

(18) 角状構造物に作用する空気力に関する乱流効果

京都大学 工学部

白石成人

京都大学 工学部

松本 勝

大阪府立工業高等専門学校 ○ 岡南博夫

1. まえがき

長大構造物に及ぼす自然強風の作用は、構造物を設計する際に考慮すべき重要な要素であり、風洞実験結果に基づいて耐風性の検討が行われている。この場合、橋梁構造物を対象とした風洞実験は、ある規定された一様な気流状態で行われることが一般的であるが、このことは自然風の乱流構造に不明な点を有すること、風洞気流の乱流特性を自然風と相似させることが実験技術的に困難な問題を有している点などに起因して、現在のところ自然風の乱流特性を考慮した統一的な風洞実験手法が確立されるまでに至っていないことによるものであろう。また、従来の風洞実験的研究によれば、橋梁断面の空力挙動に及ぼす乱流効果は、断面の形状特性、振動系の振動特性、および気流の乱流特性などによって異なることが知られており、空力不安定振動現象の多くは、気流の乱れによって安定化される傾向にあることも一つの要因と考えられる。しかしながら、静止時のある辺長比を有する矩形断面の抗力は、一様流中における値より乱流中における値が大きくなり、さらにこの種の断面は、動的問題としてのギャロッピング振動現象において一様流中における現象より乱流中における現象が構造物にとって危険な状態を与える場合が存在するなど、構造物の空力特性に及ぼす乱流効果は耐風設計を行う上で多くの問題を残していると云えよう。

自然風の乱れを考慮した耐風設計が行われている空力現象の一つとして、風の乱れに起因する不規則振動(バフエッティング)が挙げられるが、この現象に関してはA. G. Davenport⁽¹⁾の研究に基づいた統計的手法による最大応答期待値の推定が行われている。この方法は、設計風速以下の比較的低風速領域におけるガスト応答を線形システム論に従った解析を行うものであり、構造物に作用する空気力としては、物体の運動に起因して発生する自励空気力および変動風速成分に起因する強制空気力、あるいは平均空気力(定常空気力)などが考えられ、これらの空気力は風洞実験的に求められている。ここでも、乱流中における空気力を考えていることより判断すれば、より合理的で信頼性の高い耐風設計を行うためには、さらに各種空気力に及ぼす乱流効果を明らかにすることが望まれる。ガスト応答問題においては、定常空気力は一様流中における結果が一般に採用されているようであるが、前述のように断面形状によっては、乱流中と一様流中とでは結果が大きく異なる場合がある。そこで、本研究では、乱れの影響を敏感に受けることが知られている矩形断面を対象として、定常空気力に及ぼす乱流効果に関する実験的な考察を行うものである。まず、正方形断面に作用する定常空気力(横力)が乱流特性によって異なった特性を示すことを従来報告されている実験結果⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾によって示し、若干の考察を加える。さらに、辺長比の異なる矩形断面に作用する定常空気力などを周期的な主流方向変動気流中において測定し、定常空気力の主流方向変動気流に関する周波数特性を求め乱流効果に関する若干の考察を行う。なお、ここでの定常空気力の周波数特性とは、システム論的な入出力間の伝達特性を表すものではなく、時間平均的な空気力の気流変動効果としての周波数変化特性を表す。

2. 正方形断面の静的空気力(横力)係数と乱流特性

準定常空気力理論に基づいたギャロッピング振動の解析を行う際に、静的空気力(横力)係数 C_F は基本的なデータとして利用され、ギャロッピングに及ぼす乱流効果と関連して C_F に及ぼす乱れの効果に関する実験的な研究成果が報告されている。また、矩形断面は、構造物を構成する基本形状であると共に、渦励振動、ギャロッピング振動など空力的振動が容易に発生することにも起因して、研究対象断面として広く用いられ、最近では、断面側面圧、背圧および周辺気流の流速などを詳細に計測し、振動発生メカニズムの解明、乱流現象との関連性などを考察した基礎的研究成果が多く報告されている。本章では、正方形断面の静的空気力係数 C_F に及ぼす乱流効果を調べた従来の研究結果をいくつか示し、乱流特性によって乱れの効果が変わることを示すものである。同時に乱流効果を評価する一つの試みとして、気流に含まれる乱れは気流中に存在する物体によって変化せず、かつ、ゆっくり変動するものと仮定した準定常的な考察を加えるものとする。その方法は文献(5)(6)(7)に示されており、ここではその詳細については省略するか、簡単に述べれば、次のとおりである。すなわち、乱流中においてもスパン方向のストリップ部の空気力は、一様流中における2次元実験で求められた静的空気力係数が利用できるものと仮定し、乱流効果としては、断面領域で空間的に平均された鉛直方向流速変動に起因した相対迎角の時間変動の形で表されるものであり、一様流中における C_F の迎角に関する非線形性、および空間平均された鉛直方向流速変動の大きさに応じてその効果が表れる。

Fig.1~Fig.3におけるプロットされた実験結果は、乱流特性の異なる気流中において測定された静止した正方形断面の静的空気力係数 C_F と迎角との関係を示す。各図において、白丸印は一様流中の結果であり、実線は実験結果を多項式で近似したものである。なおFig.1とFig.3は区分的に最小2乗法で近似したもので、Fig.2は1つの近似関数で表した。Fig.1は、模型上流側に設置された可変翼によって発生させた2次元的な変動気流中における

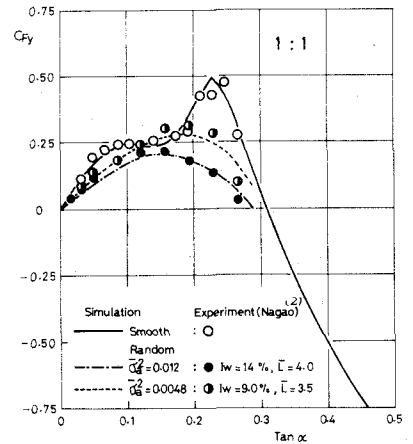


Fig.1 Lateral force coefficient of 2-dimensional square section in vertical fluctuating flow and smooth flow

Experiments Kwok-Melbourne (3)
 ○ Uniform smooth flow
 (---) Polynomial approximation 0-0.231, 0.231-0.369, 0.369-0.4
 ● Turbulent boundary layer flow 7%
 (---) Simulation $\alpha_0=0.23$ $K=0.015$ $\nu=0.667$ $\sigma^2=0.00562$
 ● Rod generated turbulent flow 9%

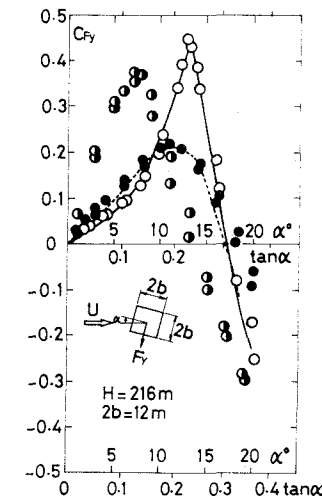


Fig.3 Lateral force coefficient of slender square tower in three types of flow

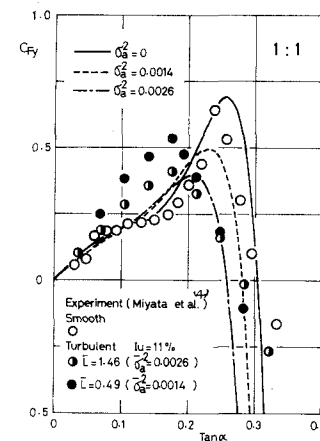


Fig.2 Lateral force coefficient of 2-dimensional square section in grid generated turbulent flow and smooth flow

部分模型の C_F であり、乱れの強さの相違による影響が認められる。破線および一点鎖線で表された結果は、前述の準定常的方法によって求めたものであり、実線で表された一様流中の結果と実験時の乱流特性と与えて時系列表示した変動流速より求めたシミュレーション結果である。実験結果とシミュレーション結果とはかなり一致しており、このような気流状態に対しては乱流効果を準定常的に評価されることが知られる。Fig.2は格子乱流中における部分模型の C_F であり、乱れのスケールの相違による影響が認められる。この図より無次元乱れのスケールが小さい場合には、準定常的に乱流効果を評価する際に問題点を有することが推測される。この点に関しては、Fig.3の結果からも同様なことが知られる。Fig.3は、風洞床面に直立する正方形断面柱の C_F を表すものであり、黒丸印でプロットされた実験結果は、境界層乱流における C_F の迎角変化特性を示す。この実験時の塔頂における主流方向乱れの強さは7%で、無次元乱れのスケールは9であり、suburban領域を想定した乱流境界層となっている。計算方法の詳細は省略するが、高度方向に変化する乱流特性を有する変動流速と、一様流中の C_F の迎角変化特性より求めたシミュレーション結果を破線で示す。実験結果とシミュレーション結果とは、三次元効果、および粗度状態を表すパラメータの問題などを有するものの良く一致していると思われる。一方、半黒丸印で示される実験結果は、乱れの強さが9%、無次元乱れのスケールが2.53であり、無次元乱れのスケールが極めて小さい乱流となっている。この実験結果は乱流境界層における結果と大きく異なるが、平均風速および乱流特性の高度方向の分布特性に起因した剥離渦の発生状態、乱れのスケールの相違などに関連するものである。前述のことより、静的空気力係数 C_F に及ぼす乱れの効果は、乱れの強さと共に断面幅が無次元化した乱れのスケールによる影響が認められ、無次元乱れのスケールが大きい場合には、乱流効果を準定常的に評価することがある程度可能となる。一方、無次元乱れのスケールが小さい場合には、準定常的な乱流効果は小さく、剥離渦の問題、主流と死木領域の流体との連行作用、気流の再付着、接近流の乱れの変形など多くの問題が乱流効果の要因として考えられる。

3. 主流方向周期流中における平均空気力

前章では、静止した正方形断面の静的空気力係数 C_F の乱流効果に対して従来の研究結果に基づいた若干の考察を加えたが、主として鉛直方向変動気流成分の効果に関するものであった。本章では、気流を主流方向に周期的に変動させ、辺長比の異なる数種類の矩形断面の平均空気力も風洞実験的に求め、主流方向変動気流に関する平均空気力の周波数変化特性から乱流効果を考察しようとするものである。

使用した風洞は、吸込み式小型風洞、測定断面(20m×20m)であり、変動気流は風洞吸込み口に設置した回転羽根形式のシャッターによって発生させた。なお、シャッターの開閉周期が短くなるに従って主流方向周期変動流の変動の強さ($I_u = \text{rms値} / \text{平均風速}$ 、 $I_u = 5 \sim 7\%$ 、 $I_u = 3 \sim 5\%$)は若干小さくなる傾向にある。なお、実験はReynolds数が5000～11000の範囲で行った。

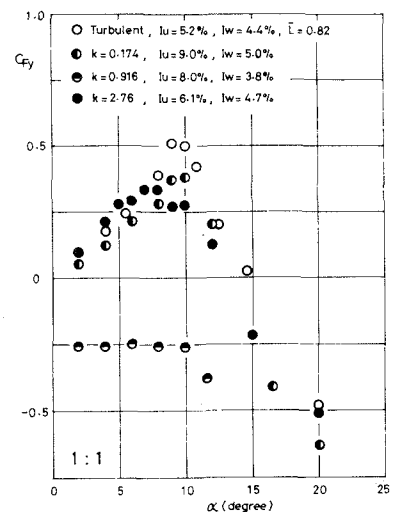


Fig. 4 Effect of periodical longitudinally fluctuating flow on mean lateral force coefficient of square section

Fig.4は、正方形断面に対する C_F の迎角変化特性における主流方向同期流の周投数効果をj示すものである。同図における n は換算振動数であり、主流方向同期流の振動数 f 、平均流速 U 、断面半幅 b をjとしたとき $2\pi b f/U$ で表される。図から知られるように、 $n=2$ のj結果は他の結果と大きく異なるが、この場合の気流状態はKarman渦発生振動数の2倍の振動数で主流方向に変動しにあり、主流に含まれる周期的変動に起因した断面隅角部から剥離する周期的変動気流と断面隅角Karman渦との同期、あるいは連成作用によって断面周辺の流速分布が大きく、変化することによるものと考えられる。また、前章で示した C_F に及ぼす乱流効果として、無次元乱れりスアール I_u のj小さい乱流においては C_F のピーク値を与える迎角が小さくなり、迎角がせじにおける勾配が大きくなり、なる傾向が認められたが、周投数の高い変動気流中における結果が同様の傾向を示すようである。このことは、断間平均された C_F に関する乱れりスアールのj小さい乱流の効果は、乱れり周投数成分別効果の面から判断すれば、高周投数領域の効果が大きいことを示唆しているものと思われる。ただし、本実験においては、閉塞比が正方形断面に対しては15%、他の矩形断面では10%とかなり大きくなるが、全体的実験結果は補正を行っておらず現象的には強調されて表れる可能性を有する。また、周投数せじの気流状態が風洞性能上一様流となっておらず、ある程度乱れたものであること、および同期流の変動の強さに関する考察が十分行われていないなど、実験精度上の問題と共に今後の課題であろう。Fig.5は、辺長比 B/D の矩形断面に対する迎角 α および 8° における C_F の主流方向同期流の周投数に関する変化特性を示すものであるが、先の正方形断面における結果と同様に定常空気に及ぼす剥離渦の効果が推測される。Fig.6は、辺長比 B/D の矩形断面に対する迎角 $15^\circ, 30^\circ$ における C_F の主流方向同期流の周投数に関する

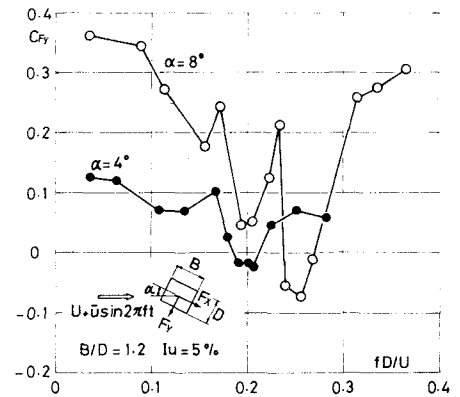


Fig.5 Variation of mean lateral force coefficient of rectangular prism $B/D=1.2$ with fD/U

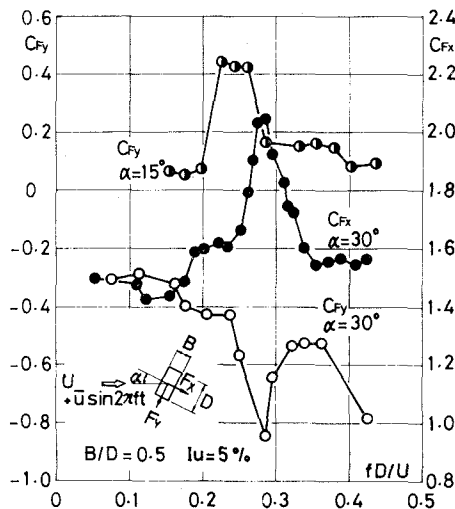


Fig.6 Variation of mean lateral (and normal) force coefficients of rectangular prism $B/D=0.5$ with fD/U

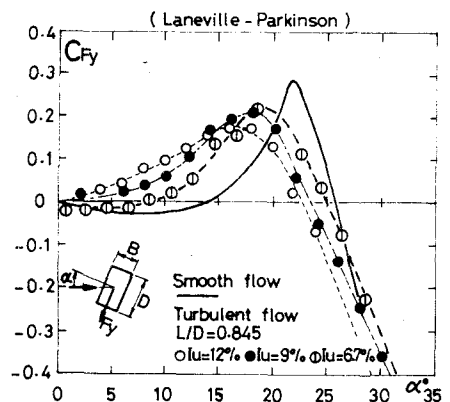


Fig.7 Effect of turbulence intensity on lateral force coefficient of rectangular prism $B/D=0.5$

変化特性を示す。また同図には、断面の側面方向の空気力を動圧で無次元化した空気力係数 C_{Fx} の迎角 30° における結果を示した。 C_{Fx} は、迎角がゼロの場合は、主流方向をとる抗力係数と等しい。この図より、各係数はKarman渦の発生振動数の2倍の周波数を有する主流方向周期流中において急変することが知られ、Karman渦と周期流との同期領域における C_{Fy} が 15° においては正側に急変するのに対し、 30° では負側に急変する傾向が認められる。ここで得られた平均空気力における主流方向周期流の周波数に関する周波数特性から、迎角 15° と 30° における C_{Fy} に及ぼす乱流効果に対する定性的な傾向が推定される。Fig.7は辺長比 0.5 の矩形断面に対する C_{Fy} に及ぼす格子乱流の乱れの効果を表すものであるが、迎角 15° においては乱れの効果として C_{Fy} は大きくなり、 30° では乱れが増大するに従ってその値が小さくなる傾向が認められる。このことは、Fig.6から推測されることに一致するものであり、乱流効果としてKarman渦の寄与を示すものである。

次に、主流方向に作用する矩形断面の抗力に対して、主流方向周期流の周波数および断面辺長比の影響に関して述べる。主流方向周期流の作用を受ける構造物の流体力に関する研究としては、最近の海洋構造物の建設に関連して研究が行われており、Keulegan-Carpenterの研究⁽⁴⁾はこの種の研究の先駆的なものとして知られている。また、自然風の乱れに起因する構造物のガスト応答問題において、主流方向に振動する物体の動的流体力を水路で測定し、変動風速と変動空気力との伝達特性として求めにDavenportの研究⁽¹⁾が認められ、流体の運動と物体の運動とを相対的問題と見做した同様の研究が行われている。なお、風洞実験装置の向上に伴い、大型風洞内に主流方向ガストを発生させる装置などが開発され、今後この種の研究成果に期待される。

Fig.8、Fig.9は主流方向周期流中における矩形断面の平均抗力係数であり、周期流の周波数変化特性を示す。Fig.8は、抗力係数、背圧係数がピーク値を示すとされる $B/D=0.62$ とそれ以下の矩形断面に対する結果であり、Fig.9は $B/D=0.62$ より大きな辺長比を有する矩形断面の結果を示す。これらの図より $B/D=0.62$ より小さい辺長比の断面では、周期流の振動数がKarman渦発生振動数の2倍に達するまで fD/U を増大するに伴って C_{Fx} は大きくなり、 2.5 付近で急変することが知られる。

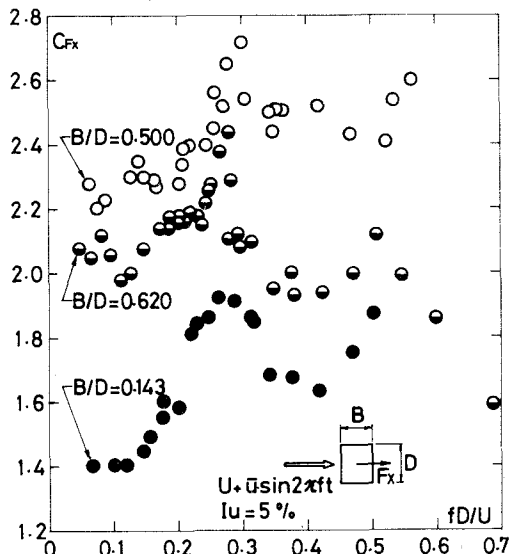


Fig.8 Variation of mean drag coefficients of rectangular prisms ($B/D=0.143, 0.500, 0.620$) with fD/U

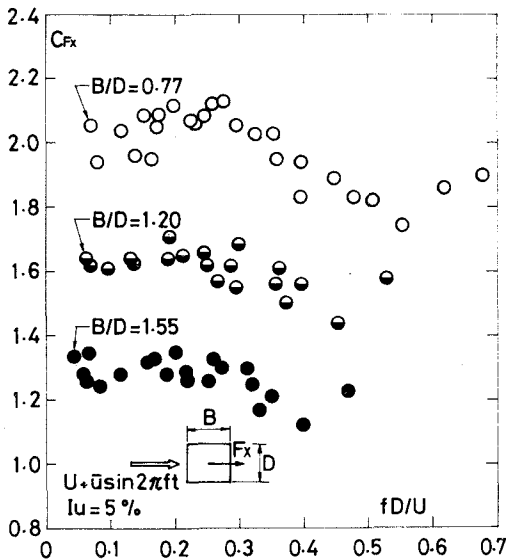


Fig.9 Variation of mean drag coefficients of rectangular prisms ($B/D=0.77, 1.20, 1.55$) with fD/U

一方、 $\alpha/2$ より大きい辺長比の断面では、前述の傾向は顕著に表れず、辺長比が大きくなるに従ってピーク値は低下し、ピークの存在が明瞭には認められなくなる。また、 $2fs$ より高い周波数領域においても、 $B/D = \alpha/2$ 程度の辺長比を境として傾向が異なる。このような現象を考察するためには、最終的な結果として表れた空気力のみでなく、空気力発生過程としての断面周辺流速分布、圧力分布などのデータが与えられることによって、より詳細な考察を加えることができる。本研究においては、今後流れの可視化などの測定を行うことにより現象の解明を試みる予定であるが、現時点ではこれらのデータは入手されていない。そこで、溝田・岡島⁽⁹⁾による一様流中における矩形断面の周辺流速分布の測定結果に従って1つの推定を行う。辺長比 $\alpha/2$ を境として辺長比 $\alpha/4$ の断面と辺長比 1.0 およびそれより大きな断面とで平均流速分布のパターンの相違することが報告されており、辺長比 $\alpha/4$ の断面では側面近くの流線は全て背後と連続した1個の循環流を構成しているのに対し、辺長比 1.0 より大きい断面では側面近くと背面後方とに2種類の循環流が構成されることが示されている。このことより、辺長比が $\alpha/2$ より小さい断面では、背面後方の大きな循環流と主流に含まれる周期変動成分との連成作用が強く表れるが、辺長比が $\alpha/2$ より大きい断面では、側面近くおよび背面後方に構成される2種類の循環流の存在によって、主流に含まれる周期変動成分とそれとの相互作用として表れ同期現象が強くは認められなかったものと思われる。また周波数の高い成分は、辺長比が $\alpha/2$ より大きい断面の側面上の循環流を小さくする作用として働いているものと推測される。しかしながら詳細に関しては、表面圧力分布の測定、流れの可視化などの実験結果が待たれる。Fig.10は、Fig.8、Fig.9の結果より求めたもので $D/U = 0.05$ における C_F の値で無次元化した平均抗力係数の概略の特性を示すものである。破線で示した曲線は、Davenport⁽¹⁾が主流方向に振動する平板に作用する動的抗力係数を水路中で実験的に求めたものである。この図より、 B/D が小さくなり形状が平板状になるに従って破線で示す結果に接近する傾向が認められる。ただし、破線の結果には、Karman渦の発生振動数の2倍の振動数で認められるピークが表れていない。Fig.11に示す半黒丸印は、Karman渦の発生振動数の2倍の振動数で主流方向に変動する周期流中の平均抗力係数を表すが、Fig.12に示す格子乱流における乱れの効果と同様の傾向が認められる。このことより、判断すれば、辺長比が $\alpha/2$ より小さい断面の抗力係数が、乱流特性

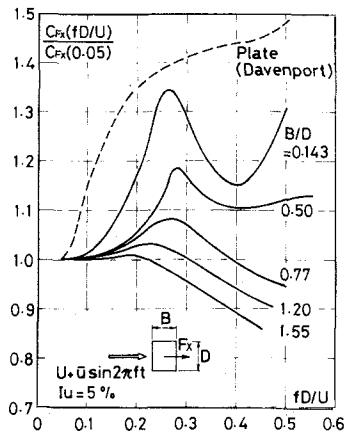


Fig.10 Effects of periodic longitudinal fluctuating flow on mean drag coefficient

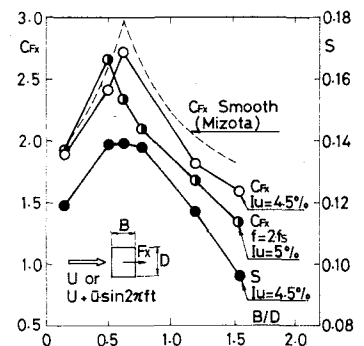


Fig.11 Mean drag coefficients and Strouhal number of rectangular prism versus B/D

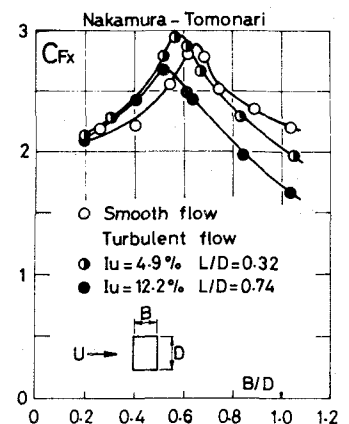


Fig.12 Mean drag coefficients of rectangular prism in smooth flow and turbulent flow

によつては一様流中よりも乱流中における値が大くなる結果を示すことは、Karman渦と主流に含まれる主流方向同期流の変動成分との連成作用に起因する効果が大いことを示すものと思われる。

Fig.13は後流軸に沿つた流速変動の二乗平均値の分布を示すものであり、熱線流速計（I形プローブ使用）およびRMS計によつて計測したものである。この図より、分布曲線のピークを示す位置が同期流の振動数によつて変化することが認められる。振動数がKarman渦の発生振動数の2倍の同期流に対してその位置は最小となり、それより振動数が増大しても減小してもピークを与える位置は大きくなる。このことは、平均抗力に及ぼす同期流の周波数特性が示す傾向と関連したものである。この場合のピークを示す位置は、Bloor-Gerrard

によつて定義された剥離渦の形成領域とある程度関連したものであり、剥離渦形成領域が背面側に接近するに従つて抗力係数が大まくなることを示す。なお文献(9)では、伴流よどみ点が背面側に接近するに従つて抗力係数および背圧係数が大まくなることが報告されているが、伴流よどみ点と剥離渦形成領域との間の相関性を示すものであろう。

4. わすび

矩形断面を対象として、従来の研究結果および主流方向に周期的に変動する気流中における時間平均した空気力に対する風洞実験結果より、平均空気力に及ぼす乱流効果を考察した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。(1)正方形断面の静的空気力（横力）係数 C_F に及ぼす乱れの効果は、乱れの強さと共に無次元乱れのスケールによる影響が認められ、無次元乱れのスケールの大きい乱流中では、気流変動を準定常的に考え、 C_F の迎角に関する非線形性に起因した乱流効果を評価することが、ある程度可能となる。(2)辺長比が0.62より小さい矩形断面の平均空気力は、背面後方に構成される強い循環流あるいはKarman渦と主流に含まれる主流方向同期流との連成効果が大まく表れ、同期状態では、抗力係数は一様流中における値よりかなり大きくなる。一方、辺長比が0.62より大きい矩形断面では、背面後方の循環流あるいはKarman渦のみでなく、側面付近に構成される循環流に対する相互作用として主流に含まれる同期流成分の影響が表れる。また、 C_F に対しては、Karman渦と主流に含まれる同期流との同期現象による効果が極めて顕著に表れる。(3)同期状態では、剥離渦形成領域は背面側に接近する。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費の援助を受けて行われた。

参考文献

- (1) Davenport, A.G. Ph.D. Dissertation, Univ. of Bristol, 1961 (2) 白石, 松本, 岡南, 土木学会関西支部年譜, 1982
- (2) 長尾, 徳島大学大学院修士論文, 1980 (3) 岡南, 大阪府立工業高等学校研究紀要, 第16巻, 1982
- (3) Kuroki, K.C.S. & Helbourne, W.H., ASCE, EM2, April, 1980 (4) Keulegan, G.H. & Carpenter, L.H., J. Res. NBS. Vol.60, 1958
- (4) 宮田・宮崎・山田, 第26回構造工学シンポジウム論文集, 1980 (5) 溝田・岡島, 土木学会論文報告集, 第312号, 1981
- (5) 岡南・白石・松本, 土木学会全国大会年譜, I-351, 1981 (6) Bloor, M.S. & Gerrard, J.H. Proc. Roy. Soc. A294, 1966

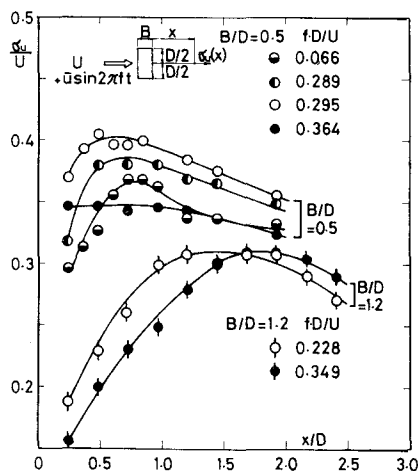


Fig. 13 Root-mean-square velocity fluctuation along the wake stagnation line

Turbulent Effects on Aerostatic Force of Bluff Structures

by Naruhito SHIRAIISHI*, Masaru MATHUMOTO** and Hiroo OKANAN***

It has been observed by many investigators, that turbulence has a profound effect upon the aero-dynamic and -static characteristics of rectangular prism. The work described in this paper forms a part of study of the time averaged aerodynamic forces on rectangular prisms with various side ratios(breadth to depth ratios) in turbulent flow and in sinusoidal longitudinally Fluctuating flow.

A quasi-steady approach for turbulent effects is discussed from the considerations of some studies reported formerly on lateral force(lift force) coefficients of square prism in some kinds of turbulent flows, and then it is shown that these approaches can be usefull to evaluate the turbulent effects on lateral force coefficient of square section in the case of considerably larger scale of turbulence than the side length of the section.

Furthermore, the steady aerodynamic force component of rectangular prisms with side ratio of from 0.143 to 1.55 has been investigated in periodical longitudinally fluctuating flow generated by suitable techniques in the wind tunnel. Experimental results show the important roles of the Karman vortex-shedding frequency characteristics to the turbulence effects of aerostatic forces on bluff sections through a series of tests with various periodical frequencies of flow.

* Prof., Dept. of Civil Eng., Kyoto University

** Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Kyoto University

*** Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Osaka Prefecture Technical College