

数値流体解析を用いた突風作用時における基本断面の非定常空気力特性に関する研究

徳島大学大学院 学生会員 久延 周平 徳島大学 正会員 野田 稔

徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

近年、日本各地で突風による事故が増え、突風による被害が問題となっている。過去には種子田ら¹⁾が風洞実験や水槽実験を行い、少しずつ突風作用時に物体に作用する非定常空気力特性が明らかにされてきているものの現在もなお未解明な部分は多い。そこで、著者らは突風作用時における正方形柱の非定常空気力特性をより明確にするために、無風から有風へ風速変化させるケースと、より現実的な条件と考えられる有風から有風へ風速変化させるケースの2つについて曳航水槽実験と数値流体解析を用いて検討をしてきた²⁾が、数値流体解析において波形のばらつきに問題があり、本研究ではそれを改善するために乱流モデルを用いた2次元の解析を行い、検討を行った。

2. 実験概要

計算値と比較検討するために行った曳航水槽実験の概要について説明をする。本実験では設定した初速度から台車を発進させたときの急発進により生じる力を突風により生じる力とみなしている。そこで図-1、図-2に示す水槽(幅420mm×高さ320mm×奥行き7200mm)と台車を用いて、水槽に水が溜まっている状態の力から水槽に水が溜まっていない状態で得られる慣性力を差し引くことで突風により生じる力のデータを得ている。また、本実験で用いる供試模型として正方形柱模型(幅20mm×奥行き20mm×高さ250mm)を台車に取り付けており、図-3に示すように迎角(0°から45°まで5°ピッチ)を与えている。実験パターンは全て等加速度での速度変化とし、初速度0m/sから定常速度0.2m/sに風速変化させる条件と初速度0.2m/sから定常速度0.4m/sに風速変化させる条件、初速度0.4m/sから定常速度0.6m/sに風速変化させる条件を行っており、加速時間を0.1、0.2、0.5、1.0sとしてそれぞれの迎角ごとに実験を行った。



図-1 水槽の外観



図-2 台車の外観



図-3 正方形柱模型の設置角度

3. 解析概要

本解析では矩形要素を使って分割された非構造格子によって2次元の解析を行った。流体の支配方程式は非圧縮性粘性流体のナビエ・ストークス方程式で、乱流モデルとしてRASモデルを用いた。図-4に用いた解析メッシュを示す。なお、用いた正方形柱模型(幅20mm×奥行き20mm)は実験と同じ寸法としており、解析メッシュの幅も水槽と同じ寸法として実験により近い条件を再現させた。また、実験同様に図-3に示すように迎角(0°から45°まで5°ピッチ)を与え、解析パターンも上述の実験パターンと同じ条件で解析を行った。レイノルズ数 $Re = \frac{UD}{\nu}$ (D は代表長、 U は定常速度、 ν は動粘性係数)に関係のある動粘性係数については水温15°での水の動粘性係数 $\nu = 1.141 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ を用いている。

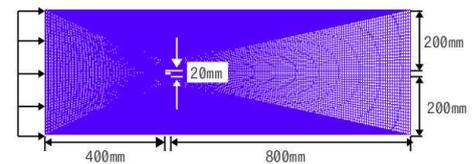


図-4 解析メッシュ

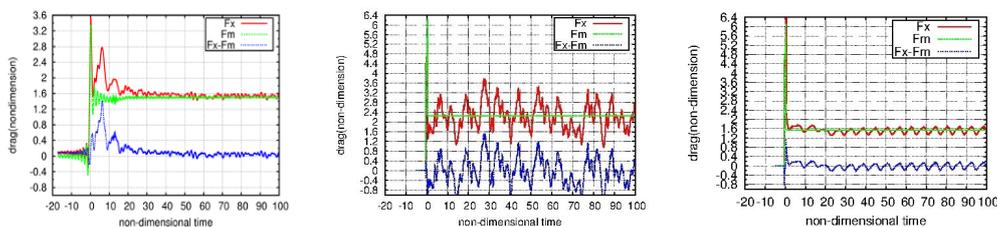
4. 結果及び考察

本研究で得た実験値および計算値とモリソン式の抗力とを比較し、モリソン公式との差分成分の波形を求めた結果を図-5、図-6に示す。なお、乱流モデルを用いていない場合とRASモデルの違いについて検討するために両方のグラフを載せている。ここで、モリソン式による無次元非定常抗力 F_M は、速度圧 F_K と加速度圧 F_I の和で表され、次式で求められる。

$$F_M = F_K + F_I \quad , \quad F_K = \frac{U(t)^2}{U_1^2} C_d \quad , \quad F_I = \frac{2\tilde{C}_d D}{U_1^2} \frac{\partial U(t)}{\partial t} \quad (1)$$

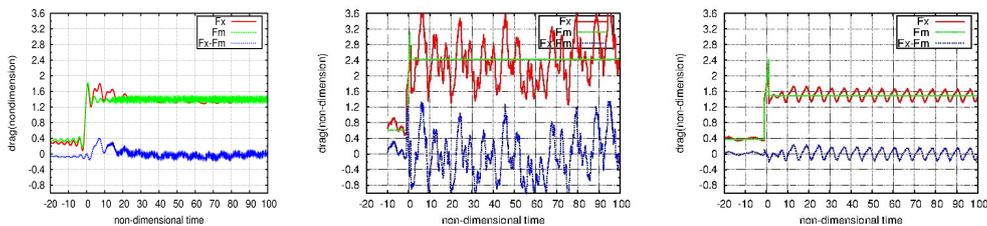
ここで U_1 は定常速度、 $U(t)$ は速度時刻歴、 $\frac{\partial U(t)}{\partial t}$ は加速度、 D は代表長さ、 C_d は速度に関する抗力係数、 \tilde{C}_d は慣性力係数を表す。なお、図-5、図-6は横軸を無次元時間 $t' = \frac{Ut}{D}$ (t は時間)、縦軸を無次元抗力 F_X 、 F_M で整理したグラフであり、 U_0 は初速度を表す。結果は図-5、図-6の(b)と(c)を比較すると、今回RASモデルを用いた解析を行ったことにより、加速中のオーバーシュート現象が発生した後に、実験値とほぼ同じ定常値を取るようになった。また、モリソン式に

において定常値となる部分での波形のばらつきもなく、定常値に収まるような波形を示した。しかし、(b),(c) どちらのケースにおいても計算値の方が実験値より大きいピーク値を示す結果となった。また、無風から有風へ風速変化させるケースに比べると、有風から有風へ風速変化させるケースの方が加速中のオーバーシュートによるピーク(1次ピーク)は小さいということが言える。



(a) 実験値 (b) 計算値 (乱流モデルなし) (c) 計算値 (RAS モデル)

図-5 無風から有風へ風速変化させる条件のモリソン式の抗力との差分成分波形 ($U_0=0, U_1=0.2(\text{m/s})$, 加速時間 $s=0.1\text{s}$, 迎角 $\theta=10^\circ$)



(a) 実験値 (b) 計算値 (乱流モデルなし) (c) 計算値 (RAS モデル)

図-6 有風から有風へ風速変化させる条件のモリソン式の抗力との差分成分波形 ($U_0=0.2, U_1=0.4(\text{m/s})$, 加速時間 $s=0.1\text{s}$, 迎角 $\theta=10^\circ$)

次にモリソン式の抗力のピーク値を F_{MAX} とし、無次元立ち上がり時間における無次元速度の変化量より求めた平均無次元加速度 a^* を用いて検討した結果を図-7に示す。 a^* は次式で定める。

$$a^* = \frac{dU^*}{dt^*} = \frac{(U_1 - U_0)}{\frac{U_1 s}{D}} = \left(1 - \frac{U_0}{U_1}\right) \frac{D}{U_1 s} \quad (2)$$

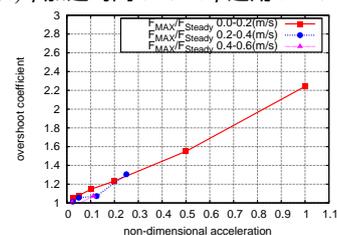
ここで U_0 は初速度, U_1 は定常速度, s は加速時間, D は代表長さである。定常値の平均抗力値を F_{Steady} とし, F_{MAX}/F_{Steady} よりオーバーシュート係数を算出した。図-7(b)から乱流モデルを用いていない場合には、有風から有風へ風速変化の場合において多少の誤差があり直線的な比例関係を示さなかったが、RAS モデルを用いた解析(図-7(c))では、無風から有風, 有風から有風へ風速変化の場合どちらにおいても直線的な比例関係となり、実験値(図-7(a))により近い傾向を示した。以上の結果から、1次ピークのオーバーシュート係数はほぼ無次元加速度 a^* に比例して増加するということと言える。

5. おわりに

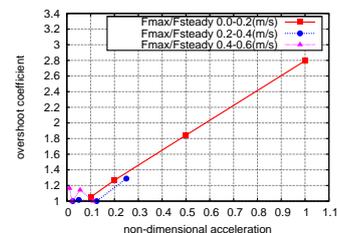
本研究では、基本断面である正方形柱模型に対して無風から有風へ風速変化させるケースと有風から有風へ風速変化させるケースの2つについて、数値流体解析を行い、水槽実験で得たデータと比較検討を行った。数値流体解析のモデルとして乱流モデルを用いたことにより、乱流モデルを用いていない場合に比べて実験値に近い値や傾向を示した。結果としては、無風から有風, 有風から有風のどちらの場合においても、抗力の波形では加速中のオーバーシュートが発生した後で定常値に収まる傾向を示し、定常値もほぼ同値となったが、加速中のオーバーシュートのピークの部分では計算値の方が実験値より大きい値を示す結果となった。また、1次ピークのオーバーシュート係数と無次元加速度との関係では、解析において乱流モデルを用いたことにより、有風から有風へ風速変化させる条件においても比例関係を示し、実験値と同じ傾向を示した。今後は、有風から有風へ風速変化させる条件における実験について、無次元加速度が大きい条件の実験を行い、詳細な検討を行うことが必要となる。

参考文献

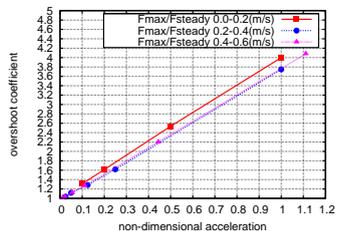
- 1) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治: 静止から急に一定速度で動き出した楕円柱の揚力, 九州大学応用力学研究所所報 第38号, pp.29-35, 1972.
- 2) 久延周平, 野田稔, 脇孝文, 長尾文明: 突風作用時における正方形柱の非定常空気力特性に関する研究, 四国支部技術研究発表会, 2011.



(a) 実験値



(b) 計算値 (乱流モデルなし)



(c) 計算値 (RAS モデル)

図-7 1次ピークのオーバーシュート係数と a^* との関係 ($\theta=10^\circ$)