

· 综 合 ·



透空式上部结构开孔沉箱码头 波浪反射系数与波峰面高度试验研究*

周凌愉, 戴路, 郑金海, 严士常, 龚伟杰

(河海大学 港口海岸与近海工程学院 海岸灾害与防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过波浪断面物理模型试验, 测得开孔沉箱结构码头在不规则波作用下的波浪反射系数和码头前沿波峰面高度。采用单因次分析法, 在研究开孔沉箱基本结构对反射系数的主要影响基础上, 着重探讨透空式上部结构对反射系数的影响; 同时采用同样的方法研究波峰面高度的影响因子。最终拟合出这两个物理量的简化计算式, 并用理论方法对波峰面高度的拟合公式加以验证且建立了其与反射系数之间的关系, 为工程设计提供参考。

关键词: 不规则波作用; 透空式上部结构; 开孔沉箱结构; 波浪反射系数; 波峰面高度

中图分类号: TV 139.2*

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0018-06

Experimental research on wave reflection coefficient and wave crest height of perforated caisson with permeable superstructure

ZHOU Ling-yu, DAI Lu, ZHENG Jin-hai, YAN Shi-chang, GONG Wei-jie

(Key Laboratory of Coastal Disasters and Protection, Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through the wave cross-section physical model test, the wave reflection coefficient and wave crest height of the open caisson structure under irregular wave action can be measured. Through the single factor analysis method, this paper mainly analyses the influence of different factors related to the permeable upper structure to the reflection coefficient based on the study on the basic structure of open caisson structure; and at the same time analyses the influence of factors to the wave crest height in the same way. Finally, it fits out formulas to compute the two physical quantities, proving the formula about wave crest height by theory and establishing the relationship between it and reflection coefficient. The test results may serve as reference for the engineering design.

Key words: irregular wave action; permeable superstructure; perforated caisson wharf; reflection coefficient; wave crest height

开孔沉箱结构于20世纪60年代由加拿大学者 Jarlan^[1]提出, 因具有减小波能量和节约工程投资等显著优势而被广泛应用于离岸深水海域的实际工程中。在此类结构的设计中, 波浪反射系数和码头前沿波峰面高度是十分重要的参数。

码头反射系数影响港域内的波高以及码头的泊稳条件等诸多方面。目前, 这方面的研究主

要有: Tanimoto等^[2]较早地利用物理模型试验结合理论分析来研究开孔沉箱防波堤的反射特性, Chwang^[3]等基于线性势流理论对具有一个消浪室的全开孔消浪结构的反射特性进行理论分析, 陈雪峰等^[4]通过波浪水槽规则波试验研究了开孔率、相对水深、消浪室相对宽度与波浪反射系数的关系。以上研究结论都是针对无上部结构的开孔沉

收稿日期: 2012-07-12

*基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (20091310714)

作者简介: 周凌愉 (1990—), 男, 硕士研究生, 从事港口海岸与近海工程研究。

箱而得到, 在实际的工程中一般都需要设置上部结构来承受码头面上的荷载, 当水位较高或者波高较大时, 上部结构的存在会影响开孔沉箱码头的反射系数大小。开孔沉箱码头前沿波峰面高度是确定开孔沉箱码头面板高程的主要参数之一, 目前, 国内外研究成果较少, 实际工程设计中通常采用整体物理模型的方法进行码头高程确定, 季则舟^[5]、张定军^[6]和李冠华^[7]对开敞式、半开敞式码头面高程确定方法进行研究, 但只是简单提出确定码头面高程的影响因素, 未能进行深入研究, 确定高程时仍以经验为主, 未给出确定方法。此外, JTJ 295—2000《开敞式码头设计与施工技术规程》规定了码头面高程的确定方法, 但是规范确定码头面高程的波峰面高度是不考虑任何建筑物干扰情况下的波峰面高度, 存在不足。因此针对上部结构的开孔沉箱的反射系数及码头前沿波峰面高度开展试验研究具有重要实际意义。

1 试验概况

1.1 试验设备与方法

本次物理模型试验在河海大学港航动力实验室波浪水槽内进行, 水槽长80 m, 宽1 m, 高1.2 m。水槽的一端安装有液压式推板造波机, 通过电机系统控制推波板运动的行程和频率, 水槽的另一端铺设消能缓坡, 以减小和消除波浪反射影响。试验采用不规则波, 波谱取JONSWAP谱, 试验组合见表1。

试验模型设计为前墙开孔、后墙实体。根据《波浪模型试验规程》, 按正态重力相似准则设计模型, 模型长度比尺为 $\lambda=30$ 。断面模型由多层板制作而成, 包括开孔沉箱结构和透空式上部结构两个部分。试验中开孔沉箱的前壁开孔率为32%, 内墙开孔率为48%, 上部结构形式为II型梁透空。码头立面如图1所示。

由于在本次试验中波浪为不规则波, 且有效波对码头的的作用起主要作用, 表1中, 波高采用有效波高 H , 周期则采用 T_c (即1/3大波的周期平均值), 对于以上波要素与码头面板超高组合的各种工况, 重复试验3次, 取平均值作为试验值。

表1 物理模型试验组合

水深 d/m	波高 H/m	周期 T/s
20.42	4.29	8.9
	3.22	8.9
	2.12	8.9
18.80	3.04	8.9
	2.03	8.9
18.30	3.04	8.9
	2.03	8.9
15.19	3.48	8.9
	2.32	8.9
	1.26	8.9
19.33	2.03	8.9
	1.56	7.8
	0.89	6.3
	4.14	8.9
	3.04	8.9
	2.34	7.8
	3.05	7.8
	1.90	6.3
	1.37	6.3
	4.14	7.8

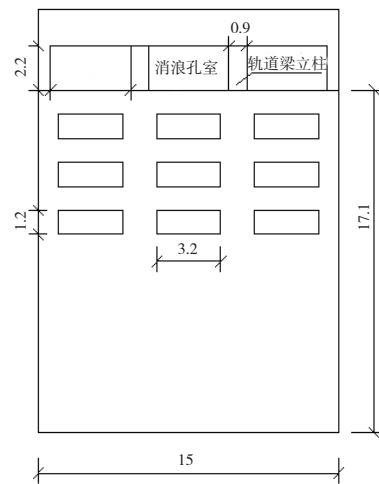


图1 码头立面(单位:m)

1.2 数据采集与分析

波浪测量采用DJ 800型采集系统采集, 波高仪为电容式波高仪, 采集频率为0.02 Hz。离开码头前沿1倍入射波长以外, 试验共设置了5根浪高仪, 用于记录建筑物前波面变化。1#~5#波高仪用于不同入射波浪作用下入、反射分离的数据采集; 6#和7#波高仪用于记录并计算建筑物前的波峰面高度, 波高仪布置如图2所示。

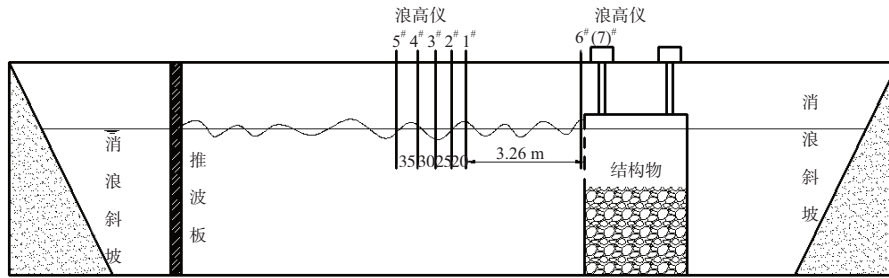


图2 波高仪布置

本次试验数据是通过编写Matlab程序进行处理, 采用上跨零点法统计不规则波波高值及波峰面高度。由于统计得到的波高值是沉箱前入反射波叠加的结果, 因此在求反射系数时, 应先将入反射波进行分离, 本次试验采用三点法^[8]进行分离。

2 试验成果分析

2.1 影响反射系数 (K_r) 的主要因素

透空式上部结构开孔沉箱码头主要由开孔沉箱基本结构与透空式上部结构组合而成, 实际工程中这两部分的结构形式均会对反射系数产生影响。与无上部结构开孔沉箱的分析方法相似, 本文运用单因次分析法, 首先考察波陡 (H_s/L_s)、沉箱消浪室相对宽度 (B/L_s)、相对水深 (k_d) 对反射系数的影响, 在此基础上着重考察透空式上部结构对反射系数的影响, 主要反映在面板相对底超高 (h_i/H_s) 及上部结构开孔程度这两个影响因子上。

2.1.1 开孔沉箱基本结构对反射系数的影响

开孔沉箱基本结构对反射系数的影响主要体现在波陡 (H_s/L_s)、沉箱消浪室相对宽度 (B/L_s)、相对水深 (k_d) 这3个影响因子上, 如图3~5所示。在本次试验中, 反射系数随着波陡增大而小幅增大, 随相对宽度的增大而减小且呈非线性关系, 随相对水深的增大而增大且呈线性关系, 试验规律与周松泽等^[9]研究透空式上部结构对开孔沉箱反射系数影响相一致。

2.1.2 透空式上部结构对反射系数的影响

2.1.2.1 相对底超高对反射系数的影响

上部结构对反射系数的影响主要反映在相对底超高上, 本文定义相对底超高为静水位至码头底面高程的距离与入射波高的比值。

图6为码头面相对底超高与反射系数的关系,

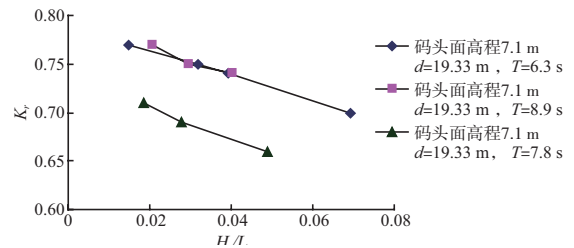


图3 波陡与反射系数关系

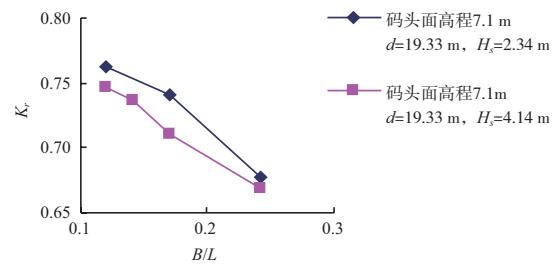


图4 消浪室相对宽度与反射系数关系

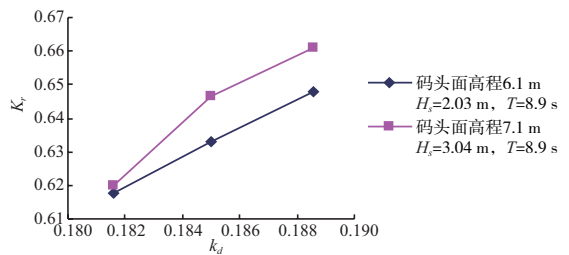


图5 相对水深与反射系数关系

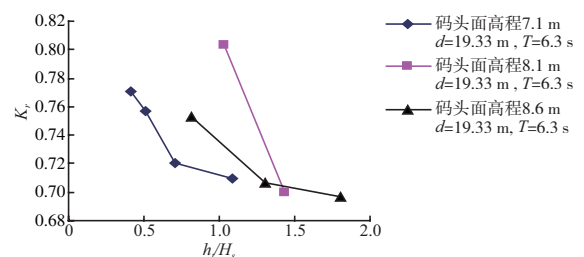


图6 相对底超高与反射系数关系

由图可知 K_r 随 h_i/H_s 的增大先快速减小、随后缓慢地减小。这是因为保持水深不变, 码头面高程一定, 在不发生越浪的情况下, 相对底超高较小时, 波高较大, 大部分波浪超过码头底面高程,

但未达到码头顶面高程, 有一部分波浪作用在顶面横梁上发生反射, 同时由于上部结构开孔区较小, 所以此时反射系数较大, 随着相对底超高的增大, 上部结构开孔区增大, 波高减小, 作用在顶面横梁的波浪减小, 进入消浪室的波浪显著增加, 反射系数迅速减小, 当相对底超高进一步增大, 由于波浪已几乎位于上部开孔区范围内, 其对消浪效果的增强效果并不明显, 所以反射系数缓慢减小。

2.1.2.2 上部开孔率对反射系数的影响

为反映上部结构开孔的消浪效果, 特定义上部结构的开孔率: 在码头立面内, 与水位线距离为一个波高的两条直线范围内码头上部结构透水面面积除以上部结构面积即为上部开孔率。

根据上述定义, 从图7中可以得出反射系数随着开孔率的增大而微幅减小。这是由于在水深、码头面高程以及周期不变且波浪作用范围集中在上部结构处的情况下, 随着开孔率的增加, 波浪打在顶面横梁上发生反射的比例减小, 进入消浪室的波浪比例增加, 反射系数减小, 消浪效果增强。

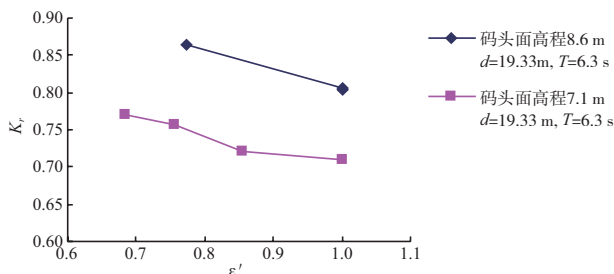


图7 上部开孔率与反射系数关系

根据2.1.1~2.1.2中的试验结果的图表及分析可知, 沉箱消浪室相对宽度、相对水深和码头面相对底超高为影响反射系数的主要因子, 而波陡对反射系数的影响较小, 在拟合公式中不予以考虑; 此外, 上部开孔率对反射系数的影响很小且规定不一, 在拟合公式中也不予以考虑。

综合上述分析和前人研究的无上部结构开孔沉箱反射系数公式, 在本试验范围内, 假定透空式上部结构开孔沉箱反射系数的计算公式结构为:

$$K_r = \lambda \cdot K_{r1} \quad (1)$$

其中: $K_{r1} = f(\frac{B}{L_s}, \frac{d}{L_s})$, 主要反映开孔沉箱基本结

构对反射系数的影响; 而 $\lambda = f(\frac{h_t}{H_s}, \frac{H_s}{\Delta h})$ (Δh 为对应的面板顶超高, 即面板顶部至静水位的距离) 反映了透空上部结构对反射系数的影响。本文采用最小二乘法对所有试验数据进行拟合得出反射系数计算公式为:

$$K_r = \left[0.54 - 7.16 \frac{B}{L_s} - 9.22 \left(\frac{B}{L_s} \right)^2 + 8.75 \frac{d}{L_s} \right] \cdot \exp\left(-0.012 \frac{h_t}{H_s} + 0.11 \frac{H_s}{\Delta h}\right) \quad (2)$$

此公式适用范围: $0.12 \leq \frac{B}{L_s} \leq 0.24, 0.16 \leq \frac{d}{L_s} \leq 0.32, -0.52 \leq \frac{h_t}{H_s} \leq 3.26, 0.23 \leq \frac{H_s}{\Delta h} \leq 7.57$ 。其相关系数 $R=0.825$, 相关性较好。同时为检验式(2)的拟合结果, 将式(2)的计算值和试验值通过matlab程序点绘成图, 实线是 $y=x$ (图8), 绝大多数点在实线附近, 证明了该计算公式的准确性。

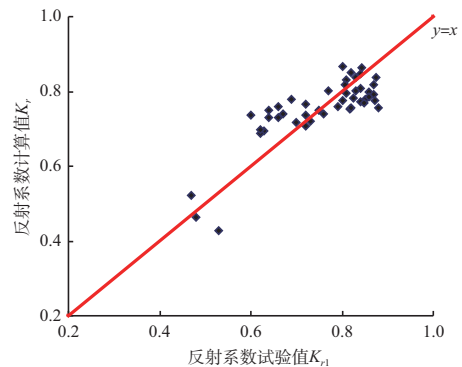


图8 反射系数计算值与试验值对比

2.2 影响波峰面高度的主要因素

综合周益人等^[10-11]对透空式水平板波浪上托力所做的系列试验成果, 得知透空平板波峰面高度与相对水深、波陡、波高有关。与反射系数分析类似, 本文继续采用单因次分析法来考察入射波高 (H_s)、相对水深 (d/L_s) 和波陡 (H_s/L_s) 对码头前沿波峰面高度的影响。另外由于采用不规则波, 所以波峰面高度采用有效波高对应的值。

2.2.1 入射波高与波峰面高度的关系

合成波高就是指入射波高与反射波高叠加后的波峰面高度, 表示为 $(1+K_r)H$, 由图9可知, 随着合成波高的增加, 波峰面高度也随着增加, 并且曲线上升的趋势明显, 近似呈一次函数变化

规律，这是因为在水深、码头面高程和波浪周期不变的情况下，随着入射波高增加，合成波高增加，波峰面高度也随之增加。

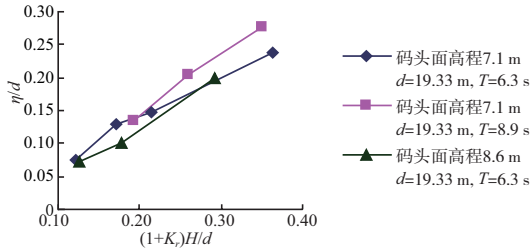


图9 (1+K_r)H/d与η/d关系

2.2.2 相对水深与波峰面的关系

图10为只改变波长的相对水深与波峰面高度的关系，由图10可知，相对水深d/L_s增大时，波峰面高度的变化规律并不明显。这是因为在波高以及码头面高程不变的情况下，随着相对水深的增加，上部结构的消浪效果减小但越浪增加，综合作用下码头的反射效果变化并不明显且变化幅度很小，因此在拟合公式中不予考虑。

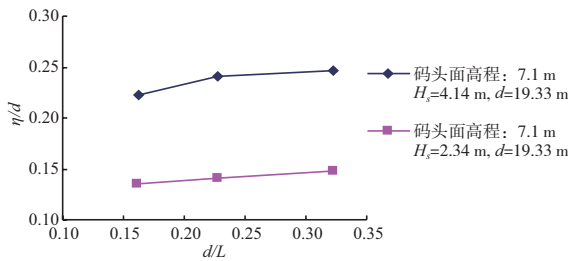


图10 相对水深与波峰面高度关系

2.2.3 波陡与波峰面高度的关系

图11为只改变波长的波陡与波峰面高度的关系，由图11可知，波峰面高度η随波陡H_s/L_s的增大而增大，但图中曲线非常平缓，近似趋近水平。考虑到波陡对波峰面高度的影响程度远不及入射波高的影响程度，因此无需另外考虑。

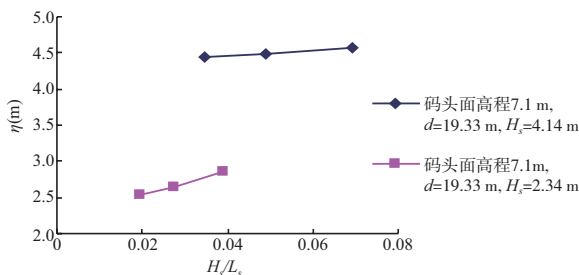


图11 波陡与波峰面高度关系

鉴于上述分析，在本试验范围内，影响上水高度的主要因素有(1+K_r)H（即合成波高）。这个因素对反射系数的影响均呈线性关系。因此，本文采用最小二乘法线性拟合(1+K_r)H与波峰面高度的关系，得到下述相关拟合公式：

$$\eta = 0.727(1+K_r)H_s - 0.0192d \quad (3)$$

其相关系数R=0.963，相关性很好。同时为检验式(3)的拟合结果，将式(3)的计算值和试验值通过matlab程序点绘成图，实线是y=x,由图12可见，绝大多数点在实线附近，证明了该计算公式的准确性。

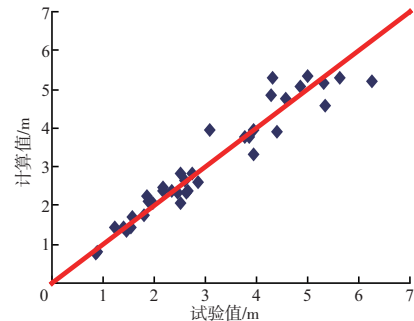


图12 波峰面高度计算值与试验值对比

2.3 波峰面高度拟合公式的理论验证

根据陈国平^[12]对高桩码头波峰面高度的理论研究，通过微幅波理论、波能流守恒理论、二阶Stocks波理论等相关理论可推得高桩码头前沿规则波波峰面高度计算公式为

$$\eta = \frac{H_i}{2} + \frac{\pi H_i^2}{2L} \left[\frac{\left(\text{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2 \right) \text{ch} \frac{2\pi d}{L}}{4 \left(\text{sh} \frac{2\pi d}{L} \right)^3} \right] \quad (4)$$

式中：H_i为入射波高(m)；d为码头前沿水深(m)；L为波浪波长(m)

对于开孔沉箱码头，较高桩码头反射系数较大，并且在不规则波中1/3大波对于波峰面高度形成起主要作用，可认为一系列不规则波等效以T_s为周期、以其有效波高H_s为波高的一系列规则波，故只需将式(4)中的H_i替换成为合成波高H且公式中的波要素均取为有效值，即可得开孔沉箱码头的波峰面高度理论公式：

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{2L} \left[\frac{\left(\text{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2 \right) \text{ch} \frac{2\pi d}{L}}{4 \left(\text{sh} \frac{2\pi d}{L} \right)^3} \right] \quad (5)$$

式中: H 为合成波高(m)。

将式(3)计算所得波峰面高度值与式(5)计算所得波峰面高度值运用matlab程序点绘成图进行比较,实线是 $y=x$,由图13可知,绝大多数点在实线附近,并且相关性为0.964,拟合公式与理论公式相符,从而证明了本次试验的波峰面高度的拟合公式的正确性和适用性。

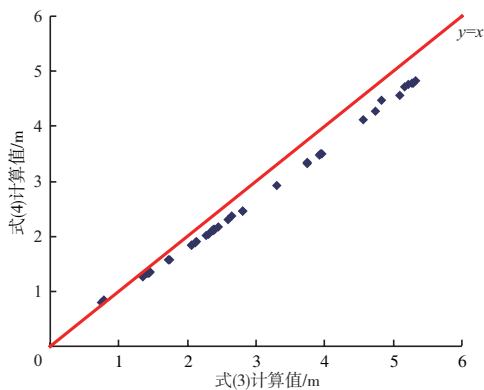


图13 波峰面高度拟合公式计算值与理论公式计算值对比

3 结语

本文对透空式上部结构开孔沉箱反射系数和码头前沿波峰面高度进行分析,分析出影响两个物理量的主要因素及反射系数与码头前沿波峰面的相互关系,拟合出透空式上部结构开孔沉箱反射系数和码头前沿波峰面高度的计算公式。相关结论如下:

1) 影响反射系数的主要因素有消浪室相对宽度、相对水深和相对超高。它们之间的影响关系可由式(2)确定。

2) 试验证明透空式上部结构可以增强码头的消浪效果,这主要反映在 $\lambda = f(\frac{h_t}{H_s}, \frac{H_s}{\Delta h}) < 1$,即透空式上部结构可以增加紊动消能作用从而使反射系数减小。

3) 影响波峰面高度的主要因素有 $(1+K_r)H$ 。它们之间的影响关系可由式(3)确定。

4) 分析出沉箱码头反射系数与波峰面高度的关系,它们之间的关系可由式(4)确定。

5) 不规则波作用下开孔沉箱码头波峰面高度理论公式为式(5)。

参考文献:

- [1] Jarlan G E. A perforated vertical wall breakwater[J]. Dock and Harbour Authority, 1961, 486(7): 394-398.
- [2] Tanimoto K, Yoshimoto Y. Theoretical and experiment study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall[J]. Report of Port and Harbour Research institute, 1982, 21(3): 43-77.
- [3] Chwang A T, Dong Z. Wave-trapping due to a porous plate[G]. Hamburg: Proceedings of the 15th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1984: 32-42.
- [4] 陈雪峰,李玉成. 开孔沉箱的波浪力及反射率的实验研究[G]//《水动力学研究与进展》编委会. 第十四届全国水动力学研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 2000.
- [5] 季则舟. 半开敞式码头顶面高程确定方法的探讨[J]. 港工技术, 2005(3): 15-16
- [6] 张定军. 开敞式码头顶面高程的确定[J]. 水运工程, 2005(3): 37-39
- [7] 李冠华. 开敞式码头面高程的确定[J]. 港工技术, 2008(4): 15-16
- [8] Van der Meer J W. Wave run-up and wave overtopping at dikes[C]. The Netherlands: Technical Advisory Committee on Flood Defence, 2002:1-27.
- [9] 周松泽, 胡闰春, 陈国平, 等. 透空式上部结构对开孔沉箱消浪性能影响的试验研究[J]. 水运工程, 2012(1): 21-25.
- [10] 周益人, 陈国平. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004(3): 30-40.
- [11] 周益人, 陈国平. 透空式水平板波浪上托力分布[J]. 海洋工程, 2003(4): 41-47.
- [12] 陈国平, 张志明, 严士常, 等. 波浪作用下高桩码头前波峰面高度研究[J]. 水运工程, 2010(1): 28-31.

(本文编辑 武亚庆)