文章编号:1005-9865(2021)02-0044-09

波流作用下悬浮隧道运动响应纵向截断模型试验研究

阳志文[1],张华庆[1],李金钊[2],袁春光[1],季新然[3],杨 华[1]

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究院 港口水工建筑技术国家工程实验室,天津 300456; 2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 3. 海南大学 土木建筑工程学院,海南 海口 570228)

摘 要:利用波流水槽构建悬浮隧道纵向截断模型试验,分析了水流及波浪作用对悬浮隧道运动响应的影响,获得了管体结构的垂向及横向运动响应特性。研究结果表明:水流流速较小时,模型振幅随约化流速 V_r 增大而增大,而在约化流速为 5.8 附近,管体振幅达到最大并在这一临界值之后形成较为稳定的振幅值,产生明显的结构共振和涡激振动“锁定”现象。振幅稳定后垂向幅值约为管径的 2 倍,横向幅值与管径相当。对于波浪单独作用,在波浪较弱时,横向幅值与垂向几乎相等,随着特征 KC_n 数的增大,响应振幅先增后减。在特征 KC_n 数小于 0.51 范围内,垂向振幅大于横向振幅,其余范围则相反。垂向振幅和横向振幅分别在特征 KC_n 数为 0.42 和 0.55 时达到峰值,且两个方向的最大振幅值均与管体的管径相当。相对响应频率随着特征 KC_n 数的增大而减少,且垂向大于横向。

关键词:悬浮隧道;波流作用;纵向截断;结构共振;涡激振动

中图分类号:P751 **文献标志码**:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2021.02.005

A study on the wave-current-induced motion responses of submerged floating tunnels using longitudinal truncated model tests

YANG Zhiwen[1], ZHANG Huaqing[1], LI Jinzhao[2], YUAN Chunguang[1], JI Xinran[3], YANG Hua[1]

(1. National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Using a wave-current flume, a truncated model of the submerged floating tunnels (SFT) was established for analyzing the wave-current-induced motion response. The vertical and horizontal response characteristics of the SFT tube structure were obtained. Experimental results are as follows: at low velocity, the model motion amplitude increases by increasing the reduced velocity of V_r. The vertical motion amplitude peaks when the reduced velocity equals 5.8, and maintains stable amplitude results when the reduced velocity is larger than this critical value, leading to structural resonance and vortex-induced vibration “lock-in” phenomenon. In the stable amplitude range, the vertical motion amplitude is two times of the SFT's diameter, and the horizontal motion gives a comparable amplitude to the SFT's diameter. When considering waves action solely, the horizontal motion amplitude is comparable to the vertical when wave is weak. The motion amplitude firstly increases and then decreases when increasing the characteristic KC_n number. In the range of $KC_n < 0.51$, the vertical amplitude is greater than the horizontal amplitude, and if $KC_n > 0.51$, an inverse relationship takes hold. The vertical and horizontal amplitude peaks at $KC_n = 0.42$ and 0.55, respectively, and both the two peak values are comparable to the SFT's diameter. As the characteristic KC_n number increases, the relative response frequency deceases, and the vertical relative frequency is generally larger than the horizontal one.

Keywords: submerged floating tunnel; wave-current action; longitudinal truncation; structure resonance; vortex-induced vibration

收稿日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509119, 51709069);中央公益性科研事业单位基本科研业务费(TKS190101, TKS20200101);交通运输行业重点科技项目(2019-ZD10-059);国家重点研发计划课题(2019YFB1504304)

作者简介: 阳志文(1983-),男,湖南衡阳人,博士,副研究员,主要从事波浪及其与浮式结构物相互作用研究。E-mail:oyangzhiwen@126.com

通信作者: 张华庆。E-mail:tjzhq1@163.com

悬浮隧道是建设悬浮于水中的一种大型跨海交通构筑物,被认为是继跨海大桥、海底隧道后人类又一种实现深海峡湾跨越的重大交通运输工程,是面向未来、面向科技前沿、具有前瞻性战略制高点且具有重大挑战的世界级科技难题。2018 年,悬浮隧道关键技术被中国科协列为我国面向未来的 60 个重大科学问题和工程技术难题之一。截至目前,世界范围内既未形成完备的理论和技术体系,也无工程先例。攻克悬浮隧道核心技术,是机遇也存挑战,对引领我国乃至世界未来交通运输事业的发展具有十分重要的战略意义。

与传统的大跨度桥梁、沉管隧道相比,悬浮隧道具有选址灵活、造价低、对环境破坏小、受恶劣天气影响小等独特的优势,这种新概念一经提出就得到了国内外研究者的广泛关注[1-5]。悬浮隧道按其支撑方式的不同,主要分为浮筒式、锚索式、桩柱式和自由式等。悬浮隧道建设核心难题是保障隧道结构体系在严酷海洋环境下的平稳性及安全性,这决定了整个工程的成败。而准确预报结构体系的水动力响应,获取运动、变形与受力等技术参数,是设计、建造及安全服役所面临的首要科学技术难题,是现阶段的主要研究任务。

物理模型试验是目前悬浮隧道动力响应研究广泛采用的方法,如 Nishio 和 Incecik[6] 及 Wu[7] 进行了水流作用下固定水平圆柱体水动力的测量。晁春峰等[8] 开展了锚索流固耦合振动节段模型试验,观察到了锚索涡激振动现象。李勤熙等[9] 研究了波浪作用下椭圆形截面悬浮隧道管段压强特性。王长春[10] 利用管段模型试验,对洋流和悬浮隧道管段进行了流体—结构耦合物理模拟。王广地[11] 和秦银刚[12] 进行了结构节段模型试验,研究了水流作用下结构的空间应力和锚索轴力分布规律。Oh 等[13] 利用规则波试验研究了管段在波浪作用下的横向水动力特性。以上研究主要以水流或者波浪为环境背景,针对隧道典型管段及其锚系的运动及受力特性开展了二维断面研究,其成果对隧道节段横向动力响应规律的把握提供很好的借鉴,然而试验中模型的端部一般为自由状态,没有考虑端部约束对结果的影响。悬浮隧道跨度大,相对而言其纵向动力行为即整体运动和变形特征,更应值得关注。为研究隧道整体的动力响应特征,挪威开展了相关的三维水池试验[14-15],得到了一些关于隧道整体受力的研究成果,但是模型本身尺度较大,难度和成本均较高,且并没有对结构动力性能进行深入研究。为更进一步研究悬浮隧道的整体动力性能,Yoshihara[16] 将整体结构进行纵向截断,并采用弹性边界约束模拟隧道的等效截断刚度,研究了均匀流条件下结构的振动响应问题,测量了结构的拖曳力和升力,该试验考虑了隧道的纵向刚度,较好反映了隧道局部整体的动力行为。然而文中只研究了水流作用下垂向振动问题,并没有关注结构横向运动特性及结构振动与水动力要素之间的内在联系,另外忽略了另一个重要因素——波浪对结构横向与垂向耦合振动效应的影响。

在 Yoshihara[16] 研究的基础上,利用二维波流水槽构建了波浪水流作用下悬浮隧道结构动力响应的纵向截断试验模型,研究了不同水流及波浪环境下典型悬浮隧道结构局部整体的运动和变形规律。通过改变不同的水流和波浪条件,获得了结构引起水流激振及波浪激振共振所对应的水动力条件,分析了结构振动与水动力要素之间的内在联系,研究成果可为悬浮隧道的整体动力分析提供参考依据。

1　试验设计

1.1　试验模型

悬浮于水中的隧道,由于跨度大,可认为是细长结构,在波浪和水流作用下将发生复杂的结构整体位移及变形。为在有限宽度的试验场地中模拟这种整体空间变形现象,一种可选的方式是利用纵向截断试验技术(相关技术原理可见 Yoshihara[16] 的研究),即纵向截取悬浮隧道的一小段为研究对象,并利用一定约束条件来模拟截断接头处的等效刚度,由截断模型研究的结果进而分析隧道整体的动力响应机理。

由于当前世界上没有悬浮隧道建成实例,因此试验模型以挪威 Sognefjorden 海峡直径 12.6 m 的圆形截面悬浮隧道概念设计方案为背景[17]。管体模型按几何缩尺比 1∶157.5 设计,截断模型直径 $D=0.08$ m,总长 $L=0.684$ m,用透明有机玻璃管制成。为了方便根据浮重比进行配重,如图 1 所示,模型端部各设置一个配重舱,采用铅块进行模型的配重,试验配重后模型总质量为 3.3 kg,根据外形体积换算模型的浮重比为 $\gamma=1.07$,即完全淹没后,模型浮力 F 与重力 G 的比值为 1.07。

对于纵向截断处约束条件的模拟,假设悬浮隧道的自振周期和单位质量已知,根据单自由度体系振动方程,即可计算截断模型的等效刚度:

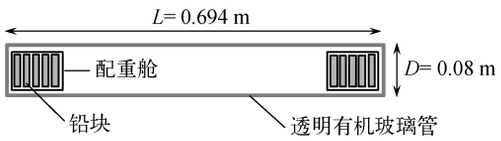


图 1 截断模型内部构造示意

Fig. 1 Internal structure diagram for the truncated model

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T} \tag{1}$$

式中:T 为结构在水中的自振周期,m 为结构单位质量,k 为等效约束刚度。

试验利用线性弹簧来模拟截断处的等效刚度。根据原型隧道的设计方案,对于横向和垂向约束,分别采用了两种刚度的弹簧,弹簧原始长度均为 100 mm。横向及垂向弹簧的刚度系数分别为 k_x = 30.6 N/m 和 k_z = 21.6 N/m,弹簧的线性很好。需要指出的是,由于材质的原因,模型中弹簧刚度无法完全按照比尺进行缩放,但误差均小于 10%。试验主要目的是研究运动响应与水动力要素之间的相关性,模型与原型之间可不要求严格满足相似关系。

1.2 试验环境及模型布置

试验在波流水槽中进行,试验水槽宽 0.7 m,长 45 m,允许最大试验水深为 0.7 m,有效造波造流范围 25 m,水槽一端配备伺服电机式不规则波造波机系统,尾端采用斜坡式消波框防止波浪反射。水槽中可生成规则波和不规则波,造波周期范围为 0.5~4.0 s,造流性能为 0.6 m 水深时可生成 0.02~0.50 m/s 的水深平均流速。

模型试验布置如图 2 所示,模型放置于水槽中间段,该段波浪与水流条件较为平稳。试验水深固定为 0.57 m,模型入水深度为 0.5 倍水深,即模型中心距水面的距离为 0.285 m。为便于安装模型及弹簧,在水槽内侧紧贴两块厚度为 0.5 mm 的透明有机玻璃板,在两块透明有机玻璃板的对应位置,分别安装 4 个 L 型不锈钢扣,如图 2(d)所示,模型的 0°、90°、180°、270°位置各设置一个钢扣,通过弹簧与透明有机玻璃板上的钢扣连接。弹簧原始长度均为 100 mm,模型安装后理想状态下(即空气中不受重力和浮力作用下,模型放置在有机玻璃上 4 个钢扣所组成正四边形的中心),模型上钢扣与对应的端部钢扣之间的距离均为 192 mm。在垂直于水流方向上,模型不与上述有机玻璃板接触,其两端与对应边壁之间形成非常小的缝隙,宽度均为 3 mm。经验证,该宽度可保证模型在垂直的水流或波浪作用下产生横向的二维平动,而不会产生或很少产生其它方向运动,且不会与边壁发生摩擦或碰撞,从缝隙中穿越的水量亦可达到最少,不至于干扰模型后方的水动力场。

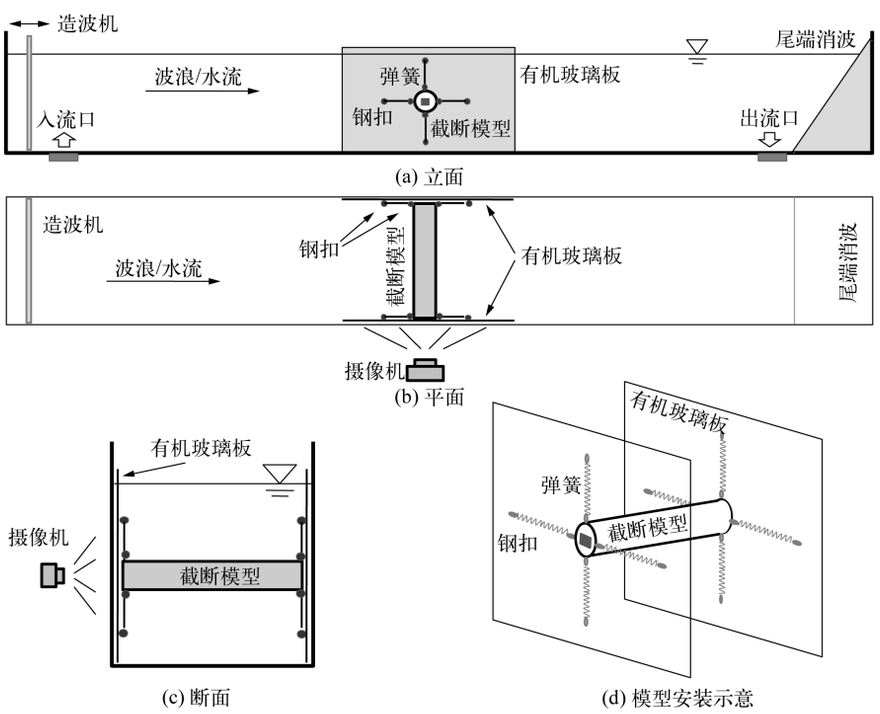


图 2 截断模型试验布置

Fig. 2 Layout for the truncated model test

2　试验条件及试验方法

2.1　试验条件

水流及波浪试验相关参数见表 1,水流试验时采用恒定流,试验组次共 9 组,表中 U 表示水深平均流速大小,并可根据流速大小算得相应的雷诺数 Re。波浪试验时采用规则波,考虑 8 个不同的周期,试验共 8 个组次。

表 1　试验条件

Tab. 1　Model test conditions

水流试验	水深 h/m	管直径 D/m	流速 U/(m·s^{-1})	雷诺数 Re	波浪试验	周期 T/s	波高 H/m
C1	0.57	0.08	0.244	2.0×10^4	W1	0.6	0.02
C2	0.57	0.08	0.266	2.1×10^4	W2	0.8	0.02
C3	0.57	0.08	0.289	2.3×10^4	W3	1.0	0.02
C4	0.57	0.08	0.311	2.5×10^4	W4	1.13	0.02
C5	0.57	0.08	0.334	2.7×10^4	W5	1.41	0.05
C6	0.57	0.08	0.356	2.8×10^4	W6	1.62	0.05
C7	0.57	0.08	0.379	3.0×10^4	W7	1.80	0.05
C8	0.57	0.08	0.401	3.2×10^4	W8	2.00	0.05
C9	0.57	0.08	0.424	3.4×10^4			

2.2　试验方法

试验中对于模型运动的测量,采用目前国内外广泛使用的单目非接触式视觉识别测量技术[18-20]进行。试验前,在模型侧面涂装一个红色矩形色块,试验过程中先利用摄像机对色块进行动态捕捉,然后通过视觉识别程序,抓取每一帧中色块中心的位置坐标,并将前后两帧位置数据进行比较,从而得出模型的横向和垂向相对位移值,具体方法见参考文献,此处不再赘述。

动态捕捉摄像机的像素为 1 920×1 024,帧率 25 Hz,即数据采集的时间间隔为 0.04 s。为确保试验测量的精度,摄像机与截断模型的初始位置保持正向且水平,并对摄像系统进行畸变校正和梯形校正。经校正后测试,试验模型运动测量精度可控制在 1 mm 以内。试验过程中,先通过摄像机记录模型的运动过程,再通过视觉识别程序计算分析运动量,得到运动轨迹以及横向、垂向的位移值。运动记录时,在模型静止时进行定零,即认为该时刻模型的运动值为 0。

水流试验时,先进行小流速试验,后逐渐增大流速,得到相应情况下的响应值,从而捕捉涡激振动下的锁定流速。波浪试验时,按照周期从小到大的顺序进行。正式水流波浪试验前,先进行结构自由衰减试验,即在静水环境中给定模型一个垂向初始位移,通过记录其振动衰减过程,得到其自振频率、阻尼比参数。

3　试验结果及分析

3.1　结构固有特性试验

为获得结构振动自身固有特性,如自振周期、阻尼比,首先进行自由衰减试验。研究关注结构的垂向和横向固有特性,给定一个垂向和横向初始位移,使其作自由衰减运动,垂向与横向位移分别用 dz 和 dx 表示。图 3 给出了结构自由衰减试验中所记录的模型运动时程曲线,由图可见,模型自初始位置围绕其平衡位置作周期性往复运动,由于水及弹簧系统的阻尼效应,模型最终静止于平衡位置。通过位移频谱分析可得到结构的垂向自振频率为 $f_{nz}=0.763$ Hz,自振周期 $T_{nz}=1.310$ s,阻尼比为 $\xi=0.018\ 9$;横向自振频率为 $f_{nx}=0.905$ Hz,自振周期 $T_{nx}=1.105$ s,阻尼比为 $\xi=0.020\ 5$。

3.2　水流试验

图 4 给出了几个典型流速下模型的横截面运动轨迹,从左至右、从上到下流速依次增大。由于垂向升力及横向拖曳力的综合作用,模型的横向运动轨迹基本呈现“8”字形,整体上呈现向水流下游方向弯曲的形态。随着流速增大,模型的运动幅度越大,这是由尾涡上下非对称脱落引起垂向升力变化以及横向拖曳力增大导致的,但当流速到达 0.356 m/s 时,垂向振动幅度达到最大,并逐渐趋于稳定(如图 4(d)~(f)所示)。图

5 给出了水流作用下截断模型横向及垂向典型运动时程曲线,可见在水流作用下,管体结构发生了较为规则的周期性运动。

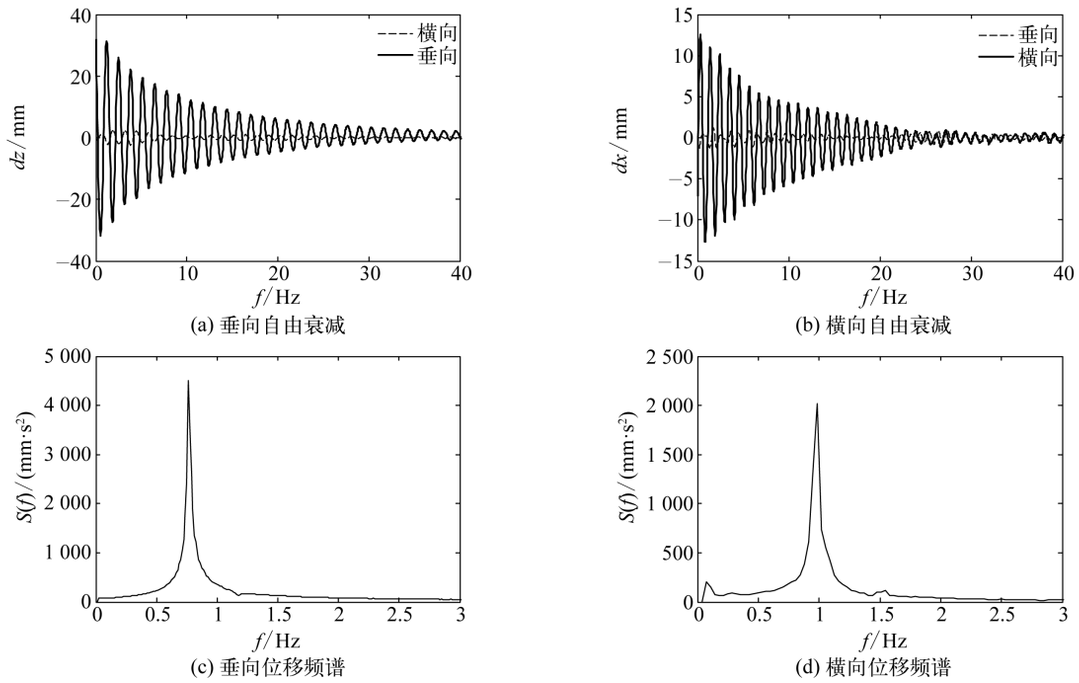


图 3 自振衰减试验结果

Fig. 3 Results for the free decay test

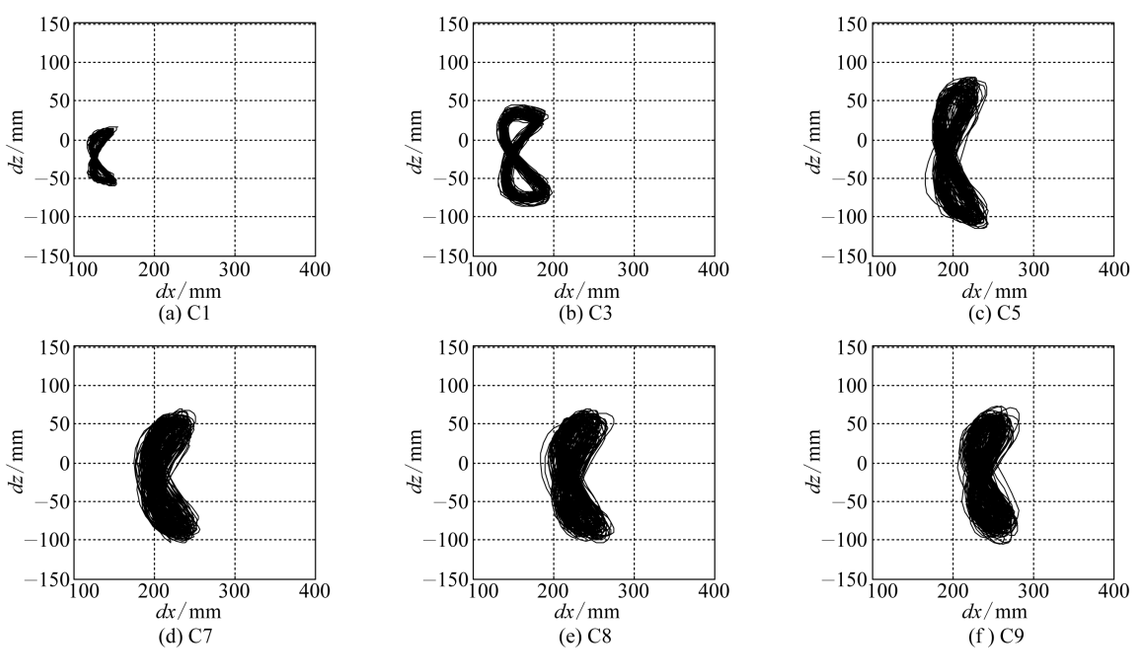
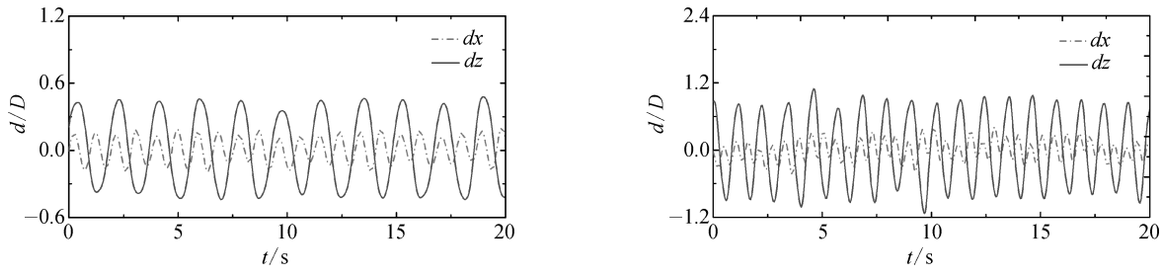


图 4 不同流速下模型横截面运动轨迹线

Fig. 4 Sectiaonal motion trajectory of the model under different velocities

为定量分析结构水动力响应,首先引入相对响应频率 f/f_n(即结构实际振动频率 f 与其自振频率 f_n 之比),以及约化流速 V_r($V_r=U/(f_nD)$,其中,U 为水流平均流速,f_n 为结构自振频率,D 为模型管径)两个重要参数。其中,约化流速 V_r 考虑了水流流速、模型尺寸及自振频率的影响,而自振频率又与结构自身的约束刚度、质量及浮重比有关,因此约化流速 V_r 是一个包含了水流流速、模型尺寸、约束刚度、质量及浮重比综合影响的参数。



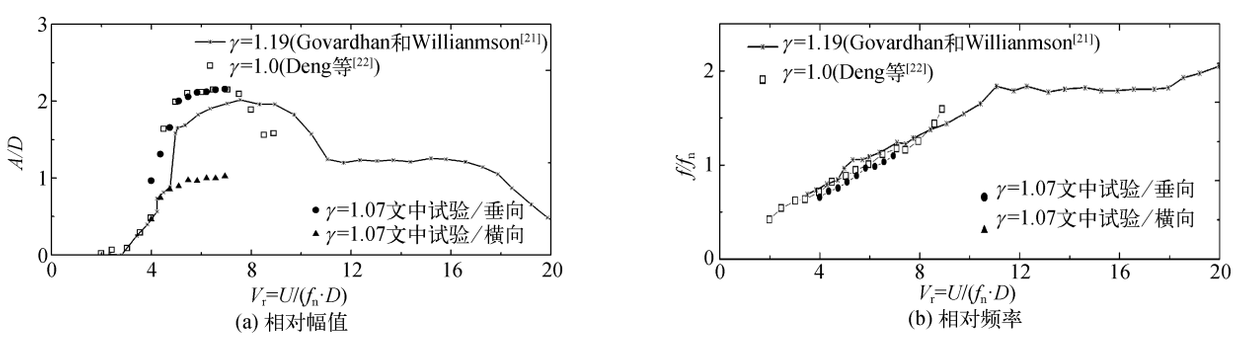
(a) U=0.244 m/s　　(b) U=0.424 m/s

图 5　水流作用下横向及垂向典型运动时程曲线

Fig. 5　Typical motion time series of horizontal and vertical directions in current

图 6 给出不同约化流速下相对横向和垂向运动响应幅值(A/D)及相对垂向响应频率(f_z/f_n)试验结果。可明显看出:随着约化流速的增大,由于结构所受的横向拖曳力及升力增大,横向和垂向振幅随之增大,但流速达到 U=0.356 m/s,即约化流速为 V_r=5.8 时,振幅达到最大,而当流速继续增大时,其幅值几乎不再增加,达到一个较为稳定的振幅值,管体系统产生涡激振动“锁定”现象。振幅稳定后垂向响应幅值约为管径的 2 倍,而横向响应幅值与管径相当,即垂向响应幅值约为横向响应幅值的 2 倍。相对响应频率 f_z/f_n 同样随着 V_r 的增大而增大,而当增大到 V_r=5.8,f_z/f_n 恰好增大至 1 附近,即管体结构响应频率与结构的自振频率接近,发生共振现象,对应的振幅亦达到最大。从幅值和频率响应的试验结果可得出结论,该模型发生共振的临界约化流速为 V_r=5.8,对应的实际流速约为 0.356 m/s。

与此同时,图 6 对比了文中试验结果与 Govardhan 和 Williamson[21],以及 Deng 等[22]的试验结果。需要指出的是,文中试验浮重比 γ(文献中亦称之为质量比 m^*)比文献[21]中要小,而与 Deng 等[22]研究相当;在试验方法上,Govardhan 和 Williamson[21]和 Deng 等[22]均采用拖曳水池进行试验,模型的横向运动被锁定,而只能垂向运动,文中试验在横截面内运动自由,并不限制横向运动,因此除得到垂向响应幅值外,还得到了横向响应幅值。从图中对比可以看到,试验结果与文献中结果无论是幅值响应还是频率响应均吻合较好,充分说明试验方法可行,结果可信,尽管试验存在垂向和横向的耦合运动,但并不影响各向运动幅值结果的正确性。在幅值响应上,试验与 Deng 等[22]研究结果几乎重合,但总体上比 Govardhan 和 Williamson[21]结果稍大,主要原因是浮重比 γ 较小,这也符合响应幅值随浮重比的增大而减小的结论[21]。尽管试验所选取的模型绝对质量 m 和端部约束刚度 k 与前人不同,但得到了几乎相同的结论,即在约化流速 V_r=5.8 附近,管体结构发生明显流固耦合共振现象,充分证明约化流速 V_r 是影响悬浮隧道管体结构响应的一个重要影响因子。



(a) 相对幅值　　(b) 相对频率

图 6　模型运动相对幅值及频率随约化流速的变化

Fig. 6　Relative amplitude and frequency of the model vs. the reduced velocity

图 7 给出了不同流速时模型垂向振动的频域分析结果,由图可见,随着流速增大,峰值频率随之增大,说明结构的振动频率随着流速增大而增大。在流速 0.334~0.356 m/s(C5 与 C6)之间较小的范围内,即约化流速 V_r=5.8 附近,得到的结构响应频率很接近,分别为 0.743 Hz 和 0.751 Hz,该频率与结构的垂向自振频率亦非常接近。同时,对比图 6,在此频率附近,管体结构的响应幅值几乎相等,因此约化流速 V_r=5.8 附近亦可视为“锁定”流速。

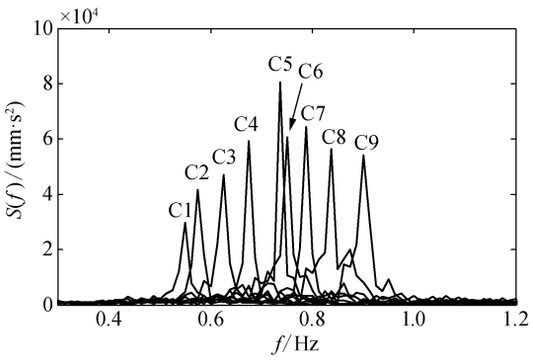


图 7 不同流速下模型垂向运动频谱

Fig. 7 Power spectra of the vertical motion under different velocities

3.3 波浪试验

图 8 给出了典型组次的整个时程模型横截面的运动轨迹,图 9 给出了两组典型波浪条件下管体横向位移 dx 和垂向位移 dz 运动的时程曲线。图中可见,当周期较小时,即便是规则波入射,模型亦呈现不规则的运动过程,而当周期达到一定值后,模型的运动趋于规则形状。管体模型在横向和垂向方向作周期性往复运动,周期不同其运动轨迹不尽相同,但总体上运动轨迹近似于椭圆或者圆形。通过上述水流试验,证明了约化流速是一个反映了外界水动力要素及结构参数综合影响的可靠参数。为进一步定量分析波浪要素及结构参数对模型运动的影响,类似于水流试验,引入特征 KC_n 数($KC_n = uT_n/D$,其中,u 为试验入射波浪周期和波高对应的模型深度处的实测流速,T_n 为结构的自振周期,D 为管径),特征 KC_n 数与上述约化流速 V_r 具有相同的物理意义,主要反映了波浪周期、波高、模型尺寸、约束刚度、质量、浮重比的综合影响。

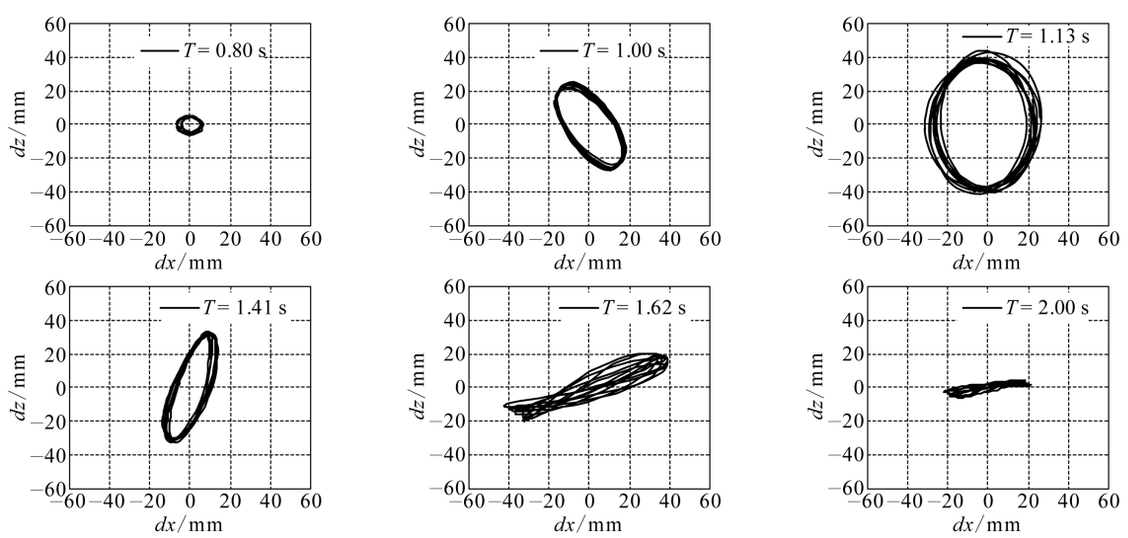
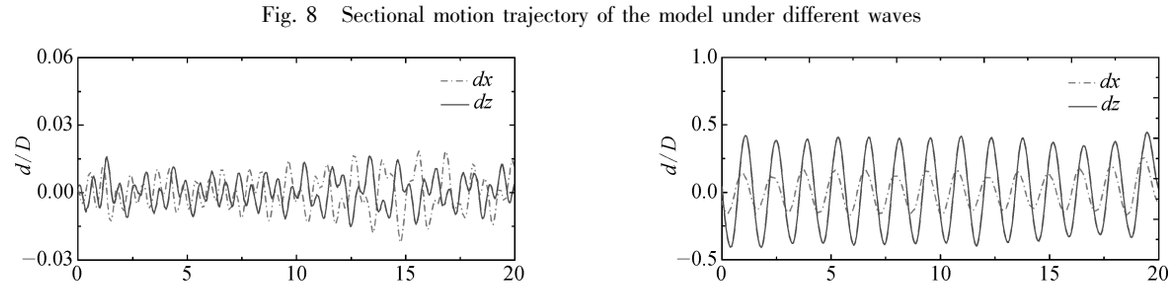


图 8 不同波浪作用下截断模型横截面运动轨迹

Fig. 8 Sectional motion trajectory of the model under different waves

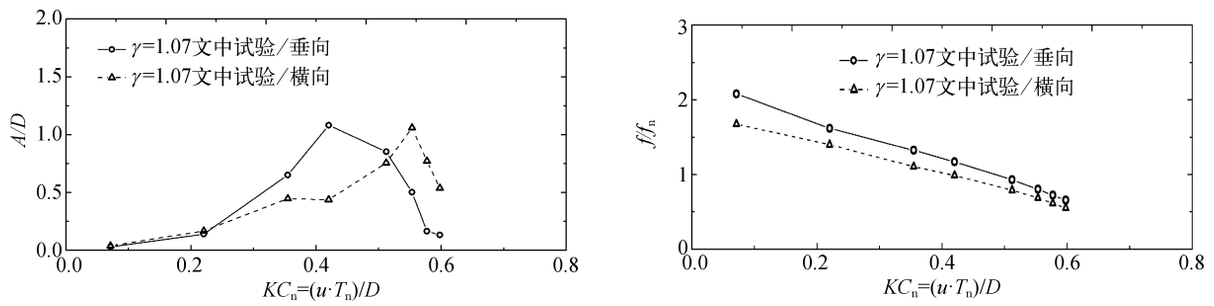


(a) T=0.60 s, H=0.02 m (a) T=1.13 s, H=0.02 m

图 9 波浪作用下横向及垂向典型运动时程曲线

Fig. 9 Typical motion time series of horizontal and vertical direction in waves

图 10 定量给出了相对横向及垂向响应幅值及相对响应频率随特征 KC_n 数变化的曲线,从图中结果可看出,当特征 KC_n 数较小时,即入射波浪周期较小时,横向位移幅值与垂向几乎相等,随着特征 KC_n 数的增大,横向位移与垂向位移均先增后减。当特征 KC_n 数小于 0.51 时,主要发生垂向位移,而横向位移值较小。垂向位移在特征 KC_n 数为 0.42 时达到最大,而此时对应的波浪周期为 $T=1.13$ s,与管体结构系统自身自振周期 $T_n=1.31$ s较为接近,说明发生了水动力结构共振现象,横向位移在 $KC_n=0.55$ 附近存在较为明显的振幅峰值,且两个方向的最大振幅值均与管体的管径相当。基于所有的波浪组次分析,当特征 KC_n 数在 0.22~0.51范围内,垂向位移幅值分量大于横向分量,而在特征 KC_n 数在 0.55~0.60 范围内,横向位移幅值分量大于垂向分量。相对响应频率随着特征 KC_n 数的增大而减少,且垂向结果大于横向结果,主要原因是垂向自振周期大于横向自振周期。



(a) 相对幅值　　(b) 相对频率

图 10　模型运动相对幅值及频率随特征 KC_n 数的变化

Fig. 10　Relative amplitude and frequency of the model vs. the characteristic KC_n number

4　结　语

利用波流水槽构建悬浮隧道结构纵向截断模型试验,研究了典型水流波浪环境下悬浮隧道结构的运动规律。在确定模型的自振周期、阻尼比等固有动力特性参数的基础上,分析了水流及波浪单独作用对悬浮隧道运动响应的影响。通过改变不同的水流和波浪条件,获得了引起结构共振所对应的水动力条件,主要的研究结论如下:

1) 水流单独作用时,模型的横向运动轨迹基本呈现“8”字形,整体上呈现向水流下游方向弯曲的形态。随着流速增大,模型的振幅越大,当约化流速为 $V_r=5.8$ 时,管体结构响应频率与结构的自振频率接近,发生共振现象;此时,振幅达到最大,并在之后形成一个较为稳定的振幅值,管体产生明显的锁定现象。振幅稳定后垂向幅值约为管径的 2 倍,而横向幅值与管径相当。

2) 波浪单独作用时,悬浮隧道管体将作周期性往复运动,其横截面运动轨迹近似于椭圆或圆。当特征 KC_n 数较小时,横向位移幅值与垂向几乎相等,随着特征 KC_n 数的增大,响应振幅先增大后减小。在特征 KC_n 数小于 0.51 范围内,垂向振幅大于横向振幅,其余则相反。垂向振幅和横向振幅分别在特征 KC_n 数为 0.42 和 0.55 时达到峰值,且两个方向的最大振幅值均与管体的管径相当。相对响应频率随着特征 KC_n 数的增大而减少,且垂向大于横向。

参考文献:

[1] FELCH J. The Seattle-Bellevue loop with still-water submerged floating tunnel[C]//Proceedings of the 4th Symposium on Strait Crossings. 2001: 581-590.

[2] HAUGERUD S, OLSEN T, MUTTONI A. The lake lugano crossing-technical solutions[R]. Swets & Zeitlinger BV, Lisse, the Netherlands, Strait Crossings 2001, Krokeborg ed, 2001.

[3] TVEIT P. Design of a submerged floating tube with a free span of 1750 m[C]//Proceedings of International Conference on Submerged Floating Tunnels. 1996.

[4] FAGGIANO B, LANDOLFO R, MAZZOLANI F. Design and modelling aspects concerning the submerged floating tunnels: An application to the Messina Strait crossing[C]//Proceedings of the 4th Symposium on Strait Crossings. 2001: 511-519.

[5] KUNISU H, MIZUNO S, MIZUNO Y, et al. Numerical analysis of wave force and dynamic response to the submerged floating

tunnels[C]//Proceedings of 3rd Symposium Strait Crossings. 1994: 637-644.

[6] NISHIO S, INCECIK A . Synchronization of vortex shedding from an oscillating cylinder in uniform flow[C]//Proceedings of 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, The Hague, Vol III. 1995: 603-610.

[7] WU Z. Forces on a vibrating cylinder in current under lock-in condition[C]//Proceedings of 5th International Offshore and Polar Engineering Conference. 1995: 632-638.

[8] 晁春峰, 项贻强, 杨赢, 等. 悬浮隧道水下锚索抑振装置试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(4): 687-693. (CHAO Chunfeng, XIANG Yiqiang, YANG Ying, et al. Cables dynamic response experiment of submerged floating tunnel based on fluid-structure interaction[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4): 687-693. (in Chinese))

[9] 李勤熙, 蒋树屏, 丁浩, 等. 波浪作用下椭圆形横截面悬浮隧道管段压强特性试验[J]. 隧道建设, 2018, 38(1): 57-64. (LI Qinxi, JIANG Shuping, DING Hao, et al. Experimental study of pressure characteristics of elliptical cross section submerged floating tunnel pipeline under wave actions[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(1): 57-64. (in Chinese))

[10] 王长春. 水中悬浮隧道与洋流耦合作用的模型试验[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (WANG Changchun. Model tests of coupled effects of submerged floating tunnels and ocean currents[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))

[11] 王广地. 波流作用下悬浮隧道结构响应的数值分析及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. (WANG Guangdi. Numerical analysis and experimental study of SFT structure response under wave current[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese))

[12] 秦银刚. 洋流涡激作用下水中悬浮隧道稳定性的关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (QIN Yingang. Key technologies of SFF stability under ocean eddy currents[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))

[13] OH S, PARK W, JANG S, et al. Physical experiments on the hydrodynamic response of submerged floating tunnel against the wave action[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts. 2013: 582-587.

[14] DAHLE L, REED K, ARSNES J. Model test with submerged floating tube bridges[C]//Proceedings of the 1th Symposium on Strait Crossings. 1990: 435-442.

[15] LOKEN A, CARLSEN H, OFTEDAL R, et al. Comparison between hydrodynamic numerical methods and results from model tests for submerged floating tube bridges[C]//Proceedings of the 1st Symposium on Strait Crossings. 1990: 427-434.

[16] YOSHIHARA S. Hydrodynamics of ocean pipelines[R]. The Research Reports of the Faculty of Engineering, Kagoshima University, No 35, 1993: 143-153.

[17] FJELD A, SØREIDE T, HAUGERUD S. Feasibility study for crossing the sognefjord submerged floating tunnel[R]. Reinertsen Olav Olsen Group, 2012: 6-26.

[18] SUN C, WANG Q, YU Q, et al. Online Machine version method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes[J]. Optical Engineering, 2001, 40(11): 2565-2571.

[19] 耿明超, 赵铁石, 边辉, 等. 基于并联理论的单目视觉位姿估计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2617-2626. (GENG Mingchao, ZHAO Tieshi, BIAN Hui, et al. Pose estimation of monocular vision based on parallel theory[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (10): 2617-2626. (in Chinese))

[20] WAND Q, ZHANG Z, ZANG Z, et al. The trajectory prediction of spacecraft by grey method[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(8): 085011.

[21] GOVARDHAN R, WILLIAMSON C. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 420: 85-130.

[22] DENG S, REN J, XU Y, et al. Experimental study of vortex-induced vibration of a twin-tube submerged floating tunnel segment model[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 94(2020): 1-16.