



中长周期波浪作用下多层板浮式防波堤 尺寸特征对消浪性能的影响

王曦巍

(中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300450)

摘要: 多层板浮式防波堤具有质量轻、结构简单、造价低、便于移动、可重复使用、不受水深和地质条件限制等优点。毛里塔尼亚某疏浚工程施工区涌浪大、周期长，严重影响绞吸船的正常施工。为解决中长周期波浪干扰的问题，降低工程预算，基于开源流体力学平台 OpenFOAM，采用雷诺平均 N-S(RANS)方程和剪切应力输运(SST) $k-\omega$ 紊流模型对流场进行模拟，分析板长、板间距、板厚等尺寸特征和不同波浪周期对多层次板浮式防波堤性能的影响，确定影响多层次板浮式防波堤消浪性能的主要尺寸参数。结果表明，提高多层次板浮式防波堤消浪性能最直接有效的方法是增加板长；板间距变化对消浪性能的影响并不完全确定，需要依据实际需求进行选择。

关键词: 多层板浮式防波堤；数值模拟；尺寸优化；透射系数

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0089-06

Influence of size characteristics of multi-layer floating breakwater on wave dissipation performance under medium and long period waves

WANG Xi-wei

(Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: The multi-layer floating breakwater has the advantages of light mass, simple structure, low cost, easy to move, reusable, and not limited by water depth and geological conditions. The construction area of a dredging project in Mauritania has large swells and long period waves, which affect the dredging operation of cutter suction dredger. To solve the problem of medium and long period waves interference and reduce project budget, we use Reynolds average (RANS) equation and shear stress transport (SST) $k-\omega$ turbulence model to simulate the flow distribution based on the open source fluid mechanics platform OpenFOAM, analyze the dimensional characteristics of the multi-layer floating breakwater including plate length, plate spacing, plate thickness and the influence of different wave periods on the performance of multi-layer floating breakwater, and determine main dimensional parameters affecting wave dissipation performance of multi-layer floating breakwater. The results show that the most direct and effective way to improve the wave elimination performance of the multi-layer floating breakwater is to increase the length of board. The effect of the spacing change of board on the wave elimination performance is not completely determined, and it needs to be selected according to the actual needs.

Keywords: multi-layer floating breakwater; numerical simulation; dimensional optimization; transmission coefficient

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 王曦巍(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事疏浚装备及施工技术研究。

近年来,多层次板浮式防波堤在港口工程领域的相关研究越来越多,其优点是安装方便且建造成本较低。大型绞吸挖泥船适合施工的区域涌浪周期一般在6 s以内^[1],为应对在7 s及以上的中长周期波工况,考虑采用多层次板浮式防波堤进行消浪,进而降低波浪对绞吸船施工的影响。中长周期波与一般的短周期涌浪和风浪不同,其波高不大、波长较长、波速较快,具有极强的穿越浮式防波堤的能力,因而传统的浮式防波堤在减少长周期波危害方面往往容易失效,难以满足疏浚工程需求^[2-4]。为解决多层次板浮式防波堤对中长周期波易失效的问题,基于毛里塔尼亚某疏浚工程的实际需求,通过开展数值模拟仿真,分析包括板长、板间距、板厚在内的尺寸特征和不同波浪周期对多层次板浮式防波堤性能的影响,确定适合的结构尺寸,为后续工程应用提供有效数据。

1 工况概况

毛里塔尼亚某疏浚工程平面布置见图1,分别选取丁坝内外不同位置的3个观测点进行波浪观测。某日在3个点位的实测波浪工况数据见表1。

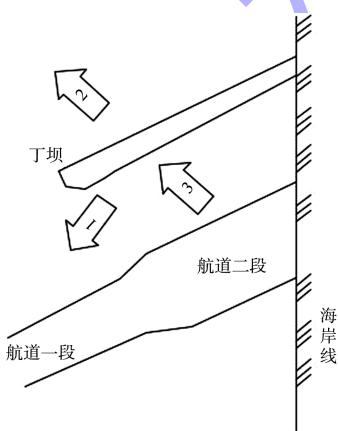


图1 毛里塔尼亚某疏浚工程平面布置

表1 波浪数据

观测位置	潮位种类	潮位/m	观测点水深/m	浪高/m	周期/s
1		1.77	2.60	0.6	7.3
2	高潮位	1.77	5.10	1.0	7.5
3		1.77	2.24	0.7	7.2
1		1.76	2.60	0.6	7.6
2	中潮位	1.76	5.10	1.1	7.7
3		1.76	2.24	0.7	7.3
1		1.64	2.60	0.6	7.4
2	低潮位	1.64	5.10	1.1	7.6
3		1.64	2.24	0.8	7.2
1		1.07	2.60	0.8	7.8
2	低潮位	1.07	5.10	1.3	8.0
3		1.07	2.24	1.0	7.5
1		1.23	2.60	0.9	7.7
2	中潮位	1.23	5.10	1.4	8.1
3		1.23	2.24	1.1	7.4
1		1.40	2.60	1.0	7.9
2	高潮位	1.40	5.10	1.5	8.0
3		1.40	2.24	1.2	7.2

2 试验设置

在数值模拟中,为提高计算效率,暂不考虑地形变化对浮式防波堤消浪性能的影响,将地形设置为平底地形。根据Cui等^[5]的研究可知,在波高与水深之比为0.6的情况下,地形发生剧烈变化(水深陡降1/2,即水底地形抬升水深的1/2)时,波浪透射系数具有基本一致的变化趋势,同条件下不同地形下透射系数差距总体小于10%,最大差距小于15%。若将地形简化为平底地形,只改变全局水深,对于浮箱的消浪性能不会存在明显影响。因此结合现场实际水深情况,在仿真模型试验中将水深均设置为5.1 m。

波高的变化主要集中在0.8~1.5 m,周期变化主要集中在7.2~8.0 s,因此选取的参数为波高1 m、周期7.5 s。实际海况中的波浪往往为不规则波,可以视作多种规则波的叠加。主导波形为长周期波时,其波谱中往往包含了短周期波,因此设置周期3.5和7.5 s两个对照组,试验参数见表2。

表2 计算工况设置

对照组	波周期/s	水深/m	波高/m	波长/m	板长/m	板厚/m	板数量/个	板间距/m	板间距与板厚之和/m
1	7.5	5.1	1	50.7	4.8	0.08	6	0.32	0.40
2	3.5	5.1	1	18.2	3.6	0.04	6	0.16	0.20

在模型的长度方向上, 为避免结构物对造波和消波效果的影响, 造波边界与浮箱之间距离设置为3~4倍入射波长, 出流边界附近设置海绵消波层, 长度为2倍入射波长, 浮防波堤右侧与海绵层的间距为2倍入射波长, 模型见图2。

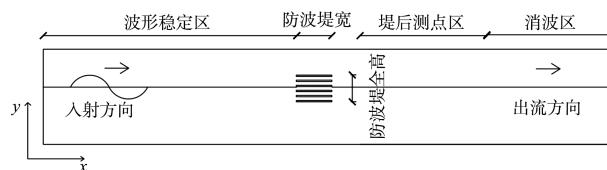
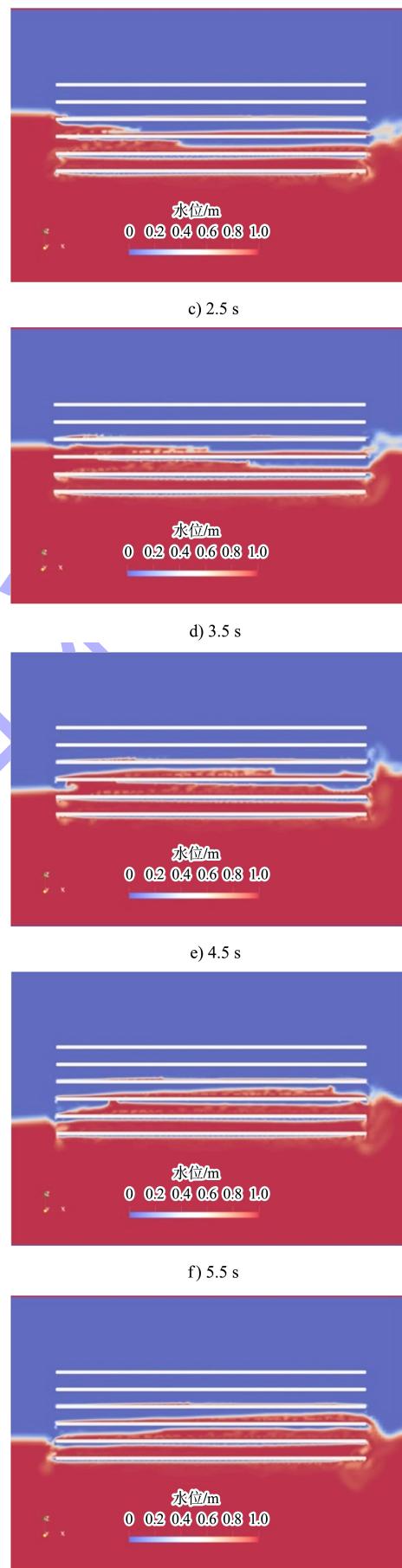


图2 多层板数值波浪水槽

3 流场分析

1个周期内波浪经过多层平板的水位见图3。图3a)~c)为多层平板前的水位上涨, 平板后部的水流逆向卷积。图3d)~h), 水流分层进入平板内, 越高处的平板间隔内经过的水流量越少, 在最下边的平板两侧形成微小的漩涡。涨水期在多层平板左侧板与水流相接处的流速较大, 平板右侧形成1个漩涡, 而紧贴第3层板底部存在最大流速, 之后多层平板的左侧底部和顶部交替出现涡流, 平板中部出现最大流速, 而由于水流脱离平板在右侧重新汇入, 右侧总存在流速较大的漩涡。涡流运动是流体动能消耗的主要因素之一, 可以通过一定的结构改动增加涡流运动, 进而提高消浪性能。



a) 0.5 s

f) 5.5 s

b) 1.5 s

g) 6.5 s

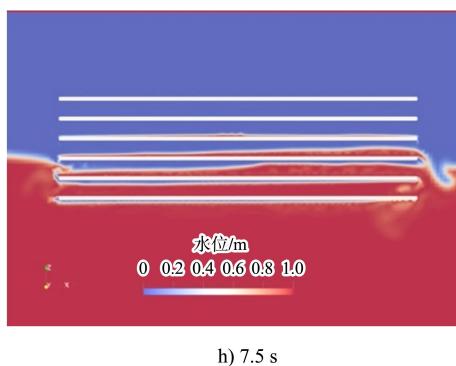


图 3 1 个周期内多层平板水位

4 波浪历时曲线分析

防波堤前后测点的波高历时曲线见图 4。堤前和堤后测点测得的波高平均值为 0.973 和 0.778 m。

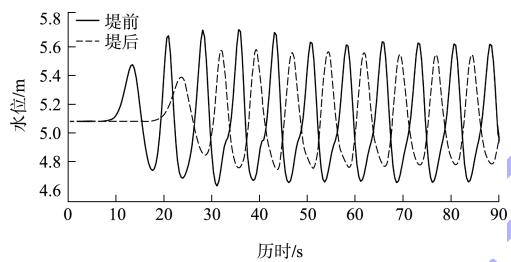


图 4 堤前后测点波高历时曲线

5 各参数对透射系数的影响

5.1 波周期

为了对比浮防波堤的消波作用, 使用透射系数进行评价:

$$K_t = \frac{h_i}{h_i} \quad (1)$$

式中: K_t 为透射系数; h_i 为透射波高 (m), 使用 Goda 两点法, 由堤后测点数据求得; h_i 为入射波高 (m)。

在对照组 1 的基础上, 改变波浪周期范围, 在 7.5~11.0 s 进行测试, 得到的 K_t 与波周期 T 的变化曲线见图 5。可以看出当波周期增加时, 多层板浮式防波堤的透射系数显著增加, 周期 11.0 s 时的透射系数比周期 7.5 s 时增加了约 11.5%, 周期 10.0 s 时的透射系数比周期 7.5 s 时增加了约 5%。该对照组尺寸的多层板浮式防波堤在波浪周

期大于 10.0 s 时消浪效果迅速衰减, 针对该尺寸的多层板浮式防波堤还需要对其他因素进行分析, 从而提升消浪性能。

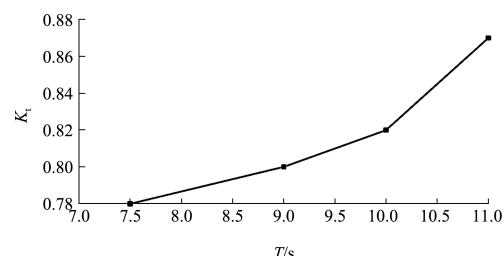
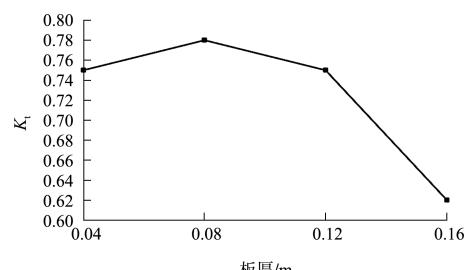


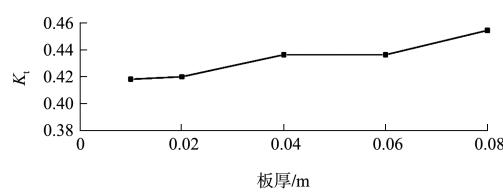
图 5 对照组 1 在周期 7.5~11.0 s 的多层板透射系数变化曲线

5.2 板厚

调整对照组 1 和 2 的板厚进行测试, 其中对照组 1 的板厚测试范围为 0.04~0.16 m, 对照组 2 的板厚测试范围为 0.01~0.08 m, 最终得到的 K_t 与板厚的变化曲线见图 6。可以看出, 对照组 1 的透射系数随着板厚的增加先略微增加后明显减小, 消浪性能显著提高, 最大透射系数相比最小透射系数大了约 25.8%; 对照组 2 的平板厚度增加时, 多层板透射系数略有上升, 变化并不明显, 最大透射系数相比最小透射系数增加了约 7%。综合两组的情况, 认为板厚度和消浪性能并非简单的线性关系, 基于不同测试条件会产生较大变化。



a) 对照组1



b) 对照组2

图 6 K_t 与板厚的变化曲线

5.3 板长

调整对照组 1 和 2 的板长进行测试, 其中对照组 1 的板长测试范围为 4.8~9.6 m, 对照组 2 的板长测试范围为 2.4~4.8 m, 最终得到的透射系数 K_t 与板长的关系变化曲线见图 7。可以看出, 对照组 1 的板长增加到 9.6 m, 透射系数降低约 33.3%; 对照组 2 的板长增加到 4.8 m, 透射系数降低约 23.6%。因此增加板长是提升多层板浮式防波堤消浪性能较为直接的方式。

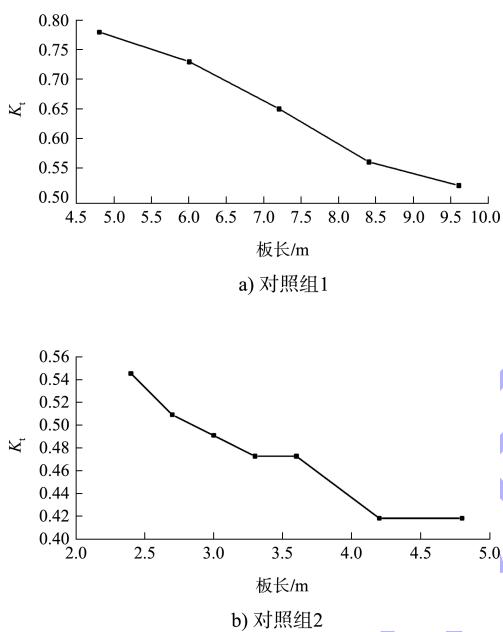


图 7 K_t 与板长的变化曲线

5.4 板间距

调整对照组 1 和 2 的板间距进行测试, 为方便统计, 横坐标取值为板间距与板厚之和, 其中对照组 1 的板间距与板厚之和测试范围为 0.3~0.6 m, 对照组 2 的板间距与板厚之和测试范围为 0.16~0.32 m, 最终得到的 K_t 与板间距与板厚之和的变化曲线见图 8。可以看出, 对照组 1 的 K_t 先增大后有一定减小, 最小透射系数与最大透射系数相比下降约 4%; 对照组 2 的 K_t 先减小后有一定回升, 最小透射系数与最大透射系数相比下降约 14.9%。在当前试验对照组设置的条件下, 板间距的改变对透射系数的影响并不显著。

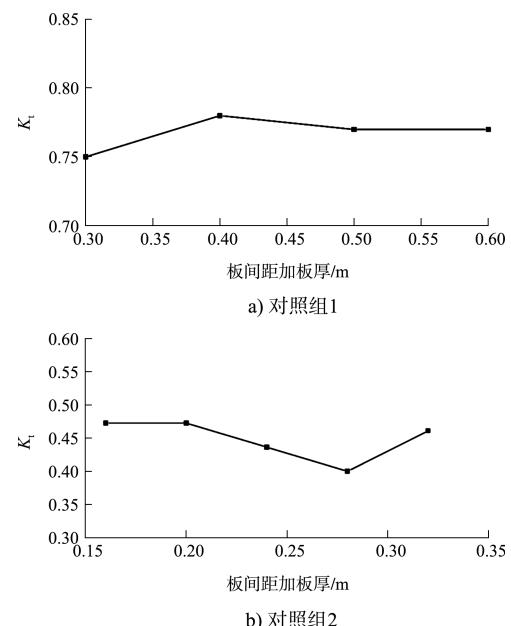
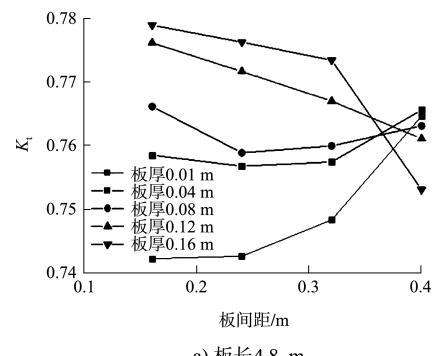


图 8 K_t 随板间距与板厚之和的变化曲线

5.5 板间距、板长和板厚联合研究

将板间距、板长和板厚的研究结果汇总, 见图 9。经分析可知, 板长为 9.6 m 的多层板浮式防波堤消浪性能明显优于板长 4.8 m, 分别取两组板长透射系数的最大、最小值进行对比发现, 板长 9.6 m 的透射系数相较于板长 4.8 m 减少 20%~28%。随着板间距的增加, 板厚小、板长短的多层板结构消浪性能呈下降趋势, 如图 9a) 所示; 板长长的多层板结构消浪性能则是先下降后上升, 板厚大的多层板消浪性能上升, 如图 9b) 所示。总体而言, 板厚小的情况下, 消浪性能更好。板厚和消浪性能并不是单纯的线性关系, 而是随着板间距发生变化, 例如当板间距为 0.2 m 时, 板厚小的多层板消浪性能更好; 而板间距为 0.4 m 时, 板厚为 0.16 m 的多层板消浪性能好。但总体上板间距的变化对于消浪性能影响并不显著。



a) 板长 4.8 m

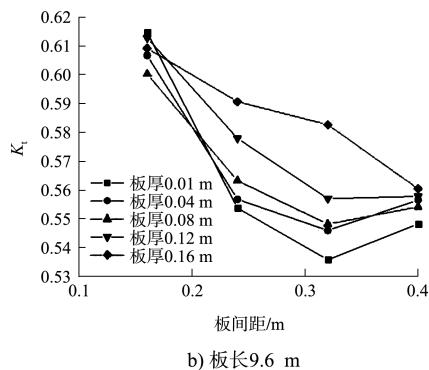


图 9 板长不同的多层板浮式防波堤透射系数
随板间距和板厚的变化曲线

6 结论

1) 由于波浪的绕射特性, 波周期的增大会明显降低多层板浮式防波堤的消浪性能。在对照组 1 的试验条件下, 波周期从 7.5 s 增加至 11.0 s 时透射系数上升了约 11.5%。

2) 提高多层板浮式防波堤消浪性能最直接有效的方法是增加板长。针对对照组 1 和 2, 当板长与波长比值约为 0.16 时透射系数均为 0.55 左右。如果增加 1 倍板长, 能够分别降低 23% 和 33% 的透射系数。

3) 多层板的间距变化对于多层板消浪性能的

影响并不完全确定, 需要依据实际需求进行选择。板长短、厚度小时适宜 0.2 m 的板间距; 板长短、厚度大时适宜 0.4 m 的板间距; 板长长、厚度小时适宜 0.3 m 的板间距; 板长长、厚度大时适宜 0.40~0.45 m 的板间距。

4) 针对中长周期波浪进行浮式防波堤的布置时, 对相对较短周期的波浪能够起到更好的效果, 因此并不需要针对相对较短周期的波浪进行额外考虑。

参考文献:

- [1] 刘航. 绞吸挖泥船施工受波浪作用研究[J]. 水运工程, 2017(9): 206-208, 213.
- [2] 张大伟. 毛里塔尼亚友谊港介绍[J]. 天津航海, 1997(2): 46-47.
- [3] 刘晔. 西部非洲强输沙率海岸特征及港口建设[J]. 港工技术, 2019, 56(4): 25-30.
- [4] 王超, 秦世杰, 于明, 等. 长周期波作用下透空式防波堤的防浪性能研究[J]. 港工技术, 2019, 56(4): 20-24.
- [5] CUI J, LIU H, DENG X K, et al. An experimental study on hydrodynamic performance of a box-floating breakwater in different terrains[J]. Journal of marine science and technology, 2019, 25(1): 991-1009.

(本文编辑 王璁)

(上接第 88 页)

5 结论

1) 为了解决常规灌注桩水上作业平台的螺旋管打设困难、平台基础体系难以形成的难题, 采用岸侧回填块石+搭设 2 排贝雷架、外侧 1 排螺旋管桩的方案。典型试验段结果显示, 施工过程中作业平台没有产生较大的滑移突变、沉降较均匀, 证明该设计方案可行。

2) 工程实例证明该水上作业平台结构简单、易操作、能快速形成, 降低了灌注桩水上作业平台安全隐患、提高灌注桩进度与质量、节省了施工成本, 可为同类高桩码头工程设计及施工提供参考。

参考文献:

- [1] 文鹏, 陈志永. 高桩码头施工技术的应用分析[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(12): 200-201.
- [2] 严海宁, 江栋材, 向一明, 等. 大型海上钢栈桥及钢平台标准化施工工艺研究[J]. 中国水运(下半月), 2019(5): 112-114.
- [3] 中交第一航务勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.
- [4] 耿嘉庆. 桥梁水上钢栈桥、钢平台设计及有限元仿真分析[J]. 西部交通科技, 2021(4): 149-153, 205.
- [5] 杨学锋. 贝雷架支架结构的平面计算与空间计算结果对比分析[J]. 施工技术, 2016, 45(S2): 333-336.

(本文编辑 武亚庆)