

水中トンネルに作用する非定常流体力とその低減方法の評価 (反転回転式アクチュエータによる流体力特性)

Characteristics of unsteady fluid lift force of SFT acted by flip-flop type actuator subjected to cross flow

飯島 徹※、近藤淑郎※※、大塚夏彦※※※、大島 修※※※※
Toru Iijima, Hideo Kondou, Natuhiko Otuka, Osamu Oosima

These days, SFT will be discussed about marine development in several countries especially Japan and Norway. In this paper, we researched for the unsteady fluid lift force on SFT caused by vortices and developed flip-flop type actuator for reduction of this unsteady fluid lift force estimated by measurement of unsteady fluid force and movement of separating points on the surface of SFT used by parameters: St. rotating angle, rotating frequency, and oscillation frequency.

Key Words: Unsteady fluid lift force, Flip-Flop-type actuator, Movement of separating points, SFT

1. 緒言

今日、都市の地方分散化に伴う都市の交通体系整備と公共工事のコスト削減の要求が高まる中、海洋に囲まれる我が国の現在、未利用空間が多い海洋開発の一環としてメガフロート構想と共に、海洋に挟まれた空間を結ぶ水中トンネル構想が広く議論されている。ことに水中トンネル設計ハンドブックの作成にいたる研究成果が報告されている。しかし、その実現のためには、日本のとりまく海洋の潮流動向、地震多発地域である環境により、水中浮遊式のチューブ式トンネルには、長周期の波動や、定常流にさらされる場合が懸念されるなど、解決されるべき問題点は数多く残されている。その中でも、その構造上で水中トンネルの支持条件に制限があり、対象となる水中トンネルの固有振動数が極めて低く数Hz以下となり、上記の条

件下では、渦によるロックインによる揚力方向の振動が生じ、低周期振動による問題に着目した。そこで、その発生メカニズムである渦の剥離点移動と固執振動数とストローハル数の引き込み現象に着目し、振動の起きるメカニズムの原因を利用した反転回転式アクチュエータを提案し、その効果を、振動状態を再現されている円柱に働く非定常流体揚力と流れの剥離点移動測定により、本反転回転式アクチュエータの性能評価を実験的に、ストローハル数、回転振幅、回転振動数、加振振幅比によって明らかにした。

2. 記号

σ : アクチュエータ未使用の流体力RMS
 σ_a : アクチュエータ使用時の流体力RMS
 $d(t)$: 正弦波加振変位

※ 正会員 室蘭工業大学 CRDセンター

※※ 正会員 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科

※※※ 正会員 北日本港湾コンサルタント

※※※※ 学生員 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科

- d : 正弦波加振振幅
 D : 円柱直径
 D_0 : 正弦波加振振幅比
 $(= d / D)$
 f_s : 正弦波加振振動数
 f_r : 回転反転振動数
 S_r : ストローク数
 $(= f_r \times D / U)$
 U : 流速
 β : 比定常流体力RMS比
 (σ_o / σ_a)
 θ_o : 反転回転角振動振幅
 $\theta(t)$: 反転回転角振動変位
 $\theta_v(t)$: 剥離点移動角変位
 κ : 剥離点移動比
 (アクチュエータ作動時の $\theta_v(t)$ のRMS と
 アクチュエータ無しの $\theta_v(t)$ RMS の割合)

3. 実験装置

3. 1 テスト円柱

水中トンネルを円柱にモデル化して直径10 cm、長さ20 cm肉厚3 mmの中空アクリル材の円柱を用いた。表面には、渦の剥離点の移動をとらえるために圧力センサーが5度間隔に複数取り付けられている。また、この円柱の一端は自由端、他端はアルミ性の棒バネで方持ち支持されていて、力測定用に歪みゲージが揚力、抗力の二方向が同時計測されるよう互いに垂直に取り付けてある。またこの円柱は、流体力計測のため、振動状態を実現するために1から3 Hzで加振される。そのため、この円柱の支持部の剛性を加振振動数の数倍以上に設計され、実際の空気中での固有振動数は13.6 Hzで、減衰率は対数減衰比で5%程度である。この円柱は流速1.8 m/sまで流速を変化させることの出来る回流水槽に取り付けられる。円柱総質量は407 gである。(図1参照)

3. 2 正弦波加振装置

対象となる振動は渦によるロックイン振動であるため、振動数の単一振動数での正弦振動である。

そこで、その振動時における流体力特性を調るために、加振装置を用いて実現した。

この装置は一定回転数の運動をスピードコントロールモータ(オリエンタルモータ社製BL430GD-AF)によって制御され、その回転運動を中心軸から偏芯された軸に取り付けたプーリと両スライダクランク機構により、一方向の正弦波加振可能である。また、その加振振幅は、偏芯と回転中心との距離で実現される。なお、本研究においては、流れに垂直方向の揚力においてのみ検討する。なお、高周波のノイズが生じぬように、スライダクランクはすべてリニアベアリング等でガイドされている。また、この加振機で加振するのは前述の円柱と反転回転式アクチュエータ両者を同時に加振するために反転回転式アクチュエータの台をリニアベアリングに取り付けてある。その時に実現した正弦波加振の振動変位は加振棒に取り付けた歪みゲージ式加速度計により測定され、その例を図2に示す。

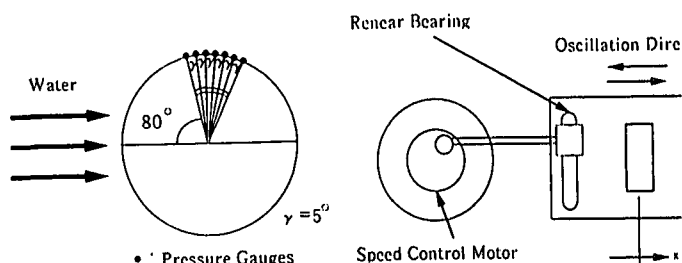


図1 テスト円柱および加振装置

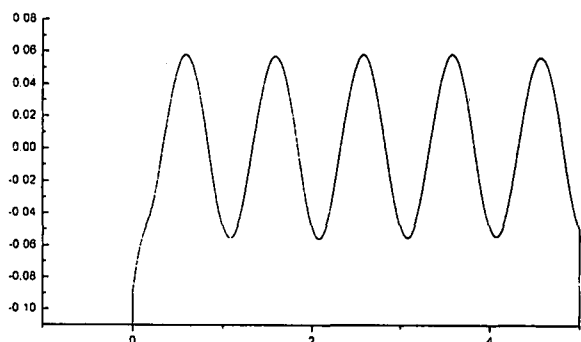


図2 加振した場合の変位波形例

加振振動数は1、2、3 Hzの3種で、加振振幅比は0.05、0.1、0.15の3種類である。

3. 3 反転回転式アクチュエータ

対象となる振動現象の発生メカニズムは流れの剥離点の移動運動による渦放出と円柱の振動数が引き込みあうロックイン現象である。そこでその振動を抑制するために、外部から反力を生じさせる反転回転式アクチュエータは、対象とする水中トンネルでは構造上また、水中であることを考慮すると現実的でない。そこで、その発生メカニズムを疎外するアクチュエータとして反転回転型アクチュエータを提言する。この反転回転式アクチュエータは、揚力振動が規則的な単一正弦振動であることから、剥離点移動運動が正弦波運動であること、また、その剥離の生じるメカニズムが壁面での摩擦から流れの逆流現象が生じることの2点である。そこで、壁面をこの単一正弦波の反転回転させる反転回転式アクチュエータを振動状態で渦の規則的交番発生を疎外するよう用いて低減させる装置である。

横軸時間、縦軸角加振変位 θ である。この加振制御はソフト上で回転角加振振幅 θ 、回転角反転振動数 f_r を変化させることが可能である。そこで、この正弦波反転振動を実現するために、基本ステップ角 0.072 度の5相ステッピングモータ（オリエンタルモータ社製PK564BN-TG10）を用い、図3に示す方法で正弦波反転回転運動を実現する。

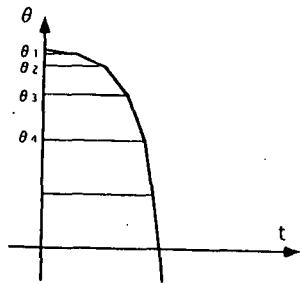


図3 正弦波反転回転加振原理

反転回転式アクチュエータは台上に固定され、ねじれ変位絶縁型ユニバーサルジョイントにより反転回転運動が円柱の支持部にロスなく伝達されるようになっている。また、このモータの軸はころがり軸受けで回転支持され、その下部に歪み

ゲージが取り付けられている。これは、円柱が力を受け、微小振動することによる軸の偏芯等をステッピングモータにフィードバックされるのを防ぐためである。以上のまとめとして図4に実験装置のレイアウト図を示す。

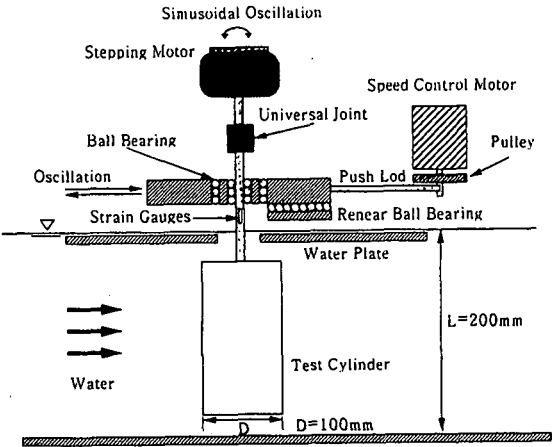


図4 実験装置レイアウト

またシステム構成図は以下の図5に示す通りである。

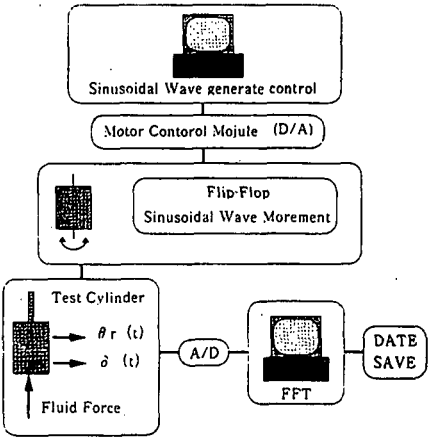


図5 システム構成図

4. 非定常流体力

非定常流体力はバネ部に取り付けられた歪みゲージ出力 $\delta(t)$ に構成係数を乗じて力とし、その値から加振力 $m\alpha$ を差し引くことで算出する。

$$F(t) = \delta(t) - m\alpha \tag{式1}$$

その際、この円柱は反転式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、絶対座標軸に変換する必要がある。そこで、 $\delta(t)$ を算

出するために、軸上の歪みゲージX、Yを以下の式により座標変換した上で絶対座標系での揚力を算出する。

ここで、この反転回転式アクチュエータの評価として、以下のように整理する。

反転回転式アクチュエータ作動による影響を、流体力の値のF(t)のRMS値の比すなわち β で示す。この値が正ならば流体力は増加、負ならば減少を示す。また、ここでその流体力が振動に際して励振あるいは制振するかについては、正弦波加振変位に対する非定常流体力の位相差によって評価する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad \text{式 2}$$

5. 剥離点移動運動測定

円柱表面によどみ点から80度の地点から5度間隔で数個の圧力センサーが設置されている。このセンサーの上を剥離点が通過する場合に、圧力信号が変化し、剥離点移動の周期で極値を取る。そこで、数個のセンサーの極大値をとる時間とよどみ点からの角度とをプロットすることにより、剥離点の移動運動を観測する。また剥離点の移動振幅に関しては、逆フーリエにより剥離点移動関数を用いて式3の様に算出する。

$$\theta_v(t) = \theta_v \sin 2\pi f_r t \quad \text{式 3}$$

なお、歪みセンサー出力、圧力センサー出力、加振変位（加速度）センサー出力は同時にA/D変換された後、コンピュータでFFTを施され、上記の手段により、解析される。データは2000点、取込時間は5msecである。

6. 実験結果

図6、図7、図8はそれぞれ、 $St = 0.3$ 、 $\theta_0 = 1$ 度、 $f_s = 1\text{Hz}$ の場合、 $St = 0.2$ 、 $\theta_0 = 1$ 度、 $f_s = 1\text{Hz}$ の場合、 $St = 0.1$ 、 $\theta_0 = 1$ 度、 $f_s = 1\text{Hz}$ の場合であり、

(a)、(b)、(c)は横軸が加振振幅比、縦軸がそれぞれRMS比、その時の加振変位と流体力の位相差 ϕ 、剥離点の移動比 κ である。

これから以下のことが記述される。

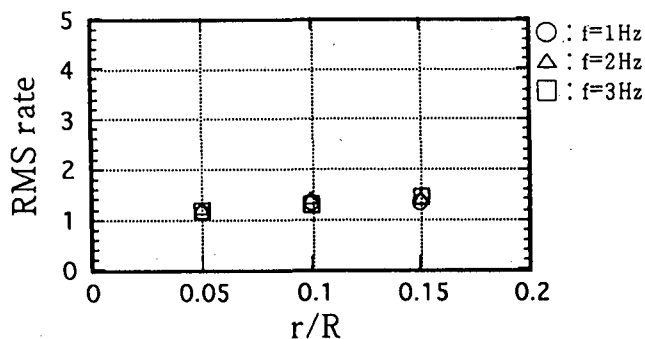
図6の St 数が0.3と流速が小さい場合は、(a)から反転回転式アクチュエータ使用による流体力の大きさは振動振幅比0.1の場合に減少するが、(b)の位相角の関係より、流速がロックイン振動時より小さい場合で、このとき振動振幅比が小さい場合には高振動数で反転回転式アクチュエータを使用すると励振する。

大きい振幅比で振動する場合には低い振動数で反転回転式アクチュエータを稼動させた場合に制振効果が現れる。

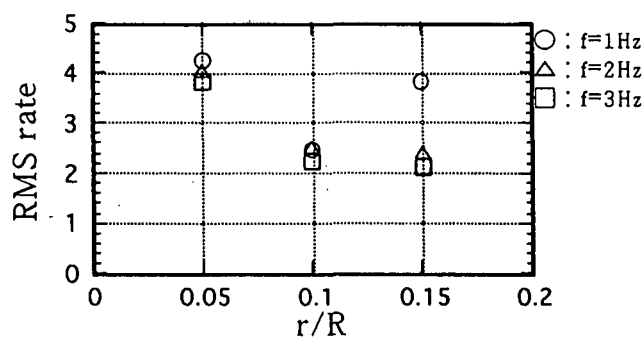
図7の St 数0.2とロックイン振動数領域では、(a)から流体力RMS比はいずれも1より大であるが、振動振幅が増加するに連れてその割合は小さくなる。また(b)から、その流体力の特性は、大振幅比での振動時に効果的な制振作用を与えることが分かる。

図8の St 数が0.1と流速が比較的大きい場合は、(a)から流体力RMS比はいずれも1前後で余り変化が見られないが、振動振幅が大きい場合に、1より小さくなる。また(b)から、その流体力特性の位相遅れが見られる。そのため、アクチュエータによる制振効果が確認される。

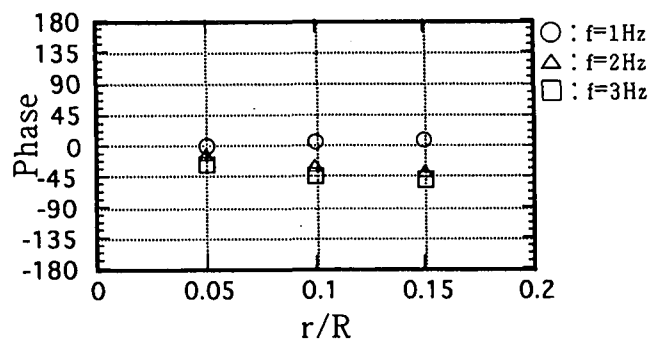
また、図6、7、8の(c)のどの場合にも制振効果が現れる場合には剥離点の移動量は減少していることから、非定常流体力が減衰として働く場合には見かけ上の St 数が変化して、ロックイン振動メカニズムを破壊することが確認された。次に図9に回転加振振動数を横軸、縦軸に正弦波揚力方向加振変と非定常流体力との位相差の関係を示す。このグラフより、 St 数が小さく、比較的流速が高い場合には、反転回転加振振動数が正弦加振振動数より小さい場合には、位相変化が見られないので、あまりアクチュエータによる振動への寄与はない。



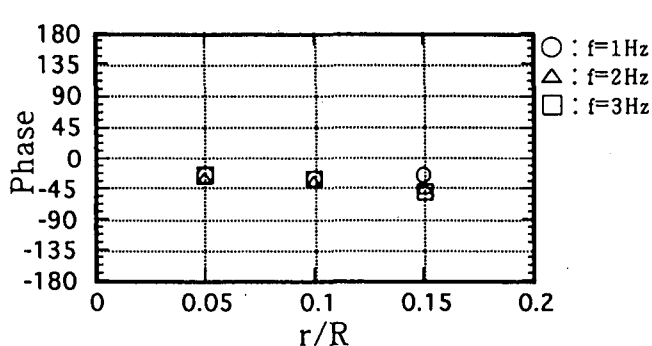
(a) $St=0.10$, $\theta=1$, $f_s=1$



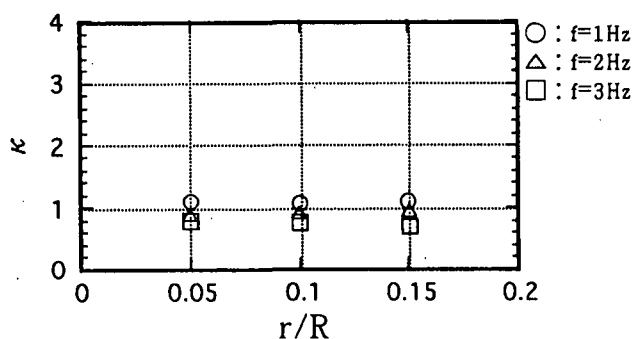
(a) $St=0.20$, $\theta=1$, $f_s=1$



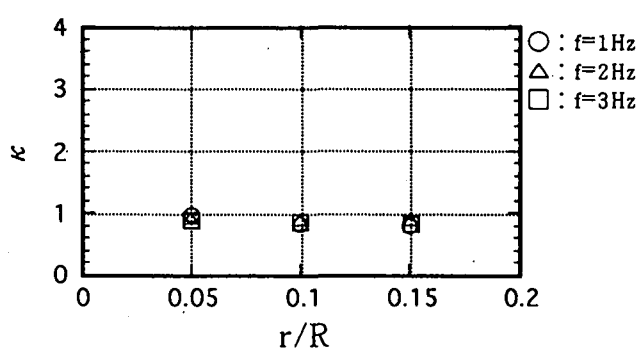
(b) $St=0.10$, $\theta=1$, $f_s=1$



(b) $St=0.20$, $\theta=1$, $f_s=1$



(c) $St=0.10$, $\theta=1$, $f_s=1$



(c) $St=0.20$, $\theta=1$, $f_s=1$

図6 $St=0.3$ 、 $\theta_0=1$ 度、 $f_s=1$ Hz
の場合の結果

一方高い反転回転振動数の場合には、位相遅れになるため、制振効果を得ることが出来る。また、 St 数が0.2より小さいロックイン振動数以前の比較的流速の低い場合では、反転回転振動数によらず、位相進みが生じることから、励振効果

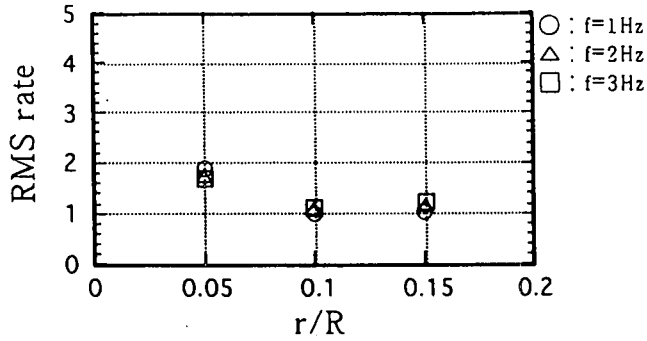
図7 $St=0.2$ 、 $\theta_0=1$ 度、 $f_s=1$ Hz
の場合の結果

を得ることがわかる。また、 St 数0.2に関しては、加振振動数以上の回転振動数でアクチュエータを稼動させた場合に、位相遅れとなり制振効果が現れる。

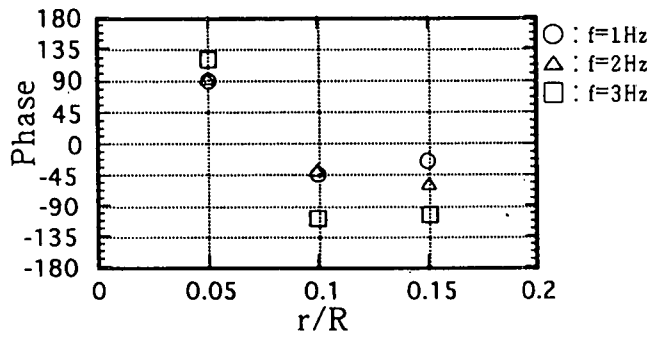
7. まとめ

以上のことが本研究で明らかになった。

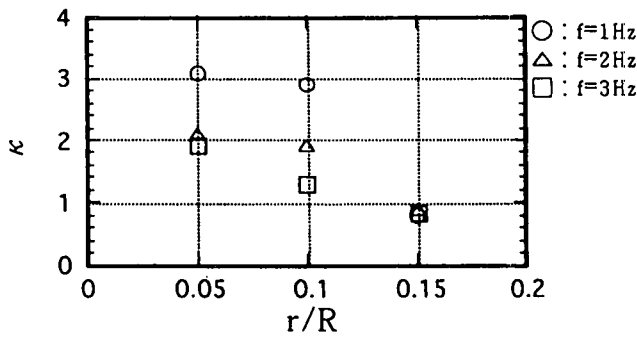
- (1) 反転回転アクチュエータによる、非定常流体力特性を、振動振幅比、反転回転加振角度振幅、反転回転加振振動数のパラメータにより、実験的に明らかにすることにより、このアクチュエータによる円柱形構造物（水中トンネルのモデル）で揚力低減に対する有効性を確認した。
- (2) この反転回転式アクチュエータにより、剥離点の移動運動を変化することが確認された。また、非定常流体力が制振として加わる場合は、剥離点の移動量が減少、励振として働く場合は、剥離点の移動量が増加することが確認された。
- (3) ロックイン振動が起きない比較的低い流速に相当する場合は、反転回転式アクチュエータを使用することにより反転回転式アクチュエータの反転回転振動数が加振振動数以上の高い振動数で作用させると励振効果として働くことが確認された。
- (4) ロックイン振動数の St 数の場合には、反転回転振動数が加振振動数以上の高い振動数で作用させると制振効果として働くことが確認された。



(a) $St=0.30$, $\theta=1$, $f_s=1$



(b) $St=0.30$, $\theta=1$, $f_s=1$



(c) $St=0.30$, $\theta=1$, $f_s=1$

図8 $St=0.1$ 、 $\theta_0=1$ 度、 $f_s=1\text{Hz}$ の場合の結果

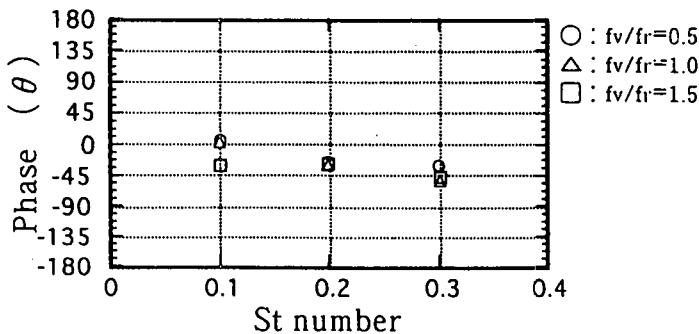


図9 反転回転加振振動数毎の位相関係

参考文献

- 水中トンネル設計ハンドブック、(社) 水中トンネル研究調査会発行
 日本機械学会流体力学便覧；流体力学編
 Flow induced vibration；Blevin、R.D. Nostrand Reihold (1990)