

# 不同浮重比水中悬浮隧道 动力特性的实验研究

陆维<sup>1</sup>, 葛斐<sup>1</sup>, 王雷<sup>1</sup>, 龙旭<sup>2</sup>, \*洪友士<sup>1</sup>

(1. 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;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

**摘要:** 浮重比是水中悬浮隧道结构的重要控制参数。本文通过模型实验, 研究了不同浮重比的水中悬浮隧道在波浪作用下的动力响应。针对锚索固定式水中悬浮隧道, 在一定条件下将其锚索简化为水平和竖直方向的线性弹簧。实验中保持相同的波浪载荷条件, 研究了 SFT 管段的动力响应受其浮重比影响的规律。

**关键词:** 水中悬浮隧道; 浮重比; 模型实验; 波浪; 动力响应

## Model tests of submerged floating tunnel with different buoyancy-weight ratios

LU Wei<sup>1</sup>, GE Fei<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, LONG Xu<sup>2</sup>, \*HONG Youshi<sup>1</sup>

(1. State Key Lab. of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100190, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore)

**Abstract:** Buoyancy-weight ratio (BWR) is one of the key parameters of submerged floating tunnels (SFT). An investigation into the dynamic behavior of an SFT with different BWR under wave conditions is carried out by model tests. The mooring lines of the SFT are simplified as linear springs in both horizontal and vertical direction. And then the relation between the dynamic behavior of the SFT module and BWR is investigated in detail by keeping the same excitation of wave.

**Key words:** submerged floating tunnel; buoyancy-weight ratio; model test; wave; dynamic behavior

## 1 引言

水中悬浮隧道 (Submerged Floating Tunnels) 简称 SFT<sup>[1]</sup>, 又称为阿基米德桥 (Archimede's Bridge), 是一种潜浮于水面下一定深度、利用其自身浮力为支撑, 通过锚索、浮筒或桩柱固定的一种新型跨水域交通方案。自其概念提出以来, 已受到广泛关注。和传统的桥梁、隧道相比 SFT 具有明显的经济和环保优势<sup>[2, 3]</sup>: 由于潜浮于水面下一定深度, SFT 对当地的自然景观破坏较小且不影响水面交通; 单位长度的建造成本不随跨度增加而增加等。除用于交通, SFT 还可作为观光、水渠、流冰控制、港湾连接设施等。

尽管 SFT 的概念早在十九世纪八十年代就已经提出, 但到目前为止世界上仍然没有一座已经建成的

---

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10532070), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KJCX2-YW-L07), 非线性力学国家重点实验室青年基金资助项目

作者简介: 陆维(1986—), 男, 安徽人, 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;

龙旭(1983—), 男, 辽宁人, 硕士, 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)。

• III-601 •

SFT。究其原因,除了经济和社会方面的因素,很大程度上是由于 SFT 所涉及的科学技术问题十分复杂<sup>[3]</sup>,如结构的静力和动力响应分析、结构-流体耦合、结构-流体-土耦合、腐蚀与疲劳等等。对于这种未实现的新型结构来说,在计算分析的同时进行针对性的模型实验是必须且十分重要的。

目前,针对SFT的模型实验研究开展的比较少,挪威和日本的学者在这方面做了一些工作。Dahle等<sup>[4]</sup>用两种不同缩比的长桥和短桥模型实验研究了SFT在规则波、不规则波和流的组合作用下所受的流体载荷和桥体响应问题。实验结果和数值计算较好的吻合。实验结果同时表明在低阻尼水平下,慢漂力对桥体响应有重要贡献;长桥模型对入射波的方向十分敏感,当入射角为22.5度时,线性响应约为0度时的1/2。Kunisue等<sup>[5]</sup>针对北海道波浪环境实验研究了三种不同锚索形式SFT的动态响应。实验结果表明,竖直布索方式的SFT在水平方向的位移较倾斜布索的大;在一定条件下,两种倾斜布索的SFT锚索中均观察到了冲击张力现象;实验中未观察到漩涡脱落,管体所受波浪力可作为绕射问题来计算,且管体所受拖曳力约为惯性力的1/4。

浮重比 BWR(Buoyancy-Weight Ratio)定义为 SFT 管体所受浮力和其自身重力之比,是 SFT 结构的重要控制参量。本文针对波浪环境载荷,实验研究了不同浮重比的 SFT 动力响应问题。通过保持相同的触发条件得到基本相同的波浪载荷,改变模型浮重比以研究其对 SFT 动力响应的影响。

## 2 实验方案

本文针对锚索固定式水中悬浮隧道,研究了浮重比在 1.12~1.89 之间的 SFT 在波浪载荷作用下的动力响应。事实上,在实际设计中所考虑的 SFT 是一种大型复杂的柔性结构,并且处在多种环境载荷的组合作用下,动力响应十分复杂。而在实验室中,由于本身实验条件的限制,需要对研究的问题做出必要的简化。本实验研究考虑的是水中悬浮隧道管段在二维规则波作用下的动力响应,引入如下假设:

- 1) 忽略 SFT 管段之间的相互作用,只研究单节管段在二维规则波作用下的动力响应。
- 2) SFT 管体的刚度远大于锚索的刚度,因此不考虑管体的变形,将管体视为刚体。
- 3) 不考虑锚索的自身质量和横向变形影响,且结构仅发生弹性小变形,故锚索可以简化为水平和竖直方向的线性弹簧<sup>[6]</sup>。

### 2.1 量纲分析

水中悬浮隧道在波浪载荷下的动力响应一方面和外激励即波浪的参数有关,另一方面和 SFT 自身结构参数有关。其中波浪参数有波幅  $a$ , 周期  $T$ , 水的密度  $\rho_0$ , 水的运动粘性系数  $\nu$ , 重力加速度  $g$ 。在本问题研究中,所考虑的波浪可作为深水波处理,故不考虑水深的影响。SFT 自身结构参数包括管体长度  $L$ , 管体外径  $d$ , 潜水深度  $h$  (管体上表面至水面距离), 管体等效密度  $\rho_{eq}$ , 弹性支座的刚度系数  $K_x, K_z$ 。于是, SFT 管体位移响应  $\delta$  可以写为上述控制参数的函数:

$$\delta = f(L, d, h, \rho_{eq}, K_x, K_z; a, T, \rho_0, g, \nu) \quad (1)$$

取波幅  $a$ , 周期  $T$  和水的密度  $\rho_0$  作为基本未知量,对(1)进行无量纲化,得到:

$$\frac{\delta}{a} = f\left(\frac{L}{a}, \frac{d}{a}, \frac{h}{a}, \frac{\rho_{eq}}{\rho_0}, \frac{K_x}{\rho_0 a^3 / T^2}, \frac{K_z}{\rho_0 a^3 / T^2}; \frac{g}{a / T^2}, \frac{\nu}{a^2 / T}\right) \quad (2)$$

$$\text{其中 } \frac{\rho_{eq}}{\rho_0} = \frac{\rho_{eq} g \frac{\pi}{4} d^2}{\rho_0 g \frac{\pi}{4} d^2} = \frac{1}{BWR}, \quad \frac{g}{a / T^2} = \frac{ga}{(a / T)^2} = \frac{1}{Fr}, \quad \frac{\nu}{a^2 / T} = \frac{1}{Re}。$$

由式(2)可以看到,在实验中无法同时满足 Froud 数相似和 Reynolds 数相似,因此抓住问题的主要矛盾,在实验中满足 Froud 数相似以及几何相似、浮重比相似和锚索刚度系数相似。

## 2.2 实验装置

实验在  $3.6\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.1\text{m}$  的水池中进行。在水池的一端池壁上固定有一定高度的支架，通过释放该支架上的球形重物以引起水面的扰动来产生波浪。在实验中，通过保持相同的触发条件来得到基本相同的波浪载荷。

模型为圆柱形，由有机玻璃制成，两端固定有带有标记的白色面板，以记录管体运动。模型采用 1:100 的几何比尺，由此可得实验中其余控制参量的比尺，如表 1 所示。由假设 3 可知，SFT 锚索在一定条件下可以简化为水平和竖直方向上的弹簧。如图 1 所示的由两根倾斜锚索约束的 SFT，忽略锚索自身质量和横向变形，在弹性小变形假设下有：

当  $x$  方向有位移  $\delta x$  时，由几何关系（如图 2）可知，锚索变形为

$$\text{左侧锚索: } \Delta l_L = \delta x \sin \theta \quad (3)$$

$$\text{右侧锚索: } \Delta l_R = -\delta x \sin \theta \quad (4)$$

锚索中张力变化为，

$$\text{左侧锚索: } \Delta T_L = \Delta l \frac{EA}{l} \quad (5)$$

$$\text{右侧锚索: } \Delta T_R = -\Delta T_L \quad (6)$$

从而得到管体  $x$  方向位移，锚索所引起的  $x$  方向恢复力：

$$F_x = -K_x \delta x = -\Delta T_L \sin \theta + \Delta T_R \sin \theta = -\delta x \frac{2EA \sin^2 \theta}{l} \quad (7)$$

从而得到  $x$  方向的恢复力系数：

$$K_x = \frac{2EA \sin^2 \theta}{l} \quad (8)$$

其中  $l$  为锚索初始长度， $E$  为锚索弹性模量， $A$  为锚索横截面积， $\theta$  为锚索初始倾角。式 (7) 中的负号表示恢复力方向与位移方向相反。

类似地，可以得到锚索体系在  $z$  方向的恢复力系数：

$$K_z = \frac{2EA \cos^2 \theta}{l} \quad (9)$$

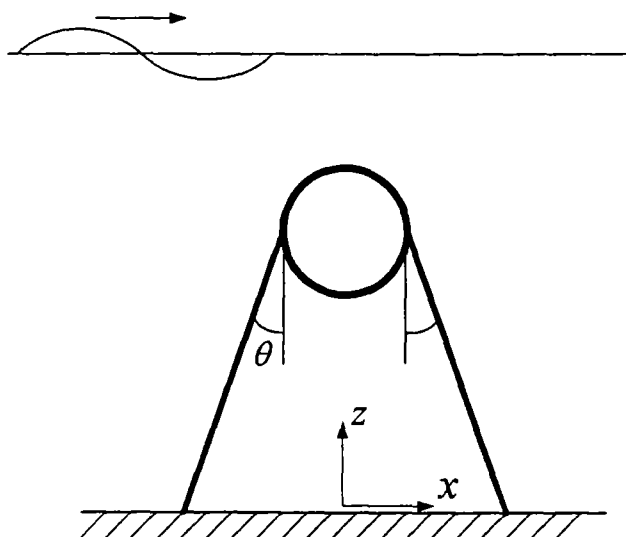


图 1. 由两根倾斜锚索约束的水中悬浮隧道示意图

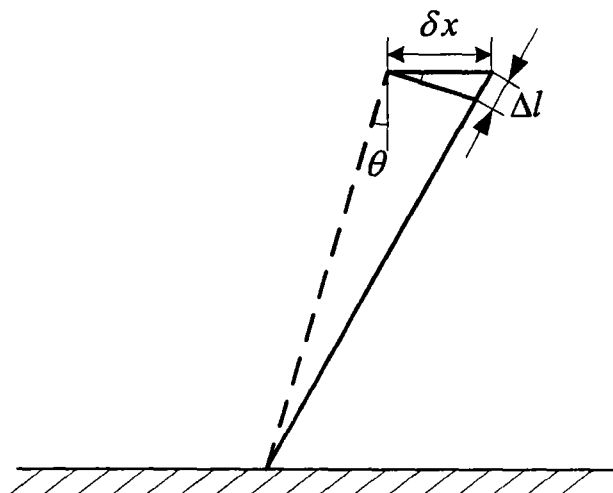


图 2. 锚索变形示意图

在实验中,模型由布置在两端的4根水平方向和2根竖直方向上的弹簧约束于固定支座上。模型示意图如图3所示,模型参数列于表2。为了便于进一步在实验中调节浮重比,将模型实验空载时的浮重比设定为1.89。在保持管体外径不变的情况下,通过增加管体内部填充物以改变管体等效密度 $\rho_{eq}$ 从而改变模型浮重比,实验中最小可至1.12。

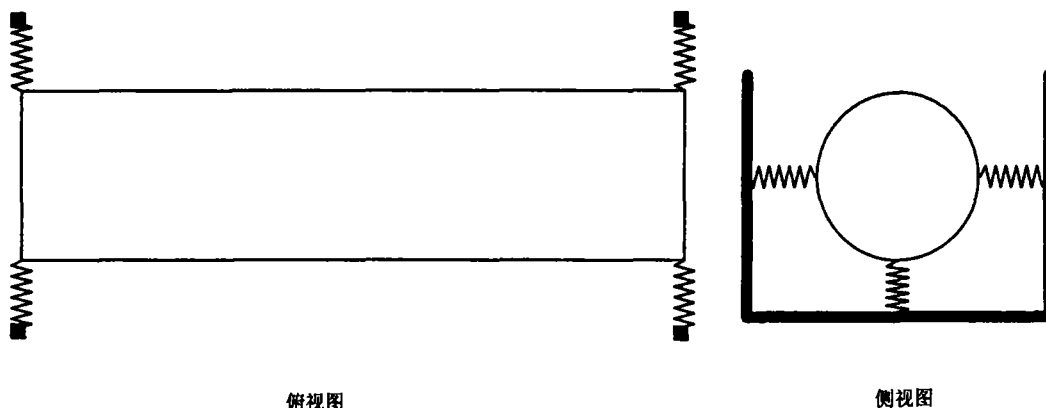


图3. 模型示意图

表1. 实验中的比尺

参数	缩比	
长度	1: $\lambda$	1:100
波浪周期 $T$	1: $\sqrt{\lambda}$	1:10
弹簧刚度 $K_x, K_z$	1: $\lambda^2$	1:10000

表2. 模型参数

参数	
管体长度 $L$	1 m
管体外径 $d$	0.09 m
管体潜水深度 $h$	0.1 m
弹性支座的刚度系数 $K_x$	188 N/m
弹性支座的刚度系数 $K_z$	955 N/m

### 2.3 实验步骤

本实验是通过释放水池一端支架上的球形重物,在水池一侧水面产生扰动,形成波浪。通过保持相同的释放高度和触发条件得到基本相同的波浪载荷,作为本实验模型强迫振动的外激励。由于扰动源的衰减和水池长度限制所带来的池壁反射波的影响,在实验中我们只关注前4个波浪的作用。实际上,这是一簇波浪对SFT管体的冲击作用,问题研究的是SFT管体在这一簇波浪冲击作用下的动力响应。

实验采用CCD高速摄像的方法来记录波浪的传播和管体的运动。管体运动由其端盖上的4个标记点来表征,如图4所示。在模型下方,将一刻度尺固定于支座上,作为测量长度的标尺。通过图像处理的办法得到实验中的波浪参数和管体位移。具体处理过程如下:

- 1) 从实验记录文件中甄选出前4个波浪中波峰最高的图片文件,测量此时波浪最高点的绝对坐标值。将该绝对纵坐标值与初始时刻的水面绝对纵坐标值相减,即得到实验中的半波高值。
- 2) 根据前4个波中两次连续最大波浪幅值产生的时间点得出波浪周期。
- 3) 从实验记录文件中甄选出在前4个波浪作用下管体产生最大水平位移和最大竖直位移的图片文件。由图像处理软件分别得出相应图片中标记点的绝对坐标值,将其与初始时刻各标记点相应绝对坐标值相减,即得到相应的最大位移。为了消除转动的影响减小实验误差,将2、3点的水平位移平均值和1、4点的竖直位移平均值作为管体平动位移。

## 3 结果与讨论

通过添加压仓物调节管体等效密度进而改变管体浮重比,其变化范围为1.12~1.89。对每个浮重比的

模型，实验重复三次，并由上节的方法记录并测量管体运动。在实验中可以观察到：管体水平和竖直方向最大位移均出现在第三个波即将传播至管体上方时刻附近。不同浮重比的管体运动的最大位移如表 3 所示。

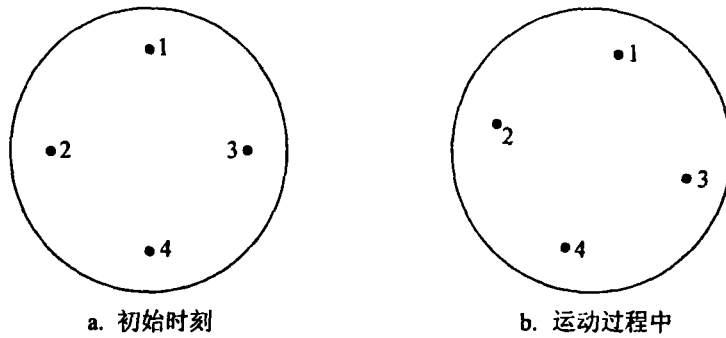


图 4. 管体端部标记点示意图

实验所测得的波浪平均周期为 0.48 s，平均波高为 37 mm。由于每组实验中波浪参数略有不同，为消除由于激励不稳定所产生的影响，将管体位移除以相应的波高得到一个无量纲位移。

图 5 给出了管体的无量纲最大位移随管体浮重比变化的曲线。由图可以看出，浮重比对于管体的动力响应有重要影响。其中管体水平方向的无量纲位移基本上随浮重比的增大有增大的趋势；而管体竖直方向的无量纲最大位移则呈现先减小、后增大，最后趋于稳定的趋势。竖直方向的无量纲位移在浮重比等于 1.2 附近有最小值。

龙旭<sup>[7]</sup>在对 Messina 海峡水中悬浮隧道在波浪作用下的动力响应的有限元计算中得到了类似的规律。该 SFT 每个管段由两对倾斜锚索约束，如图 6 所示。计算表明 SFT 结构仅发生小变形，故其锚索可以按照 2.2 节中类似的方法简化为水平和竖直方向的线性弹簧。其计算得到的 SFT 在波浪载荷作用下跨中位置在水平方向和竖直方向的动力响应标准差和浮重比之间的关系如图 7 所示。可以看出其计算结果和本实验结果在趋势上有很好的 consistency。综合水平和竖直方向的位移响应随浮重比的变化规律可以看出，1.2 是该 SFT 浮重比的一个优选值。

表 3. 管体运动最大位移

BWR	向左最大位移 mm	向右最大位移 mm	向上最大位移 mm	向下最大位移 mm
1.12	3.1	3.6	6.1	5.7
1.18	4.3	4.2	2.5	6.6
1.24	6.5	5.4	5.9	6.3
1.31	7.9	6.5	6.9	7.1
1.37	8.2	6.5	7.3	8.2
1.46	9.2	7.6	6.5	7.3
1.53	9.5	8.2	6.1	6.7
1.64	9.4	7.8	6.4	6.8
1.76	9.8	9.6	6.3	6.7
1.89	10.0	9.5	6.9	7.2

## 4 结论

通过对由弹簧约束的 SFT 管段模型的实验研究表明，浮重比对 SFT 的动力特性有重要影响。在波浪作用下，SFT 管段模型在水平方向和竖直方向的最大位移均随其浮重比的变化而变化，1.2 可以作为该 SFT 浮重比的一个优选值。

在本实验中未考虑锚索自身质量和横向振动以及 SFT 结构有限变形所产生的非线性效应，在后面的实验和计算分析中需要进一步的研究。同时，应用本文的方法和思路可以研究浮重比对其它布索形式的 SFT 动力响应的影响。

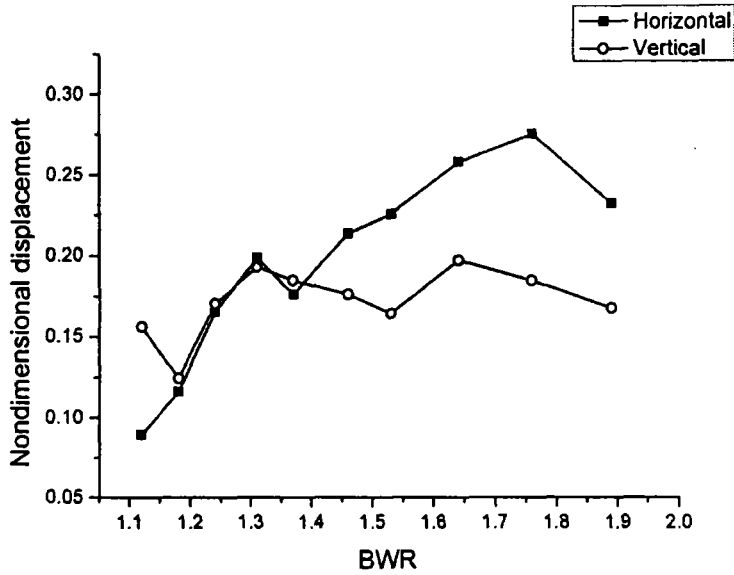


图 5. 管体无量纲位移-浮重比变化曲线

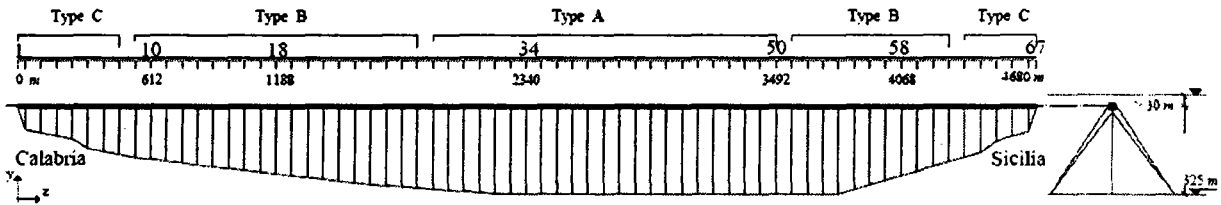
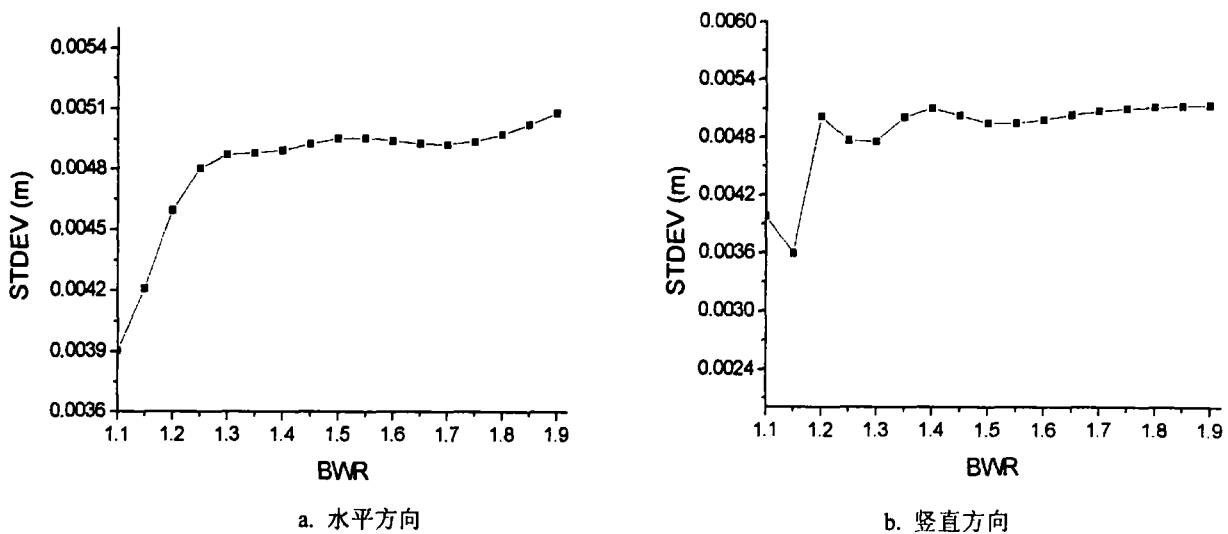


图 6. Messina 海峡水中悬浮隧道示意图<sup>[8]</sup>



a. 水平方向  
b. 竖直方向  
图 7. 波浪载荷下水中悬浮隧道管体动力响应的标准差与浮重比的关系<sup>[7]</sup>

## 参考文献:

- [1] Analysis of the submerged floating tunnel concept[R]. FEHRL Report 1996 2a.
- [2] Ahrens D. Submerged floating tunnels-A concept whose time has arrived[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1997, 12(2): 317-336.
- [3] 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.
- [4] Dahle L A, Reed K & Aarsnes J V. Model tests with submerged floating tube bridges[C]. In J. Krokeborg, editor, Proceedings of the 2nd Symposium on Strait Crossings, pages 435-442, Trondheim, Norway, June 1990. Balkema, Rotterdam.
- [5] Kunisu H, Mizuno S, Mizuno Y and Saeki H. Study on submerged floating tunnel characteristics under the wave condition[C]. Proceedings of the Fourth (1994) International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka: ISOPE, 1994. 27-32.
- [6] Kanie S, Mikami T, Horiguchi H, et al. Effect of non-linearity in restoring force on dynamic response of SFT[C]. Strait Crossing 2001[C]. Krokeborg: Swets & Zeitlinger Publishers Lisse, 2001. 529-534.
- [7] 龙旭. 不同浮重比的水中悬浮隧道在波流载荷下的动力响应[D]. 中国科学院力学研究所硕士学位论文, 2009: 86-96.
- [8] Di Pilato M, Perotti F, Fogazzi P. 3D dynamic response of submerged floating tunnels under seismic and hydrodynamic excitation[J]. Engineering Structures, 2008, 30: 268-281.