

张紧式锚泊单浮箱水动力特性试验研究

纪巧玲,徐妍,徐成浩

(山东科技大学 交通学院,山东 青岛 266590)

摘要:为研究张紧式浮式防波堤的水动力性能,采用二维物理模型试验方法,研究系泊缆锚泊倾角、系泊缆预张力以及浮箱相对宽度等因素,在规则波作用下对迎浪面动水压力、系泊缆拉力以及透射系数等水动力特征的影响规律。结果表明:随着锚泊倾角增加,迎浪面动水压力呈先增加后减小的趋势,系泊缆拉力呈先增加后轻微减小的趋势,透射系数则呈明显的减小趋势;随着系泊缆预张力增加,迎浪面动水压力、系泊缆拉力呈增加趋势,透射系数呈先减小后增加趋势;随着浮箱相对宽度增加,迎浪面动水压力、系泊缆拉力和透射系数均呈减小趋势。该结果可为张紧式锚泊单浮箱浮式防波堤的设计和安全性评估提供参考。

关键词:张紧式锚泊;浮箱;消波性能;水动力特性;物理模型试验

中图分类号:U656.2

文献标志码:A

Experimental study on hydrodynamic characteristics of a taut moored floating box

Ji Qiaoling, XU Yan, XU Chenghao

(College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To investigate the hydrodynamic capabilities of the taut floating breakwater, a two-dimensional physical modelling experiment was performed to study the influencing laws of such hydrodynamic characteristics as the hydrodynamic pressure on the front surface of the box, tension of mooring line and transmission coefficient under regular waves, considering factors such as mooring angle, pre-tension of mooring line and relative width of the floating box. The results show that, with the increase of the mooring angle, the hydrodynamic pressure on the front surface of the box first increases and then decreases; the tension of mooring line first increases and then decreases slightly; and the transmission coefficient obviously decreases. As the pre-tension of the mooring line increases, the hydrodynamic pressure on the front surface of the box and the tension of the mooring line increase, and the transmission coefficient first decreases and then increases. As the relative width of the floating box increases, the hydrodynamic pressure on the box, tension of mooring line and transmission coefficient all show a decreasing trend. The results can provide a reference for the design and safety assessment of taut mooring single pontoon floating breakwaters.

Key words: taut mooring; floating box; wave attenuation performance; hydrodynamic characteristics; physical modelling experiment

张紧式锚泊结构的系泊缆在静水中处于拉紧状态,这种布链方式的锚泊半径相对较小,能够有效减少对海域的占用^[1-2]。相较于悬链式锚泊结构,张紧式锚泊结构的系泊缆拉力更大,能够有效减小浮式结构横荡和垂荡的运动幅度,在一定程度上能保证结构的平稳性,提升防波效果,因此在海洋浮式结构领域的应用十分广泛^[3],如浮桥、张力腿平台、悬浮海底隧道等。

收稿日期:2023-08-25

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020MEB259, ZR2016EEB06);山东省高等学校科技计划项目(J18KA198);中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放研究基金项目(KLOCW2006)

作者简介:纪巧玲(1984—),女,山东烟台人,副教授,博士,主要从事近海工程研究. E-mail:jiqiaoling@126.com

在工程应用中,浮式防波堤需要考虑的关键因素是防波堤的水动力特性,目前的研究成果主要针对悬链式锚泊结构。文献[4-6]研究了规则波作用下悬链式系泊的浮式防波堤水动力特性,结果表明增大浮箱的宽度或吃水深度均可减小透射系数,提升其防波性能。关于浮式防波堤的研究,研究者的关注点主要是浮箱的透射系数、系泊缆拉力以及运动响应情况等。文献[7-8]研究了带腹板型浮式防波堤的透射系数、锚链拉力等变化情况。Ji等^[9-10]通过试验对比研究了圆柱形浮式防波堤、多孔浮式防波堤以及网格笼型浮式防波堤的透射系数、系泊缆拉力及运动响应情况;董华洋等^[11-12]研究了规则波作用下浮箱式浮防波堤系泊缆的刚度系数以及相对宽度对系泊缆受力的影响,结果表明系泊缆刚度越大,浮箱迎浪面系泊缆受力越大。部分研究者对悬链式锚泊结构的运动响应进行了研究,与张紧式锚泊结构进行了对比分析。袁培银等^[13]分析了圆筒型浮式防波堤的运动响应,结果表明悬链系泊对浮体的横向和垂向运动限制效果不明显;金哲飞等^[14]通过数值模型模拟浮式防波堤的运动响应以及锚链张力,结果表明采用悬链式锚泊时,锚链拖地段的受力分析更加复杂;柳辉^[15]通过模型试验对比张紧式与悬链式海洋平台的系泊缆张力,结果表明张紧式系泊具有更好的稳定性,能有效避免结构物发生触底现象;尚勇志^[16]分析了近岛礁海域浮式结构物的运动响应,结果表明张紧式系泊的稳定性更优;康庄等^[17]对比了单柱式平台作业时使用的张紧式系泊系统和半张紧式系泊系统,分析了相同初始垂向力作用下二者的受力以及运动响应情况,结果表明张紧式系泊系统的性能更优。

上述研究的关注点主要为结构物的运动响应和系泊力,若将张紧式锚泊结构用于浮式防波堤,则需要关注其消波性能和系泊力。于定勇等^[18]对比了悬链式与张紧式锚泊的箱式浮式消波设施的水动力特性,结果表明浮堤采用张紧式锚泊时,消波性能最优,但其研究仅针对透射系数;Peng等^[19]针对淹没的张紧式防波堤,通过物理试验及数值研究对比了矩形浮式防波堤和圆形浮式防波堤的运动响应和系泊缆张力;Yang等^[20]针对张紧式锚泊的水压载式浮式防波堤,通过物理模型试验研究了特定锚泊倾角下不同波浪条件对浮式防波堤的运动情况、系泊力以及浮箱水压的影响,试验结果表明浮箱的运动幅度随波浪周期的增大而增大,系泊力与水压随着相对宽度的增大而减小。这些研究多数针对特殊结构形式的张紧式浮式防波堤的水动力响应,部分研究者考虑了淹没状态与系泊缆角度的影响,但对于张紧式浮式防波堤在不同吃水状态、不同锚泊倾角以及不同系泊缆预张力下的水动力特性(结构物表面动水压力、系泊缆拉力以及透射系数)的分析不够深入透彻。对于潮差较小或潮差较大但波浪较小的海域,张紧式锚泊的浮式防波堤具有更加良好的消波性能^[21],因此在实际应用过程中仍需要更为广泛的试验和数值研究。

浮式防波堤一般应用于浅海海域,且多为悬链式。随着海洋强国战略的提出,海洋旅游、海洋能发电、海洋牧场以及深水港等海洋资源开发逐渐走向应用,对防波堤的性能提出新要求。张紧式浮式防波堤由于锚泊半径小,能够有效减少海域的占用,且作业时结构物更稳定,对其研究和应用逐渐受到重视。对张紧式结构的研究多集中在浮式海洋平台领域,研究的关注点与浮式防波堤不同,研究成果尚不能完全套用于浮式防波堤。为进一步探究张紧式浮式防波堤的水动力特性,本研究采用物理试验方法,以张紧式锚泊的单浮箱为研究对象,分析规则波作用下不同锚泊倾角、系泊缆预张力、浮箱相对宽度以及波高等条件,对浮式防波堤迎浪面动水压力、系泊缆拉力、透射系数的影响,以为张紧式锚泊单浮箱浮式防波堤的工程应用提供参考。

1 物理模型试验

1.1 试验设备与仪器

本研究对象为浮式防波堤,其纵向长度远大于横向宽度,因此采用二维模型试验模拟其水动力特性。物理模型试验在中国海洋大学工程水动力学实验室的二维波浪水槽中进行,水槽长30 m,宽1.0 m,深1.2 m。水槽一端设有造波机,造波波高范围为3~30 cm,周期范围为0.5~3 s;水槽另一端设有由不规则网状结构组合成的消波网,防止透射波反射对水槽内波浪的干涉。试验采用2008型数据采集系统,由BG08-40型波高仪、32通道数据采集仪、Smart Sensor 4.10压力测试系统以及相应的计算机数据处理模块组成,能够实时采集波高、动水压力数据并进行分析。系泊缆拉力采用DHDAS动态信号采集分析系统采集,配备DY-MH-103型拉力称重传感器,量程为0~30 kg,输出灵敏度为20 mV/V,满足试验中拉力数据采集要求。

1.2 试验设计

试验根据重力相似准则进行缩尺设计,按照中国黄海海域近海条件模拟,目标水域水深为 10~20 m,波高为 1.0~3.0 m,波浪周期为 3.0~8.0 s。考虑试验水槽的尺寸以及造波机造波能力等试验条件,选定模型比尺 $\lambda=1:30$ 。据此确定模型试验水深 d 分别为 0.5、0.6、0.7 m,设置 3 组波高 H 分别为 0.05、0.07、0.1 m,以分析不同相对波高的波浪作用下防波堤的水动力特性;每组波高设置 4 个周期 T ,分别为 0.80、1.10、1.25、1.40 s,以分析浮箱相对宽度对防波堤消波特性的影响。

浮箱采用有机玻璃制成,缩尺后的模型尺寸为长 0.96 m×宽 0.30 m×高 0.15 m,在浮箱底部配重铅块以保证吃水深度达到试验设定值。浮箱底部四个角安装挂钩,与拉力传感器和系泊缆相连。系泊缆采用链径 2 mm 的环扣链,由于系泊缆模型很难同时满足重力相似和弹性相似,因此下端连接处使用弹簧模拟系泊缆刚度,弹簧另一端连接挂钩,固定在波浪水槽底部锚固点处的底座上。参照工程常用的柔性系泊缆的特性,原型刚度的研究范围为 1~2 MN/m,模型刚度按照比尺换算后取 5 kN/m。

试验主要研究锚泊倾角、相对宽度 B/L (浮箱的宽度 B /波长 L)和系泊缆预张力三个因素对浮式防波堤水动力特性的影响。其中,研究锚泊倾角的影响时,设置水深 $d=0.5$ m,设置系泊缆预张力 $F_0=49.8$ N,锚泊倾角 α 取 4 组,分别为 $0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ$,试验工况设计如表 1 所示。研究系泊缆预张力的影响时,锚泊倾角设置为 $\alpha=30^\circ$,通过水位升降改变浮箱的吃水,从而改变系泊缆预张力。设置水深分别为 0.5、0.55、0.6、0.7 m,对应的系泊缆预张力取 5 组,分别为 0、49.8、82.4、115.0、163.9 N,其中 $F_0=0$ 时对应悬链式锚泊情况,试验工况设计如表 2 所示。两类工况设计中,均设置 4 个周期,分别为 0.80、1.10、1.25、1.40 s,以研究相对宽度的影响。

表 1 锚泊倾角影响试验工况表

Table 1 Experimental conditions for the influence of the mooring angle

水深 d/m	系泊缆预张力 F_0/N	锚泊倾角 $\alpha/(^\circ)$	波高 H/m	相对宽度 B/L
0.5	49.8	0, 30, 45, 60	0.05, 0.07, 0.10	0.302, 0.169, 0.138, 0.117

表 2 系泊缆预张力影响试验工况表

Table 2 Experimental conditions for the influence of the pre-tension of the mooring line

水深 d/m	系泊缆预张力 F_0/N	锚泊倾角 $\alpha/(^\circ)$	波高 H/m	相对宽度 B/L
0.5, 0.55, 0.6, 0.7	0, 49.8, 82.4, 115.0, 163.9	30	0.05, 0.07	0.302, 0.169, 0.138, 0.117

模型放置于水槽中后部区域,以满足造波机端波浪稳定发展的需要,同时减小浮箱与造波机之间的二次反射波的影响,具体布置如图 1 所示。浮箱迎浪面一侧与背浪面一侧均放置两个波高仪,波高仪 W2 与 W3 距离浮箱外表面 2.0 m,W1 与 W2、W3 与 W4 之间距离为 0.25 m,以便采用 Goda 两点法分离入反射波高数据。

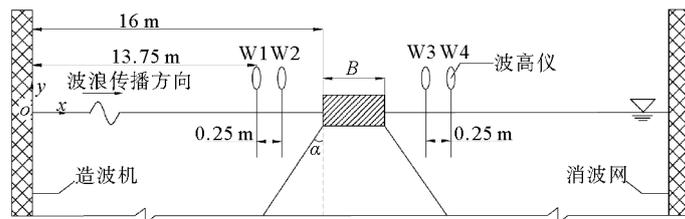


图 1 模型布置图

Fig. 1 Layout diagram of the model

浮箱表面共设置 6 个测点,如图 2 所示。测点 P1、P2、P3 位于浮箱迎浪面中心线处,测点 P4、P5、P6 位

于浮箱背浪面中心线处,同一表面相邻两个测点间距为 3.75 cm。其中,P1 与 P4 位于自由液面以上,P2 与 P5 位于自由液面附近,P3 与 P6 位于自由液面以下。以下选取浮箱迎浪面测点 P1、P2、P3 进行分析。

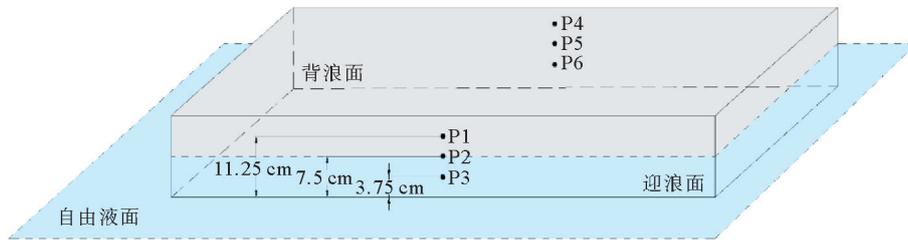


图 2 浮箱表面压力测点分布图

Fig. 2 Distribution of pressure measurement points on the surface of the floating box

1.3 数据处理与采集

试验开始前,需先进行试验水深条件下的波浪率定,确保生成的波浪符合试验要求,本次试验所造波在经过 2~3 个波浪周期后趋于稳定。拉力数据在造波开始前采集,造波结束后停止采集并保存。动水压力历时截取其 10 个平稳周期内的 10 个动水压力峰值,取平均值作为动水压力平均峰值。每组试验分别进行 3 次,试验数据取 3 次的平均值,以消除试验过程中存在的偶然误差。

透射系数 C_t 是浮箱消波性能的衡量标准,计算式为:

$$C_t = H_1 / H_2。$$

式中: H_1 为 W3 和 W4 波高仪的平均波高, H_2 为采用 Goda 两点法计算的入射波波高。

图 3 为波高 $H=0.07$ m、周期 $T=1.40$ s 时迎浪面 W1 波高仪上的拉力历时变化。由图 3 可知,拉力的峰值存在高频振荡现象,且各周期的峰值略有差别。分析时采用上跨零点(初始拉力)法,一个周期内取拉力序列的前 1/3 峰值的平均值作为拉力幅值,取 10 个平稳周期内的拉力幅值的平均值作为系泊缆拉力,迎浪面系泊缆拉力为该侧两个系泊缆拉力的总和。

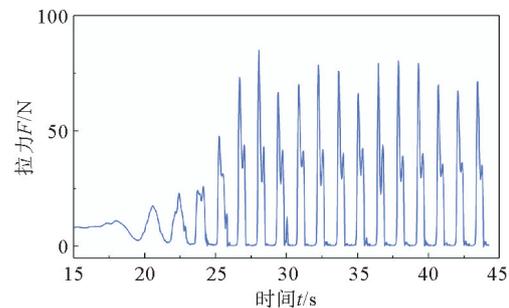


图 3 $H=0.07$ m、 $T=1.40$ s 时拉力历时曲线图

Fig. 3 Time history of the tension of the mooring line when $H=0.07$ m, $T=1.40$ s

2 试验结果分析

2.1 迎浪面动水压力的影响因素分析

按照表 1、表 2 设计工况,分别研究锚泊倾角、系泊缆预张力、相对宽度、波高对浮箱迎浪面动水压力的影响规律。

2.1.1 锚泊倾角的影响

图 4 为不同锚泊倾角下浮箱迎浪面动水压力情况。由图 4 可知,自由面附近及以下的两个测点(P2 和 P3)的浮箱表面动水压力变化趋势基本一致,而位于自由面以上的测点 P1 变化趋势略不同。对于自由面以上的 P1,浮箱表面动水压力随锚泊倾角的增加呈现先增加后减小的趋势,在 $\alpha=30^\circ$ 时动水压力达到最大值。说明锚泊倾角 $\alpha=30^\circ$ 时,波浪与浮箱的相互作用较强,波浪对迎浪面的砰击作用剧烈。对于自由面及以下的测点 P2 和 P3,浮箱表面动水压力变化趋势基本一致,呈先增加后减小再增加的趋势,动水压力在锚泊倾角 $\alpha=45^\circ$ 时存在一个最小值,在锚泊倾角 $\alpha=30^\circ$ 时存在一个最大值。这是由于锚泊倾角较大时,系泊缆会对浮箱的运动响应产生较大限制,此时的情形类似于波浪与静止浮箱的相互作用,波浪能量中有少部分转化为浮箱的动能,大部分能量作用于浮箱箱体,因此浮箱表面的动水压力峰值较大。

综上所述,从浮箱动水压力的角度考虑,存在一个最优锚泊倾角 $\alpha = 45^\circ$, 使得其迎浪面各个测点的动水压力处于较低的范围,有利于浮箱箱壁的结构稳定性。同时,存在一个最不利锚泊倾角 $\alpha = 30^\circ$, 使其迎浪面各个测点的动水压力处于较高的范围内,不利于浮箱箱壁的结构稳定性,在设计时需要尽量避免采用该锚泊倾角。

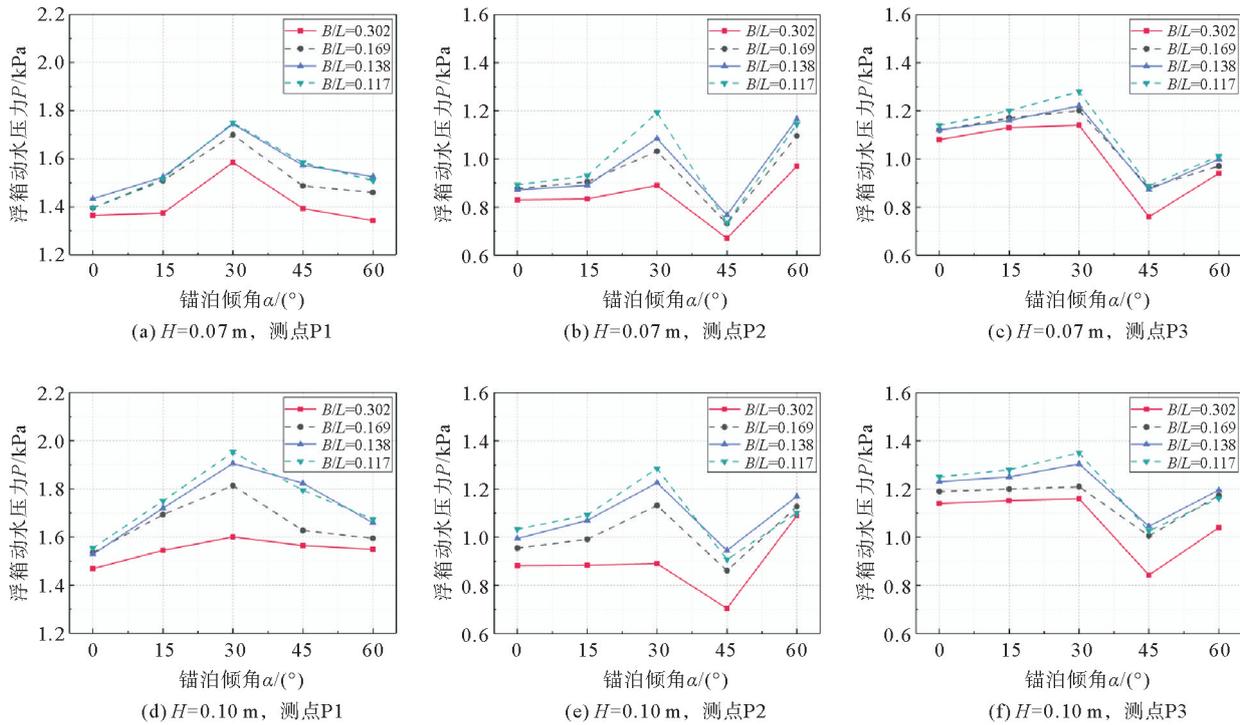


图 4 锚泊倾角对浮箱迎浪面动水压力的影响

Fig. 4 Influence of mooring angle on hydrodynamic pressure on the front surface of the floating box

2.1.2 系泊缆预张力的影响

系泊缆预张力对浮箱迎浪面动水压力的影响如图 5 所示。图 5 中,系泊缆预张力 $F_0=0$ 为悬链式结构,其水深与 $F_0=49.8\text{ N}$ 相同,但系泊缆长度以及浮箱吃水深度不同。系泊缆预张力 F_0 分别为 49.8、82.4、115.0、163.9 N 的试验工况中,系泊缆长度相同,但水深以及浮箱吃水深度不同,系泊缆预张力越大,其水深与浮箱吃水深度越大。

由图 5 可知,随着系泊缆预张力的变化,各测点动水压力的变化趋势基本一致,即随着系泊缆预张力的增大,各测点动水压力呈增大趋势,但各测点的增长幅度略有差异。预张力较小时,3 个测点的动水压力峰值差异较大,随着预张力的逐渐增加,各测点动水压力峰值的差异逐渐减小。相对宽度对动水压力的影响随着系泊缆预张力的增加而逐渐减小。这主要是由于预张力增大使系统的刚性增加,约束了浮箱的运动响应,从而导致波浪的砰击作用加剧。

系泊缆预张力的增大对浮箱迎浪面动水压力增长率的影响如图 6 所示。综合图 5、图 6 可知,测点 P1 的动水压力幅值最大,但增长幅度最小,而测点 P3 的动水压力幅值最小,但增长幅度最大。通过分析各工况对应的吃水变化可知,随着系泊缆预张力的增加,浮箱的吃水深度增加,测点 P1 距静水面的距离在逐渐缩小,测点 P2 由自由面位置变为淹没状态,测点 P3 距静水面的距离则逐渐增大。

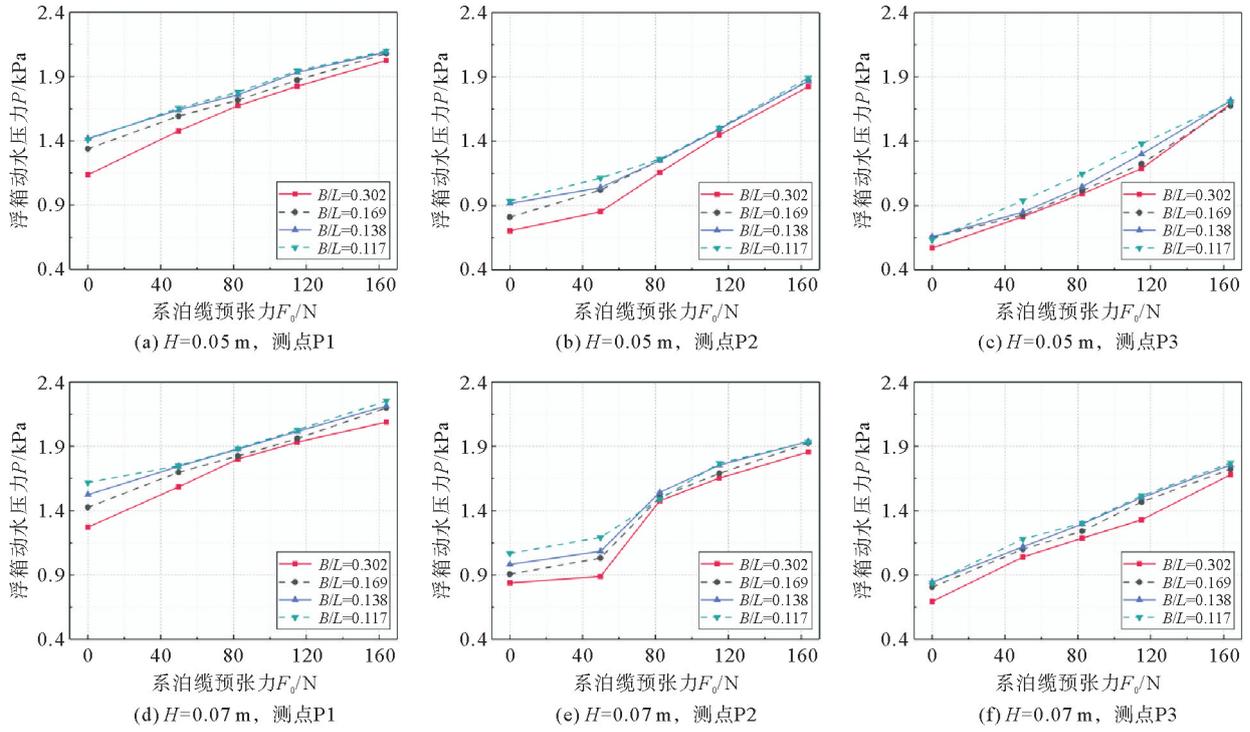


图 5 系泊缆预张力对浮箱迎浪面动水压力的影响

Fig. 5 Influence of pre-tension of mooring line on hydrodynamic pressure on the front surface of the floating box

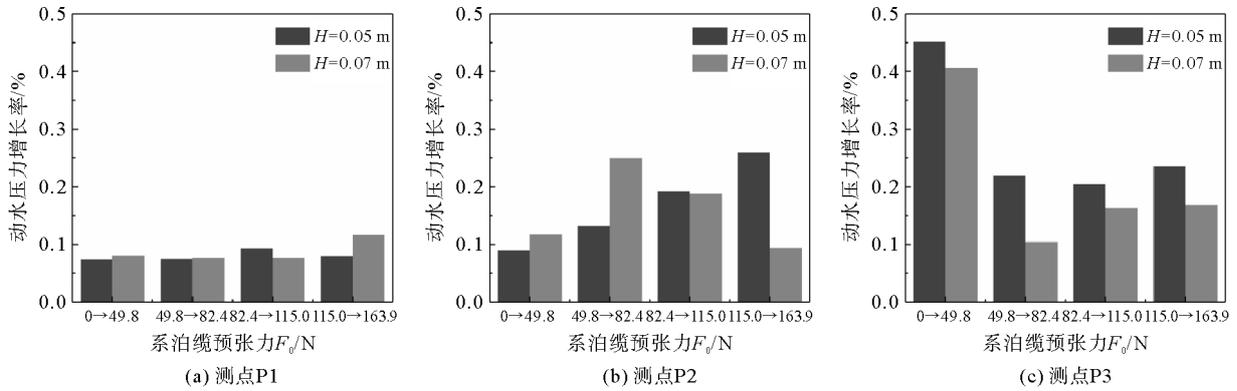


图 6 系泊缆预张力对浮箱迎浪面动水压力增长率的影响

Fig. 6 Influence of pre-tension of mooring line on the growth rate of hydrodynamic pressure on the front surface of the floating box

2.1.3 相对宽度的影响

随着相对宽度的减小,在不同波高和锚泊倾角条件下,相对宽度对浮箱动水压力的影响不同。当锚泊倾角 $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ 时,相对宽度对浮箱动水压力的影响较大,而在其他倾角时影响程度并不大。选取 $d = 0.5$ m、 $\alpha = 30^\circ$, $H = 0.05$ m 和 $H = 0.10$ m 两种工况,分析相对宽度 B/L 对浮箱迎浪面动水压力的影响,结果如图 7 所示。由图 7 可知,浮箱迎浪面动水压力随相对宽度的增大而减小,且在 $B/L = 0.302$ 时,浮箱迎浪面动水压力达到最小,这是由于相对宽度越大,波浪能量越小,对浮箱迎浪面的冲击力也就越小。

2.1.4 波高的影响

由前文可知,浮箱动水压力不仅受锚泊倾角、系泊缆预张力、相对宽度的影响,波高的改变对浮箱动水压力的影响也较为明显。为探究不同波高对浮箱动水压力的影响情况,选取 $\alpha = 30^\circ$ 、 $d = 0.5$ m,吃水深度为 0.10 m,波浪周期 T 分别为 0.80、1.10、1.25、1.40 s,波高 H 分别为 0.05、0.07、0.10 m 等工况进行对比分析

析,对比结果如图 8 所示。图 8 中,横轴取无量纲参数波陡 $s = H/L$ 。

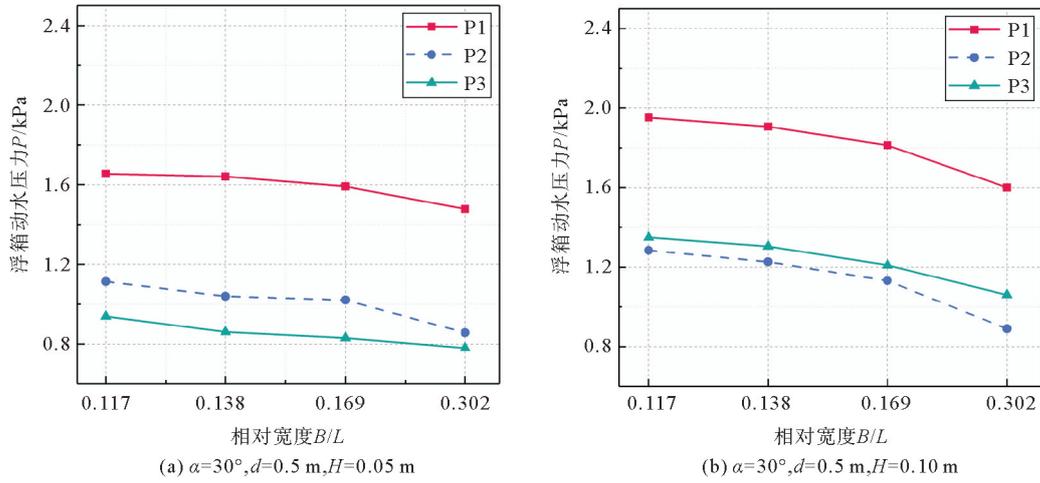


图 7 相对宽度对浮箱迎浪面动水压力的影响

Fig. 7 Influence of relative width on hydrodynamic pressure on the front surface of the floating box

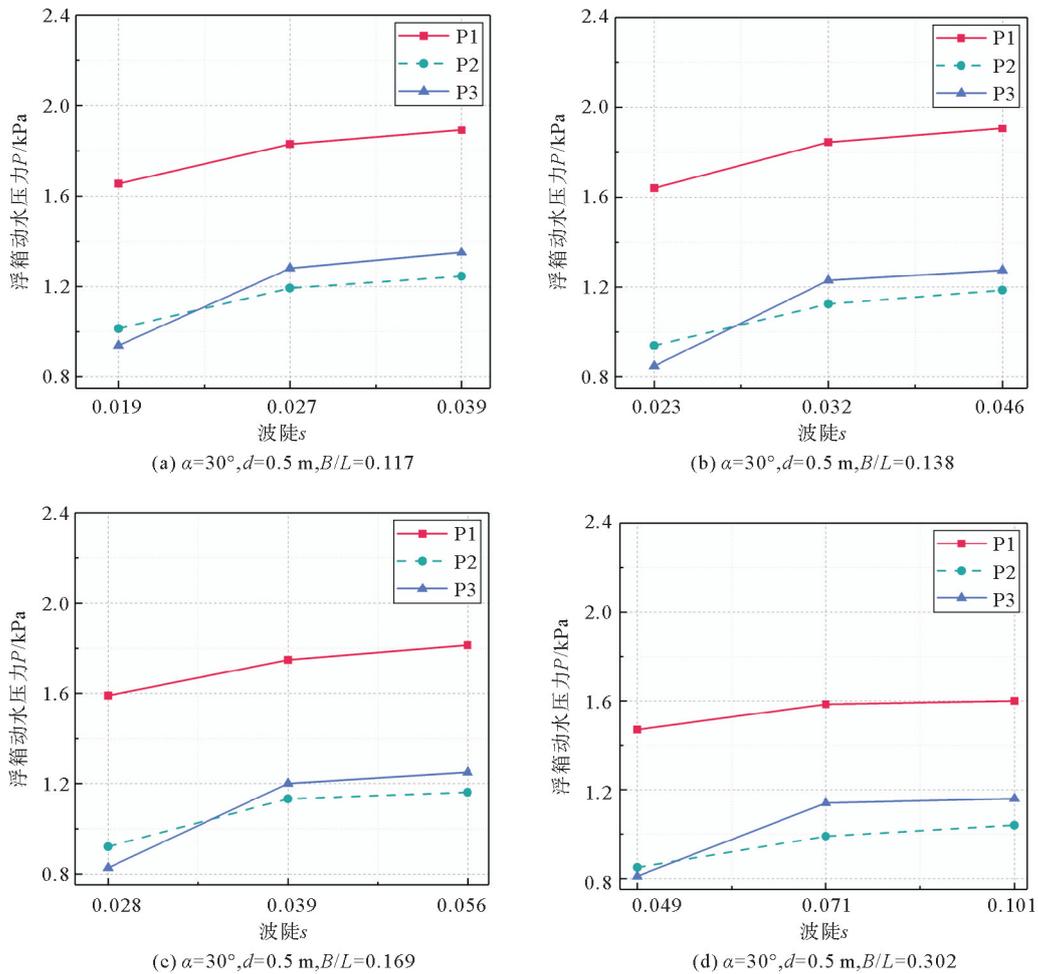


图 8 波高对浮箱迎浪面动水压力的影响

Fig. 8 Influence of wave height on hydrodynamic pressure on the front surface of the floating box

由图 8 可知,浮箱迎浪面所有测点的动水压力均随着波高的增大而增大,且随着波高的增大,影响程度呈减小趋势。这是由于波高越大,波浪的动能相应也会越大,导致波浪与浮箱的相互作用更加剧烈,浮箱迎浪面承受的波浪砰击作用增强,进而使浮箱的动水压力增加。当 $0.028 < s < 0.039$ 时,波陡对浮箱迎浪面动水压力的影响较为显著,而当 $0.039 < s < 0.056$ 时,浮箱迎浪面动水压力的增长速率明显减弱。这是因为对于固定周期的波浪,随着入射波波高增加,其水质点的运动速度增加,浮箱附近的涡流强度也逐渐增加,黏性耗散作用逐渐增强,使得浮箱迎浪面动水压力的增长速率变缓。

2.2 系泊缆拉力的影响因素分析

按照表 1、表 2 设计工况,分别研究锚泊倾角、系泊缆预张力、波高、相对宽度对系泊缆拉力的影响规律。

2.2.1 锚泊倾角的影响

图 9 为水深 $d=0.05$ m,波高 H 分别为 0.07、0.10 m 时,不同锚泊倾角、相对宽度下,系泊缆拉力情况。由图 9 可知,整体上,系泊缆拉力随着锚泊倾角的增大呈先增大后减小的趋势,且系泊缆拉力峰值所对应的锚泊倾角随着波高的增大而增大。对比相同波高下的迎浪面与背浪面的系泊缆拉力变化情况,迎浪面系泊缆拉力的变化幅值约为背浪面拉力的 1.5 倍。这主要由于浮箱对入射波能产生了一定程度的耗散,减小了相互作用力,使背浪面的位移比迎浪面小。不同波高下,系泊缆拉力达到峰值时所对应的锚泊倾角也不同。对于 $H=0.07$ m,锚泊倾角增加到 30° 时,系泊缆拉力达到峰值,随后拉力呈减小趋势。对于 $H=0.10$ m,锚泊倾角增加到 45° 时,系泊缆拉力达到峰值,随后拉力呈减小趋势。这是由于在锚泊倾角增大的过程中,系泊缆限制浮箱运动,系泊缆拉力由以垂直方向为主变为以水平方向为主,浮箱的垂荡运动对系泊缆水平拉

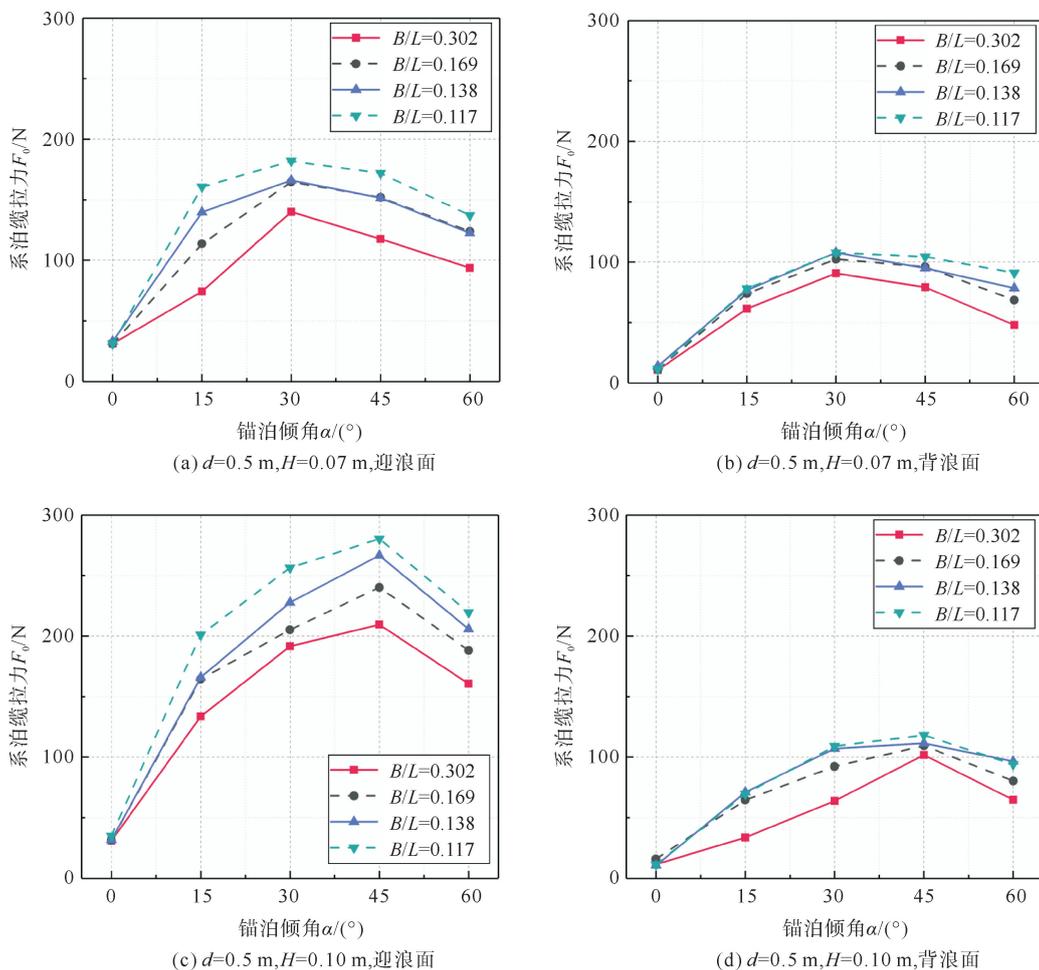


图 9 锚泊倾角对系泊缆拉力的影响

Fig. 9 Influence of mooring angle on tension of mooring line

力的影响不大,因此在锚泊倾角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,系泊缆拉力开始减小。这与 2.1.1 节中迎浪面的动水压力的峰值特点相一致,由此可知,设计时若考虑减小系泊缆拉力,则需尽量避免设置 $30^\circ \sim 45^\circ$ 的锚泊倾角。

2.2.2 系泊缆预张力的影响

图 10 给出了锚泊倾角 $\alpha = 30^\circ$, 波高 H 分别为 0.05、0.07 m 时,不同相对宽度 B/L 下,系泊缆拉力峰值随系泊缆预张力 F_0 的变化情况。可以看出,随着系泊缆预张力的增加,迎浪面的系泊缆拉力增长较缓慢,背浪面系泊缆拉力增长较快,使得迎浪面和背浪面系泊缆拉力之间的差距逐渐变小。在系泊缆预张力 $F_0 = 163.9$ N 时,背浪面系泊缆拉力达到迎浪面的 90% 左右。这主要是因为系泊缆预张力增加,使结构物的整体刚度增加,浮箱的运动响应相应地减小,迎浪面和背浪面系泊缆之间的倾角差异减小。在系泊缆预张力较小时,由于浮箱的运动响应较大,迎浪面系泊缆的倾角变化较大,其系泊缆拉力的水平分量远大于背浪面,使迎浪面和背浪面系泊缆拉力之间的差距较大。在系泊缆预张力较大时,由于浮箱的运动响应较小,迎浪面系泊缆的倾角变化也较小,其系泊缆拉力的水平分量与背浪面相差不大,使迎浪面和背浪面系泊缆拉力之间的差距较小。由此可见,系泊缆预张力过大会造成两侧缆绳过紧,一旦遇到涌浪或者长周期波浪,流固耦合的非线性增强,浮箱运动加剧,导致系泊缆拉力增大,容易发生断缆事故,因此系泊缆预张力不宜选取过大。

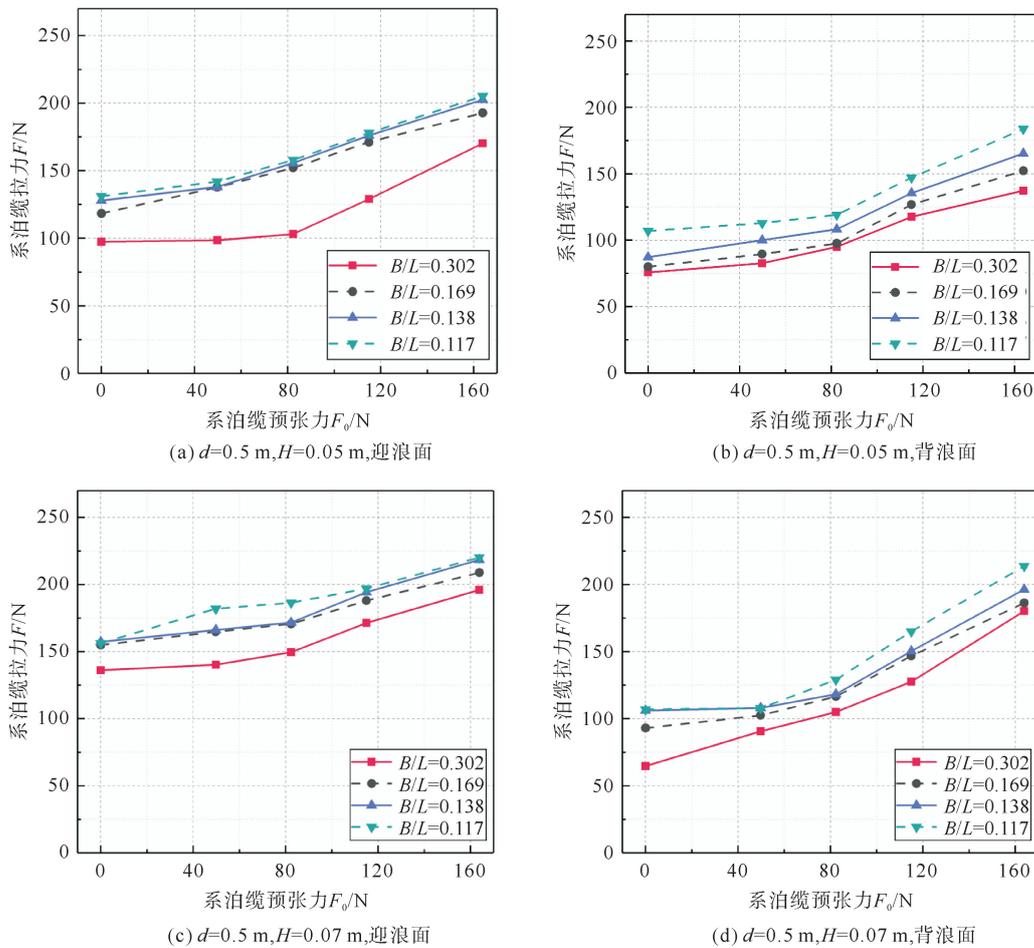


图 10 系泊缆预张力对系泊缆拉力的影响

Fig. 10 Influence of pre-tension of mooring line on tension of mooring line

2.2.3 相对宽度的影响

为分析相对宽度对系泊缆拉力的影响,图 11 给出了 $d = 0.5$ m、 $H = 0.10$ m 时,不同锚泊倾角条件下,和 $\alpha = 30^\circ$ 、 $H = 0.05$ m 时,不同系泊缆预张力条件下,相对宽度对系泊缆拉力的影响。由于 $\alpha = 0^\circ$ 时系泊缆拉力过小,此处忽略其变化趋势。由图 11 可知,随着相对宽度的增大,系泊缆拉力逐渐减小, $B/L = 0.302$

时系泊缆拉力达到最小。该趋势与浮箱迎浪面的动水压力随相对宽度的变化趋势一致。这是由于随着相对宽度的增加,波浪相对周期减小,波浪对结构物的水平作用减小,使得结构物的运动响应也减小,系泊缆拉力的水平分量也随之减小,因此系泊缆的拉力也减小。

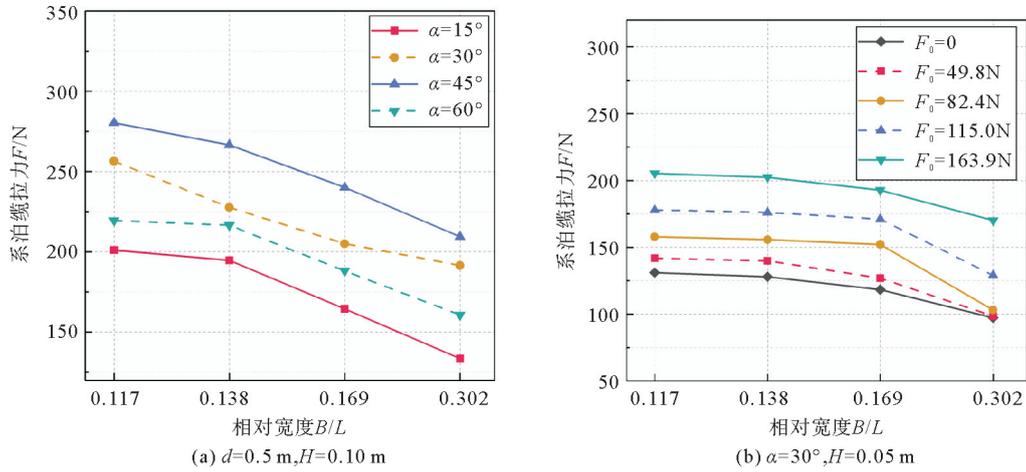


图 11 相对宽度对系泊缆拉力的影响

Fig. 11 Influence of relative width on tension of mooring line

2.3 透射系数的影响因素分析

透射系数能直观地反映浮箱的消波性能,是分析防波堤性能的重要参数。透射系数越小,浮箱对入射波的能量耗散越大,防波堤的消波性能越优,对堤后水域的防护作用也就越好。图 12~14 给出了不同工况下透射系数随锚泊倾角、系泊缆预张力以及相对宽度的变化趋势。

2.3.1 锚泊倾角的影响

图 12 给出了水深 $d=0.5\text{ m}$,波高 H 分别为 0.07 、 0.10 m 时,不同相对宽度 B/L 下,浮箱透射系数随锚泊倾角的变化。由图 12 可知,随着锚泊倾角由 0° 增加至 60° ,浮箱透射系数整体呈减小趋势。当锚泊倾角 $\alpha < 30^\circ$ 时,透射系数随锚泊倾角变化不明显,此时透射系数较大,超过 0.5 ,不能满足防波要求^[22]。当锚泊倾角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,透射系数下降趋势较明显,其原因主要与浮箱的运动方式有关。随着锚泊倾角增大,浮箱的主要运动由垂荡运动转为横荡运动,可以较大程度耗散入射波能量,因此透射系数减小。当 $B/L > 0.169$ 、 $\alpha > 45^\circ$ 时, $H=0.07\text{ m}$ 和 $H=0.10\text{ m}$ 两种波高下的透射系数均满足防波要求。

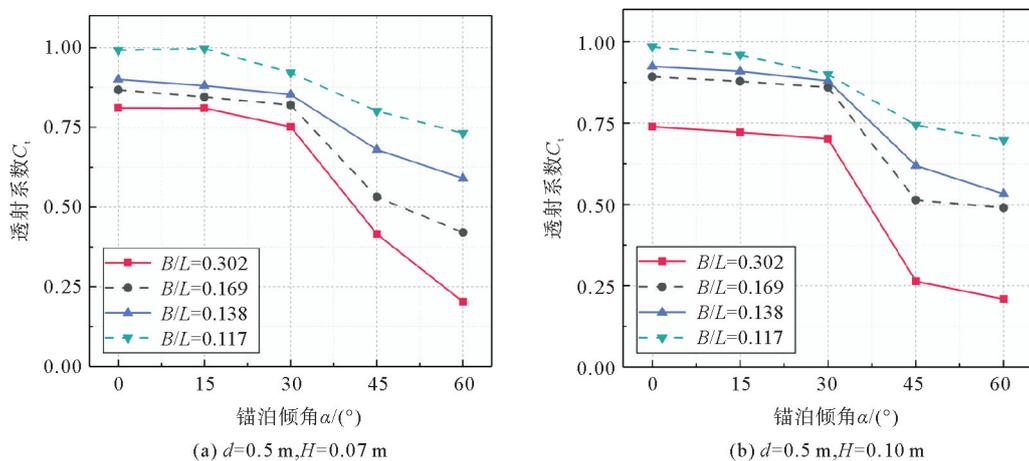


图 12 锚泊倾角对透射系数的影响

Fig. 12 Influence of mooring angle on transmission coefficient

2.3.2 系泊缆预张力的影响

图 13 给出了锚泊倾角 $\alpha=30^\circ$, 波高 H 分别为 0.05、0.07 m 时, 相对宽度 B/L 不同, 浮箱透射系数随系泊缆预张力 F_0 的变化。从图 13 中可知, 随着系泊缆预张力的增加, 透射系数呈先减小后增大的趋势。在 $F_0=82.4$ N 时, 透射系数存在最小值。这是由于系泊缆预张力增大后, 浮箱受系泊缆的作用力增大, 限制了浮箱的运动, 增大了波浪的反射, 使相互作用过程中的浮箱承受了更大的波浪作用力, 增大了对入射波能量的耗散程度, 因此透射系数减小。然而, 随着系泊缆预张力的继续增大, 波浪与浮箱的非线性作用不断增强, 波浪破碎和砰击使得浮箱运动变得更加复杂, 导致堤后波高反而有轻微增加的趋势^[6]。由此可见, 系泊缆预张力并非越大越好, 存在一个最优系泊缆预张力, 使得浮箱的透射系数最小、性能最优。

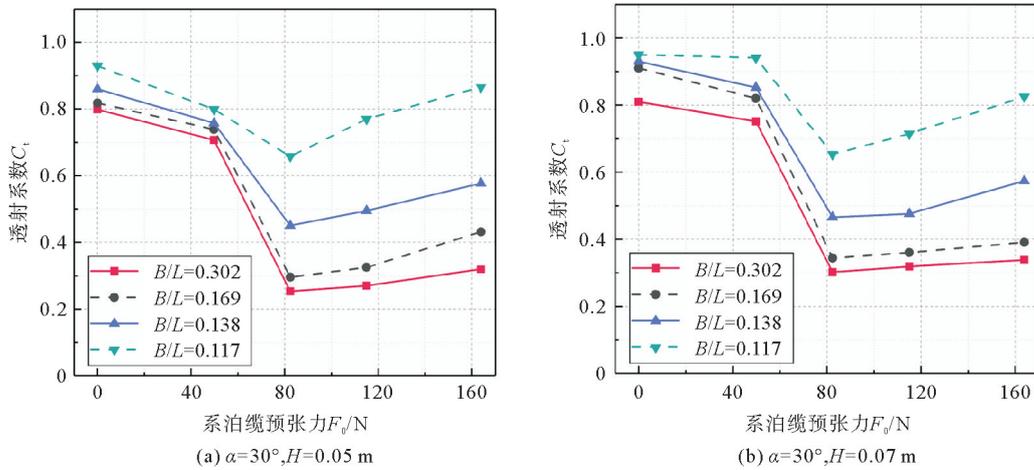


图 13 系泊缆预张力对透射系数的影响

Fig. 13 Influence of pre-tension of mooring line on transmission coefficient

2.3.3 相对宽度的影响

图 14 给出了波高 H 分别为 0.05、0.10 m 时, 在不同锚泊倾角 α 和系泊缆预张力 F_0 条件下, 浮箱透射系数随相对宽度 B/L 的变化。由图 14 可知, 随着相对宽度的增大, 透射系数均呈现减小趋势。 $\alpha \leq 15^\circ$ 、 $F_0 \leq 82.4$ N 时, 本研究相对宽度范围内的透射系数均大于 0.5, 不满足实际工程的防波要求。两种波况下, 相对宽度 $B/L=0.117$ 的透射系数均较大, 透射系数 $C_t=0.6 \sim 0.9$, 此时消波性能最差。对于相对宽度 $B/L \geq 0.169$, 波高较小 ($H=0.05$ m) 且系泊缆预张力较大 (100 N $< F_0 < 180$ N), 以及波高较大 ($H=0.10$ m) 且锚泊倾角较大 ($30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$) 时, 透射系数均小于 0.5, 满足防波要求。

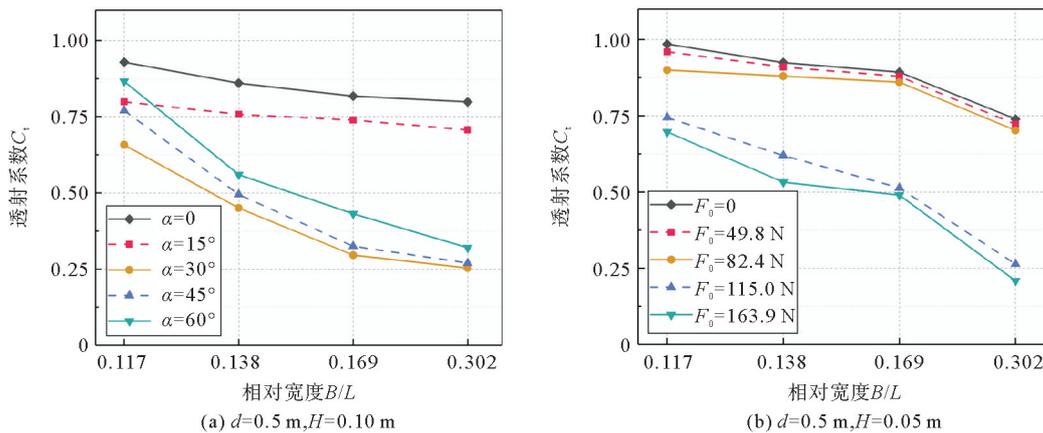


图 14 相对宽度对透射系数的影响

Fig. 14 Influence of relative width on transmission coefficient

3 结论

本研究通过物理模型试验,分析了张紧式浮式防波堤的水动力特性,讨论了系泊缆锚泊倾角、系泊缆预张力以及浮箱相对宽度对迎浪面动水压力、系泊缆拉力和透射系数的影响,得到以下结论。

1) 锚泊倾角对浮箱迎浪面动水压力、系泊缆拉力以及透射系数的影响较为显著。对于测点 P1,动水压力随锚泊倾角的增大呈先增大后减小的趋势, $\alpha = 30^\circ$ 时动水压力达到最大;对于测点 P2 和测点 P3,动水压力呈先增大后减小再增大的趋势, $\alpha = 45^\circ$ 时动水压力达到最小。随着锚泊倾角的增大,系泊缆拉力呈先增大后减小的趋势, $30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 时,系泊缆拉力达到最大值。透射系数随着锚泊角度的增大呈减小的趋势, $\alpha \geq 30^\circ$ 时该趋势更为明显。在实际应用和设计中,应综合考虑动水压力、系泊缆拉力和消波性能等水动力特征,选择合适的锚泊倾角。

2) 系泊缆预张力对浮箱迎浪面动水压力、系泊缆拉力的影响规律基本一致,对透射系数的影响有所不同。迎浪面动水压力与系泊缆拉力均随着系泊缆预张力的增大而增大,而透射系数随着系泊缆预张力的增大呈先减小后增大的趋势, $F_0 = 82.4 \text{ N}$ 时透射系数达到最小。表明系泊缆预张力并非越大越好,过大的预张力会使结构物两侧缆绳过紧,在发生剧烈运动时易导致缆绳断裂。

3) 浮箱相对宽度在不同锚泊倾角、不同系泊缆预张力范围内对动水压力、系泊缆拉力与透射系数的影响特征基本一致,呈反比趋势。 $B/L = 0.302$ 时,动水压力和系泊缆拉力达到最小值。锚泊倾角较大($30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$)、系泊缆预张力较大($100 \text{ N} < F_0 < 180 \text{ N}$)时,透射系数随浮箱相对宽度增大呈显著减小趋势,并且 $B/L \geq 0.169$ 时,透射系数小于 0.5,达到防波要求。

参考文献:

- [1] 熊凌志. 深海张紧式系泊系统及其与海底锚基的相互作用研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.
XIONG Lingzhi. Taut mooring system and its interaction with offshore foundations[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2017.
- [2] GUO Y, MOHAPATRA S, SOARES G C. Review of developments in porous membranes and net-type structures for breakwaters and fish cages[J/OL]. Ocean Engineering,2020,200. DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.107027.
- [3] 乔东生,漆徐良,闫俊,等. 张紧式锚泊系统松弛-张紧过程冲击张力分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2020,41(2):206-211.
QIAO Dongsheng, QI Xuliang, YAN Jun, et al. Analysis of snap loading of a taut mooring system in the slack-taut process [J]. Journal of Harbin Engineering University,2020,41(2):206-211.
- [4] 刘庆凯,纪巧玲,王钰. 悬链式单浮箱防波堤水动力特性试验研究[J]. 水运工程,2020(1):23-28.
LIU Qingkai, JI Qiaoling, WANG Yu. Experimental study on hydrodynamic characteristics of chain moored single pontoon floating breakwater[J]. Port & Waterway Engineering,2020(1):23-28.
- [5] 崔杰,李柏阳,陈鑫,等. 多刚体组合式新型浮式防波堤消波性能数值模拟分析[J]. 中国造船,2023,64(5):235-248.
CUI Jie, LI Boyang, CHEN Xin, et al. Numerical simulation analysis of wave elimination of new type floating breakwater with multi-rigid body[J]. Shipbuilding of China,2023,64(5):235-248.
- [6] 何超勇,王登婷,冯卫兵. 矩形方箱浮式防波堤消浪性能研究[J]. 水运工程,2014(1):14-18.
HE Chaoyong, WANG Dengting, FENG Weibing. Experimental study on wave attenuation of rectangular-pontoon floating breakwater[J]. Port & Waterway Engineering,2014(1):14-18.
- [7] 焦文翰,季新然,阳志文,等. T型浮式防波堤水动力特性的数值模拟研究[J]. 海南大学学报(自然科学版),2021,39(1):58-67.
JIAO Wenhan, JI Xinran, YANG Zhiwen, et al. Numerical research on the hydrodynamic characteristics of T-shaped floating breakwater[J]. Journal of Hainan University(Natural Science),2021,39(1):58-67.
- [8] 季新然,焦文翰,车志伟,等. 不规则波浪作用下带腹板型浮式防波堤的水动力特性研究[J]. 船舶力学,2023,27(5):683-689.
JI Xinran, JIAO Wenhan, CHE Zhiwei, et al. Numerical research on hydrodynamic characteristics of floating breakwaters with web under random wave action[J]. Journal of Ship Mechanics,2023,27(5):683-689.

- [9] JI C Y, CHEN X, CUI J, et al. Experimental study on configuration optimization of floating breakwaters[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 117: 302-310.
- [10] JI C Y, GUO Y C, CUI J, et al. 3D experimental study on a cylindrical floating breakwater system[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 125: 38-50.
- [11] 董华洋, 王永学, 陈燕珍. 浮箱式浮防波堤锚泊系统受力试验研究[J]. *大连交通大学学报*, 2016, 37(1): 25-30.
DONG Huayang, WANG Yongxue, CHEN Yanzhen. Experimental study on the mooring chain forces of pontoon type floating breakwaters[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2016, 37(1): 25-30.
- [12] 董华洋. 浮箱-水平板式浮防波堤水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
DONG Huayang. Study on hydrodynamic characteristics of pontoon-plates type floating breakwaters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [13] 袁培银, 李渝锋, 张哲. 基于 AQWA 的圆筒型浮式防波堤波浪运动响应分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(5): 85-91.
YUAN Peiyin, LI Yufeng, ZHANG Zhe. Motion response of cylindrical floating breakwater based on AQWA[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2023, 42(5): 85-91.
- [14] 金哲飞, 张金凤, 张庆河, 等. 波浪作用下锚链系泊浮式防波堤动力响应的数值模型研究[J]. *海洋工程*, 2021, 39(1): 21-31.
JIN Zhefei, ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe, et al. Study on numerical model of hydrodynamics of mooring line floating breakwater under wave actions[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(1): 21-31.
- [15] 柳辉. 浮式海洋结构物浅水系泊设计及水动力分析方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
LIU Hui. Research on design of shallow water mooring and hydrodynamic analysis of floating marine structures[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [16] 尚勇志. 近岛礁中型浮式结构物张紧式系泊性能分析[J]. *船舶与海洋工程*, 2022, 38(4): 20-23.
SHANG Yongzhi. An analysis on taut mooring performance of medium-size floating structures near islands and reefs[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2022, 38(4): 20-23.
- [17] 康庄, 付森, 袁洪涛, 等. SPAR 平台张紧式与半张紧式系泊性能比较[J]. *船舶与海洋工程*, 2018, 34(4): 15-21.
KANG Zhuang, FU Sen, YUAN Hongtao, et al. Comparative study on the performance of tensioned and semi-tensioned mooring systems for a SPAR platform[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2018, 34(4): 15-21.
- [18] 于定勇, 谢雨嘉, 黄东燕, 等. 箱型浮式消浪设施水动力特性研究[J]. *海岸工程*, 2019, 38(3): 187-193.
YU Dingyong, XIE Yujia, HUANG Dongyan, et al. Study on hydrodynamic characteristics of floating box-type wave dissipation facilities[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 38(3): 187-193.
- [19] PENG W, LEE K H, SHIN S H, et al. Numerical simulation of interactions between water waves and inclined-moored submerged floating breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 82: 76-87.
- [20] YANG Z W, JI X R, XIE M X, et al. Experimental study on the dynamic response of a water ballast type floating breakwater[J/OL]. *Ocean Engineering*, 2021, 233. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109012.
- [21] GUO W J, ZOU J B, HE M, et al. Comparison of hydrodynamic performance of floating breakwater with taut, slack, and hybrid mooring systems: An SPH-based preliminary investigation[J/OL]. *Ocean Engineering*, 2022, 258. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111818.
- [22] HE F, HUANG Z H, LAW A W K. Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: An experimental study[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 51: 16-27.

(责任编辑: 齐敏华)