

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.004

李青峰,程永舟,韩二品,等.破碎波作用下床面形态研究及泥沙受力分析[J].水利水运工程学报,2015(4):22-27.(LI Qing-feng, CHENG Yong-zhou, HAN Er-pin, et al. Analysis of bed form and sediment force under action of breaking waves[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 22-27.)

## 破碎波作用下床面形态研究及泥沙受力分析

李青峰<sup>1,2</sup>, 程永舟<sup>1,3</sup>, 韩二品<sup>1</sup>, 潘 昀<sup>4</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 丹华水利环境技术(上海)有限公司(DHI 中国), 上海 200235; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004; 4. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:**破碎带水体强烈紊动对床面形态影响甚大,基于波浪水槽试验对沙质斜坡上破碎带床面形态以及泥沙受力进行研究。分析床面形态发现,同一断面处沙纹沙坝的形态与波浪形态基本一致,波高和周期决定沙纹沙坝的尺寸,波高越大,沙纹沙坝越高;周期越长,沙纹沙坝越长。通过对波浪破碎区的近底流速及砂床内孔隙水压力进行测量,将计算得到的表层上举力与超静孔隙水压力进行对比分析,发现其上举力与床面超静孔隙水压力大小相同。同时观察波浪破碎带床面高程,进一步研究上举力与超静孔隙水压力与床面高程的关系,发现表层上举力随着床面高程增加而变大,随着床面高程的降低而减小,而超静孔隙水压力与床面高程之间的关系则相反。

**关键词:**破碎波作用;床面形态;超静孔隙水压力;上举力

**中图分类号:** TV149.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2015)04-0022-06

很多学者致力于破碎波的研究,Stokes 首先提出了波浪破碎指标的概念,认为波陡有一个极限值,当大于这个波陡时,波浪就会破碎<sup>[1]</sup>。后来 J. H. Michell<sup>[2]</sup> 准确计算出在深水及浅水区的极限波陡值都为 0.142。波浪与海床之间具有相互耦合作用,破碎波造成海床床面变化,同时床面变化对波浪破碎类型产生影响<sup>[3]</sup>。R. George<sup>[4]</sup> 等研究了波浪破碎时产生的紊动传播到床面是泥沙起动、悬扬的主要动力,高祥宇等<sup>[5-6]</sup> 通过水槽试验分析了波浪在破碎前以及破碎处的悬沙浓度,发现在波浪破碎带水体悬沙含量显著增加。吴国强等<sup>[7]</sup> 对规则波、不规则波和波群作用下沙纹峰上悬移质含沙量与波浪形态的关系进行了试验研究。

在波浪循环荷载作用下,海床中产生的循环剪切力可能引起土体中孔隙水压力在时间和空间上的不均匀分布。程永舟等<sup>[8]</sup> 研究表明渗透系数小的细颗粒泥沙,渗流力远大于泥沙颗粒的上举力和有效重力。H. Xiao 等<sup>[9]</sup> 结合物理试验与数值分析,对孤立波破碎带的床面形态、输沙以及海床响应进行了研究。波浪运动则是造成海床泥沙运动的主要动力因素之一,随着波浪周期运动,沙纹中泥沙推向沙纹的前坡,使得沙纹向波浪传播方向运动<sup>[10]</sup>。尹晶等<sup>[11]</sup> 研究发现在波浪作用下,沙坝处于向岸和离岸运动的不稳定状态,经过较长时间后,这一运动会很小。

波浪破碎带水体运动十分复杂,床面形态变化极不规律。本次研究着重对泥沙颗粒受力进行深入分析,通过实测数据对比上举力以及超静孔隙水压力,分析了波浪破碎处的床面形态演变特征。

**收稿日期:** 2014-12-01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50909009,41176072);水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金资助项目(2014SS04);湖南省自然科学基金资助项目(2015552006)

**作者简介:** 李青峰(1988—),男,湖南南县人,硕士,主要从事河流海岸动力学及泥沙运动方面研究。

E-mail: 328534872@qq.com 通信作者:程永舟(E-mail: chengyongzhou@163.com)

# 1 试验设计

试验在长沙理工大学港航中心的波浪水槽进行,水槽两侧为透明玻璃,总长 40 m,宽 0.5 m,高 0.8 m。试验用造波机采用大连理工大学研制的造波控制系统,通过摄像机对波浪以及床面形态进行采集,孔隙水压力测采用天津水运工程科学研究所研制的 SG2000 型水工试验数据采集处理系统,浪高量测采用 WG-50 和优泰克采集系统,流量量测采用诺泰克的 NDV 流速仪。

## 1.1 模型设计及测点布置

试验中海床模型采用模型砂堆建一个斜坡顶部高程 0.5 m,坡度 1:20 的概化模型,模型砂密度 2 650 kg/m<sup>3</sup>,渗透系数 0.048 cm/s,模型砂粒径级配曲线见图 1,中值粒径 0.47 mm。

首先根据预备试验确定波浪的破碎区,然后根据波浪破碎位置确定浪高仪、孔隙水压力传感器以及 NDV 的位置,不同波况时根据波浪破碎位置的不同调整上述采集仪器的位置。图 2 所示的试验布置图是根据入射波高 10 cm,周期 2 s,水深 35 cm 的规则波情况布置的,坡度为 1:20,其中共布置 7 个浪高仪,在 6#断面以及 7#断面埋置 2 组孔隙水压力传感器,每组垂向布置 5 个孔隙水压力传感器,其中第 1 个压力传感器置于斜坡表面,竖直向下每隔 5 cm 布置一个,压力传感器从上至下标号为 P1,P2,P3,P4,P5。同时在 6#断面放置 NDV 用以采集流速。

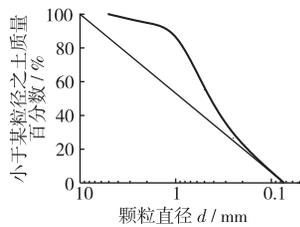


图1 模型砂的粒径级配曲线  
Fig.1 Particle size distribution

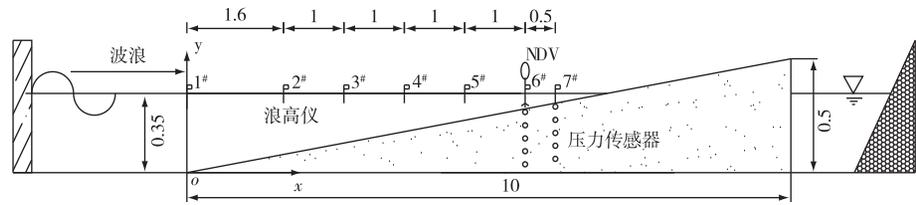


图2 试验布置(单位:m)

Fig.2 Schematic diagram of experimental arrangement(unit: m)

## 1.2 试验波要素

选取部分波况进行分析,波况参数详见表 1。

表 1 波况参数

Tab.1 Wave parameters

编号	波高/m	周期/s	水深/m	坡度	破碎位置-离坡脚距离/m	破碎类型
1	0.100	2.0	0.35	1:20	5.6	崩破→卷破
2	0.080	2.0	0.35	1:20	5.9	崩破→卷破
3	0.075	1.4	0.35	1:20	5.9	崩破→卷破
4	0.075	2.0	0.35	1:20	6.0	崩破→卷破
5	0.099	2.0	0.35	1:15	3.8	卷破
6	0.086	2.0	0.35	1:15	4.0	卷破
7	0.094	1.6	0.35	1:15	3.8	卷破

# 2 泥沙受力对床面形态的影响

## 2.1 试验现象

波浪在沿斜坡传播时,波形、波高等会发生变化,特别是波浪即将破碎时,波高显著增大,波长减小,而在波浪破碎后,波高急剧下降。

通过对第1组波况进行分析(斜坡坡度为1:20),波浪传播至离坡脚5.6 m处(6#断面)时破碎,破碎类型为卷破波。其破碎水深为7 cm,破碎波高为12.8 cm,可能是波浪沿斜坡上爬引起的壅水造成的,才导致破碎波高大于破碎水深。图3为7个断面的波高历时变化,波浪破碎前,波面变化平滑且稳定,而在波浪破碎以及破碎后,波面变化极不规则。波浪开始进入斜坡时,水深较大,波浪非线性效应较弱,波浪较为对称,此时床面沙纹也很对称。

在波浪浅化并未破碎前,此时波浪非线性效应较强,波浪的不对称性较明显,波浪向传播方向处前倾,此时的沙纹与波浪形态一致,迎水面沙纹坡度较缓,背水面沙纹坡度较陡。

图4描述了第1组波浪形态以及造波20 min后的沙纹形态,其中床面高程与波面高程分别是以初始床面与初始水位为零点,从试验现象可以看出,床面泥沙的变化规律与该处所对应的波形具有很密切的关系,波浪破碎前,波峰经过处所对应的沙纹与波浪形态一样,由于波浪向前传播,沙纹同样匀速向前输移。当波浪破碎时,波浪在破碎过程中卷起大量气泡,而此时的波浪形态与床面泥沙形态不同,此处形成的沙坝没有波浪陡峭,而在波浪破碎后也是如此。

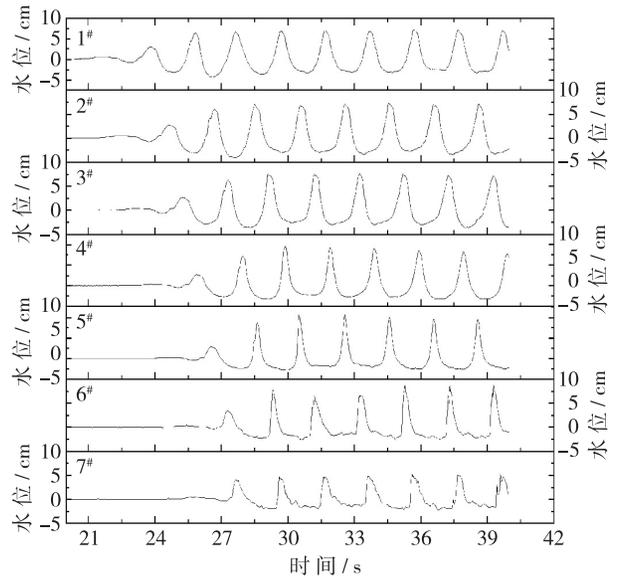


图3 各断面波高历时变化

Fig. 3 Changes in wave-height along each section

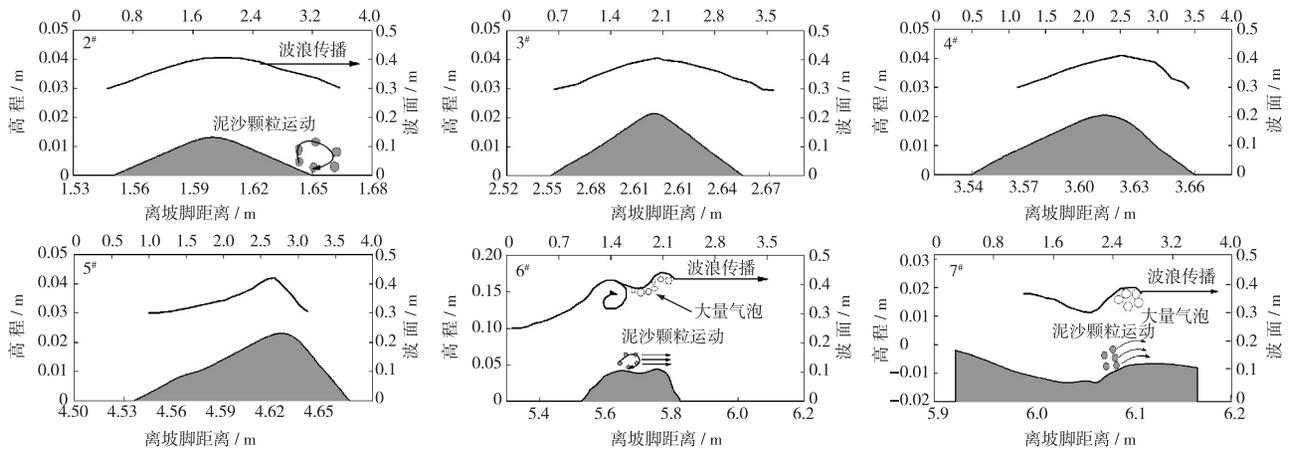


图4 各断面处波浪和床面形态

Fig. 4 Wave profiles and bed forms in each section

波浪形态对沙纹沙坝形态影响很大,波高越大,则沙纹沙坝的高度越高,同时,波浪周期对海床沙纹的影响也非常明显,分析了相同水深、波高的两组不同周期的波况,分别研究了编号2,3两组波况作用下破碎前沙纹的个数,以0.8 m为1个单位(见图5),从图中可以看出,周期不同对沙纹尺寸的影响也不同,在周期较大的波浪作用下,海床中沙纹长度较长,则相应的一段范围内沙纹个数较少,而在周期较小的波浪作用下,沙纹长度较短,则相应的范围内沙纹个数较多。

根据秦崇仁等<sup>[12]</sup>的研究成果,背水面一侧的长度与沙纹的长度之比可表示为:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda} = 0.555 - 0.085 \lg\left(\frac{gHT^2}{h^2}\right) \quad (1)$$

式中: $\lambda_2$ 为沙纹背水面一侧的长度; $\lambda$ 为沙纹总长; $H$ 为波高; $T$ 为周期; $h$ 为水深。

对表1中不同波况进行分析,虽然该公式不适用于破碎带沙坝,但是通过图6可以看出,波浪破碎前,实际观测的沙纹不对称性与理论得到的非对称性相差不大,而在波浪破碎处,实际观测的床面沙坝不对称性跟理论值相差较大,且非对称性更明显。

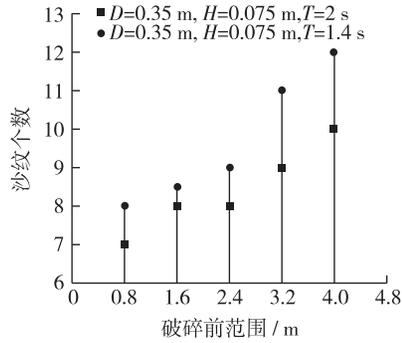


图5 不同周期沙纹个数对比

Fig. 5 Comparison between numbers of sand ripple at different periods

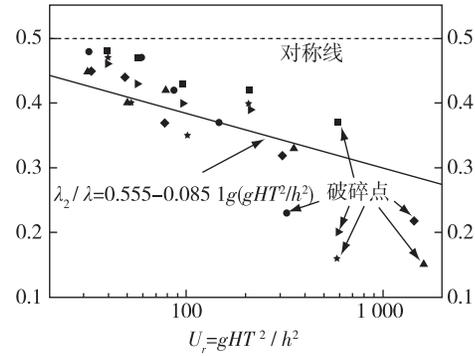


图6 沙纹非对称性与 Ursell 数关系

Fig. 6 Relationship between asymmetry of sand-ripple and Ursell

### 2.2 破碎处泥沙受力特性

波浪作用下床面泥沙颗粒受到上举力的作用<sup>[13]</sup>,其上举力  $F$  可表述为:

$$F = C_y \frac{\pi}{4} d_{50}^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (2)$$

式中:  $C_y$  为上举力系数;  $d_{50}$  为中线粒径;  $\rho$  为水的密度;  $u_b$  为实测的床面近底流速。

采用 Bagnold 水槽实测资料得到上举力系数  $C_y$  为

$$C_y = \left[ \frac{1}{4.684 (L/H)^{0.322}} \right]^2 \quad (3)$$

式中:  $L$  为波长。

由试验所测得的超静孔隙水压力为压强值,为了将实测的超静孔隙水压力与上举力作对比分析,这里将上举力除以泥沙颗粒面积,得到压强值,此时的上举力为:

$$F_y = \left[ \frac{1}{4.684 (L/H)^{0.322}} \right]^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (4)$$

同样分析了第1组波浪,通过式(4)所得上举力与实测超静孔隙水压力进行对比分析,经过3个波浪的传播,波形开始稳定,此时波浪破碎带的床面形态还未发生变化,对比分析泥沙表层上举力以及各处超静孔压之间的关系,从图7可见波浪破碎处床面泥沙颗粒的上举力能瞬时达到最大值,然后瞬时降为0,而孔隙水压力在不同深度的变化规律不同,位于床面表层的孔隙水压力变化幅值最大且其幅值的变化率最大,越往底层,孔隙水压力变化幅值越小且其变化率最小。上举力变化幅值与床面表层的超静孔隙水压力变化幅值基本一致,上举力转瞬即逝,超静孔隙水压力幅值沿着深度方向逐渐减小。

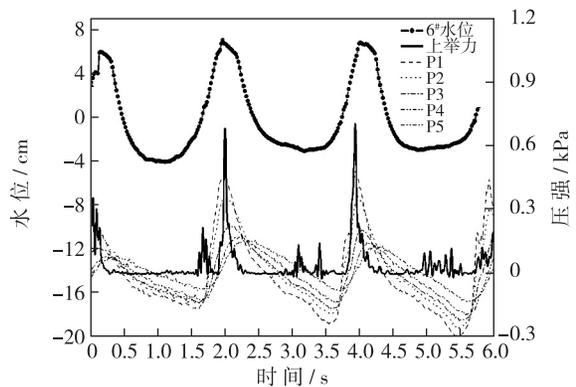


图7 破碎处上举力与超静孔隙水压力

Fig. 7 Uplift-force and excess pore water pressure in wave broken zone

### 2.3 破碎处泥沙受力特性与床面形态关系

随着波浪力的循环作用,波浪破碎带床面高程发生

巨大变化,研究了上举力以及床面表层超静孔隙水压力与床面高程之间的关系,通过对1,2两组波况进行分析,从图8可得波浪破碎带床面高程对泥沙颗粒的受力也会产生影响,上举力会随床面高程的增加而变大,随床面高程的降低而减小,而超静孔隙水压力幅值与床面高程的关系则相反。

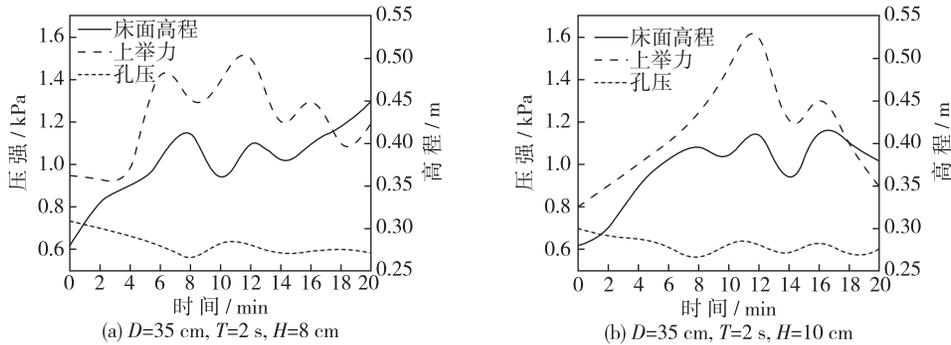


图8 上举力及超静孔压与床面高程的关系

Fig. 8 Relationships between uplift-force, excess-pore-water-pressure and bed-elevation

## 3 结 语

波浪在向斜坡传播时不仅自身形态发生巨大变化,泥沙床面的变化以及海床内部响应都与波浪形态有着紧密联系,特别是波浪破碎时对海床的影响巨大。在床面形态还未发生大变化之前,波浪破碎带泥沙颗粒受到的上举力与表层受到的超静孔隙水压力幅值相同,随着波浪破碎带床面形态发生变化,上举力也随之不稳定,且上举力随床面高程的增加而变大,随床面高程的降低而减小,而超静孔隙水压力与床面高程之间的关系则相反。波浪破碎前,波浪形态与泥沙床面形态保持一致;在波浪破碎处以及波浪破碎后半米范围内,由于这一区域有大量气泡产生,床面形态与波浪形态稍有差异,波高越大,沙坝高度越高,反之则越低,且波浪破碎带沙坝陡度极其复杂,沙坝非对称性更加明显。

### 参 考 文 献:

- [1] 邹志利. 海岸动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2009. (ZOU Zhi-li. Coastal hydrodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [2] MICHELL J H. The highest waves in water [J]. Phil Mag, 1893, 36(5): 430-437.
- [3] 程永舟,李青峰,潘昀,等. 不同破碎波对沙质海床作用的实验研究[J]. 海洋学报,2014,36(5): 130-135. (CHENG Yong-zhou, LI Qing-feng, PAN Yun, et al. Experimental study of different breaking waves impact on sandy seabed[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(5): 130-135. (in Chinese))
- [4] GEORGE R, FLICK R E, GUZA R T. Observations of turbulence in the surf zone[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C1): 801-810.
- [5] 高祥宇,高正荣,窦希萍. 破碎波作用下淤泥含沙量分布实验研究[J]. 水利水运工程学报,2014(4): 38-43. (GAO Xiang-yu, GAO Zheng-rong, DOU Xi-ping. Experimental studies on sediment concentration distribution under breaking waves action along muddy coast[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 38-43. (in Chinese))
- [6] XIA Yun-feng, XU Hua, CHEN Zhong, et al. Experimental study on suspended sediment concentration and its vertical distribution under spilling breaking wave actions in silty coast[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(4): 565-575.
- [7] 吴国强,邹志利,张海飞. 波浪作用下沙纹上含沙量的时变特征[J]. 泥沙研究,2013(4): 16-24. (WU Guo-qiang, ZOU Zhi-li, ZHANG Hai-fei. Time-dependent nature of suspended sediment concentration over ripples due to waves and wave groups

- [J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(4): 16-24. (in Chinese))
- [8] 程永舟, 蒋昌波, 潘昀, 等. 波浪渗流对泥沙起动的影响[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 256-262. (CHENG Yongzhou, JIANG Chang-bo, PAN Yun, et al. Effect of wave-induced seepage force on incipient sediment motion[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 256-262. (in Chinese))
- [9] XIAO H, YOUNG Y L, MADDUX T. Hydro- and morpho-dynamic modeling of breaking solitary waves over a fine sand beach. Part II: Numerical simulation [J]. *Marine Geology*, 2010, 269(3-4): 119-131.
- [10] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. *Sediment dynamics*[M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese))
- [11] 尹晶, 邹志利, 李松. 波浪作用下沙坝不稳定性实验研究[J]. *海洋工程*, 2008, 26(1): 40-50. (YIN Jing, ZOU Zhi-li, LI Song. Unstable sandbar movement under wave action[J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(1): 40-50. (in Chinese))
- [12] 秦崇仁, 孙海军, 赵冲久. 波浪作用下沙纹形态的实验研究[J]. *天津大学学报*, 1991: 109-113. (QIN Chong-ren, SUN Hai-jun, ZHAO Chong-jiu. The experimental study on geometry of sand ripple under wave action[J]. *Journal of Tianjin University*, 1991: 109-113. (in Chinese))
- [13] 曹文洪, 刘青泉. 波浪掀沙的动力学机理分析[J]. *水利学报*, 2000, 31(1): 49-53. (CAO Wen-hong, LIU Qing-quan. Analysis of dynamic mechanism of sediment winnowing caused by waves[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(1): 49-53. (in Chinese))

## Analysis of bed form and sediment force under action of breaking waves

LI Qing-feng<sup>1,2</sup>, CHENG Yong-zhou<sup>1,3</sup>, HAN Er-pin<sup>1</sup>, PAN Yun<sup>4</sup>

(1. *School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China*; 2. *DHI(China), Shanghai 200235, China*; 3. *Key Laboratory of Water & Sediment Science and Water Hazard Prevention, Changsha 410004, China*; 4. *Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of the Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** Strong turbulent flow has a great influence on the bed form in the wave broken zone. Based on the wave flume experiments, studies of the bed form and forces acting on the sediment in the wave broken sections have been carried out. According to the analysis of the bed form, it is found that the form of the sand ripple, sandbar and wave in the same place is basically consistent; the wave height and wave period influence the size of the sand ripple and the sandbar; the higher the wave height, the higher the sand ripple and sandbar; the larger the wave period, the longer the sand ripple and sandbar, and vice versa. The near bottom velocity and pore water pressure have been measured along the wave broken sections. Comparing and analyzing the surface uplift force and excess pore water pressure, it is concluded that the values of uplift force and the bed excess pore water pressure amplitude are the same. At the same time, the bed elevation in the broken zone is observed and further studies are made of the relationship among surface uplift force, excess pore water pressure and bed elevation. The analysis results show that the surface uplift force has increased with the increase in the bed elevation and decreased with the decrease in the bed elevation. However, the relationship between the excess pore water pressure and the bed elevation is quite opposite.

**Key words:** breaking wave; bed form; excess pore water pressure; uplift force