

废轮胎多孔隙消波结构物特性之初期研究

叶子怡¹, 王雪迎¹, 倪旭晖¹, 施俊超¹, 陈燕玲¹, 林嘉琪¹,
巫子扬¹, 王芳宇¹, 黄劭华¹, 郑剑豪¹, 郑智超¹, 林绍圭²

(1. 福州大学 海洋学院, 福建 福州 350108; 2. 台湾海洋大学 河海工程系, 台湾 基隆 20224)

摘要:基于废旧轮胎再利用及研发简易且低廉的施工方法与维护成本,本研究以规则波水工模型试验研究提出应用于港口码头的多孔隙弹性帷幕的初步理念。利用模型车轮胎以模块化方式组装成弹性帷幕后安装于码头前壁,研究多种周期波浪作用及不同消波室纵深对波浪反射率的影响。实验结果表明,简单的单一消波室多孔隙弹性帷幕对短周期波浪的消波效果较显著,消波室纵深较大者反射率较低,但可能引致水体振荡,后续可再强化消波室的消能效果。未来如能妥善研究废旧轮胎应用于多孔隙弹性帷幕消波结构物的施工与维修方法,除可缓解废旧轮胎处理给环境带来的压力外,也提供一种可用于简易渔港的施工简单、维修容易且资源再利用的消能结构物,该工程技术亦可输出至发展中国家,符合可持续发展观。

关键词:废轮胎; 环境污染; 消波; 开孔式结构物; 反射率

中图分类号:U656

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)01-0040-12

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.01.003

引用格式:YE Z Y, WANG X Y, NI X H, et al. An experimental study on characteristics of waste tire perforated-type wave dissipation structure[J]. Ocean Engineering, 2019, 38(1): 40-51. 叶子怡, 王雪迎, 倪旭晖, 等. 废轮胎多孔隙消波结构物特性之初期研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(1): 40-51.

据经济日报^[1]报道,2018 年我国废轮胎产出量达到 3.798 亿条,并正以 8%~10% 的速度急剧增加,随之带来的一系列环境问题不容乐观。由于废旧轮胎的存放占用大量土地资源,极易滋生蚊虫,传播疾病,更可能引发火灾,严重恶化自然环境,因此,轮胎的处理一直是世界性的公认难题。从我国废轮胎的消耗现状来看,国内轮胎循环利用行业起步较晚,规模较小,行业发展水平低且技术不成熟,因此,提高废旧轮胎的循环利用,可一定程度上缓解日益严峻的环境问题。实际上,关于废轮胎在海岸工程上的应用不乏先例,例如用于防撞设施、隔栏工程、离岸堤、浮式码头(图 1),对于废轮胎浮式防波堤的研究也可追溯至 1960 年代。Mccartney^[2]将废旧轮胎浮式防波堤的形式大致分为 3 种(图 2),分别为 Wave-Maze, Goodyear, Wave-Guard。对废轮胎防波堤在实际工程上的应用,林至聪等^[3]从废旧轮胎防波堤的材料特性、施工程序、稳定性分析及经济分析做了多方面的探讨,证实了其确实可行。遗憾的是,前人对废轮胎在码头工程的应用常止步于防撞设施,鲜少考虑其多孔性与弹性的特质。基于此,本研究提出一种将轮胎以弹性帷幕的形式组合而成的新型码头消波结构物,通过水工模型实验讨论废轮胎的消波效果及其在实际工程上的应用。

有关开孔型消能结构物的开发,Jarlan^[4]于 1961 年首次提出具有开孔前墙与不透水后墙且二者之间有一消波室(图 3)的设想,该设想主要是利用波浪于波峰作用期间从开孔进入消波室内形成扰动,又于波谷作用期间排出干扰水面从而达到消减波能之目的。之后又有许多学者做了扩展性的研究,Huang 等^[5]针对 1974—2010 年上百篇的开孔结构物相关研究做了大体回顾,其将 Jarlan 型开孔结构物大体分为 6 类,分别为完全开孔式、部分开孔式、多重开孔式、顶板式、块石填充式、内部有横向隔板等的开孔式结构物;同时汇整出 Jarlan 型消波结构物的消能机制与消波室的纵深及开孔比例有关的结论。井岛武士等^[6]利用水工模型实验,针对作用于单消波室的开孔防波堤的碎波压力进行分析,实验结果显示,开孔式防波堤由于前墙的开孔作用,将

收稿日期:2018-07-02

作者简介:叶子怡(1997-),女,主要从事海岸工程方面研究. E-mail: hurmony 939494@gmail.com

(李 燕 编辑)

入射波波压一分为二,分别作用于开孔前墙与不透水后墙,因此较不开孔结构物能更有效降低波压力。Tanimoto 和 Yoshimoto^[7]认为开孔沉箱波浪反射率的影响因素主要有相对水深 d/L 、相对纵深 B/L 、波浪尖锐度 H/L 、开孔率 X 以及消波相对水深 q ,其中 d 为水深, L 为波长, B 为消波室纵深, H 为波高。经过实验,陈雪峰等^[8]进一步得出反射率与其影响因素的相互关系,指出消波室的 B/L 对波浪反射率的影响最大,开孔率影响最小。Wang 等^[9]基于线性波理论,着重分析了单消波室的全开孔消波结构物的消波室 B/L 对波浪反射率的影响,并得出了具体的变化特性:当 $B/L = n/2$,即消波室纵深(B)为入射波半波长($L/2$)的整数倍(n)时,结构发生全反射;当 $B/L = (n/2 + 1/4)$ 时,反射率将达到最小。Lee 等^[10]针对开孔沉箱(图 4)的开孔数、开孔率、相对宽度以及消波室个数对部分开孔沉箱的消波效果进行探讨,并得出结论:1)双消波室的消波效果较单消波室突出;2)在双消波室的情况下,若第一消波室与第二消波室呈现相同纵深,此时消波效果最佳;3)当第一消波室开孔率为 40%,第二消波室开孔率为 20%时,消波效果最显著。林蔚等^[11]提出的折叶板开孔式沉箱结构物对长周期波浪有显著的削减效果。该新型结构物利用波浪及水流运动与折叶板的开阖互动关系,于波峰作用时,水压力推开折叶板让水流进入结构物体内;波谷作用时,向外排出的水体力与重力将折叶板闭合,阻止水流由原路径排出,并导引水流由下方排水孔排出。借此降低波浪的反射,达到消波目的。

目前,国内外有关废旧轮胎的文献甚少,一般多集中在工程应用上,例如 Simm 和 Wallis^[12]针对废旧轮胎在港湾、海岸及河川工程上的应用编写了一份参考手册。但未见有关作为固定消能式结构物的研究,其他方面的应用如前言所述。



(a)防撞设施



(b)隔栏工程



(c)离岸堤

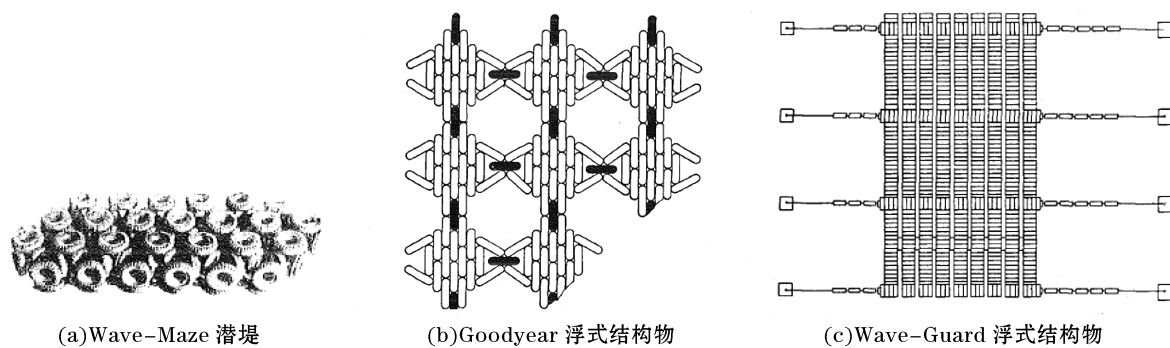
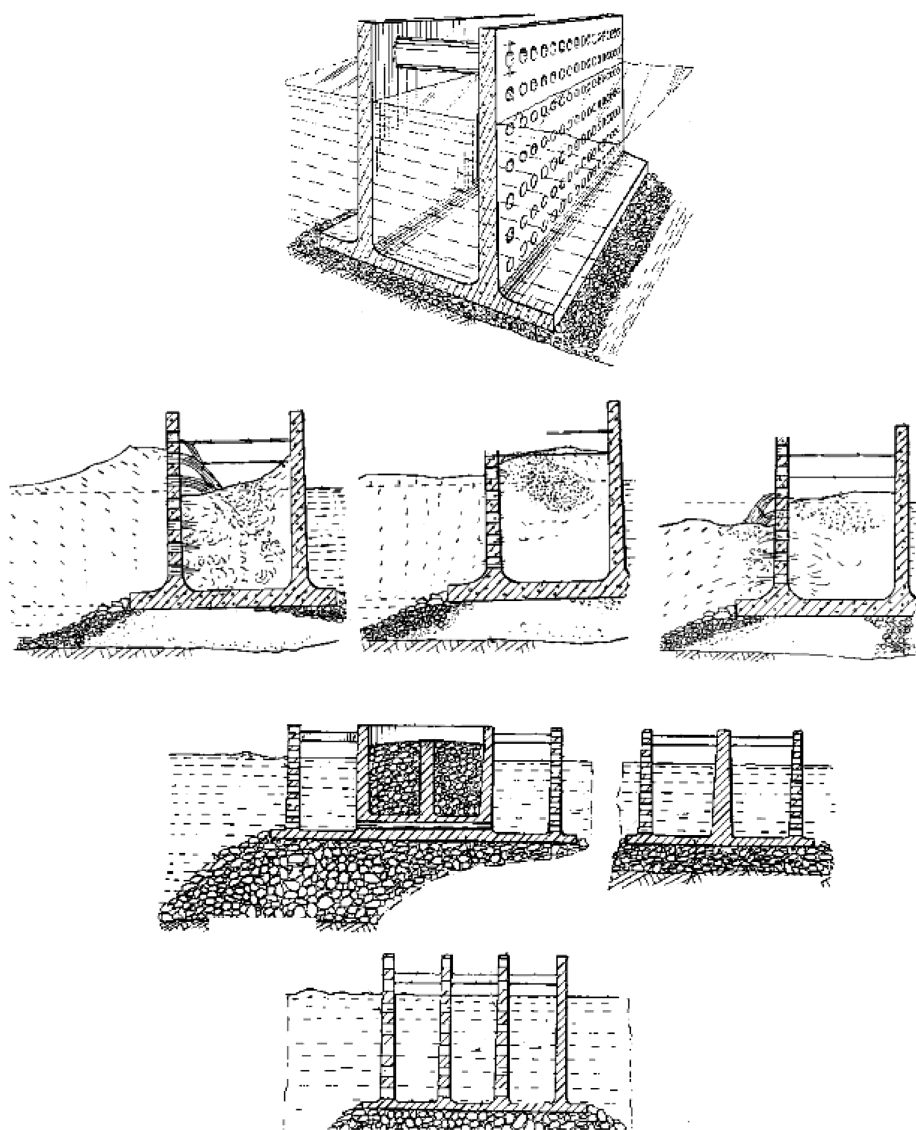


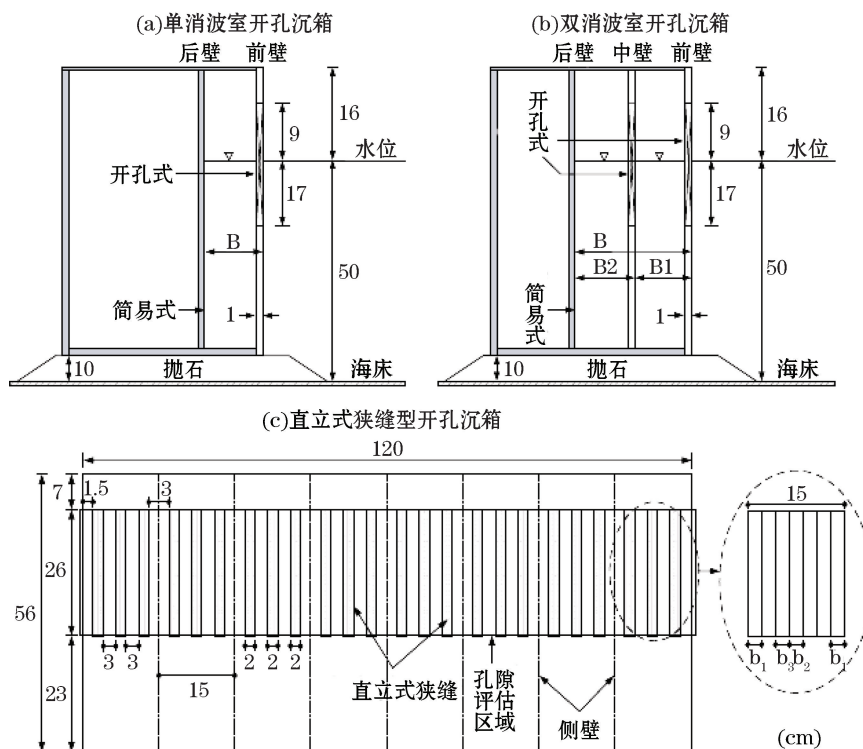
(d)浮式防波堤

注: c 图摘自 <http://pontiaccove.blogspot.com/2015/01/the-breakwater.html>; b, d 两图摘自 <https://www.slideshare.net/promediakw/scrap-tires-as-wave-barriers-in-the-marine-environment-an-analysis-of-pros-and-cons-neelamani>

图 1 废轮胎的实际工程应用

Fig.1 Practical engineering applications of waste tires

图 2 废轮胎浮式防波堤^[2]Fig.2 Floating breakwater constructed using model vehicle tires^[2]图 3 Jarlan 开孔型消能结构物构想图^[4]Fig.3 A conception map of perforated wave dissipation structure proposed by Jarlan^[4]

图 4 狭缝型沉箱配置图^[10]Fig.4 Layout of the slit-type caisson^[10]

1 实验设备

实验是在台湾海洋大学的断面水槽中进行的,以规则波的形式对不同消波室纵深的结构物进行多种周期不同波高的造波实验,通过波高计测量其水面变动时的波高,进而计算其反射率以讨论消波效果。详细实验设备与仪器如下:

1) 断面造波水槽

本实验使用长 28 m、宽 0.8 m、高 0.8 m(有效造波段长为 25.56 m)的断面水槽(图 5),水槽主要由底部的不锈钢板以及两侧的透明强化玻璃组成,由此可清楚地观察波浪波高的变化情况。

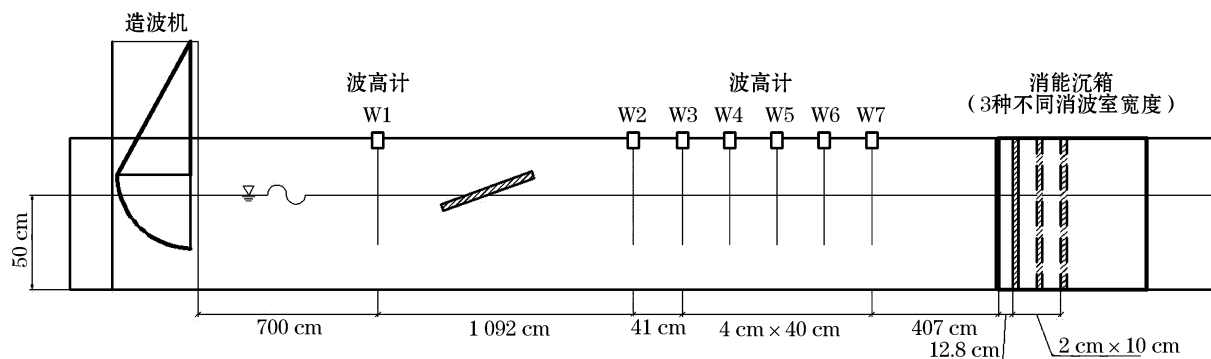


图 5 断面造波水槽及实验整体布置图

Fig.5 Cross-section wave generating flume and overall arrangement of the experiment

2) 造波机

本实验使用活塞式造波机(英国 Edinburg Dsigns Ltd. 产制), 造波板宽度为 0.77 m。此款造波机可造规则波与不规则波, 通过造波室的控制面板来预设波的周期以及波高, 再由控制盒来驱动造波。

3) 波高量测撷取系统

此系统采用波高计、增幅器(日本 Union Engineering 株式会社电容式波高仪 U.E.W1-1)与 Instrunet 类比—数位讯号转换, 其测定范围为 ± 0.15 m。可由波高计测得水位变化, 再经由增幅器放大讯号, 以电压形式进行讯号的数位转换并以数字讯号存档。

4) 监控录影装置

本实验使用 3 台 CCD 的录影设备及一个显示屏, 可通过监视器来观察并记录整个实验过程, 有助于实验后对异常波高进行检讨。

2 实验设计

2.1 比例缩尺

本实验所用造波水槽的最大水深为 0.5 m, 而实际港内水深范围大致为 15~18 m, 根据 Froude 相似定律^[13], 设置长度比例缩尺为 1/36, 时间比例缩尺为 1/6。

2.2 模型设计

本实验针对消波室的不同纵深进行评估, 为方便调整消波室纵深, 设计了一个实验架, 长 78 cm、宽 78 cm、高 80 cm。该实验架采用不锈钢角钢及方管制作焊接而成, 纵向以间隔 10 cm 设置 3 组导槽, 并以木板材分隔消波室来调整 3 种不同的舱室纵深, 即 10, 20 及 30 cm (依序以代码 B_1 , B_2 及 B_3 代表)。

将 4.4 cm 直径的模型车用轮胎的轮胎面打孔并以金属螺丝螺帽链接以保持轮胎弹性, 在构成整片多孔隙轮胎面后将其安置于实验架的迎波面模拟码头前壁。轮胎面规格为 16×17 (行×列), 共 272 个轮胎(图 6), 考虑到当水深大时波浪行为产生的影响较小, 故在沉箱最下方保留一排泄水孔。由于实际的车用轮胎还有钢丝圈, 而模型车用轮胎仅是人造橡胶压模制成, 其间差异无法比较, 因此本实验仅视为一种多孔隙弹性帷幕的研究。

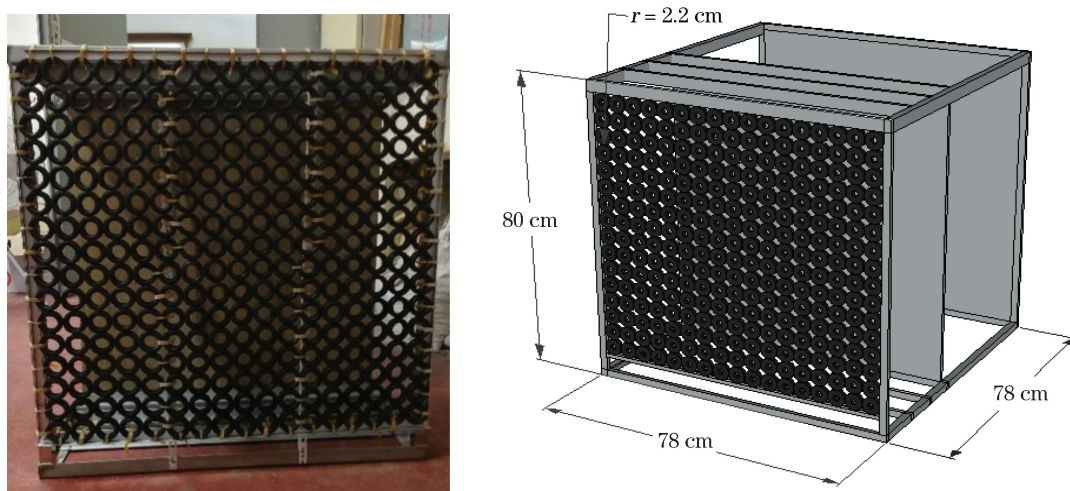


图 6 废轮胎型沉箱

Fig.6 Dimension of the caisson constructed using model vehicle tires

2.3 实验配置

2.3.1 模型配置

以造波机为起点,试验架模型放置于离造波机 24 m 处。实验时在模型顶端放置 6 块具有相当重量的压载,以确保试验架有足够的自重,不致因较大的波浪而产生滑移或晃动。

2.3.2 波高计配置

如图 5 所示,本实验共布设 7 支波高计(依序编号为 W1~W7)。第 1 支为量测入射波高,第 2~7 支为分析反射率用。以造波板为起点,将第 1 支波高计放置于 7 m 位置,此后波高计依次距造波机 17.92,18.33,18.73,19.13,19.53 和 19.93 m。模型设置于距离造波板 24 m 处。

本实验采用 Goda 和 Suzuki^[14]两点法对反射率进行分析。为避开容易产生量测误差的波峰及波节位置,在距反射壁 0.45~0.50 波长布设波高仪。但由于实验过程将进行多种波长的造波,除非每次移动波高计位置,否则在波高计的布设上无法同时避开所有波浪的波峰及波节位置。此外波浪进出消能结构物时也可能发生无法预知的相位改变,使波浪节点位置发生偏移,导致试验资料不准确。为尽量减少实验误差,本研究采用多组波高计配对量测方式,在分析时将波高计两两配对以推算反射率,如以相邻波高计作配对分析则至少有 5 组配对,从而可剔除不合理之配对(反射率大于 1 或接近 0 或波形异常)。

2.3.3 活动式透水消能板

为使造波后水面能快速恢复静稳进而缩短实验时间,在第 1 支波高计与第 2 支波高计之间放置活动式透水消能板(图 5)。在每一次造波完成后,将透水消能板放置于水面削减造波后残余波能,在水面恢复平稳后再将消能板拉离水面。

2.3.4 实验造波条件与量测记录

本实验以不发生碎波为原则,设定造波周期为 0.8~3.0 s,周期间间隔 0.1 s(共 23 种周期)。造波波高设定 $H=3$ 和 6 cm 两种,故共有 46 组造波条件,各条件均重复实验 3 次,每次造波时间约 90 s,取样频率为 25 Hz。设定数据如表 1 所示。

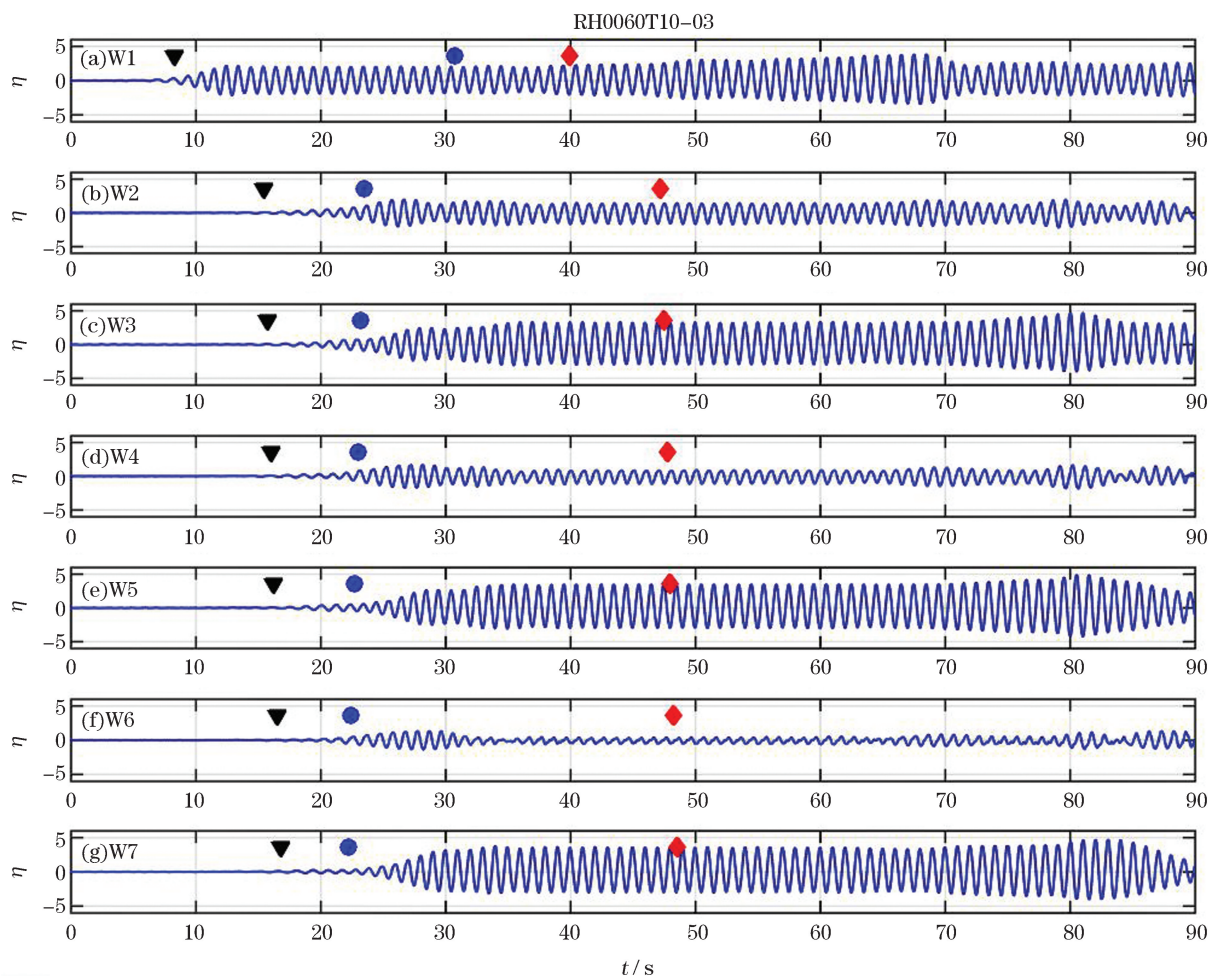
表 1 实验造波条件设定
Table 1 Settings of wave-making condition in the experiments

模 型			原 型		
比例缩尺	波高/m	周期/s	造波水深/cm	波高/m	周期/s
1/36	3	0.8~3.0	50	1.08	4.8~18.0
	6	0.8~3.0		2.16	4.8~18.0

2.4 资料分析

2.4.1 波形序列分析的前处理

在获得各组造波条件的波形数位时间序列后,首先进行去除平均值的处理,其次绘制原始时间序列波形图(图 7,由上而下为各波高计的波形记录),以便判断是否有仪器故障或量测误差的问题。图 7 中第 4 及 6 支波高计(W4 及 W6)的记录明显与其他波高计不同从而判断其可能记录到波节讯号,因此分析中予以剔除。此外,还发现由于造波机的造波能量有限,波浪在水槽中传播时,其前导波会发生波高衰减的现象及可能因为电压不稳定或仪器问题而存在有杂讯的现象。故必须对各波列进行前导波的辨识与排除工作,最终得到正确的时间序列波形图。

图7 原始波列范例($H=6\text{ cm}$, $T=1\text{ s}$)Fig.7 Example of measured wave profiles($H=6\text{ cm}$, $T=1\text{ s}$)

2.4.2 反射率的分析

在造波板持续造波时,波浪在水槽中向消波段传播,经过波高计后作用于结构物而产生反射波,再逆向往造波机方向传播,并在造波板处产生二次反射波,再度向消波段传播,而后陆续在造波板及消波段之间往返传播而形成多次反射波。分析中定义造波波浪首次通过波高计至反射波首次通过波高计之间为入射波时段;其后为入射波+一次反射波时段,直到二次反射波首次通过波高计以后为入射波+一次反射波+二次反射波时段,依此类推,则有入射波+多次反射波时段。根据 Goda 和 Suzuki^[14] 建议,进行反射率分析时最好撷取只同时存在入射及反射波的波形,故需要将各个时段辨识出。在完成波形序列的前处理后,设定启动水位(0.3 cm)以确认前导波到达 W1 波高计的时间(设定为入射波的起始时间(如图 7a 中的 ▼ 符号)),其次通过分散关系式求得波速,分散关系式为:

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = kh \tanh kh, \quad (1)$$

式中, $\sigma=2\pi/T$ 为角频率; T 为周期; $k=2\pi/L$ 为波数; h 为水深; L 为波长。再以波高计间的距离以及造波板与水槽反射壁的距离推算波浪由 W1 波高计依序到达 W2~W7 波高计及反射壁的传播时间,并进一步推算一次反射波到达时间。入射波+一次反射波时段(二次反射波到达之前)为分析反射率的有效波。

选取只有入射波+反射波成分的波形记录,以等时间间距从两个波列同步撷取长度为一个周期的波数(短周期取 7 个,长周期取 5 个)。图 8 为一组造波条件($H=3\text{ cm}$, $T=0.9\text{ s}$)所有配对分析的反射率结果。

最后从图中筛选出较为合理以及稳定的数据进行反射率的回归曲线图的绘制。图 8 显示,在波浪序列 100 以前,出现反射率由 0.4 降至 0.1 再增大到 0.7 左右的情形,应是衰减的前导反射波与已经发展成熟的入射波交所造成的反射率不稳定的现象。波浪序列 120 后相当稳定,因此主要以此区段进行反射率的讨论。

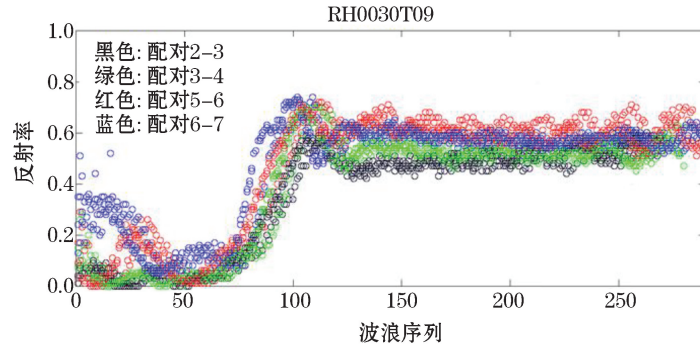


图 8 造波波高 3 cm、周期 0.9 s 所有波高计配对的反射率范例

Fig.8 Example of wave reflectivity of all wave altimeter pairs ($H=3$ cm, $T=0.9$ s)

3 讨论与分析

图 9 为不同消波室纵深反射率与周期的关系图(K_R-T),图 10 为综合不同波高的 K_R-T 及 K_R-B/L 图,采用 3 次回归曲线进行拟合。不同消波室纵深在不同波高条件的回归方程式表 2。从图 9,图 10 大致可以看出消波室纵深越大,反射率越低。波高大的反射率较低,应是多孔隙轮胎帷幕限制大波高波浪入侵而产生较大消波能力的结果。图中的 K_R-T 由于直接显示反射率随周期的变化,数据显得离散,但 K_R-B/L 图亦有类似情形,3 种不同纵深的反射率值并未混合在一起,与一般以无因次参数进行讨论的认知不同,经观察实验录像后发现消波舱室的纵深引发了水体振荡,而非预期的随纵深增大反射率越低,显示多孔隙消能结构物尚有消波机制,值得研究。

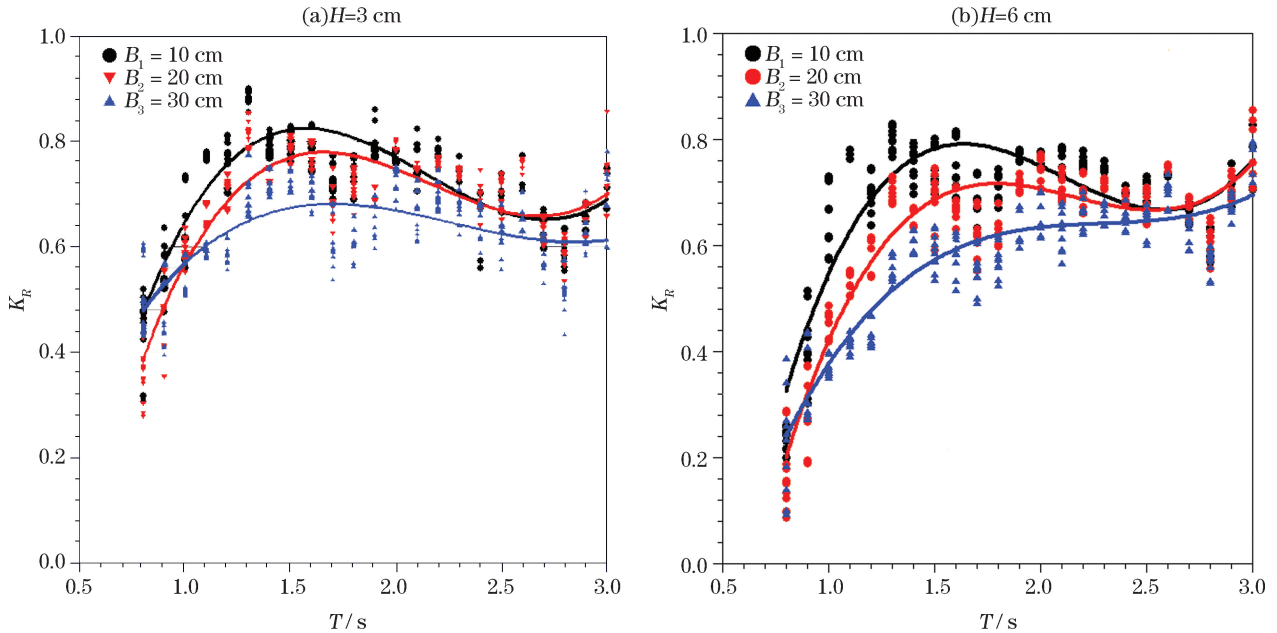
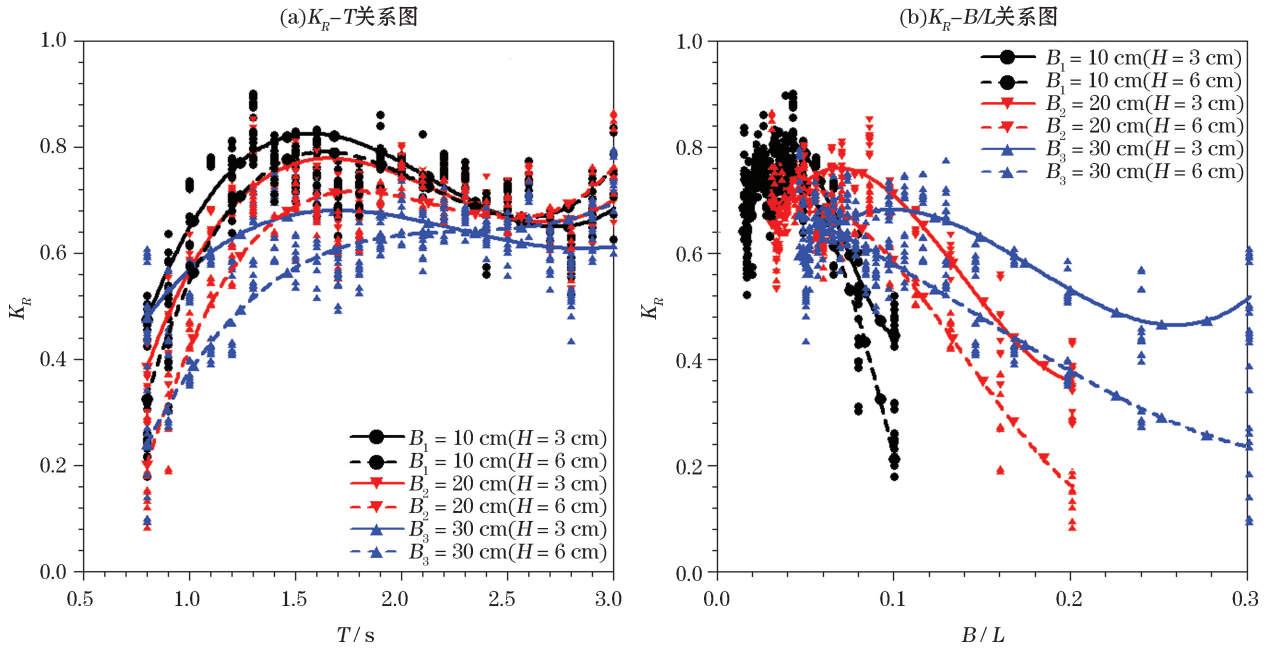


图 9 不同波高 K_R-T 关系图

Fig.9 Relation of K_R-T at different wave heights

图 10 不同波高 K_R-T 及 K_R-B/L 关系图Fig.10 Relations of K_R-T and K_R-B/L at different wave heights表 2 弹性壁反射率回归公式(K_R-T)Table 2 Regression formula of the elastic wall reflectivity (K_R-T)

纵深	H/cm	回归曲线	误差平方和
B_1	3	$K_R = -1.085\ 584 + 3.007\ 774\ T - 1.508\ 761\ T^2 + 0.234\ 392\ T^3$	0.725\ 329
B_2		$K_R = -1.189\ 676 + 2.991\ 451\ T - 1.460\ 568\ T^2 + 0.224\ 495\ T^3$	0.771\ 648
B_3		$K_R = -0.280\ 072 + 1.422\ 163\ T - 0.673\ 720\ T^2 + 0.099\ 771\ T^3$	0.459\ 581
纵深	H/cm	回归曲线	误差平方和
B_1	6	$K_R = -1.632\ 398 + 3.760\ 431\ T - 1.879\ 574\ T^2 + 0.297\ 471\ T^3$	0.735\ 361
B_2		$K_R = -1.632\ 930 + 3.447\ 455\ T - 1.650\ 682\ T^2 + 0.255\ 830\ T^3$	0.868\ 031
B_3		$K_R = -0.793\ 046 + 1.867\ 194\ T - 0.818\ 839\ T^2 + 0.120\ 886\ T^3$	0.842\ 025

由图 9 知,纵深大的反射率低于纵深小的,且波高 6 cm 的反射率低于波高 3 cm 的,以 $B=30\text{ cm}$ 为例,周期在 1.7 s(相当于原型的 10.2 s) 以下时,反射率均小于 0.6。对于波高 6 cm,周期 1.1 s(相当于原型的 6.6 s) 以下反射率低于 0.4,而在 1.2 s 以上反射率略高但均小于 0.82(小于一般消波结构物的 0.9)。

实验结果表明,轮胎型结构物消波效果整体良好,尤其是对短周期波。对于同波高波浪,消波室纵深较大者总体消波效果较优。图中波高 3 cm 与波高 6 cm 的反射率变化趋势相似,皆在周期 0.8 和 2.4 s 处略有相交,而图 10 中曲线仍于周期 2.4 s 处相交。经初步判断,认为该结构物在消减短周期波浪时首先发挥其弹性壁的消波功效,让波流在能量传递过程中产生内摩擦力并干扰水流质点的传递轨迹,此后,主要为结构物消波室纵深发挥其消波能力,纵深大者总体消波效果较佳。而第二个交点则可推断为轮胎型结构物在针对消减不同波高波浪的波能时,在周期为 2.4 s 处消波效果达到一致,此时,可选择最为经济的消波室纵深。但由于本实验缺乏对不同波高波浪的反射率分析,故无法得出精确结论。

图 11 整理了不同纵深及不同波高的实验结果与回归曲线,根据 Lee 等^[10]的分析,开孔结构物的反射率主要与消波室个数、消波室宽度、开孔数以及开孔率相关。其实验模型长 80 cm、宽 120 cm、高 56 cm(实验模型如

图 4)。实验水深为 50 cm,波高为 2 和 4 cm,共设置 3 种消波室纵深($B=15, 30, 45$ cm),狭缝开孔个数 3~5 个,开孔率为 20%~60%。根据 2 个实验的相关性,本文节选其只有一个消波室,开孔率为 40%,即 $E=40\%$ 的实验结果进行比较如图 11 所示。图 11 显示 2 种模型在 $B/L < 0.1$ 时,有类似的反射率; $0.1 < B/L < 0.2$ 时, Lee 等的模型消波性能略佳; $B/L > 0.2$ 时则以轮胎型较佳。Lee 等^[10]通过实验认为双消波室的消波效果优于单消波室,且对达到最佳效果时的消波室开孔率进行分析讨论。虽然本文只对轮胎型结构物进行初步特性探讨,但其消波效果已可达到一般消波结构物,若能在此基础上对消波配置进行完善,定能达到更好的消波效果。

4 工程实用初步构想

本研究通过水工模型试验已证实利用废轮胎构成多孔隙弹性帷幕消波结构物的消波效果优于传统多孔隙刚性消波结构物。有关工程实务的主要施工工项包括轮胎简易清洗、打孔、串结成多孔隙弹性帷幕,然后吊装于码头前壁。由于轮胎材料规格单一,易于清洗、打孔、可应用高张力且耐磨绳索或钢缆并配合快速链接器等器具进行施工,废轮胎成本低廉,施工亦省时省力,未来维修时也可采用局部性换装方式进行。将其吊放于海中,另有吸引海洋生物,为鱼类提供遮蔽场所之妙用,但需考虑废轮胎的油污清洗,避免造成对海洋环境的二次污染。此外亦需对废旧轮胎的妥善固定作慎重考量。防止轮胎在飓风波浪作用时脱离,给海洋环境带来负担。因此,废轮胎的再利用工程也必须未雨绸缪,规划后续的维修相关规范。

5 结 语

本研究由废旧轮胎产生的一系列环境问题,提出将其应用在渔港码头进行消波的初步构想。将轮胎进行捆扎组合,吊放于沉箱前壁形成多孔隙弹性帷幕,利用轮胎呈现的开孔特性及弹性阻尼对水粒子的运动产生干扰,减少反射波。

1) 实验分析显示纵深大的反射率低于纵深小的,且波高 6 cm 反射率低于波高 3 cm,以 $B=30$ cm 为例,周期在 1.7 s (相当于原型的 10.2 s) 以下时,反射率均小于 0.6。对于波高 6 cm,周期 1.1 s (相当于原型的 6.6 s) 以下反射率低于 0.4,而在 1.2 s 以上反射率略高但均小于 0.82 (小于一般消波结构物的 0.9)。

2) 现有的消波结构物对长周期波的消波效果不够理想,主要是目前尚未考虑加强消波工的施作,但本实验表现良好的周期范围已可覆盖常时波浪至长周期,表明其囊括较广的可消波周期。

3) 实验的反射率随着 B/L 增大呈下降趋势,显示消波室纵深越大消波越好。本研究发现反射率大小主要和波动的相位有关,如增加可改变相位的消能设施,应可有效降低对消波室纵深的要求,在实际应用中,还应考虑当地波浪特性以及工程经费,选取适当消波室纵深。

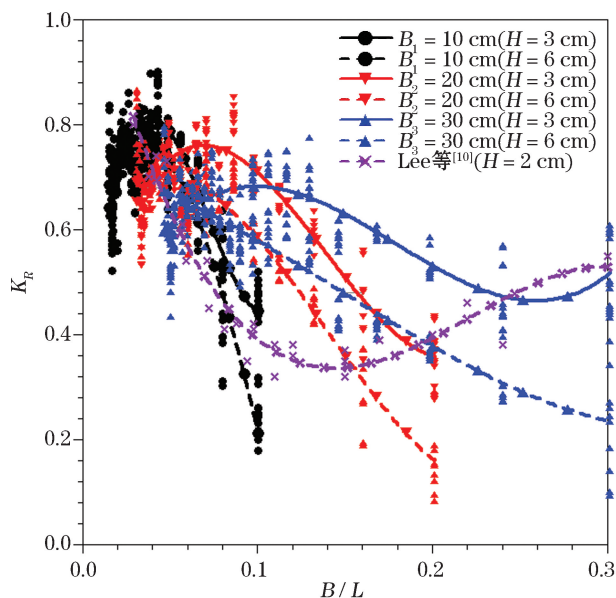


图 11 与 Lee 等^[10] ($N=3, H=4$ cm, $E=40\%$) 的反射率比较

Fig.11 Comparison with the wave reflectivity obtained by Lee et al.^[10]

参考文献 (References):

- [1] LIN H C. Economic Diary. Thermal cracking technolog can be help of recycling waste material[EB/OL]. [2018-10-30] http://paper.ce.cn/jjrb/html/2018-10/30/content_375630.htm. 林火灿. 经济日报社. 热裂解技术有望变废为宝[EB/OL]. [2018-10-30] http://paper.ce.cn/jjrb/html/2018-10/30/content_375630.htm.
- [2] MCCARTNEY B L. Floating Breakwater Design[J]. *Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering*, 1985, 111(2): 304-318.
- [3] LIN Z C, WU H X, CHEN S F, et al. The feasibility study of building breakwater with waste tires[C]//Cross-strait Conference on Structural and Geotechnical Engineering. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 978-991. 林至聪, 吴泓勋, 陈顺发, 等. 废轮胎防波堤之可行性研究[C]//海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 978-991.
- [4] JARLAN G E. A Perforated Vertical Wall Breakwater[J]. *Dock and Harbour Authority XII*, 1961(486): 394-398.
- [5] HUANG Z H, LI Y C, LIU Y. Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(10): 1031-1053.
- [6] IJIMA T, H OKUZONO H, TANAKA E, et al. An experimental study of breaking wave force on perforated breakwater with wave absorbing chamber[C]//Proceeding of 25th Conference of Coastal Engineering. Tokyo: JSCE Coastal Engineering Committee, 1978: 333-336. 井岛武士, 奥菌英明, 牛房性光, 等. 作用于拥有静波室开孔防波堤之碎波力之实验研究[C]//第廿五回海岸工学演讲会论文集. 东京: 土木学会海岸工学委员会, 1978: 333-336.
- [7] TANIMOTO K, YOSHIMOTO Y. Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall[J]. *Report of the port and Harbour Research Institute*, 1982, 21(3): 44-77 (in Japanese).
- [8] CHEN X F, LI Y C, SUN D P, et al. An experimental study of wave acting on perforated caisson[J]. *China Offshore Platform*, 2001, 16(5-6): 1-6. 陈雪峰, 李玉成, 孙大鹏, 等. 波浪与开孔沉箱作用的实验研究[J]. *中国海洋平台*, 2001, 16(5-6): 1-6.
- [9] WANG Y X, WANG G Y, LI G W. Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(13): 1829-1839.
- [10] LEE J I, SHIN S. Experimental study on the wave reflection of partially perforated wall caissons with single and double chambers[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 91(15): 1-10.
- [11] LIN W, LIN P, CHEN C W, et al. A preliminary study on wave dissipation characteristics of flap plate type of vertical caisson[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 36(4): 10-19. 林蔚, 林鹏, 陈池威, 等. 直立折叶板开孔式沉箱之消波特性初期研究[J]. *海岸工程*, 2017, 36(4): 10-19.
- [12] SIMM J D, WALLIS M. Sustainable re-use of tyres in port, coastal and river engineering. Guidance for planning, implementation and maintenance[R]. UK: HR Wallingford, 2004.
- [13] CHANSON H. *Hydraulics of open channel flow: an introduction*[M]. 2nd ed. United Kingdom: Butterworth Heineman, 2004: 650.
- [14] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments[C]//Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering, Hawaii: American Society of Civil Engineers, 1976: 828-845.

An Experimental Study on Characteristics of Waste Tire Perforated-Type Wave Dissipation Structure

YE Zi-yi¹, WANG Xue-ying¹, NI Xu-hui¹, SHI Jun-chao¹, CHEN Yan-ling¹, LIN Jia-qi¹, WU Zi-yang¹,
WANG Fang-yu¹, HUANG Shao-hua¹, ZHENG Jian-hao¹, ZHENG Zhi-chao¹, LIN Jaw-guei²

(1. College of Marine, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung 20224, China)

Abstract: For the reuse of waste tires and the research and development of simple construction method and low maintenance cost, a preliminary concept of perforated elastic curtain which can be used at wharfs is proposed based on experimental studies of regular wave hydraulic model. The perforated elastic curtain is, in a modular manner, assembled into by using model vehicle tires, and then by installing the elastic curtain on the front wall of the wharf the effects of the action of different periodic waves and the different widths of wave dissipation chamber on the wave reflectivity are studied experimentally. The model test results indicate that the perforated elastic curtain with a single wave dissipation chamber has a remarkable wave dissipation effect in the case of short period waves, and that a larger width of the wave dissipation chamber can cause a lower wave reflectivity. Although water oscillation may be caused, the energy dissipation effect of the wave dissipation chamber could be re-intensified in the future. If the application of real waste tires to the perforated elastic curtain structures can be studied well in the future, not only the pressure of the waste tire treatment on the environment could be relieved, but a wave dissipation structure which is simple in construction and convenient in maintenance and can be applied at a simple fishing port could also be provided. This technique can be exported to the developing countries.

Key words: waste tire; environmental pollution; wave dissipation; perforated structure; wave reflectivity

Received: July 2, 2018