



开孔双挡板式高桩码头透浪系数试验研究

高晨晨, 陈国平, 许忠厚, 尹亚军, 黄璐

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

摘要: 通过不规则波作用下波浪水槽物理模型试验, 对开孔双挡板式高桩码头透浪特性开展研究。将试验结果与各家公式的计算结果进行对比分析, 认为规范公式并不适用于开孔双挡板式高桩码头透浪系数的计算。Kriebel 公式计算结果与试验结果吻合良好。在 Kriebel 公式的基础上, 提出了计算一定波浪条件下开孔双挡板式高桩码头透浪系数的半经验公式, 可为类似条件下的工程建设提供计算透浪系数的依据。

关键词: 透浪系数; 挡浪板; 高桩码头; 物理模型试验

中图分类号: U 656.3 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)11-0075-06

Experimental research on wave transmission coefficient through double immersed vertical barriers with holes of high-piled wharf

GAO Chen-chen, CHEN Guo-ping, XU Zhong-hou, YIN Ya-jun, HUANG Lu

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

Abstract: The wave transmission coefficient through double immersed vertical barriers with holes of high-piled wharf is studied through the physical model experiment in wave flume under irregular wave action. By comparison of experimental results with different theoretical calculation methods of wave transmission coefficients, the calculation method of wave transmission coefficient in the Code of Design and Construction of Breakwaters turns out to be not suitable for high-piled wharf with double immersed vertical barriers with holes. The results of Kriebel formula are in good agreement with experimental results. On the basis of Kriebel formula, the paper proposes a semi-empirical formula of wave transmission coefficient under certain wave conditions, which may serve as a reference for the engineering practice under similar conditions.

Keywords: wave transmission coefficient; immersed vertical barrier; high-piled wharf; physical model experiment

设有挡浪板的高桩码头是一种兼有防波堤与码头双重功能的新型水工结构形式^[1]。它下部采用桩基透空结构, 能减轻自质量、节约工程材料, 同时对工程水域的水流扰动较小, 具有防止泥沙淤积、改善港内水质和降低工程造价等优点, 因此近年来该结构形式被越来越多地应用于工程实践。其挡潮消浪的原理主要是利用伸入水面以下的挡浪板阻挡集中在表层水体中的大部分波浪能量的传播, 以减小工程结构后方的透射波高。该

结构形式适用于水深较大、波浪较小、地基承载能力较差的软土地区。如沈家湾客运码头一期工程针对当地的地形地质条件、水动力条件和泥沙冲淤情况, 采用了内外两侧均设挡浪板的高桩板梁式码头结构。码头设计为两侧均靠船, 迎浪面泥面高程为 -3.0 m, 码头面高程 6.30 m, 码头宽度 16 m, 排架间距 7 m, 基桩采用直径 800 mmPHC 预应力混凝土管桩。工程设计时需要解决透浪系数 K_t 的计算问题。

透浪系数 K_t 是指工程结构后方的透射波高与入射波波高的比值。当入射波浪作用于桩基透空式结构时, 波能主要转化为 3 部分^[2]。一部分波能与工程结构相遇发生反射; 一部分波能由于波浪间相互作用引起水流剧烈紊动而损耗; 另一部分波能则透过堤身, 表现为工程结构后方的透射波高。大量的物理模型试验研究与工程实践表明, 合理、准确地计算透射系数 K_t 是建设带消浪设施的桩基透空结构并使其达到挡潮消浪效果的关键因素。

国外学者对透浪系数的研究始于 20 世纪 40 年代。Ursell^[3] 首先研究了无限水深情况下直立挡板的透浪系数, 给出了深水直立薄板的精确解; Wiegel^[4] 根据微幅波理论, 对图 1 所示的垂直挡板结构, 忽略波浪在挡板前发生反射, 在透射能量等于直板下的入射波能量的假定下, 推导出了有限水深情况下透射系数 K_t 的近似解析解; Kriebel 等^[5] 对 Wiegel 理论进行了修正, 即进一步考虑垂直挡板对波浪反射的影响, 根据波能流守恒推导出了透浪系数 K_t 的计算公式; 前苏联学者拉帕在双挡板透空式防波堤的规则波试验基础上, 提出了计算透浪系数 K_t 的经验公式, JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》^[6] 采用的就是此公式。

国内学者在桩基透空式结构透浪特性的研究方面也做了较多工作。邱大洪等^[7] 在 Wiegel 理论的基础上提出了反射的波能有一部分能从挡浪板底部绕射到挡浪板后方的假设; 严以新等^[8] 进行了福建省黄岐渔港多层挡板物理模型试验研究, 发现挡板不同透空率对透射系数的影响显著; 王文鼎等^[9] 在 Wiegel、Kriebel 等理论分析的基础上, 根据波能流守恒原理对透浪系数 K_t 值的计算作了进一步的理论推导, 得出了较为适用的透浪系数计算公式; 琚烈红等^[10] 从微幅波理论出发, 通过理论分析和模型试验, 提出了设有单挡浪板透空堤透射系数的近似计算方法。

虽然国内外对桩基透空式结构透浪特性已有一定的研究, 但由于波浪与建筑物相互作用问题本身的复杂性, 在透浪系数 K_t 的计算方面仍然没

有形成系统的体系。本文结合浙江省嵊泗县沈家湾客运码头建设, 在 Kriebel 公式的基础上采用因次分析和多元非线性回归的方法, 推导一定波浪条件下开孔双挡板式高桩码头透浪系数的计算公式, 可为类似条件下的工程建设提供计算透浪系数的依据。Wiegel 计算图见图 1。

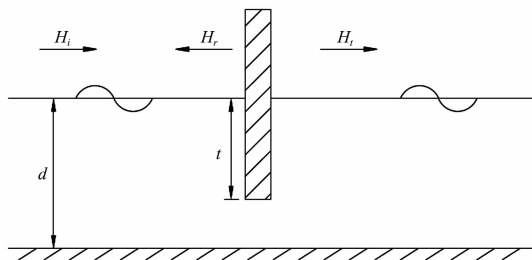


图 1 Wiegel 计算图示

1 试验设备与方法

试验在河海大学港口海岸与近海工程学院海工试验室波浪水槽内进行。水槽长 80 m、宽 1.0 m、高 1.5 m。水槽一端设有液压式推板造波机, 用于产生试验所需要的波浪, 另一端设有消浪缓坡, 以减小波浪反射的影响。在中后部用隔板将水槽分成等间距的两部分, 取水槽外侧 0.5 m 作为有效试验宽度进行模型断面铺设, 另一侧用以消除波浪的二次反射。

试验数据的采集选用电容式浪高仪及其配套的传感器以及中国水利水电科学研究院研制的 DJ800 型多功能监测系统。试验采用间歇式生波方式, 以消除波浪在水槽内的多次反射。物理模型比尺遵循正态重力相似准则, 结合试验断面和设备性能等因素, 确定模型长度比尺 $\lambda_l = 25$ 。试验波浪采用不规则波, 谱型选用 JTS 145-2—2013《海港水文规范》^[11] 推荐的 JONSWAP 谱, 谱峰升高因子 γ 取 3.3。试验过程、开孔双挡板式高桩码头模型的制作均按照 JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》^[12] 的相关规定进行。试验时在模型后方架设 4 根浪高仪进行波高量测, 浪高仪离码头距离分别为 2、3、4、5 m。试验水槽、物理模型及浪高仪布置见图 2。原型波要素及挡板入水深度见表 1。

表 1 原型波要素及挡板入水深度

水位/m	波周期 T_s /s	波高 H_s /m	码头前水深 d /m	重现期 P/a	挡板入水深度 t /m	挡板开孔率 $\varepsilon/\%$
5.71	16.9	4.00	9.71		5.71	34.0
			8.71		4.21	13.6
		3.35	9.71	50	5.71	34.0
			8.71	50	4.21	13.6
	12.8	2.58	9.71	10	5.71	34.0
			8.71	10	4.21	13.6
4.51	16.9	3.07	8.51	50	4.51	34.0
			7.51	50	3.01	13.6
	12.8	2.20	8.51	10	4.51	34.0
			7.51	10	3.01	13.6
	7.8	1.65	8.51	2	4.51	34.0
			7.51	2	3.01	13.6
	3.8	1.53	8.51	6 级风	4.51	34.0
			7.51	6 级风	3.01	13.6
2.5	7.8	1.40	6.50	2	2.50	34.0
			5.50	2	1.00	13.6
0.53	16.9	2.37	4.53	50	0.53	34.0
	12.8	1.75	4.53	10	0.53	34.0
	7.8	1.32	4.53	2	0.53	34.0

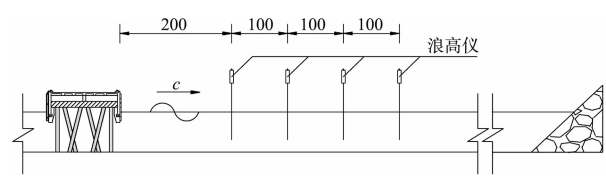


图 2 试验水槽、物理模型及浪高仪布置 (单位: cm)

2 码头后波高分布概型检验

采用假设检验方法中非参数检验的单样本 $K-S$ 检验方法进行波高分布概型检验。取开孔双挡板式高桩码头模型后 1 倍波长外的浪高仪测点的比波高 (波高值与其平均波高的比值) 作为样本对象, 分别假设比波高服从 Weibull 分布和 Rayleigh 分布。检验结果表明, 所有组次都服从 Weibull 分布, 有 71.4% 的组次服从 Rayleigh 分布。对未通过 $K-S$ 检验的 28.6% 的组次进行分析后发现, 未通过检验的组次普遍发生了较为严重的波浪破碎。从方便应用的角度考虑, 可以认为码头后比波高近似服从 Rayleigh 分布。图 3 是 W45221 组次 (水位 4.51 m, 波高 2.2 m, 波周期 12.8 s, 不规则波作用情况) 码头后 1 倍波长外浪高仪测点的波高分布情况。从图 3 可以看出, 比波高与 Rayleigh 分布 (形状参数 $b=0.7885$) 吻合得很好。

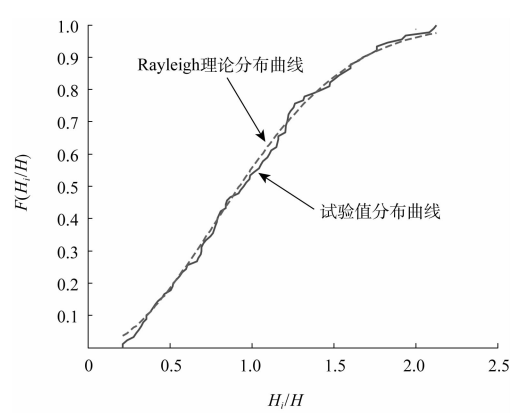


图 3 W45167 组次码头后 1 倍波长外浪高仪测点的波高分布

3 试验结果与讨论

3.1 挡板相对入水深度对透浪系数的影响

挡板相对入水深度 (t/d) 是指挡板入水深度 (即水位与挡板底高程之差) 与堤前水深的比值。透浪系数与挡板相对入水深度的关系见图 4。从图 4 可以看出, 相对入水深度与透浪系数近似呈线性关系, 即透浪系数随着挡板相对入水深度的增加而呈线性减小趋势。这是因为随着挡板相对入水深度的增加, 挡浪面积也随之增大, 造成对波能的反射作用增强。根据波能守恒原理, 从挡板底部透过的能量就会减少, 导致堤后波高减小,

透浪系数也随之减小。

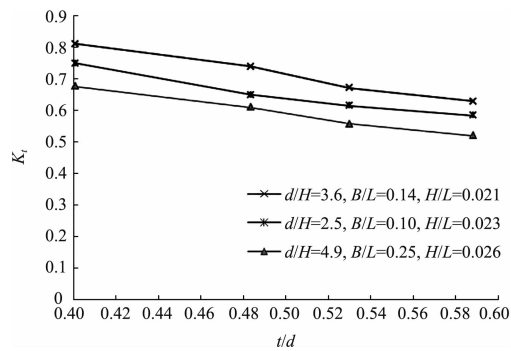


图 4 挡板相对入水深度对透浪系数的影响

3.2 相对堤宽对透浪系数的影响

相对堤宽是指桩基透空式防波堤堤顶宽度（本文指高桩码头前方桩台宽度）与入射波波长的比值。透浪系数与相对堤宽的关系见图 5。图中给出了相对入水深度 $t/d = 0.40$ 和 $t/d = 0.53$ 两种情况下的 K_t 与 B/L 关系曲线。从图 5 可以看到，透浪系数总体上随着相对堤宽的增大呈指数减小趋势，但随着相对堤宽 B/L 的增大，透浪系数的减小趋势逐渐放缓，因此在工程实践中为达到消浪目的而单纯增加堤顶宽度的做法并不可取。

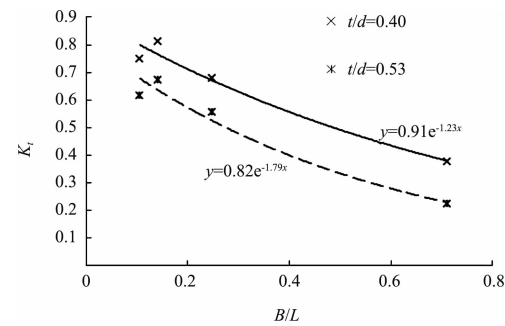


图 5 相对堤宽对透浪系数的影响

3.3 挡板开孔形式对透浪系数的影响

本次试验前后挡板开孔形式分为交错开孔和非交错开孔两种。图 6 给出了开孔率分别为 13.6% 和 34% 情况下交错开孔与非交错开孔透浪系数之间的比较。从图 6 可以看出，挡板非交错开孔时的透浪系数总体上要大于交错开孔时的透浪系数，仅有少数几个高透浪系数的点存在两者间近似相等的情况。分析后发现，这种情况只发生在设计低水位时，此时静水面较低，挡板入水

深度很小，大部分波浪能量从挡板下方透过，造成挡板开孔形式对透浪系数影响有限。

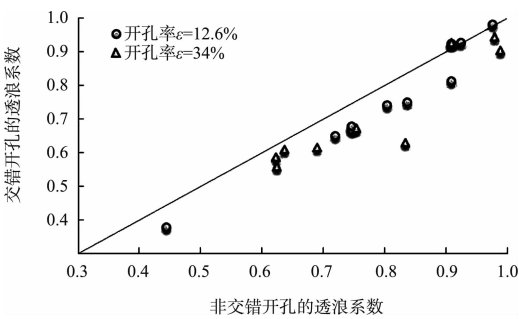


图 6 挡板开孔形式对透浪系数的影响

4 透浪系数试验值与各家公式比较

将透浪系数试验值分别与 Wiegel 公式、Kriebel 公式以及我国规范^[6]中的透浪系数计算公式（拉帕公式）进行比较分析。

图 7 是透浪系数试验值与各家公式计算值的比较。从图 7 可以看到，Wiegel 公式大部分数据点落在 45° 参考线下方，表明大部分透浪系数试验值略小于 Wiegel 公式计算值。这可能是由于 Wiegel 公式是基于单挡板结构推导得到的，而本次试验采用的是双挡板结构，在同等波要素情况下，双挡板的消浪效果应该要优于单挡板结构。Kriebel 公式计算值与透浪系数试验值吻合程度良好，平均误差 7.64%，均方根误差为 0.049，相关系数达到 0.97。规范公式计算值总体上要略小于透浪系数试验值，这主要是因为规范公式是建立在不开孔双挡板结构规则波试验的基础上得到的，挡板开孔后波浪透射会有一定程度的增强，因此造成规范公式计算值较试验值为小。

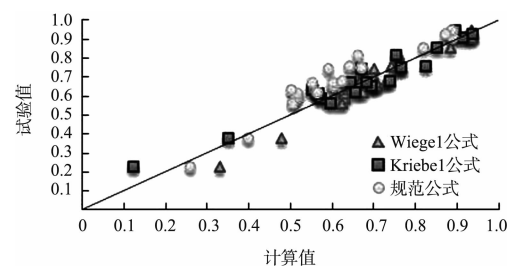


图 7 透浪系数试验值与各家公式计算值比较

由图 7 单独比较 Kriebel 公式计算值与 Wiegel 计算值，可以发现：在同一工况（对应相同的透

浪系数试验值) 下的 Kriebel 公式计算值要略小于 Wiegel 公式计算值, 透浪系数较小时, 这种现象更为明显。这是因为 Kriebel 公式在 Wiegel 理论的基础上做了修正, 即考虑了垂直挡板对入射波波能反射的影响, 因此按 Kriebel 公式计算得到的透浪系数要小于按 Wiegel 公式计算得到的透浪系数。

5 开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算方法分析

根据前人的研究^[1], Kriebel 公式计及了波浪在挡板前的反射, 相较 Wiegel 公式来说更为合理, 同时考虑到 Kriebel 公式计算值与模型试验值的吻合程度较 Wiegel 公式高, 所以本文采用 Kriebel 公式作为研究开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算方法的基础。Kriebel 公式如下所示:

$$K_t = \frac{2T_F}{1 + T_F} \quad (1)$$

$$\text{其中 } T_F = \frac{2k(d-t) + \sinh[2k(d-t)]}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (2)$$

式中: T_F 称为透射函数 (transmission function^[5]); K_t 为透浪系数; d 为堤前水深(m); t 为挡浪板入水深度(m); k 为波数 ($k = 2\pi/L$); L 为波长(m)。

5.1 公式结构

Kriebel 公式是对插入波浪场中的垂直单挡板结构, 考虑挡板对波浪反射的影响, 根据波能流守恒原理推导得到的。为得到开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算公式, 现做出如下假定: 1) 对于开孔双挡板式高桩码头结构, 假定外侧挡板与内侧挡板彼此间独立工作, 互相没有影响。基于这个假定, 开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算公式在结构上应该由 Kriebel 公式的二次方组成, 即基础公式中包含 Kriebel 公式的二次方项。2) 由于 Kriebel 公式是以插入波浪场的未开孔垂直板为研究对象进行推导得到的, 挡板开孔后, 波浪的透射会有所增强; 而开孔双挡板之间常常存在较强的水流紊动, 此时波能发生损耗, 波浪透射也会大大减弱。为此, 引入一个修正系数 C , 对基础公式进行修正。可以认为, 当挡板的开孔率较大时, 表现为波浪透射增强, 修正系数 C 趋向于大于 1; 当挡板间水流紊动起主导作用时, 波

能被极大地削弱, 表现为波浪透射减弱, 修正系数 C 趋向于小于 1。最终得到的公式形式如下式所示:

$$K_t = C \left(\frac{2T_F}{1 + T_F} \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{其中 } T_F = \frac{2k(d-t) + \sinh[2k(d-t)]}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (4)$$

5.2 开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算公式拟合

对修正系数 C 的影响因素进一步分析, 并结合前人的研究, 发现修正系数 C 的影响因素主要有: 1) 挡板相对入水深度 t/d (由于试验组次的限制, 仅考虑外侧挡板与内侧挡板入水深度相同的情况); 2) 相对水深 d/L ; 3) 相对堤宽 B/L ; 4) 相对波高 H/d ; 5) 挡板开孔率 ε 。修正系数 C 与各影响因素的关系式可表示为:

$$C = f_1(t, d, B, L, H, \varepsilon) \quad (5)$$

转换成无因次形式, 则为:

$$C = f_2\left(\frac{t}{d}, \frac{d}{L}, \frac{B}{L}, \frac{H}{d}, \varepsilon\right) \quad (6)$$

对试验结果进行分析, 并忽略次要因素 (相对波高 H/d 和挡板开孔率 ε) 的影响, 仅考虑主要因素 (相对入水深度 t/d 、相对水深 d/L 、相对堤宽 B/L) 的影响, 则修正系数 C 可表示为:

$$C = f_3\left(\frac{t}{d}, \frac{d}{L}, \frac{B}{L}\right) \quad (7)$$

假设挡板相对入水深度 (t/d) 对修正系数 C 的影响为线性关系, 相对水深 (d/L)、相对堤宽 (B/L) 对其的影响为非线性关系, 构造出的修正系数 C 形式如下:

$$C = \left(k_1 \cdot \frac{t}{d} + k_2\right) \cdot \exp\left(k_3 \cdot \frac{B}{L} + k_4 \cdot \frac{d}{L} + k_5\right) + k_6 \quad (8)$$

将式(8)代入式(3), 得到开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算公式结构如下:

$$K_t = \left[\left(k_1 \cdot \frac{t}{d} + k_2\right) \cdot \exp\left(k_3 \cdot \frac{B}{L} + k_4 \cdot \frac{d}{L} + k_5\right) + k_6 \right] \cdot \left(\frac{2T_F}{1 + T_F}\right)^2 \quad (9)$$

将数据代入式(9), 利用 MATLAB 拟合修正

系数 C 与 3 个无量纲因素 (t/d 、 d/L 、 B/L) 的关系, 拟合得到的结果为: $k_1 = 0.73$, $k_2 = -0.18$, $k_3 = -5.01$, $k_4 = 16.79$, $k_5 = 0.35$, $k_6 = 1.19$ 。

将系数 $k_1 \sim k_6$ 代入式(9), 得到开孔双挡板式高桩码头透浪系数计算公式:

$$K_t = \left[\left(0.73 \cdot \frac{t}{d} - 0.18 \right) \cdot \exp \left(-5.01 \cdot \frac{B}{L} + 16.79 \cdot \frac{d}{L} + 0.35 \right) + 1.19 \right] \cdot \left(\frac{2T_F}{1+T_F} \right)^2 \quad (10)$$

该公式的适用范围为: $\frac{t}{d} = 0.117 \sim 0.588$,

$\frac{B}{L} = 0.1 \sim 0.71$, $\frac{d}{L} = 0.04 \sim 0.38$ 。

图 8 是试验值与修正公式计算值的比较结果。从图 8 可以看出, 修正公式的计算结果与试验值吻合度较高, 平均误差仅 4.91%, 均方根误差为 0.035, 相关系数达到 0.98。

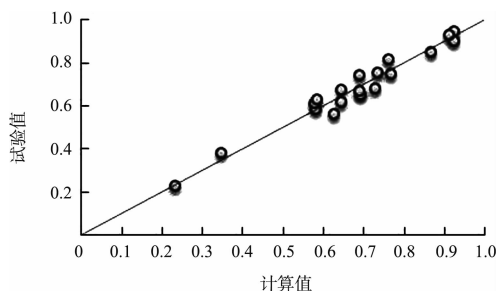


图 8 透浪系数修正公式计算值与试验值比较

6 结论

1) 不规则波作用下, 挡板相对入水深度是影响透浪系数的最主要因素, 透浪系数随相对入水深度的增大而减小。相对堤宽对透浪系数的影响十分有限, 当相对堤宽增大到某一值后, 透浪系数减小将趋于平缓。挡板交错开孔的消浪效果要略好于非交错开孔。

2) 在分析国内外有关研究和物理模型试验结果的基础上, 认为规范公式并不适用于开孔双挡板式高桩码头透浪系数的计算。

3) 将模型试验值、Kriebel 公式计算值和 Wiegel 公式计算值三者进行对比, 发现 Kriebel 公式计算值与试验值吻合度较高, 因此 Kriebel 公式可用于对开孔双挡板式高桩码头透浪系数的初步估算。

4) 基于 Kriebel 公式和波浪水槽试验数据, 提出了一定波浪条件下计算开孔双挡板式高桩码头透浪系数的半经验公式。利用该公式计算的理论与试验值吻合良好, 对类似条件下开孔双挡板式高桩码头的透浪系数计算具有较高参考和借鉴价值。

参考文献:

- [1] 贾玉成. 挡板式高桩码头透浪特性分析[J]. 海岸工程, 2009, 28(1): 1-8.
- [2] 冯卫兵, 丁文林, 叶小红. 桩基挡板透空式防波堤透浪特性研究[J]. 水运工程, 2014(3): 62-67.
- [3] Ursell F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water[C]//Proc of the Cambridge Philosophical Society. England: Cambridge University Press, 1947: 374-382.
- [4] Wiegel R L. Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of Water Ways and Harbors Division: ASCE, 1960(3): 1-12.
- [5] Kriebel D L, Bollmann C A. Wave transmission past vertical wave barriers[C]. Proc of the 25th Coastal Eng Conf, 1996.
- [6] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [7] 邱大洪, 王学庚. 深水薄板式防波堤的理论分析[J]. 水运工程, 1986(4): 8-12.
- [8] 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, 16(1): 67-74.
- [9] 王文鼎, 王永学. 有挡浪设施的桩基透空码头透浪特性分析[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(1): 20-25.
- [10] 据烈红, 杨正已. 设有挡浪板透空堤波浪透射系数实验研究[J]. 水运工程, 2008(4): 19-22.
- [11] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [12] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].

(本文编辑 武亚庆)