

双挡板桩基透空式结构的透浪系数模型试验

黄 璐, 陈国平, 许忠厚, 尹亚军, 周 雅

(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: 通过波浪物理模型试验, 研究桩基透空式结构的影响因子 (包括波陡、挡板的相对入水深度、开孔情况), 给出了各个因素对透射系数的影响规律。结果表明, 挡板的入水深度越大, 透射系数越小; 波陡越小, 透射系数越大; 挡板开孔对透射系数影响相对较小, 但可有效减小波浪作用力。将试验结果与各家透浪系数的理论计算公式以及规范所给的经验公式进行比较, 结果与 Wiegel 公式计算结果吻合较好, Wiegel 公式可为工程设计提供参考。

关键词: 桩基透空式结构; 开孔率; 透射系数; 波浪物理试验

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0023-05

Model test of permeable pile double baffle structure of wave transmission coefficient

HUANG Lu, CHEN Guo-ping, XU Zhong-hou, YIN Ya-jun, ZHOU Ya

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

Abstract: This paper investigates the impact factors of permeable pile structure (including wave steepness, the relative immersed depth of the piled baffle and openings) using the physical model experiment method, and gives the influential law of various factors on the transmission coefficient. The experimental result indicates that the relative immersed depth of the piled baffle and wave steepness have a negative correlation with the transmission coefficient. The impact of baffle openings for the transmission coefficient is relatively small, but it can effectively reduce the wave forces. Comparing the experimental result with various wave transmission coefficients' theoretical formula and empirical formula given by the specification, the Wiegel formula matches well with the result got in this study, so it can be used for reference for the design.

Keywords: pile permeable structure; opening rate; transmission coefficient; wave physical experiment

从理论的角度说, 波浪在传播过程中的大部分能量都集中在表层水体中。桩基透空式结构就是利用这一特点, 将主要的挡浪结构 (大部分挡浪结构是垂直挡板) 置于波能集中的水深范围内, 而下部采用桩基透空结构, 这样不仅可以减轻结构自身的质量, 而且还节省了材料, 又有利于港内外的水体交换, 可以有效防止港内淤积^[1]。桩基透空式结构的水工建筑物适用于水深较大、地

基承载能力较差而波浪作用不是十分强烈的水域。它容许部分波浪能量随同水体通过建筑物传输到建筑物后。

桩基透空式结构改变了在水深方向上材料分布的不合理性, 可节省材料, 降低造价; 并且结构下部透空后, 有利于水体交换, 可保持良好的港内水质条件。由此可见, 桩基透空式结构优势明显。

收稿日期: 2014-12-12

作者简介: 黄璐 (1991—), 女, 硕士研究生, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

透射系数是桩基透空式结构的研究方面的重要问题, K_t 越小表示建筑物后波高越小, 其消浪性能也就越好。国内外很多学者对这种结构消浪效果的理论研究也做了一些工作。1960 年, Wiegel^[2] 在不考虑挡浪板反射的情况下, 利用波能流守恒, 假设透射波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; 1986 年, 邱大洪等在 wiegel 公式的基础上, 提出了反射能量除直接反射外, 另一部分从挡板底部绕射到挡板后; 1996 年 Kriebel 等^[3] 考虑挡板对波能产生的反射, 按照波能流守恒, 推导出挡浪板透浪系数。本文基于前人结论通过模型试验对桩基透空式结构物做了进一步研究。

1 模型设计

物理模型试验 (图 1) 按照《港口工程技术规范》^[4] 及《波浪模型试验规程》^[5] 进行, 试验采用不规则波, 按正态重力相似准则设计模型。结合试验断面及设备性能等因素确定模型长度比尺为 $\lambda = 25$ 。

试验在河海大学风浪水槽中进行, 水槽长 80 m、宽 1.0 m、高 1.5 m, 水槽一端安装液压力推板造波机, 另一端铺设消能缓坡, 水槽纵向分为宽 0.5 m 的两部分, 一部分铺设试验断面, 另一部分用以消除波浪的二次反射。

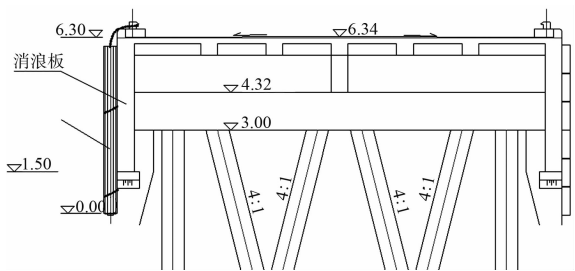


图 1 双挡板桩基透空式结构 (单位: m)

试验根据不同的挡板入水深度以及开孔情况分为 8 个断面, 本文仅研究 7 个断面, 分别为: 1) 第 1 个断面为二期码头断面试验方案 1, 采用带挡板高桩结构, 前挡板和后挡板均开孔, 前后挡板底高程均为 0 m。下称断面 1。2) 第 2 个断面为二期码头断面试验方案 2, 采用带挡板高桩结

构, 前挡板开孔, 后挡板不开孔, 前后挡板底高程均为 0 m, 下称断面 2。3) 第 3 个断面为二期码头断面试验方案 3, 采用带挡板高桩结构, 前挡板开孔, 后挡板不开孔, 后挡板下沿高程降为 -1.0 m, 下称断面 3。4) 第 4 个断面为二期码头断面试验方案 1, 采用带挡板高桩结构, 前挡板和后挡板均开孔, 前后挡板高程均为 1.5 m。下称断面 4。5) 第 5 个断面为二期码头断面试验方案 2, 采用带挡板高桩结构, 前挡板开孔, 后挡板不开孔, 前后挡板高程均为 1.5 m, 下称断面 5。6) 第 6 个断面为二期码头断面试验方案 3, 采用带挡板高桩结构, 前挡板开孔, 后挡板不开孔, 后挡板下沿高程降为 0 m, 下称断面 6。7) 第 7 个断面为二期码头补充方案 1, 采用带挡板高桩结构, 前挡板开孔, 后挡板不开孔, 挡板下沿底高程为 -3.0 m, 下称断面 7。

挡板开孔情况见图 2、3, 开孔率分别为 34%、13.6%。试验采用的波要素见表 1。

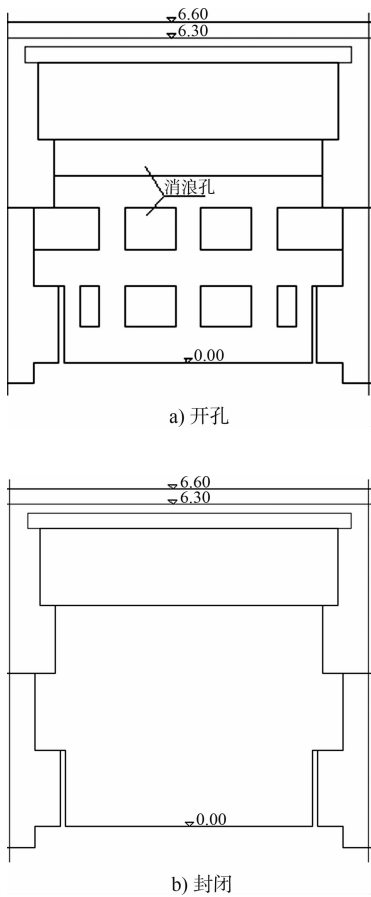


图 2 二期码头挡板开孔情况 (单位: m)

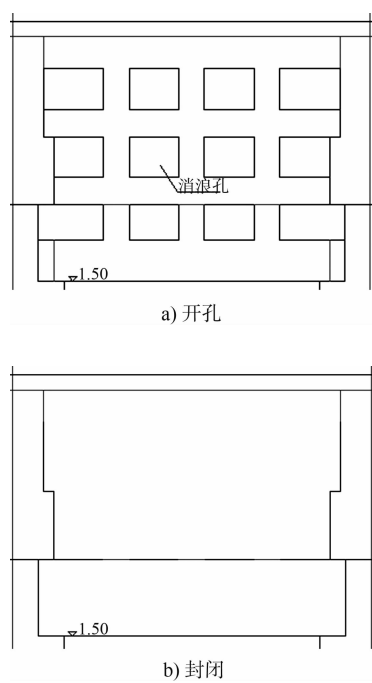


图 3 一期码头挡板开孔情况 (单位: m)

表 1 试验波要素

水深/m	波高 H_s /m	平均周期 T /s
10.21	4.00	16.90
	3.35	16.90
	2.58	12.80
9.01	3.07	16.90
	2.20	12.80
	1.65	7.80
	1.53	3.83
7.00	1.40	7.80
5.03	2.37	16.90
	1.75	12.80
	1.32	7.80
	1.10	3.83

2 试验结果及分析

透射系数为建筑物后波高与建筑物前入射波高之比, 即 $K_t = H_t/H_i$ 。影响桩基透空式结构透射系数的因素比较复杂, 根据前人研究经验及试验观测分析, 可能对结构的消浪效果产生影响的因素有: 入射波高 H_i 、波周期或波长 L 、堤前水深 d 、挡板的入水深度 t 、开孔率 ε , 故透射系数 K_t 可用以下函数表示:

$$K_t = f(\varepsilon, d, L, t, H)$$
 (1)

将上述中的变量表示为无因次式:

$$K_t = f\left(\frac{d}{L}, \varepsilon, \frac{H}{L}, \frac{d-t}{L}\right)$$
 (2)

在本文中, 考虑各主导因素, 将 K_t 表达如下:

$$K_t = f\left(\varepsilon, \frac{H}{L}, \frac{d-t}{L}\right)$$
 (3)

下面根据物理模型试验数据, 分析各无因次量对透射系数的影响。

2.1 波陡 H/L 对透射系数的影响

从图 4 可以得到: 透射系数 K_t 随着波陡 H/L 的增大而缓慢减小, 这是由于长周期波浪能沿水深分布比较均匀, 且波浪不容易破碎, 波浪从挡板下透过的能量就比较多, 堤后波高也相对较大, 所以长周期波浪的透射性比较强。但由图 4 可以看出, H/L 对透射系数 K_t 的影响很小, 变化范围大致控制在 10% 以内, 属于次级影响因素。

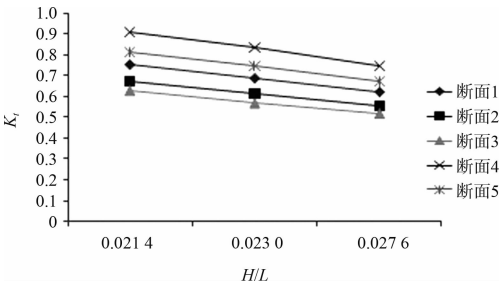


图 4 K_t 随波陡 H/L 的变化

2.2 相对入水深度 $(d-t)/L$ 对透射系数的影响

从图 5 可以清楚地看出: 透浪系数随着挡板的入水深度的增大而减小。这是因为随着挡板入水深度的增大, 挡板的挡浪面积随之增大, 波浪透过挡板的能量减小, 集中在水体表面的波浪能量被阻挡, 消浪效果就更加明显 (选取底高程一样的前后挡板进行研究)。相对入水深度 $(d-t)/L$ 明显影响着透射系数的大小, 是透射系数的主要影响因子。

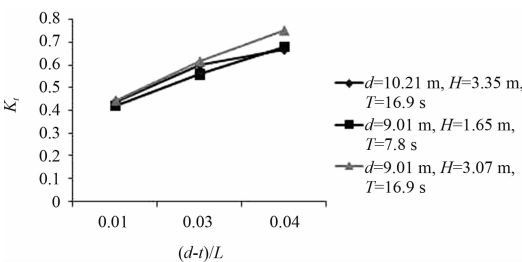


图 5 K_t 随相对入水深度 $(d-t)/L$ 的变化

2.3 开孔情况对透射系数的影响

表 2 是不同波要素下,前后挡板完全开孔和交错开孔对透射系数的影响。由表 2 可知,大部分交错开孔的情况下,透射系数小于挡板均开孔的情况,但是变化率不大,大致控制在 10% 以内。极端高水位时,部分交错开孔的透射系数小于均开孔的挡板,但是透射系数的减小率比起设计高水位时略小,原因是在极端高水位时,集中能量的表层水体越过堤后,堤后波能稍许增大。在设计低水位时,挡板开孔情况对透射系数影响甚微,大部分波浪从挡板下穿过,还有的甚至是部分交错开孔的透射系数大于均开孔的挡板,原因可能是波浪在开孔处破碎的能量大于透过堤后的能量。试验中发现,虽然开孔情况对透射系数影响不大,但是可以减小后挡板的波浪冲击力,开孔的挡板比起挡板封闭时所受的冲击力大大减小,最大可以减小 50% 以上。为了满足设计低水位时的透浪要求,需要挡板入水深度较大,那么在设计高水位时,透射系数就大大地减小了,最大减小了 30% 左右,在工程中,如果对高水位时的透浪效果没有很高的要求,可以选择挡

板上部开孔、下部封闭。这样做不仅可以满足透浪的要求,也可有效减小结构物的波浪作用力。

3 试验值与经验公式的比较

Wiegel^[2]采用微幅波理论,忽略挡浪板对波浪反射的影响,对插入波浪场中的垂直挡浪板结构,推导出了计算透浪系数的理论公式:

$$K_t = \sqrt{\frac{\text{sh}[2k(d-t)] + 2k(d-t)}{\text{sh}(2kd) + 2kd}} \tag{4}$$

将透射系数的试验值与 Wiegel 公式计算值进行对比,得到图 6 的结果。

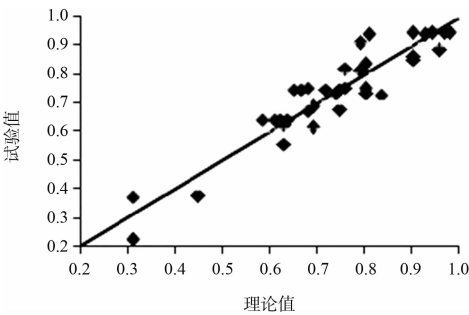


图 6 Wiegel 公式计算值与试验值比较

图 6 中,纵坐标为本次试验的所有试验值,横坐标为公式计算值,Wiegel 理论公式的计算值与试验值的误差比较小,平均误差为 8.4%,相关系数为 94.3%,吻合良好。且 Wiegel 公式考虑的水深 d 、波长 L 、挡板的入水深度 t 正是本试验得出的主要影响因素。

Kribel 等考虑挡浪板的反射,按波能流守恒,得到了透浪系数计算公式^[2]:

$$K_t = \frac{2T_F}{1 + T_F} \tag{5}$$

其中: $T_F = \frac{2k(d-t) + \text{sh}[2k(k-d)]}{2kd + \text{sh}(2kd)}$ (6)

现将透射系数的试验值与 Kribel 公式计算值进行对比,得到图 7 的结果。

图 7 中,纵坐标为本次试验的所有试验值,横坐标为公式计算值,Kribel 公式同样考虑了水深 d 、波长 L 、挡板的入水深度 t 。Kribel 理论公式的计算值与试验值的相比,计算值略小于试验值,平均误差 12.7%,相关系数为 92.5%,误差稍显偏大。

表 2 不同开孔情况对透射系数的影响

开孔率/%	挡板底高程/m	水位	前后挡板均开孔	前后挡板交错开孔	交错开孔较完全开孔透射系数变化率/%
34	0	极端高水位	0.625 0	0.585 0	-6.40
			0.637 5	0.610 0	-4.31
		设计高水位	0.690 0	0.615 0	-10.87
			0.755 0	0.672 5	-10.93
			0.625 0	0.557 5	-10.80
			0.820 0	0.755 0	-7.93
		设计低水位	0.970 0	0.925 0	-4.64
			0.980 0	0.945 0	-3.57
			0.810 0	0.927 5	14.51
13.6	1.5	极端高水位	0.720 0	0.650 0	-9.72
			0.747 5	0.667 5	-10.70
		设计高水位	0.837 5	0.750 0	-10.45
			0.910 0	0.812 5	-10.71
			0.747 5	0.677 5	-9.36
			0.860 0	0.850 0	-1.16
		设计低水位	0.925 0	0.927 5	0.27
			0.960 0	0.980 0	2.08
			0.910 0	0.922 1	1.33

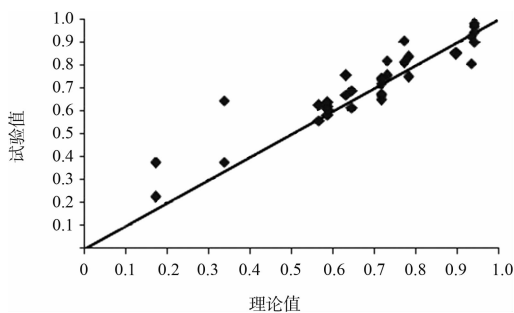


图 7 Kribel 公式计算值与试验值比较

《防波堤设计与施工规范》中描述桩基透空堤的经验公式^[9]如下：

$$K_t = \frac{(1 - \zeta) \sinh\left[\frac{2\pi}{L}(d - t_0)\right] \sinh\left[\frac{2\pi}{L}(2d - t_0)\right]}{\sinh\frac{2\pi d}{L} \sinh\frac{4\pi d}{L}} \quad (7)$$

$$\text{其中：} \zeta = \frac{H}{H + 0.5L} \exp\left[-\frac{t_0}{2(d - t_0)}\right] \quad (8)$$

图 8 是规范公式与试验值的比较结果，规范考虑了水深 d 、波长 L 、挡板的入水深度 t 、波高 H 。规范公式的计算值与试验值的相比，计算值明显小于试验值，平均误差 11.3%，相关系数为 91.5%，误差稍显偏大。

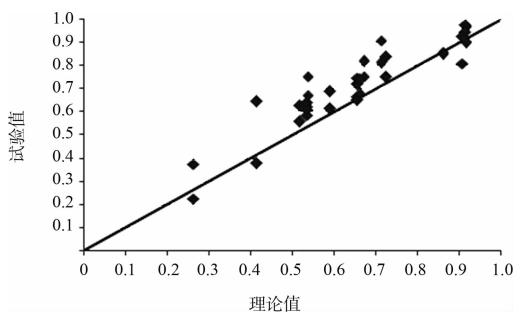


图 8 规范计算值与试验值比较

综上考虑，Wiegel 公式理论公式的试验值与计算值吻合较好，且公式形式简单。Wiegel 公式虽然是单挡板不开孔结构的计算公式，但在实际中证明，对双挡板桩基透空式结构物同样具有理论和参考价值，可用于双挡板桩基透空式结构物透射系数的估算。

4 结论

1) 对桩基透空式结构的透射系数影响最大的因素为挡板下水深 $d - t$ ，其对结构的透浪效果起到决定性的作用， K_t 会随 $d - t$ 的减小而减小。除此之外波长 L 、开孔率 ε 对其透浪效果也有着不可忽略的影响。

2) 虽然开孔率对透射系数的影响不明显，但实际工程中，如果对透浪要求不是特别严苛，可以采取开孔式挡板，以减小挡板所受的冲击力。

3) 用 Wiegel 公式、Kribel 公式和规范所给的经验公式与试验结果进行对比，发现 Wiegel 公式和试验结果吻合良好，对双挡板桩基透空式结构物具有理论和参考价值，可用于双挡板桩基透空式结构物透射系数的估算。

参考文献：

- [1] 邵杰. 不规则波作用下挡板式透空堤水动力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [2] Wiegel R L. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1960, 86(1): 1-12.
- [3] Kriebel D L, Bollmann C A. Wave transmission past vertical wave barriers[C]//The International Conference on Coastal Engineering. Proceedings of the 25 th Coastal Engineering Conference. Orlando: World Scientific Publication Co Inc, 1996: 2 470-2 483.
- [4] JTJ 144-1—2010 港口工程荷载规范 [S].
- [5] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [6] 尹德军, 刘韬, 丁七成, 等. 不同结构形式桩基透空式防波堤功效综合实验研究[J]. 水运工程, 2009 (3): 67-69.
- [7] 范骏, 王宇楠, 杨斯汉, 等. 双挡板透空堤透浪与反射系数实验研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 60-67.
- [8] 钟瑚穗, 徐昶, 过达. 桩基透空堤的透浪系数[J]. 中国港湾建设, 2004 (5): 21-24.
- [9] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范 [S].

(本文编辑 武亚庆)