



低透空率桩基防波堤消浪效果研究

孙晓帆¹, 闻 学², 刘鹏飞¹

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 岱山县交通运输局, 浙江 舟山 316299)

摘要: 为验证新型低透空率桩基防波堤的消浪效果, 进行模型试验预测和现场波浪观测后评估。通过断面模型、整体模型、防波堤工后内外侧波浪观测数据对比, 得到反映其消浪效果的内外比波高系数。结果表明, 在水深大于 10 m、 $H_{1/10}$ 大于 2.5 m、海域开阔度接近 180°的条件下, 该结构方案基本可实现内外比波高控制在 0.3 以内的要求。实际海况中, 比波高与外部波陡和潮位的关系显著, 潮位较低时, 实测波陡较大, 对应比波高较小。

关键词: 低透空率; 桩基防波堤; 密排桩

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0014-07

Study on wave dissipation effect of low-permeability breakwater with pile foundations

SUN Xiao-fan¹, WEN Xue², LIU Peng-fei¹

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.Daishan Transportation Bureau, Zhoushan 316299, China)

Abstract: To verify the wave dissipation effect of a new type of low-permeability breakwater with pile foundations, this paper carries out model prediction and evaluation after on-site wave observation. The relative wave height of the internal and the external areas, which can reflect the wave dissipation effect of the breakwater, is obtained by the sectional model test, the whole model test and the post-observation of wave data on both sides of the breakwater. The results show that in the conditions of water depth >10 m, $H_{1/10}>2.5$ m and nearly 180° open sea area, the structure is able to meet the requirement that the relative wave height is controlled within 0.3. In the actual sea conditions, the relative wave height has a significant relationship with the external wave steepness and the tide level. Generally, the wave steepness is larger and the relative wave height is smaller when the tide level is lower.

Keywords: low permeability; breakwater with pile foundations; closely spaced piles

桩基防波堤是透空防波堤的一个常见种类, 其本身不是一个新型的结构形式, 其在现代港口工程上的研究和应用至少可追溯至 20 世纪 50 年代^[1-2], 其中我国在 20 世纪 80 年代已有工程案例^[3]。实际上, 除了上述标准化的工程之外, 在浅滩、内湖上常见的密排木桩, 理论上也属于该结构类型, 其产生年代可能更久远。上述的桩基防波堤, 多处于不直接遭受外海大浪影响的半开敞水域或内河、内湖水域, 水深一般较浅, 且对于控制波浪透射的要求相对不高。国外工程中,

提出了密排桩防波堤的概念并进行应用; 国内工程中, 除纯桩基防波堤外, 也有工程利用桩基上部挡板结构起到主要的波浪掩护效果, 其桩群正向投影面上的透空率较大, 桩基自身提供的波浪掩护效果在整个结构中相对次要。近年的一些工程中, 受限于港址条件、用海政策、使用需求等因素, 对桩基防波堤所处的水深、波浪环境适应性及其掩护效果均提出更高的要求, 设计考虑采用一种更低透空率桩基防波堤予以实现。本文基于模型试验和现场观测资料分析, 对该类型防波

堤的消浪效果进行研究分析。

1 桩基防波堤消浪效果研究现状

桩基防波堤消浪效果的相关研究包括了理论和模型试验分析等, 并对其波浪透射系数 K_t 得出了一些半理论半经验公式。

对于单排桩, 一些估算公式简化认为其 K_t 仅与桩基的相对间距有关, 定义 $\eta = b/(b+D)$ 为其透空率(其中 D 为桩径, b 为桩的净间距), 例如 Hartmann^[4] 基于波高与能量的关系及能量的传播得出:

$$K_t = \sqrt{1 - (1 - \eta)^2} \quad (1)$$

Massel^[5] 加入波浪散射的影响, 得出:

$$K_t = \frac{\sqrt{1 - (1 - \eta)^2}}{1 - \frac{\pi^2}{12} (1 - \eta)^2} \quad (2)$$

还有一些公式则综合考虑了入射波高 H_i 、水深 d 、波长 L (或波数 $k = 2\pi/L$) 等其他因素, 例如 Hayashi 等^[6-7] 基于波浪理论和孔口出流控制方程, 得出:

$$K_t = 4\epsilon \cdot \frac{d}{H_i} \cdot \frac{e^2 kd}{\alpha \text{th}(kd)} \left[-\epsilon + \sqrt{\epsilon^2 + \frac{H_i}{2d} \cdot \frac{\alpha \text{th}(kd)}{e^2 kd}} \right] \quad (3)$$

其中:

$$\alpha = \left[\frac{kd}{\sinh(kd)} \right]^2 \{ 1 + [\sinh^2(kd)]/3 \} \quad (4)$$

$$\epsilon = C\eta/\sqrt{1 - \eta^2} \quad (5)$$

式中: C 为桩间隙的流量系数, 取 0.9~1.0; e 为系数, 取 1.1。

对于浅水长波条件下, 即 $\text{th}(kd)/(kd) \approx 1$ 时, 近似有:

$$K_t = 4\epsilon (d/H_i) (-\epsilon + \sqrt{\epsilon^2 + H_i/2d}) \quad (6)$$

上述式(1)(2)(6)在不同波浪和透空率条件下的断面试验对比中, 各自体现出一定的吻合性, 其试验范围大致在: $\eta = 0.05 \sim 0.70$ 、 $K_t = 0.2 \sim 0.9$ 。同时, 有关试验显示, 在 η 相同的情况下, 波陡 H_i/L 较大时, K_t 相对较小, 表明密排桩在波陡相对较大的条件下消浪效果更好。

王瑜^[8] 通过断面试验和数据相关分析, 拟合

得到浅水小波高条件下 K_t 与 H_i 、波周期 T 及相对水深 d/L 之间的经验关系式:

$$K_t = 0.0287 + 0.9093 (1 - 0.00028^n) - 11.59H_i/(gT^2) + 0.11d/L \quad (7)$$

对于单排桩, 透空率 η 在 0.5 以上时的波浪掩护效果较弱, 需将其降低至较小值时, 方可有明显效果; 常规条件下, 如须将正向波浪透射系数 K_t 控制在 0.3 左右, 所需的 η 大致在 0.05 以下(上述均未考虑堤顶越浪影响)。

此外, 也有学者对方桩、异型桩、多排桩等结构进行了研究^[9-11], 其消浪性能有一定差异, 且多排桩的效果优于单排桩。

对于由上部结构实现主要消浪效果的桩基防波堤, 有关研究^[12-13] 多针对挡板竖向尺度进行分析, 我国现行规范^[14] 也给出了其透浪系数的经验公式, 类似结构在水深较浅、挡板底面距泥面较近(波浪力允许)的情况下, K_t 试验值可达到 0.3 左右^[15]。

2 低透空率桩基防波堤的应用

由于单排密排桩防波堤需要极小的透空率保证其消浪效果, 施工中难以实现, 实际工程中常采用带挡板的上部结构进行挡浪, 但当水深较深、波浪较大时, 因挡板受力因素, 其入水深度及相应的消浪效果也将受限; 另外, 也可采用多排桩的形式, 通过增加桩的数量弥补单排桩施工间距偏大带来的不足, 但同时也将增大工程投资。因此, 常规桩基防波堤形式的适用性存在一定局限性。

在浙江岱山岛北部的燕窝山陆岛交通码头工程中, 由于选址水域(图 1)北向开敞, 且外侧海域水深较深(10 m 左右), 港址波浪掩护条件相对较差(正向 50 a 一遇 $H_{1\%} > 6$ m); 而基于用海政策、地质条件及港内淤积等因素, 防波堤不宜采用非透水构筑物形式; 同时, 交通码头对于港内泊稳安全又有相对较高的标准, 研究表明防波堤的透射系数需控制在 0.3 左右方可满足运营要求, 已有桩基防波堤形式在该条件下难以同时满足消浪效果和自身结构安全。为应对不利的建设条件

和较苛刻的使用要求,设计采用了新型低透空率桩基防波堤,其密排桩结构见图2。通过桩侧加肋板(桩顶至泥面范围),使结构在正投影面上不透空,仅存在曲折的空隙;同时将相邻桩位适量前后交错偏移,使其净间距加大,降低施工难度;另外,为消除桩顶越浪影响,将密排桩与其所掩护的码头水工相结合,码头面(前沿挡坎)高程在设计高水位以上4.2 m,8级风波况下基本不越浪。

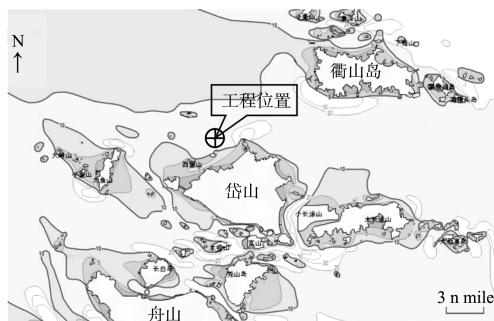


图 1 工程位置

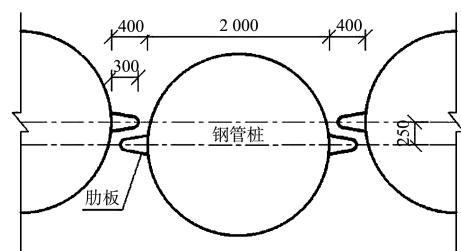


图 2 低透空率桩基防波堤密排桩截面 (单位: mm)

该结构的密排桩在桩位上介于单排桩和多排桩之间，而在桩的数量上应归类为单排异型桩，但前文所述的透空率 η 概念在该结构中不适用，可定性将其归纳为低透空率桩基结构。

该工程建设防波堤总长 650 m, 轴线处水深 10 m 左右(85 高程), 码头布置于堤内侧, 泊位长度 400 m(图 3), 设计客运年通过能力(188 万人+14 万辆车)/a。截至 2020 年底, 已完成防波堤的全部桩基施工。

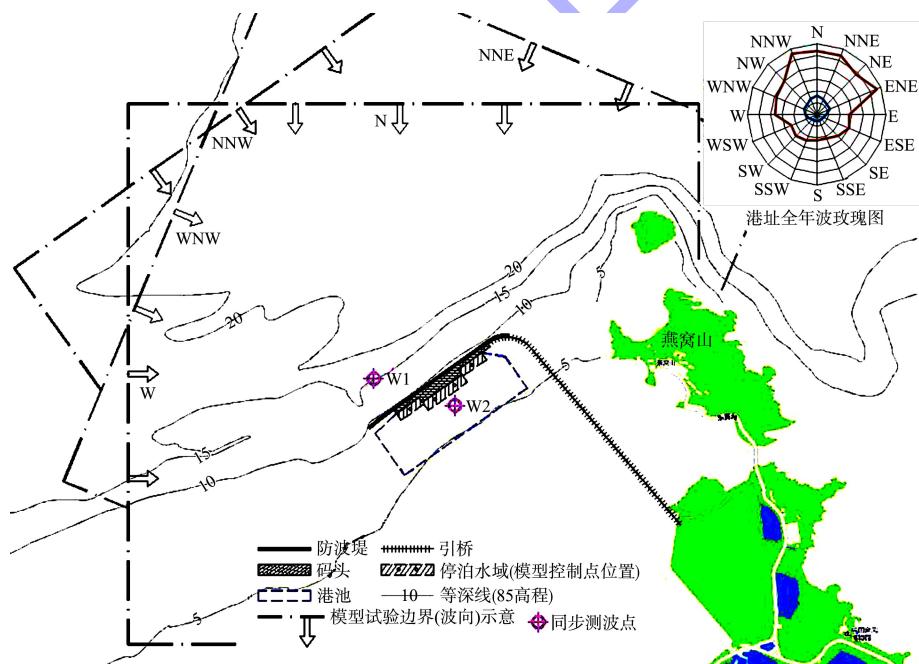


图 3 防波堤及码头总平面及模型试验布置 (单位: m)

3 消浪效果的模型试验分析

3.1 试验条件

上述工程案例的防波堤结构，在设计阶段进行了多方案的模型试验比选和优化工作，模型试验包括断面物理模型、大范围及工程水域数学模型和整体物理模型。

模型试验所采用的堤前波浪要素由大范围数学模型推算得出,见表1。其中,50 a一遇的波要素主要用于验算防波堤结构,即其自身稳定,而波浪掩护效果主要通过7~8级风(10 min平均风速)作用下的波况进行分析。断面物理模型试验采用正向波浪,数学模型试验和整体物理模型试验

对正向、斜向浪均进行试验。

表 1 模型试验防波堤前沿波浪要素

波况	波向	水位	$H_{4\%}/m$	T/s
50 a一遇	正向	极端高水位	5.5	8.1
		设计高水位	5.2	8.1
		设计低水位	4.1	8.1
8 级风	正向	设计高水位	3.1	6.2
		设计低水位	2.8	6.2
	斜向	设计高水位	2.8	5.6
		设计低水位	2.6	5.6
7 级风	正向	设计高水位	2.5	6.0
		设计低水位	2.4	6.0
	斜向	设计高水位	2.3	5.1
		设计低水位	2.1	5.1

3.2 断面物理模型试验

由于密排桩间隙较小, 断面试验^[16-17]比尺适当取大为1:30~1:20, 试验包括纯桩基情况和桩基防波堤与码头结构相结合情况, 其中又包含密排桩有无肋板、桩基防波堤与码头结构是否相连等不同方案。主要试验组次的透射系数 K_t 见表2, 对该系列试验结果可归纳总结为:

1) 密排圆桩($\eta=0.024\sim0.111$ 时)在设计高水

表 2 断面模型试验波浪透射系数 K_t

波况	试验方案	桩参数	水位	K_t
8 级风	无肋板密排桩 (桩顶高程=设计高水位-0.5 m)	$D=2\text{ m}, b=0.25\text{ m}, \eta=0.111$	设计高水位	0.64
			设计低水位	0.57
	无肋板密排桩+不相连的码头结构	$D=2\text{ m}, b=0.05\text{ m}, \eta=0.024$	设计高水位	0.52
			设计低水位	0.29
8 级风	密排桩+肋板+不相连的码头结构	$D=2.2\text{ m}, b^*=0.2\text{ m}$	设计高水位	0.36
			设计低水位	0.29
	错位密排桩+肋板+相连的码头结构 (码头前沿高程=设计高水位+4.0 m)	$D=2.0\text{ m}, b^*=0.4\text{ m}$	设计高水位	0.31
			设计低水位	0.18
7 级风	错位密排桩+肋板+相连的码头结构 (码头前沿高程=设计高水位+4.0 m)		设计高水位	0.33
			设计低水位	0.34
	无肋板密排桩+不相连的码头结构		设计高水位	0.31
			设计低水位	0.37

注: b^* 为相邻桩不计肋板存在的正投影间距。

3.3 数学模型试验

上述桩基防波堤结构与码头结构相结合, 码头水域位于防波堤后沿, 其波浪条件受透射和绕射等综合影响。为此, 建立工程区的波浪数学模型^[18], 并基于断面试验情况, 将透射因素在模型中进行概化处理, 推算不同波况影响下的港内波

位情况下, 受桩顶越浪影响, K_t 介于0.52~0.64, 总体较大。

2) 密排圆桩在设计低水位情况下, 越浪影响较小, K_t 介于0.29~0.57, 明显随透空率的减小而减小。

3) 加入码头结构后, 受其上部结构的挡浪作用, 高水位时 K_t 降低至0.36。

4) 桩侧加肋板后, 因防波堤的实际透空性下降, K_t 进一步降低, 而通过试验观察发现, 当桩基防波堤与码头结构不相连时, 高水位时波浪仍可由桩顶与码头下部之间翻越, 因此高水位时 K_t 仍明显大于低水位。

5) 采用带肋板的错位密排桩, 并与其所掩护的码头水工相结合, 尽管增大了桩间净距, 但仍可将 K_t 控制在1/3左右, 且高、低水位时的 K_t 相差不大。

6) 加入上部结构时, 相同结构方案下, 高水位时 K_t 总体略小于低水位, 该情况是由于高水位时上部结构发挥了更大的挡浪效果; 8级风波况下 K_t 总体略小于7级风, 其原因可能是8级风波陡稍大。

高分布。

由于该防波堤平面位置、轴线方位主要由当地水深、潮流场及海床冲淤情况确定, 波浪数学模型主要用于解决防波堤长度和港内泊稳条件问题。首先采用忽略波浪透射影响的模型, 试验得出满足特定波浪条件(该工程设置为8级风波况下

停泊区 $H_{4\%} \leq 0.6$ m 所需的防波堤长度；然后加入波浪透射影响(正向浪按 $K_t = 0.3$ 进行验证,其余浪向由模型自适应),计算得出各主要波向下,7、8 级风叠加设计高水位时,传播至内侧不同码头泊位的 $H_{4\%}$ 分别介于 0.4~0.8 m、0.5~1.0 m,基本可满足工程使用需要。

3.4 整体物理模型试验

通过比尺 1:60 的整体物理模型试验^[19],进一步研究其港内波浪情况。其结果显示:

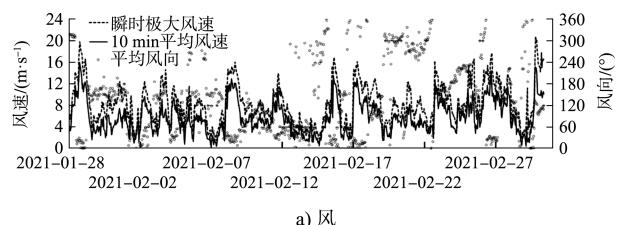
1) 针对密排桩与码头水工脱开的结构方案,相同桩间距情况下(该试验 $\eta = 0.13$),有肋板情况相对无肋板时, K_t 减小幅度可达 15%~65%,正向、斜向浪之间差别不大,均有明显效果。

2) 上述结构方案,各主要波向下,7、8 级风叠加设计高水位时,传播至内侧码头泊位的 $H_{4\%}$ 分别介于 0.52~0.84 m、0.70~1.08 m(原文献中采用有效波高 H_s ,本文换算至 $H_{4\%}$)。

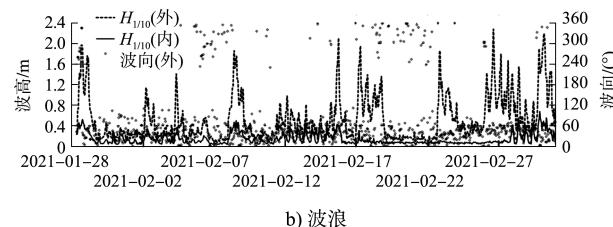
3) 针对密排桩与码头水工相结合的结构方案,控制波向下,7、8 级风叠加设计高水位时,传播至内侧码头泊位的 $H_{4\%}$ 降低至 0.44~0.68 m、0.52~0.85 m,内外比波高 K (整体试验包含不同波向,区别于正向透浪系数 K_t)介于 0.2~0.3。

4 消浪效果的现场观测分析

在防波堤密排桩沉桩及部分上部结构安装施工完成后,在堤外、堤内布置了 2 个临时测波站 W1、W2(图 3),在寒潮期进行了 1 个月的同步观测(码头工程停工期,附近无船舶干扰)。测期环境风力、波浪与模型试验条件基本属同一量级,共有 3 次过程风力(10 min 平均风速)达到 7 级,瞬时极大风速均达 8 级以上,外侧波向主要集中于 ENE—NNW 向,最大 $H_{1/10}$ 为 2.28 m,内侧最大 $H_{1/10}$ 为 0.69 m。测期风速、波高过程线见图 4。



a) 风



b) 波

图 4 观测期风与波浪过程线

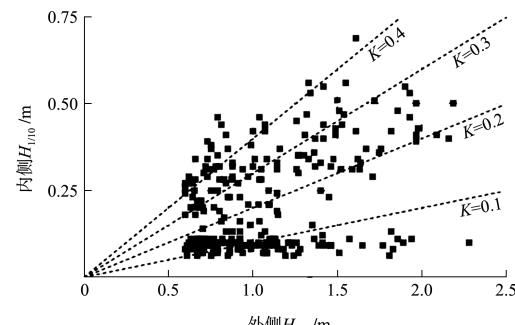
根据实测资料计算堤内外比波高 K ,得到统计分析结果如下:

1) 比波高 K 大部分在 0.10~0.45, 占总样本的 94%, 其中 0.1~0.3 区间占 50% 左右。

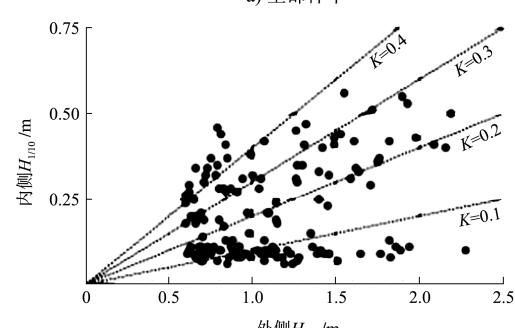
2) 比波高 K 与外侧波高大小、波向的关系不明显(图 5)。

3) 比波高 K 与外侧波陡 $\delta (= H_{1/10}/L)$ 的关系明显, $\delta > 0.05$ 时, $K \geq 0.3$ 的累积频率仅约 10%,而 $\delta < 0.03$ 时, $K \geq 0.3$ 的累积频率达 50% 左右(图 6),即波陡越大,防波堤的消浪效果越强(图 7),该情况与前文所述研究成果相符。

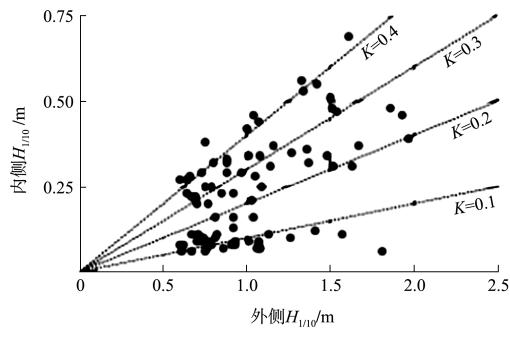
4) 比波高 K 与潮位的高低呈一定关系,对测期潮位按潮高保证率小于 25%、25%~75%、大于 75% 划分为高、中、低等,发现 3 种潮位下 $K \geq 0.3$ 的累积频率分别约为 38%、22%、13%(图 8),表明高潮位下的消浪效果较弱,该情况与模型试验情况存在差异。



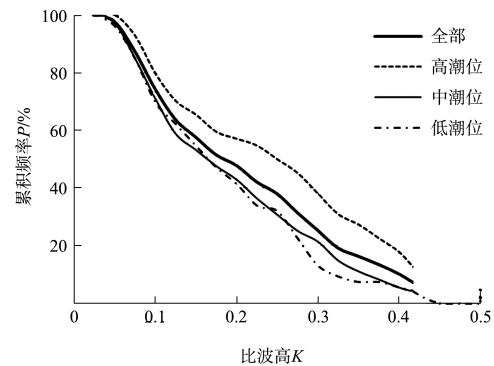
a) 全部样本



b) 斜向浪ENE—NNE



c) 正向浪N—NW

图 8 不同潮位下比波高 K 累积频率曲线

为分析上述实测与试验不符的现象原因, 统计了波陡 δ 与潮位的关系见图 9, 发现较低潮位时的波陡总体大于较高潮位时, 该现象可解释为何低潮位时的 K 较小。而前述模型试验各组次中给定的 δ 在高、低水位时差异不大(如 8 级风正向浪对应设计高、低水位的 δ 均为 0.055), 该情况下, K 的大小受 δ 以外的其他因素决定。

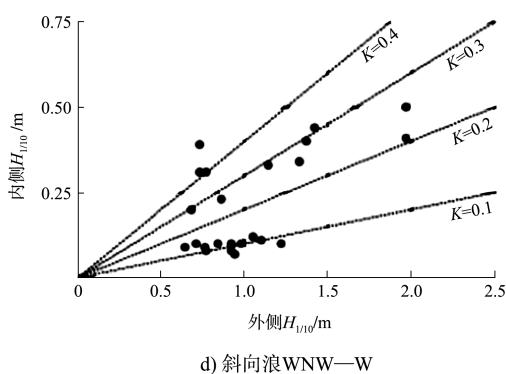


图 5 实测同步外侧、内侧波高相关分布

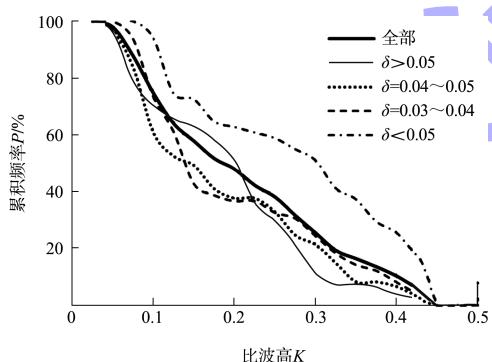
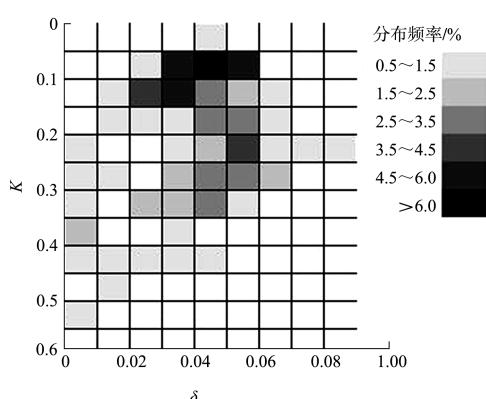
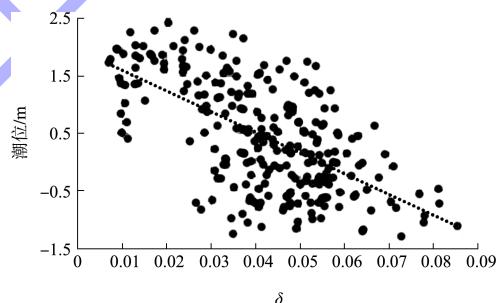
图 6 不同波陡下比波高 K 累积频率曲线图 7 实测比波高 K 与波陡 δ 联合频率分布

图 9 堤外实测波陡与潮位相关关系

5 结论

1) 密排圆桩防波堤及利用上部挡板结构消浪的桩基防波堤在工程中已得到一定应用, 对其消浪效果也形成了相关试验成果和经验公式。

2) 在深水大浪条件下, 特别是消浪效果要求较高的工程中, 常规桩基防波堤的适用性较差, 为此设计提出了新型低透空率桩基防波堤。通过模型试验及现场观测, 验证了该新型防波堤的消浪效果: 断面模型试验在设计波况下, 正向波浪投射系数 K_t 可控制在 0.30~0.35; 整体模型试验考虑了不同波向影响, 对应内外比波高 K 可控制在 0.2~0.3; 实测环境下, 外部 $H_{1/10} \geq 0.6$ m 的序列中 $K \leq 0.3$ 的频率约占 75%, $K \leq 0.2$ 约占 55%, K 与波陡大小呈反比关系, 实测所得高潮位时段

的波陡相对小于低潮位, 相应时段 K 值稍大。

3) 在深水条件下, 圆桩加侧面肋板结构的低透空率桩基防波堤的消浪效果可达到或超出采用挡板结构的桩基防波堤在浅水条件下的水平, 具有一定的可推广性。限于客观条件, 未详细对该类型结构中主要参数(桩、肋板尺度及间距)对消浪效果的影响进行控制变量试验, 后续可进一步开展相关研究。

参考文献:

- [1] WIEGEL R L. Closely spaced piles as a breakwater[R]. California: California University Berkeley Hydraulic Engineering Laboratory, 1961.
- [2] NAGAI S. Research on steel-pipe breakwater[J]. Coastal engineering proceedings, 1966, 1(10): 48-54.
- [3] 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.
- [4] HARTMANN H. Das Stabgitter in instationärer Strömungsbewegung[R]. München: Mitteilung Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 1969.
- [5] MASSEL S R. Interaction of water waves with cylinder barrier[J]. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division, 1976, 102(2): 165-187.
- [6] HAYASHI T, HATTORI M, KANO T, et al. Hydraulic research on the closely spaced pile breakwater[J]. Coastal engineering journal, 1966, 9(1): 107-117.
- [7] HAYASHI T, HATTORI M, SHIRAI M. Closely spaced pile breakwater as a protection structure against beach erosion[J]. Coastal engineering proceedings, 1968, 1(11): 606-621.
- [8] 王瑜. 浅水小波高条件下桩式透空堤消浪效果研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [9] SHANKAR N J, KHADER M A. Performance characteristics of closely spaced pile breakwaters[C]//5th Australia Coastal Engineering Conference, 1981: 82-86.
- [10] 高东博. 桩式透空防波堤的性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [11] WEELE V B J, HERBIEH J B. Wave reflection and transmission for piles arrays[C]//13th Coastal Engineering Conference, 1972: 1935-1953.
- [12] WIEGEL R L. Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of waterways and harbors division, 1960(3): 1-12.
- [13] 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, 79.
- [14] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [15] 信书, 徐伟, 赵海涛, 等. 朱家尖月岙渔港透空式防波堤设计[J]. 水运工程, 2012(1): 54-58, 63.
- [16] 张义丰, 谢华亮, 袁春光, 等. 岱山县燕窝山陆岛交通码头工程波浪断面物理模型研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2018.
- [17] 陈国平, 杨越. 岱山县燕窝山陆岛交通码头及防波堤工程波浪断面物理模型试验[R]. 南京: 河海大学, 2019.
- [18] 肖辉, 张义丰, 李文丹. 岱山县燕窝山陆岛交通码头工程波浪数学模型深化研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2018.
- [19] 黄健钧, 于倩, 陈国平, 等. 不规则波作用下排桩式透空堤透浪系数试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41(3): 296-302.

(本文编辑 王璁)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。