

第 I 部門 非定常気流中における過渡抗力特性に関する基礎的研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○橋本 三智雄 京都大学大学院工学研究科 フェロー 松本 勝
 東日本旅客鉄道株式会社 フェロー 島村 誠 財団法人鉄道総合技術研究所 前田 達夫
 京都大学大学院工学研究科 正会員 白土 博通 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木 知己

1.はじめに

従来より、構造物の耐風設計は一定の風速のもとで検討されてきた。しかし、現実には風が常に一定の風向、風速というのではなく、竜巻などが発生したときには極めて短時間の間に風速が急変するような非定常性の強い気流となる。このような非定常気流中における揚力の過渡特性においては overshoot 現象や undershoot 現象なども確認されている[1]。耐風設計の点で構造物における抗力の評価は不可欠であるため本研究では、円柱だけでなく、Bluff な矩形断面において風速急変時における過渡抗力特性を明らかにする。

2.実験概要

Bluff な矩形断面 ($B/D=0.5\sim 4.0$) および円柱を対象に、主風速がステップ状に変化する様な非定常気流が作用した場合の非定常抗力を測定した。本計測においては主風速をできるだけステップ状に変化させることが可能な吸い込み式の非定常気流発生風洞を用いた。

本研究では既往の研究を参考に、近似的に主風速の自乗 U^2 を一つの時間変動量としてとらえ、この U^2 による抗力の Indicial 応答関数が存在するものとし、以下の式で非定常抗力を表した。

$$F_{U^2} = \rho D C_D \int_{-\infty}^{\tau} \frac{d\Psi_{U^2}(\tau - \tau^*)}{d\tau} U^2(\tau^*) d\tau^* \quad (1)$$

なお、この風洞システムにおいて発生させた非定常気流は完全なステップ関数状にはならず、ある時間遅れ τ_0 を伴って定常値に達するため、非定常気流 U^2 は以下の式でモデル化した。

$$\begin{aligned} \tau < 0: U^2(\tau)/U^2(\infty) = 0, \quad \tau_0 \leq \tau: U^2(\tau)/U^2(\infty) = 1 \\ 0 \leq \tau < \tau_0: U^2(\tau)/U^2(\infty) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\pi\tau}{\tau_0} \end{aligned} \quad (2)$$

このとき、Indicial 応答関数は 2 つの指数関数の和として以下のように近似的に表せるとする。

$$\Psi_{U^2}(\tau) = \left(\frac{a}{b} + \frac{c}{d} \right) - \frac{a}{b} e^{-b\tau} - \frac{c}{d} e^{-d\tau} \quad (3)$$

また Indicial 応答関数を Laplace 変換することにより、周波数応答関数は以下のように表せる。

$$\Phi_{U^2}(k) = \left(\frac{ab}{b^2 + k^2} + \frac{cd}{d^2 + k^2} \right) - i \left(\frac{ak}{b^2 + k^2} + \frac{ck}{d^2 + k^2} \right) \quad (4)$$

本研究では式(1)が実験により得られた風速急変時の非定常抗力を最もよく近似するような形式決定パラメータ a , b , c , d を求めた。

さらに、パルセーターを設置することで主流方向に周期変動気流を発生させたときの非定常抗力を計測し、以下のように表した。

$$\begin{aligned} F_u(t) &= \frac{1}{2} \rho D \left[(U + u(t))^2 - U^2 \right] C_D \Phi_u(k) \\ &\cong \rho D U C_D u(t) \Phi_u(k) \quad (\because U \gg u(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

このようにして得られた周波数応答関数 $\Phi_u(k)$ と、Indicial 応答関数 $\Psi_u(t)$ を Laplace 変換することにより求められた周波数伝達関数 $\Phi_{U^2}(k)$ を比較することで、非定常抗力の時間領域および周波数領域での対応関係について考察を加える。

3. 風速急変時における過渡抗力特性

Fig.1に $B/D=0.5$ における抗力のウェーブレット解析の結果とともに抗力応答波形(図中: measured), 抗力応答波形を近似した Indicial 応答関数(図中: calculated), 風速が理想的なステップ関数状に変化したと仮定したときの Indicial 応答関数(図中: Indicial func.)の結果と全断面における overshoot のピーク値を示す. 風速急変後, 抗力が定常値 $D/D_{\infty}=1$ を超えた値をとった後, 緩やかに定常値に下がっていることが分かる. このような現象は overshoot と呼ばれ,

全断面において 1.14~1.25 倍の overshoot が確認されたが, その特性に幾何学形状への依存性はあまり見られなかった. また, ウェーブレット解析では, overshoot 時のみに短時間現れる非定常な周波数成分が確認された. この成分は定常的に見られる周波数成分の約 1/2 の周波数であり, 抗力の overshoot の原因と考えられる. 既往の研究において Sarpkaya[2][3]は実験および解析的な考察から, このような抗力の overshoot を及ぼす要因として, 流速の急変時に断面背後に形成される対称な循環流(Nascent vortex)の存在を指摘している. また, overshoot 時に確認された非定常な周波数成分は Strouhal 数の約 1/2 または Strouhal 数とほぼ一致した無次元周波数であったことから, この周波数成分がカルマン渦に関連した何らかの渦の成分と考えられる.

4. 周期変動気流中における周波数伝達関数の評価

Fig.2に $B/D=0.5$ における周波数応答関数と変動抗力から求められた測定値を示す. 周波数領域で測定された変動抗力から求められた測定値と, 上記のように時間領域によって測定された非定常抗力の Indicial 応答関数を Laplace 変換することにより得られた周波数応答関数はあまり一致しなかった. この原因として, 本実験の風洞システム上, 変動抗力が非常に小さいこと, および平均風速 U の影響が変動風速 $u(t)$ の影響に比べ大きかったからと考えられる. これについては今後検討が必要と考えられる.

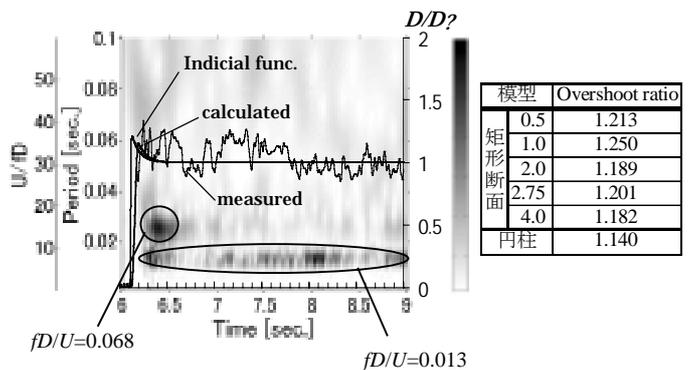
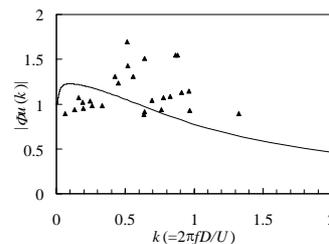


Fig.1 時系列解析($B/D=0.5, St=0.13$)および overshoot の割合



▲: present experiment
—: frequency transfer function based on $\Psi_{U^2}(t)$

Fig.2 周波数応答関数と実験値の比較

5. 結論

以下に, 本研究で得られた結論を述べる.

- 構造基本断面では風速急変時において抗力が定常値の1.14~1.25倍の値を示す overshoot 現象が見られた.
- overshoot時に確認された非定常な周波数成分が Strouhal 数に関連していることから, overshootを引き起こす要因がカルマン渦と何らかの関係を持っていると考えられるが, 今後詳細な検討が必要である.

謝辞

本研究を遂行するにあたり, 京都大学大学院工学研究科川島由紀氏には多大なる協力を得た. ここに感謝の意を表す.

参考文献

[1] N. Shiraishi, M. Matsumoto and H. Shirato : A Fundamental Study About Unsteady Aerodynamic Characteristics of Structures due to Fluctuating Wind, Proc. of JSCE, No.328, pp.19-30, 1982

[2] T. Sarpkaya : Separated Flow about Lifting Bodies and Impulsive Flow about Cylinders, AIAA Journal, Vol.4, No.3, p.414-420, 1966

[3] T. Sarpkaya : An Analytical Study of Separated Flow About Circular Cylinders, Trans. of ASME, J. of Basic Eng., pp.511-520, 1968