第 20 卷 第 4 期
2007 年 7 月

中 国 公 路 学 报
China Journal of Highway and Transport

Vol. 20 No. 4
July 2007

文章编号:1001-7372(2007)04-0101-07

水中悬浮隧道研究进展

董满生,葛 斐,惠 磊,洪友士
(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室,北京 100080)

摘要:介绍了各国关于水中悬浮隧道的研究进展,主要包括:波浪和水流作用下水中悬浮隧道与流体相互作用的理论分析模型,波浪环境下水中悬浮隧道的锚固系统的涡激振动数值分析,地震激励下水中悬浮隧道的动力响应分析,水中悬浮隧道的结构问题,针对实际工程背景的波浪环境载荷下的模型试验及水流环境中水中悬浮隧道阻力系数、惯性力系数的试验研究。最后讨论了水中悬浮隧道尚需要进一步研究的问题:荷载的确定,结构分析和设计方法,针对性的模型试验,安全性研究等。

关键词:隧道工程;水中悬浮隧道;综述;流固耦合;涡激振动
中图分类号:U459.9 **文献标志码**:A

Research Progress in Submerged Floating Tunnels

DONG Man-sheng, GE Fei, HUI Lei, HONG You-shi
(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: Authors mainly summarized the research progress on submerged floating tunnel (SFT) at home and aboard in following four aspects: under the environment of water wave and current, the theoretical analysis model of interaction for SFT and under water wave, numerical analysis of the vortex induced vibration of anchoring system for SFT, dynamical response analysis of SFT due to seismic effect were studied. Structures of SFT, model tests on SFT for practical engineering under environmental loads of water wave and tests for drag coefficient and inertial coefficient of SFT under water current environment should be studied. Finally, some problems existed in submerged floating tunnel in the future were discussed, ie determining of load, structural design and analysis method, corresponding model test and safety research.

Key words: tunnel engineering; submerged floating tunnel; summarization; coupling of fluid and solid; vortex induced vibration

0 引 言

水中悬浮隧道(Submerged Floating Tunnel, SFT),又称阿基米德桥,是一种悬浮在水面下方的通道,通道管体可以由金属结构或钢筋混凝土结构构成,通常有 3 种固定形式:由立柱支撑,由张力腿(缆索或钢管构成)固定在水底,由水面浮箱撑托。

对于那些由于环境的限制使得水域不可能跨越的地方,SFT 提供了跨越的可能性。对于宽且深的水域,传统的跨越选择包括:悬索桥、斜拉桥和浮桥以及沉管隧道、水底隧道等。所有这些选择的工程造价和交通运输成本都随跨越宽度和深度的增加而急剧增加。对于 SFT,随着水域的宽度和深度的增加,单位长度造价增加并不显著,这使 SFT 在未来的应用具有竞争力。

SFT 的结构原理在很多方面类似于沉管隧道,

收稿日期:2006-11-05
基金项目:国家自然科学基金重点项目(10532070)
作者简介:董满生(1973-),男,安徽安庆人,工学博士,E-mail:dongmans@sohu.com。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

同时与沉管隧道也有许多不同,其中一个很重要的差异是 SFT 在水中间,有一定的自由度。动力行为和疲劳在 SFT 的设计中需要重点考虑,而沉管隧道则不需要在这方面专门考虑[1-3]。

SFT 从概念到可行性概念设计是在最近 30 a 内完成的[4],其概念涉及市政工程、船舶工程和海岸工程技术。对于近海城市,SFT 是极具发展前景的一种交通设施。20 世纪 60 年代意大利、挪威的相关学者就开始研究 SFT,早期研究主要集中在 SFT 的可行性方面。实质性的研究从 20 世纪 90 年代初的概念设计和模型试验开始。

本文中笔者从 SFT 流固相互作用、SFT 对地震激励的动力响应、SFT 结构设计及模型试验等方面介绍 SFT 的研究进展,并讨论 SFT 尚需进一步研究的问题。

1 波流环境下 SFT 流固相互作用

关于波流作用下 SFT 的动力响应研究,Remseth 和 Brancaleoni 等[5-6]的工作比较有代表性。前者分析风浪作用下 SFT 的全局动态响应,用基于 Navier-Stokes 方程的有限元方法计算规则波作用下二维模型的水动力。后者提出环境载荷下完整的工程分析程序,从而避免了大量繁琐的计算。中国科学院力学研究所对于波浪环境下张力腿定位 SFT 动力行为进行了数值分析研究。这里主要介绍文献[5]和文献[6]中的分析方法。

1.1 动力平衡方程

荷载和响应随机过程的关系可以用运动的半离散方程来描述

$$R^I + R^D + R^S = Q \tag{1}$$

$$R^I = R^I(\ddot{r}, t) = \int_0^{+\infty} M(t-\tau)\ddot{r}\,d\tau \tag{2}$$

$$R^D = R^D(\ddot{r}, \dot{r}, r, t) = \int_0^{+\infty} C_T(\dot{r}, r, t-\tau)\dot{r}\,d\tau \tag{3}$$

式中:R^I 为惯性力向量;R^D 为阻尼力向量;R^S 为内力向量;Q 为外力向量;M 为质量矩阵;r 为位移向量;$\ddot{r}$ 为加速度向量;t 为时间变量;$\dot{r}$ 为速度向量;C_T 为阻尼矩阵。

质量矩阵包括结构质量和附加水质量,后者与振动频率有关。同样,阻尼矩阵也包括与频率有关的水力项和与结构相关的常数项。现有研究中忽略质量矩阵、阻尼矩阵中与频率相关的项。在平衡方程中这项卷积积分消失,从而得出简化形式。对于运动方程时间积分,用增量形式表达较为方便

$$M\Delta\ddot{r}(t) + C_T\Delta\dot{r}(t) + K_T\Delta r(t) = \Delta Q(t) \tag{4}$$

式中:Δ 为对时间的增量算子。

1.2 流固相互作用的 Navier-Stokes 模型

SFT 的动力特性可以通过考虑流体、固体及流固相互作用的计算工具来捕捉。这里以直管状悬浮隧道为例,介绍基于 Navier-Stokes 方程的有限元分析方法。模型为受定常流和规则波作用的圆柱体,只在管体两端设支撑。采用 ALE 方法来分析流体动力,允许有限元网格运动与流体质点运动无关。

模型的几何形状如图 1 所示,按二维问题求解。流固耦合的有限元模型由以下 3 个部分组成:①采用不可压缩的 Navier-Stokes 方程求解的流体域;②非线性弹性的固体域;③流固界面。

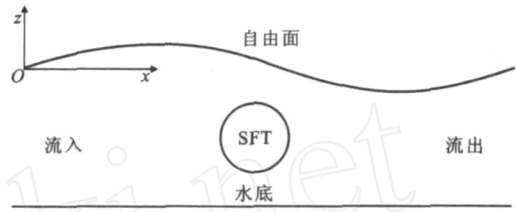

图 1 简化模型

Fig. 1 Simplified Model

1.2.1 不可压缩的 Navier-Stokes 方程的求解

不可压缩的 Navier-Stokes 方程在时间和空间上用谱方法求解,用隐式有限元方法和 Newmark 时间积分。在每个时间步上得到一组非线性代数方程组,采用准牛顿法求解。

流体域的边界条件采用节点边界条件,具体如下:①流入边界条件为 $u_x = u_c + u_w(z,t)$, $u_z = w_w(z,t)$ 和 $d_x^{ALE} = 0$;②流出和自由面边界条件为 $d_x^{ALE} = 0$;③底边边界条件为 $u_z = 0$, $d_x^{ALE} = 0$ 和 $d_z^{ALE} = 0$;④波的激励节点处 $(x = z = 0)$, $d_z^{ALE} = d_z^w(z,t)$。这里 u_c 为流速,$u_w(z,t)$ 和 $w_w(z,t)$ 为根据线性波理论计算的流入边界流体质点流速,d_x^{ALE} 和 d_z^{ALE} 为 ALE 网格位移,$d_z^w(z,t)$ 为流体质点竖向流速。

单元边界条件:①流出边界条件中压力 p 和切向力由内部定义;②自由表面 $p = 0$, $u_n^{ALE} = u_n$。内部定义是指从边界上的解求得边界条件的值。自由表面条件 $u_n^{ALE} = u_n$ 表明网格的法向速度等于流体速度法向分量。

1.2.2 固体域参数确定

SFT 可看作两端固支的 y 方向梁,梁断面呈圆环形,半径为 D,壁厚为 t'。对二维问题,梁可以简化为质量 M 为 $\rho_w A_w L$ 的 2 个自由度系统,A_w 为断面面积,L 为结构长度。全局弯曲刚度用 2 个弹簧

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表示,如图 2 所示。梁用实体单元或壳单元模拟。

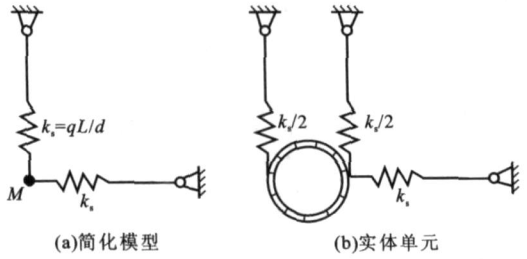

图 2　SFT 计算模型

Fig. 2　Calculation Model of SFT

Remseth 等在文献[5]中用 16 个实体单元模拟梁断面,见图 2(b),为了防止圆形截面绕中心轴转动,垂直弹簧用 2 个相对位置的杆单元模拟。

1.2.3　流固界面条件

通过定义流固两域的圆柱形界面将两域的自由度联系在一起,定义时要保证 2 个域在界面上节点的连续性。具体界面条件如下:①流体域界面上的节点对应固体域固定位置,忽略 2 个域不同离散水平带来的空隙;②界面上速度无滑移条件,即 $u^f = u^s$;③界面上网格无滑移条件,即 $d^{ALE} = d^s$。速度和网格条件可以通过 Lagrangian 乘子加上去。

1.3　SFT 锚固系统的涡激振动

在海洋环境中,SFT 的锚固系统极有可能发生涡激振动。董艳秋[7]较早研究了海洋平台张力腿的涡激振动。她将张力腿简化为简支梁,考虑微幅波和线性分布的不均匀流,采用伽辽金法和四阶龙格-库塔法计算,给出了一些重要结论。在董艳秋的工作基础上,麦继婷等[8]研究了水中悬浮隧道张力腿的涡激振动。笔者考虑隧道振动对张力腿的激励[9],在前人研究的基础上进一步研究张力腿的涡激振动,发现考虑隧道对张力腿的激励影响时,锚索顺流向涡激振动的振幅明显大于不考虑外激励影响时的振幅,而且当强迫激励和参数激励同时存在时,2 种激励之间的相互作用使涡激振动的振幅明显增大。以上张力腿涡激振动研究中的张力腿均垂直于水平面,实际工程中张力腿往往并不垂直于水平面,需要考虑波流作用下倾斜张力腿的涡激振动。

2　地震激励下 SFT 的动力响应

Kiyokawa 等[10]考察了流体的压缩性对地震力的影响,给出压缩流体的波势理论,并说明在深水和高频下,水的压缩性对流体力有很大影响。Morita 等[11]基于二维波势理论,即格林函数方法,考虑水的压缩性,用数值模拟分析垂直地震激励下 SFT 的动力响应,结果表明:震动频率大于 1 Hz 时流体的压缩性不能忽略。Fogazzi 等[12]考虑流体与结构耦合、结构与土耦合,给出了缆索固定式悬浮隧道对地震响应的有限元分析程序。

这里以二维问题为例,介绍地震激励下 SFT 的动力响应分析方法。假设满足以下条件:①流体可压缩、无黏性,流体运动为无旋运动;②地震和结构运动与 SFT 尺度相比是小量;③水底平动;④忽略表面波影响。

流体运动可用速度势函数 Φ 来描述,笛卡儿坐标如图 1 所示。势函数满足

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + k^2 \Phi = 0 \tag{5}$$

式中:$k = \omega / c$,c 为水中声速。

在水面运动时

$$\Phi = 0 \tag{6}$$

在水底运动时

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -v_0 \tag{7}$$

式中:v_0 为海底运动速度。

在结构表面运动时

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = -\frac{\partial X_1(x_s, z_s)}{\partial t} n_x - \frac{\partial X_2(x_s, z_s)}{\partial t} n_z - \frac{\partial X_3(x_s, z_s)}{\partial t}(x_s n_z - z_s n_x) \tag{8}$$

式中:n 为结构表面点 (x_s, z_s) 的单位法向量,$n = (n_x, n_z)$;X_1、X_2、X_3 分别为纵移、起伏、俯仰位移。

地震波的波长远大于水和结构的位移,因此可将上述问题分解为绕射问题和辐射问题进行研究。速度势函数 Φ 可表示为

$$\Phi = (\phi_0 + \phi_D + \phi_R) e^{-i\omega t} \tag{9}$$

式中:ϕ_0 为海床运动所产生的入射波势;ϕ_D 为绕射波势;ϕ_R 为辐射波势。入射波势满足式(5)～(7),可表示为

$$\phi_0 = \frac{v_0 \sin kz}{k \cos kh} \tag{10}$$

绕射波势和辐射波势的边值问题可由式(5)～(8)确定。对于具有对称断面的结构,如圆管形,绕射波势和辐射波势满足式(11)～(14)

$$\frac{\partial^2 \phi_D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_D}{\partial z^2} + k^2 \phi_D = 0 \text{ 或 } \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial z^2} + k^2 \phi_R = 0 \tag{11}$$

在水面运动时

$$\phi_D = 0 \text{ 或 } \phi_R = 0 \tag{12}$$

在水底运动时

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial \phi_R}{\partial z} = 0 \tag{13}$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在结构表面运动时

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\Phi_D}{\partial n} &= -\frac{\partial\Phi_I}{\partial n} = -n_z v_0\frac{\cos kz}{\cos kh} \equiv g_D\\ \frac{\partial\Phi_R}{\partial n} &= -\frac{\partial X_2}{\partial t}n_z = -i\omega n_z \equiv g_R\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

采用格林函数来表述式(11)～(14)的解,用线积分的形式给出流体域的势。考虑流体压缩性的格林函数 G 的求解可参照 Kiyokawa 等的研究。格林函数包含一些奇异函数,要准确积分奇点周围需要专门的方法,如 Nakamura 等[13]针对表面波结构相互作用提出的方法。

获得了速度势 Φ,就可以进一步分析地震激励下 SFT 的动力行为。

3 SFT 的结构

关于 SFT 结构研究的文献很少,笔者提出了 3 种 SFT 结构,已申报专利[14-16],并结合交通对公路线形的要求提出空间曲线形水中悬浮隧道[17]构思。目前笔者已完成静水环境下曲线形 SFT 的结构内力及温度变化所引起的结构内力变化的分析,研究结果表明,由温度升高导致隧道膨胀(或收缩)所产生的轴向力很小,主要是径向力,同时还会产生扭矩和弯矩。影响曲线形 SFT 温度内力的因素复杂,主要影响因素为张力腿弹簧系数、隧道曲率半径、截面抗弯刚度及圆心角。对该曲线形 SFT,当张力腿弹簧常数大于 2.4×10^8 N·m^{-1},隧道的圆心角大于 0.6 rad 时,将会产生较大的温度内力,SFT 设计时需要考虑这方面影响。笔者目前正在进行波流环境下曲线形 SFT 动力行为的研究。

4 模型试验

SFT 作为一个新型结构,在实施之前,进行不同缩比的模型试验很有必要,目前日本学者在这方面做了一些工作。他们的研究主要集中在水流作用下 SFT 的动力模型试验,在波浪荷载下的模型试验研究相对比较少,只有 Kunisu 等[18]针对北海道波浪环境做了 SFT 动态特性的试验研究。

在水流作用下 SFT 的动力模型试验方面,Katta 等[19]的研究工作比较有代表性,其针对两端柔性固定的 SFT 模型,通过试验研究了震荡拖力和震荡升力作用下模型的响应。

4.1 波环境下的模型试验

现介绍 Kunisu 等的工作。原型环境:日本的北海道 Funkawan 海湾,水域宽 34 km,最大水深 100 m,有效波高 9.3 m,有效波周期 13.0 s。圆形截面 SFT 直径:11.4 m (4 汽车道) 和 23.0 m (4 汽车道、2 火车道)。张力绳锚固定位,具体见图 3。

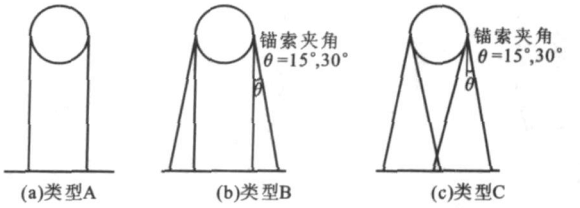

图 3 SFT 的锚固形式

Fig. 3 Anchoring Types of SFT

试验条件:二维不规则波槽,长 50 m,宽 5 m,深 3 m。根据 Froude 准则,模型试验比例尺采用 1/62.16。SFT 模型采用密封的有机玻璃圆管。

试验工况如表 1 所示。试验测量了管体的加速度、压力、管体上方波高以及缆索张力。

对于直径 23.0 m,波高 6.2 m,重浮比 0.71 的 SFT,其动力行为特征如下:A 型和 B 型的加速度与波周期成反比;观察到 A 型模型的最大加速度为 0.4 m·s^{-2},C-15 型模型为 0.1 m·s^{-2},B-30、C-30 型模型为 0.02 m·s^{-2};桥体的位移特性类似于加速度特性。SFT 加速度最大允许值为0.1 m·s^{-2},因此只有 C-30 型 SFT 满足加速度要求。

当重浮比为 0.76,波高大于 10 m 时,缆索的张力突然变化。如果没有足够的浮力,当波峰经过 SFT 上方时,向下的波力将大于桥体富余浮力。波浪力使缆索张力消失,通常称缆索松弛。当波谷经过 SFT 时,向上的波力将发挥作用,使张力突然增大。因此在设计阶段考虑避免缆索松弛很重要。

试验结果表明:拖曳力只有惯性力的 1/4,SFT 的重浮比对桥体的稳定性至关重要,波浪对 SFT 的作用力由惯性力控制。试验没有观察到流体的漩涡脱落,SFT 的波浪力可作为绕射问题来计算。

4.2 水流环境下的模型试验

Katta 等的试验在能产生单向流的循环水槽中进行,水槽长为 6 m,宽为 2 m,深为 1 m,最大流速 2 m·s^{-1}。试验模型采用聚氯乙烯管,直径 75 mm,长 200 mm。

为记录管体的运动,模型的中心轴设置一杆件,杆的两端装上直径220 mm的压克力板,一个板上沿径向等间距设置 8 个点。模型通过两端弹簧组固定,弹簧刚度见表 2。整个模型设计概念见图 4。

试验的流速从 0.1 m·s^{-1}到 1.2 m·s^{-1},间隔 0.1 m·s^{-1}。低流速时,模型静止不动,流态为层流,在模型的下游方向产生规则的漩涡。随着流速

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　试验工况

Tab. 1　Case of Experiments

固定类型	缆索角度/ (°)	重浮比	直径/ m	波周期/ s	波高/ m
A	0	0.76 ,0.71		9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3 ,12.4 ,15.5 ,18.6
B-15	15	0.71	23.0	9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2
B-30	30	0.76		9.0 ,11.0	6.2
		0.71	11.4 ,23.0	9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3
		0.51		9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3 ,12.4
C-15	15	0.71	23.0	9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2
C-30	30	0.76 ,0.71		9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3 ,12.4
		0.66		9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3 ,12.4 ,15.5
		0.61 ,0.56		9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3 ,12.4 ,15.5 ,18.6
		0.51	11.4 ,23.0	9.0 ,11.0 ,13.0 ,15.0	6.2 ,9.3 ,12.4 ,15.5 ,18.6

表 2　试验弹簧刚度

Tab. 2　Rigidity of Test Springs

模型编号	刚度比($k_x \cdot k_y^{-1}$)	固有周期/ s	
		水平	竖直
1	1	0.838	0.838
2	2	0.665	0.741
3	3	0.562	0.684
4	4	0.503	0.627

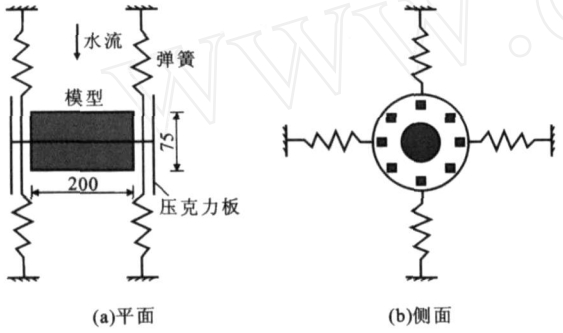

图 4　试验模型(单位 :mm)

Fig. 4　Test Model (Unit :mm)

逐渐增大 ,涡产生的升力和阻力开始影响模型的运动 ,导致流固相互作用。当涡激频率接近结构的固有频率时 ,这个影响尤为显著。随着流速进一步增加 ,流态演变成湍流 ,涡随机产生 ,模型随机振动。

由于流体拖曳力随流速增大而加大 ,水平位移随之增大。升力波动和垂直位移变化受流态和强流固相互作用影响 ,变得很复杂。当涡激频率接近模型的固有频率时 ,垂直位移对应流速有一个峰值。Katta 等的试验表明 ,在较大的流速范围(0.5～0.9 m ·s^{-1})内 ,涡激频率锁定固有频率 ,在这些流速下漩涡脱落和模型振动相互作用。

5　SFT 研究展望

现行规范没有涉及 SFT ,迫切需要建立关于这方面的一系列标准 ,例如 ,结构方案的选择 ,材料选择 ,力学模型的建立 ,环境作用的评估 ,计算方法的规定 ,施工阶段分析 ,运行过程的监控等。当然 ,其中相当一部分可以参照类似结构工程的经验 ,如船舶、海岸工程。尽管有很多技术可借鉴 ,但仍有不少领域需要研究。这里列出亟需解决的问题。

(1) 荷载的确定。不同的环境条件下 ,分析应力、动力响应是很有必要的。在分析中 ,一个重要主题是确定荷载。荷载研究包括环境荷载、结构的恒载、压舱荷载、施工荷载、交通活载和偶然荷载的研究。环境荷载包括流、波、潮汐以及地震等产生的荷载 ,偶然荷载如碰撞力、爆炸力、火灾等。目前波浪载荷分析研究主要针对设计波 ,而这种分析方法不够充分 ,分析应该基于随机方法。

(2) 结构分析和设计方法。结构分析包括线性和非线性情况下的静力和动力分析。由于 SFT 跨度较大 ,结构系统表现出一定的柔性 ,在波载、漩涡脱落、地震、火车通行时这些交变荷载作用下将产生振动 ,需要研究这些交变荷载作用下结构的动力学特性 ,以通过动力学设计避免涡激振动时的频率锁定及波浪、地震作用时的共振现象 ,从而控制最大振幅和加速度。目前还没有系统提出 SFT 的设计方法 ,主要的参考是海岸工程和沉管隧道 ,这些结构的经验的汇集很重要。像其他结构一样 ,SFT 设计也应该基于不同荷载期望组合 ,在海洋工程中 ,可接受的设计方法通常基于半概率极限方法 ,在荷载和材料强度方面采用一定的安全系数。分析验算可服役极限状态(SLS)、最大极限状态(ULS)、破坏极限状态(PLS)以及疲劳极限状态(FLS)的受力和变形。

(3) 针对性的模型试验。以下情况时需要做模型试验 : ①隧道外形异常复杂以致理论上不能准确描述所受荷载 ,如波或潮汐流对 SFT 的作用 ; ②流

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

或结构的非线性使得线性计算方法不可靠,如波浪冲击桥体、张力腿的运动,冲击载荷尽管不一定是非线性的,通常还是用模型试验来研究;③多种不同现象同时出现,尽管每个现象单独可解,但混合出现往往就不可解,如波、潮汐、地震联合作用下的 SFT 动力行为;④还没有比较成熟的计算方法,如流和波作用下的漩涡脱落。

(4)安全性研究。研究表明:SFT 要求的安全水平和类似结构(如桥梁)相同,SFT 的失效概率与其他形式跨越的失效概率量级相同[20-22]。尽管如此,从安全角度考虑,有必要给出这些荷载规定和合理的处理方法。如必须考虑船舶、潜艇碰撞的安全性,管体内部或外部爆炸,部分浮力损失,支撑系统破坏等情况下的安全性。此外,隧道内的通风也是值得关注的问题[23-25]。以前的 SFT 概念设计都考虑把安全通道设在隧道内部,发生事故时安全通道也并不安全。可以说目前并没有很好地解决发生意外事故时的安全逃生问题。中国科学院力学研究所阿基米德桥课题组最近提出在隧道之外设置安全逃生装置,能较好地解决安全逃生问题。

(5)施工方法。从类似工程项目的经验来看,如近海工程,设计和施工不能割裂,SFT 的可行性研究必须考虑可能的施工方法。SFT 的主体隧道一般采用预制隧道管段,而后运至施工现场,定位和锚固,同时将不同的节段用连接装置连接起来。SFT 的施工在很多方面类似于沉井隧道,然而有个显著的不同是,缆索系统的支撑比沉井隧道中地基支撑要弱得多,在桥体对接时需要重点考虑这点。

6 结 语

SFT 作为新兴事物,目前尚未得到社会各阶层的普遍认可。这是因为:①悬浮在水中易使人产生不安全感;②海洋环境恶劣,SFT 结构长细比大,一些关键工程力学问题及施工技术没有解决。随着社会、科技的发展,相信不久的将来 SFT 必将出现,成为基础交通设施的重要组成部分。

参考文献:

References:

[1] 黄国君,吴应湘,洪友士. 跨越水域交通的阿基米德桥[J]. 中国造船,2002,43(增):13-18.
HUANG Guo-jun, WU Ying-xiang, HONG You-shi. Transportation of Crossing Waterways via Archimedes Bridge[J]. Ship Building of China, 2002, 43(S): 13-18.

[2] 项贻强,薛静平. 悬浮隧道在国内外的研究[J]. 中外公路,2002,22(6):49-52.
XIANG Yi-qiang, XUE Jing-ping. Research on Submerged Floating Tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2002, 22(6): 49-52.

[3] 王梦恕,皇甫明. 海底隧道修建中的关键问题[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):1-4.
WANG Meng-shu, HUANGFU Ming. Key Problems on Subsea Tunnel Construction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 1-4.

[4] AHRENS D. Submerged Floating Tunnels - a Concept Whose Time Has Arrived[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, 12(4): 317-336.

[5] REMSETH S, LEIRA B J, OKSTAD K M, et al. Dynamic Response and Fluid/Structure Interaction of Submerged Floating Tunnels[J]. Computers and Structures, 1999, 72(3): 659-685.

[6] BRANCALEONI F, CASTELLANI A, ASDIA P. The Response of Submerged Tunnels to Their Environment[J]. Engineering Structures, 1989, 11(1): 47-56.

[7] 董艳秋. 波、流联合作用下海洋平台张力腿的涡激非线性振动[J]. 海洋学报,1994,16(3):121-129.
DONG Yan-qiu. Vortex-induced Nonlinear Vibration of Tension Legs for Offshore Platform Under Combined Wave-current Effect[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(3): 121-129.

[8] 麦继婷,罗忠贤,关宝树. 流作用下悬浮隧道张力腿的涡激动力响应[J]. 西南交通大学学报,2004,39(5):600-604.
MAI Ji-ting, LUO Zhong-xian, GUAN Bao-shu. Vortex-induced Dynamic Response of Tension Legs for Submerged Floating Tunnel Under Current Effect[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(5): 600-604.

[9] 葛 斐,董满生,惠 磊,等. 水中悬浮隧道锚索在波流场中的涡激动力响应[J]. 工程力学,2006,23(增):217-221.
GE Fei, DONG Man-sheng, HUI Lei, et al. Vortex-induced Vibration of Submerged Floating Tunnel Tethers Under Wave and Current Effects[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S): 217-221.

[10] KIYOKAWA K, INADA Y. Analysis of Hydrodynamic Force Acting on Submerged Structures During Earthquakes[J]. Proceedings of Coastal Engineering of Japan, 1990, 37(1): 639-643.

[11] MORITA S, YAMASHITA T, MOZIMP Y, et al.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Earthquake Response Analysis of Submerged Floating Tunnels Considering Water Compressibility [C]// ISOPE. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka: ISOPE, 1994: 20-26.

[12] FOGAZZI P, PEROTTI F. Dynamic Response of Seabed Anchored Floating Tunnels Under Seismic Excitation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(3): 273-295.

[13] NAKAMURA T, NAKAYAMA K. Two-dimensional Water Wave Problems Around a Body by Source Distribution Method [J]. Proceedings of Coastal Engineering of Japan, 1982, 29(1): 462-466.

[14] 董满生, 洪友士, 葛　斐, 等. 浮托式观光阿基米德桥: 中国, 200410034159. 1[P]. 2005-05-04.
DONG Man-sheng, HONG You-shi, GE Fei, et al. Sightseeing Archimedes Bridge by Supporting at Both Ends: China, 200410034159. 1[P]. 2005-05-04.

[15] 洪友士, 董满生, 葛　斐, 等. 环岸型阿基米德桥: 中国, 03209574. 0[P]. 2004-09-15.
HONG You-shi, DONG Man-sheng, GE Fei, et al. Archimedes Bridge of Encircling-shore: China, 03209574. 0 [P]. 2004-09-15.

[16] 洪友士, 李　岐, 姜俊成, 等. 带有防护外壳的阿基米德桥: 中国, 03209319. 5[P]. 2006-07-26.
HONG You-shi, LI Qi, JIANG Jun-cheng, et al. Archimedes Bridge with Defending Shell: China, 03209319. 5[P]. 2006-07-26.

[17] 董满生, 葛　斐, 洪友士. 曲线形水中悬浮隧道的温度内力研究[J]. 工程力学, 2006, 23(增): 21-24.
DONG Man-sheng, GE Fei, HONG You-shi. Analysis of Thermal Internal Forces for Curved Submerged Floating Tunnel[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (S): 21-24.

[18] KUNISU H, MIZUNO S, MIZUNO Y, et al. Study on Submerged Floating Tunnel Characteristics Under the Wave Condition[C]// ISOPE. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka: ISOPE, 1994: 27-32.

[19] KATTA V, SUSUMU Y, SHOZO T, et al. Current-induced Vibrations of Submerged Floating Tunnels [C]// ISOPE. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Los Angeles: ISOPE, 1996: 111-118.

[20] 俞茂宏, ODA Y, 盛　谦, 等. 统一强度理论的发展及其在土木水利等工程中的应用和经济意义[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 24-41.
YU Mao-hong, ODA Y, SHENG Qian, et al. Development of Unified Strength Theory and Its Applications in Civil Engineering and Its Economic Significance [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 24-41.

[21] 宝　华, 董小坤. 建筑与可持续发展探讨[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 86-89.
BAO Hua, DONG Xiao-kun. Discussion of Architecture and Sustainable Development[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 86-89.

[22] 贺拥军, 周绪红, 刘永健, 等. 超大跨度巨型网格结构[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 25-29.
HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, et al. Super-span Reticulated Mega-structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 25-29.

[23] 刘　静, 俞炳丰, 高振生. 低温送风系统的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 70-74.
LIU Jing, YU Bing-feng, GAO Zhen-sheng. Study Progress of Cold Air Distribution Systems[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 70-74.

[24] 胡宇峰, 陆志良. 汽车隧道内气流及污染问题研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 109-113.
HU Yu-feng, LU Zhi-liang. Ventilation and Pollution Characteristics of Vehicle Tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 109-113.

[25] 陈建勋, 杨　忠, 袁雪戡. 秦岭终南山特长公路隧道大埋深段施工监测及分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(3): 71-75.
CHEN Jian-xun, YANG Zhong, YUAN Xue-kan. Construction Monitoring and Measuring in Segments of Large Embedded Depth in Qinling Zhongnanshan Super-long Highway Tunnel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 71-75.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net