DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.011
李昌良, 蓝晓俊. 水平斜插板透空式防波堤消波性能数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 75-80. (LI Changliang, LAN Xiaojun. Numerical simulation of wave dissipation property of a new-type open breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 75-80. (in Chinese))

水平斜插板透空式防波堤消波性能数值模拟

李昌良, 蓝晓俊
(中国石油大学(华东), 石油工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 通过改进已有的防波堤模型,建立了一种新型水平斜板透空式防波堤模型。基于VOF方法建立了波浪与水平斜板防波堤相互作用的数值模型。经数值模拟研究了该新型水平斜板防波堤结构对波浪透射系数的影响,主要考虑了斜板角度、波陡、相对板间距、相对板宽和相对出水高度等因素对防波堤消波效果的影响。模拟结果显示:①水平斜插板透空式防波堤比水平板透空式防波堤的消波效果好。在斜插板作用下,随着斜板角度增大,透射系数逐渐增大,但增幅逐渐减小;②随着波陡增大,透射系数先减后增;③随着水平板间距增加,透射系数增大;④随着防波堤相对板宽的增大,透射系数逐渐减小;⑤随着防波堤出水高度增加,透射系数先减后增。结果表明,该新型结构防波堤的消波效果显著,可以很好地消减波浪,应用前景良好。

关 键 词: 水平斜板; 防波堤; 数值模拟; 透射系数
中图分类号: U656.2⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)04-0075-06

随着海洋工程向深水发展,传统形式的防波堤造价剧增,且施工难度增加。由于波浪的能量主要集中在水体上部,在离水面2~3倍的波高范围内集中了90%~98%的波浪能量,因此可通过在水面上层布置特种结构来削减波浪,由此产生了透空式防波堤结构。新型透空式防波堤结构因为有利于内外水体的交换、对地质条件要求低、造价较低,越来越受到关注。

Neelamani等[1-2]在2002年提出"T"型透空式防波堤和"⊥"型透空式防波堤模型,并通过物理模型试验,研究了不同情况下波浪的反射系数、透射系数和能量衰减系数。Dattatri等[3]通过模型试验,对一块水平板在不同淹没深度条件下的消波性能进行了研究分析。邱大洪等[4]提出了一种单一薄板式防波堤结构形式,该防波堤结构形式简单,通过对理论和试验的对比分析,得到了该防波堤结构形式在不同水深条件下的透射系数和反射系数。Brossard等[5]通过对单层潜式板的试验研究,分析了非线性波作用时单层潜式板的消波性能,以及不同相对潜深和波数下对防波堤透射系数和反射系数的影响。王科[6]主要通过数值模拟研究,分析了单层潜式水平板的消波效果和水动力特性。王国玉等[7]提出了多层薄板透空式防波堤结构,通过试验得到了结构几何参数以及波陡作用下透反射系数的变化特征曲线。2006年,Neelamani等[8]通过试验对上层位于水面处的双层水平板防波堤的透射系数、反射系数和水平板受力进行了研究。何军[9]对两种特种板式透空式防波堤进行了研究,通过物理模型试验和理论分析,对规则波作用下两种结构消波性能、波浪压强分布等进行了研究。李靖波等[10]通过数值模拟,研究了不同参数下潜式双层水平板防波堤的投射系数和波浪理论荷载随这些影响因素的变化规律。刘丹[11]通过试验对不同结构的双层潜式水平板的消波效果进行了研究。同时,基于线性波浪理论,通过特征函数展开法和速度势连续条件,推导出了波浪对这两类水平板潜式结构作用的解析解。2014年,潘春昌等[12]提出了一种多层圆弧板透空式防波堤模型,通过物理

收稿日期: 2017-09-13
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109220)
作者简介: 李昌良(1977—), 男, 山东莱芜人, 副教授, 主要从事海洋工程水动力学方面的研究。
E-mail: Fifalcl@163.com 通信作者: 蓝晓俊(E-mail: lxj25863@163.com)

模型试验探讨了不同波高下与水平板结构的消波性能的比较,并对每层圆弧板间的间距以及圆弧板层数对该透空式防波堤结构的消波性能的影响进行了研究。

由于水平板防波堤的消波效果较差,而竖直板防波堤受到的波浪力较大易损坏,本文通过对已有防波堤模型的改进,提出一种新型透空式防波堤模型,该新型防波堤结构既可进一步削减波浪,又因利用斜板代替竖直板从而减小波浪力。

目前,对透空式防波堤消波效果的研究主要集中在物理模型试验方面,在数值模拟方面的研究还相对较少,缺少相应的数值模拟分析。本文对新提出的水平斜板透空式防波堤结构进行了数值模拟研究。研究中使用 Ansys-Fluent 软件,基于 Navier-Stokes 方程,采用 k-ε 紊动模型,用多相流的 VOF 方法跟踪自由表面,建立了波浪与透空式防波堤相互作用的数学模型。主要采用规则波来模拟波浪与结构物的相互作用,并讨论了不同波浪和防波堤要素对透空式防波堤透射系数的影响。

1 数学模型

新型双层水平板防波堤结构通过破坏波浪水质点的竖向运动轨迹,使波浪破碎,从而达到削减波浪的效果。因此,控制方程为不可压缩黏性流体雷诺平均 N-S 方程。其中:

连续性方程:

$$\frac{\partial(\theta U)}{\partial x}+\frac{\partial(\theta V)}{\partial z}=0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right)+g \tag{3}$$

式中:x,z 分别为水平和垂直方向坐标;p 为瞬时压力;U,V 分别为水平和垂直方向瞬时速度分量;ρ,ν 分别为流体密度和动力黏滞系数;θ 为部分单元体参数。

k-ε 紊动模型控制方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U\frac{\partial k}{\partial x}+V\frac{\partial k}{\partial z}=\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}+\nu\right)\left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 k}{\partial z^2}\right)-G-\varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+V\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}+\nu\right)\left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2}\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G-C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

$$G=2\nu_t S_{ji}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=\nu_t\left\{\left(\frac{\partial U}{\partial z}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2+2\left[\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2\right]\right\} \tag{6}$$

$$v_t=C_d\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

$$C_d=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{3.7+S_{max}}\right) \tag{8}$$

$$S_{max}=\frac{k}{\varepsilon}\max\left|\frac{\partial U_i}{\partial x_i}\right| \tag{9}$$

式中:$C_{1\varepsilon}=1.44$,$C_{2\varepsilon}=1.92$,$\sigma_k=1.00$,$\sigma_\varepsilon=1.3$;k 为紊动动能;ε 为紊动动能耗散率;S_{ji}为应变率张量。

自由表面运动根据 VOF 函数 $F(x,y,z)$ 计算,$F(x,y,z)$ 代表了流体所占流体单元的体积分数。控制方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t}+U\frac{\partial F}{\partial x}+V\frac{\partial F}{\partial z}=0 \tag{10}$$

2 防波堤模型

运用 Fluent 进行二维数值模拟,水槽长 100 m,宽6 m(图 1)。防波堤模型的三维示意图见图 2。防波堤

布置在距左边界 40 m 处，防波堤前后各设 2 个波高监测点，1 号监测点位于堤前 12 m 处，2 号监测点位于堤前 7 m 处，3 号监测点位于堤后25 m处，4 号监测点位于堤后 30 m 处。防波堤上下斜板的竖直高度分别为水平板间距的一半。防波堤水平板的宽度 B 为 5，6，7，8 和 9 m；水深 h 为 2.5，3.0，3.5，4.0 m；入射波高 H 为 0.6，0.8，0.9，1.0 和 1.2 m；两水平板间的高度 D 分别为 0.34，0.40，0.50，0.60 和 0.70 m；水平板出水深度 d 为−0.5，−0.3，−0.1，0，0.2 和 0.5 m；斜板的斜角 θ 为 17°，30°，45°，60°和 90°。

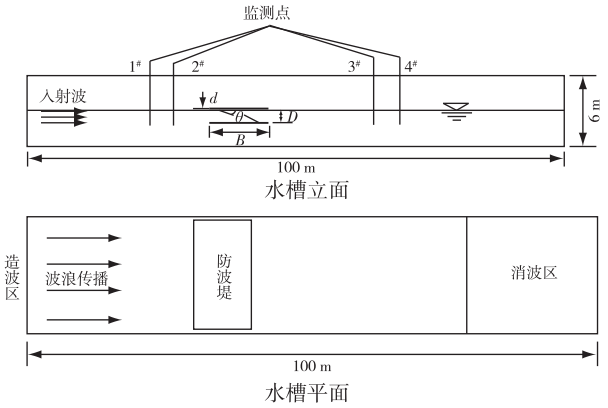


图 1　二维数值水槽布置

Fig. 1　Layout of two-dimensional numerical flume

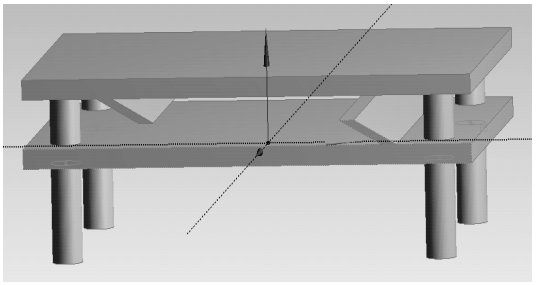


图 2　三维防波堤模型

Fig. 2　Three-dimensional breakwater model

采用边界条件造波的方法，数值水槽上部与大气相连通，设置为压力入口边界条件；水槽底面采用光滑壁面边界条件；水槽左边界设置为速度入口边界条件；水槽右边界设置为压力出口边界条件。采用 VOF 方法来追踪自由表面高度的变化。在 Fluent 的 solution 设置中采用压力隐式的分裂算子格式（PISO）进行求解。水槽网格尺寸为 0.10 m×0.05 m，网格在自由水面附近加密为 0.10 m×0.02 m。计算时间步长设置为 0.001 5 s。通过观察计算的残差曲线来判定计算结果的收敛性，当残差曲线收敛时，认为计算结果收敛。

3　计算结果分析

主要分析了改进的新型防波堤结构形式的透射系数与波陡、水平板宽、水平板间距、相对出水高度和斜板角度等因素的关系，并对该新型模型消浪性能的影响因素进行了分析。

3.1　斜板与水平板角度对消波效果的影响

取斜板的斜角 θ 为 17°，30°，45°，60°和 90°，其他各参数均保持不变，在 2 种不同波高情况下，对不同斜角的消波情况进行研究。当斜角 θ 为 0°时，表示无斜插板的情况。

由图 3 可见，在波浪作用下，水平板透空式防波堤的透射系数比水平斜插板透空式防波堤的透射系数大，说明水平斜插板透空式防波堤的消波效果比水平板透空式防波堤的消波效果好。当有斜插板作用时，随着斜板角度的增加，透射系数逐渐增大，且透射系数的增加幅度逐渐减小。这是因为斜板角度越小，波浪与斜板的接触面积越大，波能的消耗越多，所以透射波高越小。

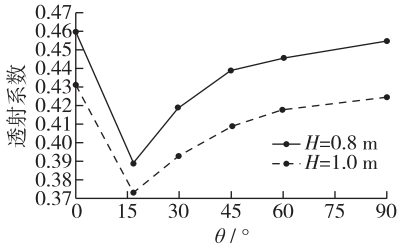


图 3　不同波高条件下透射系数随斜板角度的变化

Fig. 3　Variations in transmission coefficients with angle of inclined plate under different wave heights

3.2　波陡对消波效果的影响

为了研究波陡对该结构消波性能的影响，分别取波高 H 为 0.6，0.8，0.9，1.0 和 1.2 m，其他各参数均

保持不变,将 2 种不同水平板间距模型的透射系数与波陡关系的试验数据示于图 4。

从图 4 中不同模型透射系数随波陡的变化可以看出,透射系数随波陡的增大先减后增,由此可以看出,波陡对透射系数有明显影响。由透射系数曲线可以看出,在试验范围内,透射系数整体低于 0.46,最小在 0.38 以下,因此,该结构对波浪的消波效果显著。

3.3 相对板间距对新型透空式防波堤消波效果的影响

分别取水平板间距 D 为 0.34, 0.40, 0.50, 0.60 和 0.70 m ,其他各因素均不变,在 2 种不同波高情况下,研究水平板间距对防波堤透射系数的影响。

由图 5 中不同波高条件下透射系数随相对水平板间距的变化可知,随着相对板间距变大,透射系数变大。当波高为 0.8 m 时,透射系数随相对板间距的变化幅度较大,当波高为 1.0 m 时,透射系数随相对板间距的变化较小。当相对板间距大于 0.50 时,波高 0.8 m 的透射系数大于波高为 1.0 m 的,因此,当相对板间距大于 0.50 时,波高越大,透射系数越小,消波效果越好。

3.4 相对板宽对消波效果的影响

分别取水平板宽 B 为 5, 6, 7, 8 和 9 m ,并保持其他参数均不变,研究分析了 5 种不同相对板宽在两种不同波高作用下,水平板宽对防波堤透射系数的影响。

通过分析图 6 可知,随着相对板宽的增加,防波堤透射系数减小,这是因为随着防波堤板宽增加,波浪在防波堤区域内与板的接触面积增大,波浪能量损耗加大。通过对两条透射系数曲线研究可以发现,随着相对板宽的增加,两种波高下的透射系数差逐渐减小,最后透射系数趋于一致。通过对透射曲线分析,在试验范围内,透射系数整体低于 0.46,当相对板宽较大时,透射系数更是在 0.28 左右,可以看出,板宽对防波堤透射系数的影响效果显著。

3.5 相对出水高度对消波效果的影响

分别取出水高度 d 为 −0.5, −0.3, −0.1, 0, 0.2 和 0.5 m,并保持其他因素均不变,分析了在 2 种不同板宽情况下,对 6 种不同的出水高度进行了试验研究,并通过透射波高计算得出透射系数的变化。

通过观察图 7 可知,随着相对出水高度的增大,透射系数先减后增,当相对出水高度为−0.125 时,透射系数达到最小值,此时防波堤的消波效果最好。通过对两条曲线的研究可以发现,板宽 B=7 m 的透射系数曲线要比板宽 B=6 m 的透射系数曲线的值小,这是因为板宽大,与波浪的接触面大,消耗的波浪能量多。

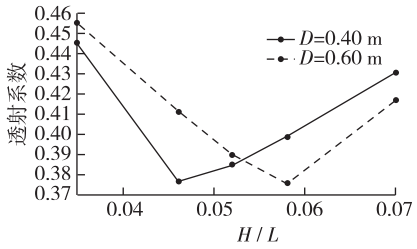


图 4 不同水平板间距条件下透射系数随波陡的变化

Fig. 4 Variations in transmission coefficients with wave steepness under different horizontal plate spacings

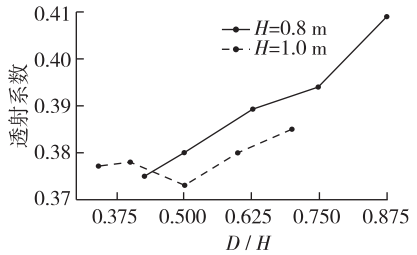


图 5 不同波高条件下透射系数随相对板间距的变化

Fig. 5 Variations in transmission coefficients with relative plate spacing under different wave heights

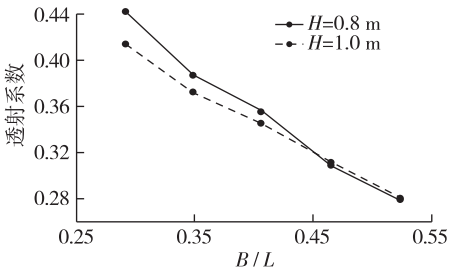


图 6 不同波高条件下透射系数随相对板宽的变化

Fig. 6 Vriations in transmission coefficients with relative plate width under different wave heights

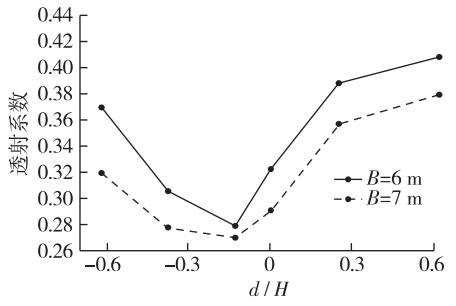
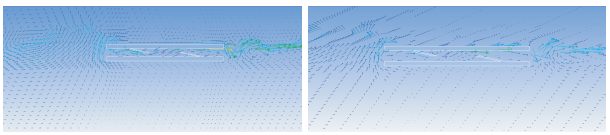


图 7 不同板宽条件下透射系数随相对出水高度的变化

Fig. 7 Variations in transmission coefficients with relative water outlet height under different plate widths

3.6　防波堤附近的速度矢量图



(a) D=0.40 m　　(b) D=0.50 m

图 8　t=25 s 时的速度矢量

Fig. 8　Velocity vector diagram of t=25 s

图 8 是板宽 B=6 m，波高 H=0.8 m，水平板间距 D 分别为 0.40 和 0.50 m 时，波浪传播 25 s 时防波堤附近的速度矢量图。因桩柱相对防波堤而言体积相对较小，对流场的影响小，因此忽略桩柱对流场的影响。

从图 8 可以看出，波浪传播到防波堤左侧时，波能分成 3 个部分传播：一部分能量由于受到防波堤作用，以反射波形式反射回来与入射波能相加；一部分能量在防波堤附近以涡或者破波的形式耗散消失；另一部分能量从防波堤上部、中部和底部流过，传到防波堤右侧以透射波的形式继续传播。

4　结　语

(1)水平斜插板透空式防波堤比水平板透空式防波堤的消波效果好。当有斜插板作用时，斜板角度对防波堤透射系数有较大影响。随着斜板角度增大，透射系数逐渐增大，但是增幅逐渐减小。

(2)这种新型防波堤结构消波效果较好，波陡对防波堤消波效果影响显著。随着波陡增大，透射系数先减后增，当波陡在 0.045~0.060 时，透射系数达到最小值，此时透射系数小于 0.38。

(3)相对板间距对防波堤的透射系数有较大影响，随着水平板间距的增加，透射系数增大。当相对板间距大于 0.50 时，波高 1.0 m 情况下的透射系数要明显小于波高 0.8 m 的透射系数，说明当相对板间距较大时，防波堤对大波高的消波效果要优于小波高的。

(4)防波堤的水平板宽对防波堤的透射系数有明显影响。随着防波堤相对板宽的增大，透射系数逐渐减小。在试验范围内，透射系数整体小于 0.46，最小为 0.28，说明这种防波堤结构的消波效果明显。

(5)相对出水高度对防波堤的透射系数影响较明显，随着出水高度增加，防波堤透射系数先减后增，当相对出水高度为-0.125 时，透射系数最小，此时该结构防波堤的消波效果最佳。

参　考　文　献：

[1] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with T-type breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(2): 151-175.

[2] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with '⊥' type breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(5): 561-589.

[3] DATTATRI J, SHANKAR N J, RAMAN H. Laboratory investigations of submerged platform breakwaters [C]//Proceedings of the 17th Congress of the IAHR, Baden, Germany, 1977, 4: 89-96.

[4] 邱大洪，王学庚. 深水薄板式防波堤效果分析与探讨[J]. 水运工程，1986(4)：8-12.(QIU Dahong, WANG Xuegeng. Analysis and discussion on effect of deepwater thin plate breakwater[J]. Port and Waterway Engineering, 1986(4): 8-12.(in Chinese))

[5] BROSSARD J, CHAGDALI M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate[J]. Coastal Engineering, 2001, 42(4): 277-290.

[6] 王科. 潜式水平板型防波堤消浪效果研究[D]. 大连：大连理工大学，2001.(WANG Ke. Study on wave dissipation effect of submerged horizontal plate breakwater[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001.(in Chinese))

[7] 王国玉，王永学，李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 大连理工大学学报，2005，45(6)：865-870.(WANG Guoyu, WANG Yongxue, LI Guangwei. Experimental study of wave-damping performance of multiple layer breakwater [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(6): 865-870.(in Chinese))

[8] NEELAMANI S, GAYATHRI T. Wave interaction with twin plate wave barrier[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(3/4): 495-516.

[9] 何军. 特种板式防波堤消浪及波压力特性研究[D]. 长沙：长沙理工大学，2009.(HE Jun. The research on wave-dissipating and force performance of the special plate breakwaters[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.(in Chinese))

[10] 李靖波, 张宁川, 刘爱珍. 潜式双层水平板型防波堤的数值研究[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 317-324. (LI Jingbo, ZHANG Ningchuan, LIU Aizhen. Numerical investigation of submerged horizontal twin-plate breakwater[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(4): 317-324. (in Chinese))

[11] 刘丹. 波浪对两层潜式水平板的作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (LIU Dan. Wave motion over two submerged horizontal plates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))

[12] 潘春昌, 王国玉, 任冰, 等. 圆弧板透空式防波堤消波性能试验研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 33-40. (PAN Chunchang, WANG Guoyu, REN Bing, et al. Experimental study on the performance of arc-plate type breakwater[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(4): 33-40. (in Chinese))

Numerical simulation of wave dissipation property of a new-type open breakwater

LI Changliang, LAN Xiaojun

(*School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: By improving the existing models for the breakwaters, a model for the new-type horizontal-inclined-plate open breakwater is developed in this study. Based on the VOF method, a numerical model for interaction between the waves and the horizontal-inclined-plate breakwater is established. Studies of impacts of a new type of the horizontal-inclined-plate breakwater upon the wave transmission coefficients are carried out by numerical simulation. The main impacts such as the wave steepness H/L, relative plate spacing D/H, relative plate width B/L, relative freeboard d/H and inclined-plate angle on the wave dissipation effects of the breakwater have been considered in this paper. From the analysis results it is found that the above factors have great influences on the wave dissipation effects of the breakwater, and the results are as follows: ①the horizontal-inclined-plate permeable breakwater has a better wave-absorbing effect than the horizontal-plate permeable breakwater. Under the action of the inclined plate, the transmission coefficients increase with the increase in the angle of the inclined plate, but the increase magnitude gradually decreases; ②with the increase in wave steepness, the transmission coefficients decrease first and then increase; ③with the increase in horizontal-plate spacing, the transmission coefficients increase; ④with the increase in the relative plate width of the breakwater, the transmission coefficients decrease; ⑤with the increase in breakwater level, the transmission coefficients decrease first and then increase. The analysis results show that the new-type breakwater structure has remarkable effects on wave energy dissipation and has a good application prospect in ocean engineering.

Key words: horizontal inclined plate; breakwater; numerical simulation; transmission coefficient