

II-59

直交流にさらされる円柱構造物に作用する非定常流体力低減効果
(Flip-Flop式アクチュエータによる流体力特性)

室蘭工業大学 正会員 飯島 徹
 室蘭工業大学 フェロー 近藤 俊郎
 室蘭工業大学 学生員 佐藤 靖尚
 北日本港湾コンサルタント(株) 正会員 大塚 夏彦

1. はじめに

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っている。海洋に囲まれるわが国の現在、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。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や地震多発地域である環境により、水中浮遊式の円柱構造物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。なかでも円柱構造物の支持条件に制限があり、対象となる浮遊式円柱構造物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るため低周期問題に着目した。そこで、その発生メカニズムである渦の剥離点移動と固有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理を利用した反転回転式(Flip-Flop式)アクチュエータを提案する。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、本アクチュエータの性能評価を実験的に、ストローハル数、(但しここでストローハル数はメカニカルストローハル数を意味する)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

d_0 : 正弦波加振振幅	$d(t)$: 正弦波加振変位
D_0 : 正弦加振振幅比 (= d/D)	D : 円柱直径
f_s : 正弦波加振振動数	f_r : 反転回転振動数
St : ストローハル数	U : 流速
X : 絶対座標系の揚力方向	Y : 絶対座標系の抗力方向
β : 非定常流体力 RMS 比 (σ_0/σ_s)	θ_0 : 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	σ_0 : アクチュエータ未使用の流体力 RMS
σ_s : アクチュエータ使用時の流体力 RMS	

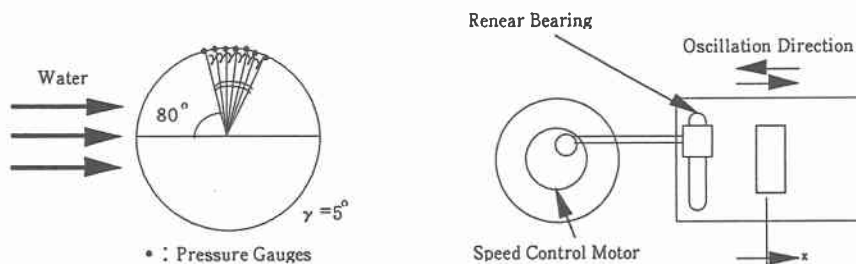


図1 テスト円柱および加振装置

2. 実験装置

2.1 テスト円柱

テスト円柱は、直径10cm、長さ20cm、肉厚3mmの中空アクリル材を用いた。表面には、渦の剥離点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、他端はアルミ製の弾性棒で片持ち支持されていて、力測定用に歪ゲージが揚力、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、振動状態を再現するために1から3Hzで加振される。そのため、この円柱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13.6Hzで、減衰率は対数減衰比で5%程度である。この円柱は流速1.5m/sまで変化させることのできる回流水槽にとりつけられる。円柱総質量は407gである。(図1参照)

2.2 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とする。そのため、単一振動数での正弦波振動となる。そこで、その振動時における流体力特性を調べるために、加振装置を用いて実験した。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)によって制御し、その回転運動を中心軸から偏芯された軸に取り付けられたプーリとダブルスライダクランク機構により、一方向の厳密な正弦波加振が可能である。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。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。尚、高周波ノイズが生じぬように、スライダクランクは全てリニアベアリング等でガイドされている。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実用性は弾性棒に取り付けた歪ゲージ式加速度変換器により検証し、その例を図2に示す。

2.3 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。そこでその振動を制御しようとする場合、外部から反力を生じさせるタイプのアクチュエータは、対象とする水中浮遊式円柱構造物では構造上と水中であることを考慮すると現実的ではない。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案する。揚力振動が規則的な単一正弦波振動であることから、剥離点移動運動が正弦波運動となる。またその剥離の生じるメカニズムは壁面での摩擦によって表面流れに逆流現象が生じる点にある。そこで壁面を単一正弦波の反転回転させる本アクチュエータで実現し、振動状態で渦の規則的交番発生を疎外することができる。その結果として揚力低減を実現させることになる。

図3の横軸は時間 t 、縦軸は角加振変位 θ であるこの加振制御はソフト上で回転角加振振幅 θ_0 、回

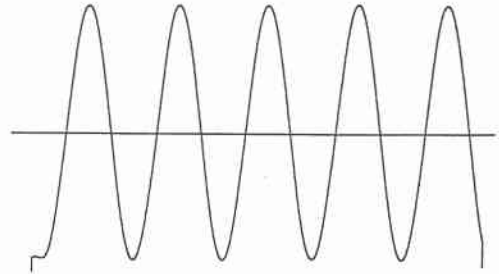


図2 加振した場合の波形例

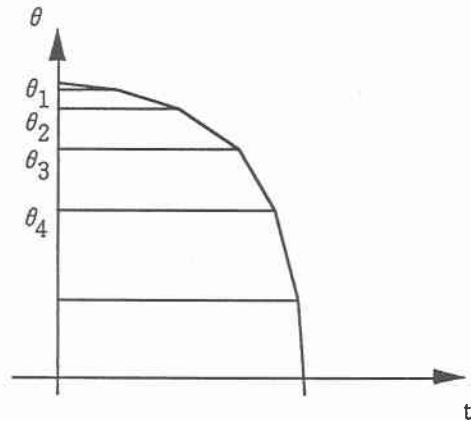


図3 正弦波反転回転加振原理

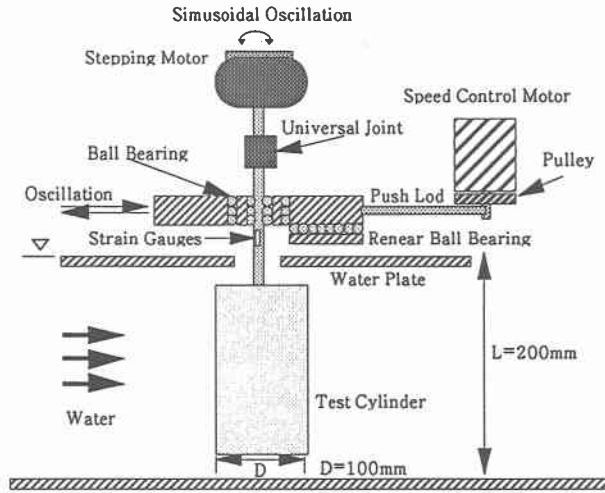


図4 実験装置レイアウト

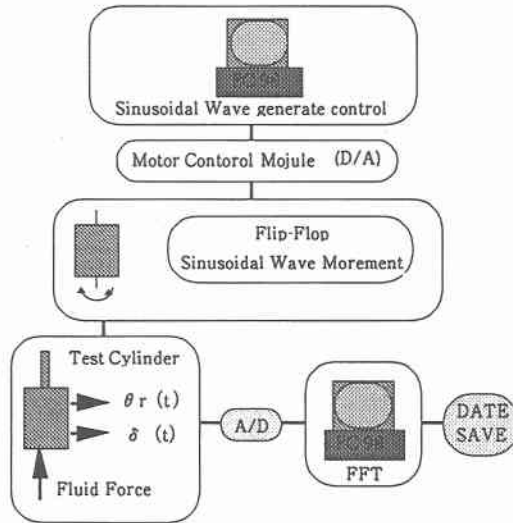


図5 システム構成図

転角反転振動数 f_r を変化させることが可能である。そこでこの制限波回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に示す方法で正弦は反転回転運動を実現する。

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、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。また、システム構成図は図5に示すとおりである。

3. 非定常流体力

非定常流体力は弾性部に取り付けられた歪ゲージ出力 $\delta(t)$ に較正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。(式1)

$$F(t) = k\delta(t) - m\alpha \quad \text{式1}$$

その際、この円柱は反転回転運動をするために、測定座標そのものが反転回転運動するため、絶対座標系に変換する必要がある。(式2) そこで、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。

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

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1より大ならば流体力は増加、1より小ならば減少を示す。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、正弦は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。

4. 剥離点移動運動測定

円柱表面によども点から80度の位置から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、よども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、逆フーリエ変換により剥離点移動関数を用いて式3のように算出する。

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

なお、歪ゲージ出力、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、コンピューターでFFTを施され、上記の手段により解析される。データは2000点、サンプリング周期は5msecである。

6. 実験結果

図6、7、8はそれぞれ $St=0.3$ 、 $\theta_0=1$ 度、 $f_s=1$ Hzの場合、 $St=0.2$ 、 $\theta_0=1$ 度、 $f_s=1$ Hzの場合、 $St=0.1$ 、 $\theta_0=1$ 度、 $f_s=1$ 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)の位相角の関係により、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アクチュエータを稼働させた場合に制振効果が現われる。

図7の $St=0.2$ とロックイン振動数領域は、(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つれ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わかる。

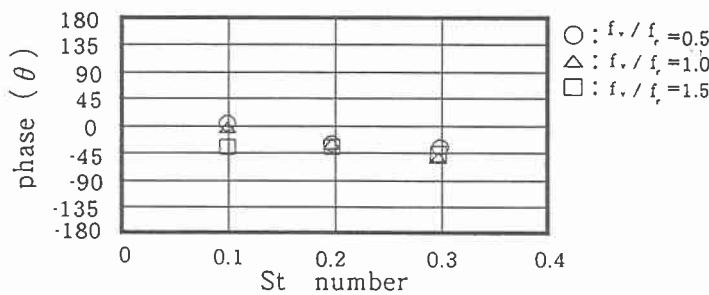
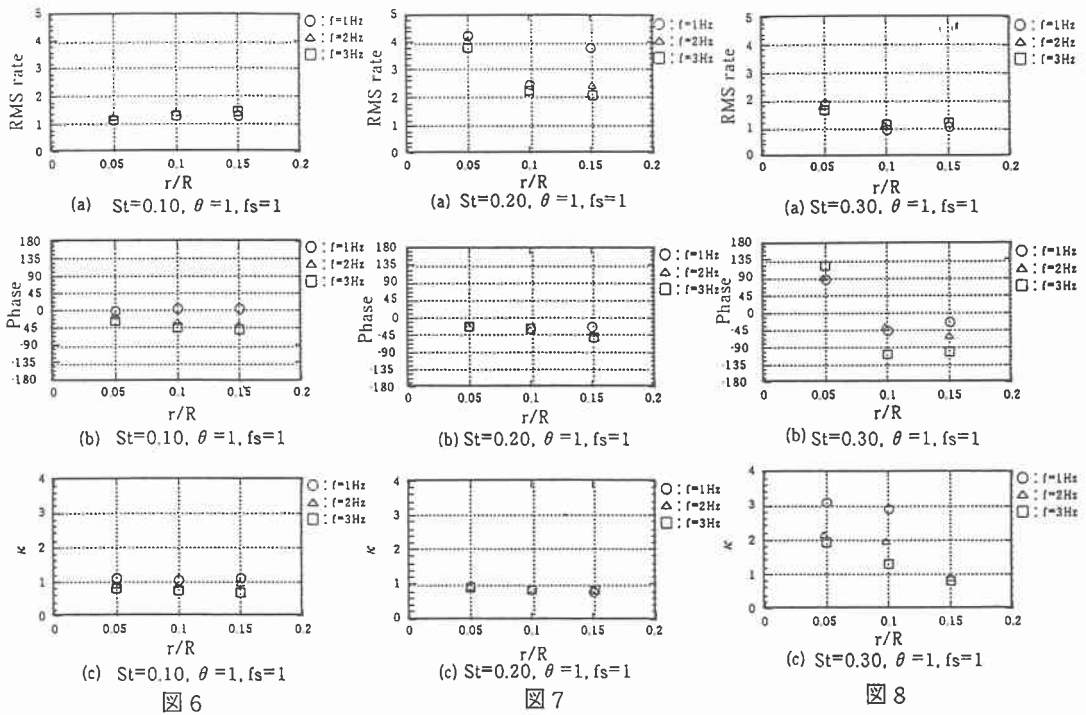


図8の $St=0.1$ と流速が比較的大きい場合は、(a)から流体力RMS比はいずれも1前後であり変化は見られないが、振動振幅が大きい場合に1より小さくなる。また(b)から、その流体力特性の位相遅れが見られる。そのため、アクチュエータの制振効果が確認される。

また図6、7、8の(c)のどの場合にも制振効果が現われる場合には、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位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。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できる。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

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働させた場合に位相遅れとなり、制振効果が現われる。

7. まとめ

- (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って、このアクチュエータによる円柱型構造物で揚力低減に対する有効性を確認した。
- (2) この反転回転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それ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、反転回転アクチュエータを使用することにより、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。

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 (1995)
日本機械学会流体工学便覧；流体工学編
Flow induced vibration; blevins, Van Nostrand Reinhold (1990)