical distribution features of the suspended sediment concentration are analyzed. The results from the experiments have show that the water depth exerts the most significant influence on the resuspension of the bottom sediment, and that the effects of other experimental parameters are not very significant. By the analysis of vertical sediment transport equilibrium, a theoretical formula which can describe the vertical distribution of the fluid mud concentration is work out and verified by using the flume experimental data. The results show that the curves obtained by using the theoretical formula have a consistent changing tendency with those resulted from the experimental data, with the exception that in some cases the theoretical values are slightly higher.

**Key words:** fluid mud; resuspension; turbidity; wave parameters; sediment transport formula