

円柱構造物における渦励振発生機構の数値流体解析による検討

○ 中央大学大学院 学生員 佐藤 亮 中央大学 正会員 平野 廣和
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

円柱構造物において、比較的低風速域において発現する渦励振現象は、円柱が流れ直角方向に激しく振動する応答振幅は限定的であるものの、共振風速近傍に至ると急激に応答振幅や空気力の性質が変化することが知られている。また、斜張橋や吊橋において、並列ケーブル形式が多く採用されている。この並列円柱構造は、高風速域における上流側円柱の後流の影響により、ウェークギャロッピング現象と呼ばれる下流側円柱の複雑な振動現象を起こすことがある。したがって、ケーブルの耐風安全性や機能維持の観点から、これらの現象における最大振幅や発現風速などの振動特性を予め見積もっておくことは重要である。このため、実橋における観測や、現象の把握及び対策をするための風洞実験が行われている。

本報では、これらの風洞実験結果を基に、振動する円柱まわり流れの2次元及び3次元解析を行うことで、渦励振の空力特性及び発現機構を把握すると共に、実問題へのCFDの適用性を論ずる。具体的には、河井らの円柱の振動実験¹⁾と対応させ、Reynolds数 2.0×10^4 において、渦励振時における応答特性の急変現象を明らかにし、空気力特性や振動応答を検討する。

2. 解析諸元

2.1 支配方程式

(1) 流れの場の支配方程式

流れ場を非圧縮粘性流れとして扱うと、支配方程式は非圧縮性 Navier-Stokes(NS)方程式で表される。また、物体の振動に合わせたメッシュの変形に対処するために Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE)法を用いてメッシュ速度を支配方程式に取り込む。この場合の NS 方程式は次式で表される。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \cdot \nabla \mathbf{u} \right) - \nabla \cdot \sigma(p, \mathbf{u}) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 $\mathbf{u}$ は流速、 $\mathbf{v}$ はメッシュ速度、 t は時間、 p は圧力、 Ω は解析領域を示す。また、 $\sigma(p, \mathbf{u})$ は応力テンソルであり、次式となる。

$$\sigma(p, \mathbf{u}) = -p\mathbf{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}), \quad \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (3)$$

ここで、 $\mu(= \rho \nu)$ は粘性係数、 ν は動粘性係数、また、 $\mathbf{I}$ は単位テンソルである。

(2) 構造モデルの支配方程式

構造モデルの振動は、鉛直たわみ変位 η およびねじれ変位 θ についての次式の振動方程式で表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{p} \quad (4)$$

$$\text{ここで、} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} mD^2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2mD^2\delta_\eta f_\eta & 0 \\ 0 & 2I\delta_\theta f_\theta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 4mD^2\pi^2 f_\eta^2 & 0 \\ 0 & 4I\pi^2 f_\theta^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \eta/D \\ \theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} DL \\ M \end{bmatrix} \quad \text{であり、}$$

δ_η , δ_θ は構造減衰率、 f_η , f_θ は固有振動数、 m , I は質量と慣性モーメントを表している。また、スクルートン数は無次元量として次式のように定義される。

$$S_{C\eta} = \frac{2m\delta_\eta}{\rho D^2} \quad S_{C\theta} = \frac{2I\delta_\theta}{\rho D^4} \quad (5)$$

2.2 動的解析における自由振動法

自由振動法は、ばねによって弾性支持された断面に初期条件を与え、その後の振動応答を求めるものであり、たわみおよびねじれの1自由度振動方程式に直接時間積分法の線形加速度法を適用して振動応答を求めている。

2.3 解析手法

離散化手法として、丸岡らが提案している IBTD/FS 有限要素法²⁾を用いる。また、乱流モデルには2次元解析においては RANS の SA モデルを、3次元解析においては LES の Smagorinsky モデルを用いる。

2.4 解析条件

(1) 解析領域と解析条件

解析領域は、円柱直径をDとした場合、円柱前方と側方を7.0D、円柱後方を20.5Dとしている。3次元解析におけるアスペクト比は2としている。境界条件は、流入境界で一樣流速、側面でslip、流出境界で移流型流出境界条件、円柱表面は円柱の移動速度を与え、円柱上の視点で考えると、円柱表面でnon-slipとしている。3次元解析における解析領域上下境界には、周期境界条件を与えている。

解析条件を表-1に示す。一樣流入風速 U_∞ は円柱直径 D を用いて次式で無次元化される。

$$U_{r\eta} = \frac{U_\infty}{f_\eta D} \quad (6)$$

メッシュ分割は、断面近傍で節点を集中的に配置しており、2次元平面で総節点数は14190、総要素数は14000となっている。また、河井らの円柱の振動実験¹⁾と対応させ、スクルートン数を1.5、Reynolds数を 2.0×10^4 とする。なお、本報においては、鉛直たわみ変位 η に着目し、流れ方向の変位およびねじれ変位 θ については拘束されているものとする。自由振動の初期条件は、静的解析を十分に行った後の結果を用いる。

表-1 解析条件

	2D	3D
Reynolds数	2.0×10^4	
総節点数	14190	14190×20
総要素数	14000	14000×20
周方向分割数	160	
軸方向長さ L	2.0D	
軸方向分割数	20	
最小分割幅	0.0005D	
時間増分 Δt	0.02D/U	
無次元風速 $U_{r\eta}$	1.0 ~ 10.0	
構造減衰率 δ_η	1%	
スクルートン数 S_{Cy}	1.5	
質量比 $m/\rho D^2$	75	

3. 解析結果

3.1 2次元解析結果

図-1 に自由振動状態での揚力係数とたわみ変位、後流渦の振動数を示す。無次元風速3においては、揚力係数は振動初期から定常であ

キーワード：円柱、CFD、渦励振、ALE法

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel. 03-3817-1816 fax. 03-3817-1803

り、たわみ変位はほとんど 0 となっている。揚力のパワースペクトルについては、後流渦の振動数が 0.232 Hz となっており、静的解析におけるストローハル数に一致している。これが円柱の固有振動数とは一致していないため、look-in 現象の発現は確認されない。また、揚力とたわみ変位は同位相で推移していることが確認された。

次に無次元風速 5 について、揚力のパワースペクトルより、後流渦の振動数が 0.198 Hz となっており、固有振動数とほぼ一致していることから、lock-in 状態となっていることがわかる。たわみ変位の急激な増幅に伴い、揚力係数は増加と減少を繰り返した後定常になっている。また、無次元風速の増加に伴い、揚力と変位に位相差が生じるようになり、渦励振時には約 80 度の位相差が生じていることが確認できる。これより、振動現象の発現において、揚力に遅れて円柱が振動していることがわかる。

さらに無次元風速 10 について、変位と揚力に関しては無次元風速 3 の時と同じ傾向であり、look-in 領域からはずれていることもわかる。しかし、揚力と変位に約 180 度の位相差が見られる。

図-2 に無次元風速 5 における渦励振時の圧力分布図を示す。たわみ変位が 0 の時の流れ場を見ると、円柱下部で剥離せん断層が発達し、再付着による圧力上昇が見られる。上部では圧力が低下し、圧力差により上向きの揚力が作用していることがわかる。たわみ変位が最大の時の流れ場を見ると、円柱下部から剥離渦が放出され、上部では剥離せん断層と円柱下部からの剥離渦が結合し、上下面での圧力差はほとんどみられない。たわみ 0 において揚力がピークをむかえ、たわみ最大時に揚力がほぼ 0 となっていることで、揚力とたわみの位相差により、揚力に遅れて円柱が振動していることがわかる。

図-3 に定常振幅と無次元風速の振動応答関係を示す。実験では無次元風速 5 付近から渦励振が発現しているのに対し、2次元解析では無次元風速 4 付近から発現している。これは2次元解析の Strouhal 数が実験に比べて高いことに起因していると考えられる。また、同じスクリーン数に設定した実験値と解析値において、最大振幅に差がみられる。これは2次元解析による流体力の過大評価に起因していると考えられる。また、実験では最大振幅後、look-in 領域からは外れた後に、緩やかに振幅が 0 に向かっているのに対して、解析では急激に 0 に向かっている。これは、2次元解析による揚力の振動数と円柱の固有振動数の差が急激に広がってしまうことに起因していると考えられる。

3.2 3次元解析結果

図-3 示す定常振幅と無次元風速の振動応答関係より、振動の発現機構、最大振幅、振動の継続と、2次元解析とは異なった結果がみてとれ、実験と同様な傾向がみられる。実験において look-in が生じているのは無次元風速 5.7~7 となっているのに対し、解析において look-in が確認できたのは無次元風速 6~7 であった。なお、無次元風速 5.5 においても非常に look-in に近い状態であった。

4. おわりに

本報において、振動する円柱まわり流れの2次元及び3次元解析を行った。その結果、2次元解析でも渦励振等の動的現象の再現は可能であり、現象の物理機構を可視的に解明できることがわかった。よって、2次元解析は定性的な流れ場を予測するには有効であると考えられる。しかし、

渦励振の発現風速や振動応答等において定量的に精度を欠いた結果となった。一方、3次元解析により、剥離点の定まりにくい断面まわり流れにおいては、軸方向の影響により、振動の応答、発現機構について2次元解析とは異なることが示された。示した結果は振動応答のみではあるが、定量的にも実験値を精度よく再現できると考えられる。

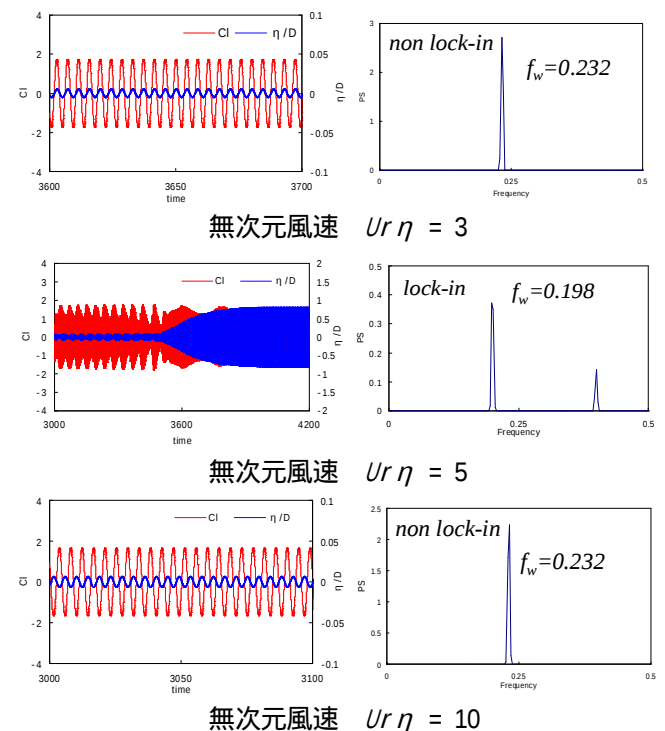


図-1 揚力係数とたわみ変位、後流渦の振動数

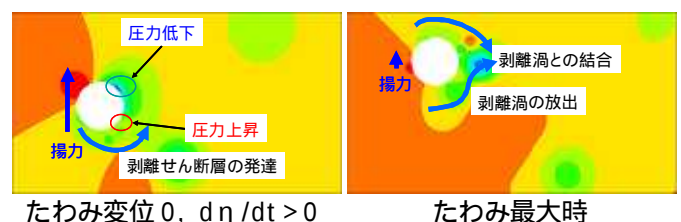


図-2 無次元風速 5 における渦励振時の圧力分布図

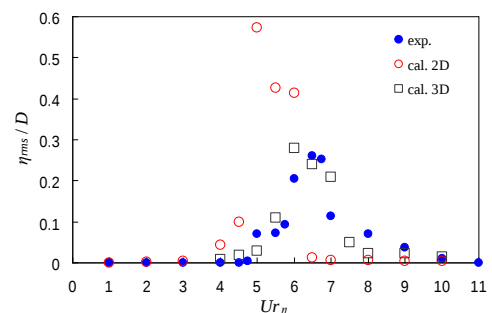


図-3 2次元、3次元円柱の振動応答

<参考文献>

- 1) 河井宏允, 二井啓, 藤波潔: リブ付き円柱の渦励振とギャロッピング, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.461-466, 1998
- 2) 丸岡他: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析, 土木学会構造工学論文集 Vol. 43A, pp383-394, 1997. 3