

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

徳島大学大学院 学生員 ○久延 周平 徳島大学 正員 野田 稔
 徳島大学大学院 学生員 脇 孝文 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が多い。そこで本研究では曳航水槽実験および数値流体解析を用いて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ことを目的とする。ここでは無風から有風へ風速変化させるケースに加えて、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つについて検討した。

2. 実験概要

本研究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見なしている。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実験データより得られる突風により生じる力と慣性力から水槽に水が溜まっていない状態の実験データより得られる慣性力を引くことで突風により生じる力のデータを取得している。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。実験パターンとしては初速度 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

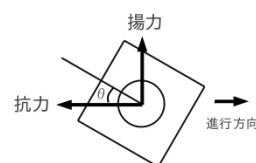


図-3 正方形柱模型の設置角度

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、乱流モデルは用いていない。図-4に用いた解析メッシュを示す。なお、用いた正方形柱モデル（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。動粘性係数は水温 15℃での水の動粘性係数 $\nu = 1.141 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ を用いており、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）は定常速度が 0.2m/s で $Re=3506$ 、0.4m/s で $Re=7011$ 、0.6m/s で $Re=10517$ となる。

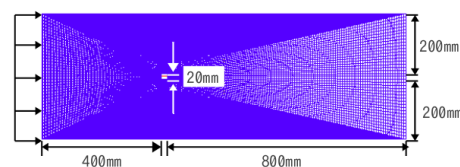


図-4 解析メッシュ

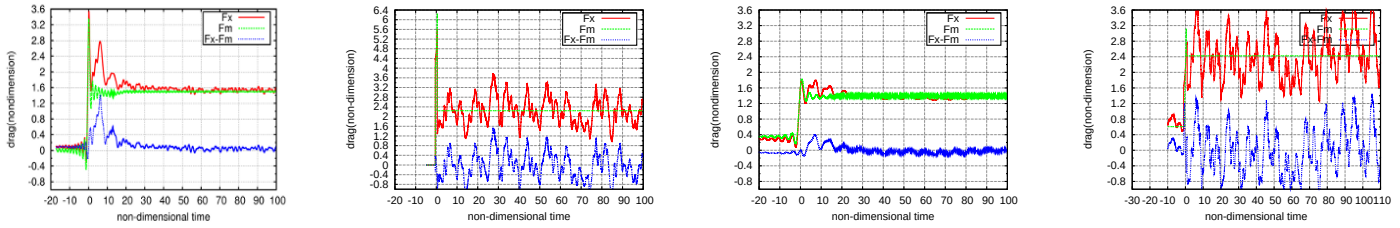
4. 結果及び考察

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に示す。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。

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

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 は横軸を無次元時間 $t' = \frac{U_1 t}{D}$ (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 (a), (b) に示す無風から有風への風速変化の場合では, 実験値および計算値で加速中のオーバーシュート現象 (突風などの急激に風速が増加した時に受ける, 波形が定常値を超過する現象) が発生するまでは F_X と F_M は一致したが, 直後のモリソン式では定常値に収まる部分でいくつかのピークが確認できた. 図-5 (c), (d) に示す有風から有風への風速変化の場合では, 無風から有風への風速変化の場合に比べて加速中のオーバーシュートによるピーク (1 次ピーク) は顕著に見られなかった. また, 両ケースにおいて加速中のオーバーシュートの部分で計算値の方が実験値より大きいピーク値を示した.



(a) $U_0=0, U_1=0.2(\text{m/s})$ 実験 (b) $U_0=0, U_1=0.2(\text{m/s})$ 解析 (c) $U_0=0.2, U_1=0.4(\text{m/s})$ 実験 (d) $U_0=0.2, U_1=0.4(\text{m/s})$ 解析

図-5 実験値および計算値とモリソン式の抗力との差分成分波形 (迎角 $\theta=10^\circ$, 加速時間 $s=0.1\text{s}$)

次にモリソン式の抗力の 1 次ピークのオーバーシュート係数を, 無次元立ち上がり時間における無次元速度の変化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-6 に示す. a^* は次式で定める.

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

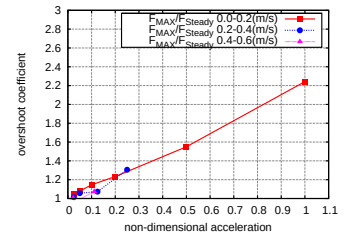
ここで U_0 は初速度, U_1 は定常速度, s は加速時間, D は代表長さである. 1 次ピークの抗力値を F_{MAX} , 定常値の平均抗力値を F_{Steady} とし, F_{MAX}/F_{Steady} よりオーバーシュート係数を算出した. 図-6 から無風から有風への風速変化の場合はオーバーシュート係数はほぼ無次元加速度 a^* に比例して増加する傾向がわかる. 有風から有風への風速変化の場合は多少の誤差はあるがオーバーシュート係数はほぼ無次元加速度 a^* に比例していると言える. 以上の結果を踏まえると, 無風から有風, 有風から有風への風速変化の場合どちらにおいても加速中に発生する 1 次ピークのオーバーシュート係数は加速度に大きく依存しているため, 1 次ピークのオーバーシュートは単純に加速度に比例して大きくなる傾向があると言えた.

5. おわりに

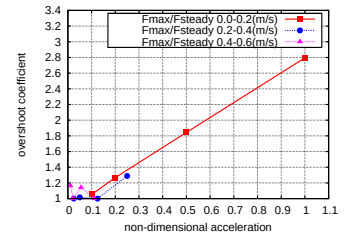
本研究では, 正方形柱模型に対して無風から有風へ風速変化させる場合と有風から有風へ風速変化させる場合との違いを検討することを目的とし, さらに実験で得たデータと比較検討するために数値流体解析を行った. その結果は無風から有風の場合と有風から有風の場合で加速中のオーバーシュートのピークに明らかな違いが確認できた. また, 実験値と計算値を比較するとほぼ同じ傾向がでていたがピーク値の差異や計算値における定常値部分での波形のばらつきに問題があり, 今後は計算値にも実験値と同様にアンサンブル平均などのデータ処理を施すことが必要になる. また正方形柱だけでなく種々の模型で検討していくことが今後の課題である.

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



(a) $\theta=10^\circ$ 実験



(b) $\theta=10^\circ$ 解析

図-6 1 次ピークのオーバーシュート係数と a^* との関係