



# 一种新型透空式潜堤消浪促淤特性试验研究

冯卫兵, 厉佳卉, 曹海锦, 张 俞  
(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 通过物理模型试验的方法, 采用规则波和不规则波对新型空心立方体潜堤进行一系列消浪特性研究。同时, 对2种不同空心率的空心立方体潜堤和实心堤透浪系数进行试验对比。对实验数据的统计分析结果表明: 当选取合适空心率时, 空心立方体堤的消浪效果与实心堤的消浪效果基本相同, 并能达到一定的促淤效果, 说明选取空心立方体作为潜堤堤身结构材料的方法是合理且有效的。

**关键词:** 潜堤; 空心方块; 透浪系数

**中图分类号:** TV 149.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2014)01-0025-06

## Experimental study on wave transmission and silt deposition performance of a new-type submerged breakwater

FENG Wei-bing, LI Jia-hui, CAO Hai-jin, ZHANG Yu

(College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** A series of experimental investigations are carried out to study the regular wave and irregular wave acting on the wave transmission and silt deposition of a new-type hollow-block breakwater. At the same time, by comparing wave transmission coefficient of two kinds of hollow-block breakwater which have different hollow rates and solid breakwaters, we can get statistical analysis results of the experiment data. It shows that when choosing the appropriate hollow rate, hollow-block breakwater can also reach the almost same wave transmission coefficient of solid breakwater, and can achieve a certain effect on promoting the deposition, which means that the method of selecting hollow block as the structure of submerged breakwater is reasonable and effective.

**Key words:** submerged breakwater; hollow block; wave transmission coefficient

潜堤是指堤顶位于静止水面下的防波堤。作为一种常用的护岸工程建筑物, 它主要应用于护岸、防浪导流以及保滩促淤等海岸工程中。潜堤的结构形式较多, 有斜坡形、矩形、梯形、薄壁形等。不论是何种形式, 目前的工程中大多是采用实心堤身结构的。随着港口的发展扩大, 深水泊位的需求越发增大, 若依然采用传统的抛石等实心防波堤, 则造价颇高。倘若透空式潜堤<sup>[1-3]</sup>同样能满足越浪要求, 并保证堤后水域的平稳, 相对于实心潜堤而言, 不仅可以节省大量原材料, 还可以使得海水交换, 保证海域水质质量。

潜堤的消浪效果是人们长期以来比较关注的问题。早于1981年, 杨正已<sup>[4]</sup>就通过物理试验模型的方法得出潜堤堤后相对波高的计算公式。而后, Van der Meer<sup>[5]</sup>利用前人研究及模型试验对比分析, 提出简单经验公式, 认为透射系数为堤顶淹没水深与入射波有效波高的比值的函数, 未考虑堤顶宽度因子的影响。杨正已公式是在规则波情况下得到的, 这与实际海浪情况有所差异。邹红霞等<sup>[6-7]</sup>同样利用物理模型试验的方法得出潜堤在不规则波作用下透射系数的经验公式, 并考虑了相对堤顶宽度对潜堤透射系数的影响, 得到较

**收稿日期:** 2013-04-17

**作者简介:** 冯卫兵(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋、海岸工程研究。

好的验证结果。潜堤消浪系数的影响因素诸多，主要有波陡 ( $H/L$ )、相对水深 ( $d/H$ )、相对堤顶宽度 ( $B/H$ ) 以及相对浸水深度 ( $a/H$ ) 等。对于透水防波堤，波浪传递到堤后的由越浪和透射两部分组成，这时就需要考虑波流相互作用，目前只有数值模拟<sup>[8]</sup>才能考虑，在试验的条件下很难得到波流共同作用下的波浪在潜堤上的传递系数。

本文以上海某防波堤工程资料为外海波浪要素的参考。由于上海地区块石和砂土材料供应来源很少，大规模远距离采石和取砂成本越来越高，而工程区域地基属软土地基，堤坝建成后极易产生较大沉降及不均匀沉降。因此，寻求人工替代材料和在软基上的建筑物应从最大限度地减轻自重和促淤堤堤身透水有利于库区淤积等方面出发。本文选择了改进的预制空心立方体作为研究对象，考虑在风暴高潮及台风浪作用下，对采用空心立方体作为防波堤堤身材料的潜堤进行了试验，对不同空隙率情况下防波堤的消浪效果进行了对比分析，并进一步与实心结构的潜堤的消浪特性比较，提出该新型透空式潜堤的优缺点及可用来代替常规土石堤的可行性。此外，本文还探讨了不同水位下堤后流速的变化，并与泥沙起动流速相比较，进一步确定其促淤效果及实用性。

### 1 模型试验

#### 1.1 试验设备及仪器

试验于河海大学水利部港口航道重点实验室

的波浪水槽内进行。水槽长80 m，宽1.0 m，高1.2 m。有效试验宽度为0.5 m。有效试验段用以铺设断面，另外部分用以减少二次反射。波浪水槽一端安装有南京水利科学研究院研制的不规则波造波机，通过电机系统控制推波机运动行程和频率，可产生试验所需要的规则波和不规则波。水槽尾端设有消能装置，用以吸收波浪能量来消减波浪反射。

波浪要素的测量采用中国水利水电科学研究院生产的 DJ800 型多功能监系统，它是由监测仪和各种传感器组成的数据采集和数据处理系统。数据采集是巡回式的，取得一个测点的数据大约需要 400  $\mu$ s 的时间 (包括选中通道号、模数转换和数据传送等时间)。因此，采样的频率随着测点数量的增加而降低。

#### 1.2 试验布置

潜堤堤心全部采用空心立方体填充，不再考虑护面块石。本次研究选取了以下2种结构尺寸的空心立方体 (比例1:30) 进行研究，设计采用的钢筋混凝土 (或素混凝土) 空心方块为图1, 2所示的空心立方体，结构参数见表1。波高数据采用电容式浪高仪测量，堤两侧布置了6个浪高仪。仪器的灵敏度及稳定性均满足要求，所有测量信号均通过计算机采集、记录，采样时间间隔为0.01 s。模型试验浪高仪布置见图2。

#### 1.3 试验参数

本文主要讨论不同空隙率下防波堤的消浪效

表1 空心立方体结构参数

型号	尺寸/mm	实体体积/ $m^3$	总体积/ $m^3$	单体空隙率	单体质量/t
型号1 (钢筋混凝土)	边长2 000, 杆350×350	2.350	8.000	0.706 3	5.88
型号2 (素混凝土)	边长1 500, 杆400×400	1.856	3.375	0.549 9	4.45

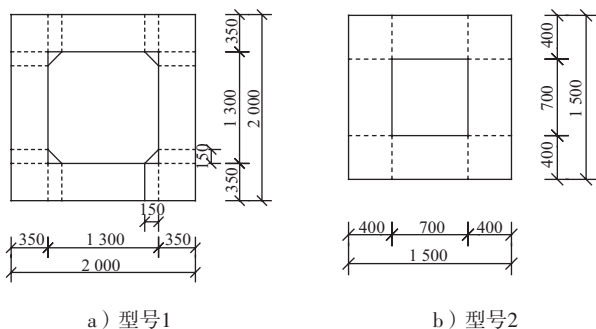


图1 空心立方体结构

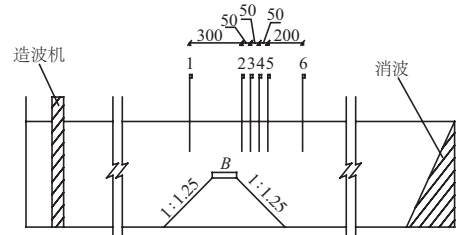


图2 波浪水槽及浪高仪布置 (单位: cm)

果的差异及对促淤效果的影响。故试验保持堤身尺寸不变，仅仅通过改变空心立方体的空隙率，

得到相应不同的透浪系数, 而后与同等条件下的实心堤对波浪的影响进行对比分析。试验中, 空心立方体均采用随机摆放方式, 以保证堤身整体的稳定性及更好的消浪效果。模型中分别采用规则波与不规则波作为入射波, 其中不规则波的谱型选用JONSWAP谱。具体试验要求参照《波浪模型试验规程》。波要素见表2。本文采用潜堤底高程为-4.0 m, 堤顶高程3.70 m, 具体尺寸见图3。

表2 规则波与不规则波透射试验波浪要素

波浪种类	水深/cm	平均波高/cm	平均周期/s
规则波	33.5	16.17	1.25
		13.75	
	31.7	15.62	1.23
不规则波	33.5	11.55	1.17
		11.22	
	25.0	12.74	1.25
不规则波	31.7	12.27	1.23
	25.0	10.50	1.17

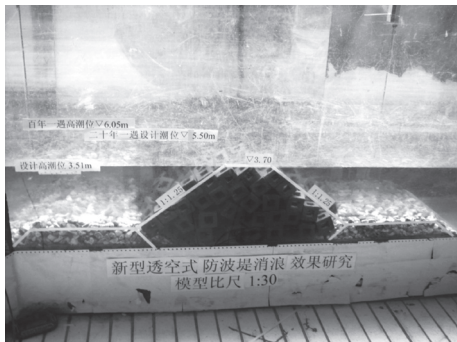


图3 潜堤断面 (比尺1:30)

## 2 试验结果与分析

以水深 $d$ 为33.5 m时的规则波为例, 图4是潜堤采用型号1立方体的波高沿程变化。图5是采用型号2立方体, 入射波为3种不同不规则波时的波高沿程变化。从图中可以看出自5#浪高仪开始, 不论规则波抑或不规则波, 波高均开始趋于稳定, 故堤后稳定波高 ( $H_2$ ) 即选取5#浪高仪测得的值。

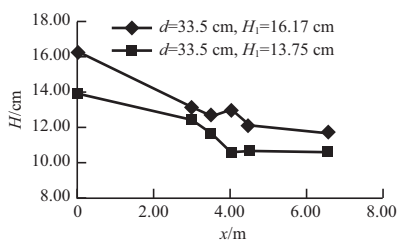


图4 波高沿程变化 (规则波)

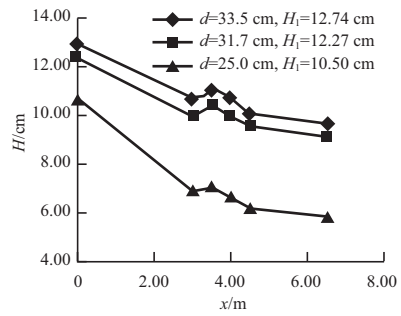


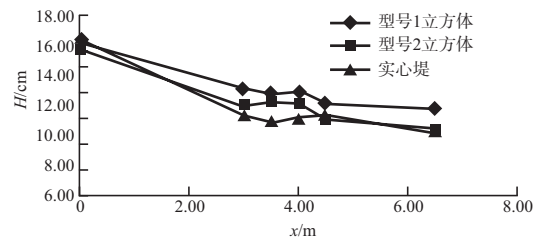
图5 波高沿程变化 (不规则波)

### 2.1 潜堤上波浪传播的沿程变化比较

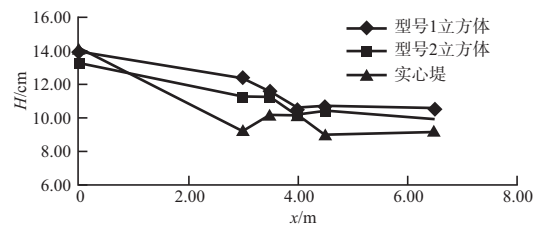
通过采用2种不同空心立方体的潜堤和实心潜堤进行比较, 波浪在不同波高、水深下在潜堤上的传播产生了不同的效果。

#### 1) 规则波。

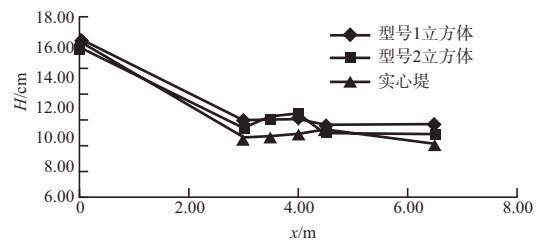
图6为6种不同水深、入射波高组合, 在入射波均为规则波的情况下, 采用2种不同型号的空心立方体堤和实心堤上的波高沿程变化。



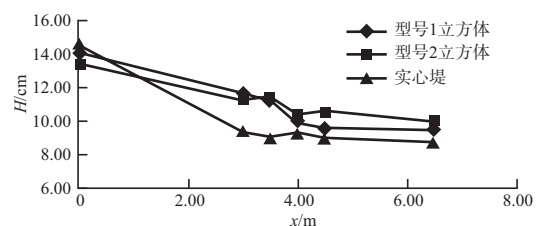
a)  $d=33.5$  cm,  $H_1=16.17$  cm



b)  $d=33.5$  cm,  $H_1=13.75$  cm



c)  $d=31.7$  cm,  $H_1=15.62$  cm



d)  $d=31.7$  cm,  $H_1=13.20$  cm

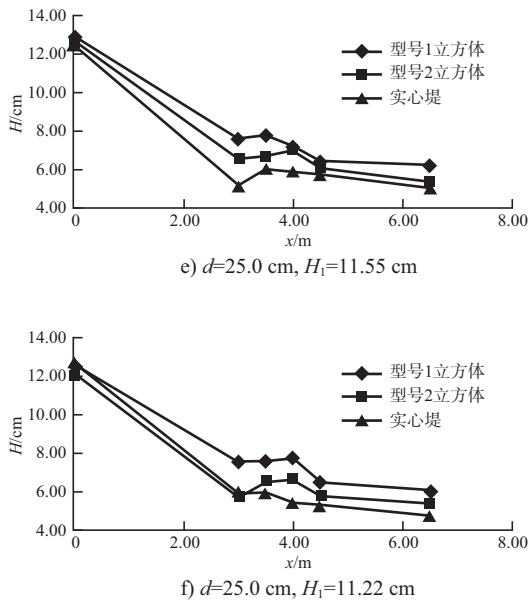


图6 不同潜堤波高沿程变化 (规则波)

从图中可以看出，当波浪传至潜堤所在位置时，波浪的能量发生损耗，经过一段距离的传播，堤后波高趋于稳定，达到最后的堤后稳定波高。同一水深、入射波高条件下，实心堤的波高沿程变化相对较为明显，采用型号1立方体的空心堤的波高沿程变化则最不明显。这证明实心堤相对于空心立方体堤的消浪效果最好，而采用型号2立方体的潜堤又比采用型号1立方体的消浪效果更好。比较图6a)~f)可以看出，在同一水深、不同入射波高的情况下，入射波高越大，三条曲线越为接近；反之，入射波高越小，3条曲线差距则越大。这证明空心潜堤对于波高比较大的港域消浪效果相对更佳，此时采用空心堤更具有经济实用的优点。

2) 不规则波。

图7为3种不同水深、入射波高组合，在入射波均为不规则波的情况下，采用两种不同型号的空心立方体堤和实心堤上的波高沿程变化。从图8可以看出，与规则波一样，实心堤的消浪效果仍然比空心立方体堤要好，但是这种差异已经明显缩小，在 $d=33.5\text{ cm}, H_1=12.74\text{ cm}$ 和 $d=31.7\text{ cm}, H_1=12.27\text{ cm}$ 时，这3条曲线几乎重合。可见，在实际海域中，实心堤与空心立方体堤并无很大差异，这也进一步说明了空心立方体堤的实用性。

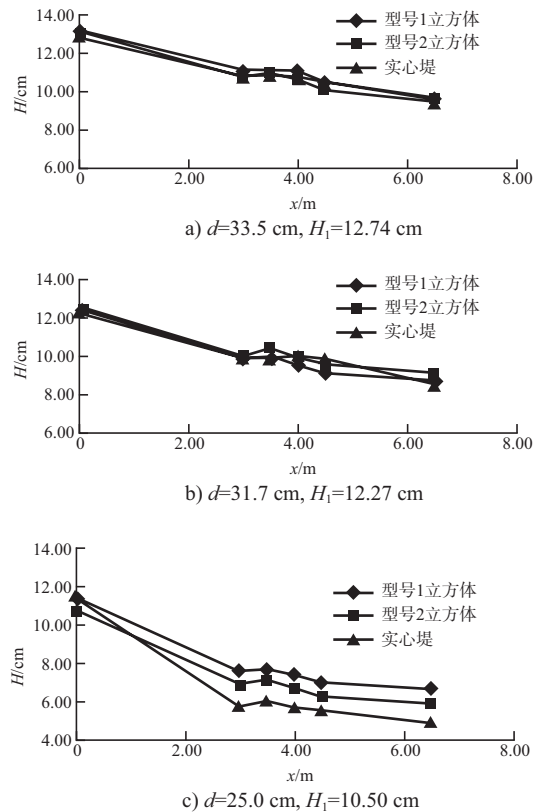
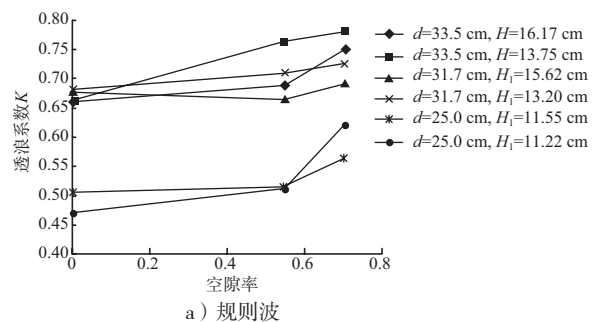


图7 不同潜堤波高沿程变化 (不规则波)

2.2 空心率对潜堤透浪系数的影响

潜堤的透浪系数 $K$ 可以定义为：潜堤堤后稳定波高 ( $H_2$ ) 与堤前入射波高 ( $H_1$ ) 的比值 ( $H_1$  取未放堤时的率定波高值， $H_2$  选取5#浪高仪测得的值)。型号1立方体的空心率为0.706 3，型号2立方体的空心率为0.549 9，实心堤的空心率为0。从上面的波高沿程变化曲线中可以看出空心率越低，则消浪效果越好。图8则更为直观地表现出这一规律。

从图中可以看出，空隙率越大，潜堤的透浪系数越高，这就意味着消浪效果越差。但这一规律并不是呈线性递增的。除个别组次以外，采用型号2的空心立方体堤与实心堤的消浪效果相



a) 规则波

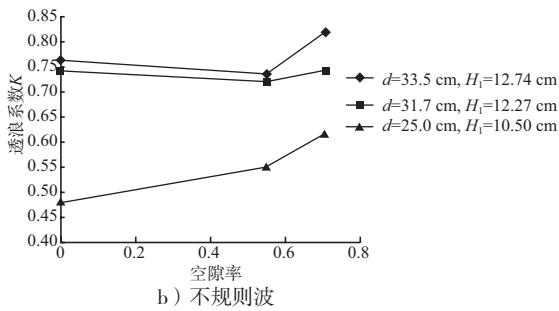


图8 不同空隙率对透浪系数的影响变化

比较, 差异并不是很大。这是因为若空心立方体的空隙率并不是很大, 海水从堤身透过时不会直接通过, 而水体在空心立方体中发生互相冲击、碰撞等复杂运动, 同样消耗了大量波浪能量。另外, 从图8 a)中可以看出, 当入射波为规则波时,

若水深一定, 入射波高大的相对透浪系数小, 消浪效果明显; 同样的, 水深越浅, 透浪系数越小。从图8 b)中可以看出, 当入射波为不规则波时, 同样水深越浅, 透浪系数越小。

### 3 堤后流速及促淤效果分析

在潜堤的影响下, 堤后波高明显减小, 从而大大降低了水流的掀沙能力, 并且外海进入堤后的水体所挟带的泥沙会有一部分沉积下来, 使得堤后滩面持续淤高。为了判断空心立方体堤的促淤效果, 本文根据已得试验数据, 通过计算, 得到堤前及堤后底面流速, 结果见表3和表4。

表3 规则波堤前堤后底部流速对照

波要素	堤前底部流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	堤后底部流速/( $m \cdot s^{-1}$ )		
		型号1立方体堤	型号2立方体堤	实心堤
$T=1.2 s$ $h=0.335 m$ $H_1=16.17 cm$	1.76	1.30	1.19	1.21
$T=1.2 s$ $h=0.335 m$ $H_1=13.75 cm$	1.48	1.14	1.12	0.96
$T=1.2 s$ $h=0.317 m$ $H_1=15.62 cm$	1.81	1.22	1.17	1.20
$T=1.2 s$ $h=0.317 m$ $H_1=13.20 cm$	1.51	1.08	1.05	1.01
$T=1.1 s$ $h=0.250 m$ $H_1=11.55 cm$	1.55	0.85	0.77	0.74
$T=1.1 s$ $h=0.250 m$ $H_1=11.22 cm$	1.50	0.84	0.74	0.68

表4 不规则波堤前堤后底部流速对照

水深/m	堤前底部流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	堤后底部流速/( $m \cdot s^{-1}$ )		
		型号1立方体堤	型号2立方体堤	实心堤
0.335	1.64	1.30	1.26	1.26
0.317	1.74	1.25	1.31	1.30
0.250	1.77	1.11	0.98	0.84

从表3和表4中可以看出, 堤后断面底部流速相对于堤前有所减小, 尤其在水深较浅的情况下, 减小的幅度更大。而采用不同型号的空心立方体堤与实心堤相比较, 堤后断面底部流速相差则并不大, 这也再次验证了空心立方体堤的消浪效果与实心堤相近。

图9为3种不同试验水深情况下的泥沙瞬时起动底速, 本文选取了窦国仁公式进行计算。表5为3种不同试验水深的情况下, 对于规则波, 堤前与堤后的泥沙起动粒径范围对比结果。

从表5中可以看出, 不同水深的计算结果差异并不明显, 均表明堤后泥沙起动粒径范围相对于

表5 规则波作用下堤前堤后泥沙起动粒径范围对照

试验水深 $h/m$	堤前泥沙起动粒径范围/ mm	堤后泥沙起动粒径范围/ mm
0.335	0.006 ~ 14	0.010 ~ 11.5
0.317	0.006 ~ 15	0.010 ~ 11.0
0.250	0.007 ~ 12	0.025 ~ 10.0

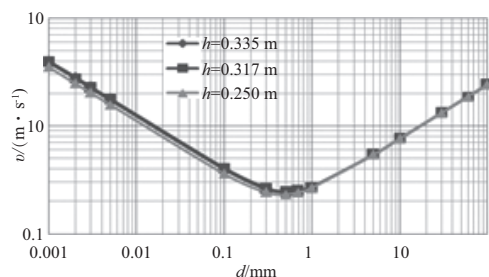


图9 不同试验水深下泥沙起动底速随粒径的变化

堤前大大减小了。倘若该处泥沙粒径主要分布在该减小范围之内，那么此堤起到的促淤效果则更加明显。

#### 4 结论

1) 空心立方体的不同空心率对潜堤的消浪效果有影响，且空心率越大，透浪系数越大，消浪效果越差。空心率对透浪系数的影响并不敏感，试验中采用的型号2的立方体，空心率为0.55，堤身总空隙率为0.63，其透浪系数与实心堤相比较为接近，故在实际工程中，选取合适的空心立方体，不仅可以满足消浪要求，与实心堤相比，节省了大量石料，并且预制方便可减少运输成本。

2) 潜堤在减小堤后波高的同时，减小了水质点的运动速度，使得水流的掀沙能力有所降低，达到了促淤的效果。空心立方体堤与实心堤相比，其差异并不明显，已能够基本满足消浪促淤的要求。

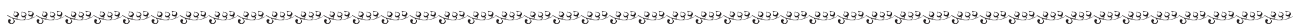
3) 由于空心立方体结构的潜堤堤身空隙较大（最大可在0.7以上），更为符合透水构筑物的设计要求，并且在试验中可清晰的看到在潜堤堤身中存在水体流动，充分保证了地内外水体交换，保证了堤内水质，同时，由于单个块体较大，在

促淤工程结束后的堤身的拆除及回收也相对更为容易。

#### 参考文献:

- [1] 严以新, 郑金海, 曾小川. 多层挡板桩基透空式防波堤消浪特性试验研究[J]. 海洋工程, 1998, (1): 67-75.
- [2] 王国玉, 王永学, 李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005(6): 90-95.
- [3] 陈旭达, 张宁川. 一种新型透空式防波堤水动力特性试验研究[J]. 水道港口, 2011(1): 13-17.
- [4] 杨正己, 贺辉华, 潘少华, 等. 波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J]. 水利水运科学研究, 1981(3): 34-45.
- [5] Van M J W. Data on wave transmission due to overtopping[R]. Marknesse, The Netherlands: Delft Hydraulics, 1990.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Madsen O S, White S M. Reflection and Transmission Characteristics of Porous Rubble Mound Breakwaters[R]. Miscellaneous Report 76-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1976: 141.

( 本文编辑 郭雪珍 )



### 著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。