



# 大潮差条件下浮式防波堤 锚泊线组合形式的试验研究\*

师艳景, 梁书秀, 孙昭晨, 韩智臣

(大连理工大学港口、海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 通过物理模型试验研究了在大潮差条件下不同锚泊线组合形式对浮箱式防波堤运动响应和锚链拉力特性的影响。其中, 锚泊系统布置形式采用平行型, 组合形式有链+重块、链+重链、链+钢丝绳和链+尼龙绳4种。探讨了不同组合形式的锚泊系统在大潮差条件下的优劣, 给出一种比较适合大潮差的锚泊线组合形式, 为实际工程提供参考。

**关键词:** 大潮差; 浮式防波堤; 锚泊线组合; 运动响应; 锚链拉力

中图分类号: U 656.1<sup>†3</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0018-07

## Experiment study on mooring lines combinations of floating breakwater under large tidal ranges

SHI Yan-jing, LIANG Shu-xiu, SUN Zhao-chen, HAN Zhi-chen

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Laboratory physical model tests are performed to study the influences of different mooring lines combinations on the motion responses and mooring forces of pontoon-type floating breakwater models under large tidal ranges. The mooring systems contain four different mooring combinations, i.e., chain + clump, chain + heave chain, chain + wire rope, chain + nylon rope, of which all mooring lines are arranged parallelly. The advantages and disadvantages of different mooring configurations and different mooring combinations under large tidal ranges are investigated. A kind of mooring system which is suitable for large tidal ranges is given to provide reference for practical engineering.

**Key words:** large tidal ranges; floating breakwater; mooring lines combinations; motion response; mooring force

浮式防波堤与传统的坐底式防波堤相比, 具有施工便捷、拆装方便、造价较低、对被掩护水域的水动力环境影响不大、受水深和地基等影响小等优点。近些年来, 由于兴建小码头、发展深水养殖等工程实际需要, 浮式防波堤的应用越来越广泛, 各国学者对浮式防波堤的研究也越来越多。

对浮式防波堤的研究, 大多集中在研究不同上部结构对于浮堤消浪效果、运动响应以及锚链拉力的影响<sup>[1-6]</sup>。对于浮式防波堤锚泊系统的研

究, 侯勇等<sup>[7]</sup>研究了锚链刚度、导链孔处锚链与水平线夹角等对浮堤运动和锚链拉力影响; 董华洋等<sup>[8]</sup>研究了锚链拖地长度对模型消浪效果、运动响应及锚链拉力的影响; Sannasiraj等<sup>[9]</sup>研究了在几种不同布置形式的锚泊系统下模型运动和锚链拉力, 但对于大潮差条件下锚泊形式以及锚泊线长度设计等问题均未提到。Peña<sup>[10]</sup>在其研究中虽然提到了潮差, 但潮差不大(3 m), 且文中只对不同潮位时的透射情况做了简单分析, 并未对运动

收稿日期: 2013-04-09

\*基金项目: 国家自然科学基金(51221961)

作者简介: 师艳景(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事浮式结构物方面的研究。

响应和锚链拉力进行细致的研究。

本文在前人研究的基础上, 通过物理模型试验, 研究在大潮差条件下具有不同锚泊线组合形式的浮式防波堤运动特性和锚链拉力特性, 并通过分析给出一种适合大潮差条件的浮式防波堤锚泊线组合形式。

## 1 试验设备和测量仪器

试验在大连理工大学港口、海岸及近海工程国家重点实验室的波流水槽中进行。水槽长 69 m, 宽 2 m, 深 1.8 m, 水槽的一端配有美国 MTS 公司生产的不规则波造波机, 可产生单向规则波、不规则波和双向流, 水槽的另一端配有消能装置, 可用来吸收波浪能量、减小尾端反射。

试验波要素的测量采用实验室自行研制的 DLY-1 型波高、滤波、应变混合式浪高仪。模型的运动采用实验室研制的非接触式运动姿态测量系统 (又称为非接触式六分量系统) 测量, 测量的采样频率为 30 Hz。锚链拉力采用布置在锚链与模型相接处的拉力传感器测量, 其量程为 0~15 kg。

## 2 试验设计

### 2.1 浮堤形式设计

试验浮式防波堤采用单方箱形式, 按照重力相似准则进行设计, 模型比尺为 1:30。方箱采用有机玻璃制作而成, 其尺寸为 78 cm (长) × 33 cm (宽) × 16 cm (高), 模型的吃水为 12 cm, 通过给方箱均匀配重得到。配重完成后方箱的质量为 30.89 kg, 方箱的重心位于离底面 5.4 cm 处。

### 2.2 锚泊系统设计

考虑到大潮差对浮式防波堤运动和锚链力的影响, 试验中锚链长度是依据模型处于平均潮位时锚链的拖地长度为零设计的, 这样可以使得模型处于低潮位时锚链的拖地不会太长而且在高潮位时锚链的拉力不会很大。链长以及锚链与水底接触点的坐标根据以下公式<sup>[11]</sup>计算得到:

$$2zS = (S^2 - z^2) \tan \theta \quad (1)$$

$$\frac{\tan \theta}{S} z = \cosh\left(\frac{\tan \theta}{S} x\right) - 1 \quad (2)$$

式中:  $z$  为锚泊线垂直方向的长度;  $x$  为锚泊线水

平方向的长度;  $S$  为锚泊线的总长度;  $\theta$  为  $M$  点张力沿该点的切线方向与水平方向的夹角。如图 1 所示。

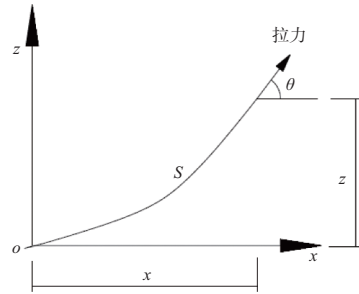


图 1 悬链曲线

锚链的布置形式一般有平行型、交叉型和八字型 3 种。根据前期的试验结果, 平行型布置的浮箱除了横摇运动较大以外, 其它运动以及锚链拉力都较小; 而八字型链虽然横摇运动较小, 但是其锚链拉力很大, 会造成锚泊系统成本高。因次在本次试验中选用平行型布置形式。

试验中锚泊线的组合形式有链+重块、链+重链、链+钢丝绳、链+尼龙绳共 4 种。其中链+重块、链+重链这两种组合形式的设计是希望增加链的重力, 克服一般链处于低潮位时运动较大的缺点。钢丝绳的强度比锚链大, 可以提供较大的断裂拉力, 高潮位时锚链拉力较大, 用链+钢丝绳组合可以较好保证锚泊系统安全。尼龙绳虽然重力较小且强度不大, 但是笔者认为这种组合方式在高潮位时锚泊线的拉力会较小, 故本试验针对链+尼龙绳也做了一定研究。

试验中链的弹性用弹簧线性模拟, 弹簧的刚度根据式 (3)~(5) 计算得到<sup>[12]</sup>。对于绳的弹性, 仅考虑了试验条件下钢丝绳、尼龙绳自身弹性的影响, 对原型转化成模型中弹性的变化在本次试验中未加以考虑。

$$\Delta L_m = \frac{T_m L'_m}{(EA)_m} \quad (3)$$

$$(EA)_m = \frac{(EA)_p}{\lambda^3} \quad (4)$$

$$(EA)_p = \frac{1}{2} E_p \pi d_p^2 \quad (5)$$

式中:  $\Delta L_m$  为模型锚链的伸长;  $T_m$  为模型锚链拉

力； $L'_m$ 为模型锚链的长度； $(EA)_m$ 为模型锚链的抗拉刚度； $(EA)_p$ 为原型锚链的抗拉刚度，其中 $E$ 由厂家提供的受力-变形曲线计算得到； $\lambda$ 为模型长度比尺； $E_p$ 为原型锚链的有效弹性模量； $d_p$ 为原型链环杆的直径。

这4种组合形式中的“链”是指锚链，布置在与水底接触一端。链的直径为2.5 mm，单位长度的链质量为102 g/m，模拟链弹性的弹簧刚度为196 N/cm。考虑到低潮位时锚泊线的拖地长度较大，为了使得重块、重链、钢丝绳和尼龙绳起到应有的作用，其布置位置靠近浮体侧。链+重块中重块距离链与浮体相接处15 cm，其它3种形式距离链与浮体相接处11 cm，见图2。组合形式的其它参数见表1。

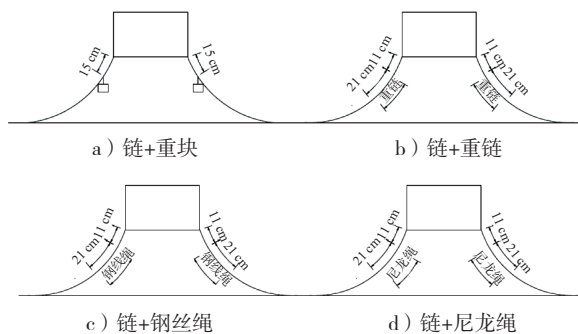


图2 4种不同组合形式的锚泊系统

表1 不同组合形式的锚泊系统参数

组合	链的长度/cm	组合部分的单位长度质量/(g·m <sup>-1</sup> )	组合部分的直径/mm
链+重块	63	34.0	
链+重链	42(链)+2(重链)	264.0	4
链+钢丝绳	42(链)+21(钢丝绳)	34.4	3
链+尼龙绳	42(链)+21(尼龙绳)	26.9	7

### 2.3 试验波要素与试验布置

我国台湾海峡、福建沿海地区的潮差较大，为4~7 m，本次试验中采用原型潮差6 m，换算到试验中潮差为20 cm。试验水深为60 cm，50 cm和40 cm，分别模拟高潮位、平均潮位和低潮位。对于每一个潮位，试验波浪均为规则波，波高6 cm，波浪周期为0.85，1.0，1.10，1.25和1.40 s。针对二维模型的研究，在试验水槽中安装了隔板以保证模型的二维运动。锚泊系统拉力采用拉力传感器测量，模型的运动采用六分量仪测量，并在方箱的顶部布置3个发光二极管，试验布置见图3。

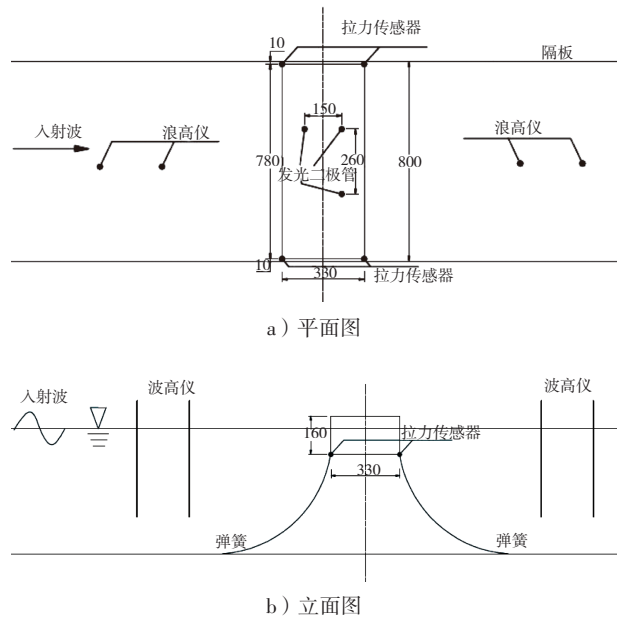


图3 试验布置

### 2.4 数据处理方法

**运动数据：**二维试验有3个方向的运动，横荡（sway）、垂荡（heave）和横摇（roll）。试验中对于得到的运动物体的运动轨迹，通过低通滤波滤掉高频信号，最后统计各个方向运动的幅值。

**拉力数据：**试验拉力测量的目的是为了保证锚泊系统的安全性，因此数据处理只考虑了锚链拉力较大的迎浪侧的拉力。对于拉力历时曲线，统计出拉力的峰值并计算均值。

**无因次化：**运动和拉力结果均采用响应幅值算子（RAO）来表示，具体表达式如下：

$$RAO(\text{sway}) = \text{横荡运动的幅值} / \text{入射波的幅值} \quad (6)$$

$$RAO(\text{heave}) = \text{垂荡运动的幅值} / \text{入射波的幅值} \quad (7)$$

$$RAO(\text{roll}) = \text{横摇运动的幅值} / \text{入射波的幅值} \quad (8)$$

$$RAO(F_y) = \text{迎浪侧拉力峰值} / \text{入射波高} \quad (9)$$

这里需要注意的是， $RAO(F_y)$ 是广义无因次化，其单位为N/m。

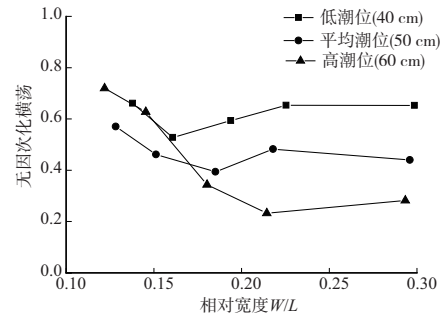
## 3 试验结果及讨论

### 3.1 各种组合方式下模型运动结果

图4~6给出了3个潮位下，几种不同锚泊线组合情况的模型横荡（sway）、垂荡（heave）、横摇（roll）运动随着相对宽度 $W/L$ 变化的曲线。其中 $W$ 为方箱的宽度， $L$ 为波长。不同潮位时水深不

同, 相同周期的波长有一定的差距, 但是差距不是很大。在波浪周期最大时 ( $T=1.40\text{ s}$ ) 最高和最低水深的波长的差距最大, 为13%。

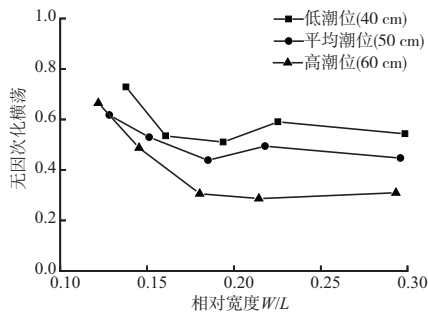
图4为不同锚泊线组合方式的浮式防波堤在3个潮位下横荡运动随着相对宽度变化的曲线。可以看出, 4种组合方式下横荡运动曲线的趋势大致相同。在低潮位和平均潮位时, 锚链处于松弛状态, 横荡值在相对宽度0.21附近呈现增加趋势, 然后随着相对宽的增加横荡值逐渐减小, 这与文献[6]中所描述的结果一致。高潮位时锚链处于张紧状态, 模型的横荡值随着相对宽度的增加而减小。对比3个潮位的横荡值, 可以看到, 在高潮位时横荡值最小, 低潮位和平均潮位横荡值较大。这主要是因为大潮差的存在使得在高潮位时锚链对上部浮箱的束缚较大, 故而模型横荡运动较小, 而低潮位和平均潮位锚链约束较小, 运动较大。



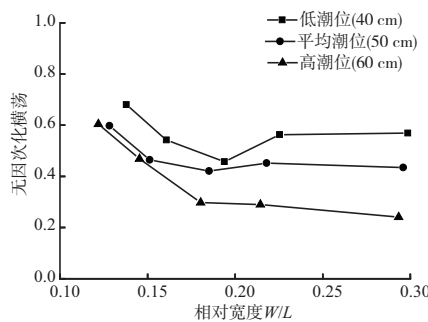
d) 链+尼龙绳

图4 不同组合条件下模型的横荡运动

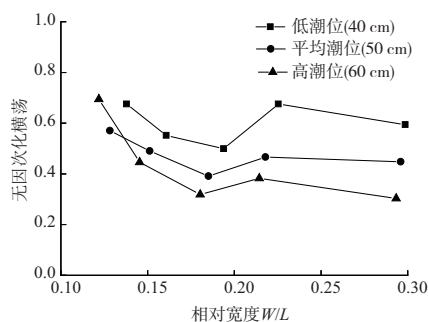
图5给出了不同锚泊线组合方式的浮式防波堤在3个潮位下垂荡运动随着相对宽度变化的曲线。理论来讲, 相对宽度越小, 相应的波浪周期越长, 模型受到垂向波浪力越大, 垂荡运动也应越大。但是从图中可以看到, 这4种组合方式下均是仅高潮位时模型垂荡符合这一理论, 而低潮位和平均潮位时垂荡运动随着相对宽度增加先增加后减小。出现这种现象可能是这两个水位下波浪频率包含了模型垂荡自然频率的原因。对比3个潮位垂荡值, 大都是低潮位垂荡值最大, 高潮位垂荡值最小。这是由于大潮差时锚链对浮式防波堤约束不同造成的。



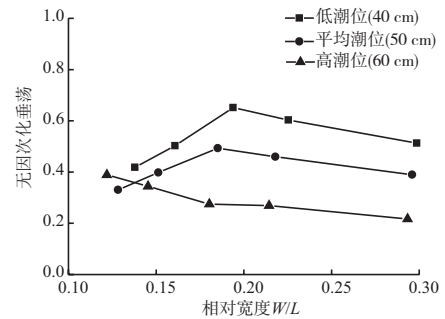
a) 链+重块



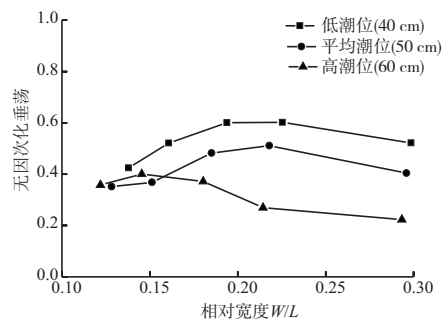
b) 链+重链



c) 链+钢丝绳

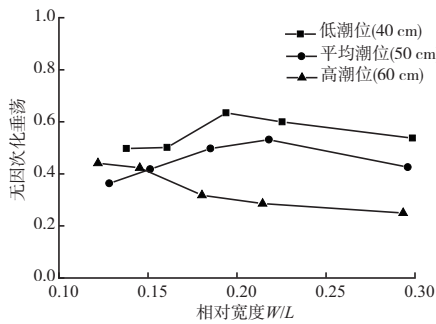


a) 链+重块

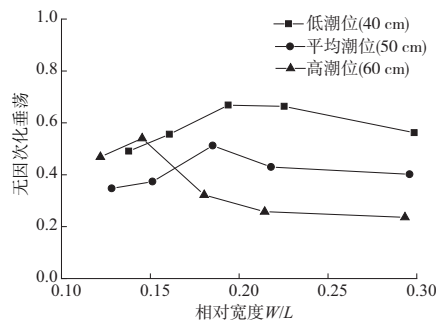


b) 链+重链





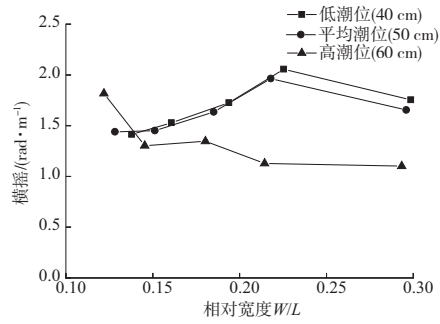
c) 链+钢丝绳



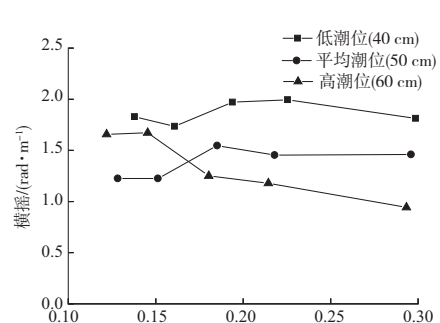
d) 链+尼龙绳

图5 不同组合条件下模型的垂荡运动

图6给出了3个潮位下模型横摇运动随着相对宽度变化的曲线。在低潮位和平均潮位时横摇运动随着相对宽度增加呈现先减小后增加再减小趋势<sup>[6-7]</sup>或者先增加再减小趋势<sup>[8]</sup>，高潮位时随着相对宽度的增加大致呈现横摇逐渐减小的趋势。3个潮位之间的对比，低潮位的横摇值大于平均潮位横摇值，而高潮位的横摇值在相对宽度较小时较大。



c) 链+钢丝绳



d) 链+尼龙绳

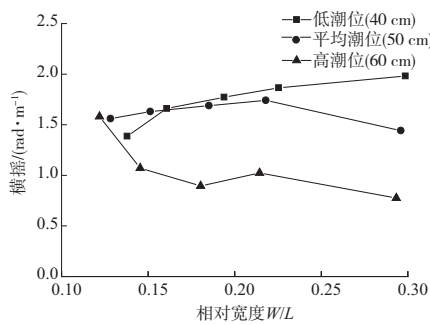
图6 不同组合条件下模型的横摇运动

### 3.2 各种组合形式下锚链拉力结果

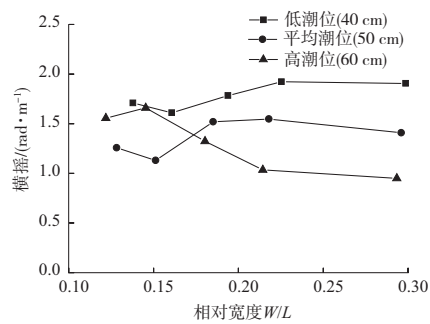
图7给出了不同锚泊线组合方式的浮箱在3个潮位下锚链拉力的曲线。从图7可以看到，对于低潮位和平均潮位的情况，拉力都随着相对宽度的增加呈现先增加后减小的趋势，这与Murali<sup>[6]</sup>结果相同。高潮位时锚链一直处于张紧状态，拉力则随着相对宽度的增加呈现逐渐减小的趋势。比较3个潮位之间的拉力大小则发现，并不是潮位越高拉力越大。具体而言，高潮位时拉力最大，而低潮位拉力不一定最小，有时会大于平均潮位的拉力。这与低潮位时模型运动较大有关。

### 3.3 各种组合形式锚泊系统试验结果对比

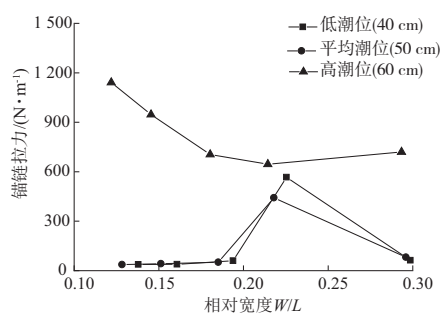
由前面分析可知，大潮差条件下浮式防波堤的运动和锚链拉力并不是低潮位时浮式防波堤运



a) 链+重块



b) 链+重链



a) 链+重块

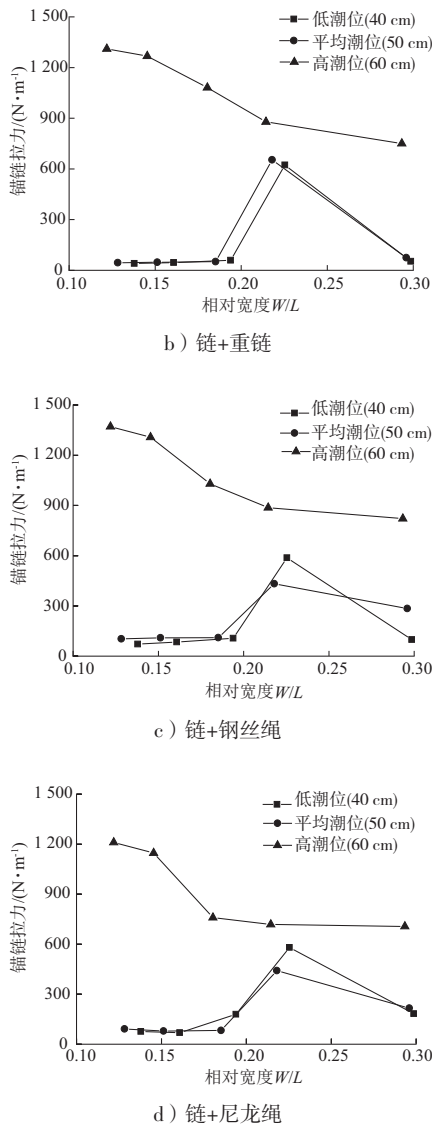


图7 不同组合条件下锚链迎浪侧拉力

动最大、高潮位时锚链拉力最大, 因此选择合适的组合形式不能通过简单的选取某个潮位的运动及拉力进行对比来确定。对工程设计来说, 不利的工况起控制作用, 因此, 本文综合前期平行型全链的试验结果, 通过对比每个相对宽度各种锚泊形式下浮箱运动和锚泊系统拉力最大值来比较大潮差条件下锚泊系统的优劣。

图8给出了在不同锚泊线组合情况下模型运动和锚链迎浪侧拉力对比的结果。模型横荡运动在相对宽度较小的时候, 除了链+尼龙绳组合形式外, 其它几种链的横荡运动均较小, 而在相对宽度较大的时候, 链+重块以及链+重链组合模型横荡运动较小。对于模型的垂荡运动, 在相对宽度较小时, 除了链+尼龙绳组合外其它几种组合形式

运动均较小; 在模型垂荡自然频率处, 链+重链组合垂荡运动最小; 在相对宽度较大时, 链+重块、链+重链、链+钢丝绳运动较小。由此可见, 对于不同的相对宽度, 链+重链组合形式的垂荡运动都较小, 可认为是最佳组合方式。不同组合形式下模型横摇运动, 综合不同相对宽度来看, 链+重块、链+重链以及链+钢丝绳为横摇运动较小的组合形式。图8d)列出了锚链迎浪侧拉力的对比结果, 平行全链、链+重块、链+尼龙绳这三种组合方式的锚泊系统拉力较小。

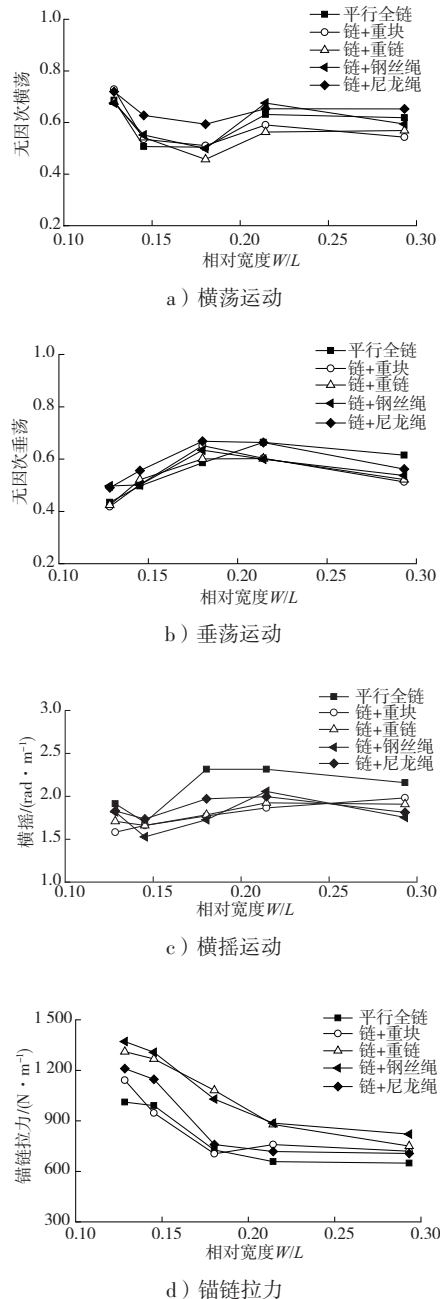


图8 不同组合方式的运动和拉力结果对比

#### 4 结论

本文通过物理模型试验的方法研究了浮箱式防波堤在处于高潮位、平均潮位以及低潮位时的运动特性以及锚泊系统拉力规律，并对不同锚泊线组合下浮箱的运动和拉力进行对比，通过分析给出在大潮差条件下浮式防波堤锚泊系统选择的一些结论及建议，供实际工程参考：

1) 浮箱的运动：浮箱在低潮位和平均潮位时运动规律相似，在高潮位时一般随着相对宽度增加呈递减趋势，但是3个潮位的运动大小不一定是低潮位时最小。

2) 锚泊系统拉力：低潮位和平均潮位拉力趋势相同，而在高潮位时随着相对宽度递减，且大致为高潮位时的锚泊拉力起控制作用。

3) 锚链组合方式的选择：链+重块、链+重链这两种组合方式的锚泊系统，模型的横荡、垂荡以及横摇运动在不同相对宽度时均有较小的结果。这也验证了设计中希望通过增加锚泊线重力减小浮式防波堤运动想法的正确性。但是需要注意的是，大潮差条件下链+重链组合方式会产生较大的拉力，从而会造成锚链成本较高，因此，链+重块为最佳的组合方式。

#### 参考文献：

[1] 郑艳娜,董国海,李玉成,等.深水浮式防波堤结构形式的试验研究[J].中国海洋平台,2006,20(6):1-5,10.  
 [2] 王环宇.多孔浮式防波堤的试验研究与数值模拟[D].大连:大连理工大学,2010.

[3] Mani J S. Design of Y-frame floating breakwater[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1991, 117(2): 105-119.  
 [4] 邢至庄,张日向.一种应用在深水中能降低长波透过率的浮式防波堤[J].大连理工大学学报,1996,36(2):246-247.  
 [5] 吴静萍,王仁康,郑晓伟,等.浮漂式防波堤的试验研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2001,25(1):91-93.  
 [6] Murali K, Amer S S, Mani J S. Dynamics of cage floating breakwater[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2005, 127(4): 331-339.  
 [7] 侯勇,王永学,董华洋.矩形浮式防波堤运动特性和锚链力试验研究[J].中国海洋平台,2009,24(6):1-6.  
 [8] 董华洋,王永学,侯勇,等.矩形箱式浮防波堤水动力特性试验研究[J].渔业现代化,2009,36(3):7-11.  
 [9] Sannasiraj S A, Sundar V, Sundaravadivelu R. Mooring forces and motion responses of pontoon-type floating breakwaters[J]. Ocean Engineering, 1998, 25(1):27-48.  
 [10] Peña E, Ferreras J, Sanchez-Tembleque F. Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(10): 1150-1160.  
 [11] 李玉成,滕斌.波浪对海上建筑物的作用[M].北京:海洋出版社,2002.  
 [12] 韩丽华,姜萌,马震岳.港口、海岸工程水动力模型试验教程[M].大连:大连理工大学出版社,2007.

(本文编辑 武亚庆)

### 著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。