

充腹構造断面の剥離流特性と空力特性について

白石 成人・松本 勝・白土 博通・岸 明信

ON SEPARATED FLOW CHARACTERISTICS AROUND BLUFF BODY AND ITS AERODYNAMIC RESPONSE

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO,*
Hiromichi SHIRATO and Akinobu KISHI

Synopsis

This study is concerned with the bluff body aerodynamics, i.e. the vortex-induced oscillation and galloping.

Aerodynamic effects of separated vortices generated by body movement to torsional vortex-induced oscillation has been investigated by changing rotational axis of two dimensional rectangular cylinder. Furthermore, the Karman vortex effect to these self-movement vortex-induced oscillation has been experimentally clarified by arrangement of splitter plate in a wake of cylinder.

The galloping investigation for simplified box girder section and the fundamental consideration of its aerodynamically stabilizing mechanism have been done by pressure measurement, static force measurement and flow visualization.

1. ま え が き

本州四国連絡橋に代表されるように、橋梁構造物は大規模化・長径間化が促進され、その結果、一般的には構造減衰・振動数が極めて低いものとなっている。こうした構造物には種々の空力不安定現象が発現する可能性があり、その対策が橋梁構造物を設計・施工する上で重要な課題となっている。たとえば、最近盛んに建設されている斜張橋では桁部の渦励振問題の他に主塔の高層化が進み、それに伴って架設時ならびに完成系のギャロッピングに対する制振対策が問題となる場合も生じると共に、一方では明石海峡大橋等の長径間橋梁の桁部フラッタ現象に対する安定性の確保が技術的問題としてクローズアップされている。また、支間長が 200 m 程度の比較的中規模の橋梁構造物であっても、たとえば本州四国連絡橋の A ルートに位置する門崎高架橋のオリジナル桁断面では風速 20 m/sec. 前後で渦励振やギャロッピングの発現が実験的に明からにされたことから、フラップ・デフレクタ等の制振対策が現実には講じられたことは周知のことである。ところで、これらの構造物の制振対策・耐風安定化対策をより合理的かつ効率的に施すためには、各種空力現象の発生機構を解明することが最も有効であると考えられる。本研究では、流体力学的に bluff な構造断面の空力特性に検討を加えることを目的として、特に渦励振とギャロッピングについて考察を加える。

渦励振は物体の断面形状、特に断面辺長比が変化するとその応答特性にも変化が生ずる。それぞれの断面辺長比で励振メカニズムが異なりそのタイプを大別すると、物体後流に形成されるカルマン渦の放出周波数が物体の固有振動数と同期することにより生ずるもの、断面振動に伴って前縁から生じる前縁剥離渦と後縁近傍で生じる二次的な渦（後縁二次渦）が一体化して生ずるとされるものである¹⁾。本研究においては、後

者のタイプの渦励振が生ずる断面辺長比の矩形断面を用いて物体振動の影響に対する検討を加えるために、振れ中心位置を断面中心から偏心させた場合の振れ1自由度系渦励振特性について応答及び非定常圧力特性より考察を加える。

ギャロッピングは他のフラッタ現象と異なり準定常理論を用いたある程度理論的な取り扱いが可能とされている。しかし、断面形状のわずかな変化でその特性が著しく変化すること、準定常空気力を用いてギャロッピング振動中の空気力を推定しているため無次元風速が小さいと非定常特性が次第に強く現われて準定常理論が適用できなくなることなど、ギャロッピングは準定常的な取り扱いが半ば可能であるという典型的な特性を有するものの、その発生機構は理論的に十分説明されているといえない。本研究においては、橋梁箱桁をある程度単純化した基本的な箱桁断面のギャロッピング特性について、応答・静的空気力特性及び静的圧力分布特性、さらに流れの可視化より断面周りの流れの特性に考察を加えると共に各種防振装置設置による空力特性変化・流れのパターン変化を調べることに、それらの空力安定化効果について考察を加える。

2. 渦励振特性にもたらす物体振動の影響

2.1 風洞実験

本章で対象とする模型の断面を Fig. 1 に示す。なお、この断面は前縁剝離型渦励振特性を示す²⁾。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 1.0m, 幅 0.7m, 長さ 5m)であり、模型支持ターンテーブル・模型支持アーム・バネなどによる気流の攪乱を防止するために導風壁を設置している。風速は 0~15 m/sec, の範囲で連続的に制御することができる。

応答特性測定実験ならびに圧力測定実験は、1:4 矩型断面模型を風洞内に水平に設置し、振れ1自由度ならびに曲げ1自由度支持を行った。前縁剝離型渦励振では断面振動に伴って発生する前縁剝離渦と後縁二次渦に特徴がある。Fig. 2 に示すように、断面の前縁と後縁の変位が同相であるときには後縁二次渦は下面

後縁近傍の後流に生じ、逆相であるときには上面後縁近傍の後流に生じる。そのため、前縁剝離型渦励振では双方の渦が互いに強く関連し合っているものと判断される。断面の振れ中心位置を変化させることにより、前縁剝離渦・後縁二次渦の特性に変化を与えるために、振れ1自由度支持に際して Fig. 1 に示すように振れ中心位置を Case No. 1~No. 7 まで変化させているが、中立位置での迎角が 0° となるようにカウンター

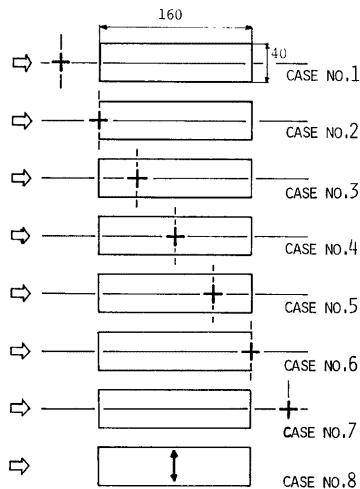


Fig. 1 Cross section of models

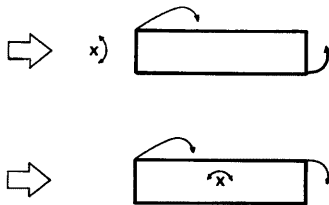


Fig. 2 The characteristics of movement-generated vortices

Table 1 Test conditions of models

CASE No	f (Hz)	I (kg·sec ²)	δ 0.1rad	δ 0.075rad	δ 0.05rad	δ 0.025rad
No. 1	5.23316	3.638×10^{-3}	0.02465	0.01759	0.01304	0.00546
No. 2	6.48148	2.349×10^{-3}	0.03294	0.02021	0.01277	0.01001
No. 3	8.24427	1.447×10^{-3}	0.01831	0.01508	0.01168	0.00764
No. 4	9.48485	2.538×10^{-3}	0.03217	0.01571	0.00877	0.00506
No. 5	8.38462	1.421×10^{-3}	0.02274	0.01539	0.01102	0.00485
No. 6	6.60377	2.277×10^{-3}	0.02903	0.01784	0.01102	0.00553
No. 7	5.32874	3.636×10^{-3}	0.01983	0.01484	0.01375	0.01002
CASE No	f (Hz)	M (kg·sec ² /m)	δ (20mm)	δ (15mm)	δ (10mm)	δ (5mm)
No. 8	6.51934	0.1972	0.01883	0.01493	0.01324	0.01218

ウェイトを付加している。模型の物理諸元を **Table 1** に示す。模型は 8 本のコイルスプリングにより剛性を与えられておりスプリング端に取り付けられたコの字型エレメントに貼り付けられた歪ゲージの抵抗値の変化としてホイストブリッジ（新興通信 K.K. 製）を通じて動歪計（新興通信 K.K. 製 6008 F 型）により検出し、データレコーダー（TEAC K.K. 製 MR-10 型）に収録すると共に、ローパスフィルター（NF 回路設計ブロック K.K. 製 E 3201 型）を通した後リニアコーダ（渡辺測器製作所 K.K. 製 MARK VII 型）に記録した。また、風洞内平均風速は NPL 型ピトー管を風洞内に設置し総圧と静圧の差圧をデジタルマノメーター（林製作所 DP 20-A 型）によって測定した。断面周りの圧力測定は、模型表面に設けられた圧力孔よりアルミニウム製の導圧管により模型端部へ導かれ、さらにビニールチューブを通じて圧力変換器（豊田工機 K.K. 製 DD 101 K 型）により風洞内静圧との差圧を検出し、D.C. アンプ（豊田工機 K.K. 製 AA 2330 型）を用いて電氣的に増幅しデータレコーダ（前出）にアナログ量として記録した。圧力変動成分は、ローパスフィルター（前出）を介してリニアコーダ（前出）により記録した。また、圧力平均成分は、ローパスフィルターを介してマルチコーダ（渡辺測器製作所 K.K. 製 MC 6612 型）に記録した。

2.2 風洞実験結果

2.2.1, 振れ軸の影響 (1) CASE No. 1, CASE No. 7 これらの CASE は共に前縁・後縁が同相で振動する断面である。前縁と後縁の振幅比が CASE 1 では 1 : 5, CASE 7 では 5 : 1 となっており、前縁剝離渦と後縁二次渦の渦励振に対する影響の度合いが大きく異なることが予想される。実験結果を **Fig. 3** (CASE 1) と **Fig. 10** (CASE 7) に示す。両者共に無次元風速 $V_r \approx 7$ 及び $V_r \approx 8$ の 2 つの風速域において応答ピークが確認される。第 1 の渦励振発現風速は、曲げ 1 自由度の前縁剝離型渦励振の発現風速として知られる $V_{cr} = 1.67 B/D$ に相当する。変動圧力位相特性も後縁近傍の圧力の位相遅れが 360° となり、前縁剝離型曲げ渦励振の特性を示している。また、両者の応答振幅を比較するとほぼ同一の値 (0.01 rad.) を示しており、前縁剝離型渦励振の励振メカニズムにおける前縁剝離渦と後縁二次渦の影響の度合いはほぼ同一であると考えられる。第 2 の渦励振の応答ピークは、ストローハル数の逆数で定義される共振風速 $V_r = 1/S_r \approx 8$ に認められカルマン渦が励振力に対して支配的であると考えられる。

(2) CASE No. 2, CASE No. 3 これらは前縁と後縁の振幅位相が逆相である。また、他の CASE で認められなかった振れフラッタが発現した。実験結果を **Fig. 4** (CASE 2), **Fig. 5** (CASE 3) に示す。CASE 2 では、共振風速で応答ピークを迎えた直後に振れフラッタへ移行している。位相特性は、CASE 1 とほぼ同一の傾向があるが図中 (I) で示すように位相差の大きなばらつきが認められる。これは、共振風速が振れフラッタ発現の途中にあり、かなり非定常な渦放出が行われていると判断される。CASE 3 では、渦励振ピークはなく振れフラッタのみとなっている。他の CASE で振れフラッタが発現せずこの CASE のみで発現

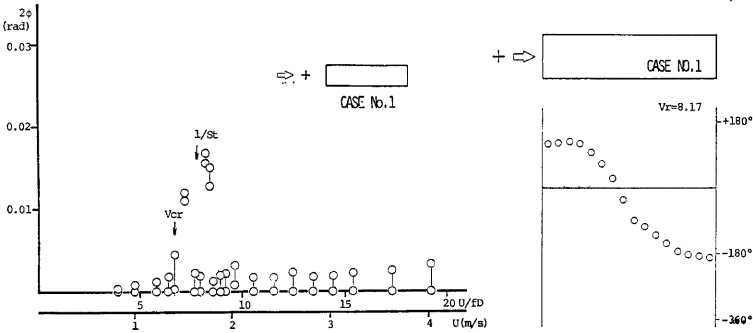


Fig. 3 Response characteristics and phase difference (CASE No. 1)

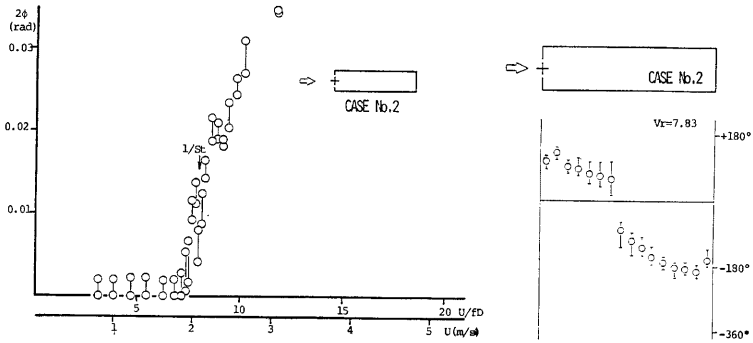


Fig. 4 Response characteristics and phase difference (CASE No. 2)

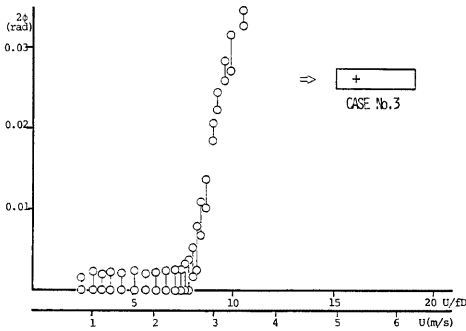


Fig. 5 Response characteristics (CASE No. 3)

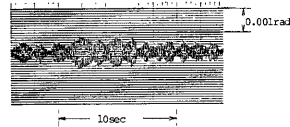


Fig. 7 Responsive record at a corresponding to Fig. 6

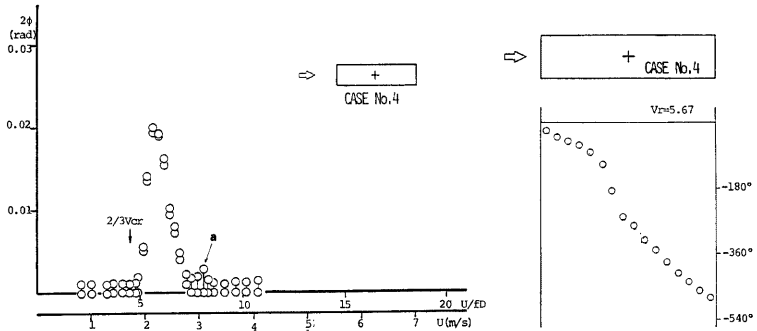


Fig. 6 Response characteristics and phase difference (CASE No. 4)

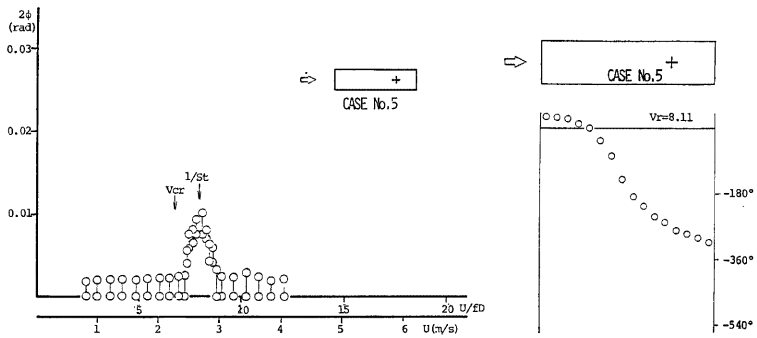


Fig. 8 Response characteristics and phase difference (CASE No. 5)

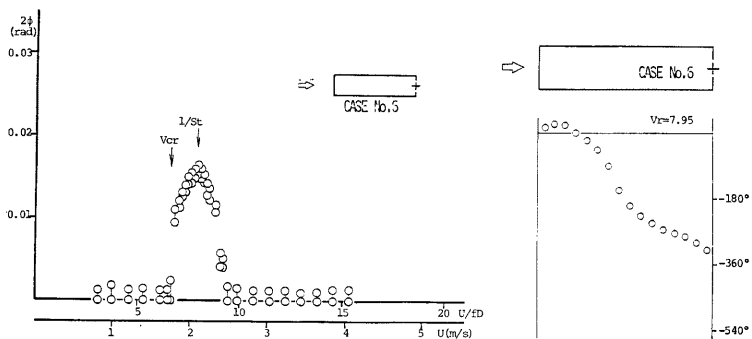


Fig. 9 Response characteristics and phase difference (CASE No. 6)

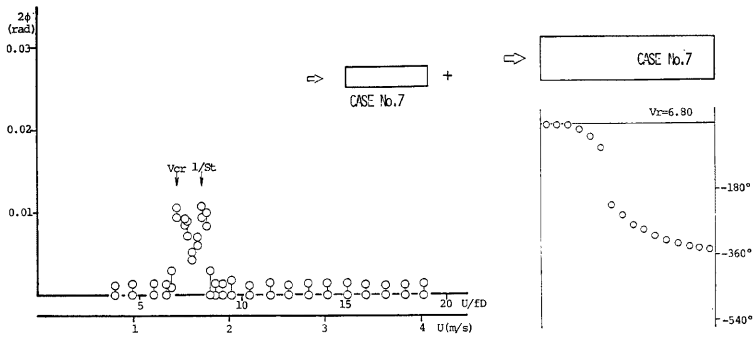


Fig. 10 Response characteristics and phase difference (CASE No. 7)

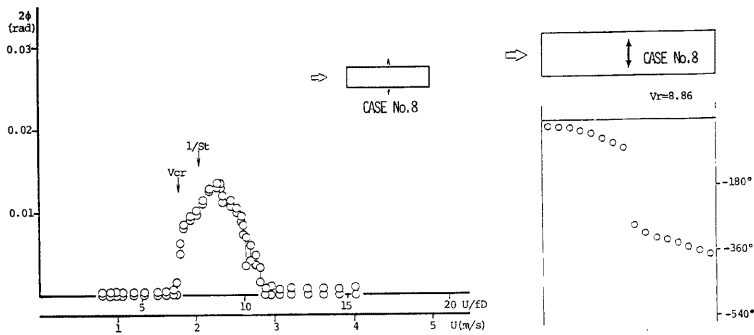


Fig. 11 Response characteristics and phase difference (CASE No. 8)

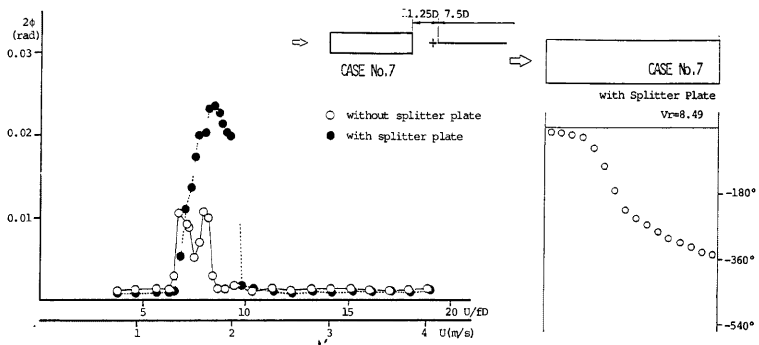


Fig. 12 Response characteristics and phase difference (CASE No. 7 with splitter plate)

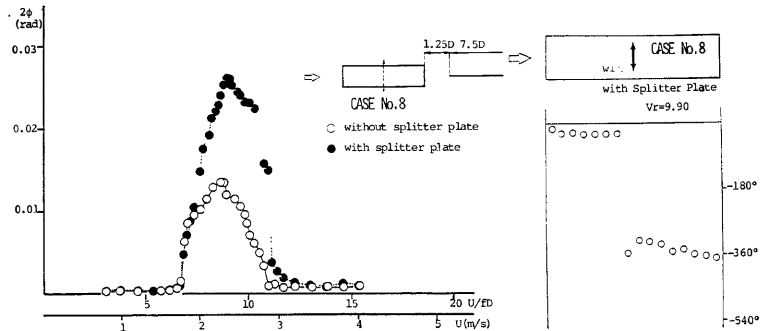


Fig. 13 Response characteristics and phase difference (CASE No. 8 with splitter plate)

しているのは、白石・松本等²⁾の1:2の矩形断面の振れフラッタ時のエネルギーの供給は前縁側よりも後縁側でなされるという報告に対応するものと思われる。

(3) CASE No. 4 これは、振れ中心が断面中心に一致する場合である。実験結果を Fig. 6 に示す。渦励振の発現風速は $V_r=5$ で前縁剝離型振れ渦励振の発現風速の特性である $V_{\phi}=2/3 V_{cr}$ と一致する。位相特性も後縁近傍で約 540° の位相遅れとなり、剝離渦が振動一周半を要して前縁から後縁に至る特性をよく表わしている。また、共振風速付近でわずかな応答ピークがみられる。Fig. 7 は、このピーク時の応答波形であるが、定常振幅には至らないもののビート状の応答波形が定期的に現われ、カルマン渦の影響がうかがわれる。

(4) CASE No. 5, CASE No. 6 実験結果を Fig. 8 (CASE 5), Fig. 9 (CASE 6) に示す。双方 $V_r=7$ 前後で渦励振が発現し、 $V_r=8$ において応答のピークを迎えている。発現風速は V_{cr} に相当し、ピーク風速は共振風速に一致している。また、ピーク時の位相特性は前縁剝離型曲げ渦励振の特性を示している。

(5) CASE No. 8 これは、曲げ1自由度支持した場合である。実験結果を Fig. 11 に示す。典型的な前縁剝離型曲げ渦励振特性を示しているが、応答曲線は鋭いピークを有さずかなりの凹凸があり、カルマン渦との干渉が予想される。1:4 矩形断面では共振風速は $V_r=8$ で、前縁剝離型渦励振のピークを迎えるといわれる $V_{peak}=1.2 V_{cr}=8$ と一致するため、この風速域でかなり干渉し合っているものと思われる。

2.2.2 スプリッタープレートの効果 振れ中心位置を偏心させた場合の渦励振特性においてカルマン渦の影響がかなりの CASE でうかがえる。そこで、カルマン渦の影響を除去するために物体後流にスプリッタープレートを挿入した。スプリッタープレートは、後縁二次渦を破壊しないように物体直後には設置せずに断面後端より桁高 D の1.25倍の距離だけ離して設置した。実験した CASE は、CASE 7, CASE 8 である。

(1) CASE No. 7 (スプリッタープレート付) 実験結果を Fig. 12 に示す。スプリッタープレートが無い場合には渦励振の応答ピークを2つ有していたが、挿入後は第2の応答ピークが消失している。渦励振発現風速はプレート無しの場合と同一の $V_{cr}=1.67 B/D$ で、最大応答振幅は2倍以上に増加している。これは、カルマン渦が破壊されることにより物体振動に起因した変動空気力が増大したものと考えられる。すなわち、物体の振動と同期したカルマン渦は前縁剝離渦または後縁二次渦を抑制する働きをし、かつ両者が一体化した安定な渦放出を妨げていると考えられる。

(2) CASE No. 8 (スプリッタープレート付) 実験結果を Fig. 13 に示す。CASE 7 と同様にカルマン渦との干渉が弱められたため、応答振幅が約2倍に増大している。白石・松本²⁾は1:2矩形断面の曲げ渦励振を対象としてスプリッタープレートを設置しているが、設置位置 $X/D=1.0$ では応答に変化が認められな

かったと報告している。これは、1:2 矩形断面で前縁剝離渦励振の発現する風速 $V_r \approx 4 \sim 6$ と共振風速 $V_r = I/S_r = 12.5$ が離れているためにカルマン渦の影響を受けておらず、物体振動のみによって流体系が規定されていたものと判断される。

2.2.3 まとめ 振れ中心位置を偏心させることにより、渦励振特性における物体振動の影響、スプリットプレートを物体後流に挿入しカルマン渦が前縁剝離型渦励振に与える影響について調べた。その結果、前縁と後縁で剝離特性の異なる断面の応答比較から、前縁剝離型渦励振の励振メカニズムにおいて前縁剝離渦と後縁二次渦は共に重要な役割を果たすことが確認された。また、物体振動と同期したカルマン渦は前縁剝離型渦励振に強い影響を与え前縁剝離渦と後縁二次渦が一体化して安定な渦放出を行うのを抑制しており、スプリットプレートによりカルマン渦の影響を除去した結果、前縁剝離型渦励振の応答特性が強められることが確認された。

3. 箱桁断面のギャロッピング特性

3.1 ギャロッピング

ギャロッピングは、その振動形態、流体からのエネルギー授受の観点から曲げ1自由度フラッタ現象であり、振動の激しさから構造物を破壊に至らしめることもある。矩形断面におけるギャロッピング特性は比較的明らかにされつつある。矩形断面では、断面辺長比が臨界断面比 $B/D=0.62$ より、前縁で剝離したせん断層が後縁に再付着する $B/D \approx 2.8$ までギャロッピングが生じるとされている。臨界断面比において背圧係数が極小値を示すことに対し、Bearman & Trueman⁵⁾ はこの断面比付近では wake cavity の size が小さくなり渦が背面に非常に近いところで形成され、断面辺長比が増すと後縁の影響で渦形成位置が下流側へ移動するためとしている。臨界断面より生じる流れの機構の特徴的变化として中村・友成⁶⁾ は、i) 局所循環流の形成、ii) 下流端の張り出しによるせん断層の巻き込みの阻止をあげている。i)については、せん断層が物体の下流端に近づくため、Fig. 14 に示すように物体背面の wake 領域内からの流体補給が十分には行われず、その結果、側面上に局所循環流が形成される。従って i) は剝離せん断層の曲率を増大し、ii) によって曲率の低下をまねく。このようなせん断層の変化は側面上の圧力分布に変化をもたらしており、この圧力低下・圧力回復のパターンを再付着型圧力分布と呼び、ギャロッピングは再付着型圧力分布で始まり再付着により終わっている。Laneville & Yong⁷⁾ は、臨界断面を含む種々の断面辺長比の時間平均流の特性を主としてカルマン渦の位置に注目し、流れの可視化より流れのパターンを4つの段階に分類できると仮定している。Fig. 15 は $B/D < 3.0$ における流れのパターンを概略的に示したものである。流れのパターンの一般的特徴は剝離点からの渦度分布・剝離バブルの生成・後流渦の形成にあるとしている。前縁からの剝離せん断層の渦度 a の一部は周期的に生成する剝離バブルに吸収され (b) 、残りの渦度 c がせん断層に続く。周期的な流れのパターンに応じてこのせん断層に存在する渦度と流体は隣接した渦あるいは反対側の渦を成長させる。隣接した渦が成長するにつれて剝離バブルは大きくなり流体と渦度でふさがれた領域となり maximum size に至る

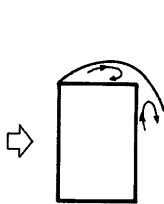


Fig. 14 Inner-circulatory flow

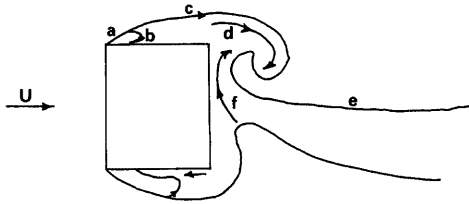


Fig. 15 Filament-line sketch for 2-D rectangular cylinders (refer to 7)

と放出する (d)。d によって渦度と流体を供給された渦はそののち放出され、剝離バブルは minimum size に縮小する。この場合、剝離バブルはその内部の渦度と流体を後流渦形成に費やすのに対し、再付着の生ずる $B/D > 3.0$ の場合には vortex patch の形成に費される。溝田等³⁾は角柱を用い、断面比や迎角を系統的に変化させて表面圧力を測定すると共に流れと流体力に関して考察を加えている。その結果、臨界断面比より $B/D = 2.8$ までにおいて迎角の増加に伴う上面の圧力回復が負の法線力に寄与するとしている。また、迎角の増加による時間平均の流れの変化を wake stagnation point $X_{w.s.}$ の空間位置の動きを調べて対応づけている。この断面において、 $X_{w.s.}$ の位置は迎角の増加と共に物体から後方へと移動し wake cavity size が大きくなり背圧が回復する。また、各々の迎角で $X_{w.s.}$ の位置がポテンシャル流れの中心線よりはずれることから物体周りの循環を定義し、この循環との関係から揚力は下向きに作用するとして流体力と流れの特性を対応づけている。一方、中村等は再付着型圧力分布の迎角による変化からギャロッピングに対しては下面の方が支配的であるとしている。このように、Negative slope の発生要因として側面上の圧力分布の際立った変化があげられる。

3.2 風洞実験

箱桁断面に生ずるギャロッピングは、断面そのものが実際の橋梁の桁断面形状として採用されており、かつ近年の橋梁の長径間化の傾向からそのギャロッピング特性及び防振対策に対する一般的な特性を見いだす必要がある。

本章における実験では、ギャロッピング発生に関する流れの機構に着目し定常な流れの特性について考察を加えるために、(1)応答特性測定実験、(2)静的空気力測定実験、(3)静的圧力測定実験を行った。

実験に使用した風洞は、(1)、(3)は京都大学工学部土木工学教室に設置された吹込み式エッフェル型風洞(測定部高さ 1.0 m、幅 2.5 m、長さ 8 m)であり、模型支持ターンテーブル・模型支持アームなどによる攪乱を防止するために測定部側面に導風壁を設置している。風速は 0~20 m/sec. の範囲で連続的に制御することができる。また、(2)は 2 章と同じ風洞を用いて実験を行った。

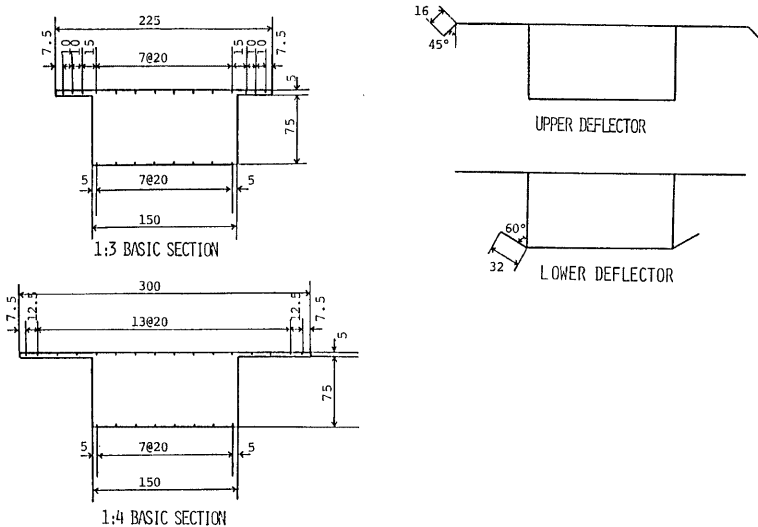


Fig. 16 Cross section of models

Table 2 Test conditions of models

	f(Hz)	m(kg・sec ² /m ²)	δ(20mm)	δ(15mm)	δ(10mm)	δ(5mm)
1:4 Basic Section	2.0720	0.3742	0.05078	0.04524	0.03830	0.03242
1:4 with Upper Deflector	2.4542	0.3906	0.05796	0.04863	0.03330	0.01971
1:4 with Lower Deflector	2.2208	0.4140	0.03924	0.03426	0.03010	0.01830
1:3 Basic Section	2.0513	0.3757	0.05896	0.05084	0.04613	0.04099
1:3 with Upper Deflector	2.0074	0.3818	0.05139	0.04550	0.03979	0.03500
1:3 with Lower Deflector	2.0000	0.4007	0.05384	0.04504	0.04422	0.04146

(1), (3)に用いた模型と物理諸元を Fig. 16 及び Table 2 に示す。また、(2)で用いた模型は(1)で用いた模型の2/3倍の縮尺となっている。

(1) 応答特性測定実験 模型は鉛直に曲げ1自由度支持され、8本のコイルスプリングにより剛性を与えられている。スプリング端に取り付けられたコの字型エレメントに貼り付けられた歪ゲージの抵抗値の変化としてホイストンブリッジ(前出)を通じ動歪計(前出)により検出し、D.C. アンプ(三栄測器 K.K. 製 6 L 51 型)を用いて電氣的に増幅し、ローパスフィルタ(前出)を通した後ペン書きレコーダ(渡辺測器製作所 K.K. 製 WTR 281 型)に記録した。平均風速は NPL 型ピトー管を用い、総圧と静圧の差圧としてデジタルマノメータ(前出)によって測定した。なお、測定はすべて一様流中で迎角5°に模型を設置し行った。

(2) 静的空気力測定実験 風洞内に模型を2台のロードセル(日章電機 K.K. 製 LMC 3501 型)により水平に支持し、ロードセルからの信号を動歪計(前出)により電氣的に検出し、ローパスフィルタ(前出)を介してマルチコーダ(前出)に記録した。平均風速は 8 m/sec. であり、空気力係数の算出は次式による。

$$C_{Fx} = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 D l} \dots \dots \dots (1)$$

$$C_{Fy} = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U^2 B l} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 F_x : 抗力, F_y : 法線力, ρ : 空気密度
 D : 桁高, B : 上面幅員, l : 模型スパン長
 U : 平均風速

なお、 F_x , F_y 及び迎角 α は、Fig. 17 に示すとおりである。また、測定は-15°~15°の範囲で行った。

(3) 静的圧力測定実験 Fig. 16 に示す模型にはスパン中央の断面周りに圧力孔が設けられており、測点に作用する圧力は模型端部の導圧管を経てプレッシャーマイク(豊田工機 K.K. 製 PD 104 K 型)により検出し、D.C. アンプ(前出)により増幅した。また、これと同様の検出装置を経たピトー管の静圧との差圧を演算器(日本科学工業 K.K. 製 MODEL 1017 型)により計算し、ローパスフィルタ(前出)を通した後フォトコーダ(YOKOGAWA ELECTRIC WORKS TYPE 2932)に記録した。測定は、迎角5°を中心に±8°の範囲で行った。静的圧力係数の算出は次式による。

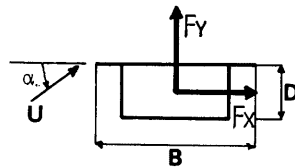


Fig. 17 Definition of aerostatic force

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、(P: 模型圧力孔の動圧, P_∞ : 風洞内静圧)

3.3 風洞実験結果

3.3.1 応答特性 Fig. 18, Fig. 19 に 1:3 箱桁断面と 1:4 箱桁断面の迎角 5° における応答比較図を示す。基本断面におけるギャロッピング発現無次元風速は 1:3 箱桁断面で $V_r \approx 18$, 1:4 箱桁断面で $V_r \approx 32$ となっている。対象とした Box 辺長比が 1:2 の箱桁断面では張り出しの長い方がギャロッピングに対して安定である。また、上部デフレクタ及び下部デフレクタをそれぞれの基本断面に付設することにより、ギャロッピングに対する著しい防振効果が認められる。1:3 箱桁断面の場合には、下部デフレクタより上部デフレクタの方が優れた防振効果を示しており、1:4 箱桁断面の場合には、上部デフレクタ、下部デフレクタ共に優れた防振効果が認められる。

3.3.2 静的空気特性 Fig. 20 と Fig. 21 に 1:3 箱桁断面と 1:4 箱桁断面の静的空気力特性を示す。1:3 基本断面及び 1:4 基本断面において $\alpha = 5^\circ$ での法線力係数は負となっており、準定常的にギャロッピングが発生することに対応している。また、1:3 箱桁断面で上部デフレクタの方が下部デフレクタよりも防振効果が大きいのは下部デフレクタの法線力係数が $\alpha = 5^\circ$ 付近で負になっていることに対応する

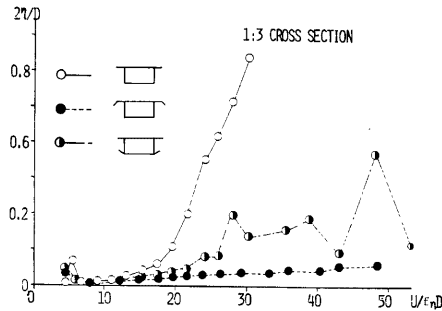


Fig. 18 Velocity-amplitude curve (1:3 cross section)

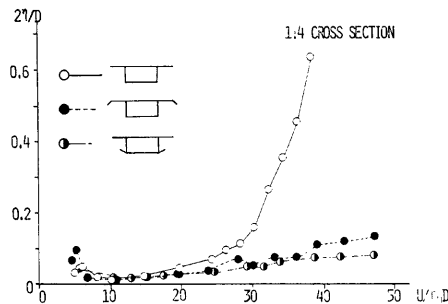


Fig. 19 Velocity-amplitude curve (1:4 cross section)

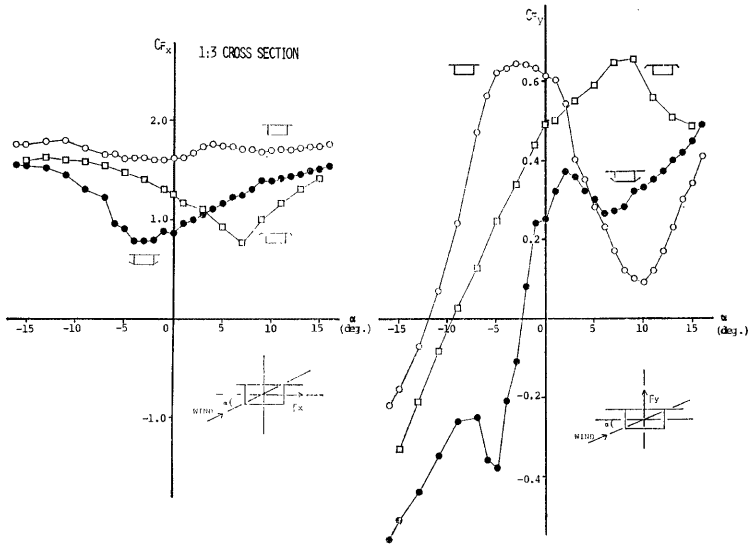


Fig. 20 Aerostatic force coefficient curve (1:3 cross section)

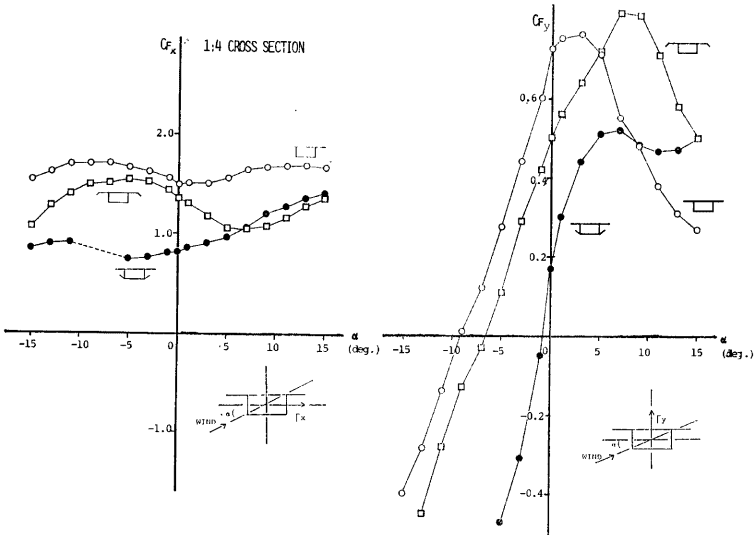


Fig. 21 Aerostatic force coefficient curve (1:4 cross section)

ものと判断される。しかし、防振装置付断面では基本断面に比べ法線力曲線の負勾配特性からギャロッピングに対する安定化効果が認められる。

3.3.3 静的圧力分布特性 Fig. 22 と Fig. 23 に 1 : 3 基本断面と 1 : 4 基本断面の静的圧力分布特性を示す。1 : 3 基本断面について $\alpha = 3^\circ$ から迎角が増加するにつれて一様に上面の圧力は回復し下面の圧力は低下している。これは、 $\alpha = 5^\circ$ における法線力係数が負になることに対応している。また、1 : 4 基本断面では $\alpha = 3^\circ$ から 5° に増加すると上面で圧力低下が生じているが、下面では著しい圧力回復が生じている。 $\alpha = 5^\circ$ から 7° になると上面では一様な圧力回復、下面では圧力低下が生ずる。このように、法線力係数の負勾配は上面と下面の総合的な流体力が物体に対する down lift に貢献するものと考えられ、上面及び下面の剝離せん断層が相互に関連しているものと判断される。1 : 3 基本断面の法線力係数曲線において、迎角 $\alpha = -3^\circ$ で極大値をとり $\alpha = 10^\circ$ で極小値をとっている。これらのことから、 $\alpha = -3^\circ$ 及び $\alpha = 10^\circ$ において剝離せん断層が上面及び下面に最も近づいているものと思われる。また、静的圧力分布でも $\alpha = -3^\circ$ 及び $\alpha = 10^\circ$ において再付着型圧力分布を示しており、法線力係数が極小値または極大値となることに対応している。矩形断面における静的空気力特性において、剝離せん断層が後縁に最も近づく時 wake stagnation point が断面から最も後退し背圧係数が回復するため抗力が極小値を示す。1 : 3 基本断面の抗力係数曲線においても、 $\alpha = -3^\circ$ で抗力係数はわずかに小さくなっている。1 : 4 基本断面においても $\alpha = 3^\circ$ で同様の傾向がうかがわれる。Fig. 24 と Fig. 25 に 1 : 3 箱桁断面と 1 : 4 箱桁断面の上部デフレクタ及び下部デフレクタを付設した時の静的圧力分布を示す。前述の振動応答特性図より明らかなように、上部デフレクタ及び下部デフレクタを付設した場合、優れた防振効果が認められる。上部デフレクタ付断面の場合、基本断面の圧力特性と比較すると圧力分布形状は特に上面にその効果が現われている。上面前縁で著しい圧力低下

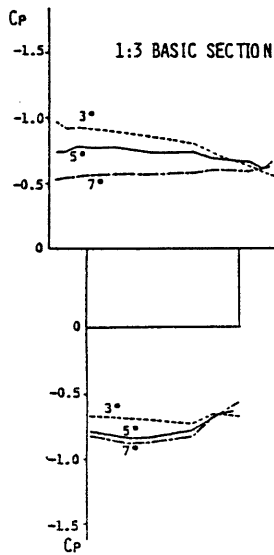


Fig. 22 Steady surface pressure distribution (1:3 basic section)

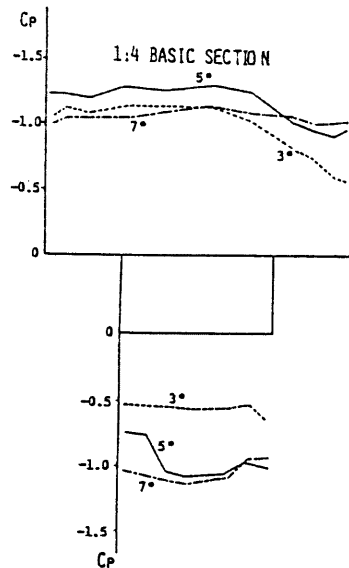


Fig. 23 Steady surface pressure distribution (1:4 basic section)

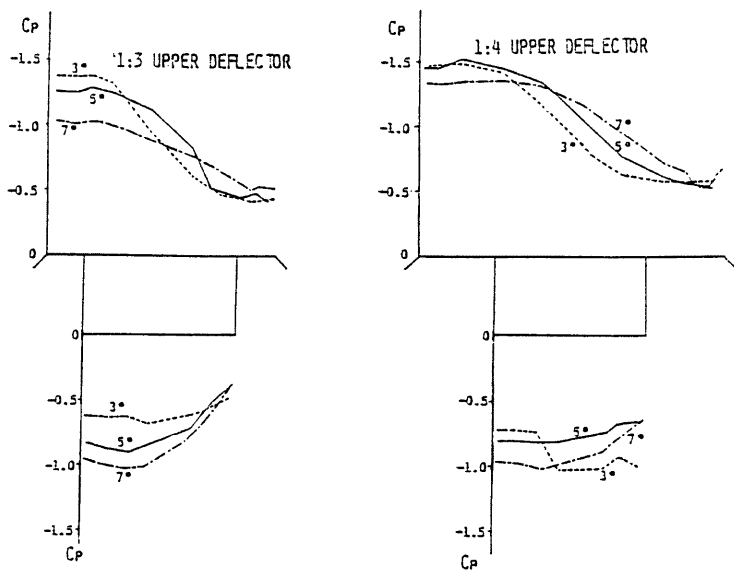


Fig. 24 Steady surface pressure distribution (with upper deflector)

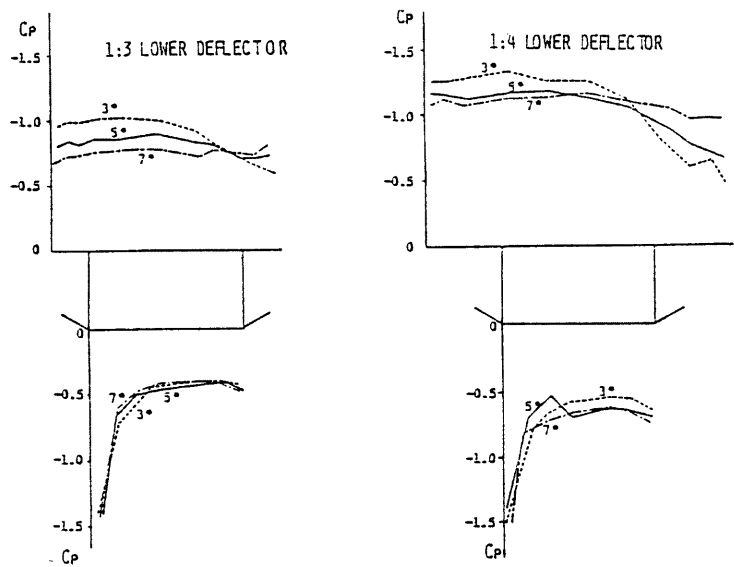


Fig. 25 Steady surface pressure distribution (with lower deflector)

を示し断面中央付近で再付着によるものと思われる圧力回復が生じている。これは、上部デフレクタにより上面前縁の流れの剝離が抑えられ再付着が促進されたことによるものと考えられる。1:3箱桁断面では、下面にその効果が認められる。下部デフレクタを付設した場合は、下面の圧力分布にその効果が認められ、下面前縁付近に著しい圧力低下が起り側面中央から後縁にかけて急激な圧力回復を生じている。これも、下部デフレクタを付設することにより下面前縁での流れの剝離が抑えられ圧力回復を促進させているものと考えられる。また、下部デフレクタを付設した場合には、上面でもその効果が現われており、下面側圧力分布は迎角の変化による変動が小さいことが認められる。

3.3.4 まとめ 基本断面に対し上部デフレクタ付断面、下部デフレクタ付断面のギャロッピングに対する防振効果には顕著なものが認められ、上部デフレクタ及び下部デフレクタにより前縁からの流れの剝離が抑えられ再付着が促進されていると考えられる。また、下部デフレクタを付設した場合には下面のみならず上面にもその影響が現われており、下面の剝離せん断層が上面の剝離せん断層に影響を与えていることが確認された。つまり、上面の剝離せん断層と下面の剝離せん断層は互いに干渉し合い、ギャロッピング発生にかかわる法線力係数の負勾配の発生原因には両者の Total の流体力が貢献しているものと考えられる。

3.4 水槽実験

水槽実験による流れの可視化観察を行うことにより物体周りの流れのパターンをとらえ風洞実験との比較を行う。使用した水槽は、京都大学工学部土木工学教室に設置された回流式水槽である。水槽実験概略図を Fig. 26 に示す。観測部上流側タンク内に整流板を設置し上流側水路には2層のハニカム及び3層のメッシュを設けることにより整流している。観測部における乱れの強さは流速約 23 cm/sec. で 0.5%程度である。水槽用模型は、観測部水面上に設けられた模型加振装置に片持支持されている。また、流速の設定は直径 42 mm の円柱パイプを水槽内に設置し、その後流に熱線プローブを設置してその流速変動より円柱の渦放出周波数を求め、ストローハル数より流速を算出した。流れの可視化は、水槽の両側壁からのスリット光線により水中に光平面をつくり、その平面内で水素気泡発生装置（開発電子測器研究所製 SCR-PG）による水素気泡法により行った。流れの様子は水槽底面の透明アクリル板を通して 35 mm カメラによって撮影し記録した。水槽実験ケースは、1:3箱桁断面の静止状態で基本断面 ($\alpha = -3^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$) と上部デフレクタ付断面 ($\alpha = 0^\circ, 10^\circ$)、下部デフレクタ付断面 ($\alpha = -3^\circ, 0^\circ$) である。また、設定流速は 23 cm/sec, でレイノルズ数は 4.54×10^{-3} である。

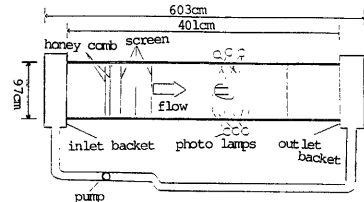


Fig. 26 Water tunnel configuration

3.5 水槽実験結果

Photo. 1, Photo. 5, Photo. 7 に各々迎角 $\alpha = 0^\circ$ における静止状態による 1:3 基本断面, 上部デフレクタ付断面, 下部デフレクタ付断面周りの流れの様子を示す。**Photo. 1** と **Photo. 5** を比較すると上部デフレクタにより上面前縁からの剝離せん断層は常時再付着していることが確認できる。また、**Photo. 7** では、せん断層はほとんど下面側面に沿って流下しているが前縁部では剝離バブルが形成されている。この剝離バブルが前縁部における著しい圧力低下とその後の圧力回復をもたらすと考えられる。上部デフレクタ及び下部デフレクタにより、せん断層の前縁での剝離角（剝離点における物体表面と剝離流れとのなす角度）が小さくなっており、このため後流の渦形成位置に変化をもたらす（Fig. 27）、その結果、抗力特性にも変化が現われたと判断される。**Photo. 1~Photo. 4** は、1:3 基本断面で迎角を種々に変化させた場合の流れの様子を示す。基本断面において法線力係数は $\alpha = -3^\circ$ で極大値、 $\alpha = 10^\circ$ で極小値を示す。**Photo. 2** と **Photo. 4** を比べた場合、 $\alpha = -3^\circ$ において再付着が生じていることがわかる。また、**Photo. 3** では、 $\alpha = 0^\circ$ の

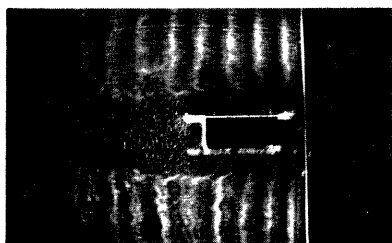


Photo. 1 Flow pattern (1:3 basic section $\alpha = 0^\circ$)

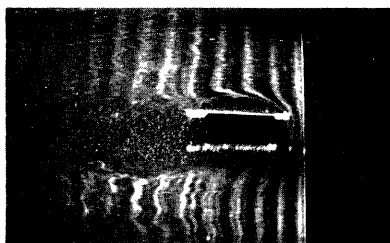


Photo. 2 Flow pattern (1:3 basic section $\alpha = -3^\circ$)

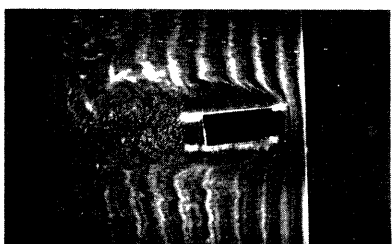


Photo. 3 Flow pattern (1:3 basic section $\alpha = 5^\circ$)

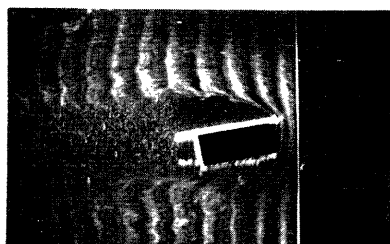


Photo. 4 Flow pattern (1:3 basic section $\alpha = 10^\circ$)

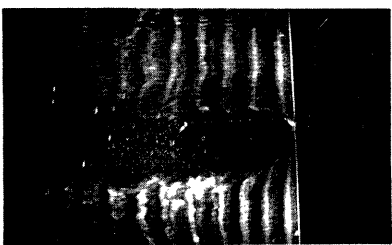


Photo. 5 Flow pattern (1:3 with Upper Deflector $\alpha = 0^\circ$)



Photo. 6 Flow pattern (1:3 with Upper Deflector $\alpha = 9^\circ$)

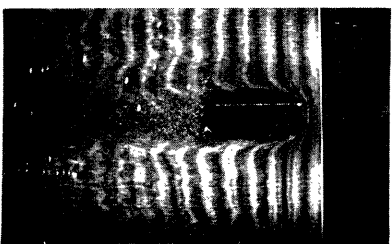


Photo. 7 Flow pattern (1:3 with lower deflector $\alpha = 0^\circ$)

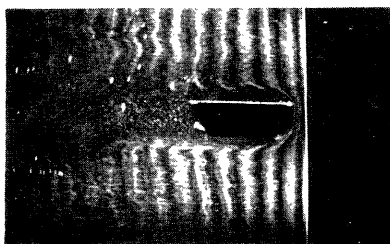


Photo. 8 Flow pattern (1:3 with lower deflector $\alpha = -3^\circ$)

場合と比較して上面の剝離せん断層は上面から遠ざかり下面の剝離せん断層は下面に接近している。従って $\alpha=0^\circ$ と比較して法線力としては down lift が大きく、ギャロッピングに対して不安定である。**Photo. 5**, **Photo. 6** は上部デフレクタを付設した 1 : 3 箱桁断面の流れの様子を示している。 $\alpha=9^\circ$ において下面後縁部に再付着が生じている。基本断面の $\alpha=0^\circ$ (**Photo. 1**) と **Photo. 5** を比較すると剝離角に大きな差が見られる。すなわち、上部デフレクタ付断面は基本断面と比べると前縁における剝離角は小さくなり後縁部付近で再付着が生じやすくなっていると考えられる。 $\alpha=0^\circ$ においては後縁部付近で再付着が生じている。

Photo. 7, **Photo. 8** は、下部デフレクタ付 1 : 3 箱桁断面の流れの様子を示している。 $\alpha=0^\circ$ において、下面前縁部から剝離したせん断層は急速に再付着し、剝離バブルが生じている。 $\alpha=-3^\circ$ において、静的圧力分布特性から上面及び下面で顕著な圧力回復が生じているが、フローパターンも上面・下面において前縁から剝離したせん断層は、模型の側面に接近し、断面中央部から後縁付近で再付着が生じているのが認められる。

4. む す び

本研究では、捩れ中心位置を断面中心から偏心させた場合の渦励振特性実験、また、箱桁断面を対象としたギャロッピング特性実験について、断面周りの流れの特性から検討を加えた。これより、次のような結果が得られた。

渦励振特性にもたらす物体振動の影響

- (1) 前縁剝離型渦励振の励振メカニズムにおいて前縁剝離渦と後縁二次渦は共に重要な役割を果たすことが確認できた。
- (2) 1 : 4 矩形断面の渦励振は、カルマン渦の影響を受け易く、前縁剝離型渦励振とカルマン渦励振の混在型である。
- (3) CASE No. 7, CASE No. 8 でスプリットプレートを挿入しカルマン渦の影響を除去すると応答振幅が増大することより、物体振動と同期したカルマン渦は前縁剝離渦と後縁二次渦が一体化して安定な渦放出するのを妨げる働きがあることが確認された。
- (4) 捩れ中心位置が断面中心以外の時に捩れ 1 自由度支持をした場合には曲げ渦励振に近い特性を示す傾向が認められた。

箱桁断面のギャロッピング特性

- (1) 防振装置として上部デフレクタ及び下部デフレクタは優れた防振効果を示し、上部デフレクタは上面、下部デフレクタは下面で剝離せん断層の再付着を促進させる。
- (2) 上部デフレクタ及び下部デフレクタは前縁での剝離角を変化させており、その結果、後流渦形成位置が変化し抗力にも変化が現われることが確認された。
- (3) 断面上面の剝離せん断層と下面の剝離せん断層は互いに干渉し合っており、ギャロッピング特性にはこの両者の影響が密接に関連していることが確認された。

最後に、本研究を遂行するにあたり風洞実験・データ整理等に多大な御協力を得た、大阪市 横田哲也氏

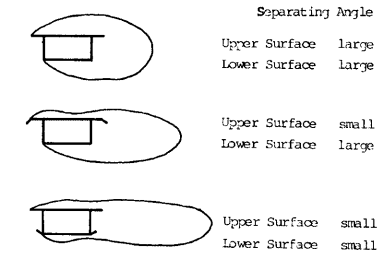


Fig. 27 Flow pattern around box girder section

横河橋梁 尾上義博氏, ならびに小林茂雄氏をはじめとする京都大学工学部橋梁工学研究室のかたがたに心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 白石成人・松本 勝: 充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第322号, 1982年6月
- 2) 白石成人・松本 勝: 渦励振の発生機構と応答評価, 日本風工学会誌, 第20号, 昭和59年6月
- 3) 白石成人・松本 勝・白土博通・北川雅章・平出純一: 各種矩形断面のフラッタ時の圧力分布特性, 第8回風工学シンポジウム論文集, 1984年
- 4) 白石成人・松本勝: 充腹構造断面の渦励振に関する基礎的考察, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980年
- 5) P.W. Bearman, D.M. Trueman: An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders, The Aeronautical Quarterly, Vol. 2,3 1972.
- 6) 中村泰治・友成義正: 層流および乱流における D 型断面柱のギャロッピング, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980.
- 7) A. Laneville, Lu Zhi Yong: MEAN FLOW PATTERNS AROUND TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR CYLINDERS AND THEIR INTERPRETATION, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 14, 1983.
- 8) 溝田武人・岡島 厚: 一様流中にある断面比 0.4~1.5 角柱まわりの剝離流れと流体力の変化について, 第7回風工学シンポジウム, 1982年