



大潮差条件下不同锚泊形式 浮式防波堤的试验研究

师艳景¹, 苗毓海², 梁书秀³

(1. 天津大学仁爱学院, 天津 301636; 2. 大连理工大学城市学院, 辽宁 大连 116600;
3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以平行布置为例, 用物理模型试验的方法研究了浮箱式防波堤在大潮差条件下的运动响应特性和透射系数的规律。结果表明: 相同相对宽度下透射系数的数值在高潮位时与其它两个潮位有较大的差别, 综合考虑运动响应和透射系数, 对浮式防波堤的相对宽度设计给出建议。另外, 通过对比不同锚泊系统布置形式的浮式防波堤在相同波况下运动和透射系数的大小, 指出平行布置较适合大潮差海域, 为工程实践提供参考借鉴。

关键词: 大潮差; 浮式防波堤; 锚泊形式; 运动响应; 透射系数

中图分类号: U 656.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0048-06

Experiment study on floating breakwater with different mooring configurations in condition of large tidal ranges

SHI Yan-jing¹, MIAO Yu-hai², LIANG Shu-xiu³

(1. Ren' ai College of Tianjin University, Tianjin 301636, China; 2. City Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116600, China;
3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Taking the parallel arrangement for example, we study the motion responses and transmission coefficients of pontoon-type floating breakwater under large tidal ranges by laboratory model tests. The results show that the value of transmission coefficients with relative width for the high tide is different from the other tide levels. By a comprehensive consideration of motion responses and transmission coefficients, we give suggestions on the relative width design of floating breakwater. In addition, based on the comparison study on motion responses and transmission coefficients under the same wave conditions of floating breakwaters with different mooring configurations, we point out that the parallel arrangement is more suitable for the water with large tide ranges. The research result may serve as reference for the engineering practice.

Keywords: large tidal range; floating breakwater; mooring configuration; motion response; transmission coefficient

浮式防波堤由上部消浪结构和下部的锚泊系统组成。由于与传统的防波堤相比具有造价低廉、建造方便、海水交换功能强等优点^[1], 浮式防波堤得到了很多投资者的青睐。但目前浮式防波堤并未得到大范围广泛的应用, 只是在一些临时工程和一些小的游艇码头中有较多的应用, 这主要

是因为它对长波的消浪效果不佳、在恶劣环境中安全性不佳等缺点。

近几十年来, 越来越多的国内外学者致力于对浮式防波堤的研究。其中主要包括: 提出了多种性能优良的浮式防波堤形式以改善其消浪性能^[2-5]; 对不同锚泊系统下的浮堤运动和锚泊拉力

进行研究,以寻求运动和拉力较小的锚泊方式^[6-8]。然而,纵观国内外,对浮式防波堤在大潮差条件下的表现研究甚少。

考虑到我国的浙江、福建沿海以及台湾海峡地区的潮差较大,浮式防波堤的应用受到限制,本文在国内外学者研究的基础上,通过物理模型试验的方法,对浮式防波堤在大潮差条件下的运动特性和消浪效果进行研究。并探讨了不同锚泊系统布置形式在大潮差条件下的优劣。

实际海域的波浪为不规则波,考虑到不规则波是由无数规则波组成的,故本文探究大潮差下浮式防波堤的运动特性、消浪特性以及不同锚泊系统的优劣,先用规则波试验做初步研究,后续再进行不规则波试验模拟实际海域波浪情况。

1 模型试验

1.1 试验设备

本试验在大连理工大学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。水槽一端配有美国 MTS 公司制造的不规则造波机,能够产生单向规则波和不规则波,水槽末端设有消浪装置,用来吸收波能,减小尾端反射对试验的影响。

试验波要素的测定采用的是实验室自行研制生产的 DLY-1 型波浪、滤波、应变混合测量仪。试验中波高的测量采用北京水科院研制生产的 DS30 型浪高水位仪量测系统。模型运动采用实验室自行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,仪器的采样频率为 30 Hz。

1.2 试验设计

1.2.1 浮式防波堤形式设计

试验中浮式防波堤采用单方箱式,按照重力相似准则设计,模型比尺为 1:30。方箱采用有机玻璃制作而成,长宽高分别为 78、33、16 cm。方箱吃水 12 cm,通过给方箱均匀配重得到。配重之后方箱的总质量为 30.89 kg。

1.2.2 锚泊系统设计

由于实际海域中大潮差的存在,若锚链设计太长,则会导致在低潮位时浮式防波堤的运动较大;相反,如果锚链设计太短,则在高潮位时,浮式防波堤的锚泊系统拉力很大。综合考虑,试验中锚链长度是按照平均潮位时锚链的拖地长度为零设计的。

试验中,锚泊系统的布置形式有平行型、交叉型和人字型 3 种(图 1)。其中,平行型是一种较常用的布置方式,试验中设置该布置形式,一是为了探究大潮差条件下浮式防波堤的运动和消浪效果(用透射系数表示)的规律;二是起参照作用,方便其它两种布置形式的对比。交叉型和人字型布置则一直是不同风格设计师争议的热点,本文通过试验方法研究其在大潮差下的表现,为大潮差海域锚泊系统形式的选取提供参考。试验中 3 种布置形式所采用的锚链长度、直径、质量、模拟弹性所用弹簧刚度以及锚链在水平方向的投影长度等都是相同的。

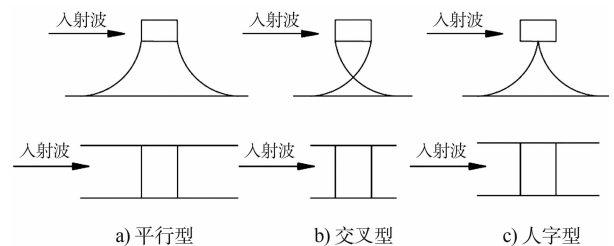


图 1 锚泊系统的布置形式

试验中锚链的弹性用弹簧来线性模拟。在拉力作用下锚链的弹性变形符合虎克定律,但是它的变形是由环杆的变形和链环的变形两部分组成,故锚链的弹性模量 E_p 小于材料的弹性模量^[9]。锚链的弹性模量 E_p 应依据厂家给出的锚链受力变形曲线,依据公式(1)来计算。

$$E_p = \frac{2P \times 100}{d^2 \xi \pi} \quad (1)$$

式中: E_p 为锚链的有效弹性模量 (MPa); P 为单位变形的力 (N); ξ 为变形量 (%); d 为锚链直径 (mm)。得到有效弹性模量后,依据公式(2)~(4)计算模拟所用弹簧的刚度^[10]。

$$\Delta L_m = \frac{T_m L'_m}{(EA)_m} \quad (2)$$

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

$$(EA)_p = \frac{1}{2} E_p \pi d_p^2 \quad (4)$$

式中： ΔL_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，63 cm； $(EA)_m$ 为模型锚链的抗拉刚度； $(EA)_p$ 为原型锚链的抗拉刚度； λ 为模型长度比尺； E_p 为原型锚链的有效弹性模量； d_p 为模型锚链的直径，2.5 mm；单位长度链质量为 102 g/m；弹簧刚度为 196 N/cm。

1.3 试验波要素与试验布置

试验水深为 40、50、60 cm，分别模拟低潮位、平均潮位和高潮位。潮差为 20 cm，换算到原型为 6 m。对于每一个潮位，试验波浪均为规则波，波高为 0.06 m，波浪周期分别为 0.85、1.0、1.10、1.25、1.40 s。

试验中为了保证方箱的二维运动，水槽用隔板隔开。方箱前后各布置 2 个浪高仪，用来分离入射波高和透射波高。模型运动用非接触式六分量系统测量，在方箱上部布置 3 个发光二极管，见图 2。

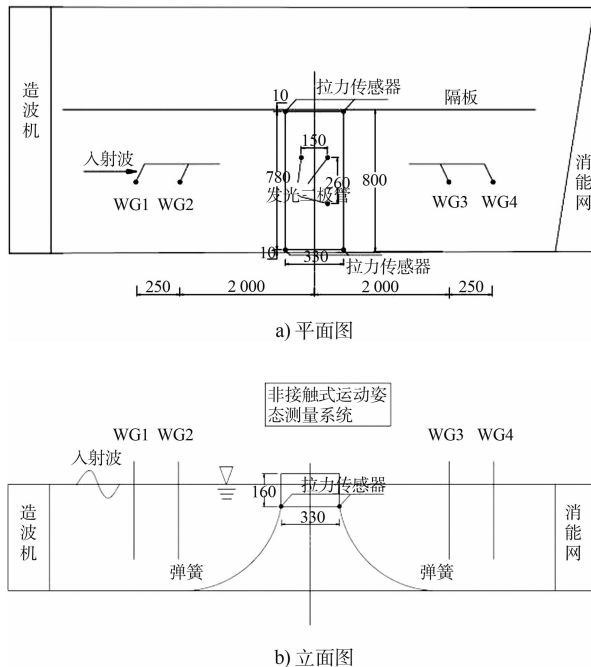


图 2 试验布置

1.4 试验数据处理

1) 透射系数。浮式防波堤的消浪效果用透射系数 K_t 表示：

$$K_t = H_t/H \quad (5)$$

式中： H 为入射波高，由方箱前 2 个浪高仪测量的波面数据利用 Goda 两点法原理分离得到； H_t 为透射波高，由方箱后 2 个浪高仪测量的波面数据分离得到。

2) 运动响应。对于系统测量得到的数据，低通滤波滤掉高频信号，统计各个周期内的运动幅值，并取均值作为最后的结果。

3) 无因次化。透射系数本身即为无因次量；对于运动响应的无因次化则采用响应幅值算子 (RAO) 来表示，具体表达式为：

$$\begin{cases} RAO(\text{sway}) = \text{横荡运动的幅值} / \text{入射波幅值} \\ RAO(\text{heave}) = \text{垂荡运动的幅值} / \text{入射波幅值} \\ RAO(\text{roll}) = \text{横摇运动的幅值} / \text{入射波幅值} \end{cases} \quad (6)$$

其中，需要注意的是，这里的无因次化是指广义的无因次化， $RAO(\text{roll})$ 单位为 rad/m。

2 试验结果及讨论

2.1 浮式防波堤运动和消浪效果分析

衡量浮式防波堤性能的重要参数有运动响应、透射系数和锚泊系统拉力等。考虑到锚泊系统拉力过大可以通过增加锚链的链径等方法解决，因此在本文中只考虑了浮式防波堤的运动特性和消浪特性，未对锚泊系统拉力特性进行研究。

本小节以锚泊系统平行布置为例，给出了浮式防波堤在大潮差条件下横荡 (sway)、垂荡 (heave)、横摇 (roll) 以及透射系数 (K_t) 随着相对宽度 W/L 的变化规律。其中， W 为方箱的宽度， L 为波长。不同潮位下相同周期对应的波长不同，但是经计算差距不大，因此认为 3 个潮位下相同周期对应的波长相同，并用平均潮位时计算得到的 L 值来计算相对宽度 W/L 的数值。

图 3 给出在 3 个不同潮位下, 锚泊系统为平行布置的方箱横荡运动随着相对宽度的变化曲线。由图 3 可知: 高潮位时横荡运动最小, 平均潮位和低潮位较大。这主要是由于高潮位时锚泊系统的约束大于其它两个潮位。在高潮位时, 横荡运动随着相对宽度的增加逐渐减小。在低潮位和平均潮位时, 横荡运动在相对宽度为 0.21 附近有增加趋势, 然后随着相对宽度的增加而减小。Murali 在其研究中也得到了类似的规律^[2]。试验结果随着相对宽度增加横荡会有增加的过程, 可能的原因是: 水平波浪力随着相对宽度的增加会呈现先增后减趋势, 是由于较大的波浪力导致横荡运动较大。由此可见, 在试验条件下设计浮式防波堤, 应避免相对宽度 W/L 在 0.21 附近, 以保证有较小的横荡运动。

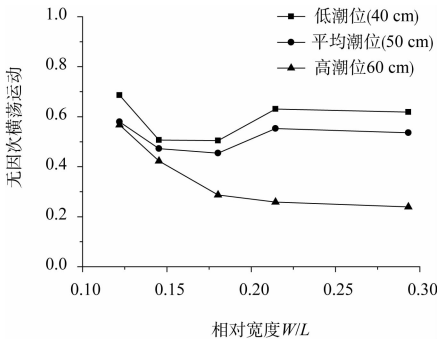


图 3 不同潮位下横荡运动

图 4 给出了锚泊系统为平行布置时, 方箱的垂荡运动在不同潮位下随相对宽度的变化曲线。由图 4 可知, 垂荡运动在低潮位时最大、平均潮位时次之、高潮位时最小。高潮位时由于锚链处于张紧状态, 垂荡运动随着相对宽度的增加逐渐减小。在平均潮位和低潮位时, 垂荡运动随着相对宽度的增加呈现先增加后减小的趋势, 并且在相对宽度为 0.21 附近有极值。这可能是试验中的波浪频率与模型垂荡自然频率接近的原因。因此在实际设计中, 应尽量避免出现这种模型自然频率与海域波浪频率相近的情况。

图 5 给出了 3 个不同潮位下, 锚泊系统为平行布置的方箱横摇运动随相对宽度的变化曲线。

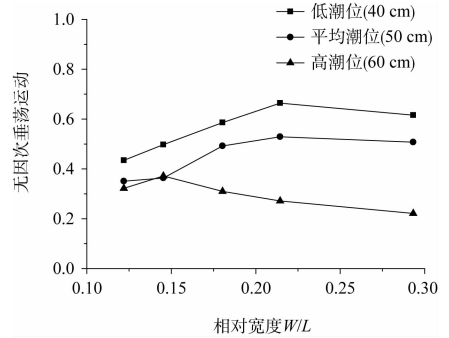


图 4 不同潮位下垂荡运动

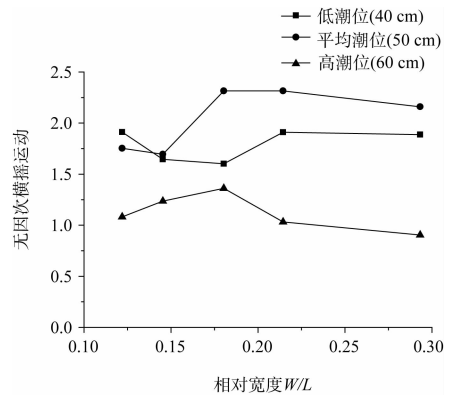


图 5 不同潮位下横摇运动

从图 5 可以看到, 横摇运动在高潮位时最小, 在平均潮位和低潮位时较大。高潮位时, 横摇运动大致呈现先增加后减小的趋势。而在低潮位和平均潮位时, 则呈现先减小后增加而后再减小的趋势^[6,11], 并且横摇运动在低潮位和平均潮位下的大小关系并不明确。对于浮体横摇运动随相对宽度增加而增加的原因与横荡运动类似。从图 5 中还可以看到, 横摇运动的最大值大致出现在相对宽度 W/L 为 0.18 ~ 0.21, 因此设计浮式防波堤时应避免相对宽度出现在这一范围内。

图 6 给出了 3 个不同潮位下, 平行布置时, 浮式防波堤的透射系数随相对宽度的变化规律。由图 6 可以看到, 在低潮位和平均潮位下, 透射系数随着相对宽度的增加而减小, 且相同相对宽度下低潮位和平均潮位的透射系数大小相差不大。在高潮位下, 相对宽度较小时, 透射系数比其它两个潮位小, 而相对宽度较大时, 透射系数比其它两个潮位大。这可能是因为, 高潮位时锚

泊系统对浮式防波堤的束缚较大，在相对宽度较小时，方箱不能像其它两个潮位下那样“随波逐流”，因此透射系数较小；而在相对宽度较大时，高潮位下的横摇运动较其它两个潮位小，从而挡浪面积较小导致消浪效果不佳。另外，从图6中还可以看到，在相对宽度 W/L 小于 0.18 时，透射系数较大（大于 72%），消浪效果不好，因此设计时应使相对宽度大于 0.18 以保证有较好的消浪效果。

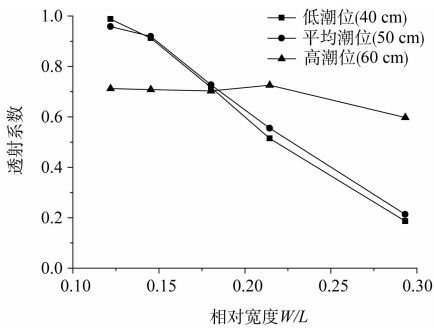


图6 不同潮位下透射系数

对于交叉型和人字型布置方式，方箱运动和透射系数规律与平行布置类似，不再赘述。

2.2 锚泊系统布置形式的选择

本节主要介绍了在大潮差条件下锚泊系统布置形式的选择。对于3种不同布置形式，选取相同相对宽度时3个潮位中最大的运动和透射系数值；并对比不同布置形式下运动和透射系数的大小，认为数值较小的锚泊形式较适合大潮差海域。

图7~10给出了在大潮差条件下不同布置形式的方箱运动和透射系数最大值随着相对宽度的变化规律。

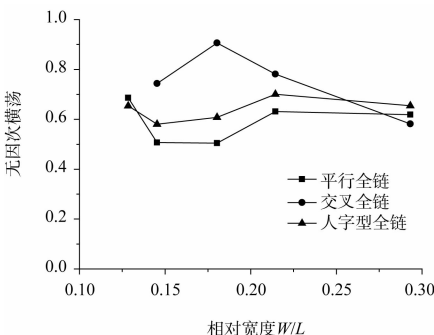


图7 不同布置形式横荡运动对比

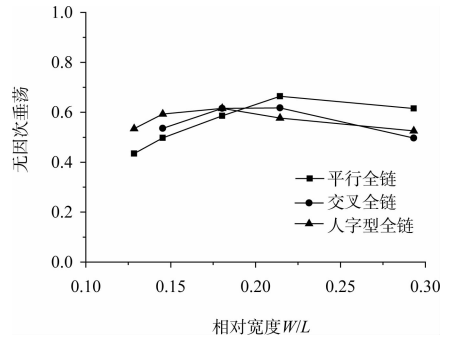


图8 不同布置形式垂荡运动对比

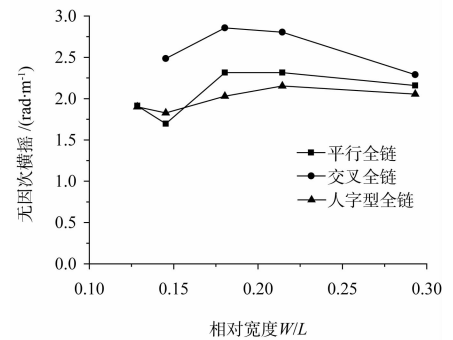


图9 不同布置形式横摇运动对比

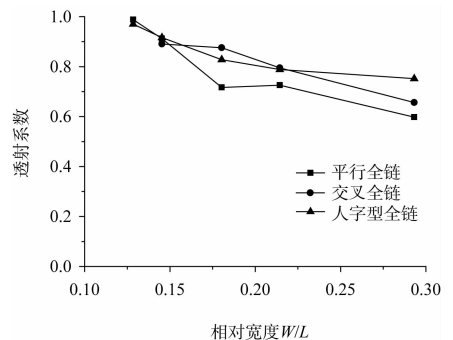


图10 不同布置形式透射系数对比

图7为不同锚泊形式的方箱横荡运动的对比。可以看到，在试验条件下，锚泊系统为平行布置时横荡运动较小，人字型布置横荡运动居中，交叉布置较大。

图8为不同锚泊形式的方箱垂荡运动的对比。从图8可以看到，在相对宽度小于0.18时，垂荡运动由小到大的锚泊形式依次为平行布置、交叉布置和人字型布置；相对宽度大于0.18时，则是平行布置时垂荡运动最大，交叉布置和人字型布置垂荡运动值相差不大，且均小于平行布置。

图9为不同锚泊形式的方箱横摇运动的对比。

可以看到,试验条件下,交叉型布置时方箱的横摇运动最大,人字型布置时横摇运动最小,平行布置时横摇略大于人字型布置。

图10为不同锚泊形式时透射系数的对比。从图10可以看到,试验条件下,对于任一相对宽度来说,平行布置时透射系数都有最小值。

对于浮式防波堤来说,最重要的功能是消浪,以保证所掩护水域波况的稳定。因此,确定哪种布置形式较优,最主要的是对比透射系数的大小,并适当考虑方箱运动的大小。从上面分析可知,平行布置时浮式防波堤的透射系数最小;并且,平行布置时横荡运动最小,横摇运动较小,垂荡运动只在相对宽度大于0.18时较大。因此,平行布置可以认为是大潮差下最优的锚泊方式。

3 结论

1) 方箱的运动在高潮位时一般最小,但在低潮位时不一定最大;透射系数在3个潮位时随相对宽度的变化规律不尽相同。

2) 浮式方箱的相对宽度大于0.18时才可保证有较好的消浪效果。但对于方箱的横荡和垂荡来说,在相对宽度为0.21附近有小峰值;对横摇运动来说,在相对宽度0.18~0.21之间有小的峰值。综合考虑,方箱相对宽度应大于0.21,以保证能有较好的消浪效果并且有较小的运动。

3) 鉴于方箱在相对宽度大于0.21时运动较大,相对宽度位于0.15~0.18附近时大,此时锚泊系统可能会有较大的锚链拉力。因此工程设计中需要注意锚链直径的选取以保证锚泊系统安全。

4) 通过对比不同锚泊形式的方箱在相同相对宽度下的最大运动和最大透射系数可知:平行布置对于抑制模型的横荡运动效果最佳;人字型布置下方箱的横摇运动最小;对于垂荡运动而言,

在相对宽度较小时平行布置较优,而在相对宽度较大时,其效果略差于交叉布置和人字型布置;透射系数则是平行布置形式下最小。

5) 综合考虑模型的运动和透射系数,平行布置为大潮差条件下较优的布置方式。

参考文献:

- [1] 毛伟清. 浮式防波堤的研究[J]. 中国造船, 1994(4): 49-56.
- [2] Murali K, Amer S S, Mani J S. Dynamics of cage floating breakwater[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering: ASME, 2005, 127(4): 331-339.
- [3] 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.
- [4] 吴静萍, 王仁康. 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.
- [5] Matsunaga N, Hashida M, Uzaki K, et al. Performance of wave absorption by a steel floating breakwater with truss structure[C]. Kitakyushu, Japan: Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2002: 768-772.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 俞聿修. 浮筒多链系统的静力特性[J]. 大连理工大学学报, 1981, 20(1): 151-160.
- [10] 韩丽华, 姜萌, 马震岳. 港口、海岸工程水动力模型实验教程[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.
- [11] Murali K, Amer S S, Mani J S. Dynamics of cage floating breakwater[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering: ASME, 2005, 127(4): 331-339.