

各種矩形断面のフラッター特性の体系化に関する考察

Flutter Instabilities for Rectangular Cylinders

松本 勝¹⁾ 白石成人²⁾ 白土博通³⁾
 藤井大三⁴⁾ 山岸 稔⁵⁾ 青木 淳⁴⁾

Masaru Matsumoto, Naruhito Shiraishi, Hiromichi Shirato
 Daizo Fujii, Minoru Yamagishi and Jun Aoki

- 1) 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒 606 京都市左京区吉田本町)
- 2) 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒 606 京都市左京区吉田本町)
- 3) 工博 京都大学助手 工学部土木工学科 (〒 606 京都市左京区吉田本町)
- 4) 京都大学大学院 工学部土木工学科 (〒 606 京都市左京区吉田本町)
- 5) (株) 間組 (研究当時 京都大学大学院) (〒 214 川崎市麻生区金程 1-34-12)

This study aims to clarify the flutter instabilities of two dimensional rectangular cylinders. So the unsteady pressure distributions of cylinders with various slenderness ratios(B/D) were measured by use of "forced vibration method". It has been concluded that their characteristics drastically changes at the particular section with critical slenderness ratio of 2.8, and that flutter sections than $B/D=2.8$ are aerodynamically characterized by height(D) of deck, while bluff sections by width(B) of deck.

Key Words: Flutter Instability, Bluff Body, Unsteady Pressure

1. まえがき

矩形断面周りの空気の流れのパターンはその断面形状によって異なるが、その形状を表すパラメータとして断面辺長比 B/D (断面幅員 B , 断面高さ D) がよく用いられる。断面辺長比の小さい (Bluff) 矩形断面に関しては、その空力特性として、 $B/D=0.62$ で背圧が最も低下し、また $B/D=2.8$ で剥離流れが非定常的に断面側面に再付着するようになりこの断面辺長比を境に断面周りの空気の流れが大きく変化することが知られている [1]。一方、断面辺長比の大きな矩形断面に関しては、 $B/D=6.0$ で剥離流れが定常的に断面側面に再付着するようになることが知られている。図-1[2] は矩形断面の断面辺長比とストローハル数の関係を表しており、矩形断面周りのストローハル数はレイノルズ数に依存せず、また、 $B/D=2.8$, $B/D=6.0$ で不連続となっていることがわかる。

- さらに、 $B/D=20 \sim 5$ の扁平な矩形断面に関しては、
- (1) たわみ及びねじれ振動時の非定常圧力特性は、相対迎角という観点(振動変位と変動圧力の位相差として相対迎角を基準にする)からみると本質的には同一である。
 - (2) どの断面辺長比の断面についても、断面高さ (D)

によって無次元化された座標系で規準化される。ということが過去の研究 [3] により明らかにされている。この扁平な矩形断面の非定常圧力特性に関しては、3 節で詳しく述べる。

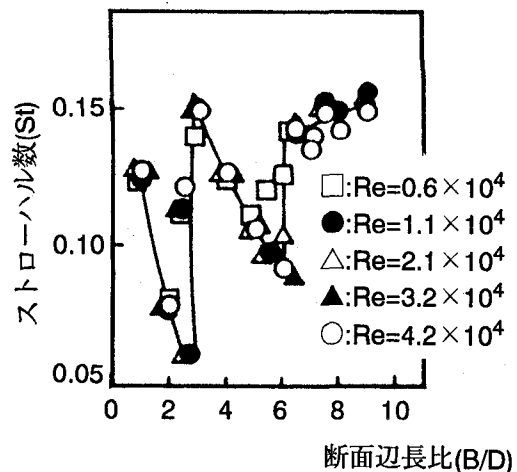


図-1 矩形断面の断面辺長比によるストローハル数の変化[2]

また、連成フラッター、ねじれフラッター及びギャロッピングの一連のフラッター現象に関して、過去の種々の研究[4～8など]により、図-2に示されるような種々の断面辺長比とその断面でのフラッター発現風速の関係が得られている。

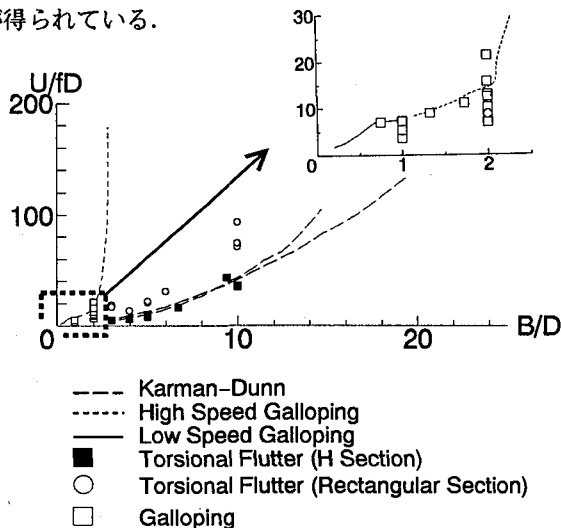


図-2 フラッター発現風速^{[4]～[8]}

本研究では、ストローハル数が不連続となる $B/D=2.8$ を含む断面辺長比の小さな矩形断面、 $B/D=3, 2, 1$ の矩形断面を用いて強制加振による非定常圧力測定を行い、その非定常圧力特性が $B/D=20 \sim 5$ の偏平な矩形断面で明らかにされた一連の特性の延長として取り扱うことができるかどうか、また非定常圧力特性により断面辺長比で連続的かつ統一的な分類が可能であるか否かを検討し、非定常圧力特性から体系的 Flutter Instability について考察を加えることを試みた。

2. 風洞実験概要

本実験で使用した風洞は京都大学工学部土木工学教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞(測定部高さ 1.0m, 幅員 0.7m, 長さ 5.0m)であり、0.3m/s ～ 15.0m/s の範囲で連続的に風速変化が可能となっている。また、模型設置位置付近ではほぼ様な風速分布となること、主流平均乱れ強さが平均風速 4.0m/s で 0.5% 以下となることが確認されている。本研究ではこの風洞を使用して一樣流中のみで実験を行った。実験に使用した模型は断面辺長比 $B/D=3, 2, 1$ の矩形断面で、木製の 2 次元剛体模型であり、気流の 2 次元性を確保するために模型の両端に端板を取り付けている。さらに、非定常圧力測定用の圧力孔を各断面の側面中央部に設けている。それらの矩形断面の断面図を図-3に示す。

各模型の強制加振には 2 自由度電動加振機を用いた。たわみ 1 自由度振動時における変動圧力は非常に小さいことが知られているため、たわみ 1 自由度強制加振実験においては、基本的には倍振幅を $2\eta = 10\text{mm}$ とし、ねじれ 1 自由度強制加振実験においては、 $2\phi = 4^\circ$ とした。ただ、本研究では断面辺長比の小さな矩形断面を

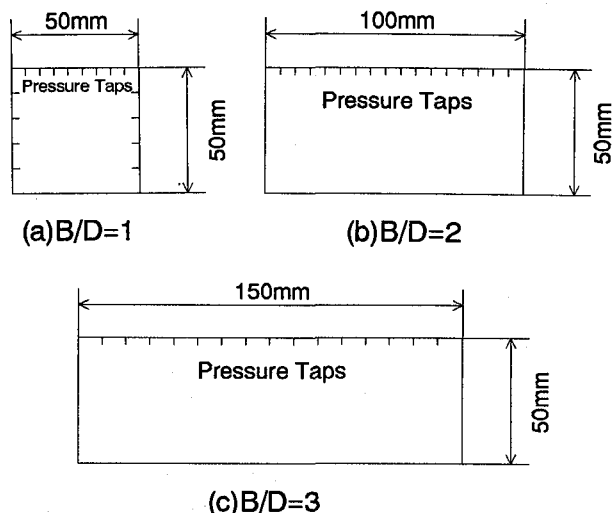


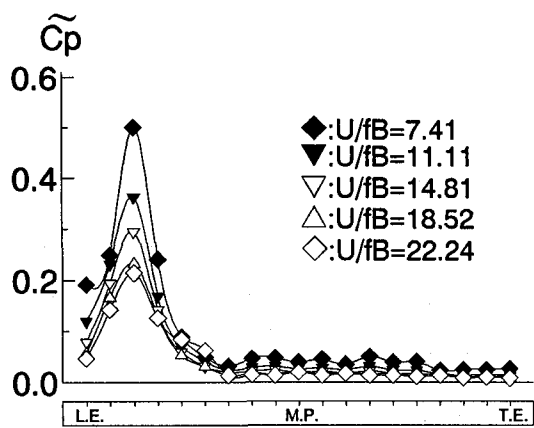
図-3 矩形断面模型

対象としておりカルマン渦の強い影響が予想されたため、必要と認められた場合には $2\eta = 20\text{mm}$ でも強制加振実験を行った。加振振幅は、過去の研究[3]に従い同じ値とした。圧力測定は模型表面の圧力孔から取り出した圧力をプレッシャーマイク・バンドパスフィルタを介してリニアコーダに出力し変動圧力を読みとった。それと同時に模型の振動変位も出力し、変動圧力と振動変位の位相差も読み取った。その際、変動圧力から平均圧力を引き、その圧力変動の大きさ(倍振幅)を主流の動圧で無次元化した値を変動圧力係数とし、位相差 θ を「たわみ振動の場合は模型断面が下向きに原点を通過する瞬間(すなわち相対迎角が最大になる瞬間)を、ねじれ振動の場合はねじれ変位が頭上げ最大となる瞬間(すなわち相対迎角が最大になる瞬間)をそれぞれ起点とし、それらの瞬間から模型上面の負圧がピークに達するまでの位相遅れを正とする」と定義した。

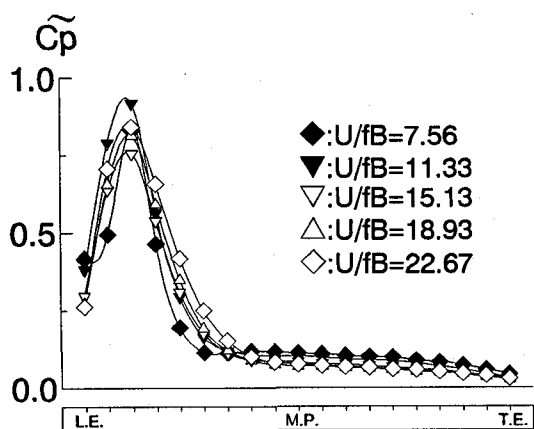
3. 矩形断面の非定常圧力特性

3.1 変動圧力係数の分布特性

図-4[3]は、断面辺長比 $B/D = 20$ の矩形断面の(a)たわみ(b)ねじれ 1 自由度振動時の各圧力孔における変動圧力係数の分布特性である。この図より、たわみ及びねじれ振動時の変動圧力係数の分布形状が類似していることがわかる。(a)のたわみ 1 自由度振動では、変動圧力係数の最大値が風速により変化しているが、(b)のねじれ 1 自由度振動では風速が変化しても変動圧力係数の最大値はほとんど変化していない。このことは、相対迎角について考えると、たわみ 1 自由度振動では相対迎角は $\alpha = \eta \omega / U$ (η : たわみ片振幅, ω : 円振動数, U : 風速)と表され、風速の上昇により相対迎角が小さくなるが、ねじれ 1 自由度振動では相対迎角はねじれ片振幅 ϕ による影響が支配的で振幅そのものがほぼ相対迎角となり、風速の変化による相対迎角の変化は小さいためであると考えられる。



(a)たわみ1自由度振動



(b)ねじれ1自由度振動

図-4 B/D=20の変動圧力係数分布^[3]

図-5^[3]は、断面辺長比 $B/D = 20$ の矩形断面の、各風速における相対迎角の最大値と変動圧力係数の最大値の関係をプロットしたものであるが、相対迎角の最大値と変動圧力係数の最大値がほぼ線形関係にあることがわかる。

このように、相対迎角と変動圧力係数に比例関係が認められることから、変動圧力係数は相対迎角によって決定されと考えられる。

図-6は、断面辺長比 $B/D = 2$ の矩形断面の(a)たわみ ($2\eta = 20\text{mm}$)(b)ねじれ1自由度振動時の変動圧力係数の分布特性である。図-6より、 $B/D = 2$ の矩形断面のたわみ及びねじれ振動時の変動圧力係数の分布形状は類似しており、どちらも、低風速域においては、模型前縁部から中央部にかけて緩やかに増加し中央部から後縁部にかけてピークを示した後に減少する傾向にあり、高風速域においては、小さな一定値を示す傾向にある。分布特性の変化する風速が(a)たわみと(b)ねじれにおいて少々異なっているが、これは振動モードの影響が若干表れていると考えられる。また、図には示していないが、

$B/D = 3$, $B/D = 1$ の矩形断面の変動圧力係数の分布特性に関しても $B/D = 2$ の矩形断面と同じ傾向にあり、 $B/D = 3$ の矩形断面においては変動圧力係数の最大値と相対迎角の最大値に比例関係も認められた。

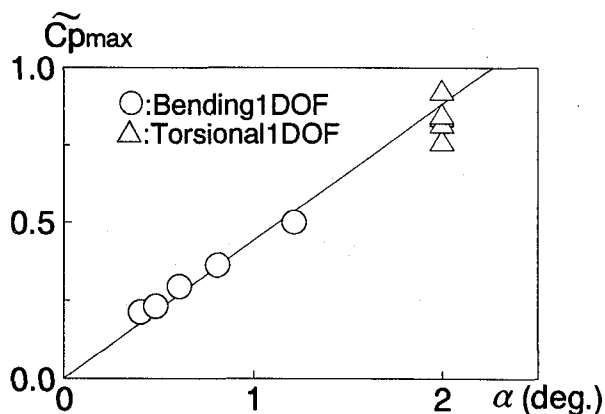
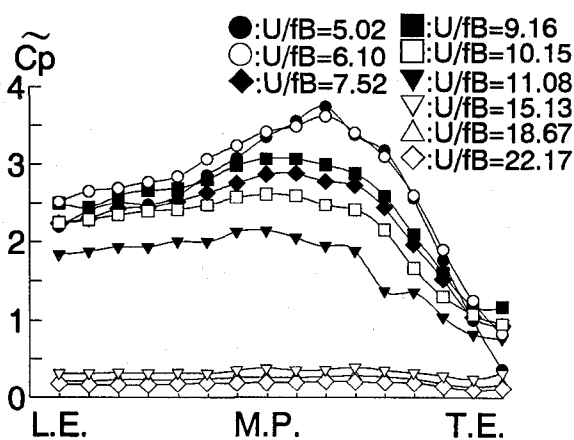
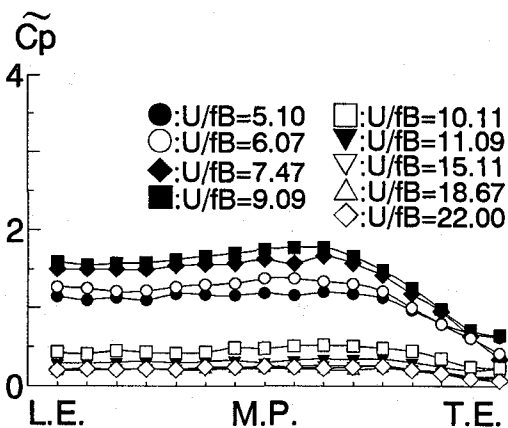


図-5 相対迎角 α と変動圧力係数の最大値($B/D=20$)^[3]



(a)たわみ1自由度振動

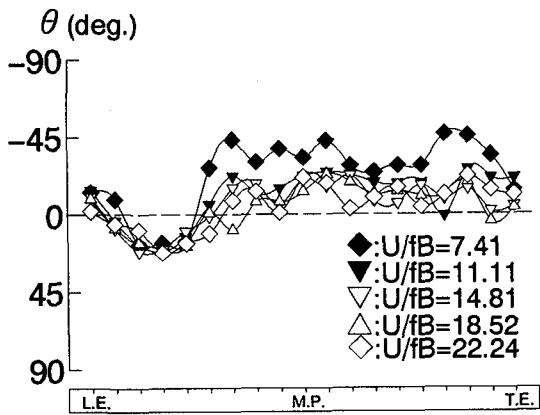


(b)ねじれ1自由度振動

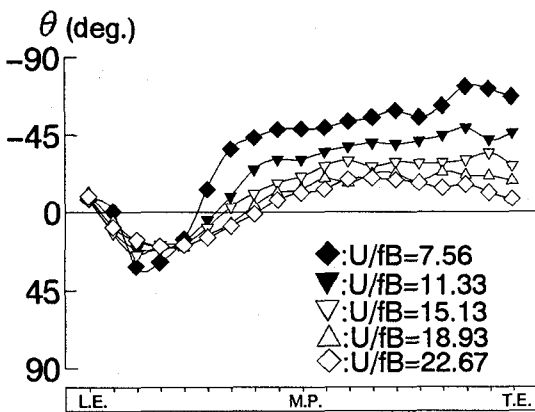
図-6 B/D=2の変動圧力係数分布

3.2 変位と変動圧力の位相差特性

図-7[3]は、断面辺長比 $B/D = 20$ の矩形断面の(a)たわみ(b)ねじれ1自由度振動時の各圧力孔における変位と変動圧力の位相差の分布特性である。2節で定義したように相対迎角の観点から位相差を定義すると、 $B/D = 20$ の位相差の分布特性はたわみ振動とねじれ振動で非常に類似していることがわかる。



(a)たわみ1自由度振動

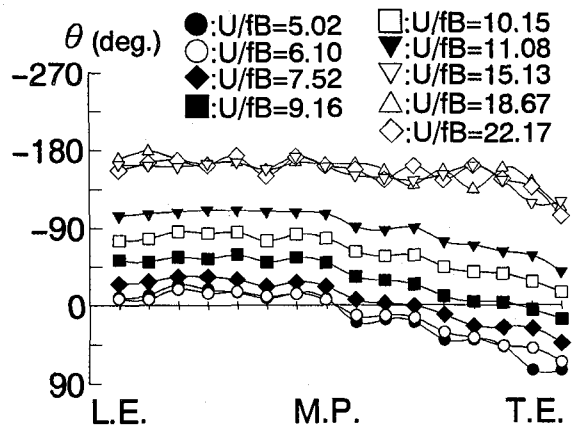


(b)ねじれ1自由度振動

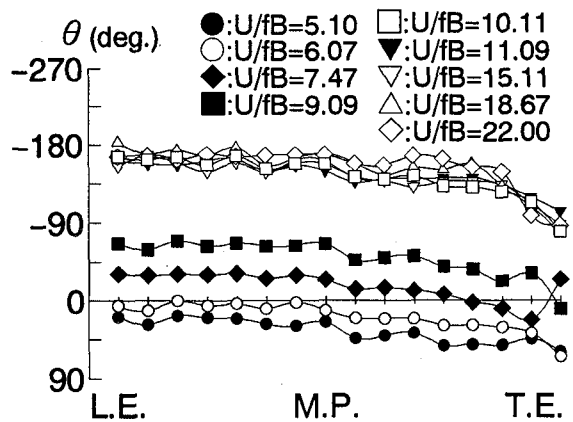
図-7 $B/D=20$ の変位と変動圧力の位相差[3]

図-8は、断面辺長比 $B/D = 2$ の矩形断面の(a)たわみ(2 $\eta = 20\text{mm}$)(b)ねじれ1自由度振動時の変位と変動圧力の位相差の分布特性である。図-8より、 $B/D = 2$ の矩形断面のたわみ及びねじれ振動時の位相差の分布特性は類似しており、低風速域では、模型前縁部でほぼ一定値($\theta = 0^\circ \sim -90^\circ$)で中央部から後縁部にかけて一様に遅れていく傾向を示すのに対し、高風速域では、前縁部で $\theta = -180^\circ$ 付近に分布し後縁部に向かうにつれて緩やかに遅れる傾向にあることがわかる。このように、この断面においても相対迎角の観点から位相差を定義すると、位相差の分布特性はたわみ振動とねじれ振動で非常に類似している。また、図には示さないが、 $B/D = 3$ 、 $B/D = 1$ の矩形断面の位相差の分布特性に関してもたわみ振動とねじれ振動で類似している。

これらの矩形断面のたわみ及びねじれ1自由度振動時の非定常圧力特性をまとめると、変動圧力係数の分布特性に関しては、 $B/D = 3, 2, 1$ のような断面辺長比の小さな断面においても、たわみ及びねじれ振動時のその分布形状が類似しており、断面辺長比 $B/D = 3$ の矩形断面については変動圧力係数の最大値と相対迎角の最大値に比例関係が認められる。また、変位と変動圧力の位相差に関しては、相対迎角の観点から位相差を定義するとたわみ及びねじれ振動時の位相差特性は同一とみなし得る。また、 $B/D = 2$ の矩形断面の非定常圧力特性は、高風速域と低風速域ではその傾向が異なり、高風速域において、 C_p は断面側面全体にわたり小さな一定値を示し(図-6)、 θ は -180° でほぼ一定となっており(図-8)、準定常理論が成立していると考えられる。これは高風速(U/fB が10程度から)において剥離せん断層と断面後縁が非常に近づいた状態となり、断面側面上に内部循環流が形成されたことによるギャロッピングの発生[9]と結びつけられる。このことは $B/D = 2, 1$ の矩形断面においてのみ高風速域でみられる特性である。



(a)たわみ1自由度振動

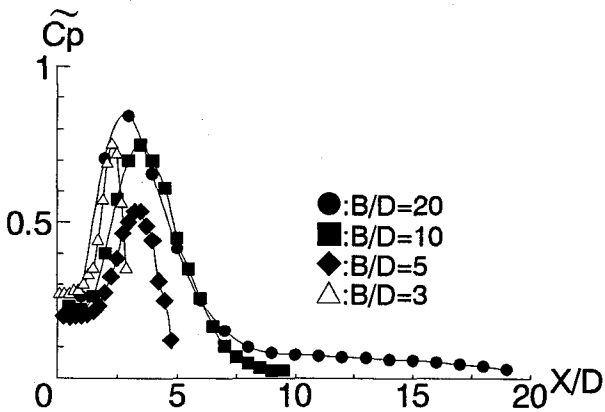


(b)ねじれ1自由度振動

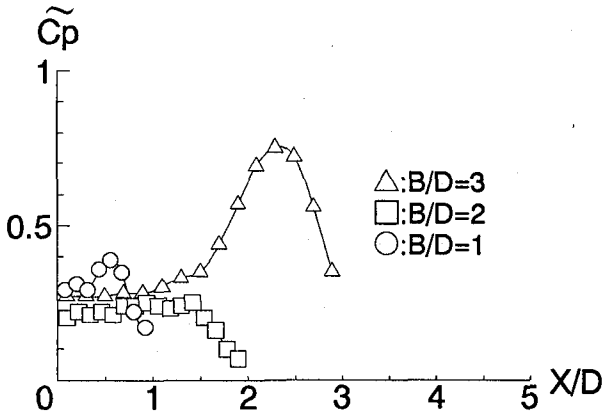
図-8 $B/D=2$ の変位と変動圧力の位相差

4. 断面高(D)で無次元化した座標系からみた非定常圧力特性

図-9は、(a) $B/D=20 \sim 3$ 、(b) $B/D=3 \sim 1$ の各矩形断面について、無次元風速 $U/fB = 22$ でのねじれ1自由度振動時の変動圧力係数の分布特性を断面高(D)で無次元化した座標系で比較評価したものである(x は模型前縁部から各圧力孔までの距離であり、横軸は(a)に関しては $x/D = 20$ までを、(b)に関しては $x/D = 5$ までを表示している)。過去の研究[3]により、 $B/D = 20 \sim 5$ の矩形断面における変動圧力係数の分布特性は、たわみ及びねじれ1自由度振動時ともにその断面辺長比によらず断面高(D)で無次元化される座標系により規準化されたが、図-9(a)より、変動圧力係数の分布特性が $B/D = 20 \sim 3$ でほぼ一致していることから、 $B/D = 3$ の断面においてもこの一般性が成立するものと考えられる。したがって、このような断面辺長比を持つ矩形断面の変動圧力は、断面高(D)によってその特性は決定され、つまり、断面高(D)に対する前縁からの再付着点までの距離が高風速でほとんど同じであり、その点よりも後流側にある断面による非定常圧力特性への影響はほとんどないと考えてよい。連成フラッターやねじれフラッター



(a) $B/D=20 \sim 3$



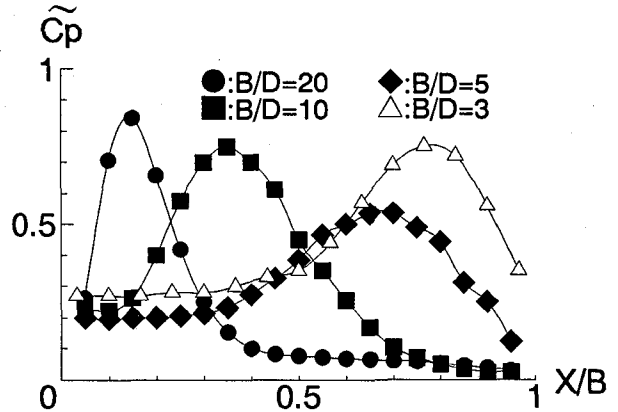
(b) $B/D=3 \sim 1$

図-9 断面高さ(D)で無次元化した座標系からみた変動圧力係数の分布特性(ねじれ振動)

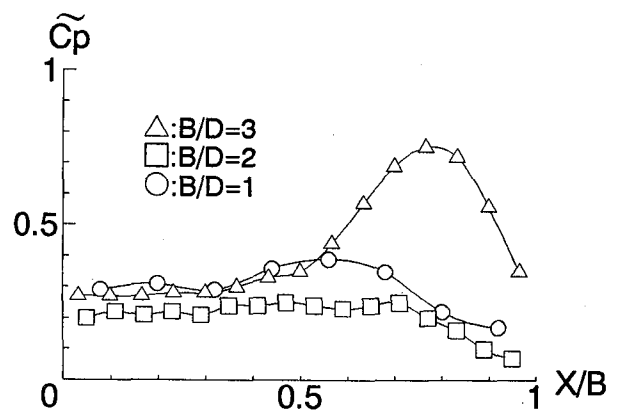
の発現に対しては、変動圧力係数のピークとその位置での位相差が重要であるので、それらの自励振動では本質的に空気力の作用の仕方は同じであると考えられる。なお、図-9(b)より、 $B/D = 2,1$ の断面については、 $B/D = 20 \sim 3$ までの断面の特性とは顕著に異なることがわかる。

5. 断面幅員(B)で無次元化した座標系からみた非定常圧力特性

図-10は、(a) $B/D = 20 \sim 3$ 、(b) $B/D = 3 \sim 1$ の各矩形断面について、無次元風速 $U/fB = 22$ でのねじれ1自由度振動時の変動圧力係数の分布特性を断面幅員(B)で無次元化した座標系で比較評価したものである。 $B/D = 2,1$ の矩形断面の非定常圧力特性がギャロッピング発生時の特性を表していることは3節で述べた通りである。図-10(b)より $B/D = 2,1$ の矩形断面の変動圧力係数の分布特性は、断面幅員(B)によって無次元化される座標系により規準化されることが分かる。このことより、ギャロッピング発生時における断面側面への流体力の働き方は断面後縁部の影響を強く受け、断面高(D)により無次元化される座標系により規準化されるねじれフラッ



(a) $B/D=20 \sim 3$



(b) $B/D=3 \sim 1$

図-10 断面幅員(B)で無次元化した座標系からみた変動圧力係数の分布特性(ねじれ振動)

ター及び連成フラッターとは自励空気力の作用の仕方が本質的に異なると考えられる。つまり、ギャロッピングが発生する矩形断面では、非定常圧力特性が断面幅員(B)によって規準化されるが故に断面前縁に対する後縁部の相対的な位置関係が重要となる。

6. 結論

(1)断面辺長比 $B/D = 2,1$ のような断面辺長比の小さな矩形断面においても、相対迎角という観点からみると、たわみ及びねじれ1自由度振動時の非定常圧力特性は同一とみなし得る。

(2)断面辺長比 $B/D = 2,1$ の矩形断面の非定常圧力特性は、高風速と低風速では傾向が異なり、高風速における特性は断面側面上に形成される内部循環流の存在によるギャロッピングの発生を示している。

(3)断面辺長比 $B/D = 3$ の矩形断面は、より偏平な断面($B/D = 20 \sim 5$)の特性を示し、断面高(D)で無次元化された座標系において一般性を有する傾向にある。

(4)断面辺長比 $B/D = 2,1$ の矩形断面は、断面幅員(B)

で無次元化された座標系において一般性を有する傾向にあり、これらの断面は断面後縁部の影響を強く受けているといえる。

(5)結論(3)(4)をまとめると図-11のように示すことができる。

最後に、本研究の遂行にあたり多大なるご協力を頂いた、京都大学大学院奥寺健彦氏、ならびに京都大学橋梁工学研究室の学生一同に深く感謝致します。

【参考文献】

- [1] 中口 博, 橋本貴久祐, 武藤真里: 矩形断面の柱の抗力に関する一実験, 日本航空学会誌, VOL.16, No.168, 1958年.
- [2] 岡島 厚: 種々な断面辺長比の矩形断面周りの流れ, 日本風工学会誌, 第17号, 昭和58年.
- [3] 松本 勝, 新原雄二, 小林祐輔: 構造基本断面のフラッター発生機構に関する研究, 構造工学論文集, VOL.40A, 1994.3.
- [4] Th.Von Karman and L.G.Dunn, "Aerodynamic Stability of Suspension Bridges with Special Reference to the Tacoma Narrows Bridges", F.D.Farquharson(ed.) Bull. of Univ.Washington Eng. Exp. Station, No.116 Part1, 1949.
- [5] G.V.Parkinson, N.P.H.Brooks, "On the Aerolastic Instability of Bluff Cylinders", Journal of Applied Mechanics, Vol.28, 1961.
- [6] 宮崎正男: 矩形断面柱の空力不安定振動とその制御に関する一考察, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, 1982年.
- [7] 小林紘士: 長方形断面の渦励振, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, 1982年.
- [8] 久保喜延, 加藤九州男: 偏平構造断面柱発振風速推定式について, 第9回風工学シンポジウム論文集, 1986年.
- [9] 橋と風編集グループ: 風の作用と構造物の挙動, 橋と風(第1章), 1990年.

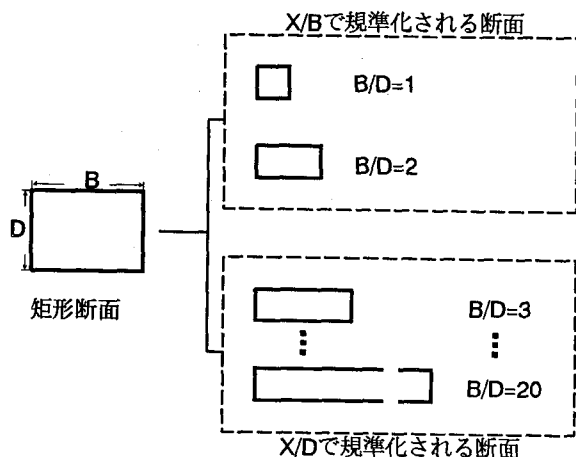


図-11 非定常圧力特性からみた
矩形断面の分類

(1994年9月14日受付)