

文章编号:1000-4939(2008)02-0207-05

水中悬浮隧道在波浪场中非线性动力响应的研究*

葛 斐 惠 磊 洪友士

(中国科学院力学研究所 100080 北京)

摘要: 针对水中悬浮隧道在波浪力作用下动力响应的问题,通过柔度系数法推导得到了悬浮隧道的等效刚度系数,考虑了不同自由度运动之间的耦合作用,建立了悬浮隧道管段的动力响应模型,在时间域内采用逐步积分法迭代求解其运动控制方程。波浪力采用 Airy 线性波理论和 Morison 方程计算。计算结果表明,在波浪力作用下悬浮隧道管段产生较大的横荡位移,且随着波频或锚索中预张力的减小,响应振幅增大。在悬浮隧道的动力响应分析中,若不考虑不同自由度运动之间的耦合作用,会过低估计垂荡响应的幅值。

关键词: 水中悬浮隧道;动力响应;逐步积分法;耦合;阿基米德桥

中图分类号: U459.9 **文献标识码:** A

1 引 言

水中悬浮隧道,即 SFT (Submerged Floating Tunnel),亦称“阿基米德桥”,是一种新型的跨越海峡、湖泊、河流等水域的交通结构。其基本结构包括四部分:悬浮在水面以下一定深度的管状结构;锚固在水下基础的锚索(或水上的浮箱)装置;桥体管节之间的连接装置;隧道与两岸相连的构筑物。悬浮隧道通过重力、浮力以及支撑系统之间的平衡悬浮在水下一定深度,且利用支撑系统维持悬浮隧道的稳定性。当悬浮隧道所受浮力大于重力时,则可采用锚索将其与水下的基础连接起来,并平衡悬浮隧道的剩余浮力,如图 1 所示。

对于那些由于环境的限制水域跨越不可能的地方,SFT 成为跨越的唯一可能。且随着水域宽度的增加,SFT 每米的造价增加并不显著,单位长度运输成本并不增加^[1]。SFT 悬浮在水面以下,对水面上的自然景观不会产生破坏。目前,在我国千岛湖

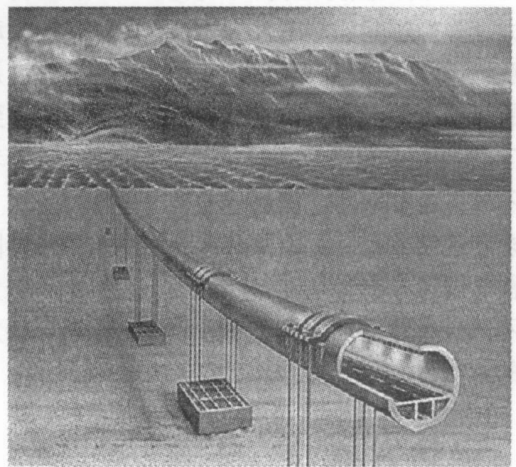


图 1 一种水中悬浮隧道

风景区正在筹划世界上第一座观光型水中悬浮隧道的建设。

SFT 的结构原理在很多方面类似于沉井隧道,同时也有许多不同,一个很重要的差异是 SFT 悬浮在水中间,有一定的运动自由度。动力行为在 SFT 的设计中必须重点考虑,而沉井隧道不需专门考虑这方面。上个世纪八十年代以来,水中悬浮隧道逐

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(10532070) 来稿日期:2006-08-15 修回日期:2007-03-01

第一作者简介:葛斐,男,1980 年生,博士,中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室,助研;研究方向——水中悬浮隧道的动力响应。E-mail: gefei@imech.ac.cn

渐为欧洲、美国、日本的科技界和政府所关注,但是迄今世界上还没有建成一座水中悬浮隧道,而人们对其动力响应规律认识还不是很清楚,成为阻碍它早日实现的关键问题之一^[2-3]。

1994年, Kunisu 等^[4]针对北海道的波浪环境通过模型试验研究了悬浮隧道的动态特性。试验原型如下:水域宽 34 km,最大水深 100m,有效波高 9.3m,有效波周期 13.0 s。圆形截面 SFT 直径为 11.4m (4 汽车道)或 23.0m (4 汽车道,2 火车道),位于水面下 30m 深处。试验结果表明:作用于 SFT 管段上的波浪力中,惯性力是主要部分,拖曳力只有惯性力的 1/4;不同的锚索连接方式对 SFT 的动力响应有很大影响。Kanie 等^[5]用数值方法研究悬浮隧道在规则波作用下的动力响应,把锚索简化为线性的弹簧约束,用 Morison 方程和波浪散射理论分别计算作用于 SFT 上的波浪力及其动力响应,结果表明当悬浮隧道直径与波长之比小于 0.2 时,两种方法所得结果是一致的。

已有的研究中,把锚索简化为线性的弹簧约束,建立 SFT 的回复力矩阵,不考虑 SFT 的运动对回复力矩阵的影响。笔者在分析 SFT 管段的运动时注意到:管段的回复力系数与锚索中的张力以及管段的运动有关。为此,本文利用柔度系数法得到了 SFT 管段六个运动自由度的等效刚度矩阵,并考虑了不同自由度运动之间的耦合作用,在时间域上迭代求解运动方程。文中以日本北海道水中悬浮隧道的概念设计参数为基础,分析了波频、锚索预张力以及不同自由度运动之间的耦合作用对 SFT 动力响应的影响。

2 运动方程

取 SFT 的一节管段,初始状态时 SFT 竖直静浮于水中;视锚索系统为无质量的弹簧,其对 SFT 管段的作用仅考虑锚索轴向刚度的影响;同时假定锚索系统的刚度足够大,在 SFT 管段的运动过程中始终保持平行状态。SFT 管段在几何与质量分布上具有轴对称性,因此取管段的质心为坐标原点,设立总体坐标系,考虑 SFT 管段在六个自由度上的运动,其定义如图 2 所示。

SFT 管段的非线性动力学方程可以写为

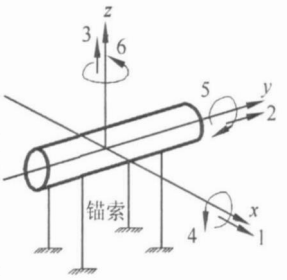
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(x, \dot{x}, t) \quad (1)$$

式中: M 是质量矩阵,包括附加质量; C 是阻尼矩阵; K 是刚度矩阵; F 是外力向量。 x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别是位移、速

度、加速度向量。

2.1 等效刚度矩阵

悬浮隧道管段可视为刚体,将锚索中的张力等效线性化处理,即将锚索视为无质量的弹簧,从而可采用“等效刚度系数”的概念来表征其作用,相应的各个等效刚度系数均可由柔度系数法导出^[6]。



1—横荡 2—纵荡 3—垂荡
4—纵摇 5—横摇 6—首摇

图 2 SFT 的坐标系及六个自由度运动的定义

例如,当在横荡方向给管段一任意位移 x_1 时,锚索中拉力的改变为

$$T_1 = \frac{AE}{L} (\sqrt{x_1^2 + L^2} - L) \quad (2)$$

其中: A 是锚索的截面积; E 是锚索的弹性模量; L 是锚索的初始长度。由 x 方向力的平衡得

$$K_{11} x_1 = 4(T_0 + T_1) \sin \phi_x \quad (3)$$

式中: T_0 是初始时刻锚索中的拉力; ϕ_x 是运动过程中锚索与初始位置的夹角。由 z 方向力的平衡可以得到

$$K_{31} x_1 = 4(T_0 + T_1) \cos \phi_x - 4T_0 \quad (4)$$

由回复力引起的弯矩平衡可得

$$K_{51} = -\frac{1}{2} K_{11} D \sin \phi_x \quad (5)$$

式中: D 是 SFT 管段截面的直径; ϕ_x 的定义如图 3 所示。

同样可以得到其余五个自由度的等效刚度系数表达式

$$K_{22} = \frac{4(T_0 + T_2)}{\sqrt{x_2^2 + L^2}}, \quad K_{33} = \frac{4AE}{L},$$

$$K_{44} = \frac{AE}{L} w^2, \quad K_{55} = \frac{AE}{L} D^2 \cos^2 \phi_x,$$

$$K_{66} = 4(T_0 + T_6) \frac{a^2}{\sqrt{(a_z)^2 + L^2}},$$

$$K_{32} = \frac{4T_0}{x_2} \left(\frac{L}{\sqrt{x_2^2 + L^2}} - 1 \right) + \frac{4T_2}{x_2} \frac{L}{\sqrt{x_2^2 + L^2}},$$

$$K_{42} = -\frac{1}{2} K_{22} D \sin \phi_x,$$

$$K_{36} = \frac{4(T_0 + T_6)}{z} \frac{L}{\sqrt{L^2 + (a_z)^2}} - \frac{4T_0}{z}$$

式中: w 为沿管段轴向锚索之间的距离; a 为坐标原点到锚索与管段连接点之间的水平距离。以上没有给出的等效刚度矩阵中的系数均取零值。从等效刚度系数的表达式可以看到,等效刚度矩阵与结构的位移有关,随着位移的增大,等效刚度系数也发生变化。

横荡振幅有着显著的影响。图 5 中,波浪周期在 9 ~ 13s 内变化时,相应横荡加速度幅值在 $0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}^2$,已经较大,能够为 SFT 中的行人所感知。

表 2 给出了不同波浪周期下,SFT 管段的横荡和垂荡振幅值。SFT 管段的横荡振幅比垂荡振幅大两个量级,这和 SFT 管段的等效刚度系数大小有关,横向等效刚度系数最大值 $K_{11} = 1.94 \times 10^6 \text{ N/m}$,垂向等效刚度系数 $K_{33} = 1.67 \times 10^9 \text{ N/m}$,垂向等效刚度系数远远大于横向等效刚度系数。

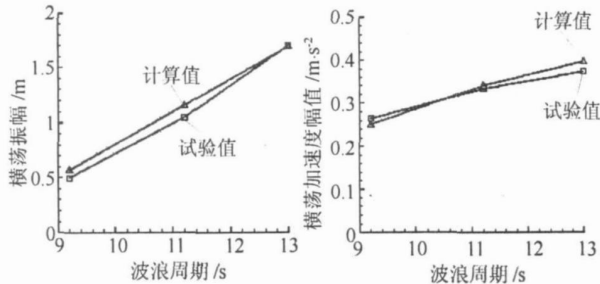


图 4 SFT 管段的横荡振幅

图 5 SFT 管段的横荡加速度幅值

表 2 波浪周期对 SFT 动力响应的影响

波浪周期	9.2s	11.2s	13.0s
响应幅值			
横荡 / m	0.568	1.157	1.689
垂荡 / m	0.010	0.016	0.028

图 6 和图 7 给出了不同锚索预张力情况下 SFT 管段的横荡功率谱曲线,计算时波高 $H = 6.2 \text{ m}$,波浪周期 $T = 13 \text{ s}$ 。从图中可以看到,当预张力较小 ($1.417 \times 10^7 \text{ N}$) 时,SFT 横荡运动有两个振动模态被激发,其频率分别为波频和 $1/2$ 波频。当预张力增大 ($2.834 \times 10^7 \text{ N}$) 时,仅有一个振动模态出现,频率等于波频。从响应的时程曲线可以得到,当锚索中的预张力增大了一倍,SFT 横荡响应的最大位移减小了 65%。SFT 管段的刚度矩阵与锚索中的预张力有关,预张力增大,管段受到的回复力也相应增大,抑制了更多振动模态的激发,从而管段的响应位移减小。

为了考察不同自由度运动之间的耦合作用对 SFT 管段垂荡响应的影响,分别选取两种计算工况:考虑不同自由度运动之间的耦合作用;不考虑不同自由度运动之间的耦合作用,即等效刚度矩阵中只保留对角线上的元素。波高和波周期不变,分别为 6.2 m 和 13 s 。图 8 和图 9 给出了两种计算工况下 SFT 管段的垂荡功率谱曲线。图 8 中两个谱峰对应的频率分别为波频及 2 倍波频,图 9 中谱峰频率等于波频。不同自由度运动之间的耦合作用,使

垂荡运动中的高阶振动模态被激发,相应的响应最大位移值也增大,从响应时程曲线可以得到,垂荡位移极值增加了 133%。因此,在 SFT 的动力响应分析中,如果不考虑不同自由度运动之间的耦合作用,会过低估计垂荡响应的幅值。

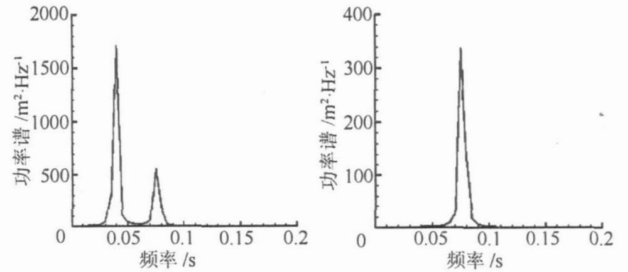


图 6 SFT 管段的横荡功率谱 ($T_0 = 1.417 \times 10^7 \text{ N}$)

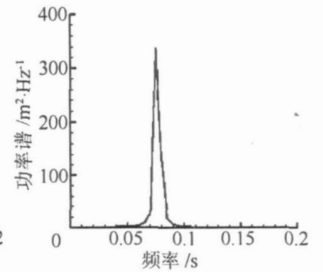


图 7 SFT 管段的横荡功率谱 ($T_0 = 2.834 \times 10^7 \text{ N}$)

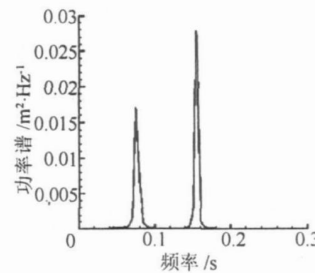


图 8 考虑耦合作用时 SFT 管段的垂荡功率谱

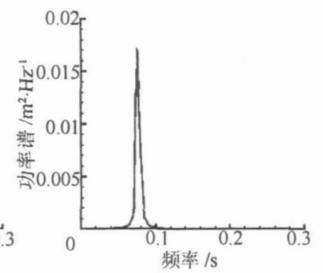


图 9 不考虑耦合作用时 SFT 管段的垂荡功率谱

4 结 论

本文建立了水中悬浮隧道管段动力响应的数学模型,考虑了不同自由度运动之间的耦合作用,在时间域内采用逐步积分法迭代求解管段的非线性动力学方程,通过实例分析得到以下结论。

- 1) SFT 管段在波浪力作用下将产生较大的横荡位移,对其安全性是一个严重的威胁,而垂荡位移很小,比横荡位移小两个量级以上。
- 2) 当入射波幅一定时,横荡和垂荡幅值对于入射波频率十分敏感,随着入射波频率的增加,横荡和垂荡幅值减小。
- 3) 随着锚索中预张力的增大,作用于管段上的回复力增加,SFT 管段的横荡响应幅值减小。
- 4) 在 SFT 的动力响应分析中,如果不考虑不同自由度运动之间的耦合作用,会过低估计垂荡响应的幅值。

参 考 文 献

- [1] Ahrens D. Submerged floating tunnels — A concept whose

- time has arrived[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1997, 12(2):317-336.
- [2] 项贻强,薛静平.水中悬浮隧道在国内外的研究[J].*中外公路*, 2002,22(6):49-52.
- [3] 黄国君,吴应湘,洪友士.跨域水域交通的阿基米德桥[J].*中国造船*,2002,43(增):13-18.
- [4] Kunisu H, Mizuno S, Mizuno Y, et al. Study on submerged floating tunnel characteristics under the wave condition[C]// Chung JS, Natvig BJ, Das BM. Proc of the international offshore and polar engineering conference. Osaka, ISOPE, 1994: 27-32.
- [5] Kanie S, Kokubun H, Mizutani Y, et al. Analytical study on dynamic response of submerged floating tunnels due to wave force [C]// Krokeborg J. Proc 3rd Symposium on Strait Crossings, Symposium on Strait Crossings. Alesund, Rotterdam, 1994: 659-666.
- [6] Jain A K. Nonlinear coupled response of offshore tension leg platforms to regular wave forces[J]. *Ocean Eng*, 1997, 24(7): 577-592.
- [7] Chandrasekaran S, Jain A K. Dynamic behavior of square and triangular offshore tension leg platforms under regular wave loads[J]. *Ocean Eng*, 2002, 29: 279-313.
- [8] Burrows R, Tickell R G, Hames D, et al. Morison wave force coefficients for application to random seas[J]. *Applied Ocean Research*, 1997, 19: 183-199.

www.cnki.net

gular plate with elliptic holes confirms the effectiveness.

Keywords: *elastic plate, bending, holes, stress concentration, conformal mapping change.*

Numerical and Experimental Investigation to Unsteady IGV-Impeller-Diffuser Interaction

Zhou Li¹ Xi Guang² Cai Yuanhu¹

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, 710072, Xi'an, China)¹

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China)²

Abstract : The unsteady IGV-impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor is investigated numerically and experimentally under at different IGV prewhirl angle; and the mechanism of unsteady IGV-impeller-diffuser interaction is explored. Results show that the maximum unsteadiness appears at the interface between impeller and vaneless diffuser. When the IGV prewhirl occurs, the basic frequency of the unsteady flow in the vaneless diffuser is demonstrated as the blade passing frequency of the impeller or the half; when the stagger angle of the diffuser is increased, the basic frequency is dominated by the half of the blade passing frequency. The turbulence intensity and unsteady intensity increase toward the hub, and tend violently when IGV prewhirl angle of 60° matches with the diffuser stagger angle of 17°.

Keywords: *IGV, impeller, diffuser, prewhirl angle, unsteady intensity.*

Nonlinear Response of Submerged Floating Tunnel to Wave Forces

Ge Fei Hui Lei Hong Youshi

(State Key Lab. of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, 100080, Beijing, China)

Abstract : Dynamic response of submerged floating tunnel due to regular wave forces is investigated. The equivalent stiffness coefficients are derived with softness factor method, and the dynamic model of submerged floating tunnel is presented considering the coupling among various degrees-of-freedom. The nonlinear motion equation is solved in the time domain by step-by-step integration scheme. The wave forces on the tunnel tube are calculated following Airy linear wave theory and Morison equation. The simulated results show that surge response is much more remarkable than responses in the other degrees-of-freedom under wave condition. As the wave frequency or the tether pretension decreases, response amplitudes increase. The heave response may be highly underestimated if the coupling effect among various degrees-of-freedom is ignored in the submerged floating tunnel response analysis.

Key words : *submerged floating tunnel, dynamic response, step-by-step integration, coupling, Archimedes bridge.*