

不同断面型式悬浮隧道管段波动特性实验研究*

蒋树屏^{1,2}, 李勤熙^{1,2}

(1.重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400067;2.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400067)

摘要:水中悬浮隧道(Submerged floating tunnel,简称SFT)是世界上目前唯一还没有实践过的海洋交通结构。SFT的波浪荷载作用评价对隧道结构设计十分重要。通过在二维波浪水槽中的物理模型实验,研究了3种不同断面型式悬浮隧道结构在不同波高和周期下的不规则波作用响应。实验结果表明:(1)相比圆形和多边形断面,椭圆形断面在周期内明显出现了多个局部峰值,且随着波高的增加,局部峰值的个数也随之增多,说明高宽比较小的椭圆形断面旋转力矩发生了作用。(2)通过获得的SFT断面周向压强对SFT断面的垂向和水平向波浪力进行了估算。(3)3种SFT断面出现最大最小压强的位置是一致的,但3种SFT断面的垂向波浪力均大于水平波浪力,结构设计时应重点关注垂向波浪力。根据垂向波浪力与水平波浪力幅值差变化比较,椭圆形和多边形受波高变化的敏感性比圆形更为显著。

关键词:水中悬浮隧道;断面型式;波动特性;波浪荷载;物理实验

中图分类号:U459.5

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0416-07

Wave Characteristics of Submerged Floating Tunnels under Random Irregular Waves

Jiang Shuping^{1,2}, Li Qinxi¹

(1.School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R. China; 2.China Merchants Chongqing Communication Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P.R. China)

Abstract: Submerged floating tunnel (SFT) is a unique marine structure whose actual realization has yet been made in the world. Assessment of hydrodynamic performance of SFT under wave loading is one of important factor in the design of SFT structure. The effect of different wave heights and periods on the structure of three kinds of cross section tunnel structures was studied by the physical model experiment in a two-dimensional wave flume. Experimental results show that, (1) compared to circular and polygonal sections, there are obvious local peaks in the elliptical section in the period, and with the increase of wave height, the number of local peaks also increases, this shows that the rotating moment of the elliptical section with high width and small width has an effect. (2) Through the obtained SFT section circumferential pressure the vertical and horizontal wave forces on the SFT section are estimated. (3) The position of the maximum and minimum pressure in the three SFT sections is the same, but the vertical wave force is larger than the horizontal wave force, the vertical force should be paid more attention to in structural design. According to the amplitude difference of vertical wave force and horizontal wave force, the sensitivity of ellipse and polygon to wave height change is more obvious than that of circular shape.

Keywords: submerged floating tunnel; cross section type; wave characteristics; wave load; physical experiment

* 收稿日期:2018-08-17(修改稿)

作者简介:蒋树屏(1951-),男,重庆南岸人,博士,研究员,全国工程勘察设计大师,主要从事隧道与地下工程领域的工程咨询与科研工作。E-mail:2902330051@qq.com

基金项目:国家交通运输部重大科技建设项目(2013318740050);重庆市研究生教育创新基金(CYB17130)

0 引言

水中悬浮隧道(Submerged floating tunnel,简称SFT)是唯一靠浮力和锚索张力保持动力平衡的海洋交通结构。近年来,国内外学者在SFT的波浪、洋流、地震和海啸等荷载分析中有许多代表性的研究^[1-13]。对SFT而言,根据波浪运动方向,波浪力会在断面的不同位置形成不同的压强场分布,使得SFT存在明显的波动特性。影响SFT的波动特性的因素主要有结构断面型式的选择、锚索类型和锚固方式等。针对SFT的波动特性,目前普遍以洋流为研究对象,并认为在一定水深下,SFT的波浪变化将很小。但从文献[1]和文献[2]的研究来看,在海洋内波的作用下,SFT的波浪力在较大水深下还保持相当数值,这一点在文献[3-4]的研究中得到了证实。因此,波浪荷载是研究SFT波浪力的重要考量因素,其主要原因是考虑SFT整体方案中过渡段和进口段受波浪荷载的影响和选择SFT接驳位置时尽量减小波浪荷载的影响。

目前,还未见波流耦合作用下SFT模型试验的报道。大多学者的物理模型试验研究多集中于纯流作用,比如西南交通大学的王广地等^[5]、秦银刚等^[6]和日本的Venkataramana等^[7]的水池试验研究。他们主要集中于研究SFT管段的绕流特性和涡激振动。而关于悬浮隧道管段的波浪荷载物理模型试验只见于日本的Kunisu等^[8]、中国中科院的葛菲等^[9]和韩国的Oh等^[10]与Seo等^[11]的水槽试验研究,其中仅Kunisu在波浪水槽中模拟了波流耦合作用。从波浪荷载的研究来看,以上水池试验研究对均匀流的模拟还不够精细,特别是对试验区流速和流场的控制难以满足真正意义的海洋环境要求。大部分波浪水槽试验只模拟了波浪,且研究集中于规则波,少见对随机不规则波浪的研究。本文研究了随机不规则波作用下的3种SFT断面型式管段的波动特性。

1 模型实验

1.1 实验断面与设备

本试验的浮重比设计为1.3,模型管段的浮力大于配重后的管段重力,所以采用锚索加管段的组合型式平衡剩余浮力。根据文献[9]的研究,当悬

浮隧道浮重比为1.3时,采用45°锚索倾角,则悬浮隧道锚索不会产生冲击张力,所以锚索倾角设计为45°。本试验主要测试的指标为锚索张力、管段表面压强。

本试验在南京水利科学研究院的河港实验室的波浪水槽中开展。实验以琼州海峡跨海通道工程为背景,设计了3种断面型式,分别为圆形、椭圆形和八边形,如图1所示,3种断面的尺寸如表1所示。SFT管段由4根对称布置的拉索固定于水槽底部,间距为70 cm。实验时,波浪沿垂直于管段的方向传播,如图2所示,现场实验如图3所示。SFT管段的断面压强由4个均匀布置的压强传感器进行测试,波浪传播方向与压强和锚索布置的相对位置如图4所示。

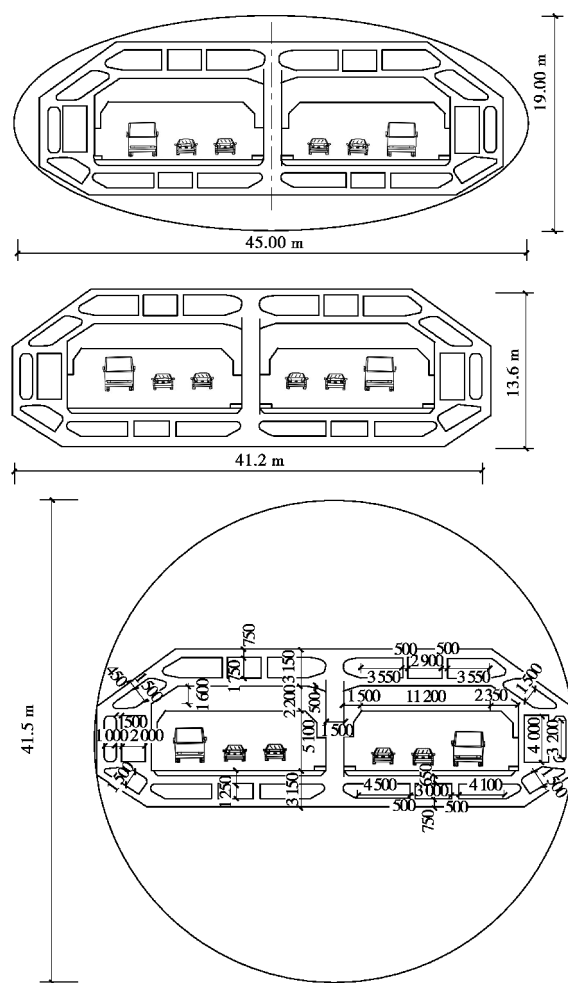


图1 3种SFT断面型式

Fig. 1 Three types of SFT sections

表 1 3 种结构型式主要断面尺寸

Table 1 Dimensions of main sections of three structural types

断面型式	主要参数值	断面面积	交通量
圆形	直径=41.5 m	1 355.0 m ²	双向 6 车道
椭圆形	长轴×短轴= 45.0 m×19.0 m	671.5 m ²	双向 6 车道
多边形	高×宽=41.2 m×13.6 m	514.2 m ²	双向 6 车道

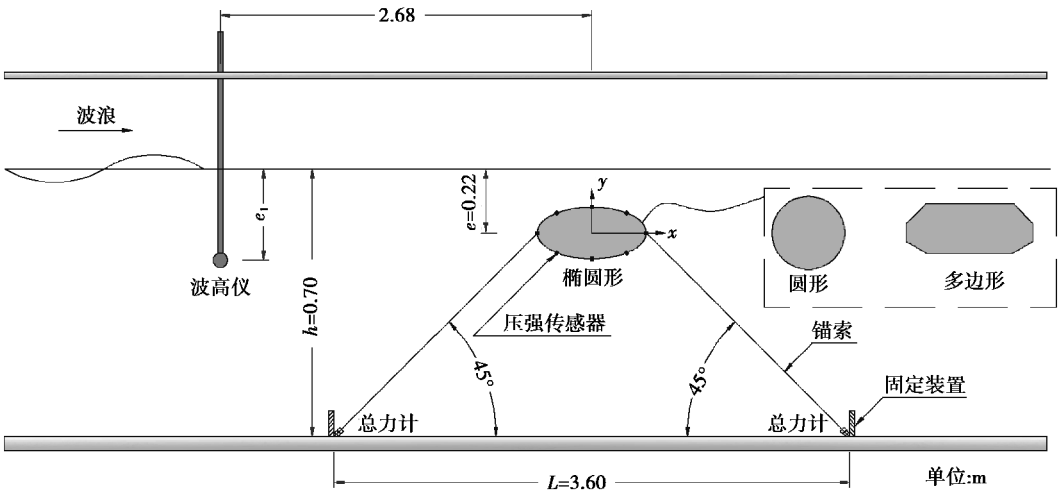


图 2 SFT 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SFT experimental device

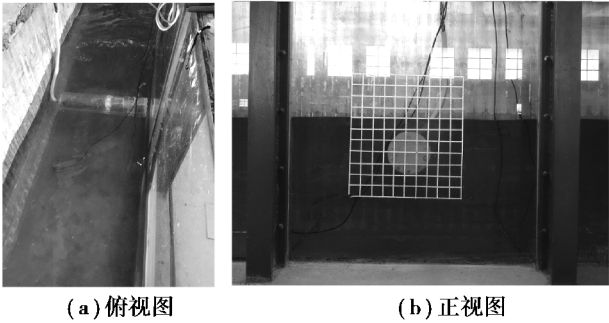


图 3 现场实验图(圆形为例)

Fig. 3 Field experiment plot (taking circle as example)

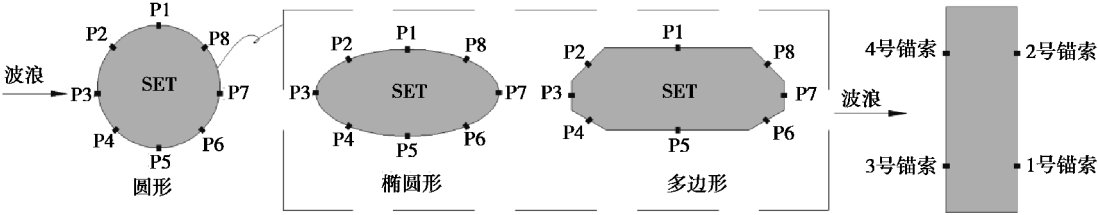


图 4 波浪传播方向与压强和锚索布置的相对位置

Fig. 4 The relative position of wave propagation direction with pressure and anchor arrangement

1.2 相似模拟

考虑 Froude 相似准则和水力学实验要求,本实验主要选取的相似指标为模型管段、锚索和波浪。

1.2.1 管段模拟

根据实验水槽的尺寸大小,并考虑水力学实验的最小比尺要求,本模型实验缩尺确定为 60。悬浮隧道模型采用玻璃钢制作,与原型保持几何相似。为了保持与原型的质量相似和重心位置相似,对模型采用铅制薄片压载配重,模型的浮重比为 1.3。

1.2.2 锚索模拟

按照受力变形和质量相似分别对锚索进行模拟。根据《波浪模型试验规程 JTJ/T 234—2001》,锚索的变形相似可按式(1)进行模拟。

$$T_m = \frac{C_p d_p^2 (\Delta S/S)^n}{\lambda^3} \quad (1)$$

式中: T_m 为模型锚索拉力(N); C_p 为原型锚索弹性系数,钢缆取 $C_p = 26.97 \times 10^4$ MPa; d_p 为原型锚索直径(m); $\Delta S/S$ 为原型锚索相对伸长, S 为原型锚索初始长度; n 为指数,钢缆可取 $n = 1.5$; λ 为模型比尺,本次试验中 $\lambda = 60$ 。

式(1)主要确定的是锚索拉力与其伸长量的变形关系。

根据《波浪模型试验规程 JTJ/T 234—2001》,锚索的质量相似可按式(2)进行模拟。

$$W = \frac{C_p d_p^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

式中: W 为锚索单位长度质量, kg/m; C_p 是原型锚索质量比例系数,钢缆取 $C_p = 3\,670$ [kg/(m²·m)]; d_p 为原型锚索直径; λ 为模型比尺,本次试验中 $\lambda = 60$ 。

实验时,采用钢丝绳和多级弹簧钢片来实现锚索的变形受力相似模拟,锚索的初始张力为 30 kN。

1.2.3 波浪模拟

本次实验的不规则波谱采用 JONSWAP 谱,如式(3)所示。

$$s(f) = \frac{\alpha H_s^2 T_p}{\gamma \exp[-(T_p f - 1)/2\sigma^2]} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f - 4)\right] \quad (3)$$

式中: $\alpha = \frac{0.062\,4}{0.230 + 0.033\,6\gamma - 0.185(1.9 + \gamma) - 1}$, $\sigma = \begin{cases} 0.07f \leq f_p \\ 0.09f \geq f_p \end{cases}$; H_s 为有效波高, m; T_p 为谱峰值周期, s; γ 为谱峰值参数,取 $\gamma = 3.3$ 。

1.3 实验条件

模型实验工况由一系列波浪周期为 1.5~2.1 s 和波高为 2~6 cm 的波浪组成,主要实验条件见表 2。实验选用的主要测试系统参数见表 3 所示。

表 2 实验条件概况

类别	参数	参数值
模型	埋置深度	0.1 m(水面至模型顶部)
	管节长度	0.85 m
	支撑形式	柔性锚索
锚索	锚索类型	钢丝绳
	钢丝绳直径	2.5 mm
	锚索倾角	45°
波浪	波浪周期	1.5 s、1.8 s、2.1 s
	波高	2 cm、4 cm、6 cm
波浪水槽	尺寸(长×宽×高)	60.0 m×2.0 m×1.9 m

表 3 测试系统参数

类型	传感器量程	分辨精度	采样频率
压力测量系统	10~20 kPa	1%	0.008 s/次
总力测量系统	2~30 kg	1%	0.03 s/次

本模型实验考虑了波浪的消波和消能。宽度为 2.0 m 的波浪水槽被分成了两个独立运行的部分,下部为实验区,在实验区的尽头模拟堆放了的碎石边坡,以起到消波和消能作用,如图 5。在实验区的上部的平行水槽的作用是将试验区反射回来的波浪进行扩散消能。此外,还在推波板前部设置了导流板以扩散波浪。

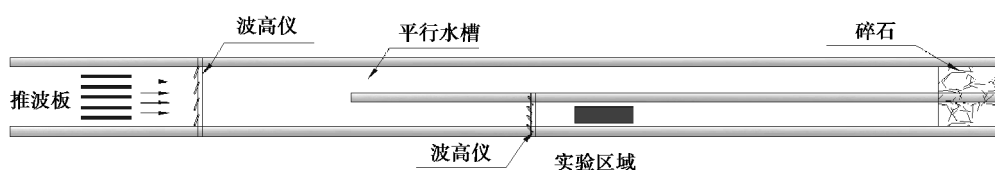


图 5 波浪实验水槽图

Fig.5 Wave experiment flume diagram

2 实验分析

图 6 是 3 种 SFT 断面型式管段在不同波高下一个波浪周期内迎浪面压强的时程变化曲线。3 种 SFT 断面的比较基础是均为双向 6 车道,即交通流量保持一致。因此,由于断面面积的不同,他们波浪力时程曲线呈现出差异性。其中,具有最大断面

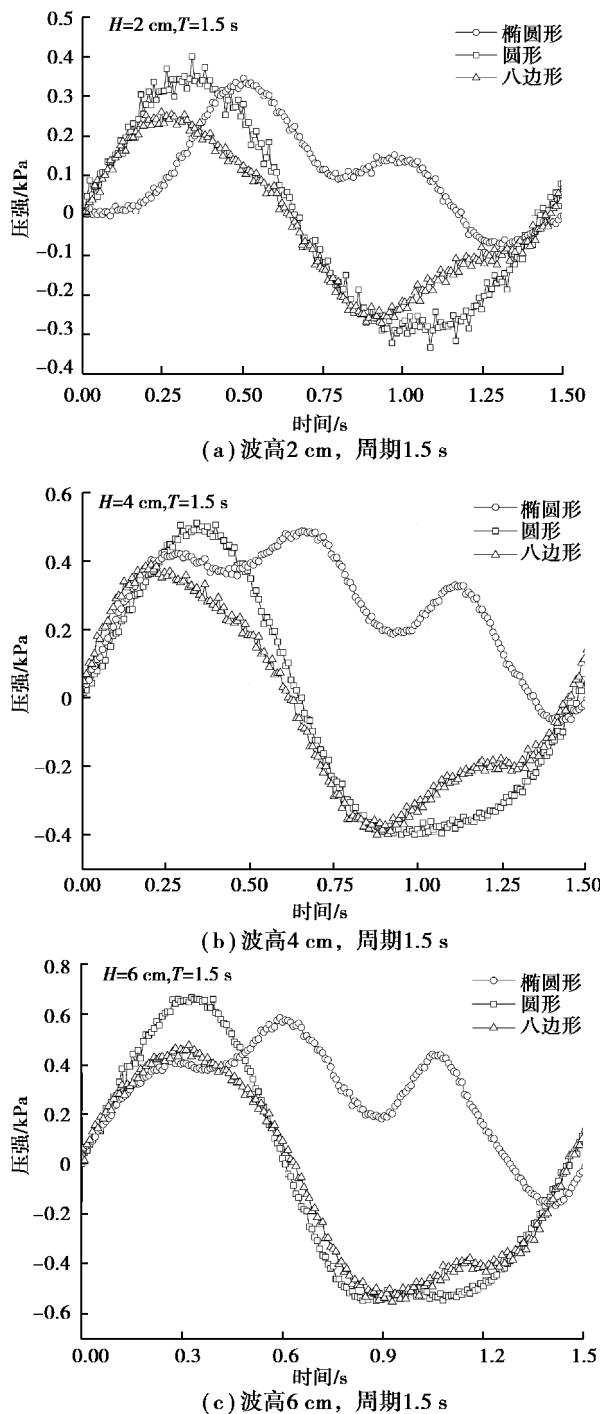


图 6 不同波高下的断面迎浪面压强

Fig. 6 Wave front pressure at different wave cross sections

面积的圆形断面,时程曲线中的压强峰值也最大。椭圆形断面在周期内明显出现了多个局部峰值的情况,且随着波高的增加,局部峰值的个数也随之增多。这是由于高宽比较小的椭圆形断面旋转力矩发生了作用,这在结构设计应重点关注。

保持波浪周期 1.5 s 不变,使波高在 2~6 cm 内变化,可以得到 3 种 SFT 断面周向压强各测点峰值的变化曲线,如图 7 所示。3 种 SFT 断面的周向压强峰值均随波高的增大而增大。不同断面压强峰值呈现出显著的差异性。3 种 SFT 断面的最大压强位置均为 P2,最小压强位置均为 P5。主要原因是流体在绕过 SFT 管段时,涡流会改变管段上下表面流速,下表面流速增大,上表面流速被抑制,从而形成了压力差,从而形成了最大最小压强的分布。

本文参考 Hiroshi Kunisu^[2]估算波浪力时采用的基于速度势的边界元法衍射理论,对 3 种不同断面型式的 SFT 管段的波浪力进行估算。保持波浪周期 1.5 s 不变,使波高在 2~6 cm 内变化,可以获得断面周向压强,从而估算出 3 种 SFT 断面随波高变化的垂向波浪力和水平波浪力,如图 8 所示。3 种 SFT 断面的水平波浪力和垂向波浪力均随波高的增大而增大。表 4 给出了 3 种 SFT 断面垂向波浪力与水平波浪力的比值,3 种 SFT 断面的垂向波浪力总是大于水平波浪力。就垂向波浪力随波高增大而增加的幅值而言,多边形大于椭圆形,圆形最小。说明波高是影响波浪力大小的重要因素之一,椭圆形和多边形受波高变化的敏感性比圆形更为显著。

表 4 3 种 SFT 断面垂向波浪力与水平波浪力的比值

Table 4 Ratio of vertical wave force to horizontal wave force for three SFT sections

断面型式	比值
圆形	1.02~1.12
椭圆形	1.52~1.55
多边形	1.67~1.69

Kunisu^[2]在分析波浪力时提出了将波浪力无量纲化的方法,即用波浪力比上水的质量和波高的一半。图 9 分别给出了 3 种 SFT 断面垂向和竖向波浪力无量纲化的结果,横轴为波高。结果一方面说明,随着波高的增大无量纲波浪力并非线性增

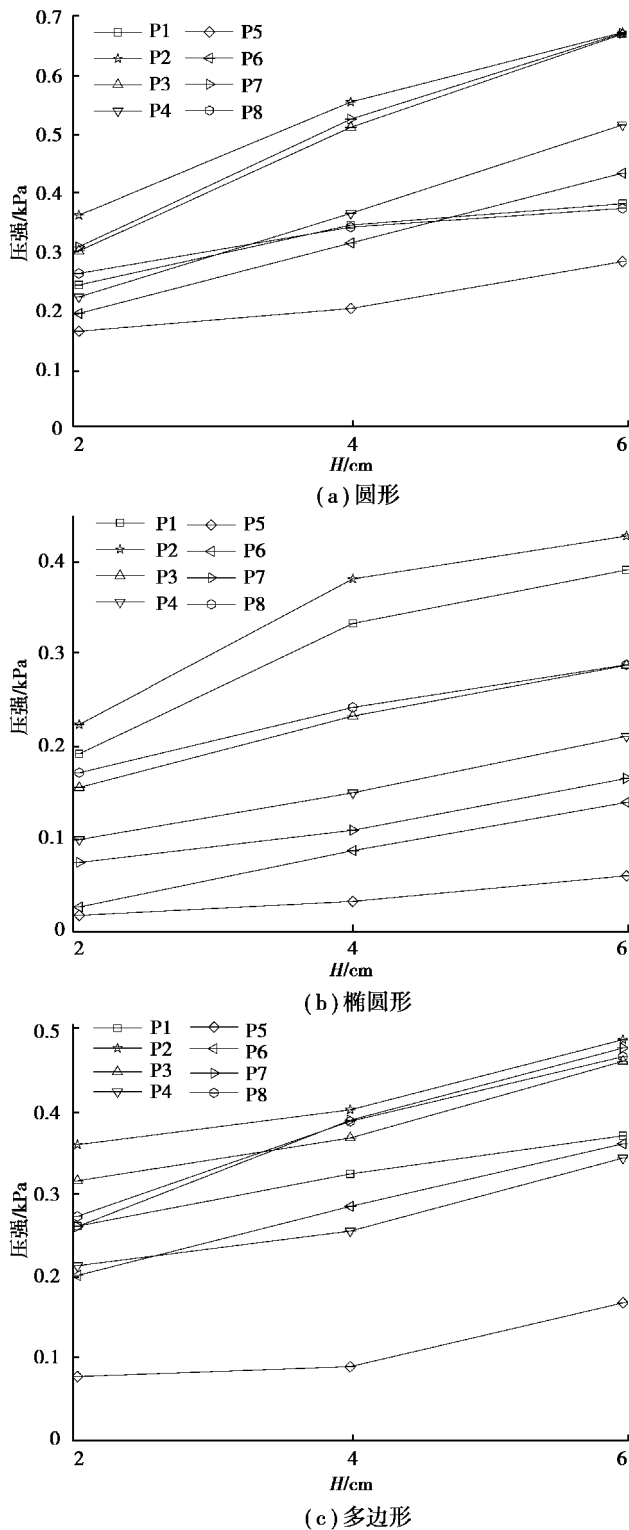


图 7 3 种断面的周向压强

Fig. 7 Circumferential pressure of three sections

加;另一个方面说明,在等值增加波高时,无量纲波浪力的增幅在逐渐减小,且垂向无量纲波浪力和水平无量纲波浪力减小的速率几乎一致。

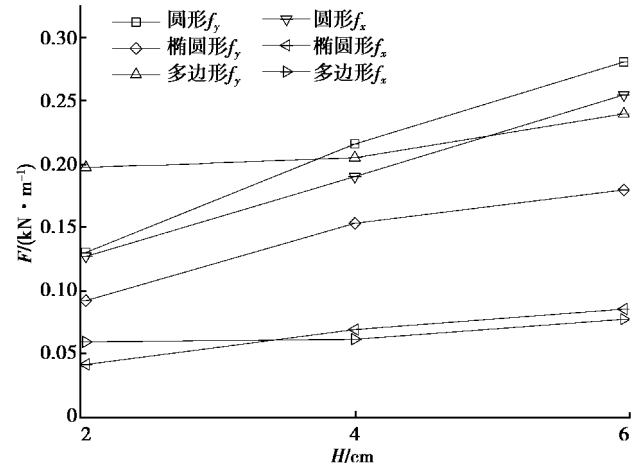


图 8 3 种 SFT 断面的水平波浪力和垂向波浪力

Fig. 8 Horizontal wave forces and vertical wave forces on three SFT sections

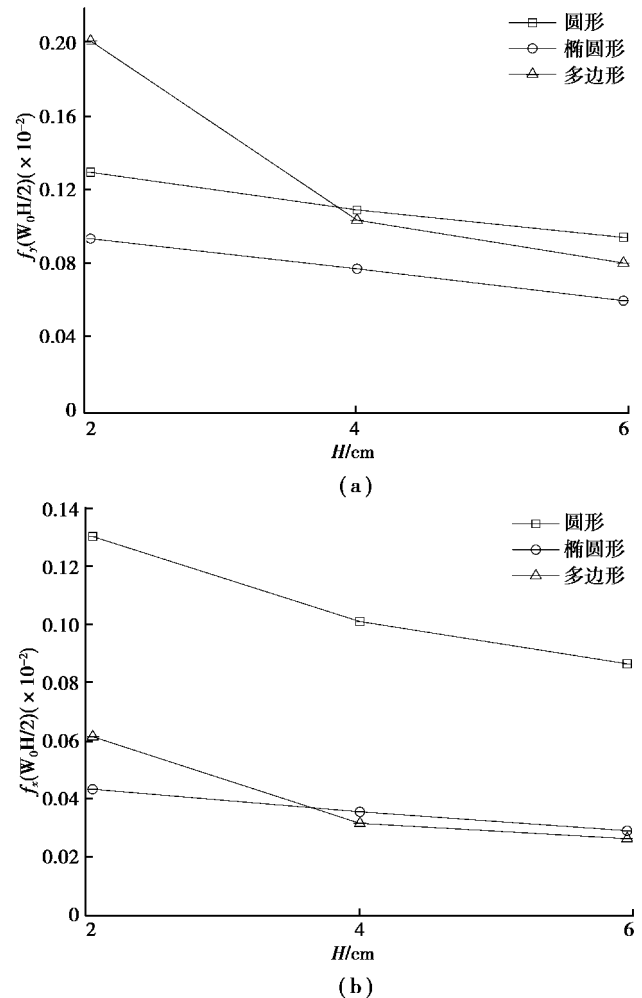


图 9 3 种 SFT 断面的无量纲波浪力

Fig. 9 Normalized wave forces of three SFT sections

3 结论与讨论

在不同波浪周期和波高下开展了3种SFT断面的波浪物理模型实验,重点分析了结构上的压强分布和波浪力大小。对SFT断面波浪力主要物理量的无量纲化处理,对将来的实际结构设计和研究有重要参考价值。

总体而言,3种SFT断面波浪力大小均随波高增大而增大。在相同的交通量条件下,椭圆形和多边形断面的波浪力虽然更小,但他们对波高的变化更加敏感,增幅明显,而圆形断面波浪力分布则更加均匀。

参考文献(References)

- [1] 麦继婷,关宝树.用Morison方程计算分析悬浮隧道所受波浪力初探[J].石家庄铁道学院学报,2003,16(3):1-4.(Mai Jiting, Guan Baoshu. Preliminary study on calculation and analysis of wave forces on submerged floating tunnel by Morison equation [J]. Journal of Shijiazhuang Railway College, 2003, 16(3): 1-4.(in Chinese))
- [2] Kunisu H. Evaluation of wave force acting on Submerged Floating Tunnels [J]. Procedia Engineering, 2010, 4(6):99-105.
- [3] Hong Y, Ge F. Dynamic response and structural integrity of submerged floating tunnel due to hydrodynamic load and accidental load [J]. Procedia Engineering, 2010, 4:35-50.
- [4] Lu W, Ge F, Wang L, et al. On the slack phenomena and snap force in tethers of submerged floating tunnels under wave conditions[J]. Marine Structures, 2011, 24(4):358-376.
- [5] 王广地,周晓军,高波.水下悬浮隧道波流荷载分析研究[J].铁道建筑,2007(10):48-51.(Wang Guangdi, Zhou Xiaojun, Gao Bo. Wave-current load analysis of underwater suspension tunnel [J]. Railway Architecture, 2007(10):48-51.(in Chinese))
- [6] 秦银刚,周晓军.张力腿型悬浮隧道涡激响应影响因素分析[J].铁道工程学报,2009,26(1):77-81.(Qin Yingang, Zhou Xiaojun. Analysis of influencing factors on eddy-induced response of tension leg suspension tunnel [J]. Journal of Railway Engineering, 2009, 26(1):77-81.(in Chinese))
- [7] Venkataramana K, Yoshihara S, Toyota S, et al. Current-induced vibrations of submerged floating tunnels [A]//Proceedings of the Six International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Los Angeles, USA, 1996:111-118.
- [8] Kunisu H, Mizuno S, Mizuno Y, et al. Study on submerged floating tunnel characteristics under the wave condition [A]// International Society of Offshore and Polar Engineers [C]. 1994:99-105.
- [9] 惠磊,葛斐,洪友士.水中悬浮隧道在冲击载荷作用下的计算模型与数值模拟[J].工程力学,2008,25(2):209-213.(Hui Lei, Ge Fei, Hong Youshi. Computational model and numerical simulation of underwater suspension tunnel under impact load [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2):209-213.(in Chinese))
- [10] Oh S H, Park W S, Jang S C, et al. Physical experiments on the hydrodynamic response of submerged floating tunnel against the wave action [J]. Hasanuddin University Press, 2013(10):582-587.
- [11] Seo S I, Sagong M, Son S W. Global response of submerged floating tunnel against underwater explosion [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(7):2029-2034.
- [12] 吴梦军,李科.大型水下隧道实验技术与系统研发[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1701-1708.(Wu Mengjun, Li Ke. Development of large scale experimental technique and system for underwater tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6):1701-1708.(in Chinese))
- [13] 陈仁东.妈湾跨海通道前海湾隧道工法方案比选[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1319-1328.(Chen Rendong. Comparison and selection for construction method of qianhaiwan tunnel on mawan cross passage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5):1319-1328.(in Chinese))