



越南茶荣沿海港口波浪 三维整体物理模型稳定性研究*

王 昊, 张慈珩, 刘海源, 陈汉宝

(交通运输部天津水运工程科学研究院, 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456)

摘要: 三维波浪整体物理模型试验已广泛运用于防波堤工程实践中。三维整体物模试验较传统的波浪断面物理模型而言, 对于波浪与结构物的作用有着更加完备的刻画。三维随机波浪整体物理模型试验可量化波浪的浅水变形、折绕射、越浪量及海工结构物三维稳定性。以越南茶荣沿海港口防波堤工程为例, 利用 1:34.3 三维整体波浪物理模型, 针对不同波向及重现期波浪条件下防波堤堤头、堤身三维稳定性与防波堤越浪量进行测试研究。试验结果表明: 1) 防波堤头堤石为 5 t、主干为 3.5 t 时结构布置可靠稳定。2) 仅在极端高水位和设计高水位部分组次发生少量越浪或者溅浪。

关键词: 物理模型; 波浪; 稳定性; 防波堤

中图分类号: U 656.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0062-06

Stability of 3D wave physical modeling for port in Trà Vinh, Vietnam

WANG Hao, ZHANG Ci-heng, LIU Hai-yuan, CHEN Han-bao

(National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology,
Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: The three-dimensional wave physical modeling has been widely employed in the breakwater design. Compared with the conventional 2D wave physical model, the 3D model has the merits in full description of the wave-structure interaction. The 3D random wave integral physical model test can quantify the wave shoaling, refraction and diffraction, overtopping amount and 3D stability of coastal structures. Taking the breakwater project of port in Trà Vinh, Vietnam as an example, a 1:34.3 3D integral wave physical model is used to test and study the 3D stability of the breakwater head and body and overtopping amount of breakwater under different wave directions and return periods. The test results show that: 1) The breakwater is reliable and stable when the head of the breakwater is 5 t and the trunk is 3.5 t. 2) Only a small amount of overtopping or splashing occurs at the extreme high water level and design high water level.

Keywords: physical modeling; wave; stability; breakwater

海港工程建设中三维整体物模试验与传统的断面水槽试验比较而言, 对波浪与结构物的作用有着更加完备的刻画, 在工程上应用日趋广泛^[1-3]。二维断面试验往往采用正向浪作用, 且无法模拟波能沿堤传输扩散等实际现象, 因此其越

浪结果有所偏大^[4]。高峰等^[5]通过三维物理模型试验, 探究印尼某港口的防波堤结构稳定性及越浪量, 同时指出三维试验所得波浪越浪量比二维试验少约 25%。三维波浪物理模型也被应用于评估航道开挖工程对于航道区域波浪传播的影响^[6]。

收稿日期: 2022-04-10

*基金项目: 国家自然科学基金项目(28119002); 中央级科研院所基本科研业务费专项(TKS20200204; TKS20220110)

作者简介: 王昊(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 从事港口航道工程研究。

通讯作者: 张慈珩(1981—), 男, 副研究员, 从事波浪与结构物相互作用研究。E-mail: 330945465@qq.com

唐玮等^[7]利用三维波浪整体物理模型,采用随机越浪与实际降雨叠加,更好地验证某人工岛在风浪及降雨共同作用下排水设施的能力及效果;孙鹏等^[8]通过对横沙东滩典型断面形式进行整体和断面物理模型试验,研究结构各参数对越浪量的影响,进而提出适合长江口海堤的越浪量计算公式;戈龙仔等^[9]利用整体三维物理模型,探讨不同入射来波作用下防波堤衔接段块体的稳定性和沉箱结构上的波浪力情况。以上研究均表明:为了更好地刻画波浪与海工建筑物的相互作用,三维整体模型不可或缺。虽然数值模拟技术在波浪越浪领域也取得了很多研究成果^[10-11],但物理模型始终是工程上,尤其是大型涉海工程最可靠的

研究手段。本文以越南茶荣省某海港防波堤工程为例,探讨波浪整体物理模型在海外工程建设中的应用。

1 工程概况

某海港工程位于中南半岛越南茶荣省东南海岸(图 1)。项目包括北防波堤和南防波堤、堆码头、港湾和航道。北防波堤长 3 900 m,南防波堤长 2 300 m,形式均为斜坡式。防波堤堤头坡面护面块体为 5.0 t 勾联块体,斜坡堤坡度为 1:1.6,护面石尺寸为 5~200 kg,滤石尺寸为 250~500 kg,顶高程 7.5 m。堤身的护面块体为 3.5 t 中式联锁块,坡度 1:1.6,护面石 5~200 kg,滤石 150~350 kg。

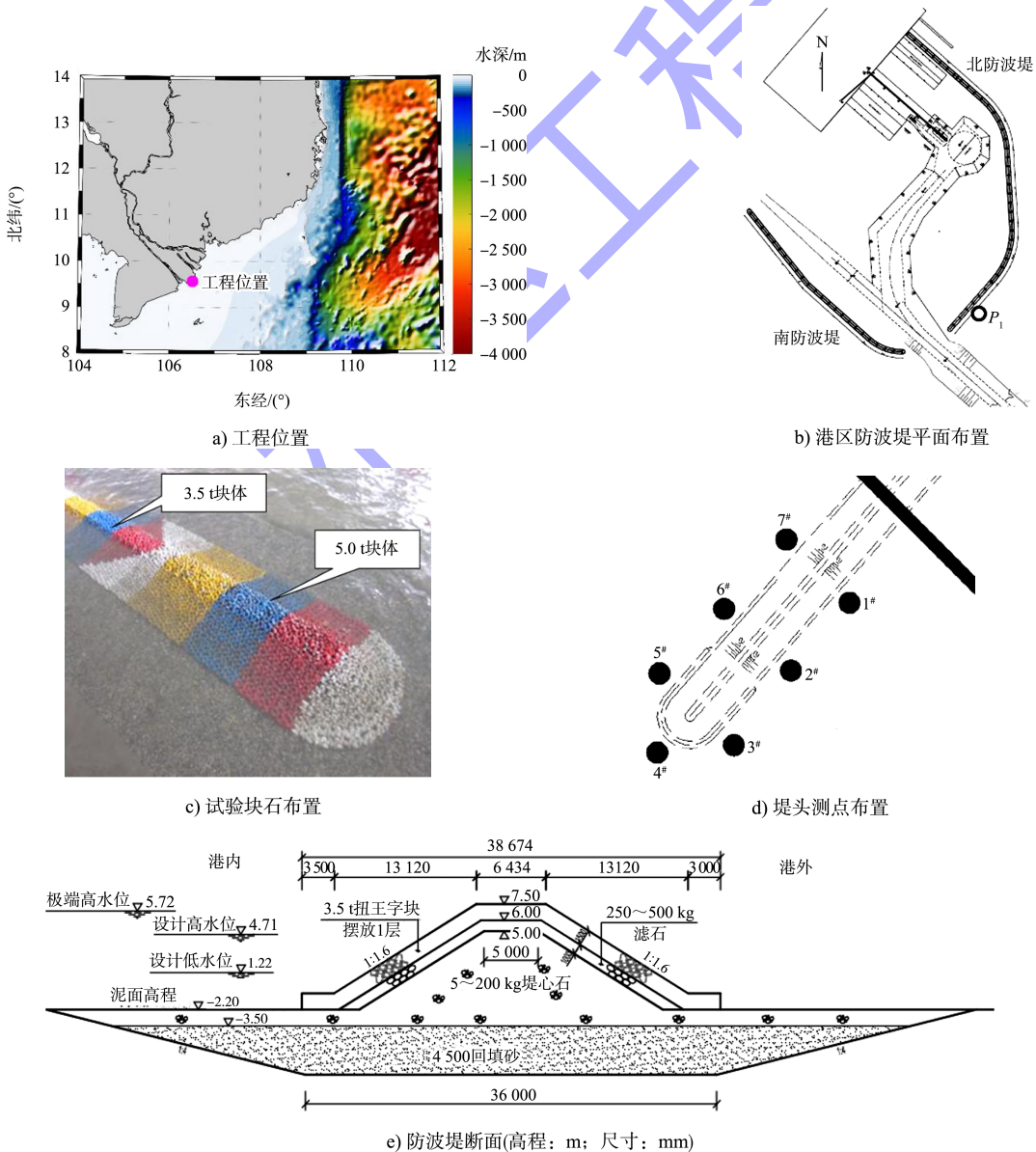


图 1 越南茶荣沿海港口

2 试验方法

试验依据英国规范 *Maritime structures-Guide to the design and construction of breakwaters*^[12] 和 *Port Designer's Handbook*^[13]。模型试验在交通运输部天津水运工程科学研究所波浪港池中进行,池长 45 m、宽 35 m、深 1.2 m。试验采用不规则造波机造波,水池四周均设置消波设备,造波机由造波板及伺服驱动器、伺服电机、编码器、服务器、计算机及其外设组成。造波机能产生的最大波高为 15 cm,最大波周期 2.0 s。试验时,按所需波浪对应一定参数,由计算机完成造波控制信号的计算,经接口电路将造波控制信号传输到伺服驱动器中,由伺服驱动器控制伺服电机的转动,电动缸将伺服电机输出轴的转动转换为电动缸推杆的直线运动,并经过杠杆将运动传递到推波板,从而带动推波板产生期望的水波。TK2008 型动态波高采集系统采用电容式传感器测波,自动采集并统计波高与周期结果。通过摄像机记录波面过程和上水、越浪等试验现象。海浪测量仪放置在设定区域的支架上,波高范围为 0.1~40 cm,精度为测量值的±0.5%,采样率(输出)为 1~200 Hz。依据重力相似准则,取比尺为 1:34.3,其他物理量比尺为几何比尺 34.3、时间比尺 5.86、质量比尺 40 353.6。

模型水下地形采用桩点法复制,平面尺寸及高程按几何相似原则制作。试验场地平面按 1.2 m×1.2 m 布设桩点,尺寸偏差控制在±1 cm 以内,用于制作地形的桩点高程用水准仪精确控制,偏差控制在±1 mm 以内。模型试验采用的是淡水,而实际工程中为海水,受淡水与海水的密度差影响,制模中考虑海水密度/淡水密度=1.025。护面块体以不同的颜色放置,可以很容易地观察到块石的位移。

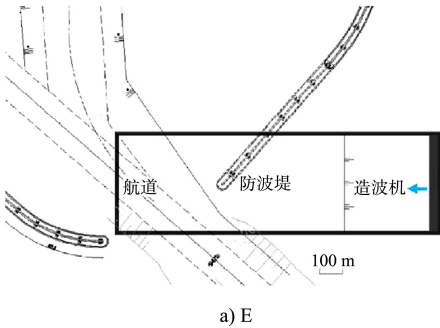
试验包含 3 种水位、2 种波浪重现期、4 种来波方向,试验条件见表 1。各波向布置见图 2。采

用不规则波入射,波谱为 JONSWAP 谱,谱方程解析式可见文献[5]。试验前进行原始波的率波验证,在所需波要素率定完成后建立防波堤,进而开展各组次试验。极端高水位 HHWL 时试验率定 P_1 点各向波要素结果见图 3。

表 1 试验波浪条件

方向	水位	重现期/a	H_s/m	T_p/s
NE	HHWL	50	1.84	9.07
		10	1.73	8.57
	HWL	50	1.63	9.07
		10	1.55	8.57
	LWL	50	1.07	9.07
		10	1.05	8.57
E	HHWL	50	3.19	9.07
		10	2.94	8.57
	HWL	50	3.06	9.07
		10	2.82	8.57
	LWL	50	2.18	9.07
		10	2.13	8.57
SE	HHWL	50	3.66	9.29
		10	2.67	7.84
	HWL	50	3.53	9.29
		10	2.59	7.84
	LWL	50	2.31	9.29
		10	1.83	7.84
S	HHWL	50	2.08	9.53
		10	1.89	8.91
	HWL	50	1.97	9.53
		10	1.80	8.91
	LWL	50	1.34	9.53
		10	1.32	8.91

注:极端高水位 HHWL 为 5.72 m,设计高水位 HWL 为 4.71 m,低水位 LWL 为 1.22 m。



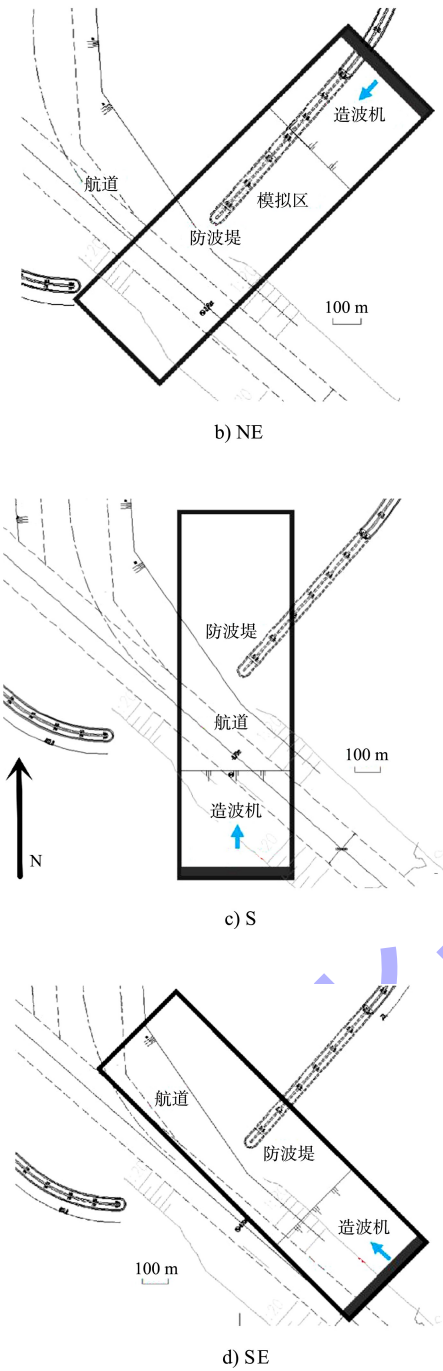


图 2 各波向布置

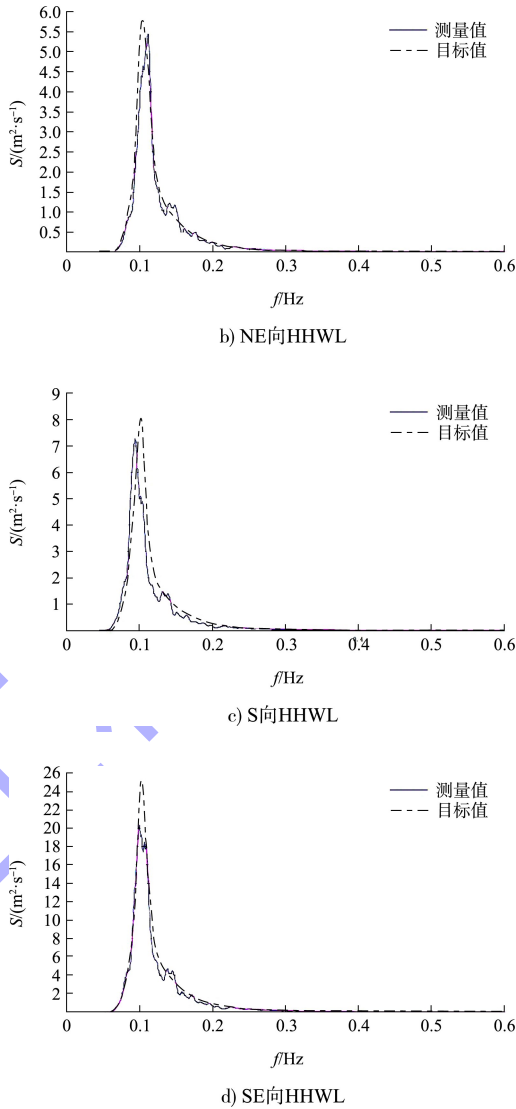
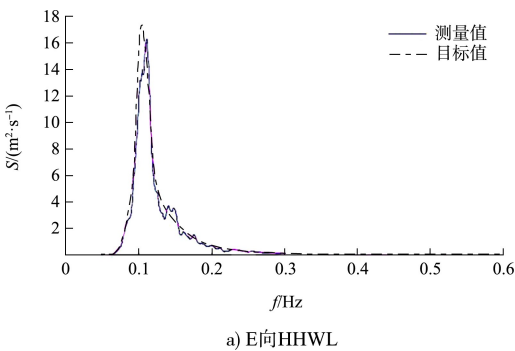


图 3 波谱率定结果

块石失稳率公式:

$$n=\frac{n_d}{N_1}\times100\%$$

(1)

式中: n 为失稳率(%); n_d 为静水位上、下各 1 倍设计波高范围内护面块体的失稳数; N_1 为静水位上、下各 1 倍设计波高范围内护面块体的总数。

3 试验结果

试验波要素结果见表 2, 1[#] ~ 7[#] 的位置见图 1d)。试验过程中, 堤头的 5 t 勾联块体和防波堤主干的 3.5 t 勾联块体的护面块体均未发生位移, 5~200 kg 的垫层块石也未发生移动, 认为防波堤整体结构稳定可靠。对于 50 a 一遇和 10 a 一

遇的波浪, 极端高水位条件下, 结构物在 E 和 SE 向来波都会产生少量越浪; 设计高水位时, 结构物在 E、SE 和 S 向来波都会产生少量溅浪; 低水位条件下无越浪。

物在 E、SE 和 S 向来波都会产生少量溅浪; 低水位条件下无越浪。

表 2 来波试验结果

来波方向	水位	重现期/a	波高/m							稳定性		越浪
			1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	5 t 勾联块体	3.5 t 勾联块体	
NE	HHWL	50	1.99	2.01	2.02	2.12	0.39	0.24	0.20	稳定	稳定	无
		10	1.83	1.85	1.86	1.95	0.36	0.22	0.19	稳定	稳定	无
	HWL	50	1.80	1.81	1.83	1.91	0.33	0.20	0.17	稳定	稳定	无
		10	1.67	1.69	1.70	1.78	0.31	0.19	0.16	稳定	稳定	无
	LWL	50	1.20	1.21	1.22	1.28	0.21	0.13	0.11	稳定	稳定	无
		10	1.16	1.17	1.18	1.23	0.20	0.12	0.10	稳定	稳定	无
E	HHWL	50	3.77	3.80	3.90	4.02	1.21	0.89	0.77	稳定	稳定	越浪
		10	3.40	3.43	3.51	3.63	1.09	0.81	0.69	稳定	稳定	越浪
	HWL	50	3.68	3.71	3.81	3.93	1.12	0.82	0.70	稳定	稳定	溅浪
		10	3.33	3.36	3.44	3.56	1.01	0.74	0.64	稳定	稳定	溅浪
	LWL	50	2.68	2.70	2.77	2.86	0.76	0.56	0.48	稳定	稳定	无
		10	2.57	2.59	2.66	2.74	0.73	0.54	0.46	稳定	稳定	无
SE	HHWL	50	4.45	4.46	4.65	4.87	2.94	1.54	1.21	稳定	稳定	越浪
		10	3.14	3.16	3.29	3.44	2.08	1.09	0.86	稳定	稳定	越浪
	HWL	50	4.22	4.18	4.36	4.59	2.80	1.47	1.17	稳定	稳定	溅浪
		10	2.97	2.92	3.04	3.24	1.95	1.04	0.85	稳定	稳定	溅浪
	LWL	50	2.60	2.58	2.69	2.83	1.72	0.90	0.72	稳定	稳定	无
		10	1.96	1.94	2.03	2.14	1.32	0.67	0.56	稳定	稳定	无
S	HHWL	50	2.45	2.48	2.5	2.62	0.87	0.64	0.62	稳定	稳定	溅浪
		10	2.19	2.20	2.22	2.33	0.78	0.57	0.56	稳定	稳定	溅浪
	HWL	50	2.37	2.39	2.41	2.53	0.79	0.59	0.57	稳定	稳定	溅浪
		10	2.12	2.14	2.16	2.27	0.71	0.52	0.51	稳定	稳定	溅浪
	LWL	50	1.65	1.66	1.67	1.76	0.52	0.38	0.37	稳定	稳定	无
		10	1.59	1.60	1.62	1.70	0.50	0.37	0.36	稳定	稳定	无

4 结语

1) 防波堤头部 5 t 勾联块体在测试时无位移, 结构稳定; 防波堤主干部分 3.5 t 勾联块体在测试时无位移, 结构稳定。

2) 对于 50 a 一遇和 10 a 一遇的波浪, 在极端高水位(5.72 m)条件下, 在 E、SE 向均会发生少量越浪, S 向为溅浪; 在设计高水位条件下, E、SE 和 S 向会有波浪飞溅; 低水位条件下无越浪, 结构稳定。

3) 本文所采用的比尺为 1:34.3 的三维整体物理模型能更加真实地刻画波浪由深水区往浅水区传播变形和与防波堤的相互作用(如块石稳定性、越浪等), 避免了在水槽断面试验中的一些简化与假设, 在实际防波堤工程设计中有着更好的推广

价值。

参考文献:

[1] 王诺, 郁黦兰, 吴暖, 等. 大连海上机场人工岛越浪量物模试验[J]. 水运工程, 2015 (5): 1-7.

[2] 王诺, 郁黦兰, 吴暖, 等. 大连海上机场人工岛护岸结构整体波浪物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2015(4): 19-23.

[3] 陈德旺, 刘海源. 斜向波作用宽肩台式防波堤稳定性试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(4): 451-456.

[4] 谢世楞. 三维不规则波作用下海堤和防波堤的越浪量计算[J]. 港工技术, 1995 (4): 1-4.

[5] 高峰, 雷华, 张慈珩, 等. 随机波浪作用下的防波堤三维稳定性及越浪量试验研究[J]. 水运工程, 2015 (10): 50-56.

[6] 吴月勇, 陈国平, 高晨晨, 等. 航道开挖对波浪传播影响的试验研究[J]. 水运工程, 2017 (5): 92-97.

[7] 唐玮, 杨粤茗, 董焱赫. 整体物理模型试验在人工岛排水设计中的应用[J]. 水运工程, 2021 (10): 78-84.

[8] 孙鹏, 陈海英, 周益人, 等. 长江口横沙东滩典型海堤越浪量现场和试验研究[J]. 海洋工程, 2019, 37 (4): 27-34.

[9] 戈龙仔, 栾英妮, 陈汉宝, 等. 斜向波作用下防波堤衔接段块体的稳定性和沉箱结构上波浪力试验研究[J]. 海洋通报, 2021, 40(1): 113-120.

[10] 孙大鹏, 修富义, 王键, 等. 基于 FLUENT 扭王字块体护面斜坡堤越浪量的数值研究[J]. 水道港口, 2021, 42(3): 281-288.

[11] 段岳, 高华喜, 孙宇飞, 等. 规则波作用下斜坡堤越浪量的数值模拟[J]. 水运工程, 2022(1): 1-6.

[12] INSTITUTION BRITISH STANDARD. Maritime structures-Guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7[S]. London: BSI, 1991.

[13] THORESEN CARL A. Port designer's handbook[M]. London: Thomas Telford Limited, 2014.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 47 页)

3)董家口港区的涌浪主要通过波浪对船体的直接作用影响船舶运动, 通过波生流间接对船舶惯性的影响较小, 一般可忽略不计。

参考文献:

[1] BABANIN A V, JIANG HY. Ocean swell: how much do we know [C]//American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. NewWork: American Society of Mechanical Engineers, 2017: 1-8.

[2] ARDHUIN F, CHAPRON B, COLLARD F. Observation of swell dissipation across oceans[J]. Geophysical research letters, 2009, 36(6): 1-5.

[3] 陈奇. 长周期波浪作用下的大型船舶系泊特性研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.

[4] 张先武, 张华平. 长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构优化设计[J]. 水运工程, 2015(1): 58-62.

[5] 李懿, 牛红林, 薛丁源. 斜向长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构稳定性优化[J]. 水运工程, 2018(9): 69-75.

[6] 李龙浩, 支远哲, 严庆新, 等. 考虑长周期涌浪影响散货船运动响应研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(1): 137-140.

[7] 邹红霞, 陈国平. 不规则波作用下潜堤透射系数的计算方法及统计分布[J]. 水运工程, 2010(3): 11-16.

[8] 潘冬冬, 郝嘉凌, 王红川. 规则波作用下潜堤透浪系数数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 95-102.

[9] HUR D S, LEE W D, AN S W, et al. A numerical study on flow control structure of a new-type submerged breakwater[J]. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 2010, 22(3): 181-190.

[10] 王科, 许旺, 张志强. 近自由水面水平板式防波堤消波特性及消波机理研究[J]. 船舶力学, 2010, 14(4): 362-371.

[11] 边峰, 黄哲, 琚烈红. 不同结构形式潜堤消浪性能物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2020(8): 36-41, 58.

[12] BOOIJ N, HOLTHUIJSEN L H, RIS R C. The “Swan” wave model for shallow water[C]//The American Society of Civil Engineers. Proceedings of 24th International Conference Coastal Engineering. Washington: ASCE, 1996: 668-676.

[13] QI J H, CHEN CS, BEARDSLEY R C, et al. An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): implementation, validations and applications[J]. Ocean modelling, 2009, 28: 153-166.

[14] MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/ POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan[J]. Journal of oceanography, 2000, 56(5): 567-581.

[15] 高义磊. 董家口港区总体规划的水动力分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

(本文编辑 王璁)