

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.03.019

废旧轮胎浮式防波堤模型试验

张 余 ,王永学 ,肖 霄

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 辽宁 大连 116023)

摘要 :依据水弹性相似理论设计小比尺的废旧轮胎浮式防波堤模型 ,该模型试验结果与原型结果吻合较好 ,验证了废旧轮胎浮式防波堤模型试验所取的相似关系是合理的 ,试验技术是可行的。研究废旧轮胎浮式防波堤结构衰减波能量的机理 ,探讨结构相对堤宽、锚链拖地长度、锚链刚度对废旧轮胎浮式防波堤消浪性能及锚链力的影响。在该试验范围内 ,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。

关键词 :物理模型试验 ;相似关系 ;消浪性能 ;锚链力 ;废旧轮胎浮式防波堤

中图分类号 :TV139.2⁺6 ;TV131.61⁺4 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)03-0073-04

Model test of scarp tire floating breakwaters//ZHANG Yu , WANG Yong-xue , XIAO-xiao (*State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116023 , China*)

Abstract : Based on the hydro-elastic similarity theory , a physical model with small scale for scarp tire floating breakwaters was designed. The model test results agreed with those of the prototypes. The similarity relation for the model tests on scarp tire floating breakwaters was verified to be rational , and the test techniques were feasible. The mechanism of wave energy attenuation of scarp tire floating breakwaters was studied. The influences of relative width of the structure , length and stiffness of the anchor systems on wave attenuation performance and anchor line forces of the scarp tire floating breakwaters were discussed. A conclusion is drawn that within the test range , when the relative width of the breakwaters is larger than 0.6 times the wave length , the transmission coefficient is smaller than 0.5 , and the influences of the stiffness and length of the anchor systems on the transmission coefficient are not obvious.

Key words : physical model test ; similarity relation ; wave attenuation performance ; anchor line force ;scarp tire floating breakwaters

随着我国汽车数量不断增多 ,废旧轮胎的回收和再利用问题日益迫切 ,因此利用废旧轮胎建造废旧轮胎浮式防波堤不失为一种绿色环保、经济可行的办法。

国外在 20 世纪 60 年代末就开始进行废旧轮胎浮式防波堤的研究 ,大部分研究工作基于现场和原型试验 :1968 年美国陆军工程水道实验站在 Vicksburg 做了 Wave-maze 型废旧轮胎浮式防波堤现场试验^[1-2] ;1978 年 Giles 等^[3]进行了全相似的 Goodyear 型废旧轮胎浮式防波堤试验研究 ;1982 年 Harms 等^[4]在美国陆军海岸工程研究中心进行了全相似 Wave-guard 型结构的试验研究等 ,并陆续应用到实际工程中。国内吴维登等^[5]在 2002 年进行了钢管轮胎浮式防波堤消波的几个影响因子的试验研究。波浪对轮胎浮式防波堤结构的作用机理十分复杂 ,原型试验对试验场地、试验设备等要求很高 ,且

费用极大 ,而模型试验需要解决模型相似问题 ,当前这方面还没有见到相关的研究工作 ,各种因素对废旧轮胎浮式防波堤性能的影响还有待于深入研究。笔者依据水弹性相似理论 ,设计了小比尺的废旧轮胎浮式防波堤模型试验 ,通过与 Harms 等在美国陆军海岸工程研究中心做的原型试验对比 ,验证了废旧轮胎浮式防波堤等柔性防波堤结构模型试验技术的可行性。进行了废旧轮胎浮式防波堤结构相对堤宽、锚链拖地长度、锚链刚度对其消浪性能影响的试验研究 ,为实际工程应用提供参考。

1 物理模型试验

1.1 试验设备与仪器

模型试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室中尺寸为 23 m×0.8 m×0.8 m(长×宽×高) ,生波周期为 0.5~5.0 s 的溢油水槽中进行。试

作者简介 张余(1984—) ,女 ,辽宁铁岭人 ,硕士研究生 ,从事港口、海岸及近海工程研究。E-mail :yuzhang840827@163.com

验水槽的前端为该实验室研制生产的 DL-3 型液压伺服不规则波造波机,采用微机控制并配备数据采集系统,水槽的末端安装有消能网。波要素测量采用该实验室研制生产的 DLY-1 型波高-滤波-应变混合式测量仪,波高测量范围不小于 30 cm,绝对误差小于 1 mm。采用量程为 0~5 kg、精度小于或等于 1%RL 的 DYL-1A 型应变式拉力传感器测定模型的锚链力。

1.2 模型设计及试验布置

依据 Harms 等^[4]于 1982 年在美国陆军海岸工程研究中心做的原型试验的试验参数进行模型设计。原型为 3 个 Wave-guard 型轮胎浮式防波堤结构单元,沿波浪传播方向宽为 12.2 m,长为 3.66 m,轮胎为标准载重车废轮胎,平均直径为 1.016 m,锚泊系统采用轮胎制动型,制动部分长 6 m,总链水平投影长度为 12 m。该试验考虑废旧轮胎浮式防波堤结构的弹性特性,采用水弹性相似理论^[6-7],即依据重力相似(Froude)准则和弹性相似(Cauchy)准则设计试验模型,几何比尺 λ_L 、波高比尺 λ_H 、波长比尺 λ_L 、波周期比尺 λ_T 、流体密度比尺 λ_ρ 、轮胎密度比尺 $\lambda_{\rho'}$ 、弹性模量比尺 λ_E 之间的关系为

$$\begin{cases} \lambda_H = \lambda_E = \lambda_L = \lambda_l = 15 \\ \lambda_T = \sqrt{\lambda_l} \\ \lambda_\rho = \lambda_{\rho'} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

在满足轮胎主要参数(几何尺寸、密度、硬度)要求的前提下,综合相似理论与模型制作实际,确定轮胎厚度比尺 $\lambda_{L'} = 10$,变态率为 1.5,从而得到既能满足几何尺寸、密度、硬度要求又能方便制作的模型轮胎,取质量比尺 λ_M 为

$$\lambda_M = \lambda_l^2 \lambda_{L'} \quad (2)$$

浮体结构中轮胎^[8]采用硬度为 70 的天然橡胶制成,轮胎的主要参数见表 1。

表 1 轮胎主要参数

轮胎类别	质量 M/g	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	外径/ mm	内径/ mm	断面最大 宽度/mm
原型轮胎	50000	1.2	12.46	1016	508	240
模型轮胎 (设计)	22.2	1.2	0.8	68	34	16
模型轮胎 (实际)	22.2± 0.5	1.16	0.8± 0.5	68	34	16

考虑原型钢管特性,模型试验管材采用直径为 30 mm、壁厚为 3 mm 的有机玻璃管。用玻璃丝带做绑扎材料,将 11 个模型轮胎串成 1 排,并列 12 排,相邻 2 排串连绑扎在有机玻璃管上,每 132 个模型轮胎组成 1 个结构单元,相邻 2 个单元共用同 1 个

管,使 3 个单元联结在一起,每根管上还串有 51 个轮胎,合计 600 个模型轮胎组成宽度 $B = 820 \text{ mm}$ 、管间距 $G = 244 \text{ mm}$ 的试验浮体,其中 80 个模型轮胎以 13.3% 的填充率填充泡沫材料,有机玻璃管两端密封并提供一定浮力使试验模型始终保持漂浮状态。锚泊系统中锚链考虑重力相似和弹性相似准则,模型中锚链单位质量为 25 g/m ,用弹簧模拟锚链刚度。验证试验模型在迎浪侧选用轮胎制动型锚泊系统,每根锚链中轮胎制动部分长 400 mm,共有 5 个模型轮胎,在迎浪侧靠近浮体的 4 根锚链端各布置 1 个拉力传感器,背浪侧选用锚链锚泊,混合布链,总链水平长度为 800 mm,其中锚链拖地长度 $L_t = 340 \text{ mm}$,模型锚链布置见图 1,图中 D 为轮胎直径, d 为轮胎顶端到水面的距离。浮体模型放置在水槽中间,浪高仪布置见图 2。在模型的迎浪测布置 1 号与 2 号浪高仪,1 号与 2 号浪高仪和浮体模型中心的距离分别是 215 cm 和 200 cm;在模型的背浪测布置 3 号与 4 号浪高仪,3 号与 4 号浪高仪和浮体模型中心的距离分别是 200 cm 和 215 cm。

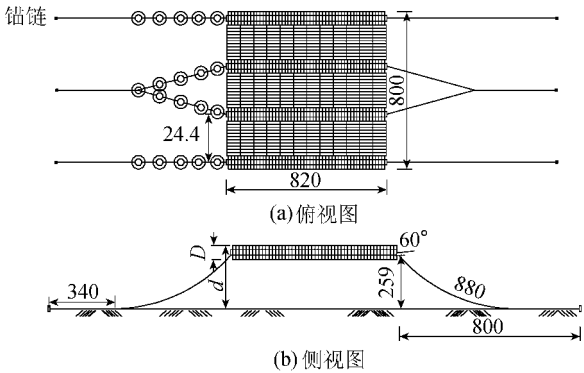


图 1 验证试验模型锚链布置示意图(单位: mm)

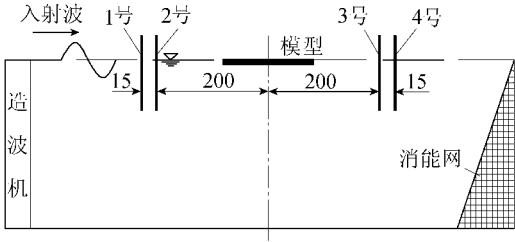


图 2 浪高仪布置示意图(单位: cm)

1.3 数据处理

波面采样时距为 0.05 s,采样长度取 1 024。每个试验组次中将 1 号、2 号浪高仪采集的波面数据用两点法分离得到堤前入射波高和反射波高,将 3 号、4 号浪高仪采集的波面数据各取 10 个波高求平均值得到透射波高。所有试验重复 3 次,将 3 次结果取平均值,得到该组次的透射波高,从而得到表征消浪性能的透射系数。

锚链力通过拉力传感器测量,每次试验前要将

传感器调零,传感器的信号通过 A/D 转换器由计算机采集。图 3 为迎浪侧 4 个传感器采集到的典型锚链力历时曲线(此时波周期 $T = 0.97\text{ s}$),将迎浪侧 4 个锚链力数据进行同时刻叠加,得到迎浪侧总的锚链力时间过程线。每个试验组次取迎浪侧总锚链力时间过程线的最大值,将 3 次重复试验结果取平均,得到该组次浮堤模型迎浪侧的最大总锚链力 f_0 。

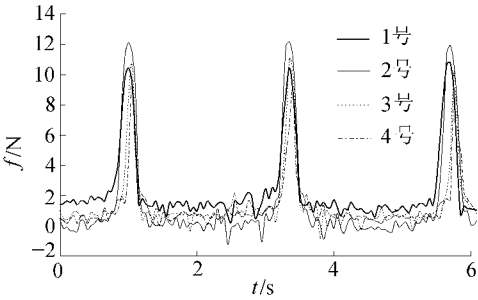


图 3 典型锚链力历时曲线 ($T = 0.97\text{ s}$)

1.4 试验结果

将原型波浪要素按 1:15 比尺换算成模型试验波浪要素。水深 h 为 0.31 m,波高 H 分别为 0.03 m, 0.04 m, 0.05 m, 0.07 m, 0.08 m, 0.10 m, 波周期 T 分别为 0.52 s, 0.61 s, 0.70 s, 0.79 s, 0.88 s, 0.97 s, 1.06 s, 1.14 s。消浪性能由透射系数 K_t 来表征,即 $K_t = H_t/H_i$,其中 H_t 为透射波高, H_i 为入射波高。为方便与原型试验比较,将模型试验中迎浪侧的最大总锚链力 f 按照式 (3) 换算成原型的迎浪侧单宽锚链力 F_p :

$$F_p = \frac{f\lambda_l^2}{l} \quad (3)$$

式中: l 为模型迎浪侧宽度。

图 4 是在相同的相对吃水 $D/d = 0.22$ 、相对间隔 $G/D = 3.3$ 、浮体宽高比 $B/D = 12.0$ 情况下,相对堤宽 B/L 对 K_t 影响的试验结果与原型结果^[4]的比较,图中 H 为波高, L 为波长。图 5 是锚链力试验结果与原型结果^[4]的比较。图 4 和图 5 反映出试验结果与原型结果吻合较好,证明该模型试验采取的相似关系是合理的。由图 4 和图 5 可以得出: K_t 随 B/L 的增大而减小,当 $B/L > 0.6$ 时, $K_t < 0.5$; F_p 随 H 的增大而增大。

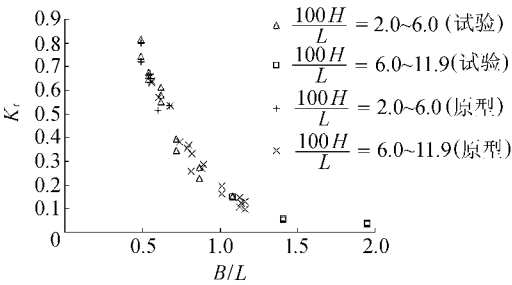


图 4 透射系数试验结果与 Harms 原型结果的比较

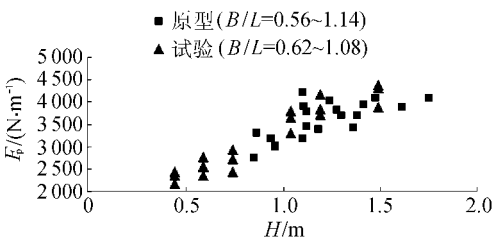


图 5 锚链力试验结果与 Harms 原型结果的比较

2 影响因素分析

在验证试验的基础上,进行了不同锚链刚度、不同锚链拖地长度对废旧轮胎浮式防波堤性能影响的试验研究。锚泊系统采用平行布链形式,锚链靠近浮体端安装拉力传感器,均为铰接,试验模型布置见图 6。选取水深 $h = 0.31\text{ m}$,波高 $H = 0.05\text{ m}$,波周期 T 分别为 0.70 s, 0.79 s, 0.88 s, 0.97 s,锚链拖地长度 L_t 分别为 0 m, 0.15 m, 0.34 m,锚链刚度 k 分别为 0.20 kg/m, 1.00 kg/m, 4.50 kg/m。消浪性能由透射系数来表征,波面采样数据处理过程与验证试验相同。每个试验组次分别对迎浪侧每根锚链力时间过程线取最大值,将每根锚链的 3 次重复锚链力试验结果取平均,得到该组次浮堤模型迎浪侧每根锚链的最大锚链力 f_i ($i = 1, \dots, 4$),再将迎浪侧这 4 根锚链的最大锚链力取平均,得到单根锚链的锚链力 F_0 。

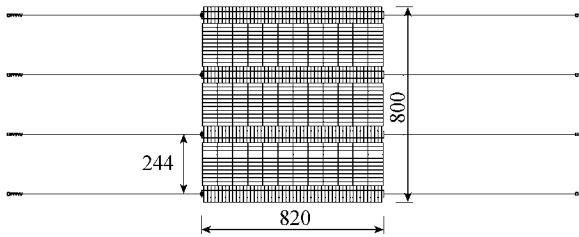


图 6 试验模型布置示意图(单位:mm)

2.1 透射系数影响因素分析

图 7 是在 $H = 0.05\text{ m}$ 情况下, B/L , L_t 和 k 对 K_t 影响的试验结果。由图 7 可以看出:相对堤宽是影响透射系数的主要因素,随着相对堤宽的增大,透射系数减小,锚链刚度、锚链拖地长度对透射系数的影响不是很明显。废旧轮胎浮式防波堤结构的挡浪面积小,波浪反射小,其主要消浪机理是通过浮体组件轮胎之间的相对运动扰乱水流质点的轨迹以及轮胎沿程摩擦来耗散波能。相对堤宽越大,耗能作用越大,沿程摩擦所耗散的波能越大,因而消浪效果越好。浮体模型在波浪作用下主要是升沉运动,横移运动不大,因而锚链刚度及锚链拖地长度影响不大。

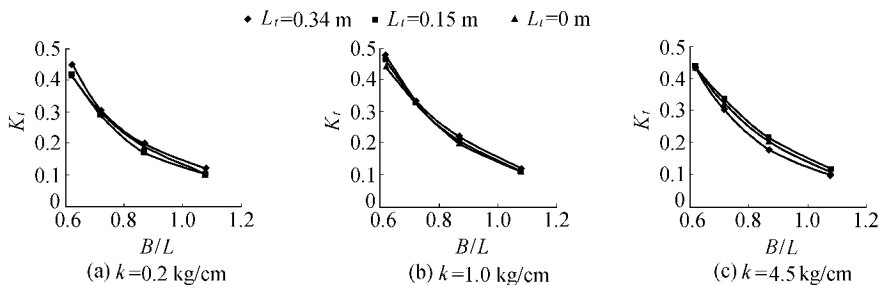


图 7 B/L , L_t 和 k 对 K_t 的影响

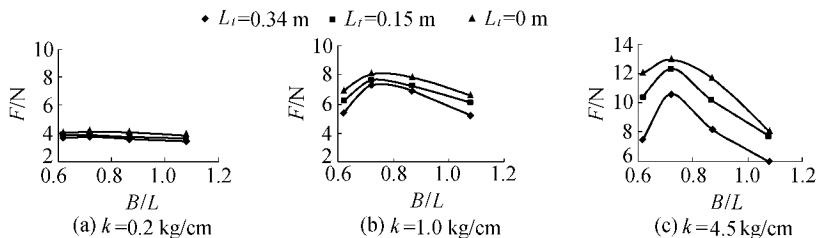


图 8 B/L , L_t 和 k 对 F 的影响

2.2 锚链力影响因素分析

图 8 是在 $H = 0.05$ m 情况下, L_t , k 和 B/L 对锚链力影响的试验结果。由图 8 可以看出: 锚链刚度一定时, 随着锚链拖地长度的增加, 锚链张紧程度降低, 锚链力减小; 相同锚链拖地长度时, 锚链力随锚链刚度的增大而增大。锚链刚度较小时, 锚链拖地长度对锚链力的影响较小, 锚链刚度较大时, 锚链拖地长度对锚链力的影响较大。随着相对堤宽的增加, 锚链力达到某一峰值, 这主要是受模型结构本身自振周期的影响。对于小刚度的锚泊系统, 锚链力的峰值不明显, 对于刚度较大的锚泊系统, 锚链力的峰值十分明显。

3 结 论

a. 采用水弹性相似理论设计的轮胎浮式防波堤模型试验与原型试验吻合较好, 表明该试验的模型相似技术是可行的。

b. 轮胎浮式防波堤结构消浪性能的主要影响参数是浮堤的相对宽度。随着相对堤宽的增加, 透射系数减小。在该试验范围内, 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。

c. 波高、相对堤宽、锚链拖地长度和锚链刚度等对轮胎浮式防波堤的锚链力有明显的影响。锚链力随着波高和锚链刚度的增大而增大, 随着锚链拖地长度的增大而减小。柔性体的自振周期对锚链力有较大的影响, 表现在锚链力在某一相对堤宽时出现 1 个峰值。

参考文献:

[1] NOBLE H M. Wave-maze, floating breakwater[C]/Civil

Engineering in Oceans Conf Proceedings, Dallas [s. n.], 1969 929-942.

[2] NOBLE H M. Use of wave-maze flexible floating breakwater to protect offshore structure and landings[C]/Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston [s. n.], 1976 215-224.

[3] GILES M L, SORENSON R M. Prototype scale mooring load and transmission tests for a floating tire breakwater[R]. Washington D. C. : Coastal Engineering Research Center, 1978.

[4] HARMS V W, WESTERINK J J, SORESENSEN R M, et al. Wave transmission and mooring force characteristics of pipe-tire floating breakwaters[R]. Washington D. C. : Coastal Engineering Research Center, 1982.

[5] 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.

[6] KOLKMAN P A. 用于研究近海工程的弹性相似模型[J]. 水道港口, 1980 (3) 32-40.

[7] 韩丽华, 姜萌, 马震岳. 港口海岸工程水力模型实验教程[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007 43-45.

[8] 《橡胶工业手册》编写小组. 橡胶工业手册: 轮胎、胶带与胶管[M]. 北京: 北京燃料化学工业出版社, 1975.

(收稿日期 2009-06-23 编辑 骆超)

