



消浪曲面对孤立波消浪性能的 物理模型试验研究*

陈思桦^{1,2}, 严士常^{1,2}, 付睿丽^{1,2}, 王岗^{1,2}, 郑金海^{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)

摘要: 通常曲面消浪装置能够在较小的空间范围内达到良好的消浪效果, 是目前港池或水槽波浪试验中常用的消浪结构。现有研究均基于该装置对规则波或随机波等短波的消浪效果, 对孤立波这类长波的消浪性能尚不清楚。在河海大学 L 形风浪流港池开展了栅格抛物线型消浪曲面对孤立波消浪性能的物理模型试验。结果表明: 其消浪性能与相对波高密切相关。对于栅格消浪曲面, 相对波高在 0.07~0.38 时, 经消浪曲面直接反射的反射系数为 0.10~0.17, 透过栅格被港池右侧内壁反射的反射系数为 0.17~0.44。无栅格消浪曲面的反射系数为 0.34~0.64。基于试验结果建立有、无栅格曲面孤立波反射系数的计算关系, 为波浪物理模型试验的设计与分析提供依据。

关键词: L 形港池; 抛物线型消浪曲面; 栅格; 孤立波; 反射系数

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0020-08

Experimental study on physical model of wave elimination performance of parabolic wave absorber for solitary waves

CHEN Sihua^{1,2}, YAN Shichang^{1,2}, FU Ruili^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, ZHENG Jinhai^{1,2}

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

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Parabolic wave absorber can achieve a good wave elimination effect in a small space, making it a commonly used wave elimination structure in basins or wave tanks. Existing studies have predominantly focused on the wave reduction effects of these devices on regular waves or random waves, which are short waves. However, the wave reduction performance for long waves such as solitary waves is still unclear. In this paper, a physical model test on the wave elimination performance of parabolic wave absorber with grids for solitary wave is carried out in the L-type basin of Hohai University. The results show that the wave elimination performance of the parabolic wave absorber for solitary waves is closely related to the relative wave height. For the grid wave-absorbing surface, the reflection coefficient directly from the wave-absorbing surface for relative wave heights between 0.07 and 0.38 ranges from 0.10 to 0.17. The reflection coefficient for waves transmitted through the grids and reflected by the right inner wall of the flume varies between 0.17 and 0.44. The reflection coefficient of the wave-absorbing surface without grids is in the range of 0.34 to 0.64. Based on the experimental results, the relationship between the reflection coefficients of parabolic wave absorber with and without perforated grids for solitary waves was established to provide a basis for the design and analysis of wave tests.

Keywords: L-type basin; parabolic wave absorber; perforated grid; solitary wave; reflection coefficient

收稿日期: 2024-03-04

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52201319); 江苏省自然科学基金项目(BK20220082)

作者简介: 陈思桦(1999—), 男, 硕士, 从事非线性水波动力学研究。

通讯作者: 严士常(1980—), 男, 博士, 副教授, 从事波浪与建筑物相互作用研究。E-mail: yanshichang@hhu.edu.cn

波浪港池与水槽物理模型试验是研究波浪传播变形及其对工程影响的重要方法之一。试验中通常需要在造波机的另一端布置消浪装置, 用于吸收波能和减小反射波对试验的影响。因此, 消浪装置的性能对试验结果的准确性具有重要意义。

消浪装置按几何形状分为直立式、斜坡式和曲面式等。直立式消浪装置通常在固定框架内填充铁丝网等多孔材料吸收波能。Goda 等^[1]基于理论及物理模型试验研究铁丝网的消浪性能, 并总结了其反射系数的计算关系; Méhauté^[2]设计孔隙沿程减小的变孔径铁丝网消浪装置, 通过逐渐增大波能耗散以提高消浪效果; Madsen^[3]理论研究各种多孔结构的反射特性, 认为反射系数不仅与直立消浪装置的孔隙比和长度有关, 还与水深、波浪周期和入射波高相关。与直立式消浪结构相比, 斜坡式消浪装置在保证相同消浪效果时可节省一半长度。Ouellet 等^[4]总结不同材料构成的均匀斜坡消浪性能, 发现在坡度缓于 15° 时, 由碎石或铁丝网组成的消浪结构性能相当, 均可达到较好的消浪效果; 张洪雨等^[5]提出一种孔经由外向里逐渐减小的多层带孔斜坡组成的消浪装置, 试验结果表明斜坡倾角越小, 消浪性能越好, 相同长度的消浪装置孔板间距适当减小有助于提高消浪性能; 俞杰等^[6]在多层变孔径斜坡的基础上增加三角消浪网, 进一步提高了消浪性能。

为进一步节省占用空间、提高消浪效果, 一些学者采用抛物线形曲面消浪。Lean^[7]基于线性长波理论对比直立式、斜坡式及抛物线型结构的消浪效果, 研究表明后者性能更佳。Lu 等^[8]从理论上分析了 $y \sim -x^2$ 型可渗透和不可渗透曲面的消浪性能, 表明在合理的参数下渗透曲面可以达到良好的消浪效果; 兰波等^[9]基于物理模型试验比较多层铁丝网、箱式以及弧形装置的消浪效果, 表明后者的消浪效果最好; Neelamani 等^[10]基于模型试验分别比较抛物线型曲面以及存在横槽与圆

孔的反射特性, 表明同时带横槽与圆孔的抛物线型曲面消浪效果最好; Hodaiei 等^[11]认为波浪主要集中于自由水面, 提出半浸没式带孔消浪曲面装置, 并测试不同曲面的消浪效果; 兰波等^[12]在栅格抛物线型曲面下增设多层斜坡, 并在后方静水面以上布置消浪网, 提高了装置对更宽频率范围波浪的消浪性能; 彭程等^[13]以双层弧形孔隙板曲面构成消浪装置, 并基于水槽试验比较上下层孔隙率对消浪效果的影响, 发现上下层曲面的孔隙率分别为 30% 和 20% 时, 波浪的反射系数可低至 0.06; Izquierdo 等^[14]基于物理模型试验和数值模拟, 得到半浸没抛物线型曲面反射系数与几何形状和波要素的关系, 并提出针对具体试验组次的最小反射曲面。

综上, 在同等条件下, 相较于直立式与斜坡式消浪装置, 抛物线型曲面具有长度更短、消浪效果更佳的优势, 然而以往研究主要局限于规则波和随机波。消浪装置性能与试验的波要素密切相关, 孤立波作为一种典型的长波, 通常用于海啸灾害影响研究, 但抛物线型曲面的反射性能还未得到研究。此外, 斜坡式或曲面式消浪装置增加栅格可以提高消浪效果, 但透过栅格的波浪若未被有效吸收, 还可再次被反射回来并影响试验区域。为此, 拟开展物理模型试验分别研究有、无栅格时, 抛物线型消浪曲面对孤立波的消浪性能, 总结其反射系数计算表达式, 为波浪物理模型试验的设计与分析提供依据。

1 试验概况

试验在河海大学 L 形风流港池中进行。港池长 84 m、宽 70 m、深 1.5 m, 在造波机的另一端设置了栅格抛物线型消浪曲面。造波板距港池左侧内壁 3.25 m, 消浪装置距港池右侧内壁 1.52 m。消浪曲面由不锈钢单元制成, 长 4.52 m, 以坡脚为 X 轴起点, 剖面表示为 $Y^2 = 0.22X$ (图 1)。整个消浪装置由宽 2 m 的单元拼接而成, 每个单元下方

设置 3 组栅格。每个栅格长 0.33 m、宽 0.06 m，左右间距 0.03 m。港池内水深保持不变，沿波浪传播方向依次布置 7 根采样频率为 50 Hz 的波高仪，记录波面过程(图 2)。整个试验过程不考虑波浪的

横向运动，因此本研究也可视为波浪水槽试验。

研究针对 2 组水深情况下不同孤立波的传播过程，参数见表 1。每组试验重复 3 次，波高仪从造波机启动开始采集数据，整个采集时间为 300 s。

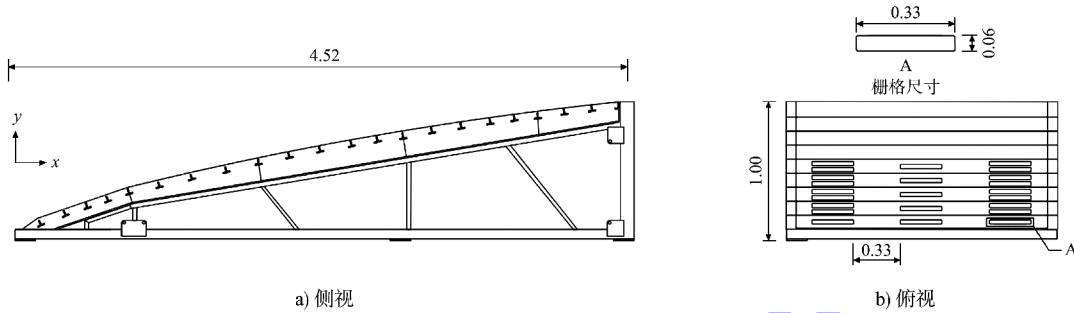


图 1 栅格抛物线型消浪曲面 (单位: m)

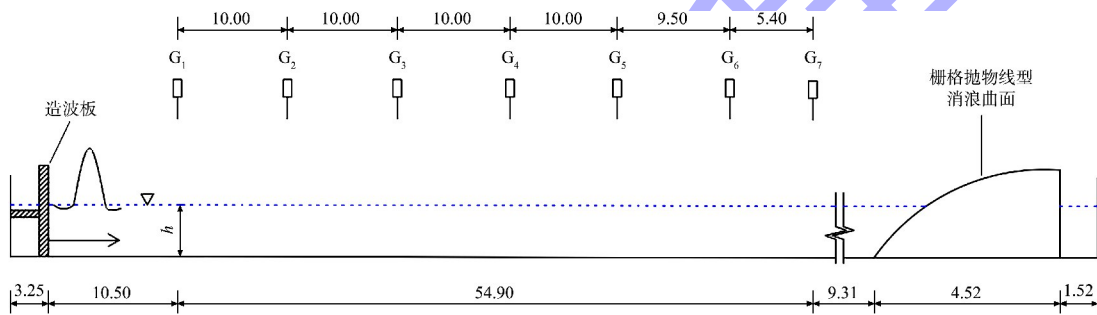


图 2 试验布置 (单位: m)

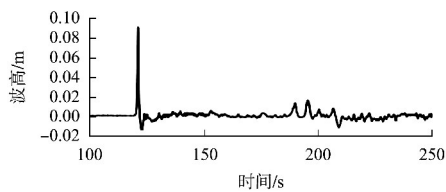
表 1 试验水深及入射孤立波波高

水深 h/m	波高 H/m
0.32	0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08、0.09、0.10、0.11
0.40	0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08、0.09、0.10、0.11、0.12、0.13、0.14、0.15、0.16

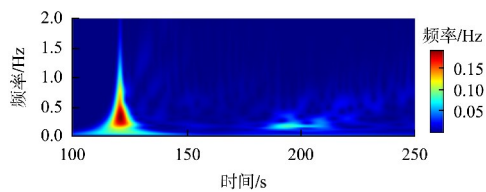
2 栅格消浪曲面

2.1 波面过程

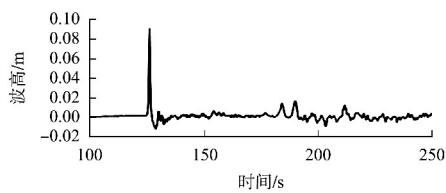
图 3 为水深 $h=0.32$ m、初始波高为 $H=0.09$ m 时， $G_1 \sim G_6$ 测得波面过程及其对应的小波谱。



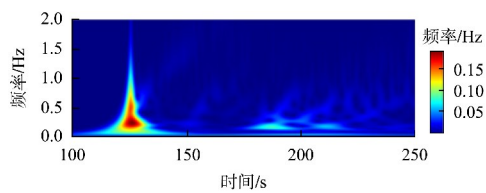
a) G_1 波面过程



b) G_1 小波谱



c) G_2 波面过程



d) G_2 小波谱

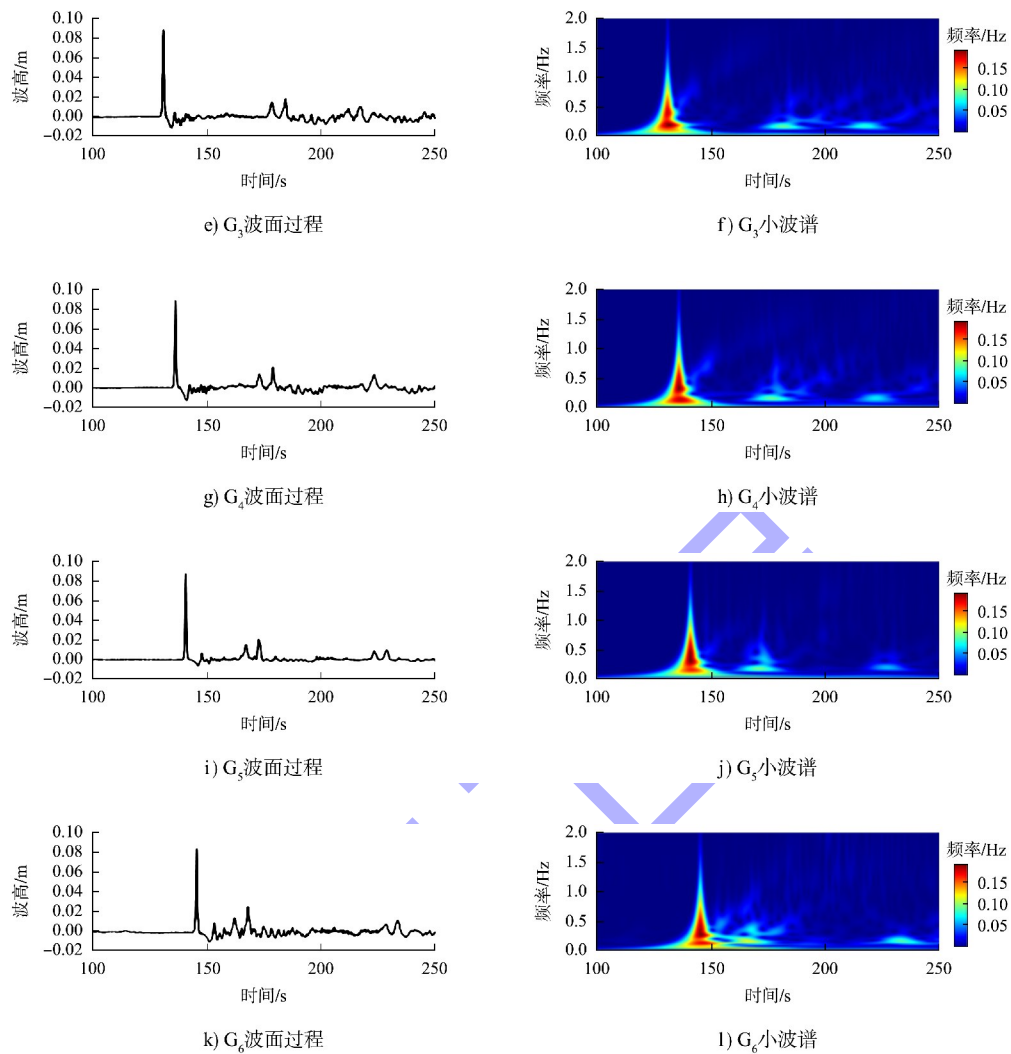


图 3 栅格消浪曲面 $G_1 \sim G_6$ 测点对应的波面过程及小波能量谱

孤立波在传播至消浪曲面前, 波形保持稳定, 但伴随着波高沿程微小的衰减(波高由 G_1 处 0.090 m 减小至 G_6 处 0.085 m)。孤立波传至消浪曲面, 沿其爬升的同时部分波浪被反射回去。此外, 还有部分波浪透过栅格传至港池右侧被反射回来, 这些被反射回的波浪部分透过栅格继续向造波机方向传播。由于消浪曲面距离港池右侧边壁很近, 这两部分反射波几乎叠加在一起形成第 1 次反射波。这些波浪传播至造波机处被再次反射回来形成第 2 次反射波。基于各测点波面过程及对应的小波谱, 可获得试验中反射波的到达时刻, 由于孤立波在水面上传播, 因此其对应的波峰值即为波高。以 G_1 测点为例, 根据波面序列过程, 当 $t=189.8$ s 时, 消浪曲面直接反射的波浪到达该处,

对应波高为 0.014 m, 该值即为消浪曲面直接反射的反射波高。当 $t=195.4$ s 时, 透过栅格被港池右侧内壁反射回来的波浪到达该处, 对应波高为 0.017 m, 该值即为透过栅格被港池右侧内壁反射回来的反射波高。基于各测点位置的入射波高和两部分反射波高, 结合公式(1):

$$c = [g(h+H)]^{1/2} \quad (1)$$

式中: c 为波浪传播速度, m/s; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; h 为水深, m; H 为波高, m。

得到试验入射波、反射波的传播速度, 根据图 2 中各测点的位置即可得到两部分反射波各自到达测点位置的时刻, 与试验测量结果进行比较(表 2), 两者非常接近, 误差不超过 0.5%。

表2 反射波到达测点 G₁~G₆ 位置的时刻

测点位置	消浪曲面反射的波浪到达时刻/s		港池右侧内壁反射的波浪到达时刻/s	
	理论值	试验值	理论值	试验值
G ₁	188.7	189.8	195.3	195.4
G ₂	183.1	184.1	189.9	189.9
G ₃	177.6	178.7	184.3	184.3
G ₄	172.1	173.0	178.8	178.6
G ₅	166.5	167.4	173.2	173.1
G ₆	161.2	162.2	167.9	168.0

2.2 波高沿程衰减

由于 G₇ 测点距离消浪曲面坡脚 9.31 m，考虑到波浪传播过程由于底摩阻导致的衰减，无法用测量结果计算反射系数。通过分析孤立波沿程衰减过程，计算消浪曲面坡脚处的入射波高、消浪曲面直接反射的反射波高和经过栅格被港池右侧内壁反射回来的反射波高。

Keulegan^[15]总结了由于底部边界层导致孤立波在平底海床上波高沿程衰减规律为：

$$\left(\frac{H_x}{h}\right)^{-1/4} - \left(\frac{H_0}{h}\right)^{-1/4} = K \frac{x}{h} \quad (2)$$

式中：H₀ 为初始位置的波高，x 为波浪传播的距离，H_x 为 x 处的波高，K 为衰减系数，忽略港池侧壁影响仅考虑底部边界层作用时可表示为：

$$K = \frac{1}{12} \frac{\nu^{1/2}}{g^{1/4} h^{3/4}} \quad (3)$$

式中：ν 为运动黏滞系数，本次试验取 0.897 × 10⁻⁶ m²/s。

基于式(2)、(3)，根据 G₁ 测点处的初始入射波高值 H₀，即可得到各位置入射波高的沿程变化 H_{1,x}。同理，根据 G₁ 测点处消浪曲面直接反射的反射波高 H_{r10} 或经过栅格被右侧内壁反射回来的波高 H_{r20}，可由公式得到消浪曲面直接反射的反射波高沿程变化 H_{r1,x} 及经过栅格被右侧内壁再次反射回来的波高沿程变化 H_{r2,x}。

各测点入射及反射波高与理论解吻合较好，见图4、5，误差不超过1%。因此，基于公式能够准确地得到坡脚处的入射波波高、消浪曲面直接

反射的反射波高及经过栅格被港池右侧内壁反射回来的反射波高。

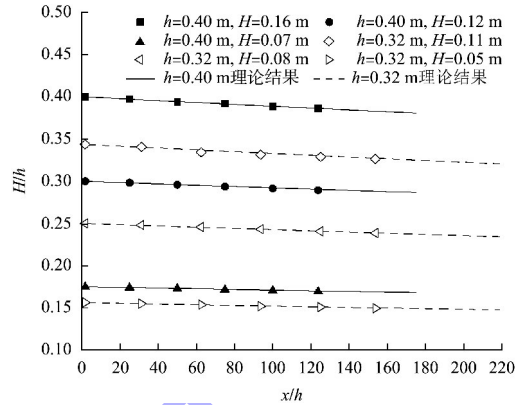
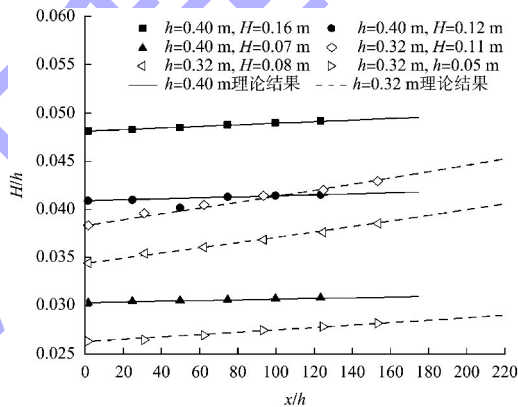
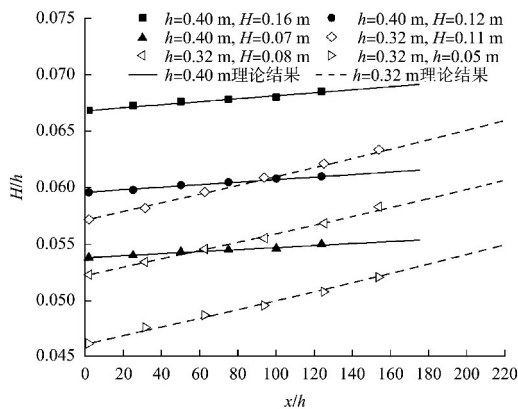


图4 基于试验与理论的入射波高沿程变化对比



a) 直接反射的波高



b) 经过栅格被右侧内壁反射回来的波高

图5 基于试验与理论的消浪曲面的波高沿程变化对比

2.3 反射系数

孤立波由消浪曲面直接反射和经过栅格被港池右侧内壁反射后再次透过栅格的反射波两部分组成，分别定义其反射系数为 K_{r1} 和 K_{r2}：

$$\begin{cases} K_{r1} = \frac{H_{r1}}{H_1} \\ K_{r2} = \frac{H_{r2}}{H_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: H_1 为栅格消浪曲面坡脚处的入射波高, H_{r1} 为栅格消浪曲面直接反射的反射波在坡脚处的波高, H_{r2} 为经港池右侧内壁反射的波浪再次透过栅格在栅格消浪曲面坡脚处的波高。

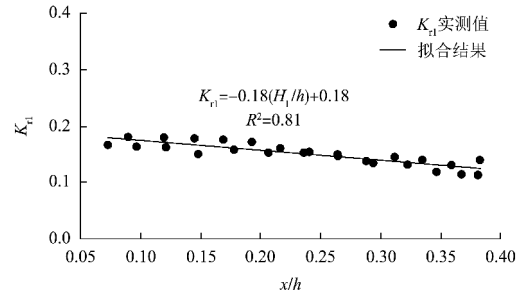
栅格消浪曲面反射系数随孤立波相对波高的变化关系见图 6。反射系数 K_{r1} 整体在 0.10~0.17 之间波动, 反射系数 K_{r2} 在 0.44~0.16 之间。从图中可以看出, 反射系数 K_{r1} 、 K_{r2} 随着相对波高的增大而减小, 相对波高为波高与水深之比, 当水深较浅或波高较大时, 波浪非线性较强, 其波形更加尖陡, 波浪传播至消浪曲面更容易发生波浪破碎从而消耗更多波能, 因此, 其反射系数往往更小, 这与彭程等得到的研究结果类似。进一步建立反射系数 K_{r1} 、 K_{r2} 与相对波高的关系式:

$$\begin{cases} K_{r1} = a_1 \frac{H_1}{h} + b_1 \\ K_{r2} = a_2 \frac{H_1}{h} + b_2 \end{cases} \quad (5)$$

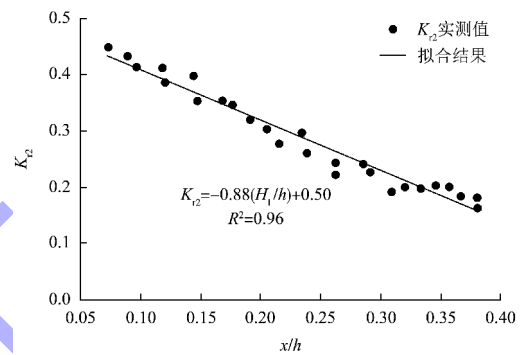
式中: $a_1 = -0.18$, $b_1 = 0.18$, $a_2 = -0.88$, $b_2 = 0.50$ 。

公式(5)的拟合优度 R^2 均在 0.8 以上, 说明该公式能有效预测孤立波在消浪曲面上产生的反射。从结果上看, 虽然栅格消浪曲面的反射系数 K_{r1} 均小于 0.2, 但当相对波高小于 0.3 时, 栅格消浪曲面反射系数 K_{r2} 均在 0.2 以上, 且变化幅度较大。因此, 要进一步提高消浪曲面对孤立波的消浪效

果, 可在消浪曲面与港池末端墙壁之间抛投一定量的碎石。



a) K_{r1} 与相对波高关系



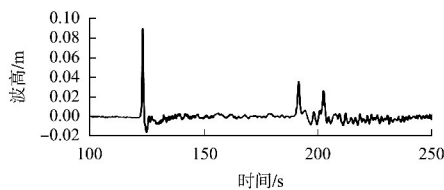
b) K_{r2} 与相对波高关系

图 6 反射系数 K_{r1} 和 K_{r2} 随相对波高的变化

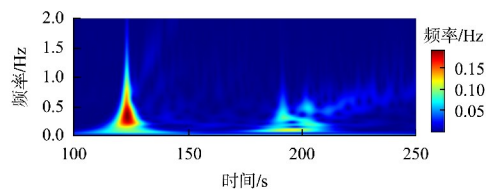
3 无栅格消浪曲面

为进一步量化试验中消浪曲面上栅格的影响, 将栅格封住研究孤立波被无栅格消浪曲面的反射。当入射波高为 $H=0.09$ m、港池水深为 $h=0.32$ m 时, $G_1 \sim G_6$ 处浪高仪的波面时间过程及对应的小波谱见图 7。孤立波传至消浪曲面, 部分被反射回去, 之后传播至造波机后发生二次反射。

入射波高 $H=0.09$ m、港池水深 $h=0.32$ m 时, 以 G_2 为例, 有无栅格两种情况的波面过程见图 8。无栅格消浪曲面的反射波高明显大于栅格消浪曲面的情况, 说明栅格能够有效减小波浪的反射。



a) G_1 波面过程



b) G_1 小波谱

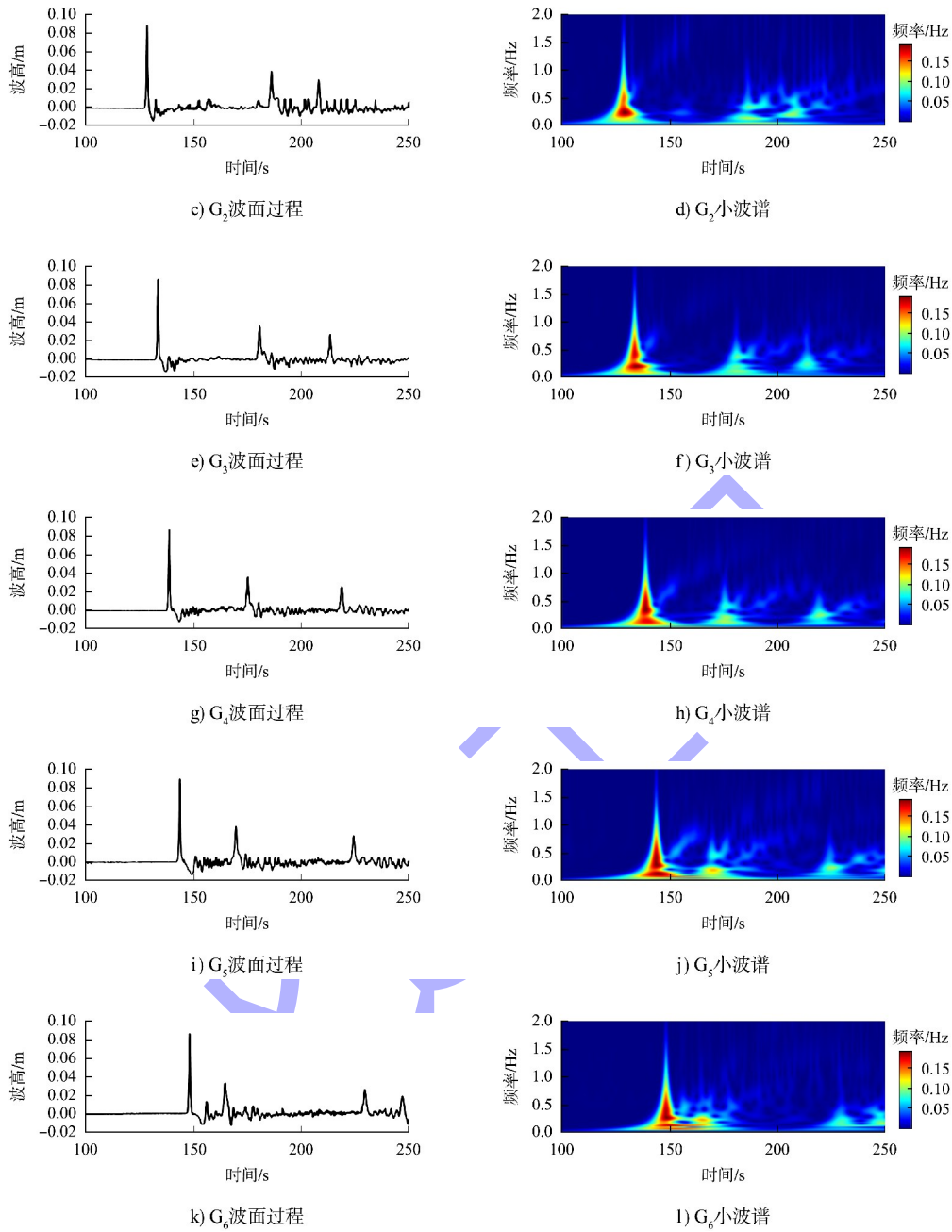


图 7 无栅格曲面 $G_1 \sim G_6$ 测点对应的波面过程及小波能量谱

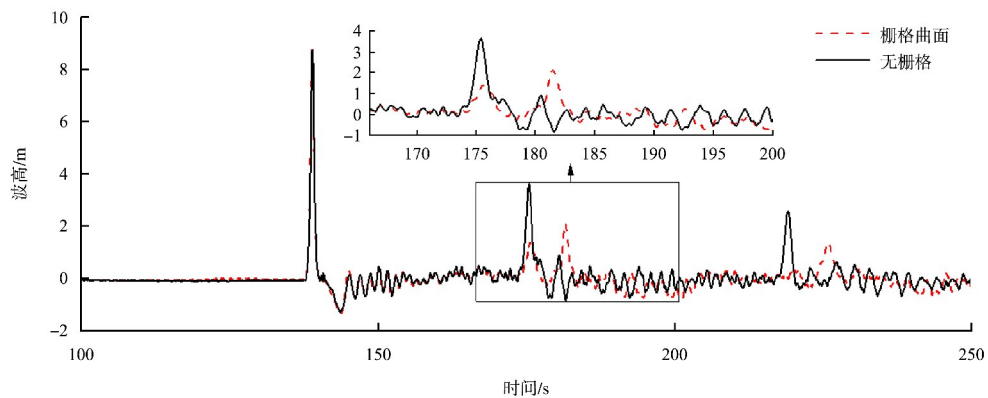


图 8 G_2 测点处栅格曲面与无栅格曲面波面过程对比 ($H=0.09\text{ m}, h=0.32\text{ m}$)

采用公式对无栅格消浪曲面坡脚处的入射波高 H_1 以及反射波高 H_{r1} 进行预测, 并计算反射系数。反射系数随相对波高的变化见图 9, 其反射系数为 0.34~0.64, 且随着相对波高的增大而减小。

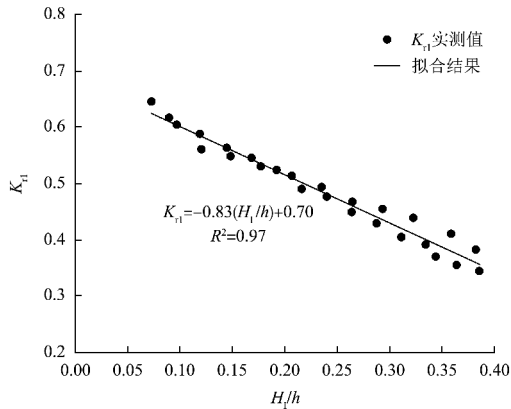


图 9 反射系数 K_{r1} 随相对波高的变化关系

进一步建立反射系数 K_{r1} 与相对波高的关系式, 与公式的形式一致, 对 K_{r1} 的拟合优度 R^2 高达 0.97, 式中 $a = -0.86$, $b = 0.70$ 。从结果上看, 波浪仅在无栅格消浪曲面上发生反射, 消浪效果较差, 说明栅格在消浪过程中具有重要作用, 无栅格消浪曲面无法满足实验室的消浪需求。

4 结论

1) 孤立波传至栅格消浪曲面, 沿其爬升的同时部分波浪被反射回去。此外, 还有部分波浪透过栅格传至港池右侧被反射回来, 这两部分反射波高及入射波高沿程变化与理论公式吻合良好, 误差不超过 1%。

2) 基于栅格消浪曲面坡脚处的入射、反射波高计算反射系数, 发现栅格消浪曲面直接反射的反射系数为 0.10~0.17, 透过栅格被港池右侧内壁反射的反射系数为 0.17~0.44。为加强栅格消浪曲面对孤立波的消浪效果, 可在栅格消浪曲面和港池末端墙壁之间抛投一定量的碎石。

3) 波浪在无栅格消浪曲面上直接反射, 反射系数为 0.34~0.64, 是相同波况下栅格消浪曲面的 1.4~2.2 倍, 说明栅格可有效减小波浪反射。

4) 有、无栅格的消浪曲面反射系数均与相对波高线性相关, 建立不同消浪曲面反射系数的经验公式, 为波浪物理模型试验的设计与分析提供依据。

参考文献:

- [1] GODA Y, IPPEN A T. Theoretical and experimental investigation of wave energy dissipators composed of wire mesh screens [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [2] MÉHAUTÉ B L. Progressive wave absorber[J]. Journal of hydraulic research, 1972, 10(2): 153-169.
- [3] MADSEN P A. Wave reflection from a vertical permeable wave absorber [J]. Coastal engineering, 1983, 7(4): 381-396.
- [4] OUELLET Y, DATTA I. A survey of wave absorbers[J]. Journal of hydraulic research, 1986, 24(4): 265-280.
- [5] 张洪雨, 张鑫. 多层变孔径倾斜孔板式消波装置的试验研究[J]. 应用科技, 2015, 42(4): 74-80.
- [6] 俞杰, 白志刚, 余海涛, 等. 一种新型多结构复合消波装置的性能试验研究[J]. 水道港口, 2023, 44(4): 552-558, 571.
- [7] LEAN G H. A simplified theory of permeable wave absorbers[J]. Journal of hydraulic research, 1967, 5(1): 15-30.
- [8] LU C J, HE Y S. Reflexion and transmission of water waves by a thin curved permeable barrier[J]. Journal of hydrodynamics, 1989, 1(3): 77-85.
- [9] 兰波, 缪泉明, 姚木林, 等. 波浪水池消波装置选型的试验研究[C]//第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 中国海洋工程学会, 2007: 240-243.
- [10] NEELAMANI S, PRASAD RAJU P V. Wave interaction with parabolic corrugated and perforated wave absorbers[J]. ISH Journal of hydraulic engineering, 2012, 10(1): 19-32.
- [11] HODAEI S M R, CHAMANI M R, MOGHIM M N, et al. Experimental study on reflection coefficient of curved perforated plate [J]. Journal of marine science and application, 2016, 15(4): 382-387.