

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.010

潜堤坡度对波浪传播变形的影响

毛鸿飞^{1,2}, 韩 龙^{1,3}, 赫岩莉¹, 周忠兵^{1,3}, 杨媛婷³

(1. 广东海洋大学海洋工程与能源学院, 广东 湛江 524088; 2. 大连理工大学海岸和近海国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 广东省南海海洋牧场智能装备重点实验室, 广东 湛江 524088)

摘要: 应用 OpenFOAM 开源计算平台, 基于黏性流理论和有限体积法建立数值水槽模型, 系统验证了强非线性波浪的传播及潜堤地形上波浪传播变形的计算准确性和精度, 并分析了入射波幅、潜堤坡度等因素对波浪传播特性的影响规律。结果表明: 数值水槽模型可较好地模拟强非线性波浪的生成和传播以及波浪经潜堤传播的变形过程; 小波陡工况下水面波形具有较好的周期性规律, 不同坡度之间存在相位差, 具体表现为坡度越平坦, 相位越滞后; 强非线性波浪条件下, 由于波浪破碎, 不同坡度波面形态呈现强非线性, 水面波形有较大差别; 入射波陡由 0.53% 增大到 3.00% 的过程中, 无量纲化波面的峰谷差均值逐渐减小, 体现出潜堤反射作用随着波陡的增大而逐渐增强。

关键词: 潜堤坡度; 波浪传播; 非线性波浪; 黏性流理论; 数值水槽模型

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)05-0076-09

Influence of slope of submerged breakwater on wave propagation and deformation

MAO Hongfei^{1,2}, HAN Long^{1,3}, HE Yanli¹, ZHOU Zhongbing^{1,3}, YANG Yuanting³

(1. College of Ocean Engineering and Energy, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Equipment for South China Sea Marine Ranching, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: In this study, a numerical flume model is established based on the viscous fluid theory and the finite volume method using OpenFOAM, one open-source computing platform, to systematically verify the accuracy and precision of calculation of strong nonlinear wave propagation and wave propagation deformation on submerged embankment topography. The influence law of incident wave amplitude and the slope of submerged breakwater on the wave propagation characteristics is explored. The results show that the numerical flume model accurately simulates the strong nonlinear wave propagation, and the wave surface changes as the wave is spreading through the submerged breakwater. In the case of small wave steepness, the surface wave shape exhibits a good periodicity, and there are phase differences between different slopes, which indicate that if the slope is flatter, the phase is more lagged. In the case of large wave steepness, the wave shapes of different slopes show strongly nonlinear and there are great differences in surface wave shapes due to wave breaking. As wave steepness increases from 0.53% to 3.00%, the mean value of the dimensionless peak-to-valley difference of the wave surface decreases, which indicate that a gradual enhancement of the reflection effect of the submerged breakwater as the wave steepness increases.

Key words: slope of the submerged breakwater; wave propagation; nonlinear wave; viscous fluid theory; numerical flume model

我国海域辽阔, 拥有丰富的海岸带资源, 近岸是重要的人类活动地带和经济发展区域。潜堤是重要的海岸防护工程, 功能是防浪消波, 防止港池淤积和波浪冲蚀岸线。波浪的传播受地形影响显著, 传播过程中可能出现波面非线性变形、翻卷、破碎、反射和绕射等物理现象, 因此深入研究潜堤地形上波浪传播变形规律具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52001071); 广东省基础与应用基础研究基金-自然科学基金面上项目(2023A1515010890, 2024A1515012321); 广东省基础与应用基础研究基金-海上风电联合基金面上项目(2022A1515240039); 湛江市海洋青年人才创新项目(2021E05010)

作者简介: 毛鸿飞(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事跨海悬浮隧道水动力学研究。E-mail: maohongfei-gd@qq.com

通信作者: 赫岩莉(1983—), 女, 讲师, 博士, 主要从事非线性水波动力学研究。E-mail: heyanni0623@126.com

引用本文: 毛鸿飞, 韩龙, 赫岩莉, 等. 潜堤坡度对波浪传播变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 76-84.

MAO Hongfei, HAN Long, HE Yanli, et al. Influence of slope of submerged breakwater on wave propagation and deformation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 76-84.

对潜堤地形上的波浪传播特性早期研究手段以物理模型试验为主。Beji 等^[1]基于物理试验,研究了波浪通过潜堤的水动力特征并总结分析了潜堤处波浪能量的变化过程。Christou 等^[2]对非线性规则波与矩形潜堤的相互作用开展了相关试验,并与基于边界元法的数值计算结果进行对比,结果表明在潜堤宽度足以确保流动分离不是主导因素的情况下,边界元法能够准确地模拟水面波形及谐波的产生;即使入射波具有非线性特征,矩形潜堤对于波浪的反射过程仍可用线性理论去描述。庞启秀等^[3]通过水槽试验研究了波流共同作用下潜堤高度与堤前水深之间的关系,发现二者比值为 0.2~0.5 时有较好的消浪减淤效果。Cho 等^[4]研究了规则波在透水和不透水两种形式潜堤上的传播及反射现象,并给出了透水防波堤的反射能力优于不透水防波堤的原理解释。

随着计算机技术快速发展,学者们对近岸的波浪传播问题开展了大量数值模拟研究。关于流体运动问题的基本理论可分为势流理论和黏性流理论。势流理论方面:陈丽芬等^[5]基于边界元法建立了波流耦合作用下的完全非线性数值水槽模型,并研究了均匀水流中潜堤地形上波浪传播变形规律;Rambabu 等^[6]基于势流理论,计算了线性波经潜堤的传播变形过程,系统研究了入射波、堤顶水深及堤顶宽度对潜堤透射的影响规律;马朝晖等^[7]基于势流理论研究了定常流经过矩形潜堤的水流流速特征,分析了堤顶宽度等参数对反射系数的影响,计算结果表明矩形潜堤对无流和波流同向时的反射系数影响较大,对波流反向时反射系数影响较小;Cooker 等^[8]考虑波浪非线性,研究了孤立波与半圆形潜堤的相互作用问题,分析了水深和波高对波浪传播特性的影响,并讨论了半圆形潜堤周围流体的二维无旋流动;李本霞等^[9]基于势流理论开展了潜堤地形上非线性波浪传播变形的数值研究,提出了一个可用来有效模拟潜堤上非线性波浪传播变形的数值分析方法,该方法能很好地模拟潜堤前坡上高次谐波的产生和堤后波浪破碎变形现象。因为势流理论无法考虑流体黏性、流动有旋性,也很难准确描述涡旋流动、波浪破碎、抨击等物理现象,因此,学者们开展了一系列基于黏性流理论的相关研究:曾诚等^[10]基于 OpenFOAM 建立二维黏性流数值波浪水槽,探究了不同造波和消波方法组合方式对不同波陡的适用性,认为小波陡工况下采用速度边界造波及大波陡工况采用推板边界造波具有较高的模拟精度;Han 等^[11]基于光滑粒子法计算研究了 1/4 圆和方形两种组合潜堤及其布置方式对消波性能的影响,认为布置方式对规则波耗散影响不显著,但潜堤浸没深度对波浪耗散有明显影响;孙亮等^[12]利用 OpenFOAM 开源程序模拟了波浪在潜堤地形上的传播变形,总结了波浪传播过程中的波形变化规律,并验证了该黏性流计算程序可以较好地模拟潜堤地形上的波浪传播;潘天娇等^[13]基于黏性流理论,深入研究了斜坡式防波堤透浪系数与堤心石粒径、相对堤身宽度、入射波高、入射波周期、波陡等要素之间的关系,并结合试验对提出的适用于规则波和不规则波的透浪系数半经验半理论公式进行了验证;Chang 等^[14]通过试验和数值模拟方法研究了在孤立波作用下矩形潜堤周围涡流的产生和演化,并对局部流场特性进行了详细的测量与分析;徐瑶瑶等^[15]基于黏性流理论系统研究了二阶聚焦波作用下透水潜堤的消波特性,分析了波高、堤顶水深、波频率、透水潜堤的孔隙率和堤顶宽度等因素对消波特性的影响;Zou 等^[16]基于黏性流理论模拟了潜堤地形上波浪传播变形过程,基于二阶谱分析了波浪不对称度和偏度发生变化的原因;王广生等^[17]采用数值模型研究了常浪条件和极端波浪条件下海滩上波浪传播规律;韩新宇等^[18]基于格子玻尔兹曼法建立了二维数值水槽模型,对孤立波与矩形潜堤和半圆形潜堤的相互作用进行了分析;Liang 等^[19]基于黏性流理论研究了波浪经双梯形潜堤的传播变形,分析了潜堤间距和堤顶宽度等对波浪传播的影响,发现淹没深度、波高和堤间距均对消波性能有显著影响,并给出了消波性能最优参数组合;Sun 等^[20]对孤立波在潜堤地形上的传播开展了数值计算,阐明了锯齿型矩形潜堤能够减小结构所受波浪力的水动力原理,并提出了反射系数经验计算公式。

本文采用 OpenFOAM 开源平台开发程序,基于黏性流理论,在二维数值波浪水槽内建立波浪与潜堤结构相互作用的计算模型,结合五阶 Stokes 非线性波浪生成和消波方法,系统研究潜堤地形上强非线性波浪传播变形特征,并重点研究分析潜堤迎浪和背浪坡度对波浪形态的影响规律。

1 数值波浪水槽模型的建立

1.1 控制方程

数值模型以纳维-斯托克斯方程为基本控制方程,其连续性方程和动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \rho g + \mu_e \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

(2)

其中

$$\mu_e = \mu + \mu_t$$

式中: u_i 为流体在*i*方向上的速度; ρ 为流体的密度; t 为时间; g 为重力加速度; p 为压强; μ_e 为有效动力学黏性系数; μ 为流体动力学黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数。

1.2 自由面捕捉方法

数值模型采用自由表面捕捉方法(volume of fluids,VOF 方法)进行自由表面捕捉,该方法能够有效地捕捉到自由表面的复杂形态。单元内水的密度和动力学黏性系数分别为

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a$$

(3)

$$\mu = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a$$

(4)

其中

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{气相} \\ > 0 \sim < 1 & \text{自由液面} \\ 1 & \text{液相} \end{cases}$$

式中: ρ_a 、 ρ_w 分别为气相和液相的密度; μ_a 、 μ_w 分别为气相和液相的黏性系数; α 为单元内的液相体积分数。

在界面方程中引入人工压缩项可以使得两相流界面形状更清晰,并将界面方程定义为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} + u_{i,r} \frac{\partial [\alpha(1 - \alpha)]}{\partial x_i} = 0$$

(5)

式中 $u_{i,r}$ 为相对压缩速度。式(5)左边第3项为人工压缩项。

1.3 边界条件

波浪数值水槽采用速度边界法和松弛方法^[21]相结合来实现造波和消波功能,如图1所示。速度边界法是一种基于改变边界的速度以产生波动的数值造波方法,波浪生成边界*AB*定义为速度入口条件,速度边界条件按所需波浪对应的理论给定,压强为 $\partial p^* / \partial n = 0$ (动态压强 $p^* = p - \rho gh$, h 为某点到自由面的距离);水槽的底部边界*BD*和消波边界*CD*均为不可滑移边界条件,初始速度和压强条件为 $u_i = 0$, $\partial p^* / \partial n = 0$;顶部边界*AC*为气相边界,边界条件为可自由进出边界条件,初始速度和压强条件为 $\partial u_i / \partial n = 0$, $p^* = 0$ 。图1中松弛区Ⅰ的功能是协助生成波浪和吸收从结构物反射回的波浪,松弛区Ⅱ的功能是消除消波边界的波浪反射影响。松弛区内,以解析形式修正数值求解。松弛区内的流体速度、压强和体积分数的修正均符合下式:

$$S_r = (1 - \delta_R) S_a + \delta_R S_c$$

(6)

其中

$$\delta_R = 1 - \frac{e^{\chi_R^{3.5}} - 1}{e - 1} \quad (0 < \chi_R < 1)$$

式中: S_r 、 S_a 、 S_c 分别为修正物理量的目标值、解析值和计算值; δ_R 、 χ_R 为松弛函数。

2 数值水槽模型验证

为验证数值水槽模型的精准性,分别对网格收敛性、大幅波生成和传播过程中波形的稳定性,以及波浪经潜堤传播的非线性变化过程进行计算验证。

2.1 网格收敛性验证

选取4组不同分辨率的网格(表1)进行数值计算并进行对比分析验证。波浪生成和传播计算域水槽长度为24.0 m,水深(d)为0.4 m,采用五阶Stokes波浪理论^[22]指定

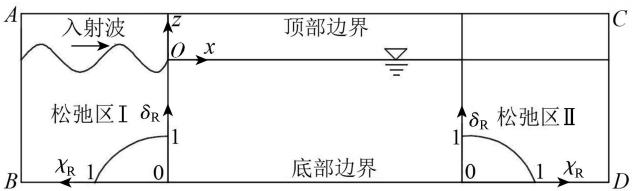


图1 边界和松弛区示意图

Fig.1 Sketch map of boundaries and relaxation zone

表1 网格参数

Table 1 Grid parameters

网格编号	一个波长内的网格数	一个波高内网格数
1	40	10
2	70	15
3	100	20
4	120	25

速度边界条件,入射波波幅 $A=0.01\text{ m}$,周期 $T=2.02\text{ s}$ 。

选取不同网格分辨率下 $x=12.5\text{ m}$ 处的波面高程(η)时间历程进行对比,结果如图 2 所示。网格 3、网格 4 的计算结果非常接近,而相对稀疏的网格 1 和网格 2 计算结果与之相比区别显著。由此可以判断,网格 3 和网格 4 对应数值结果满足网格收敛性要求,也证明了本文数值模型对波浪传播模拟的准确性,为节约计算资源及时间成本,后文使用网格 3 进行数值计算。

2.2 波浪传播过程的波陡验证

由于本文研究涉及强非线性波浪的入射传播,需在数值水槽模型中验证波浪生成和传播过程中波面形态的准确性。参考 Méhauté^[23] 提出的波浪理论适用范围和界限,在 $d=0.4\text{ m}$ 、波长 $L=3.74\text{ m}$ 、 $T=2.02\text{ s}$ 条件下,满足 $U_1=L^2H/d^3=26$ (U_1 为椭圆余弦波与 Stokes 波浪之间的界限定义值, H 为波高),五阶 Stokes 波浪理论所对应的最大波高为 0.1122 m ,波陡(H/L)约为 3.00% 。

验证计算参数见表 2。由图 3 可知,数值计算结果与五阶 Stokes 波浪理论解吻合较好,因此不论是波面高程时间历程还是空间分布,数值水槽模型在大波陡波浪生成和传播过程计算中具有较好的计算精度。

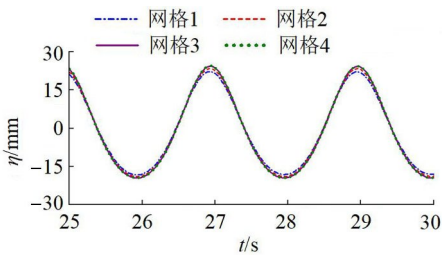


图 2 不同网格分辨率下的时间历程曲线
Fig. 2 Time-series of surface elevation with different mesh resolutions

表 2 波浪参数		
Table 2 Wave parameters		
波况	波高/m	波陡/%
1	0.0200	0.53
2	0.1122	3.00

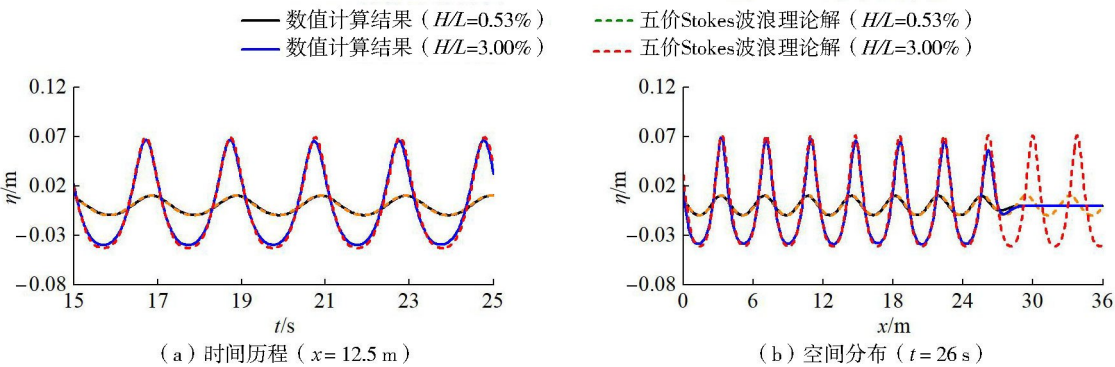


图 3 不同波陡情况下波面高程时间历程和空间分布
Fig. 3 Time-series and distribution of surface elevations under different wave steepness

2.3 潜堤地形上波浪传播验证

以 Beji 等^[1]开展的潜堤地形上波浪传播的物理试验作为验证算例,其数值计算域如图 4 所示。水槽长度为 24.0 m ,水深为 0.4 m ,潜堤堤顶左端距离松弛区 I 为 6.0 m ,右端距离松弛区 II 为 7.0 m ,潜堤顶端淹没深度为 0.1 m ,堤顶宽度为 2.0 m ,堤底宽度为 11.0 m ,迎浪侧坡度为 $1:20$,背浪侧坡度为 $1:10$,潜堤高度为 0.3 m 。分别采用线性和五阶 Stokes 波浪理论生成波浪。线性和五阶 Stokes 波浪基本参数与物理试验保持一致; $T=2.02\text{ s}$, $A=0.01\text{ m}$, $H/L=0.53\%$ 。参考 Beji 等^[1]物理试验中浪高仪设置,数值水槽中共设置 11 个浪高仪(G1~G11),坐标 x 依次为 $2.0、4.0、5.2、10.5、12.5、13.5、14.5、15.7、17.3、19.0、21.0\text{ m}$ 。

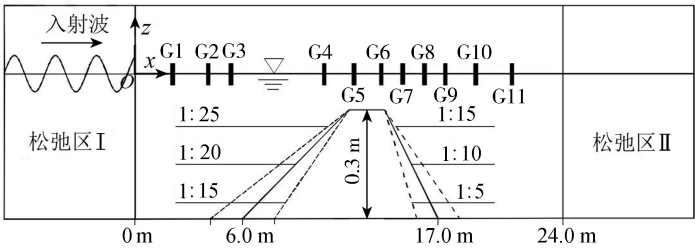


图 4 潜堤地形上波浪传播验证计算域示意图

Fig. 4 Sketch map of computational domain for wave propagation verification through submerged breakwater

由图5可知,潜堤前的浪高仪G1~G4位置,波浪在传播过程中没有明显的强非线性变形;当波浪经过潜堤迎浪坡时,浪高仪G5~G11显示波浪产生了明显变形,体现为强烈的非线性特征。总体而言数值计算结果与Beji等^[1]试验值吻合度较好,表明数值水槽模型对潜堤地形上波浪传播变形过程的计算较准确。

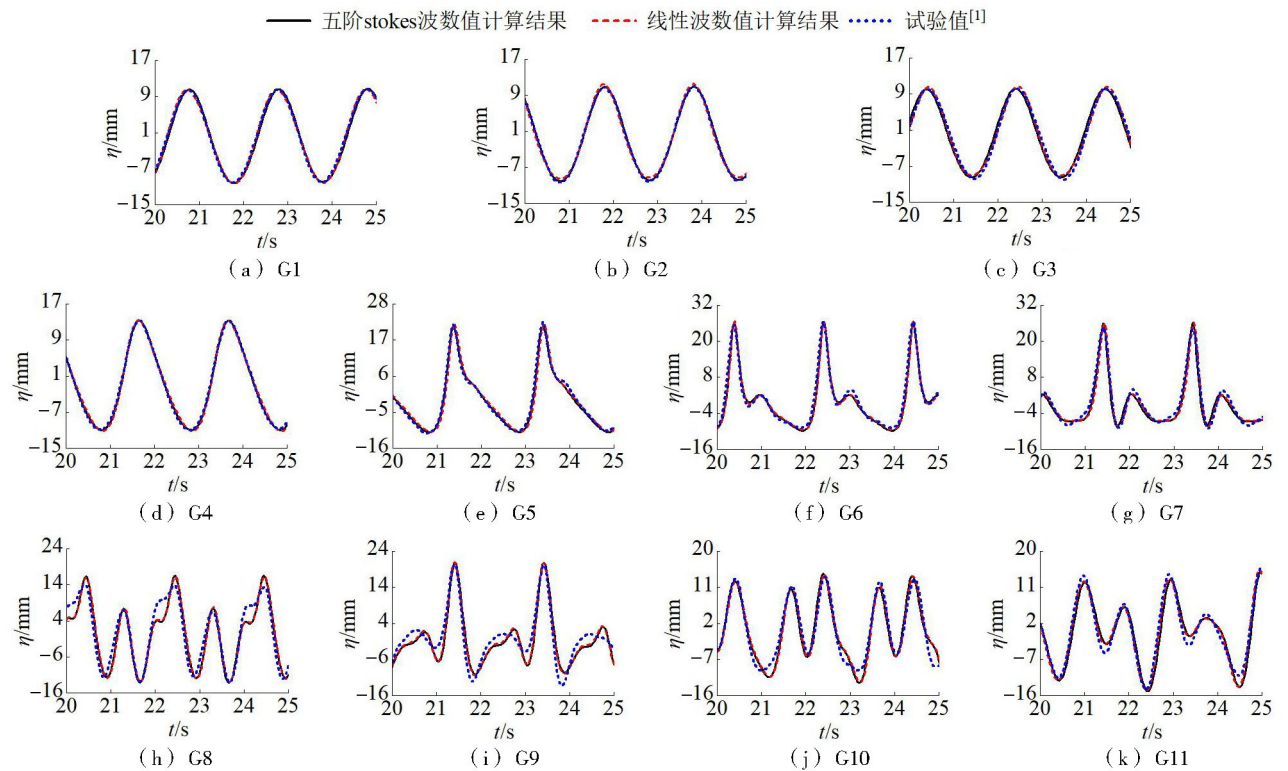


图5 小振幅波浪条件下潜堤地形上波浪传播对比

Fig. 5 Comparisons of wave propagation over submerged breakwater for small amplitude wave

由图5可知,小波陡工况下,波面形态在线性和非线性入射波浪条件下的差异不明显,为探求强非线性波浪传播的非线性特性,需考察在线性和五阶Stokes波浪理论造波条件下,大幅波浪与潜堤相互作用的差别。将波高增至0.1122 m,波陡为3.00%,保持其他波浪参数一致,在线性波和五阶Stokes波浪理论条件下,潜堤地形上波面时间历程如图6所示。各测点处两组波结果存在显著区别,G1~G4波峰和波谷形态均有差别,在浪高仪G5~G11位置处,相对于线性波,五阶Stokes波出现了明显的相位滞后现象。结合Méhauté^[23]归纳的波浪理论适用范围可知,在大波陡波浪与潜堤的相互作用计算中,采用五阶Stokes波浪理论更为合理。

3 不同参数对波浪传播的影响

廖斌等^[24]仅考虑了 $H/L=0.91\%$ 时,潜堤坡度对波浪传播变形的影响,结论具有一定局限性。为全面考察波况条件、潜堤坡度对潜堤处波浪传播的影响,设入射波 $T=2.02\text{ s}$, H/L 分别为0.53%、1.00%、1.50%、2.00%、2.50%、3.00%;坡度参数设置如下:保持背浪坡坡度为1:10,迎浪坡坡度用 $\tan\beta$ 表示,分别取1:15、1:20、1:25;保持迎浪坡坡度为1:20,背浪坡坡度用 $\tan\gamma$ 表示,分别取1:5、1:10、1:15。

不同迎浪坡坡度下的波面时间历程如图7所示(以0.53%、3.00%两种波陡为代表性工况)。小波陡($H/L=0.53\%$)波形具有较好的周期性,各坡度的波面形态有相位差,体现为坡度越平坦,相位越滞后;在G5处,波浪爬坡从深水向浅水传播过程中波浪受到浅水作用,坡度1:25时波浪受浅水效应影响最大。在强非线性波浪条件下($H/L=3.00\%$),不同坡度之间波面形态区别较大,出现周期紊乱的现象。由图7(d)~(f)可知,在潜堤作用下,波面强非线性表现的十分强烈,出现尖锐波峰及相对于波峰较平缓的波谷,表现出明显的波面水平不对称性;波峰正面变得异常陡峭,波峰高度不稳定,变化迅速,导致了波面的垂直不对称性^[25]。为确定强非线性波浪经潜堤爬坡传播过程中是否发生破碎,统计不同波陡情况下,迎浪坡(坡顶水深为0.1 m,坡度为1:20)坡顶处的平均波高。基于Goda等^[26-27]提出的经验公式,拟合破碎波高的临界曲线:

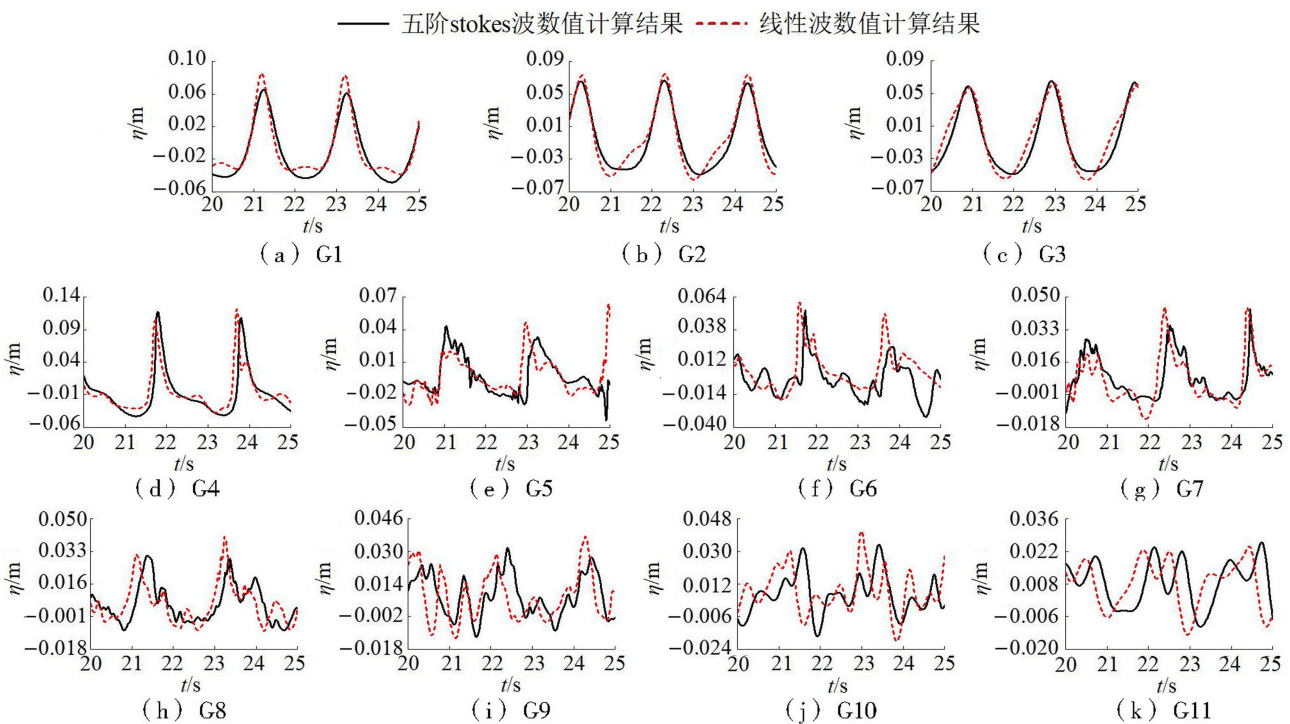


图 6 强非线性波浪条件下潜堤地形上波浪传播对比

Fig. 6 Comparisons of wave propagation over submerged breakwater for strong nonlinear wave

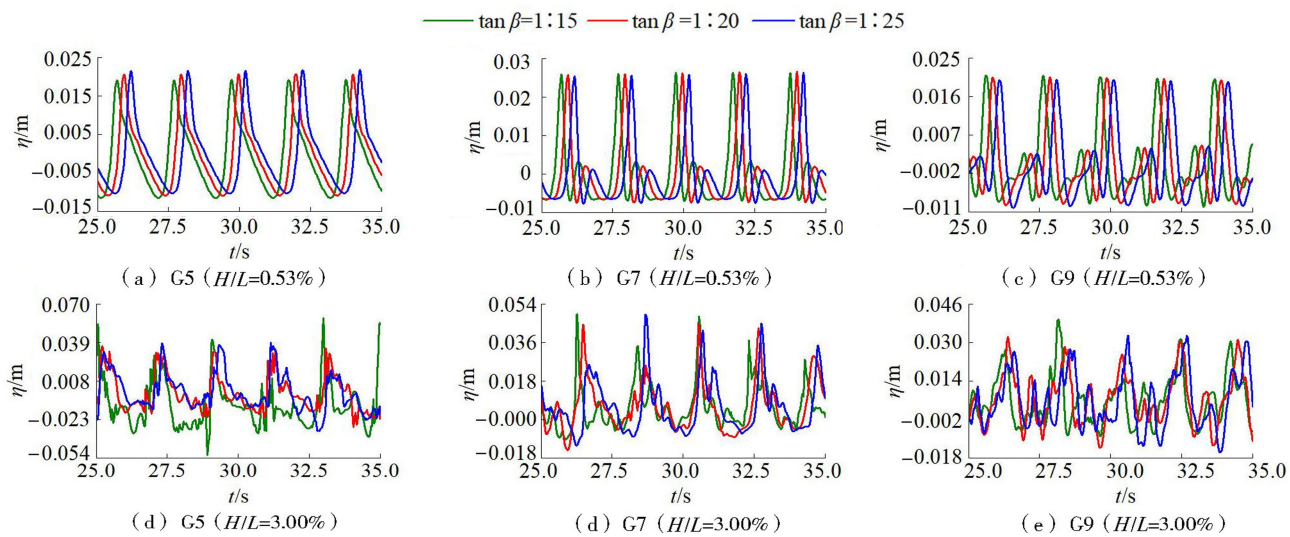


图 7 不同迎浪坡坡度下的波面时间历程

Fig. 7 Time histories of surface elevation on varying windward slope

$$H_0 = 0.15 \left\{ 1 - e^{-1.5 \frac{\pi d_0}{L} [1 + 15 (\tan \beta)^{4/3}]} \right\} L \quad (7)$$

式中: H_0 为破碎波高的临界值; d_0 为破碎处水深。由图 8 可知,当波陡大于 2.00%,对应坡顶处的平均波高大于经验公式计算的临界破碎波高值,表明强非线性波浪在潜堤传播过程中发生破碎,从而导致潜堤处波浪传播具有随机性及不确定性。

由图 9 可知,波陡为 0.53% 时,G5、G7 的波形几乎一致,这是由于波浪前期传播过程中外部影响条件相同;波浪传播至背浪坡时,由于后坡坡度变化,G9 处不同坡度波面形态出现较小相位差。波陡为 3.00% 时,由于波浪破碎等影响,不

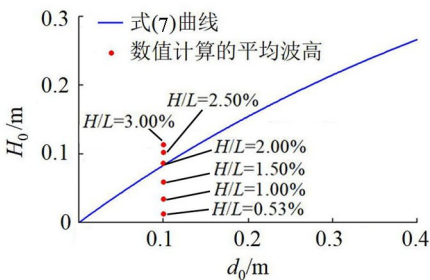


图 8 不同波陡的平均波高与破碎波高关系

Fig. 8 Relationship between average wave heights of different wave steepnesses and breaking wave height

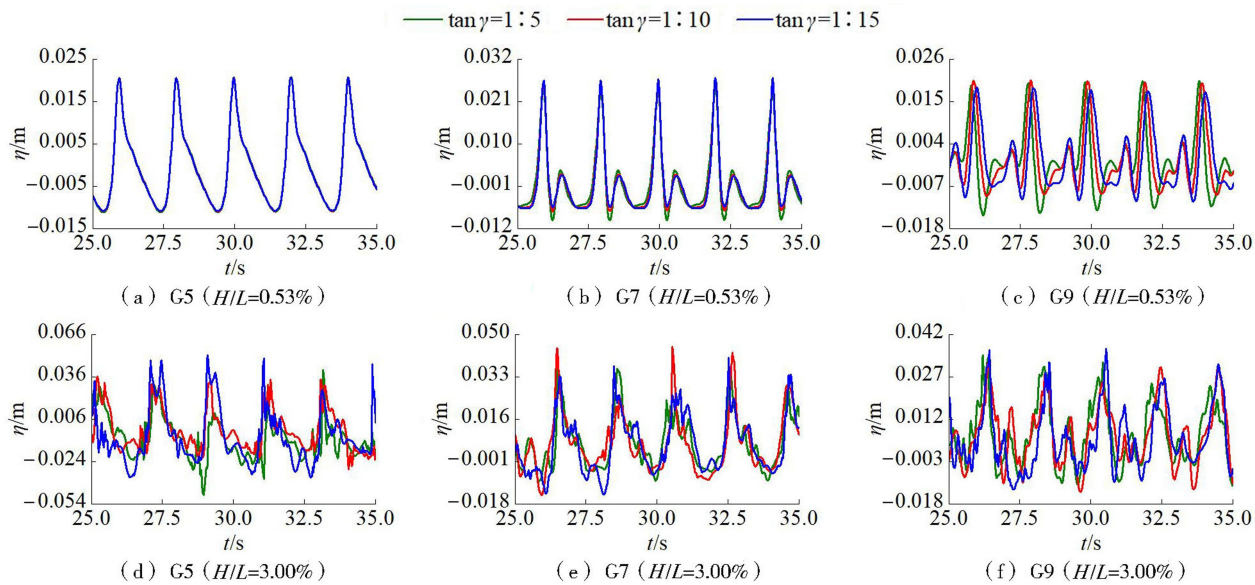


图 9 不同背浪坡坡度下的波面时间历程

Fig. 9 Time histories of surface elevation on varying backward slope

同坡度的波形显著不同,表现出明显的不规则性。

对不同坡度、不同波陡的波面做无量纲化处理,无量纲形式为 η/A 。统计浪高仪 G5 ~ G10 的无量纲波面情况,获得该时间段内波峰波谷的差值,并对其取均值。无量纲波面的峰谷差均值用 M 表示,绘制 $M-H/L$ 曲线,分析潜堤坡度、入射波幅对波浪传播变形的影响。

由图 10 可知,浪高仪 G5 处,不同迎浪坡坡度下无量纲波面的峰谷差均值随着波陡增大而增大,在波陡为 1.00% 时出现最大值,之后逐渐减小;浪高仪 G6 ~ G10 处,波陡从 0.53% 变化到 1.00% 过程中,波面峰谷差均值急剧下降,在波陡从 2.00% 增大到 3.00% 过程中,由于波浪破碎,峰谷差均值仍出现下降趋势,但过程较为缓慢。总体上无量纲波面的峰谷差均值随着波陡的增大而减小,潜堤反射作用随着波陡的增大而逐渐增强。

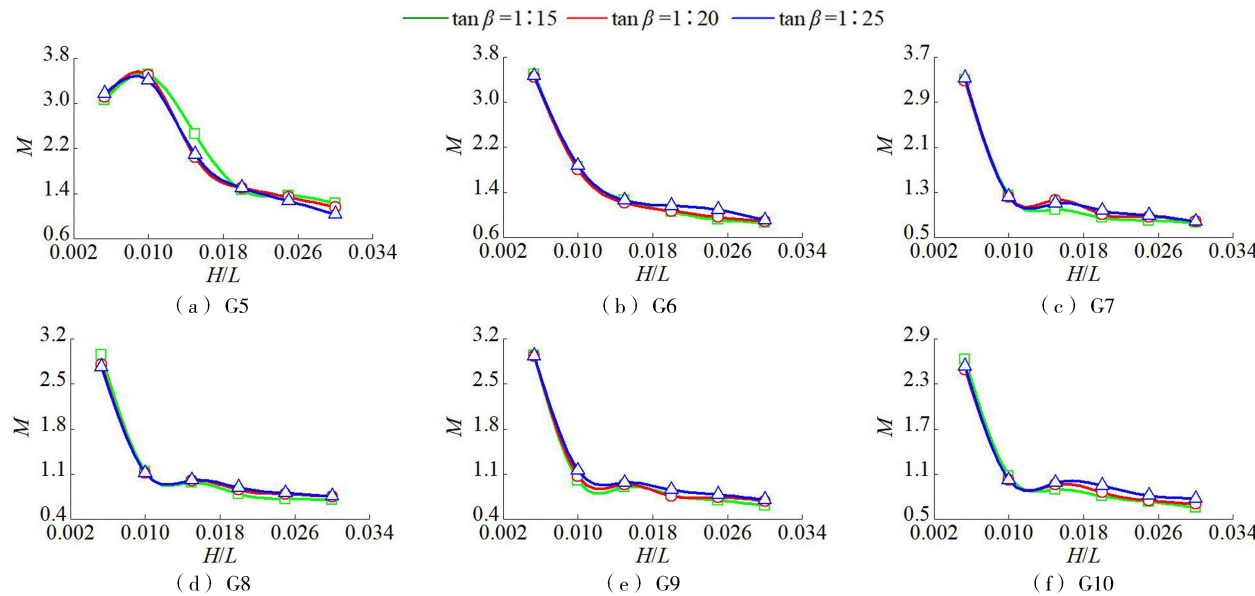


图 10 不同迎浪坡坡度下无量纲波面峰谷差均值随波陡变化趋势

Fig. 10 Mean difference between peaks and valleys of dimensionless waves with the change of wave steepness in different windward slope

由图 11 可知,在浪高仪 G5 处,随着波陡逐渐增大,无量纲波面峰谷差均值在波陡为 1.00% 处出现最大值,然后逐渐减小,不同坡度之间没有显著区别;浪高仪 G6 ~ G10 处,无量纲化波面的峰谷差均值随着波陡的增大

逐渐减小,且不同坡度之间峰谷差均值变化趋势几乎一致,改变背浪坡坡度对于潜堤处波浪传播及消波性能影响较小。

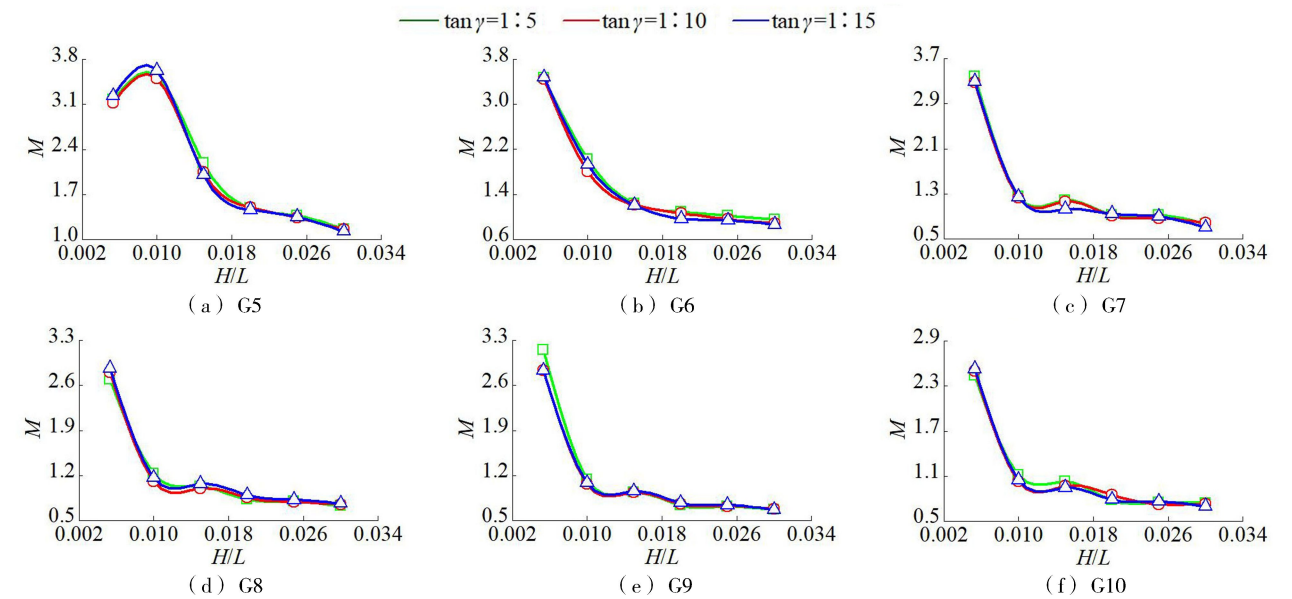


图 11 不同背浪坡坡度下无量纲波面峰谷差均值随波陡变化趋势

Fig. 11 Mean difference between peaks and valleys of dimensionless waves with the change of wave steepness in different backward slope

4 结 论

- a. 基于黏性流理论和有限体积方法建立了数值水槽模型,对强非线性波浪的生成传播和潜堤地形上波浪传播变形的准确性进行系统化验证,所得数值计算结果与五阶 Stokes 波浪理论解具有较好的一致性,表明数值水槽模型能够准确模拟波浪的生成及潜堤地形上传播变形过程。
- b. 在小波陡工况下,波浪传播的波形具有较好的周期性,不同坡度下波面形态有相位差,表现为坡度越平坦,相位越滞后;随着入射波幅的增大,波浪经潜堤过程中发生破碎及翻卷现象,波浪传播呈现强非线性,波面形态表现出随机性及不规则性。
- c. 无量纲化波面的峰谷差均值在波陡从 0.53% 增大到 1.00% 过程中整体上急剧减小,而波陡由 1.00% 增大到 3.00% 过程中,由于波浪破碎翻卷,能量衰减,无量纲波面的峰谷差均值减小趋势变得较为缓慢;但总体上,无量纲化波面的峰谷差均值随着波陡的增大而减小,潜堤反射作用随着波陡的增大而逐渐增强。

参考文献:

[1] BEJI S,BATTJES J A. Experimental investigation of wave propagation over a bar[J]. Coastal Engineering,1993,19(1/2):151-162.

[2] CHRISTOU M,SWAN C,GUDMESTAD O T. The interaction of surface water waves with submerged breakwaters[J]. Coastal Engineering,2008,55(12):945-958.

[3] 庞启秀,张瑞波,杨华. 不同高度潜堤减淤效果水槽实验研究[J]. 海洋工程,2012,30(2):66-71. (PANG Qixiu,ZHANG Ruibo,YANG Hua. Flume experimental study on the heights of submerged dike to diminish siltation[J]. The Ocean Engineering, 2012,30(2):66-71. (in Chinese))

[4] CHO Y S,LEE J I,KIM Y T. Experimental study of strong reflection of regular water waves over submerged breakwaters in tandem [J]. Ocean Engineering,2004,31(10):1325-1335.

[5] 陈丽芬,宁德志,滕斌,等. 潜堤上波流传播的完全非线性数值模拟[J]. 力学学报,2011,43(5):834-843. (CHEN Lifen, NING Dezhi,TENG Bin,et al. Fully nonlinear numerical simulation for wave-current propagation over a submerged bar[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2011,43(5):834-843. (in Chinese))

[6] RAMBABU A C,MANI J S. Numerical prediction of performance of submerged breakwaters[J]. Ocean Engineering,2005,32(10):1235-1246.

[7] 马朝晖, 宁德志, 于定勇. 恒定流对潜堤波浪反射系数影响研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(3):105-113. (MA Zhaohui, NING Dezhi, YU Dingyong. Study of steady uniform flow effect on wave reflection coefficient of rectangular submerged breakwater[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(3):105-113. (in Chinese))

[8] COOKER M J, PEREGRINE D H, VIDAL C, et al. The interaction between a solitary wave and a submerged semicircular cylinder [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 215:1-22.

[9] 李本霞, 余锡平. 潜堤上波浪分裂现象的数值分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12):1656-1659. (LI Benxia, YU Xiping. Numerical analysis of wave decomposition over submerged breakwaters[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2004, 44(12):1656-1659. (in Chinese))

[10] 曾诚, 尹雨然, 周婕, 等. 基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4):33-40. (ZENG Cheng, YIN Yuran, ZHOU Jie, et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4):33-40. (in Chinese))

[11] HAN Xinyu, DONG Sheng. Interaction of solitary wave with submerged breakwater by smoothed particle hydrodynamics [J]. Ocean Engineering, 2020, 216:108108.

[12] 孙亮, 那鑫宇, 陈柯宇, 等. 波浪在潜堤和潜堤地形上的传播变形[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(1):139-144. (SUN Liang, NA Xinyu, CHEN Keyu, et al. Propagation deformation of waves over a submerged bar and terrain[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(1):139-144. (in Chinese))

[13] 潘天娇, 冯曦, 倪兴也, 等. 可透浪斜坡式防波堤透浪系数对入射波要素的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2):45-53. (PAN Tianjiao, FENG Xi, NI Xingye, et al. Study on the response of wave transmission coefficient to various incident wave elements of a permeable sloping breakwater[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2):45-53. (in Chinese))

[14] CHANG Kuangan, HSU T J, LIU P L F. Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle[J]. Coastal Engineering, 2001, 44(1):13-36.

[15] 徐瑶瑶, 屈科, 黄竞萱, 等. 聚焦波作用下透水潜堤消波特性数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(11):121-132. (XU Yaoyao, QU Ke, HUANG Jingxuan, et al. Numerical simulation of wave dissipation characteristics of permeable submerged breakwater under focused wave[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11):121-132. (in Chinese))

[16] ZOU Qingping, PENG Zhong. Evolution of wave shape over a low-crested structure[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(6):478-488.

[17] 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))

[18] 韩新宇, 董胜, 崔俊男. 潜堤上孤立波传播的格子 Boltzmann 法数值模拟[J]. 工程力学, 2019, 36(9):247-256. (HAN Xinyu, DONG Sheng, CUI Junnan. Numerical study of the interaction between a solitary wave and submerge breakwater based on lattice Boltzmann method[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9):247-256. (in Chinese))

[19] LIANG Bingchen, WU Guoxiang, LIU Fushun, et al. Numerical study of wave transmission over double submerged breakwaters using non-hydrostatic wave model[J]. Oceanologia, 2015, 57(4):308-317.

[20] SUN Jiawen, MA Zhe, WANG Dongxu, et al. Numerical study of the run-up of a solitary wave after propagation over a saw-tooth-shaped submerged breakwater[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12:283-296.

[21] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9):1073-1088.

[22] FENTON J D. A fifth-order stokes theory for steady waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1985, 111(2):216-234.

[23] MÉHAUTÉ B. An introduction to hydrodynamics and water waves[M]. Heidelberg: Springer, 1969:256-270.

[24] 廖斌, 陈善群, 任超洋. 潜堤上波浪传播过程数值研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(8):52-58. (LIAO Bin, CHEN Shanqun, REN Chaoyang. Numerical investigation of wave propagation over a submerged dike[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8):52-58. (in Chinese))

[25] PERLIN M, CHOI W, TIAN Zhigang. Breaking waves in deep and intermediate waters[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 45:115-145.

[26] GODA Y, KISHIRA Y, KAMIYAMA Y. Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves[J]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1975, 14(4):4-42.

[27] 李玉成, 崔丽芳, 于洋, 等. 平缓岸坡上波浪谱的变形及破碎[J]. 中国工程科学, 2000, 2(5):51-59. (LI Yucheng, CUI Lifang, YU Yang, et al. Wave spectrum transformation and wave breaking on gentle slope[J]. Engineering Science, 2000, 2(5):51-59. (in Chinese))