

· 港口 ·



# 不规则波作用下的混凝土铰链排 稳定厚度的试验研究\*

邵宇阳<sup>1</sup>, 张健玮<sup>1</sup>, 吕博<sup>2</sup>, 王飞朋<sup>3</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省滨海水利局, 江苏 滨海 224500;  
3. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江 宁波 315040)

**摘要:** 基于某海堤防护工程, 将柔性混凝土铰链排技术结合到原刚性的护坡中, 利用室内波浪水槽开展了一系列试验, 确定适合滨海海域波浪作用下的铰链排的最小稳定厚度。试验结果表明: 在不规则波作用下排体所需最小稳定厚度要明显大于规则波作用所需厚度, 波高和波周期均是显著影响混凝土铰链排的稳定厚度的关键要素。根据试验结果, 比较前人研究公式, 拟合出新的不规则波作用下的混凝土铰链排最小稳定厚度的经验公式。

**关键词:** 混凝土铰链排; 稳定厚度; 不规则波浪; 物理模型试验

中图分类号: TV 92; U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0039-06

## Experiment study on stable thickness of hinged fascine mattress under the action of the irregular wave

SHAO Yu-yang<sup>1</sup>, ZHANG Jian-wei<sup>1</sup>, LYU Bo<sup>2</sup>, WANG Fei-peng<sup>3</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Resources Bureau of Binhai, Binhai 224500, China;

3. Ningbo China Communication Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315040, China)

**Abstract:** Based on the seawall protection engineering, modified the original rigid structure with the hinged fascine mattress technique, a series of tests were applied at the indoor wave flume to determine the minimum stable thickness of hinged fascine mattress. The results show that the minimum stable thickness of hinged fascine mattress under regular wave is much less than that under irregular wave although both the regular and the irregular wave have similar wave parameters. The wave period is as important as the wave height when determining the stable thickness. The new fitting formula about the minimum stable thickness of hinged fascine mattress was obtained based on the test results and previous formulas.

**Keywords:** hinged fascine mattress; stable thickness; irregular wave; physical modeling experiment

在侵蚀性海岸的防护中, 传统的抛石以及刚性结构护坡在工程中得到了广泛的应用, 在护岸保滩中起到了较好的效果, 但在地基整体性差、地基发生变形情况下易发生水毁破坏, 进而丧失

对岸滩的保护作用, 同时石料的开采也会对环境产生一定的不利影响。作为一种新型结构形式, 近年来国内外都对混凝土铰链排进行了研究, 其中文献[1]对混凝土铰链排的工艺流程、结构形

收稿日期: 2016-06-06

\*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51339005); 江苏省水利厅科技项目(2013-55)

作者简介: 邵宇阳(1980—), 男, 讲师, 从事河口海岸水动力学研究。

式、水下受力状态等进行了详细介绍。我国的陈学良等<sup>[2]</sup>、徐锡荣等<sup>[3]</sup>、范期锦等<sup>[4]</sup>通过研究混凝土铰链排在长江口深水航道工程中的应用,探讨了混凝土铰链排在内河及河口地区的保滩护底工程中地对地基稳定、减速促淤等方面的作用,得出该结构形式具有整体性好、抗冲及适应岸坡变形能力强等特点。为了更进一步地探究混凝土铰链排在水中的受力状况,文献[5]对混凝土铰链在较高波能情况下的稳定性及对地基的保护状况进行了研究,得出混凝土铰链排在较高波能情况下能有效保护人工建筑,并可以运用于易受侵蚀的岸滩。基于长江口深水航道的数据,张玮等<sup>[6]</sup>在研究中比较了几种常见混凝土铰链排厚度公式的计算结果,并分析这几种公式的失稳形式。从上述研究中发现,混凝土铰链排虽已广泛应用于河口、海岸的护岸工程,但目前缺少统一的公式用于确定波浪作用下的混凝土铰链排厚度。

对于混凝土铰链排技术而言,最重要的工作是确保铰链排的压载稳定,它是关系到整个工程安全性及经济性的重要问题。20世纪初,荷兰就在三角洲整治与谢尔德闸工程中广泛采用混凝土铰链排防护技术,并取得了较好的效果<sup>[7]</sup>。20世纪80年代中期,由于海堤护坡技术的快速发展,国内有不少专家学者也对混凝土铰链排稳定厚度的影响因素及失稳机理开展试验,且多为室内试验,如水利部有关规范中的推荐公式<sup>[8]</sup>认为排体稳定厚度与稳定系数 $S_N$ 有关,吴苏舒等<sup>[9]</sup>开展了规则波作用下的混凝土铰链排稳定厚度的研究,周海等<sup>[10]</sup>研究分析了混凝土铰链排不同部位在不同水深、流速等条件下的失稳形式。对于波浪及水流共同作用的情况,前人也做过了不少研究,如田鹏等<sup>[11]</sup>开展的规则波和水流共同作用下对混凝土铰链排压载稳定性影响的研究。但在现阶段,已有研究成果多集中在以水流或规则波作用为主的情况,对混凝土铰链排在不规则波作用下的稳定性研究较少。而在我国的侵蚀性海岸地区,主要动力是波浪并且实际海浪多为不规则波,混凝土铰链排在

不规则波浪作用下的稳定研究目前尚不成熟。

本文以受波浪严重侵蚀的江苏滨海县海岸为研究对象,结合实际工程的典型断面,将柔性的铰链排技术运用到原刚性的护坡中,开展室内波浪断面试验研究。本文重点对不规则波作用下铰链排稳定厚度开展研究,为相关海域开展实际工程提供研究基础。

## 1 波浪水槽试验

### 1.1 试验条件

试验在河海大学海工实验室(水利部河口海岸工程重点实验室)的波浪水槽内进行,该水槽长80.0 m、宽1.0 m、高1.2 m。波浪水槽的前端安装有液压式推板造波机,由计算机自动控制产生试验所需的波浪要素,水槽末端配有消浪缓坡,同时在水槽中的试验段设置隔板用于消除二次反射。

试验采用正态模型,按照Froude相似准则,结合设计水位、波浪要素、试验断面及设备性能等因素确定本文试验的模型长度比尺为1:20。

试验中采用滨海县振东闸以南段三期工程达标海堤防护工程断面及翻身河以北段达标海堤防护工程断面作为原型,以废黄河基面为零点,两个试验断面的底高程分别为-2.70 m和-0.70 m,断面布置见图1。在高程0.0 m及3.0 m处的混凝土梗下,分别采用柔性的混凝土铰链排作为部分护面代替原刚性的槽型块。结合滨海海域潮位相关资料<sup>[12]</sup>,振东闸以南段三期工程海堤护岸工程断面设置-0.70、0.30、1.30、2.30、3.30、3.62 m共6级水位进行试验;翻身河以北段海堤护岸工程断面设置1.30、2.30、3.30、3.62 m共4级水位进行试验。本试验中两个断面均采用坡度比为1:4的形式。结合本次试验的波要素数据,文献[13]的研究表明此时的最大波压力较大,属于排体受力较为危险的情况,排体最小稳定厚度也是偏安全的,所以本文选择了1:4的坡度比开展试验。

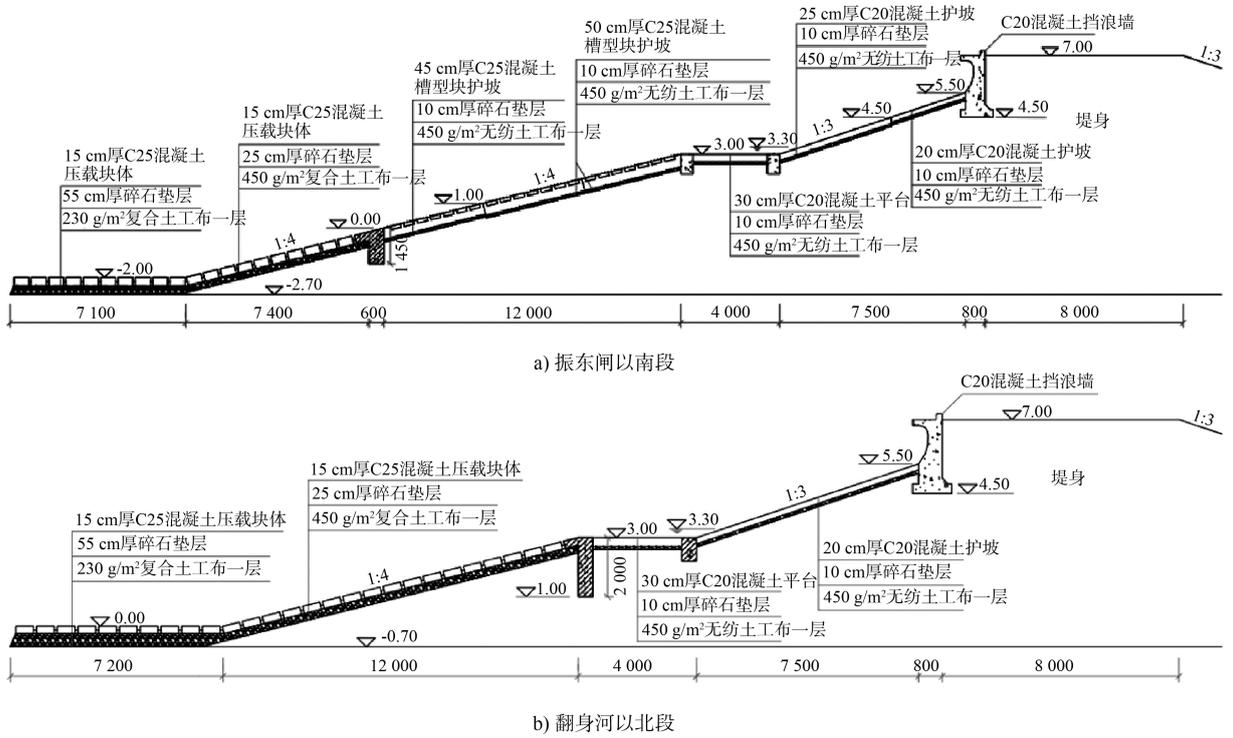


图 1 混凝土铰链排组成下海堤断面形式 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 试验方案

由于波高和波周期均是海岸及近海工程中重要的设计参数, 两者都会直接影响到工程安全。实际海浪具有随机性, 波高和波周期并不是固定不变的, 并且两者之间的组合方式也具有随机性, 即可能出现大波高与大波周期组合、大波高与小波周期组合、小波高与大波周期组合以及小波高与小波周期组合的情况, 这些不同组合的波况会对沿海工程结构产生不同的作用效果。根据河海大学 1998 年编制的《盐城市六合庄保滩工程方案技术咨询报告》, 以其中确定的平均周期

$T_0 = 7.98\text{ s}$  为基础, 在此周期基础上将其各扩大和缩小 1.2 倍, 分别得到短周期  $T_D = 6.65\text{ s}$  和长周期  $T_C = 9.58\text{ s}$ 。在每组水深、波高情况下分别采用这 3 个不同波周期开展试验, 表 1 为海堤断面试验波要素。根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》的规定, 试验中不规则波浪谱峰周期  $T_p = 1.21T_0$ 。

由于滨海海岸段缺乏长期波浪实测资料, 无法直接对波浪进行统计分析来确定该海域的波浪要素, 因此本文规则波采用正弦波进行模拟, 不规则波波谱选取常用的 JONSWAP 谱作为目标谱进行模拟<sup>[14]</sup>。

表 1 不同海堤断面试验波要素

工程断面	潮位/m	堤前水深/m	波浪形态及波高				波浪周期		
			规则波		不规则波		短周期	原周期	长周期
			$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	$H_s/\text{m}$	$T_D/\text{s}$	$T_0/\text{s}$	$T_C/\text{s}$
振东闸以南段 三期工程达标段	3.62	6.32	3.70	3.50	3.10	3.10	6.65	7.98	9.58
	3.30	6.00	3.60	3.40	3.00	3.00	6.65	7.98	9.58
	2.30	5.00	3.00	2.80	2.40	2.40	6.65	7.98	9.58
	1.30	4.00	2.40	2.20	1.80	1.80	6.65	7.98	9.58
	0.30	3.00	1.80	1.60	1.40	1.40	6.65	7.98	9.58
	-0.70	2.00	1.20	1.00	0.80	0.80	6.65	7.98	9.58
翻身河以北 达标段	3.62	4.32	2.60	2.40	2.10	2.10	6.65	7.98	9.58
	3.30	4.00	2.40	2.20	1.80	1.80	6.65	7.98	9.58
	2.30	3.00	1.80	1.60	1.40	1.40	6.65	7.98	9.58
	1.30	2.00	1.20	1.00	0.80	0.80	6.65	7.98	9.58

根据现有实际工程常采用的尺寸，试验中混凝土铰链排中压载块体的长、宽分别拟定为 0.8 m 和 0.6 m，块体间距为 0.1 m。根据不同的水位和波浪要素组合方案，混凝土铰链排压载块体厚度均从 0.15 m 开始试验，当排体在试验过程中排尾 2~4 排压载块体在波浪作用下被掀起，回落之后排尾压载块体无法与原铺设位置一致，发生变形，即判定为失稳。失稳后在原厚度基础上每次增加厚度 0.05 m 开展新的试验，至最终完全稳定后中止试验。

## 2 试验结果分析

通过一系列的试验，分别获得了在规则波和不规则波浪作用下，不同波高和不同波周期组合下混凝土铰链排稳定所需要的最小厚度（表 2、3）。由于铰链排铺设高程不同，本文的规则波的稳定厚度比吴苏舒等<sup>[9]</sup>的试验结果略大，不过两者结果比较接近。但对比表 2、3 的结果发现，在相似波高和波周期下，不规则波作用下排体最小稳定厚度要明显大于规则波作用下排体最小稳定厚度，由于实际海域波浪均为不规则波，这表明在以波浪作用为主的实际工程中确定铰链排最小稳定厚度必须要重点考虑不规则波的作用。

表 3 不规则波作用下排体最小稳定厚度的试验结果

工程断面	有效波高 $H_s/m$	谱峰周期/s	排体稳定厚度/m
振东闸以南段三期工程达标标段	0.8	8.05	0.15
		9.66	0.25
		11.59	0.25
	1.4	8.05	0.20
		9.66	0.25
		11.59	0.25
	1.8	8.05	0.35
		9.66	0.35
		11.59	0.45
	2.4	8.05	0.35
		9.66	0.35
		11.59	0.50
	3.0	8.05	0.40
		9.66	0.50
		11.59	0.55
3.1	8.05	0.40	
	9.66	0.50	
	11.59	0.55	
翻身河以北达标标段	0.8	8.05	0.15
		9.66	0.20
		11.59	0.25
	1.4	8.05	0.20
		9.66	0.25
		11.59	0.25
	1.8	8.05	0.35
		9.66	0.40
		11.59	0.50
2.1	8.05	0.35	
	9.66	0.45	
	11.59	0.50	

表 2 规则波作用下排体最小稳定厚度的试验结果

波高 $H_{1\%}/m$	平均周期/s	排体稳定厚度/m	文献[9]结果/m
1.2	6.65	0.10	
	7.98	0.10	
	9.58	0.10	
1.8	6.65	0.10	
	7.98	0.10	
	9.58	0.15	
2.4	6.65	0.10	
	7.98	0.15	0.11
	9.58	0.20	
3.0	6.65	0.15	
	7.98	0.20	0.15
	9.58	0.25	
3.6	6.65	0.15	
	7.98	0.20	0.20
	9.58	0.25	
3.7	6.65	0.15	
	7.98	0.20	
	9.58	0.25	

表 2 中，在规则波作用下，排体的稳定厚度不仅与波高有关，还与波周期有关，即排体的稳定厚度随周期及波高的增大而增大。

将表 3 中两个不同海堤断面的试验结果进行比较：在堤前水深较小、波高较小的条件下，不同断面中铰链排排体的稳定厚度结果相差很小，表明在该波要素范围内，堤前水深和排体起始铺设位置对排体最小稳定厚度影响较小。对于波高为 1.8 m 的情况，此时翻身河以北段排体处于半淹没状态，而振东闸以南段排体处于淹没状态，前者的排首处于破波带附近，相较于后者更易失稳，通过试验结果的观察，前者的最小稳定厚度大于后者，但差别较小。

将试验结果中得到的不规则波作用下铰链排最小稳定厚度与波高和波周期建立关系 (图 2), 图 2 中  $\delta_m$  为铰链排最小稳定厚度 (m);  $g$  为重力加速度;  $R^2$  是趋势线拟合程度的指标, 它的数值大小可以反映趋势线的估计值与对应的实际数据之间的拟合程度, 拟合程度越高则趋势线的可靠性越高。由图 2 可知, 随着波高的不断增加, 铰链排排体稳定厚度也随之增大, 这与以往规则波的研究结论是一致的, 但是在相同的有效波高下, 随着波浪周期的增大, 排体稳定所需厚度也随之增大, 相同波高下长周期所需稳定厚度比短周期所需稳定厚度大。这些结果表明在实际工程海域中波周期与波高都是决定铰链排稳定的关键要素。在工程运用时, 有时为了保证绝大多数情况下的安全性, 可以根据图 2 结果采用包络线法获取偏安全的公式。

### 3 拟合公式与前人公式的比较

对于以波浪为主要动力因素的情况, 目前确定铰链排稳定厚度的公式主要有水利部规范推荐的压载重法公式<sup>[8]</sup>, 根据荷兰三角洲整治过程中的相关试验与理论研究得出的荷兰公式<sup>[7]</sup>以及吴苏舒等提出的规则波作用下的简化公式<sup>[9]</sup>, 表 4 给出了上述 3 个公式的详细表达式, 公式中  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水和混凝土的密度, 其中  $\rho_w$  取  $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ,  $\rho_a$  取  $2\ 400\ \text{kg/m}^3$ , 且公式中均有一个待确定的系数。从形式来看, 水利部规范推荐公式与荷兰公式基本上是一致的, 只是这个待确定系数的物理意义解释以及取值范围有所不同。将表 3 中所得到的排体稳定厚度数据代入压载重法和荷兰公式当中, 推算出这个待确定系数的取值范围为  $2.29 \sim 6.00$ , 结果并不符合水利部推荐压载重法公式系数的取值范围 ( $< 5.7$ ), 且系数的变化区间过大, 在实际工程难以直接运用。同时取值范围超过了荷兰公式中波浪破碎参数取  $4.0 \sim 6.0$  的范围。规则波作用下的简化公式在形式上与前两个式子形式上有所不同, 将表 3 中得到的排体稳定厚度数据代入公式中, 得到修正系数的取值范围为  $-0.47 \sim 0.44$ , 与推荐取值  $0.78$  相差很大。

表 4 得不规则波经验公式是图 2 中采用上包络线的公式 (图 2 最外侧两条线), 并转换成  $\rho_w$  和  $\rho_a$  形式表达的经验公式, 可以得到在工程上较为偏安全的结果。从图 2 中也可看出, 与前人仅考虑波高的稳定公式相比, 本文提出的公式与试验结果有较高的相关性 ( $R^2 = 0.824$ )。

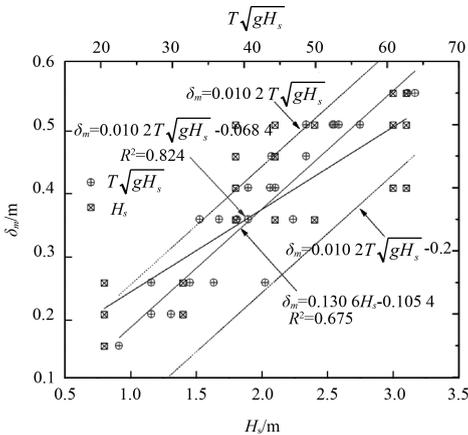


图 2 混凝土铰链排稳定厚度与不规则波波高和波周期关系

表 4 波浪作用下的铰链排排体稳定厚度经验公式

公式名称	公式表达式	公式中系数说明	参考文献
水利部规范推荐公式	$\delta_m = \frac{\rho_w H}{(\rho_a - \rho_w) S_N}$	$S_N$ 为稳定系数, $< 5.7$	[8]
荷兰公式	$\delta_m = \frac{\rho_w H}{(\rho_a - \rho_w) f(\zeta_{op})}$	$f(\zeta_{op})$ 为波浪破碎参数的函数, 取 $4.0 \sim 6.0$	[7]
规则波作用下的简化公式	$\delta_m = 0.298(1 - \lambda) \frac{\rho_w H}{(\rho_a - \rho_w)}$	$\lambda$ 为修正参数, 取 $0.78$	[9]
本文不规则波经验公式	$\delta_m = 0.014 3 \frac{\rho_w T \sqrt{g H}}{(\rho_a - \rho_w)}$	无系数	

对比本文的试验结果与前人公式的参数取值范围,结果表明,在以不规则波作用为主的滨海县海岸防护中,前人公式中系数的取值不确定性较大,并且未能体现波周期这一重要参数的影响,本文拟合出的不规则波经验公式是结合实际工程中典型断面形态并利用实际波要素通过开展系统的室内试验获得,且不再需要对系数进行确定,有利于实际工程的开展。

#### 4 结语

1) 本文以滨海县振东闸以南段三期工程达标海堤防护工程及翻身河以北段达标海堤防护工程断面为典型,利用波浪水槽物理试验开展了当地不同潮位、不同波要素组合下的混凝土铰链排排体最小稳定厚度研究,得出了考虑不规则波影响以及波周期变化的铰链排稳定厚度经验公式,研究成果可以为在该海域进行混凝土铰链排海堤防护工程的建设提供参考。

2) 通过规则波和不规则波的试验结果对比表明,波高和波周期均为决定铰链排稳定厚度的关键要素。同时在相同波要素情况下,不规则波作用下铰链排排体所需稳定厚度要显著大于规则波作用下的情况,由于实际海域波浪多为不规则波,这表明在今后开展相关研究中必须要优先考虑不规则波作用下的情况。

3) 实际沿海地区波况复杂多变,本文主要针对滨海县海域的波浪特征开展研究,其研究成果尤其是拟合出的确定铰链排稳定厚度的不规则波经验公式是否适用于其他侵蚀性海域还有待开展进一步研究。本文主要针对的是滨海海域的防护工程开展研究,在其他海域不同坡度下铰链排稳定厚度会有所不同,两者的相互关系还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] National Concrete Masonry Association. Design manual for articulating concrete block (ACB) revetment systems [M]. Virginia: NCMA Publications, 2010.
- [2] 陈学良,张景明.土工织物在长江口深水航道治理工程中的应用[J].水运工程,2000(12):48-52.
- [3] 徐锡荣,唐洪武,宗竞,等.长江南京河段护岸新技术探讨[J].水利水电科技进展,2004,24(4):26-29.
- [4] 范期锦.长江口深水航道治理工程的创新[J].中国工程科学,2004,6(12):13-26.
- [5] LEIDERSDORF C B, MCDUGAL W G. Articulated concrete mat slope protection [C]//Twenty First Coastal Engineering Conference, 1998: 2 400-2 415.
- [6] 张玮,吴苏舒,蒲高军.淹没海滩护底混凝土联锁排稳定厚度公式研究[J].海洋工程,2007,25(4):54-59.
- [7] PILARCZYK K. Dikes and revetments design maintenance and safety assessment [M]. Rotterdam: A A Balkema, 1998: 413-416.
- [8] 天津港湾工程研究所.水运工程土工合成材料应用技术规范:JTJ 239—2005[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [9] 吴苏舒,张玮,李国臣.波浪作用下混凝土联锁排稳定厚度研究[J].中国港湾建设,2006(6):5-8.
- [10] 周海,马兴华,田鹏,等.水流作用下混凝土联锁块软体排压载失稳机理和计算方法[J].中国港湾建设,2014(9):11-16.
- [11] 田鹏,马兴华,周海,等.波浪作用下混凝土联锁块软体排压载失稳机理和计算方法[J].中国港湾建设,2014(10):31-35.
- [12] 陆培东,王艳红.盐城市滨海港区10万吨级航道工程潮流泥沙物理模型试验及挡沙堤局部冲刷分析[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
- [13] 钟瑚穗.斜坡坡度对波浪最大压力的影响[J].华东水利学院学报,1984(1):142-154.
- [14] HUANG X F, PAND M. Research of paddle wave-maker control system based on Jonswap spectrum [J]. Advanced materials research, 2014: 679-684.

(本文编辑 武亚庆)