

数値流体解析を用いた円柱構造物の渦励振振動特性の検討

中央大学 正会員 平野 廣和 神奈川県庁 正会員 佐藤 亮*
 中央大学大学院 学生員 川崎 貴之 八戸高専 正会員 丸岡 晃

1. はじめに

円柱構造物における比較的低風速域で発現する渦励振現象は、円柱の固有振動数と後流渦の振動数が一致することによる *lock-in* が生じ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。そのため、これらの現象の振動特性等を把握しておくは、構造物の耐風安定性や機能維持の観点から重要なことだとされており、構造物の設計においても必要不可欠なこととなっている。従来の研究では、渦励振現象は円柱からのカルマン渦放出に伴う自励的渦励振として説明されてきた。しかし、最近の研究¹⁾から励振開始時においては *lock-in* が認められないことや、風速の増加に伴う振動振幅が段階的に変化することなどから、これを自励的渦励振に帰着するのは無理があるとされている。そして、これらに関して河井らの研究によると、励振時の振幅の変化から、振動を3つの風速領域に分類し、それぞれの風速域での振動の発生機構が異なることを論じている。また、*lock-in* 後の領域における振動に関して、これを渦励振と考えるよりも空力負減衰力に伴うギャロッピングタイプの空力不安定振動ではないかと指摘されている。そのため風洞実験、数値解析の両面から多く検討がなされている。

そこで本研究ではこの空力不安定振動に着目し、円柱の渦励振特性を数値解析の面から検討する。具体的には、河井ら¹⁾が行った一様流中での円柱の風洞実験に関して、3次元数値流体解析を対応させることを目的とし、一様流中でのLESのSmagorinskyモデルに基づく3次元数値流体解析を行う。

2. 解析概要

数値流体解析には著者ら²⁾が提案しているIBTD/FS有限要素法を用いる。本解析手法では、運動方程式はIBTD法、連続式はFS法により離散化され、流速と圧力は分離して求まり、それぞれ陰的に解くことになるが、代数方程式の行列が対称となるため、対称行列用の代数方程式で効率よく解析することができる。代数方程式の解法にはSCG法を用いる。また、有限要素には流速と圧力に対して双1次の四角形要素を用いる。また、乱流モデルはLESのSmagorinskySGSモデルを用いる。

解析手法は、構造減衰と空力減衰を分けて算出するために、風洞実験で広く行われているバネ支持振動試験法と同一の手法を取り入れる。具体的な解析方法は、静的解析において定常状態になった流れを初期条件とし、ここに加振振幅 $\eta_0=0.05D$ として強制加振を与える。さらに十分に加振し

$$S_{C\eta} = \frac{2m\delta_\eta}{\rho D^2} \quad S_{C\theta} = \frac{2I\delta_\theta}{\rho D^4} \quad (1)$$

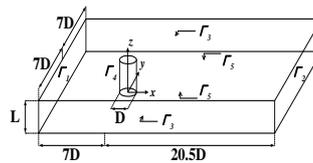


図-1 解析領域

表-1 解析条件

| 解析ケース | 3次元解析 |
|---------------------|-------------------|
| Reynolds数 | 2.0×10^4 |
| 総節点数 | 14190×21 |
| 総要素数 | 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 |
| モデル定数 C_s | 0.1 |
| 無次元風速 U/η_0 | 3.0~9.0 |
| 加振振幅 η_0 | 0.05D |
| 構造減衰率 δ_η | 1% |
| スクルートン数 $S_{C\eta}$ | 1.5 |
| 質量比 $m/\rho D^2$ | 75 |

た状態で解析を行った後、これを自由振動法における初期条件とし、自由減衰状態における空力減衰率を算出する。ここで本手法での自由振動法は、たわみ及びねじれの1自由度振動方程式に直接時間積分法の線加速度法を適用し、振動応答を求める。また、スクルートン数は無次元量として式(1)に定義する。

解析領域を図-1に、解析条件を表-1に示す。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、アスペクト比は2.0である。境界条件は、 Γ_1 で一様流速、 Γ_2 で流体の表面応力0、 Γ_3 でslip、 Γ_4 で円柱の移動速度を与え、円柱上の視点で考えるとnon-slipとしている。 Γ_5 で周期境界条件を与えている。なお、本論では鉛直たわみ変位 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。

3. 解析結果及び考察

(1) 振動応答

図-2に強制加振後の自由振動状態における振動応答の風洞試験結果及び数値解析結果との比較を、図-3には各無次元風速での応答のパワースペクトルを示す。ここで図-2の縦軸は、風直角方向の変動変位のRMS値を円柱の直径で除した無次元振幅 η_{rms}/D 、横軸は無次元風速 U/η_0 を表す。

河井ら¹⁾の風洞実験では、 $U/\eta_0=5.0$ 付近から励振が始まり、 $U/\eta_0=6.5$ で最大振幅 $\eta_{rms}/D=0.26$ に達する。そしてその後 $U/\eta_0=10.0$ 付近まで励振が持続する。また、*lock-in*現象が生じているのは $U/\eta_0=5.7\sim 7.0$ 付近となることが示されている。河井らはこの風洞実験結果より、励振時の振幅の変化を図-2に示す3つの風速領域であるⅠ～Ⅲに分類している。

これに対して解析結果は、 $U/\eta_0=4.5$ 付近から円柱の励振が始まり、風速が上がるにもない振幅も増加して行く。 $U/\eta_0=6.0$ で最大振幅 $\eta_{rms}/D=0.26$ を示し、ここから風速が上がるにもない振幅が徐々に減少している。また、実験値と

キーワード : 円柱、CFD、渦励振、ALE法

*研究当時 中央大学大学院学生員

連絡先 : 〒192-0395 東京都八王子市東中野 742-1 tel.042-674-4170 fax.042-674-4118

の整合性も比較的良好な結果である。

(2) 各風速領域での検討

領域 I は風洞実験では、励振開始時 $U_{\eta}=4.8$ から $U_{\eta}=5.7$ までの領域、解析結果では、励振開始時の $U_{\eta}=4.5$ から $U_{\eta}=5.5$ までの領域である。図-3 (a), (b) に示す領域の特徴は、応答のパワースペクトルに 2 つのピークが存在することである。 $U_{\eta}=4.5$ においては 0.18Hz と 0.15Hz, $U_{\eta}=5.0$ においては 0.18Hz と 0.17Hz である。前者の鋭いピークは円柱の固有振動数に伴うピークで、後者の小さいピークはカルマン渦発生に伴うピークだと考えられる。励振が始まるまでには、パワースペクトルには固有振動数以外のピークはなく、静止状態ではカルマン渦の放出に伴う変動揚力は極めて小さい。図-3 (a), (b) に示すように、その刺激によってカルマン渦の発生が助長され、円柱には周期的変動が働くようになるが、この揚力の周波数は円柱の固有振動数とは一致せず、風速の増加とともに徐々に増大する。よってこの励振はカルマン渦の発生とは直接的には関係がなく、別の発生機構によって生じたものと考えられる。さらに風洞実験結果¹⁾において、このような振動現象の特徴は、奥行きが幅より小さい角柱の場合と同様であると言われている。

次に領域 II は、実験結果では $U_{\eta}=5.7$ から 7 までの領域、解析結果では lock-in が生じている $U_{\eta}=5.5$ から $U_{\eta}=7.5$ までである。図-3 (c) の領域では応答のパワースペクトルのピークは 1 つとなり、カルマン渦は円柱の固有振動数と同期して発生する lock-in が生じる。

領域 III は $U_{\eta}=7$ から励振が収まる $U_{\eta}=10$ までの領域である。解析結果では lock-in 領域からはずれた後、振幅が収束するまでである。応答のパワースペクトルには固有振動数に伴うピーク以外に固有振動数の半分程度の周波数付近にもう一つのピークが現れる。図-3 (d) に示すように 0.2Hz とほぼ半分程度である 0.12Hz を見ることができる。また、この領域では円柱の後流中での風速変動や既往の研究から、lock-in は生じていないと考えられる。よってこの領域における励振現象の継続は、渦励振と考えるよりもギャロッピングタイプの空力不安定振動と考える方が妥当である。

(3) 空力減衰

図-4 に自由振動開始からの振動振幅の減衰率を算出したものを示す。縦軸に減衰率、横軸を無次元風速とする。励振前から lock-in に至るまでは、無次元風速の増加に伴い減衰率は正であることから、強制振動から自由振動に移ると振幅が緩やかに収束していることがわかる。また、lock-in が生じると減衰率は負減衰となり振幅は増加する。そして無次元風速の増加に伴い、振幅が収束するにつれて減衰率も増加している。ここで、 $U_{\eta}=8.0$ において、図-3 (d) に示すように円柱の固有振動数とカルマン渦の発生周波数の一致はみられないので lock-in から外れているのがわかる。しかし、図-4 の赤く囲まれた斜線領域では、減衰率が負減衰を示している。これは風洞実験においても示唆されているように、lock-in 後の振動の継続は、渦励振と考えるよりも空力負減衰に伴う、いわばギャロッピングタイプの空力不安

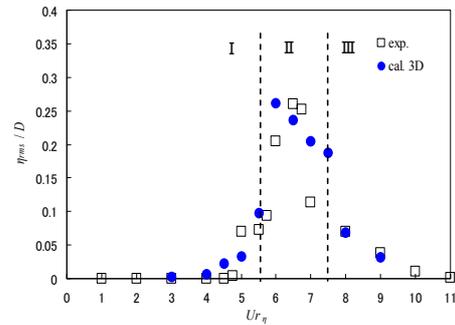
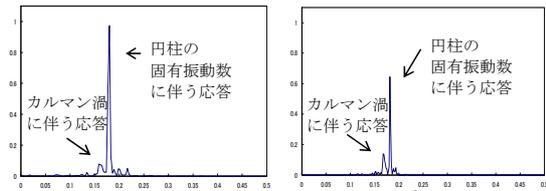
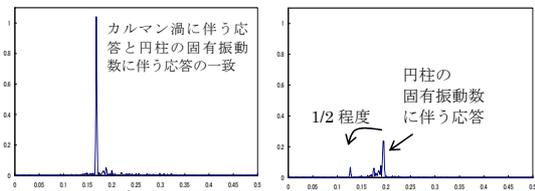


図-2 円柱の振動応答 (河井¹⁾らの実験との比較)



(a) 無次元風速 $U_{r\eta}=4.5$ (I) (b) 無次元風速 $U_{r\eta}=5.0$ (I)



(c) 無次元風速 $U_{r\eta}=6.0$ (II) (d) 無次元風速 $U_{r\eta}=8.0$ (III)

図-3 各無次元風速における応答のパワースペクトル

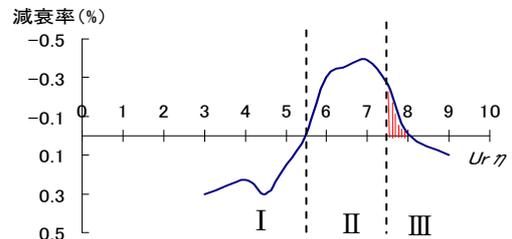


図-4 自由振動開始時の減衰率

定振動であり、これを 3 次元数値流体解析の面からも示すことができた。

4. おわりに

円柱の渦励振現象について一様流中での 3 次元数値流体解析を行い、風洞実験との比較・検証を行った。風洞実験において指摘されている円柱の励振発生機構の 3 つの領域に関し、解析結果からもこの指摘を確認することができた。特に励振域でのギャロッピングタイプの空力不安定振動を捕らえることができた。

<参考文献>

- 1) 河井宏九, 二井啓, 藤皮潔: 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, pp461-466, 1998.
- 2) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原陸人: 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, 構造工学論文集 Vol.42A, pp383-394, 1997.