

· 综 合 ·



冰冻区斜挡浪板透空式防波堤 波浪断面模型试验研究

董 浩，李林俐，李伟昊，左志刚

(天津水运工程勘察设计院有限公司，天津 300456)

摘要：传统的桩基透空式防波堤在冰冻区实施存在较大困难，为适应工程建设与生态环境协调发展的要求，提出一种适用于冰冻区的斜挡浪板透空式防波堤，并通过物理模型试验研究了其在不规则波作用下的消浪效果及受力性能。结果表明：当存在较强越浪时，透射波高由越浪和透浪两部分叠加组成，随着水位的增加，透射系数逐渐减小。经过模型试验验证，斜挡浪板透空式防波堤消浪效果较好，且挡浪板结构受力均匀。

关键词：透空式防波堤；冰冻区；受力性能；透射系数

中图分类号：U656.2

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)07-0020-05

Model experimental research on sectional wave of permeable breakwater of inclined baffle for frozen areas

DONG Hao, LI Linli, LI Weihao, ZUO Zhigang

(Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: It is difficult to implement the traditional pile foundation permeable breakwater in frozen areas. In order to meet the requirements of coordinated development of engineering construction and ecological environment, this paper proposes a kind of permeable breakwater of the inclined baffle for frozen areas and studies the wave absorbing effect and mechanical performance of the permeable breakwater under the action of irregular waves by physical model test. The results show that when there is a strong crossing wave, the transmission wave height consists of crossing waves and permeable waves, and the transmission coefficient decreases with the increase in water level. The model test proves that the permeable breakwater of the inclined baffle has an excellent wave absorbing effect, and the force of the baffle structure is uniform.

Keywords: permeable breakwater; frozen area; mechanical performance; transmission coefficient

海岸与近海工程中的防波堤主要作用是挡浪，传统防波堤依靠自重力承受波浪荷载以维持稳定，堤身高大，对工程区域的生态环境影响很大。而基于波浪理论的研究和试验表明，波浪主要集中在水体的上层，在设计水位以下2~3倍设计波高的范围内集中了90%以上的波能。因此，随着我国对生态环境的日趋重视以及波浪的实际特点，透空式防波堤越来越受到工程界的关注。透空式防波堤通常是由支墩及中间伸入水中一定深度的挡浪结构组成。与传统实体防波堤相比，透空

式防波堤具有水体交换能力强、深水及地基适应能力强、绿色环保等优点。

透空式防波堤的结构形式多样，常见的支墩结构包括重力式和桩基式；挡浪结构包括箱式、挡板和消能孔洞或栅栏等。近年来，国内外学者对不同类型的透空式防波堤进行了大量研究。邱大洪等^[1]对深水薄板式防波堤进行了深入的理论分析；张万威等^[2]、褚裕良等^[3]、范俊等^[4]、冯卫兵等^[5]分别对桩基透空堤的透射系数进行了物理或数学模型试验，并将试验结果与现行的透射

收稿日期：2022-09-22

作者简介：董浩（1990—），男，硕士，工程师，从事港口工程结构设计工作。

系数公式进行比较; 王国玉等^[6]、范玉平等^[7]分别提出多层水平板、斜挡板透空式防波堤, 并通过试验研究验证了消浪性能; 潘楚昌等^[8]提出圆弧板透空式防波堤, 并对其消浪性能进行了物理模型试验研究, 结果表明圆弧板透空堤的消波效果优于水平板式透空堤; 朱浩等^[9]通过大窑湾岛堤工程对梳式透空防波堤的机理特点及掩护效果进行了系统分析; 房卓等^[10]通过数学模型试验研究了透空式梳式防波堤的波浪透射系数, 并提出了梳式防波堤的透射系数经验公式。

根据众多学者的研究成果可知, 通过合理设计挡浪结构, 透空式防波堤具有较好的消浪效果, 可应用于实际工程。透空式防波堤尚无成熟的理论计算方法, 根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》, 桩基透空堤的透射系数及其各部位的波浪力应由模型试验确定, 因此透空式防波堤在实际工程中的应用较少。目前, 申崇车客渡码头、炮台湾船舶基地驳船码头、上海金山车客渡码头、芦潮港临时交通船码头、上海化学工业区孚宝码头、东营港一期扩建码头、海安新港等非冰冻区主要采用桩基透空式防波堤结构; 大连大窑湾港

区等冰冻区主要采用梳式防波堤结构。但对于地质条件较差的天津、黄骅等冰冻区, 采用梳式防波堤结构将大大增加工程成本。

因此, 考虑适用于冰冻区且工程成本较低, 本文提出一种斜挡浪板透空式防波堤波浪结构, 并对其消浪效果及受力性能进行试验研究。

1 斜挡浪板透空式防波堤结构

透空式防波堤作为新型结构, 在工程上应用较少, 大部分应用于南方地区, 很少考虑冰荷载的作用。近年来, 随着用海政策的调整, 实体堤建设受到限制, 为保证港区泊稳条件, 北方港区也逐渐关注透空式防波堤结构, 但由于北方存在冰冻期, 冰荷载的作用对透空式防波堤至关重要, 不利于透空式防波堤的应用。为减少冰荷载对透空式防波堤的影响, 本文提出斜挡浪板透空式防波堤。根据 JTS 144—2010《港口工程荷载规范》, 当冰排作用于混凝土斜面结构(斜面与水平面夹角小于75°)时, 将因弯曲破坏或碎冰块堆积产生冰力, 此时产生的波浪力远小于冰排的极限挤压冰力。本文基于此理论提出斜挡浪板透空式防波堤, 结构断面见图1。

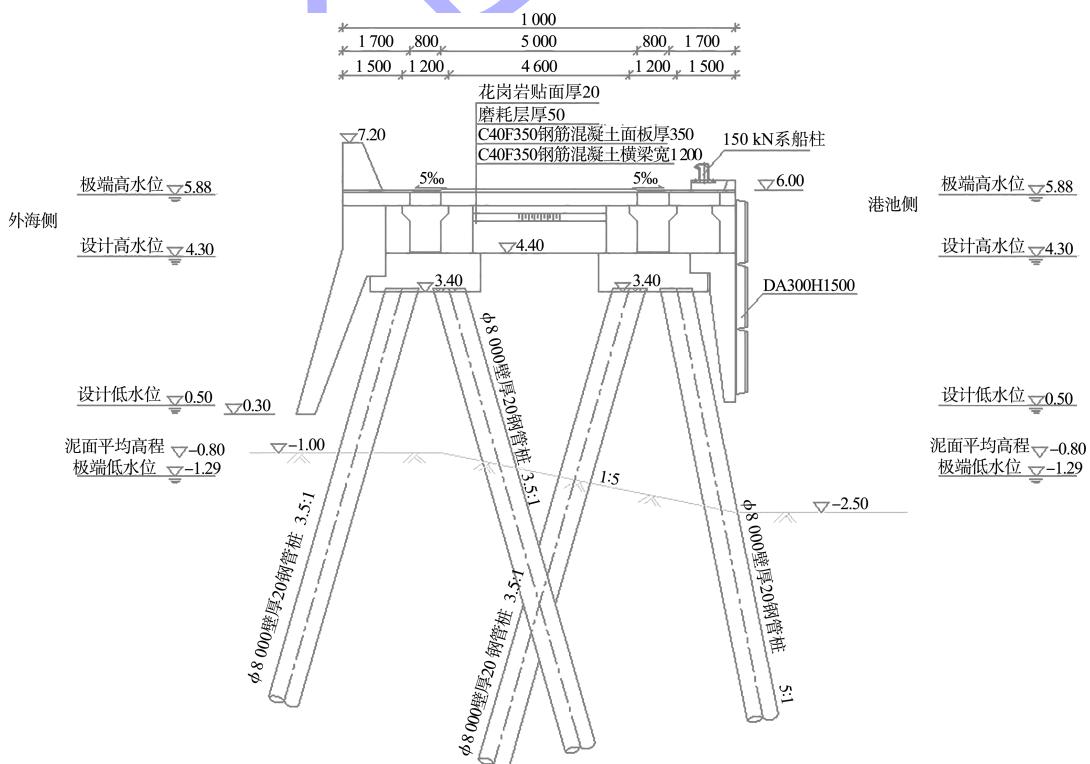


图1 透空式防波堤结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 模型试验

2.1 试验条件

为验证本透空式防波堤的消浪效果及受力性能, 在交通运输部天津水运工程科学研究院水工厅波浪水槽中进行模型试验, 波浪水槽设计总长度 68.0 m, 宽 1.0 m, 高 1.5 m; 采用电机伺服驱动推板吸收式造波机, 可产生规则波与不规则波; 采用电容式波高传感器测量波高, 并通过 SG 2000 型动态水位测量系统对波高进行采集分析; 采用 2008 型微型点压力采集系统测量模型波浪力。

2.2 模型制作

根据试验场地及试验要求, 模型选用几何比尺 1:20。断面模型中透空式结构防波堤采用大芯板+灰塑料板制作, 尺寸偏差控制在 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 以内,

满足相关试验要求。钢管桩采用 PVC 管模拟。由于模型试验使用淡水, 而实际工程中为海水, 受淡水与海水的密度差影响, 试验中考虑 $\rho_{\text{海}} = 1.025\rho_{\text{淡}}$ 。图 2 为透空式防波堤结构模型和现场试验。



a) 结构模型



图 2 透空式防波堤结构模型和现场试验 (单位: m)

2.3 波浪模拟

为了探明透空式防波堤挡浪效果及受力性能, 在两种不同水深条件下和不规则波作用时, 对防

波堤进行不同周期和波高的物理模型试验。试验水位和波要素见表 1。

表 1 试验水位和波要素

试验水位/m	堤顶高程/m	波浪类型	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	H/m	\bar{T}/s	L/m
5.88			3.28	2.87	2.80	2.43	1.64	7.60	56.37
4.30		外海传入波浪	2.82	2.48	2.43	2.12	1.46	7.60	50.12
5.88		(大波高)	2.32	1.99	1.94	1.65	1.08	5.40	36.81
4.30			2.06	1.78	1.73	1.49	0.99	5.40	33.45
5.88	7.20		1.70	1.45	1.40	1.19	0.76	8.10	28.10
4.30		小风区风成浪	1.53	1.31	1.27	1.08	0.70	8.10	24.76
5.88		(小波高)	1.50	1.27	1.24	1.04	0.66	5.60	23.39
4.30			1.40	1.19	1.16	0.98	0.63	5.60	20.72

3 试验结果分析

3.1 透射系数试验

3.1.1 测定方法

透射系数 K_t 为透射波高 H_t 与入射波高 H_i 的

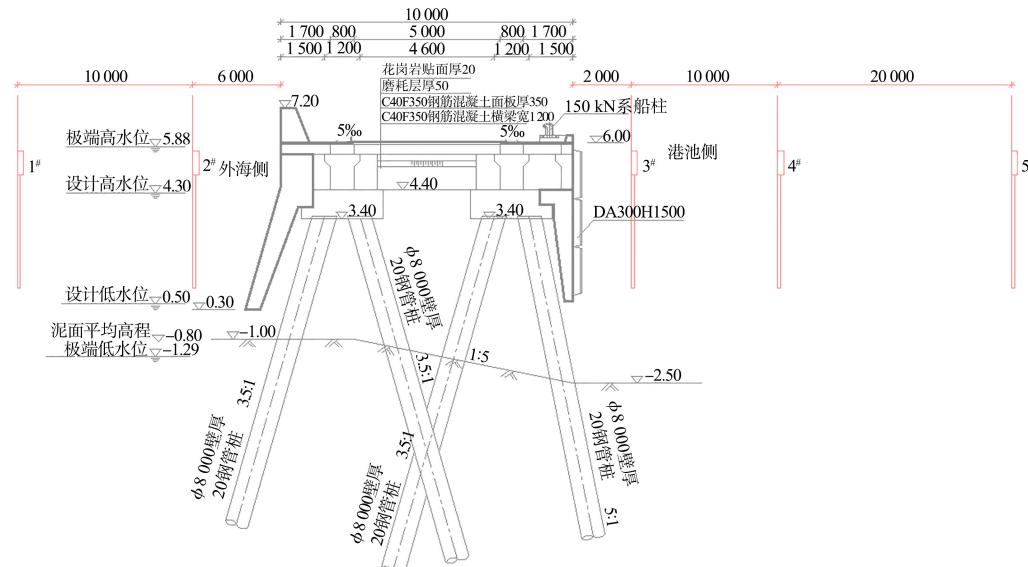


图 3 波高传感器布置 (高程: m; 尺寸: mm)

3.1.2 试验结果

分别开展了不同水位对应设计波浪作用下的波浪透射试验, 结果表明: 在小风区风成浪(小波高)作用和设计高水位条件下, 随着堤前水深和入射波高的增加, 迎浪侧挡浪板对进入港侧波高掩护加强, 堤前波浪只能在内外水位差和波浪动能压力作用下, 由挡浪板以下区域迫使水体由挡浪板进入港池; 在极端高水位条件下, 随着堤前水深和外海入射波高再次增加, 设计堤顶存在越浪, 堤后波高由透空结构底部透射和堤顶越浪产生的两部分波高组成。对于外海传入波浪(大波高)作用, 两种水位条件下设计堤顶均存在越浪, 堤后波高均由两部分波高组成。试验结果见表 2。

根据透浪试验结果可知: 1) 当堤顶高程与水位较接近, 入射波高较大时, 堤顶存在越浪, 透射波高由越浪和透浪两部分叠加组成; 2) 高水位时堤后各测点透射系数平均为 0.42, 斜挡浪板挡浪效果较好; 3) 随着水位的增加堤后透射系数逐渐减小; 小波高、长周期作用大于大波高和短周期。

比值: 即 $K_t = H_t / H_i$ 。为测量透空式防波堤结构透射系数, 在透空结构堤后港池侧布置 3 个波高传感器, 对应测点分别为 3#、4#、5#, 见图 3。

表 2 不同波浪作用下入射波要素和透射系数

波浪 类型	水位/ m	$H_{13\%}/$ m	$\bar{T}/$ s	透射系数				平均值
				3#	4#	5#		
外海传 入波浪 (大波高)	5.88	2.43	7.60	0.55	0.43	0.36	0.45	
	4.30	2.12	7.60	0.41	0.44	0.39	0.41	
	5.88	1.65	5.40	0.35	0.32	0.28	0.32	
	4.30	1.49	5.40	0.42	0.41	0.39	0.41	
小风区 风成浪 (小波高)	5.88	1.19	8.10	0.52	0.48	0.45	0.48	
	4.30	1.08	8.10	0.36	0.58	0.50	0.48	
	5.88	1.04	5.60	0.38	0.32	0.34	0.35	
	4.30	0.98	5.60	0.48	0.47	0.45	0.47	

3.2 透空式防波堤受力试验

3.2.1 挡浪板波压力和浮托力的测定

依据 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》和试验技术要求相关规定, 对透空式防波堤挡浪板波压力进行测定。在挡浪板迎浪面和内侧($P_1 \sim P_8$ 和 $P_9 \sim P_{14}$)、面板底部($P_{15} \sim P_{20}$), 以及港池挡浪板内侧($P_{21} \sim P_{26}$)和面板顶面($P_{27} \sim P_{32}$)均布置点压力传感器对压力分布进行测定, 共计 32 个测点, 见图 4。

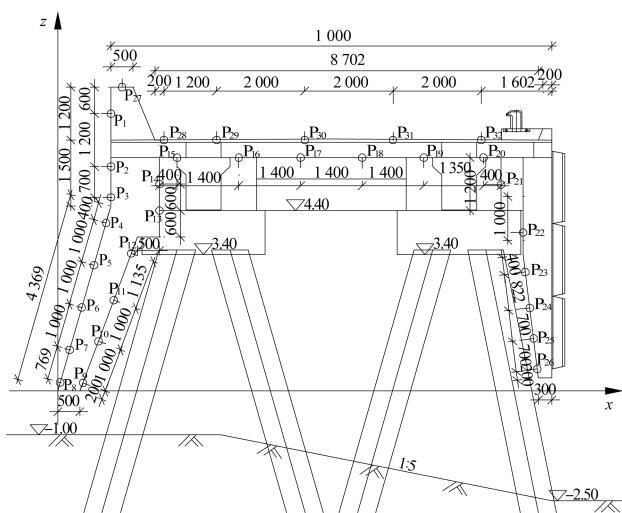


图 4 透空式防波堤压力测点布置
(高程: m; 尺寸: mm)

3.2.2 试验结果

桩基透空堤的结构设计可按现行行业标准 JTS 167—2018《码头结构设计规范》的有关方法确定。为验证透空式防波堤的波浪受力情况，进行了透空式防波堤受力试验。根据试验结果，绘制极端高水位外海传入波浪(大波高)及设计高水位小风区风成浪(小波高)两种波要素作用下防波堤透空结构水平力最大时各点压强分布，见图5。

由试验结果可知，透空式防波堤受力特点为：
1) 结构迎浪侧和底部最大压强测点均在静水位附近；2) 在不同水位及波浪作用下，挡浪板结构受力较均匀，且挡浪板薄弱点为转折点位置，设计应加强区域配筋。

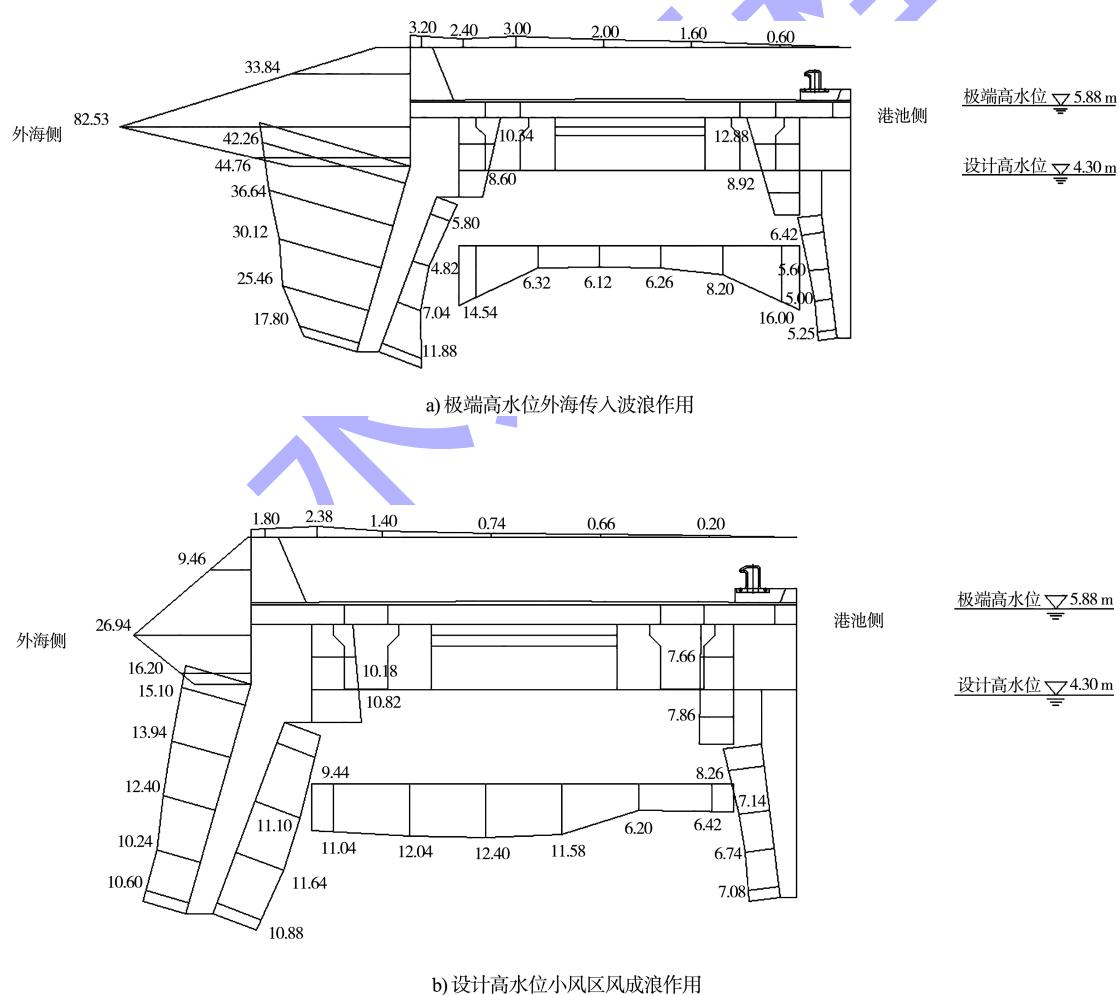


图 5 防波堤透空结构水平力最大时各点压强分布 (单位: kPa)

(下转第 73 页)