

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.009

细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验

张继生^{1,2}, 钱方舒^{1,2}, 童林龙², 韦超², 蒋裕丰³

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京河海科技有限公司, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了解波浪在渗透性良好的斜坡海床上的传播演变机制,在水槽中开展细砾质斜坡海床上波浪传播特性试验,研究海床土体孔隙水压力响应特征、波浪在斜坡海床上发生浅水变形区域内波浪近底水平流速特性以及波浪在可渗透斜坡海床上的传播演变特性。试验结果表明:海床中超静孔隙水压力随着波浪波高和周期的增大而增大;近底水平流速随着波浪浅水变形程度的增加而增加;波浪厄塞尔数越大,斜坡上波浪浅水变形越明显,各谐波之间的波-波相互作用越剧烈;在浅水变形初段,海床渗透作用大于波浪浅水变形作用,在浅水变形剧烈区域,波浪浅水变形作用大于海床渗透作用。

关键词: 渗流;超静孔隙水压力;近底水平流速;浅水变形;波浪非线性;波-波相互作用;厄塞尔数
中图分类号: TV139.2+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)02-0150-08

Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed

ZHANG Jisheng^{1,2}, QIAN Fangshu^{1,2}, TONG Linlong², WEI Chao², JIANG Yufeng³

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Hohai University),
Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Hohai Technology Co., Ltd., Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to understand the wave propagation and evolution mechanism on the slope seabed of good permeability, the wave propagation characteristics on the fine gravel slope seabed were tested in the flume. The pore water pressure responding characteristics of the seabed soil, the near-bottom horizontal velocity characteristics of wave in the shallow water deformation area of the slope seabed, and the wave propagation and evolution characteristics on the permeable slope seabed were studied. The experimental results show that the excess pore water pressure increases with the increase of wave height and wave period. It's also found that the near-bottom horizontal velocity increases with the increase of wave shallowing degree. Meanwhile, with the increase of wave Ursell number, the deformation of wave shallowing on slope is more obvious, and the wave-wave interaction between harmonics is more intense. In addition, in the initial stage of wave shallowing, the seabed permeability is greater than the effect of wave shallowing, and in the area of severe wave shallowing, the effect of wave shallowing is greater than the seabed permeability.

Key words: seepage flow; excess pore water pressure; near-bottom horizontal velocity; wave shallowing; nonlinearity of wave; wave-wave interaction; Ursell number

波浪与海床之间的相互作用是土动力学和海岸动力学间的交叉学科,是海岸动力学研究领域的前沿和重点课题^[1-2]。波浪与海床之间的相互作用机制十分复杂,一方面,波浪作用下海床动力响应规律与海床土

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合基金 POW3C(U1906230)

作者简介: 张继生(1979—),男,教授,博士,主要从事波浪-海床-结构物相互作用机理研究。E-mail:jszhang@hhu.edu.cn

引用本文: 张继生,钱方舒,童林龙,等. 细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):150-157.

ZHANG Jisheng, QIAN Fangshu, TONG Linlong, et al. Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(2):150-157.

体的性质密切相关,不同类型海床在相同波浪荷载作用下的响应机制具有明显差异^[3];另一方面,海床土体动力响应对应波浪传播过程中水底边界条件影响显著,进而对波浪的传播演变规律也具有重要影响^[4-5]。

海床的稳定性与波浪作用下的海床动力响应有关。波浪传播过程中在波浪与海床交界面上产生动水压强,从而引起海床土体中有效应力和孔隙水压力在时间及空间上的不均匀变化。当波浪作用于砂质海床时,由于海床土体粒径较大,渗透性较好,在波浪作用下超静孔隙水压力的响应具有周期性振荡特征^[6];当波浪作用于粉砂质或黏土海床时,细粒土的渗流通道狭窄,孔隙流体较难排除且波浪荷载作用土骨架会发生残余变形,导致孔隙水压力逐渐累积^[7-8]。海床土体内有效应力及孔隙水压力的上述变化可能导致土骨架发生剪切破坏或者液化,导致海工结构物失稳。

传统波浪理论中通常假设海床表面为刚性、不可渗透边界,而海洋土体属于可渗透的多孔介质^[9],海床表面法向速度分量不为零。当海床土体为松散的细颗粒泥沙时,渗流作用较弱,波浪的传播规律受床面变形的作用更为显著^[10-11];但当海床土体由粗颗粒泥沙构成时,床面变形较小,渗流作用对波浪传播特性的影响更加显著^[12-13]。基于线性波浪理论,Putnam^[5]推导了波浪运动过程中受渗流作用而引起的波能耗散率。由于波峰波谷的压力差,水质点会透过可渗透介质的孔隙流进和流出而发生渗流损失,但只适用于渗流较小的情况。Reid 等^[14]指出 Putnam^[5]的结果只适用于渗流引起能量耗散较弱的情况。Liu^[15]研究了波浪传播过程中的黏性耗散和渗流耗散作用。刘忠波等^[12]推导出了适用于渗透海床的 Boussinesq 方程,改进后模型的计算结果与前人的解析结果更加吻合。在海床渗透系数对波浪传播的影响方面,王忠涛等^[9]用理论分析方法讨论了海床条件对波幅衰减和波长变化的影响。唐志波等^[13]通过数值算法研究了不同渗透系数以及不同水深条件下波浪传播过程中波高的衰减规律。Tong 等^[11]通过试验研究了海床发生液化时波高沿程的衰减,入射波浪条件对波高衰减有一定的影响。

上述研究侧重于探讨常水深条件下渗流对波浪传播特性的影响机理,而近岸地区多为斜坡地形。波浪在斜坡上传播时,随着相对水深的减小,波浪发生浅水变形,变形过程伴随着渗流耗散作用,波浪的演变机制十分复杂。为了增进波浪在渗透性良好的斜坡海床上传播演变机制的认识,笔者在水槽中开展斜坡海床上波浪传播特性试验,观测波浪与细砾质海床相互作用过程中的海床动力变化、近底流速和自由液面变化,研究波浪在可渗透斜坡海床上的传播演变规律。

1 试验方案

1.1 试验布置

试验在海岸灾害及防护教育部重点实验室波浪水槽中进行,水槽长 35 m、宽 0.5 m、高 1 m,水槽两侧为光滑透明的钢化玻璃,一端布置了多孔泡沫用于消波,另一端安装有液压活塞式造波机用于造波。试验水槽中间布置有 5 m 长的砂槽,试验通过在砂槽中铺设细砾质土模拟细砾质海床。为了方便,采用笛卡尔直角坐标系对水槽进行划分,波浪传播方向为 x 轴正方向,水槽横断面方向为 y 轴正方向, z 轴为竖直方向(图 1), y 轴和 z 轴正方向根据右手定则确定,坐标原点 O 位于砂床表面处。在砂槽上方布置 11 个电容式浪高仪,

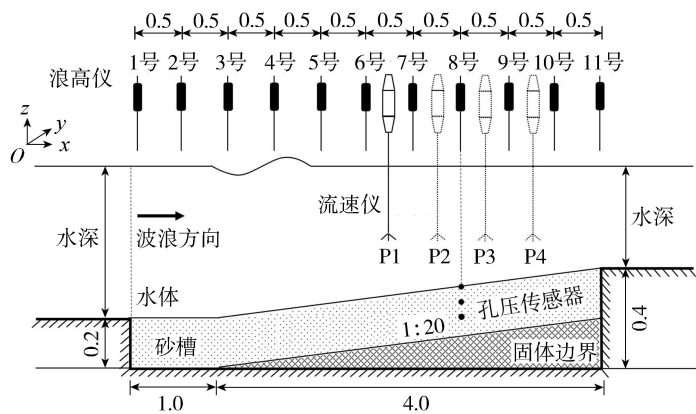


图 1 试验布置(单位:m)

Fig.1 Experiment layout (units: m)

测量沿程自由水面位移;在斜坡上 $x=3.5\text{ m}$ 处沿垂向布置了 3 个微型芯片式孔隙水压力传感器(探头直径 0.6 cm ,长 1 cm ,下文简称孔压传感器),孔压传感器的间隔为 8 cm ,用于测量波浪运动过程中海床内超静孔隙水压力;为研究波浪边界层附近的水动力特征,采用小威龙剖面流速仪(简称流速仪)测量了斜坡上沿波浪传播方向 4 个剖面(P1、P2、P3、P4)处的近底流速,每 2 个剖面之间的间隔为 0.5 m 。浪高仪和孔压传感器的精度均为 0.1% ,流速仪可以单次测量探头以下 4 cm 的剖面上 30 个点的流速,剖面分辨率为 1 mm ,测量精度为 0.5% 。试验中浪高仪和孔压传感器布置的具体位置如图 1 所示,流速仪布置所选 4 个剖面分别位于距离斜坡起点 1.75 m 、 2.25 m 、 2.75 m 、 3.25 m 处($x=2.75\text{ m}$ 、 $x=3.25\text{ m}$ 、 $x=3.75\text{ m}$ 、 $x=4.25\text{ m}$,图 1)。采用电容式浪高仪和流速仪同步测量波浪传播过程中的自由液面位置和近底流速,流速仪的采样频率设置为 50 Hz ,浪高仪和孔隙水压力传感器的采样频率均设置为 100 Hz 。

1.2 试验条件

试验中所用的砂砾为经过筛选的石英细砾,其平均粒径 d_{50} 为 3.71 mm ,相对密度 D_r 为 0.69 ,孔隙率 n_s 为 0.39 ,土样的颗粒密度 ρ_s 为 $2.66\times 10^3\text{ kg/m}^3$,渗透系数 k_s 为 $1.4\times 10^{-2}\text{ m/s}$ 。波浪与细砾质海床相互作用过程中,海床内的细砾质颗粒位移并不明显,水体十分清澈,无沙纹产生,在埋设孔压传感器断面处的海床地形高程也无变化。为了讨论斜坡前水深 h 、特征波高 H 和波浪周期 T 的影响,设置了 7 组工况,各组次所对应的试验条件 and 无量纲参数见表 1,表中 H 和 T 为砂槽入口处的特征波高和波浪周期, L 为按照线形波浪理论计算的砂槽入口处的特征波长,这 7 组试验工况均无波浪破碎现象。为了描述砂槽入口处波浪的非线性程度,引入描述波浪特性的无量纲参数:波浪的非线性参数 $\varepsilon=H/(2h)$ 、相对水深 $\mu=kh$ (其中波数 $k=2\pi/L$)和厄塞尔数 $U_r=HL^2/h^3$,各工况具体参数见表 1。

表 1 试验条件和无量纲参数
Table 1 Summary of test conditions and dimensionless parameters

工况编号	h/cm	H/cm	T/s	L/m	ε	μ^2	U_r
T1	40.0	5.66	1.70	3.05	0.071	0.679	8.23
T2	40.0	7.00	1.70	3.05	0.088	0.679	10.18
T3	40.0	8.12	1.70	3.05	0.102	0.679	11.80
T4	40.0	7.00	1.01	1.49	0.088	2.845	2.43
T5	40.0	7.00	2.24	4.20	0.088	0.358	19.29
T6	37.5	7.00	1.70	2.98	0.093	0.625	11.79
T7	45.0	7.00	1.70	3.20	0.078	0.781	7.87

2 试验结果与讨论

2.1 超静孔隙水压力

海床在正负交变的波浪荷载作用下,内部会形成渗流,同时海床内的超静孔隙水压力也会相应发生改变。由图 2 可知,改变波浪入射波高和周期,海床中超静孔隙水压力幅值 $|p|_{\max}$ 变化趋势基本相同,波浪引起的超静孔隙水压力幅值均随波高和周期的增加而增加。图 2 中 z 表示埋设孔压计剖面位置处以砂床表面为原点竖直向上的距离。根据 Liu 等^[16]的研究,当海床厚度一定时,超静孔隙水压力在海床中的扩散距离

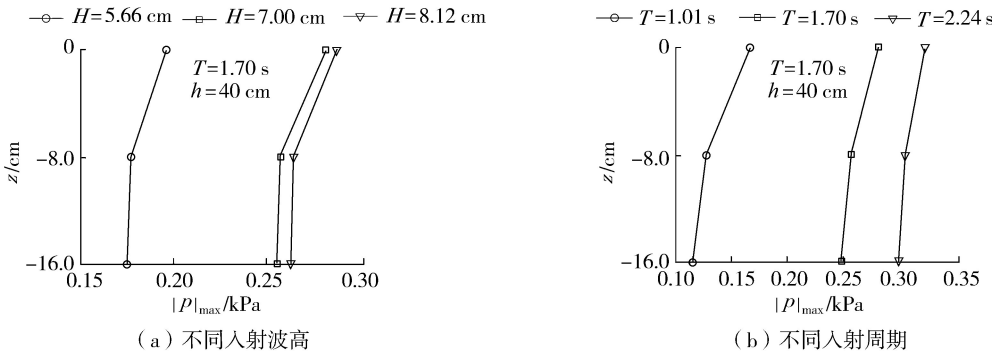


图 2 试验中超静孔隙水压力的幅值沿垂向的分布

Fig. 2 Vertical distributions of the amplitude of wave-induced excess pore water pressure

可以表示为

$$L_z = \frac{k_sKT}{\rho gn_s}$$

(1)

式中: L_z ——海床中超静孔压扩散的垂直距离; K ——波浪的有效体积弹性模量; ρ ——流体密度; g ——重力加速度。

根据式(1),当入射波浪周期增大时,超静孔隙水压力垂直扩散距离增大,在海床中可以扩散更深的距离。海床中超静孔隙水压力随着扩散深度的增加而减小,且周期大的波浪作用下海床中超静孔隙水压力较大。当入射波浪波高增大时,波浪与海床交界面处的孔隙水压力增大,则海床中的超静孔压也相应增大。由图 2 可知,在本试验海床超静孔压的测量范围内,海床内波浪引起的超静孔隙水压力在床面附近衰减较快,海床 8 cm 以下超静孔隙水压力衰减较慢,这表明在海床表层处,超静孔隙水压力扩散较快,随着扩散距离的增大,超静孔隙水压力衰减逐渐缓慢,即海床中的渗流速度随着海床深度的增加而逐渐减小。

2.2 近底水平流速特征

根据 Liu 等^[17]的研究,近底层水平流速分量的尺度远大于垂向流速分量的尺度,且垂向流速与脉动值较为接近,难以将时均值与脉动值分离,为了分析方便,本文以分析水平方向流速特征为主,而垂向流速分布可再通过连续性方程得出。将试验中测得的水平流速 u 分为时均流速 $\langle u \rangle$ 和脉动流速 $\hat{u}$,即其中时均流速 $\langle u \rangle$ 的定义为

$$\langle u \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u(t + nT)$$

(2)

式中: N ——统计波数,试验中采用连续的 10 个周期内时均流速进行分析,即取 $N=10$; t ——试验测量时间。

研究中根据式(2)计算 4 个剖面的近底水平流速,图 3 分别给出了 T1、T2、T3 工况近底水平流速最大值和最小值沿水深方向的分布。由图 3 可以看出,当波浪经过 1 m 长的平坡进入斜坡海床发生浅化后,受到非线性影响,近底水平流速具有明显不对称特征。其中 T3 工况的 P4 剖面处由于水面接触流速仪,产生碎波无法测量,故只测量了前 3 个剖面的流速变化特征,如图 3 (c) (f) 所示,图中正值表示向岸流速,负值表示离岸流速。对比各剖面最大和最小流速分布,近底水平流速分布呈现向岸方向的速度幅值大于离岸方向的速度幅值的特征。随着波浪在斜坡上传播距离增加,波浪浅化特征越来越明显,近底水平流速的幅值也随之增大。出现 P1 处近底水平流速幅值比 P2 处大的情况是因为 P1 剖面位于斜坡前缘,波浪经过 1 m 长平坡的

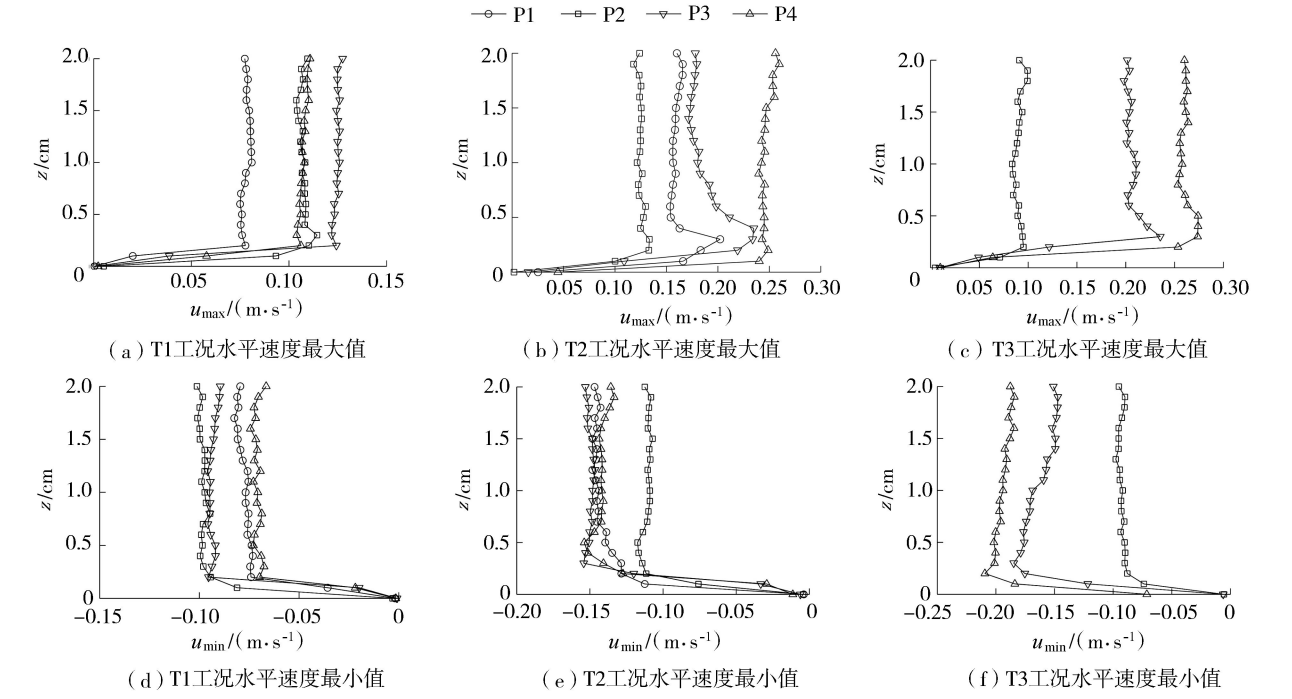


图 3 近底边界层内水平速度最大值和最小值沿水深方向的分布

Fig. 3 Vertical distributions of maximum and minimum horizontal velocities in near-bottom boundary layer

传播,斜坡对它的影响还比较小,波浪传播到 P2 剖面时,由于斜坡上细砾质海床的渗流更大,波浪能量会有一定程度的衰减,底部波浪近底层内的流速相应变小。图 3(a)~(c)可以看出,在同一入射波浪周期条件下,入射波高越大,波浪近底水平流速越大。这是因为入射波高的增大使得波浪在斜坡上的浅化增强,加剧了波浪波峰和波谷的不对称性,因此近底水平流速也会相应变大。

此外,波浪在细砾质海床上传播时,受海床内渗流的影响,水质点会通过细砾质海床的孔隙进入海床内部,因此在波浪与海床交界面上的流速并非为 0,而是在床面处存在一个较小的速度。例如图 3(b)(d)所示,P1 床面处的最大向岸流速和最大离岸流速分别为 0.002 m/s 和 0.004 m/s,P2 中床面处分别为 0.005 m/s 和 0.004 m/s,P3 中床面处分别为 0.008 m/s 和 0.006 m/s,P4 中床面处分别为 0.009 m/s 和 0.011 m/s。

2.3 自由液面变化特征

由于受到近岸海床地形和浅水变形的影响,浅水地区波浪的非线性特征会愈加显著,而波浪浅水变形的几何特征是描述波浪非线性性的重要依据之一。

图 4 分别为 T1、T2、T3、T5 工况同一相位的波浪经过入口处(1 号浪高仪)和出口处(11 号浪高仪)的波形图。由图 4 可知,这 4 组试验中入射波浪较为规则,具有斯托克斯波波特征,且随着波高、周期的增大,波峰波谷不对称更加明显。波浪经过斜坡后,受浅水变形作用,波形水平不对称和峰谷不对称现象更加显著。如图 4(a)~(c)所示,当入射波高为 5.66 cm 时,11 号浪高仪处波形较为光滑,波高较为陡峭,波谷较为平坦;而当波高增大到 7.00 cm 和 8.12 cm 时,11 号浪高仪的波形较为不规则。结合砂槽入口处(1 号浪高仪)的波浪厄塞尔数进行分析,试验 T1 工况中,砂槽入口处波浪的厄塞尔数为 8.23,波谷传播时间与波峰相比稍有延长,峰谷时间比为 0.67;在试验 T2 工况中,入口处的厄塞尔数增大到 10.18,出口处的波形与入口处相比有较大差异,波峰传播时间缩短至 0.63 s,波谷传播时间增长至 1.07 s,峰谷时间比减小至 0.59; T3 工况,入口处的厄塞尔数进一步增大到 11.80,出口处的波形在进入波谷时有一处明显的凹陷,波峰更加尖锐,峰谷时间比仅为 0.50。综上,随着斜坡入口处厄塞尔数的增加,波浪的非线性特征越来越明显,即波浪浅水变形程度越来越剧烈。当周期增大时,波形呈现同样的变化特征,如图 4(d)所示。

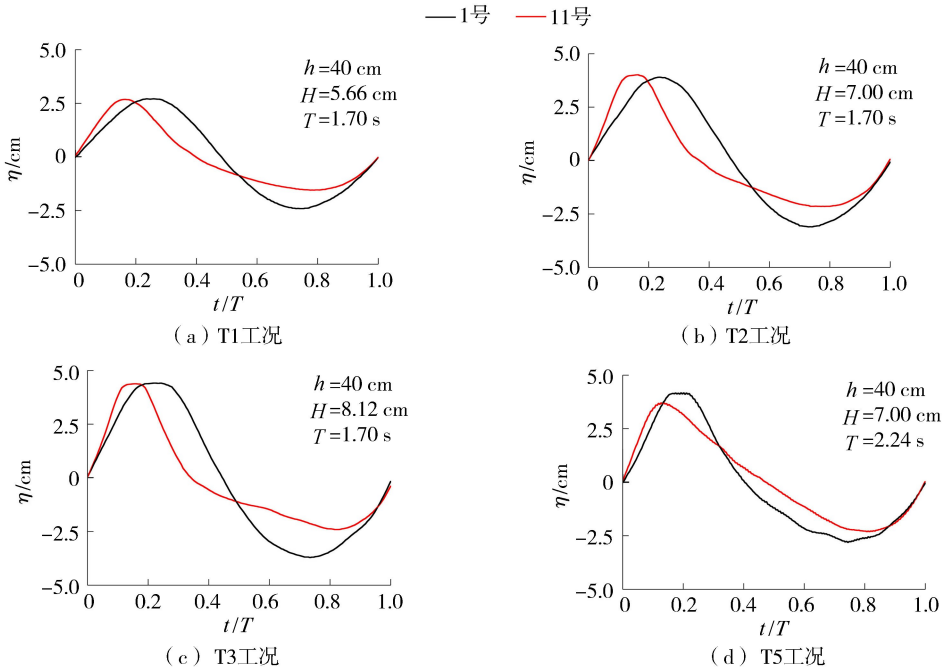


图 4 细砾质海床试验自由液面曲线

Fig. 4 Free surface elevation curves of waves over the fine gravel seabed

为了深入研究波浪在斜坡海床上传播过程中的能量变化,将沿程 11 根浪高仪所测得的波形进行模态分析,计算各阶谐波的波高和能量,阐明波浪在砂槽上方传播过程中各阶谐波波幅的沿程变化特征,进一步揭示波浪的运动规律。波面 η 的变化函数采用特征波幅进行无量纲化,可以展开为如下傅里叶级数的形式:

$$\eta(x_0,t)=\frac{1}{2}\sum_{m=1}^{\infty}A_m\exp(imt)+c$$

(3)

式中: x_0 ——固定的水平位置; $A_m(m=1,2,3,\cdots)$ ——第 m 阶谐波的波幅; c ——前一项的转置。

波浪总能量 E 的计算公式定义为

$$E=\rho g\int_{-\infty}^{+\infty}\eta^2\mathrm{d}x=\sum_{m=1}^{\infty}|A_m|^2\approx\sum_{m=1}^{10}|A_m|^2$$

(4)

基于式(3)(4)的模式分析发现,10 阶以上谐波对波形的影响小于 1%,因此只计算前 10 阶谐波的波幅,且四阶以上谐波较小可以忽略。由图 5 可知,一阶谐波的波幅在试验中较大,相应地,一阶谐波的能量占总能量的主要部分。在砂槽入口处, $|A_1|$ 接近于 1,二阶谐波波幅相对较小,基本小于 0.2,三阶及四阶谐波波幅更小,分别为 0.04 和 0.02,图 5(d)中三阶和四阶谐波分别达到了最大值 0.04 和 0.08。随着波浪在砂槽上方传播距离的增加,一阶谐波的幅值减小,二阶及以上谐波的幅值逐渐增大且该现象在斜坡上方更加明显,对砂槽入口和出口处的能量计算发现波浪能量也有所衰减,这说明波浪的各阶谐波之间可以发生能量交换,能量是从一阶谐波逐渐转移到二阶及以上谐波波浪中的,同时波浪总能量受渗流和黏性耗散影响会出现衰减。对比图 5(a)~(c),入射波高从 5.66 cm 增大到 7 cm 和 8.12 cm 时,砂槽入口处厄塞尔数相应从 8.23 增大到 10.18 和 11.80,在砂槽出口处一阶谐波波幅从 0.88 分别减小至 0.84 和 0.79,二阶谐波波幅从 0.30 分别增大到 0.35 和 0.40,三阶、四阶谐波波幅也呈现同样的趋势,因此入射波浪的厄塞尔数越大,波浪传播过程中的波-波相互作用也越剧烈。相应地 3 组试验中波浪在砂槽上方传播过程中波能损失分别为 11.9%、13.3%、20.6%。图 5(f)(b)(e)分别展示了斜坡前水深为 45 cm、40 cm、37.5 cm 时前四阶谐波波幅的空间分布规律,斜坡前水深越小,入射波浪相应的厄塞尔数则相对较大。当斜坡前水深为 37.5 cm 时,砂槽出口处一阶谐波波幅减小至 0.74,二阶和三阶谐波波幅分别增大至 0.40 和 0.16,这 3 种工况的波浪经过砂槽的能量耗散分别为 6.3%、13.3%、22.9%。对于周期较大即厄塞尔数较大的波浪,各谐波之间的相互作用时间也随之增加,波-波相互作用相对较强,如图 5(d)所示。上述结果表明,波-波相互作用的本质是各阶谐波之间的能量交换,随着厄塞尔数的增大即波浪浅水变形的增强,波浪的各谐波之间的波-波相互作用剧烈,同时波浪在渗透性良好的斜坡海床上的浅水变形还需要考虑渗流耗散的影响。

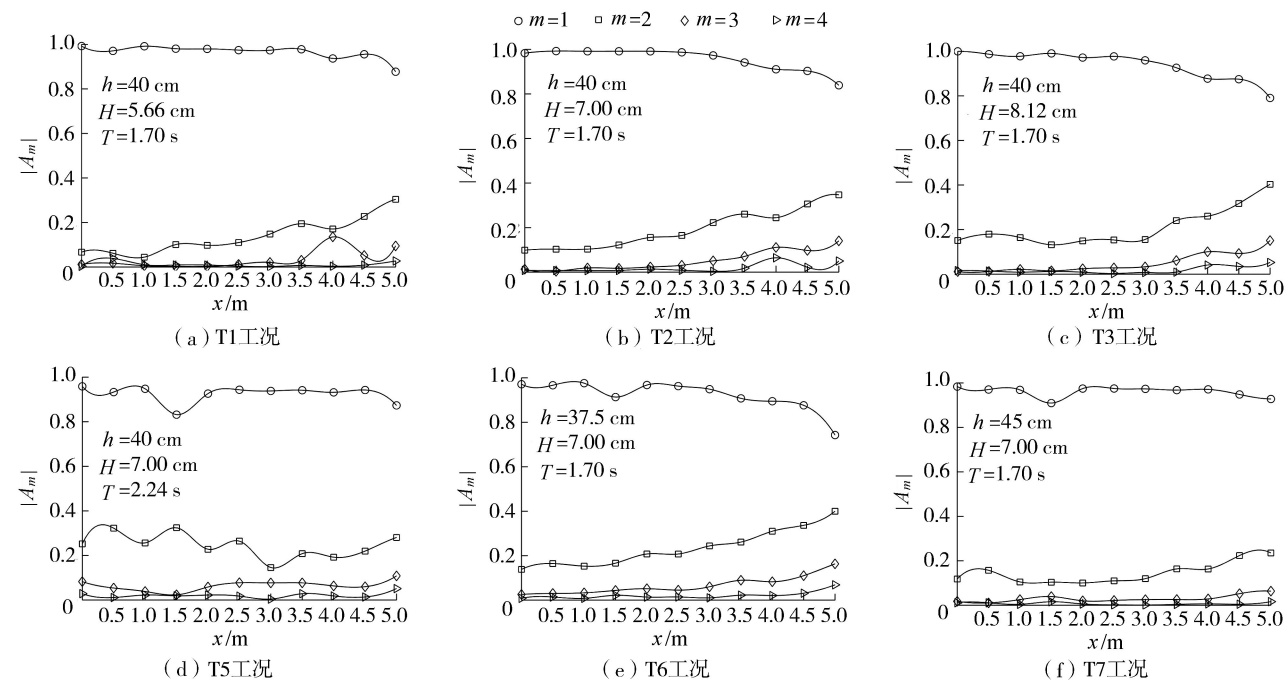


图 5 波浪前四阶谐波波幅在砂槽上方的分布

Fig.5 Distributions of wave amplitudes of first four harmonics along the flume

2.4 波浪的衰减和浅水变形

图 6 展现了斜坡前水深为 40 cm 时,波浪在细砾质海床沿程波幅变化的理论解和试验结果的对比图。

根据 Liu 等^[18]的研究,当不考虑海床的渗透性时,波浪在平坡海床上的波幅衰减的解析表达式为

$$\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{-\frac{1}{4}} = 1 + 0.083\,56\left(1 + \frac{h}{W}\right)\left(\frac{\nu}{h}\sqrt{gh}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{a_0}{h}\right)^{\frac{1}{4}}\frac{x}{h}$$

(5)

式中: a_0 ——入射波浪的波幅; a_1 —— $x=1\text{ m}$ 处波浪的波幅; $2W$ ——水槽宽度; ν ——水的黏度。

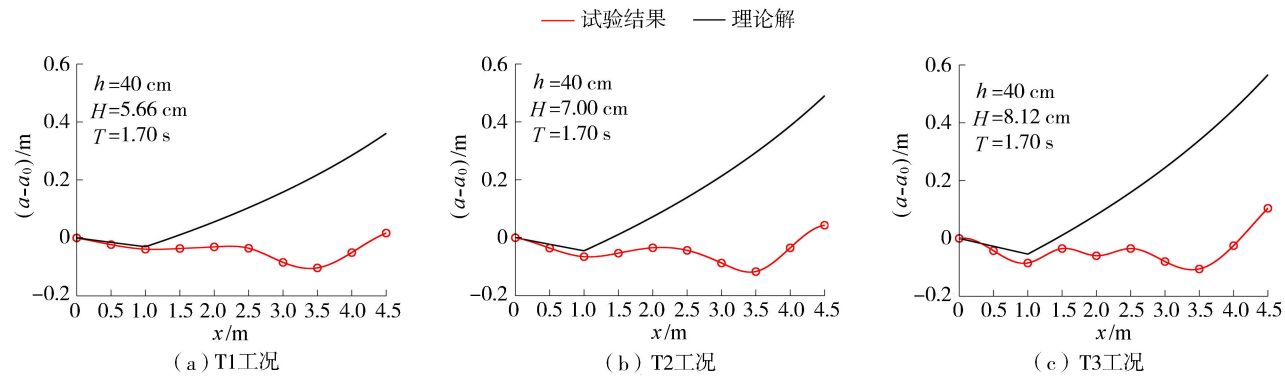


图6 波浪沿程波幅变化的理论解和试验结果对比

Fig.6 Comparison of theoretical and experimental results of wave amplitude variation along the flume

斜坡海床上波浪由浅水变形导致的波幅变化的解析表达式为

$$\left(\frac{a'}{a_1}\right)^{-\frac{1}{4}} = \left(\frac{h}{h'}\right)^{\frac{1}{4}}$$

(6)

式中: a' ——波浪在斜坡海床上的波幅; h' ——斜坡海床上的水深。

对比图6(a)~(c)中0~1 m的波幅变化,理论结果显示无渗透性平坡海床对波浪传播作用较小, $x=1\text{ m}$ 处波幅与入射波浪波幅相比略有减小;而细砾质平坡海床波浪传播的试验结果显示, $x=1\text{ m}$ 处波幅出现明显的衰减。入射波高为5.66 cm时,在 $x=1\text{ m}$ 处的波幅衰减了1.5%。当入射波高增大到7.00 cm和8.12 cm时, $x=1\text{ m}$ 处的波幅衰减相应为1.9%和2.1%。

当波浪在斜坡海床上传播时,理论结果显示波浪由于浅水变形的作用,波幅呈现稳定增大的趋势,入射波高分别为5.66 cm、7.00 cm和8.12 cm的波浪传播到 $x=4.5\text{ m}$ 处的波浪波幅分别增大了14.1%、15.2%和15.5%。而对比细砾质海床的试验结果,在渗透性和浅水变形共同作用下,波浪在斜坡的前半段($x<3.5\text{ m}$)即浅水变形的初段,波幅呈现先增大后减小的趋势;在 $x=3.5\text{ m}$ 左右处,波幅衰减到最小,即海床的渗透作用大于波浪浅水变形作用。由图6可知,波幅分别减小了4.0%、2.6%和2.6%;波浪继续在斜坡上传播($3.5\text{ m}<x<4.5\text{ m}$),波浪波幅与入射波幅的差距逐渐减小,并且在斜坡上部区域处波浪波幅超过入射波幅,即波浪浅水变形作用大于海床的渗透作用,此区域为浅水变形剧烈区域,且在 $3.5\text{ m}<x<4.5\text{ m}$ 区域的试验结果波幅变化的斜率小于理论结果,这是因为在公式中考虑了浅水变形导致的波高增大,而在试验中海床还存在渗透作用的影响。在 $x=4.5\text{ m}$ 处,对比图6(a)~(c)的试验结果,波幅分别增了0.7%、1.2%和2.6%。

3 结 论

- a. 海床中超静孔隙水压力的垂直扩散距离随着波浪周期的增大而增大,即入射周期较大的波浪作用下海床中超静孔隙水压力较大;入射波高的增加使海床表面处的孔压增大,同样导致海床中的超静孔隙水压力较大。
- b. 波浪近底水平流速随着波浪浅水变形程度的增大而增大,且受海床渗流的影响,在波浪与海床交界面上的流速并非为0,而是在床面处存在一个较小的速度。
- c. 入射波浪厄塞尔数越大,斜坡上波浪浅水变形越明显;波-波相互作用的本质是各阶谐波之间的能量交换,厄塞尔数大的波浪各谐波之间的波-波相互作用剧烈,同时波浪在渗透性良好的斜坡海床上的浅水变形还需要考虑波能耗散的影响。
- d. 在浅水变形初段,海床渗透作用大于波浪浅水变形作用,在浅水变形剧烈区域,波浪浅水变形作用大于海床渗透作用。

参考文献:

[1] ZHANG Jisheng, TONG Linlong, ZHENG Jinhai, et al. Effects of soil-resistance damping on wave-induced pore pressure accumulation around a composite breakwater[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 34(3) : 573-585.

[2] ZHANG Jisheng, SUN Ke, ZHAI Yanyan, et al. Physical study on interactions between waves and a well-mixed seabed[J]. Journal of Coastal Research, 2016, 75(Sup1) : 198-202.

[3] LIN M, JENG D S. Comparison of existing poroelastic models for wave damping in a porous seabed[J]. Ocean Engineering, 2003, 30(11) : 1335-1352.

[4] MACPHERSON H. The attenuation of water waves over a non-rigid bed[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 97(4) : 721-742.

[5] PUTNAM J A. Loss of water energy due to percolation in permeable sea bottom[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1949, 30(3) : 349-356.

[6] ZEN K, JENG D S, HSU J R C, et al. Wave-induced seabed instability, difference between liquefaction and shear failure[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2) : 37-47.

[7] SEED H B, RAHMAN M S. Wave-induced pore pressure in relation to ocean floor stability of cohesionless soils[J]. Marine Geotechnology, 1978, 3(2) : 123-150.

[8] SEKIGUCHI H, KITA K, OKAMOTO O. Response of poro-elastoplastic beds to standing waves[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society, 2008, 35(3) :31-42.

[9] 王忠涛, 栾茂田, 郑东生, 等. 多孔介质海床对波浪传播影响理论分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(6) : 891-896. (WANG Zhongtao, LUAN Maotian, ZHENG Dongsheng, et al. Dynamic analysis for effects of porous seabed on wave propagation[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(6) : 891-896. (in Chinese))

[10] GARNIER E I, HUANG Z H, MEI C. Nonlinear long waves over a muddy beach[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 718: 371-397.

[11] TONG Linlong, ZHANG Jisheng, SUN Ke, et al. Experimental study on soil response and wave attenuation in a silt bed[J]. Ocean Engineering, 2018, 160: 105-118.

[12] 刘忠波, 孙昭晨. 波浪在渗透海床上传播的数学模型[J]. 中国科技论文在线, 2011(5) :374-379. (LIU Zhongbo, SUN Zhaochen. Wave propagating model over a porous seabed[J]. Sciencepaper Online, 2011(5) : 374-379. (in Chinese))

[13] 唐志波, 倪云林, 于姜梅, 等. 渗透海床上波浪传播特性的研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(1/2) : 77-82. (TANG Zhibo, NI Yunlin, YU Jiangmei, et al. Research of the characteristics of wave propagation over porous bottom[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(1/2) : 77-82. (in Chinese))

[14] REID R O, KAJIURA K. On the damping of gravity waves over a permeable sea bed[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957,38(5) : 662-666.

[15] LIU P L-F. Damping of water waves over a porous bed[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1973, 99: 2263-2271.

[16] LIU P L-F, PARK Y S, LARA J L. Long-wave-induced flows in an unsaturated permeable seabed[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 586: 323-345.

[17] LIU P L-F, ORFILA A. Viscous effects on transient long-wave propagation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 520: 83-92.

[18] LIU P L-F, SIMARRO G, VANDEVER J, et al. Experimental and numerical investigation of viscous effects on solitarywave propagation in a wave tank[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(2/3) :181-190.

(收稿日期:2019 - 09 - 19 编辑:刘晓艳)