

波浪作用下细颗粒泥沙悬移特性的试验研究

韩丹岫¹, 庞重光², 李广伟³

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:通过 9 组室内水槽试验, 系统分析了不同周期和波高波浪作用下粉砂质细砂的悬移特性。试验结果表明, 在波浪作用下, 细颗粒泥沙在水中悬浮产生明显的三层混浊结构: 近底高浓度混浊层、中部混浊层和上部低浓度混浊层。其混浊度的大小与波浪动力条件相关, 波浪周期的延长和波高的增加都会使近底层悬沙浓度显著增大, 悬沙浓度的波动性在近底层表现得最为突出和复杂; 波浪动力条件的改变对上层水体的悬沙浓度基本不产生影响。当波浪作用停止, 悬沙开始静水沉降时, 近底层水体含沙浓度的变化与波浪要素的比值相关, 当波浪要素的比值大于临界值时, 底层含沙浓度在一定时间段内反而增加, 出现浓度返起现象。

关键词:波浪; 细颗粒泥沙; 悬移特性; 三层混浊结构

中图分类号: TV142

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2008) 06-0046-06

波浪作用下的泥沙运动一直为国内外专家学者所关注, 研究内容主要集中于不同粒径泥沙颗粒的起动机理以及沙粒运动对海床的影响方面^[1~4], 一些学者也针对波浪作用下泥沙的悬移特性作了分析^[5~10]。研究表明, 粉砂质悬移质从扬起到沉降可以分为 3 种型式: 悬扬型、稳定型和沉降型^[6]。含沙量在垂向上的分布一般为上小下大的形态, 其均匀程度受波浪、潮流和泥沙粒径大小等因素共同制约^[10], 个别情况还会出现底部沙粒倒分布的现象^[2]。

近底层泥沙是推移质与悬移质相互转化的过渡区^[2], 也是泥沙颗粒的扬动悬浮过程的关键, 因而这一层泥沙颗粒运动特性一直受到人们重视。对于砂质床面和粉砂质床面的河口海岸地区, 泥沙易在波浪作用下起动并进入悬浮状态^[8]。这时近底床处的悬移质含沙量较大, 由于这部分泥沙颗粒的粒度较粗, 沉降速度较大, 在水动力条件减弱时会快速沉积, 所以易于造成航道的淤积或海岸带的侵蚀。因此, 研究波浪作用下悬浮泥沙, 尤其是近底层悬浮泥沙的运动、输移规律, 对航道工程和海岸工程都有十分重要的意义。

借助大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室的浑水水槽进行试验, 并分析了不同周期和波高波浪作用下, 水体中泥沙颗粒尤其是近底层水体泥沙颗粒的悬浮特性, 包括垂向各水深的含沙量与波要素关系, 沙粒在各种波浪条件下的运动特性, 以及波浪停止作用后, 悬浮颗粒的静水沉降特征等。

1 试验概况

室内实验水槽长 56 m, 宽 0.7 m, 最大水深 0.7 m, 水槽进水端配有美国 AOC 公司造波机, 以产生规则波, 尾端设有消浪网箱(图 1)。中间段装有 7 个间距为 2 m 的波高仪, 1 个流速仪和 5 只浊度计, 浊度计间隔 5 cm 纵向排列, 测量水体垂向剖面的悬移质浓度。整套系统采用计算机控制并进行数据采集。试验采用规则波和椭圆余弦波, 周期分别为 1, 1.5 和 2 s, 实验段水深为 30 cm, 设于水槽中后部以得到稳定的波浪, 铺砂段长 10 m, 沙厚 0.15 m, 两侧为 1 m 长水泥台和 2 m 的斜坡, 以便减少波浪变形。试验底质采用标准石英砂, 粒级为粉砂质细沙, 按照不同的波浪要素配置共进行 9 组实验。

造波开始前缓慢向水槽注入清水, 使试验段水面至底床表面 30 cm, 自然淤沉 24 h, 之后进行造波试验。按设定的波浪要素造波, 稳定加载约 2 h。直接输入计算机的数据记录有: 波高仪采集的实际波高, 流速仪测定的近底流速, 浊度仪采集的电压值, 采样间隔均设为 0.1 s。波浪载荷停止后, 波高、近底流速的数据采集停止, 浊度纪录再持续 1 h。

收稿日期: 2006-04-24; 修回日期: 2008-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40406025)

作者简介: 韩丹岫(1979-), 女, 辽宁丹东人, 博士生, 主要从事物质输运研究, E-mail: danxiuh@yahoo.com.cn; 庞重光, 通讯作者, E-mail: chgpang@ms.qdio.ac.cn

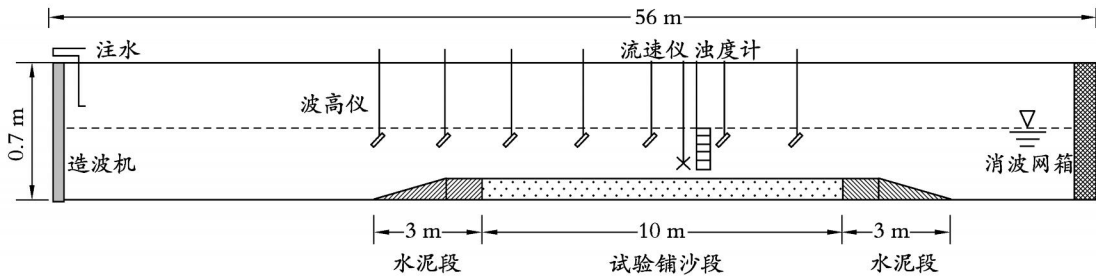


图1 波浪水槽和测量仪器示意图

Fig. 1 Layout of wave flume and the apparatus

波浪作用下的床面水质点运动是近似对称的往复振动,泥沙颗粒也作相应运动,对于线形波在一个波周期内,正反方向输沙量基本相等,净输沙量为零^[3],即波浪对底质的净作用较小。所以为了取得明确的试验结果,本次试验着重进行长周期波浪(2 s)的实验,为验证其可靠性进行了2组造波条件相同的对比实验,分别是实验2和5,实验8和9。为作对比,又分别进行了1.0 s和1.5 s两个较短周期的实验,分别是实验1和实验4。各组实验的造波波高和周期如表1所示。

2 实验现象与分析

2.1 实验现象

试验中,浊度计1~5号通道分别测量距底5,

10,15,20和25 cm水深处的电压,根据对各通道浊度计的标定将电压值转化为浓度值。

短周期($T = 1$ s)波的实验4(图2d),当造波开始后,底床泥沙随着强烈振荡的水质点迅速起动,并在近底处形成浓度非常高的混浊层,其中较细的颗粒很快向上扩散至整个水体。波浪作用约18 min后,高浓度混浊层不再继续向上发展,水体中呈现出稳定的三层混浊结构:近底高浓度层,中部层和上部低浓度层。随后,由于床面沙纹地形的起伏增加,近底层浊度计触底,浓度突然剧增;经手动调整浊度计位置后,浊度计整体抬高约0.5 cm,底层浓度恢复正常。然而,由于浊度计位置被抬高,所以所测底层浓度小于调整前。

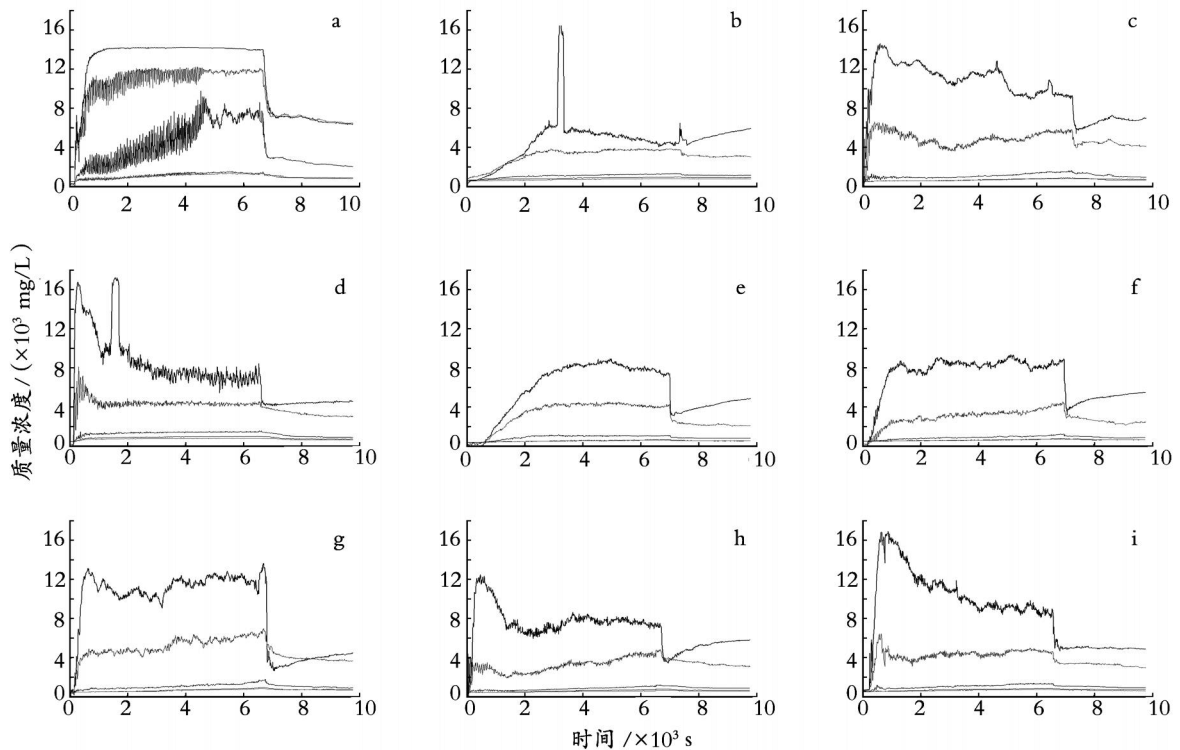


图2 悬沙质量浓度过程曲线

Fig. 2 Curves of suspended sediment

长周期 ($T=2\text{ s}$) 波的 7 组试验 (实验 2, 5, 6, 7, 3, 8, 9), 波浪加载初期, 细颗粒底质即会产生比较明显的运动, 随着加载时间的延长, 均形成了类似实验 4 的 3 层混浊结构: 波浪作用较小时, 在近底层可以看到高混浊变性水 (由于其黏滞性增加) 呈絮团状来回摆动, 其中较细的颗粒上扬扩散至上层水体; 波浪作用较强时, 沙粒全面上扬, 并向上扩散形成更厚、更浓的浑水层, 有时隐约可见 4 层混浊现象, 在底高混浊层中出现浓度更高的类浮泥层。这 7 组试验, 近底高浓度混浊层的厚度均大于短周期波, 约 3~5 cm。

波高较小的实验 2 和实验 5 ($h=12\text{ cm}$), 近底床泥沙颗粒从起、悬浮发展至一相对稳定的浓度, 经历了约 50 min 的时间。随着波高的增加, 近底高浓度混浊层达到相对稳定状态的时间逐渐缩短, 实验 6 试验波高为 15 cm, 达到这一稳定状态的时间约为 20 min; 其他 4 组波高为 17, 18, 20 和 20 cm 的试验, 波浪载荷开始作用后近底泥沙颗粒立即起、悬浮, 水体混浊度很快达到最大值并趋于稳定, 或略有所下降而后稳定。说明波高越大, 水体中悬沙浓度达到最大值的历时越短。

2.2 悬沙质量浓度分析

实验段设有 3~7 号 5 个波高仪通道。一般前端波高仪测定的波高大于后端, 波高的能量损失主要包括 3 个方面^[11]: (1) 沙质床面的密实程度引起的波高衰减, 称为渗透损失; (2) 床面对波浪水流的摩阻引起波高衰减, 称为摩阻损失; (3) 波高仪、流速仪和浊度计的安放间距产生的消波作用, 称为阻力损失。由 0.5 h 的平均实际波高曲线可以看出 (图 3), 5 号、6 号波高仪处波浪衰减程度最大, 7 号通道所测波高有所增强, 这是由于波浪在水槽尾部被反射, 与造波机传来的正向波反复叠加而形成的。本文取 3 号、4 号通道的波高平均值作为各组试验的实际波高 (表 1)。

波浪作用下悬移质运动的过程曲线相当复杂, 根据不同的波浪周期和波高, 呈现不同尺度和形态的周期性变化。图 4 细致地描绘了稳定状态下 1 min 内, 不同垂向深度处悬沙颗粒随波浪运动的情况。可以看出, 近底层悬沙浓度 (1 号通道) 的波动特性最为复杂。由于近底层高混浊层的厚度较小, 一般为 2~5 cm, 与由于波浪作用形成的近底层水体的起伏高度大致相同, 所以在波浪荷载的作用下, 近底层悬沙浓度在一个波浪周期内从小到大又从大到

小, 分别代表底混浊层内从上到下又从下到上的浓度。当造波周期为 2 s 时, 近底层悬沙浓度的波动周期亦为 2 s 与波浪周期完全相同, 作规则振荡, 如图 4b 所示。当造波周期为 1 s 时, 由于其周期短, 水槽中的波浪不仅前后传播, 而且左右摆动严重; 近底层悬沙浓度的波动周期不仅仅是规则的波浪周期 1 s, 而是造波周期 1 s 和摆动周期的叠加, 由于摆动周期不稳定, 所以近底层悬沙浓度的波动不规则, 周期有大有小, 如图 4a 所示。对于中下层水体的悬沙浓度一般呈现与近底层水相同的脉动特征, 波峰、波谷的相位基本一致; 而上层水体的含沙量已经很小, 长、短周期波对悬沙浓度都不产生影响。

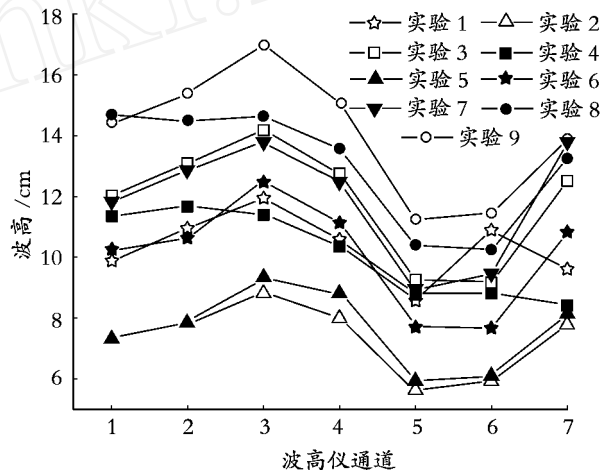


图 3 各通道 0.5 h 平均波高曲线

Fig. 3 Curve of average wave height in seven channels

本文计算了稳定状态时不同波浪要素作用下悬沙浓度沿水深的分布。由图 5 可见, 悬沙质量浓度的垂线分布仍呈上小下大的形态。随着波浪作用的加强, 底流速随之加大, 各水深处的悬沙浓度基本呈增大的趋势, 特别是在近底层, 浓度的增加更为显著, 即浓度的垂向梯度增量较大。实验中, 波高和周期的加强并未使上层水体的含沙浓度发生大的改变, 也就是说, 越贴近床面, 沙粒对波浪要素的改变越为敏感。另外, 悬沙粒径的大小同样影响水体含沙浓度^[12], 一般颗粒越细, 越容易克服自重而起动悬浮, 所测浓度越大 (表 1), 但对于粒径相差不大的泥沙, 波浪对浓度的控制作用占主导地位。图 5 中显示, 在 $T=2\text{ s}$, $H=20\text{ cm}$ 的最强波浪作用下, 悬沙浓度并不是最大的, 主要是由于进行实验 8、实验 9 两组实验时, 强烈的水动力使下端浊度仪触底, 整体抬高浊度仪后的测量水深偏小而造成的。但水体混浊度随波浪动力的加强而增大的规律并未改变。

表 1 波浪作用下悬沙试验资料及测量结果

Tab. 1 Data of the experiment for the suspended fine sand and the test result

组次	水动力条件				中值粒径 (mm)	悬移质状态			
	周期 (s)	设计波高 (cm)	实际波高 (cm)	近底流速 (cm/s)		最大浓度 时间(min)	距底 5 cm 浓度(g/L)	距底 10 cm 浓度(g/L)	距底 15 cm 浓度(g/L)
实验 1	1.5	20	11.28	14.05	0.115	11.47	14.06	11.64	6.81
实验 2	2.0	12	8.44	9.24	0.198	47.2	5.30	3.66	1.19
实验 3	2.0	18	13.48	11.98	0.150	10.67	10.44	4.87	1.17
实验 4	1.0	18	10.90	10.59	0.167	6.67	7.04	4.33	1.48
实验 5	2.0	12	9.09	9.86	0.202	53.3	8.36	4.36	1.15
实验 6	2.0	15	11.83	11.61	0.199	19.47	8.51	3.41	0.96
实验 7	2.0	17	13.15	11.96	0.131	11.2	12.02	5.86	1.28
实验 8	2.0	20	14.11	13.44	0.183	6.67	7.86	3.85	1.00
实验 9	2.0	20	16.00	14.80	0.191	10.67	9.12	4.54	1.25

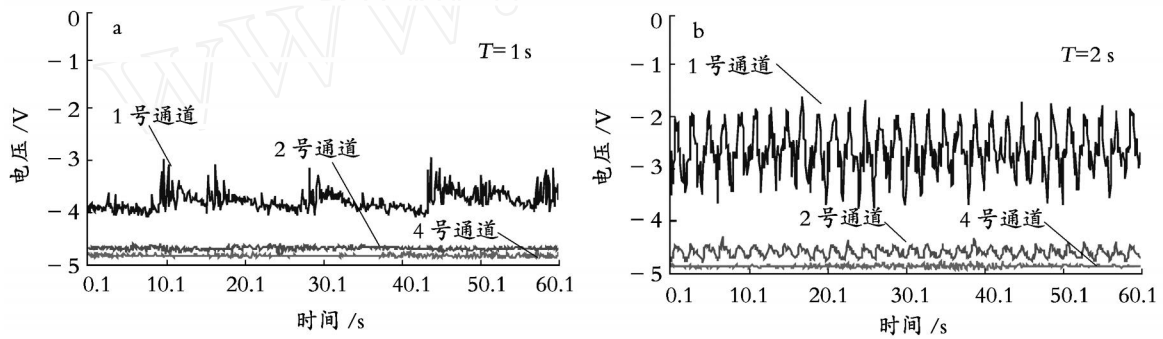


图 4 1 min 悬沙浓度曲线

Fig. 4 Curves of suspended sediment in one minute

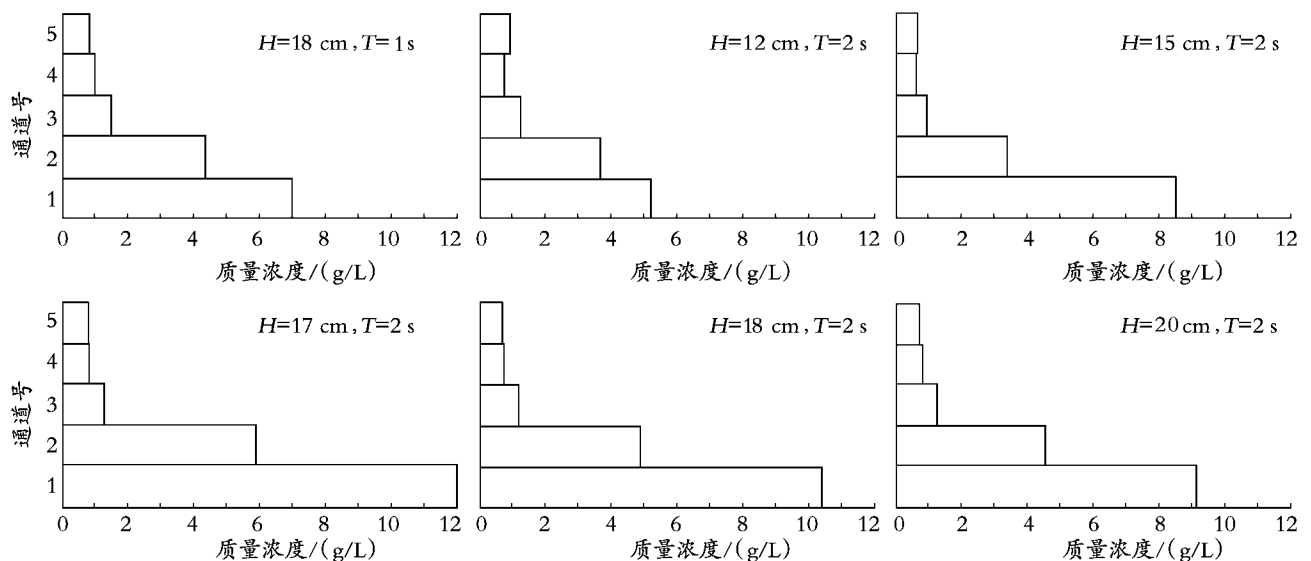


图 5 不同波浪要素作用下含沙量沿水深分布

Fig. 5 Distribution of mean suspended sediment concentration under different wave elements

3 悬沙的静水沉降分析

从各组实验的悬沙浓度过程曲线(图 2)可以看出,当波浪载荷停止作用后,近底悬沙颗粒迅速沉降,高含沙水层随即消失,而其上的各层水体,悬沙浓度在较长时间内不产生变化或降低较少。这是因为悬沙浓度的垂向分布随泥沙粒径的不同而变化,越靠近底床沙粒越粗,静水沉降时,粗颗粒沙的自重重力大于细颗粒,因而近底高浓度层迅速下降消失,上层水体悬沙粒径细,静水沉降速度相对较慢,浓度在较长时间内变化不大。

值得注意的是,其中几组实验,当近底层悬沙浓度降至一定值后,浓度停止降低反而产生不同程度的增大,称为浓度返起现象。该现象的产生可能是由于在中下层水中,悬沙粒径较细,当失去波浪的推力、上举力以及惯性力后^[2],逐渐下沉并与近底层较粗的沙粒混合,较细颗粒产生了絮凝现象^[13],使得处于分散状态的粗颗粒置于絮凝结构中,减缓了粗颗粒的下沉速度。随着静水沉降时间的延长,上层水体的细颗粒进一步降落,絮凝作用不断加强,在一定时间段内,近底含沙量就表现为浓度的不断增高。

作者比较了所有组次的实验,发现返起现象与波浪周期、波高的比值有一定的关系(表 2):比值小于 0.1 的实验 1 和实验 4,沙粒沉降后保持在相对稳定的浓度值;比值大于 0.1 的 5 组实验均有浓度反起现象;而比值恰为 0.1 的两组实验,实验 8 浓度返起,实验 9 浓度稳定。这就说明,对于一定粒径级配的床沙(本次为粉沙质细沙),其波浪荷载的周期和波高比存在临界值,大于该比值,沙粒在波浪荷载停止作用的静水沉降过程中,会出现底层浓度返起现象,小于该比值沙粒的静水沉降平稳,在该比值附近,悬沙的静水沉降过程可能发生浓度反起现象,也可能不发生。这里的波浪荷载的周期和波高比,代表了波浪荷载的强度,而波浪荷载的强度决定了水体中悬沙的粒径级配情况,即水体中悬沙的级配情况决定了其静水沉降时是否会出现浓度返起现象。本试验只作了 9 组,而且只针对一类泥沙底质进行实验,因而无法给出对于 30 cm 水深,波浪载荷作用后悬沙沉降的准确波要素临界比值。

表 2 近底悬沙静水沉降与波要素比值关系

Tab. 2 Settling phenomena of the near bed sand and the ratio of wave elements after the wave action

实验编号	T/H	静水沉降现象
1	0.075	稳定
2	0.167	返起
3	0.111	返起
4	0.055	稳定
5	0.166	返起
6	0.133	返起
7	0.118	返起
8	0.1	返起
9	0.1	稳定

4 结论

波浪作用下的细沙颗粒底质,经水流启动后发生悬移,并在水体中产生明显的三层结构,分别是:近底高浓度混浊层、中部混浊层和上部低浓度混浊层。各混浊层的发展速度和厚度与波浪要素有关,稳定后层厚基本保持不变。

水体中悬移质浓度与沙粒的粒径和波浪要素相关,一般沙粒越细,浓度越大,波高和周期越大,浓度越大。近底层的悬沙浓度对波浪要素最为敏感,波高或周期的改变直接影响其浓度值的大小,水体越向上,波浪对浓度的影响越小。

悬沙浓度表现出类似波浪水质点的波动性,且这种性质随水深的增加而显著。

悬沙颗粒的运动主要受波浪周期的控制,长周期波控制下的沙粒振幅大于短周期波,其运动也更加稳定。越靠近底层,沙粒的脉动性特征表现的越明显、越复杂。

对于本试验所采用的粉沙质细沙,存在一周期和波高的临界比值,影响沙粒的静水沉降过程。大于该比值,浓度在一定时间段内出现返起,小于该比值沉降平稳。

参考文献:

[1] 窦国仁, 窦希萍, 李禔来. 波浪作用下泥沙的起动规律[J]. 中国科学, 2001, 31(6): 566-573.

- [2] 刘青泉,周济福,舒安平. 床面附近泥沙运动的分析 [J]. 水科学进展, 2003, 14(5):569-575.
- [3] 周益人,肖惠兴,潘军宁,等. 波浪作用下太湖底泥试验及航道回淤分析 [J]. 湖泊科学, 2003, 15(4):305-312.
- [4] 赵冲久,秦崇仁,杨华,等. 波流共同作用下粉沙质悬移质运动规律的研究 [J]. 水道港口, 2003, 24(3):101-108.
- [5] 高亚军,窦希萍. 波浪作用下细颗粒泥沙密实起动试验 [J]. 水利水运工程学报, 2004, 1:49-52.
- [6] 练继建,赵子丹. 波浪作用下软泥床面的粘性泥沙悬扬 [J]. 水利学报, 1998, 8:47-51.
- [7] 曹文洪,张启舜. 潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力的研究 [J]. 泥沙研究, 2000, 5:16-21.
- [8] 赵冲久,秦崇仁,黄明政. 波流共同作用下近底高含沙水层流速的探讨 [J]. 水道港口, 2005, 26(3):12-16.
- [9] Van Rijn L C. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland [J]. *Coastal Engineering*, 1997, 32(1):61-90.
- [10] Miles J R, Russell P E, Ruessink B G., *et al.* Field observations of the effect of shear waves on sediment suspension and transport [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(4):657-681.
- [11] 白玉川,胡世雄,金玉石. 泥质床面上波浪衰减规律的研究 [J]. 水利学报, 2001, 11:56-61,69.
- [12] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京:科学出版社, 1986.
- [13] 詹咏,王惠明,曹小为. 泥沙沉降速度研究进展及其影响因素分析 [J]. 人民长江, 2001, 32(2):23-24.

Experimental study on characteristics of suspended fine sediment under wave-loading

HAN Dan-xiu¹, PANG Chong-guang², LI Guang-wei³

(1. Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Received: Apr., 24, 2006

Key words: wave; fine sediment; suspension characteristics; three-concentration layers

Abstract: The transportation mechanism of suspended sediment with wave load is very important for the navigational and coastal engineering in the sea water, especially in the near-bottom layer. The motion characteristics of suspended fine sediment with different wave loads are conducted based on 9-set flume experiments. The results of experiments show that sediment concentration is consistent with wave height and period which appears three-concentration layers: high-concentration near-bottom layer, middle layer with medium-concentration and low-concentration upper layer in the water. Sediment concentration near the bed is obviously higher while wave period is longer, and wave height is larger. The fluctuation behavior of sediment concentration responding with wave property is evident and complicated in a certain water layer near the bed, while the fluctuation behavior are quite weak in the upper layer beyond the bed. The settling pattern of suspended sediment in the still water after wave load is affected by the ratio of wave elements between period and height. When the real ratio is larger than the threshold value of 0.1, sediment concentration in the near-bottom layer would increase rather than decrease within a certain time period.

(本文编辑:刘珊珊)