



基于 Boussinesq 模型的刚性植被水域 波浪传播特性数值分析*

崔坤明, 唐 军, 杨志勇

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:通过在 Boussinesq 水波模型中引入拖曳应力项来考虑植被对波浪的衰减作用, 建立了波浪在近岸刚性植被水域传播运动的数值模型。在对模型进行验证的基础上, 模拟分析了植被特征参数与入射波要素对波浪传播运动的影响。数值模拟结果表明, 波浪在近岸植被区传播时, 随着植被密度和植被淹没高度的增加, 波浪传播中波高衰减率增大、波能损耗率增大; 随着入射波高的增加, 波浪传播中波高衰减率增大、波能损耗率增大。

关键词: 刚性植被; Boussinesq 方程; 波能损耗; 波浪传播

中图分类号: TV 139.2; U 652.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0041-06

Numerical study for wave propagation in rigid vegetation based on Boussinesq equation

CUI Kun-ming, TANG Jun, YANG Zhi-yong

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The numerical model for wave propagation in rigid vegetation water was developed based on Boussinesq equation, in which the drag force due to vegetation was added. The model was verified by comparing the numerical and experimental results. The model was used to test the effects of vegetation parameters as well as the incident wave parameters on wave propagation. The numerical results indicates that the ratio of wave height attention and wave energy attention increase with the increasing of plant density and plant diameter, as well as the incident wave height.

Keywords: rigid vegetation; Boussinesq equation; wave energy attention; wave propagation

海岸植被能有效地降低波浪对岸滩的侵蚀作用。波浪在植被区传播过程中部分波能将被消耗, 波高随之衰减, 有效地降低了波浪对岸滩的侵蚀作用; 同时, 随着波高的衰减, 波浪的物质输运能力也随之减小, 对近岸水环境演变有重要影响。随着沿海经济的发展, 海岸资源的开发以及海岸工程的修建改变了该区域原有的植被形态及分布, 影响到海岸波浪、流等水动力的运动环境, 并对近岸物质输运产生重要影响^[1]。因此, 研究近岸植被影响下波浪的传播运动对分析近岸资源开发

对近岸水动力及物质输运、岸滩稳定等有重要理论指导和工程应用价值。

近岸植被对波浪传播的影响目前已引起了国内外学者的广泛关注, 并对此开展了一系列的研究工作。研究表明: 近岸植被的存在会明显耗散波浪传播的能量^[2-4]。在近岸波浪传播模型研究中, 由于 Boussinesq 模型兼有良好的色散性和非线性, 使其在模拟近岸波浪的传播变形问题中得到广泛应用。国内外一些学者基于 Boussinesq 模型数值模拟研究了近岸植被区波浪传播。Augustin

收稿日期: 2016-04-26

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51579036, 51579030); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT14YQ108)

作者简介: 崔坤明(1990—), 男, 硕士研究生, 从事海岸环境水动力学研究。

等^[5]在 Boussinesq 方程中将植被的影响直接概化为摩阻应力, 模拟分析了淹没植被对线性波传播的影响特性; Kuiry^[6]、王磊等^[7]在 Boussinesq 方程基础上引入植被引起的拖曳应力, 建立植被区波浪传播的数值模型; 张明亮等^[8]通过在浅水方程 (SWE) 和扩展的 Boussinesq 方程中引入植被耗散项模拟分析了植被对孤立波爬坡的影响; Huang 等^[9]基于 Boussinesq 方程研究孤立波与非淹没刚性植被的相互作用问题, 并提出刚性淹没植被拖曳应力系数的经验公式; 姚宇等^[10]在此研究的基础上, 模拟分析了非淹没刚性植被对孤立波爬坡运动的影响。这些研究主要关注波浪在特定植被水域的传播特性, 而关于植被特征参数以及入射波要素对波浪传播变形的研究则相对较少。

本文通过在扩展型 Boussinesq 水波模型的动量方程源项中引入刚性植被引起的拖曳应力项, 建立了刚性植被水域波浪传播的数值模型; 在该数值模型进行验证的基础上, 数值模拟分析植被密度、淹没高度以及入射波波高等参数对波浪传播变形的影响。

1 数学模型

假定植被为刚性植被, 波浪经过植被区域受到的作用力主要有惯性力和拖曳力, 由于植被的直径尺寸相对较小, 则可忽略其绕射作用及惯性力, 只考虑植被的拖曳力作用^[11]。考虑植被拖曳应力的一维 Boussinesq 方程可表述为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\eta + h)u] + B_c = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + B_m + f_{\text{bot}} + f_{\text{veg}} = 0 \quad (2)$$

$$B_c = -\frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h + \eta) \left[\left(\frac{\eta^2 - \eta h + h^2}{6} - \frac{z_\alpha^2}{2} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{\eta - h - 2z_\alpha}{2} \right) \frac{\partial^2 u h}{\partial x^2} \right] \right\} \quad (3)$$

$$B_m = \frac{z_\alpha^2}{2} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + z_\alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(h \frac{\partial u}{\partial t} \right) + z_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial^2 h u}{\partial x^2} \right) + z_\alpha u \cdot$$

$$\frac{\partial z_\alpha \partial^2 u}{\partial x \partial x^2} + \frac{z_\alpha}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + u \frac{\partial z_\alpha \partial^2 h u}{\partial x \partial x^2} + \frac{\partial h u \partial^2 h u}{\partial x \partial x^2} -$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u \partial h u}{\partial x \partial x} - \frac{\eta^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \eta u \frac{\partial^2 h u}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\eta^2}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \right\} \quad (4)$$

$$f_{\text{bot}} = \frac{f}{h + \eta} u |u| \quad (5)$$

$$f_{\text{veg}} = \frac{1}{2} C_d N_v b_v u |u| \quad (6)$$

式中: η 为波面; h 为静水深; u 为 $z = z_\alpha$ ($z_\alpha = -0.531h$) 处的水平流速; f_{bot} 为底摩擦应力; f 为底摩擦因数; f_{veg} 为单位高度植被受到的拖曳应力; N_v 为植被密度; b_v 为植被的直径大小; C_d 为植被引起的拖曳力系数; 特别指出, 与文献[9]相比, 公式(6)中的流速值为 u 。

植被的拖曳力系数是数值模拟中的一个关键参数, 其大小与流体特征、植被特征密切相关。Tanino 等^[12]及解学超等^[13]认为植被的拖曳力系数是雷诺数、植被的体积占有率的函数, 并给出了相应的经验公式:

$$C_d = 2 \left(\frac{\alpha_0}{Re} + \alpha_1 \right) \quad (7)$$

式中: $Re = \frac{|u|D}{\nu}$ 为雷诺数, 与水流状态和植被参数有关; D 为植被的直径大小; $|u|$ 为流速绝对值; ν 为水的动力黏度, 取值 $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; α_0 、 α_1 与植被参数有关。

本文在已有研究的基础上, 通过对王瑞雪^[14]和 Kuiry 等^[6]试验数据与数值模拟结果的分析比较, 拟合了植被拖曳力系数与雷诺数以及植被的体积占有率之间的关系式, 并对式(7)中的 α_0 、 α_1 定义如下:

$$\begin{cases} \alpha_0 = 5 \\ \alpha_1 = 2.191 \varphi^{-0.23} \end{cases} \quad (8)$$

式中: φ 为植被的体积占有率, $\varphi = v_s/v_w$, v_s 为控制水域中植被的体积, v_w 为控制水域的体积。

本文数值模型是基于 COULWAVE 波浪模型的源代码建立的, 关于数值模型的求解方法、造波方式以及边界等数值条件可参考 COULWAVE 数值模型^[15]。

2 模型验证及分析

2.1 模型验证

采用 Huang 等的植被消波物理模型试验来验证本文模型, 采用活塞式造波机产生孤立波, 试验布置及浪高仪分布见图 1。试验水槽长 32 m、宽 0.55 m, 试验中用固定在水槽地面的有机玻璃管代表刚性植被, 植被的直径和淹没高度分别为 0.01 m 和 0.15 m, 试验时静水深 h 为 0.15 m, 采用入射波浪为孤立波, 部分工况的入射波要素见表 1。

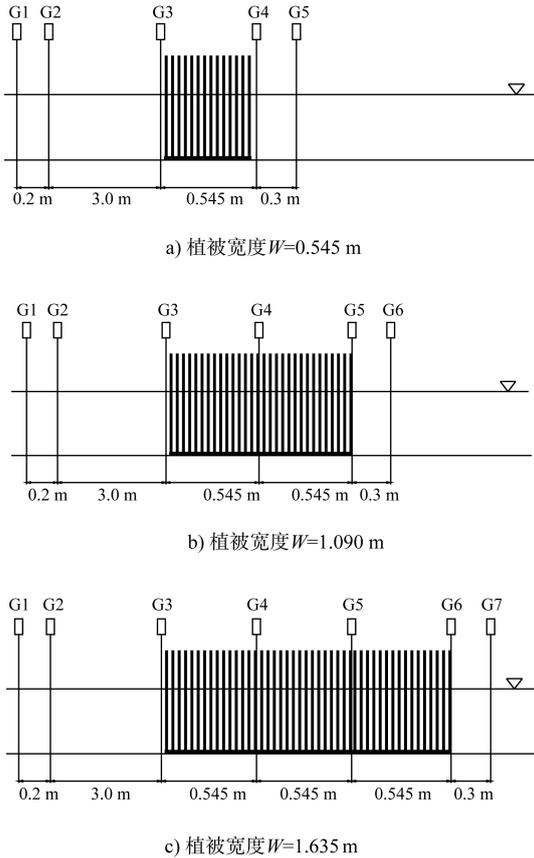


图 1 波浪在植被区域传播变形的试验布置

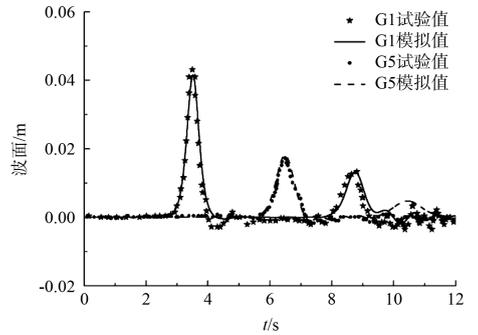
表 1 入射孤立波的波浪要素

工况	入射波高 H_0/m	植被区域长度 W/m	植被体积占有率 φ
A	0.041 7	0.545	0.175
B	0.03	1.090	0.087
C	0.02, 0.04	0.545	0.044
D	0.02, 0.04	1.090	0.044
E	0.02, 0.04	1.635	0.044

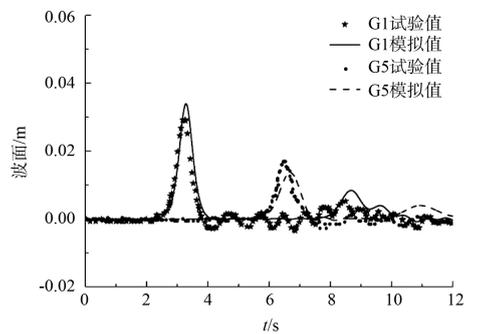
数值水槽与试验水槽基本一致, 图 2 给出了本文数值模拟结果和试验结果比较, 图 2 对应的数值模拟参数设置见表 2; 造波方式采用域内造波, 初始孤立波波峰位置距离数值水槽左侧边界 5 m, 数值水槽左端为直墙边界, 右端为海绵层吸收边界, 海绵层长度取 1.25 倍的波长, 考虑底摩擦影响, 底摩擦系数 f 取值 0.16, 其余参数与试验参数均保持一致。

表 2 数值模拟的参数设置

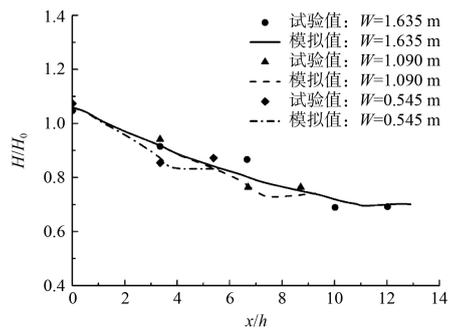
工况	计算域/m	空间步长 dx/m	时间步长 dt/s	模拟时间 t/s
A	18.5	0.018	0.007 6	50
B	18.5	0.020	0.008 2	50
C、D、E, $H_0=0.02$ m	18.5	0.017	0.007 1	50
C、D、E, $H_0=0.04$ m	18.5	0.035	0.014 0	50



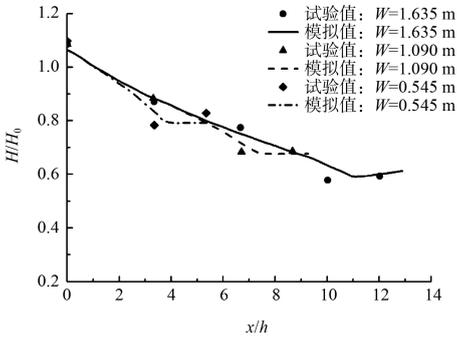
a) 工况A



b) 工况B



c) 工况C、D、E孤立波, $H_0=0.02$ m



d) 工况C、D、E孤立波, $H_0=0.04$ m

图2 孤立波在植被水域传播的波高变化

由图2可知：当波浪在植被区传播时，随着传播距离的增加，波高发生了不同程度的衰减；本模型的计算结果与试验数据吻合良好，表明本模型可有效地模拟波浪在植被区的传播过程。

2.2 植被外在特征参数及入射波要素与植被区波高分布的关系

植被的特征参数以及入射波的波要素对波浪传播运动有重要影响。本文利用所建立的植被水域波浪传播的数值模型，模拟分析植被的密度、淹没高度以及入射波波高等要素对刚性植被水域波浪传播的影响。假定在长为100 m、水深为1 m的水域中分布着长度为3 m的植被区，植被的直径为0.02 m，考虑底摩擦的影响，底摩擦系数 f 取值0.16，水槽两端设有海绵层，模拟所用波浪为周期4 s的规则波。当波浪传播经过植被水域时，假定植被域始端的波高为 H_s ，植被域末端的波高为 H_e ，则根据规则波的能量计算公式，定义波高衰减率以及波能损耗率如下：

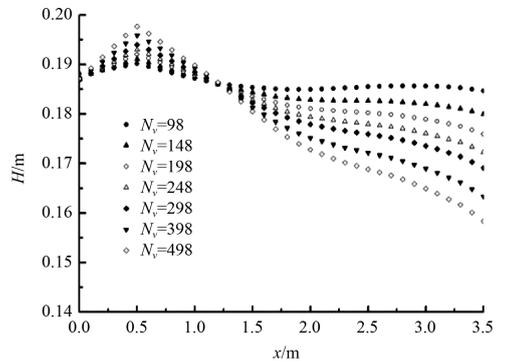
$$\begin{cases} \text{波高衰减率} = \frac{H_e - H_s}{H_e} \\ \text{波能损耗率} = \frac{H_e^2 - H_s^2}{H_e^2} \end{cases} \quad (9)$$

图3给出了入射波高为0.2 m的入射波在不同植被密度影响下传播时波高的变化规律，植被淹没高度为0.8 m，植被均布于0.5~3.5 m， $K_v = H/H_0$ ，图3中 N_v 表示植被的密度(unit/m^2)。由图3以及表3可以看出：波浪在传播过程中，

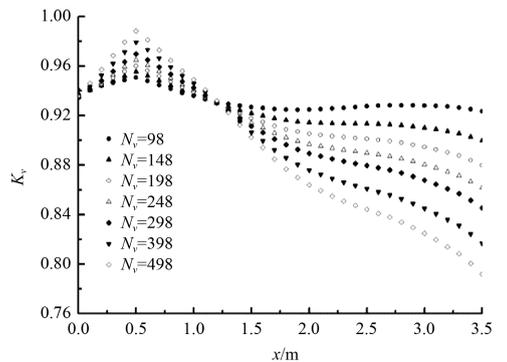
受底摩擦作用的影响，植被上游区域波高均出现了微弱程度的衰减；当波浪传播至植被水域时，由于植被的反射作用，植被区域前的波面会有一定程度的壅高，且壅高程度随着植被密度的增大而愈加强烈；当波浪传播经过植被水域时，由于植被对波浪的耗散作用，波高以及波能均出现了不同程度的衰减，且波高衰减率以及波能损耗率随着植被密度的增加而愈加剧烈，但当植被密度小于一定值时，波浪的波高衰减和波能损耗不再明显。

表3 植被密度及植被区的波高衰减率、波能损耗率

植被密度 $N_v(\text{unit}/\text{m}^2)$	植被始端 波高/m	植被末端 波高/m	波高衰减 率/%	波能损耗 率/%
98	0.190	0.185	2.9	5.7
148	0.191	0.180	5.8	11.3
198	0.192	0.176	8.4	16.0
248	0.193	0.172	10.7	20.3
298	0.194	0.169	12.8	24.0
398	0.196	0.163	16.6	30.4
498	0.198	0.158	19.9	35.8



a) H



b) K_v

图3 波浪在不同植被密度区传播的波高变化

图 4 给出了入射波高为 0.2 m 的入射波在不同植被淹没高度影响下传播时波高的变化规律, 植被密度 $N_v=398 \text{ unit/m}^2$, 植被均布于 0.5~3.5 m, $K_v=H/H_0$ 。由图 4 以及表 4 可以看出: 波浪在传播过程中, 受底摩擦作用的影响, 植被上游区域波高均出现了微弱程度的衰减; 当波浪传播至植被水域时, 由于植被的反射作用, 植被区域前的波面会有一定程度的壅高, 且壅高程度随着植被淹没高度的增大而愈加强烈; 当波浪传播经过植被水域时, 由于植被对波浪的耗散作用, 波高以及

波能均出现了不同程度的衰减, 且波高衰减率以及波能耗散率随着植被淹没高度的增加而愈加强烈, 但当植被淹没高度小于一定值时, 波浪的波高衰减以及波能损耗不再明显。

图 5 给出了植被区的波高衰减与入射波波高之间的变化规律, 入射波周期为 4.0 s, 植被的密度为 398 unit/m^2 、淹没高度为 0.8 m, 植被均布于 0.5~3.5 m。由图 5 可看出: 波浪在传播过程中, 受底摩擦作用的影响, 植被上游区域波高均出现了微弱程度的衰减; 当波浪传播至植被水域时, 由于植被的反射作用, 植被区域前的波面会有一定程度的壅高, 且壅高程度随着入射波高的增大而愈加强烈; 当波浪传播经过植被水域时, 由于植被对波浪的耗散作用, 波高以及波能均出现了不同程度的衰减, 且波高衰减率以及波能耗散率随着入射波波高的增加而愈加强烈, 但当入射波波高小于一定值时, 波浪的波高衰减以及波能损耗不再明显。

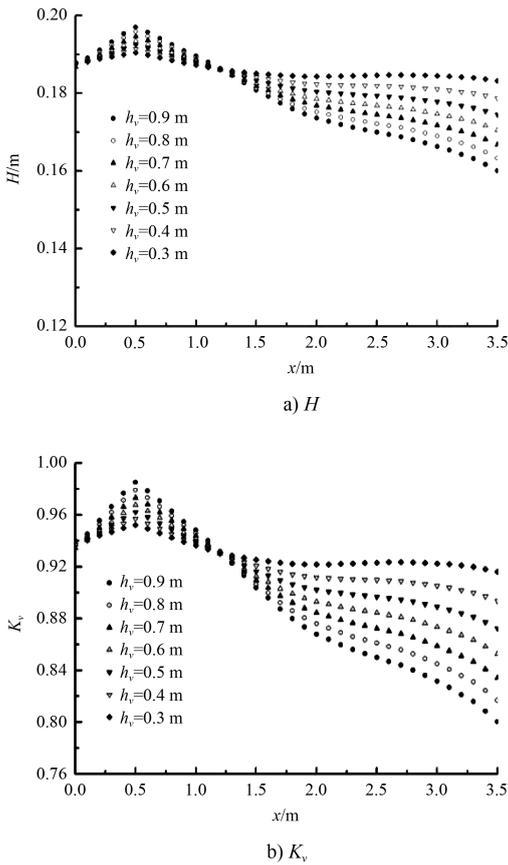


图 4 波浪在不同淹没高度植被区传播的波高变化

表 4 植被淹没高度及植被区的波高衰减率、波能损耗率

植被淹没高度/m	植被始端波高/m	植被末端波高/m	波高衰减率/%	波能损耗率/%
0.3	0.190	0.183	3.8	7.4
0.4	0.191	0.179	6.6	12.8
0.5	0.192	0.174	9.3	17.7
0.6	0.194	0.171	11.9	22.3
0.7	0.195	0.167	14.3	26.5
0.8	0.196	0.163	16.6	30.4
0.9	0.197	0.160	18.8	34.0

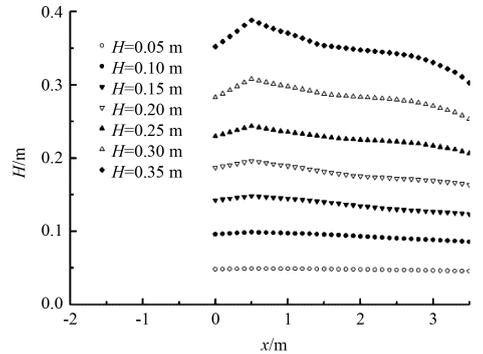


图 5 不同波高的入射波在植被水域传播的波高变化

表 5 入射波波高及植被区的波高衰减率、波能损耗率

入射波高 H/m	植被始端波高/m	植被末端波高/m	波高衰减率/%	波能损耗率/%
0.05	0.049	0.046	7.3	14.0
0.10	0.099	0.086	13.3	24.8
0.15	0.148	0.123	16.7	30.6
0.20	0.196	0.163	16.6	30.4
0.25	0.244	0.207	15.2	28.1
0.30	0.308	0.253	17.7	32.2
0.35	0.388	0.303	22.0	39.2

3 结语

1) 波浪在刚性植被水域传播时, 受植被反射作用的影响, 植被区域前的波面会出现不同程度

的壅高；受植被耗散作用的影响，植被区域的波高会出现不同程度的衰减；且波面壅高程度、波高衰减程度与植被特征参数、入射波要素密切相关。

2) 随着植被密度以及植被淹没高度的增加，植被区域前的波面壅高程度愈加强烈，植被水域的波高衰减程度以及波能损耗程度愈加强烈。

3) 随着入射波波高的增加，植被区域前的波面壅高程度愈加强烈，植被水域的波高衰减程度以及波能损耗程度愈加剧烈。

参考文献：

[1] 唐军, 沈永明, 崔雷. 基于抛物型缓坡方程模拟近岸植被区波浪传播[J]. 海洋学报, 2011, 33(1): 7-11.

[2] DUBI A, TORUM A. Wave damping by kelp vegetation[C]. USA: Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference, 1995: 142-156.

[3] QUARTEL S, KROON A, AUGUSTINUS P G E F, et al. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam[J]. Journal of Asian earth sciences, 2007, 29(4): 576-584.

[4] PAUL M, BOUMA T J, AMOS C L. Wave attenuation by submerged vegetation: combining the effect of organism traits and tidal current[J]. Marine ecology-progress series, 2012(1): 31-41.

[5] AUGUSTIN L N, IRISH J L, LYNETT P. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation[J]. Coastal engineering, 2009, 56(3): 332-340.

[6] KUIRY S N, DING Y. A hybrid finite-volume/finite-

difference based one-dimensional Boussinesq model for waves attenuated by vegetation [J]. Journal of ocean engineering & marine energy, 2015, 2(1): 1-16.

[7] 王磊, 房克照, 尹晶, 等. 近岸波浪在刚性植被区域传播的数学模型[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 62-69.

[8] 张明亮, 时锋, 郝子宁. 具有捕捉激波能力的一维溃坝波及孤立波爬坡数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(6): 687-695.

[9] HUANG Z, YAO Y, SIM S Y, et al. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation [J]. Ocean engineering, 2011, 38(10): 1 080-1 088.

[10] 姚宇, 杜睿超, 袁万成, 等. 斜坡非淹没刚性植被影响下孤立波爬高的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(5): 506-515.

[11] MENDEZ F J, LOSADA I J. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields [J]. Coastal engineering, 2004, 51(2): 103-118.

[12] TANINO Y, NEPF H M. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders[J]. Journal of hydraulic engineering, 2008, 134(1): 34-41.

[13] 解学超, 林鹏志. 浅水方程模型模拟非淹没刚性植被阻力特性[J]. 西南民族大学学报, 2010, 36(3): 446-449.

[14] 王瑞雪. 非淹没刚性植物对波浪传播变形影响实验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.

[15] LYNETT P J, LIU P L F, KIM D H, et al. Modeling wave generation evolution and interaction with depth-integrated, dispersive wave equations [R]. USA: South California University, 2008.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。