



组合式密排桩基防波堤透浪特性研究

李少斌¹, 丁建军¹, 沈雨生²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290;

2. 南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对新型组合式密排桩基防波堤的透浪特性问题, 基于现有密排桩基防波堤研究成果, 通过物理模型试验, 开展此新型结构透浪特性的多因素分析研究, 并在试验结果的基础上, 拟合出组合式密排桩基防波堤透浪系数的计算公式。结果表明, 增设桩间肋板和桩后插板等组合式措施对减少透浪系数均有影响, 其中增设桩间肋板对于相对桩间距小的密排桩基结构效果甚为明显。

关键词: 组合式密排桩基; 透浪系数; 相对桩间距; 肋板; 插板

中图分类号: U653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0127-07

Wave transmission characteristics of breakwater with combined closed-pile foundation

LI Shaobin¹, DING Jianjun¹, SHEN Yusheng²

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. NHRI- River and Harbor Engineering Department, Nanjing 210024, China)

Abstract: To analyze the wave transmission characteristics of combined closed-pile breakwater, we carry out physical model test to take the multi-factor analysis on wave transmission characteristics of the new structure based on the relevant existing research. On the basis of model test results, we obtain the fitting formula of wave transmission coefficient on the breakwater with the combined closed-pile foundation. The results show that measures of adding inter-pile rib plate and post-pile panel have remarkable effect on reducing the wave transmission coefficient, especially that the inter-pile rib plate can obviously reduce the wave transmission coefficient of the breakwater with closed-pile foundation with small relative pile spacing.

Keywords: combined closed-pile foundation; wave transmission coefficient; relative pile spacing; rib plate; panel

密排桩基防波堤对地质有较强的适应性, 以及透空、透水等绿色环保特点, 近年来受到国内外港口海岸工程界的密切关注。国内外已有较多工程采用密排桩基结构, 如日本大港采用直径 2.0 m 的钢管建成一道钢桩防波堤, 桩间距仅为 5 cm^[1]。国内龚崇准等^[2]将桩式结构作为离岸堤, 消减近岸区浅水波浪的波高, 已在上海南汇东滩二期围垦促淤工程、奉贤南港及青年河宝山横沙保滩工程和胜利油田保滩工程等有多处应用。在太湖梅

梁湾水源地的水质改善示范工程中^[3], 采用截面边长为 30 cm 混凝土方桩的透空堤消减太湖风浪, 全长 3.3 km, 据现场实测, 该透空堤可减小 40%~60%的波高, 波浪越大, 透浪效果越好。目前密排桩基防波堤的应用局限于波浪作用不十分强烈的区域, 且结构形式较为单一。而针对波高较大、波浪周期较长的区域, 密排桩基防波堤的透浪效果研究较少, 尤其是采用桩间肋板和桩后插板的组合式密排防波堤进一步增强透浪效果的

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 李少斌 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事码头结构研究。

研究更少。

现有的理论研究方面,常见的如 Wiegel^[4]、Hartman^[5]和 Massel^[6]的研究都是基于结构透浪系数仅与桩群的透空率相关这一前提下推导而来。Hayashi 等^[7]基于连续方程和伯努利定理,同时考虑堤前水深、堤前入射波高、桩的透空率 3 个因素的影响,推导出透浪系数的理论公式。除了理论分析,对于密排桩结构的透浪性能国内外学者也进行了大量的物理模型试验研究,如 Grüne 等^[8]进行不同入射波向和不同长宽比截面矩形桩的透浪系数试验,结果表明,相对水深对透浪系数的影响可忽略不计,透浪的主要影响因素为波陡和排桩的透空率以及波浪入射角度;Huang 等^[9]对孤立波作用下的密排桩结构透浪进行试验研究,结果表明,透浪对相对波高的变化不敏感,桩间距对透浪系数影响显著;王瑜^[10]通过不同透空率、不同波周期和不同波高组次的规则波断面模型试验对密排桩结构的透浪系数进行研究,确定了影响透浪系数的主要因素为透空率和波陡,其次才是相对水深。

以上密排桩结构的透浪性能研究成果主要是针对单一密排桩结构,为了提高密排桩结构的透浪性能,须考虑采用桩间肋板和桩后插板的组合式防波堤,因此应对其透浪系数进行深入研究,为后续工程提供参考。

1 模型设计

物理模型试验结合某组合式密排桩基防波堤工程,在南京水利科学研究院河流海岸研究所的大波浪水槽进行试验。水槽长 68 m、宽 1.8 m、深 1.8 m,水槽的两端分别配有透浪缓坡和丹麦水工研究所(DHI)生产的推板式不规则波造波机,由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。为消除水槽试验中波浪的多次反射,造波板上配有二次反射全吸收装置。试验遵循 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[11]的相关规定。试验模型按照几何相似进行模拟。模型按照 1:20 的几何比尺进行设计。密排桩结构的桩采用亚克力管进行模拟,桩上肋板、桩后插板和上部

挡墙等部件采用硬塑料板或者木材等制作。模型按刚性结构进行模拟。防波堤前后均布置 DS30 型多功能自动采集系统采集波高。模型设置见图 1。

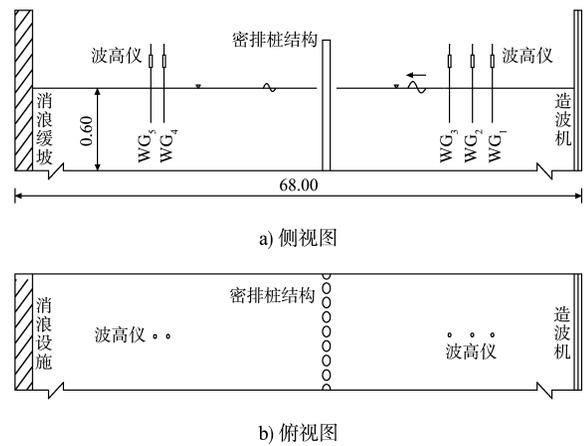


图 1 模型布置

模型试验包括分析不同桩间距、桩间肋板和桩后插板等因素的影响,按不同因素层层递进分析,试验参数选择为:1)水深为 12、9 m;2)有效波高 H_s 为 1.5、3.0 m,谱峰周期 T_p 为 5.0、7.0、9.0、12.0、15.0 s,波陡 H/L (H 为入射波高, L 为入射波波长)为 0.009 ~ 0.072;3)承台底部高度 h 为 19.0 m,相对桩间距 b/D (b 为桩间净距, D 为桩基直径)为 0.05、0.10、0.20、0.40;4)有桩肋板时的相对桩间距 b/D 为 0.05、0.20,肋板层数 n 为 0、1、2、3;5)有插板时的相对桩间距 b/D 为 0.05、0.20,此时的肋板层数 n 为 2,插板高度 T 为 5.0 m,插板层数 n' 为 0、1、2。

2 试验结果分析

2.1 相对桩间距对防浪系数的影响

影响组合式密排桩基防波堤透浪系数的因素较为复杂,本文基于现有密排桩基防波堤的研究成果进行分析,对相对桩间距、堤前水深、波陡、肋板形式等多因素研究分析,得出其影响的主要因素。

进行桩间距对透浪特性影响的试验时,不考虑上部承台等结构对波浪的影响,试验波浪爬高低于承台底面高度,不同桩间距布置见图 2。

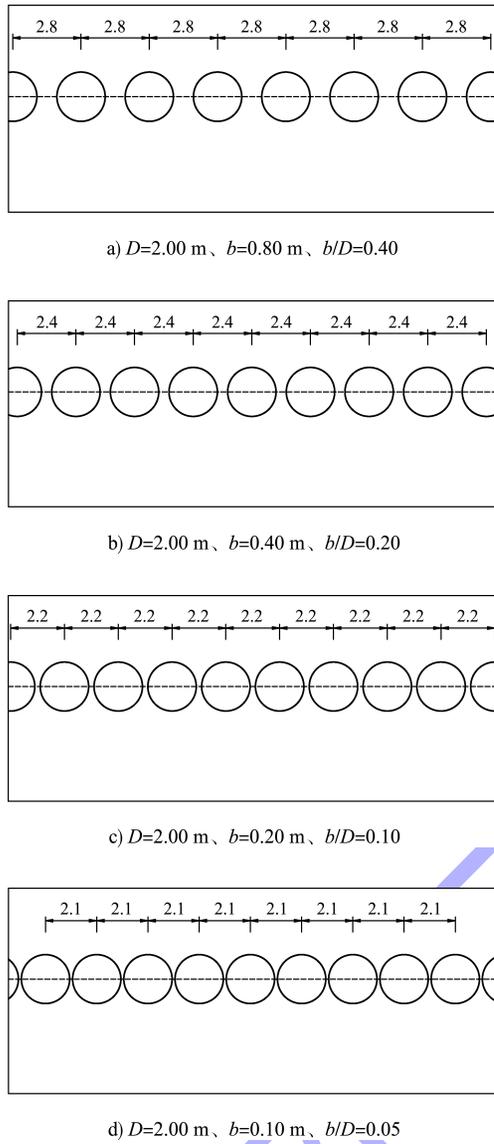


图 2 不同桩间距布置 (单位: m)

不同桩间距情况下透浪系数的对比见图 3。可以看出, 不同水深、波高和波浪周期条件下, 密排桩结构的透浪系数均随着相对桩间距 b/D 的减小而变小, 当相对桩间距 b/D 由 0.40 减小到 0.05 时, 透浪系数由 0.81~0.95 减小至 0.31~0.40, 透浪系数平均减小了 0.5 左右。总体上, 相同桩间距情况下, 透浪系数随着波陡 H/L 的减小呈先增大后趋于平缓的趋势, 且在相对桩间距 b/D 较大时趋势较为明显, 在相对桩间距 b/D 较小时透浪系数随波陡变化而变化的趋势不明显。相同桩间距、入射波高和波浪周期条件下, 不同水深下的透浪系数差别较小, 水深对透浪系数的影响较小。

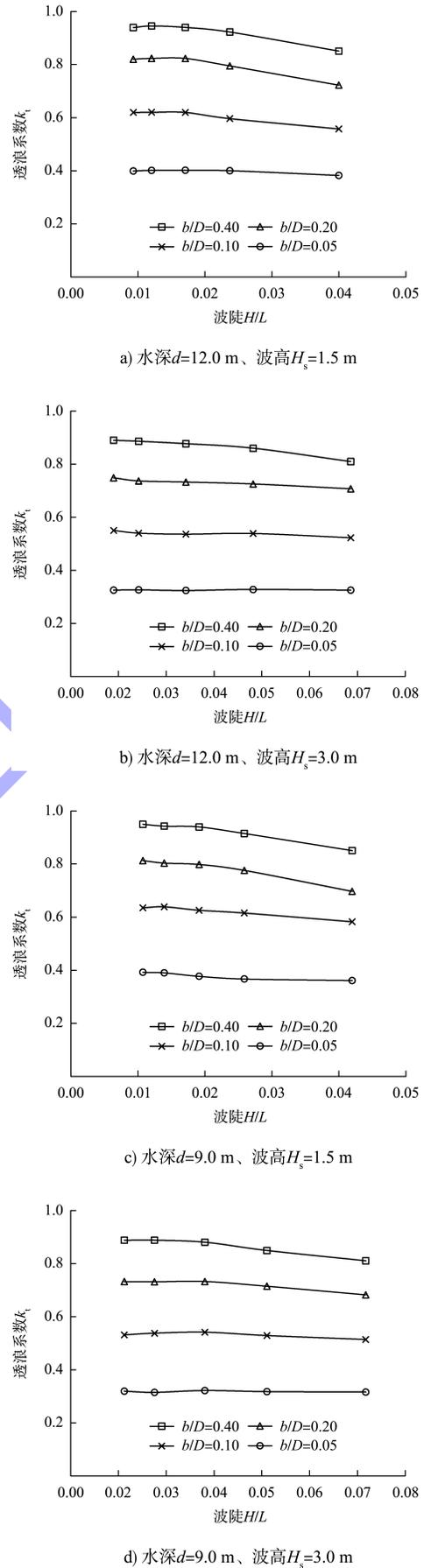
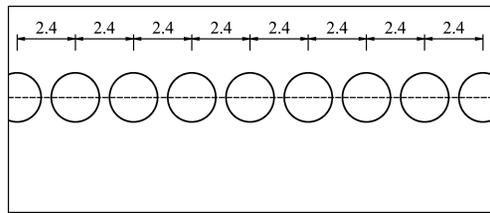


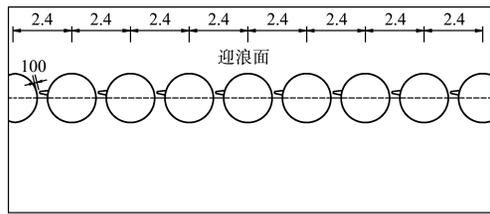
图 3 不同桩间距情况下透浪系数的对比

2.2 肋板对透浪特性的影响

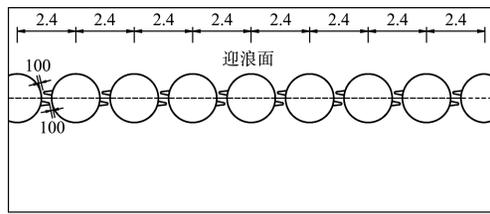
为研究桩间肋板对密排桩结构透浪特性的影响，在相对桩间距 b/D 为 0.20 和 0.05 两种情况下分别进行了不同肋板布置的透浪特性试验。进行肋板对透浪特性影响的试验时，同样不考虑上部承台等结构对波浪的影响不同肋板布置见图 4、5。



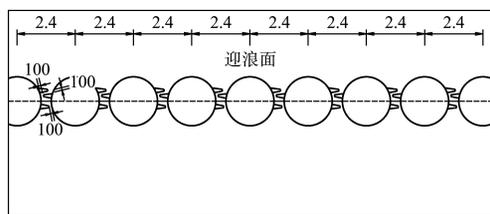
a) 无肋板



b) 1层肋板、 $b'=0.10\text{ m}$ 、 $b/b'=4$



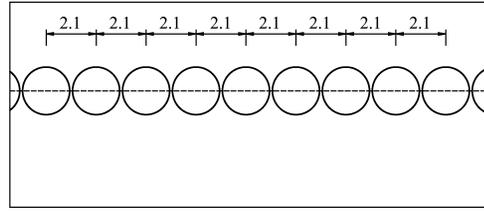
c) 2层肋板、 $b'=0.10\text{ m}$ 、 $b/b'=4$



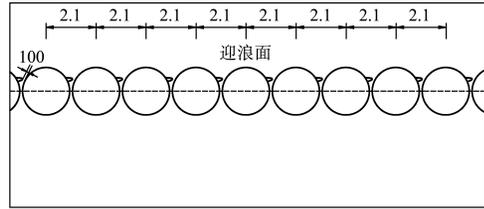
d) 3层肋板、 $b'=0.10\text{ m}$ 、 $b/b'=4$

注： $D=2.0\text{ m}$ ， $b=0.40\text{ m}$ ， b' 为肋板至临近桩净距。

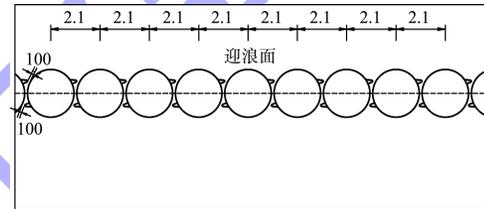
图 4 $b/D=0.20$ 时肋板布置 (单位：m)



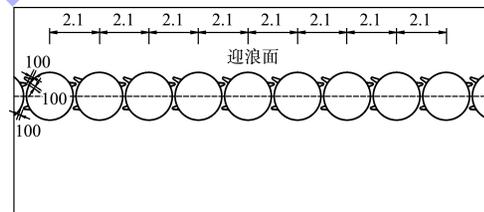
a) 无肋板



b) 1层肋板、 $b'=0.10\text{ m}$ 、 $b/b'=1$



c) 2层肋板、 $b'=0.10\text{ m}$ 、 $b/b'=1$



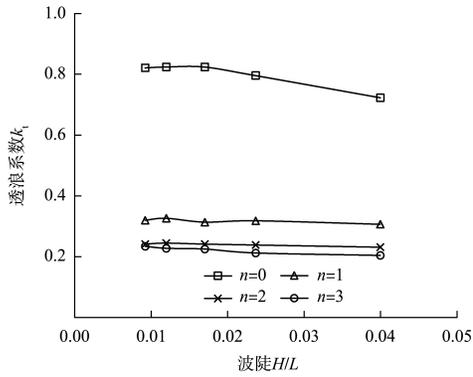
d) 3层肋板、 $b'=0.10\text{ m}$ 、 $b/b'=1$

注： $D=2.0\text{ m}$ ， $b=0.10\text{ m}$ 。

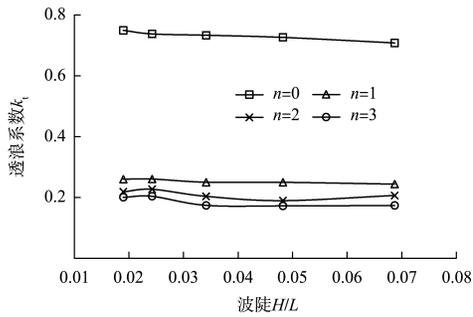
图 5 $b/D=0.05$ 时肋板布置 (单位：m)

相对桩间距 b/D 为 0.20、0.05 时肋板对透浪系数的影响结果见图 6、7。由图 6 可看出，在相对桩间距 $b/D=0.20$ 情况下，肋板数量对密排桩结构的透浪系数影响十分显著，透浪系数随着肋板层数 n 的增多而变小，尤其是无肋板与 1 层肋板相比的情况，随着肋板层数的变多透浪系数减小的趋势变缓；由图 7 可看出，在相对桩间距

$b/D=0.05$ 情况下, 虽然肋板数量对密排桩结构的透浪系数的影响程度小于相对桩间距 $b/D=0.20$ 的情况, 但是透浪系数也随着肋板层数 n 的增多而变小。另外带有肋板的密排桩结构的透浪系数随着波陡 H/L 变化而变化的趋势不明显。

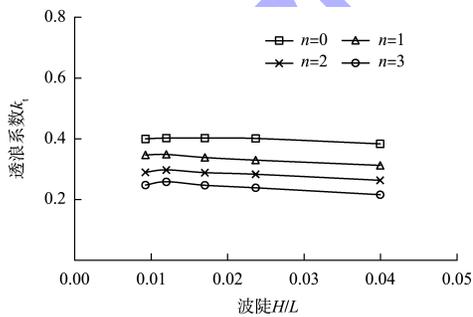


a) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=1.5$ m

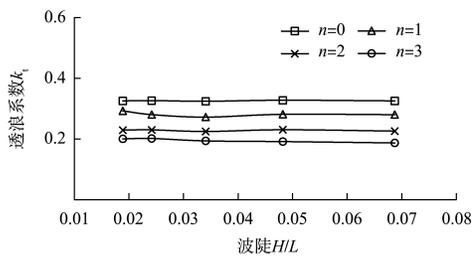


b) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=3.0$ m

图 6 $b/D=0.2$ 时不同肋板层数的透浪系数



a) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=1.5$ m

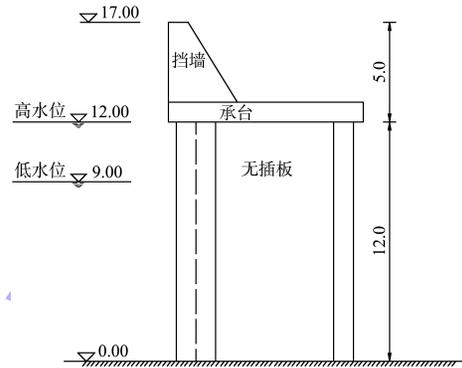


b) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=3.0$ m

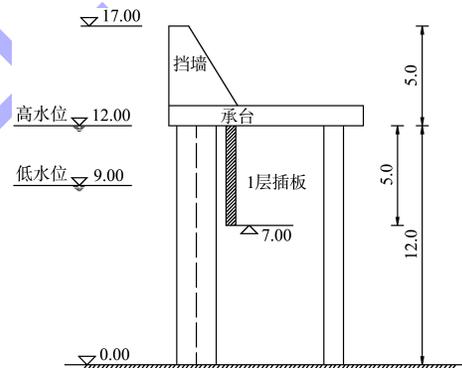
图 7 $b/D=0.05$ 时不同肋板层数的透浪系数

2.3 插板对透浪特性的影响

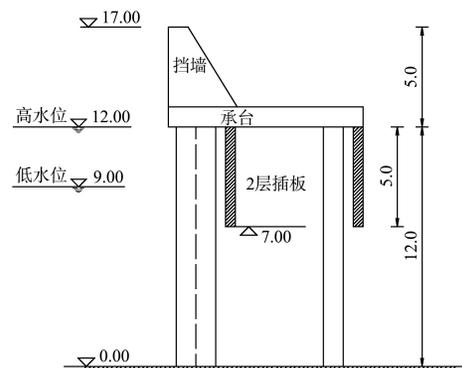
为研究桩后插板对密排桩结构透浪特性的影响, 在 $b/D=0.20$ (无肋板)、 $b/D=0.05$ (无肋板) 和 $b/D=0.05$ (2 层肋板、肋板至桩缝隙相对间距 $b/b'=1$) 3 种情况下分别进行不同插板布置的透浪特性试验, 得到不同插板布置的密排桩结构的透浪系数。不同插板布置见图 8。



a) $b/D=0.20$ 、无肋板



b) $b/D=0.05$ 、无肋板

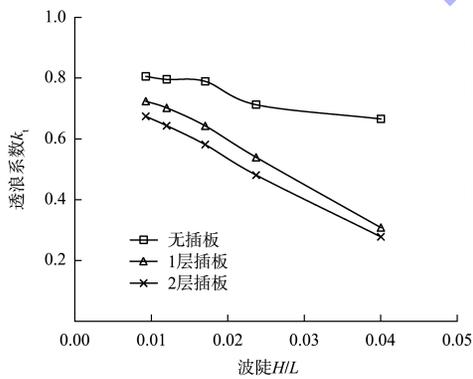


c) $b/D=0.05$ 、2层肋板、 $b/b'=1$

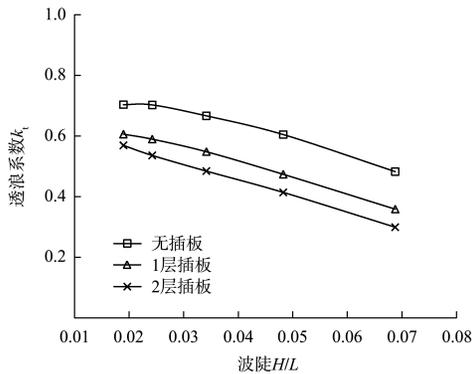
图 8 桩后不同插板布置 (单位: m)

相对桩间距 $b/D=0.20$ (无肋板)、相对桩间距 $b/D=0.05$ (无肋板) 和相对桩间距 $b/D=0.05$ (2 层肋板、 $b/b'=1$) 3 种情况下桩后插板对透浪系数的

影响结果见图9~11。由图9可看出,在相对桩间距 $b/D=0.20$ (无肋板)情况下,桩后插板对的影响较为明显,透浪系数随着插板层数的增多而变小,与无插板相比,桩后设置1层插板的透浪系数平均相对减小了21%左右,桩后设置2层插板的透浪系数平均相对减小了29%左右;由图10可看出,在相对桩间距 $b/D=0.05$ (无肋板)情况下,桩后插板对透浪系数的影响程度明显小于相对桩间距 $b/D=0.20$ (无肋板)的情况,尤其在波陡 H/L 较小的条件下有无插板的透浪系数总体上差别很小;由图11可看出,在相对桩间距 $b/D=0.05$ (2层肋板、 $b/b'=1$)情况下,各组水深、波高和波浪周期条件下桩后有无插板的透浪系数差别均很小,桩后插板对透浪系数的影响很小。进一步分析可知,当插板前的密排桩结构透浪较大时,桩后插板可明显提高整体结构的透浪效果,而当插板前的密排桩结构透浪较小时桩后插板对整体结构的透浪效果影响不大。

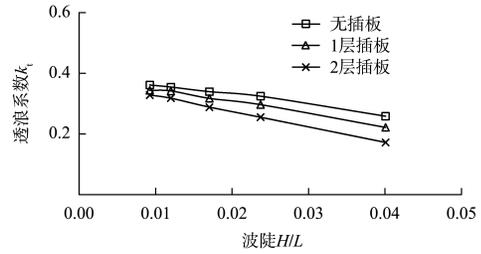


a) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=1.5$ m

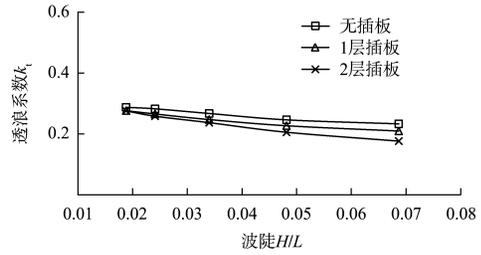


b) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=3.0$ m

图9 $b/D=0.20$ (无肋板)时的透浪系数

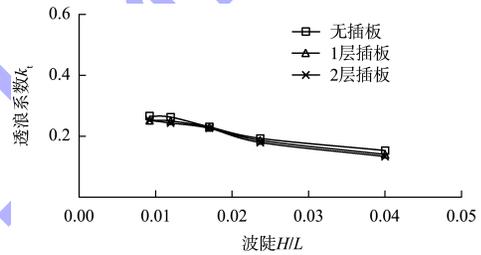


a) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=1.5$ m

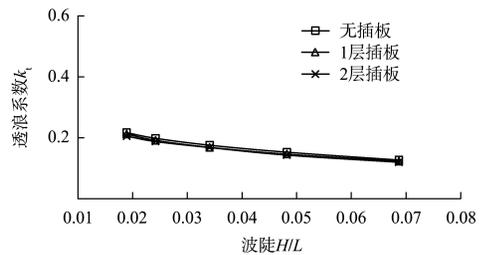


b) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=3.0$ m

图10 $b/D=0.05$ (无肋板)的透浪系数



a) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=1.5$ m



b) 水深 $d=12.0$ m、波高 $H_s=3.0$ m

图11 $b/D=0.05$ (2层肋板)的透浪系数

3 经验公式拟合

结合上述试验结果,将其与现有理论公式进行对比,结果见表1。

表1 试验值与理论值对比

公式	平均误差/%			
	$\eta=0.286$	$\eta=0.167$	$\eta=0.091$	$\eta=0.048$
Wiegel	40.3	46.6	47.0	39.5
Hartmann	21.8	27.7	26.8	15.5
Massel	4.4	10.5	29.3	67.7
Hayashi	10.4	18.0	25.7	30.4

注: $\eta=b/(b+D)$ 。

由表 1 可知, Wiegel 和 Hartmann 公式理论值较试验值误差较大; Massel 公式在透空率较小的情况下误差变大; Hayashi 修正公式误差最小, 但也存在误差随着透空率变小而变大。本文旨在拟合组合式桩基防波堤在较小透空率下的透浪系数的经验公式。

结合上述桩间距和桩上肋板对透浪系数的影响, 较小透空率下插板对透浪系数的影响较小, 因此选取分析的无量纲量分别为相对桩间距、波陡、桩间肋板层数, 肋板至桩缝隙相对距离。组合式密排桩结构的透浪系数 k_t 计算公式假设为:

$$k_t = f_1(b/D, H/L) \cdot f_2(n, b/b') \quad (1)$$

式中: f_1 为桩间距影响的函数式, f_2 为桩上肋板影响的函数式。

根据 b/D 和 H/L 对密排桩结构的透浪系数影响趋势, 桩间距影响的函数采用以下公式进行拟合:

$$f_1(b/D, H/L) = \tanh[a_0(b/D)^{a_1}(H/L)^{a_2}] \quad (2)$$

式中: a_0 、 a_1 和 a_2 为无因次系数。采用无肋板的试验数据进行多元线性回归分析, 可确定式(2)中的系数, 得到的函数式为:

$$f_1(b/D, H/L) = \tanh[1.51(b/D)^{0.66}(H/L)^{-0.17}] \quad (3)$$

根据 n 和 b/b' 对密排桩结构的透浪系数影响趋势, 桩上肋板影响的函数采用以下公式进行拟合:

$$f_2(n, b/b') = a_3(n+1)^{a_4}(b/b'+1)^{a_5} \quad (4)$$

式中: a_3 、 a_4 、 a_5 为无因次系数。采用有、无肋板的透浪系数比值的试验数据进行多元线性回归分析, 可确定式(4)中的系数, 得到的函数式为:

$$f_2(n, b/b') = 2.05(n+1)^{-0.47}(b/b'+1)^{-0.86} \quad (5)$$

由式(3)、(5)可得到密排桩结构的透浪系数计算方法如下。

桩上无肋板时密排桩结构的透浪系数按下式计算:

$$k_t = \tanh[1.51(b/D)^{0.66}(H/L)^{-0.17}] \quad (6)$$

桩上有肋板时密排桩结构的透浪系数按下式计算:

$$k_t = \tanh[1.51(b/D)^{0.66}(H/L)^{-0.17}] \cdot 2.05(n+1)^{-0.47}(b/b'+1)^{-0.86} \quad (7)$$

组合式密排桩基防波堤透浪系数拟合公式计算值与试验值的比较见图 12。可以看出, 基于本文提出计算公式的结果与试验值吻合良好, 各组透浪系数公式计算值与试验值的相对误差基本上均在 15% 误差范围内, 其相关系数为 0.994, 具有较好的相关性。

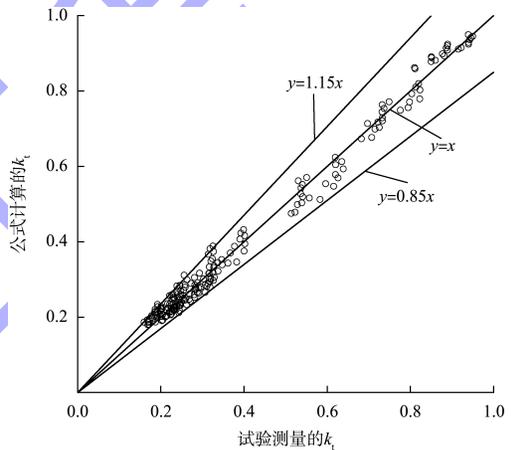


图 12 拟合公式计算值与试验值的比较

4 结论

1) 增设桩间肋板在相对桩间距较大情况下, 对透浪系数影响较大; 但随着肋板层数增加, 效果逐渐减低。相对桩间距较小情况下, 增设肋板的效果降低。

2) 增设板后插板在相对间距大和无肋板等透空率较大的情况下, 对透浪系数影响效果明显; 但随着透空率减少, 影响逐渐降低。

3) 根据各种因素分析, 本文拟合了估算组合式桩基防波堤的透浪系数理论计算公式, 其计算结果与试验值对比具有很好的相关性, 可为后续工程提供参考。