

· 综 合 ·



斜向波浪作用下直立式防波堤前沿 波浪特性试验研究

杨 博, 潘军宁, 沈雨生

(南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 在波浪与结构物相互作用过程中, 若入射波波向与结构物小于某个角度时, 会产生沿着建筑物传播的 Stem 波。它的波能在传播过程中迅速集中, 对堤结构的稳定性以及港内波浪条件产生重要的影响。通过三维波浪物理模型试验, 对比分析了规则波和不规则波下 Stem 波的波高分布随波浪入射角的变化规律以及不同结构形式防波堤前 Stem 波的波高分布。研究结果表明: 规则波和不规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向均呈部分驻波的分布形式, 规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向的变化幅度明显大于不规则波。对于不开孔直立堤, 相同入射波浪周期下, 波陡较大时 Stem 波比波高较小; 而在不同波浪周期下, 波浪入射角较小时, 波陡对 Stem 波比波高影响不大; 在波浪入射角度较大时, 波陡较大则 Stem 波比波高较小。波浪入射角和直立堤开孔与否对直立堤前 Stem 波比波高的影响较大, 且规律明显。

关键词: 斜向浪; 直立堤; Stem 波; 入射波浪; 结构形式

中图分类号: U656.2+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0001-07

Experimental study on front wave characteristics of vertical breakwater under oblique wave action

YANG Bo, PAN Junning, SHEN Yusheng

(Key Laboratory of Sediment Engineering and Transportation Industry, Nanjing Institute of Hydraulic Sciences, Nanjing 210029, China)

Abstract: In the process of wave-structure interaction, if the incident wave direction and the structure are less than a certain angle, Stem waves propagating along the building will be generated. Its wave energy is rapidly concentrated during propagation, which has an important impact on the stability of the dike structure and the wave conditions in the harbor. In this paper, the variation law of Stem wave height distribution with wave incident angle under regular wave and irregular wave and the wave height distribution of Stem wave in front of different structural breakwaters are compared and analyzed through three-dimensional wave physical model experiments. The results show that the Stem wave height perpendicular to the axis of the vertical embankment is partial standing wave distribution under the action of regular wave and irregular wave, but the amplitude of the change of the Stem wave height perpendicular to the axis of the breakwater under the action of regular wave is significantly greater than that under the action of irregular wave. For non-perforated vertical embankments, under the same incident wave period, when the wave steepness is large, the comparative height of Stem wave is small. In the case of the different incident wave period, when the wave incidence angle is small for a non-perforated vertical embankment, the wave steepness has little effect on the comparative height of Stem wave. In the case of larger incident angles, when the wave steepness is large, the comparative height of Stem wave is small. The impact of wave incidence angle and whether the vertical embankment is perforated or not on the comparative height of the Stem wave in front of the vertical embankment is significant, and the law is obvious.

Keywords: oblique wave; vertical breakwater; Stem wave; incident wave; structural type

收稿日期: 2023-04-06

作者简介: 杨博 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

当入射波波向与直立式防波堤布置方向小于某个角度时,其并不仅仅被直墙常规地反射,沿着建筑物传播的 Stem 波也会随之产生(图 1)。Stem 波波高经常比入射波波高高 1 倍以上,其波能在传播过程中迅速集中,并不断增大,对堤结构的稳定性以及港内波浪条件产生重要的影响。因此研究直立式防波堤前 Stem 波特性具有重要的理论和工程实际意义。

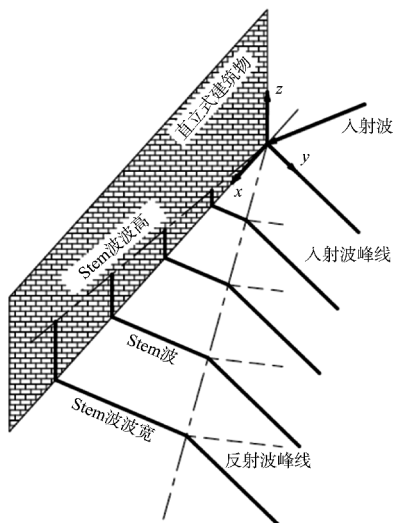


图 1 直立式防波堤前 Stem 波

1980 年, Melville^[1]关于孤立波斜向入射直立式建筑物时引起的 Stem 波进行试验,观测到 Stem 波沿墙传播时,波宽逐渐增加,波高随着入射角度的减小而有所减小。Nielsen^[2]和 Berger 等^[3]通过试验证实了当正弦波斜向入射到直立堤时会产生 Stem 波,并且正弦波和孤立波产生的效果相同。Yue 和 Mei^[4]于 1980 年采用抛物线近似波浪模型,通过数值模拟的方法研究静水中薄楔形向前衍射的二阶 Stokes 波,研究表明当入射波的振幅变大时,Stem 波沿着直墙边缘逐渐增强。Liu 和 Yoon^[5]于 1986 年对 Yue 和 Mei 的模型进行了改进,以研究不同水深的影响,推广了 Yue 和 Mei 的模型到非等深情况。Yoon 和 Liu^[6-7]使用 Boussinesq 方程的抛物线近似作为控制方程,使用数值方法研究浅水中椭圆余弦波与直壁的相互作用,并证明了 Stem 波列的存在。Mase 等^[8]于 2002 年对规则波和随机作用下 Stem 波的相似点与不同点、以及

Stem 波的演变对于波浪破碎影响进行研究。Lee 等^[9]通过数值模拟和物理模型试验对规则波和不规则波作用下的 Stem 波特性进行研究,结果表明垂直于直墙方向波浪分布呈明显的驻波形式。张永刚等^[10]应用具有四阶频三特征的新型 Boussinesq 方程对非线性 Stem 波进行数值研究,结果表明这种组合式差分格式能有效模拟非线性 Stem 波的演变规律。张慈珩^[11]结合 2 个实际工程项目的三维整体波浪物理模型试验,重点对 Stem 波作用下防波堤护面块体的稳定性进行研究。张少华^[12]在直立式结构物与非线性波浪相互作用的研究中,根据斜向规则波在直立结构物上的极端爬高,探究水深、入射波角度以及波陡对 Stem 波的波幅和宽度的影响。

综上所述,国内至今对 Stem 波的研究还比较少,重要原因之一是我国已建成防波堤的工程水深较浅,大多采用斜坡堤结构,且多与来浪方向成较大的角度,Stem 波现象不明显。但随着我国港口建设中深水工程越来越广泛,直立式防波堤将被更多地应用,该现象也将越来越多地出现在工程实践中。因此本文通过三维波浪物理模型试验,对比分析规则波和不规则波下 Stem 波的波高分布随波浪入射角度的变化规律以及不同结构形式防波堤前 Stem 波的波高分布。

1 物理模型试验

1.1 试验设备和仪器

波浪物理模型试验在南京水利科学研究院波浪试验厅波浪港池进行。港池长 52 m、宽 17.5 m、高 1.2 m,配备 1 台不规则波造波机,由计算机自动控制,可产生所需的模拟波浪要素,生成不同波谱类型的规则波和不规则波。波浪要素测量采用电容式波高仪,通过 DS30 型多功能自动采集系统采集波高,最终由计算机形成数据文件。试验前后需对波高仪进行标定和校准,保证数据的准确性和精度,波高测量的绝对误差小于 ± 1 mm,相对误差小于 $\pm 2\%$ 。对于不规则波,连续采集的波浪个数不少于 100 个。

1.2 试验方法

1.2.1 直立堤结构

直立式防波堤采用暗基床沉箱结构, 沉箱高 0.40 m, 对于开孔沉箱结构, 开孔率为 10.8%, 沉箱结构见图 2、3。直立堤模型采用有机玻璃制作。

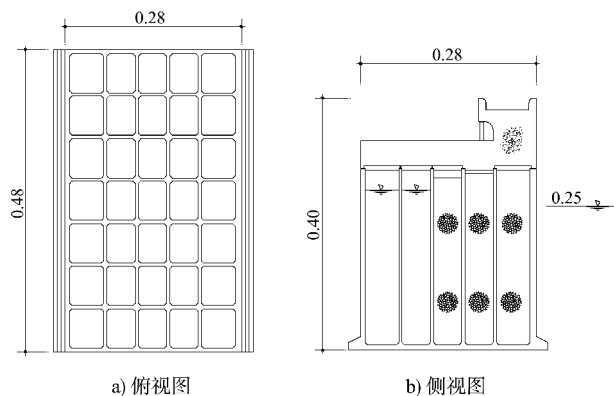


图 2 不开孔沉箱结构 (单位: m)

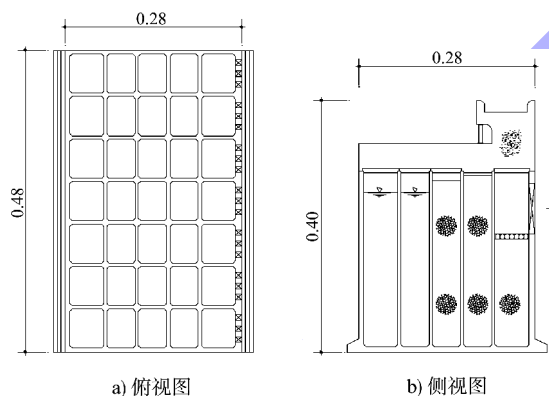


图 3 开孔沉箱结构 (单位: m)

1.2.2 试验组次

试验直立堤结构包括不开孔沉箱和开孔沉箱。试验水深 0.25 m。试验波浪包括规则波和不规则波, 波浪入射角 β 包括 10° 、 20° 、 30° 和 40° , 试验波高 $H_{1/3}$ 包括 0.025、0.045 和 0.065 m, 波浪周期 T 包括 1.10、1.40、1.70 和 2.00 s 4 种。试验根据重力相似准则进行波浪模拟, 使用规则波和不规则波分别进行, 不规则波的频谱使用 JONSWAP 谱, 取谱峰值升高因子 $\gamma=3.3$ 。

1.2.3 模型布置

港池造波机为单向造波机, 通过调整沉箱模

型在港池内的布置达到不同的波浪入射方向, 试验波浪入射方向包括 10° 、 20° 、 30° 和 40° 。沉箱模型长 12.0 m, 在沿着堤轴线方向和垂直于堤方向分别布置多根波高仪, 沿堤轴线方向的波高测点间距为 0.5 m, 垂直于堤轴线方向的波高测点间距为 0.3 m。模型和波高测点布置情况见图 4、5。

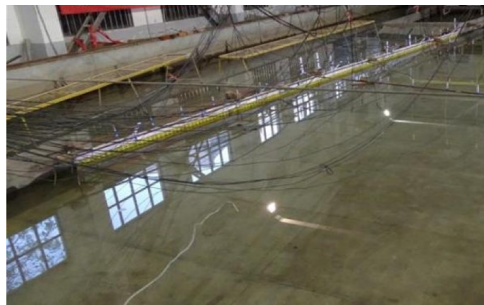


图 4 模型照片

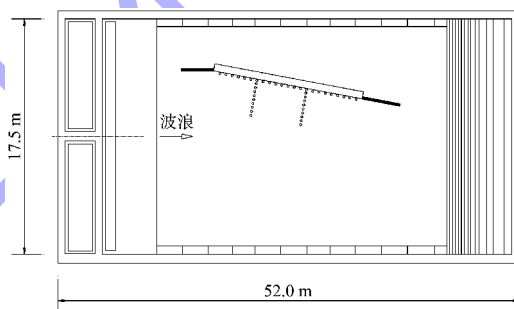


图 5 波高测点布置

2 试验结果与分析

2.1 波浪入射角度对 Stem 波波高的影响

图 6 为不规则波作用下, $H_{1/3}=0.045$ m 时不同波浪入射角度下不开孔直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波波高分布的对比, 为便于比较, 采用比波高即堤前波高与入射波高的比值 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0$ 进行对比。由图可见, 对于不开孔直立堤, β 对堤前 Stem 波比波高的影响较大, 且规律明显。当 β 较小时 (10°) 可以看出沿堤轴线方向各位置 Stem 波的比波高差距并不大; 当 β 增到 20° 时, 其比波高在轴线方向上骤然增大; 随着 β 不断增大, 比波高也逐渐增高, 但当 β 由 30° 增大到 40° 时, Stem 波的比波高增加有变缓趋势。由本次试验可以得出, 当 β 为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时, Stem 波现象较为明显。

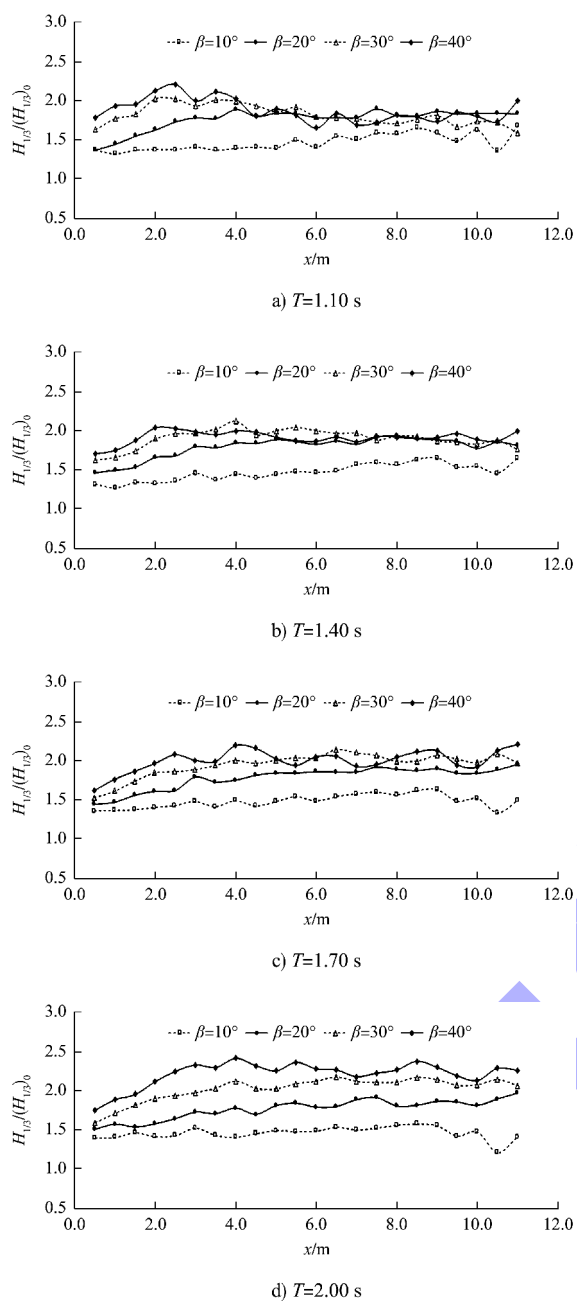


图6 不同波浪入射角度下不开孔直立堤 Stem 波波高

2.2 规则波与不规则波对比

首先对规则波和不规则波作用下直立堤前的 Stem 波波高分布进行对比分析。直立堤为不开孔沉箱, 波浪入射角为 30° , 波高 0.045 m , 波浪周期为 1.10 、 1.40 、 1.70 和 2.00 s 4 种。不规则波的波高为有效波高 H_s , 周期为平均周期 \bar{T} 。

图 7 为规则波和不规则波作用下直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波比波高分布的对比。由图可见: 在不规则波作用下, 直立堤前 Stem 波波高沿堤轴线方向曲线较为平缓, 整体趋势表现为先增

大后减小; 而在规则波作用下, 直立堤前 Stem 波波高沿堤轴线方向曲线波动较大, 与不规则波相比, 其直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波波高整体上较大。在该组工况下 1.10 、 1.40 、 1.70 和 2.00 s 波浪周期时, 不规则波作用下直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波比波高最大值分别为 2.03 、 2.11 、 2.14 和 2.17 ; 规则波作用下直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波比波高最大值分别为 2.37 、 2.55 、 2.37 和 2.38 。

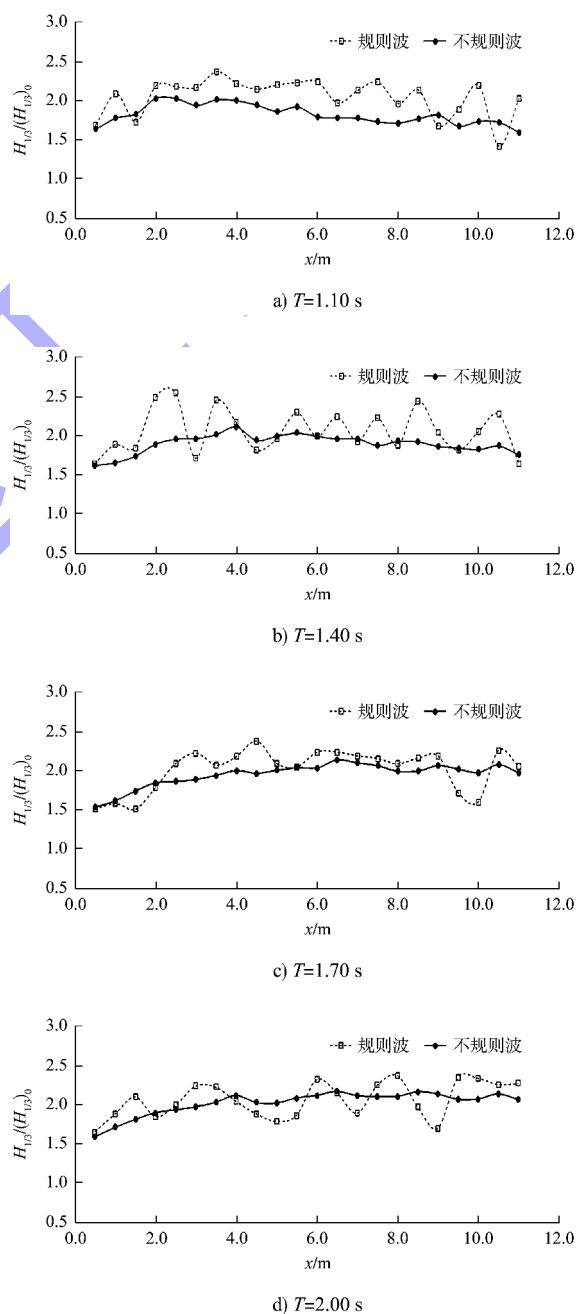


图7 规则波和不规则波作用下沿堤轴线方向 Stem 波波高分布

图 8 为规则波和不规则波作用下直立堤前垂直于堤轴线方向 Stem 波波高分布的对比。由图可见: 规则波和不规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向的第一个谷值点的位置较为接近, 但是其后的峰值点和谷值点位置差别较大。规则波和不规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向均呈部分驻波的分布形式, 但是规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向的变化幅度明显大于不规则波作用下的情况。

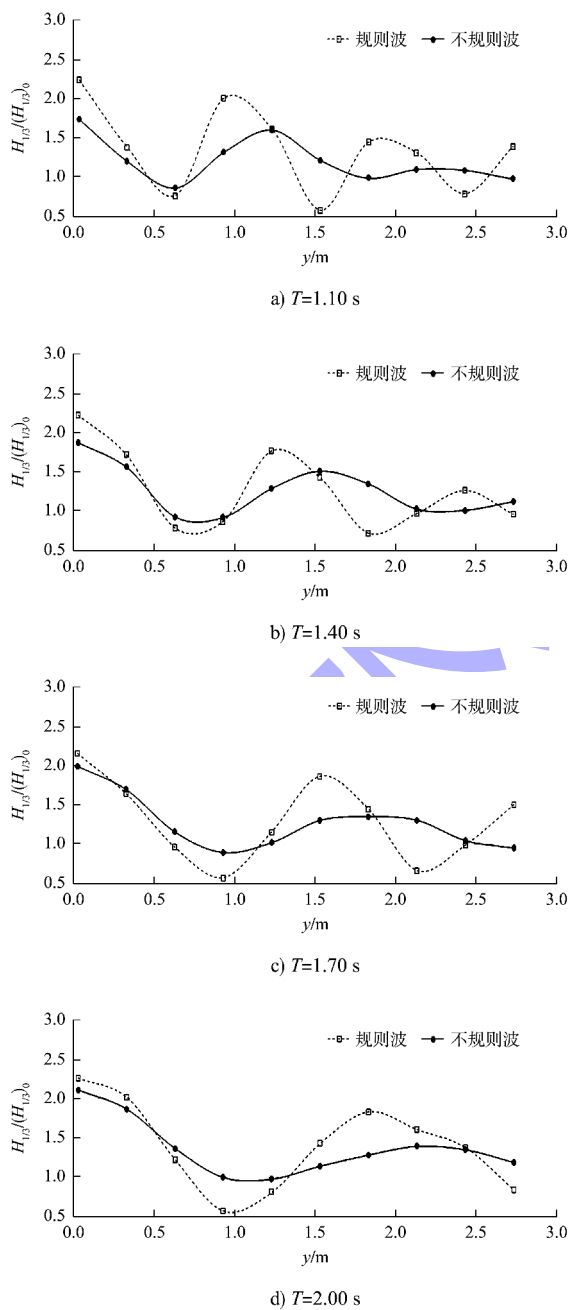


图 8 规则波和不规则波作用下垂直于堤轴线方向 Stem 波波高分布

2.3 波陡对 Stem 波波高的影响

图 9 为不规则波作用下, 波浪入射角 30° 时, 不同入射波高下不开孔直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波波高分布的对比。由图可见, 对于不开孔直立堤, 整体上沿堤轴线方向 Stem 波比波高均随着入射波高的增大而减小, Stem 波比波高在 $H_{1/3} = 0.025$ m 时较大、在 $H_{1/3} = 0.065$ m 时较小, 即相同入射波浪周期下, 波陡较大时 Stem 波比波高较小。

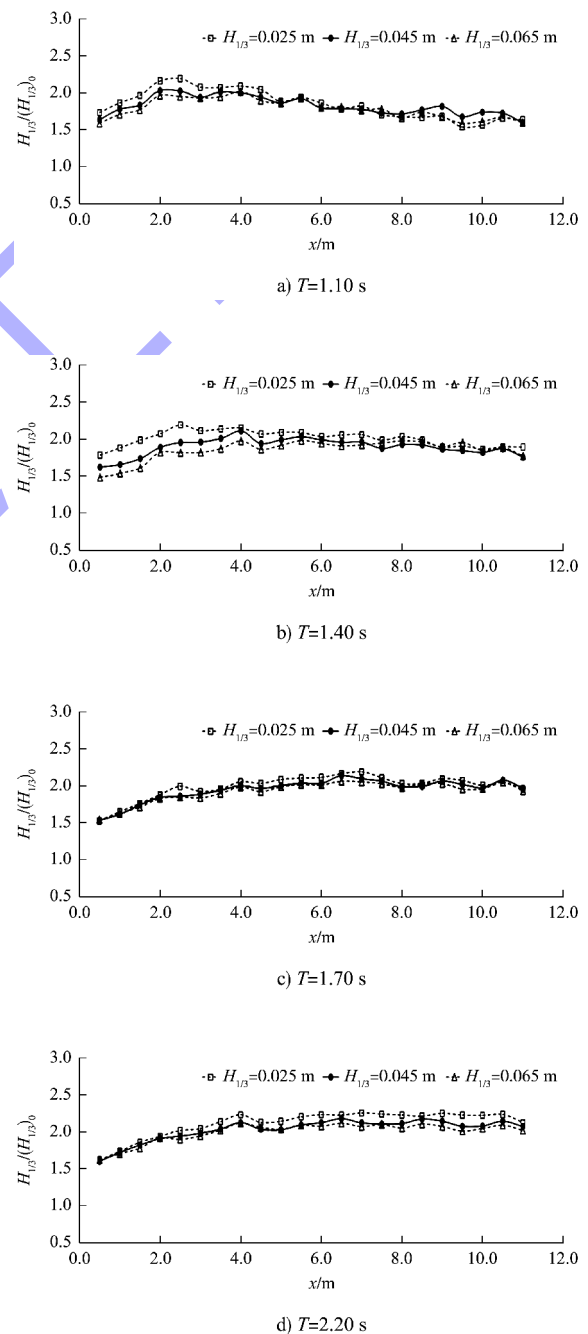


图 9 不同入射波高下 Stem 波波高的对比

图 10 为不规则波作用下, 入射波 $H_{1/3}=0.045$ m 时不同入射波浪周期下不开孔直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波波高分布的对比。由图可见, 对于不开孔直立堤, 在 β 较小 (10° 和 20°) 时, 不同入射波浪周期下直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波比波高的差别较小。在 β 相对较大 (30° 和 40°) 时, 不同入射波浪周期下直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波比波高有一定的差别, 整体上沿堤轴线方向 Stem 波比波高均随着入射波浪周期的增大而增大。

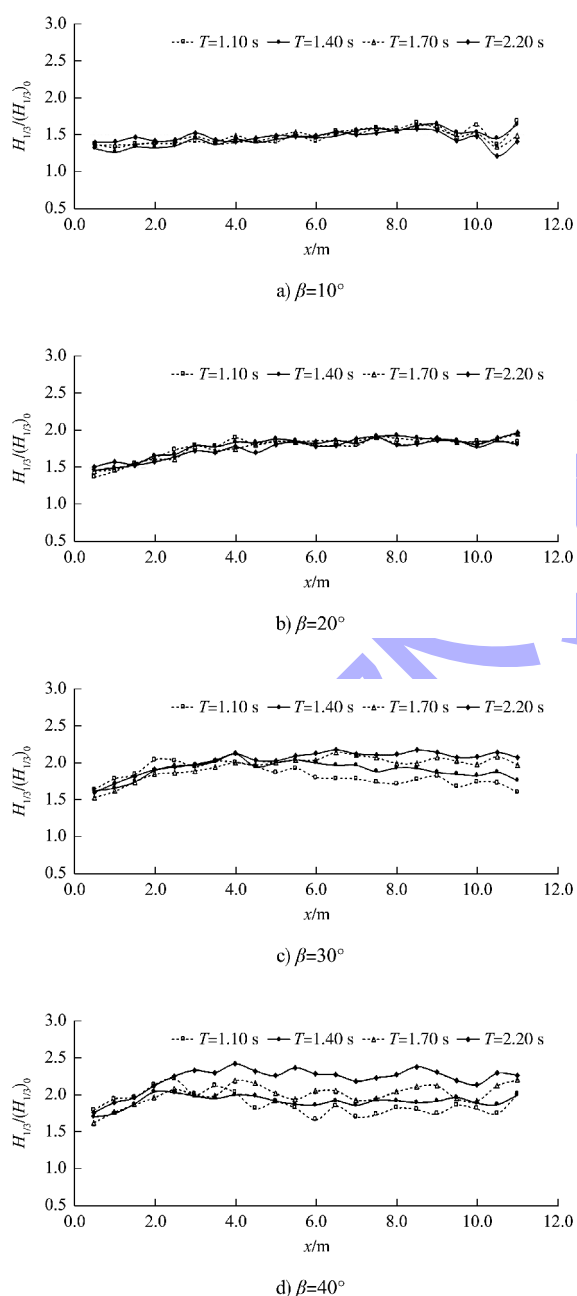


图 10 不同入射波浪周期下 Stem 波波高对比

2.4 沉箱开孔情况对 Stem 波波高的影响

图 11 为不规则波作用下, $\beta=30^\circ$ 、 $H_{1/3}=0.045$ m 时, 沉箱不开孔与开孔时直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波波高分布的对比。由图可见, 直立堤开孔与否对 Stem 波比波高的影响较大, 且规律明显。与不开孔直立堤相比, 开孔直立堤前的 Stem 波比波高相比均较小。本次试验条件下, 与不开孔直立堤相比, 开孔直立堤前的 Stem 波比波高平均相对减小 14%。

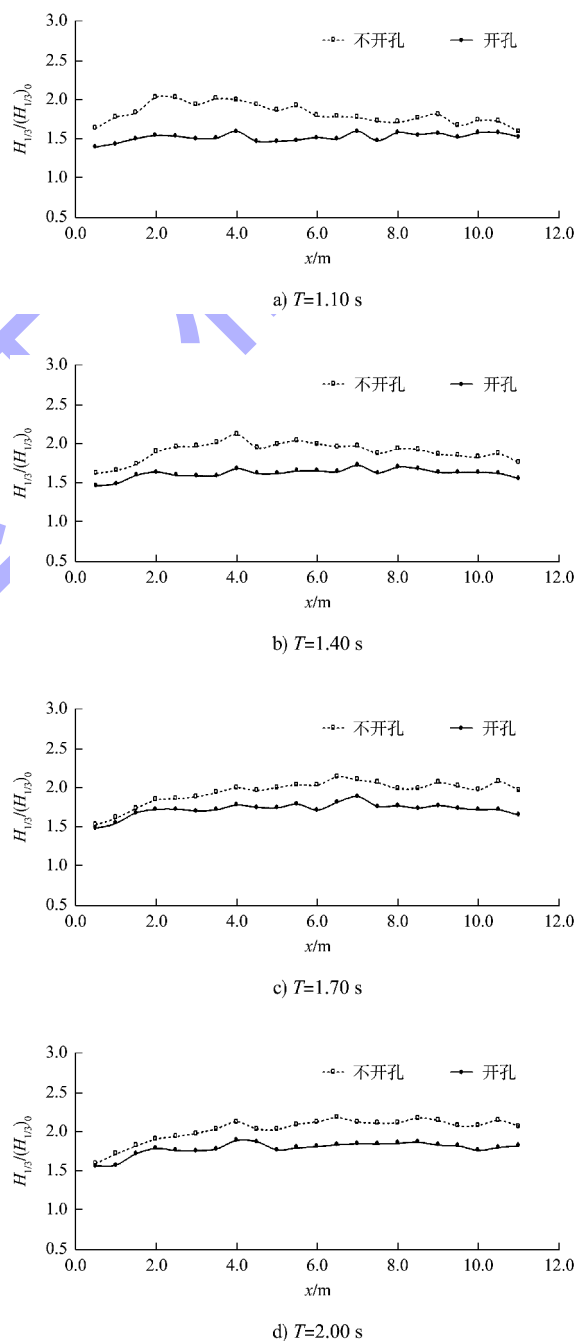


图 11 不同沉箱开孔情况下直立堤结构前 Stem 波波高对比

3 结论

1) 波浪入射角对直立堤前 Stem 波比波高的影响较大,且规律明显。整体上,沿堤轴线方向 Stem 波比波高均随着波浪入射角度的增大而增大,但在增大到 40° 后,Stem 波比波高的增加有变缓趋势。

2) 与不规则波相比,规则波作用下直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波波高整体上较大。不规则波作用下,直立堤前 Stem 波波高沿堤轴线方向整体上趋势为先增大后略减小。规则波作用下,直立堤前 Stem 波波高沿堤轴线方向分布波动较大。规则波和不规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向均呈部分驻波的分布形式,但是规则波作用下直立堤前 Stem 波波高垂直于堤轴线方向的变化幅度明显大于不规则波作用下的情况。

3) 对于不开孔直立堤,相同入射波浪周期下,无论波浪入射角如何,波陡较大时 Stem 波的比波高均较小。然而在不同入射波浪周期下,在波浪入射角较小(10° 和 20°)时,直立堤前沿堤轴线方向 Stem 波的比波高差别较小;在波浪入射角相对较大(30° 和 40°)时,波陡较大时 Stem 波的比波高则较小。

4) 直立堤开孔与否对 Stem 波比波高的影响较大,且规律明显。与不开孔直立堤相比,开孔直立堤前的 Stem 波比波高相比均较小。本次试验条件下(波浪入射角 30° 、入射波高 0.045 m),与不开孔直立堤相比,开孔直立堤前的 Stem 波比波高平均相对减小 14% 。

参考文献:

[1] MELVILLE W K. On the Mach reflection of a solitary wave[J]. Journal of fluid mechanics, 1980, 98: 285-297.

- [2] NIELSEN A H. Diffraction of periodic waves along a vertical breakwater for small angles of incidence [R]. California: California University of Berkeley Hydraulic Engineering Lab, 1962.
- [3] BERGER U, KOHLHASE S. Mach-reflection as a diffraction problem[J]. Coastal engineering proceedings, 1976, 1(15): 796-814.
- [4] YUE D K P, MEI C C. Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge [J]. Journal of fluid mechanics, 1980, 99: 33-52.
- [5] LIU P L F, Yoon S B. Stem waves along a depth discontinuity[J]. Journal of geophysical research: Oceans, 1986, 91(C3): 3979-3982.
- [6] YOON S B, LIU P L F. Stem waves along breakwater[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1989, 115(5): 635-648.
- [7] YOON S B, LIU P L F. Interactions of currents and weakly nonlinear water waves in shallow water[J]. Journal of fluid mechanics, 1989, 205(1): 397-419.
- [8] MASE H, MEMITA T, YUHI M, et al. Stem waves along vertical wall due to random wave incidence [J]. Coastal engineering, 2002, 44(4): 339-350.
- [9] LEE J I, LEE Y T, KIM J Y, etc. Stem waves along a vertical wall: comparison between monochromatic and random waves[J]. 2009, 25 (1): 991-994.
- [10] 张永刚,李玉成,王永学.应用 Boussinesq 方程对非线性 Stem 波的数值研究[J].水动力学研究与进展(A辑),1997(4): 393-400.
- [11] 张慈珩.STEM 波作用下防波堤护面稳定的物理模型研究[D].天津:天津大学,2012.
- [12] 张少华.非线性波浪在直立结构物上爬高的研究[D].大连:大连理工大学,2020.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部