

風向方向振動時の空力減衰について

谷池 義人・寺井 徹・丸山 勇祐

AERODYNAMIC DAMPING UNDER ALONG-WIND OSCILLATIONS

By Yoshihito TANIKE, Toru TERAJ and Yusuke MARUYAMA

Synopsis

The streamwise oscillation of rectangular sectioned structures are usually caused by the turbulence of the incident flow but also by the resonance effect due to vortex sheddings from the structure in a low turbulent wind. The unsteady aerodynamic forces on a square-section cylinder which is forced to oscillate harmonically in the along wind direction were measured to investigate the characteristics of the aerodynamic damping and the added mass forces in both smooth and turbulent flows. The streamwise oscillation causes the so-called synchronization in a reduced velocity range around $U_r (= U/f_m B) = 1/2 S_r$, where S_r is the Strouhal number for the stationary cylinder and the corresponding aerodynamic damping becomes negative in the smooth flow. This negative damping effect may cause the vortex resonance with small amplitudes. The added mass coefficient takes a peak value near the synchronization range, which results in the 2 ~ 3% increase of the actual mass of structures or buildings. The aerodynamic damping approaches a value due to the quasi-steady theory with the increase of the following parameters: turbulence; the amplitude of vibration; and the reduced wind velocity. The mean drag coefficients vary with the amplitudes near and below the the synchronization range, however they reach that of the stationary cylinder in the higher velocity range.

1. まえがき

風による建築構造物の振動には、大きく分けて風方向振動と風直角方向振動の2種類ある。後者の振動は、物体背後に生じる渦や物体の運動に伴って発生する付加的な空気力によって引き起こされ、一般にある限界の風速を越えると急速に発達する。

前者の振動は、主として風の乱れによる強制的な力によって引き起こされるが、乱れの小さいときには、物体とその背後に形成される渦との共振現象によっても生じる場合がある。この風方向振動は、渦との共振現象を無視すると、通常、風速の2乗に比例して増大し、ある風速域までは風直角方向振動よりも大きくなる。この振動の解析手法は、1960年代にDavenport等^{1), 2)}によって確立され、その成果は各国の風荷重の指針にも数多く取り入れられている。また、居住性の評価基準として用いられている加速度値の算定にもこの手法が用いられている。

その一方、この手法は、物体の風方向の運動に伴う空気力を準定常的に求めているために、実際に作用している付加的な空気力(非定常空気力と呼ばれ、主として加速度に比例する付加質量力と速度に比例する空

力減衰力から成る)を正しく評価していない面がある。また、物体振動時の平均風力を静止時の値で置き換えている面もあり、得られた応答値は過小評価される恐れがある。近年、居住者に対する風影響の評価と風環境の改善を計る面から、応答加速度の算定やTMDを用いた制振効果を検討する必要性が生じており、より精度の高い解析結果が要求されている。

風方向振動時の空力減衰を求める方法として、変位応答を基にした自己相関法³⁾やRD法⁴⁾があるが、いずれも間接的な空力減衰の推定に止まっている。本報では、物体の風方向振動時に生じる非定常空気を直接検出する装置を開発し、物体の振動に伴う空力減衰や付加質量及び平均抗力等を風洞実験により求め、準定常表現に基づく空力減衰や乱れによる強制外力及びポテンシャル流から計算される付加質量等との比較検討を行うことにした。

2. 実験及び解析方法

風洞実験は京大防災研究所のゲッチンゲン型の開放風洞(断面は直径1mの円に外接する正八角形)で行った。測定部内に高さ0.9m、幅1.5mの側板を31cm離して2面設け、両側板間に端板(直径30cm)付きの2次元角柱を、側板の先端から45cmの位置に風に直面させて水平に配置した(Fig. 1)。角柱を支持している両側板には流れ方向にベアリング付きの細長い溝を設け、一方の溝の外側にはモーターを取り付け、カムを介してモーターの回転運動を並進運動に変換し、角柱が流れ方向に調和振動できるようにした。振動変位の測定は側板の外側に取り付けられたレーザー変位計により行った。

2次元角柱はアクリル板で作り、幅 B ×奥行き D ×長さ $L=5\times5\times30$ cmとした。角柱中央部の正面と背面には5点ずつ圧力の測定孔を設け、両面の差圧をマニホールドを介して測定し、角柱に作用する空気を検出した。マニホールドを含む測定孔から圧力変換器(Setra 239)までのチューブ長は25cmとし、解析時には圧力測定時の位相遅れ(7.1 Hzで5ms)を補正した。

角柱の強制振動数は $f_m=7.1$ Hzとし、加振振幅 x_0 は無次元化し、 $x_0/B=0.024, 0.04, 0.07, 0.1$ の4種類とした。気流は乱れ強さ0.5%の一様流と15%の乱流(乱れのスケール7cm)を用いた。実験風速はいずれも $U=0.7\sim6.5$ m/sとし、無次元風速で $U_r(=U/f_m B)=2\sim18$ の範囲とした。なお、データは30

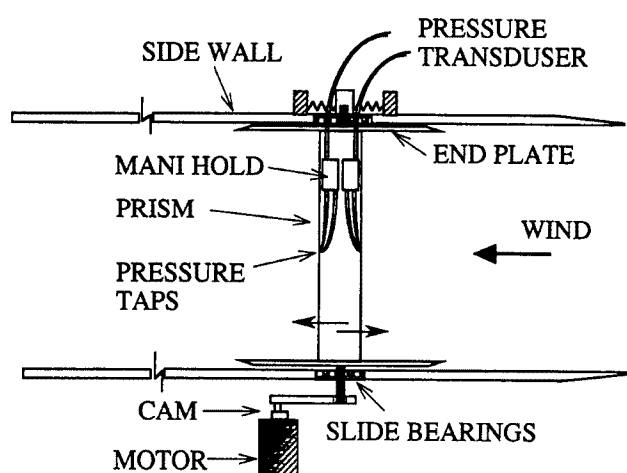


Fig. 1 Sketch of the experimental set-up.

Hz のローパスフィルターを通した後、時間間隔 1 ms で 20 sec 読みとり、波形解析装置 (Waveform Analyzer 6500) により解析した。

3. 非定常空気力の定式化

乱流中で物体の風方向の振動変位は不規則となり、それに対応して作用空気力も不規則になる。このため、付加質量と空力減衰の値は、時々刻々と変化し、さらに同じ変位レベルにおいても大きくばらつく。したがって、時間平均操作を施した統計量を求めることが必要になる。変位の r.m.s 値等の統計量は、通常、乱流中においても定常値をとり、それに対応して付加質量と空力減衰も定常値をとると考えられる。ここでは定常振幅の振動変位を仮定することにより、ある既知の速度と加速度に対応した統計量としての空力減衰と付加質量を求めることにした。

Fig. 2 のように、流速 $U_T(t)$ の気流中で流れ方向に調和振動する角柱に作用する単位長さあたりの空気力 $F_T(t)$ は、準定常的に表すと次式となる⁵⁾。

$$F_T(t) = \frac{1}{2}\rho C_T B (U_T(t) - \dot{x}) |U_T(t) - \dot{x}| + \rho B D (1 + C_a) \left\{ \frac{\partial U_T}{\partial t} + (U_T - \dot{x}) \frac{\partial U_T}{\partial \xi} \right\} - \rho B D C_a \ddot{x} \quad (1)$$

where

$$x(t) = x_0 \cos 2\pi f_m t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x , ξ は振動変位と流れ方向の座標、 ρ は空気密度、 C_T , C_a は空気力係数。気流の加速度が小さく、 $U_T(t)$ の平均成分 U が変動成分 $u(t)$ と振動速度 $\dot{x}$ より大きいとき、

$$\frac{DU_T}{Dt} \approx 0, \quad U \gg u, \dot{x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

振動角柱に作用する空気力 $F_T(t)$ を平均成分 F と変動成分 $f(t)$ に分け、さらに $f(t)$ にストローハル数成分の渦放出に伴う強制的な空気力 $v_s(t)$ を付加すると、

$$F = \frac{1}{2}\rho B C_D U^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f(t) = \rho B C_a U u(t) + v_s(t) - \rho B \tilde{C}_a U \dot{x} - \rho B D \tilde{C}_a \ddot{x} \quad \dots\dots\dots (5a)$$

$$= \rho B C_a U u(t) + v_s(t) + 2\pi f_m x_0 \rho B \tilde{C}_a U \sin 2\pi f_m t + 4\pi^2 f_m^2 \rho B D \tilde{C}_a \cos 2\pi f_m t \quad \dots\dots\dots (5b)$$

となる。(5b) 式に Keulegan and Carpenter による Fourier-Averaging⁵⁾ を適用して、 $\tilde{C}_a$, $\tilde{C}_a$ を抽出すると、

$$\begin{aligned} \tilde{C}_a &= \frac{1}{\pi \rho B U x_0 f_m} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin 2\pi f_m t \, dt, \\ \tilde{C}_a &= \frac{1}{2\pi^2 \rho B D x_0 f_m^2} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cos 2\pi f_m t \, dt \quad \dots\dots (6) \end{aligned}$$

したがって、空力減衰 ζ_a は無次元風速 $U_r (= U/f_m B)$ を用いて次式で表される。

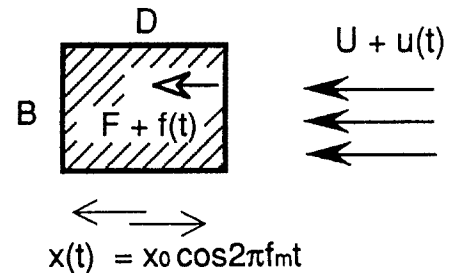


Fig. 2 Definition of the wind force acting on the oscillating prism.

$$\zeta_a = \frac{\rho B^2 \tilde{C}_d}{4\pi M} U_r, \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 M は単位長さあたりの質量、 C_D 、 C_d 、 $\tilde{C}_d$ 、 $\tilde{C}_a$ は、それぞれ、平均抗力係数、抗力係数（空力アドミッタンス）、空力減衰係数、付加質量係数を表す。

(5a) 式の右辺第 1 項は風の乱れによる強制的な空気力で一様流中では 0 になる。第 2 項は渦放出による強制力であり、渦の発生周波数 f_s の 2 倍と物体の振動数 f_m とが一致するとき、第 3、4 項の振動数成分の空気力に取り込まれる。第 3 項は物体の振動に伴う空力減衰力、第 4 項は付加質量力を表す。なお、従来の準定常表現では、 C_D 、 C_d 、 $\tilde{C}_d$ の各係数を全て物体静止時の抗力係数 C_{D0} で表しており、作用風力を正しく表現していない。

$x_0/B=0.024$ のときの非定常空気力 $f(t)$ と振動変位 $x(t)$ の波形を Fig. 3 に示す。一様流中 (in smooth flow) で $U_r=3.55$ のとき、作用空気力 $f(t)$ は変位 $x(t)$ と同じ周期をもつ正弦波に近くなり、さらに変位に対して位相が進むことから、(2)、(5) 式より空力負減衰効果の発生が予想される。また、角柱のストローハル数 S_t ($=f_s B/U$, f_s は一様流中における静止角柱の渦の発生数) は 0.126 であるから、この無次元風速 $U_r=3.55$ は $1/2S_t (=3.97)$ の近くにある。このため渦の発生が角柱の風方向の振動に同調して、 $2f_s=f_m$ となり、同期現象が生じる。この現象は、最初に 2 次元円柱において見つめられた^{6), 7)}。

$U_r=5.55$ になると同期領域を外れるために、 f_m 成分以外に $2f_s$ 成分が現れてくる。 f_m 成分に着目すると、変位との位相は遅れてくるために、空力負減衰効果は生じないものと考えられる。

また、乱流中 (in turbulent flow) においても f_m 成分が存在するが、一様流中のような明瞭な同期現象は見られず、変位との位相も遅れてくる。

4. 付加質量

(6) 式より求めた付加質量係数 $\tilde{C}_a$ を Fig. 4 に示す。横軸上の矢印は、 $2f_s=f_m$ となる $U_r (=1/2S_t)=3.97$ と、 $f_s=f_m$ となる $U_r (=1/S_t)=7.94$ (いわゆる共振風速) である。縦軸上の矢印は静止流体中の $\tilde{C}_a$ で、白矢がポテンシャル理論による値 (1.19) を黒矢が本実験結果 (2.05) を示す。

静止流体中の C_a は振幅によらずほぼ一定値をとり、その値は Bearman (1.95)⁸⁾ や Troesch (2.05)⁹⁾ の値とも一致している。一様流中の $\tilde{C}_a$ は $U_r=1/2S_t$ の少し手前で極大となり、その値は振幅の減少につれて大きくなる。このため、この領域における微小振動時の付加質量係数は、 $\tilde{C}_a \cong 3$ となり理論値の 3 倍近くにも達する。これは実際の高層建物の質量に換算すると、2~3% の質量増加になる。したがって、TMD を用いて振動を制御する際、同調させる振動数の算定にはこの付加質量を考慮すべきであろう。

乱流中においても一様流中と同様の傾向が見られるが、振幅による変化は小さく、また、 $U_r=1/S_t$ を少し越えた風速域で静止流体中の値に近づく。

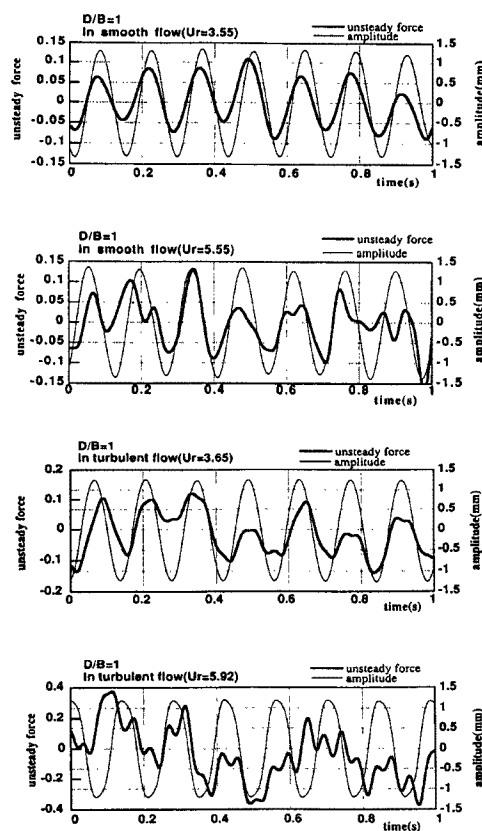


Fig. 3 Time records of the unsteady aerodynamic force under the along-wind oscillation.

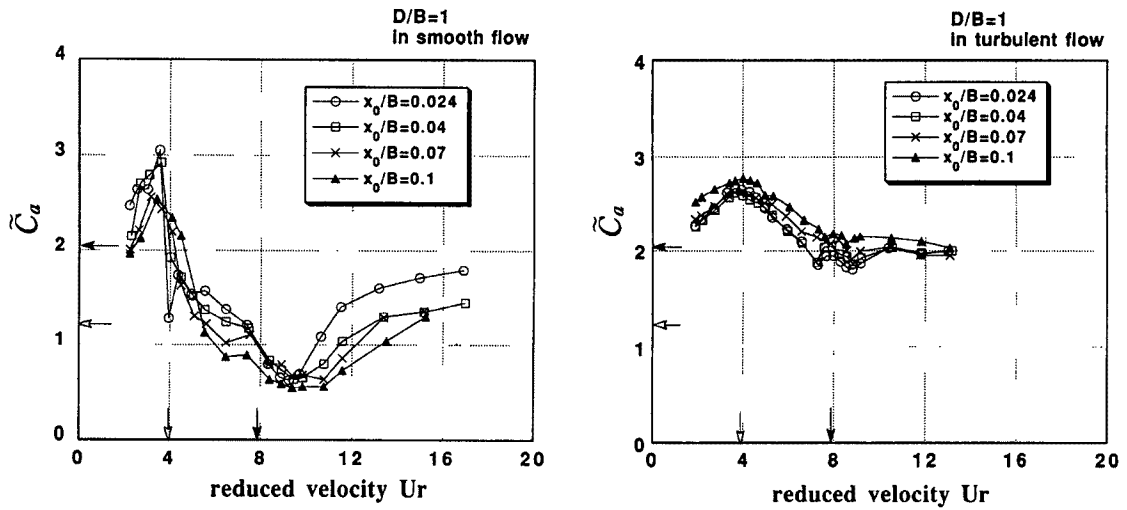


Fig. 4 Added mass coefficients under the along-wind oscillation.

5. 空力減衰と準定常表現値

空力減衰係数 $\tilde{C}_d$ を Fig. 5 に示す。一様流中の $\tilde{C}_d$ は、振幅の最も大きい $x_0/B=0.1$ を除くと、 $U_r=1/2S_i$ 付近で負の極値をとり、(5a) 式より空力負減衰効果が生じる。 $\tilde{C}_d$ の極小値は $x_0/B=0.04$ で最も小さく、振幅が大きくなると正に転じ、逆に振動を抑制する力が作用する。したがって、 $U_r=1/2S_i$ の風速域では空力負減衰効果による振動の発生する恐れがあるが、この振動はピーク応答を示す限定振動になる。このことは、Fig. 6 に示す Obasaju 等¹⁰⁾ による自由振動実験結果より確認される。

なお、彼らの可視化の結果に基づく、振動の2周期ごとに角柱の一方の前縁より渦が放出され、風下に向かう振動速度が最大になるとき、丁度角柱の背後に巻き上がる。このために振動に依存する空気が振動を助長する方向に作用し、空力負減衰効果が生じるのであろう。このことは Fig. 3 (一様流, $U_r=3.55$) において、変位が0で傾きが右上がりなのとき、すなわち、風下に向かう振動速度が最大のとき、空気が

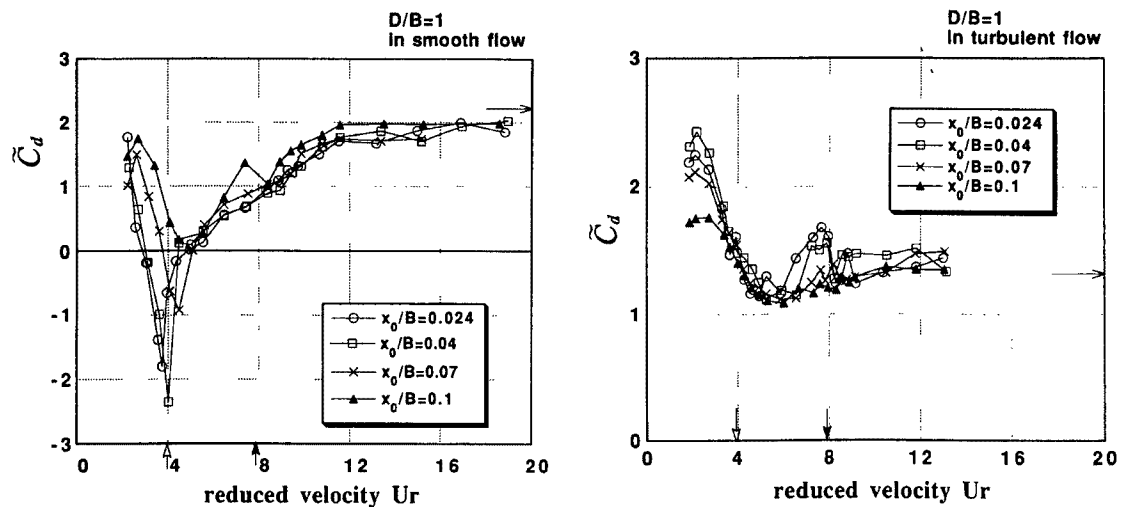


Fig. 5 Aerodynamic damping coefficients under the along-wind oscillation.

正となり風下方向に作用していることから確認される。

風速の増加につれて振幅による $\bar{C}_d$ の差はなくなり、縦軸上の矢印で示した静止角柱の抗力係数 C_{D0} ($=2.28$) に近づく。Davenport 等の準定常表現では、空力減衰係数として静止角柱の平均抗力係数 C_{D0} を採用しているため、 $\bar{C}_d$ は正の一定値になる。このため、一様流中では、高風速域を除くと実際に作用する空力減衰力を正しく評価していないことが分かる。

乱流中の $\bar{C}_d$ は、 $U_r=1/2S_f$ の手前で急に減少するが、全ての風速域で正になることから、空力負減衰効果は生じない。また、振幅及び風速による $\bar{C}_d$ の変化は一様流中に比べて小さく、より低い風速域で静止角柱の抗力係数 C_{D0} ($=1.3$) に近づく。

得られた $\bar{C}_d$ を(7)式に代入し、さらに単位長さあたりの高層建物の密度を $M/BD=150 \text{ kg/m}^3$ と仮定して空力減衰 ζ_a を求めると Fig. 7 になる。したがって、 ζ_a は $\bar{C}_d$ を減衰定数の形式で表したもので本質的には $\bar{C}_d$ と同じである。図中の波線は $\bar{C}_d$ の代わりに C_{D0} を用いた準定常表現による ζ_{a0} である。

準定常表現による ζ_{a0} は、一様流中では全ての風速域で過大になるが、乱流中では低風速域を除くと実際の ζ_a にほぼ等しくなる。このことから、乱れ強さ 15 % 以上の乱流中では、空力減衰として準定常表現による値を採用しても差し支えないものと思われる。また、 $U_r=1/2S_f$ 付近では、一様流中の空力減衰は -0.5% 以下になるが、建築物の構造減衰は通常 1% 以上あるために、振動系全体として負減衰になることはない。このため、空力負減衰効果による自励的な振動は生じないと思われるが、渦放出に伴う強制的な振動は、同効果により増大することが予想される。

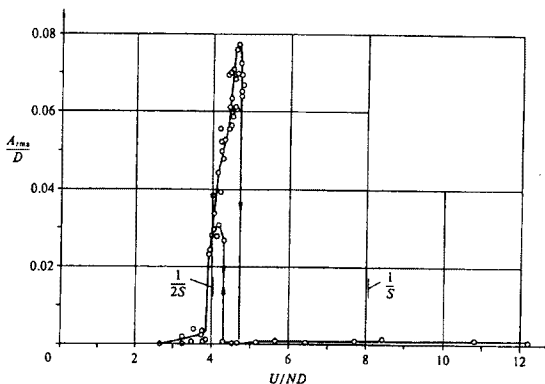


Fig. 6 Along-wind response versus reduced wind velocity for a two-dimensional square prism obtained by Obasaju et al.¹⁰⁾

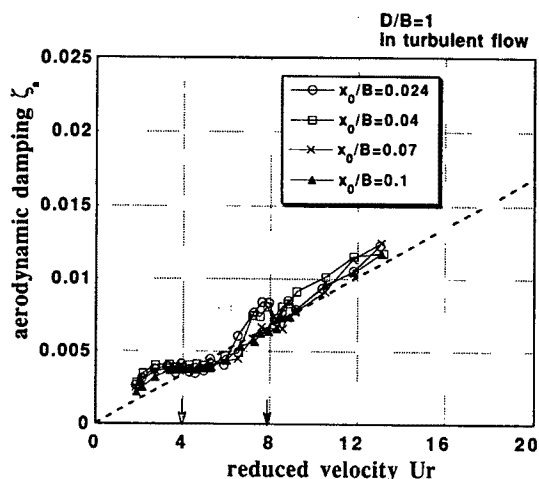
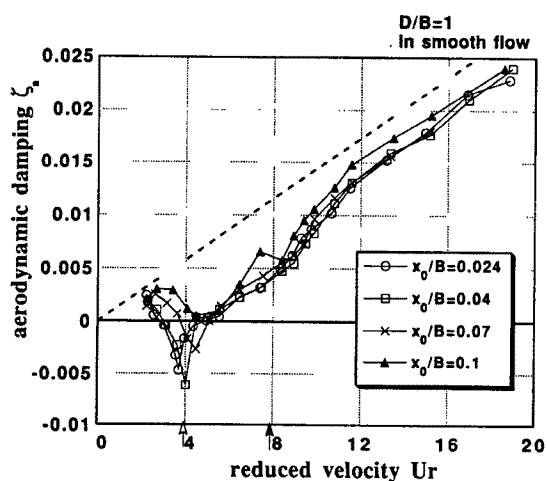


Fig. 7 Aerodynamic damping ratios under the along-wind oscillation compared to the quasi-steady values.

6. 振動時の平均抗力と変動揚力

角柱振動時の平均抗力係数 C_D を Fig. 8 に示す。Fig. 9 は、一様流中で風方向振動時の変動揚力 (r.m.s. 値) を速度圧と幅 B で割って無次元化した変動揚力係数 C_{Lrms} を示す。両図中の波線は、角柱静止時の平均抗力係数 C_{D0} と変動揚力係数 C_{L0rms} ($=1.16$) を示す。

一様流中での C_D は、 $U_r=1/2S_i$ 前後で振幅と風速によって $C_D=1.6\sim2.6$ と大きく変化する。同様の傾向は、Obasaju 等¹⁰⁾ による自由振動実験における平均応答にも見られる。 $U_r=1/2S_i$ 付近の極大値は振幅の減少につれて大きくなる。同様の傾向は C_{Lrms} においても見られ、前節の $\tilde{C}_d$ の極小値の傾向に対応している。これは、前節で述べたように、振幅の小さいときには、角柱背後に放出される渦が振動を助長する位相で形成されることに関係する。逆に、 $U_r=2\sim3$ の低風速域において、 C_D は C_{D0} より小さくなる。これは、

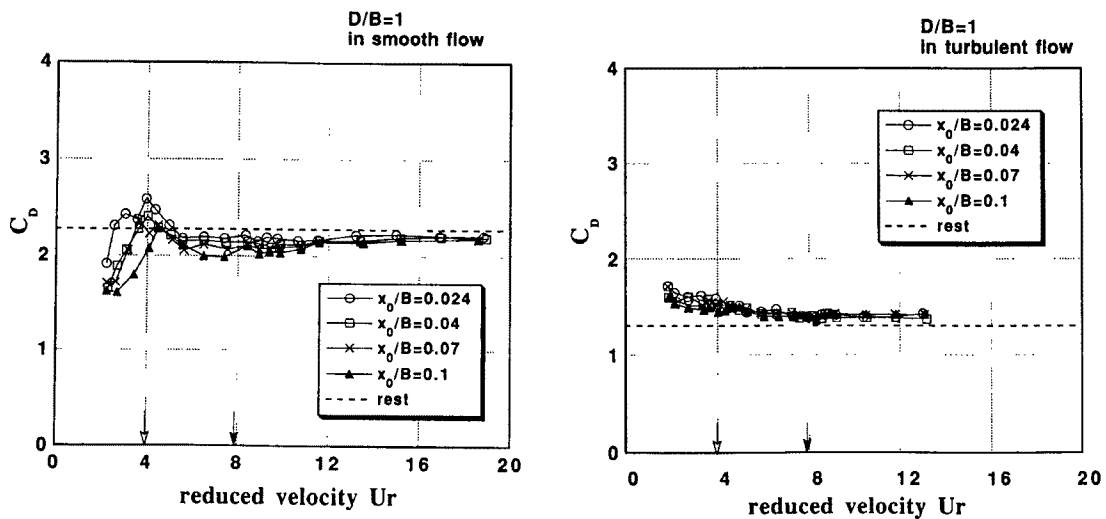


Fig. 8 Mean drag coefficients under the along-wind oscillation.

$\tilde{C}_d$ が正減衰になることにも関係し、渦が振動を抑制する位相、すなわち、風上に向かう速度が大きくなる時、あるいは角柱が最も風上に移動するときに渦が背後で形成されるためであろう。

$U_r=1/2S_i$ を越えると、 C_D は、 $C_D < C_{D0}$ の状態を保ちながら C_{D0} に近づく。同じ傾向が C_{Lrms} にも見られる。同期領域を外れると、振動数 f_m 成分の渦とストローハル数 f_s 成分の渦とが干渉し合って互いに弱くなるが、風速の増加につれて f_s 成分の渦が卓越してくるために、振動時の空気力係数が静止時の値に近づくものと考えられる。

乱流中での C_D は、振幅及び風速による変化は小さく、一様流とは逆に、 $C_D > C_{D0}$ の状態を保ちながらより低い風速域で C_{D0} に近づく。ガスト応答の予測に用いる乱れによる強制力は、準定常的には (5a) 式の第 1 項で与えられる。このときの抗力係数は、これまでの準定常的表現では C_{D0} が用いられているが、低風速域

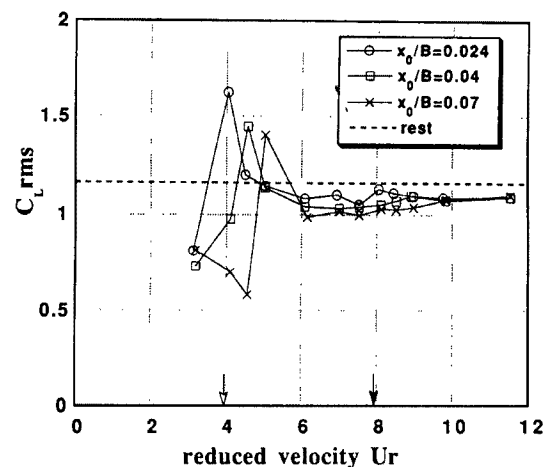


Fig. 9 Fluctuating lift coefficients under the along-wind oscillation in smooth flow.

においては $C_D > C_{D0}$ となるために過小評価となる。したがって、抗力係数として振動時の C_D を採用すべきであろう。なお、低風速域において $C_D > C_{D0}$ となる原因については、風方向の振動が剥離剪断層を刺激し、乱流中においても f_s 成分の渦化が促進されるためとも考えられるが、明らかではない。

7. む す び

気流中で正方形角柱が風方向に振動するときに作用する非定常空気力を強制振動法により求め、空力減衰、付加質量及び振動時の平均抗力等に関する特性を明らかにした。

- 1) 一様流中では、無次元風速 $U_r \cong 1/2 S_r$ (S_r はストローハル数) 付近で、渦の発生が角柱の振動に同調する同期現象が確認された。
- 2) $U_r \cong 1/2 S_r$ の同期領域付近で、付加質量係数は $\bar{C}_a \cong 3$ となり、ポテンシャル流による理論値の 3 倍近くに達する。これは実際の高層建物の質量に換算すると、2~3 % の質量増加になる。
- 3) 一様流中での空力減衰は、振幅と風速に応じて大きく変化し、同期領域付近では負の極小値をとり、空力負減衰効果による振動の増大が予想される。このため、正の一定値をとるとした準定常表現による空力減衰は、実際の空力減衰を正しく評価していない。
- 4) 一方、乱れ強さ 15 % の乱流中での空力減衰は、低風速域を除くと準定常表現による値にほぼ等しくなる。
- 5) 一様流中において、振動時の平均抗力係数及び変動揚力係数は、同期領域付近で極大となり、静止時の値を上回る。これは、角柱背後に放出される渦が振動を助長する位相で形成されることに関係し、空力負減衰効果の発生要因にもなる。
- 6) ガスト応答を予測する際、乱れによる強制力の大きさを表す平均抗力係数は、準定常的表現では角柱静止時の値を用いているが、低風速域においては過小評価となるため、振動時の抗力係数を採用すべきであろう。

参 考 文 献

- 1) Davenport, A.G. : The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures, Proc. Inst. Civ. Eng., Vol.19, 1961, pp.449-472.
- 2) Vellozzi, J. and E. Cohen : Gust Response Factors, Proc. ASCE, Vol.94, ST6, June, 1967, pp.11-34.
- 3) Vickery, B.J. and K. H. Kao : Drag or Along-Wind Response of Slender Structures, Proc. ASCE, Vol.98, ST1, January, 1972, pp.21-36.
- 4) 田村幸雄・佐々木淳・佐藤民夫・高坂隆一 : RD 法による強風時の構造物の減衰評価, 第 12 回風工学シンポジウム, 1992, pp.303-308.
- 5) Sarpkaya, T. and M. Isaacson : Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- 6) Tanida, Y., A. Okajima and Y. Watanabe : Stability of a Circular Cylinder Oscillating in Uniform Flow or in a Wake, Jour. Fluid Mechanics, Vol.61, 1973, pp.769-784.
- 7) Chang, K. S. and J. Y. Sa : Pattern of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder, AIAA Journal, Vol.30, May, 1992, pp.1331-1336.
- 8) Bearman, P. W., M. J. Downie, J. M. R. Graham and E. D. Obasaju : Forces on Cylinders in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Number, Jour. Fluid Mechanics, Vol.154, 1985, pp.337-356.

- 9) Troesch, A. W. and S. K. Kim : Hydrodynamic Forces Acting on Cylinders Oscillating at Small Amplitudes, Jour. Fluids and Structures, Vol.5, 1991, pp.113-126.
- 10) Obasaju, E. D., R. Ermshaus and E. Naudascher : Vortex-Induced Streamwise Oscillations of a Square-Section Cylinder in a Uniform Stream, Jour. Fluid Mechanics, Vol.213, 1990, pp.171-189.