

随机波浪作用下底层水沙运动的试验研究

牛建伟, 徐继尚, 董平*

(中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要:通过一系列室内水槽试验,对规则波与不规则波浪荷载作用下的粉土质海床内的孔隙水压力、底层悬沙浓度以及底层水体流速的变化进行了比较分析。结果表明:波浪荷载的能量分布对床土的响应强度有着重要影响,尤其低频(大周期)部分的影响尤为强烈;随着超孔隙水压力累积,进而影响到底层悬沙浓度的变化;悬沙颗粒的结构和性质同样随着水动力的变化而变化,不同强度的水动力通过影响颗粒的絮凝特性而影响到悬沙颗粒的沉降和悬浮。另外,随机波浪所伴随的较强的非线性作用同样影响着悬浮体的絮凝与解体,这大大加剧了细颗粒沉积物的悬浮、运动的复杂性。

关键词:随机波;超孔隙水压力;底层悬沙浓度;底层流速

中图分类号:P229.5

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)02-0017-12

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2017.02.003

三角洲、缓陆坡等快速沉积环境中,沉积物松散程度较高,波浪与海床交互作用强烈。波浪与海床的交互作用是非常复杂的物理过程,一方面,由于细颗粒土的排水条件差,当波浪达到一定程度时,海床很容易由于超孔隙水压力累积而导致海床强度减弱、甚至丧失;而另一方面,波浪等水动力作用下的床土体的变化,如渗流性、土体颗粒组成和结构、孔隙比以及强度特性的变化,也在不断地影响着底层水动力以及底层悬沙的运动。

近几十年来,波浪与海床交互作用的研究重心从单独考虑波致床土响应或者波浪和水流剪切引起的泥沙起动及海床侵蚀,逐渐转移到波浪-海床耦合动力过程的研究。波致床土响应的研究,从传统的规则波浪作用下的超孔隙水压力累积及海床失稳机制^[1-10],逐渐拓展到了随机波浪。Sassa 等通过野外的调查暴风浪条件下的超孔隙水压力的累积和消散过程,发现床土的不稳定性与随机波浪的波群特征密切相关^[11]。Liu 和 Jeng 通过参数分析法,对比了不规则波浪和相应规则波浪荷载作用下瞬时孔隙水压力的变化,并指出不规则波浪作用下的土体响应强度要超过对应规则波^[12]。Xu 和 Dong 基于双层非黏性流体模型,分析了随机波浪对液化的影响,模型的结果表明相同波高条件下,不规则波产生的液化深度大大高于规则波,且波浪序列的中大波对孔隙水压力的响应起主导的作用^[13]。这些研究表明,随机波浪作用下的床土体的响应要强于对应规则波浪。与此同时,床土体的变化对悬浮泥沙的影响的研究也在进行。Maa 和 Mehta 首先确认黏性沙质海床中的波致超孔隙水压力的累积会促进床土的侵蚀和悬浮,尤其床土液化之后,向上的渗流作用力对床土颗粒的搬运作为非常得强烈^[14]。Tzang 和 Ou 通过水槽试验得出,一段时间的波浪作用后,粉质床体表面的细颗粒物质进入悬浮体,土体表层形成液化层^[15],之后,进一步通过水槽试验分析了液化过程中悬浮泥沙(细沙)对其的响应^[16]。孔亚珍和朱传芳发现,在水槽实验波浪条件下,垂向上的悬浮沉积物质量浓度随水深增加而增大,而且悬浮沉积物质量浓度的增加幅度远大于只有水流作用下的情况^[17]。Jia 等利用黄河口潮滩的土体进行了一系列的水槽试验,分析了粉质海床中床土液化与沉积物颗粒再悬浮之间的关系,并尝试给出二者之间的定量关系^[18]。不过,这些研究都以规则波浪为试验条件,对床土响应更为强烈的随机波

收稿日期:2017-02-26

资助项目:国家自然科学基金项目——波浪水流联合作用下粉土海床液化和泥沙运动耦合动力过程(51479182)

作者简介:牛建伟(1991-),男,硕士研究生,主要从事河口及近海工程方面研究。E-mail: jianweiniu2014@163.com

* **通讯作者:**董平(1958-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事海洋泥沙动力运动过程、海岸动力地貌演变预报和海岸防护工程等方面研究。E-mail: p.dong@dundee.ac.uk

(王 燕 编辑)

浪的试验较为缺乏。

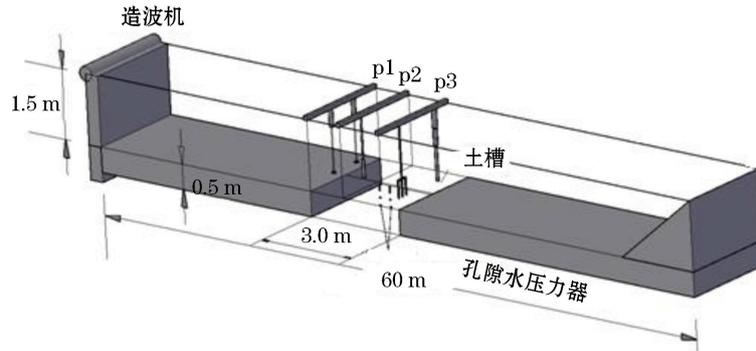
本文通过研究波浪作用过程中的水动力、底层悬沙浓度以及床土表层孔隙水压力的变化来探索波浪与海床交互作用过程及其对悬沙浓度变化的影响,并通过直接对比的方法来探讨规则波与不规则波浪对海床及悬沙浓度变化的不同影响。

1 实验设计

1.1 实验装置与仪器

1.1.1 波浪水槽

该实验是在中国海洋大学海洋工程重点实验室的宽断面波流水槽中(图 1)进行的。实验水槽尺寸为长 60 m,宽 3 m,高 1.5 m;造波机为活塞式液压驱动;距造波机 38 m 处有一土槽,尺寸为长 3.0 m,宽 3.0 m,深 0.5 m,距离消波区 15 m。消波区的斜坡坡比为 1:3,上覆吸波材料用来消除波浪反射。孔隙水压力传感器由南京水利科学研究所研发,分布于土槽中线 $z=5, 10, 15, 30, 45$ cm 处(本文中 $z=0$ 为泥面位置, z 轴向下为正值,向上为负值)。



注:p1 为测波计;p2 为 HR-ADCP;p3 为 ASM(右)和抽水器(左)

图 1 实验布置图(3D)

Fig.1 Arrangement of the experiment: 3D view

土槽由水泥墙面组成,试验土体置于其间。土样未填入之前,预先埋入钢筋支架并将传感器预先固定。实验中采用的波高仪为杆状电容式波高仪,实验过程中水体垂向流速用高频声学多普勒流速仪(HR-ADCP)获得,测量范围为底床往上至探头高度以下 0.1 m(仪器盲区),采样频率 1 Hz,分层厚度 1 cm,底床以上及水面以下 1 cm 为测量盲区。悬沙浓度则由 ASM-IV, AQUAScat1000 以及水样采集器来测量,得到具有高时空分辨率的悬沙浓度数据。ASM-IV 采集频率为 1 Hz,测量范围为底床至水面, AQUAScat1000 测量范围为底床至探头水面以下 5 cm,采样频率 8 Hz,数据采集频率 1 Hz,分层厚度 1 cm。水样采集器 3 个(1 号、2 号、3 号),每个采集器有 3 个进水口,位于不同深度,深度值可以调节,取水时间为每次造波开始的 3,6,9,12,17 和 20 min,波浪停止后的第 3 和 6 min。

1.1.2 土床制备与初始状态

试验用土取自黄河口潮间带的泥滩,主要碎屑矿物包括长石、石英、白云石、方解石,约占矿物总组成的 75%。黏性矿物的组成有绿泥石、伊利石、蒙脱石和高岭石,约占总矿物组成的 24.2%,另外还有部分有机质组分。

泥滩沉积物经晒干碾碎后筛去碎石杂质,制备成实验用土。实验的时候再加一定比例的水,搅拌,形成重塑粉土,以保证实验的可重复性。底床制备总体上可以分为以下几个步骤:取土、晒土和筛土、搅土、填土、

固结。搅土采用直立式搅拌机,主要是考虑在搅拌过程中能够尽量地减少搅土中的空气含量。土体达到预定状态之后,土体比沙坑四周边缘高出 1~2 cm,后期固结将会使土体厚度降至与沙坑上边缘平齐的位置。

试验土体的中值粒径 d_{50} 为 0.037 mm,有效粒径 d_{10} 为 0.007 8 mm, d_{90} 为 0.075 2 mm,黏粒含量 7.9%;土体曲率系数 C_c 为 9.22,不均匀系数 C_u 为 3.35,土体颗粒较为均匀性质较稳定(图 2)。土体特性见表 1。黏粒含量 CC 指土体颗粒中黏粒含量所占的百分比(黏粒:粒径小于 0.005 mm 的颗粒^[19])。粒度总的几何标准差 SD 为 1.733,计算为 $\sigma_g = d_{84}/d_{50}$ 。 k_0 为土体侧向静压力系数,代表土体水平和竖向有效应力的比值,其中 $k_0 = 1 - \sin \varphi$, φ 为土体内摩擦角^[20]。 s 为土颗粒比重,计算公式为 $s = \gamma_s/\gamma_w$ 其中 γ_s 和 γ_w 分别为土颗粒和水的容重。

为了保证土体性质接近于野外,底床在空气中固结 5 d 后,水槽中加入预定水位的水,继续固结 5 d 左右,达到实验前的初始状态。土体固结过程中,孔隙水和空气被排出,孔隙率降低,土体强度增加,土体性质更加均匀(图 3)。从图中可以看出,刚刚搅拌好的试验土体放入土槽中时,上、下部分的土体含水率要大大高于土体中部(排水速度差异),随着时间持续,整个深度范围内的含水率逐渐接近。

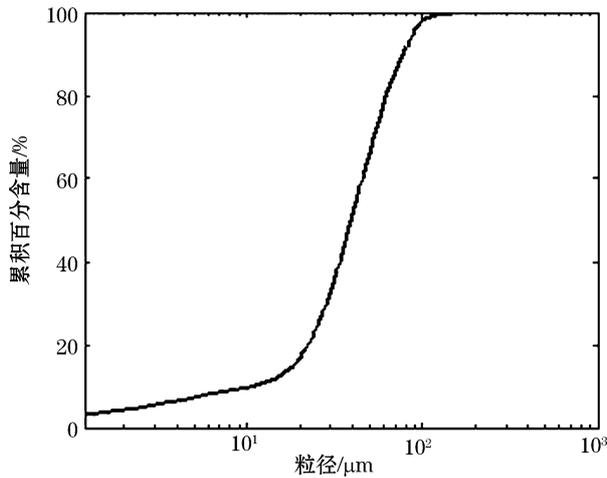


图 2 试验土体颗粒的粒径分布

Fig.2 Grain-size distribution of the sediment used for the experiments

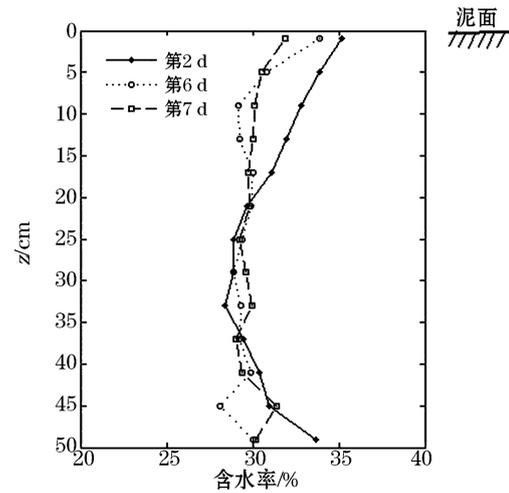


图 3 固结过程中土体含水率变化

Fig.3 Changes in moisture content of the tested sediments during the consolidation

表 2 给出土体固结前后物理性质的变化。固结前后,土体密度分别为 1.86 和 1.92 g/cm^3 ;含水率分别为 38% 和 30%;孔隙比 e 从 1.011 降低至 0.835,饱和度 S_r 从 1.000 降低至 0.970,而饱和密度分别从 1.850 g/cm^3 增加至 1.932 g/cm^3 ;土体对应浮容重 γ' 从 8.504 增加至 9.319。

表 1 试验土体特性

Table 1 Properties of the tested soils

试验土体	d_{50}/mm	$CC/\%$	SD	$\varphi/^\circ$	k_0	s
黏质粉砂	0.0377	7.9	1.733	25.4	0.571	2.71

表 2 土体固结前后基本物理性质的变化

Table 2 Changes in the basic physical properties of sediments before and after the consolidation

土体状态	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$w/\%$	e	S_r	$\rho_{\text{sat}}/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\gamma'/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
固结前	1.86	38	1.011	1.000	1.850	8.504
固结后	1.92	30	0.835	0.970	1.932	9.319

土体相对密度的测试是根据最大干密度 $\rho_{d\max}$ 与最小干密度 $\rho_{d\min}$ 算得。根据测量得:土体 $\rho_{d\max} = 1.622 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\min} = 1.101 \text{ g/cm}^3$, 对应最大孔隙比 e_{\max} 和最小孔隙比 e_{\min} 分别为 1.144 5 和 0.671。根据式(1)

$$Dr = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}, \quad (1)$$

可得固结前后相对密度分别为 0.36 与 0.78。

1.2 水槽实验设计与实施过程

1.2.1 实验工况

整个试验既包括规则波也包括不规则波,波况条件见表 3。表中试验 X-Y, X 代表第 X 个试验序列, Y 代表第 Y 次试验(例如:Test 3-2 为试验序列 3 的第二次试验,其波高为 14 cm)。每个试验序列包括 3 次试验,其波高依次增高,每次试验中,波浪作用 1 200 s。序列 3 与序列 4 以水深为变量,序列 3 与序列 6 分别为规则波与不规则波,规则波的波高与不规则波的有效波高大小相等,作为对比。

表 3 设计波况

Table 3 The designed wave conditions

试验组	H/cm	T/s	h/cm	$h:L$	$H:L$
3-1	10	1.5	50	0.177	0.064
3-2	14	1.5	50	0.165	0.018
3-3	18	1.5	50	0.165	0.037
4-1	10	1.5	45	0.165	0.055
4-2	14	1.5	45	0.123	0.012
4-3	18	1.5	45	0.123	0.025
6-1 ^b	10	1.5	50	—	—
6-2 ^b	14	1.5	50	—	—
6-3 ^b	14	1.5	50	—	—

注:上标 b 为不规则波浪;H 为有效波高;T 为平均周期;h 为水深;L 为波长,不规则波浪的波长非定值。“—”表示该值不存在。因受造波条件限制,Test 6-3 并未达到设计波高 18 cm,故仍然选择 14 cm 的波高条件

1.2.2 实验流程

整个试验流程(图 4):

- 1) 清理水槽和土槽;
- 2) 安装孔隙水压力计及其支架;
- 3) 搅拌试验土体并将水土混合物转移至土槽,并使其自由固结,12 h 后,摊平床面并继续固结 4 d;
- 4) 向水槽中注水至设计水位,继续固结 5 d;
- 5) 安装测波计和其他仪器,准备好测量仪器;
- 6) 取样,并按照设计波况制造波浪条件,直到达到预定时间,造波过程中采集水样;
- 7) 取样,并继续下一次波浪,波浪过程中同样要采集水样;造波过程持续 3 次,波高条件依次增高(分别对应同一序列的 3 次试验,如 Test 3-1, Test 3-2, Test 3-3);
- 8) 清理水槽和土槽;

- 9)检查试验仪器,记录数据并准备下一个试验序列;
- 10)样品的室内分析。

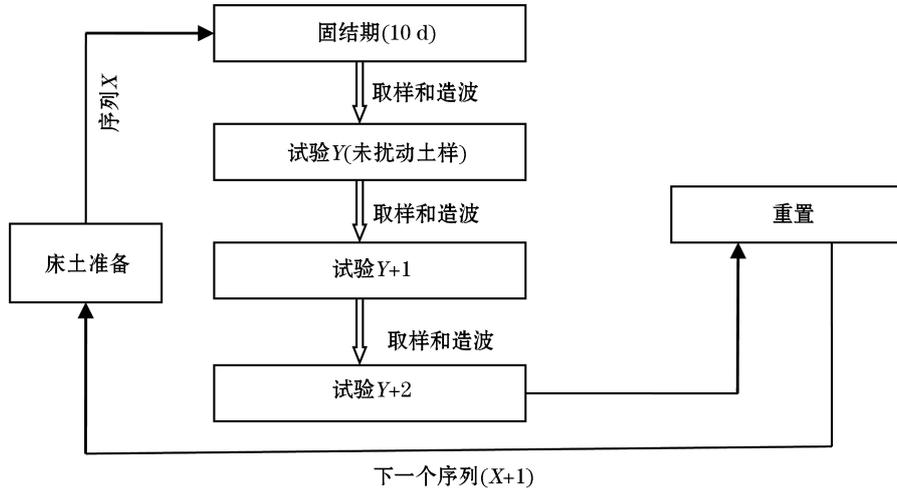


图 4 试验流程图

Fig.4 Experimental flow chart

2 结果与分析

2.1 不规则波浪与规则波浪的不同水动力特征

图 5 给出了规则波浪与不规则波浪作用过程的频谱分布。从图中可以看出,规则波浪作用过程中,波浪能量集中于某一特定的频段(波浪周期的倒数),其波高和波浪周期都是固定的(图 5a)。而不规则波浪中,由于破波作用 and 波浪的非线性作用,波浪的能量分布在非常宽的范围(图 5b)。从图中可以看出,本次实验室所选用的 Jonswap 波浪中包含了两部分:一部分为较高频率的部分(HF),也就是较小周期的波浪,其能量较高;另一部分为低频(LF),其波浪周期较大,而其能量相对较低。

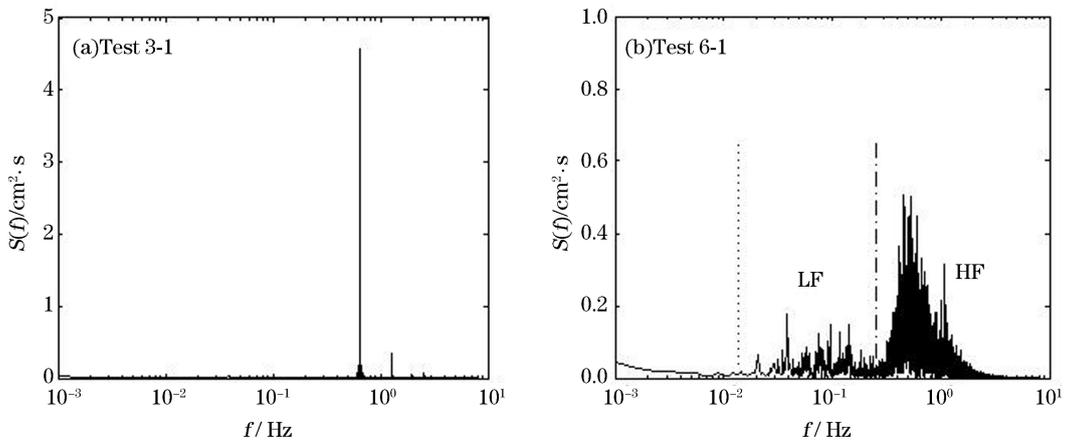


图 5 波浪频谱分布

Fig.5 Wave spectrum distribution

从能量分布来看,不规则波浪的能量分布在一个较宽的频率范围中,而规则波的波浪能量集中于某一特定的频段。从组成波的分布来看,规则波浪作用过程中,波浪周期与波高保持恒定,而不规则波的波浪大小掺杂,波浪周期与波高均随时间而变化。反映到水动力中,规则波浪中水体振荡的幅度与频率保持固定,水质点移动轨迹稳定,底部剪切力与水体湍动能相对稳定,而不规则波中,水体的振荡幅度和频率随波形而发生变化,底部剪切力与水体湍动能也随波形而变化。

图 6 给出了规则波 Test 3-1 与对应不规则波 Test 6-1 试验中的 15 cm 深度处孔隙水压力时序图。从图中可以看出,规则波浪作用时,超孔隙水压力的累积速度非常快,很快达到峰值并逐渐消散,而不规则波浪荷载下,孔隙水压力由快速累积到慢速累积,经历了一个较长的累积过程,超孔隙水压力的峰值强度大大高于对应的规则波。这表明,不规则波浪作用荷载下的床土响应强度要强于规则波浪荷载。因此,除了波浪能量的强度外,波浪能量的分布对床土的响应也有着极其重要的影响。

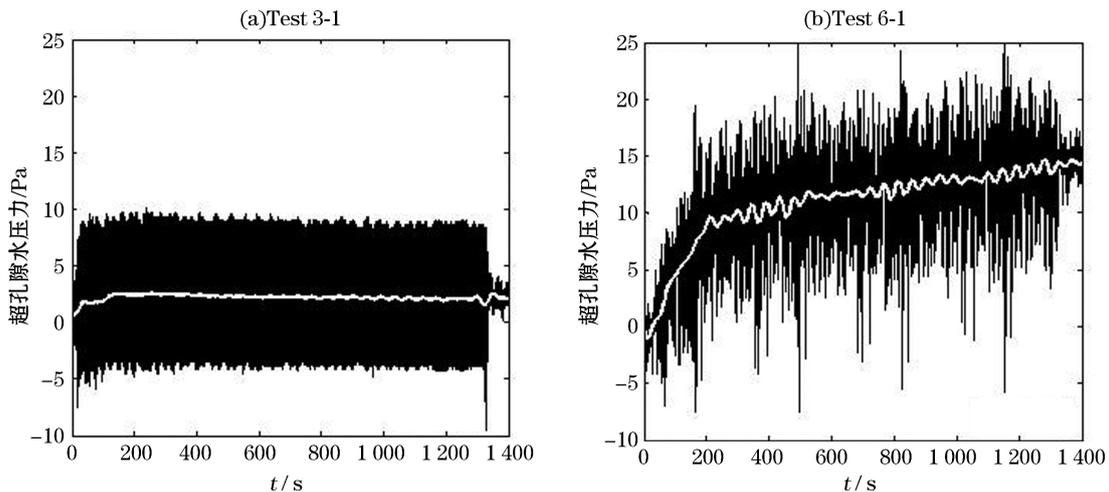


图 6 深度 15 cm 处超孔隙水压力累积特征(波浪作用 20 min)

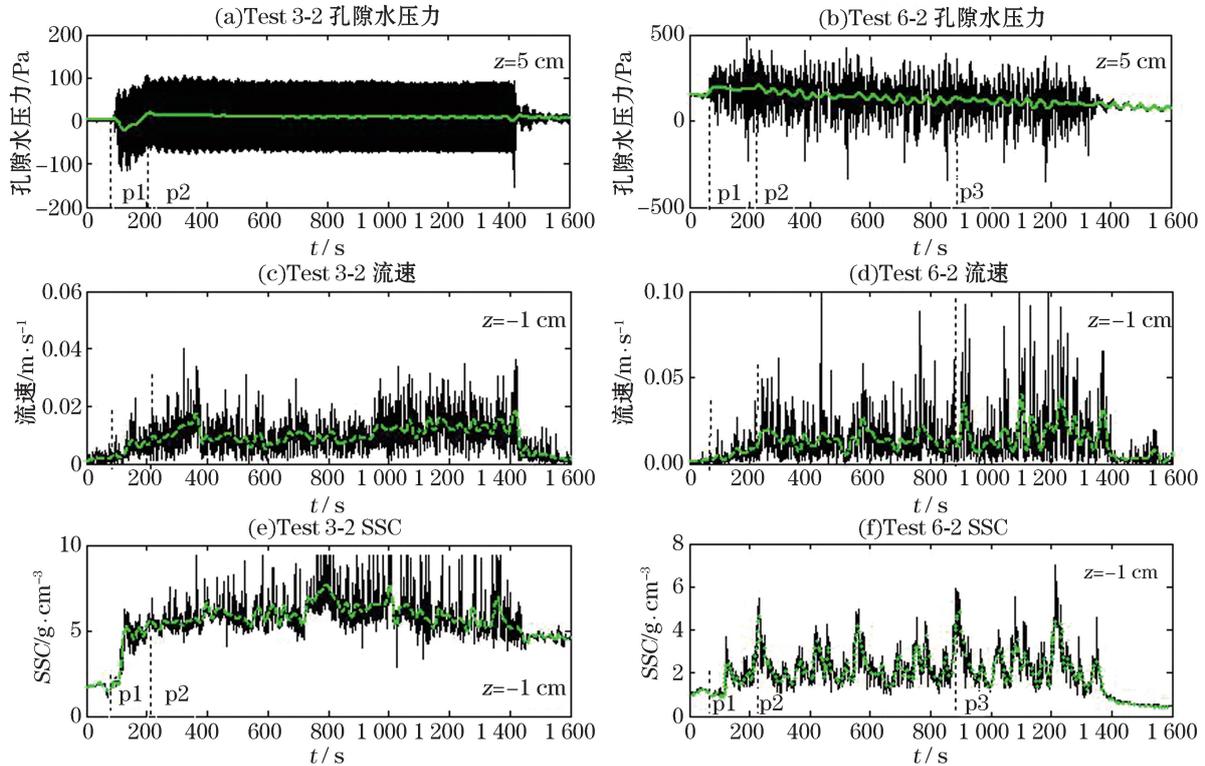
Fig.6 Accumulation characteristics of the excess pore water pressure at the depth of 15 cm(wave action: 20 min)

2.2 底层水沙随时间的变化

波浪作用过程中,水-土界面附近的水沙运动是一个十分复杂的过程。一方面,床土的渗流作用、底层水体的剪切作用控制着底层悬沙浓度的变化,床土的液化也影响着悬沙浓度的变化;另一方面,悬沙浓度的变化也影响着底层流速的分布,进而影响着水沙的运动过程。

图 7 给出不规则波与对应规则波浪作用过程中床土表层 5 cm 处的超孔隙水压力变化、距泥面 1 cm 处的底层流速变化以及距床面 1 cm 处的底层悬沙浓度的变化。由图 7 可知,波浪刚刚开始作用的时候,振荡孔隙水压力立即响应,而底层水体的速度开始累积,其幅度尚不足以启动泥沙颗粒,而这个阶段,底层悬沙浓度却急速上升。也就是说,波浪作用初期的底层泥沙的运动与水-土界面间的渗流作用有着紧密的关系。对比规则波与不规则波浪荷载作用下的孔隙水压力、悬沙浓度以及底层流速的时间序列,可以看出:不规则波浪作用期间,大小波浪掺杂,大波作用时,振荡孔隙水压力幅值极高,此时床土渗流作用达到极值点,同时,底层悬沙也在强烈渗流作用下达到极值,而底层流速在接下来的 20~25 s 左右出现极值。此外,从底层流速来看(图 7d),随着时间的持续,不论是规则波还是不规则波,其非线性作用都在逐渐加强,水体的湍动作用越来越剧烈,底层流速的振荡作用越来越剧烈。

从图 8a 和图 8b 可以看出,液化首先发生于土体浅层,随着波浪作用,逐渐向床土深处发展。随着土体液化以及之后的压实过程,床土内部结构与强度随之发生变化,床体的渗透性、粒径分布、剪切强度等都会发



注:p1 为波浪开始作用时刻;p2 为超孔隙水水压力峰值时刻;p3 为底层悬沙浓度某极值点时刻

图7 规则波与不规则波作用下表层超孔隙水压力、底层流速以及悬沙浓度随时间的变化

Fig.7 Variations of the surface excess pore water pressure, the bottom flow velocity and the suspended sediment concentration with the time under the actions of regular and irregular waves

生变化,进而影响到了底层悬沙的变化(图 8c)。由于波浪的持续作用,以及其引发的底层水流的连续剪切,底层悬沙浓度在很大程度上受流体的湍动作用以及床土的变化所控制(尤其土体浅层)。

从底层悬沙浓度变化的细节图(图 8c)来看,悬沙浓度的变化有几个阶段(规则波与不规则波情况类似)。Test 3-1 与 Test 4-1 采用不同的水深条件(分别为 50 与 45 cm),对比图 8c 与图 9c,尽管浅水条件下的悬沙浓度在初期(阶段 II)会比较低,但是随着时间持续,它出现另一个增长过程(阶段 III),最终超过深水条件下的悬沙浓度(Test 3-1)。这主要是由浅水条件下的强烈冲刷作用所致。另外,注意到,阶段 III 与不同深度的峰值超孔隙水压力有关,这意味着床土液化(或者半液化)是底层浓度增加的另一个原因。

图 10 给出规则波 Test 3-2 以及不规则波荷载 Test 6-2 过程中不同深度处的悬沙浓度变化,其中对不规则波浪的数据进行了平均,消除了部分振荡水流引起的悬沙浓度的振荡。从图 10a 中可以看出,初始泥面并非在波浪作用一开始就已经受到冲刷,而是在波浪作用一定时间之后,出现“松动”。另外,在泥面未松动前,不规则波浪荷载作用下,泥面处的悬沙浓度有一些强烈的“波动”,这些波动应该是由水-土界面的渗流作用引起的。Test 3-2 与 Test 6-2 分别为规则波条件与对应不规则波条件(不规则波的有效波高对应规则波的平均波高),从泥面、 $z=-3$ cm 以及 $z=-5$ cm 深度的稳定悬沙浓度来看,波浪初期时,规则波浪有更强烈的掀沙能力,而各个层位最终悬沙浓度值基本一致,也就是说,2 种波浪条件达到稳定阶段时,其流体强度所决定的悬沙浓度非常相近。

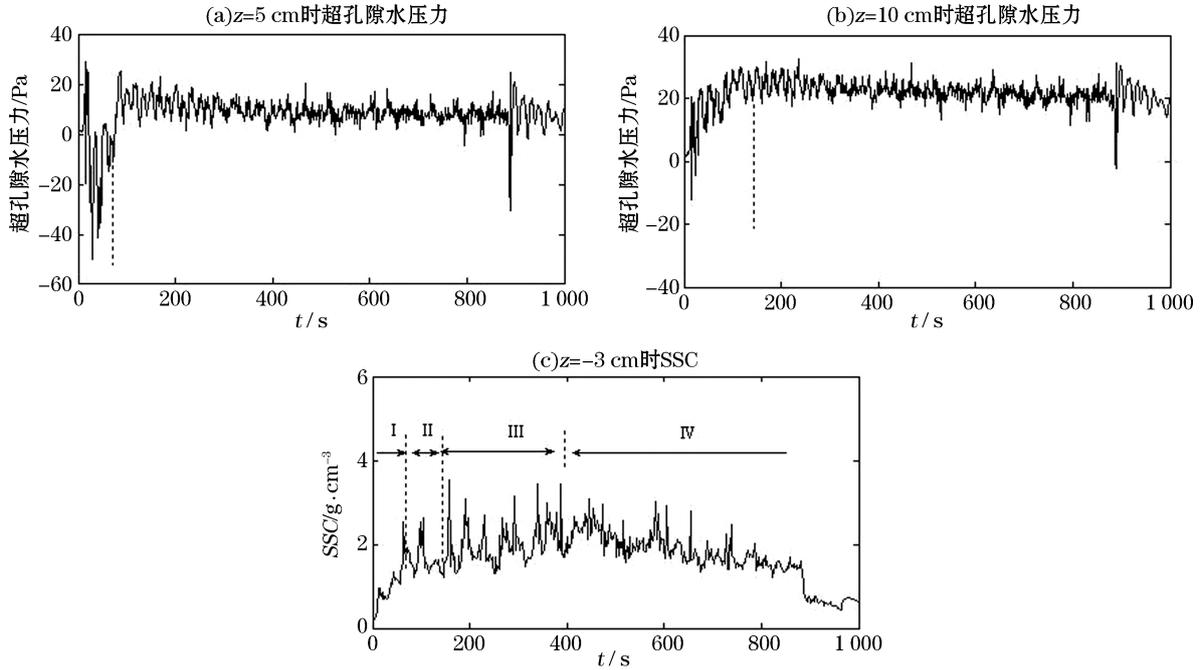


图 8 Test 3-1 中不同深度的超孔隙水压力累积以及 $z = -3$ cm 处对应底层悬沙浓度的变化
 Fig.8 The accumulation of excess pore water pressure at different depths and the changes of suspended sediment concentration corresponding to $z = -3$ cm in the experiment 3-1

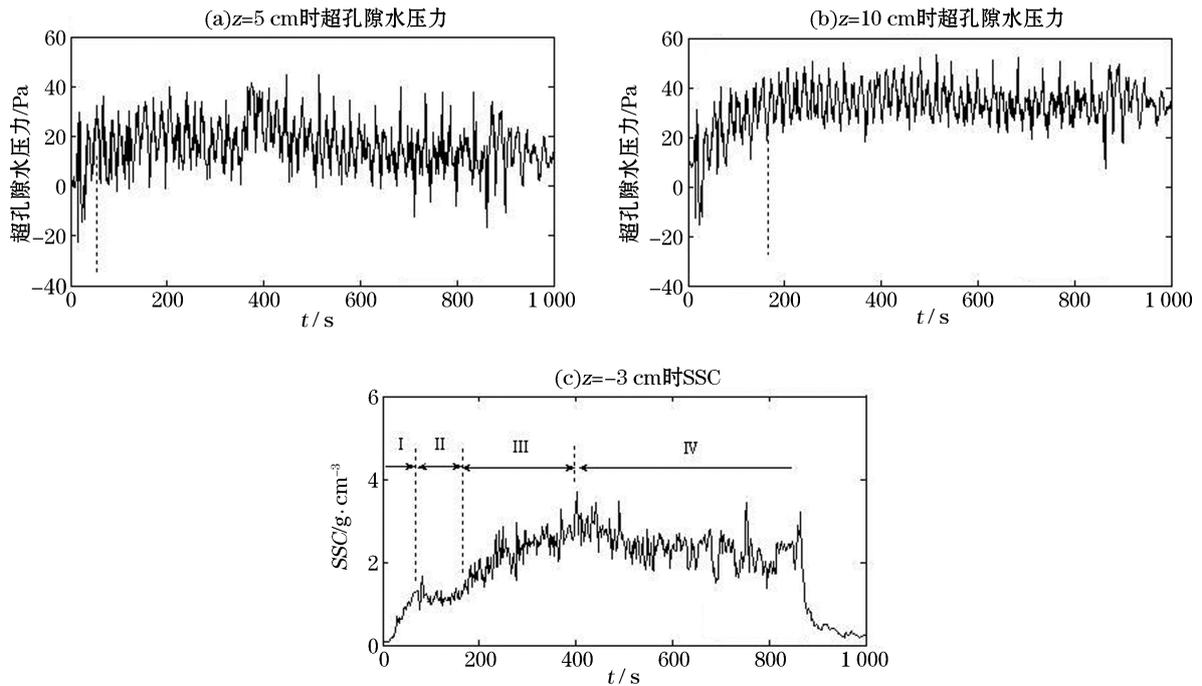


图 9 Test 4-1 中不同深度的超孔隙水压力累积以及 $z = -3$ cm 处对应底层悬沙浓度的变化
 Fig.9 The accumulation of excess pore water pressure at different depths and the changes of suspended sediment concentration corresponding to $z = -3$ cm in the experiment 4-1

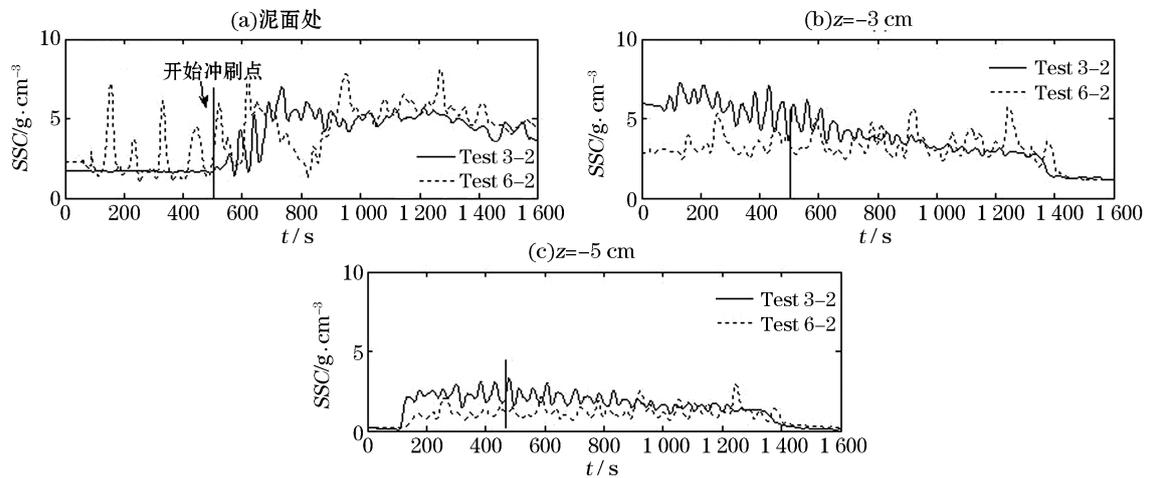


图 10 规则波与不规则波浪作用下的不同层位悬沙浓度变化的对比

Fig.10 Comparison of suspended sediment concentrations in different layers under the actions of regular and irregular waves

2.3 底层悬沙浓度的影响因素

近底层的流体剪切力和水体的湍动作用是维持悬沙运、保持悬沙颗粒悬浮的关键因素^[21]。在非破碎规则作用过程中,湍动作用限制在床底之上的薄层区域,波浪振荡引起的水底剪切作用力基本保持恒定。因此规则波试验中的底层悬沙浓度的变化很大程度上取决于悬浮体本身的性质(颗粒粒径、颗粒沉降特性、悬浮体的絮凝作用等)以及床土体性质的变化(床土液化、床土压缩以及泥沙的再悬浮等)。而不规则波浪试验中,不规则波的水动力以及不规则波浪所产生的非线性作用同样是影响悬浮体和水体运动的因素。

根据 Duren 等^[22]的调查,小于 $63 \mu\text{m}$ 的泥沙颗粒更容易产生絮凝作用。由于絮凝作用的存在,小颗粒的悬浮体变为大体积的絮凝体而加快其沉降速度,进而使水体中单位体积内的泥沙含量减少。而另一方面,高能量的波浪和流体作用可以破坏絮凝体的结构,降低悬浮体的沉降速度,增加水体中的悬沙浓度含量^[23]。试验土体来自黄河口的潮间带泥滩粉土质沉积物,其中值粒径为 $37.7 \mu\text{m}$,也就是说,大部分的沉积物颗粒属于易絮凝的范围。

Winterwerp 等^[24]基于流体运动和湍动作用以及动水压力引起的床底平均剪切应力,总结出不同床底平均剪切应力下的床土侵蚀模型,具体包括稳定海床、絮凝侵蚀、表面侵蚀以及质量侵蚀四种模式。中等波浪动力下(图 8 与图 9),床土表面的侵蚀强度较弱,部分沉积物颗粒在渗流作用下迅速悬浮(流体剪切压力超过临界剪切压力)。不过,当波致超孔隙水压力累积到一定程度并带动细颗粒从床土进入水体时,悬浮沉积物浓度进入另一个增长阶段。一旦水中的粉土颗粒进入絮凝状态,沉积物沉降速度加快,悬浮泥沙浓度下降。但是,在更强的水动力作用时(也就是更强的水体剪切应力),悬浮沉积物浓度的变化进入另一状态(图 11)。高能量的水体湍动作用不仅可以破坏絮凝体的结构,还会影响床土的侵蚀模式。不规则波浪作用中,高能波浪与低能波浪交替,从长期的作用效果来看,对悬沙运动效果的影响与规则波相近。不过,不规则波浪作用中,波浪在能量传递过程中可能会引起较为强烈的非线性作用,而这种非线性作用对海床和悬沙的运动会产生很大的影响。因为悬沙浓度的测量仪器的位置是预先固定的,随着泥面的冲刷下降,悬沙浓度的剖面整体下降,进而引起测得的悬沙浓度的下降。

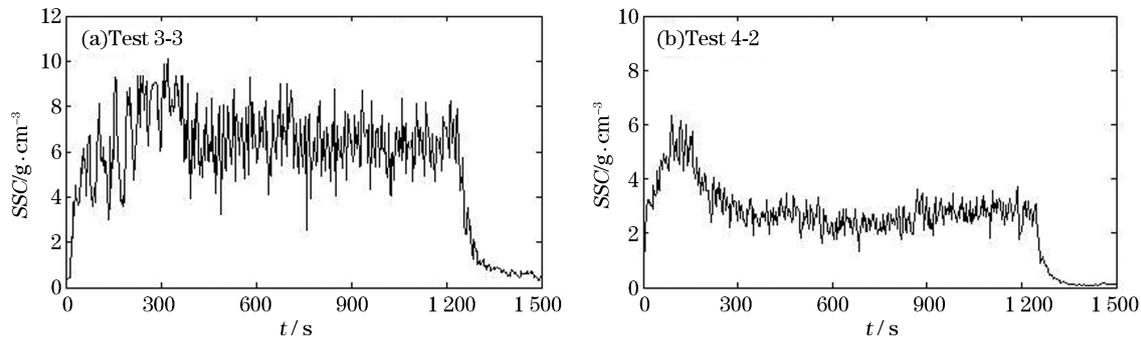


图 11 $z = -3$ cm 处底层悬沙浓度变化的时间序列

Fig.11 Time series of the bottom suspended sediment concentration at $z = -3$ cm

3 结 论

通过室内水槽试验对比了不同波浪作用下底层水沙运动特征,得出结论:

1) 由于规则波与不规则波浪作用规程中,水动力特征有着明显的区别,波浪能量的分布存在较大差异。不规则波浪的能量分布在一个较宽的频段,而规则波的频率是固定的。从床土的响应强度来看,不规则波浪的响应强度大大高于对应的规则波浪,这意味着波浪能量的分布对床土的响应强度有着非常大的影响。

2) 床土的表层最先液化(达到峰值状态),然后逐渐向深处发展。床土从液化到最后压实的过程中,床土内部结构与强度也在变化着,床土物理性质和组成颗粒的运动也在影响着底层水沙的组成结构以及运动过程,进而影响到了底层悬沙的浓度。规则波浪与不规则波浪的不同水动力特征和床土响应强度使得二者对应的水沙运动也表现出差异。

3) 流体剪切力和水体的湍动作用是维持悬沙运、保持悬沙颗粒悬浮的关键因素,而悬沙浓度的影响因素是多方面的,尤其来自黄河口的细颗粒泥沙。除了波浪能量及其分布以及水深条件等条件外,悬浮体的粒度及絮凝特性也发挥着重要的作用。而波浪的水动力条件又会对絮凝过程产生影响(大能量的波浪会破坏絮凝体的结构),波浪-絮凝体的相互作用与相互影响也大大增加了细颗粒泥沙悬浮和运动的复杂性。

参考文献 (Reference)

- [1] KIRCAV S O, SUMER B M, FREDSØE J. Influence of clay content on wave-induced liquefaction[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2014, 140(6): 04014024-1-04014024-11.
- [2] SEED H B, RAHMAN S. Wave-induced pore pressure in relation to ocean floor stability of cohesionless soils[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1978, 3(2): 123-150.
- [3] ZEN K, YAMAZAKI H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed[J]. Soils & Foundations, 1990, 30(4): 90-104.
- [4] ZEN K, YAMAZAKI H. Oscillatory pore pressure and liquefaction in seabed induced by ocean waves[J]. Soils & Foundations, 1990, 30(4): 147-161.
- [5] FODA M A. Sea floor dynamics[M]// LIU P F. Advances In Coastal And Ocean Engineering, Volume 1. Singapore: World Scientific, 1995: 77-123.
- [6] SEKIGUCHI H, KITA K, OKAMOTO O. Response of poro-elastoplastic beds to standing waves[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 1995, 35(3): 31-42.

- [7] SASSA S, SEKIGUCHI H. Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge[J]. *Géotechnique*, 1999, 49(5): 621-638.
- [8] SUMER B M, FREDSØE J, CHRISTENSEN S, et al. Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil underwaves[J]. *Coastal Engineering*, 1999, 38(2): 53-90.
- [9] SUMER MB. *The mechanics of scour in the marine environment*[M]. Singapore: World Scientific, 2002.
- [10] ZHOU C Y, LI G X, DONG P, et al. An experimental study of seabed responses around a marine pipeline under wave and current conditions[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(1): 226-234.
- [11] SASSA S, TAKAYAMA T, MIZUTANI M, et al. Field observations of the build-up and dissipation of residual pore water pressures in seabed sands under the passage of storm waves[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 39(12): 410-414.
- [12] LIU H J, JENG D S. A semi-analytical solution for random wave-induced soil response and seabed liquefaction in marine sediments[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(8-9): 1211-1224.
- [13] XU H X, DONG P. A probabilistic analysis of random wave-induced liquefaction[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(7): 860-867.
- [14] MAA P Y, MEHTAA J. Mud erosion by waves: a laboratory study[J]. *Continental Shelf Research*, 1987, 7(11-12): 1269-1284.
- [15] TZANG S Y, OU S H. Laboratory flume studies on monochromatic wave-fine sandy bed interactions Part 1. soil fluidization[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(11): 965-982.
- [16] TZANG S Y, OU S H, HSU T W. Laboratory flume studies on monochromatic wave-fine sandy bed interactions Part 2. sediment suspensions[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 53(11): 965-982.
- [17] KONG Y Z, ZHU C F. Experimental study on vertical sediment mixing coefficient under waves[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2008, 2008(6): 9-13. 孔亚珍, 朱传芳. 波浪作用下悬沙垂向扩散特性的实验研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 2008(6): 9-13.
- [18] JIA Y G, ZHANG L, ZHENG J W, et al. Effects of wave-induced seabed liquefaction on sediment re-suspension in the Yellow River Delta[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 89: 146-156.
- [19] JIA Y G, ZHENG J W, YUE Z Q, et al. Tidal flat erosion of the Huanghe River Delta due to local changes in hydrodynamic conditions [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 116-124.
- [20] LAMBE T W, WHITMAN R V. *Soil Mechanics, SI version*[M]. New York: Wiley, 1979.
- [21] FREDSØE J, DEIGAARD R. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*[M]. Singapore: World Scientific, 1992.
- [22] DUREN L A V, MIDDELBURG J J. The benthic boundary layer: transport processes and biogeochemistry[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2001, 82(52): 658-659.
- [23] WIBERG P L, DRAKE D E, CACCHIONE D A. Sediment resuspension and bed armoring during high bottom stress events on the northern California inner continental shelf: measurements and predictions[J]. *Continental Shelf Research*, 1994, 14(10-11): 1191-1219.
- [24] WINTERWERP J C, KESTEREN W G M V, PROOIJENB V, et al. A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C10): 10020.

Experimental Study on Bottom Water-Sediment Movement Under Random Wave Action

NIU Jian-wei, XU Ji-shang, DONG Ping

(College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In the case of silty seabed and under the actions of regular and irregular waves, the pore water pressure, bottom flow velocity and bottom suspended sediment concentration are studied through a series of flume experiments in the laboratory. The results indicate that the response strength of the seabed can be affected significantly by the energy distribution of wave loads, especially by those of low frequency (with large period). Further, the bottom suspended sediment concentration can be affected with the accumulation of excess pore water pressure, and the particle structure and property of the suspended sediment vary also with the change of water power. Through affecting the flocculating characteristics of the particles, the water power of different intensity can influence the settling and suspending of the particles in the suspended sediment. Moreover, the strong nonlinear action of random waves also influences the flocculation and disintegration of the suspended substance, which intensifies greatly the complexity of the suspension and movement of the fine-grained sediments.

Key words: random waves; excess pore water pressure; bottom suspended sediment concentration; bottom flow velocity

Received: February 26, 2017