

種々の辺長比をもつ長方形角柱の空力特性に関する研究

A Study of the Wind Force on Several Rectangular Prisms

西村宏昭*

Nishimura Hiroaki

*工博, 日本建築総合試験所, 耐風試験室 (〒565-0873 大阪府吹田市藤白台 5-8-1)

Aerodynamic characteristics acting on rectangular prisms remarkably vary with the side ratio of the prisms. The variation of wind forces with the side ratio is caused by the aerodynamic interaction between the separated shear layer and the after-body of the prism. Especially, the re-attachment of the separated shear layer on the after-body of the prism yields the remarkable variation of wind forces. When wind attacks obliquely to a prism, the re-attachment of the flow obviously occurs on one side surface of the prism. In this condition, fluctuations of wind forces decrease and Strouhal numbers increase. The phenomenon is similar to the variation of wind forces by the side ratio of prisms of which the front face is normal to a wind.

Key Words: wind force, pressure, rectangular prism, side ratio

キーワード: 空気力, 風圧, 長方形角柱, 辺長比

1. はじめに

長方形断面は多くの構造物の基本断面であり, 特に, 辺長比が 3 程度以下の断面は構造物または構造部材に多く用いられている。これらの辺長比の範囲では, 流れの剥離と再付着が複雑に変化し, これに伴って空力特性の変化が顕著に現れる。これらの空力特性を正確に知ることは耐風設計の観点から重要である。

長方形角柱の空力特性の辺長比による変化については多くの研究がなされている。その中で中口ら¹⁾の発見は重要で, 2 つの重大な事実を報告している。ひとつは後に臨界断面と呼ばれる辺長比 $D/B=0.6$ 付近において平均抗力係数が最大値 (後に中口ピークと呼ばれる) をもち, その傾向が背圧係数と同一の傾向を示すこと, ふたつめは $D/B=2.8$ 付近においてストローハル数 St が突然ジャンプして大きくなることである。これらの発見は Bearman & Trueman²⁾, Otsuki et al.³⁾, 桂⁴⁾, 岡島⁵⁾, 大屋⁶⁾, 溝田⁷⁾らによって確認されており, 現象の説明がなされている。例えば, Bearman & Trueman²⁾は臨界断面比より小さい角柱では辺長比の増加に伴って after body が大きくなり, 剥離領域が小さくなることで背圧が低下し,

臨界断面より大きい角柱では after body が渦形成位置を剥離点から遠ざけることで背圧が回復すると推測している。桂⁴⁾は, 臨界断面の角柱において渦の巻き込みが最も強く, このとき渦が背面に最も近くと述べている。大屋⁶⁾は, Bearman ら²⁾の主張では辺長比による背圧のカスプ状の変化はうまく説明できないとし, 臨界断面の前後では渦の巻き込みの強弱が安定したそれぞれの状態が存在し, $D/B=0.6$ 付近ではそれらが不規則に入れ替わると述べている。溝田⁷⁾は, 角柱周りの時間平均的流れを測定して伴流旋み点の位置を同定し, $D/B=0.62$ のとき渦形成位置が最も角柱背面に近づくことを明らかにした。岡島⁵⁾は, $D/B=2.8$ 付近での St 数の不連続な変化は再付着に関係があるとし, $D/B<2.8$ の角柱では再付着が生じないが, $D/B=2.8\sim6$ では後流渦の St 数で周期的に再付着し, $D/B>6$ では定常的に再付着が生じるとしている。筆者⁸⁾は, これまで完全剥離型とされていた正方形角柱においても間欠的な再付着が生じることを明らかにし, 長方形角柱における再付着を完全剥離型, 間欠的再付着型, 周期的再付着型, 定常的再付着型の 4 つのタイプに分類することを提案している⁹⁾。

本研究では, 辺長比の変化に対する長方形角柱の

圧力分布を多点同時測定により調べ、臨界断面付近で現れる空力特性の変化について述べている。また風向変化に伴う流れの再付着現象に及ぼす after body の影響を明らかにした。更に、ギャロッピングの準定常仮定による横力係数の負の勾配が $D/B=2.6$ で最も大きいことを明らかにしている。

2. 実験概要

実験は、(財)日本建築総合試験所所有の幅 1.8m × 高さ 1.3m のエッフェル型吹出式風洞で行なった。実験模型は、図-1 に示す、辺長比 $D/B=0.3\sim 3.2$ の 20 体の長方形角柱で、 $D/B=0.3\sim 1.0$ の角柱については見付幅 $B=6\text{cm}$ を固定長さとし、奥行き D の変化によって辺長比を 0.1 ピッチで、また $D/B=1.0\sim 3.2$ の角柱については $B=3\text{cm}$ を固定長さとし、 D の変化によって辺長比を 0.2 ピッチでそれぞれ変化させた。角柱の長さは 55cm とし、0.3mm 厚のアルミニウム

板の折り曲げ加工で模型を制作した。模型は流れの二次元性を保つための $0.9\text{m}\times 1.8\text{m}$ の端板の間に鉛直に固定した。また、模型軸上にステッピングモーターを付けて風向 θ を 1.8° ピッチで段階的に変化させた。なお模型端部には直径 18cm の小さい端板を付け、模型とともに回転することで、端部の影響を小さくした。模型設置の概要を図-2 に示す。ブロッケージ率は 2.3% で、これによる補正は行っていない。圧力測定点は模型スパンの中央断面に隅角部から 2mm、測定点間隔 3~5mm ピッチで、0.8mm の穴を 40~70 点設けた。各点の圧力は、内径 1.5mm × 長さ 600mm のビニールチューブを介して容量 1kPa の圧力変換器に導き各点同時にサンプリングを行なった。サンプリング周波数は 400Hz、サンプリング数を 16384 個とした。チュービングによる信号の歪みは周波数領域で補正した。実験気流は乱れ強さ約 0.5% の一様流とし、実験風速は約 $V=9.5\text{m/s}$ とした。

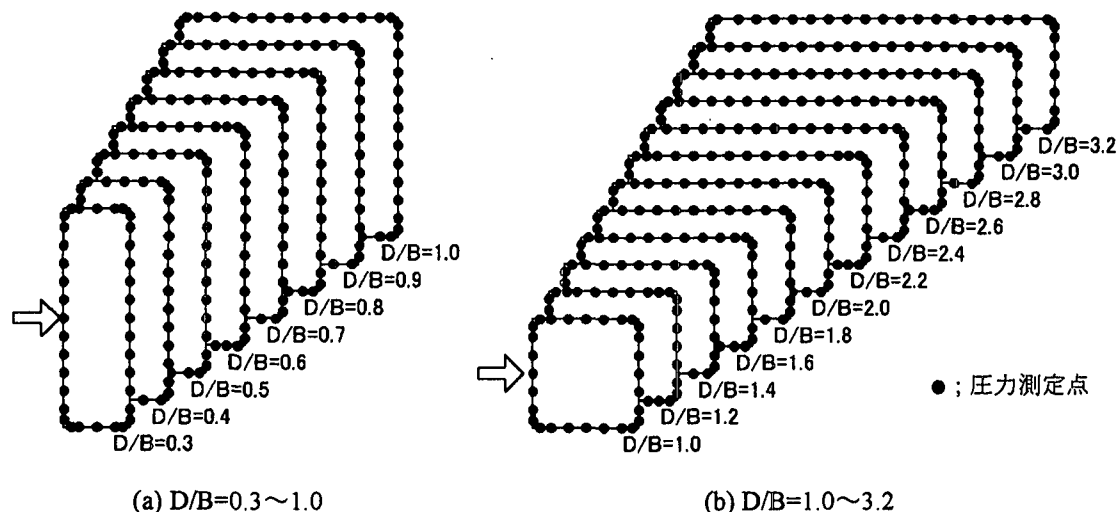


図-1 実験模型

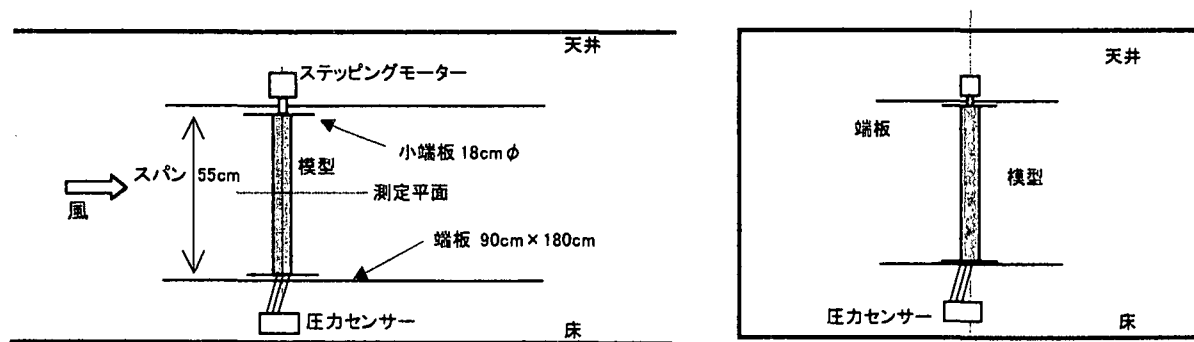


図-2 模型設置概略図

3. 実験結果

3.1 平均風圧係数

風向角 $\theta=0^\circ$ における平均風圧係数 C_p の分布を

図-3 に示す。正圧を模型の内側に、負圧を模型の外側に描いている。○印は角柱ごとに C_p の最小値を示している。辺長比による平均風圧の変化の概略は次のように述べるができる。正面の圧力は概ね正圧の分布を示し、正面中央の淀み点で $C_p\approx 1.0$

となる。 $D/B=0.6$ 付近で正面の端部において負圧を示すが、流れの連続性を考えると、隅角部ではいずれの角柱においても負圧になり、側面前縁の風圧とほぼ等しい値になると考えられる。側面では負圧の分布を示し、 $D/B \leq 0.6$ では D/B の増加に伴って負圧は大きくなり、 $D/B=0.6$ 付近でその負圧が最大となり、その後 D/B の増加につれて小さくなる。また、側面負圧の分布は、 $D/B \leq 0.5$ では後縁部で若干大きく、 $D/B=0.6 \sim 2.6$ では側面ではほぼ一様になり、 $D/B \geq 2.8$ においては側面中央部から後縁部にかけて負圧が小さくなる。背面も負圧の分布となり、 $D/B=0.6$ 付近で最も強くなる。また、 $D/B=0.6 \sim 0.8$ 付近では背面の中央部の負圧が端部に比べて大きくなる。なお、 $D/B=1.2$ の実験結果は他の研究者による結果¹⁰⁾と比較的よく一致している。

図-4 は正面の風圧分布の比較である。 C_p の最大値は淀み点でほぼ $C_p=1.0$ を示す。ここから端部に近づくにつれて C_p は減少し、測定した範囲において

も負圧に至るケースが見られる。 $D/B=0.3 \sim 1.0$ のグループと $D/B=1.0 \sim 3.2$ のグループとでは、模型の幅に対する測定点の位置の割合 y/B (y は風軸から測定点までの距離) が異なるので、値を直接比較することはできないが、傾向を知ることはできる。正面の端部で C_p が最も低下するのは $D/B=0.6$ の断面である。端部での C_p は $D/B=0.3$ から $D/B=0.6$ にかけて低下し、その後 $D/B=2.0$ まで上昇して最大値を示した後、再び低下する。流れの連続性を考慮すると、隅角部での両面の風圧は連続しているはずなので、正面端部近くの風圧と側面前縁近くの風圧とは相関が高いと考えられる。図-5 は正面端部の C_p と側面前縁の C_p を示したものである。正面端部の C_p は図-4 の端部 2 点の風圧分布を隅角部まで直線で外挿して求めた。見付け幅 B が小さい角柱では測定点が隅角部から遠いので隅角部の C_p の推測値は精度が悪く、 $D/B=1$ で不連続になっている。これらの隅角部の風圧係数の辺長比による変化は中口ら¹⁾が示し

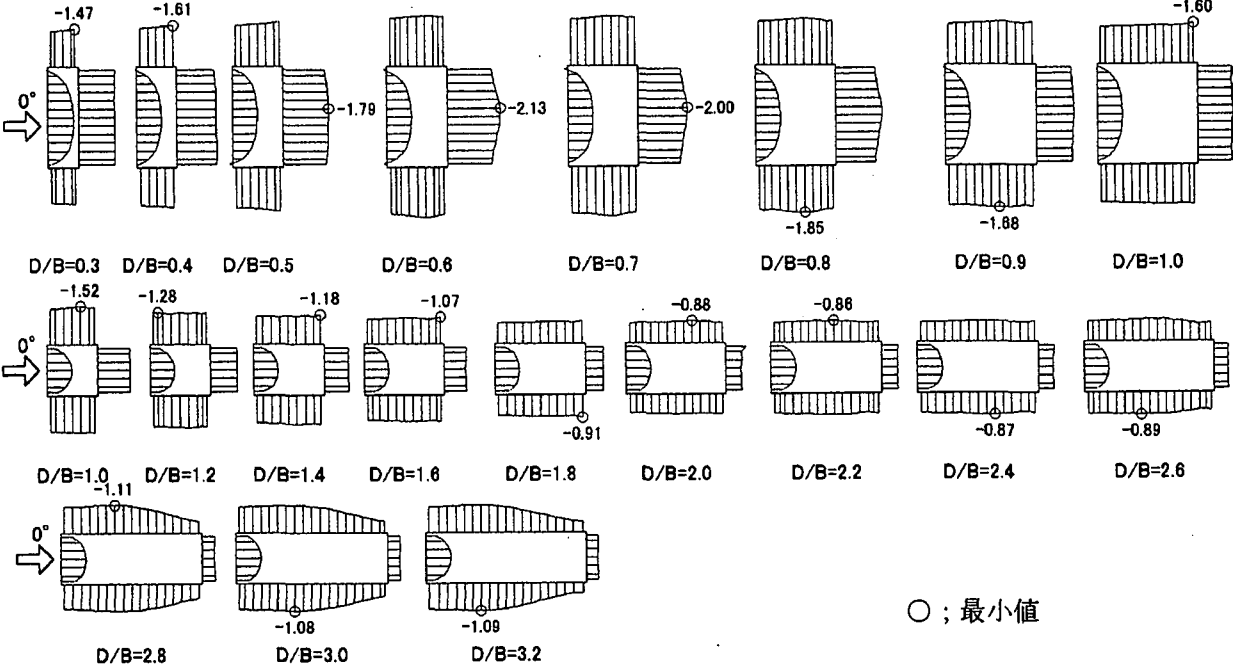


図-3 平均風圧係数分布

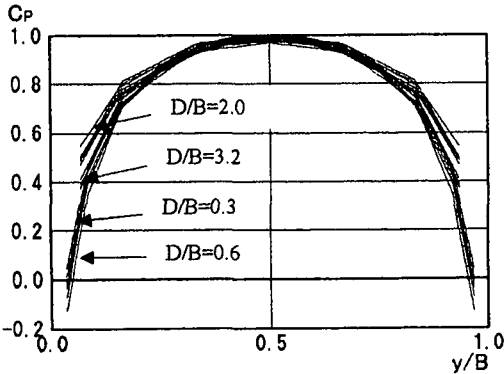


図-4 正面の平均風圧係数分布

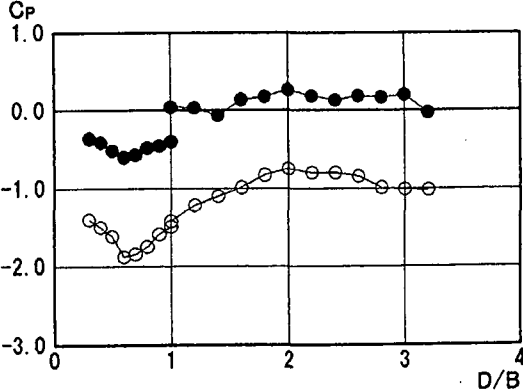


図-5 前縁部の平均風圧係数

た平均抗力係数や背面圧の傾向とよく似ている。後流渦の渦の強さは背面圧の大きさを決定するといわれているが、その渦の生起点である前縁付近の平均風圧もやはり渦の強さの影響を受けているのである。

3.2 変動風圧係数

図-6 は $\theta=0^\circ$ のときの r.m.s 変動風圧係数 C_p' の分布を示したものである。○印は角柱ごとに C_p' の最大値を示している。いずれの角柱でも淀み点では $C_p' \approx 0$ であるが、正面の端部では C_p' が大きくなる。特に $D/B=0.6$ の正面端部で C_p' が最大値をもち、またこのとき側面においても C_p' は最大値を示す。このことは、 $D/B=0.6$ で渦放出の影響が最も強いことを意味している。 $D/B=1.6 \sim 2.6$ では角柱周りの C_p' は全面にわたって小さい一様な分布を示す。 $D/B \geq 2.8$ では側面の前半部で C_p' は小さい一様な分布を示すが、側面後半部と背面の端部において C_p' が大きい。なお、 $D/B=0.3 \sim 0.5$ の角柱では側面の C_p' は後

縁に近づくほど大きい、 $D/B=0.6 \sim 1.4$ の角柱では後縁部の C_p' が若干小さい傾向が見られ、剥離せん断層が瞬間的に再付着していると考えられる⁹⁾。背面の C_p' はいずれの辺長比においても端部の方が中央部より大きい傾向が見られ、後縁部と前縁剥離せん断層または後縁剥離せん断層との距離が中央部より近いことが圧力変動を大きくしていると考えられる。なお、 $D/B=1, 2$ の実験結果は他の研究者による結果¹⁰⁾より2割程度小さい値を示している。

図-7 は正面の変動風圧係数分布を示したもので、隅角部で C_p' が最も大きいのは $D/B=0.6$ の角柱の場合であることがわかる。図-8 は正面端部と側面前縁の C_p' と辺長比の関係を示したものである。前縁隅角部での C_p' も $D/B=0.6$ で最大値を示す。

中口ら¹⁾は種々の辺長比の角柱周り流れの可視化実験で興味深い記述をしている。風上側から放流した煙は淀み点で角柱表面に当たり上下に分かれて流れるが、ある一定時間露光した写真では、流れが分岐して上下に変動してできる漏斗状の模様が撮影さ

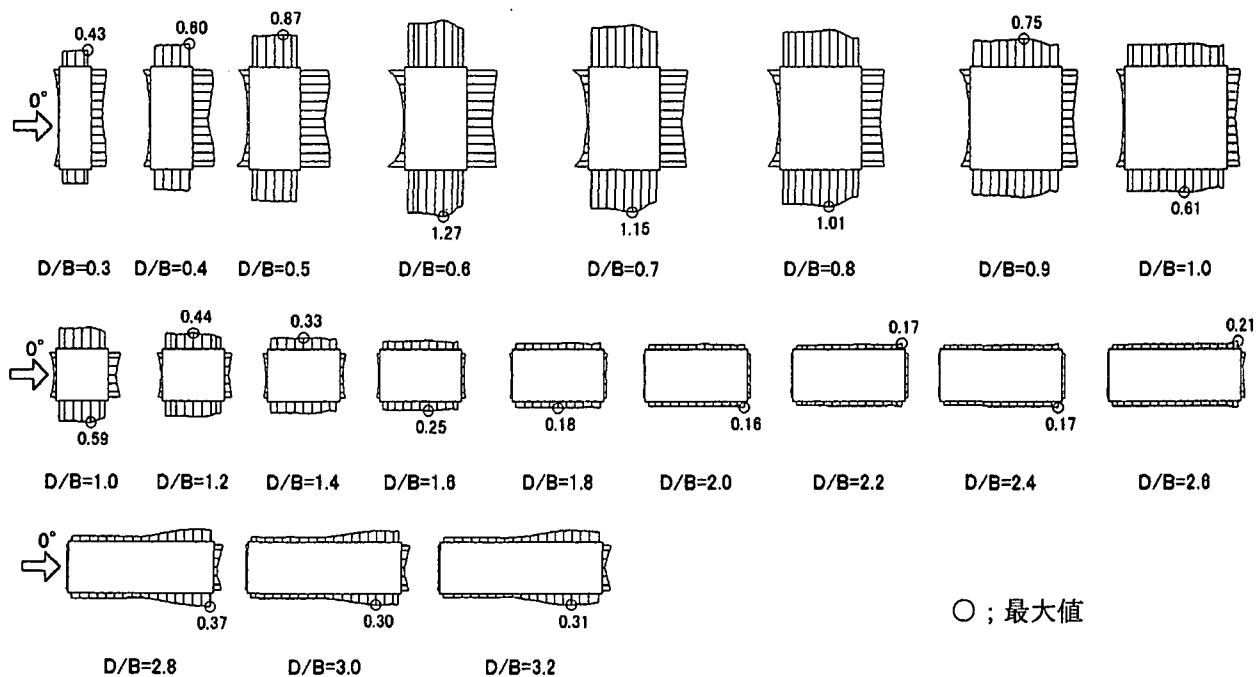


図-6 変動風圧係数分布

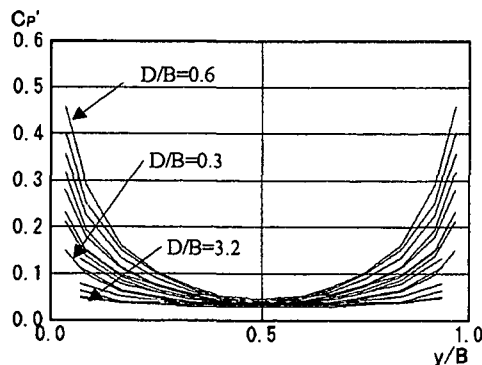


図-7 正面変動風圧係数分布

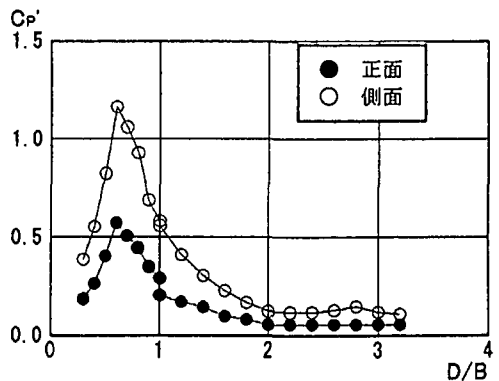


図-8 前縁部の変動風圧係数

れる。彼らはその模様が分岐流れの振幅を表しているとし、その振幅が $D/B=0.6\sim0.7$ の辺長比で最も大きいと述べている。このことは $D/B=0.6$ 付近の臨界断面で剥離せん断層の揺動が最も大きく、それは渦放出の影響が強いことを意味するであろう。因みに、正面の風圧変動のパワースペクトルにおいてもストローハル数成分が卓越している。

正面の瞬間風圧分布の最大値を示す位置を瞬間淀み点の位置と考え、淀み点の変動を計算し、その標準偏差 σ_s を角柱の見付け幅 B で無次元化して図-9 に示す。風圧係数の最大値は風圧分布を三次関数で近似して求めた。淀み点変動の D/B に対する傾向は図-12 の揚力変動とよく似ており、 $D/B=0.7$ で最大になる。渦が放出されるとき渦と逆向きの循環が角柱周りに発生して揚力が生じるが、これによって淀み点が移動すると考えられる。

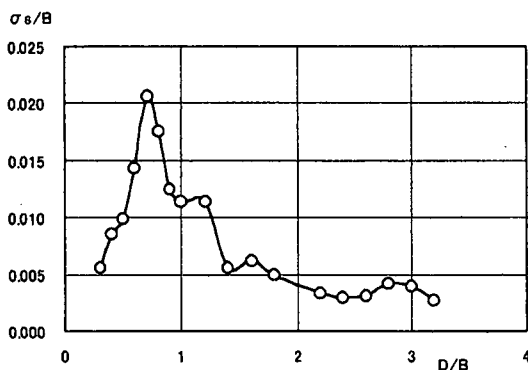


図-9 淀み点の変動($\theta=0^\circ$)

3.3 空気力係数

風圧係数を積分して得られる瞬間空気力係数を(1)~(3)式と図-10 で定義し、これらの平均値と r.m.s. 値を計算し、平均抗力係数; C_d , 平均揚力係数; C_l , 平均モーメント係数; C_m , 変動抗力係数; C_d' , 変動揚力係数; C_l' , 変動モーメント係数; C_m' を求めた。いずれも風向角 $\theta=0^\circ$ のときの見付け幅 B を無次元化に用いている。

$$C_d(t) = \sum_i C_p(t)_i \cdot A_i \cdot \cos \beta_i / B \quad (1)$$

$$C_l(t) = \sum_i C_p(t)_i \cdot A_i \cdot \sin \beta_i / B \quad (2)$$

$$C_m(t) = \sum_i C_p(t)_i \cdot A_i \cdot \ell_i / B^2 \quad (3)$$

ここで、 $C_p(t)_i$ は時刻 t における i 点の瞬間風圧係数、 A_i はその圧力が負担する長さ、 β_i は風向角 θ のときの i 点が属する面の垂線と風軸とのなす角度、 ℓ_i は角柱断面の中心から i 点に作用する圧力までの作用距離である。

平均抗力係数 C_d と背圧係数 $-C_{pb}$ の辺長比による変化を図-11 に示す。 C_d と $-C_{pb}$ は $D/B=0.6$ で最大値を示し、中口ら¹⁾や Bearman & Trueman²⁾の結果と比較的よい一致を示している。 C_d は $D/B=0.6$ で $C_d=2.66$ を示し、 $D/B=0$ で $C_d=2.0$ に、 $D/B>3.0$ で $C_d \approx 1.2$ にそれぞれ漸近する。なお、中口ら¹⁾は背面中央点のみの風圧係数を背圧係数としているが、本研究では背面の風圧係数の平均値を背圧係数とした。

$\theta=0^\circ$ における変動空気力係数 C_d', C_l' および C_m' と辺長比の関係を図-12 に示す。変動空気力係数は角柱まわりの風圧係数の時刻歴を面積積分して得られる各空気力係数の時刻歴の r.m.s. 値を計算して求めた。変動抗力係数 C_d' は $D/B=0.5\sim0.6$ でピークを示し、平均抗力係数 C_d の辺長比に対する変化の傾向とよく似ている。変動揚力係数 C_l' は $D/B=0.7\sim0.8$ でピークをもち、臨界断面より若干大きい辺長比で変動揚力が最大となる。ただし、 C_l' は見付け幅 B を基準にしており、奥行き D を基準にすると $D/B=0.6$ の方が大きい値である。 C_d' と C_l' は柱の実

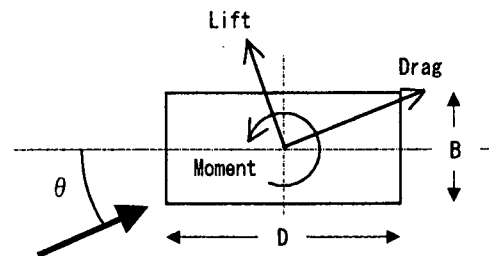


図-10 空気力係数の定義

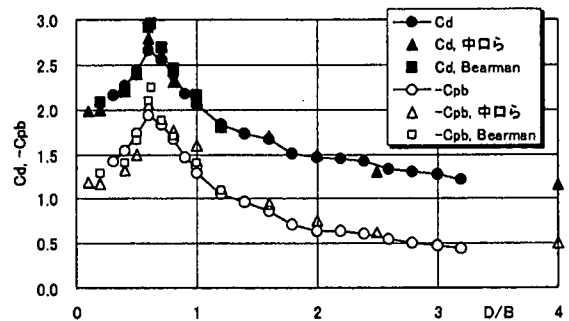


図-11 平均抗力係数と背圧係数($\theta=0^\circ$)

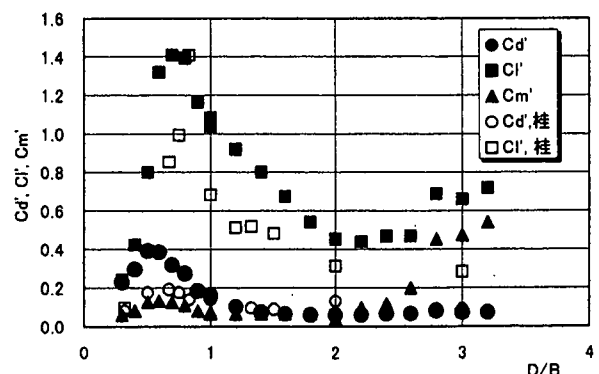


図-12 変動空気力係数($\theta=0^\circ$)

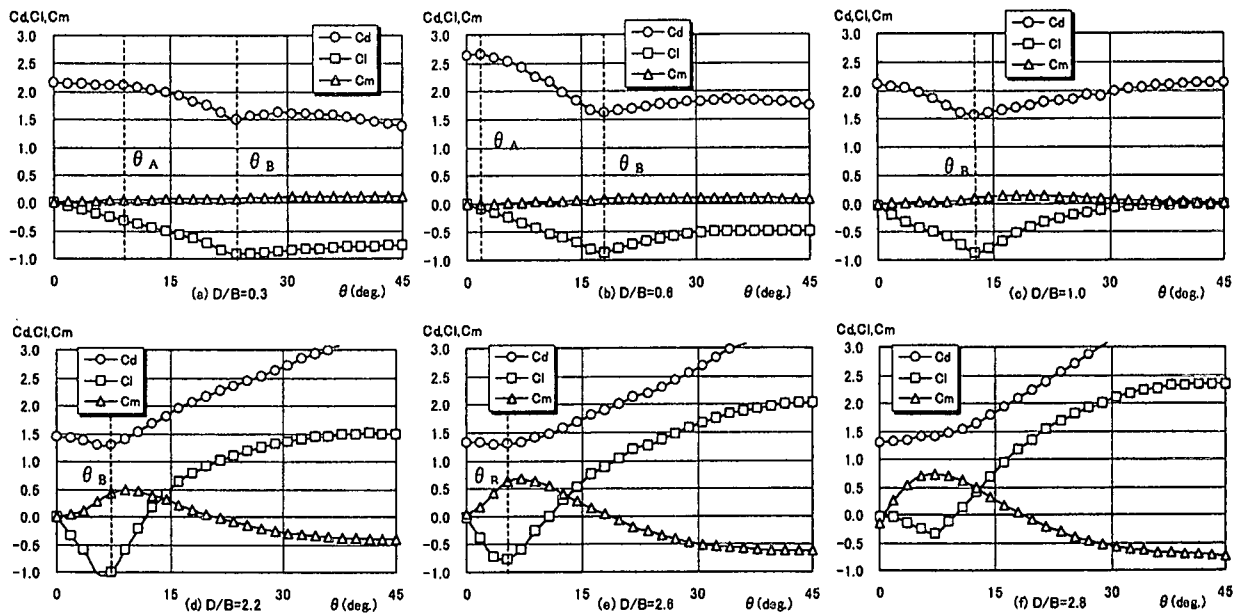


図-13 平均空気力係数の風向角による変化

験結果よりやや大きめであるが、 $D/B=0.8$ の Cl' は近い値である。なお、辺長比が $D/B \geq 2.8$ になると Cl' と Cm' が増加し、これは後縁剥離渦によると考えられ、特に Cm' の増加が著しいのは後縁部付近の圧力変動が大きくなるためである。

風向角が増すと、完全剥離型の長方形角柱においては風上側側面で再付着が生じ、再付着型の角柱では風下側側面で再付着が生じなくなるので、それぞれの空力特性が変化することは容易に想像できる。図-13 は平均空気力係数の風向角による変化を示したものである。 $D/B=0.3$ の角柱では、 Cd は $\theta=0^\circ \sim 9^\circ$ の範囲でほぼ一定の値を示し、これを超えると徐々に減少し、 $\theta=23.4^\circ$ で極値を示し、わずかに増加した後緩やかに減少する。小さい風向角で Cd が一定値を示す傾向は $D/B=0.3 \sim 0.6$ の範囲で見られ、その風向は D/B の増加につれて小さくなり、 $D/B \geq 0.7$ では見られない。この風向角を θ_A 、また空気力係数が極値をもつ風向を θ_B で表し、これらの D/B による変化を図-13 に示した。 θ_B も D/B の増加とともに小さくなるが、 $D/B \geq 2.8$ では Cd の変化点は見られない。 θ_A および θ_B は空力特性が変化する風向で、 θ_A はいかなる瞬間にも再付着が生じない完全剥離から瞬間的に再付着が生じる変化点、 θ_B は瞬間的再付着から定常的再付着への変化点と考えられる。しかし、本実験では再付着を厳密に定義し確認できていないので、この説明は空気力の変化からの推測である。ここでは、平均抗力係数の変化に注目して θ_A と θ_B を決定したが、再付着はある風向範囲で生じるので、これらにも幅があり、過渡的な状態もあることに注意する必要がある。後述するように種々の空力特性は特に θ_B 付近で著しく変化する

ことがわかるが、すべての空力特性が同じ風向角で変化するわけではない。

Cl は風向角の増加とともに減少し、 θ_B で最小値を示した後、増加する。 θ_B が D/B とともに減少することは、辺長比の増加に伴って定常的再付着がより小さい風向角度で生じることを意味し、風向角の増加に伴って $\theta > \theta_B$ で風上側側面の風圧が回復し、揚力係数が増加すると考えられる。 Cl の $\theta=0^\circ$ における風向角に対する負の勾配は D/B に伴って増加し、 $D/B=2.6$ で最大を示すが、 $D/B \geq 2.8$ では急激に小さくなりほぼゼロを示す。このことが、後述するように、辺長比に対する横力係数に急激な変化を与えている。

Cm は $D/B \leq 2.6$ で、 θ_B よりわずかに大きい風向角で最大値を示し、その最大値は D/B の増加とともに大きくなる。 $\theta=0^\circ$ における Cm の風向角に対する勾配は $D/B \leq 2.6$ では比較的小さいが、 $D/B \geq 2.8$ では急激に大きくなる。これは Cl の傾向と逆である。なお、風向角による $D/B=1, 2, 3$ の角柱の空気力の変化は他の研究者による結果¹⁰⁾と比較的よく一致して

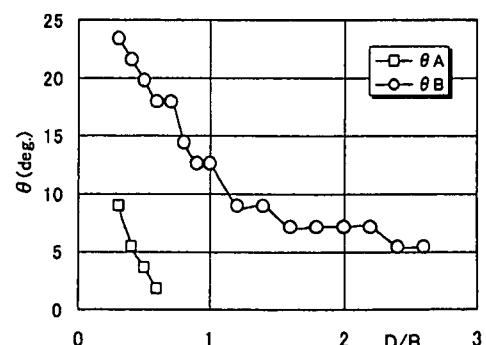


図-14 空気力係数の変化点

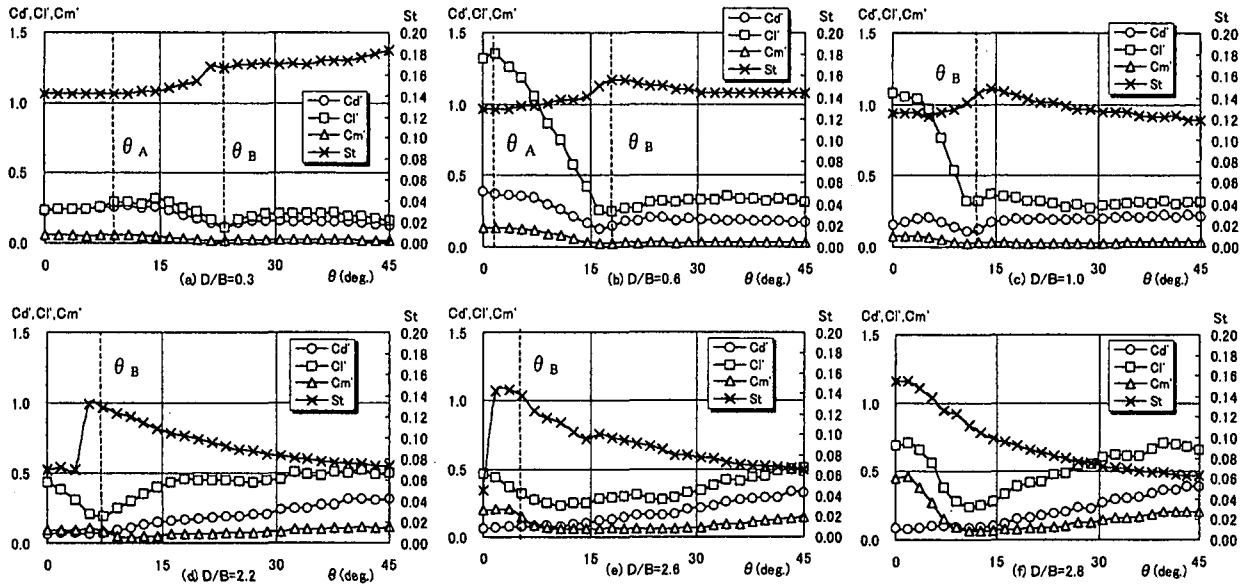


図-15 変動空気力係数とストローハル数の風向角による変化

いる。

変動空気力係数とストローハル数の風向角による変化を図-15に示す。Cd'はCdとよく似た傾向を示し θ_B 付近で極値をもつが、 $D/B \geq 2.0$ ではその変化は顕著ではなくむしろCd'は単調に増加する。 θ_A と θ_B の間で瞬間的再付着が生じていると考えられるが、風向角が増して再付着の頻度が増えると変動空気力は減少し、 θ_B で定常的再付着に至り、変動空気力はほぼ最小値をもつものと思われる。Cm'は $D/B \geq 2.8$ の $\theta < \theta_B$ の範囲で特に大きくなるが、これは側面後縁部付近の変動風圧が大きい(図-6)ことから後縁剥離渦による影響と思われる。

ストローハル数Stも θ_B 付近で急激に大きくなり、 D/B の増加とともにその変化の割合が著しいことがわかる。 $\theta = 0^\circ$ の辺長比の増加によるStの変化だけを見ると、 $D/B = 2.8$ で不連続にジャンプするように見えるが、それ以前の辺長比においても同様の現象が風向角の変化で現れている。これについては次節でも触れる。

3.4 変動空気力のパワースペクトル密度

$\theta = 0^\circ$ のときの変動抗力と変動揚力のパワースペクトル密度を図-16に示す。揚力変動のパワースペクトルは鋭いピークをもち、カルマン渦の放出が明瞭であることを示している。このピーク周波数 f_s からストローハル数 $St = f_s \cdot B/V$ を定義する。 $D/B = 0.4 \sim 1.0$ の角柱では $3St$ の位置に第2のピークをもつ。このピークは主に後縁部付近の圧力変動がサイン波に歪みを生じて高調波として現れる成分である¹¹⁾。 $D/B = 2.2 \sim 2.6$ では D/B の増加とともにピークが小さくなり幅が広がる。 $D/B = 2.6 \sim 3.0$ では2つのピーク

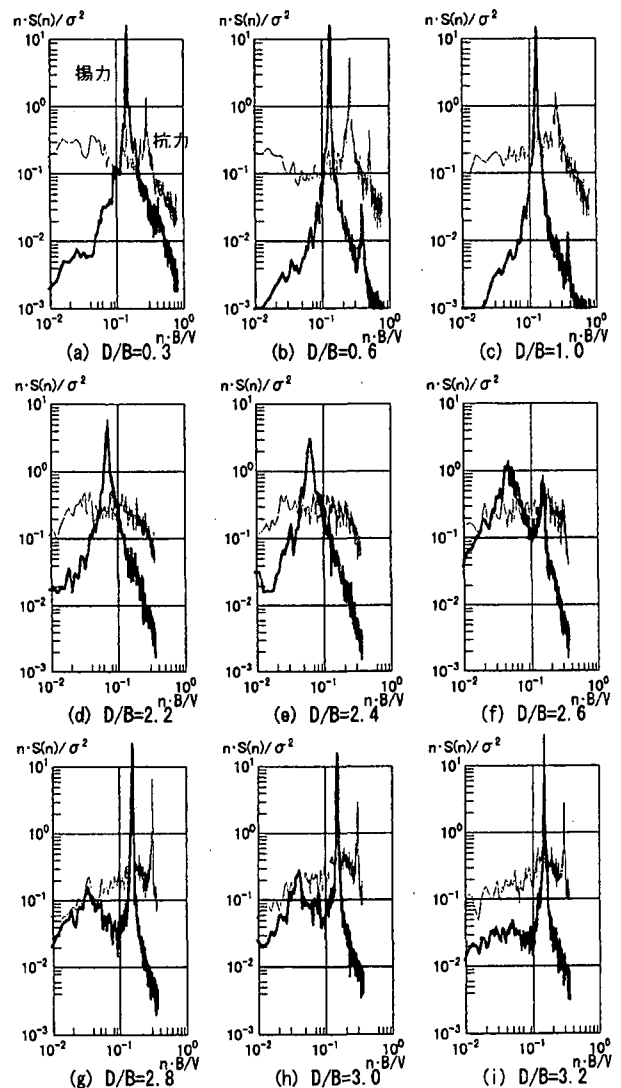


図-16 変動抗力と変動揚力のパワースペクトル密度($\theta = 0^\circ$)

が見られ、岡島⁵⁾がこの辺長比付近で2つのストローハル数が存在すると述べた結果と一致する。 $D/B=3.2$ では明瞭なピークは一つしか見られない。大きい方のピークにのみ注目すると、 $D/B=2.6$ から $D/B=2.8$ の間でストローハル数が突然ジャンプしたかのように思えるが、この辺長比では2つのピークが存在し、辺長比の増加に伴って周波数の低いピークから高い方のピークに徐々にパワーが移行するのがわかる。

多くの角柱では抗力変動のパワースペクトルは、Vickery¹²⁾が指摘したように、 $2St$ でピークをもつが、 $D/B=2.2\sim 2.6$ の間では抗力変動のピークは明瞭ではない。抗力変動のパワースペクトルは背面中央の風圧変動のパワースペクトルとよく似ており、図-6 に示したようにこれらの角柱では背面の変動風圧が小さいことから、渦は背面に強く巻き込まれないと

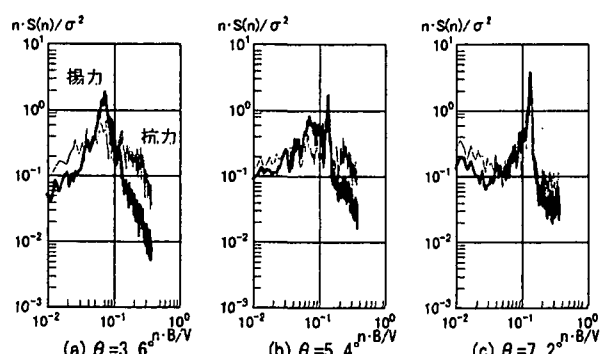


図-17 パワースペクトル密度の風向角による変化 ($D/B=2.2$)

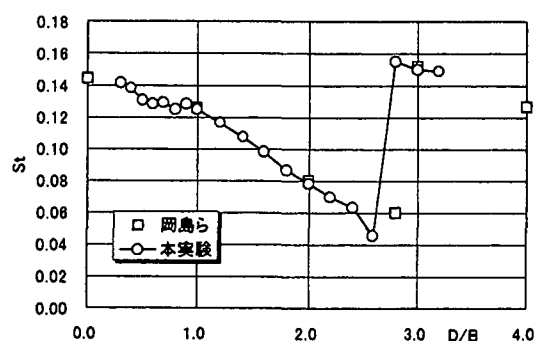


図-18 ストローハル数と辺長比の関係 ($\theta=0^\circ$)

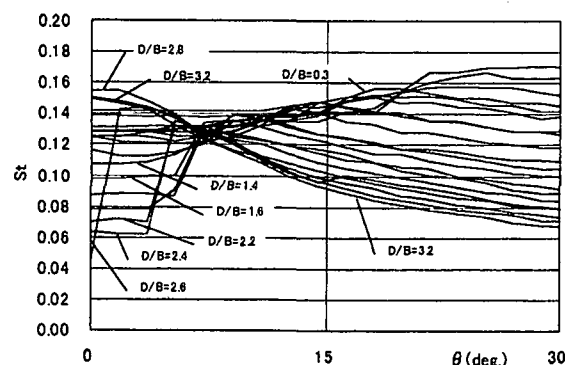


図-19 ストローハル数の風向角による変化

思われる。

図-17は $D/B=2.2$ の風向角によるパワースペクトルの変化を示したもので、低周波側のピークが高周波側に移行する様子がわかる。これは $\theta=0^\circ$ のときの辺長比の増加に伴うスペクトルピークの移行とよく似ており、多くの角柱で見られる。風向角の増加によって側面の片側に流れが再付着することによりスペクトルピークが変化すると考えられる。

図-18は $\theta=0^\circ$ のときの D/B に対するストローハル数の変化を示したもので、岡島⁵⁾の結果とよく一致している。ただし、本実験では $D/B=2.8$ の St は高周波側の値を選択した。図-19は風向角に対するストローハル数の変化を示したものである。 $D/B \leq 1.4$ では θ の増加によってストローハル数は単調に増加するが、 $D/B=1.6\sim 2.8$ ではある風向で急激に増加することがわかる。先に述べたように、ストローハル数の風向角に対する変化点は θ_B 付近にあり、 D/B が増加するとともにより小さい風向角で図-18に似た St のジャンプが見られることは細長い角柱ほど小さい風向角で再付着が生じていることを唆している。

図-20は空気力係数の時刻歴波形で、横軸は無次

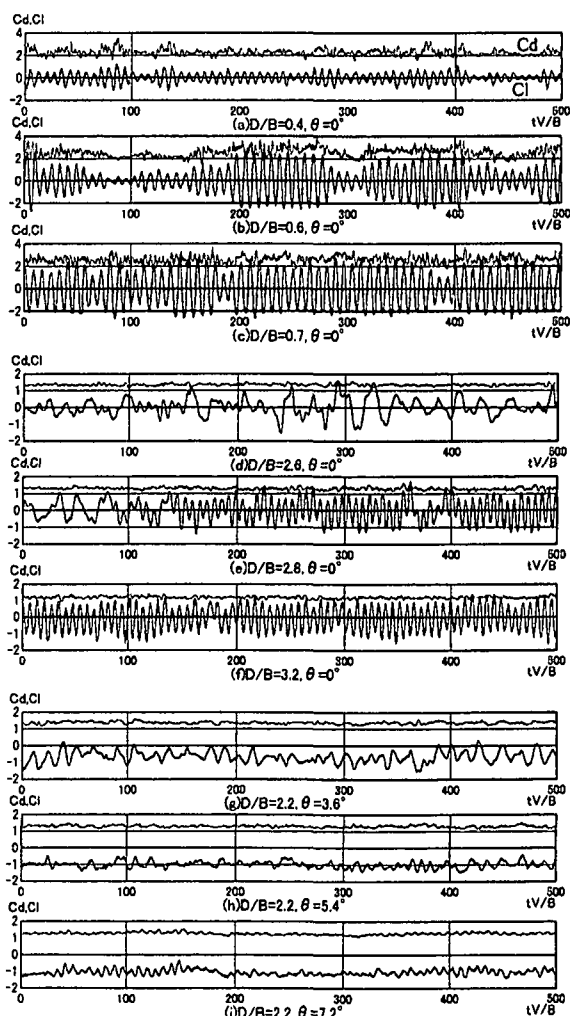


図-20 空気力の時刻歴

元時間で表している。大屋⁶⁾は臨界断面を挟んで、2つの強弱をもつ安定した渦の巻き込みの状態が存在すると述べているが、(b)D/B=0.6の波形は(a)D/B=0.4と(c)D/B=0.7の波形が交互に繰り返す、大屋の結果を裏付けていると思われる。

(d)のD/B=2.6は(f)のD/B=3.2の波形と比べると揚力変動の周期が明らかに長くなっているのがわかる。(e)のD/B=2.8の時刻歴には高周波域の変動と低周波域の変動の両方が現れ、このことによってパワースペクトルに2つのピークが現れる。

(g)～(i)はD/B=2.2の角柱の風向角による変化である。風向角の増加に伴って、低周波数の波形が高周波の波形に移行するのがわかる。これは図-17でStがジャンプすることと同じである。

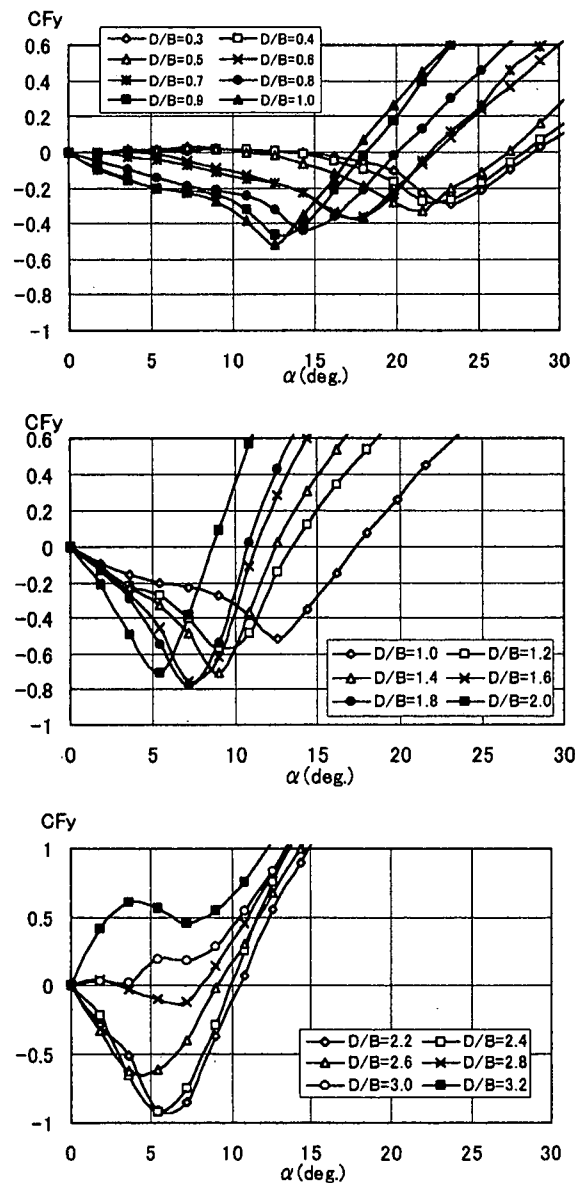


図-21 横力係数

3.5 横力係数

ギャロッピングにおける準定常仮定においては、風直角方向に振動中の物体に作用するある瞬間の振動方向の空気力を、接近風速と物体の振動速度からなる相対風速Uと相対風向αを静止物体に作用させた準定常的な空気力で表すことができる。この空気力は横力と呼ばれ、(4)式で表すことができる。

$$F_y = C_{Fy} \cdot B \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \tag{4}$$

ここで、 C_{Fy} は横力係数、 ρ は空気密度、 U は風向角 $\alpha=0^\circ$ のときの接近風速である。 $\alpha>0^\circ$ のとき、実験風速VはUと物体の振動速度 $\dot{y}$ からなる相対風速

速 $V_{rel} = \sqrt{U^2 + \dot{y}^2} = U / \cos \alpha$ に等しい。Vを用いて(4)式を書き換えると(5)式になる。

$$F_y = C_{Fy} \cdot B \cdot \frac{1}{2} \rho (V \cos \alpha)^2 \tag{5}$$

横力係数の風向角に対する変化を図-21に、D/B=1.0の角柱つまり正方形角柱の横力係数を図-22に示す。実験結果はParkinson¹³⁾の結果と良く一致している。図中の曲線はParkinsonにならって、本実験結果をαに関する7次の奇関数で近似した曲線である。 $\alpha=0^\circ$ での横力係数の勾配A1は(6)式で表され、これが負の値であるとき空気力は負減衰効果をもちギャロッピングが発現する、いわゆる Den

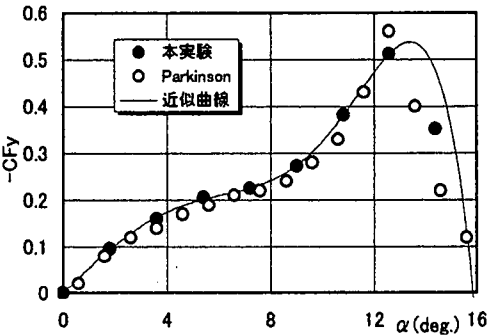


図-22 正方形角柱の横力係数

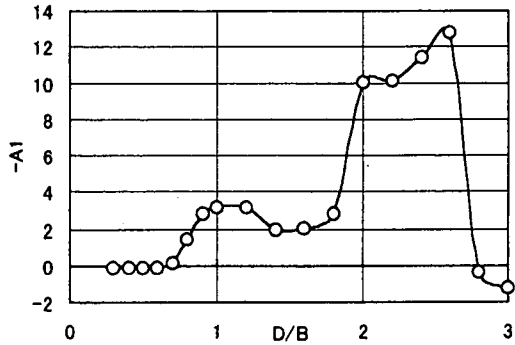


図-23 辺長比による横力係数の勾配の変化

Hartog の判別式である。

$$\frac{dC_{fy}}{d\alpha} = \frac{dCl}{d\alpha} + Cd = A1 \quad (6)$$

また系の減衰が負になる条件から振動が発現する風速、すなわち限界風速 V_0 が(7)式で得られる。

$$V_0 = \frac{2c}{\rho B \left| \frac{dCl}{d\alpha} + Cd \right|} \quad (7)$$

ここで、 c は系の減衰係数である。

D/B による横力係数の勾配 $A1$ の変化を図-23 に示す。よく知られているように、 $D/B \leq 0.6$ の臨界断面より小さい辺長比の角柱ではギャロッピングは発生しないことがわかる。また、 $D/B \geq 2.8$ の角柱でも $\theta = 0^\circ$ ですでに再付着しているためギャロッピングは発生しない。 $-A1$ はこの間で辺長比とともにほぼ増大し、 $D/B=2.6$ で最大になる。(7)式から $|A1|$ が大きいときギャロッピングの発現風速は小さく、 $D/B=2.6$ において最も低風速からギャロッピングが発生すると思われる。

4. 結論

一様流中の長方形角柱の空力特性を圧力の多点同時測定から求め、次の結論を得た

- (1) $\theta = 0^\circ$ において、臨界断面 $D/B=0.6$ での空力特性のカスプ状の変化は正面隅角部での風圧や淀み点の変動にも現れる。
- (2) 平均空気力係数は $D/B=0.6$ でピークを示すが、変動揚力係数は臨界断面より若干大きめの辺長比でピークを示す。
- (3) 風向角の増加に伴って、空気力係数の傾向が変化する2つの風向がある。ひとつは $D/B \leq 0.6$ の角柱において平均空気力係数がほとんど変化しない風向 θ_A で、 $\theta < \theta_A$ の範囲では再付着が生じないと考えられる。ふたつめは各空気力係数に極値が見られる風向 θ_B で、 $\theta_A < \theta < \theta_B$ の範囲で片側側面に瞬間的な再付着が生じると考えられ、 $\theta \geq \theta_B$ では定常的な再付着が生じると考えられる。また θ_B 付近でストローハル数が急激にジャンプする。これは $\theta = 0^\circ$ の辺長比 2.8 付近の変化とよく似ており、片側側面に定常的に再付着が生じる影響であると考えられる。
- (4) ギャロッピングの準定常仮定による横力係数の負の勾配は $D/B=2.6$ で最も大きく、比較的低風速域からギャロッピングが発生する危険性がある。

参考文献

- 1) 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理: 矩形断面の柱の抗力に関する一実験, 航空学会誌, 第 16 巻, 第 168 号, pp.1-5, 1968.
- 2) Bearman, P.W. and D.M. Trueman: An investigation of the Flow around Rectangular cylinders, The Aeronautical Quarterly, vol.23, pp.229-237, 1972-9.
- 3) Otsuki, Y., K. Washizu, H. Tomizawa, A. Ohya: A note on the aeroelastic instability of a prismatic bar with square section, J. of Sound and Vibrations, No.34(2), pp.233-248, 1974.
- 4) 桂順治: 直方形建築物に加わる圧力に関する基礎的研究, 京都大学博士学位論文, 1978.
- 5) 岡島厚: 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, 第 17 号, 昭和 58 年, 9 月, pp.1-19.
- 6) 大屋裕二: 2 次元矩形柱の臨界断についての一考察, ながれ, No.10, pp.210-215, 1991.
- 7) 溝田武人, 岡島厚: 一様流中にある断面比 0.4 ~ 1.5 角柱まわりの剥離と流体力の変化について, 第 7 回風工学シンポジウム論文集, pp.75-81, 1982.
- 8) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元正方形角柱の変動風圧特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 533 号, pp.37-43, 2000, 7.
- 9) 西村宏昭・谷池義人: 二次元長方形角柱の変動風圧特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 538 号, pp.49-55, 2000, 12.
- 10) 中村泰治, 溝田武人, 山田均, 久保吉延, 岡島厚, C.W. Knisely, 白土博通: 構造基本断面の空力特性(その 1), 日本風工学会誌, 第 36 号, pp.49-84, 1988.
- 11) 西村宏昭, 谷池義人: 二次静止円柱の変動風力発生機構, 日本風工学会誌, No.74, pp.47-57, 1998.
- 12) Vickery, B.J.: Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, J. Fluid Mech., vol.25, pp.481-494, 1966.
- 13) Parkinson, G.V.: Wind -induced instability of structure, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A.269, pp.395-409, 1971.

(2002 年 4 月 19 日 受付)