

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.014

贝宁海滩波浪传播演变特性及其对海床稳定性的影响

罗梦岩^{1,2}, 王广生³, 童林龙^{1,2}, 孙雷⁴, 张继生^{1,2}

(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. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027;

4. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510440)

摘要: 基于贝宁海滩侵蚀区段地形特征建立了海滩剖面物理模型, 通过斜坡上波浪浅水变形和破碎物理试验, 研究了贝宁海滩波浪传播演变规律和孔隙水压力响应特征, 分析了波浪运动过程中的浅水变形特性、破碎规律和土体液化情况。结果表明: 波浪在传播至沙坝附近时波高显著增大, 且随着入射波高的增大, 波浪的传播变形更为剧烈; 波浪在向岸传播过程中非线性参数不断增大, 并在沙坝附近达到临界值、发生破碎, 随着入射波高和周期的增大, 波浪破碎带逐渐外移, 长周期涌浪比短周期风浪更容易发生破碎, 涌浪能量占比越大, 破碎越早, 其破碎波呈现出崩破波的特征; 波面形态的急剧变化导致沙坝附近的垂直孔压梯度陡增, 从而影响了土颗粒的有效容重, 随着入射波高的增大, 沙坝附近的水平孔压梯度增大, 土体更容易液化; 风浪能量占比为 50% 的双峰谱波浪引起的水平孔压梯度最大, 液化显著, 涌浪次之, 纯风浪引起的水平水压梯度和液化风险最小。

关键词: 长周期波浪; 双峰谱; 孔隙水压力; 浅水变形; 土体液化; 贝宁海滩

中图分类号: P731.22; TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)02-0115-09

Wave propagation and its influence on the stability of seabed over the Benin coast

LUO Mengyan^{1,2}, WANG Guangsheng³, TONG Linlong^{1,2}, SUN Lei⁴, ZHANG Jisheng^{1,2}

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

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

3. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China;

4. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. Ltd., Guangzhou 510440, China)

Abstract: A standard physical model of beach profiles was established based on the morphological features of the erosion section of Benin beach. The wave propagation and evolution laws, along with pore water pressure response characteristics, were investigated through physical tests of wave shoaling and breaking on a slope. Wave shoaling, breaking, and liquefaction during wave propagation were analyzed. The findings indicate a substantial increase in wave height as it propagates near the sandbar; wave propagation deformation increases with rising incident wave height. Nonlinear parameters of the wave continually increase during onshore propagation and attain critical values close to the sandbar, resulting in breaking. With increasing heights and periods of the incident wave, the wave-breaking zone shifts seaward progressively, with long-period swell more prone to breaking than short-period storms. As the proportion of swell increases, the breaking wave occurs earlier, characterized by spilling breakers. Additionally, abrupt changes in waveform result in a sharp increase in vertical pore pressure gradient near the sandbar, affecting soil effective weight. The higher the incident wave height, the larger the horizontal pore pressure gradient, increasing susceptibility to liquefaction. Furthermore, bimodal spectrum waves with 50% wind wave proportion cause the largest horizontal pore pressure gradients and most significant liquefaction, followed by swollen waves; wind waves alone result in the smallest liquefaction.

Key words: long period wave; bimodal spectrum; pore water pressure; wave shoaling; liquefaction; Benin coast

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2023YFE0126300); 国家自然科学基金项目(52101309)

作者简介: 罗梦岩(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。E-mail: myluo@hhu.edu.cn

通信作者: 童林龙(1989—), 男, 副研究员, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。E-mail: tlnlj@hhu.edu.cn

引用本文: 罗梦岩, 王广生, 童林龙, 等. 贝宁海滩波浪传播演变特性及其对海床稳定性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 115-123.

LUO Mengyan, WANG Guangsheng, TONG Linlong, et al. Wave propagation and its influence on the stability of seabed over the Benin coast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 115-123.

当波浪向海岸传播时,受地形约束会发生变形、折射、破碎等现象,其波长、波高、传播速度随之变化。贝宁海滩的主导波浪是以长周期涌浪为主的双峰谱混合浪,其谱峰周期大(8~22 s),且表现出明显的非线性特征,具有较强的破坏力,在近岸地区的传播演变情况较为复杂。同时,波浪荷载作为周期性动荷载,在传播过程中海床表面的动水压强较大,与海床土体的稳定性密切相关,这对岸线泥沙输移、海工结构安全、海岸冲刷防护、港口规划建设等工程问题具有重要影响。因此,掌握波浪的传播变形规律和海床土体响应,对近岸区域的工程设计与建设具有一定的价值。

近几十年来,前人对波浪浅水变形规律和破碎现象进行了大量研究,得到了大量的试验和现场资料。在自由变化规律方面,Ting等^[1]基于试验方法研究了周期波在斜坡地形上的浅水变形规律,Goring^[2]和 Fujii等^[3]分别采用试验和现场观测方法研究了海啸波在岸滩上的传播演变规律。在对波浪破碎的试验测量中,主要分为接触式测量与非接触式测量,接触式测量仪器主要有声学多普勒测量流速仪、光纤反射仪等,非接触式测量仪器主要有粒子图像测速仪(PIV)、激光多普勒测速仪、气泡图像测速仪等。Stive^[4]和 Mizuguchi^[5]分别采用热膜流速仪和多普勒流速仪在波浪水槽中研究了周期波在浅化和破碎过程中的流速场和紊动特性;蒋昌波等^[6]基于粒子图形测速技术对波浪沿斜坡传播特性进行了研究,结果表明波浪沿斜坡传播过程中波形不对称性加剧,并且波能迅速衰减。在数值模拟方面,李孟国等^[7]总结与归纳了波浪近岸传播浅水变形的各种数学模型,如射线理论、缓坡方程、Boussinesq方程等;房克照等^[8]利用非静压波浪传播数值模型研究了近岸区域孤立波和规则波传播和变形的过程;王广生等^[9]基于开源波浪数值计算软件COBRAS建立了贝宁典型海滩剖面数值模型,模拟了常浪条件和极端波浪条件下海滩上波浪的传播规律。

为了研究波浪传播变形过程中海床的稳定性,很多学者开展了海床土体动力响应试验。Sleath^[10]最早利用水槽试验研究了波浪作用下孔隙水压力的响应规律并验证了波浪作用下海床动力响应解析解,发现波浪引起的孔隙水压力存在相位滞后现象;Kajima等^[11-12]利用水槽试验设备对三维前进波作用下自由海床内的孔隙水压力响应问题进行了相关研究;Maeno等^[13-15]利用水槽试验研究了粉质海床和砂质海床在波浪作用下的孔隙水压力和应力的响应情况;Cheng等^[16]利用水槽试验研究了规则碎波作用下孔隙水压力响应及海床形状的变化情况。对于极端波浪条件下的海床响应问题,Schumacher等^[17]利用水槽试验对飓风作用下的海床孔隙水压力响应问题进行了研究。

前人针对波浪浅水变形及海床土体响应问题开展了大量理论和试验研究,但对贝宁海滩长周期波浪的传播和破碎规律还缺乏了解,且贝宁海滩波浪为长周期涌浪与短周期风浪组合的双峰谱波浪,其引起的水沙运动和海床土体响应与我国沿海地区存在显著差异,由于相关研究基础较为薄弱,当地海岸及港口工程的设计、规划与建设面临诸多挑战。为此,本文基于贝宁海滩侵蚀区段地形特征,通过海滩剖面物理模型试验研究该区域的长周期波浪传播演变情况,分析长周期波浪传播至近岸浅化过程中的变形特性、破碎规律及海床土体响应特征,以为贝宁海滩保护与修复提供科学依据和理论基础。

1 物理模型试验

本文根据贝宁海滩侵蚀特性开展试验研究。图1为贝宁湾海域,选择贝宁沿岸平均岸滩剖面观测结果为初始地形(图2,图中 x 为水平距离,从海岸线向海方向延伸, z 为高程,以海平面为基准),搭建海滩剖面物理模型。如图2所示,贝宁沿岸平均岸滩剖面的最高潮位为0.8 m(实线为平均潮位,虚线为最高潮位),在

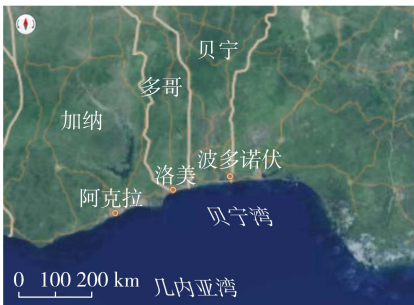


图1 贝宁湾海域

Fig.1 Waters of Benin Bay

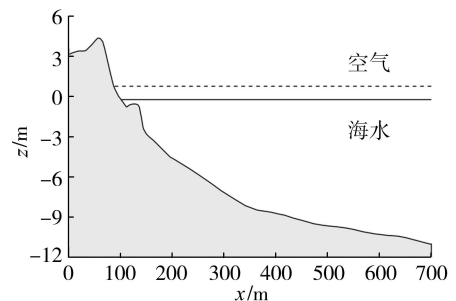


图2 贝宁沿岸平均岸滩剖面

Fig.2 Average beach profile along the coast of Benin

水平方向上 100~150 m 之间由于长期波流荷载作用形成了水下沙坝。沙坝外侧(向海侧)海床坡度较小,为 0.01~0.03。贝宁湾常浪向为南南西向,在常浪条件下,贝宁湾海域的有效波高范围为 0.75~1.75 m,谱峰周期范围为 8~16 s。根据 1981—2006 年波浪模拟结果,在极端波浪条件下,最大有效波高为 3.1 m,最大谱峰周期为 22 s^[18],海滩泥沙粒径为 0.2~1.0 mm,泥沙中值粒径为 0.4 mm。根据实测海域频谱特性分析,贝宁湾海域波浪数据均体现出明显的双峰形态,其中低频涌浪为能量主导成分。

为研究波浪浅化过程中的海床动力响应特征,试验中模型与原型应满足弗劳德数(Fr)相似准则。弗劳德数表示为^[19]

$$Fr = v/\sqrt{gh} = H_s/gT^2 \tag{1}$$

式中: H_s 为有效波高; T 为波周期; v 为波速; h 为水深; g 为重力加速度。基于式(1),弗劳德数相似意味着几何比尺 λ_l 与时间比尺 λ_t 的关系为

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} \tag{2}$$

为了探究土颗粒的动力响应规律,需要满足渗流力相似,即模型与原型遵循达西数(Da)相似准则。波浪在多孔介质中传播时,达西数表示为^[20]

$$Da = \rho_w k_s \omega / \mu \tag{3}$$

其中 $k_s = n^3 d_{50}^2 / 180(1 - n)^2$

式中: ρ_w 为水的密度; k_s 为海床的渗流系数; n 为孔隙率; ω 为波浪角频率; μ 为动力黏度。根据当地地形、波浪特征及设备性能等因素选定模型几何比尺为 1 : 25,并根据弗劳德数相似准则和达西数相似准则确定时间比尺为 1 : 5、泥沙粒径比尺为 1 : $\sqrt{5}$ 。

海滩剖面物理模型试验考虑动床情况,初始地形考虑实际海滩地形缩尺,试验在河海大学港口航道工程与海岸科学实验中心开展,试验水槽长 70 m、宽 1 m、高 1.5 m,试验水深 0.6 m,实验室造波机可造周期 0.5~5.0 s、波高 0.02~0.30 m 的波浪,两端分别设有推板式造波机和消波板,造波机可以生成单向的规则波和不规则波,不规则波可以根据输入的谱型自定义波谱,并且具备二次消波功能,可以减小反射波浪对最终波谱的影响。试验水槽及整体布置如图 3 所示。

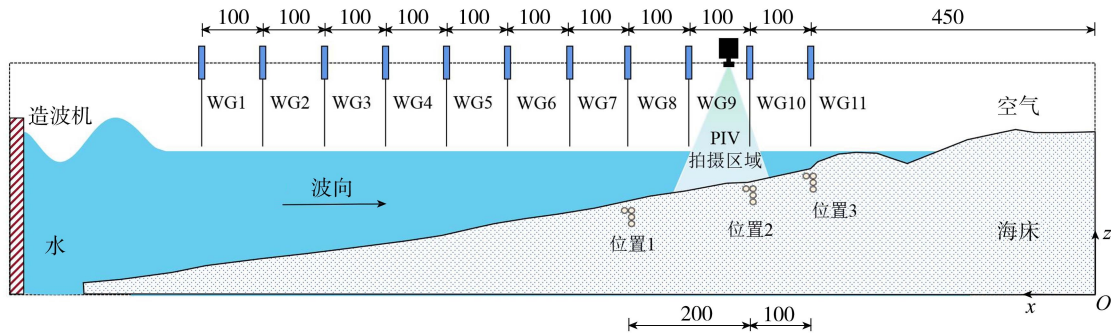


图 3 物理模型试验整体布置示意图(单位:cm)

Fig. 3 Overall layout of physical model test (unit: cm)

采用浪高仪、孔隙水压力传感器阵列和高速摄像机分别观测波浪传播过程中自由液面、孔隙水压力和地形变化。电容式浪高仪布置间距为 1 m,共 11 个(WG1~WG11)。在位置 1 ($x=750$ cm, WG8 处)、位置 2 ($x=550$ cm, 沙坝外缘和 WG10 处)、位置 3 ($x=450$ cm, 沙坝和 WG11 处)分别布置 3 个孔隙水压力传感器阵列,浪高仪和孔隙水压力传感器的采样频率均设置为 100 Hz(采样间隔 0.01 s),测量结果的相对精度均为 0.5%,两者通过 Measurement ComputingTM(MCC)公司的 USB-2533 采集系统及其配套的 DAQ 采集软件同步采集数据。图 4 为孔隙水压力传感器阵列布置方式。

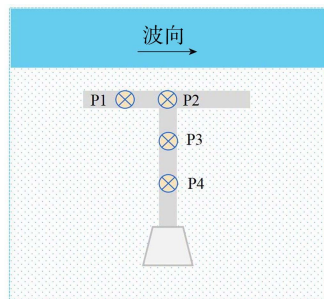


图 4 孔隙水压力传感器阵列布置方式

Fig. 4 Layout of pore water pressure sensor array

因贝宁湾波浪以涌浪为主,波谱呈现双峰特性,为了分析入射波浪条件对长周期波浪传播变形和破碎规律的影响,根据当地实测波谱调整模型中不规则波谱,根据比尺缩放后,将双峰谱分为涌浪(低频波浪主峰)与风浪(中高频波浪次峰)部分,通过调整两部分的能量占比,设置入射波高 H 为 0.04、0.08、0.12 m,风浪能量占比为 100%、75%、50%、25%、0 的 15 组试验,如表 1 所示。由于造波机的输入参数和实际造波结果存在一定的偏差,试验前还需要改变造波机的相关输入参数进行造波测试,并使用布置在斜坡坡脚前的浪高仪采集的数据完成校正,以获得所需工况的输入参数。图 5 给出了不同组次试验的实测波浪谱和目标波浪谱的对比,两者的谱峰位置、波能密度、有效波高误差符合试验要求。

表 1 试验入射波浪条件

Table 1 Summary of experimental incident wave conditions

试验组次编号	入射波高/m	类型	风浪能量占比/%
A1	0.04	单峰(风浪)	100
A2	0.08	单峰(风浪)	100
A3	0.12	单峰(风浪)	100
A4	0.04	双峰	75
A5	0.08	双峰	75
A6	0.12	双峰	75
A7	0.04	双峰	50
A8	0.08	双峰	50
A9	0.12	双峰	50
A10	0.04	双峰	25
A11	0.08	双峰	25
A12	0.12	双峰	25
A13	0.04	单峰(涌浪)	0
A14	0.08	单峰(涌浪)	0
A15	0.12	单峰(涌浪)	0

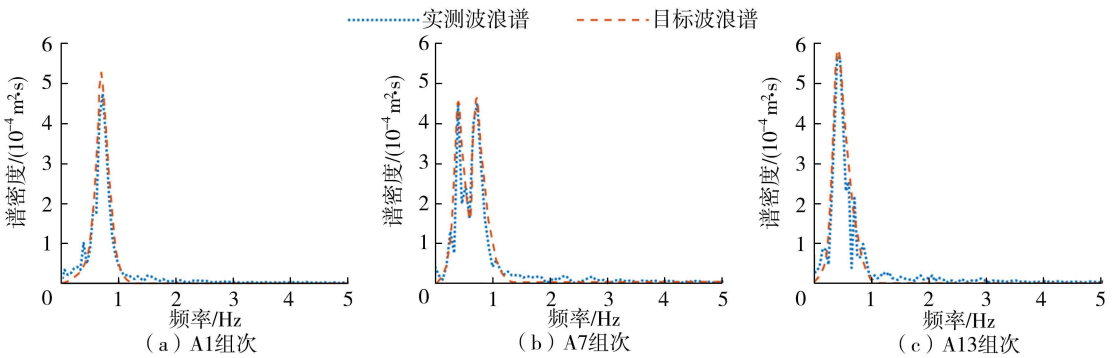


图 5 不同试验组次实测波浪谱与目标波浪谱对比

Fig. 5 Comparison between measured wave spectrum and target wave spectrum in different test groups

2 结果分析与讨论

2.1 波浪的波高变化特性

2.1.1 入射波高的影响

波浪由深水区向浅水区传播过程中会发生浅水变形,图 6 为风浪能量占比 50% 情况下入射波高 H 分别为 0.04、0.08、0.12 m 的双峰谱波浪向岸传播时的自由液面 η 变化曲线(图中 t 为时间),自上至下依次为距

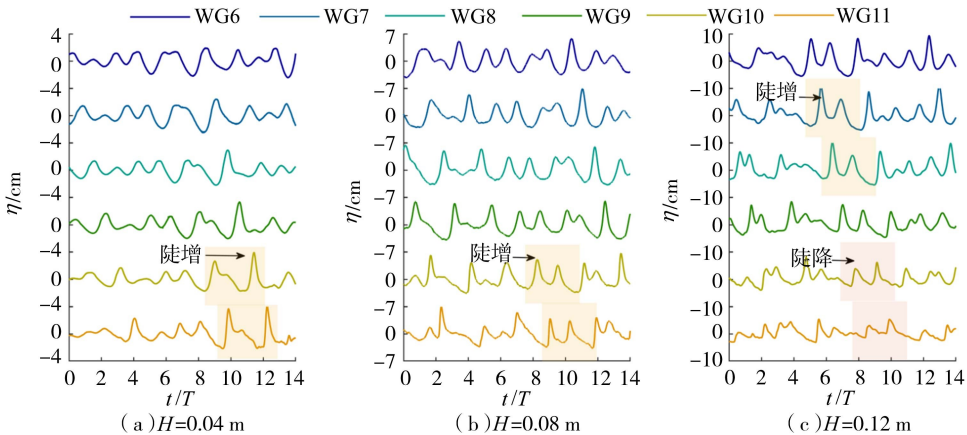


图 6 不同入射波高的双峰谱波浪向岸传播时的自由液面变化曲线

Fig. 6 Wave surface change curve of bimodal spectrum wave with different incident wave heights in the process of shore propagation

离沙坝不同位置处 (WG6~WG11) 的自由液面,黄(红)色阴影为波高发生显著变化即陡增(降)的位置。结果表明,波浪在传播至沙坝附近时波高显著增大,波形发生变化。例如 0.04 m 入射波高的双峰谱波浪在沙坝外缘处波高达到 0.07 m,0.08 m 入射波高的双峰谱波浪在沙坝外缘处波高达到 0.09 m,波浪传播至沙坝时,其波形发生显著变化。而当入射波高增大到 0.12 m 时,波浪未传播至沙坝时波高就已经达到最大值,此后波浪发生破碎,波高急剧减小,波浪因破碎引起的能量耗散而发生波形变化。因此,随着入射波高的增大,波浪的传播变形情况更为剧烈,当入射波高较大时,其向岸传播过程中波高增大更快。

2.1.2 谱峰周期的影响

图 7 为入射波高 0.04 m、不同周期的双峰谱波浪向岸传播时的自由液面变化曲线,其中风浪能量占比越小,周期越长,当风浪能量占比为 0 时,为涌浪。由图 7 可见,当风浪能量占比为 100% 时,波浪在传播至在沙坝外缘处波高变化不大,为 0.05 m。当风浪能量占比为 50% 时,波浪在传播至沙坝外缘处波高变化较大,为 0.07 m。当风浪能量占比为 0 时,即涌浪传播至沙坝外缘处波高变化最大,为 0.08 m,此时入射波周期最长。这主要是因为随着谱峰周期的增大,浅水变形系数也逐渐增大。因此,谱峰周期越大,波浪在向岸传播时波高变化也越大,其传播变形更为显著。贝宁海滩受长周期涌浪的影响,该地区波浪周期较长,其沙坝处波浪变化情况也因此较为剧烈。

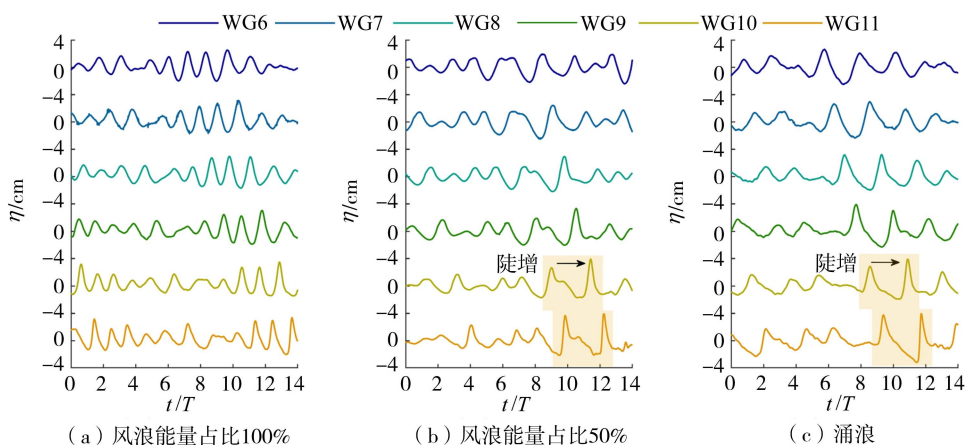


图 7 不同周期的双峰谱波浪向岸传播时的自由液面变化曲线

Fig. 7 Wave surface change curve of bimodal spectrum wave with different periods in the process of shore propagation

以连续观测的 100 个波作为一个标准段,采用上跨零点法进行统计分析,计算特征波高 H_0 ,定义非线性参数 $\varepsilon = H_0/h$,破碎指标 $\varepsilon_0 = 0.72 + \tan\beta$,海滩坡度 $m = \tan\beta$ (β 为底坡与水平轴的夹角),当 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 时,则可判断波浪已经发生破碎。图 8 为风浪能量占比 50% 条件下不同入射波高的双峰谱波浪非线性参数变化和破碎带分布区域,可见双峰谱波浪在向岸传播过程中非线性参数不断增大,并在沙坝附近达到临界值,波浪发生破碎。比较不同入射波高的双峰谱波浪传播变化情况,发现随着入射波高的增大,波浪尚未传播至沙坝时 ε 已经达到临界值。例如当入射波高为 0.04 m 时, ε 在 $x = 482$ cm 处达到 ε_0 ,此时波浪发生破碎;当入射波高为 0.08 m 时, ε 在 $x = 525$ cm 处达到 ε_0 ;而当入射波高为 0.12 m 时, ε 在 $x = 710$ cm 处达到 ε_0 。因此,随着入

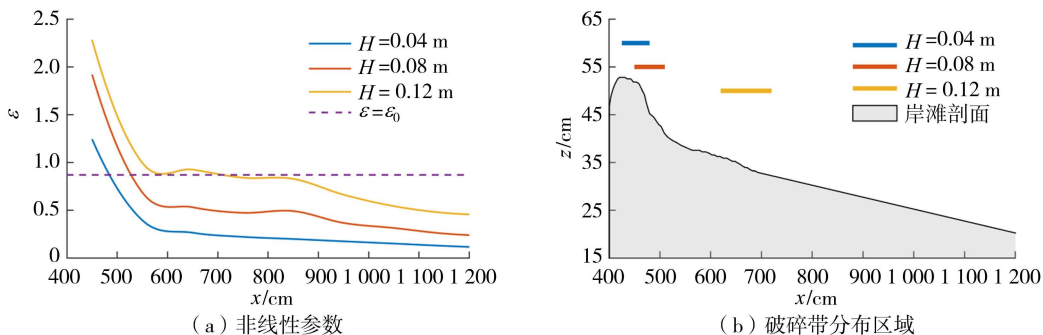


图 8 不同入射波高的双峰谱波浪非线性参数变化和破碎带分布区域

Fig. 8 Changes of nonlinear parameters and surf zone of bimodal spectrum wave under different incident wave heights

射波高的增大,波浪破碎带逐渐外移,这一计算结果与水槽试验中观测得到的现象基本一致,试验中观测得到 0.04、0.08、0.12 m 入射波高条件下波浪分别在 $x = 425 \sim 480$ cm、 $x = 450 \sim 510$ cm、 $x = 650 \sim 700$ cm 处破碎。如图 9 所示,破碎的波浪均呈现出卷破波的特征,波峰的前沿先变得陡立,然后卷曲成舌状,舌状波峰逐渐向下翻卷,最后投向水中,发生破碎。

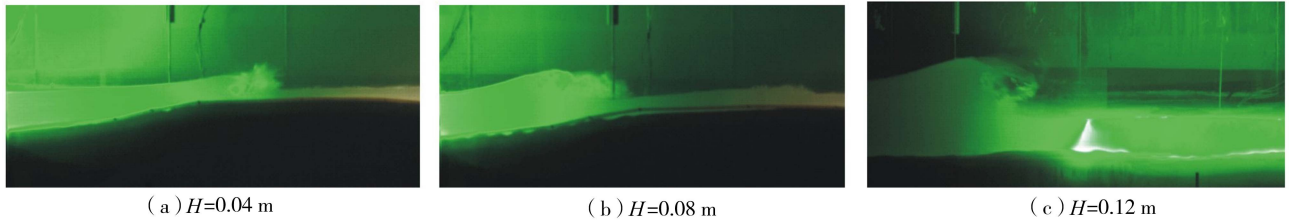


图 9 不同入射波高的双峰谱波浪向岸传播时的破碎位置及形态

Fig. 9 Breaking position and shape of bimodal spectrum wave under different incident wave heights in the propagation process

试验结果还表明谱峰周期对破碎带的影响也具有一定的规律。以入射波高 0.04 m 为例,由图 10 可知,随着风浪能量占比的逐渐减小(周期增长),非线性参数 ε 达到临界值 ε_0 的位置逐渐外移,进一步导致破碎带向离岸方向外移,但均在 460~520 cm 之前破碎,这与试验所观测到的现象基本一致(图 11)。这主要是因为随着波浪周期的增大,浅水变形系数也逐渐增大,因此,长周期涌浪占比越大,波浪越早发生破碎。特别地,当其为纯涌浪时,波浪最早发生破碎。此外,短周期风浪在破碎时呈现出卷破波的特征,当风浪能量占比减小、涌浪能量占比增大时,破碎波同时伴有卷破与崩破的特点,大部分波浪卷曲成舌状,一小部分波浪波峰顶部不断产生白色浪花并向前传播,当风浪能量占比减小至 25% 时,破碎波完全呈现为崩破波特征。

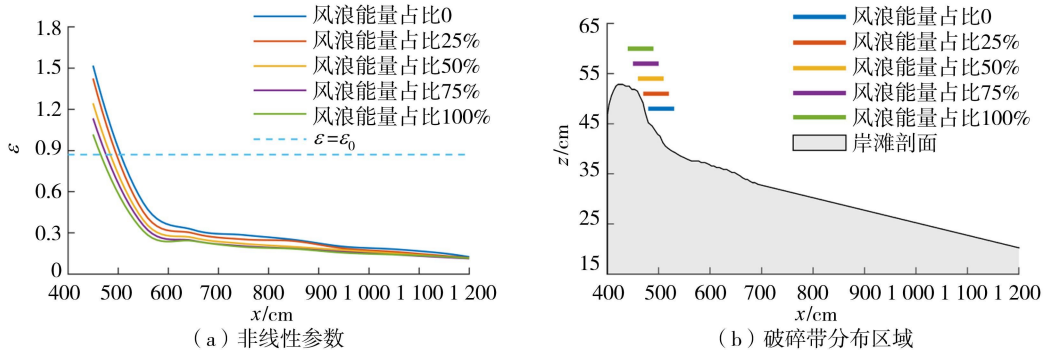


图 10 不同周期的双峰谱波浪非线性参数变化和破碎带分布区域

Fig. 10 Changes of nonlinear parameters and surf zone of bimodal spectrum wave under different periods

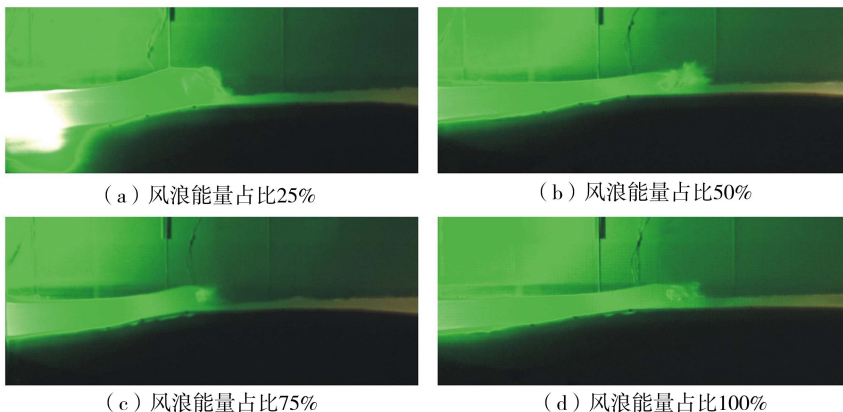


图 11 不同周期的双峰谱波浪向岸传播时的破碎位置及形态

Fig. 11 Breaking position and shape of bimodal spectrum wave under different periods in the propagation process

结合泥沙重力、摩擦力、黏性剪切应力和孔隙水压力对床面泥沙单元进行受力分析,当水平孔压梯度超过黏性剪切应力、垂直孔压梯度超过土颗粒的有效容重时,土体会失稳,由此引入两个无量纲参数 S 和 ξ 分

别表征水平孔压梯度 $\partial p/\partial x$ 和垂直孔压梯度 $\partial p/\partial z$,以此分析泥沙颗粒的状态。 S 和 ξ 计算公式分别为

$$S = - \frac{1}{(\rho_s - \rho_w)g} \frac{\partial p}{\partial x} \tag{4}$$

$$\xi = \frac{1}{(\rho_s - \rho_w)g} \frac{\partial p}{\partial z} \tag{5}$$

式中: ρ_s 为泥沙密度; g 为重力加速度; p 为孔隙水压力。

2.1.3 斜坡上波面形态及孔压梯度变化

图 12 为同一波浪作用下(A3组次)斜坡不同位置处的无量纲孔压梯度变化曲线。水土交界面的孔压梯度相位基本一致,波峰水平孔压梯度近乎为 0,垂直孔压梯度达到较大的负值,因而对土颗粒的有效容重产生较大影响,计算结果表明位置 1 处($x=750\text{ cm}$)垂直孔压梯度的最大值为 35.2%,位置 2 处($x=550\text{ cm}$)垂直孔压梯度的最大值为 70.8%,当波浪传播至沙坝处(位置 3, $x=450\text{ cm}$)时,波面形态发生急剧变化,此时波峰下的垂直孔压梯度陡增,沙坝附近的泥沙失稳并大量输移。

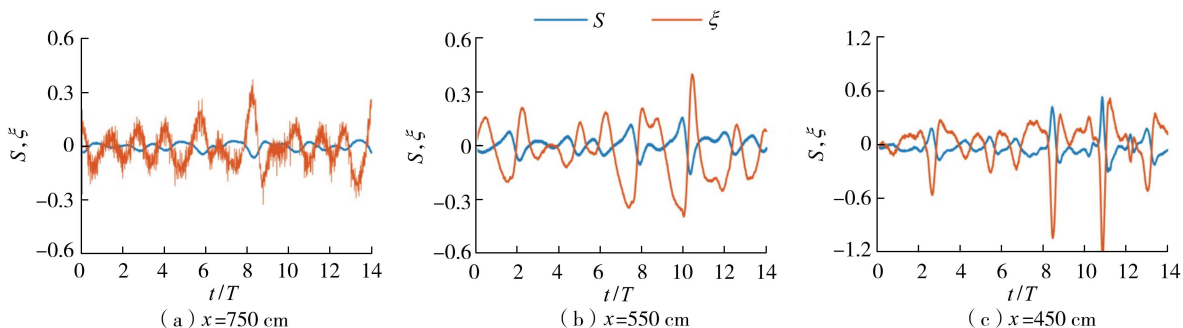


图 12 不同位置处波浪作用下无量纲孔压梯度变化曲线

Fig. 12 Change curves of dimensionless pore water pressure gradient under wave load at different positions

2.1.4 波周期对孔压梯度的影响

图 13 为不同周期的波浪作用下位置 2 处($x=550\text{ cm}$)无量纲孔压梯度变化曲线。以 0.04 m 入射波高为例,当风浪能量占比 100%时,位置 2 处水平和垂直孔压梯度对土体有效容重的影响分别为 16.7%和 83.3%;当风浪能量占比 75%时,位置 2 处水平和垂直孔压梯度对土体有效容重的影响分别为 41.7%和

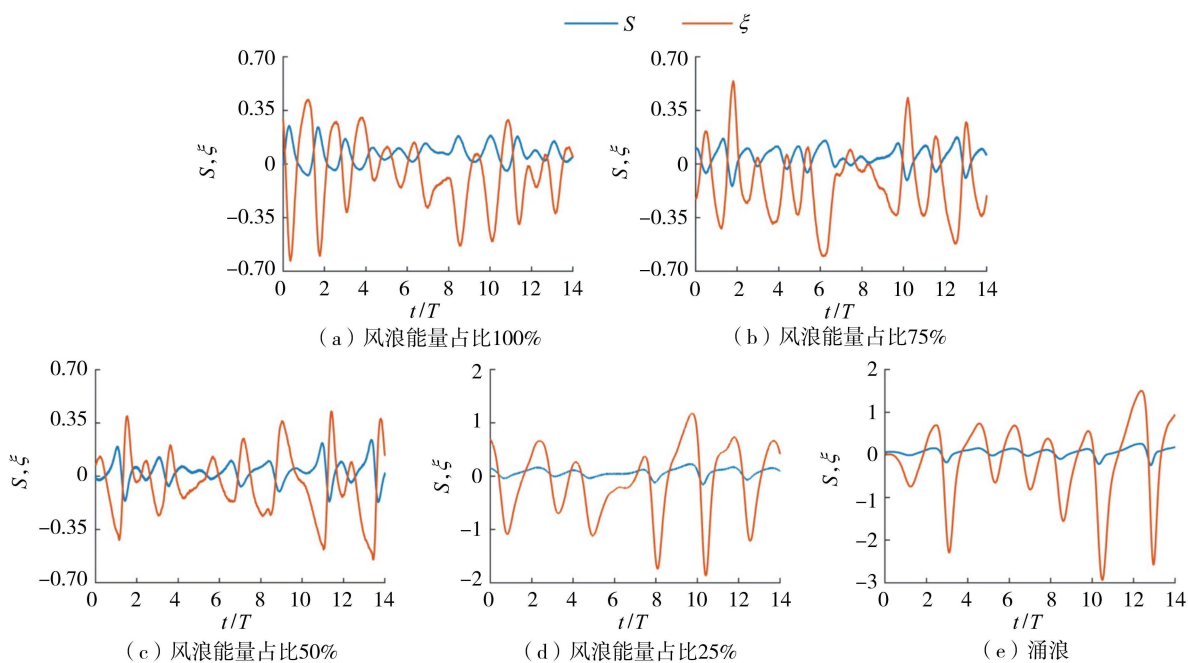


图 13 不同周期波浪作用下位置 2 处无量纲孔压梯度变化曲线

Fig. 13 Change curves of dimensionless pore water pressure gradient at position 2 under wave load of different periods

108.2%,为风浪能量占比 100%的 2.5 倍和 1.3 倍;当风浪能量占比 25%时,位置 2 处垂直孔压梯度对土体有效容重的影响达到 316.7%,为风浪能量占比 100%的 3.8 倍。因此,长周期波浪作用下海床内的孔压梯度变化比短周期波浪更为显著,贝宁湾波浪以涌浪为主,周期较长,海床土体响应更加剧烈。

2.2 波浪作用下海床稳定性分析

当波浪作用于海床表面时,海床土体中的孔隙水压力会发生变化,在土颗粒之间的有效应力接近零时,部分海床土体将发生液化,一旦发生液化,土颗粒将处于悬浮状态。因此,作为一种海床失稳的极端破坏模式,液化对海床土体稳定性具有重要的影响。砂质海床的渗透性较好,在波浪作用下常处于排水固结状态,可以通过多孔介质模型描述。Madsen^[21]主要通过孔隙水压力的变化来判断砂质海床稳定性,发现当波浪引起的水平孔压梯度大于临界值时,多孔床层将发生液化失稳,并提出了以下液化判定准则:

$$-\frac{1}{(\rho_s - \rho_w)g} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\gamma^*}{\gamma_w} \tan \theta \quad (6)$$

式中: γ^* 为土颗粒的有效容重; γ_w 为水的容重; θ 为内摩擦角。

由图 14 可以看出,当入射波高为 0.04 m 时,在不同风浪能量占比的波浪作用下,水平孔压梯度均未达到土体液化所需的临界值,因此海床土体均没有发生液化现象。当入射波高增大至 0.08 m 时,波浪引起的水平孔压梯度也增大,其中在风浪能量占比 50%和 75%的双峰谱波浪作用下的水平孔压梯度大于临界值,海床土体发生液化,其余组次(风浪能量占比 25%、100%)未达到土体液化条件。当入射波高增大至 0.12 m 时,水平孔压梯度急剧增大,均大于临界值,此时所有波浪条件下的海床土体均发生液化。因此,随着波高的增大,波浪引起的水平孔压梯度增大,使土体更容易液化。

值得注意的是,当入射波高一定时,风浪能量占比为 50%的双峰谱波浪引起的水平孔压梯度最大,纯风浪(风浪能量占比 100%)引起的水平孔压梯度最小。入射波高为 0.08 m 时,风浪能量占比 50%的双峰谱波浪引起的水平孔压梯度最大(0.36),风浪能量占比 75%的双峰谱波浪和纯涌浪次之,均达到土体液化临界值,此时海床土体的稳定性较差,而纯风浪引起的水平孔压梯度最小,仅为 0.18,低于临界值。入射波高为 0.08 m 和 0.12 m 时,风浪能量占比 50%的双峰谱波浪引起的水平孔压梯度均最大,涌浪次之,纯风浪最小。因此,在该地区的海滩保护修复及工程结构物建设中,除了需要重视涌浪的影响,也要注意风浪能量占比为 50%的双峰谱波浪对该地区海床土体稳定性的影响。

3 结 论

a. 贝宁海滩波浪在传播至沙坝附近时波高显著增大,且随着入射波高的增大,波浪的传播变形更为剧烈,当入射波高为 0.12 m 时,波浪未传播至沙坝时波高就已达到最大值。此外,周期对波浪的传播变形也有影响,涌浪占比越大,周期越长,波浪传播变形越显著。

b. 波浪在向岸传播过程中非线性参数不断增大,并在沙坝附近达到临界值,波浪发生破碎,且随着入射波高和周期的增大,波浪破碎带逐渐外移,长周期涌浪比短周期风浪更容易发生破碎,涌浪能量占比越大,破碎越早,其破碎波呈现出崩破波的特征。

c. 当波浪传播至沙坝处(位置 3)时,波面形态发生急剧变化,此时垂直孔压梯度陡增,影响土颗粒的有效容重。波浪周期越长,水平和垂直孔压梯度的变化越大,海床土体响应越剧烈。

d. 随着入射波高的增大,波浪引起的水平孔压梯度增大,土体更容易液化,在入射波高为 0.12 m 的波浪作用下海床土体均发生液化。此外,风浪能量占比 50%的双峰谱波浪引起的水平孔压梯度最大,最易液化,涌浪次之,纯风浪(风浪能量占比 100%)引起的水平孔压梯度和液化风险最小。

参考文献:

[1] TING F C K, KIRBY J T. Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone[J]. Coastal Engineering, 1994, 24(1/

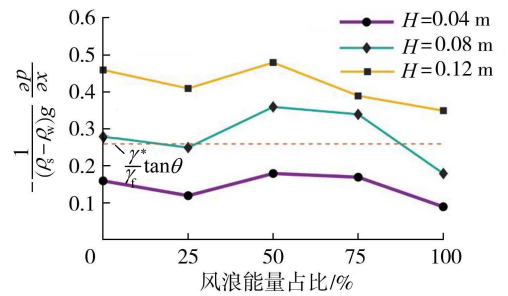


图 14 不同波浪条件下位置 2 处海床土体液化情况

Fig. 14 Seabed liquefaction at position 2 under different waves

- 2);51-80.
- [2] GORING D G. Tsunamis-the propagation of long waves onto a shelf[D]. Pasadena:California Institute of Technology,1979.
- [3] FUJII Y,SATAKE K,SAKAI S,et al. Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake[J]. Earth, Planets and Space,2011,63(7):815-820.
- [4] STIVE M J F. Velocity and pressure field of spilling breakers[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering. Reston:ASCE,1980:547-566.
- [5] MIZUGUCHI M. Experimental study on kinematics and dynamics of wave breaking[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering. Reston:ASCE,1986:589-603.
- [6] 蒋昌波,张陈浩,姚宇,等. 斜坡平台上波浪破碎变形 PIV 试验研究[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2012,27(4):417-423. (JIANG Changbo,ZHANG Chenhao,YAO Yu,et al. Laboratory study of wave transformation and breaking over a sloping platform using PIV technology[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2012,27(4):417-423. (in Chinese))
- [7] 李孟国,王正林,蒋德才. 近岸波浪传播变形数学模型的研究与进展[J]. 海洋工程,2002,20(4):43-57. (LI Mengguo,WANG Zhenglin,JIANG Decai. A review on the mathematical models of wave transformation in the nearshore region[J]. The Ocean Engineering,2002,20(4):43-57. (in Chinese))
- [8] 房克照,孙家文,刘忠波,等. 近岸波浪传播的非静压数值模型[J]. 水科学进展,2015,26(1):114-122. (FANG Kezhao,SUN Jiawen,LIU Zhongbo,et al. A non-hydrostatic model for water waves in nearshore region[J]. Advances in Water Science,2015,26(1):114-122. (in Chinese))
- [9] 王广生,童林龙,罗梦岩,等. 贝宁海滩上波浪传播演变特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):123-129. (WANG Guangsheng,TONG Linlong,LUO Mengyan,et al. Study on wave propagation and evolution characteristics over a beach in Benin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):123-129. (in Chinese))
- [10] SLEATH J F A. Wave-induced pressures in beds of sand[J]. Journal of the Hydraulics Division,1970,96(2):367-378.
- [11] KAJIMA R,SHIMIZU T,MARUYAMA K,et al. Experiments on beach profile change with a large wave flume[J]. Coastal Engineering,1982,18:1385-1404.
- [12] TSUI Y,HELFRICH S C. Wave-induced pore pressures in submerged sand layer[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1983,109(4):603-618.
- [13] MAENO Y,HASEGAWA T. Evaluation of wave-induced pore pressure in sand layer by wave steepness[J]. Coastal Engineering in Japan,1985,28(1):31-44.
- [14] DEMARS K R,VANOVER E A. Measurement of wave-induced pressures and stresses in a sandbed[J]. Marine Geotechnology,1985,6(1):29-59.
- [15] RIBBERINK J S,DOHMEN-JANSSEN C M,HANES D M,et al. Near-bed sand transport mechanisms under waves-a large-scale flume experiment (Sistex99) [C]//Proceedings of 27th International Conference on Coastal Engineering. Reston:ASCE,2001:3263-3276.
- [16] CHENG Yongzhou,JIANG Changbo,ZHAO Liping,et al. Experimental study of pore water pressure and bed profile change under regular breaking waves[J]. China Ocean Engineering,2012,26(3):457-468.
- [17] SCHUMACHER T,HIGGINS C,BRADNER C,et al. Large-scale wave flume experiments on highway bridge superstructures exposed to hurricane wave forces[C]//Proceedings of 6th National Seismic Conferences on Bridges and Highways. Washington D. C. :TRB,2008:1379-1390.
- [18] ALMAR R,HOUNKONNOU N,ANTHONY E J,et al. The Grand Popo beach 2013 experiment,Benin,West Africa:from short timescale processes to their integrated impact over long-term coastal evolution[J]. Journal of Coastal Research,2014,70(Sup1):651-656.
- [19] GRASSO F,MICHALLET H,BARTHÉLEMY E,et al. Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology:transients and equilibrium states[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans,2009,114(C9):C09001.
- [20] LYU Wenqi,WANG Xiaoming. Stokes-Darcy system,small-Darcy-number behaviour and related interfacial conditions[J]. Journal of Fluid Mechanics,2021,922:A4.
- [21] MADSEN O S. Stability of a sand bed under breaking waves[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. Reston:ASCE,1974:776-794.