

文章编号: 1000-4750(2006)Sup.I-0021-04

曲线形水中悬浮隧道的温度内力研究

*董满生, 葛 斐, 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: 采用混合法研究张力腿定位的曲线形水中悬浮隧道的温度内力。分析表明, 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。通过数值实验给出张力腿的水平径向力与张力腿弹簧系数、隧道曲率半径、截面抗弯刚度及圆心角之间的变化关系。计算结果表明温度内力变化复杂, 两组张力腿温度内力此消彼长。

关键词: 水中悬浮隧道; 温度内力; 混合法; 阿基米德桥; 张力腿

中图分类号: U459; O34 文献标识码: A

ANALYSIS OF THERMAL INTERNAL FORCES FOR CURVED SUBMERGED FLOATING TUNNELS

*DONG Man-sheng, GE Fei, HONG You-shi

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Using mixed method, temperature induced internal forces of a curved submerged-floating tunnel (SFT) supported by tension legs were investigated. The analysis indicated that axial forces were far smaller than radial forces, which were produced by temperature changes, and bending moment and torsional moment of SFT were produced by thermal forces of tension legs. Numerical test for the Qian-dao Lake case gave the relation that the radial force of tension legs varied with spring constant of tension legs, flexural rigidity, curvature radius and central angle of SFT. The results showed that one of temperature induced internal forces of two groups of tension legs were increasing, but the other were decreasing when one of foregoing factors changed. In the design of curved SFT, the influence of internal forces by temperature changes needs to be considered.

Key words: submerged floating tunnel (SFT); thermal force; mixed method; Archimedes bridge; tension leg

水中悬浮隧道(Submerged Floating Tunnel 简称 SFT), 又称阿基米德桥, 是一种悬浮在水面下方的隧道。SFT 主要由金属结构或混凝土结构构成, 是一种新的跨越水域概念。SFT 通常有三种固定形式: (1) 由立柱支撑, 见图 1(a); (2) 由张力腿(缆索或钢管构成)固定在水底, 见图 1(b); (3) 由水面浮箱撑托, 见图 1(c)。SFT 从概念到可行性概念设

计在最近三十年内完成^[1-3], 目前世界上还没有一个建成的 SFT, 仍处于理论和实验研究阶段, 国际工程界和学术界都对此非常关注。

Brancaleoni 等^[4]最早提出环境载荷下的 SFT 工程分析程序。Remseth 等^[5]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。

收稿日期: 2005-05-18; 修改日期: 2005-09-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10532070)资助

作者简介: *董满生(1973), 男, 安徽人, 博士生, 从事水中悬浮隧道研究(E-mail: dongms@lnm.imech.ac.cn);

葛 斐(1980), 男, 安徽人, 博士生, 从事水中悬浮隧道研究;

洪友士(1951), 男, 福建人, 研究员, 博士, 中科院力学所所长, 从事水中悬浮隧道及材料力学性能研究。

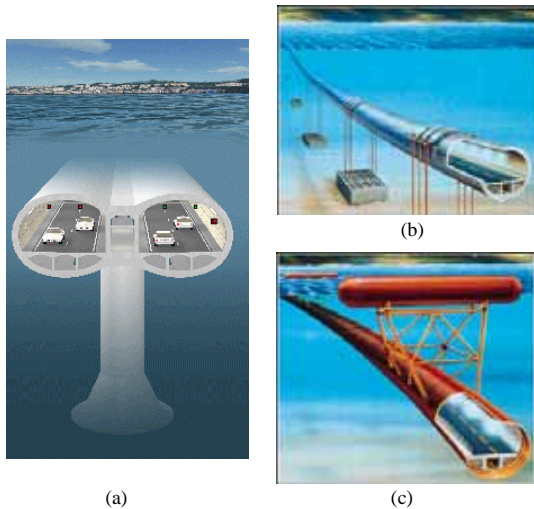


图1 水中悬浮隧道结构示意图

Fig.1 A sketch for Submerged Floating Tunnel

Kiyokawa 等^[6]和 Janaka^[7]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。他们的研究表明,深水和高频下,水的压缩性对流体力有很大影响。Morita 等^[8]基于二维波势理论,即格林函数方法,考虑水的压缩性,数值模拟分析垂直地震激励下 SFT 的响应,结果表明震动频率大于 1 赫兹时流体的压缩性不能忽略。Fogazzi 等^[9]考虑流体与结构耦合、结构与土耦合,给出缆索固定式悬浮隧道对地震响应的有限元分析程序。

有限的模型试验研究主要来自日本, Kunisu 等人^[10]针对北海道波浪环境作试验分析 SFT 动态特性。Nishio 和 Incecik^[11]也做了均匀流作用下的 SFT 模型实验,测量震荡圆柱体的水动力,得出流场震荡频段范围和力的关系。

目前研究的对象基本上是平面直线形,对于平面曲线形未有涉及。浙江千岛湖有意建造水中悬浮观光隧道,其中一种方案是水中曲线形 SFT,张力腿定位,隧道顶部位于最低水位以下 2 米左右,主体采用混凝土箱梁。隧道受四季温度变化影响,本文针对该方案分析温度变化产生的结构内力。

1 曲线形水中悬浮隧道的温度内力

1.1 一般曲线梁的温度变形

温度变化和混凝土收缩(或膨胀)所引起在平面内的位移属于弧段膨胀或缩短性质的位移,涉及到弧段的半径变化而圆心角不变,即 $r_0 \rightarrow r$, 而 $\varphi_0 = \varphi$, 见图 2(图中的不动点在桥的左侧)。不难看出: $r = r_0(1 + \varepsilon)$, $\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t$, 位移为

$$\delta = 2(r - r_0) \sin \frac{\varphi_0}{2} \quad (1)$$

式中: α 为混凝土温度膨胀系数, Δt 为温度变化, 升高为正。

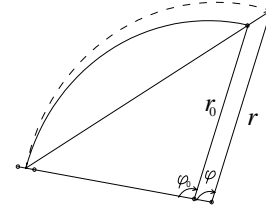


图2 一般曲线结构温度变形

Fig.2 A sketch for temperature deformation of curved structure

可见,由温度变化和混凝土收缩(或膨胀)将引起各支点处的弦向位移,故在梁活动端将引起与梁轴线相垂直的径向位移 Δ_R 和切向位移 Δ_T :

$$\begin{cases} \Delta_T = \delta \cos \frac{\varphi}{2} = r_0 \varepsilon \sin \varphi \\ \Delta_R = \delta \sin \frac{\varphi}{2} = 2r_0 \varepsilon \sin^2 \frac{\varphi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 曲线形水中悬浮隧道的温度内力

这里的研究对象是左端与岸壁固定连接的一段 SFT,右端与中间隧道段柔性连接,在径向设有两组张力腿。右端容许发生切向位移和平面内旋转变形,模型简化如图 3。

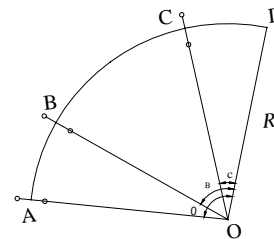


图3 简化模型

Fig.3 Simplified model

设张力腿的弹簧常数为 K , 张力腿竖向角为 θ , 则有: 径向弹簧常数 $K_R = K \sin \theta$, 切向弹簧常数 $K_T = \frac{\Delta_T}{r} K \sin \theta \approx \varepsilon K \sin \theta \sin \varphi$, 由于 $\varepsilon \sim 10^{-5}$, $K_T \ll K_R$, 所以忽略切向约束, 只考虑径向弹簧约束。

温度升高 Δt 度, 自由变形时 B 点的径向位移为 Δ_{BR} , C 点的径向位移为 Δ_{CR} 。由于张力腿约束, B 点实际变形可在自由变形之外, 也可在其之内, 见图 4。则隧道 B 点、 C 点所受张力腿的径向力为:

$$\begin{cases} P_{BR} = K_R \Delta_{BR2} \\ P_{CR} = K_R \Delta_{CR2} \end{cases} \quad (3)$$

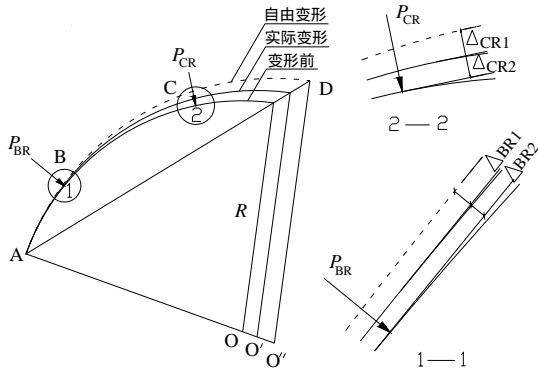


图 4 曲线形 SFT 的温度变形

Fig.4 Temperature induced deformation of curved SFT

由式(2)可得：

$$\begin{cases} \Delta_{BR} = 2R\varepsilon \sin^2 \frac{\theta_0 - \theta_B}{2} \\ \Delta_{CR} = 2R\varepsilon \sin^2 \frac{\theta_0 - \theta_C}{2} \end{cases} \quad (4)$$

水中悬浮隧道在水平面内受力可以简化为二次超静定结构，如图 4 所示。力法方程如下：

$$\begin{cases} \delta_{BB}P_{BR} + \delta_{BC}P_{CR} - \Delta_{BR1} = 0 \\ \delta_{CB}P_{BR} + \delta_{CC}P_{CR} - \Delta_{CR1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： δ_{ij} 为柔度系数，即 $X_j = 1$ 在 i 方向产生的位移。

变形如图 4 所示时，张力腿约束致径向位移 Δ_{BR2} 、 Δ_{CR2} ，温度导致的自由变形位移 Δ_{BR} 、 Δ_{CR} 以及径向力所致位移 Δ_{BR1} 、 Δ_{CR1} 满足式(6)；如果 B 点的实际变形在自由变形之外，则应满足式(7)。

$$\begin{cases} \Delta_{BR1} + \Delta_{BR2} = \Delta_{BR} \\ \Delta_{CR1} + \Delta_{CR2} = \Delta_{CR} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta_{BR2} - \Delta_{BR1} = \Delta_{BR} \\ \Delta_{CR1} + \Delta_{CR2} = \Delta_{CR} \end{cases} \quad (7)$$

由式(3)、式(5)及式(6)可得：

$$\begin{cases} \Delta_{BR2} = \frac{1}{\Delta_1} (\Delta_{BR} (\delta_{CC}K_R + 1) - \delta_{BC}K_R \Delta_{CR}) \\ \Delta_{CR2} = \frac{1}{\Delta_1} (\Delta_{CR} (\delta_{BB}K_R + 1) - \delta_{CB}K_R \Delta_{BR}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{式中 } \Delta_1 = \begin{vmatrix} \delta_{BB}K_R + 1 & \delta_{BC}K_R \\ \delta_{CB}K_R & \delta_{CC}K_R + 1 \end{vmatrix} \circ$$

由式(3)、式(5)及式(7)可得：

$$\begin{cases} \Delta_{BR2} = \frac{1}{\Delta_2} (-\Delta_{BR} (\delta_{CC}K_R + 1) - \delta_{BC}K_R \Delta_{CR}) \\ \Delta_{CR2} = \frac{1}{\Delta_2} (\Delta_{CR} (\delta_{BB}K_R - 1) + \delta_{CB}K_R \Delta_{BR}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{式中 } \Delta_2 = \begin{vmatrix} \delta_{BB}K_R - 1 & \delta_{BC}K_R \\ \delta_{CB}K_R & \delta_{CC}K_R + 1 \end{vmatrix} \circ$$

知道了 Δ_{BR2} 、 Δ_{CR2} ，由式(3)就可求得径向力。

两边张力腿在竖直方向分力为一对大小相等、方向相反的力，必然在截面产生扭矩，B 点、C 点扭矩分别为 $P_{BR} \frac{L}{2} \tan \theta$ 、 $P_{CR} \frac{L}{2} \tan \theta$ ，L 为张力腿与隧道连接点之间的水平距离。由于曲线梁弯扭耦合，截面扭矩必然在纵向产生弯矩。在通常平面曲线结构中温度内力(水平力)不会产生扭矩，在曲线形 SFT 设计时应考虑温度扭矩影响。

1.3 柔度系数计算

当 $P_{BR} = 1$ 时，弯矩： $M_B(0 \leq \theta < \theta_B) = 0$ ，

$$M_B(\theta_B \leq \theta \leq \theta_0) = 2R \sin \frac{\theta - \theta_B}{2} ; \text{ 当 } P_{CR} = 1 \text{ 时，}$$

$$M_C(0 \leq \theta < \theta_C) = 0, M_C(\theta_C \leq \theta \leq \theta_0) = 2R \sin \frac{\theta - \theta_C}{2} \circ$$

由虚功原理可得：

$$\delta_{BB} = \int \frac{M_B M_B}{EI_y} ds = \frac{2R^3}{EI_y} (\theta_0 - \theta_B - \sin(\theta_0 - \theta_B)) \quad (10)$$

$$\delta_{CC} = \int \frac{M_C M_C}{EI_y} ds = \frac{2R^3}{EI_y} (\theta_0 - \theta_C - \sin(\theta_0 - \theta_C)) \quad (11)$$

$$\delta_{BC} = \delta_{CB} = \int \frac{M_B M_C}{EI_y} ds = \frac{2R^3}{EI_y} \left((\theta_0 - \theta_B) \cos \frac{\theta_B - \theta_C}{2} - \sin \left(\theta_0 - \frac{\theta_B + \theta_C}{2} \right) + \sin \left(\frac{\theta_B - \theta_C}{2} \right) \right) \quad (12)$$

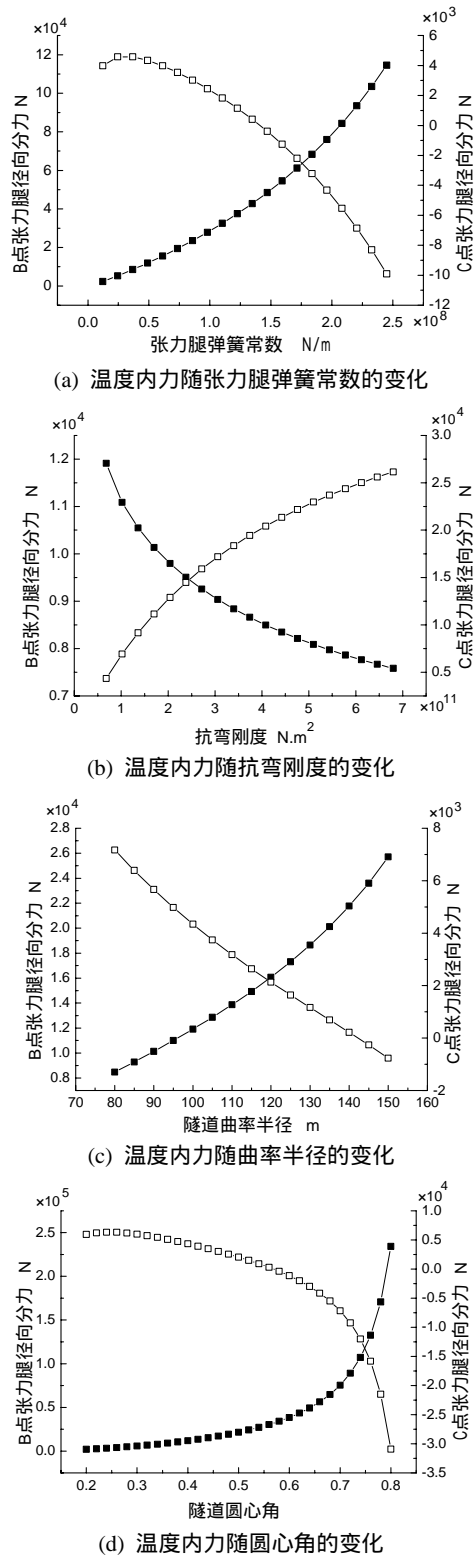
2 数值实验

采用正在做前期研究的千岛湖曲线形 SFT 的一个建议方案的基本参数：根据隧道浮力和安装前后控制伸长量确定张力腿的弹簧常数 $K = 9.8 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，隧道截面的抗弯刚度 $EI_y = 3.4 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ，张力腿的竖向角 30° ， $\theta_0 = 0.4$ ， $\theta_B = 0.3$ ， $\theta_C = 0.1$ ，曲率半径 $R = 100 \text{ m}$ ，隧道处夏季和冬季最大温度差 $\Delta t = 20$ 。

保持其他参数不变，分别改变张力腿的弹簧常数 K 、隧道截面抗弯刚度 EI_y 、曲率半径 R 和圆心角 θ_0 ，计算 B、C 处张力腿的径向分力，正为拉，负为压，结果如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出：弹簧常数增大时，张力腿 B 的径向力增大，张力腿 C 的径向力减小并很快改变方向。弹簧常数大于 $2.4 \times 10^8 \text{ N/m}$ 时，张力腿 B 的径向力在 10^5 N 量级，需要考虑温度内力对结构的影响。

截面抗弯刚度对张力腿的径向力的影响见图 5(b)。从图可知，随截面抗弯刚度增大，张力腿 B 的径向力减小，张力腿 C 的径向力增大。



— B点张力腿径向分力；— C点张力腿径向分力。

图5 曲线形 SFT 的张力腿温度内力

Fig.5 Temperature induced internal forces of tension legs of curved SFT

从图 5(c)可知：随曲率半径增大，张力腿 B 的

径向力增大，张力腿 C 的径向力减小。

从图 5(d)可知：随圆心角增大，张力腿 B 的径向力开始增大较慢，张力腿 C 的径向力缓慢减小并随之改变方向，当圆心角超过 0.6 弧度时，张力腿 B、C 的径向力绝对值迅速增大，这时需要考虑温度内力对结构的影响。

3 结论

曲线形 SFT 温度内力并不像一般结构的温度内力有规律，影响因素比较复杂，不能以单一的规律来刻画。两组锚固系统温度内力呈现出此消彼长的态势。总的来说，对本文的研究对象，当弹簧常数大于 $2.4 \times 10^8 \text{ N/m}$ ，圆心角大于 0.6 时，需要考虑温度内力对结构的影响。

在通常平面曲线结构中温度内力(水平力)不会产生扭矩，而曲线形 SFT 的温度内力会产生扭矩和弯矩，在设计时应考虑这个影响。

参考文献：

- [1] Ahrens D. Submerged floating tunnels-A concept whose time has arrived [J]. Tunnelling and Underground Space Tech., 1997, 12(4): 317~336.
- [2] Tveit P. Ideals on downward arched and other underwater concrete tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Tech., 2000, 15(1): 69~78.
- [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. Huang Guojun, Wu Yingxiang, Hong Youshi. Transportation of crossing waterways via Archimedes bridge [J]. Ship Building of China, 2002, 43(Supp.): 13~18. (in Chinese)
- [4] Brancaloni F, Castellani A, D'Asdia P. The response of submerged tunnels to their environment [J]. Eng. Struct., 1989, 11(1): 47~56.
- [5] Remseth S, Leira B J, Okstad K M, Mathisen K M. Dynamic response and fluid/structure interaction of submerged floating tunnels [J]. Computers and Structures, 1999, 72(4): 659~685.
- [6] Kiyokawa K, Inada Y. Analysis of hydrodynamic force acting on submerged structures during earthquakes [A]. Proc. of Coastal Engineering of Japan [C]. JSCE, 1990. 639~643.
- [7] Janaka Y. Earthquake response of circular cylindrical structures in water [A]. Proc. of Coastal Engineering of Japan [C]. JSCE, 1983. 366~370.
- [8] Morita S, Yamashita T, Mozimp Y, Mineta M, Kurosaki K. Earthquake response analysis of submerged floating tunnels considering water compressibility [A]. Proc. of the International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Osaka: ISOPE, 1994. 20~26.
- [9] 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.
- [10] Kunisu H, Mizuno S, Mizuno Y, Saeki H. Study on submerged floating tunnel characteristics under the wave condition [A]. Proc. of the International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Osaka: ISOPE, 1994. 27~32.
- [11] Nishio S, Incecik A. Synchronization of vortex shedding from an oscillating cylinder in uniform flow [A]. Proc. of the International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Hague: ISOPE, 1995. 603~610.