



波浪的非线性对斜坡堤反射和透射性能影响的试验研究*

赵刘群¹, 赵汝博², 马玉祥²

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230;

2. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 防波堤的反射和透射性能是评价防波堤的重要指标。通过物理模型试验研究不规则波作用下波浪的非线性对斜坡式防波堤的反射和透射的影响。应用基于小波变换的时域入射波分离方法分析防波堤前的入射波和反射波, 进而得到防波堤的反射系数和透射系数, 并将试验分析结果与现有斜坡式防波堤透射系数结果进行对比, 讨论不规则波浪的非线性和水位对反射和透射的影响。结果表明, 防波堤的反射系数随着波浪非线性和水位的增加而减小, 随着波浪非线性的增强, 波浪的透射系数减小, 而水位越大透射系数越大; 现有的防波堤透射系数公式计算的结果均偏小, 特别是高水位情况下更为显著; 所采用的防波堤具有较好的阻挡入射低频波浪的功能。

关键词: 物理模型试验; 斜坡式防波堤; 透射系数; 波浪分离

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0018-06

Experimental study on wave nonlinearity effect on reflection and transmission of sloping mound breakwater

ZHAO Liu-qun¹, ZHAO Ru-bo², MA Yu-xiang²

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The reflection and transmission properties are the key evaluating indicators of the breakwater. We carry out the physical experiments to study the influence of wave nonlinearity on the reflection and transmission of a sloping mound breakwater under the irregular waves, analyze the incident and reflected waves in front of the breakwater using a time-domain separation method based on the wavelet transform, obtain the reflection and transmission coefficients of the breakwater, compare the experimental results with the transmission coefficient of the existing sloping breakwater, and discuss the effect of wave nonlinearity and water level on the reflection and transmission. The results show that the reflection coefficient of breakwater increases with the enhancement of wave nonlinearity and water level. The transmission coefficient decreases with the enhancement of wave nonlinearity but increases with rising of water level. Almost all the existing wave transmission coefficient prediction formulae are underestimated the actual wave transmission, especially for a larger water level. This breakwater has a good performance for reflecting low-frequency waves.

Keywords: physical model experiment; sloping mound breakwater; transmission coefficient; wave separation

收稿日期: 2020-11-15

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51679031, 51979029); 辽宁省兴辽人才计划项目(XLYC1807010); 中央高校基本科研业务费项目(DUT2019TB02)

作者简介: 赵刘群(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海岸工程施工与设计。

防波堤是海岸工程中常见的一种结构物, 按照结构类型可分为斜坡式、直立式和浮式。斜坡式防波堤由堤心石和护面块体组成, 因其施工简单方便且消浪性能好, 被广泛应用于世界各地的港口和海岸工程中。

防波堤可有效减小堤后海况, 保护港口和码头的作业安全。在防波堤的设计中, 反射和透射性能是评价防波堤功能的重要指标。针对结构形式简单的防波堤, 采用理论^[1]、数值^[2]和模型试验^[3]等手段都可以较为合理地确定防波堤的消浪性能, 然而针对复杂形式的防波堤, 比如防波堤由具有一定孔隙率的堤心石和表面覆盖结构形式复杂的护面块体组成时, 应用理论分析很难实现对防波堤消浪性能的评价, 反射性能和透射性能一般通过物理模型试验确定^[4]。孙天霆等^[5]、杨会利等^[6]、葛晓丹等^[7-8]、王登婷等^[9]、沼田淳^[10]、Ahrens^[11]、冯卫兵等^[12]、夏艳军等^[13]通过物理模型试验拟合得到斜坡堤式防波堤的透射系数计算公式, 这些公式为斜坡堤的设计提供了重要参考。

在实际工程中, 作用于防波堤上的波浪为不规则波浪, 但目前只有沼田淳、Ahrens 和葛晓丹的公式涉及不规则波的情况。另外在模型试验过程中, 防波堤前所测量得到的时间序列是入射波和反射波叠加在一起的混合波浪场, 因此需要把测量数据分离成入射波和反射波, 才能准确估计防波堤的入射系数和反射系数, 然而在之前的大部分研究中并没有对防波堤前的入、反射波浪进行分离。再者波浪的非线性对结构物的入、反射性能有显著的影响, 但是目前针对波浪非线性对斜坡堤的反射性能和透射性能的研究还不多, 因此需要进行研究。

本文对广东某石化码头工程中的防波堤进行

不规则波作用下的模型试验, 采用 Ma 等^[14]提出的非平稳时域入反射方法来分离试验中测量的入、反射波浪, 进一步分析波浪的非线性对防波堤的反射和透射的影响。

1 试验布置

本防波堤工程海域床面高程为-22.0 m, 试验断面为斜坡堤, 见图 1, 斜坡坡度 1:1.5, 堤顶高程 5.30 m, 外坡堤脚附近采用 41 和 52 t 扭王字块体, 内坡下部护面采用 26 和 41 t 扭王字块体, 上部护面块体(外坡-12.0 m 高程以上、内坡-5.0 m 高程以上)均采用 75 t 扭王字块体, 75 t 扭王字块体下部垫层采用 6 和 26 t 扭王字块体, 堤心采用 1~2 t 块石。为研究波高对该防波堤透射性和反射性的影响, 在设计低水位和极端高水位条件下, 采用固定谱峰周期改变入射有效波高的不规则波方式分析防波堤断面的透浪系数。根据试验设备及场地等条件的限制, 本模型试验选用的缩比尺 $\lambda = 40$ 。

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室波浪水槽中进行, 该水槽可同时产生波浪、水流和风。水槽长 69 m、宽 2.0 m、深 1.8 m (图 1)。水槽的一端配有消浪缓坡, 另一端配有推板式不规则波造波系统, 由计算机自动控制产生所需的规则波和不规则波。为捕捉波面变化情况, 堤两侧布置 4 个波高仪, 采用日本 Techno 公司研发的 TWG-600S 型波高仪系统, 由多个可进行串联连接的电容式波高仪以及 1 个 A/D 采集盒组成。测量范围最大为 50 cm, 测量精度为 0.01 cm, 最大采样频率可设置为 50 Hz。仪器的灵敏度及稳定性均满足要求。所有量测信号均通过计算机采集、记录, 采样时间间隔为 0.02 s。波浪参数见表 1。

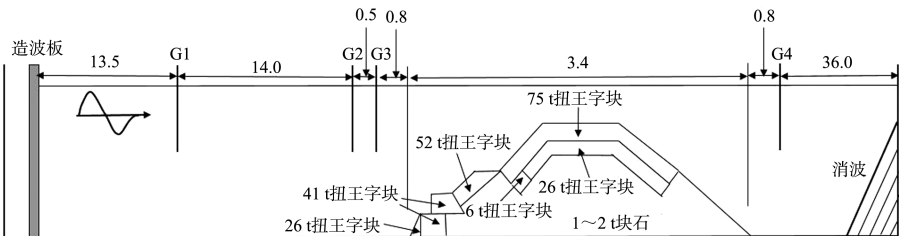


图 1 防波堤试验断面 (单位: m)

表 1 波浪参数

水位/m	原型		模型		波陡 ka
	有效波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	有效波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	
0.30 (低水位)	1.68	9.0	0.042	1.4	0.05
	2.72	9.0	0.068	1.4	0.08
	3.36	9.0	0.084	1.4	0.10
	4.40	9.0	0.110	1.4	0.13
	5.40	9.0	0.135	1.4	0.16
3.32 (高水位)	1.68	9.0	0.042	1.4	0.05
	2.72	9.0	0.068	1.4	0.08
	3.36	9.0	0.084	1.4	0.10
	4.40	9.0	0.110	1.4	0.13
	5.40	9.0	0.135	1.4	0.16

注： $ka=kH_s/2$ ，其中 k 为谱峰周期对应的波数，由波浪色散关系确定。

2 入反射波的时域分离方法

根据 Ma 等提出的入反射波分离方法，设造波板运动的中心位置为零点，波浪向建筑物传播的方向为正向，2 个波高仪与造波板的距离分别为 x_1 、 x_2 ，它们的间距为 Δx ，水深为 h 。根据波浪理论，测点 x_1 、 x_2 处的波面可表示为：

$$\eta(x_1,t)=\sum_{n=1}^N[a_{ln}\cos(\omega_nt-k_nx_1+\phi_{ln})+a_{Rn}\cos(\omega_nt+k_nx_1+\phi_{Rn})]\tag{1}$$

$$\eta(x_2,t)=\sum_{n=1}^N[a_{ln}\cos(\omega_nt-k_nx_1-k_n\Delta x+\phi_{ln})+a_{Rn}\cos(\omega_nt+k_nx_1+k_n\Delta x+\phi_{Rn})]\tag{2}$$

式中： n 为组成不规则波的波浪成分编号； N 为不规则波中总的波浪成分数量，由小波变换后确定； t 为时间； ω_n 、 k_n 分别为波浪的圆频率、对应的波数； a_{ln} 、 a_{Rn} 分别为入射和反射波浪的波幅； ϕ_{ln} 、 ϕ_{Rn} 分别为入射波浪和反射波浪的相位。根据 Ma 等的方法，通过构造式 (1)、(2) 的解析表达式来分离入射波浪与反射波浪，式 (1)、(2) 的解析形式可表示为：

$$\zeta(x_1,t)=\sum_{n=1}^N[a_{ln}e^{i(\omega_nt-k_nx_1+\phi_{ln})}+a_{Rn}e^{i(\omega_nt+k_nx_1+\phi_{Rn})}]\tag{3}$$

$$\zeta(x_2,t)=\sum_{n=1}^N[a_{ln}e^{i(\omega_nt-k_nx_1+\phi_{ln})}e^{-ik_n\Delta x}+a_{Rn}e^{i(\omega_nt+k_nx_1+\phi_{Rn})}e^{ik_n\Delta x}]\tag{4}$$

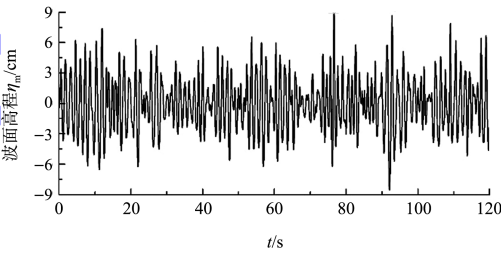
对式 (3)、(4) 进一步推导可得：

$$\eta_I=\text{Re}\left[\sum_{n=1}^N\frac{\zeta_n(x_1,t)e^{ik_n\Delta x}-\zeta_n(x_2,t)}{2i\sin(k_n\Delta x)}\right]\tag{5}$$

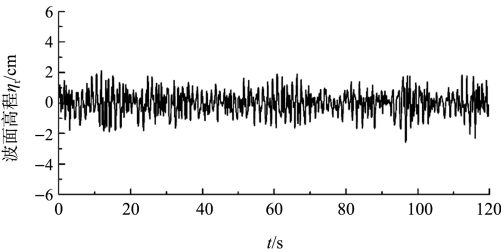
$$\eta_R=\text{Re}\left[\sum_{n=1}^N\frac{\zeta_n(x_1,t)e^{-ik_n\Delta x}-\zeta_n(x_2,t)}{-2i\sin(k_n\Delta x)}\right]\tag{6}$$

式 (5)、(6) 的实部分别为 x_1 测点处的入射波浪序列 η_I 和反射波浪序列 η_R 。不规则波浪的解析表达式构建可以通过 Morlet 小波变换实现，具体方法可参见文献 [14]。

试验直接测量得到的某一工况防波堤前和堤后的时间过程曲线见图 2。可以看出，波浪通过防波堤后，波高显著下降，说明该防波堤有良好的防浪效果。对防波堤前采集的序列分离结果见图 3。可以看出，反射波的波高虽然不大，但是在有些时间段强度较大。另外通过时间序列可以看出，透射波和反射波过程的平均频率较高。

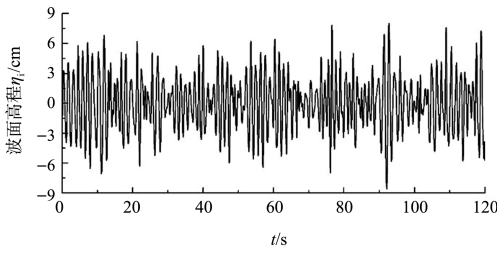


a) 防波堤前



b) 防波堤后

图 2 极端高水位 $H_s=11\text{ cm}$ 工况试验测量得到的防波堤前后的波面序列



a) 入射

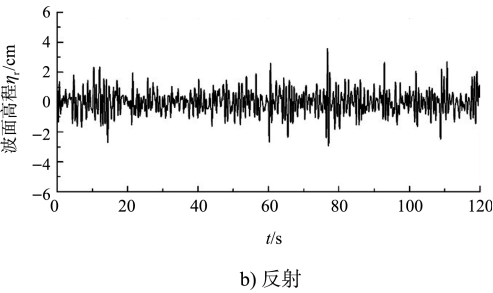


图 3 极端高水位 $H_s = 11\text{ cm}$ 工况分离后的
防波堤入射和反射的波面序列

3 防波堤反射和透射特征

通过上述分离方法针对所有工况堤前采集的波浪进行分离, 并采用上跨零点法对分离得到的时间序列进行统计分析, 计算得到入射波、反射波和透射波的有效波高, 然后计算该防波堤的反射系数 $K_r = H_{sr}/H_{si}$ 和透射系数 $K_t = H_{st}/H_{is}$ (其中 H_{sr} 、 H_{si} 、 H_{st} 分别为反射波高、入射波高、透射波高)。通过对比发现, 采用平均波高和均方根波高的结果与采用有效波高的结果基本一致, 因此本文采用有效波高的结果。

不同水位下防波堤的反射系数随波浪非线性的变化见图 4。可以看出, 无论高水位还是低水位, 随着波浪非线性的增大, 防波堤的反射呈现出减小的趋势, 波陡为 0.14 的情况下比波陡 0.05 情况的反射系数约小 15%, 这主要是波高大的波浪在斜坡堤的迎浪侧消耗了更多的能量造成的。同时随着水深增大, 反射系数减小, 但是随着波浪非线性的增强, 高水位与低水位的反射系数差有所减小, 从小波陡情况下两者之间差约 15%, 到大波陡情况下减小到仅为 7%。

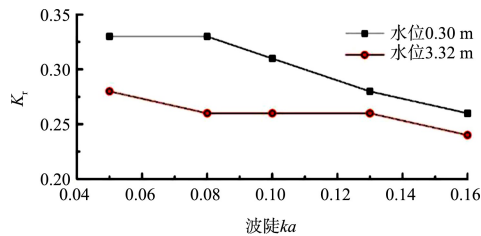


图 4 防波堤的反射系数随波陡的变化

有关斜坡堤透射系数, 许多学者基于理论和物理模型试验提出透射系数的计算公式。沼田淳和 Ahrens 都基于渗流理论, 通过物理模型试验得

出了透射系数公式。沼田淳的计算公式为:

$$K_r = \frac{1}{[1 + 1.135 (B_{swl}/D_s)^{0.66} (H/L)^{0.5}]^2} \tag{7}$$

$$D_s = 2 \times \sqrt[3]{\frac{3m}{4\rho_s}} \tag{8}$$

式中: B_{swl} 为堤身在静水面处的宽度; H 为入射波高; L 为入射波长; D_s 为等效直径; m 为堤心石质量; ρ_s 为堤心石密度。

Ahrens 的计算公式为:

$$K_t = \frac{1}{1 + \left(\frac{HA_t}{LD_s^2} \right)^{0.592}} \tag{9}$$

式中: A_t 为堤身在静水面以下的横截面面积。葛晓丹等通过参考其他资料的试验结果得出相关系数, 进而拟合出透射系数公式:

$$K_t = \frac{1}{1 + \left(100 \frac{H}{gT} \right)^{0.75} \left(\frac{B}{D_s} \right)^{0.77} (kd)^{-0.59}} \tag{10}$$

式中: T 为入射波周期; B 为堤身平均宽度; k 为波数; d 为水深。

不同水位下防波堤的透射系数随波浪非线性的变化见图 5。可以看出与反射系数类似, 随着波浪非线性的增强, 波浪的透射系数减小, 这说明大波高的波浪透过潜堤时消耗的能量越大。但是在高水位情况下, 随着波浪非线性的增强, 透射系数的减小没有低水位显著, 高水位的透射系数总体上要高于低水位情况。低水位情况下, 波陡为 0.14 的情况下比波陡 0.05 情况的透射系数约小 40%, 而高水位情况下透射系数减小仅为约 20%。总体而言, 针对透射系数, 在入射波浪非线性较强时候的透射系数较小, 高水位的时候为 23%, 在低水位的时候仅为 14%, 这说明该防波堤具有很好的防浪效果。

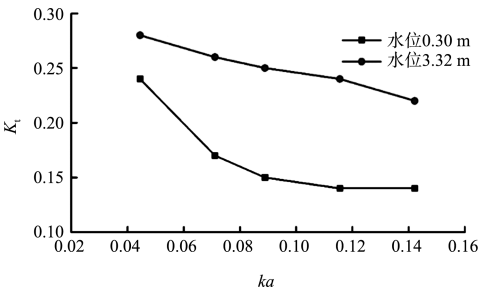
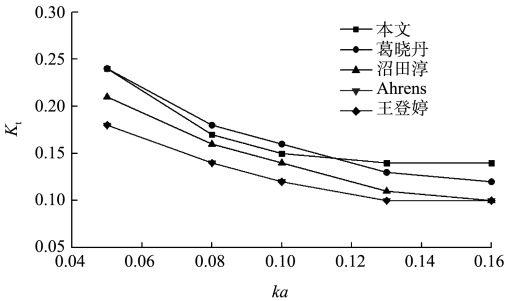


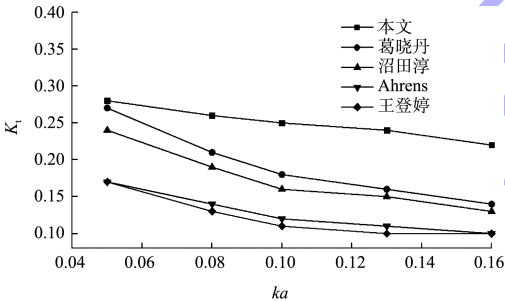
图 5 防波堤的透射系数随波陡的变化

本文的透射系数与其他学者提出的透射系数之间的对比见图 6。可以看出，无论高水位还是低水位，本文的透射系数变化规律与其他学者的基本一致，但是在低水位强非线性的情况下，本文结果均大于现有公式，而在高水位情况下，本文结果基本都显著大于现有透射系数计算公式结果。以上结果表明，波浪的非线性对波浪透射影响很大，并且水位高度对波浪透射影响也非常显著。



注：Ahrens与王登婷的结果重合。

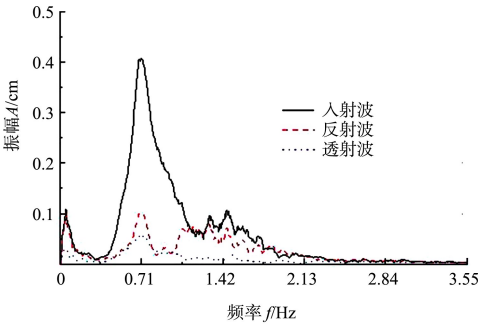
a) 设计低水位(0.30 m)



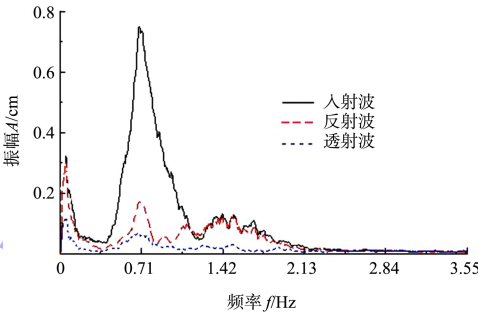
b) 极端高水位(3.32 m)

图 6 不同透射系数对比

两组工况不同水位情况下，入射波、反射波和透射波的频谱见图 7、8。可以看出，反射波虽然波频部分能量比入射波小很多，但低频部分和高频部分能量与入射波相当，其中波浪非线性越强，低频波浪能量越显著，从而导致透射波的低频部分和高频部分能量较小，这说明本防波堤可以较好地反射长波。由于长波较易引起港内系泊船的共振，因此本文所采用的防波堤不仅可以有效降低正常波频段海浪的能量，还有降低港内低频波的作用。

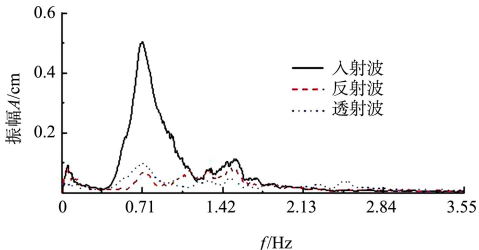


a) $H_s=8\text{ cm}$

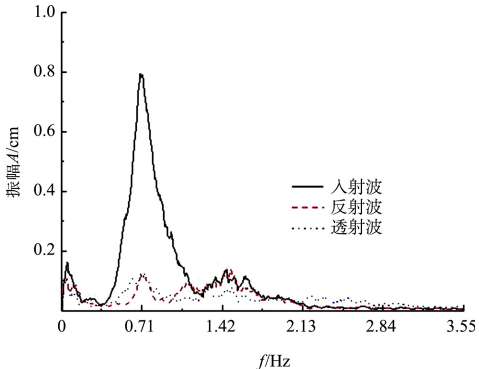


b) $H_s=12\text{ cm}$

图 7 低水位工况下防波堤的入射波、反射波和透射波频谱



a) $H_s=8\text{ cm}$



b) $H_s=12\text{ cm}$

图 8 高水位工况下防波堤的入射波、反射波和透射波频谱

4 结论

1) 防波堤的反射系数随着波浪非线性的增加而减小, 水位越大反射系数越小; 随着波浪非线性的增强, 波浪的透射系数减小, 水位越大透射系数越大。

2) 本文得到的透射系数与现有透射系数公式结果趋势一致, 但现有透射系数公式计算结果偏小。

3) 频谱分析结果表明, 反射波的低频波浪能量与入射波相当, 透射波的低频成分远小于入射波, 说明本防波堤具备降低港内低频波浪的作用。

参考文献:

[1] 习和忠, 潘建楠. 防波堤透浪特性的研究[J]. 水动力学研究与进展, 1988, 3(4): 53-62.

[2] 丁坤, 冯曦, 马钢峰, 等. 波浪非线性对斜坡堤透浪特性影响研究[J]. 水运工程, 2020(4): 1-8.

[3] 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.

[4] 向正林, 章鹏, 刘赞强, 等. 斜坡堤透浪特性研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(6): 157-158, 161.

[5] 孙天霆, 刘清君, 王登婷. 可渗潜堤波浪透射系数试验研究[J]. 水运工程, 2018, (4): 20-25, 42.

[6] 杨会利, 杨艳静, 戈龙仔, 等. 周期和波高对斜坡式防波堤透浪特性影响试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(1):

28-34.

[7] 葛晓丹. 斜坡式防波堤透浪特性的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

[8] 葛晓丹, 柳淑学, 李金宣. 斜坡堤透浪系数计算公式的对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(5): 100-101, 104.

[9] 王登婷, 左其华. 斜坡堤堤心石尺寸对波浪传播影响的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2008, 23(5): 532-537.

[10] 沼田淳. ブロック堤の消波効果に関する実験的研究[C] // 海岸工学委員会. 第 22 回海岸工学講演会论文集. 東京都: 海岸工学委員会, 1975: 501-505.

[11] AHRENS J P. Characteristics of reef breakwaters[R]. Washington: Coastal Engineering Research Center of US Army Corps of Engineers, 1987.

[12] 冯卫兵, 王明明, 崔川川. 潜堤透浪系数的试验研究[J]. 水运工程, 2012(9): 1-6.

[13] 夏艳军, 俞武华, 张昊宸, 等. 防波堤波浪透射系数现场观测及透射系数公式的验证[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 544-548.

[14] MA Y X, DONG G H, MA X Z, et al. A new method for separation of 2D incident and reflected waves by the Morlet wavelet transform[J]. Coastal engineering, 2010, 57(6): 597-603.

[15] 斯蒂芬森. 堆石工程水力计算[M]. 李开远, 周家苞, 译. 北京: 海洋出版社, 1984. (本文编辑 王璁)

(上接第 17 页)

[5] WILSON K C, ADDIE G R, SELLGREN A. Slurry transport using centrifugal pumps[M]. New York: Springer Science&Business Media, 2004.

[6] 费祥俊. 浆体管道的不淤流速研究[J]. 煤炭学报, 1997(5): 86-90.

[7] 费祥俊. 浆体的物理特性与管道输送流速[J]. 管道技术与设备, 2000(1): 1-4, 8.

[8] 喻国良, 韦兵, 李明. 往复流作用下的粗颗粒推移质的输沙规律[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 58-63.

[9] 李明, 俞梅欣, 喻国良. 往复流作用下推移质输沙强度的计算公式[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(2): 247-253.

[10] NIELSEN P. Coastal bottom boundary layers and sediment transport[M]. Singapore: World Scientific, 1992.

[11] 刘成林, 陈宇豪. 基于 Flow-3D 的水平射流冲刷泥沙数值模拟[J]. 人民长江, 2016, 47(6): 87-91.

[12] 王新民, 张德明, 张钦礼, 等. 基于 FLOW-3D 软件的深井膏体管道自流输送性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 2102-2108.

[13] 靖树一, 王亮, 杜辉, 魏岗. FLOW-3D 在流固耦合数值模拟中的应用[C] // 中国力学学会. 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集. 上海: 水动力学研究与进展杂志社, 2014: 6.

[14] 李鹏程, 韩文亮, 田龙. 高浓度管道输送参数计算模型的研究[J]. 金属矿山, 2005(4): 60-62, 66.

[15] 曹斌, 夏建新, 黑鹏飞, 等. 管道水力输送的粗颗粒运动状态变化及其临界条件[J]. 泥沙研究, 2012(4): 38-45.

(本文编辑 武亚庆)