



多层挡板透空堤消浪效果影响因素试验研究

胡 萍，高 源，冯 静，张岩松，廖 欣，严士常，郑金海
(河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098)

摘要：挡板式透空防波堤适用于水深较大、地基承载能力较差的情况。通过物理模型试验，验证双侧挡板透空堤结构参数与波要素对消浪效果的影响，主要研究相对板宽在 $[0.25, 1.5]$ 范围内透浪系数的变化规律；同时得到多层挡板消浪效果明显优于单层挡板的结论，给出工程最优设计组合。通过对透浪系数计算方法的研究，考虑水深变化与波能反射影响，对 Wiegel 公式与 Kriebel 公式进行修正得到新的结构形式并通过拟合得到双侧挡板透空式防波堤的透浪系数计算公式，与试验数据吻合较好，可供实际参考。

关键词：透浪系数；防波堤；相对板宽；水深；反射；多层挡板
中图分类号：U 656.24 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-4972(2015)11-0059-08

Experimental research on factors influencing effect
of wave dissipation of multi-layer-barriers permeable breakwater

HU Ping, GAO Yuan, FENG Jing, ZHANG Yan-song, LIAO Xin, YAN Shi-chang, ZHENG Jin-hai
(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Permeable breakwater with barriers is applicable to the situation of deep water and poor foundation bearing capacity. By physical model experiment, we verify the rules between both parameters of the model and wave elements and the effect of wave dissipation of double barriers permeable breakwater, which mainly studies the transmission coefficient variation rule of transmission coefficient in the range of $[0.25, 1.5]$. The wave dissipation effect of multi-layer-barriers permeable breakwater is obviously better than the single one, and an optimal engineering design can be given. Through the research on the calculation method of the wave transmission coefficient, we obtain a new structural form by modifying the Wiegel equation and Kriebel equation which fit the double-layer-barriers permeable breakwater, providing reference for the practical engineering calculation.

Keywords: transmission coefficient; breakwater; relatively plate width; water depth; reflection; multi-barrier

透空式防波堤较传统实体式防波堤而言是一种新型防波堤，其依据波浪传播过程中大部分波浪能量集中在表层水体这一特点，将挡浪结构置于该水深波浪的作用范围内以减小堤后波高，适用于水深较大、地基承载能力较差而波浪作用不是十分强烈的情况。它容许部分波浪能量随同水体通过堤身传输到堤后，相对实体堤身，其承受的波浪力相应减小，可有效减少港内淤积，对周围动力环境的影响也有所减少。近年来，透空式防波堤凭借透空堤结构形式和造价的优势，在实际工程中

得到了日益广泛的应用，其中，舟山市定海区西码头使用桩基挡板式透空式防波堤，黄歧渔港使用多层挡板桩基透空堤，均取得了较好的效果。

国外在 20 世纪对透浪系数公式展开研究，1947 年 Ursell^[1]研究了无限水深时挡浪板的透浪系数，给出了直立薄板的精确解；1960 年 Wiegel^[2]假定透射波能等于薄板下的入射波波能，由微幅波理论得出有限水深时透浪系数的解析解；1996 年 Kriebel 等^[3]考虑挡板对波能产生的反射，按波能流守恒推导出挡浪板透浪系数；我国《防波堤设

计与施工规范》^[4]采用苏联拉帕教授总结的公式。相对于国外,我国主要通过物模对实际工程问题进行分析,严以新等^[5]进行了多层挡板桩基透空堤的物模试验,分析其消浪机理,得到挡板透空率等因素对透浪系数的影响情况;孙士勇^[6]结合崇明岛新河镇车客渡码头工程,分析双层挡板透空堤消浪效果并对内外两侧的周期比较分析,得出堤后周期相对堤前较小;麻志雄等^[7]通过试验研究,分析了挡浪板的消浪工况与效果,得到双侧挡板消浪效果明显优于单层挡板;陈德春等^[8]进行断面波浪模型试验,结果表明,在不同水深时,穿过透空堤的波浪大小不同,从而透浪系数也不同;范骏等^[9]通过试验探究了具有双侧挡浪板结构的透空式防波堤透浪系数与反射系数的影响因素与规律,得到相对板宽在 $[0.07, 0.25]$ 范围内,透浪系数随着相对板宽的增大而缓慢减小,并引入波能修正因子拟合双层挡板透空堤透浪系数公式。虽然国内外已有一定研究,但挡板式透空堤在国内外的理论研究与工程实例依然不多,且各家研究成果适用条件各不相同,因此对多层挡板结构的防波堤消浪特性及变化规律开展研究具有一定意义。

1 物理模型试验设计

1.1 物理模型设计

物理模型设计与试验方法均遵守 JTJ/T 234 — 2001 《波浪模型试验规程》^[9]。模型水平面板下布置纵横梁,图 1 为模型剖面,图 2 为纵横梁尺寸。图中: B 为透空堤水平面板宽度, t_1 为前挡浪板入水深度(可变范围为 $0 \sim 20$ cm), t_2 为后挡板入水深度(可变范围为 $0 \sim 40$ cm), t_3 为中间挡板入水深度(可变范围为 $0 \sim 30$ cm), H_c 为面板超高,即面板底和静水位高差。随着水深变化,水平面板超高与挡板入水深度相应发生变化。表 1 为多层挡板透空堤试验工况。

表 1 多层挡板透空堤模型试验工况

工况	板宽 B/m	挡板组合/cm		
		前	中	后
1	1.40	20		40
2	1.05	20		40
3	0.70	20		40
4	0.35	20		40
5	2.80	20		40
6	0.70	20	30	40
7	0.70	30		40
8	1.05	20	30	40

注:表中挡板入水深度组合均指水深为 0.5 m 时的不同组合。

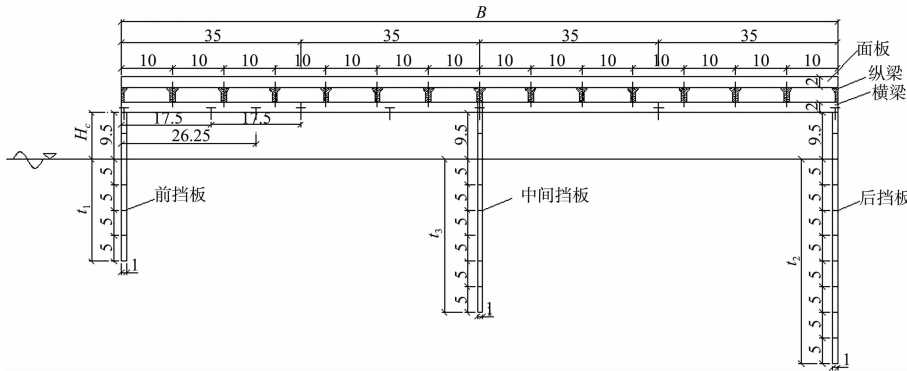


图 1 试验模型纵剖面 (单位: cm)

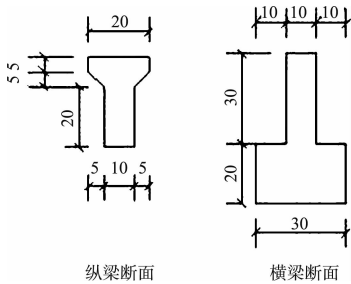


图 2 纵横梁尺寸 (单位: mm)

1.2 物理模型试验设备

试验在河海大学不规则波浪水槽中进行,采用电容式波高仪采集波高。图 3 为试验水槽中模型与浪高仪的布置。

1.3 物理模型试验方法

试验采用不规则波,不规则波波谱采用 JONSWAP 谱。试验波要素见表 2。

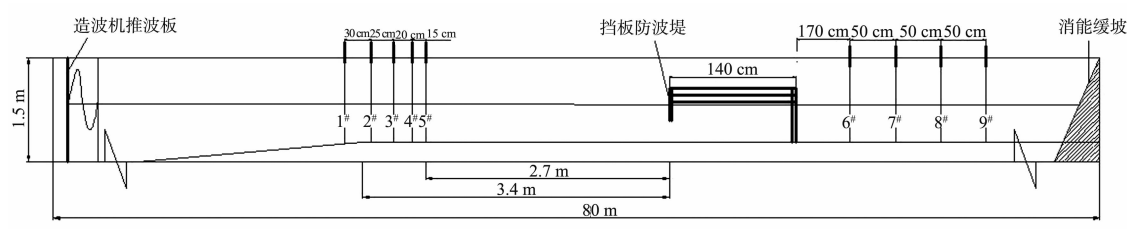


图 3 试验水槽中模型与浪高仪布置

表 2 透空堤试验波要素

水深 d/m	波高 H_s/m					
	$\bar{T}=1.3\text{ s}$	$\bar{T}=1.6\text{ s}$			$\bar{T}=1.9\text{ s}$	$\bar{T}=2.2\text{ s}$
0.3	0.12	0.08	0.10	0.12	0.12	0.12
		0.14	0.16			
0.4	0.12	0.08	0.10	0.12	0.12	0.12
		0.14	0.16			
0.5	0.12	0.08	0.10	0.12	0.12	0.12
		0.14	0.16			

2 透空堤消浪效果影响规律分析

透空式防波堤在结构宽度方向对波浪产生的影响主要包括 4 个方面：1) 波浪与前挡板相互作用发生破碎、反射和透射，其中波浪的破碎和反射是透射波能削减的主要原因；2) 波浪发生越浪，波能损耗并影响堤后波高；3) 在防波堤内，由于前、后挡板对波浪的反射作用，波浪在堤内叠加，波高增大，堤内水域紊动加剧，增加能量损耗；4) 在前、后挡板间水域波峰与水平面板及纵横梁接触，接触面越大，消能作用愈明显。

2.1 堤后透射波高分布规律概形检验

将 Weibull 分布和 Rayleigh 分布作为波高分布模型，取透空堤模型后 1 倍波长外的的波高仪测点 9# 的波高值与其平均值比值 $H_i/\bar{H}$ 作为检验的样本，采用非参数假设检验的 K-S 检验方法进行波高概率分布分析（图 4），显著性水平 $\alpha=0.05$ 。其中，试验组次普遍不符合 Rayleigh 分布，88.3% 符合 Weibull 分布。由图 4 可以看出组次 316128A 不符合 Rayleigh 分布，但符合 Weibull 分布。

2.2 双侧挡板透空堤结构参数与波要素对消浪效果的影响

取堤后 1 倍波长以外测点的有效波高作为堤后有效波高 H_T ，堤前入射有效波高 H_s 作为堤前入射波高 H_I ，采用透浪系数 $K_I=H_T/H_I$ 研究透空

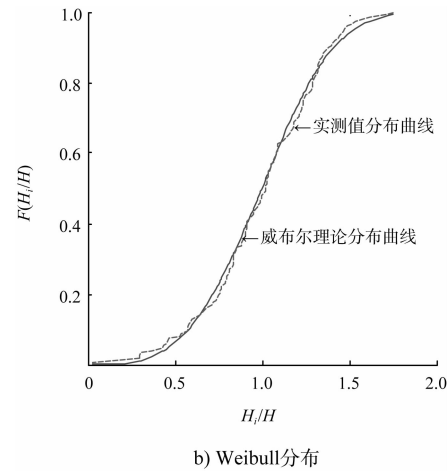
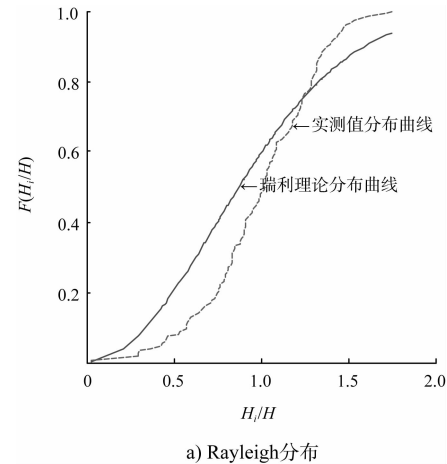


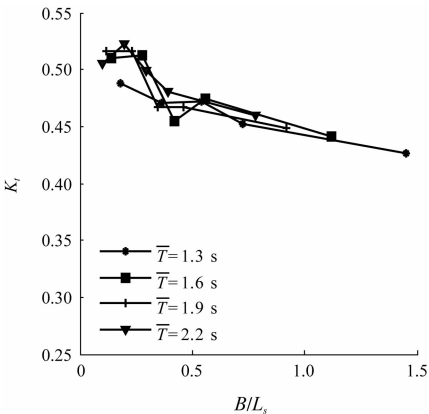
图 4 组次 316128A 测点 9# 概率分布拟合结果

堤对堤后波高的影响，透浪系数越小，消浪效果越好。采用无因次参数分析研究影响透空堤消浪效果的因素，其中，透空堤结构参数为水平面板相对宽度 B/L_s ，波浪参数包括：相对波高 H_s/d 、波陡 H/L_s (δ)、相对水深 d/L_s 。

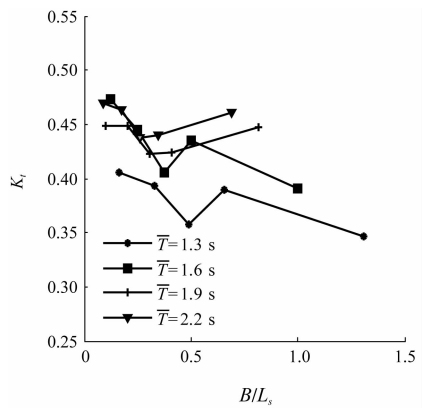
2.2.1 水平面板相对宽度 B/L_s 对消浪效果的影响

图 5 是透浪系数随结构相对板宽的变化，其中 a 、 b 、 c 分别为水深 $d=0.5$ 、 0.4 、 0.3 m 的情况。相对板宽范围为 $0.07\leq B/L_s\leq 1.5$ ，在这一范围内，透浪系数总体呈现下降趋势，这是由于随

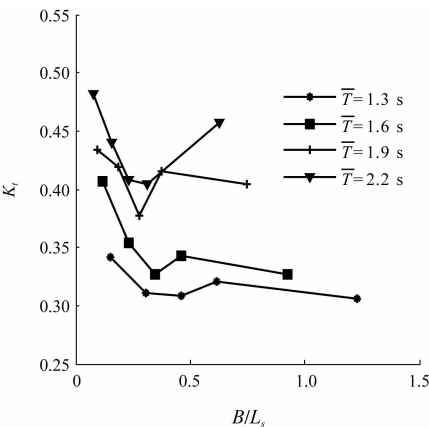
着相对板宽的增大, 波浪在防波堤内区域范围内, 在前、后挡板间水域波峰与水平面板及纵横梁的接触面增大, 能量损耗程度增大。此外, 相同波高条件下, 波浪周期越小, 透浪系数越小, 消浪效果越好; 但随着相对周期减小, 透浪系数对相对板宽的变化不敏感, 周期最大时透浪系数变化趋势最为显著, 随着周期的减小变化趋势趋缓。



a) $H_s=12\text{ cm}$, $d=0.3\text{ cm}$, $t_1/d=0.00$, $t_2/d=0.67$



b) $H_s=12\text{ cm}$, $d=0.4\text{ cm}$, $t_1/d=0.25$, $t_2/d=0.75$



c) $H_s=12\text{ cm}$, $d=0.5\text{ cm}$, $t_1/d=0.40$, $t_2/d=0.80$

图 5 水平面板相对宽度与透浪系数关系

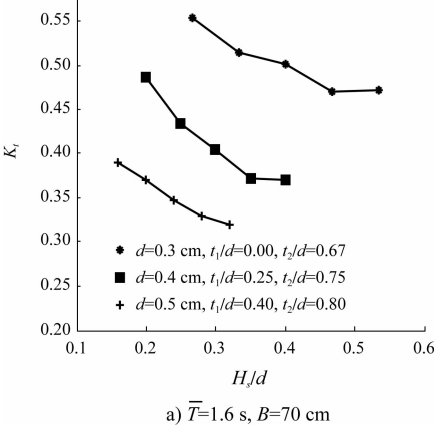
$0.07 \leq B/L_s \leq 0.5$ 范围内, 透射系数总体呈明显减小再微幅增大的规律。在 $0.07 \leq B/L_s \leq 0.4$ 范围内, 透浪系数明显减小。在 $0.25 \leq B/L_s \leq 0.4$ 范围内, 透浪系数减小趋势显著并出现谷值, 根据试验现象推断产生谷值原因为: 1) 相对于 $0.07 \leq B/L_s \leq 0.25$, 在这一范围内, 小周期波浪在后挡板的二次反射作用下在堤内与入射波叠加, 堤内水域紊动较为剧烈, 增加了能量的损耗, 使透过防波堤的波浪能量大大降低; 2) 发生越浪现象的次数明显降低, 越浪对堤后水域波高的影响降低, 透浪系数减小。在 $0.40 \leq B/L_s \leq 0.50$ 范围内, 透浪系数微幅增大。

$0.5 \leq B/L_s \leq 1.5$ 范围内, 透浪系数减小但幅度有限, 认为消浪效果变化不大。

综上可以认为: 双侧挡板透空堤相对板宽 B/L_s 在 0.4 左右时, 可以达到较好的消浪效果, 而随着相对板宽的进一步增大, 消浪效果变化不大。

2.2.2 相对波高 H_s/d 对消浪效果的影响

图 6 是透浪系数随相对波高的变化。相对波高的变化范围为 $0.16 \leq H_s/d \leq 0.53$, 在这一范围内随着相对波高的增大, 透射系数总体呈缓慢减小趋势。这是由于相对波高越大, 波浪越容易破碎, 波能损耗越大。此外, 由图 6b) 可以看出, 水深较小时, 随着相对板宽的增大, 透浪系数相差不大, 其中 $B/L_s=0.5$ 曲线偏差明显, 这可能是由于后挡板的反射波与透过前挡板的波浪叠加, 水域紊动, 波能损耗。由图 6c) 可以看出, 水深较大时, 随着相对板宽的增大, 透浪系数减小, 相对板宽 $B/L_s=0.125$ 时, 消浪效果最差。



a) $\bar{T}=1.6\text{ s}$, $B=70\text{ cm}$

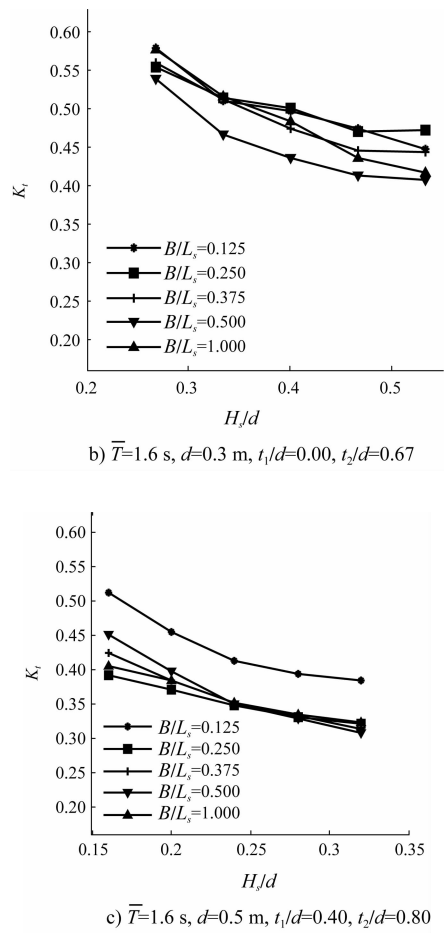


图 6 相对波高与透浪系数关系

2.2.3 波陡 H_s/L_s (δ) 对消浪效果的影响

图 7 是透浪系数随波陡的变化。波陡的变化范围为 $0.026 \leq \delta \leq 0.063$, 在这一范围内, 随着波陡的增加, 透射系数总体呈减小趋势, 且随着水深的增大, 透浪系数显著减小。与相对波高的规律相似, 波陡越大, 波浪越易破碎, 波能损耗越大, 透浪系数越小。

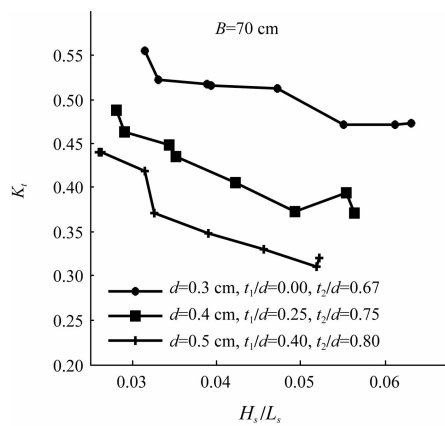


图 7 波陡与透浪系数关系

2.2.4 相对水深 d/L_s 对消浪效果的影响

图 8 是透浪系数随相对水深的变化, 相对水深变化范围为 $0.09 \leq d/L_s \leq 0.22$ 。在 $0.09 \leq d/L_s \leq 0.15$ 范围内, 透射系数变化较为缓慢; 在 $0.15 \leq d/L_s \leq 0.22$ 范围内, 透射系数变化趋势较明显。总体来看, 透浪系数为减小趋势, 相对水深越大, 消浪效果越好。这是由于透空堤本身结构不变时, 水深改变的同时引起了超高与入水深度的改变, 并产生影响: 1) 水平面板超高变化会引起前、后挡板间波峰与水平面板及纵横梁接触面积的改变, 接触面积越大, 波能损耗越大。 $d=0.3$ m 时超高 $H_c=29.5$ cm, 波浪几乎不与水平面板及纵横梁作用; 而 $d=0.4$ m 与 $d=0.5$ m 时超高分别为 $H_c=19.5$ cm 与 $H_c=9.5$ cm, 波浪与水平面板及纵横梁相互作用, 且 $d=0.5$ m 时作用强度更大。2) 波浪的能量集中分布在水体表层, 在水深为 2 倍波高范围内集中了全部波能的 90%。随着水深的增大, 前后挡板入水深度增加, 挡板入水深度的改变会影响挡板前反射的波能大小, 即影响透过挡板的波能大小, 挡板入水深度越大, 透过挡板的波能越小, 透浪系数越小, 消浪效果较好。

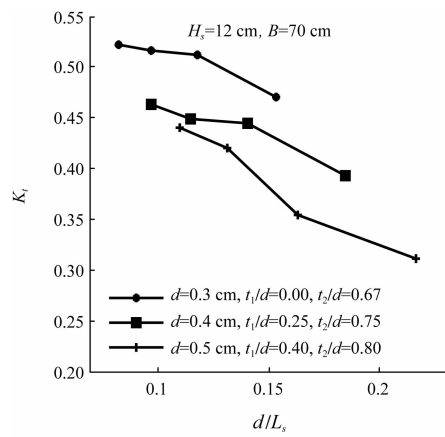


图 8 相对水深与透浪系数关系

此外, 通过图 7、6 a) 也可以发现相似的规律: 对比水深为 $d=0.5$ 、 0.4 、 0.3 m 的 3 条透浪系数曲线, 水深由 $d=0.3$ m 增加至 $d=0.4$ m 时, 透浪系数减小相对较大; 水深由 $d=0.4$ m 增加至 $d=0.5$ m 时, 透浪系数减小值相对较小。同时, 对比图 6 的 b)、c) 两图也可以得到相同结论。

可以得出,水深变化会引起超高和挡板入水深度的较大变化,进而引起透射系数的较大改变,应在公式拟合中综合考虑水深、超高与挡板入水深度对透空堤消浪效果的影响。

2.3 多层挡板与单侧挡板消浪效果对比研究

2.3.1 单侧、双侧与 3 层挡板消浪效果对比

图 9 为透浪系数随挡板数的变化,图中 3 条曲线分别为单侧挡板、双侧挡板与 3 层挡板情况。表 3 将透浪系数进行对比,得到双侧挡板相对单侧挡板透空堤消浪系数减小约 33%,在此基础上,3 层挡板相对双侧挡板透空堤消浪系数减小约 20%。相对于单、双侧挡板,3 层挡板消浪效果最优。

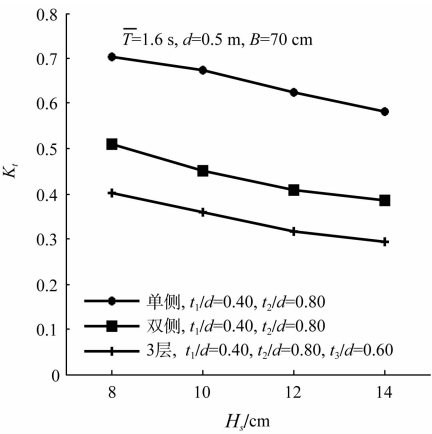


图 9 挡板数与透浪系数关系

表 3 单、双侧与 3 层挡板透浪系数对比

波高/ cm	单侧挡板 1	双侧挡板 2	3 层挡板 3	$[(1-2)/1]/\%$	$[(2-3)/2]/\%$
8	0.701	0.513 3	0.400 3	26.78	22.02
10	0.674	0.450 1	0.360 6	33.22	19.87
12	0.625	0.408 0	0.317 8	34.72	22.11
14	0.583	0.384 8	0.294 6	34.00	23.45

2.3.2 不同相对板宽多层挡板消浪效果对比

图 10 为多层挡板情况下 $B/L_s=0.25$ 与 $B/L_s=0.375$ 两种情况透浪系数的变化,可以看出,加入中间挡板前后,相对板宽 $B/L_s=0.375$ 消浪效果都明显优于 $B/L_s=0.25$ 。考虑到 $B/L_s \geq 0.40$ 时消浪效果变化不明显,因而,工程上可以采用相对板宽为 $B/L_s=0.375$ 进行设计,并根据实际需要设置双侧或 3 层挡板结构,可以达到较好的效果。

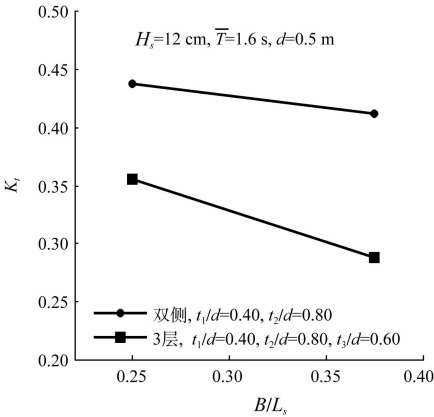


图 10 多层挡板板宽变化与透浪系数关系

3 双侧挡板透空堤透浪系数计算方法分析

3.1 前人透浪系数计算方法理论

3.1.1 单侧挡板透浪系数计算方法理论

1960 年, Wiegel 在不考虑挡板反射条件下,利用波能流守恒,假设透射波的能量等于挡板下的入射波能量,由微幅波理论推导出有限水深无越浪情况下的近似解析解。入射波能量对应的波高为 H_i ,由挡板透射到堤后的透射波能量产生的透过波高为 H_T ,由于能量与波高二次方成正比关系, $E \propto H^2$,则有透浪系数公式:

$$K_T = \frac{H_T^2}{H_i^2} = \frac{\sqrt{2k(d-t) + \sinh[2k(d-t)]}}{2kd + \sinh(2kd)} \tag{1}$$

1996 年 Kriebel 在 Wiegel 理论公式基础上,考虑挡板产生的反射,除入射能量外,还将反射能量计入透射总能量中,由微幅波理论推导出挡浪板的透浪系数公式:

$$K_T = \frac{2T_F}{1 + T_F} \tag{2}$$

其中 $T_F = \frac{2k(d-t) + \sinh[2k(d-t)]}{2kd + \sinh(2kd)} \tag{3}$

3.1.2 双侧挡板透浪系数计算方法理论

我国规范采用苏联拉帕教授的公式,拉帕通过等深双侧挡板试验,引入局部损失阻力系数 ε ,推导出适用于 $d/L_s \geq 0.25$ 、 $d/H_s \geq 2 \sim 3$ 情况的透浪系数公式:

$$K_T = \frac{H_T^2}{H_i^2} = \frac{\sqrt{(1-\varepsilon)\sinh[k(d-t)]\sinh[k(2d-t)]}}{\sinh(kd)\sinh(2kd)} \tag{4}$$

$$\text{其中 } \varepsilon = \frac{H_l}{H_l + 0.5L_s} e^{-\frac{t}{2(d-t)}} \quad (5)$$

范骏在 Wiegel 理论公式基础上, 认为两侧挡板作用相互独立, 互不影响, 并考虑波浪绕射的影响, 引入波能修正因子 η_0 , 得到适用于 $0.07 \leq B/L_s \leq 0.25$ 、 $0.11 \leq d/L_s \leq 0.22$ 的双侧挡板透空堤透浪系数公式:

$$K_T = \sqrt{\eta_0 K_{w1}^2 K_{w2}^2} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \eta_0 = \left[0.53 \tanh(kd) - 1.5 \cdot \frac{B}{L_s} + 0.3 \right] \cdot e^{\left(\frac{t_1}{d} + \frac{t_2}{d} \right)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_{w1}^2 = \frac{2k(d-t_1) + \sinh[2k(d-t_1)]}{2kd + \sinh(2kd)} \\ K_{w2}^2 = \frac{2k(d-t_2) + \sinh[2k(d-t_2)]}{2kd + \sinh(2kd)} \end{cases} \quad (8)$$

3.2 双侧挡板透空堤透浪系数试验值与范骏公式比较

试验主要研究双侧挡板透空堤消浪效果, 模型前后挡板入水深度不等, 采用范骏公式检验。图 11 是双侧挡板透空堤透浪系数试验值与范骏公式计算值比较, 试验值与范骏公式计算值相差较大, 整体表现为公式计算值比试验值偏小, 这可能由于范骏公式没有考虑水深变化情况与前、后挡板间波浪反射对透浪系数的影响。而由图 8 可知, 水深变化对透浪系数影响较大, 在推导公式中应加以考虑。

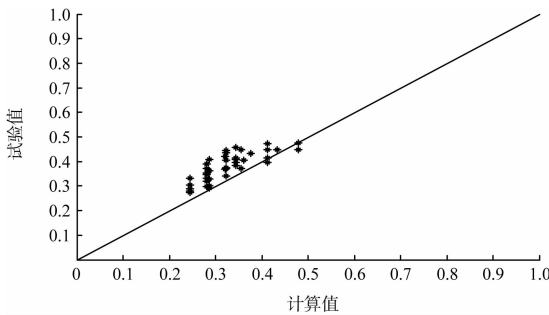


图 11 透浪系数试验值与范骏公式的比较

3.3 双侧挡板透浪系数公式理论分析与推导

图 12 为波能传播过程中的波能损耗。其中, 入射波波能对应的波高值为 H_l , 透过第 1 层挡板的波浪波能对应的波高值为 H' , 最终透射到堤后的透射波能量对应的波高值为 H_T , 透浪系数为:

$$K_T = H_T/H_l \quad (9)$$

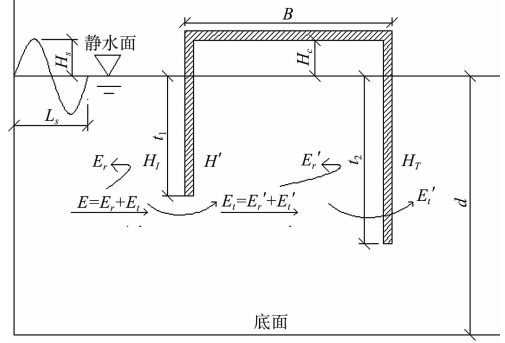


图 12 波能损耗

3.3.1 透浪系数公式理论分析

波浪通过前挡板时采用 Wiegel 公式作为计算公式结构, 波浪通过前挡板时发生反射, 反射波波能只影响堤前水域, 对堤后水域没有影响; 波浪通过后挡板时采用 Kriebel 公式作为计算公式结构, 波浪通过后挡板时再次发生反射, 反射波在堤内又与前、后挡板作用, 同时与入射波叠加, 堤内水域紊动加剧, 此时应考虑反射波波能对堤后水域的影响。但 Wiegel 公式与 Kriebel 公式均未考虑波浪与挡板作用过程中水流紊动与破碎造成的波能损耗, 因而引入波能损耗因子 ξ 对公式进行修正。

3.3.2 透浪系数公式推导

根据 Wiegel 公式, 得到波浪通过前挡板前后波高的比值关系:

$$\frac{H'^2}{H_l^2} = T_{F1} \quad (10)$$

$$\text{其中 } T_{F1} = \frac{2k(d-t_1) + \sinh[2k(d-t_1)]}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (11)$$

根据 Kriebel 公式, 得到波浪通过后挡板前后波高比值关系:

$$\frac{H_T^2}{H'^2} = \frac{2T_{F2}}{1 + T_{F2}} \quad (12)$$

$$\text{其中 } T_{F2} = \frac{2k(d-t_2) + \sinh[2k(d-t_2)]}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (13)$$

引入波能损耗因子 ξ , 得到透浪系数公式结构形式如下:

$$K_T = \sqrt{\xi \cdot \frac{H_T^2}{H_l^2}} = \sqrt{\xi \cdot \frac{H'^2}{H_l^2} \cdot \frac{H_T^2}{H'^2}} = \sqrt{\xi \cdot T_{F1} \cdot \frac{2T_{F2}}{1 + T_{F2}}} \quad (14)$$

3.4 双侧挡板透浪系数公式拟合

在波浪通过整个防波堤过程中,影响防波堤消浪效果的主要因素包括:相对板宽 B/L_s 、波陡 H_s/L_s 、相对水深 d/L_s 、水平面板相对超高 H_c/H_s 、前挡板入水深度 t_1/d 、后挡板入水深度 t_2/d 。波能损耗因子 ξ 形式如下:

$$\xi = e^{[k_1 \frac{B}{L_s} + k_2 \frac{H_s}{L_s} + k_3 \frac{d}{L_s} + k_4 \frac{H_c}{H_s} + k_5 (\frac{t_1}{d} + \frac{t_2}{d})]} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),得到透浪系数的计算公式结构如下:

$$K_T = \sqrt{e^{[k_1 \frac{B}{L_s} + k_2 \frac{H_s}{L_s} + k_3 \frac{d}{L_s} + k_4 \frac{H_c}{H_s} + k_5 (\frac{t_1}{d} + \frac{t_2}{d})]} \cdot T_{F_1} \cdot \frac{2T_{F_2}}{1 + T_{F_2}}} \quad (16)$$

将数据代入计算公式,进行非线性拟合,得到以下系数: $k_1 = -0.178$ 、 $k_2 = -26.78$ 、 $k_3 = 9.156$ 、 $k_4 = -0.119$ 、 $k_5 = -0.116$ 。

将上述系数代入式(16),得到双侧挡板透空堤透浪系数公式:

$$K_T = \sqrt{e^{[-0.178 \frac{B}{L_s} - 26.78 \frac{H_s}{L_s} + 9.156 \frac{d}{L_s} - 0.119 \frac{H_c}{H_s} - 0.116 (\frac{t_1}{d} + \frac{t_2}{d})]} \cdot T_{F_1} \cdot \frac{2T_{F_2}}{1 + T_{F_2}}} \quad (17)$$

公式适用于由于水深变化引起的水平面板相对超高与相对入水深度改变的情况,适用范围为: $0.07 \leq B/L_s \leq 1.5$ 、 $0.026 \leq H_s/L_s \leq 0.063$ 、 $0.09 \leq d/L_s \leq 0.22$ 。

图 13 是透浪系数试验值与修正公式计算值的比较,可以看出,试验情况与拟合公式的计算结果符合情况较好。

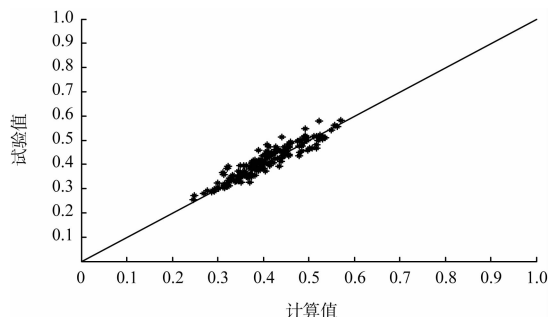


图 13 透浪系数试验值与修正公式计算值比较

4 结语

1) 3 层挡板透空堤消浪性能最优,单侧挡板透空堤最差,多层挡板结构可以更有效地保证堤

后水域平稳。

2) 双侧挡板透空堤结构参数对消浪效果的影响:相对板宽范围在 $0.07 \leq B/L_s \leq 1.50$ 时,透浪系数总体呈下降趋势,相对板宽大小在 0.4 左右可以达到较好的消浪效果,随着相对板宽的进一步增大,消浪效果变化不大。

3) 波要素对消浪效果的影响:相对水深变化范围为 $0.09 \leq d/L_s \leq 0.22$,透浪系数总体随着相对水深增加呈减小趋势;波陡变化范围为 $0.026 \leq \delta \leq 0.063$,相对波高的变化范围为 $0.16 \leq H_s/d \leq 0.53$,透射系数总体随着波陡与相对波高的增加呈缓慢减小趋势。

4) 分别讨论波浪透过前挡板与后挡板时能量的损耗,考虑水深变化与反射波波能的影响,引入能量损耗因子,对 Wiegel 公式与 Kriebel 公式进行修正拟合得到不同水深双侧挡板透空式防波堤的透浪系数计算公式,计算值和试验值吻合较好,可供工程设计参考。

参考文献:

- [1] Ursell F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water [J]. Proc of the Cam Bridge Philo Sophical Society, 1947, 43(3): 374-382.
- [2] Wiegel R L. Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1960, 86(1): 1-12.
- [3] Kriebel D L, Bellmann C A. Wave transmission past vertical wave barriers[C]//Proc of the 25th Coastal Eng Conf, 1996.
- [4] JTJ 298—1998 防波堤设计与施工规范[S].
- [5] 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.
- [6] 孙士勇. 挡板(透空)式防波堤消浪效果分析[J]. 水运工程, 1998(1): 11-15.
- [7] 麻志雄. 透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 水运工程, 1990(10): 3-8.
- [8] 陈德春, 闫少华, 马林. 透空式防波堤在渔船避风港中的综合研究[J]. 江南大学学报, 2013(4): 452-457.
- [9] 范骏, 王宇楠, 杨斯汉. 双挡板透空堤透浪与反射系数试验研究[J]. 海洋工程, 2011, 9(4): 60-66.
- [10] JTJ/ T 234—2001 波浪模型试验规程[S].