

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.018

沈雨生, 周益人, 潘军宁, 等. 浮式防波堤研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 124-132. (SHEN Yu-sheng, ZHOU Yi-ren, PAN Jun-ning, et al. Research progress and application of floating breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 124-132.)

浮式防波堤研究进展

沈雨生, 周益人, 潘军宁, 王兴刚

(南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 浮式防波堤与其他传统防波堤相比,可适应水深较大、地基软弱、大潮差和引入水体交换等情况,在港口海岸工程、海洋工程以及海水养殖等诸多领域具有广阔应用前景。对国内外浮式防波堤的主要研究成果和进展进行了综述,从理论推导、经验公式和数值计算3个方面归纳和总结了浮式防波堤波浪透射系数的计算方法。介绍了浮式防波堤结构型式的研究进展,重点分析了浮箱式、浮筒式、浮筏式及其相应改进结构等不同型式浮式防波堤的消浪原理和消浪效果,分析比较了不同结构型式浮式防波堤的优缺点。最后介绍了浮式防波堤在国内外的工程应用,并分析了限制浮式防波堤应用的主要原因,指出了目前浮式防波堤研究方面的不足,以及推广应用浮式防波堤需要进一步研究的内容。

关键词: 浮式防波堤; 透射系数; 结构型式; 工程应用; 研究进展

中图分类号: U656.2⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)05-0124-09

浮式防波堤可适应水深较大、地基软弱、大潮差和引入水交换改善港内水质等情况^[1-2],愈来愈受到国内外的密切关注。浮式防波堤可作为永久性或临时性建筑物,在掩护深水港湾码头水域、作为船舶临时靠泊码头、掩护水产养殖和海滨浴场水域、掩护海上施工现场、掩护海上军用机动码头水域和作为海上防灾应急的防浪措施等领域具有广泛应用前景。但也有很多因素限制浮式防波堤的应用,诸如掩护效果不如坐底式防波堤、波浪周期较长时消浪效果较差、波浪频率与其固有频率接近时结构响应敏感、波浪作用下的动态响应会导致结构疲劳损伤以及较大锚泊力致使维护要求高^[3],而且极端风暴条件下结构安全性难以保障。因此,国内外学者对浮式防波堤开展积极研究以克服以上问题从而扩大其应用范围。

1 浮式防波堤波浪透射系数研究

波浪透射系数是堤后透射波高与入射波高的比值,是评价浮式防波堤消浪性能的重要指标。有关浮式防波堤透射系数的研究成果较多,主要有理论推导、经验公式及数值计算。

1.1 理论推导

(1) Macagno 公式。Macagno^[4]基于矩形浮体结构刚性固定、深水和顶部无越浪等假定,利用线性波浪理论,考虑了结构宽度、吃水、水深和波数对波浪透射系数的影响,得出波浪透射系数计算公式,即

$$K_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{k_i B \sinh(k_i d)}{2 \cosh(k_i d - k_i D)} \right]^2}} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-07-14

基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2014 329 746 340); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y215013)

作者简介: 沈雨生(1990—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事波浪与建筑物相互作用研究。

E-mail: shenyusheng09@163.com 通信作者: 周益人(E-mail: yrzhou@nhri.cn)

式中: k_t 为波浪透射系数; k_i 为入射波波数; B 为结构宽度(m); D 为结构吃水(m); d 为水深(m)。

(2) Drimer 等公式。Drimer 等^[5]基于二维势流理论,考虑了浮体的横移、升沉和横摇3个运动分量引起的辐射势,求解横移运动分量时考虑了线性锚链力的影响,给出了有限水深下浮箱式浮式防波堤的二维线性简化解析解,其计算结果与完全线性数值计算结果吻合较好,但计算过程较为复杂,具体计算公式可参见文献[5]。

1.2 经验公式

实际上波浪作用下的浮堤运动和锚链力非常复杂,不同结构下的波浪透射系数可能差别较大,因此,大多通过物理模型试验得出波浪透射系数经验公式。

(1) Morey 公式。B. Morey^[6]对锚链锚固的矩形方箱浮式防波堤进行了系列不规则波物理模型试验,研究了入射波高 H_i , 波长 L_i , 水深 d , 浮箱宽度 B , 浮箱吃水 D , 单位长度的结构质量 M 和锚固刚度 K_M 等参数对波浪透射系数的影响,得出波浪透射系数的计算公式,即

$$K_t = 0.126 \left(\frac{d}{L_i} \right)^{0.151} \left(\frac{B}{L_i} \right)^{-0.437} \left(\frac{K_M}{g\rho L_i^2} \right)^{-0.192} \quad (2)$$

式中: L_i 为入射波波长(m); ρ 为水的密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); K_M 为锚固刚度(N/m),由导链孔处锚链与竖直线夹角等决定。

(2) Ruol 等公式。P. Ruol 等^[7]对锚链锚固的 π 型浮式防波堤进行了系列不规则波物理模型试验研究,基于 Macagno 理论公式,引入相对周期(χ , 波浪谱峰周期与浮箱升沉固有周期的比值)这一参数,得出波浪透射系数的计算公式,即

$$K_t = \beta(\chi) K_{t, \text{Macagno}} \quad (3)$$

$$\beta(\chi) = \left[1 + \left(\frac{\chi - \chi_0}{\sigma} \right) \exp \left(- \left(\frac{\chi - \chi_0}{\sigma} \right)^2 \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\chi = \frac{T_p}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{D + 0.35B}} \quad (5)$$

式中: $K_{t, \text{Macagno}}$ 为 Macagno 提出的波浪透射系数计算式; χ 为相对周期; T_p 为波浪谱峰周期; D 为浮箱吃水深度(包括底部插板高度, m); $\chi_0 = 0.7919$; $\sigma = 0.1922$ 。

(3) 何超勇等公式。何超勇等^[8]对锚链锚固的矩形方箱浮式防波堤进行了系列规则波物理模型试验,研究了相对浮箱宽度 B/L_i , 相对吃水深度 D/d 和锚链初始张力 F_0 等参数对波浪透射系数的影响,得出波浪透射系数的计算公式,即

$$K_t = 0.0336 (D/d)^{-0.913} (B/L_i)^{-0.523} (F_0/\bar{F})^{-0.208} \quad (6)$$

式中: F_0 为锚链初始张力(N),由导链孔处锚链与竖直线夹角等决定; $\bar{F} = \rho g S A$, S 为模型迎浪面面积(m^2), A 为入射波波幅(m)。该式适用范围为: $0.13 \leq D/d \leq 0.238$, $0.16 \leq B/L_i \leq 0.942$ 且 $0.049 \leq F_0/\bar{F} \leq 0.49$ 。

(4) 经验公式的比较分析。图1为 Morey^[6], Ruol 等^[7] 和何超勇等^[8] 计算式计算结果的比较。

由图1可见,从总体变化规律看,各家公式计算出的波浪透射系数均随浮箱相对宽度的增大而减小,但同一相对宽度下, Ruol 等公式的计算结果相比 Morey 公式和何超勇等公式的要小; Morey 公式和何超勇等公式都考虑了锚链锚固状况的影响, Morey 公式中锚固状况参

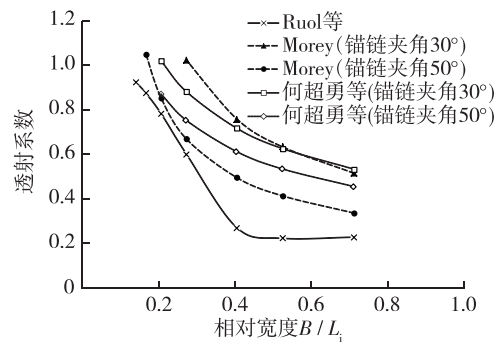


图1 浮箱式浮堤各家公式波浪透射系数计算结果比较

Fig. 1 Comparison of calculated results of different empirical formulas

数对透射系数的影响相对较大。由此可见,由于研究者针对浮堤结构差异,并考虑的影响参数不同,各家公式计算出的波浪透射系数存在较大差别。

1.3 数值计算

除理论推导和经验公式外,国内外学者提出了多种数值计算方法。波浪对浮式防波堤作用的问题中基于势流理论的数值计算方法应用最多,最为常见。S. A. Sannasiraj 等^[9]基于势流理论,利用二维有限元模型求解波浪绕射-辐射问题,计算了 3 种不同锚链布置下浮箱式浮堤的动态响应和消浪性能;A. N. Williams 等^[10-11]基于势流理论,应用边界元方法研究了双浮箱式浮堤的水动力特性;肖霄和王永学等^[12]基于势流理论,应用边界元方法求解了双浮箱-水平板式浮堤的运动响应、透射系数和锚链力。E. V. Koutandos 等^[13]基于 Boussinesq 方程,利用有限差分法,研究了仅能垂向运动的浮箱式浮堤的水动力特性。K. L. Jeong 等^[14]建立了在固定笛卡尔网格系统内求解 N-S 方程和连续方程的数值模型,研究了有越浪和波浪破碎时浮堤的消浪性能。

基于势流理论的数值计算方法,一般将波浪对浮式防波堤作用的问题简化为线性问题,计算量较小,但未考虑波浪破碎和水体紊动等非线性因素的影响,仅适用于简单的大尺度结构;基于 Boussinesq 方程的数值计算方法可考虑一定的非线性影响,但计算量较大,且一般用于简单的大尺度结构;基于 N-S 方程的数值计算方法可考虑波浪破碎和水体紊动等非线性因素的影响,但其计算较复杂,计算量较大。在实际计算中,对于矩形和圆筒等结构简单的大尺度浮体,可采用基于势流理论的数值计算方法;同时随着计算机效率的提高和并行计算的发展,对于包含开孔和隔板等复杂结构的浮体,宜采用 N-S 方程进行计算。

2 浮式防波堤结构型式研究

浮式防波堤由浮体和锚泊系统组成,通过浮体与波浪的相互作用来消浪。浮式防波堤依据消浪原理可分为波能反射型、波能损耗型和反射-损耗混合型三大类。浮式防波堤的消浪效果主要由相对宽度、相对吃水、锚固方式等因素决定。一般相对宽度越大、吃水越深、锚固方式对其运动限制越大,浮式防波堤的消浪效果越好。下面对浮箱式(浮筒式)、浮筏式以及其他型式浮式防波堤的研究进展进行介绍。

2.1 浮箱式(浮筒式)浮式防波堤

浮箱式浮式防波堤中结构最简单、应用最广的为单浮箱式。然而单浮箱式浮堤的消浪效果往往不理想,特别对较长周期波浪。为提高其消浪效果,国内外学者从增加波浪反射和波能损耗等角度对结构进行了改进,主要有双浮箱式、浮箱-垂直板式、浮箱-水平板式和浮箱-其他损耗波能结构式浮堤等。

(1) 多浮箱式浮式防波堤。与单浮箱式浮式防波堤相比,多浮箱式可增加波浪反射从而提高消浪效果。A. N. Williams 等^[10-11]和 I. Diamantoulaki 等^[15]对由两个浮箱组成的浮堤的消浪性能进行了研究。S. A. Syed 等^[16]对由 3 个浮箱组成的浮堤的消浪性能进行了研究。研究均表明多浮箱式浮堤可提高消浪效果,其消浪效果除了受浮箱宽度、吃水和锚固方式等因素影响外,还受浮箱间距的影响较大。近期美国 Lummi 国家渔港的设计过程中,为克服较长周期波浪,采用了双排浮堤,研究表明可适用于 6 s 周期的波浪情况^[17]。

(2) 浮箱-垂直板式浮式防波堤。浮箱-垂直板式浮式防波堤通过垂直插板来增加波浪反射并且干扰其附近的水体运动,从而提高消浪效果,常见的有 π 型(见图 2)和 T 型。C. D. Christian^[18]和 M. R. Gesraha^[19]的研究表明垂直插板可降低波浪透射系数,但短周期波浪作用下透射系数可能会增大。M. J. Alizadeh 等^[20]的研究表明 π 型浮堤的消浪效果优于 T 型。A. S. Koriarn 等^[21]通过试验研究了垂向插板对浮堤消浪效果的影响,结果表明随着垂向插板层数增加透射系数减小,当 4 层垂向插板时透射系数可小于 0.25。

(3) 浮箱-水平板式浮式防波堤。浮箱-水平板式浮式防波堤利用水平板来干扰其周围水体运动并可增加结构稳定性,从而既增大了波能损耗又增加了波浪反射,可提高消浪效果。S. Ikesue 等^[22]提出了带有内外翼的双浮箱式浮堤(图 3),研究表明内外翼对消浪性能影响显著,其消浪效果优于相同尺寸的单浮箱。董华洋^[23]对单浮箱下部安装水平板的浮式防波堤进行了研究,表明垂直导桩锚固时浮箱下部设置 1 层水平板可使透射系数降低 0.25 左右,设置 2 层板时透射系数继续减小,但减小幅度不明显;锚链锚固时设置 1 层板

的透射系数最多可减小 0.2。杨彪等^[24]对双浮箱下部安装水平板的浮式防波堤(图4)进行了试验研究,结果表明2层板时的消浪效果好于1层板,当相对宽度大于0.30时透射系数可控制在0.35以下,同时运动响应明显减小。研究表明,在浮箱下部安装水平板可有效提高浮式防波堤的消浪效果,且水平板的层数越多消浪效果越好。

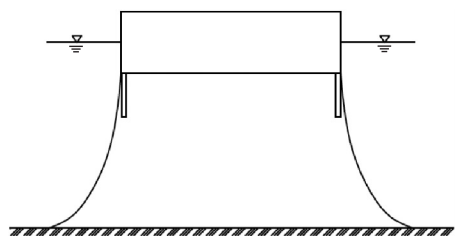


图2 π型浮式防波堤

Fig. 2 π-type floating breakwater

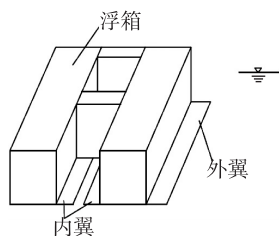


图3 带有内外翼的浮式防波堤

Fig. 3 Floating breakwater with fins

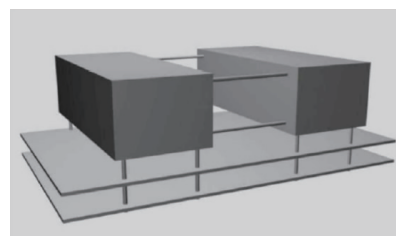


图4 双浮箱-水平板式浮式防波堤

Fig. 4 Twin pontoon-horizontal plate floating breakwater

(4)浮箱-其他损耗波能结构式浮式防波堤。浮箱联合其他损耗波能结构可提高浮堤的消浪效果,因为将其浮箱结构由波能反射型转变为波能反射-损耗混合型浮堤。波能损耗结构主要包括栅栏结构、桁架结构、薄膜结构和气室结构等。

浮箱与栅栏或桁架结构组合的浮箱式浮式防波堤利用栅栏结构或桁架结构增强水体紊动、使得波浪破碎来增加波能损耗,从而提高消浪效果。Brownsville港采用了由浮箱和下部木格栅组合成的浮堤(图5),该结构有效且成本较低^[25]。Mani等先后提出了浮箱底部安装等间距圆柱体的Y型浮式防波堤(图6)^[26]和“笼式”浮式防波堤(图7)^[27],下部圆柱体可使波能衰减,这两种结构浮堤的消浪效果相比大多浮堤结构均明显提高。N. Matsunaga等^[28]对由日本Saiki钢铁公司设计的由浮箱和前后钢桁架组成的浮式防波堤(图8)的消浪性能进行了研究,前桁架可使入射波破碎从而提高消浪效果。

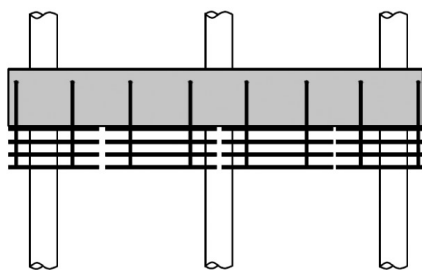


图5 浮箱与栅栏组合式浮式防波堤

Fig. 5 Floating breakwater with pontoon and porous treated timber

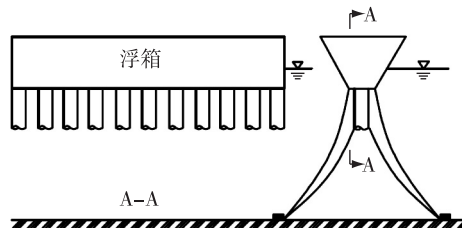


图6 Y型浮式防波堤

Fig. 6 Y-frame floating breakwater

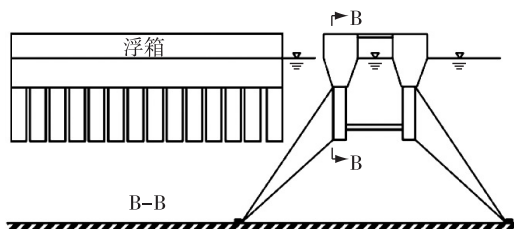


图7 笼式浮式防波堤

Fig. 7 Cage floating breakwater

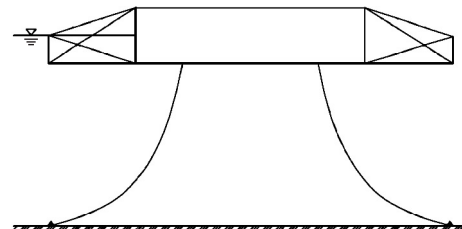


图8 浮箱与桁架组合的浮式防波堤

Fig. 8 Floating breakwater in combination with pontoon and truss structures

单层或多层薄膜结构可掩护相关水域,在浮箱底部设置单层或多层薄膜可提高浮堤的消浪效果,M. W. Hermanson^[29]提出了底部连接单层薄膜的浮箱式浮堤(图9),试验结果表明底部连接单层薄膜时的透射系数相比无薄膜时平均降低12%左右。Sung Tai Kee^[30]对底部连接多层薄膜的浮堤进行了研究,结果表明多层薄膜可增强浮堤的整体消浪效果。

气室可增加水体紊动、波能损耗,同时可利用气动传动原理将波能转化为电能。Weoncheol Koo^[31]对中间带有气室的浮箱式浮堤进行了研究,He Fang等^[32-33]对前后带有对称和不对称气室的浮箱式浮堤进行了研究,研究均表明由于气室的阻尼作用,气室可减小浮堤运动响应并有效降低波浪透射系数。

(5)浮箱式浮式防波堤不同改进结构型式的比较。单浮箱结构主要通过反射部分入射波能来衰减透射波。在浮箱式浮堤不同的改进结构型式中,与单浮箱相比,多浮箱式浮堤和浮箱-垂直板式浮堤主要通过增大波浪反射以提高消浪效果;浮箱-水平板式浮堤既增加了波浪反射又增大了波能损耗;浮箱联合其他损耗波能结构式浮堤主要利用栅栏、桁架、薄膜和气室等结构增大了波能损耗。

在浮箱式浮堤不同的改进结构型式中,多浮箱式浮堤优点主要表现在消浪效果好,结构简单,便于制造和施工;其缺点主要表现在与单浮箱相比制造成本较高。浮箱-垂直板式浮堤的优点主要表现在结构简单,可在增加较少费用情况下提高浮堤消浪效果;其缺点主要表现在短周期波浪作用下垂直板产生的辐射波会使浮堤消浪效果变差,浮堤消浪效果难以控制,且浮堤结构受力变大。浮箱-水平板式浮堤的优点主要表现在消浪效果好且浮堤整体稳定性较好;但缺点是锚链力和底部水平板受到的波浪浮托力较大,结构安全性降低。浮箱联合其他波能损耗结构式浮堤的优点主要表现在只增加较少费用即可提高消浪效果;但缺点主要表现在某些结构较复杂,不便于制造和施工,且维护成本会增大。

2.2 浮筏式浮式防波堤

浮筏式浮式防波堤为波能损耗型浮式防波堤,主要利用浮体与水面附近水体的摩擦作用、干扰水面附近水体的运动来衰减入射波浪。浮筏式浮式防波堤易于制造和维护,且与浮箱和浮筒结构相比费用低廉,但是消浪效果相对较差,浮筏结构的宽度一般要达到1倍波长左右才能有效地起到消浪作用。国内外对废旧轮胎式浮式防波堤的研究和应用相对较多。废旧轮胎式浮式防波堤根据不同布置型式分为Wave-Maze型、Goodyear型和Wave-Guard型等,其中Wave-Guard型由杆件将轮胎连成刚性整体,相比其他型式废旧轮胎式浮堤消浪效果较好^[1]。吴维登等^[34]从筏体的刚度、倾斜度、挡浪面积和自振频率等方面对钢管-轮胎式浮堤结构进行了改进。张余和王永学等^[35]对废旧轮胎浮式防波堤进行了试验研究,结果表明在其试验范围内当堤宽大于0.6倍波长时,透射系数小于0.5,锚链刚度和锚链拖地长度对透射系数的影响不明显。

对于浮筏式浮式防波堤,除了废旧轮胎式外,吴静萍等^[36]模仿水生植物“浮漂”的结构形式,设计一种新式防波堤,将多块圆形木板柔性连接成一体,平铺于水面,研究结果表明该结构具有消浪功能。吴斌和吴宋仁^[37]对用于掩护码头施工区域的竹筏式浮堤进行了试验研究。A. V. Hegde等^[38]对由多层PVC圆管水平交错布置而成的浮筏式浮堤开展了试验研究,试验范围内当浮堤相对宽度为1.0时透射系数在0.6左右。

2.3 其他型式浮式防波堤

除了多种浮箱式(浮筒式)和浮筏式浮式防波堤结构型式外,也提出了其他结构型式的浮式防波堤,如A形构架浮堤、板-网式和多孔结构的浮式防波堤等。A形构架浮堤由加拿大学者提出^[6],其设计原理是使浮堤具有较大转动惯量,由中间的一块垂直挡板和两侧各两个圆筒组成A形构架。董国海和郑艳娜等^[39]提出了一种由板、网和沉子组成的板-网式浮式防波堤(图10),试验结果

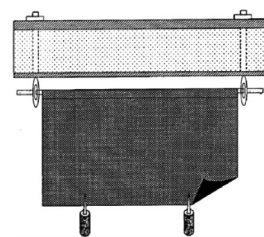


图9 浮箱-薄膜式浮式防波堤

Fig. 9 Floating breakwater in combination with pontoon and membrane

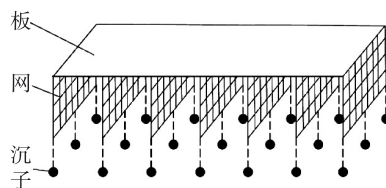


图10 板-网式浮式防波堤

Fig. 10 Board-net floating breakwater

表明这种浮式防波堤具有较好的消浪功能,可应用于深海养殖业。王环宇和孙昭晨^[40]在考虑了阻挡反射、紊动耗能和波峰耗散等基础上,提出由多层多菱形模块拼装而成的多孔结构浮堤,试验结果表明该结构浮堤消浪效果好且受力小。这些浮式防波堤结构型式的设计方法和研究思路为进一步研究浮式防波堤结构型式、增强浮式防波堤消浪效果提供了积极参考。

3 浮式防波堤的工程应用

浮式防波堤在掩护深水港湾码头水域,作为船舶临时靠泊码头掩护水产养殖和海滨浴场等水域,掩护海上施工现场和海上军用机动码头水域等诸多方面有着广阔的应用前景。到目前为止,国内外已有许多浮式防波堤工程应用实例,且在国外的工程应用相对较多。世界上第1条浮式防波堤建于1811年,是由英国在Plymouth港建造的掩护港内船只的木质浮式防波堤。二战期间1944年盟军在诺曼底登陆中,修建了著名的Bombardon浮式防波堤。从20世纪70年代开始,使用浮式防波堤的需求不断增强。日本1976年在福山建成一道矩形箱式浮堤,全长275 m,浮箱宽10 m,型深3 m,吃水2 m。荷兰FDN工程公司1996年设计了名为Mega的T型浮式防波堤,建造在希腊的Messolonghi港,主要用作游艇码头。美国陆军工程师兵团研究和发展中心(ERDC)1999年对一种V型布置的可快速安装的浮式防波堤(图11)的消浪效果进行了海上现场实测^[41]。美国的Brownsville港、Friday港、Bremerton港、Oyster Point码头和Lummi国家渔港均采用了浮式防波堤。

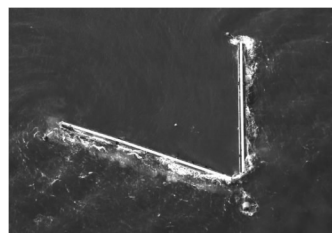


图11 V型布置浮式防波堤

Fig. 11 V-shaped floating breakwater

相较于国外,国内浮式防波堤的工程应用相对较少,但愈来愈受到关注。我国南京水利科学研究院^[42]于1962年研制并应用于丹江口水库的浮式导航防波堤,总长134 m,浮箱宽10 m,型深3 m,吃水1.5 m。该单位又于1988年针对浮箱式防波堤开展了大量试验研究^[43],并成功应用于上海炮台湾船舶基地,这是我国港口工程中实际采用的首条浮式防波堤。我国沿海第1条浮式防波堤于2002年在连云港旗台山海域建成,主要用于减小海水养殖区的波浪,但由于该工程建设前未经试验研究和充分论证,工程竣工后不久即遭受破坏。2012年福建省连江县定海海域建成一种浮筏式浮式防波堤,以清退养殖网箱,修复生态系统,开发海洋新牧场。目前限制浮式防波堤工程应用的主要原因是现有浮式防波堤的消浪效果较差(尤其当波浪周期较长时)以及极端风暴条件下结构本身的安全性难以保障。

4 结 语

综上所述,多年来国内外对浮式防波堤取得了较多研究成果,但仍存在以下不足,主要表现为:

(1)对于浮式防波堤波浪透射系数,虽然目前已有多种计算方法,但均有一定局限性,由于浮式防波堤具体结构型式差异且锚固方式不同,很难有统一的计算公式。现有研究成果大多是基于二维、正向波浪作用情况,实际上防波堤多受斜向波浪作用,而对于斜向波浪作用下浮式防波堤消浪性能的研究很少。

(2)现有浮式防波堤仍存在消浪效果较差的缺点,尤其在较长波浪周期和较大波高时,不仅透射系数大,而且结构受力大、结构安全难以保障。虽然国内外学者已提出很多种结构型式的浮式防波堤,其在消浪效果、结构稳定性或结构受力情况等方面较传统浮式防波堤有一定改善,但大都仍处于理论研究阶段,比较成熟和可广泛应用的结构型式很少。

(3)浮式防波堤在国外的工程应用较多,在国内的相对较少,目前国内浮式防波堤仅在内河、水库、湖泊以及海湾等波浪相对较小的水域得到一些应用,在港口海岸工程中的实际应用很少。

针对上述问题,建议今后围绕浮式防波堤着重开展以下几方面的研究:

(1)对于浮式防波堤波浪透射系数,应对常见结构型式和锚固方式的浮式防波堤开展系列物理模型试验,提出实用的浮堤波浪透射系数经验公式,为初步评价浮式防波堤的消浪效果提供依据。

(2)在现有浮式防波堤结构型式基础上,进一步研究消浪效果好、结构受力小、安全性好、便于施工的浮式防波堤结构型式,且能兼顾较长波浪周期情况,扩大浮式防波堤的可适用范围。

(3)专门深入研究波浪作用下浮式防波堤结构及其锚固系统的动力响应、疲劳破坏和极端风暴条件下的结构安全性等问题,以提高浮式防波堤结构的耐久性、安全性和可靠性,使其在港口海岸工程以及其他领域中具有更广泛的推广应用价值。

参 考 文 献:

- [1] MCCARTNEV B L. Floating breakwater design[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1985, 111(2): 304-318.
- [2] 王永学, 王国玉. 近岸浮式防波堤结构的研究进展与工程应用[J]. 中国造船, 2002, 43(增1): 314-321. (WANG Yong-xue, WANG Guo-yu. Research progress and application of floating breakwater[J]. Shipbuilding of China, 2002, 43(Suppl1): 314-321. (in Chinese))
- [3] Arie Cornelis Biesheuvel. Effectiveness of floating breakwaters[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013.
- [4] BOUWMEESTER E C, VAN DER BREGGEN H M. Floating breakwaters[R]. Delft: Delft University of Technology, 1984.
- [5] DRIMER N, AGNON Y, STIASSNIE M. A simplified analytical model for a floating breakwater in water of finite depth[J]. Applied Ocean Research, 1992, 14: 33-41.
- [6] MOREY B J. Floating breakwaters: predicting their performance [D]. Newfoundland: Memorial University of Newfoundland, 1998.
- [7] RUOL P, MARTINELLI L, PEZZUTTO P. Formula to predict transmission for π -type floating breakwaters[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2013, 139(1): 1-8.
- [8] 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 Chao-yong, WANG Deng-ting, FENG Wei-bing. Experimental study on wave attenuation of rectangular-pontoon floating breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(1): 14-18. (in Chinese))
- [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] WILLIAMS A N, ABUL-AZM A G. Dual pontoon floating breakwater[J]. Ocean Engineering, 1997, 24(5): 465-478.
- [11] WILLIAMS A N, LEE H S, HUANG Z. Floating pontoon breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2000, 27(3): 221-240.
- [12] 肖霄, 王永学, 王国玉, 等. 双浮筒-水平板式浮式防波堤性能研究[J]. 中国造船, 2010, 51(增2): 484-491. (XIAO Xiao, WANG Yong-xue, WANG Guo-yu, et al. Study on performance of twin-pontoons-plates type floating breakwaters[J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(Suppl2): 484-491. (in Chinese))
- [13] KOUTANDOS E V, KARAMBAS T V, KOUTITAS C G. Floating breakwater response to waves action using a Boussinesq model coupled with a 2dv elliptic solver[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2004, 130(5): 243-255.
- [14] JEONG K L, LEE Y G. Numerical simulations of two-dimensional floating breakwaters in regular waves using fixed cartesian grid [J]. International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering, 2014, 6(2): 206-218.
- [15] DIAMANTOULAKI I, LOUKOGEORGAKI E, ANGELIDES D. 3D analysis of free and moored twin-pontoon floating breakwaters [C] // Proceedings of the Seventeen International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, 2007: 2515-2522.
- [16] SYED S A, MANI J S. Performance of multiple pontoons floating breakwater - a numerical approach[C] // ASCE Conference on Civil Engineering in the Oceans VI (CEO6), America, 2006: 342-353.
- [17] COX J C, STANGLAND J. Designing floating wave attenuators for long period waves [C] // Proceedings of Ports' 13: 13th Triennial International Conference, America, Washington, 2013: 706-715.
- [18] CHRISTIAN C D. Floating breakwater for small boat marina protection[C] // Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, 2000: 2268-2277.
- [19] GESRAHA M R. Analysis of Π shaped floating breakwater in oblique waves[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28(5): 327-338.
- [20] ALIZADEH M J, KOLAHDOOZAN M, TAHERSHAMSI A, et al. Experimental study of the performance of floating breakwaters

- with heave motion[J]. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2014, 47(1): 59-70.
- [21] KORIAM A S, RAGEH O S. Effect of under connected plates on the hydrodynamic efficiency of the floating breakwater[J]. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(3): 349-362.
- [22] IKESUE S, TAMURA K, SUGI Y, et al. Study on the performance of a floating breakwater with two boxes[C]//*Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan, 2002: 26-31.
- [23] 董华洋. 浮箱-水平板式浮式防波堤水动力特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (DONG Hua-yang. Study on hydrodynamic characteristics of pontoon-plates type floating breakwaters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [24] 杨彪, 陈智杰, 王国玉, 等. 双浮箱-双水平板式浮式防波堤试验研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2014, 29(1): 40-49. (YANG Biao, CHEN Zhi-jie, WANG Guo-yu, et al. Experimental investigation of twin pontoon-twin horizontal plate floating breakwater[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(1): 40-49. (in Chinese))
- [25] ALLYN N, WATCHORN E, JAMIESON W W, et al. Port of Brownsville floating breakwater[C]//*Proceedings of Ports Conference 2001, America*, 2001: 1-10.
- [26] MANI J S. Design of Y-frame floating breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 117(2): 105-119.
- [27] MURALI K, MANI J S. Performance of cage floating breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1997, 123(4): 172-179.
- [28] MATSUNAGA N, HASHIDA M, UZAKI K I, et al. Performance of wave absorption by a steel floating breakwater with truss structure[C]//*The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002: 768-772.
- [29] HERMANSON M W. Physical modeling of a floating breakwater with a membrane[D]. Monterey: California Naval Postgraduate School, 2003.
- [30] KEE S T. Floating pontoon-membrane breakwater in the oblique seas[J]. *KSCE J Civ Eng*, 2005, 9(4): 271-278.
- [31] KOO W. Nonlinear time-domain analysis of motion-restrained pneumatic floating breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(9-10): 723-731.
- [32] HE Fang, ZHEN Hua-huang, LAW A W. Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: an experimental study[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 51:16-27.
- [33] HE Fang, ZHEN Hua-huang, LAW A W. An experimental study of a floating breakwater with asymmetric pneumatic chambers for wave energy extraction[J]. *Applied Energy*, 2013, 106(11): 222-231.
- [34] 吴维登, 钟瑚穗, 黄俊. 钢管-轮胎浮式防波堤消波的几个影响因子[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(5): 79-82. (WU Wei-deng, ZHONG Hu-sui, HUANG Jun. Factors influencing wave attenuation effectiveness of pipe-tyre floating breakwaters[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2002, 30(5): 79-82. (in Chinese))
- [35] 张余, 王永学, 肖霄. 废旧轮胎浮式防波堤模型试验[J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(3): 73-76. (ZHANG Yu, WANG Yong-xue, XIAO Xiao. Model test of scrap tire floating breakwaters[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(3): 73-76. (in Chinese))
- [36] 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. (WU Jing-ping, WANG Ren-kang, ZHENG Xiao-wei, et al. The experimental investigation of the duckweed-type floating breakwater[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)*, 2001, 25(1): 91-93. (in Chinese))
- [37] 吴斌, 吴宋仁. 浮式防波屏整体模型试验研究[J]. *重庆交通学院学报*, 2004, 23(增1): 93-95, 99. (WU Wu, WU Song-ren. The research of floating breakwater[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2004, 23(Suppl1): 93-95, 99. (in Chinese))
- [38] HEGDE A V, KAMATH K, MAGADUM A S. Performance characteristics of horizontal interlaced multilayer moored floating pipe breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2007, 133(4): 275-285.
- [39] DONG G H, ZHENG Y N, LI Y C, et al. Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(8-9): 931-938.
- [40] WANG H Y, SUN Z C. Experimental study of a porous floating breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(5-6): 520-527.
- [41] BRIGGS M, YE W, DEMIRBILEK Z, et al. Field and numerical comparisons of the RIBS floating breakwater[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2002, 40(3): 1-13.

- [42] 杨正己. 矩形浮式防波堤试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1963. (YANG Zheng-ji. Research report of rectangular pontoon floating breakwater[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1963. (in Chinese))
- [43] 姚国权, 麻志雄, 丁炳灿. 浮式防波堤消浪特性试验[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1988. (YAO Guo-quan, MA Zhi-xiong, DING Bing-can. Research report of wave attenuation characteristics of floating breakwater[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1988. (in Chinese))

Research progress and application of floating breakwater

SHEN Yu-sheng, ZHOU Yi-ren, PAN Jun-ning, WANG Xing-gang

(Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of the Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Compared to other traditional breakwaters, the floating breakwater can be applied to the conditions with relatively deep water, weak foundation, macro-tidal range and requirements of water exchange, and has broad application prospects in many fields, such as harbors, coastal works, ocean engineering, and marine culture, etc. In the study, the main research achievements and research progress of the floating breakwaters are summarized based on plenty of references. Calculation methods of wave transmission coefficient of the floating breakwaters, including theoretical derivation, empirical formulas and numerical simulations, are summarized and analyzed in the study. The research and development conditions of the structural types of the floating breakwaters are introduced and the wave attenuation mechanism and effectiveness of different structural types including pontoon type, raft type and their improved structure types are focused. The engineering application cases of the floating breakwaters both at home and abroad are introduced, and the main reasons of their application limits are also analyzed. Finally, a few deficiencies in the present research are pointed out, and future development directions and some key problems are put forward to further promote the engineering application of the floating breakwaters in the future.

Key words: floating breakwater; transmission coefficient; structural type; engineering application; research progress