

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20191017002

随机地震作用下悬浮隧道锚索的动力响应分析*

阳 帅, 颜晨宇, 巫志文

(广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 研究了悬浮隧道锚索在地震与水动力共同作用下的动力响应。通过将悬浮隧道锚索简化为欧拉梁模型, 建立悬浮隧道锚索受到水动力和地震共同作用振动的运动方程。采用分离变量法和伽辽金法求解运动方程, 并使用四阶龙格-库塔法求解得到悬浮隧道锚索的位移响应情况。采用三角级数法模拟生成人工地震波, 并选用了三种著名的地震记录, 对悬浮隧道在不同地震波激励下的关键结构参数对锚索位移响应进行数值分析。结果表明: ①地震的加速度越大, 锚索的运动响应越剧烈, 产生的位移和能量越大。地震波的峰值加速度出现时间和大小也对锚索的峰值振幅有一定影响。②参数频率和阻尼比等因素对锚索的位移都有重要的影响, 但在不同的地震作用下影响程度不同。通过控制参数频率和阻尼比可以减小地震对悬浮隧道锚索及整体结构的破坏效果。

关键词: 悬浮隧道; 锚索; 地震激励; 欧拉梁理论; 动力响应

中图分类号: U452.2⁺8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0304-07

Dynamic Analysis on Cables for Submerged Floating Tunnel under Random Seismic Excitations

YANG Shuai, YAN Chenyu, WU Zhiwen

(School of Civil Engineering Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The dynamic response of anchor cables of a submerged floating tunnel under the combined action of earthquake and hydrodynamic force was studied. The anchor cable of the submerged floating tunnel was simplified as Euler beam model and the motion equation of anchor cables of the submerged floating tunnel subjected to earthquake and hydrodynamic vibration was established. The motion equation was simplified by separating variables and Galerkin method, and the displacement response of anchor cables was solved by a fourth-order Runge-Kutta method. The dynamic behavior of cables under hydrodynamic action was obtained by displacement power spectrum analysis. Artificial seismic waves were generated by means of the triangular series method and three famous seismograms were adopted. The key structural parameters of the submerged floating tunnel under different seismic excitation were numerically analyzed. The results show that: (1) The increase of seismic acceleration will cause the motion response of anchor cables to become more intense, resulting in greater displacement and energy. The time and magnitude of peak acceleration of seismic wave also have certain influence on the peak amplitude of anchor cables. (2) Parameter frequency and damping ratio have important effects on

* 收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808136)、广西自然科学基金项目(2018JJB160058)资助

作者简介: 阳帅(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事悬浮隧道抗震方面的研究。E-mail: Ander_SYang@163.com

通讯作者: 巫志文(1984—), 男, 助理教授, 博士。主要从事悬浮隧道方面的研究。E-mail: wuzhiwen20031985@163.com

the displacement of anchor cables and the influence degree is different under different earthquake action. The damage effect of earthquake on anchor cables and the overall structure of suspension tunnel can be reduced, by controlling parameter frequency and damping ratio.

Keywords: submerged floating tunnel; cable; earthquake excitations; Euler beam theory; dynamic response

引言

悬浮隧道(Submerged Floating Tunnel,简称SFT)是一种以管状结构在水中自身的浮力为支撑,通过锚固在水下基础的锚索装置、锚固的锚基础以及与两岸相连构筑物组成的交通结构物^[1]。作为一种能跨越宽阔深水并且环境适应能力高的新型交通构筑物,悬浮隧道具有常规的交通结构形式所没有的优点,例如对原有海洋环境影响较小、力学指标(管体弯矩、锚索缆力等)和单位经济成本不会随着跨越海峡长度的增大而有显著的改变等。

悬浮隧道及其锚索长时间处于海洋环境中,波浪和水流载荷是其遭受的最主要和最常规的环境载荷。此外,由于地球大部分的地震都发生在海洋上,地震也是十分重要的环境载荷,海洋地震发生时,会对悬浮隧道产生较强的破坏性,它对工程的造价、安全性及工作寿命也有巨大影响。并且由于水介质(能传递纵波)的存在,海洋地震的发生时对悬浮隧道影响作用更为复杂。

M.D.Pilato等^[2]通过三维与非线性有限元建模,分析了墨西哥海峡悬浮在地震与波流作用下的动力响应;麦继婷等^[3]通过将悬浮隧道结构系统简化为空间梁系有限元模型,采用梁元的CR列式法,分析了悬浮隧道在波流与结构相互作用下的动力响情况;秦银刚等^[4]最先使用Lyapunov函数计算参数激励下张力腿稳定性,包括振动阶次、张力腿轴向刚度、参数激励频率、张力腿长度、初始张力大小、动张力系数对张力腿稳定性的影响;晁春峰等^[5-6]提出了一种沿悬浮隧道高度进行分层积分的计算方法,结合Morison方程来计算悬浮隧道的水平波浪力和竖直波浪力,方法具有简单和可行性高等特点;董满生等^[7]考虑锚索振动时水体的流固耦合作用,建立锚索非线性动力方程,运用虚拟激励法研究锚索的随机地震反应,对地震作用下悬浮隧道锚索的速度和位移动力响应进行分析研究。但目前对于随机地震作用下锚索的动力行为的相关

研究较少,因此深入了解锚索对地震激励的动力反应对悬浮隧道结构设计和理论研究至关重要。

本文通过建立锚索在水动力及地震作用下的动力方程,并选用了三种著名的地震记录,对悬浮隧道在不同地震波激励下的关键结构参数对锚索位移响应进行数值分析,用以评价悬浮隧道锚索在随机地震下的动力响应行为。

1 物理模型

根据现有的研究,本文提出一种简化的悬浮隧道锚索在海洋环境激励作用下运动的分析模型。假设波流速度较小且不考虑涡激振动的作用,锚索只沿直线方向运动且横向挠度较小。为简化计算,将悬浮隧道锚索模型简化为只允许平面运动的伯努利欧拉梁模型^[1]。图1为悬浮隧道和地震波方向及波浪力的示意图,其中水平地震激励作用于锚索的锚固点,锚索仅允许沿锚索轴向的法线方向由静力平衡位置开始的位移方向移动^[8]。

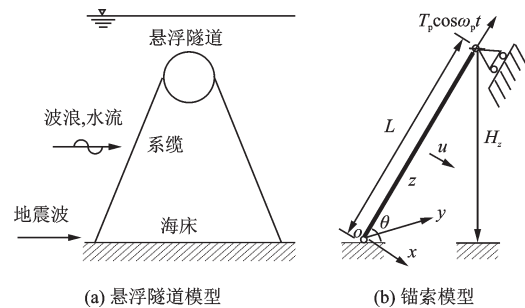


图1 悬浮隧道简化模型

Fig.1 Definition sketch of the SFT model and its cable coordinate system

注: L 为锚索未变形长度; H_z 为海床以上垂直高度; u 为锚索位移; θ 为锚索对于海床的倾角; T_p 为管道运动引起的作用于锚索的动张力, ω_p 为参数激励频率

根据文献[9]提出悬浮隧道的简化模型,只考虑了锚索系统的平面运动。虽然这一假设简化了锚索实际运动的空间运动,但二维模型能够对锚索在地震作用下的动力响应进行初步研究。坐标系

的原点设置在海底锚索的锚固点。

2 运动方程及求解

将管体对锚索的影响简化为 $T_p, \cos\omega_p t$ 的参数激励, 锚索两端铰接。为简化计算, 假定锚索的初始张力、几何形状、刚度和材料特性沿锚索长度不变。结合 Euler 梁理论可得梁受迫振动的运动方程为^[11]:

$$E_{eq} I \frac{\partial^4 u(z, t)}{\partial z^4} - (T_0 + T_p \cos\omega_p t) \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} + m \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial T^2} + C_s \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = -F_D - Q_s \sin\theta \quad (1)$$

式中, $u(z, t)$ 为锚索的动态横向位移; T_0 、 m 、 I 分别为初始张力、单位长度质量、等效弹性模量、截面惯性矩; C_s 为粘滞阻尼系数; F_D 为单位长度内的水在锚索振动时施加的阻力; Q_s 为地震激励力。

根据 Morison 方程, 当锚索振动时, 单位长度的水动力可表示为阻尼力和附加惯性力之和^[12]:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w D C_D \left(v - \frac{\partial u}{\partial t} \right) \left| v - \frac{\partial u}{\partial t} \right| + \frac{\pi D^2}{4} \rho_w C_m \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\pi D^2}{4} \rho_w (C_m - 1) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中, C_D 为阻尼系数; v 为流体的速度; ρ_w 为水的密度; D 为锚索的直径; C_m 为附加质量系数。

当地震作用下时, 地震作用的时间远短于锚索振动的时间; 地震波在锚索轴线方向的分量影响该方向水压力的变化; 在法线方向的分量引起的位移直接作用在锚索的一端^[8]。根据以上假设, 流体速度可近似认为与地震速度在轴线方向的分量一致。

时域下的地震激励项可表示为:

$$Q_s = m \ddot{x}_g \quad (3)$$

式中, \ddot{x}_g 为输入地震的振动加速度, 可由地震台的地震记录或利用三角级数法的生成的人工地震波获得。

考虑到随机激励的非平稳特性, 利用功率谱密度演化理论^[13], 非平稳随机过程通常可以写成平稳随机过程和确定性慢变调制函数的乘积:

$$\ddot{x}_g = f(t) \omega(t) \quad (4)$$

式中, $f(t)$ 为平稳过程; $\omega(t)$ 为最大值是 1 的确定性包络函数。

确定性包络函数 $\omega(t)$ 为^[14]:

$$\omega(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 < t < t_0 \\ 1 & t_0 < t < t_n \\ \exp[-c(t-t_n)] & t_0 < t \end{cases} \quad (5)$$

式中, t_0 和 t_n 分别为初始时间和第 n 秒的时间; $t_0 - t_n$ 为加速度图的显著持续时间; c 为非均匀调制系数, 取典型的 c 值为 0.2。定义 $f(t)$ 的一种方法是假设地震引起的运动是一个平稳随机的过程。根据谱密度原理, 可以得到平稳地震激励下的时程:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n C_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (6)$$

$$C_k = \sqrt{4 \times S(\omega_k) \times \Delta\omega} \quad (7)$$

式中, $\Delta\omega$ 为频谱分度 (rad/s), $\omega_k = k * \Delta\omega$ 为第 k 秒波的频率; $S_a^T(\omega)$ 为给定的目标加速度反应谱; n 是计算中考虑的频率点的总数; φ_k 是均匀分布在 $0 \sim 2\pi$ 之间的随机数。

在工程实践当中, 与地面运动功率谱密度函数相比, 设计目标在给定位置的响应谱更为常用。因此, 生成与给定设计目标响应谱相适应的地面运动时程是非常有用的。对于给定的设计目标加速度响应谱 $S_a^T(\omega)$, 可以估算出相应的地面运动功率谱^[13]:

$$S(\omega_k) = \frac{\zeta}{\pi\omega} \cdot [S_a^T(\omega)] \cdot \frac{1}{\ln\left[\frac{-\pi}{\omega T} \ln(1-P)\right]} \quad (8)$$

式中, T_d 为地震持续时间; ζ 为阻尼比; P 为反应超越概率, 取参数 P 的值为 0.9。

设计目标加速度响应谱通常由地震烈度、场地分类、峰值加速度和阻尼比等基本参数确定。图 2 所示的地震设计谱可以在 ISO 设计指南中找到。图 2 中, S_a 为光谱加速度, $S_{a, \text{site}}(T)$ 为场地光谱加速度, $S_{a, \text{map}}(T)$ 为基岩光谱加速度。当结构的基本周期为 0.2 或 1.0 s 时, 基岩谱加速度可由 $S_{a, \text{map}}(0.2) = 0.5g$ 或 $S_{a, \text{map}}(1.0) = 0.2g$ 计算得到。参数 T 是结构的基本周期, T_s 可以从以下形式得到

$$T_s = \frac{C_v S_{a, \text{map}}(1.0)}{C_a S_{a, \text{map}}(0.2)} \quad (9)$$

式中, C_a 和 C_v 为场地系数, 可以从 ISO 的表格中得到。

假设本文研究的悬浮隧道位于中国渤海浅层基础上采用锚固系统, 该基础的场地类别为 A。对于 A/B 类场地和浅基础, C_a 和 C_v 参数均赋值为 1.0。使用上述方法, 所生成的地面运动时程通常与设计目标响应谱吻合较好。

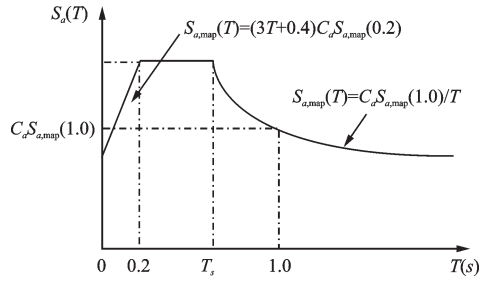


图2 地震目标设计加速度反应谱
Fig.2 ISO seismic design spectrum

通过分离变量,锚索的振动模型可以表示为:

$$x(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi z}{L} u_n(t) \quad (10)$$

式中, L 为锚索的长度; n 为振动模态的阶数。

本章主要考虑了 $n=3$ 时的振动模态。为了得到方程(1)的近似解,应用伽辽金法将偏微分方程转化为微分方程。将式(10)带入式(1)中,等式两边同时乘以 $\sin(n\pi z/L)$ 并对 z 沿梁长度方向积分,同时考虑正交条件可以得到:

$$\ddot{u} + [\omega_{Mn}^2 + \omega_{An}^2(1 + \epsilon \cos \omega_p t)] u_n + \frac{C_{sn}}{m} \dot{u}_n + \int_0^L \frac{2(F_D + Q_s \sin \theta)}{mL} \sin \frac{n\pi z}{L} dz = 0 \quad (11)$$

式中:

$$\omega_{Mn}^2 = \left(\frac{n\pi}{L} \right)^4 \frac{E_{eq} I}{m} \quad (12)$$

$$\omega_{An}^2 = \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \frac{T_0}{m} \quad (13)$$

$$\omega_n = \sqrt{\omega_{Mn}^2 + \omega_{An}^2} \quad (14)$$

$$C_{sn} = 2m\omega_n \zeta \quad (15)$$

式中, ζ 为锚索的阻尼比; ω_{Mn} 和 ω_{An} 分别为由于横向和轴向振动引起的系统的 n 阶固有频率; ω_M 为系统的 n 阶固有频率; ϵ 为锚索的动张力和静张力之比。

采用四阶龙格库塔法求解微分方程(11),可以得到锚索在地震和参数激励下的各模态响应。将三阶模态响应代入式(11),可得到锚索在地震和参数激励下的位移响应。由于欧拉梁最大动力响应一般发生在跨中。因此,本章考虑了锚索的跨中位移。

3 参数敏感性分析及讨论

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,具体物理参数见表1。

表1 数值算例基本参数

Table 1 Basic parameters of the analysis case

参数	取值
水的密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 028
水深 d / m	170
垂直高度 H_z / m	140
锚索未变形长度 L / m	161.66
锚索的直径 D / m	0.489
锚索的密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850
锚索的弹性模量 E / Pa	2.10×10^{11}
锚索的初始张力 T_0 / N	2.572×10^7
锚索的单位质量 $m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	1 474.23
阻尼比 ζ	0.001 8
惯性系数 C_M	2.0
阻力系数 C_D	1.0
倾角 $\theta / (^{\circ})$	60

选取4个具有代表性的地震记录,为便于比较,将这些加速度图的峰值加速度调整为 $0.2g$,对应地震烈度为8度的地震,如表2与图3所示。利用上述

表2 地震类别

Table 2 Seismic category

地震	场地类型	场地情况
人工地震	A/B	岩石
EI中心地震	C	密实硬土和软岩
Taft地震	D	坚硬土
Loma Prieta地震	E	软土

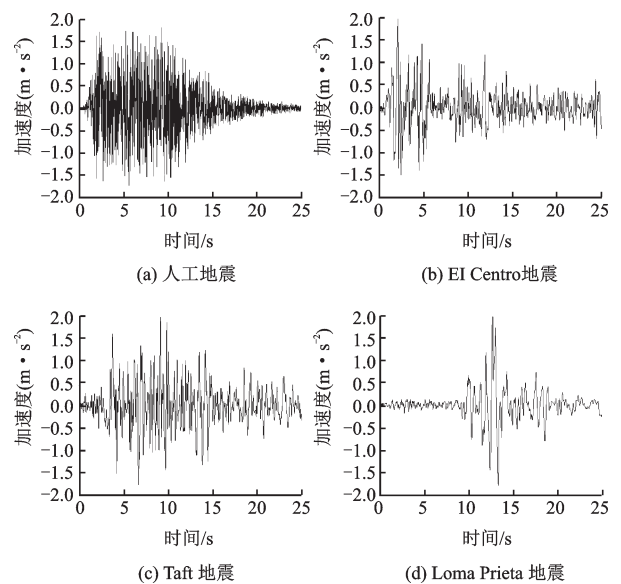


图3 四种地震的时程

Fig.3 Time histories of four selected earthquake records

分段地震激励理论在时域内生成人工地震波,并考虑与设计目标加速度响应谱的相容性,选取了其它3种地震波记录。通过参数敏感性分析,对关键参数的影响进行了分析,为地震作用下悬浮隧道锚固系统的设计和施工提供参考。

3.1 参数频率对锚索振动的影响

对4种地震波的加速度功率谱进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,简称FFT)得到地震加速度频域图像。由图4可以看出,EI Centro地震、Loma Prieta地震和 Taft地震的能量主要集中在0~5 Hz,在5 Hz之后能量快速衰减。FFT最大振幅在2.5 Hz附近,分别达到了0.11、0.115和0.10。EI Centro地震和 Taft地震相比于Loma Prieta地震具有更丰富的高频成分,激发出更宽的峰值频率区域。这意味着当EI Centro地震和 Taft地震作用于系统时,锚索的参数共振更容易发生,从而使锚索的动力响应更加剧烈。相比起其他地震作用,Loma Prieta地震作用下的锚索动力响应更不明显。

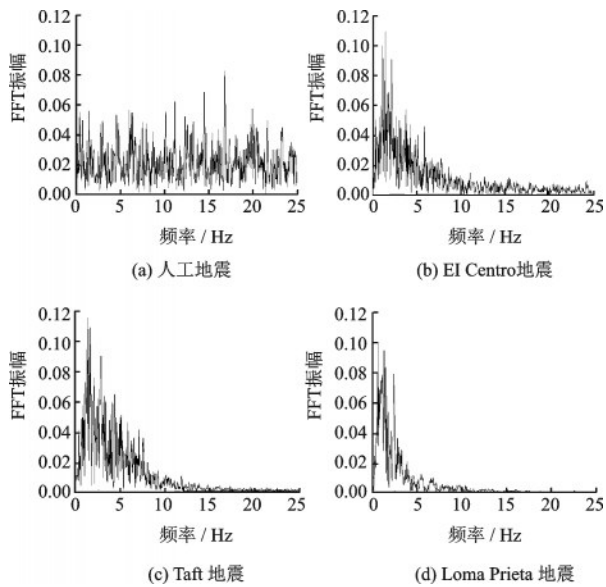


图4 地震的加速度频域

Fig.4 Seismic acceleration frequency domain

3.2 参数频率对锚索振动的影响

为了进一步分析参数频率对在不同地震作用下锚索运动响应的影响,选取了多个参数频率计算锚索跨中位移的均方根值作为参考。从图5来看,当参数频率在 $\omega_p = \omega_1$ 和 $\omega_p = 2\omega_1$ 附近时,在不同的地震作用下,都出现两个局部峰值振幅,且局部峰值振幅十分接近。而在其他情况下,在地震的作用下锚索的整体位移更为明显。

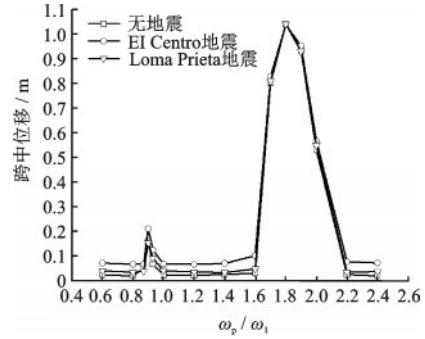


图5 不同参数频率与固有频率之比下锚索跨中位移均方根值

Fig.5 The RMS of mid-span displacement of the cable under different ω_p/ω_1

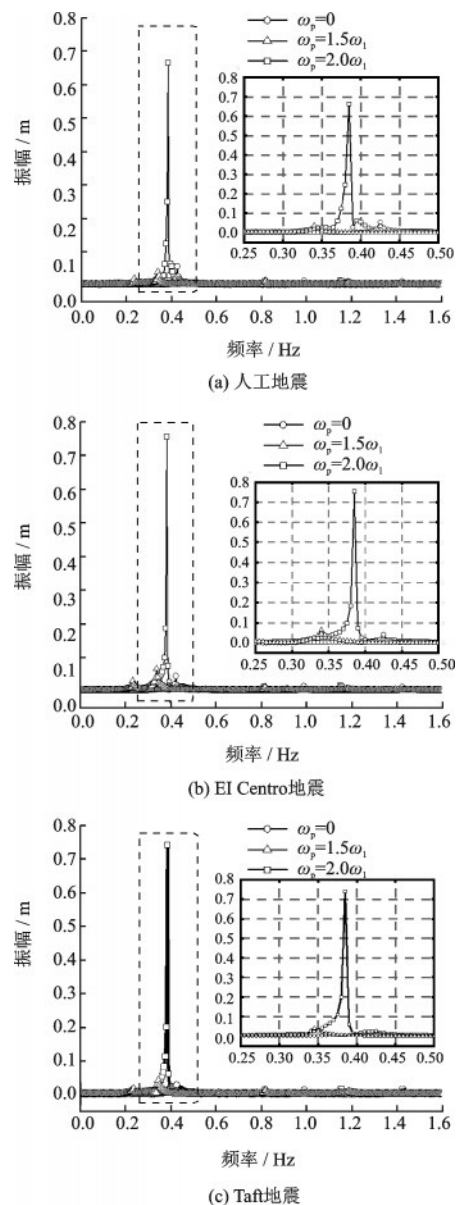


图6 不同参数频率下锚索跨中位移频域

Fig.6 Mid-span displacement frequency domain diagram of anchor cable under different parameter frequency

通过快速傅里叶变换(FFT)可以得到在地震作用下锚索位移的频域图像。在人工地震、EI Centro地震和 Loma Preita地震的作用下,当参数频率不同时,锚索的频域振幅图像也显示出不同的特性。由图6可知,振幅出现局部峰值的区域主要集中在0.3~0.45 Hz,在高频处出现较少。当参数频率 ω_p 分别为0、 $1.5\omega_1$ 和 $2\omega_1$ 时,局部峰值分别出现在0.34、0.38和0.41 Hz处,且当 $\omega_p = 2\omega_1$ 时振幅最大,振幅均在约0.7~0.8 m处。由 $1\text{ Hz} = 2\pi\text{ rad/s}$ 可得 $0.38\text{ Hz} \approx 2.38\text{ rad/s}$,即最大能量集中发生在锚索的固有频率附近。

由以上分析可以得知,在特定的情况下(如 $\omega_p = 2\omega_1$ 时),参数频率对锚索系统的影响比地震的影响更为明显,且对于锚索对于高频部分的激励更为敏感,可能的原因是,由于水体的存在,锚索对于低频激励反应起到一定的阻尼作用,而对于高频部分的影响不明显。因此,控制锚索的固有频率对于提升悬浮隧道的整体安全性来说十分重要。

3.3 阻尼比对锚索振动的影响

通过研究锚索系统在阻尼比为0.001 8、0.002、0.004、0.006、0.008和0.010下的锚索运动响应分析,如图7所示,在不同的地震作用下,当 $\omega_p = 0$ 时,

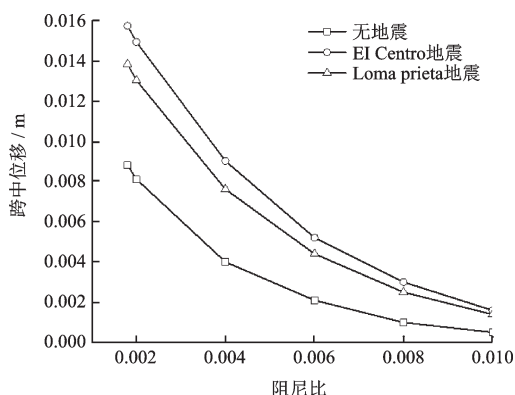


图7 不同阻尼比下锚索跨中位移

Fig.7 The mid-span displacement as a function of damping ratio

通过增大阻尼比,锚索在200 s时振动幅度和能量都逐渐减小,且减小的幅度并不相同。当锚索的阻尼比为0.002时,锚索在不同的地震状况下200 s时的位移差距较大。而当阻尼比增加到0.010时,三者之间锚索的振幅以十分接近。这说明地震作用在阻尼比较小的情况更为明显,而在阻尼比较大的情况下地震对锚索的作用效果以大幅减小。因此,阻尼在耗能中起着重要作用,使锚索系统更加稳定。

增加锚索的阻尼可以降低系统的结构响应,通过在锚索或隧道管上安装阻尼器,可以避免锚索的大振幅振动。

4 结 论

通过建立锚索系统在地震和水动力作用下和运动方程,使用三角级数法生成了地震加速度功率谱,通过分离变量法和伽辽金法分析了锚索在地震作用下的动力响应,由Matlab数值模拟出了锚索的时域位移谱,并采用快速傅里叶变化得到锚索振动的频域图像,分析了在不同地震作用下锚索的动力响应行为,并得出以下结论:

(1)通过对比4种地震的时域、频域加速度功率谱和在不同地震作用下锚索的时程位移,可以得知地震作用对锚索的动力响应行为有很大的影响。地震的加速度越大,锚索的运动响应越剧烈,产生的位移和能量越大。地震波峰值加速度出现的时间和大小也对锚索的峰值振幅有着一定的影响。

(2)通过对不同参数频率与固有频率进行分析,可发现当参数频率与固有频率成倍数关系时,锚索的跨中位移将会变大,因此,通过控制参数频率可以减小地震对悬浮隧道锚索及整体结构的破坏效果。

(3)通过调整锚索的阻尼,可以使地震对锚索的作用效果大幅减少,从而有效的减少锚索的振幅,保证悬浮隧道锚索与管体的安全。

参考文献:

- [1] 苏志彬,孙胜男.参数激励作用下水下悬浮隧道锚索的稳定性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2549-2553.
Su Zh B, Sun Sh N. Stability of submerged floating tunnel tether subjected to parametric excitation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6):2549-2553.(in Chinese)
- [2] Di Pilato M, Perotti F, Fogazzi P. 3D dynamic response of submerged floating tunnels under seismic and hydrodynamic excitation [J]. Engineering Structures, 2008, 30(1): 268-281.
- [3] 麦继婷,杨显成,关宝树.悬浮隧道和支撑结构的响应分析[J].铁道工程学报,2009(7):67-71.
Mai J T, Yang X Ch, Guan B Sh. Analsis of the responses of submerged floating tunnel and its supporting

- structure [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, (7):67-71.(in Chinese)
- [4] 秦银刚,周晓军.[J].铁道工程学报,2009(1):77-81.
Qin Y G, Zhou X J. Analysis of the influencing factors of vortex-induced vibration response of the submerged floating tunnel supported by tension leg [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(1): 77-81.(in Chinese)
- [5] 晁春峰,项贻强,杨超.悬浮隧道锚索流固耦合振动试验研究[J].振动与冲击,2016(3):158-163.
Chao Ch F, Xiang Y Q, Yang Ch. Experiments on dynamic fluid-structure coupled responses of anchor cables of submerged floating tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016(3): 158-163.(in Chinese)
- [6] 晁春峰,项贻强,林建平.基于流固耦合的锚索涡激振动抑制方法研究[J].力学与实践,2015,37(6):725-730.
Chao Ch F, Xiang Y Q, Lin J P. Patterns of cable VIV suppression based on the fluid-structure interaction [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37 (6) : 725-730. (in Chinese)
- [7] 董满生,赵佳佳,牛忠荣,等.随机地震激励作用下水中悬浮隧道锚索的动力响应 [J].合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(1):74-78.
Dong M Sh, Zhao J J, Niu Zh R, et al. Dynamic re-
- sponse of submerged floating tunnel's anchor cable to random seismic excitation [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2013, 36(1): 74-78.(in Chinese)
- [8] Lei S, Zhang W S, Lin J H, et al. Frequency domain response of a parametrically excited riser under random wave forces, Journal of Sound and Vibration, 2014, 333 (2): 485 - 498.
- [9] Wu Z, Ni P, Mei G. Vibration response of cable for submerged floating tunnel under simultaneous hydrodynamic force and earthquake excitations [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(11): 1761-1773.
- [11] Su Z B, Sun S N. Seismic response of submerged floating tunnel tether. China Ocean Engineering, 2013, 27 (1): 43 - 50.
- [12] Bi K, Hao H. Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions, Probabilistic Engineering Mechanics, 2012, 29: 92-104.
- [13] Martinelli L, Barbella G, Feriani A, et al. A numerical procedure for simulating the multi-support seismic response of submerged floating tunnels anchored by cables, Engineering Structures, 2011, 33(10): 2850 - 2860. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.009>.

(本文责编:周小潭)