

不同护面形式下复式海堤的波浪爬高试验研究*

曾灿升, 詹杰民, 胡文清

(中山大学 应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘要: 复式海堤作为重要的护岸基础设施, 能够保护海岸免受潮流和波浪侵蚀。通过物理模型试验, 研究不同块体护面复式海堤对波浪爬坡高度的影响, 发现: 1)三向孔块体护面下的爬坡高度最小, 单向孔块体护面下次之, 光滑护面下最大。2)对于同一块体护面, 随着入射波波高或周期的增大, 爬坡高度总体上逐渐增大。3)采用 *Wave Overtopping of Sea Defences Structures and Related Structure Assessment Manual* (简称 EurOtop) 规范中波浪爬高经验公式推算不同块体护面的糙渗系数, 评估不同块体护面消减波浪爬高的性能, 三向孔块体结构在实际海岸工程中具有较好的应用价值。

关键词: 复式海堤; 护面块体; 糙渗系数; 波浪爬坡

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0037-06

Experimental study on wave run-up of compound slope seawall with different protective facings

ZENG Can-sheng, ZHAN Jie-min, HU Wen-qing

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: As an important revetment infrastructure, compound seawalls can protect the coast against tide and wave attacks. Through the physical model test, the influence of the compound seawall with different block face protection on the wave climbing height is studied, and it is found that: 1) The run-up height is the smallest under the three-way hole block, moderate under the one-way hole block and max under the smooth block. 2) For the same protective facings, as the incident wave height or period increases, the run-up height generally increase. 3) Furthermore, the empirical formula of wave run-up in *Wave overtopping of sea defences structures and related structure assessment manual* (EurOtop) is used to calculate the roughness coefficient of different block protective facings, so as to evaluate the performance of different block protective facings in reducing wave run-up height, which indicating the three-way hole block structure has good application value in practical ocean engineering.

Keywords: compound seawall; protective facings block; roughness coefficient; wave run-up

海堤作为海岸工程中最重要的基础设施之一, 对于保证海岸带经济发展和人民生活安全具有非常重要的意义。常见的海堤按结构形式可以分为直立式、斜坡式、直立式与斜坡式相结合的混合式。其中, 斜坡式包括单坡、带平台的复坡式。

复坡式海堤由于具有稳定性好、消浪效果明显、维护容易等优势, 成为海堤中最受欢迎的结构形式^[1]。海堤的护面结构是保证海堤安全稳定、发挥消浪作用的关键因素。护面块体之间通过相互咬合、嵌固形成内部孔隙, 波浪在内部孔隙之间

收稿日期: 2022-02-17

*基金项目: 国家重点研发计划项目(6140206040301)

作者简介: 曾灿升(1992—), 男, 博士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

通讯作者: 詹杰民(1963—), 男, 博士, 教授, 从事海洋工程与流体力学领域研究。E-mail: stszjm@mail.sysu.edu.com

形成紊流，从而大大降低了波浪爬坡高度以及对海堤结构的冲击^[2-3]。

由于海堤结构的多样性，波浪与海堤结构相互作用的过程十分复杂，影响波浪爬高的因素有很多，主要包括入射波要素、入射波作用方向、堤前水深、海堤结构形式以及堤坡坡度等因素。大部分海堤结构与波浪相互作用研究基于工程实践以及实验室试验。国外方面，Saville^[4-5]进行了系统性试验，研究了近岸工程中的波浪爬坡和波陡、水深以及海堤结构形式的关系，并提出了波浪爬高的计算公式；van der Meer 等^[6]研究了块石护面海堤与不规则波的相互作用，发现波浪在块石护面海堤上的爬高明显小于光滑护面海堤上的爬高，并且爬坡高度随着破碎参数的增加而增加；其他学者也对不同构型的块体护面海堤与波浪的相互作用进行了研究^[7-10]。国内方面，陈国平等^[11]、陆瑞兴等^[12]研究了平台宽度和堤顶高程对不规则波波浪爬高的影响，发现静水位附近为复坡式海堤修建平台的最佳位置，并且平台的最佳宽度为入射波长的 1/4；常江等^[13]研究了复式斜坡护岸断面与不规则波相互作用，并讨论了最大爬坡距离及爬坡流厚度与护岸前沿平均越浪量的关系。

目前，国内外对波浪在复式海堤上的爬坡高度有不同的计算公式。不同的爬坡公式考虑的影响因素不同，适用的范围也有所不同。其中，美国 *Coastal Engineering Manual* (CEM)^[14] 以及欧洲 *Wave Overtopping of Sea Defences Structures and Related Structure Assessment Manual* (EurOtop)^[15] 为国际工程中较为常用的规范，而国内主要有《堤防工程设计规范》^[16] 等。刘宁等^[17]研究了国内外不同的海堤波浪爬高经验公式，得出了 CEM 和 EurOtop 公式考虑的波浪爬高影响因素更加全面、适用性更加广泛的结论。

本文提出的护面块体结构，包括单向孔块体结构和三向孔块体结构。通过对比光滑护面、单向孔块体护面、三向孔块体护面在不同入射波工况下不同监测点的实测水位以及爬坡高度，研究

了不同块体护面对波浪爬高的影响；进一步采用 EurOtop 规范中的波浪爬高经验公式，推算不同块体护面的糙渗系数，从而对不同块体护面消减波浪爬高的性能进行评估。

1 试验与理论方法

1.1 试验布置

试验在中山大学试验水槽(15 m×0.6 m×0.8 m)中进行，试验水深 $D=0.36$ m。水槽入口处安装自主开发的造波系统，在离造波板 $L_1=7.0$ m、 $L_2=5.0$ m、 $L_3=3.0$ m 的位置分别安装波高计 1~3，顶坡上安装有波高计 4。复坡式海堤由底坡、平台、顶坡和胸墙 4 部分组成，模型见图 1。结构物整体长 1.06 m、宽 0.6 m、高 0.5 m。其中底坡为光滑护面，坡度为 1:1(即 45°)，顶坡装有块体护面(单向孔或三向孔)，坡度为 1:2.414(即 22.5°)，平台装有宽度 $W_1=0.20$ m 的块体护面(单向孔或三向孔)，前缘为宽度 $W_2=0.08$ m 的光滑护面，块体护面与光滑护面的交界处距离造波板 7 m。平台离水面深度 $d_1=0.05$ m，块体护面厚度 $d_2=0.04$ m。单向孔和三向孔块体中，孔的尺寸为 0.012 5 m。单向孔和三向孔块体采用 3D 自主打印并进一步拼装，单向孔和三向孔块体模型见图 2。整个海堤模型采用支架固定在试验水槽中，试验整体布置见图 3。水池旁正对结构物的位置用三脚架安装摄像机。波高计采用 YWH201-DXX 数字化波高仪，并利用采集卡 SDA1000-SW-V02 对试验过程中的波高数据进行采集处理。试验所采用的入射波工况见表 1，实测值的误差在 5% 以内。

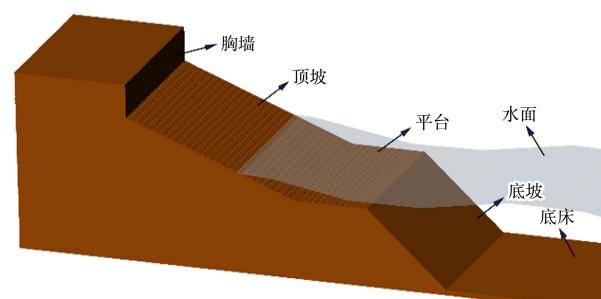


图 1 复式海堤模型

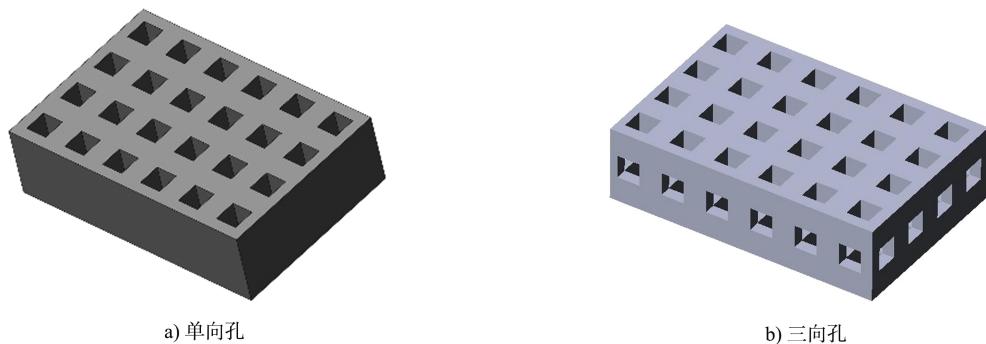


图 2 块体模型

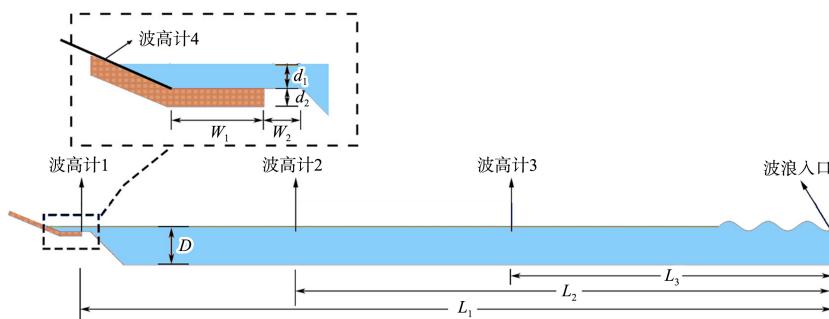


图 3 试验整体布置

表 1 试验采用入射波工况

周期/s	水深/m	波高/mm
0.90	0.36	45
1.00	0.36	23, 45, 69
1.10	0.36	45
1.43	0.36	45

1.2 波浪爬高

本文采用了 *Wave Overtopping of Sea Defences Structures and Related Structure Assessment Manual* (EurOtop) 规范中的波浪爬高经验公式。该规范针对不同形式的海堤提出了较为详细的计算公式，引入了波浪破碎影响因子，综合考虑了坡面糙率、肩台及波浪入射角度等影响因子，具有较强的实用性。

EurOtop 中波浪爬高峰值计算公式如下：

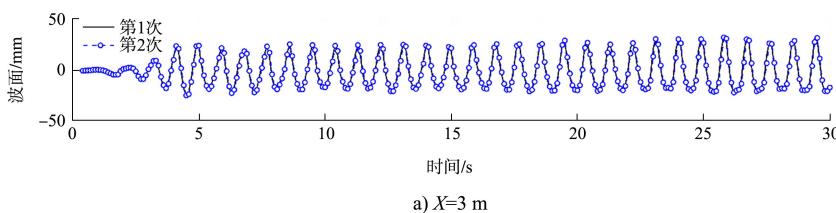
$$\frac{R_{umax}}{H_{m0}} = \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \left(4.3 - \frac{1.6}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \quad (1)$$

式中： R_{umax} 为波浪爬高的计算峰值； H_{m0} 为采用波浪频谱参数确定的有效波高； γ_b 为肩台影响因子； γ_f 为糙渗系数； γ_β 为波浪入射角度影响因子； $\xi_{m-1,0}$ 为破碎因子。本文研究的入射波为正向入射的规则波，因此这里 H_{m0} 取入射的规则波波高，角度影响因子 $\gamma_\beta = 1$ ，肩台影响因子 γ_b 及破碎因子 $\xi_{m-1,0}$ 的计算方法见 EurOtop 规范。

2 结果与讨论

2.1 重复性验证

试验过程中，在离造波板 $L_1 = 3.0$ m、 $L_2 = 5.0$ m、 $L_3 = 7.0$ m 的位置分别安装波高计 1~3，在模型的顶坡上布置波高计 4 以监测波浪爬坡高度，每个工况都进行了重复性验证。图 4、5 以单向孔块体护面在周期 $T = 0.90$ s、 $H = 45$ mm 的工况为例，比较不同试验组次下，波高计 1~3 的监测水位变化以及波高计 4 监测到的顶坡上波浪爬高。

a) $X=3$ m

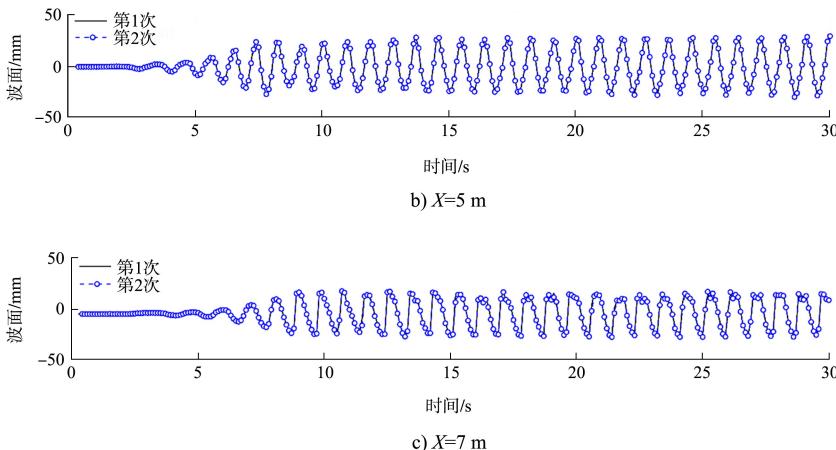


图 4 $T=0.90\text{ s}$ 、 $H=45\text{ mm}$ 工况下单向孔块体护面下不同位置处的监测水位

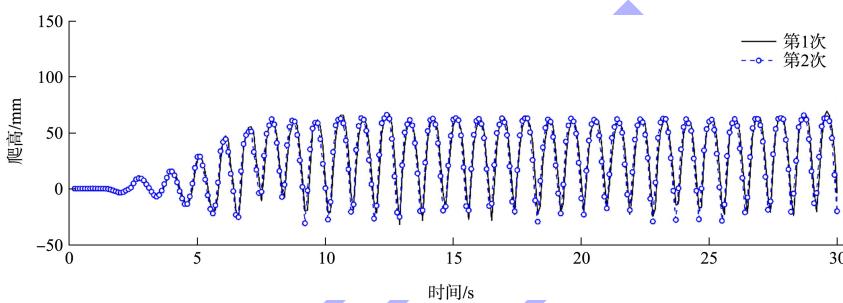


图 5 $T=0.90\text{ s}$ 、 $H=45\text{ mm}$ 工况下，单向孔块体护面下顶坡上的波浪爬高

由图 4、5 可以看出，单向孔块体护面在重复性试验下，不同位置处的监测水位以及顶坡上的波浪爬高基本完全重合，其他试验工况(包括不同块体护面及不同波况)下的比较结果同该工况下的比较结果一致，表明本文采用的试验水槽重复性较好，可进一步用于研究不同波浪要素下不同块

体护面对海堤上波浪爬高的影响。

2.2 波浪爬高

波浪爬高是确定海堤堤顶高程的重要参考标准，因此在海堤设计中具有重要意义。这里以周期 $T=0.90\text{ s}$ 、波高 $H=45\text{ mm}$ 下不同块体护面下的波浪爬高历时曲线为例，见图 6。

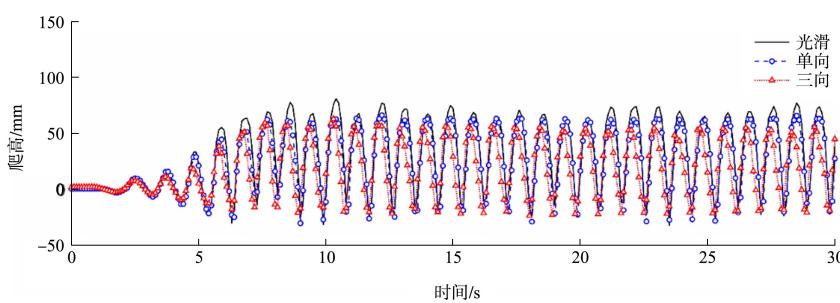


图 6 不同块体护面下的爬坡高度对比

从图 6 可知，块体的构型对波浪爬高存在较大影响。三向孔波浪爬高最小，单向孔次之，光滑护面的波浪爬高最大。这是由于波浪在三向孔海堤孔隙中发生最多的能量耗散，而单向孔结构物中能量耗散次之、光滑护面下能量耗散最少的

缘故。

统计不同周期、不同块体护面下的最大爬坡高度，并以折减系数 γ_h 表示单向孔或三向孔块体护面最大波浪爬高和光滑护面最大波浪爬高的比值。这里，由于试验中水槽长度有限，试验后期

存在造波板的二次反射, 因此只统计造波开始后前 20 s 的数据。最大爬坡高度以及折减系数随周期的变化规律见图 7、8。

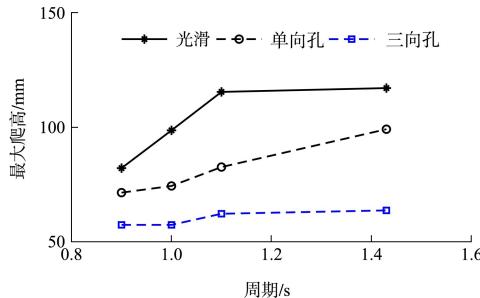


图 7 最大爬高随周期变化规律

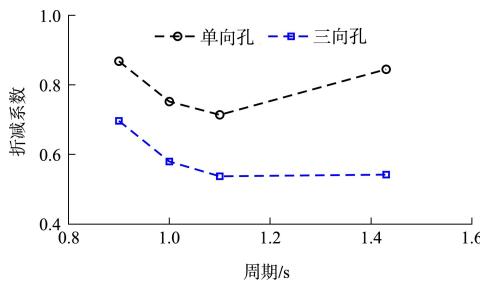


图 8 折减系数随周期变化规律

从图 7、8 可以看出, 随着波浪周期的增大, 同一块体护面下的波浪爬高基本逐渐增大。当周期小于 1.10 s 时, 随着波浪周期的增大单向孔护面和三向孔护面下的折减系数逐渐减小, 且在周期为 1.10 s 时取得最小值, 表明此时单向孔护面和三向孔护面相对光滑护面有最好的消减波浪爬坡的效果, 两者分别消减最大爬坡高度的 29% 和 47%。周期 1.43 s 下的折减系数大于周期 1.1 s 下的折减系数, 这可能与单向孔护面和三向孔护面的厚度有限不能耗散更多的波浪能量有关。

统计相同周期不同波高下不同块体护面的最大爬坡高度, 最大爬坡高度以及折减系数随波高变化的规律见图 9、10。

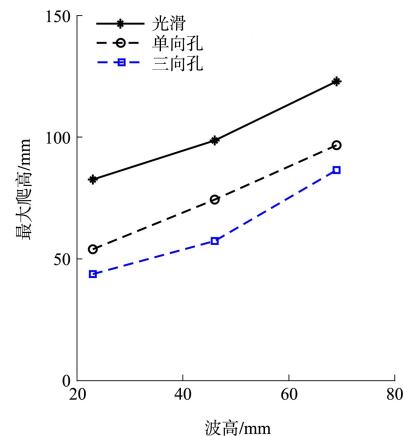


图 9 最大爬高随波高变化规律

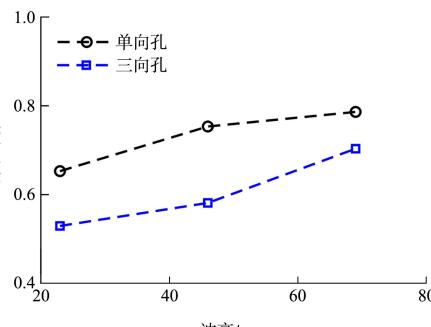


图 10 折减系数随波高变化规律

从图 9、10 可以看到, 随着波高的增大, 同一块体护面下的波浪爬高基本逐渐增大。波高 $H=23$ mm 的工况下, 单向孔护面和三向孔护面分别消减 35% 和 47% 的最大爬坡高度。随着波高的增大, 单向孔和三向孔护面的折减系数均有所增大, 这可能与护面的厚度有限不能耗散更多的波浪能量有关。

2.3 糙渗系数

采用 EurOtop 规范中波浪爬高经验公式来推算不同块体护面的糙渗系数, 各参数的计算结果见表 2。不同块体护面下的相对波浪爬高 R_{umax}/H_m 与公式拟合结果对比见图 11。

表 2 EurOtop 公式各参数计算结果

周期/s	波高/mm	波长/m	波陡 $S_{m-1,0}$	破碎因子 $\xi_{m-1,0}$	平台 γ_b	$\gamma_b \cdot \left(4.3 - \frac{1.6}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right)$	R_{umax}/H_m		
							三向	单向	光滑
0.90	45	1.207	0.037	2.321	0.733	2.383	1.274	1.588	1.825
1.00	23	1.433	0.016	3.269	0.986	3.366	1.902	2.346	3.592
1.00	46	1.433	0.032	2.514	0.723	2.380	1.247	1.617	2.145
1.00	69	1.433	0.048	2.224	0.615	1.984	1.254	1.402	1.782
1.10	45	1.658	0.027	2.643	0.689	2.286	1.244	1.652	2.309
1.43	44	2.367	0.019	3.271	0.744	2.540	1.447	2.253	2.662

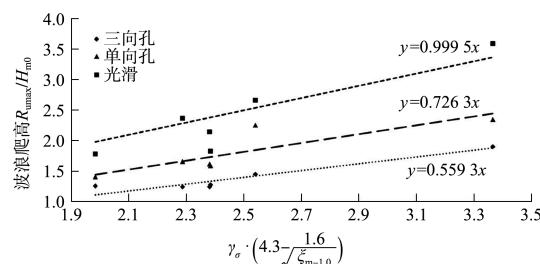


图 11 不同块体护面下, EurOtop 公式拟合波浪爬高

由图 11 可以看到, 不同块体护面下, 相对波浪爬高 R_{umax}/H_{m0} 与 $\gamma_b \cdot \left(4.3 - \frac{1.6}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}}\right)$ 成较强的线性关系。光滑、单向孔、三向孔模型相关系数分别

为 0.85、0.85、0.95, 对应各模型下的糙渗系数分别为 1.00、0.73、0.56。

通过 EurOtop 规范中爬高公式推算得出, 单向孔块体护面糙渗系数约为 0.73、三向孔块体护面的糙渗系数约为 0.56。结合表 3 海堤规范中不同护面类型的糙渗系数可知, 单向孔和三向孔块体护面的糙渗系数均小于砌石的糙渗系数, 且三向孔块体的糙渗系数小于不透水堤心抛填两层块石的糙渗系数, 与透水堤心抛填两层块石的糙渗系数相当。因此, 本文研究的单向孔和三向孔块体对于波浪爬高具有很好的消减作用, 这在实际工程中具有较好的应用价值。

表 3 不同护面类型的糙渗系数

护面类型	光滑不透水护面(沥青混凝土、混凝土)	混凝土板	草皮	砌石	抛填 2 层块石(不透水堤心)	抛填 2 层块石(透水堤心)
糙渗系数	1.00	0.95	0.90	0.80	0.60~0.65	0.50~0.55

3 结论

1) 对于相同的入射波工况, 三向孔块体护面的波浪爬坡高度最小、单向孔块体护面次之、光滑护面下的波浪爬坡高度最大, 单向孔块体最大消减 35% 的波浪爬坡高度、三向孔块体最大消减 47% 的波浪爬坡高度。

2) 对于同一块体护面, 随着入射波波高或周期的增大, 波浪爬高总体上逐渐增大, 单向孔和三向孔块体护面的折减系数均有所增大, 这表明随着入射波能量的增大, 单向孔和三向孔块体护面的消波效果有所减弱。

3) 通过 EurOtop 规范爬坡公式推算, 单向孔块体的糙渗系数约为 0.73、三向孔块体的糙渗系数约为 0.56, 表明本文研究的护面块体结构, 尤其是三向孔块体结构对于实际海岸工程中消减波浪爬高具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] BESLEY P. Wave overtopping of seawalls, design and assessment manual, R&D Technical Report W178 [R]. Bristol: Environment Agency, 1999.
- [2] 陈国平, 周益人, 硈烈红. 海堤护面型式对波浪爬高和越浪的影响[J]. 水运工程, 2005(10): 28-30.
- [3] SUN T T, WANG D T, LIU Q J, et al. Wave run-up influenced by the protective facings of the sloping breakwater [M] // Hydraulic Engineering V. Boca Raton: CRC Press, 2017: 255-261.
- [4] SAVILLE T J. Laboratory data on wave run-up and overtopping on shore structures[M]. Washington D C: US Beach Erosion Board, 1955.
- [5] SAVILLE T. Wave run-up on composite slopes[J]. Coastal engineering proceedings, 1957(6): 41-41.
- [6] VAN DER MEER J W, STAM C J M. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1992, 118(5): 534-550.
- [7] MELITO I, MELBY J A. Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC [J]. Coastal engineering, 2002, 45(1): 33-52.
- [8] KIM Y T, LEE J I. Wave transmission coefficient for rubble mound structures with superstructures[J]. Journal of coastal research, 2018, 85(S1): 1081-1085.
- [9] SHIN S, BAE I, LEE J I. Three-dimensional variation of wave transmission around the artificial reefs: an experimental study[J]. Journal of coastal research, 2018, 85(S1): 1011-1015.
- [10] SHIN S, BAE I R, LEE J I. Physical modelling of the wave transmission over a tetrapod armored artificial reef[J]. Journal of coastal research, 2019, 91(S1): 126-130.