

水中トンネルの二自由度フラッター 振動応答特性

CHARACTERISICS OF VIBRATION RESPONSE CAUSED BY STALL FLUTTER FOR
S.F.T (SUBMERGED FLOATING TUNNEL)

飯島 徹¹・佐藤靖尚²・近藤淑郎³・大塚夏彦⁴

Toru IIJIMA, Yasuhisa SATO, Hideo KONDO, Natsuhiko OTUKA

¹正会員 工博 室蘭工業大学助教授 CRD センター (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

²正会員 工修 鹿島 (元室蘭工業大学大学院) (〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-2-7)

³フェロー 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

⁴正会員 工博 北日本港湾コンサルタント㈱ (〒003-0029 札幌市白石区平和通り 2 丁目北 11-18)

Nowadays, there are many research reports about submerged floating tunnel (S.F.T.). In this paper, we examined the vibration response of floating tunnel supported by tension legs. We measured angle response and vibration response of the test model of S.F.T. subjected cross flow using by parameters reduced velocity and reduced angle displacement.

From that, we can observed the flatter vibration coupled between angle response and lift motion of S.F.T. and discuss about the mechanism of flatter vibration, subjected steady flow, caused by rotating vibration of ballast container mode and some amplitude (3 degrees).

Key Words ; S.F.T., reduced velocity, reduced angle, flatter vibration

1. 研究目的

近年, 海洋に囲まれる我が国では, 未利用空間が多い海洋開発の一貫としてメガフロート構想広く議論されている¹⁾. そのなかで水中トンネルは, テンションレグという全く新しい支持形式を有し, またそれにはトンネル函体内の換気のためトンネル本体に垂直に取り付けられる鉛直換気塔 (ballast container) が不可欠となる. これら水中トンネル本体はユニットごとに結合する構造設計がとられ, 流れに対して揚力, 抗力方向および函体を中心として回転する方向に自由度を有する. また鉛直換気塔が設置される構造上, 水中トンネルの振動モードが変化 (図-1 参照) し, 剥離渦の交番発生による揚力方向振動 (渦励振)²⁾ に連成して, 回転方向に二自由度フラッターが発生すると考えられる. 本研究ではこのように水中トンネル鉛直換気塔が, トンネル本

函体の二自由度フラッターを誘発することが懸念されるため, 基礎的実験としてトンネル函体を単円柱でモデル化し揚力方向振動を再現した上で, 上記の回転運動が直交流中で生じた際の連成振動の発生メカニズムとその特性を明らかにすることを目的とする.

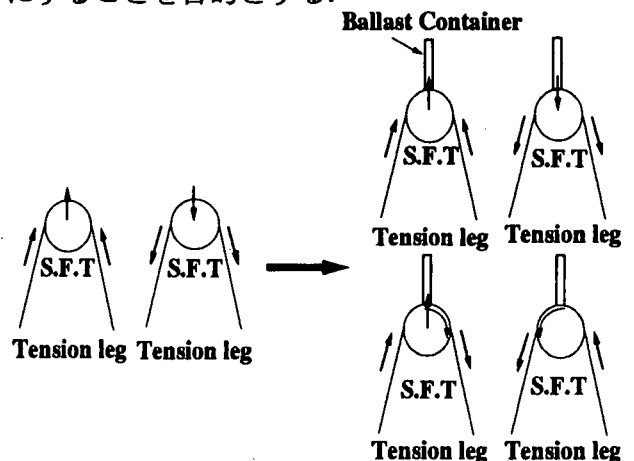


図-1 鉛直換気塔が誘発する振動モードの変化

本文中の記号を以下に示す。

- A : 無次元回転角振幅 ($=G_{\text{rot}}/G_{\text{Orot}}$)
- D : 円柱直径 (m)
- f_{Oa1} : 空気中での円柱の固有振動数 (Hz)
- f_{Ow1} : 水中での円柱の固有振動数 (Hz)
- f_v : 正弦波加振振動数 (Hz)
- f_g : 正弦波回転加振振動数 (Hz)
- G_{Orot} : アクチュエータ未稼働時の回転角加 (rad/s^2)
- G_{rot} : アクチュエータ稼働時の回転角加速 (rad/s^2)
- r : 揚力方向の加振振幅 (0.005, 0.010, 0.015(m))
- r_0 : 加振振幅比 ($=D/r$)
- St. : ストロ-ハル数 ($=f_v D/U=1/Ur$)
- Ur : 無次元流速 ($=1/\text{St.}$)
- U : 流速 (m/s)
- x : 座標変換前の揚力方向変位 (m)
- X : 絶対座標系の揚力方向変位 (m)
- y : 座標変換前の抗力方向変位 (m)
- Y : 絶対座標系の抗力方向変位 (m)
- θ_0 : 正弦波回転角振動振幅 (度)
- $\theta(t)$: 正弦波回転角変位 (度/s)
- $\theta_v(t)$: 剥離点移動角変位 (度/s)
- ξ_{Oa1} : 空気中の減衰比 (%)
- ξ_{Ow1} : 水中の減衰比 (%)

なお、加振振幅比 r_0 については、水中トンネルのテンションレグの伸び率が最大3%として上記の値を設定した。

2. 実験装置

図-2に実験装置の概略図を示す。定常流は回流水槽(図-3)により再現し、揚力方向振動は流れと直角

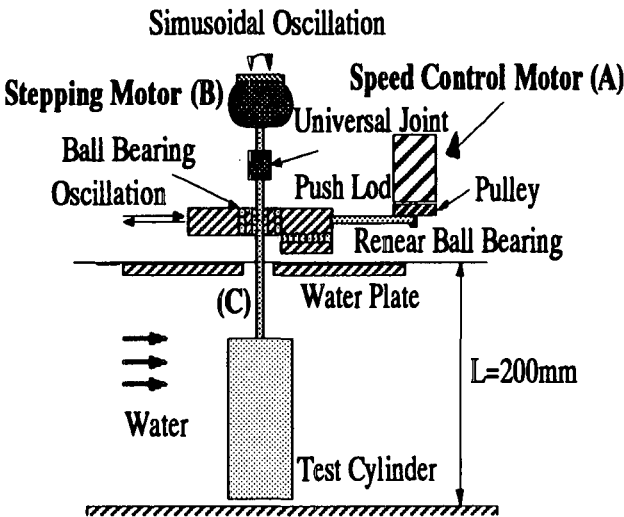


図-2 振動応答実験装置概略図

方向方向に正弦波加振(図-2(A))することにより実現する。この正弦波加振には一定回転数の運動を厳密な正弦波直線運動に変換するダブルスライダクラックシステムを用いた。また、トンネル函体の回転運動は、実験装置において円柱を反転回転(図-2(B))することにより実現する³⁾。この反転回転運動は、ステッピングモータを用いてこの動作を実現するため、デジタル的な波形で近似した制御を行い、実現した。

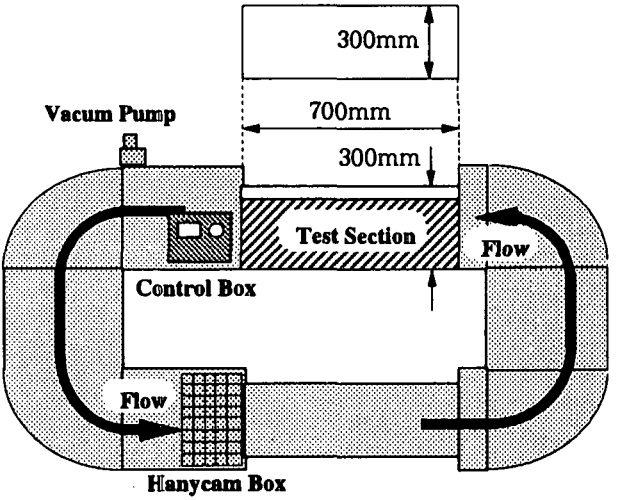


図-3 回流水槽

またここで円柱の振動応答特性を求めるにあたり、図-2中で円柱と加振機を接続する弾性棒(図-2(C))の固有振動数を低く設定する必要がある。表-1に空気中および水中で円柱をそれぞれ自由振動させた場合の固有振動数と減衰率を示す。実測値として固有振動数は、 $f_{\text{Oa1}}=3.0$ (Hz), $f_{\text{Ow1}}=2.0$ (Hz), 減衰率は、 $\xi_{\text{Oa1}}=0.6$ (%), $\xi_{\text{Ow1}}=2.5$ (%)であった。このため、固有振動数は渦の発生周波数帯域であり、減衰率は非常に低いということが確認されたので本実験装置の信頼正に問題はないと考えられる。

表-1 円柱の固有振動数と減衰率

Natural Frequency		Damping Ratio	
in Air (Hz)	in Water (Hz)	in Air (%)	in Water (%)
3.0	2.0	0.6	2.5

円柱内部には加速度センサーが2個互いに垂直に取り付けられており、振動変位は加速度として算出される。その際、円柱は反転回転運動するために測定座標そのものが反転回転運動するため、絶対座系に変

換する必要がある。そのため式(1)の処理により円柱変位を絶対座表系に変換する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. 実験結果

(1) 振動応答特性

図-4に実験結果の一例として回転角振幅、無次元流速と回転角加速度の関係を表わした図を示す。これより、反転回転させない場合の応答変位に比較して、反転回転させた場合は応答変位がピークとなる無次元流速が小さくなる傾向がある。また低無次元流速域 ($Ur=2$ 程度) では反転回転させなかった場合と比較して反転回転させた場合は振動応答が大きくなる傾向がある。

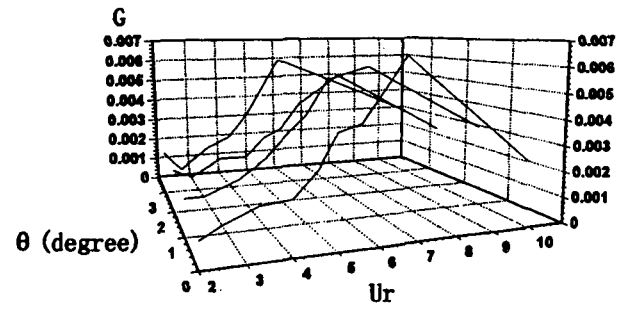


図-4の結果をまとめとして、反転回転させた場合の回転角変位を反転回転させなかった場合の回転角変位でノルマライズしたグラフを図-5に示す。図より回転角振幅を大きくさせる流速域が2点存在することが確認される。 $r_0=0.429$ では $Ur=4$ と 5.5 付近、 $r_0=0.286$ では $Ur=3$ と 5 付近、 $r_0=0.143$ では $Ur=2$ と 4.5 付近というように、ロックイン流速より低い流速域とロックイン流速域において最大で回転角振幅が2倍となっている。またこの回転振幅は θ が大きくなる程大きくなる。このように、ロックイン流速域(上述の、 $4.5 < Ur < 5.5$)で回転角振幅が大きくなるのは、渦励振に連成して二自由度フラッター生じていると考えられる。またロックイン流速より低い流速域(上述の、 $2 < Ur < 4$)はインライン振動が発生する領域である。そのため、回転角振動はインライン振動にも連成すると考えられる。

以上をもとに、例えば無次元回転角振幅(A)が2倍になる時のテンションレグの伸び率に換算する。トンネル本函体の径が10m、レグが20mとすると回転角振幅が3度の時の伸び率は、許容伸び率3%に対して1.9倍(r_0 にして0.480程度)に相当する。よってこの振動現象を考慮して設計する必要があると考えられる。

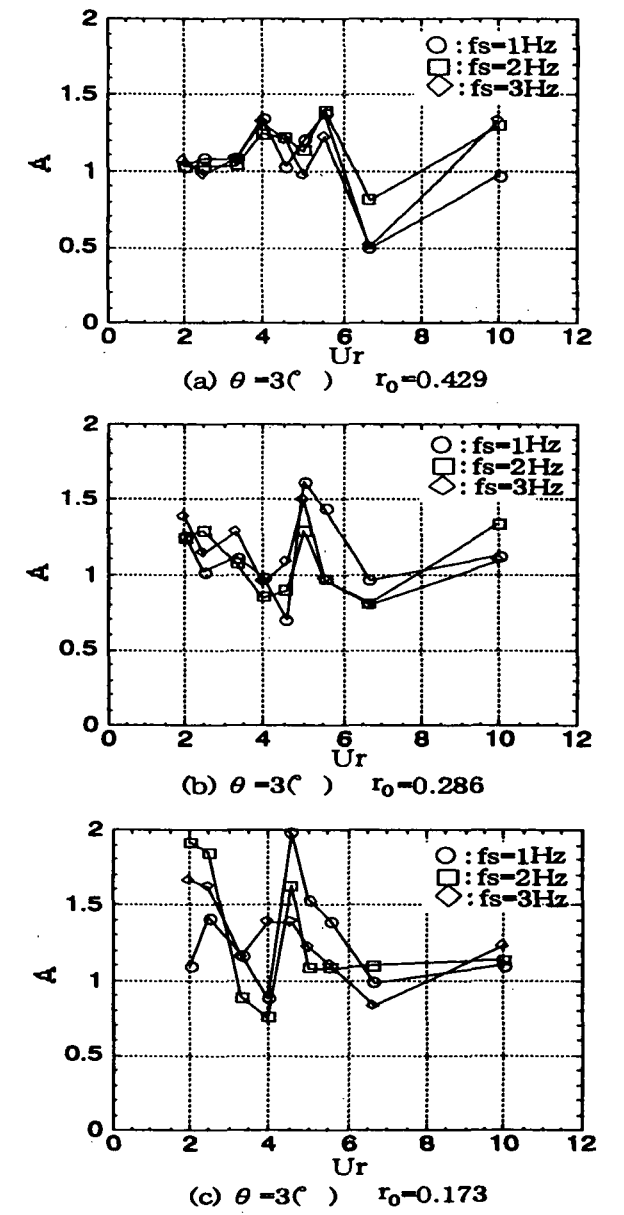
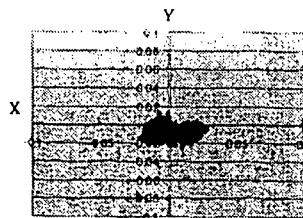


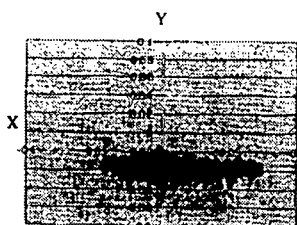
図-5 Ur とAの関係

(2) 円柱のリサーチ図

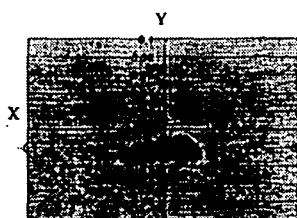
図6に円柱のリサーチ図と回転角方向変位の生波形を示す。図より円柱はほぼ楕円軌道で、振れ周りを起していることが確認される。高流速域では揚力方向振動が卓越し、流速が低下するに従ってその振幅は小さくなることも確認している。また回転角振動応答と比較すると、回転角振幅が卓越する場合には、抗力方向にふれまわりの幅が大きくなることが確認された。



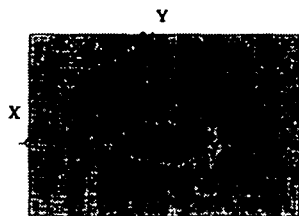
(a) 連成振動なし($Ur = 5.56$)



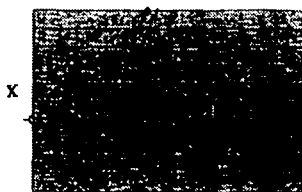
(b) 連成振動あり($Ur = 10.0$)



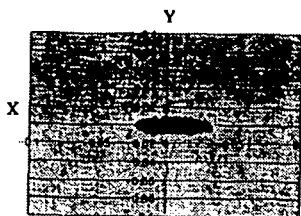
(c) 連成振動あり($Ur = 6.67$)



(d) 連成振動あり($Ur = 5.56$)



(e) 連成振動あり($Ur = 3.33$)



(f) 連成振動あり($Ur = 2.00$)

図-6 円柱のリサージュ図

4. 結論

結論として以下にまとめられる。

- (1) 回転角振動振幅の計測により、ロックイン振動と連成して回転角振動振幅が最大で2倍程度増加することが確認されたため、テンションレグ形式のサポートでは二自由度フラッターが生じることが確認された。
- (2) 円柱の振動変位のリサージュをとることにより、円柱の振れ周り振動が生じることが確認された。

以上より水中トンネル本函体(図-7(A))の二自由度フラッターが鉛直換気塔(図-7(B))の振動で誘発されることが確認され、この構造設計もしくは流体力低減方法を確立する必要があることを提言する。

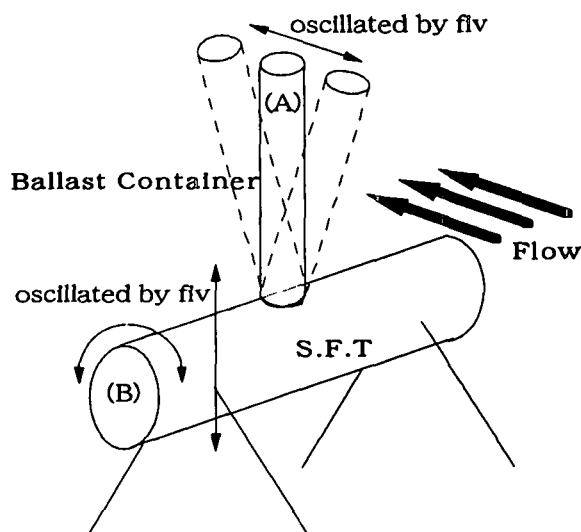


図-7 鉛直換気塔が誘発する
2自由度フラッター概念図

謝辞：本研究を遂行するに当たり成北日本港湾コンサルタント(株)の補助があったことを付記しておきます。また実験、データ整理に協力していただいた平成10年度卒研生、久瀧康央君にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水中トンネル研究調査会：水中トンネルⅠ，Ⅱ，1995
- 2) Blevines R.D. : Flow Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 1990
- 3) 飯島徹，他：水中トンネルに作用する非定常流体力とその低減方法（反転回転式アクチュエータによる流体力特性），海洋開発論文集，vol. 13, pp 907-912, 1997