

不同浮重比的水中悬浮隧道在 波流载荷下的动力响应

龙旭, 葛斐, 王雷, 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 100190)

摘要: 基于弯曲刚度等效原理, 本文提出全截面弯曲刚度等效方法以简化得到水中悬浮隧道计算模型。利用 Stokes 五阶波理论和 Morison 公式计算水流和波浪引起水质点对水中悬浮隧道的流体力作用。在此基础上, 针对中意阿基米德桥联合实验室所提出的水中悬浮隧道原型桥在不同的浮重比下计算和分析了水中悬浮隧道的动力响应, 并且讨论了保证人体在管体中的安全感需要。最后给出选用模型的水中悬浮隧道在波浪载荷下的最优浮重比范围。

关键词: 水中悬浮隧道; 浮重比; 弯曲刚度等效; 波流; 安全感; 原型桥;

Dynamic Response of Submerged Floating Tunnel with Different Buoyancy-Weight Ratios under Wave and Current Loads

LONG Xu, GE Fei, WANG Lei, HONG You-shi*

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

Abstract: Based on the principle of bending stiffness equivalence, a method for simplification throughout the total cross-section of submerged floating tunnel (SFT) is proposed to obtain the model for computation. Hydrodynamic forces, which results from wave and current, are formulated by of Stokes fifth order wave theory and Morison Equation. According to the simplified SFT models with different buoyancy-weight ratios, dynamic responses and the sense of security of human beings in SFT prototype from SIJLAB (Sino-Italian Joint Laboratory of Archimedes Bridge) are calculated and analyzed. In the end, the optimized ranges of buoyancy-weight ratio are proposed for the SFT prototype.

Key words: submerged floating tunnel; buoyancy-weight ratio; bending stiffness equivalence; wave and current; sense of security; prototype;

水中悬浮隧道, 即 SFT (Submerged Floating Tunnel), 是一种悬浮于水面以下一定深度的新型交通结构。水中悬浮隧道主要依靠水的浮力作为支撑而像桥一样跨越水域, 因此在中国和意大利又被称作“阿基米德桥”。它单位长度的造价不会随着水域跨度的增大而增加, 比较适合建造于大跨度水域。此外, 位于

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10532070)

作者简介: 龙旭(1983-), 男, 辽宁人, 硕士生, 主要从事水中悬浮隧道研究;

葛斐(1980-), 男, 安徽人, 助理研究员, 博士, 主要从事水中悬浮隧道研究;

王雷(1982-), 男, 河北人, 博士生, 主要从事水中悬浮隧道研究;

*洪友士(1951-), 男, 福建人, 研究员, 博士, 从事水中悬浮隧道及材料力学性能研究(E-mail: hongys@imech.ac.cn)。

水面以下一定距离的独特优势使得其可以建造于一些不适合在水面建造桥梁的水域^[1]，而且受台风的影响较小^[2]。

水中悬浮隧道主要结构包括：悬浮于水面以下一定深度、由单元管段连接而成、提供行人和车辆通过的管体，单元管段之间的连接装置，用于固定管体两端的岸桥连接结构，用于平衡管体剩余浮力的锚索体系，位于锚索根部的基础结构。

水中悬浮隧道的浮重比定义为管体所受浮力与管体重力之比。对于管体自身，浮重比除了影响管体几何尺寸的设计，也影响到材料选取、管体强度设计、管体整体刚度设计等问题。对于浮重比大于1类型的水中悬浮隧道，浮力要大于重力；浮力与重力的差值即剩余浮力由桥体两端的岸桥连接结构以及连接于管体和地基的锚索体系平衡，因而浮重比决定了锚索中拉力的大小，进而对锚索的动力学行为产生重要影响，如锚索在涡激振动中受激发的模态数目和相对应的锁频频率^[3]。考虑到水中悬浮隧道在投入使用的正常工况下，设备荷载、车辆荷载以及人群荷载均会使浮重比产生一定的变化范围，因此找到一个能够使水中悬浮隧道各方面性能都处于一个较优状态的浮重比范围是此种新型结构可行性分析中的一个严峻挑战。

水中悬浮隧道作为一种水下交通结构物，安全性是对其最重要的要求^[4]。1996年5月底由挪威公路管理局主持的第一次专门以水中悬浮隧道为主题的国际会议上，Hakkaart^[1]曾特别指出了在进一步研究水中悬浮隧道的安全方面要考虑到使用人群的心理问题，如水中悬浮隧道的活动必须低于人类观察力的极限。人体对所处环境安全感的感知主要来自于对水平方向和竖直方向的振动加速度及频率的信息，而此方面的研究则涉及到结构和流体等诸多方面的考虑。

文献^[5]研究表明，水中悬浮隧道的一些设计参数，如锚索体系的构造类型和管体的潜水深度，都会对结构整体性能产生重要影响。文献^[6]研究涉及了规则波下关于锚索类型、管体直径、管体比重、波高和周期的实验研究，其中得到了管体浮重比在1.32~1.96之间时管体横向位移和加速度均随着浮重比的增大而减小，但文献^[6]中模型试验的浮重比没有小于1.3的情况，而水中悬浮隧道正常工作情况下的浮重比是有可能小于1.3的。20世纪70年代以来水中悬浮隧道研究的模型实验或数值计算大多数都是在固定浮重比假定下对其做出相应分析，而忽略了浮重比对于水中悬浮隧道动力响应的非线性影响。

在进行实验研究和数值模拟计算的同时，中国和意大利阿基米德桥联合实验室于2004年12月启动了水中悬浮隧道原型桥的设计和建造计划^[7]。本文以千岛湖水中悬浮隧道原型桥为背景，建立水中悬浮隧道的计算模型，计算分析浮重比对水中悬浮隧道在波流载荷下的动力响应和管体内人体安全感的影响。

1 计算模型

出于抗腐蚀、抗冲击、保证管体足够重量和整体变形连续的需要，水中悬浮隧道原型桥的管体由铝桁架、混凝土壳和钢壳三层壳体结构复合而成^[8]，如图1所示。在建立简化计算模型时采用全截面弯曲刚度等效方法（即式1）对管体进行简化处理^[9]。

$$EI = E_{Al} I_{Al} + E_{Concrete} I_{Concrete} + E_{Steel} I_{Steel} \quad (1)$$

式中 E_{Al} 、 $E_{Concrete}$ 和 E_{Steel} 分别为铝、混凝土和钢的弹性模量， I_{Al} 、 $I_{Concrete}$ 和 I_{Steel} 分别为铝、混凝土和钢的在整个截面上的惯性矩， E 为管体简化模型的等效弹性模量， I 为管体简化模型的惯性矩。保持管体单位长度质量和管体外径不变，计算得到管体复合结构的等效弹性模量。

原型桥设计长度100米，分为五段，即每段20米，轴线位于水下4.2米；管体之间的连接方式简化为刚性连接；岸桥连接结构一端采用固定三个平移自由度的连接方式，另一端采用固定横截面内两个平移自由度而放松轴向平移自由度的连接方式；锚索体系采用球形铰接连接于管体轴向坐标30米、50米、70米处；采用球铰接方式固定锚索体系的地基结构简化为水底平面，如图2所示。

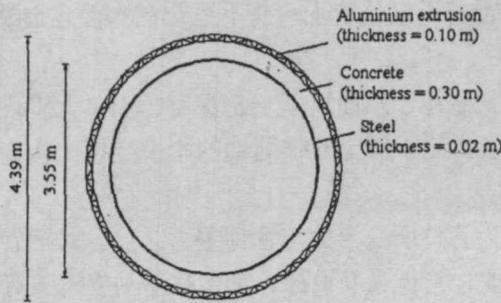


图1 阿基米德桥原型桥截面图

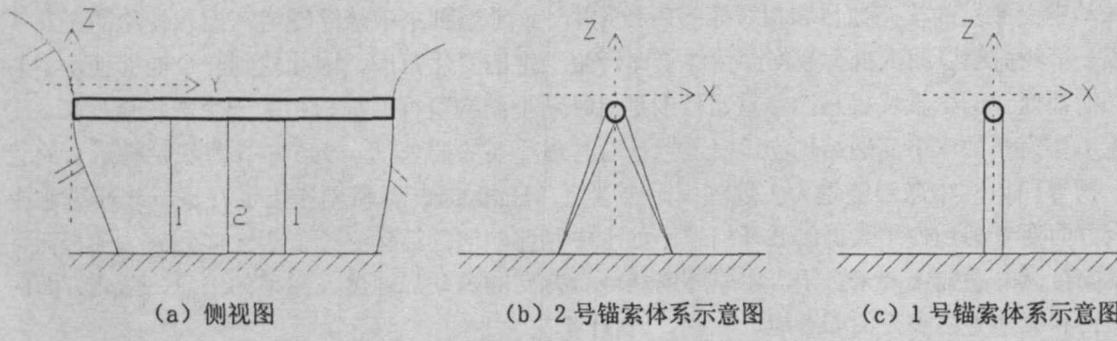


图2 水中悬浮隧道模型图

水中悬浮隧道所处水域的水文数据和计算模型（浮重比为 1.4）物理参数如表 1 所示。

表 1 水文数据和物理参数

| 水文数据 | 符号 | 单位 | 数值 | 模型参数 | 符号 | 单位 | 数值 |
|--------|--------|-------------------|------|--------|----------|-------------------|------------------------|
| 流体密度 | ρ | kg/m ³ | 1050 | 管体密度 | ρ_r | kg/m ³ | 2010.75 |
| 水深 | h | m | 30 | 管体外径 | D | m | 4.39 |
| 波高 | H | m | 1.0 | 管体内径 | d | m | 3.48 |
| 周期 | T | s | 1.8 | 管体弹性模量 | E_r | N/m ² | 3.2×10^{10} |
| 表面流速 | U_0 | m/s | 0.1 | 锚索密度 | ρ_c | kg/m ³ | 7850 |
| 拖曳力系数 | C_D | 1 | 1.0 | 锚索直径 | d_c | m | 0.06 |
| 质量系数 | C_m | 1 | 2.0 | 锚索弹性模量 | E_c | N/m ² | 1.4×10^{11} |
| 附加质量系数 | C_a | 1 | 1.0 | 运动粘性系数 | ν | m ² /s | 1.067×10^{-6} |

本文利用 Stokes 五阶波理论计算水中悬浮隧道轴线处水质点的速度和加速度。利用 Morison 公式（即式 2）计算波浪和剪切流所引起的水质点对管体和锚索体系的流体力作用^[10]。

$$f(i) = \frac{1}{2} C_D \rho D (u_w + u_c - \dot{x}_i) |u_w + u_c - \dot{x}_i| + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_w}{\partial t} - C_a \rho \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x}_i \quad (i=1,2) \quad (2)$$

式中 x_i ($i=1,2$) 为水中悬浮隧道轴线在 X 和 Z 方向的位移， D 为管体外径， u_w 和 u_c 是由波浪和水流在水中悬浮隧道轴线处 X 或 Z 方向上引起的流体质点速度。

本文借助于通用有限元软件 ANSYS 瞬态求解器，采用针对计算波浪和水流的 pipe59 单元，对重力、浮力、锚索拉力和流体力共同作用下的不同浮重比（BWR）的水中悬浮隧道进行数值模拟。

2 波流载荷下浮重比对水中悬浮隧道动力响应的影响

在静水中管体在剩余浮力和锚索体系提供的拉力作用下在水平方向和竖直方向处于稳定的状态，但作为悬浮于水中的结构物，波浪荷载和水流荷载是正常工况下的常规荷载，那么水中悬浮隧道管体必然会在

水平方向和竖直方向发生一定幅值的振荡。

管体中点和 2 号锚索体系外支中点在 X 和 Z 方向稳定振荡状态下的位移响应如图 3~6 所示。

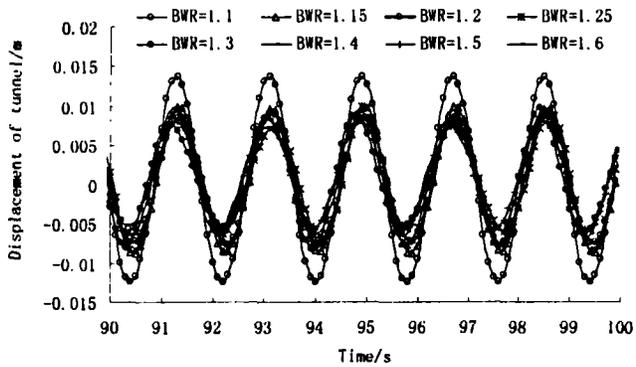


图 3 管体中点在 X 方向的位移响应

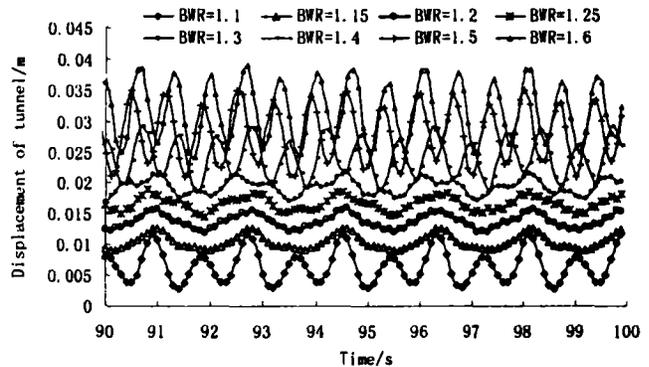


图 4 管体中点在 Z 方向的位移响应

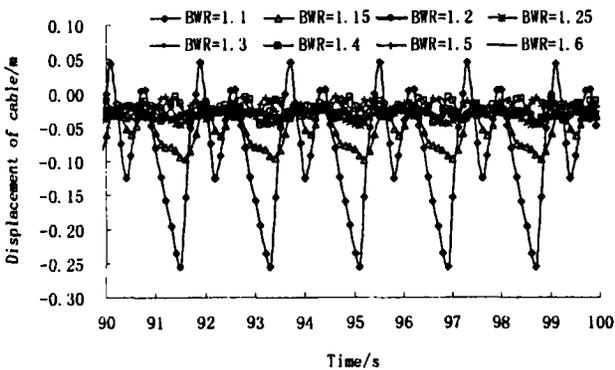


图 5 锚索中点在 X 方向的位移响应

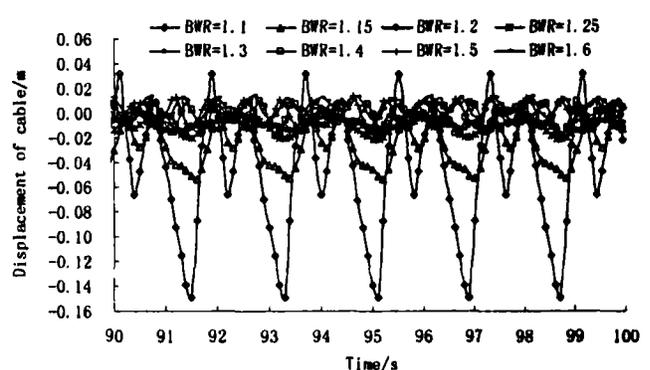


图 6 锚索中点在 Z 方向的位移响应

由图 3~6 可以看出：

(1) 管体中点在 X 方向的振动随浮重比的增加而减小，与文献^[6]中的结论吻合。但总体看来管体中点在 X 方向的振动受浮重比的影响较弱，进而可以认为，浮重比不是调节管体中点在 X 方向上振幅的有效控制参数，在其后的工程实践中对于管体横向位移的约束应当求助于其它措施，例如改良锚索体系的构造方式以增加适当的横向约束，添加阻尼器，改造管体外表面的粗糙度。

(2) 管体中点在 Z 方向的位移振荡受浮重比影响较大，而且浮重比在 1.2~1.3 左右范围内振幅显著减小。

(3) 在浮重比基本上在等于或大于 1.2 的情况下，锚索中点在 X 和 Z 方向的位移振幅相对较小。

当浮重比较大时，相对的剩余浮力较大，因而使得锚索的拉力比较大，管体受锚索的约束作用则较强，管体和锚索之间的耦合作用相对较强；反之当浮重比较小时，管体和锚索之间的耦合度较小，管体和锚索之间的相互独立性加大。而管体和锚索体系在波流载荷下位移响应的分析表明：浮重比在 1.2~1.3 左右范围内水中悬浮隧道的动力响应表现较好。所以从动力响应幅值的角度来选择浮重比时，锚索体系对管体的约束方式并不是越强越好。

3 波流载荷下水中悬浮隧道内人体安全感的讨论

人体最敏感的频率范围为水平方向振动 1~2Hz，纵向振动 4~8Hz。人体组织对高频振动的阻尼很大，其振幅会急剧衰减，所以高频振动仅对与人体的接触部分起作用。一般人刚刚感觉到的垂直振动加速度为 $10^{-3}(m/s^2)$ ，不可忍耐的加速度是 $0.5(m/s^2)$ ^[11]。管体振荡加速度和受激发的频率是引发水中悬浮隧道中行人不安全感的主要原因。

本文在不同浮重比条件下计算了稳定振荡状态时管体中点在 X 和 Z 方向的加速度变化范围，并利用快

速 Fourier 变换方法处理管体中点在 X 和 Z 方向上的位移响应, 从而得到管体在相应方向上被激发的频率, 如表 2 所示。

表 2 不同浮重比的水中悬浮隧道在波流载荷作用下的加速度响应和被激发的频率

| BWR | Acceleration/(m / s ²) | | Frequency /Hz | |
|-----|-------------------------------------|--------------|---------------|-----------|
| | X | Z | X | Z |
| 1.1 | -0.178~0.152 | -0.219~0.149 | 0.56/0.74 | 0.55/1.11 |
| 1.2 | -0.133~0.137 | -0.126~0.134 | 0.55/0.79 | 0.55/1.41 |
| 1.3 | -0.134~0.137 | -0.127~0.114 | 0.56/0.79 | 0.55/1.41 |
| 1.4 | -0.138~0.146 | -0.347~0.363 | 0.56/0.81 | 0.55/1.44 |
| 1.5 | -0.103~0.107 | -0.508~0.482 | 0.56/0.83 | 0.55/1.46 |
| 1.6 | -0.100~0.099 | -0.525~0.571 | 0.56/0.83 | 0.55/1.48 |

表 2 中约为 0.55Hz 的频率为管体在波浪载荷下的强迫振动频率, 而其他数值的频率为管体在波浪载荷下被激发的固有频率。此外, 在浮重比大于 1.3 的时候管体 X 方向加速度幅值随浮重比的增大而减小, 与文献^[6]中结论基本吻合。

表 2 中加速度和受激发的频率随浮重比的变化趋势表明, 水中悬浮隧道浮重比调节管体在水平方向上振荡加速度和受激发频率的能力较弱。但管体中点处的加速度在浮重比为 1.2~1.3 时, 竖直方向的加速度幅值会达到一个极小值, 基本满足人体对于交通设施的安全感要求。同时, 在来流方向即管体内的水平方向上结构被激发的频率主要为 0.56 Hz, 不在人体对于振动的敏感范围 1~2 Hz 之内; 竖直方向上结构主要频率约为 1.44 Hz, 也不在人体最敏感的纵向振动频率范围 4~8 Hz 内。因此, 管体振荡频率对人体安全感的影响不是很大, 问题主要集中在管体竖直方向的振荡加速度控制方面。从上面的数据分析可以看出, 水中悬浮隧道的浮重比可以有效调节管体竖直方向上振荡加速度的幅值。

4 结论

通过全截面弯曲刚度等效方法得到了计算简化模型, 在波流载荷下对不同浮重比的水中悬浮隧道进行了动力响应求解, 并针对人体在管体中的安全感需要进行了分析和讨论, 初步得到了水中悬浮隧道浮重比使得管体和锚索体系动力响应相对较小的最优范围。

在以千岛湖水中悬浮隧道原型桥为背景的实例分析中得到如下结论:

- (1) 水中悬浮隧道原型桥的浮重比在 1.2~1.3 左右范围内, 管体在竖直方向的位移响应处于较优状态, 但浮重比在控制管体在水平方向的位移响应的能力较弱。
- (2) 水中悬浮隧道原型桥的浮重比基本上在等于或大于 1.2 的情况下, 锚索中点在 X 和 Z 方向的位移振幅相对较小。
- (3) 水中悬浮隧道原型桥的浮重比在 1.2~1.3 左右范围内管体在竖直方向上的加速度响应范围达到一个极小值, 但浮重比对于水平方向加速度响应的调节效果不是很显著。
- (4) 波流载荷作用下浮重比在 1.2~1.3 左右范围内, 原型桥的管体在水平和竖直方向的加速度基本满足人体对于环境安全感的需要, 被激发频率基本可以避开人体对于振动频率的敏感范围, 满足人体对于环境安全感的需要。

参考文献

- [1] Ahrens D. Submerged Floating Tunnels: a Concept whose time has arrived[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(4): 505-510.

- [2] 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.
- [3] 葛斐. 水中悬浮隧道锚索在剪切流中的涡激响应[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(3): 351-356.
- [4] 张大伟. 大连港湾桥车桥振动的行人舒适度判断[J]. 铁道建筑, 2007, 3: 5-7.
- [5] Faggiano B, Mazzolani F M. Design and modeling aspects concerning the submerged floating tunnels: an application to the Messina Strait crossing[A]. Proc. 4th Symposium on Strait Crossings[C]. Bergen, Norway: 2001. 511-519.
- [6] Susumu M, Akihito T, Yuza M, Hiroshi K, Toshihiko Y, Hiroshi S. Experimental study on characteristics of submerged floating tunnels under regular waves[A]. Proc. 3rd Symposium on Strait Crossings[C]. Alesund: 1994. 667-674.
- [7] Chinese team of SIJLAB. Report of research and design for Archimedes Bridge Prototype at Qiandao Lake[R]. Beijing, China: SIJLAB, 2007.
- [8] Italian team of SIJLAB. The Archimede' s Bridge Prototype in Qiandao Lake(PR of China) Desing Report[R]. Italy: SIJLAB, 2007.
- [9] 惠磊. 水中悬浮隧道在偶发载荷作用下的动力响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [10] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [11] 董霜, 朱元清. 环境振动对人体的影响[J]. 噪声与振动控制, 2004, 6(3): 22-25. .