

冲击荷载作用下水中悬浮隧道的位移响应*

张 嫻¹, 董满生^{1,2}, 唐 飞¹

(1. 合肥工业大学 交通运输工程学院, 合肥 230009;
2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要: 建立冲击荷载作用下悬浮隧道的动力学模型,将悬浮隧道简化为等距离弹性支撑梁,通过 Galerkin(伽辽金)法求解悬浮隧道的振动位移方程,数值模拟悬浮隧道跨中时程响应,分析张力腿竖向刚度、冲击物质量、冲击速度对悬浮隧道跨中位移的影响.结果表明:冲击荷载作用下,张力腿竖向刚度对悬浮隧道位移响应的影响显著,但具有局限性.其次,冲击物质量和冲击速度也会显著影响悬浮隧道的跨中振动位移.研究结论为未来悬浮隧道的研究和建设提供重要的理论参考.

关键词: 水中悬浮隧道; 冲击荷载; 位移响应; 参数设计; 数值模拟

中图分类号: U495.5 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.05.004

引 言

水中悬浮隧道(submerged floating tunnel,简称 SFT)又称 Archimedes(阿基米德)桥,是一种新的穿越水域的交通形式.它通过结构的自重、浮力和锚固系统的共同作用,维持在水中的平衡和稳定.由于悬浮隧道自身的经济性和环保性,使其拥有非常广泛的应用前景,这也使悬浮隧道成为广大科研工作者的研究课题.

自上个世纪以来,国内外研究者主要致力于研究波浪力、地震力以及涡激振动作用下的悬浮隧道管体及其锚索的动力学行为.Brancaleoni 等^[1]分析不同类型的悬浮隧道在地震和海浪作用下的动力响应,研究所处环境对悬浮隧道的影响.Remseth 等^[2]利用 Navier-Stokes 方程进行有限元建模分析,采用了数值模拟的方法,研究悬浮隧道流固相互作用及其动力响应.Lu(陆维)等^[3]利用双线振荡器来模拟锚索松弛-紧绷的交变状态,分析两个基本结构参数:浮重比和锚索倾角对悬浮隧道动力响应的影响,研究悬浮隧道锚索的松弛现象和拉断力.在这一研究进程中,将悬浮隧道简化为梁模型进行分析逐渐成为了一种公认的研究方法,其简化结果的有效性也已得到验证.Sato 等^[4]分别利用等跨弹性支撑梁和弹性地基梁模型研究不同模型对于悬浮隧道的适用性,认为当张力腿沿着悬浮隧道长度离散分布,且考虑张力腿的伸缩性时,可将悬浮隧道看作是非连续的弹性支撑梁结构.近几年来,关于悬浮隧道的研究也更加多样化.Tar-

* 收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2016-02-05

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2013318740050);中国博士后科学基金(20110490833);国家山区公路工程技術研究中心项目(GSGZJ-2014-05)

作者简介: 张嫻(1991—),女,硕士生(E-mail: matcha74@sina.cn);
董满生(1973—),男,副教授,博士,硕士生导师(通讯作者).
E-mail: dongms@hfut.edu.cn.

iverdilo 等^[5]和田雪飞等^[6]利用理论分析和数值模拟相结合的方法,将悬浮隧道简化为梁结构,分别研究了移动荷载、内波和洋流联合作用力下悬浮隧道的动力响应.悬浮隧道作为巨型水下建筑,其安全问题不容小觑,例如事故沉船、坠机以及潜艇的撞击,可能导致巨大的人员和财产损失.目前针对这一方面的研究较少,仅惠磊等^[7]提出水中悬浮隧道受冲击荷载作用的简化计算模型,将悬浮隧道简化为两端简支的圆柱壳,分别采用解析法和数值模拟的方法对问题进行求解.

本文在前人的研究基础上,将悬浮隧道简化为一个等距离弹性支撑梁,建立悬浮隧道在冲击荷载作用下的动力学模型,通过 Galerkin 法求解,数值模拟分析悬浮隧道跨中的时程位移,讨论张力腿竖向刚度、冲击物质量、冲击速度对悬浮隧道跨中位移的影响.

1 物理结构模型

对于未经简化的悬浮隧道模型,由于其结构复杂,往往使相应的悬浮隧道位移响应研究变得困难.如图 1 所示,悬浮隧道结构系统由管体、张力腿、管段连接装置、锚固装置等组成.其中,张力腿力包括横向力和竖向力,由于其横向力通过自身平衡抵消,故仅考虑其竖向力的作用.

文中讨论倾斜张力腿式悬浮隧道,张力腿竖向刚度由弹簧 K 模拟.

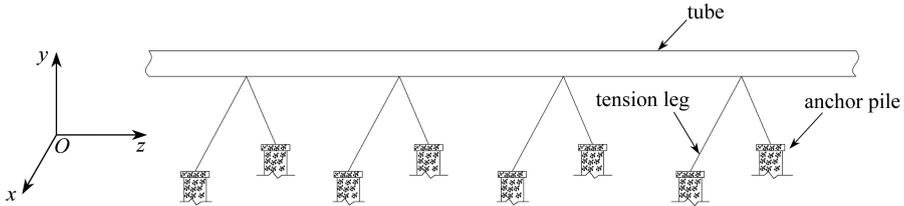


图 1 悬浮隧道模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SFT model

如果悬浮隧道两侧的张力腿沿长度方向间隔分布,则可将悬浮隧道看做离散弹性支撑梁,并考虑张力腿的作用^[4].为了便于研究冲击荷载作用下悬浮隧道的位移响应,可将悬浮隧道结构简化成一个等距离弹性支撑梁,如图 2,并作出如下假设: 1) 将悬浮隧道的张力腿简化为等距离布设的支撑弹簧,简化后的支撑弹簧竖向刚度为 K ; 2) 各支撑弹簧间支撑间距为 h ; 3) 文中仅讨论冲击荷载作用下,悬浮隧道位移的一阶振动模态; 4) 冲击物与悬浮隧道管体接触后,两者附着在一起运动; 5) 略去冲击过程中的能量损失,只考虑动能与势能的转化.

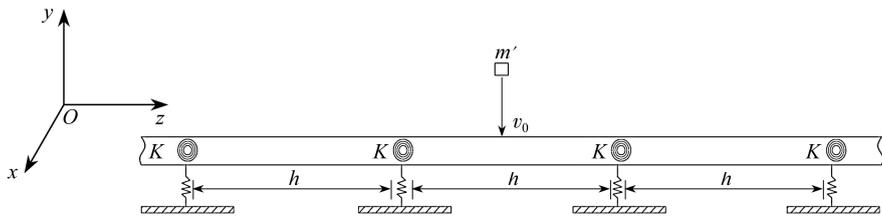


图 2 冲击荷载作用下的悬浮隧道物理模型示意图

Fig. 2 A simplified model of the SFT subjected to impact

2 动力平衡方程

为了研究冲击损害最严重的情况,冲击荷载作用于悬浮隧道管段跨中正上方,并将冲击力

简化为一个冲击速度为 v_0 , 冲击质量为 m' 的集中荷载, 如图 2 所示。

在冲击物撞击作用于悬浮隧道的过程中, 其运动平衡方程可表示为

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + \left[m_s + m' \delta \left(z - \frac{l}{2} \right) \right] \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial w}{\partial t} + \kappa w = p(t) \delta \left(z - \frac{l}{2} \right) - f_D, \quad (1)$$

其中, EI 为悬浮隧道的弯曲刚度, w 为悬浮隧道管体的竖向位移, m_s 为单位长度悬浮隧道的质量, m' 为冲击物质量, c_s 为悬浮隧道的粘滞阻尼系数, δ 为 Dirac (狄拉克) 函数, l 为悬浮隧道长度, κ 为等效线张力腿竖向刚度^[5], $\kappa = K/h$, $p(t)$ 为冲击荷载, f_D 为张力腿横向振动引起的水体对其单位长度的附加惯性和阻尼力之和。

冲击波荷载的特征是在短暂时间内上升到峰值, 随即迅速衰减到 0, 然后有数值不大的负相压力^[8]。这种冲击荷载一般可用线性规律来描述^[9]:

$$p(t) = p_0 \left(1 - \frac{t}{\theta} \right), \quad (2)$$

其中, p_0 为最大冲击力, $p_0 = 2m'g^2v_0\theta$ ^[10], θ 为正相压力的持续时间。

由 Morison 公式, f_D 可表示为

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho D \frac{\partial w}{\partial t} \left| \frac{\partial w}{\partial t} \right| + \frac{1}{4} C_m \pi D^2 \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (3)$$

其中, ρ 为流体密度, D 为管径, C_D 为拖拽力系数, C_m 为附加质量系数, 取 $C_D = 0.7$, $C_m = 1.0$ ^[11]。

由式(3)可知, f_D 由两部分组成, 其前一部分可近似简化为

$$(2\pi Sr (\partial \bar{w} / \partial t) / D) \gamma \rho D^2 \partial w / \partial t$$

可得化简后的悬浮隧道动力平衡方程为

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + \left[(m_s + m_f) + m' \delta \left(z - \frac{l}{2} \right) \right] \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + (c_s + c_f) \frac{\partial w}{\partial t} + \kappa w = p_0 \left(1 - \frac{t}{\theta} \right) \delta \left(z - \frac{l}{2} \right), \quad (4)$$

其中, c_f 为流体附加阻尼, $c_f = (2\pi Sr (\partial \bar{w} / \partial t) / D) \gamma \rho D^2$, 由于 c_f 属于非线性项, 可利用等效线性化的方法通过数值软件迭代求解, 使等效线性值尽可能逼近精确解, $\gamma = 0.8$, $Sr = 0.2$ ^[13], \bar{w} 为管体的平均位移, m_f 为流体附加质量, $m_f = \pi \rho D^2 C_m / 4$ 。

由前面假设, 悬浮隧道为等距离弹性支撑梁, 采用 Galerkin 法可得到移动荷载作用下悬浮隧道位移方程的解:

$$w(z, t) = \sum \phi_n(z) q_n(t), \quad (5)$$

其中, $\phi_n(z)$ 为悬浮隧道 n 阶振动模态的形函数, $q_n(t)$ 为广义坐标。为了便于研究, 在不影响定性结果的前提下, 文中仅考虑一阶模态形式 $\phi(z)$ 和 $q(t)$, $\phi(z) = \sin(\pi z / l)$ 。

将式(5)代入式(4), 方程两边同乘 $\phi(z)$ 后, 同时对悬浮隧道长度 l 进行积分。为了便于简化, 令 $m = m_s + m_f$, $c = c_s + c_f$ 。化简整理得

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + A \frac{\partial q}{\partial t} + Bq = p_0 l \left(1 - \frac{t}{\theta} \right), \quad (6)$$

式中 $A = \frac{cl}{ml + 2m'}$; $B = \frac{EI\pi^4 + \kappa l^4}{l^3(ml + 2m')}$ 。

根据简化后的悬浮隧道物理模型,可确定悬浮隧道的边界条件和初始条件如下:

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}(0, t) = 0, EI \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}(l, t) = 0, \quad (7)$$

$$w(z, 0) = 0, \frac{\partial w(z, 0)}{\partial t} = 0. \quad (8)$$

令 $\Omega = \sqrt{4B - A^2}/2$, 由式(7)、(8) 推得广义坐标 $q(t)$:

$$q(t) = e^{-(A/2)t}(F_1 \cos(\Omega t) + F_2 \sin(\Omega t)) + F_3 + F_4 t, \quad (9)$$

其中

$$F_1 = p_0 l \left(\frac{A}{B} - \theta \right); F_2 = \frac{A p_0 l \theta (A - B \theta) - 2 p_0 l}{2 B \Omega \theta}; F_3 = p_0 l \left(\theta - \frac{A}{B} \right); F_4 = \frac{p_0 l}{B \theta}.$$

将式(9)代入式(5),即可得到冲击荷载作用下,悬浮隧道管段任一位置的一阶模态竖向振动位移 $w(z, t)$:

$$w(z, t) = q(t) \cdot \sin \frac{\pi z}{l}. \quad (10)$$

当 $t > \theta$ 时,冲击作用结束,悬浮隧道做自由振动,并逐渐恢复初始状态.由于计算方法与上述方法相同,此处不再赘述,悬浮隧道自由振动下其任一位置的一阶模态竖向振动位移 $w^*(z, t)$ 为

$$w^*(z, t) = q^*(t) \cdot \sin \frac{\pi z}{l}, \quad (11)$$

$$q^*(t) = e^{-(A/2)t}(F_5 \cos(\Omega t) + F_6 \sin(\Omega t)), \quad (12)$$

式中

$$F_5 = \frac{F_1 \cos(\Omega \theta) + F_2 \sin(\Omega \theta) + e^{A\theta/2}(F_3 + F_4 \theta) - F_6 \sin(\Omega \theta)}{\cos(\Omega \theta)};$$

$$F_6 = F_2 + \frac{F_4 \cos(\Omega \theta)}{\Omega e^{-A\theta/2}} + (F_3 + F_4 \theta) \left(\frac{A}{2\Omega} \cos(\Omega \theta) + \sin(\Omega \theta) \right).$$

3 数值模拟与分析

由于目前世界范围内尚无一例已经建成并投入使用的悬浮隧道,故文中悬浮隧道基本参数的选取参考了目前国内外拟建悬浮隧道设计参数^[14-15]和我国现行的公路桥涵设计规范^[16],具体参数取值如表1.

表1 悬浮隧道基本参数

Table 1 Basic parameters of the SFT

parameter	symbol	unit	value
length	l	m	1 000
support spacing	h	m	100
modulus of elasticity	E	N/m ²	3.2×10^{10}
external diameter	D	m	14.26
internal diameter	D'	m	11.40
damping coefficient	c_s	N/(m/s)	0.000 1
density of the SFT	ρ'	kg/m ³	2 018
fluid density	ρ	kg/m ³	1 028

为了使本文具有一定的工程参考价值,文中冲击作用模拟参数的选取以海上沉船、坠机事故等为基础,对沉船、坠机碎片撞击悬浮隧道的情况进行模拟.张维衡、陈国虞、李国华等分别在华中理工大学和中国船舶科学研究中心做过三组船桥撞击试验^[17],如表2所示.

表2 船桥冲击试验结果^[17]Table 2 The results of ship-bridge collision tests^[17]

collision system material	testing agency and testing machine parameter	test condition	impact duration t_{id} / s	
steel-steel reinforced concrete	structure laboratory, naval architecture and marine engineering, Huazhong University of Science and Technology; collision energy of hammerhead: 11 590 J, momentum of hammerhead: 6 994 kg·m/s	impulse $I / (N \cdot s)$	6 102	0.083 8
			7 742	0.063 2
			10 444	0.051 5
drum-type rubber vibration isolator	structure laboratory, China Ship Scientific Research Center; 1# hammerhead, maximum energy: 5 000 J, initial impact velocity: 0.3~0.6 m/s	initial velocity $V_0 / (m \cdot s^{-1})$	0.3	0.13
			0.6	0.14
			0.6	0.65
steel-wire rope avoidance of collision	structure laboratory, China Ship Scientific Research Center; 1# hammerhead, maximum energy: 5 000 J, initial impact velocity: 1~8 m/s	initial velocity $V_0 / (m \cdot s^{-1})$	1.4	0.55
			1.4	0.40
			1.7	0.40
			3.7	0.33
			4.5	0.30
			5.3	0.29

由于这类事故冲击作用属于低速冲击,冲击速度不大且冲击持续时间很短,根据表2中的试验数据并考虑海水的阻尼作用,文中采用冲击时间设计值 $\theta = 0.08$ s对悬浮隧道跨中位移进行模拟.

弹簧竖向刚度 K 取值借鉴目前已有的桥梁减震装置研究成果,当要保持较大减震效率时,弹簧竖向刚度 K 的合理取值范围大于 1×10^7 N/m^[18].文中分别对 K 取 5×10^7 N/m, 8×10^7 N/m, 1×10^8 N/m时,悬浮隧道的跨中位移时程曲线进行模拟.此时 $m' = 10$ t, $v_0 = 5$ m/s.数值模拟结果如图3所示.

在图3(a)中,时间 $t \leq 0.08$ s,隧道管体受到冲击物的直接作用,当 $t = 0.08$ s时隧道跨中达到冲击作用下的最大位移,但隧道管体跨中在冲击物引发的整个振动过程中所产生的最大位移,则出现在管体随后的自由衰减振动中,如图3(b)所示.在上述两个阶段中,悬浮隧道跨中位移幅值 w_{dmax} 和振动周期 T 均随着张力腿竖向刚度 K 的增大而逐渐减小.当 K 从 5×10^7 N/m增大至 1×10^8 N/m, w_{dmax} 从0.045 m减小至0.028 m, T 从3.6 s减小至2.6 s.

另外,在数值模拟过程中发现张力腿竖向刚度对悬浮隧道振动的抑制作用具有一定的局限性.对于文中设计隧道,当 $K > 1 \times 10^8$ N/m时, K 对 w_d 的影响逐渐减小,当 $K > 5 \times 10^8$ N/m时, K 对 w_d 的影响基本可以忽略.因此,在悬浮隧道设计过程中,需经过具体计算选择 K 的最优值.

如图4和图5所示,冲击物质量 m' 和冲击速度 v_0 对于悬浮隧道位移响应具有相似的影响规律,悬浮隧道跨中位移幅值 w_{dmax} 随着 m' 或 v_0 的增大而增大.当 $K = 1 \times 10^8$ N/m, $v_0 = 5$ m/s时, m' 由5 t增大至15 t时, w_{dmax} 由0.014 m增加至0.042 m;当 $K = 1 \times 10^8$ N/m, $m' = 10$ t时,

v_0 由 3 m/s 增加至 7 m/s, $w_{d\max}$ 则由 0.017 m 增加至 0.039 m. 由于文中主要考虑低速撞击, 故冲击质量 m' 相比冲击速度 v_0 对于悬浮隧道位移响应的影响更为显著.

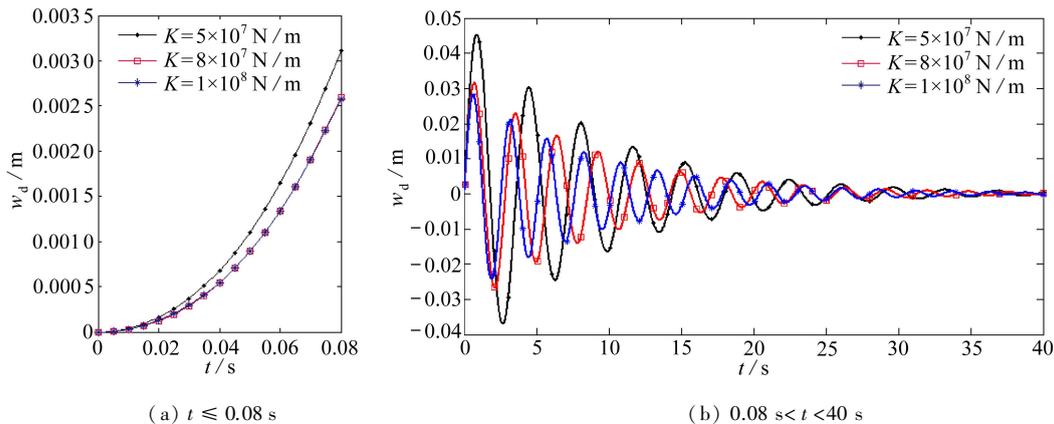


图 3 K 不同时, 悬浮隧道跨中位移 w_d 的时程曲线

Fig. 3 Central displacement w_d of the SFT with different K values

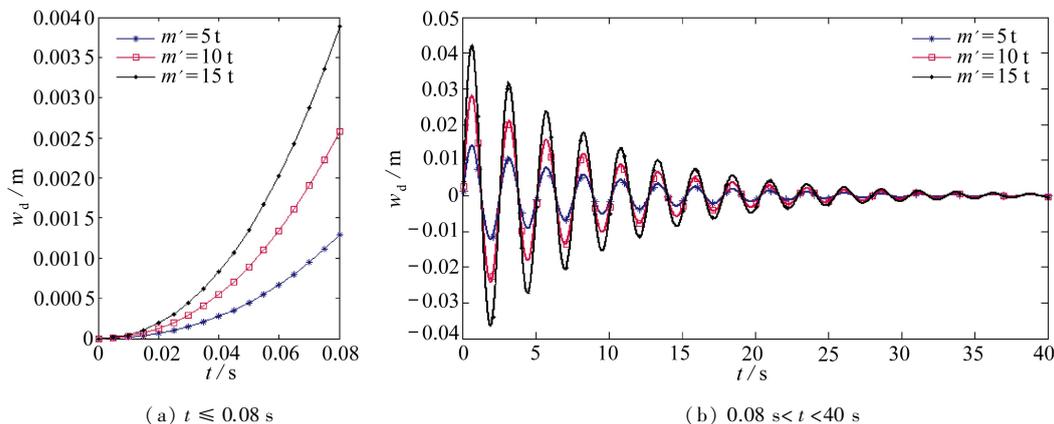


图 4 m' 不同时, 悬浮隧道跨中位移 w_d 时程曲线

Fig. 4 Central displacement w_d of the SFT with different m' values

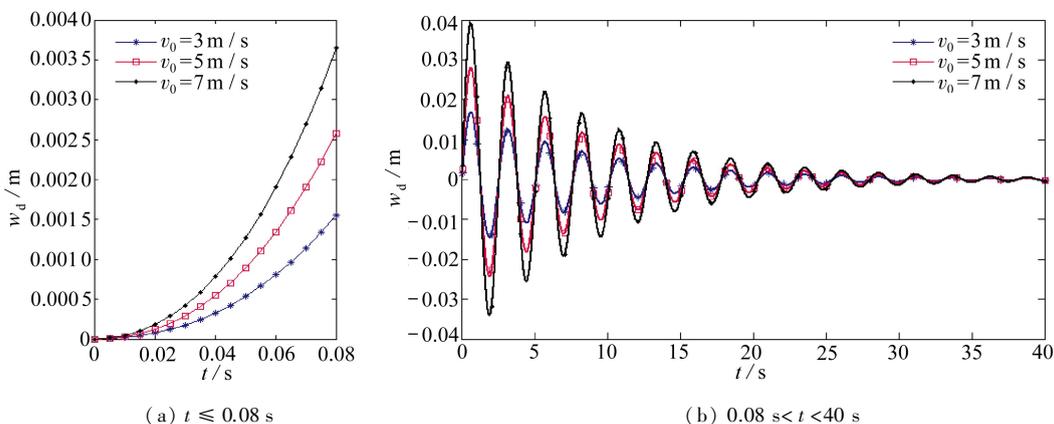


图 5 v_0 不同时, 悬浮隧道跨中位移 w_d 时程曲线

Fig. 5 Central displacement w_d of the SFT with different v_0 values

4 结 论

文中将悬浮隧道简化为一个等距离弹性支撑梁,建立悬浮隧道在冲击荷载作用下的动力学模型,通过 Galerkin 法求解,数值模拟分析悬浮隧道跨中的时程位移,讨论张力腿竖向刚度、冲击物质量、冲击速度对悬浮隧道跨中位移的影响,得到以下结论:

1) 冲击荷载作用下,张力腿竖向刚度对悬浮隧道的位移响应具有显著的抑制作用,但这种抑制作用具有极限性.在合理的范围内,增大张力腿竖向刚度可有效减小管体振动,但超出范围后,继续增大竖向刚度对减振效果不明显.在悬浮隧道设计过程中,需综合分析,考虑张力腿竖向刚度的最佳取值.

2) 冲击物质量和冲击速度的变化对悬浮隧道跨中位移幅值影响显著.悬浮隧道跨中位移幅值随着冲击物质量或冲击速度的增大而增大.

3) 沉船、坠机碎片撞击水中悬浮隧道的情况属于水下低速撞击,相比冲击速度,冲击物质量对悬浮隧道位移响应的影响更大.

参考文献(References):

- [1] Brancaleoni F, Castellani A, d'Asdia P. The response of submerged tunnels to their environment[J]. *Engineering Structures*, 1989, **1**(11): 47-56.
- [2] Remseth S, Leira B J, Okstad K M, Mathisen K M, Haukås T. Dynamic response and fluid/structure interaction of submerged floating tunnels[J]. *Computers and Structures*, 1999, **4**(72): 659-685.
- [3] LU Wei, GE Fei, WANG Lei, WU Xiao-dong, HONG You-shi. On the slack phenomena and snap force in tethers of submerged floating tunnels under wave conditions[J]. *Marine Structures*, 2011, **24**(4): 358-376.
- [4] Sato M, Kanie S, Mikami T. Mathematical analogy of a beam on elastic supports as a beam on elastic foundation[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, **32**(5): 688-699.
- [5] Tariverdilo S, Mirzapour J, Shahmardani M, Shabani R, Gheyretmand C. Vibration of submerged floating tunnels due to moving loads[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, **35**(11): 5413-5425.
- [6] 田雪飞,董满生,逢焕平,林志,牛忠荣. 海洋内波和洋流联合作用下水中悬浮隧道的动力响应[J]. *应用数学和力学*, 2014, **35**(1): 71-80.(TIAN Xue-fei, DONG Man-sheng, PANG Huan-ping, LIN Zhi, NIU Zhong-rong. The combined effect of ocean internal waves and currents of dynamic response in the tunnel water suspension[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(1): 71-80.(in Chinese))
- [7] 惠磊,葛斐,洪友士. 水中悬浮隧道在冲击荷载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 You-shi. Calculation model and numerical simulation of submerged floating tunnel subjected to impact loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, **25**(2): 209-213.(in Chinese))
- [8] 任会兰,宁建国. 冲击固体力学[M]. 北京:国防工业出版社,2013:117.(REN Hui-lan, NING Jian-guo. *Shock Dynamics of Solid*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 117.(in Chinese))
- [9] 刘福林. 简支弹塑性梁受冲击波作用时的动力响应的权余解法[J]. *机械强度*, 1989, **11**(1): 48-52.(LIU Fu-lin. The weighted residual method of the dynamic response of simply supported

- elasto-plastic beams subjected to a impact loading[J]. *Mechanical Strength*, 1989, **11**(1): 48-52.(in Chinese))
- [10] 何勇, 金伟良, 张爱晖, 吴剑国. 船桥碰撞动力学过程的非线性数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, **42**(6): 1065-1070.(HE Yong, JIN Wei-liang, ZHANG Ai-hui, WU Jian-guo. Non-linear collision simulation on dynamic interaction between ship-bridge[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2008, **42**(6): 1065-1070.(in Chinese))
- [11] 项贻强, 晁春峰. 悬浮隧道管体及锚索耦合作用的涡激动力响应[J]. 浙江大学学报, 2012, **46**(3): 409-415.(XIANG Yi-qiang, CHAO Chun-feng. Vortex-induced dynamic response for combined action of tube and cable of submerged floating tunnel[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2012, **46**(3): 409-415.(in Chinese))
- [12] Srinil N, Zanganeh H. Modelling of coupled cross-flow/in-line vortex-induced vibrations using double Duffing and Van der Pol oscillators[J]. *Ocean Engineering*, 2012, **53**: 83-97.
- [13] 陈建云, 王变革, 孙胜男. 悬浮隧道锚索的涡激动力响应分析[J]. 工程力学, 2007, **24**(10): 186-192.(CHEN Jian-yun, WANG Bian-ge, SUN Sheng-nan. Analysis of vortex-induced dynamic response for the anchor cable of submerged floating tunnel[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(10): 186-192.(in Chinese))
- [14] 麦继婷, 关宝树. 琼州海峡悬浮隧道的可行性研究[J]. 铁道工程学报, 2003(4): 93-96.(MAI Ji-ting, GUAN Bao-shu. A feasibility study on Qiongzhou strait submerged tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2003(4): 93-96.(in Chinese))
- [15] 秦银刚, 周生国, 周晓军. 多跨悬浮隧道合理支撑间距分析[J]. 铁道工程学报, 2008, **25**(3): 78-81.(QIN Yin-gang, ZHOU Sheng-guo, ZHOU Xiao-jun. Analysis of the reasonable support length for multi-spans submerged floating tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008, **25**(3): 78-81.(in Chinese))
- [16] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].北京: 人民交通出版社, 2004.(JTG D60—2004, General specifications for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [17] 罗林阁, 曹映泓, 陈国虞, 王礼立. 船舶撞击桥梁的撞击力计算方法探讨[J]. 中外公路, 2006, **26**(5): 78-81.(LUO Lin-ge, CAO Ying-hong, CHEN Guo-yu, WANG Li-li. Discussion about the calculation method of ship-bridge model under impact[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2006, **26**(5): 78-81.(in Chinese))
- [18] JTG B02—2013, 公路工程抗震设计规范[S].北京: 人民交通出版社, 2013.(JTG B02—2013, Specification of seismic design for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.(in Chinese))

Displacement Responses of Submerged Floating Tunnels Under Impact Loads

ZHANG Yuan¹, DONG Man-sheng^{1,2}, TANG Fei¹

(1. *School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China;*

2. *China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P.R.China*)

Abstract: The submerged floating tunnel (SFT) was simplified as an elastically supported beam with uniform supporting spacings. The dynamics model was established to solve the vibration problem of the SFT under impact loads. With the Galerkin method, the time-displacement responses at the central cross section of the SFT was numerically simulated. The influences of the anchor stiffness, the impact mass and the impact velocity on the SFT's central displacement were analyzed. The present results indicate that the anchor stiffness has significant but bounded negative influence on the SFT's central displacement. Moreover, the impact mass and the impact velocity have obvious positive effects on the SFT's central displacement. The work provides a theoretical reference for further study and construction of the SFT.

Key words: submerged floating tunnel; impact load; displacement response; parameter design; numerical simulation

Foundation item: China Postdoctoral Science Foundation(20110490833)

引用本文/Cite this paper:

张媛, 董满生, 唐飞. 冲击荷载作用下水中悬浮隧道的位移响应[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(5): 483-491.

ZHANG Yuan, DONG Man-sheng, TANG Fei. Displacement responses of submerged floating tunnels under impact loads[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(5): 483-491.