

(I - 41) 急激な風速変動によって角柱に作用する流体力の数値流体解析

日本大学大学院理工学研究科 学生会員 北村直哉
日本大学理工学部 正会員 野村卓史
日本大学理工学部 正会員 北川徹哉

1. はじめに

瞬間的な風速変動により発生する流体力は、定常風速によって評価される流体力では説明することができない。このような現象について、急激な風速変化が可能な風洞を用いて、正方形角柱に作用する抗力変動を測定する風洞実験¹⁾を行った。この実験から、非定常な流れにおける抗力の評価に、風速の時間勾配に比例する成分の影響が大きいという知見が得られた。そこで本研究では、この実験を対象に数値流体解析を試みたので報告する。

2. 対象とする風洞実験

風洞実験は辺長 $D=3\text{cm}$ 、軸長 $L=10\text{cm}$ の角柱模型を風洞の吹き出し口から 20cm 離れたところに配置し、迎角 0 度のときの抗力 F を測定した。図1は実験結果の一例で、約 0.1 秒で風速 U を $0 \sim 9.8\text{m/s}$ まで上昇させた風洞実験値である。この実験より、測定された抗力 F が、定常風速に基づく抗力 F_s だけでは十分な評価ができないため、風速の時間勾配 dU/dt に比例する成分 F_u を加えることによって測定抗力の変動傾向をとらえることができたという知見が得られた¹⁾。ここで、 F_s と F_u は次のように定義される。ただし、 ρ は空気密度、 $A=DL$ は角柱の受風面積、 $\tilde{C}_D (=1.6)$ は測定結果に基づく係数である。

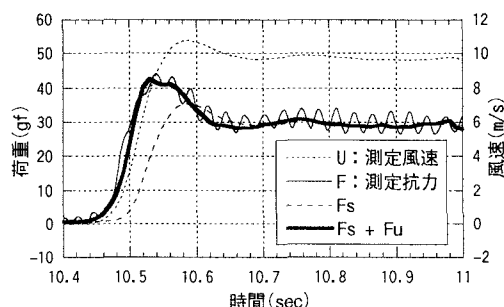


図1 測定結果

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2, \quad F_u = \rho \tilde{C}_D A D \frac{dU}{dt} \quad (1, 2)$$

3. 解析の概要

本研究では、風速を $0 \sim 9.8\text{m/s}$ まで上昇させた図1の風洞実験を対象として、2次元の数値流体解析を行った。流体は非圧縮性・粘性流体とし、ナビエ・ストークス方程式と連続条件式に流速双線形、圧力一定の混合補間法を用いて、SUPG法を適用し、得られた有限要素方程式により解析を行った。解析に用いた境界条件とメッシュを図2に示す(節点数4246、要素数4128)。上流境界の風速 U とその時間勾配 dU/dt は風洞実験で測定した値を与える。

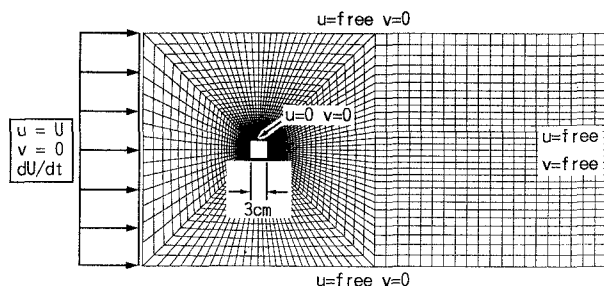


図2 使用した境界条件とメッシュ

4. 測定値補間の検討

風洞実験によって測定された風速 U は、 0.01 秒間隔で計測しているため、解析の時間刻みよりは大きい。そこで、測定値間を補間する関数を検討した。測定値の風速 U を直線補間すると、時間勾配 dU/dt が不連続となって、数値計算上好ましくない。そこで、2次以上の高次関数による補間方法の検討をした。その結果、風速 U 、時間勾配 dU/dt のいずれも3次で補間する曲線が、最も妥当な近似曲線となったので、この補間方法を用いて解析を試みることにした。図3に風速 U と時間勾配 dU/dt を示す。

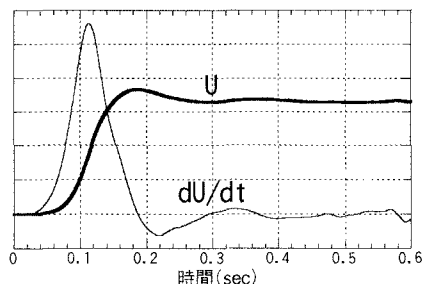


図3 風速 U と勾配 dU/dt

数値流体解析、角柱、非定常抗力、風洞実験

〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部土木工学科 TEL/FAX 03-3259-0411

5. 解析結果

本来、対象とする実験の定常風速 U は 9.8m/s であるが、本研究ではまず、 $U=1\text{cm/s}$ から計算を始めて次第に U を大きくし、10 ケースの抗力変動の傾向を調べた。解析に用いた風速 U と時間勾配 dU/dt は、実験によって得られた図3の風速値を定常風速 $U=9.8\text{m/s}$ で除し、設定した目標風速となるように定数倍することで作成した。図3は全ケースに共通したグラフ形状で、上流境界に与えた風速 U と勾配 dU/dt である。解析によって得られたグラフから $0.4\sim 0.6$ 秒を定常な領域とみなし、平均風速と平均抗力の関係をグラフにしたものが図4である。これより抗力係数を算出すると $C_D=1.43$ となり、一般的に知られている角柱の抗力係数 $C_D=2.0$ を下回る結果となった。なお、風洞実験で得られた抗力係数は $C_D=1.54$ である。

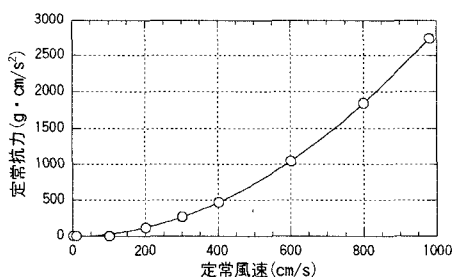


図4 平均風速と平均抗力の関係

6. 定常風速 $U=100\text{cm/s}$ までの抗力変動

算出した抗力係数 $C_D=1.43$ を用いて、定常風に基づく抗力 F_s と、 F_s に風速の時間勾配に比例する成分 F_u を加算したものを、数値解析によって得られた抗力 F のグラフにプロットした (図5, 6)。ここで解析結果より $\tilde{C}_D$ は平均 2.7 となり、実験値 1.6 より大きくなった。図5のような低風速の場合、 $F_s + F_u$ が抗力の変動を良くとらえているが、図6のように風速が上がると若干差が生じてくる。しかし、全体的に見れば抗力の変動傾向をとらえている。このことから、数値解析においても実験で得られた知見と一致することがわかった。

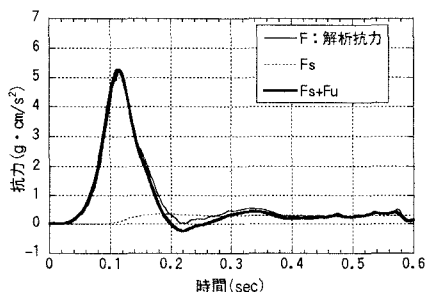


図5 風速 $U=10\text{cm/s}$ の抗力

7. 定常風速 $U=100\text{cm/s} \sim 980\text{cm/s}$ の抗力変動

定常風速 $U=100\text{cm/s}$ までの抗力変動は、図3の時間勾配 dU/dt の変動傾向が反映され、 dU/dt が最大となる位置に抗力 F のピークが対応していた。しかし、風速レベルを上げると、 $U=200\text{cm/s}$ のように2つのピークが存在する場合 (図7) と、 $U=980\text{cm/s}$ ではまた1つのピークになる (図8) といった、抗力 F のピークに特異な傾向が現れる。そこで、抗力 F の極大、極小部分に着目すると、最初のピークは F_u のピークと対応しており、風速を上げていくと F_u の影響が次第に小さくなり、抗力 F のうち F_s の成分が支配的になっていく。このような推移から、白丸で示したピークの位置は、 $U=100\text{cm/s}$ を基準に見ると、風速レベルが上がるにつれてピークの間隔が徐々につまり、 $U=980\text{cm/s}$ のプロットした場所に至ったといえる。このことは、ここでは掲載できなかったが、流れ場の様子からも示された。

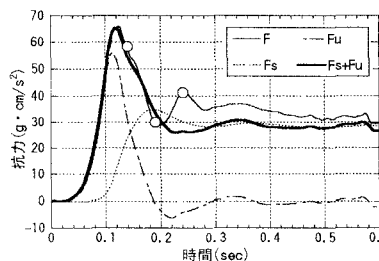


図6 風速 $U=100\text{cm/s}$ の抗力

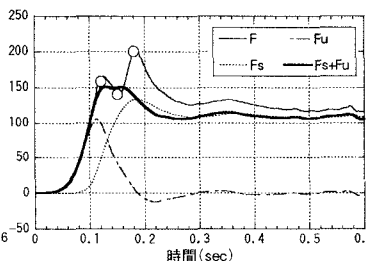


図7 風速 $U=200\text{cm/s}$ の抗力

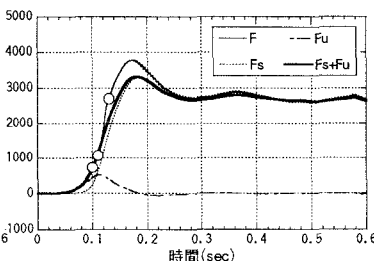


図8 風速 $U=980\text{cm/s}$ の抗力

8. まとめ

解析の結果、定常風速に基づく抗力 F_s の他に、風速の時間勾配に比例する成分 F_u を加えることによって抗力の傾向を評価できるという風洞実験で得られた知見を数値解析によっても確認できた。そして、風速が上がると F_u の影響が少なくなり、風速の2乗に比例する成分が支配的になっていく傾向があることが分かった。しかし、風洞実験で得られた非定常な抗力変動の傾向を2次元解析では得ることができなかったため、今後は、3次元解析を試みてさらに検討をしていく予定である。

【参考文献】

- 1) 野村卓史, 北川徹哉, 濱田雅史, 坂本美由紀: 瞬間的な風速変動の作用を受ける角柱の抗力, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 I-B329, pp. 654-655, 1999.