



潜堤、挡板式透空堤组合结构合理性及 消浪特性研究*

黄哲^{1,2}, 掌孝永³, 孙加月³, 琚烈红^{1,2}, 王登婷^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;
3. 灌云县水利局, 江苏连云港 222299)

摘要: 随着港口及泊位向深海迈进, 传统实体防波堤造价高且透水性差等问题愈发突显。结合大潮差海域港口的透水与消浪需求, 提出一种潜堤与挡板式透空堤组合消浪结构, 以兼顾高、低潮位下的消浪效率。波浪与单独潜堤或挡板式透空堤的相互作用已有相关研究与应用, 然而在国内尚无组合使用的先例, 针对这方面的研究也相对欠缺。通过波浪物理模型试验等手段, 首先针对波浪经过潜堤时非线性效应带来的能量谱改变开展研究, 并对比单独潜堤、单独挡板式透空堤与组合式防波堤的消浪性能, 验证了组合式防波堤的合理性; 然后, 针对不同工况下潜堤及挡板式透空堤组合结构的消浪特性开展试验, 并结合数值计算提出组合式防波堤间距选取建议。相关结论可为此类工程设计及应用提供依据。

关键词: 波浪; 潜堤; 挡板式透空堤; 组合防波堤; 透射系数

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0020-08

Rationality and wave dissipation characteristics of combination structure of submerged breakwater and baffle-type permeable breakwater

HUANG Zhe^{1,2}, ZHANG Xiaoyong³, SUN Jiayue³, JU Liehong^{1,2}, WANG Dengting^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

3. Guanyun County Water Resources Bureau, Lianyungang 222299, China)

Abstract: As ports and berths move deeper into the ocean, the problems of high cost and poor water permeability of traditional physical breakwaters become increasingly prominent. Combining the requirements of water permeability and wave dissipation in ports with large tidal range, a wave dissipation structure combining submerged breakwaters and baffle-type permeable breakwaters is proposed to achieve both high and low water level wave dissipation efficiency. There have been studies on the interaction between waves and individual submerged breakwaters or baffle-type permeable breakwaters, but there has been no precedent for their combined use at home and abroad, and there is a relative lack of research in this area. Through physical model experiments, this paper first studies the changes in energy spectrum caused by nonlinear effects when waves pass through submerged breakwater, and compares the wave dissipation performance of individual submerged breakwater, individual baffle-type permeable breakwaters, and combined breakwaters to further verify the rationality of the combined breakwater. Then, the wave dissipation characteristics of submerged breakwaters and baffle-type permeable breakwaters under different conditions are studied, and suggestions for selecting the spacing of combined breakwaters are proposed based on numerical calculations. The relevant conclusions can provide a basis for the design and application of such projects.

Keywords: wave; submerged breakwater; baffle-type breakwater; composite breakwater; transmission coefficient

收稿日期: 2024-02-25

*基金项目: 江苏省水利科技项目 (2022027)

作者简介: 黄哲 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

防波堤是保护港口内码头、船舶的重要屏障。近年来,随着社会与经济的发展,港口水环境问题越发受到重视,传统实体堤的透水性差,将导致水体交换能力弱、港内水质差等问题,也对港口景观产生一定的影响;随着港口及泊位向深水发展,实体堤工程体量及造价增幅显著^[1]。根据实际需要,提出新的港口掩护方案,其中较为常见、技术相对成熟的有潜堤、桩基挡板式透空堤等不完全封闭的防波堤结构。

潜堤或挡板式透空堤方案是实现防浪及水体交换较好的工程措施,但单一结构受水位波动影响防浪效果变化大,由于中国大部分沿海地区潮差较大,水位的升降会导致不同结构防波堤的防浪效率出现较大的差异,有时甚至起不到防浪作用^[2-3]。而将这两者组合后的防波堤结构能有效克服困难,还能优化对长周期波浪的阻隔效果,是一种更为高效、合理的防波堤结构形式。

波浪与单独潜堤或挡板式透空堤的相互作用是传统的研究课题。潜堤是一种堤顶多数时间处在静水面以下的防波堤,而根据堤顶高程的不同,潜堤又可分为淹没堤和半潮堤,其中淹没堤的堤顶位于最低潮位之下,而半潮堤的堤顶位于高低潮位之间。波浪经过潜堤的传播模型最早于 1932 年提出^[4],考虑外海入射波和反射波的线性叠加,并由质量守恒和连续性条件给出边界控制条件,计算得到波浪在潜堤上部演化的过程; Nakamura 等^[5]在水槽中进行潜堤的系列试验,研究潜堤的堤后波高与潜堤宽度、波长、潜堤顶超高、水深、波高等各影响因子之间的无因次相互关系; Dattatri 等^[6]针对不同形式潜堤开展水槽试验,研究潜堤顶宽度和堤顶超高对潜堤透射系数的影响关系,得到丰富的试验结果;杨正已等^[7]针对抛石潜堤,通过分析影响透射系数的参数,得出包含多参数的潜堤透浪系数经验公式,该公式在工程设计中得到了广泛应用。

桩基挡板式透空堤利用波浪能量集中在水体上部的原理,在桩基的上部设置挡板,设计成为

一种上部挡浪,下部透水的结构,既满足消浪效果,又保证内外的水体交换^[8],同时挡板还可兼作码头使用,供船舶的靠泊,在港口工程中应用最为广泛。Ursell^[9]于 1947 年根据半无限水深下直立挡板的波浪透射率,最先给出了挡板在深水条件波浪作用时透射系数的解析解。Wiegel^[10]基于能量传输理论对垂直挡浪板波浪透射进行研究,在不考虑波浪反射的情况下,假定挡板下部透射到内侧的波能形成了堤后的次生波浪,提出透射系数计算方法,被美国海军设施工程部门及陆军工兵部队分别在《海岸防护手册》和《美国工程兵团手册》中推荐使用。我国《防波堤与护岸设计规范》等标准及论文中也提供了桩基挡板式透空堤透射系数的计算方法。

然而,潜堤与挡板式透空堤组合使用在国内外尚未有先例,针对这方面的研究也相对欠缺。同时,波浪在两堤之间会发生反射及叠加,波浪形态将变得非常复杂,非线性作用也会更为强烈,因此如果单纯使用两堤透射系数计算公式推算组合堤的透射系数,将带来一定的误差,并且无法考虑到波浪经过潜堤后的潜水非线性效应、两堤间距、波浪反射叠加等因素对组合堤透射系数带来的影响^[11]。

本文通过波浪物理模型试验及数值计算等方法,首先对波浪经过潜堤时非线性效应带来的能量谱改变开展研究,对比单独潜堤、单独挡板式透空堤与组合式防波堤的消浪性能,进一步验证组合式防波堤的合理性,并针对不同工况下潜堤及挡板式透空堤组合结构的消浪特性开展研究,提出组合式防波堤间距选取建议。

1 试验设计

1.1 试验模型及仪器设备

试验对象包括单独潜堤、单独挡板式透空堤、潜堤与挡板式透空堤组合结构。

潜堤模型采用木工板制作,表面光滑且无渗透,断面形式为梯形,堤顶高程 0.3 m(试验床面取 0.0 m)、堤顶宽 0.3 m、堤身宽 1.2 m。挡板式

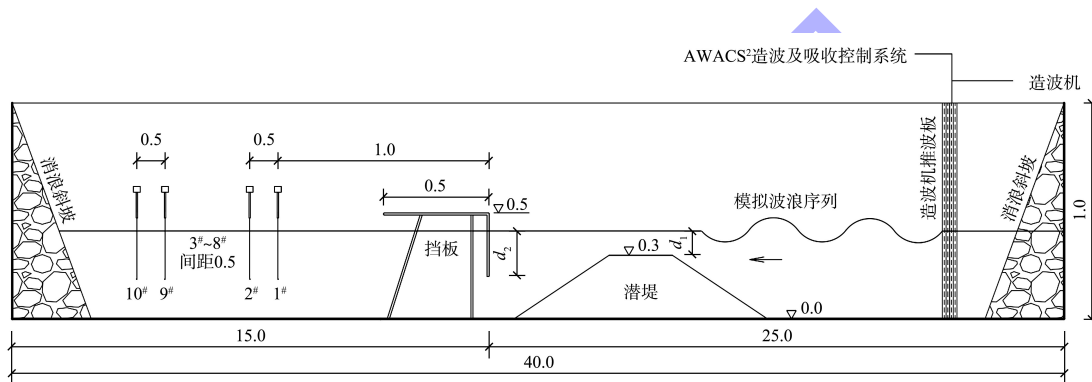
透空堤采用有机玻璃制作，下部采用桩基支撑，堤顶高程 0.5 m、挡板底高程 0.3 m、堤身宽度 0.5 cm。组合堤由上述潜堤与挡板式透空堤共同构建，外海侧为潜堤，近岸侧为挡板式透空堤，潜堤堤轴线与挡板间距 D 分别取 0.50、0.75、1.50、2.25 m。

试验水槽长 40 m、宽 1.0 m、高 1.0 m，水槽两端均配有消浪缓坡，其中一端配备推板式造波机及二次反射消波装置。波浪采集系统采样间隔 0.02 s，波高测量误差小于 0.1 mm。组合堤后方

布置 10 根间距 0.5 m 的波高仪，试验根据不同的波浪要素推算相应波长，取堤后 1 倍波长以外 3 根波高仪采集到数据的平均值作为透射波浪的波高。模型在试验水槽内布置见图 1。透射系数 K_t 为：

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

式中： H_t 为模型后方 1 倍波长外测得的透射波高， H_i 为未在水槽内放置模型率定得到的入射波高。



注： d_1 为堤顶水深， d_2 为挡板入水深度。

图 1 试验水槽内模型布置 (单位: m)

1.2 试验组次

选取不同水位及相应的波浪要素开展试验，共 7 个水位，分别为高水位 0.50、0.45 m，中间水位 0.40、0.35、0.33 m，低水位 0.30、0.27 m。

每个水位均对应 8 种入射波浪周期，分别为 0.8、0.9、1.1、1.3、1.5、1.7、2.0、2.5 s，每个周期又分别包含 5 和 10 cm 两种入射波高。

2 组合式防波堤合理性分析

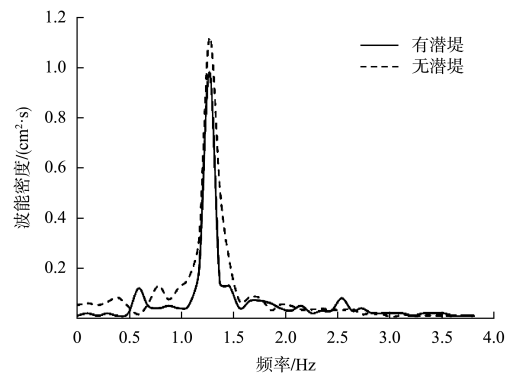
2.1 潜堤堤后谐波

根据现场观测与试验研究发现，波浪经过潜堤等障碍物时的运动过程为非线性过程，这与波浪本身的非线性相关，在此过程中，波浪经过潜堤时能量会由基频向倍频发生转移，从而在堤后产生短波成分，即高阶谐波。

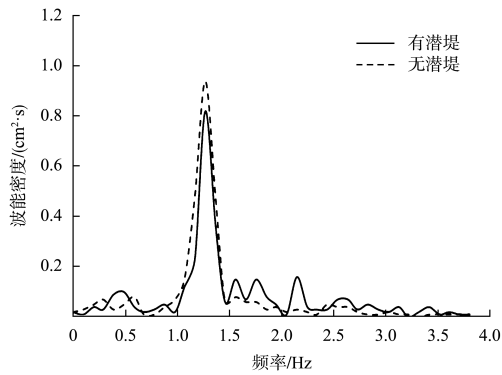
由于波浪传播的非线性效应会对组合式防波

堤的消浪效率造成影响，且挡板式透空堤消浪效率受能量频率影响较大，其对高频波消浪效果明显优于低频波浪，针对该现象，验证组合结构在理论上的可行性。

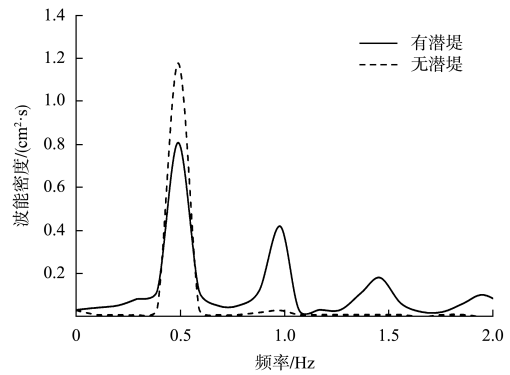
梯形潜堤在水深 0.5 和 0.4 m，波高 5 cm (即相对堤顶水深 d_1/H_i 分别为 4 和 2)，周期 2.0、1.5、0.8 s 波浪作用下的堤后谐波分布试验结果见图 2。



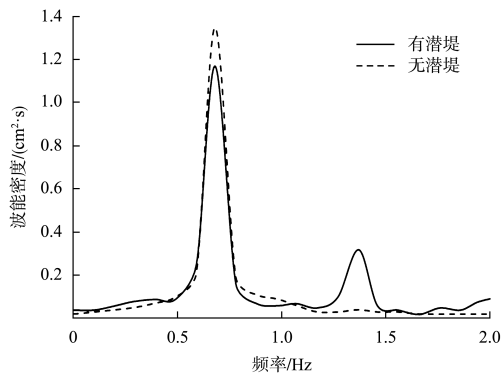
a) $d_1/H_i=4, T=0.8$ s



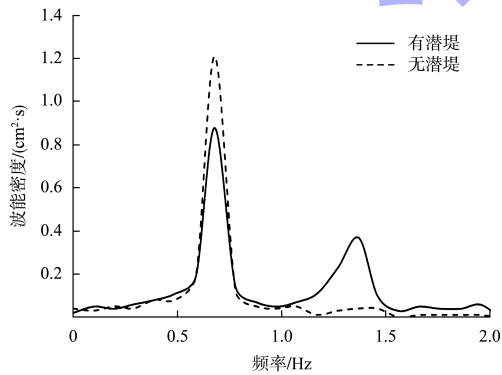
b) $d_1/H_1=2, T=0.8\text{ s}$



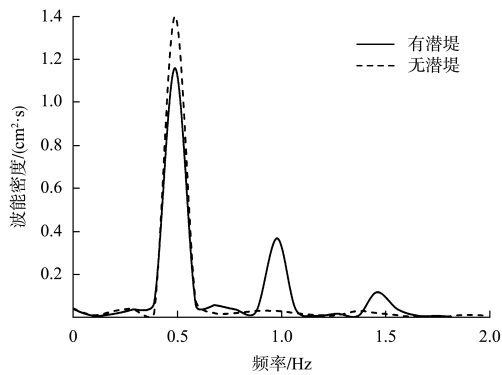
f) $d_1/H_1=2, T=2.0\text{ s}$



c) $d_1/H_1=4, T=1.5\text{ s}$



d) $d_1/H_1=2, T=1.5\text{ s}$



e) $d_1/H_1=4, T=2.0\text{ s}$

图 2 潜堤堤后谐波试验结果

由不同周期条件下未放置潜堤时的波谱可见, 率定波浪在水槽中传播时也有高阶波成分, 主要原因是试验水槽内波浪传播仍受到一定的底摩阻及边壁影响, 产生一定的变形, 难以完全模拟理论上的一阶线性规则波, 但其影响相对较小, 二阶谐波与一阶波波能密度之比均小于 5%。

在相同周期下, 对比不同相对堤顶水深时, 波能由基频向高频转移的情况可见, 随着相对堤顶水深的减小, 波浪在潜堤顶部传播时浅水变形剧烈, 非线性效应增强, 高阶波波能密度也相应增大。

对比有、无潜堤下的波能密度分布, 在放置潜堤模型后, 堤后存在明显的高阶谐波成分; 且在相同相对堤顶水深下, 随着入射周期的增长, 二阶谐波波能密度明显增大; 在 $d_1/H_1=2, T=2.0\text{ s}$ 工况下, 二阶波与一阶波波能密度之比达到 0.5, 三阶波与一阶波波能密度之比近 0.25, 并且还形成四阶、五阶等阶谐波。

由此可见, 波浪经过潜堤时, 一定比例的波能会由基频向高频发生转移。其中, 在低水位时, 或在长周期波浪作用下, 向高频发生转移的能量比例显著增大, 这一特性在一定程度上可以弥补挡板式透空堤在低水位、长周期波浪作用时消浪效率较低的缺陷, 也验证了潜堤与挡板式透空堤组合消浪的可行性。

2.2 组合式防波堤与单堤消浪性能对比

通过对比单独潜堤透射系数 $K_{t,1}$ 、单独挡板式

透空堤透射系数 $K_{t,2}$ 、组合式防波堤(选取间距 1.5 m)透射系数 $K_{t,3}$, 比较 3 种防浪结构的消浪性能。图 3 为 3 种防浪结构在 $H_i=5\text{ cm}$, $T=1.1\text{ s}$ 时透射系数随水深变化情况。

由图 3 可见, 在结构固定的情况下, 单一潜堤结构随水位的升高, 波浪透射系数不断增大; 而挡板结构随水位的降低, 波浪透射系数也不断增大。任何一种结构的防浪性能均受水位变化的影响显著。

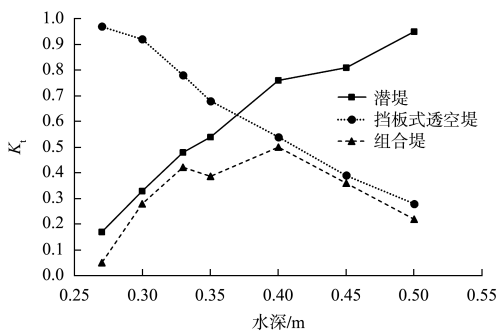


图 3 透射系数试验结果对比

在低水位时, 组合式防波堤透射系数与变化规律同单独潜堤相近, 而在高水位时, 组合式防波堤透射系数数值与变化速率同单独挡板式透空堤相近。这是由于在低水位时, 组合结构主要靠前侧潜堤消浪; 在高水位时, 主要靠后侧挡板消浪; 在中间水位时, 前堤与后堤可同时起到消浪作用, 因此透射系数相对单堤情况减小显著。

由此可见, 组合结构的波浪透射系数总体上比单一结构明显改善, 且随水位的升高或降低, 透射系数最终均减小。单独潜堤在高水位、单独挡板式透空堤在低水位时的透射系数均接近 1.0, 即无明显消浪作用, 而潜堤与挡板式透空堤组合后, 在各级水位下的透射系数均在 0.5 以内, 表明此结构可以满足大潮差海域不同时间段的防浪需求。

图 4 为水深 $h=0.35\text{ m}$ 时不同工况下 $K_{t,3}$ 与 $K_{t,1}K_{t,2}$ 对比, 图中可见, $K_{t,3} < K_{t,1}K_{t,2}$ 的情况主要出现在入射波周期较大(波陡较小)的工况下。结合潜堤高阶谐波研究成果, 这是因为单独挡板

式透空堤在大周期波浪作用下消浪性能较差, 透射系数 $K_{t,2}$ 的值较大, $K_{t,1}K_{t,2}$ 也较大, 而组合结构在长周期波浪作用下, 经过外海侧潜堤后, 一方面能量衰减、波高减小, 另一方面会在堤后产生次生波浪, 而后侧的桩基挡板式透空堤对高阶波浪的阻隔作用更为明显, 因此 $K_{t,3}$ 的值较小, 进一步验证了组合式防波堤的可行性。

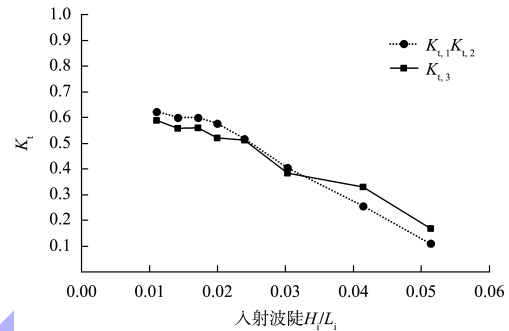
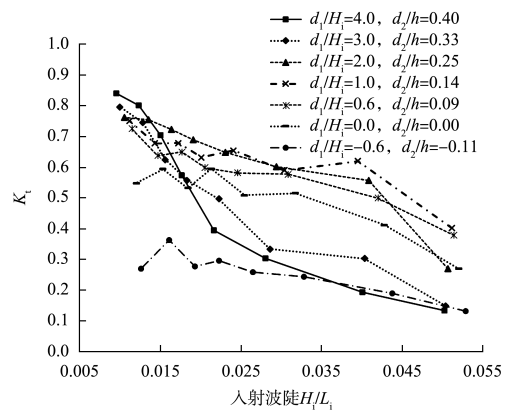


图 4 $K_{t,3}$ 与 $K_{t,1}K_{t,2}$ 对比

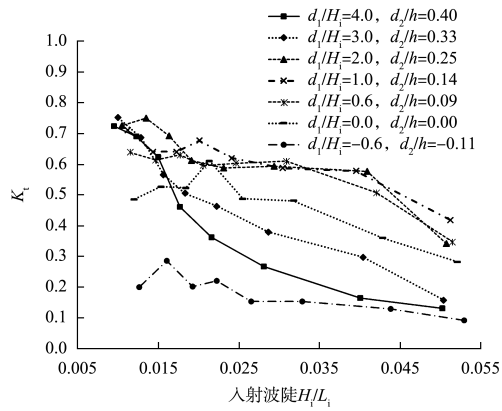
3 组合式防波堤消浪特性

3.1 组合式防波堤透射系数 $K_{t,3}$ 随入射波陡 H_i/L_i (入射波高/入射波长) 变化情况

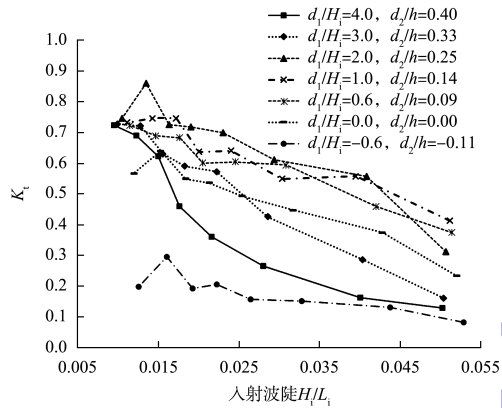
不同间距下潜堤与挡板式透空堤的组合堤透射系数随入射波陡变化情况见图 5。图中可见, 在不同两堤间距下, 随着入射波陡的增大, 透射系数均整体呈减小趋势, 但过程并非单调递减, 而是在减小过程中某些点位出现增大。考虑这一现象主要与两堤间距相关, 当间距与波长之比呈一定数值时, 潜堤的透射波浪与挡板式透空堤的反射波浪在两堤之间发生叠加, 挡板式透空堤前波高增大, 进而引起堤后透射波高的增加。



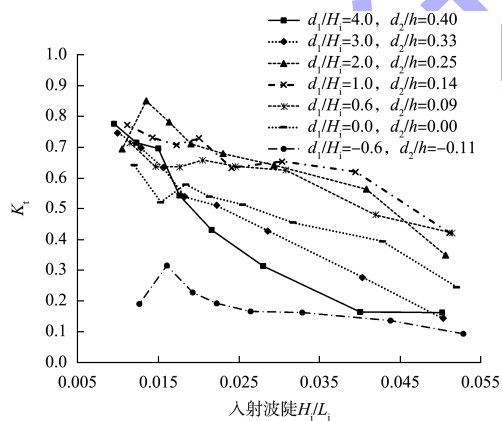
a) 间距 0.50 m



b) 间距0.75 m



c) 间距1.50 m



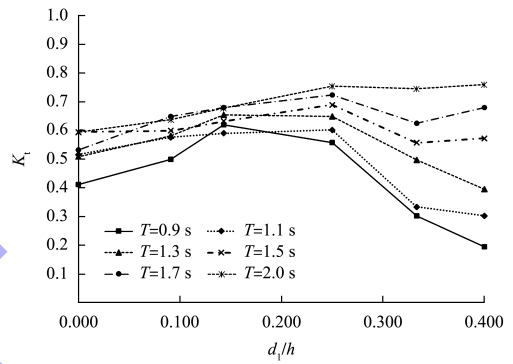
d) 间距2.25 m

图 5 组合式防波堤 $K_{t,3}$ 随 H_1/L_1 变化情况

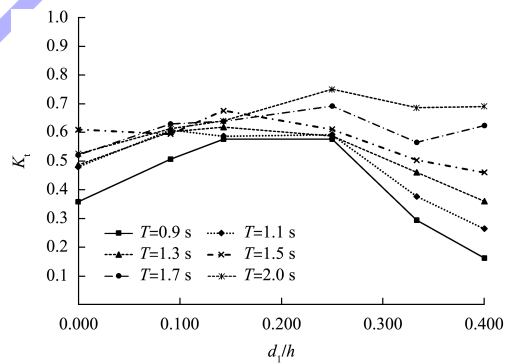
3.2 组合式防波堤透射系数 $K_{t,3}$ 随潜堤相对堤顶水深 d_1/h 变化情况

不同间距下潜堤与挡板式透空堤的组合堤透射系数随相对堤顶水深变化情况见图 6。由于潜堤

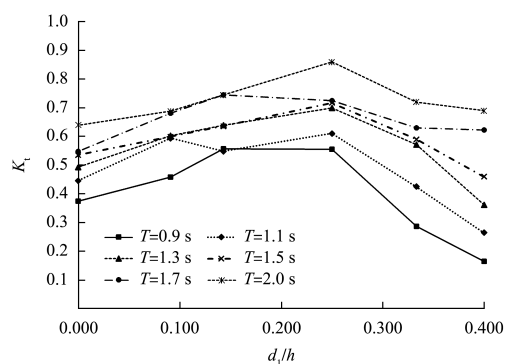
堤顶为波浪透射区域, 而挡板下方为波浪透射区域, 因此组合式防波结构整体透射系数最大值出现在潜堤顶以上某水位。当波浪周期较短时, 此水位距离潜堤堤顶更近; 而当波浪周期较长时, 挡板的防浪作用减弱, 此时, 最大透射系数对应的水位则更高。同时, 当 d_1/h 较小时, 不同周期下组合堤测得的透射系数差值相对较小, 而当 d_1/h 较大时, 不同周期相应的透射系数差值较大。



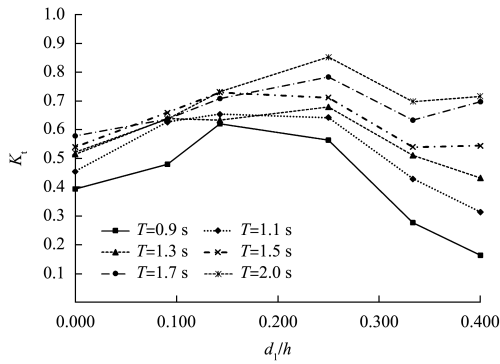
a) 间距0.50 m



b) 间距0.75 m



c) 间距1.50 m



d) 间距2.25 m

图6 组合式防波堤 $K_{t,3}$ 随 d_1/h 变化情况

3.3 组合式防波堤透射系数 $K_{t,3}$ 随两堤相对间距 b/L 变化情况

根据组合堤试验的结果可以得到，在当两堤间距接近 $1/2$ 波长的整数倍时 ($b=nL/2$ ，其中 n 为整数， L 为波长)，组合式防波堤透射系数明显增大，而当间距接近 $1/4$ 波长时 ($b=L/4+nL/2$)，透射系数又明显减小。

针对以上现象，对组合堤的结构形式进一步概化，前后堤分别以下挡板和上挡板代替，减小非线性对组合堤透射系数的影响，更好地研究不同间距对组合堤消浪效果的影响，概化后的组合堤试验结构形式见图7。共选取前挡板相对堤顶水深 $d_1/h=0.125、0.250$ 及后挡板相对挡板入水深度 $d_2/h=0.125、0.250$ 等两两组合的工况。按周期的长短分别选取了 $kh=1.05、2.5、3.5、5.0$ 不同周期的入射波浪 (k 为波数， h 为水深)。

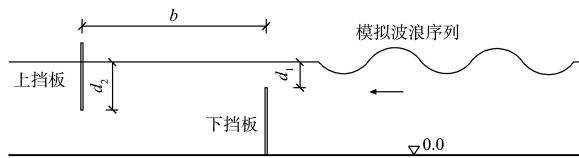
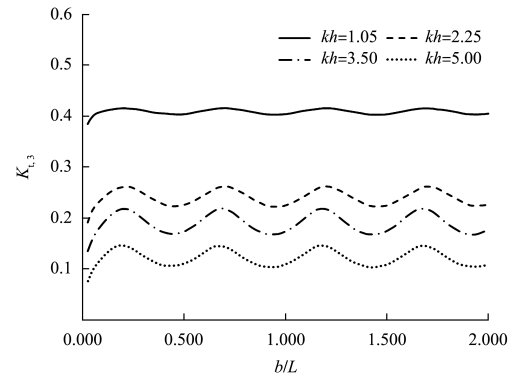


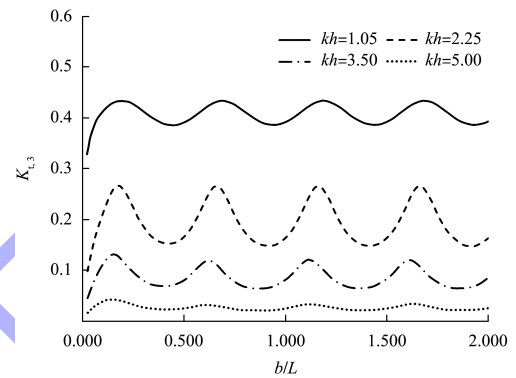
图7 概化组合堤试验断面结构

3.3.1 数值计算

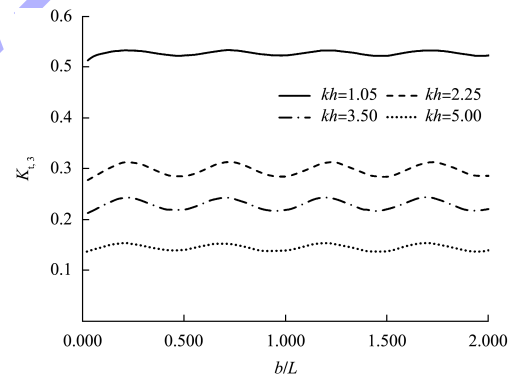
将组合式结构分为下挡板前、两挡板间、上挡板后3个部分，分别通过微幅波、理想流体等基本假定和3个部分各自的自由表面运动、动力边界及底部边界等边界条件求解不同部分的势函数，进而利用各部分的波浪形态变化求解出透射系数值。利用该方法计算得到组合堤透射系数随相对间距变化规律见图8。



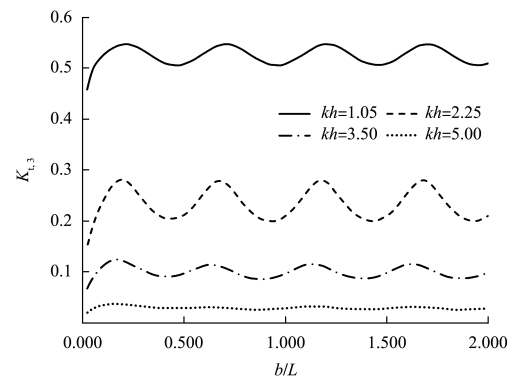
a) $d_1/h=0.125, d_2/h=0.125$



b) $d_1/h=0.125, d_2/h=0.250$



c) $d_1/h=0.250, d_2/h=0.125$



d) $d_1/h=0.250, d_2/h=0.250$

图8 组合堤透射系数随两堤间距变化趋势

结合试验结果及透射系数变化趋势得到以下结论:

1) 波浪透射系数随着 kh 的增大(波浪周期的减小)而减小, 且变化幅度较大。

2) 在各种工况下, 透射系数 $K_{t,3}$ 随相对间距 b/L 的增大呈周期性变化的趋势, 波动周期约为 0.5。

3) 当两堤相对间距 b/L 由 0 向 0.250 增大时, 透射系数 $K_{t,3}$ 呈增大趋势, 并在 $b/L=0.250$ 附近达到最大值, 此时组合式防波堤透射系数明显增大; 而当相对间距 b/L 由 0.250 向 0.500 增大时, 透射系数 $K_{t,3}$ 又呈现减小趋势, 在 $b/L=0.500$ 附近达到最小值; 此后随着相对间距 b/L 继续增大, 透射系数按以上规律呈周期性变化。

3.3.2 物模验证

在部分工况下进行物理模型试验, 选取得到的波浪透射系数结果, 绘制透射系数随相对间距的变化趋势见图 9。对比物模与数值计算的结果可以看出, 试验值与计算值吻合良好, 且周期相近, 变化趋势基本相同。但是通过试验值与计算值的对比也可发现两者间存在一些差异: 试验值透射系数的极大值与极小值所对应的相对间距小于计算得出的 0.25 与 0.50, 这两点差异主要是由于波浪传递的非线性作用及波浪与两堤相互作用时形态的复杂性造成的。因此组合堤消浪效率随两堤相对间距的变化规律可以应用于组合堤间距的选取。

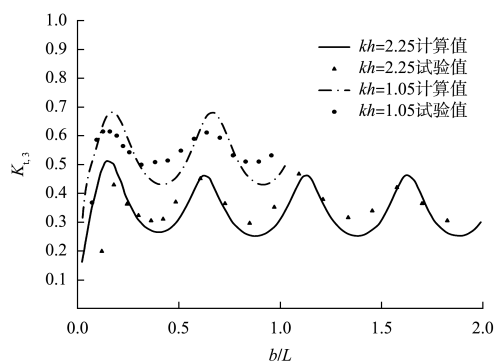


图 9 组合堤透射系数对比

4 结论

1) 波浪经过潜堤时, 一定比例的波能会由基频向高频发生转移。其中, 在低水位时, 或在长周期波浪作用下, 向高频发生转移的能量比例显著增大。

2) 各水位及波浪下组合式防波堤透射系数均小于单独潜堤或挡板式透空堤透射系数; 长周期波作用时, 组合式防波堤透射系数 ($K_{t,3}$) 小于单独潜堤透射 ($K_{t,1}$) 乘以单独挡板式透空堤透射系数 ($K_{t,2}$)。

3) 组合式防波堤可弥补单独潜堤或挡板式透空堤消浪性能受水位变动影响的不足, 并对长周期波浪具有较好的阻隔。

4) 组合式防波堤透射系数随入射波陡的增大整体呈减小趋势, 随潜堤相对堤顶水深增大呈先增大后减小趋势。

5) 当两堤间距接近 $1/2$ 波长的整数倍时 ($b = nL/2$, 其中 n 为整数), 组合式防波堤透射系数明显增大, 而当间距接近 $1/4$ 波长时 ($b = L/4 + nL/2$), 透射系数又明显减小。相关结论可为此类工程设计及应用提供依据。

参考文献:

- [1] 吕超凡. 边界元水波模型开发及其在环境友好型防波堤中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [2] 边峰, 黄哲, 琚烈红. 不同结构形式潜堤消浪性能物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2020(8): 36-41, 58.
- [3] 邵杰, 陈国平, 严士常, 等. 不规则波作用下垂直挡板式透空堤透浪系数试验研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(1): 50-57.
- [4] Lamb H L. Hydrodynamics [M]. New York: Dover Publications, 1932.
- [5] NAKAMURA M, SHIRAIISHI H, SASAKI Y. Wave damping effect of submerged dike [J]. Coastal engineering, 1966, 1(10): 254-267.
- [6] DATTA J, RAMAN H, SHANKAR N J. Performance characteristics of submerged breakwaters [J]. Coastal engineering, 1978, 1(16): 2153-2171.

(下转第 85 页)