

# 随机地震激励下水中悬浮隧道的动力响应\*

董满生<sup>1,2</sup>, 李满<sup>1</sup>, 林志<sup>2</sup>, 唐飞<sup>1</sup>, 蒋树屏<sup>2</sup>

(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:** 将张力腿定位的水中悬浮隧道结构简化为弹性简支梁和弹性支撑刚性梁的叠加,基于 Euler(欧拉)梁理论给出悬浮隧道管段受迫振动时的运动方程,等效线性化处理动力方程非线性项;采用虚拟激励模拟随机地震输入,数值模拟平稳随机地震下水中悬浮隧道管体的动力响应,给出管段的位移功率谱.通过位移功率谱分析表明:随着消能连接装置阻尼系数和张力腿弹簧系数的增大,管段的动力响应减弱,其中张力腿的刚度对悬浮隧道管体的震动影响较为显著.

**关键词:** 水中悬浮隧道; 管体; 随机振动; 虚拟激励法; 动力响应

**中图分类号:** U495.5      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.12.004

## 引 言

水中悬浮隧道(SFT, submerged floating tunnel)是一种新型跨越水域的水工结构物,在自重、浮力和锚固系统的共同作用下悬浮在水中,由于基于 Archimedes(阿基米德)原理又称为 Archimedes 桥.通常悬浮隧道自身重力小于浮力,通过锚索平衡富余浮力,以达到平衡.与地面结构物所处环境不同,水中悬浮隧道除了承受自重和车辆载荷以外,还受到浮力、波浪、海流、地震等各种环境动力荷载的作用,因此研究悬浮隧道管体在复杂环境作用下的动力响应,就成为研究悬浮隧道安全性、稳定性的重点.

现阶段,悬浮隧道的结构动力学研究工作集中在不同荷载下隧道管体和锚索系统的结构动力学响应.麦继婷等<sup>[1]</sup>将悬浮隧道和支撑结构简化为空间梁系,采用梁元的 CR 列式法,在考虑波浪、水流与结构相互作用的条件下,论述波浪与水流共同作用下悬浮隧道系统的响应计算方法.雷凡等<sup>[2]</sup>将海洋悬跨管道、悬浮隧道等结构简化为简支梁,将水流引起漩涡泄放产生的升力简化为简谐荷载,考虑流固耦合效应研究水中结构的动力响应.Su 等<sup>[3]</sup>以锚索和粘弹性阻尼器组成的系统为研究对象,建立锚索-粘弹性阻尼器的振动方程,并分析锚索可能达到的最优阻尼比以及相应的最优阻尼器系数.田雪飞等<sup>[4]</sup>采用 Morison 法考虑内波和洋流联合作用力,建立悬浮隧道-流体相互作用非线性振动数学物理模型,研究海洋内波和洋流共同作用

\* 收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-11-13

**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)

**作者简介:** 董满生(1973—),男,安徽人,副教授,博士,硕士生导师(通讯作者. E-mail: dongms@hfut.edu.cn);

李满(1989—),女,河南人,硕士生(E-mail: 1421678619@qq.com).

下水中悬浮隧道的多模态动力响应行为。Kiyokawa 等<sup>[5]</sup>考察流体的压缩性对地震力的影响,给出压缩流体的波势理论,并表明在深水和高频下,水的压缩性对流体力有很大影响。Morita 等<sup>[6]</sup>基于二维波势理论和 Green(格林)函数方法考虑水的压缩性,数值模拟分析垂直地震激励下 SFT 的响应。罗刚等<sup>[7]</sup>采用大涡模拟法,研究悬浮隧道的合理截面形式。赵江倩等<sup>[8]</sup>通过建立和求解饱和土中圆形隧道在地震加速度作用下的动力控制方程,对其进行数值计算,较为全面地分析了地震频率、隧道结构参数以及地震加速度大小对饱和土中圆形隧道地震响应的影响。傅方等<sup>[9]</sup>研究了不规则地形及地震波斜入射引起的局部场地地震动空间变化对隧道整体动力响应的影响,其国内对波浪、海流等环境荷载研究得比较多,对于地震这种极限环境荷载研究得相对较少。

本文基于 Euler 梁理论给出地震激励下悬浮隧道的运动方程,运用虚拟激励法研究设有消能连接装置的悬浮隧道在地震激励下的位移动力响应,以分析地震激励下悬浮隧道管体振动控制。

## 1 物理模型

SFT 的跨度可达十几千米,由很多相同的管段连接而成,为了研究地震作用下悬浮隧道管体的动力响应,本文取一节管体为研究对象进行分析。所选悬浮隧道管体段之间由消能连接装置连接,则整个动力学系统包括管体、消能连接装置、张力腿以及锚固桩等。Sato 等<sup>[10]</sup>对悬浮隧道的动态响应分析认为,悬浮隧道锚固定位系统弯曲刚度与管体的轴向刚度的比值具有连续弹性地基之间的类比,并得出连续弹性地基适用于相对刚度参数相同的静态和动态加载<sup>[11]</sup>,因此可将悬浮隧道的锚固支撑看成简支作用。管段之间由消能结构连接,消能连接构件整体为套管结构,被连接管和套管接触面之间设置有减振件和减振胶圈,消能连接结构作用简化为阻尼力。带有消能连接结构的悬浮隧道简化模型如图 1 所示。

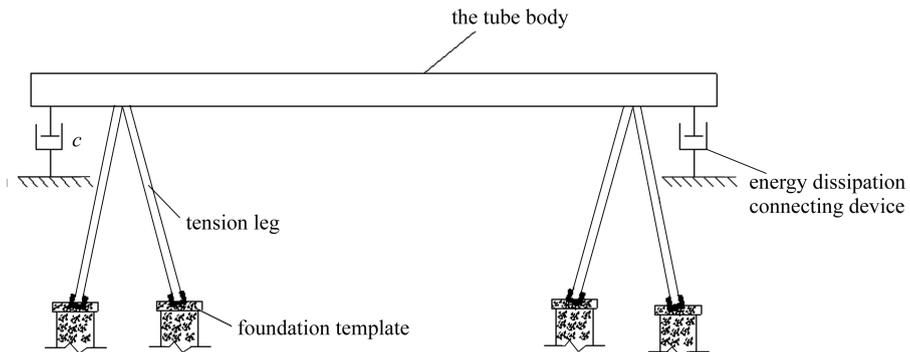


图 1 悬浮隧道结构简化模型

Fig.1 The simplified model structure of a submerged floating tunnel segment

## 2 地震激励下水中悬浮隧道的运动方程

### 2.1 悬浮隧道管体结构的运动方程

悬浮隧道管体所受地震荷载由张力腿处输入,将悬浮隧道管体简化为弹性支撑梁,结构受力如图 2 所示。取管体轴向为  $x$  方向,与管体垂直向下为  $z$  方向, $z$  方向位移为  $u$ 。将地震荷载输入作用简化为集中荷载,用  $P(t)$  表示,分别作用在距离管体左右端点  $L_2, L_1$  的两张力腿连接点

处;将消能连接装置的阻尼力用  $P_c(t)$  表示.采用 Bernoulli-Euler 梁模型,不考虑剪切变形和转动惯量的影响,梁上受到由锚固系统输入的地震动激励的作用,假设锚固支撑离两端很近,两端边界可视为铰接端.文中考虑地震波垂直方向作用,用 Dirac (狄拉克)  $\delta$  函数  $\delta(x - x_p)$  来模拟集中荷载,结合 Euler 梁理论可得梁受迫振动的运动方程为

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + c_s \frac{\partial^5 u}{\partial x^4 \partial t} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_w \frac{\partial u}{\partial t} = -\delta(x)P_c(t) - \delta(x-L)P_c(t) + \delta(x-L+L_1)P(t) + \delta(x-L_2)P(t), \quad (1)$$

式中,  $c_w$  为管体振动的外阻尼系数,  $c_s$  为内阻尼系数,  $m$  为单位长度质量,  $\delta$  为 Dirac 函数,  $u(x, t)$  为管体的横向位移,  $EI$  为管体的抗弯刚度,  $I$  为管体的惯性矩.根据 Morison 方程<sup>[12]</sup>, 管段振动时外阻尼系数  $c_w = (1/2)\rho_w D_1 C_D \partial u / \partial t$ , 其中  $\rho_w$  为水体密度;  $D_1$  为管体直径;  $C_D$  为拖曳力系数.

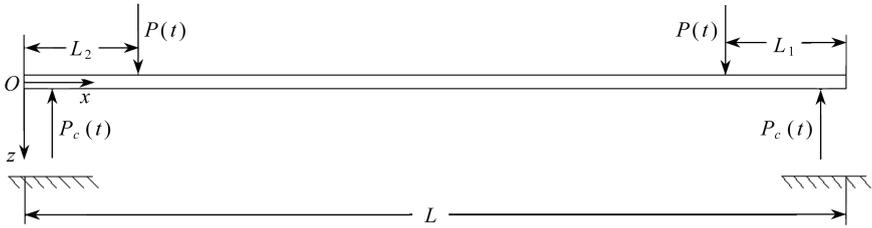


图2 悬浮隧道管体受力模型

Fig.2 The force model of the submerged floating tunnel tube

在 Tariverdilo 等<sup>[13]</sup>研究基础上将弹性支撑梁(图 3(a))的模式分离成简支弹性梁(图 3(b))和弹性支撑刚性梁(图 3(c))的模式叠加,获得满足边界条件的弹性支撑梁的模式.因此,弹性支撑梁的挠度方程可以写成

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} q(t) \phi_i(x), \quad (2)$$

式中  $q(t)$  为振型的广义坐标,  $\phi_i(x)$  为振型函数,当弹性支撑梁端部支撑弹簧刚度较大时,基本模态占主要地位.由简支弹性梁和弹性支撑刚性梁两模态叠加求得弹性支撑梁一阶模态为

$$\phi_1(x) = \sin \frac{\pi x}{L} + k, \quad (3)$$

式中  $k = EI\pi^3 / (KL^3)$ , 为梁弯曲刚度和弹簧刚度相比的无量纲量.

式(1)满足边界条件:

$$EI \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial t^2} = 0, \quad EI \frac{\partial^2 u(L, t)}{\partial t^2} = 0,$$

$$EI \frac{\partial^3 u(0, t)}{\partial t^3} = -Ku(0, t), \quad EI \frac{\partial^3 u(L, t)}{\partial t^3} = Ku(L, t),$$

初始条件为

$$u(x, 0) = \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0.$$

将挠度表达式(2)代入运动方程(1)中可得

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left( EIq(t) \frac{\partial^4 \phi_i}{\partial x^4} + c_s \frac{\partial^4 \phi_i}{\partial x^4} \frac{\partial q}{\partial t} + m\phi_i(x) \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + c_w \phi_i(x) \frac{\partial q}{\partial t} \right) =$$

$$- \delta(x)P_c(t) - \delta(x-L)P_c(t) + \delta(x-L+L_1)P(t) + \delta(x-L_2)P(t). \quad (4)$$

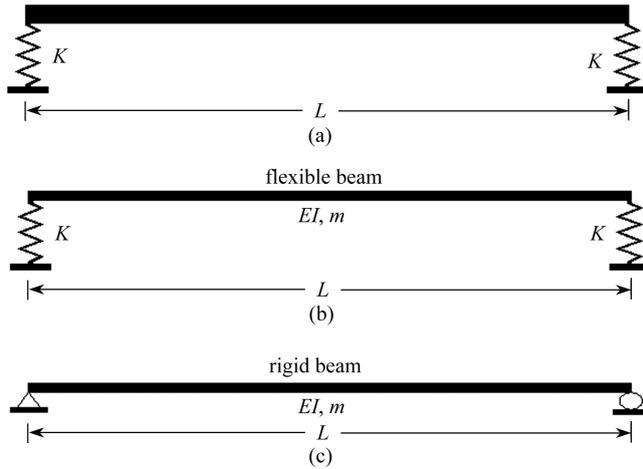


图3 梁的模式叠加

Fig.3 The modal superposition of a rigid beam on a flexible beam

令  $i = 1$ , 上式各项乘以  $\phi_1(x)$ , 沿梁长度方向积分并考虑正交条件可得

$$\begin{aligned} & \int_0^L EI\phi_1(x)q(t) \frac{\partial^4 \phi_1}{\partial x^4} dx + \int_0^L c_s \phi_1(x) \frac{\partial^4 \phi_1}{\partial x^4} \frac{\partial q}{\partial t} dx + \\ & \int_0^L m\phi_1^2(x) \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} dx + \frac{1}{2} \rho_w D_1 C_D \int_0^L \phi_1^3(x) \left( \frac{\partial q}{\partial t} \right)^2 dx = \\ & - \int_0^L \phi_1(x) \delta(x) P_c(t) dx - \int_0^L \phi_1(x) \delta(x-L) P_c(t) dx + \\ & \int_0^L \phi_1(x) \delta(x-L+L_1) P(t) dx + \int_0^L \phi_1(x) \delta(x-L_2) P(t) dx. \end{aligned} \quad (5)$$

令式中

$$\int_0^L EI\phi_1(x) \frac{\partial^4 \phi_1}{\partial x^4} dx = \lambda_1^2 M_1, \quad \int_0^L m\phi_1^2(x) dx = M_1,$$

取  $L_1 = L_2 = 0$ , 上式化简得

$$\begin{aligned} & \lambda_1^2 M_1 q(t) + \frac{c_s}{E} \lambda_1^2 M_1 \frac{\partial q}{\partial t} + M_1 \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \frac{\rho_w D_1 C_D}{2} g \left( \frac{\partial q}{\partial t} \right)^2 = \\ & - P_c(0,t)k - P_c(L,t)k + P(0,t)k + P(L,t)k, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $g = kL(2k^2 + 3)/2 + 2L(9k^2 + 2)/3\pi$ , 利用 Rayleigh(瑞利)能量法可得到系统一阶频率:

$$\lambda_1 = \lambda_0 \sqrt{\frac{\pi + 4k}{\pi + 8k + 2\pi k^2}}, \quad (7)$$

式中  $\lambda_0 = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$ ,  $\lambda_0$  为系统固有频率。

## 2.2 地震作用力

采用虚拟激励法<sup>[14-15]</sup>, 在均匀地面运动平稳随机地震响应分析中, 地震加速度  $a_g$  由反应谱可得. 平稳随机地面加速度  $a_g$  的自谱密度  $S_a(\omega)$  给定, 则虚拟简谐地面激励可写成

$$a_g = \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t}. \quad (8)$$

地震力可写成

$$P(0,t) = P(L,t) = M_{\text{anchor}} a_g = M_{\text{anchor}} \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t}, \quad (9)$$

式中  $M_{\text{anchor}}$  为锚索质量.

消能连接装置阻尼力可写成

$$P_c(0,t) = P_c(L,t) = ck \frac{\partial q}{\partial t}, \quad (10)$$

式中  $c$  为消能连接装置阻尼系数.

将地震力及端部阻尼力作用代入式(6)得

$$\begin{aligned} \lambda_1^2 M_1 q(t) + \frac{c_s}{E} \lambda_1^2 M_1 \frac{\partial q}{\partial t} + M_1 \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \frac{\rho_w D_1 C_D}{2} g \left( \frac{\partial q}{\partial t} \right)^2 = \\ - 2ck^2 \frac{\partial q}{\partial t} + 2kM_{\text{anchor}} \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t}. \end{aligned} \quad (11)$$

以上为非线性方程,可见地震下悬浮隧道管体动力响应属于非线性问题.文中采用将非线性项等效线性化的方法进行求解,即用一个有精确解的线性系统代替非线性系统,并使得两方程之差在统计意义上为最小.对高阶项系数进行求导,与一阶项进行合并,通过迭代的方法求解出非线性项的等效线性系数,等效方程如下:

$$M_1 \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \left( A + 2ck^2 + \frac{c_s}{E} \lambda_1^2 M_1 \right) \frac{\partial q}{\partial t} + \lambda_1^2 M_1 q(t) = 2kM_{\text{anchor}} \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t}, \quad (12)$$

式中,  $A = \rho_w D_1 C_D g E (\partial q / \partial t)$ , 取初始值  $E (\partial q / \partial t) = 1$ , 代入式(12), 通过数值软件迭代计算, 当  $A_n - A_{n+1} < A_{n+1} / 100$ , 则迭代完成, 通过迭代可求出  $A = 50\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ .

设

$$q(t) = (q_1(t) + iq_2(t)) e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial q}{\partial t} = i\omega (q_1(t) + iq_2(t)) e^{i\omega t},$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} = -\omega^2 (q_1(t) + iq_2(t)) e^{i\omega t},$$

则式(12)可写为

$$\begin{aligned} -M_1 \omega^2 (q_1(t) + iq_2(t)) e^{i\omega t} + \left( A + 2ck^2 + M_1 \lambda_1^2 \frac{c_s}{E} \right) i\omega (q_1(t) + iq_2(t)) e^{i\omega t} + \\ M_1 \lambda_1^2 (q_1(t) + iq_2(t)) e^{i\omega t} = 2kM_{\text{anchor}} \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t}. \end{aligned} \quad (13)$$

等式两边实部和虚部分别相等可解得

$$q_1(t) = \frac{M_1 (\omega^2 - \lambda_1^2)}{\omega \left( A + 2ck^2 + M_1 \lambda_1^2 \frac{c_s}{E} \right)} q_2(t), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} q_2(t) = 2kM_{\text{anchor}} \sqrt{S_a(\omega)} \left[ \frac{-M_1^2 (\lambda_1^2 - \omega^2)^2}{\omega (A + 2ck^2 + M_1 \lambda_1^2 c_s / E)} - \right. \\ \left. \omega \left( A + 2ck^2 + M_1 \lambda_1^2 \frac{c_s}{E} \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

### 3 数值模拟

目前世界上还没有建成一座 SFT, 因此, 本计算实例部分参考国外拟建 SFT 的设计参数<sup>[16-17]</sup>, 具体物理参数如表 1 所示.

表 1 数值计算实例的物理参数

Table 1 Physical parameters for the numerical example

structure element	parameter	symbol	unit	value
pipe	diameter	$D_t$	m	23.0
	length	$L$	m	500.0
	quality	$m$	kg/m	$1.5 \times 10^5$
	moment of inertia	$I$	$\text{m}^4$	21
	modulus of elasticity	$E$	MPa	$3.45 \times 10^4$
anchor	length	$L_a$	m	185
	quality	$m_a$	kg/m	1 474.23
	rigidity	$K$	kN/m	50~5 000
medium	density	$\rho_w$	$\text{kg}/\text{m}^3$	1 030
	drag force coefficient	$C_D$	-	0.7

地面加速度自功率谱采用 Kanai-Tajimi 平稳过滤白噪声公式, 即

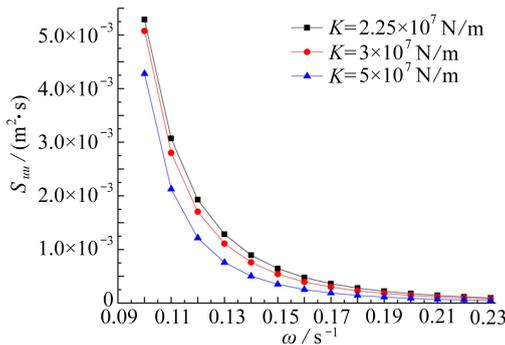
$$S_a(\omega) = \frac{1 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} S_0, \quad (16)$$

式中,  $\omega_g = 15.6 \text{ s}^{-1}$ ,  $\zeta_g = 0.6$ ,  $S_0 = 0.001 574 \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

SFT 管段中间位置响应最为剧烈, 取一阶振动模态  $x = L/2$  位置位移功率谱密度函数为

$$S_{uu} = |u(\omega, t)|^2 = \phi(x)q(t) \cdot \overline{\phi(x)q(t)} = (\phi(x)q_1(t))^2 + (\phi(x)q_2(t))^2. \quad (17)$$

借鉴已有桥梁减振装置研究成果, 若要保持较大减震效率, 弹簧刚度  $K$  取值范围大于  $1 \times 10^7 \text{ N/m}$ <sup>[18]</sup>, 阻尼系数可在阻尼比 0.3~0.5 对应范围内调整<sup>[19]</sup>. 本文消能连接装置阻尼系数  $c$  取阻尼比为 0.3, 0.4 和 0.5 时对应的阻尼系数  $1 966 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $2 315 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $2 722 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 弹簧刚度  $K$  分别取  $2.25 \times 10^7 \text{ N/m}$ ,  $3 \times 10^7 \text{ N/m}$  和  $5 \times 10^7 \text{ N/m}$ . 不同结构参数悬浮隧道跨中位移功率谱如图 4、图 5 所示.



(a)  $c = 1 966 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$

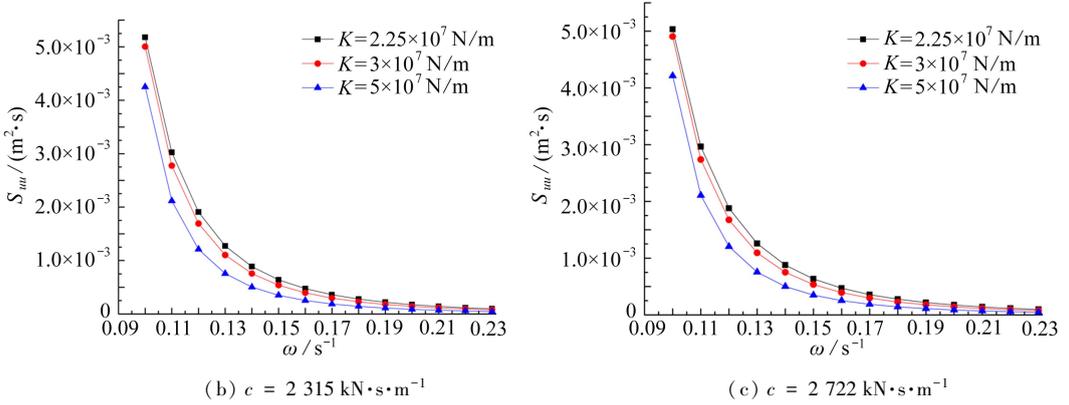


图4  $K$ 对跨中位移功率谱的影响

Fig.4 Effect of  $K$  value on the displacement power spectrum

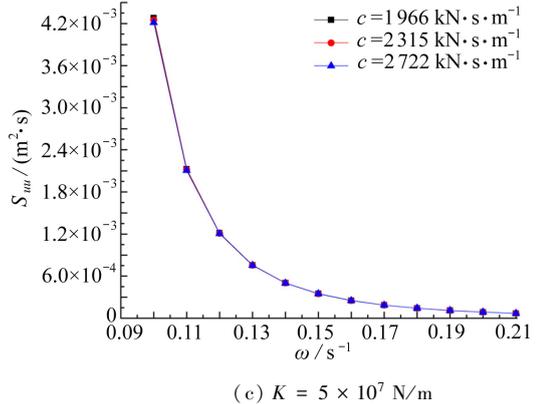
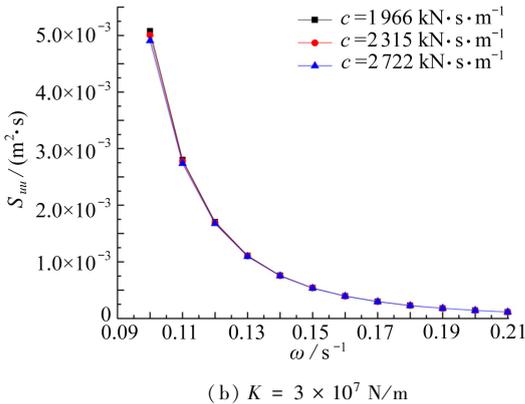
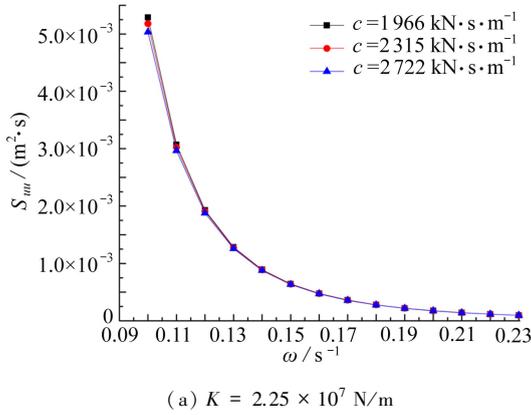


图5  $c$ 对跨中位移功率谱的影响

Fig.5 Effect of  $c$  value on the displacement power spectrum

从图4、图5可以看出,平稳随机地震作用下悬浮隧道管体跨中位移响应随着频率的增加而逐渐减小.随着消能连接装置阻尼系数  $c$  和弹簧刚度  $K$  的改变,管体位移响应均在角频率为  $0.1\ \text{s}^{-1}$  时达到最大,其最大值在  $0.004\ 2\ \text{m}^2\cdot\text{s}\sim 0.005\ 3\ \text{m}^2\cdot\text{s}$  之间.从图4可以看出当阻尼系数  $c$  取定值时,随着弹簧刚度  $K$  的增加,管体位移响应逐渐减小.从图5可以看出当弹簧刚度  $K$  取定值时,随着阻尼系数  $c$  的增加,管体位移响应略微减小.对比图4和图5可见,弹簧刚度  $K$  对SFT管段的位移响应影响较大.

继续增加  $K$ , 进一步研究弹簧刚度  $K$  对 SFT 管段位移响应的影响, 如图 6 所示。

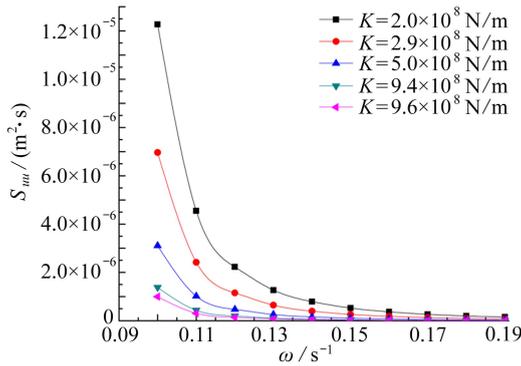


图 6  $K$  对跨中位移功率谱的影响

Fig.6 Effect of  $K$  value on the displacement power spectrum

从图 6 可以看出, 当  $K$  取值大于  $2 \times 10^8$  N/m 时, SFT 管段跨中位移响应功率谱降低到  $1 \times 10^{-5}$   $\text{m}^2 \cdot \text{s}$  左右。当  $K$  取值大于  $9.4 \times 10^8$  N/m 时, SFT 管段位移响应降低到  $1 \times 10^{-6}$   $\text{m}^2 \cdot \text{s}$  以下, 此时管体的位移响应大大降低。

## 4 结 论

文中首次将张力腿定位的水中悬浮隧道简化为弹性支撑梁, 更真实反映悬浮隧道结构的力学特性。基于 Euler 梁理论给出地震激励下悬浮隧道管段的运动方程, 采用虚拟激励法研究平稳随机地震下悬浮隧道管体的动力响应, 给出了一种悬浮隧道地震反应的理论分析方法, 通过数值模拟分析可得以下结论与建议:

- 1) 消能连接结构的阻尼系数  $c$  取定值时, 随着张力腿弹簧刚度  $K$  的增加, 管体位移响应逐渐减小, 变化明显。当弹簧刚度  $K$  取定值时, 随着阻尼系数  $c$  的增加, 管体位移响应略微减小, 因此增大张力腿弹簧刚度  $K$ , 可有效控制 SFT 管体的震动。
- 2) 由于选取管段为长细结构, 连接结构的阻尼对隧道的动力响应影响微弱。若要增大连接结构消能效果, 应缩短悬浮隧道单节管段长度。
- 3) 水中悬浮隧道锚固系统的刚度是悬浮隧道设计的关键参数之一, 对隧道结构的地震反应影响较大, 设计时需要深入考虑, 综合分析。

## 参考文献 (References):

- [1] 麦继婷, 杨显成, 关宝树. 悬浮隧道在波流作用下的响应分析[J]. 铁道学报, 2008, **30**(2): 118-123. (MAI Ji-ting, YANG Xian-cheng, GUAN Bao-shu. Analysis of the responses of submerged floating tunnel under the action of wave and current[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, **30**(2): 118-123. (in Chinese))
- [2] 雷凡, 杨吉新, 刘惠, 方伟. 水中结构的动力响应分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, **35**(1): 142-145. (LEI Fan, YANG Ji-xin, LIU Hui, FANG Wei. Dynamic response analysis of structures in water[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2011, **35**(1): 142-145. (in Chinese))
- [3] SU Zhi-bin, SUN Sheng-nan. Seismic response of submerged floating tunnel tether[J]. *China Ocean Engineering*, 2013, **27**(1): 43-50.
- [4] 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))
- [5] Kiyokawa K, Inada Y. Analysis of hydrodynamic force acting on submerged structures during earthquakes[J]. *Pro of Coastal Engineering of Japan*, 1990, **37**: 639-643.
- [6] Morita S, Yamashita T, Mozuno Y, Mineta M, Kurosaki K. Earthquake response analysis of submerged floating tunnels considering water compressibility[C]//*The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Osaka, Japan, 1994.
- [7] 罗刚, 周晓军, 李登峰, 张川. 不同断面悬浮隧道绕流特性分析[J]. 铁道学报, 2013, **35**(1): 115-120. (LUO Gang, ZHOU Xiao-jun, LI Deng-feng, ZHANG Chuang. Flow characteristics analysis of submerged floating tunnel around different sections[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, **35**(1): 115-120. (in Chinese))
- [8] 赵江倩, 刘优平, 余巍伟, 徐斌. 地震加速度作用下饱和土中深埋隧道的动力响应[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(S1): 418-424. (ZHAO Jiang-qian, LIU You-ping, YU Wei-wei, XU Bin. The saturated soil under earthquake acceleration response of deep buried tunnel[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(S1): 418-424. (in Chinese))
- [9] 傅方, 赵成刚, 李伟华, 张卫华. SV波斜入射下局部地形对隧道地震响应的影响[J]. 北京交通大学学报, 2012, **36**(6): 79-84. (FU Fang, ZHAO Cheng-gang, LI Wei-hua, ZHANG Wei-hua. Effect of local topographic SV wave oblique incidence on the earthquake response of tunnels[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2012, **36**(6): 79-84. (in Chinese))
- [10] Sato M, Kanie S, Mikami T. Mathematical analogy of a beam on elastic supports as a beam on elastic foundation[J]. *Appl Math Model*, 2008, **32**(5): 688-699.
- [11] Sato M, Kanie S, Mikami T. Structural modeling of beams on elastic foundations with elasticity couplings[J]. *Mech Res Commun*, 2007, **34**(5/6): 451-459.
- [12] 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 & Structures*, 1999, **72**(4/5): 659-687.
- [13] 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.
- [14] 赵岩, 张亚辉, 林家浩. 车辆随机振动功率谱分析的虚拟激励法概述[J]. 应用数学和力学, 2013, **34**(2): 107-117. (ZHAO Yan, ZHANG Ya-hui, LIN Jia-hao. Summary on the pseudo-excitation method for vehicle random vibration PSD analysis[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, **34**(2): 107-117. (in Chinese))
- [15] 林家浩, 钟万勰. 关于虚拟激励法与结构随机响应的注记[J]. 计算力学学报, 1998, **15**(2): 217-223. (LIN Jia-hao, ZHONG Wan-xie. Some notes on FEM and structural random response analysis[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 1998, **15**(2): 217-223. (in Chinese))
- [16] 葛斐, 龙旭, 王雷, 洪友士. 水中悬浮隧道管段锚索耦合模型涡激振动研究[J]. 中国公路学报, 2009, **22**(3): 83-88, 100. (GE Wen, LONG Xu, WANG Lei, HONG You-shi. Tether coupled model study on vortex induced vibration of submerged floating tunnel tube[J]. *Chinese Journal of Highway*, 2009, **22**(3): 83-88, 100. (in Chinese))
- [17] Martinelli L, Barbella G, Feriani A. Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel sub-

- ject to multi-support seismic input[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 4: 311-318.
- [18] JTJ004-89, 公路工程抗震设计规范[S].(JTJ004-89, Specifications for seismic design of highway engineering[S].(in Chinese))
- [19] 赵国辉, 刘健新, 李宇. 基于随机振动的液体黏滞阻尼器参数优化[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(6):1002-1007.(ZHAO Guo-hui, LIU Jian-xin, LI Yu. Parameter optimization of fluid viscous damper based on stochastic vibration[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(6): 1002-1007.(in Chinese))

## Dynamic Response of the Submerged Floating Tunnel Under Random Seismic Excitation

DONG Man-sheng<sup>1,2</sup>, LI Man<sup>1</sup>, LIN Zhi<sup>2</sup>, TANG Fei<sup>1</sup>, JIANG Shu-ping<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The submerged floating tunnel stayed by tension legs was simplified as the superposition of an elastic beam and an elastically supported rigid beam, the motion equations of forced vibration for the floating tunnel tube based on the Bernoulli-Euler beam theory were presented, then the nonlinear term of the dynamic equations was linearized equivalently. The pseudo excitation was input to simulate the random seismic impact and study the response of the submerged floating tunnel tube, with the displacement power spectrum at the middle point given and discussed detailedly. The displacement power spectrum analysis indicates that the displacement response of the tube decreases with the spring stiffness of the supporting tension legs and the damping coefficient of the energy dissipation devices, of which the former is of much higher significance.

**Key words:** submerged floating tunnel; tube body; random vibration; pseudo-excitation method; dynamic response

**Foundation item:** China Postdoctoral Science Foundation(20110490833)