



桩基挡板透空式防波堤透浪特性研究

冯卫兵¹, 丁文林¹, 叶小红²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 通过物理模型的试验模拟, 研究并分析影响透射系数的各个因素(包括相对波高、相对波长、相对堤顶宽度、挡浪板相对入水深、是否开孔), 给出各种因素组合下透射系数的变化规律。将试验值与前人公式计算值进行比较, 分析数据的差异及原因; 并在拉帕公式的基础上拟合了透浪系数经验计算公式。

关键词: 透空式防波堤; 透射系数; 物理模型

中图分类号: TV 149.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0062-06

Wave transmission coefficient of piled baffle penetrated breakwater

FENG Wei-bing¹, DING Wen-lin¹, YE Xiao-hong²

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

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper analyzes various factors affecting the transmission coefficient through experimental simulation, and presents the variation law of transmission coefficient under various combinations of factors. Comparing the experimental results with those of predecessors, this paper analyzes the differences between the results of the experiment and the predecessors. Moreover, a useful wave transmission coefficient empirical formula is put forward based on Lapa Formula.

Key words: penetrated breakwater; transmission coefficient; experimental simulation

桩基挡板透空式防波堤透射系数是衡量其削减波浪能力的主要指标, 对防波堤透射系数的分析是研究防波堤阻挡和减弱外海波浪作用、防止泥沙回淤的关键^[1]。当入射波冲击透空堤时, 一部分能量在与承台及挡浪板相遇时表现为反射波, 一部分波能因波浪破碎、波浪水质点间的相互碰撞或产生漩涡而损耗, 另一部分能量透过堤身表现为堤后透射波高。透射波高与入射波能量及波浪破碎损耗能量有关^[2]。波浪破碎损耗能量越大, 透射波高越小, 即透射系数 K_t 越小。

国外学者对透浪系数的研究自20世纪中叶就已开始。Ursell F^[3]研究了无限水深时直立挡板的波浪透射率, 给出了深水直立薄板的精确解;

Wiegel^[4]在不考虑挡浪板反射的条件下, 推出有限水深、无越浪情况下的透射系数近似解析解; Hayashi^[5]从连续方程和Bernoulli定理出发, 综合考虑了堤前水深, 堤前波高, 桩群的透空率3个因素对透射系数的影响。除理论研究外, 多数学者亦采用试验方法研究。Vanweele等^[6]设计了多排桩的模型试验, 指出透射系数的变化有赖于排间距, 以及反射波的能量损耗和紊动引起的能量损失。Shankar N J等^[7]通过圆形、八角形和矩形桩的模型试验, 提出排桩的透空率和波陡对波浪透射系数的影响。Truitt和Herbich等^[8]研究单排桩和双排桩防波堤的波浪透射率, 发现双排桩效果较单排桩效果好, 栅栏式防波堤透浪效果较桩式防波堤好。

收稿日期: 2013-05-06

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。

国内在桩基透空式防波堤的研究上也做了一些工作。1986年邱大洪等^[9]在Wiegel公式的基础上, 提出了反射的能量除有部分直接折返, 还有部分计入透浪能量从挡板底部绕射到挡板后面的假设; 河海大学严以新等^[10]通过对福建省连江县黄岐渔港多层挡板桩基透空式防波堤消浪机理的分析, 得到不同透空率和挡板设置方式对透浪系数影响显著的结论; 南京水利科学院的麻志雄等^[11]对上海吴淞口炮台湾船舶基地高桩承台透空堤断面进行了透浪系数 K_t 的物理模型试验研究, 发现仅有承台结构的透浪系数大于挡板形式, 双挡板大于单挡板。

波浪对透空式建筑物作用影响除了与波周期、波坦、相对水深和海底坡度等因素有关外, 还与透空式防波堤的结构形式密切相关。因此, 通过对不同结构形式的透空式防波堤进行深入研究, 可以更好地掌握消浪机理, 指导工程设计, 优化堤型结构。本文在理论公式的基础上通过物理模型试验的方法对桩基挡板透空式防波堤的透浪特性进行研究。

1 试验设备及试验布置

1.1 试验设备

1) 试验水槽。

试验在河海大学港航动力实验室波浪水槽内进行。水槽长40 m, 宽1.0 m, 高1.2 m。水槽一端设有液压式推板造波机, 末端铺设消能缓坡, 以减小和消除波浪反射的影响。水槽外侧0.5 m作为有效试验宽度进行铺设断面, 另一侧用以扩散二次反射的波能。

2) 数据采集。

波面数据的采集采用中国水利水电科学研究院生产的DJ800型多功能监测系统, 它是由计算机、多功能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, 取得一个测点的数据大约需要400 μ s的时间(包括选中通道号、模数转换和数据传送时间等)。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

波浪水槽纵断面和模型布置见图1。本试验断面采用承台式桩基挡板透空式防波堤结构形式(图2)。波高数据采用电容式浪高仪测量, 堤两侧总共布置7个浪高仪。堤前布置3根浪高仪以测量反射波高, 堤后放置4根浪高仪以测量堤后波高, 浪高仪具体放置位置见图3。

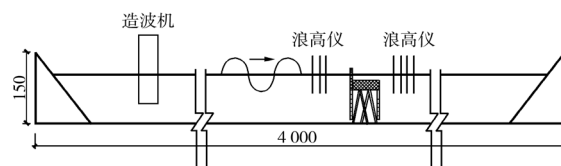


图1 波浪水槽纵断面和模型布置(单位: cm)

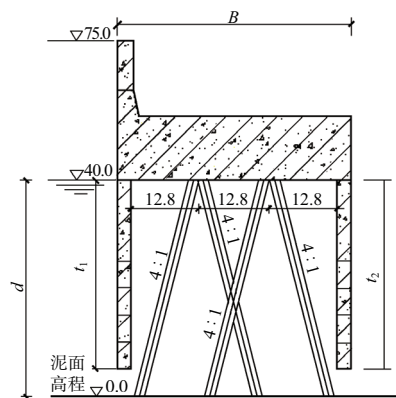


图2 桩基挡板透空式防波堤断面(单位: cm)

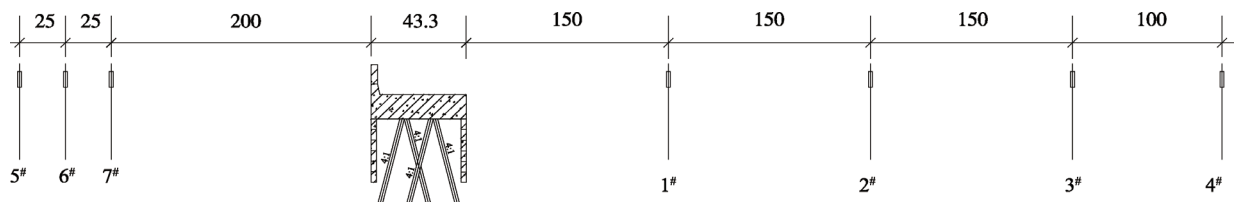


图3 波浪仪放置位置(单位: cm)

1.3 试验参数

本次试验保持防波堤堤顶宽度和水深 $d=40\text{ cm}$ 不变,采用不规则波作为入射波,其中不规则波的谱型选用改进JONSWAP谱, $\gamma=3.3$ 。采用上跨零点法,通过调节阈值将由于破碎和反射引起的小波滤掉,取采集时间内1/3大波平均波高作为不规则波的特征波高。试验采用的波要素和前后挡板入水深度分别见表1和表2。

表1 试验采用的波要素

波长 L/cm	波周期 T/s	波高 H/cm
150	1.015 1	6
		8
		10
		12
200	1.227 5	6
		8
		10
		12
300	1.675 3	6
		8
		10
		12
400	2.144 9	6
		8
		10
		12

表2 前后挡板入水深度 cm

T_1	T_2
5	0
	5
10	0
	5
	10
20	0
	5
	10
	15
	20
30	0
	5
	10
	20
	30

2 试验结果与讨论

透射系数可定义为:堤后有效波高,即透射有效波高(H_t)与入射有效波高(H_i)的比值。根据前人的研究,透空式防波堤透浪系数的影响因素主要有:波浪动力要素,挡浪板相对入水深度,相对堤顶宽度等。透射系数与各影响因素的关系式可表示为: $K_t=H_t/H_i=f_1(d,H,L,t_1,t_2,B)$ 。转换成无因次形式,则为:

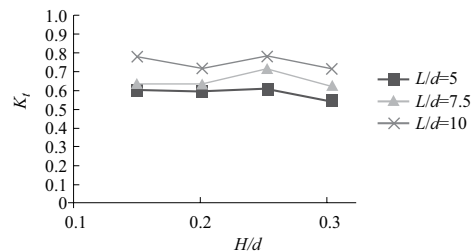
$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f_2\left(\frac{H}{d}, \frac{L}{d}, \frac{t_1}{d}, \frac{t_2}{d}, \frac{B}{L}\right) \quad (1)$$

式中: H/d 为相对波高; L/d 为相对波长; t_1/d , t_2/d 分别为前、后挡浪板相对入水深度, B/L 为相对堤顶宽度。

试验中,实测谱与期望改进JONSWAP谱吻合很好,说明造波机生成的波浪符合设计波要素。因此堤前原始波高即入射有效波高 H_i 取设计波高值。防波堤后布置4根浪高仪,测量堤后各测点处波高,统计堤后透射波高。从试验中发现,1#测点到3#测点处的波高沿程衰减,4#测点处的波高由于水槽后部反射波高与波浪透射波高叠加数值略微偏大,所以堤后波高 H_t 取2#,3#测点处浪高仪测得堤后波高的平均值。

2.1 相对波高对透浪系数的影响

相对波高 H/d 是指入射波高与水深的比值。试验中挡浪墙高度较大,不产生越浪,因此入射波高越大,在相同情况下透射产生的波高也越大。前后挡浪板相对入水深度不同时,相对波高对透射系数的影响如图4所示。从图4中可以看出相对波高对透浪系数的影响幅度较小,在下面的分析过程中暂时不予考虑。



a) $t_1/d=t_2/d=0.25$

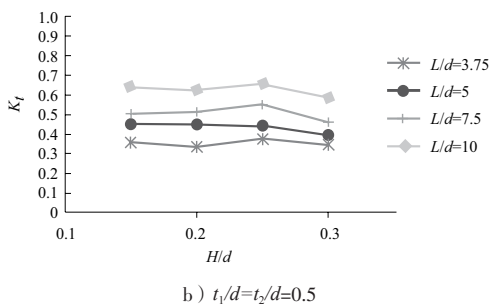


图4 相对波高对透浪系数的影响

2.2 相对波长对透浪系数的影响

相对波长是指波长与水深的比值 L/d 。前后挡浪板入水深度不同时, 相对波长对透射系数的影响如图5所示。

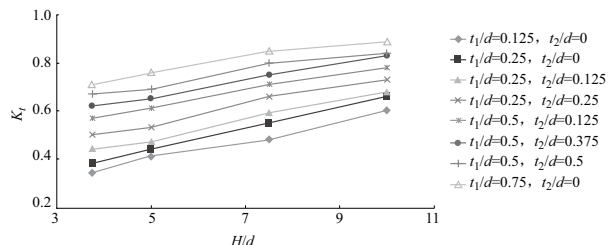


图5 相对波长对透浪系数的影响

从图5中可知, 透浪系数随相对波长 L/d 的增加而增大, 但挡浪板入水深度较小时随相对波长的变化幅度略有减缓。这是因为不同波长的波浪沿水深分布的能量随波长的增加趋于均匀, 从挡浪板底部透过的波浪能量越多, 故长周期波浪的透浪特性更强。

2.3 相对堤顶宽度对透浪系数的影响

相对堤顶宽度是指沿波浪推进方向桩基挡板透空式防波堤的堤顶宽度与波长的比值。相对堤宽 B/L 对透浪系数 K_t 的影响主要取决于单位波长内透空式防波堤与波浪相互作用的长度。随着单位波长内防波堤与波浪相互作用长度的增加, 能量耗散的程度越大, 透浪系数 K_t 越小。相对堤宽 B/L 对透浪系数 K_t 的影响如图6所示。

从图6可以看出, 透浪系数 K_t 随相对堤顶宽度 B/L 的增加而减小, 且变化幅度较大。透浪系数 K_t 在 $0.22 \leq B/L \leq 0.29$ 范围内的变化趋势比在 $0.11 \leq B/L \leq 0.22$ 范围内变化缓慢, 说明透空式防

波堤的堤顶宽度增加到一定程度时, 继续增加对降低透浪系数的效果并不显著。

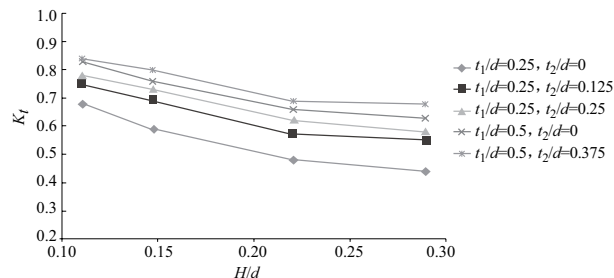
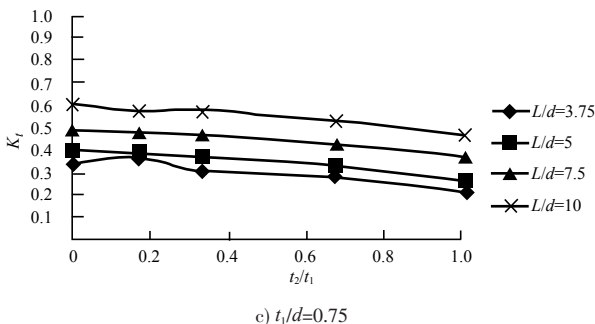
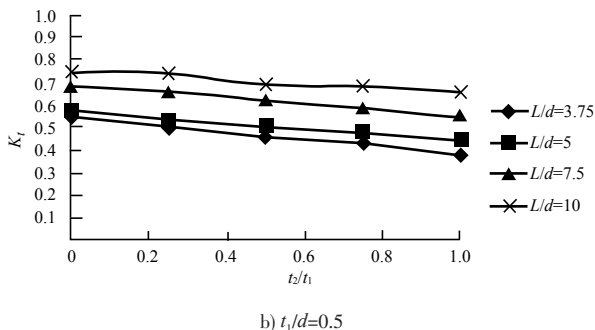
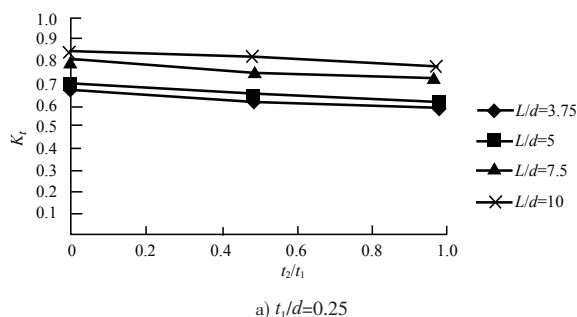
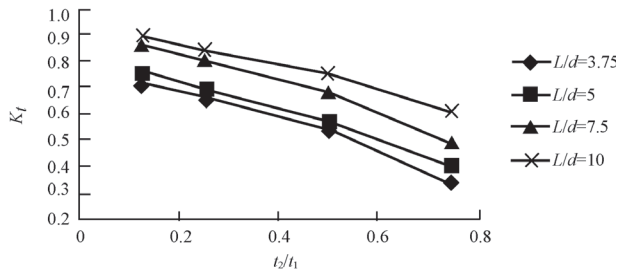


图6 相对堤顶宽度对透浪系数的影响

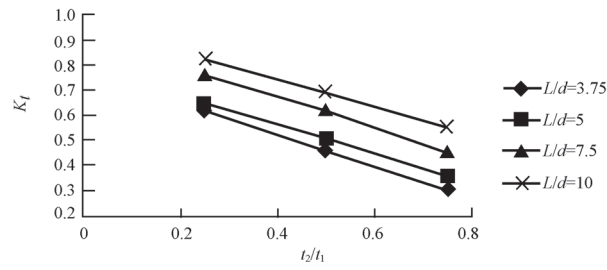
2.4 挡浪板相对入水深度对透浪系数的影响

挡浪板相对入水深度指挡浪板入水深度(即自静水位到挡浪板底的高度)与水深的比值 t/d , 是影响透浪系数的主要因素。挡浪板相对入水深度对透浪系数的影响如图7所示。

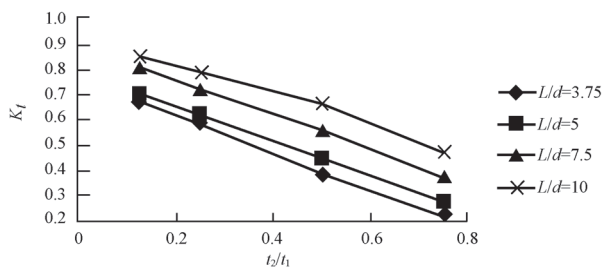




d) $t_2/t_1=0$



e) $t_2/t_1=0.5$



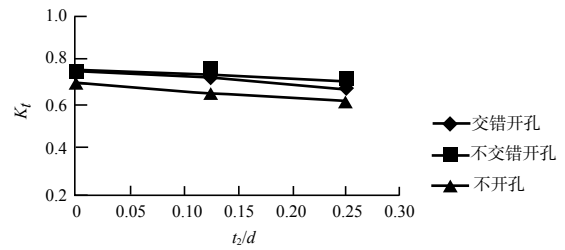
f) $t_2/t_1=1$

图7 透空式防波堤透浪系数随挡浪板入水深度的变化

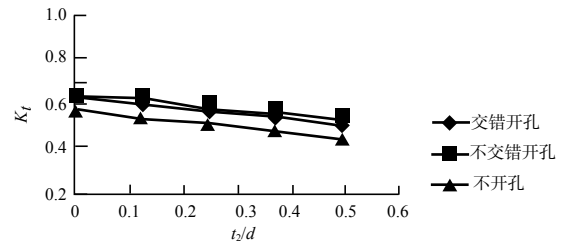
从图7可知，透射系数与相对入水深度近似成线性关系，随着相对入水深度的增大而减小。后挡浪板相对入水深度较大时，增加前挡板的相对入水深度对改善消浪效果更显著。当前挡浪板相对入水深度一定时，随着后挡浪板相对入水深度的增加，透浪系数随之降低，但降低的幅度较小，例如 $t_1/d=0.25$ ，后挡浪板相对入水深度从0增加到与 t_1/d 相同时，消浪效果只改善了10%左右。在前后挡浪板总入水深度相同的情况下，增加前挡浪板的相对入水深度，消浪效果得以加强，前挡浪板的消浪效果优于后挡浪板。因此在实际工程中，为了节约材料用量并得到较好的消浪效果，应尽量增加前挡浪板的相对入水深度。

2.5 挡浪板开孔对透浪系数的影响

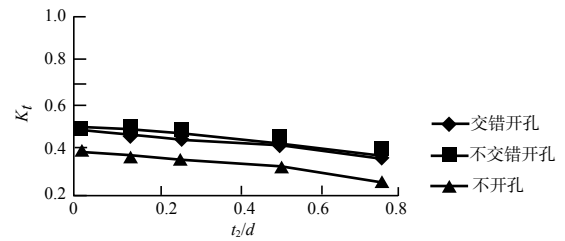
本次试验挡浪板开孔率为8.8%。各种波要素以及挡浪板相对入水深度情况下，前后挡浪板不开孔、交错开孔、不交错开孔对桩基挡板透空式防波堤透浪系数的影响如图8所示。



a) $L/d=5, t_1/d=0.25$



b) $L/d=5, t_1/d=0.5$



c) $L/d=5, t_1/d=0.75$

图8 透浪系数随挡浪板入水深度的变化

从图8可以看出，挡浪板不开孔时的透浪系数最小，其次是前后挡浪板交错开孔时，前后挡浪板不交错开孔时的透浪系数最大。挡浪板相对入水深度较小时，挡浪板不开孔时的透浪系数小于交错开孔时的透浪系数，但相差较小，均在10%以内；挡浪板相对入水深度较大时，挡浪板不开孔的消浪效果与挡浪板交错开孔时相比有明显提高，当前后挡浪板相对入水深度均为0.75时，交错开孔时的消浪效果比不开孔时降低30%。

3 透浪系数试验值与各家公式计算值的比较

透浪系数试验值与拉帕公式和Wiegel公式计算值的比较见图9和图10。从图中可以看出拉帕公式在挡板入水深度较大、透浪系数较小时计算结果小于试验值，这主要是因为拉帕公式是通过双侧挡浪板入水深度相同的透空式防波堤试验研究得到，适用于等深的双挡浪板，而本文考虑了前后挡浪板非等深的情况；在挡浪板入水深度较

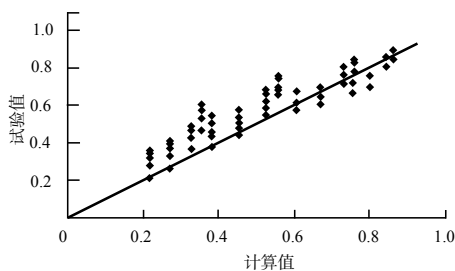


图9 试验值与拉帕公式计算值比较

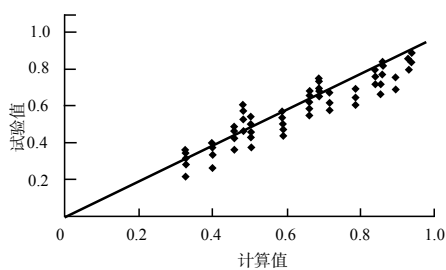


图10 试验值与wiegel公式计算值比较

小时计算结果与试验值的误差较小, 吻合程度较好。Wiegel公式基于单挡浪板的情况, 消浪效果比双挡浪板透空式防波堤差, 公式计算值总体大于试验值, 但在挡浪板入水深度较大时计算结果与试验值的误差较小, 吻合程度较高。

4 透浪系数计算公式拟合

本文透射系数是在拉帕公式基础上乘以一个修正系数 C 得到, 即 $K_t = CK_w$ 。假设相对入水深度 ($t_1/d, t_2/d$) 对透浪系数的影响为线性关系, 相对堤顶宽度 (B/L)、相对波长 (L/d) 对其的影响则为非线性关系。通过拟合修正系数 C 与 4 个无量纲因素 ($t_1/d, t_2/d, B/L, L/d$) 的关系, 得到桩基挡板透空式防波堤透浪系数的修正公式为:

$$K_t = \left\{ -0.1357 \times \left[\left(0.1424 \times \frac{t_1}{d} + 0.0115 \right) \cdot \left(0.2385 \times \frac{t_2}{d} - 4.3423 \right) \exp \left(6.0364 \times \frac{B}{L} - 4.6073 \right) \cdot \exp \left(0.2003 \right) \times \frac{L}{d} + 4.5594 \right] + 0.8057 \right\} K_w \quad (2)$$

适用范围为: $B/L=0.11 \sim 0.29, t_1/d=0.125 \sim 0.75, t_2/d=0 \sim 1, L/d=3.75 \sim 10$ 。

其中拉帕公式的透浪系数:

$$K_w = \sqrt{\frac{(1 - \varepsilon) \operatorname{sh} \frac{2\pi}{L} (d - t) \operatorname{sh} \frac{2\pi}{L} (2d - t)}{\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L} \operatorname{sh} \frac{4\pi d}{L}}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{H}{H + 0.5L} \exp \left[-\frac{t}{2(d - t)} \right] \quad (4)$$

修正公式计算值 K_t 与试验值的相关系数为 0.987, 吻合程度较高 (图 11)。

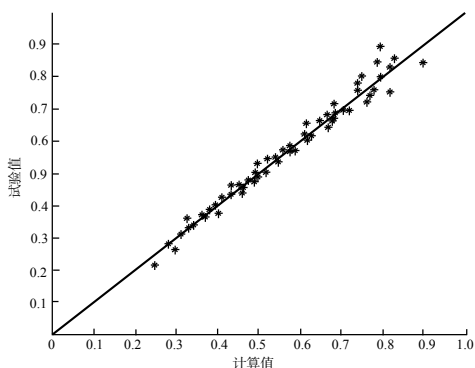


图11 透浪系数修正公式计算值与试验值比较

5 结语

基于波浪水槽试验, 对透空式防波堤开展试验研究。研究表明, 在不规则波作用下挡浪板相对入水深度 ($t_1/d, t_2/d$) 是影响透浪系数的最重要因素。相对入水深度越大, 消浪效果越好, 当前后挡浪板总入水深度相同时, 增加前挡浪板的相对入水深度, 消浪效果最显著。随着相对堤宽 B/L 增大透浪系数降低, 但大到一定程度时, 继续增加其值对降低透浪系数的效果并不显著。挡板开孔相对位置对透浪效果的影响并不大。

参考文献:

- [1] 严恺. 中国海岸工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992.
- [2] 冯卫兵. 海洋工程水文学[M]. 南京: 河海大学, 2004.
- [3] Ursell F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water[J]. Proc of the Cambridge Philosophical Society, 1947(43):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.

(下转第79页)