



東南大學  
SOUTHEAST UNIVERSITY

## 研究生讲座报告

海浪对于水下悬浮隧道（SFG）影响作用的评估

课程名称：专业讲座

姓名：桑阳

学院：苏州联合研究生院

专业：岩土工程

学号：224642

课程老师：赵学亮

2022 年 9 月 21 日

# 東南大學講座報告

SOUTHEAST UNIVERSITY

专业： 岩土工程  
姓名： 桑阳  
学号： 224642

讲座名称： 海浪对于水下悬浮隧道(SFG)影响作用的评估

演讲人： Igor Horev 讲座日期： 2022 年 9 月 21 日 讲座地点： 线上

## 一、 研究目的和背景

水下悬浮隧道（SFT）也被称为阿基米德桥，是一种创新结构，旨在解决水道运输的限制。ST 是一个淹没的浮动隧道，具有正净浮力、使用杆或电缆的锚固的系统。SFT 主要由上部的悬索桥、中间部位的水下悬浮隧道和下部的沉底隧道组成。

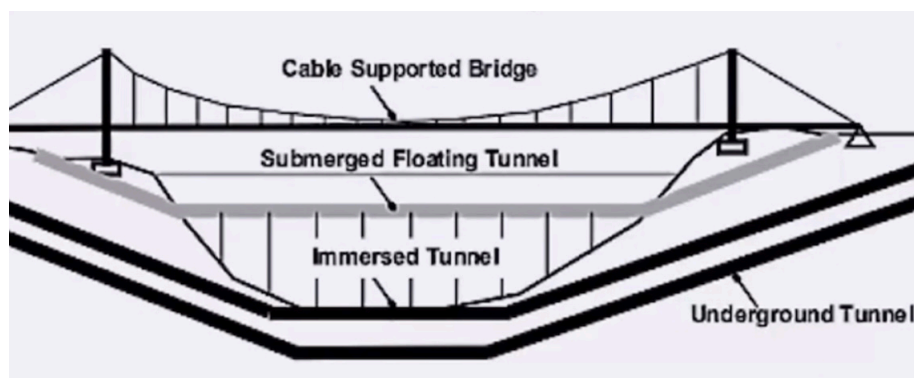


图 1: SFT 示意图

世界上目前在规划的 SFT 有中国 G3 京北高速公路、中国渤海海峡隧道、俄罗斯北令海峡隧道等。采用 SFG 技术可以显著的降低跨越海峡所需的隧道净跨长，近几年正不断进入工程师的视野之中。

由于 SFT 中部结构中水下悬浮隧道的特殊工程环境和使用条件，海浪及其产生的波动成为了其需要考量的关键因素，本讲座主要通过数值模拟的方法对于海浪作用效应进行评估以提高 SFT 工程的稳定性和安全性。

## 二、 研究内容和步骤

### 1. 理论分析方法

#### (1) 拖拽阻力和提升作用力：

由于以圆柱体的形式与沿等高线的压力分布相互作用，根据 ST 轮廓沿线的以下功能依赖流进行，压力  $p$  根据伯努利方程形成：

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p = \text{const} \quad (1)$$



图 2: 世界在规划 SFT 工程

以圆柱体形式沿着轮廓的压力分布根据以下公式得出：

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - \sin \theta^2) \quad (2)$$

在这种情况下，写入压力系数的无量纲形式定义为：

$$C_p = (p - p_0) / (\frac{1}{2} \rho U^2) \quad (3)$$

因此，通过类比无量纲形式的压力系数，阻力系数  $C$  和升力  $C$  可以写成：

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \quad (4)$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \quad (5)$$

## (2) 模型建立和假设：

1. 给出了一个外径为  $D = 27 \text{ m}$  的 SFT 轮廓，该轮廓受到区域水流作用，密度  $\rho = 998.8 \text{ kg/m}^3$ ，速度  $U = 4 \text{ m/s}$ 。对于考虑的互动案例，雷诺数： $Re = \frac{UL}{\gamma} = \frac{4 \times 27}{1 \times 10^{-6}} = 1.08 \times 10^8$ ，根据生成的雷诺数，阻力系数  $C_d$  为 0.65。

$$F_d = \frac{1}{2} \times 0.75 \times 998.8 \times 4^2 \times 27 = 161.81 \frac{kH}{M} \quad (6)$$

2. 该模型还基于以下几种假定：

- 液体是均匀且不粘稠的，不考虑结构上的流体摩擦
- 轮廓刚性且固定，该模型不考虑锚电缆
- 该模型没有考虑在水区底部附近形成边界层
- 不考虑传热现象，假设流动是连续的

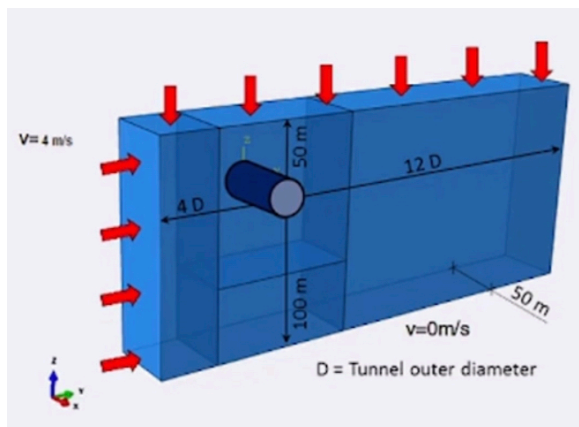


图 3: 模型建立

## 2. 研究过程

### (1) 水流-结构相互作用模型的条件和假设：

初始参数设定：水的密度为  $998.8 \text{ kg/m}^3$ ，水流速度设定为  $3.6 \text{ m/s}$ ，模拟时长为  $200 \text{ s}$ 。建立两种隧道模型：1. 椭圆形横截面 2. 双圆截面。

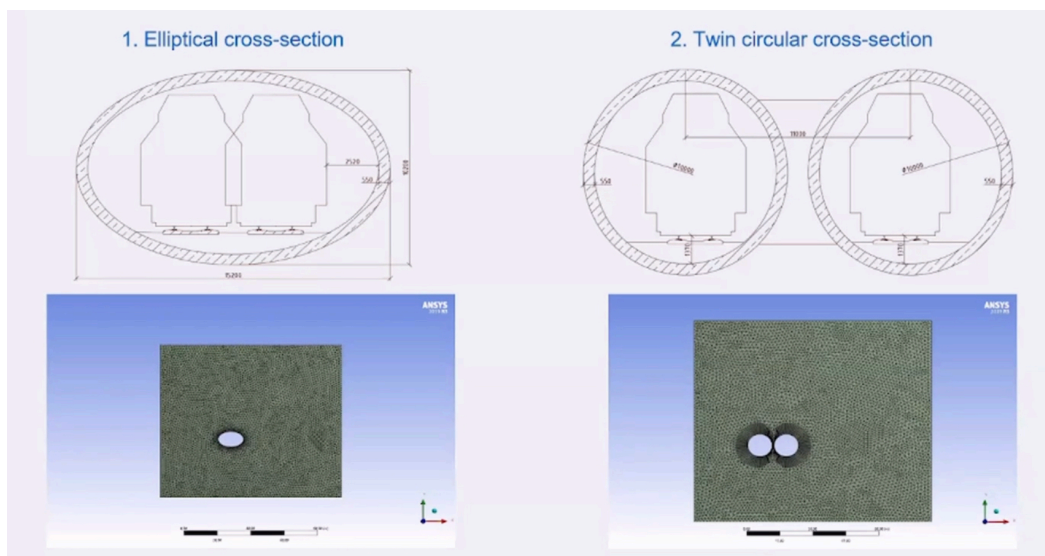


图 4: 两种隧道模型

### (2) 基于 ANSYS/LS-DYNA 的拖拽力数值模拟：

#### 1. 截面 1 中的拖拽阻力分析：

图 5 显示，数值模拟时域中的阻力值从 0 到 19s 的变化是由于模型初始 11 个条件的影响，然后图表达达到稳定值（ $2735 \text{ kN/m}$ ）

#### 2. 截面 2 中的拖拽阻力分析：

图 6 显示拖拽阻力的变化具有波动性，这可能导致结构在纵向振荡。

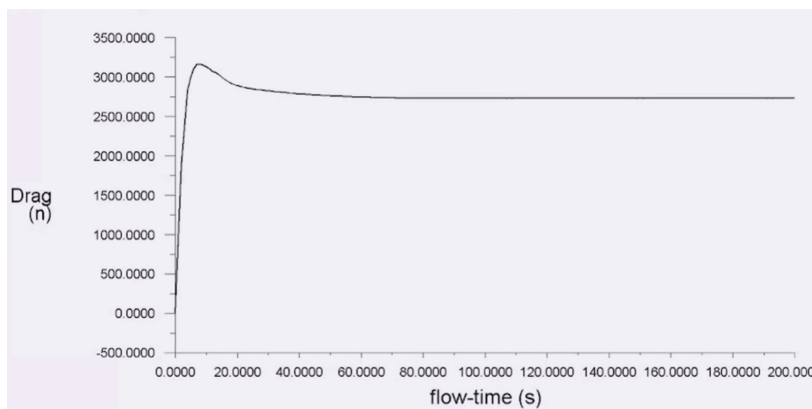


图 5: 截面 1 阻力结果

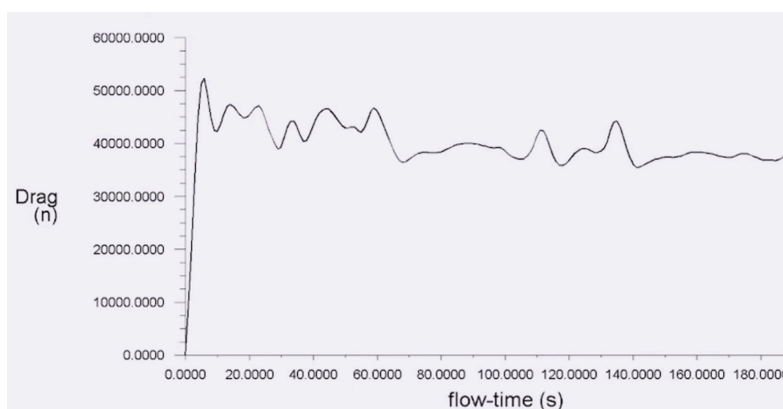


图 6: 截面 2 阻力结果

### (3) 基于 ANSYS/LS—DYNA 的提升力数值模拟

#### 1. 截面 1 中的提升力分析:

图 7 显示, 升力的作用与重力相反, 非线性下降达到稳定值 (-46960 kN/m)。

#### 2. 截面 2 中的提升力分析:

图 8 显示, 提升力变化显示出了一定的周期性, 这是发生结构横向振荡的先决条件。

## 三、 研究软件

Matlab, ANSYS, LS-DYNA。

## 四、 研究结果与分析

1. 在这项工作中, 获得了 ST 截面不同变体的相互作用“水流结构”产生的外部力值。根据数值模拟时域中获得的值, 可以谈论具有双圆形截面的结构在流中产生振荡的趋势。应该指出的是, 尽管流线型较差, 但具有双圆形截面的 SFT 有几个优点, 包括浮力与重量比较小 (椭圆截面 1.37, 双圆形截面 1.11) 和截面生产的可制造性。

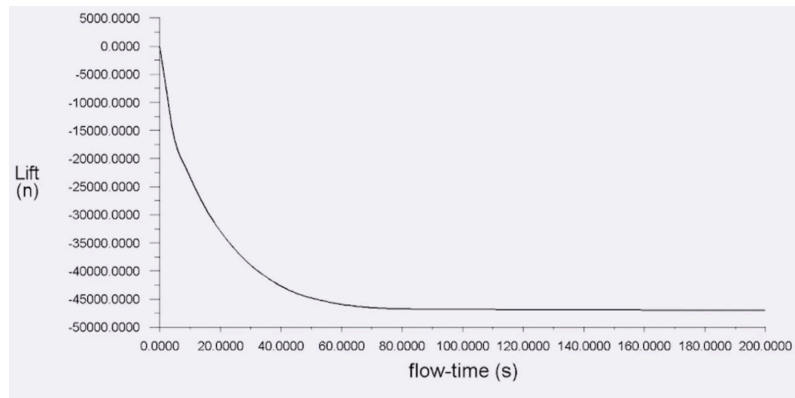


图 7: 截面 1 升力结果

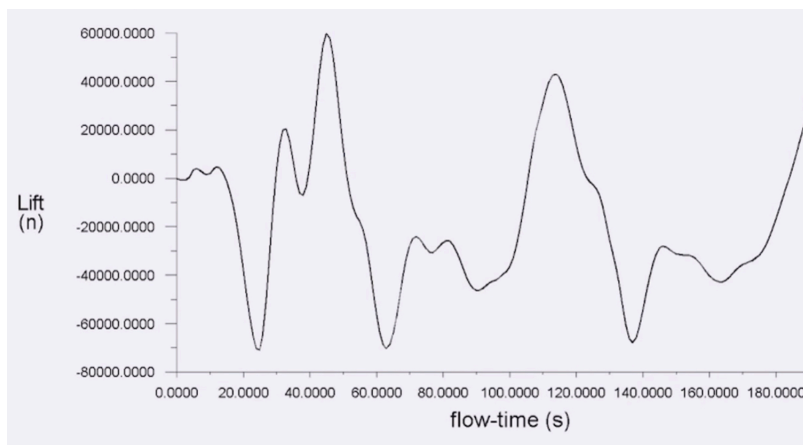


图 8: 截面 2 升力结果

2. 在水流和波的影响下对淹没浮隧道进行模拟，从而有可能找到结构的一些最佳参数。在 1.5 米管子之间的距离上，获得了流结构相互作用条件下的最佳阻力-提升依赖性。在 1.5 米管子之间的距离上，也获得了波结构相互作用条件下的最佳阻力提升依赖性。表面波对隧道结构的影响远远大于流动的影响。