

急激な風速変化に伴う非定常流体力の評価方法

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

四国建設コンサルタント株式会社

非会員

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お未解明な部分が多い。そこで、著者ら²⁾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を用いて検討を行った結果、非定常流体力はインパルス状の加速度成分の波形に加えて、流れの形成による影響を受けていることを明らかにしてきた。このような非定常流体力の波形を読み取るにはフィルタリングをする必要があるが、加速中のオーバーシュートを評価していく上ではフィルターの影響が重要となってくる。そこで、本研究では曳航水槽実験を行い、加速中のオーバーシュートを評価する方法について検討を行った。

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 0.01, 0.025, 0.05, 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

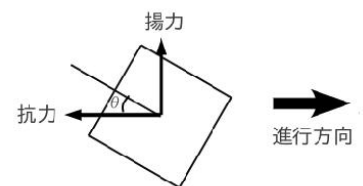


図-3 正方形柱模型の設置角度

3. 結果及び考察

本研究では、実験データに含まれる実験装置などの振動のノイズを軽減するために、実験データの抗力の波形に加重移動平均と呼ばれる重みを徐々に減らす手法を用いている。以下にその式を示す。ここで n は平均化する数値の個数を指す。

$$\overline{P_M} = \frac{nP_M + \sum_{j=1}^n |n-j|(P_{M+j} + P_{M-j})}{n + 2 \sum_{j=1}^n (n-j)} \quad (1)$$

式(1)に示す加重移動平均は、平均化する数値の個数 n の値が大きくなると、オーバーシュート現象が消失する可能性がある。図-4に、一例として、初速度 0.2m/s、定常速度 0.4m/s、加速時間 0.05s、迎角 10°の実験条件での、加重移動平均によるオーバーシュート現象への影響を示す。なお、図-4は横軸を無次元時間 $t' = \frac{U_{st}}{D}$ (t は時間)、縦軸を無次元化した抗力で整理したグラフである。図-4に示すように $n=200$ から $n=400$ へと増やしていくと少しずつオーバーシュートが小さくなっていることが読み取れ、加重移動平均によってオーバーシュートが低減している。すると、この方法では加速中のオーバーシュートによるピークを正しく評価することができない。

そこで、本研究では、加速中のオーバーシュートによるピークを正しく評価するためにモリソン式における $\bar{C}_d$ を最小自乗法により決定してから、理想的な速度と加速度を与えて加速中のオーバーシュートを評価する。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。

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

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。

モリソン式における $\tilde{C}_d$ を最小自乗法により決定する際に、加重移動平均に影響しない安定した $\tilde{C}_d$ を決定する手法として、本研究では、式 (2) における無次元非定常抗力 F_M および速度圧 F_K 、加速度圧 F_I の全ての項に同じ値の加重移動平均をかけることで、加重移動平均にほぼ影響のない $\tilde{C}_d$ を得ている。表-1 に、それぞれの値の加重移動平均から求めた $\tilde{C}_d$ およびピーク値などを示す。表-1 に示すように $\tilde{C}_d$ はほぼ一定の値を取っていることがわかる。次に、図-5 に、求めた $\tilde{C}_d$ に理想的な速度と加速度を与えて算出した無次元非定常抗力 F_M を示す。図-5 に示すように、図-4 と比較して、加重移動平均によるオーバーシュートの低減が無くなっており、加重移動平均によって加速中のオーバーシュートはほぼ影響を受けていないと言える。以上から、この無次元非定常抗力 F_M のピーク値を取ることで、加速中のオーバーシュートによるピーク（1 次ピーク）を正しく評価することができる。

次に、モリソン式による抗力のピーク値を 1 次ピーク 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-6 に示す。 a^* は次式で定める。

$$a^* = \frac{dU^*}{dt^*} = \frac{\frac{(U_1 - U_0)}{U_1}}{\frac{U_1 s}{D}} = \left(1 - \frac{U_0}{U_1}\right) \frac{D}{U_1 s} \quad (3)$$

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-6 から 1 次ピークのオーバーシュート係数は無風から有風、有風から有風へ風速変化の場合のどちらにおいても、ほぼ直線的な比例関係を示している。この結果から、1 次ピークのオーバーシュート係数は無次元加速度 a^* に比例して増加すると言える。

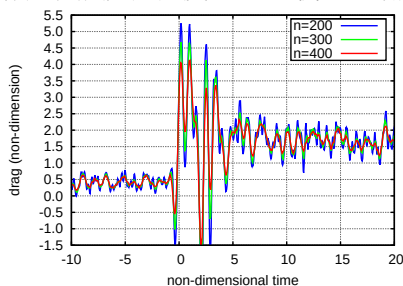


図-4 加重移動平均によるオーバーシュート現象への影響

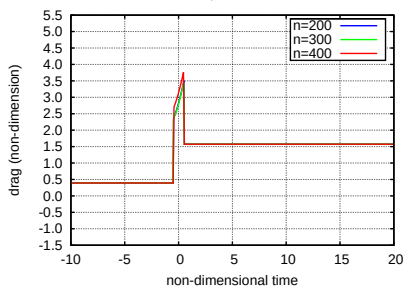


図-5 理想的な速度と加速度から算出した無次元非定常抗力

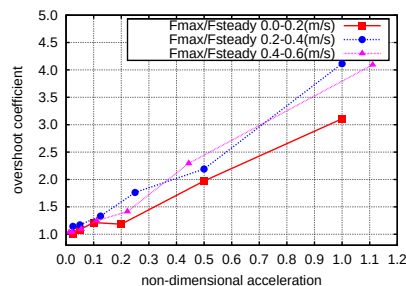


図-6 1 次ピークのオーバーシュート係数と a^* との関係 ($\theta = 10^\circ$)

4. おわりに

本研究では、加速中のオーバーシュートによるピーク（1 次ピーク）を評価する際に、実験データの抗力の波形にのみ、加重移動平均をかけると平均化する個数 n が大きくなるとオーバーシュートが低減されるため、加速中のオーバーシュートが正しく評価できないと考えた。そこで、加重移動平均に影響の受けないオーバーシュートのピークを読み取る方法として、モリソン式における無次元非定常抗力 F_M および速度圧 F_K 、加速度圧 F_I の全ての項に加重移動平均をかけてから、最小自乗法により $\tilde{C}_d$ を算出した。この方法で求めた $\tilde{C}_d$ は、加重移動平均における n の値を変えても、ほぼ一定の値となるため、加重移動平均の影響をほぼ受けていないと言える。そして、この $\tilde{C}_d$ に理想的な速度と加速度を与えて算出した無次元非定常抗力 F_M のピークを読み取ることで、加速中のオーバーシュートによるピークを正しく評価することができた。今後は、迎角を変化させた時の波形の変化や、流れの形成による抗力のピーク値である 2 次ピークを検討していく必要がある。

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.
- 2) 久延周平, 野田稔, 脇孝文, 長尾文明: 風速変化が正方形柱の非定常空気力特性に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol.66, pp.557-558, 2011.