

# 橋梁基本断面のガスト応答に関する研究

## A STUDY ON THE AERODYNAMIC RESPONSES OF BRIDGE DECK SECTIONS TO A GUSTY WIND

吉村 健\*・石田良三\*\*・荒牧信介\*\*\*・中村泰治\*\*\*\*

By Takeshi YOSHIMURA, Ryozo ISHIDA, Shinsuke ARAMAKI and Yasuharu NAKAMURA

The aerodynamic lift responses of geometrically simple bluff prismatic sections to a sharp-edged gust are studied for the purpose of evaluating the gust responses of bridge deck sections in the time domain. A towing water tank that can simulate a sharp-edged gust was specially designed and used in the experiment. The results obtained are: 1) A satisfactory form of a sharp-edged gust is obtained. 2) The indicial aerodynamic lift responses of the models are qualitatively similar to but quantitatively different from that of an airfoil. 3) Flow patterns around the models are characterized by the leading-edge separation bubbles that are formed and shed downstream during the passage of a sharp-edged gust.

### 1. はしがき

長大橋の主桁の耐風設計にあたっては、フラッタの防止に対する配慮とガスト不規則振動の評価が重要である。フラッタは風による弾性構造物の自励振動を指し、ガスト不規則振動は自然風の乱れに起因する強制振動である。ここでは、後者に議論を限定すると、その振動振幅は限定的であって、橋をただちに破壊に導くものではない。しかし、この種の振動がしばしば発生する場合、疲労損傷、車両走行上の支障あるいは歩行者の不安感の誘発等の問題が起こるので、振動性状をあらかじめ推定し、これらの問題について十分検討する必要がある<sup>1)</sup>。

一般に、不規則入力に対する系の応答は、周波数領域と時間領域において求められ、それぞれスペクトルと過渡応答の形で表わされることは周知のとおりである。ガスト不規則振動については、Davenport<sup>2)~4)</sup>の研究以来、周波数領域における多くの研究(たとえば文献5)~10))

がなされてきたが、時間領域における研究もいくらか行われている<sup>10)~15)</sup>。ガスト不規則振動には、気流の乱れの鉛直成分の寄与によって生じる鉛直曲げ振動とねじれ振動、および乱れの主流方向成分の寄与による横たわみ振動がある。以下では鉛直曲げ振動のみを取り上げ、乱れの鉛直成分(鉛直ガスト)によって主桁にもたらされる非定常揚力について考察する。

さて、竜巻等のきわめて非定常性の強い突風に対する過渡振動や、強風時における不規則振動の特性を時間領域において推定する場合、sharp-edged gust に対する過渡揚力応答が必要となる。ここに、sharp-edged gust とは、図-1(a)に示すステップ状の鉛直ガストであって、ガストフロントの後方では一様分布の鉛直成分を有するが、その前方では鉛直成分のない特殊なガストを指す。翼については、Küssner 関数として知られている過渡揚力応答の理論値がある。一方、橋梁の主桁の場合、Küssner 関数と対応する理論値はなく、実験的にこれを求めざるを得ない。ところが、風洞気流中で sharp-edged gust を発生することはきわめて困難なため、橋梁の主桁断面モデルに対する過渡揚力応答の実測値はいまだ得られていない。文献10)~13)では、過渡揚力応答を用いずに、統計的手法によって時間領域におけるガスト不規則振動が推算されている。また、文献14)、

\* 正会員 工博 九州産業大学助教授 工学部土木工学科  
(〒813 福岡市東区松香台 2-327)

\*\* 正会員 工修 (株)総合技術コンサルタント大阪支社  
(〒513 大阪市東淀川区東中島 3-5-9)

\*\*\* 正会員 工修 横河工事(株)長大橋梁部  
(〒550 大阪市西区西本町 1-3-15)

\*\*\*\* 正会員 工博 九州大学教授 応用力学研究所  
(〒816 春日市春日公園 6-1)

15)では、調和的に変動するガストを風洞気流中で発生させて、橋梁の主桁断面模型の非定常揚力を測定し、これをフーリエ変換して過渡応答を推算している。

本研究では、橋梁のガスト不規則振動を時間領域において推算する目的のため、sharp-edged gust に対する過渡揚力応答を模型実験で求めた。ただし、風洞の代わりに、水槽実験によって sharp-edged gust の発生を試み、かつ、扁平な充腹断面桁を対象としている。このガスト発生装置の概要と検定試験結果、ならびに幾可学的形状の単純な3種の充腹断面模型と二次元剛翼模型に対する過渡揚力応答の測定結果は、文献16)~18)に報告してきたが、本論文はこれらの一部修正して取りまとめたものである。以上のほかに、ガストが作用したときの模型まわりの流れを観察し、過渡揚力の発生について流れ学的考察を加えた。さらに、これらの過渡応答をフーリエ変換し、周波数応答を推算した。これらについても本論文に記すことにする。

## 2. 実験概要

### (1) 実験法と装置の概要

高精度の過渡揚力応答を得るためには、図-1(a)に示した sharp-edged gust は次の条件を満たす必要がある。

- ① ガストフロントの後方では、鉛直方向の流速  $w$

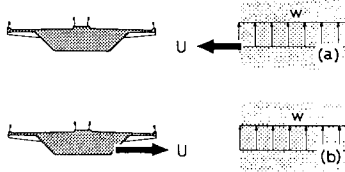


図-1 sharp-edged gust を受ける橋梁主桁

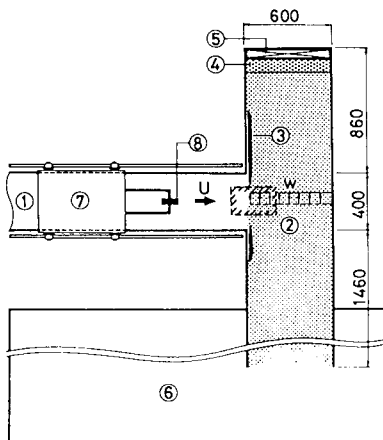


図-2 実験装置の概略図

は一様分布を示すこと。

- ② ガストフロントは流れの不連続面を形成し、その前方では  $w=0$ 、不連続面ではステップ状に鋭く流速が立ち上がること。
- ③ 流速  $w$  は主流の流速  $U$  と比べて十分小さいこと。

条件③は、後述の線形応答を得るために必要となる。これらの条件を満たす流れを風洞実験で得ることは困難であるから、本研究では、水槽実験によることにした。すなわち、図-1(b)に示すように、静水槽の一端に、模型の曳航方向と直角に一樣な遅い流れを作っておく。そして、模型を曳航してこの流れに突入させると、図-1(a)と等価な流れが模型に作用することになる。

さて、図-2は、sharp-edged gust を得るために考案した装置の概略図である。本装置は、九州大学応用力学研究所所属の曳航式水路を改造したものであって、曳航水路①の一端に、この水路と直交するガスト水路②を接合したものである。曳航水路とガスト水路の寸法は、それぞれ、幅×深さ×長さ=40×40×600 cmと60×40×270 cmである。これら2種の水路の流体は、水路の接合部に設けた2枚の翼型断面のシャッター③によって遮断することができる。ガスト水路の一端には、一樣な流速分布の遅い流れを作るための流速調整装置④と、排水装置⑤とが設けられている。また、排水に伴うガスト水路の水位の低下を解消する目的で、容積の十分大きい貯水槽⑥がガスト水路の他端に接合されている。

いま、シャッターを閉じた状態で、流速  $w$  の遅い一樣な定常流をガスト水路に作っておく。そして、曳航台車⑦に鉛直に支持された模型⑧をガスト水路の方向へ曳航し、模型がシャッターの直前に達したとき、シャッターをすばやく開放する。このとき、曳航水路の流体は静止しているが、一方、ガスト水路の流体は流速  $w$  で流れており、これら2種の流体の境界面は流れの不連続面を形成するであろう。このようにして、図-1(b)に記した流れを実現し、模型がこの不連続面を通過するときの過渡揚力を測定する。

### (2) 流速調整装置

図-3はガスト水路の下流側の詳細図であって、流れ

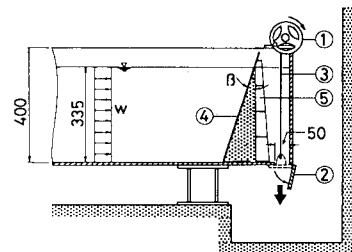


図-3 ガスト水路の断面図

方向の断面図を示している。巻上げハンドル①のクランプをはずすと排水扉②が開き、排水が始まる。流速調整装置④は、三角形に整形された補剛材付金網とその内部に充填した相馬標準砂とから成っており、一種のフィルターである。この砂粒子の間隙を流れる浸透流は、 $0.3 < w < 3 \text{ cm/s}$  の範囲でダルシーの法則に従うことがわかっている。もし、この浸透流が水平に流れるものとする、水圧に比例した流路長をもつこのフィルターの内部では、流速分布の様な定常浸透流が形成され、ガスト水路でもこれと同一の定常流が作られよう。なお、このフィルターの頂角 $\beta$ を調整することにより、所要の流速の流れを得ることができる。

(3) 翼型断面シャッター

次に、翼型断面シャッター (図-2 の③) について二三記しておきたい。シャッターの駆動はエアシリンダーによって行っている。駆動の on-off には電磁弁とリミットスイッチを用い、調圧器で駆動速度を制御した。

ところで、シャッターを駆動するとき、その後方では後流渦が形成され、この渦によって前記流れの不連続面が攪乱されることが予備実験でわかった。この後流渦は、シャッターの駆動に伴い、シャッターの表面に形成される境界層に起因するものである。そこで、図-4 に示すように、シャッターの後縁付近に設けたスリット①から境界層を吸収し、後流渦の発生を抑制している。スリットから吸収された流体は、シャッターの内部に埋め込まれた角パイプ②、吸収 on-off 用の電磁弁および流量調整器を経て、真空エアチャンバーに流入する。境界層の吸収は、シャッターの駆動時のみ行われるよう制御した。

(4) 模型、支持装置および揚力検出装置

実験に用いた二次元剛体模型の断面形状を図-5 に示す。図中 (a) は NACA 0012 の翼型断面であり、 $c \times l = 12 \times 28 \text{ cm}$ 。ここに、 $c = 2b$  は弦長、 $l$  は有効スパン長 (図-6 (b) 参照) である。図の (b)~(d) は扁平な充腹断面桁を単純化したものであって、(b) は厚み比が  $d/c = 10\%$  の矩形断面、(c) と (d) はこの矩形

断面の前・後縁に、それぞれ  $h/c = 15\%$  と  $20\%$  の薄板を付加したものである。

模型の支持部は図-6 (a) に示すとおりである。模型①の上端部は、4枚の板ばね②を介して支持板③に弾性支持されている。一方、模型の下端部は、2枚の板ばねを介して支持フレーム④に弾性支持されている。この支持板は防振ゴムを介して曳航台車に固定される。なお、流れの二次元性を保つために、模型の下端部に端板⑤を取り付けており、表面波の影響を軽減するための消波板⑥も取り付けた。

図-6 (b) は、図-6 (a) の模型の部分の断面図である。板ばね②のひずみを半導体ひずみゲージで検出して揚力を測定した。揚力とひずみとの間には良好な直線性が認められた。系の固有振動数を高めるために、模型を支持する板ばねには比較的剛性の高いものを用いた。かつ、軽金属と硬質の発泡スチロールで模型を作り、二重構造の端板⑤を用いることにより、系の軽量化を図っている。空中と水中における系の固有振動数は、それぞれ約  $60 \text{ Hz}$  と  $25 \text{ Hz}$  であった。

3. 装置の検定試験結果

(1) ガスト水路の流速特性

図-7 の図中 (1) と (2) の曲線は、それぞれ、排水扉開放 ( $T=0$ ) の後におけるシャッターの変位とガスト水路の流速測定結果であり、曲線 (3) は、シャッターを閉鎖して排水したときの流速を示している。計測には、

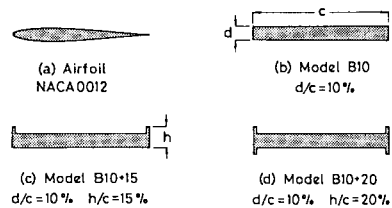


図-5 模型の断面形状

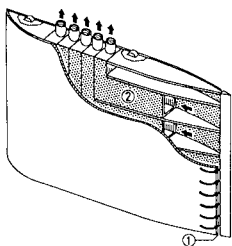
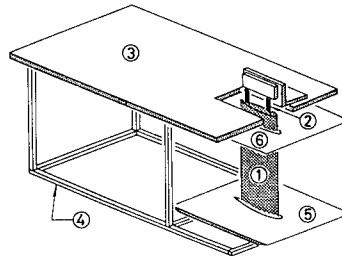
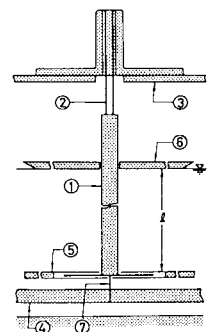


図-4 翼型断面シャッター



(a) 概略図



(b) 断面図

図-6 支持装置と揚力検出装置

円錐形プローブをセンサーとした低流速用熱線流速計を用い、測点は、ガスト水路の中心線と曳航水路のそれとの交点付近である。この流速計の出力は、 $w < 2 \text{ cm/s}$  の微小流速の範囲で非線形となるため、流速-出力検定曲線を用いて測定値を修正している。シャッター開放の有無によって、初期の流速特性にわずかな差異が認められるが、排水扉を開放して約2秒経過すると、いずれもほぼ一定流速の流れとなることが図よりわかる。

このときのガスト水路の流速分布を水素気泡法によって観察した。写真-1の(a)と(b)は、それぞれ鉛直流速分布と水平流速分布の観察写真であり、シャッターを閉鎖した場合の結果である。流れは矢印の方向に向かっている。シャッターを閉鎖した場合と開放した場合のいずれについても、ガスト水路の比較的広い範囲にわたって写真観察を行ったところ、シャッターの近傍を除き、得られた結果はこれらの写真とほぼ同様であった。一様な流速分布の流れが形成されていることを写真のタイムラインが示している。

以上に記した検定試験の結果、前記の流速調整装置(砂フィルター)により、一様な流速分布の遅い流れの得られることがわかった。すなわち、2.(1)で述べた sharp-edged gust の条件のうち、①と③が満たされていることが示された。

(2) 水路の接合部付近の流れの特性

次に、sharp-edged gust に関するいま1つの条件②について検討した結果を記す。シャッターを全開した直後とその約1.5秒後(図-7の(4)参照)における水路の接合部付近の流れをアルミ粉法により写真観察した。その結果が、それぞれ写真-2の(a)と(b)である。これらの写真は、水路の接合部付近の約20×30cmの部分(図-2に破線で囲んだ部分)の流れを示している。写真の右半分と左半分が、それぞれガスト水路と曳航水路である。模型は写真の中央を右へ向かって曳航され、ガストは矢印の方向へ向かって流れている。水路の接合部付近で、速度ベクトルが急変するのを写真にみる事ができる。すなわち、不連続面に近い流れが形成される

ことがわかった。なお、写真にみられる模型曳航方向の流速の成分は、曳航速度と比べると十分に小さく、過渡応答の計測上問題ない。また、写真-2(a)の不連続面の下方に小さい渦が存在する。この渦は、2枚のシャッターの出発渦であり、過渡応答の計測が終了する時刻では、写真-2(b)にみるようになり大きく成長する。本装置では、この出発渦が応答に及ぼす影響を軽減するために、2枚のシャッターは弦長の異なる非対称構造とし、渦の発生位置を模型の通過線から遠ざけている。

写真-3の(a)と(b)は、シャッター表面の境界層を吸収しない場合の流れを示し、それぞれ写真-2の(a)と(b)の時刻とほぼ対応している。後流渦が不連続面を攪乱する様が見られよう。

以上に記したように、本装置によって、不連続面に近い流れが作られることがわかったが、次に、この不連続面近傍の流速分布について調べた結果を記す。模型の通過線上とその近傍の流速分布( $w$ 成分)を、写真-2(a)のOHPによる拡大映像から読み取り、図-8を得た。ただし、XY座標は図中に記すように定義した。実線の曲線が模型の通過線上( $Y=0$ )の流速分布であり、破線と点線の曲線は、それぞれ $Y=2.5 \text{ cm}$ と $Y=-2.5 \text{ cm}$ の線上における分布を表わす。水路の接合部( $X=0$ )の付近におけるこれら3種の流速は、所要値ほどのステップ的变化は示さないものの、かなり急な勾配で流速の立ち上がることを図の結果は示している。なお、曳航水路内( $X < 0$ )でもいくらかの $w$ 成分が認められる。

4. 過渡揚力応答の測定結果

上記の検定試験の結果は、すべて $w=1.5 \text{ cm/s}$ のガストに関するものであるが、 $w$ の値を種々変化させて検定したところ、 $1.5 < w < 3.5 \text{ cm/s}$ の範囲で、上記とほぼ同様のおおむね良好な特性を示すことがわかった。本実験では、曳航台車の速度を $30 < U < 40 \text{ cm/s}$ に設定して計測した。この場合、ガストに突入した後の有効迎角 $\alpha = w/U$ の範囲は、 $2^\circ < \alpha < 7^\circ$ となる。なお、計測におけるレイノルズ数は、 $R = Uc/\nu = (3.6 \sim 4.8) \times 10^4$ で

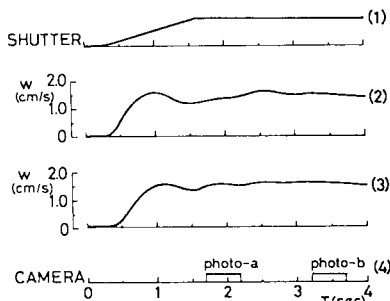


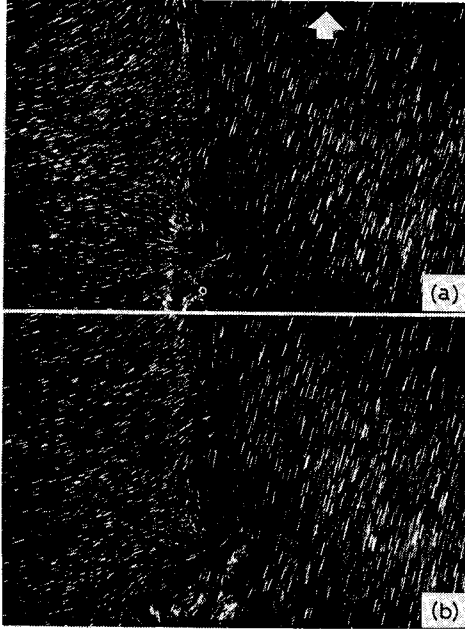
図-7 排水扉開放後におけるガスト水路の流速の記録



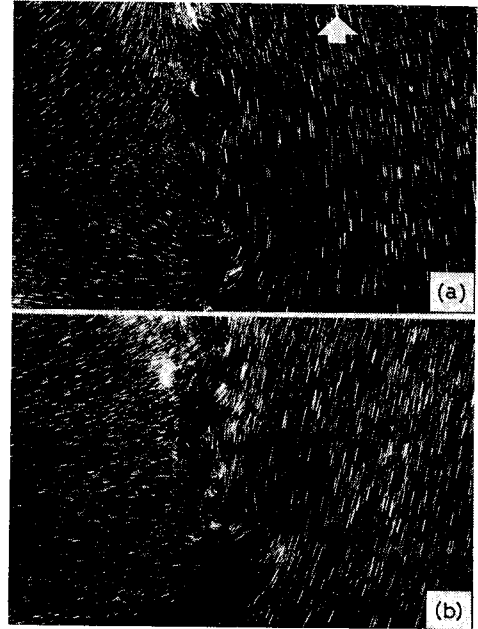
(a) 鉛直流速分布

(b) 水平流速分布

写真-1 ガスト水路の流速分布の観察写真



写真—2 シャッター開放後の流れ（境界層吸収）



写真—3 シャッター開放後の流れ（境界層吸収せず）

あった ( $\nu$  は水の動粘性係数).

(1) 応答の線形性について

本研究の目的からすると、線形重ね合わせが許される微小な有効迎角の範囲で過渡応答を求める必要がある。そこで、文献 19) と同様に、大小種々の有効迎角について過渡応答を求めて時間-応答-有効迎角曲線を描き、応答の非線形性について検討した。その結果、まず、翼では非線形性は認められず、矩形断面においても、大きい有効迎角の範囲でのみ弱い非線形性が認められた。

次に、20% のプレート付矩形断面の応答は図-9 に示すとおりである。図中、横軸は無次元時間  $\tau = Ut/b$ 、縦軸は無次元揚力  $\bar{L}(\tau) = L(\tau)/(2\rho Ublw)$  であり、各曲線に記す角度は有効迎角を表わす。ここに、 $t$  は時間、 $L(\tau)$  は揚力、 $\rho$  は水の密度。応答には、約 25 Hz の系の固有振動がノイズとして混入するので、ローパスフィルターでノイズを除去して図の結果を得た。また、既述のように、ガスト水路の幅は 60 cm しかなく、応答が定常値に達する以前に計測が終了する。そこで、計測における有効迎角と同一の迎角を模型に与え、曳航水路内で定常揚力を別途測定した。これらを  $\tau = \infty$  の値として図中に記している。  $2^\circ < \alpha < 3^\circ$  の小さい有効迎角の範囲における 2 種の過渡応答は、ともにほぼ同一とみなすことができ、応答が線形に近いことを示唆している。本装置では、 $\alpha < 2^\circ$  に対する応答を求めることはできなかったが、本実験と類似した文献 19) の結果によれば、扁平な充腹断面の過渡応答は、 $\alpha < 1^\circ$  でほとんど線形で

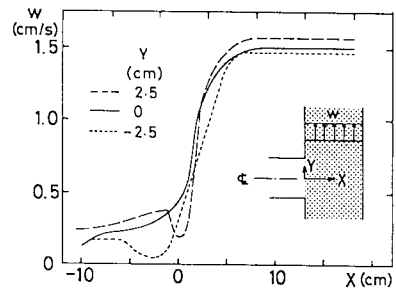


図-8 水路接合部付近の流速分布

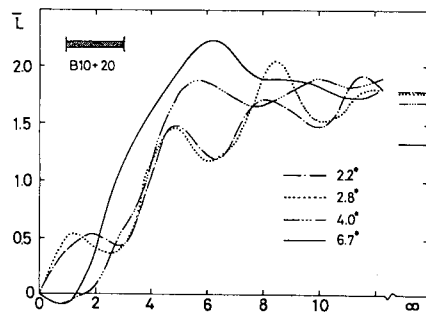


図-9 プレート付矩形断面の応答の非線形性

あり、 $1^\circ < \alpha < 3^\circ$  では線形応答に近いものであった。以上の結果から、 $\alpha = 2.2^\circ$  の実験値を線形応答とみなすことによって生じる誤差は小さいものと思われる。

応答の非線形性は、有効迎角が大きくなると顕著に認められる。すなわち、 $\alpha < 3^\circ$  における応答は、ほぼ周期

的な変動を伴いながら、単調な増加を経て定常値に達するのに対し、 $\alpha=6.7^\circ$ では、いったん増加を示した後に緩慢な減少を示すようになる。後者においては、定常値も著しく非線形となる。以上のような特性は、15%のプレート付矩形断面でもほぼ同様に認められた。なお、応答に混入するほぼ周期的な変動成分は、ガストに突入する以前の応答記録にも、定常値に達した後の記録（上記の定常揚力の測定記録）にも同様にみられることから、後流渦によってもたらされる変動揚力であるといえる。また、 $\alpha=4.0^\circ, 6.7^\circ$ の応答にみられる初期の負値も、後流渦による変動成分に起因するものであって、同一条件のもとで得られた結果の中には、 $\alpha<3^\circ$ の初期の応答と同様の正値を示すものもあったことを付記する。

(2) 翼の実験値と理論値

本実験で翼を用いた目的の1つは、理論値として知られている Küssner 関数と過渡揚力応答の測定値を比較検討し、揚力検出装置を含めた実験装置全体の総合的性能を検定することにある。また、翼については、応答の理論値は得られているものの、その実験的検証はいまだなされていない。したがって、実測値を得ること自身にも意義があるといえる。さて、その実測値と理論値は、それぞれ図-10に実線と点線で示すとおりであって、両者の間に比較的よい一致が認められる。

ところで、図-8に示したように、水路の接合部付近における流れは、所要値ほどのステップ的变化を示さない。そこで、Küssner 関数を用いて図-8の実線 ( $Y=0$ ) のガストに対する過渡応答を計算し、実測値との比較を行った。ただし、 $X<-10$  cm におけるガストの流速分布は得られていないので、 $X<-10$  cm では  $X=-10$  cm における速度勾配をもつものと仮定して計算した。図-10に一点鎖線で示す曲線が得られた計算値である。実測値との一致はいっそうよくなっている。なお、シャッターの駆動に伴い、出発渦が発生することは既述のとおりである。この出発渦が応答に与える影響は小さいことも図の結果は示している。

(3) 充腹断面の応答特性

3種の扁平な充腹断面について得られた応答の測定値を図-11に示す。ただし、 $\alpha=2.2^\circ$ に対するものであり、前記翼の実験値も比較のために図示している。充腹断面の応答は、いずれも、後流渦による変動成分を除くと、翼の応答と定性的に同様の特性を示す。すなわち、緩慢な増加を経て定常値に達するといった特性で応答は特徴づけられる。

さて、各断面の応答を定量的に比較する。応答特性を過渡特性と定常特性に分けて比較するために、図-11の応答  $\bar{L}(\tau)$  を定常値  $\bar{L}(\infty)$  で除して  $\hat{L}(\tau)$  を求めた。それらを図-12に太い実線で示す。線形応答であるか

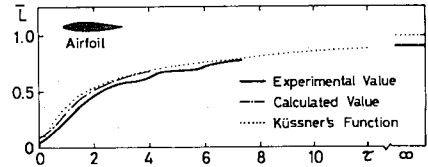


図-10 翼に対する過渡揚力応答の実測値，理論値ならびに計算値

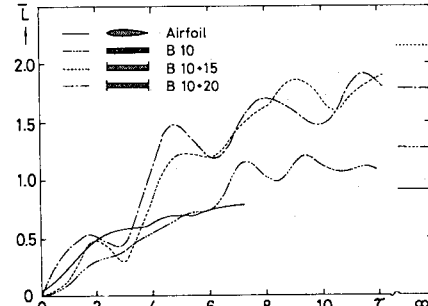
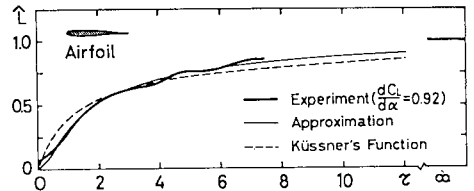
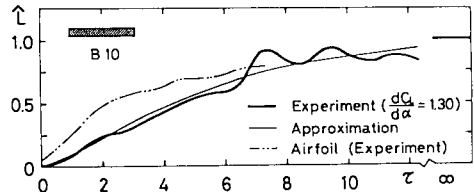


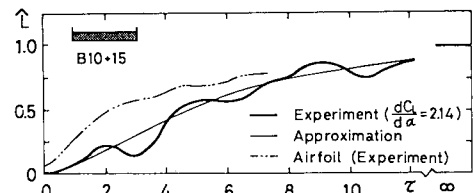
図-11 充腹断面と翼に対する過渡揚力応答の測定値



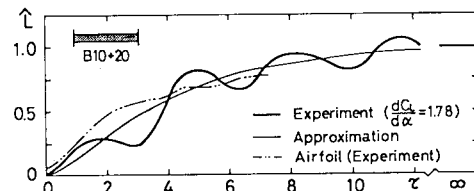
(a)



(b)



(c)



(d)

図-12 4種の断面に対する過渡揚力応答の測定値とその近似曲線

ら、 $\bar{L}(\infty)$ は定常揚力係数曲線 ( $C_L$  曲線) の  $\alpha=0^\circ$  における勾配に等しい。この揚力傾斜も  $dC_L/d\alpha$  として図中に記している。3種の充腹断面の過渡特性は、いずれも、図中に二点鎖線で記す翼のそれより緩やかな増加を示すことが図よりわかる。また、揚力傾斜については、翼の値が最も小さく、矩形断面、20%のプレート付断面、15%のプレート付断面の順に大きい値を示しており、15%断面では翼の2倍強の値となっている。

ここで、上記偏平な充腹断面に対する過渡応答特性を、白石ら<sup>15)</sup>が推算した1:2矩形断面の応答特性と比較する。はしがきに記したように、この推算値は、周波数応答の実験値をフーリエ変換して得られたものであるが、その結果によれば、初期に大きな正の揚力を生じ、その後の緩やかな減少を経て負の定常値に漸近する。このように、偏平な充腹断面の過渡応答とずんぐりした充腹断面のそれとは、全く異なる特性を示すのであって、 $dC_L/d\alpha$ の符号の差異に基づくギャロッピング発生の有無と合わせて、両者の差異が目される結果となっている。

結局、偏平な充腹断面の応答は、定性的には翼の応答と同様の特性を示すが、過渡特性と定常特性については、定量的に翼のそれとかなり異なることがわかった。ガス

トに対するこれら断面の過渡振動においては、応答振幅の差異は、主として上記定常特性の差異によって生じ、応答の位相遅れの差異は、主として上記過渡特性の差異によるものであるから、偏平な充腹断面と翼では過渡振動特性がかなり異なるものと思われる。

なお、多少細かい議論になるが、図-8の  $X < 0$  におけるガストの影響によって、翼に対する図-10の応答の初期値はゼロではなく、小さい正值を示す。これに対し、図-12の (b)~(d) に示した充腹断面の場合、応答の初期値はゼロであり、一見、 $X < 0$  におけるガストの影響がないように見える。しかし、応答に混入する後流渦の変動成分を便宜上除去して、 $\tau=0$  の前後における応答を検討すると、翼の場合と同様に、 $\tau=0$  で小さい正值を示すことを付記する。

### 5. 模型まわりの流れの特性

次に、3種の充腹断面模型にガストが作用したときの模型まわりの流れについて記す。流れの観察も、図-12と同様に、小さい有効迎角の範囲で行う必要がある。ところが、本実験装置で実現可能なガストの最小流速は  $w=0.6 \text{ cm/s}$  であり、可視化実験に適した曳航台車の

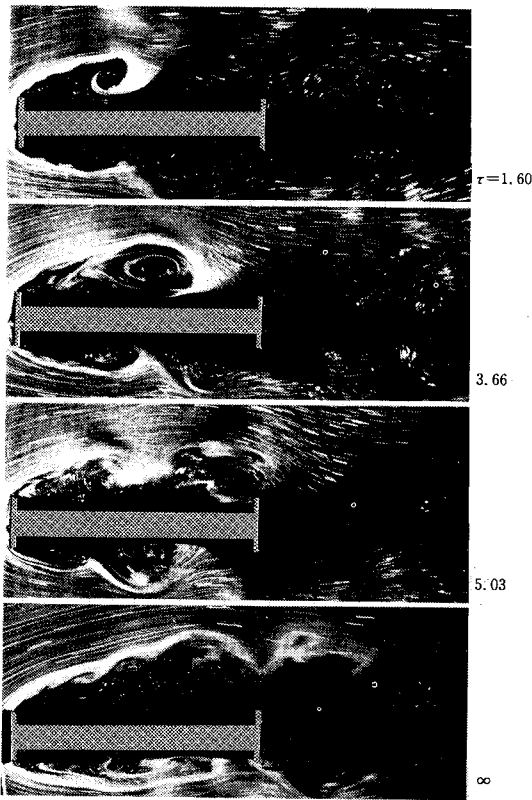


写真-4 ガストが作用したときの20%プレート付矩形断面模型まわりの流れ

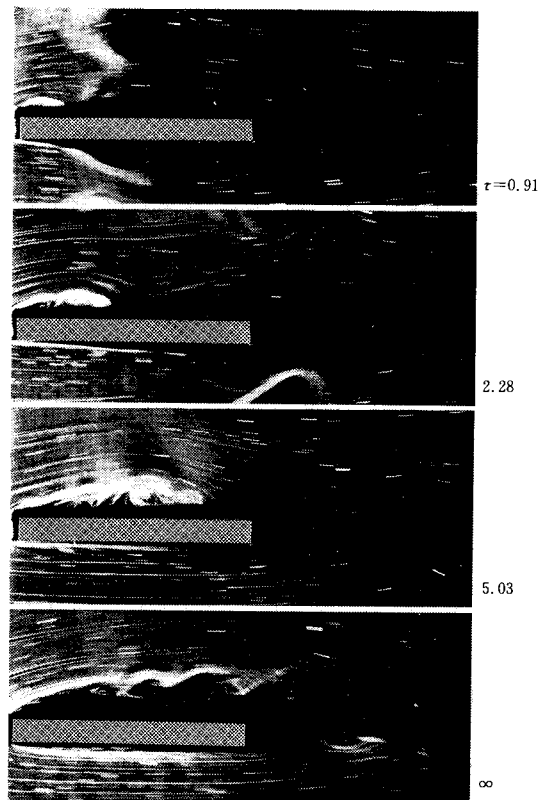


写真-5 ガストが作用したときの矩形断面模型まわりの流れ

最大速度は  $U=5 \text{ cm/s}$  であって、このときの有効迎角は  $\alpha \cong 7^\circ$  となる。この有効迎角では、充腹断面の過渡応答は非線形性を示すが、これについては注1)を参照されたい。なお、可視化実験におけるレイノルズ数は  $6 \times 10^3$  であり、過渡応答の測定における値より1桁小さいが、この程度のレイノルズ数の差異による応答特性の変化は、無視し得るものと思われる。また、 $w=0.6 \text{ cm/s}$  の場合、ガストフロントにおける流速の立上がりは、図—8の結果よりいくぶん劣る。

さて、写真—4と写真—5は、それぞれ20%のプレート付矩形断面と矩形断面の2種の模型に、ガストが作用したときの模型まわりの流れを示すものであり、水素気泡法とアルミ粉法を併用した観察写真である。本実験では、模型の前縁付近に張ったステンレス線から、ガスト突入と同時に水素気泡のシートを発生させた。このようにして、ガストが作用した後に形成される剝離せん断層が白色に着色され、ガスト作用以前の剝離せん断層と区別される。これらの写真にみるように、ガストが作用した直後における2種の模型まわりの流れでは、いずれも、白色の剝離せん断層が巻き込み、その後、この巻き込み渦が成長する。すなわち、流れの特徴は、ガストに起因する前縁剝離渦の発生と成長にある。ただし、上面の渦の大きさの差異と下面の渦の有無といった点において、両者は異なっている。図示していないが、15%のプレート付矩形断面でも、写真—4とほぼ同様の特性が認められた。

ところで、本研究で取り上げたいいわゆる Küssner 問題においては、ガストフロントが断面を通過するとき、有効迎角が断面の各点で逐次ステップ的に急変する。これに対し、インディシャルな有効迎角運動を行ったときのいわゆる Wagner 問題の場合、有効迎角が断面の各点で同時にステップ的に急変する。この点で両者は異なるが、後者においても写真—4、写真—5と同様に、有効迎角の急変に基づく前縁剝離渦の発生と成長で充腹断面まわりの流れが特徴づけられる<sup>20)</sup>。そして、この前縁剝離渦が圧力分布に負圧の山と谷をもたらす、それによって特異な過渡空気力を生じるのであって<sup>19), 20)</sup>、上記流れの類似性により、写真—4、写真—5の場合も同様の現象がみられるものと思われる。すなわち、ガストが作用

した直後に、前縁付近とそのいくらか後方に負圧の山と谷が発生し、渦の成長に伴い、この負圧の山と谷が後方へ移動するといった特異な圧力分布の変化を生じるものと思われる。その過程で、図—12の(b)~(d)に示した過渡揚力が形成されるものと考えられる<sup>21)</sup>。一方、翼理論によれば、翼がガストフロントを通過するとき、後縁から自由渦 (free vortex) が放出される。図—12(a)に示した翼の過渡揚力は、この渦の放出とこれが後方に流れ去る過程で形成されるものである。

なお、前記1:2矩形断面の過渡応答にみられる初期の大きい正の揚力も、上記偏平な充腹断面にみられた前縁剝離渦と同種の渦によってもたらされるものと思われる。その後、1:2断面の応答は、負の定常値に向かって緩慢な減少を示すが、一方、偏平断面では、より大きい定常値に向かって増加するため、両者の応答特性が全く異なるものと考えられる。

以上に記したように、偏平な充腹断面と翼にガストが作用したとき、それぞれ、前縁剝離渦の形成と後縁自由渦の放出があり、その後、前者は大きく成長し、後者は後方へ流される。これら別種の渦によって、緩慢な増加で特徴づけられる過渡揚力がもたらされるわけであるが、両者の応答は、定量的にはかなり異なることが明らかにされた。

## 6. 周波数応答

最後に、周波数応答について検討した結果を記す。ここでは、図—12に示した4種の断面の過渡応答をフーリエ変換して周波数応答を推算した。ただし、推算するにあたり、以下のような近似を行っている。すなわち、充腹断面の過渡応答に混入する後流渦による変動成分は、入力としてのガストとは無関係であるから、ノイズとみなしてよい。そこで、この変動成分を除去して過渡応答を次式で近似した。

$$\hat{L}(\tau) = \left[ 1 + \sum_j A_j \cdot \exp(-B_j \tau) \right] E(\tau) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $E(\tau)$  はヘビサイド単位関数であり、各断面に対する式(1)の係数は表—1に記すとおりである<sup>22)</sup>。

これらの近似応答曲線を図—12に細い実線で示す。既述のように、後流渦による変動成分を除去した充腹断面

注1) 写真—4と写真—5は  $\alpha=7^\circ$  に対する結果であり、対応する応答は非線形性を示す。文献19)のWagner問題に関する実験では、応答が線形~非線形の特徴を示す大小種々の有効迎角について流れを観察した結果、いずれにおいても、有効迎角の変化に基づく前縁剝離渦の発生と成長がみられることを確認している。つまり、微小な有効迎角における流れの本質的なものは、迎角が大きい場合でも保持されるわけであって、Wagner問題と類似した本実験でも、有効迎角の大小によらず、写真にみた前縁剝離渦の発生と成長が認められるものと考えられる。

注2) 白石ら<sup>15)</sup>は、周波数応答の形状を数種類のタイプに分類し、各タイプについて次の4つの条件を用い、式(1)あるいは式(2)のパラメーター  $A_j$  と  $B_j$  の存在領域を示すとともに、過渡応答の形状との対応を示している。つまり、周波数応答の実部と虚部について、①小さい  $k$  に対する虚部の符号、②大きい  $k$  に対する虚部の符号、③大きい  $k$  に対する実部の符号、といった3つの条件と、④周波数応答の絶対値について、 $k \neq 0$  における極大値の有無なる条件である。表—1のパラメーターは、この過渡応答の形状とパラメーターの関係参照して、試行計算によって定めたものである。



表一 近似計算の式(1)に用いた係数

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
AIRFOIL	-0.543	-0.653	0.196	0.15	1.0	4.0
B10	-1.41	0.41	—	0.22	0.60	—
B10+15	-1.33	0.33	—	0.20	0.80	—
B10+20	-1.40	0.40	—	0.30	0.80	—

の応答は、翼の応答と同様に小さい正值を示すが、ここでは便宜上、応答の初期値をゼロとして近似した。式(1)をフーリエ変換すると次式を得る。

$$H(k) / \frac{dC_L}{d\alpha} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\hat{L}(\tau)}{d\tau} e^{-ik\tau} d\tau = 1 + \sum_j \left[ A_j - \frac{A_j B_j}{B_j + ik} \right] \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $k = \omega b / U$  と  $\omega$  は、それぞれ調和的ガストの無次元振動数と円振動数を表わす。得られた推算値のうち、翼の結果を  $H(k) / (dC_L / d\alpha)$  として図-13(a)に示す。理論値として知られている Sears 関数も図中に記している。ただし、この理論値は、1/2 弦長点を時間の基準点に取った本来の Sears 関数ではなく、前縁を基準点に取った修正 Sears 関数<sup>21)</sup>である。図中、横軸と縦軸は、それぞれ式(2)の実部と虚部を表わす。

さて、ガストフロントにおける流速が所要値ほどのステップ的变化を示さず、そのため、翼の過渡応答の実測値と理論値との間にいくらかの差異があることは既述のとおりであるが、この差異が周波数応答の推算値にもたらす理論値との差異は、図にみるとおりである。 $k$  が 0.5 より大きくなると、両者の絶対値と位相角 ( $\tan^{-1} I_m / R_e$ ) の差異がともに顕著となり、 $k > 2$  では、推算

値の実部は負値を示すようになる。大きい  $k$  の範囲におけるこの推算値と理論値の実部の符号の差異と、過渡応答の実測値と理論値(図-12(a))にみた初期特性の差異との対応については、前頁の注2)の白石らの研究に記されている。図-13(a)の結果より、本装置で求めた過渡応答から精度よい応答計算値の得られる  $k$  の範囲は、 $k < 0.5$  であることがわかった。

図-13(b)は、4種の断面の推算値  $H(k)$  を示す。偏平な充腹断面と翼の過渡応答は、定性的には同様の特性を示すが、定量的にはかなり異なることを5.に記した。このことは、周波数領域においても同様に認められる。すなわち、両者は定性的には同様の特性を示すが、絶対値と位相角については、定量的にかなりの差異のあることが図よりわかる。たとえば、 $k = 0.5$  における充腹断面の位相角は、翼のその約2倍の値を示している。この位相角の差異は、充腹断面の過渡応答特性が翼のそれより緩慢であることと対応している(図-12)。なお、白石ら<sup>19)</sup>が得た1:2矩形断面の周波数応答は、図にみた偏平な充腹断面の応答と全く異なる特性を示すことを記しておきたい。

7. 結 論

橋梁主桁のガスト不規則振動を時間領域において推定する目的のため、特殊水路を用いて sharp-edged gust の発生を試み、幾何学的形状の単純な3種の偏平な充腹断面と翼について過渡揚力応答を測定した。さらに、ガストが作用するときの充腹断面模型まわりの流れの観察を行った。その結果、次のことが明らかにされた。

- (1) 本装置を検定したところ、おおむね良好な sharp-edged gust が得られることがわかった。
- (2) 翼の過渡揚力応答の実測値は、理論値として知られている Küssner 関数と比較的良好な一致を示した。
- (3) 偏平な充腹断面と翼の過渡揚力応答は、定性的には同様の特性を示すが、過渡特性と定常特性(揚力傾斜)については、定量的にかなり異なることがわかった。
- (4) sharp-edged gust が作用したときの充腹断面模型まわりの流れは、ガストに起因する前縁剝離渦の発生と成長で特徴づけられる。この渦によって、上記過渡特性の揚力が形成される。
- (5) 過渡揚力応答の実験値をフーリエ変換して周波数応答を推算したところ、偏平な充腹断面と翼の推算値は、定性的には同様の特性を示すが、絶対値と位相角については、定量的にかなり異なることがわかった。また、無次元振動数  $k < 0.5$  の範囲で、翼の推算値は、理論値として知られている Sears 関数と比較的良好な一致を示した。

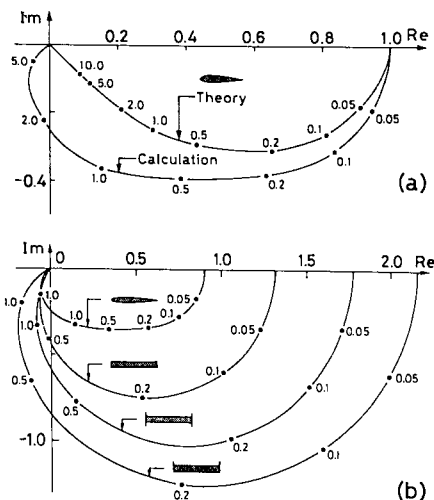


図-13 4種の断面の周波数応答(図(a):翼の推算値と理論値, 図(b):4種の断面の推算値)

謝 辞：本研究を行うにあたり，九州大学応用力学研究所の井上 進氏，九州産業大学工学部の亀井頼隆氏ならびに同構造工学研究室の大学院生と卒業研究生の支援を受けた。また，本研究の一部は，文部省科学研究費の援助によって行われた。ここに記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋耐風設計基準 (1976)・同解説，本州四国連絡橋公団，pp. 28, 1976.
- 2) Davenport, A. G. : The application of statistical concepts to the wind loading of structures, Proc. of ICE, Vol. 19, pp. 449~472, 1961.
- 3) Davenport, A. G. : The response of slender, line-like structures to a gusty wind, Proc. of ICE, Vol. 23, pp. 389~408, 1962.
- 4) Davenport, A. G. : Buffeting of a suspension bridge by storm winds, J. ST Div., Proc. of ASCE, Vol. 88, No. ST 3, pp. 233~268, 1962.
- 5) Scanlan, R. H. and Gade, R. H. : Motion of suspended bridge spans under gusty wind, J. ST Div., Proc. of ASCE, Vol. 103, No. ST 9, pp. 1867~1883, 1977.
- 6) Scanlan, R. H. : The action of flexible bridges under wind, II : buffeting theory, J. Sound and Vibration, Vol. 60, No. 2, pp. 201~211, 1978.
- 7) Holmes, J. D. : Prediction of the response of a cable stayed bridge to turbulence, Proc. of 4th Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Cambridge Univ. Press, pp. 187~197, 1975.
- 8) Okubo, T. et al. : Field observation of aerodynamic behaviour of long-span bridges, Proc. of 5th Int. Conf. Wind Engineering, Pergamon Press, pp. 825~839, 1979.
- 9) Walshe, D. E. and Wyatt, T. A. : Measurement and application of the aerodynamic admittance function for a box-girder bridge, Proc. of 6th Int. Conf. Wind Engineering, Elsevier Science Publishers, Vol. 2, pp. 211~222, 1983.
- 10) 伊藤 学，ほか：併用吊形式橋梁等の耐風性に関する研究，東大橋梁研究室報告，BEL Report No. 74201, 1974.
- 11) Shinozuka, M. : Simulation of multivariate and multi-dimensional random processes, J. Acoustical Society of America, Vol. 49, No. 1, pp. 357~367, 1971.
- 12) Beliveau, J. G. et al. : Motion of Suspension bridge subject to wind loads, J. ST Div., Proc. of ASCE, Vol. 103, No. ST 6, pp. 1189~1205, 1977.
- 13) 篠塚正宣，ほか：風の乱れによる吊橋の応答解析 (その3)，本州四国連絡橋耐風研究会資料，1-5, 1975.
- 14) Konishi, I. et al. : Aerodynamic response characteristics of bridge structures, Proc. of 4th Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Cambridge Univ. Press, pp. 199~208, 1975.
- 15) 白石成人，ほか：風の乱れに起因する構造物の非定常空力特性に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第328号，pp. 19~30, 1982.
- 16) 吉村 健，ほか：長大橋梁のガスト応答に関する基礎的研究 (第1報)——sharp-edged gustの発生装置について——，九州大学応用力学研究所報，第56号，pp. 1~10, 1982.
- 17) 吉村 健，ほか：橋梁断面のガスト応答に関する研究 (第2報)——過渡揚力応答の測定——，九州大学応用力学研究所報，第58号，pp. 23~28, 1983.
- 18) 吉村 健，ほか：橋梁断面のガスト応答に関する基礎的研究，風工学シンポジウム論文集，pp. 295~302, 1982.
- 19) 吉村 健・中村泰治：インディシャル応答による橋梁断面のねじりフラッタの研究，土木学会論文報告集，第264号，pp. 33~40, 1977.
- 20) 吉村 健・中村泰治：インディシャル運動時の橋梁断面模型まわりの流れ観測と表面圧力の測定，土木学会論文報告集，第280号，pp. 23~30, 1978.
- 21) Giesing, J. P. et al. : Sears function and lifting surface theory for harmonic gust fields, J. Aircraft, Vol. 7, No. 3, pp. 252~255, 1970.

(1984. 10. 25・受付)