

角状構造断面の空力渦励振に関する研究

白石 成人・松本 勝・白土 博通
松村 修一

AN AERODYNAMIC STUDY ON VORTEX INDUCED OSCILLATIONS OF BLUFF BODIES

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO, Hiromichi SHIRATO*
and *Shuichi MATSUMURA*

Synopsis

This study is concerned with the vortex-induced oscillations of bluff bodies. A series of wind tunnel tests was conducted for some basic bridge deck sections and for some simply modified models of suspension bridge towers in order to obtain the aerodynamically improved structural sections. The mechanism of interaction between bodies and fluid around bodies is studied by means of the flow visualization in water flume. Consequently experimental results obtained here indicate that the response characteristics of bridge deck sections are strongly governed by the depth/width ratio and the shape of leading edge and both of factors and furthermore vortex-induced oscillations of tower of suspension bridge are sensitively dependent on the lateral distance between two struts.

1. ま え が き

近年、橋梁の長大化に伴ない従来まで問題とされていなかった動的諸問題が生じし、特に風の作用による橋梁構造物の不安定性が重要視されてきた。そこで、耐風安定性について多くの実験的研究がなされてきたが、その結果、フラッター振動現象等の破壊的な大振幅空力振動現象に対しては比較的安全な断面形状が採用されるに至っている。これに対して、パフエッティング、渦励振動など低風速で発生する振動は構造物を直接破壊に至らしめることはないが、これらの振動を発現する風速の発生頻度が高いことより、かなりの頻度で発生するものと考えられ、部材の疲労や車両の走行性に悪影響を及ぼすものと考えられる。

渦励振動現象は従来より、流れの中におかれた物体の後流に生じる周期渦列に起因する空力安定現象とされてきた。つまり物体の固有振動数が物体後流の周期渦の放出周波数に一致するとき渦励振動が発現し、その発現風速は断面固有に決定されるとするものである。これに対して最近、中村¹⁾、小林²⁾等は断面の振動に伴なって物体の前縁より放出される剥離渦が物体に励振力を及ぼすものであり、振動現象と後流に形成される渦列とは直接関係がないとの報告を行っている。また白石・松本³⁾は鉛直たわみあるいはねじれの渦励振の生じる条件として、断面の後縁近傍において断面の振動に伴なって断面前縁からの剥離渦と断面後縁に生じる二次的な渦との一体化を指摘している。ところでこのような渦励振の発生機構を考えた場合、これらの剥離渦や二次渦が物体の幾何学的形状変化によりどのように変化し、その結果、渦励振応答特性にどのように変化し、その結果、渦励振応答特性にどのような影響を及ぼすかを調べることは渦励振に対してより有利な構造断面を求める上で非常に重要であり、従来より多くの研究がなされている。例えば、G. H. Toebes, P. S. Eagleson⁴⁾は後縁形状を変化させた4種類の断面形状について渦励振特性の変化を報告しており、M. E. Greenway, C. J. Wood⁵⁾は後縁の切り取り角度を変化させることにより、断面後流の放出渦による風洞内の音圧レベルが変化する報告をしている。このように渦励振の発生機構あるいは物体の幾何学的形状変

化と渦励振に対する安定性の関連については、数多くの研究がなされているものの、未だに未知の部分が多く、定性的にその傾向を明らかにするには至っていないのが現状である。

本研究では、このような点に立って、まず、橋梁基本断面の前縁、後縁の形状を数種類に変化させるとともに、桁高幅員比をも変化させた断面について風洞実験及び水槽実験を行ない、その渦励振応答特性を評価し、渦励振に及ぼす断面の幾何学的形状変化の影響を調べるとともに、渦励振発生機構についても考慮を加えるものである。次に吊橋主塔についても低風速でかなりの振動が発現したとの報告がなされており、吊橋主塔を2本の並列角柱とみなし、2本の角柱が同位相で振動すればたわみ振動、逆位相で振動すればねじれ振動と考え、2本の角柱の形状、間隔及び迎角を変化させ、風洞実験及び水槽実験を通じてその渦励振特性に考察を加えるものである。

2. 渦励振に及ぼす橋梁基本断面の幾何学的形状変化の影響

2.1 風洞実験

本研究で使用した橋梁基本断面図を Fig. 1 に示す。なお図で示すように前縁、後縁の形状を6種類に変化させ、各々の断面を MODEL A～MODEL F とする。また幅員Bは300 mm とし、桁高Dを25 mm、37.5 mm、60 mm と変化させることにより桁高幅員比 $D:B$ を1:5、1:8及び1:12の3種類とし、合計18種類の断面に対して実験を行なった。MODEL A は最も基本的な断面で矩形断面、MODEL B は逆梯形断面、MODEL C は矩形断面の上部及び下部に桁高と同じ長さのブラケットを取り付けたものであり、MODEL D は同じく上部のみにブラケットを取り付けた断面である。またMODEL E は断面の両端を半円形にしたものであり、MODEL F は偏平六角断面である。なお、使用した風洞は京都大学工学部土木工学教室内に設置されたエッフェル型風洞であり、風速は0～20 m/sec にわたり連続的に変化させることができる。測定部の高さは1.0 m、幅2.5 m、気流の流下方向約8.0 m である。使用機器は以下のとおりである。

ベッツ型マノメータ (理化精機工業 K. K.)

動歪計 (新興通信 K. K. 6008F 型)

D. C アンプ (三栄測器 K. K. 6L5 型)

ローパスフィルター

(NF 回路ブロック K. K. E320 型)

ペン書きレコーダ

(渡辺測器製作所 K. K. WTR 281 型)

模型は風洞内に鉛直にバネ支持し、たわみ、ねじれの2自由度で実験を行なったが、たわみ、ねじれの渦励振発現領域が接近し、振動相互間の干渉が起ころ、ねじれ振動が抑えられた可能性があるため、桁高幅員比1:5の断面についてはねじれ1自由度でも実験を行なった。また、同一の桁高幅員比を有する断面を用いた一連の実

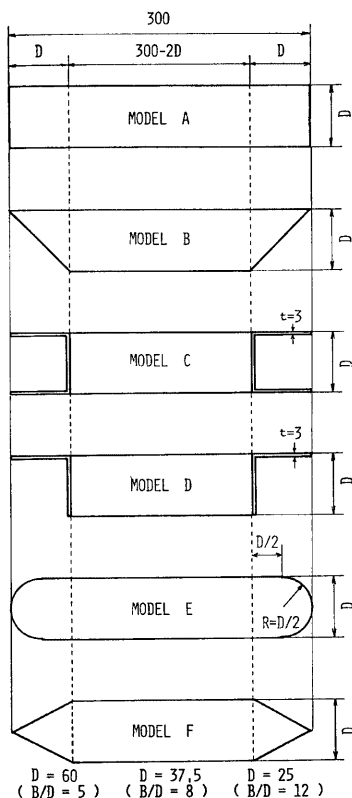


Fig. 1. Cross Section of Models.

Table 1. Strouhal Number.

MODEL	Strouhal Number	MODEL	Strouhal Number	MODEL	Strouhal Number
5-A	0.095	8-A	0.083	12-A	0.049
5-B	0.104	8-B	0.077	12-B	0.054
5-C	0.097	8-C	0.087	12-C	0.060
5-D	0.102	8-D	0.075	12-D	0.054
5-E	0.150	8-E	0.123	12-E	—
5-F	0.226	8-F	0.207	12-F	—

験に対しては振動数、質量、質量慣性モーメント及び構造減衰等の振動物理量をできるだけ同一の値になるように調整を行った。迎角に関しては、本州四国連絡橋公団耐風設計基準では、耐風安定性の動的照査を行わねばならない迎角の範囲として $\pm 7^\circ$ と規定しており、また、従来よりの報告によれば、この程度の迎角範囲では多くの場合、迎角の増加に伴って渦励振に対する不安定性が増加する傾向にあること、さらに、桁高幅員比が 1:8 及び 1:12 の断面では迎角 0° において渦励振が発現しなかったことより、断面形状変化に対する渦励振応答特性を応答振幅の点で評価することができなかったため、設定迎角は 7° とした。また実験はすべて一様流中で行った。さらに、各断面について熱線風速計 (Model 21-1211, 21-1711, 21-1311 日本科学工業 K. K.) を用いて断面後流の変動風速を測定することにより、D.C. アンプ (前出)、相関確率分析器 (SAI-42 SAICOR 社)、及びフーリエ変換器 (SAI-470 SAICOR 社) を通してパワースペクトルを求め、各風速における断面後流の卓越周波数を読みとり、断面の Strouhal 数を求めた。得られた結果を Table 1 に示す。

2.2 風洞実験結果

上記の風洞実験より得られた結果を Fig. 2～Fig. 7 に示す。この図は各々18種類の断面について得られた風速—渦励振応答幅図を桁高幅員比が同一のものを、たわみ振動、ねじれ振動にわけて示してある。なお、図中に示す矢印の位置は strouhal 数の逆数により表わされる渦励振発現無次元風速である。また Fig. 3 は桁高幅員比が 1:5 の断面のねじれ振動の風速—応答幅図で、この図はねじれ 1 自由度に拘束した実験結果であり、他のものはすべてたわみ、ねじれ 2 自由度渦励振応答測定結果である。

まず桁高幅員比が 1:5 の断面について考察を加える。Fig. 2 より MODEL A, MODEL B, MODEL C, MODEL D のたわみ渦励振無次元発現風速は 9 前後である。この無次元発現風速と Strouhal 数との関連を調べてみると、MODEL A～D の Strouhal 数はほぼ 0.1 で、その逆数である V_{cr} とはほぼ一致している。これに対してねじれ振動については MODEL B と MODEL D が無次元風速 6 程度、MODEL A と MODEL C が 7 前後で渦励振が発現しており、ねじれ渦励振の発現無次元風速はたわみ振動のそののほぼ $2/3$ となっていることがわかる。このことより MODEL A～D は剥離型の渦励振³⁾であると判断される。剥離型の渦励振について述べると、まず Fig. 8 で示すように、たわみ振動の場合、物体が上方に速度をもっている場合、物体前縁の下側から剥離渦が発生すると同時に後縁上側から振動による相対速度に起因すると考えられる二次的な渦 (後縁二次渦) が発生する。逆に物体が下方に速度をもっている場合は前縁上方から剥離渦、後縁下方から後縁二次渦が発生することになる。ねじれ振動の場合は図のように前縁剥離渦が下側から発生する場合は後縁二次渦も下側から発生するというように、たわみ振動の場合と前縁剥離渦の発生位置に対する後縁二次渦の発生位置が異なっている。このような渦の発生機構から考えると、たわみ振動の場合、前縁剥離渦が振動 1 周期後、あるいは 2 周期後、3 周期後、……に後縁に流下して後縁二次渦と一体化することによって渦励振が発生すると考えられる。また、ねじれ振動の場合は、前縁剥離渦が振動 0.5 周期後、あるいは 1.5 周期後、2.5 周期後……、に後縁に流下して後縁二次渦と一体化すると考える。このような観点から本実験結果をみると、MODEL A～D ではたわみとねじれの渦励振発現無次元風速の比はほぼ

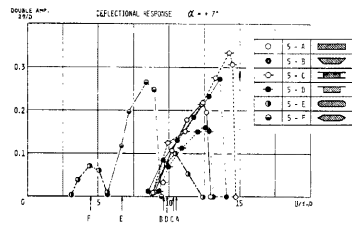


Fig. 2. Velocity-Amplitude Curve.

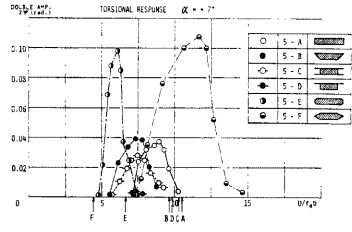


Fig. 3. Velocity-Amplitude Curve.

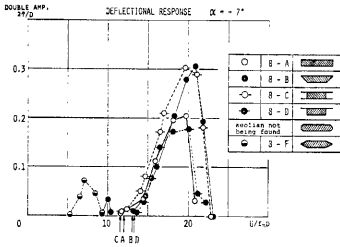


Fig. 4. Velocity-Amplitude Curve.

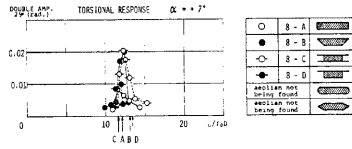


Fig. 5. Velocity-Amplitude Curve.

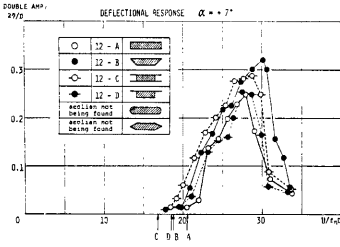


Fig. 6. Velocity-Amplitude Curve.

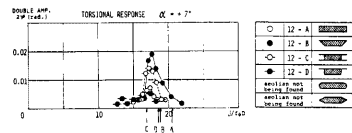


Fig. 7. Velocity-Amplitude Curve.

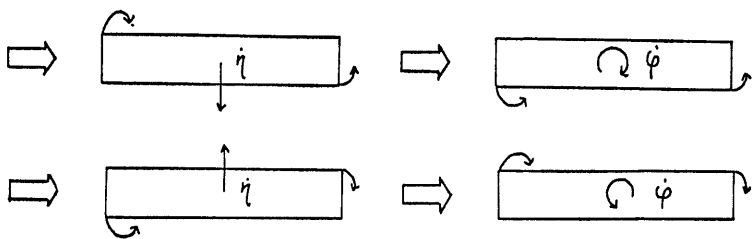


Fig. 8. Generating System of Vortex due to Oscillation.

3:2であり、たわみ振動では前縁剝離渦が振動1周期で後縁へ流下し、ねじれ振動では振動1.5周期で後縁へ流下したものと思われ、剝離型の渦励振であると考えられる。また MODEL B, D と MODEL A, C のねじれ渦励振の発現無次元風速が少し異なっており、MODEL B, D においては幅員が上側と下側で異なっているためと思われるが、このように剝離型の4断面についてもさらに MODEL A, C と MODEL B, D に分類することができる。また MODEL F については、たわみ渦励振が無次元風速で6、ねじれ渦励振が7程度というようにほぼ同じ無次元風速域で発生しており、前縁剝離渦というよりむしろ後縁近傍の流れの状態が支配的と考えられる付着型³⁾であると判断される。次に MODEL E はたわみ渦励振が無次元風速で5、ねじれ渦励振が3程度で発現しており、剝離型に付着型にも属さない特殊な断面であると考えられる。各断面について最大応答振幅を比較すると、たわみについて MODEL D, MODEL B, MODEL E の順に大きく、次に MODEL A, MODEL C となり、MODEL E は小さい振幅を示している。ねじれについては、MODEL E, MODEL F が大きく MODEL A, B, D はほぼ同じ小さい振幅であり、MODEL C は渦励振が発現していない。このことから桁高幅員比が1:5の断面では MODEL F が最も危険な断面と判断され、剝離型の4断面については、やはり MODEL A, C と MODEL B, D で若干振幅が異なり MODEL B, D の方が少し大きい振幅を示している。

Fig. 4～Fig. 7 には桁高幅員比が1:8及び1:12の断面の実験結果が示してあるが、ねじれ応答に関しては渦励振の発現風速域がたわみ渦励振発現風速域と接近していることより、ねじれ渦励振が抑えられた可能性があるため、発振風速、及び最大応答振幅を直接評価することは難しいが、MODEL A～D についてはやはり、ねじれの渦励振発現風速がたわみ渦励振発現風速より低い傾向が現われている。また最大応答振幅については、各断面ともに桁高幅員比が小さくなるにつれて、つまり偏平になるにつれて、減少する傾向を示しており、MODEL F に関しては、桁高幅員比が1:8になるとねじれ渦励振は発現せず、たわみ渦励振も非常に小さくなり、1:12になると渦励振が発生しなくなる。また MODEL E については、桁高幅員比が1:8, 1:12の断面ではまったく渦励振が発生しない。このように MODEL E, F については桁高幅員比によって、その渦励振特性が大きく変化することがわかり、渦励振の発生する限界桁高幅員比なるものが存在すると思われ、このような断面形状を橋梁断面として用いる場合には、許す限り偏平にすることが望ましいと判断される。また MODEL A～D については、各々の桁高幅員比について MODEL B, D の方が MODEL A, C よりも大きな振幅を示しており、上下の幅員の差が影響しているものと思われるが、MODEL A と MODEL C、及び MODEL B と MODEL D の差はあまり顕著なものではない。

2.3 水槽実験

風洞実験より測定されたたわみ及びねじれ渦励振の発現領域における断面まわりの流れの可視化を行なうために水槽実験を行った。対象とした断面は桁高幅員比1:5の MODEL A～MODEL F の6種類の断面である。また実験に使用した水槽は幅95 cm、深さ60 cm、長さ500 cm であり、水中にはトレーサーとしてアルミニウム微粉末が混入されており、直流モーターにより任意の速度で動く台車に、たわみ、ねじれ2自由度加振装置及び模型が取り付けられている。また模型は桁高10 mm、幅員50 mm、長さ250 mm であり、写真撮影のため表面は黒色塗装されている。撮影にはモータードライブ装置 (Nikon MD-2) 付 35 mm 一眼レフカメラ (Nikon F2) を使用した。なお1秒間あたりの撮影コマ数は4コマである。

本研究において風洞実験と水槽実験との間には strouhal 数及び Reynolds 数をできる限り一致させることが望ましい。岡島ら⁶⁾によれば、矩形断面柱の strouhal 数は $Re > 10^4$ では Reynolds 数の変化が strouhal 数に与える影響は比較的小さいものの、 $Re < 10^4$ では Reynolds 数の変化によって敏感に変化することが報告されている。本研究では、風洞実験における Reynolds 数はほぼ $5 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ の範囲であるのに対して、水槽実験においてはおよそ 5×10^2 であり、水槽実験における strouhal 数は Reynolds 数の影響を受けているものと思われる。しかし、物体の振動により誘起される渦は、物体の後流に発生するカルマン渦列とは異質なものと考えられ、風洞実験と水槽実験の間には Reynolds 数に差があるものの、物体周囲の流れの

パターンについては、風洞実験と水槽実験の間にある程度の対応が可能と思われる。

2.4 水槽実験結果

まずたわみ渦励振が発生している領域の流れの様子について述べる。Fig. 9 には MODEL A の無次元

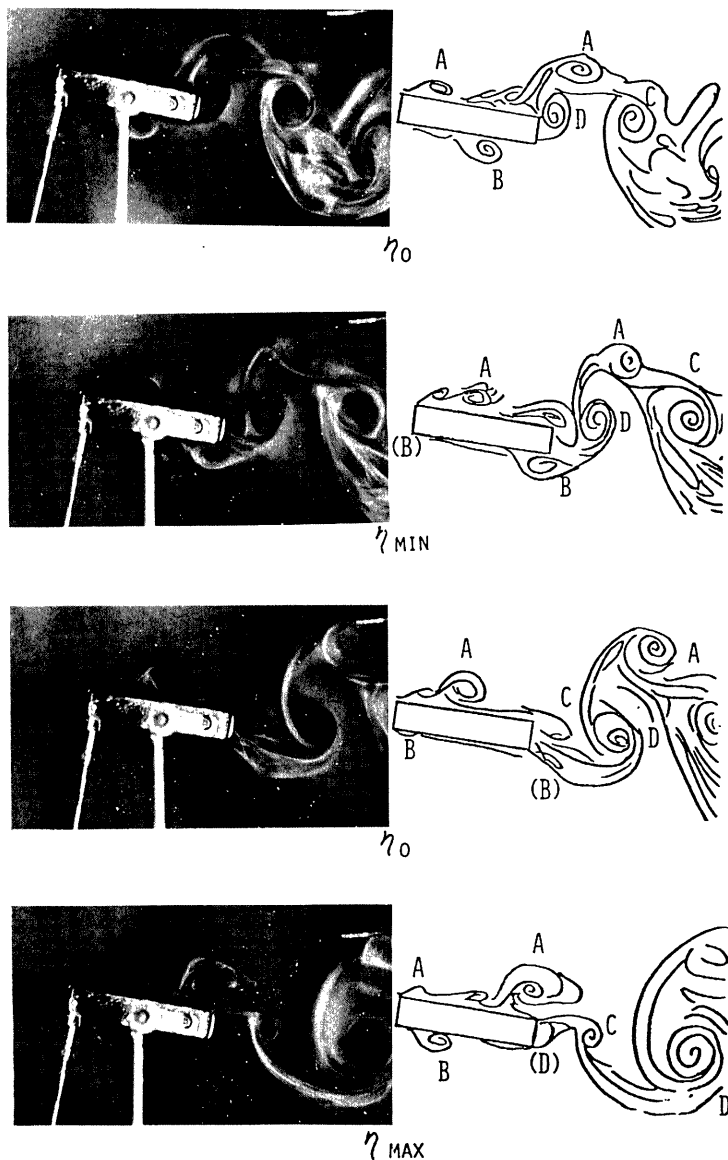


Fig. 9. Flow Pattern.

流速 $V_\eta = 11.899$, 無次元振幅 $2\eta/D = 0.6$ における流れの写真及び模式図が示してあるが, 物体の両側面で前縁剥離渦の生成, 流下が認められ, それぞれ振動 1 周期ではば後縁に到達しているものと思われるが, 下側の前縁剥離渦は以後消滅しているようである。また後縁二次渦の発生も両側面で認められるもの, 前

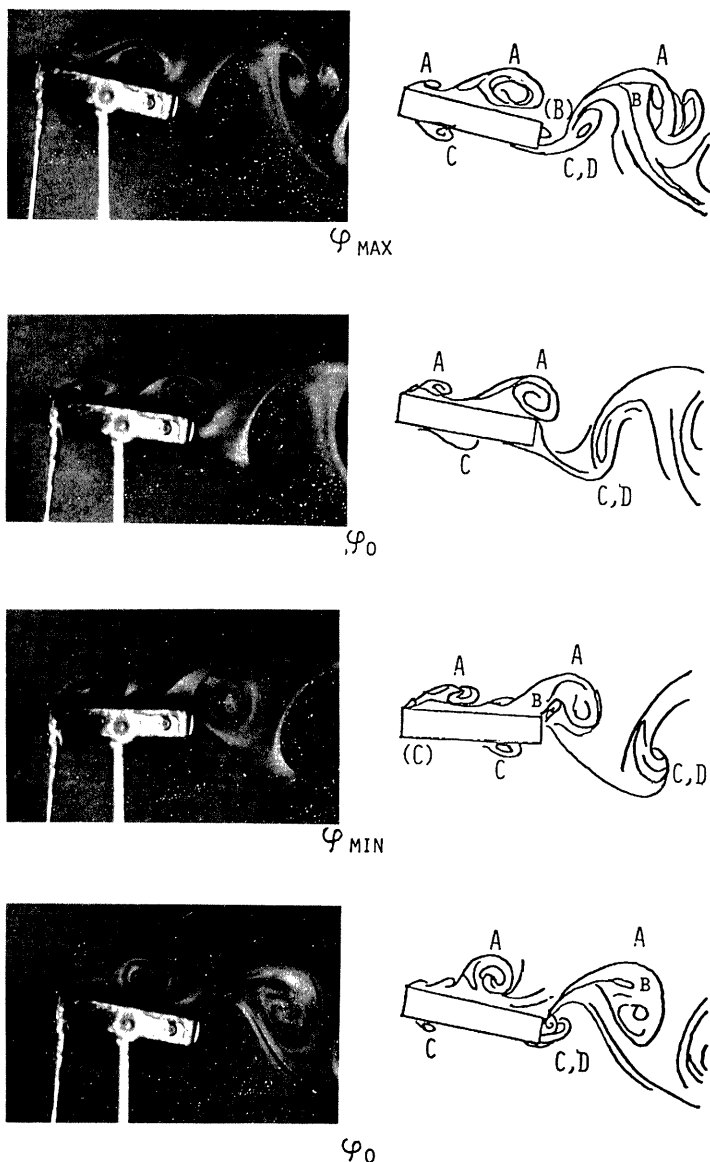


Fig 10. Flow Pattern.

縁剝離渦の到達を待ちきれずに先に後流へ流下しており、前縁剝離渦との一体化は行なわれていない。したがって後流の渦パターンには下側の後縁二次渦、上側の前縁剝離渦及び後縁二次渦の3者が現われている。MODEL B~MODEL F については紙面の都合上、写真には示していないが、その様子を述べると、まず MODEL C は MODEL A とほぼ同じ流体パターンを示し、MODEL B は断面上側(幅員の長い側)のみに前縁剝離渦及び後縁二次渦が発生し、MODEL D については前縁剝離渦は両側面で発生し、後縁二次渦は上側でのみ発生したものの、いずれの場合も MODEL A と同様に前縁剝離渦は振動1周期で後縁に流下していき、後縁二次渦はそれよりも先に流下している。ところで風洞実験における渦励振応答結果と、水槽実験による同一無次元流速での流体パターンとの対比は、加振振幅を応答測定値と同一にした場合に正確な対応づけが可能になると考えられるが、水槽実験においては物体の振動により発生される渦を明確に把握できるように、風洞実験応答測定値のほぼ2倍の振幅で加振を行っている。そこで、MODEL A~MODEL C について前縁剝離渦と後縁二次渦の一体化が認められなかったことが上述のようなことに起因しているかどうか調べるために、加振振幅を小さくして風洞実験値に近づけて実験した結果、以然、渦の一体化は認められないものの両者が接近する傾向にあり、風洞実験において渦励振発現風速域では、前縁剝離渦と後縁二次渦の一体化が行なわれているものと思われる。MODEL E についても前縁剝離渦が認められ、やはり振動1周期で後縁に流下していく。また後縁二次渦も発生し、前縁剝離渦の流下を待たずに後流へ流下しており、MODEL A~D と同様、剝離型の傾向を示している。MODEL F については前縁剝離渦は認められず、後縁近傍に剝離渦及び二次渦が発生しており、それが後流に流下している。

次にねじれ渦励振が発生している領域の流れの様子について述べる。Fig. 10 には MODEL A の無次元流速 $V_p=7.485$, $2p=0.182$ rad における流れの写真及び模式図を示してあるが、物体の両側面で前縁剝離渦が発生しており、振動1.5周期後に後縁に到達し、後縁二次渦と一体化して後流に流下している。また MODEL B~MODEL F に関しては写真を示していないが、MODEL B, MODEL C, MODEL D については若干の差はあるものの、MODEL A と同様に前縁剝離渦が発生、流下し、振動1.5周期後に後縁に到達し、後縁二次渦と一体化しているようである。また MODEL E についても、MODEL A とほぼ同じような流体パターンを示している。MODEL F については、たわみ渦励振における流体パターンと同様に前縁剝離渦は発生せず、後縁部で後縁剝離渦及び二次渦が発生し後流へ流下している。以上より、風洞実験結果から剝離型と判断された MODEL A~D は、前縁剝離渦が後縁に到達するまでに要する時間は、たわみ渦励振の場合は振動1周期、ねじれ渦励振の場合は振動1.5周期であり、風洞実験におけるたわみとねじれの渦励振発現無次元風速の比が3:2であることによく一致しており、4断面については剝離型に属することが明らかになった。また MODEL E については、水槽実験結果だけでは剝離型と判断されるが、風洞実験結果をも考慮すると剝離型とは判断しにくく、さらに詳しい研究が必要と思われる。また MODEL F については、風洞実験、水槽実験の両実験より明らかに付着型であることが認められた。

3. 渦励振に及ぼす吊橋主塔の幾何学的断面形状変化及び支柱間隔変化の影響

3.1 風洞実験

本研究で使用した吊橋主塔断面を Fig. 11 に示す。なお MODEL TA は現実の吊橋主塔により近く再現した二次元モデルであり、2本の支柱を端板に剛結し、支柱間の中点をねじれ中心とすることより、たわみ、ねじれ振動実験を行った。また MODEL TC は MODEL TA における隅切をなくした断面であり、MODEL TB は MODEL TA の外側の突起部を除いた断面で、2本の支柱(矩形断面)の間隔を変化させて実験を行った。また実験はいずれの断面についても、たわみ、ねじれ2自由度で、一様流中で行った。迎角については、MODEL TA は0°, 3°, 5°, 7°の4種類に変化させて実験を行い、MODEL TB, MODEL TC は0°にセットした。なお振動物理量については、MODEL TB で支柱間隔を変化させた場合の質量慣性モーメント等、各断面、同一にするのが困難なものを除いて、できるだけ同一になるように調整した。ま

た応答検出装置，風速測定装置等は2.1で述べたものとすべて同一である。

3.2 風洞実験結果

風洞実験より得られた渦励振応答測定結果を Fig. 12 ~ Fig. 17 に示すが，まず Fig. 12 及び Fig. 13 は，それぞれ MODEL TA の迎角変化に対するたわみ，ねじれ渦励振応答測定結果を示すものである。たわみ，ねじれとともに迎角の変化によらず発振風速は一定であり，ねじれについては2つの応答ピークをもっている。これに対してたわみ渦励振の高風速側のピークは，ねじれ渦励振の低風速側のピークと同時に発振したものであり，その振動数もねじれの固有振動数が卓越しており，ねじれ振動の中心がずれたために現れたものと判断されるため，たわみ渦励振は低風速側の応答のみであると考えられる。次に最大応答振幅に関しては，たわみ渦励振では迎角の変化による差はあまり見られず，ねじれ渦励振については迎角が小さいほど大きな振幅を示しており，橋軸に垂直に風が作用したとき最も危険であると判断される。

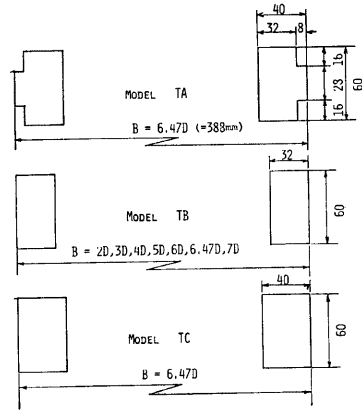


Fig. 11. Cross Section of Models.

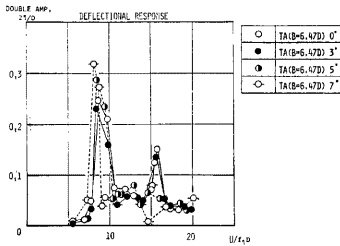


Fig. 12. Velocity-Amplitude Curve.

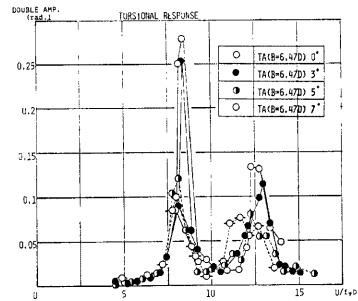


Fig. 13. Velocity-Amplitude Curve.

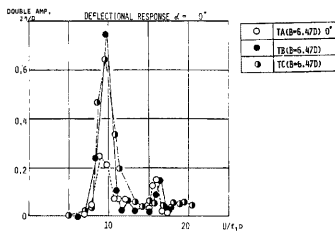


Fig. 14. Velocity-Amplitude Curve.

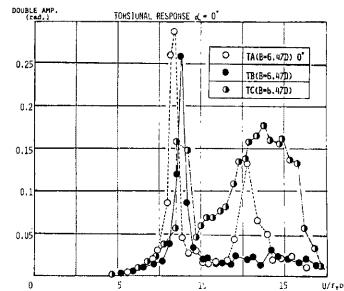


Fig. 15. Velocity-Amplitude Curve.

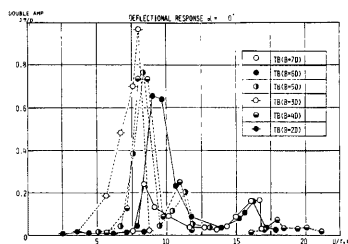


Fig. 16. Velocity-Amplitude Curve.

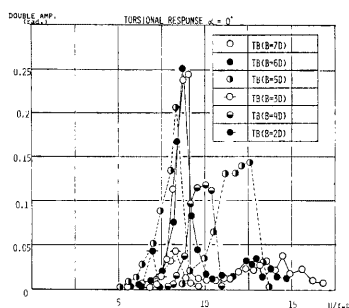


Fig. 17. Velocity-Amplitude Curve.

Fig. 14 及び Fig. 15 は、主柱の断面形状を3種類に変化させた場合のたわみ及びねじれ渦励振応答測定結果を示したものである。たわみ、ねじれともに渦励振発現風速の断面形状変化による差は認められないものの、たわみ渦励振において MODEL TA が他の2つの形状に比べて、その最大応答振幅が非常に小さく、隅切りの効果が現われている。これに対して、ねじれ渦励振については隅切りの効果は現われておらず、MODEL TA と MODEL TB はほぼ同じ傾向を示しており、また MODEL TC は広範囲の風速域で渦励振が発生している。

Fig. 16 及び Fig. 17 は、MODEL TB を対象に、主柱間隔を変化させることによる渦励振応答特性の差を示す図である。たわみ渦励振については主柱間隔が大きくなるにつれて、発振風速が高くなるとともに、最大応答振幅が減少する傾向にあり、主柱間隔を大きくする方が安定であると判断される。また、ねじれ渦励振については、桁高主柱間隔比 (Fig. 11 の D:B) が 1:5 の場合、2つの応答ピークをもっており、桁高主柱間隔比が 1:2 の渦励振から桁高主柱間隔比 1:5 における高風速側の渦励振までは、主柱間隔の増加に伴ない発振風速が高くなっており、また桁高主柱間隔比 1:5 における低風速側の渦励振より桁高主柱間隔比 1:7 の渦励振についても、主柱間隔の増加により発振風速が高くなっているが、桁高主柱間隔比が 1:5 以外の場合も、減衰等を変化させれば2つの応答ピークをもつ可能性があり、その場合、2つの渦励振応答の発振風速はそれぞれ、主柱間隔の増加に伴ない高くなるものと考えられる。また最大応答振幅については、質量慣性モーメント、減衰等が主柱間隔によって差があるため評価は難しいが、単純にその大きさを比較すれば、たわみ渦励振の場合とは逆に主柱間隔の増加に伴ない、増加する傾向が見られ、たわみ、ねじれ渦励振の両方を考慮に入れた場合、主柱間隔を大きくする方が安定であると断定できない可能性がある。

3.3 水槽実験

MODEL TB (桁高主柱間隔比 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7) の5種類を対象に、風洞実験より測定されたたわみ及びねじれ渦励振の発現領域における断面まわりの流れの可視化を行なうために、水槽実験を行った。水槽実験概要は2. 3において記述したものと同様である。実験使用模型は桁高 12 mm, 幅員 6.4 mm の角柱2本を桁高主柱間隔比が 1:3 より 1:7 のそれぞれに等しくなるように透明の亚克力製端板に固定し、表面を黒色塗装したものである。

3.4 水槽実験結果

たわみ渦励振が発生している領域の流れの様子について、一例として Fig. 18 に MODEL TB (桁高主柱間隔比 1:5) の無次元流速 $V_{\eta}=8.235$, 無次元振幅 $2\eta/D=0.833$ における流れの写真及び模式図を示しているが、前柱より発生した渦が振動1周期で後柱に到達し、後柱より生じた渦と一体化して後流に流下している。他の桁高主柱間隔比のたわみ渦励振もこれとほぼ同じ流体パターンを示しており、したがって、た

わみ渦励振発現風速は主柱間隔が広がるにつれて高風速側へ移行するものと考えられ、風洞実験結果と一致している。次にねじれ渦励振が発生している領域の流れの様子について一例として、Fig. 19 に MODEL TB (桁高主柱間隔比 1 : 5) の無次元流速 $V_\varphi = 8.170$, $2\varphi = 0.314 \text{ rad}$ における流れの写真及び模式図を示

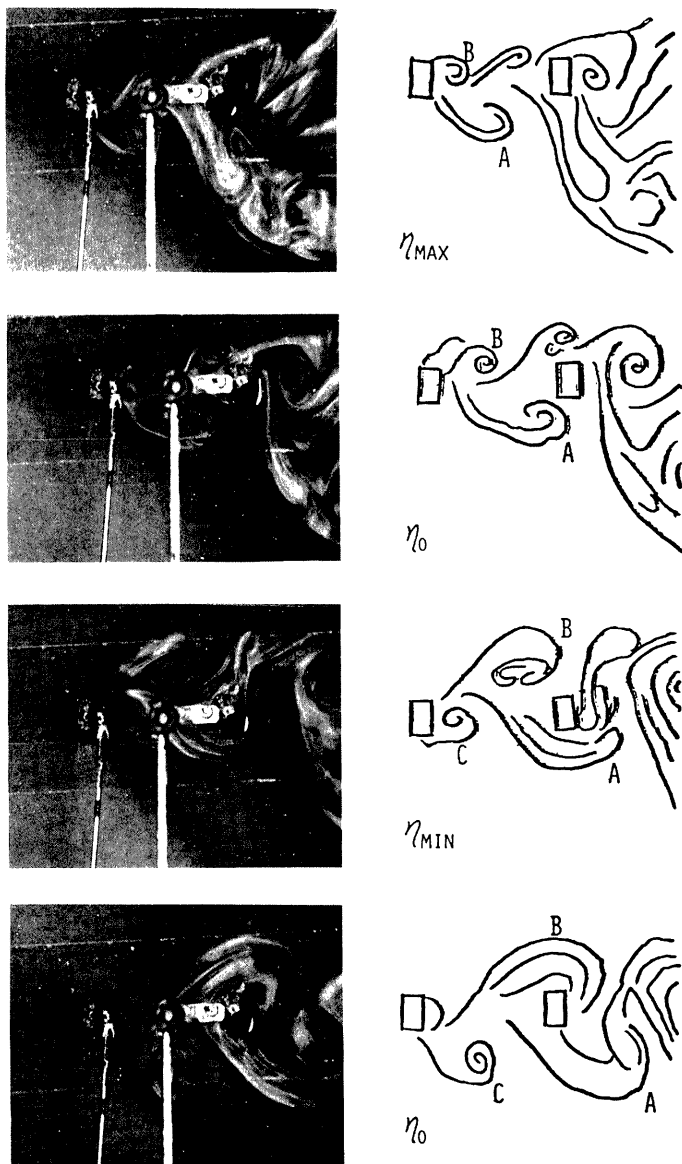


Fig. 18. Flow Pattern.

してあるが、前柱より発生した渦が振動1.5周期で後柱に到達し、後柱より生じた渦と一体化しているものと判断される。後柱での渦の一体化を行なうには、振動0.5周期であってもよく、風洞実験で桁高主柱間隔比が1:5の場合、ねじれ渦励振の応答ピークが2つ存在し、また主柱間隔の増加に伴って発振風速が増

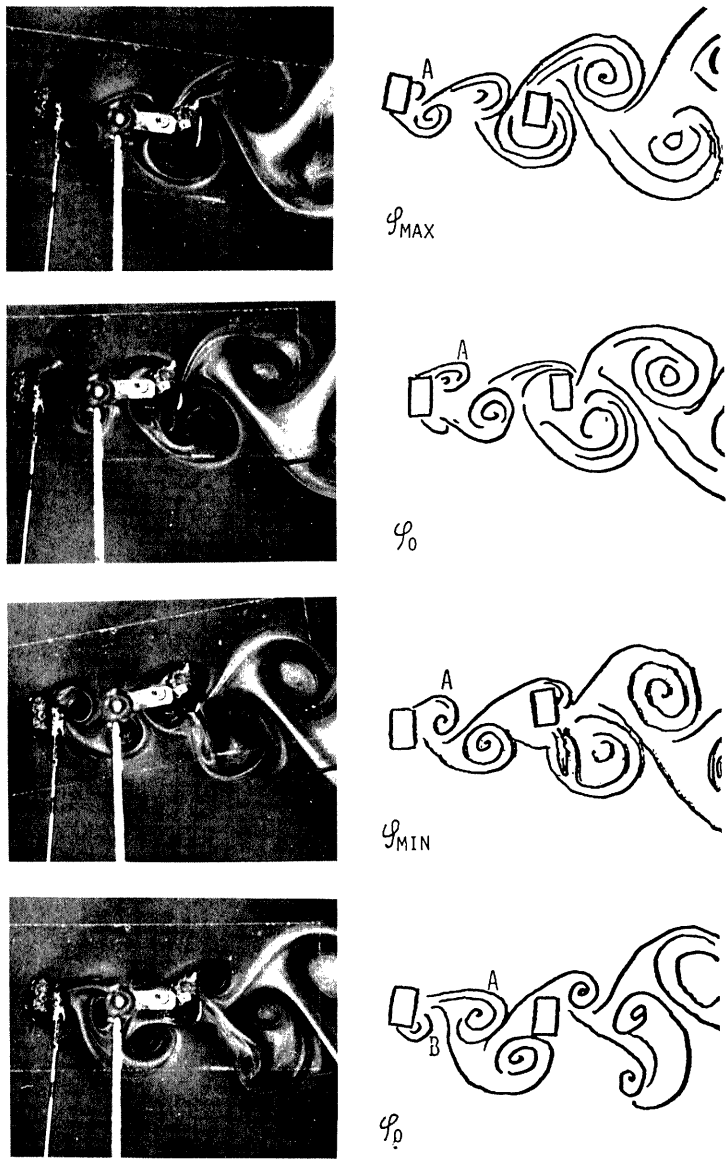


Fig. 19. Flow Pattern.

加する2つの組が存在したことも、このように渦の流下時間ということを考慮すれば説明づけるものと思われる。

4. む す び

本研究において、橋梁基本断面及び吊橋主塔の幾何学的断面形状を変化させて、風洞実験及び水槽実験を行い、渦励振に及ぼす幾何学的断面形状変化の影響及び渦励振の発生機構についても考察を加えたが、その結果得られた結論を以下に列挙する。

橋梁基本断面の幾何学的断面形状変化の渦励振に及ぼす影響について

(1) MODEL A, MODEL B, MODEL C, MODEL D はたわみとねじれの渦励振発現無次元風速の比がほぼ3:2であり、前縁で発生した剥離渦がたわみでは振動1周期、ねじれでは振動1.5周期で後縁に到達し、後縁二次渦と一体化しているものと判断された。したがって、これら4種類の断面は剥離型とみなすことが可能であり、さらに発現風速、応答振幅等から、MODEL A, C と MODEL B, D の2つのグループに分類できるものと思われ、後者のグループの方が渦励振に対して危険な断面であると判断された。

(2) MODEL E は水槽実験においては前縁剥離渦の発生が認められたものの、風洞実験結果からは剥離型とは考えにくく、さらに詳しい研究が必要であると思われる。また MODEL F については、たわみ、ねじれ渦励振の発現無次元風速がほぼ同一であり、水槽実験からも断面前縁で剥離渦が発生せず、明らかに対着型と呼ばれる断面であると判断された。

(3) 全断面とも偏平になるにつれて安定になる傾向を示したが、とくに MODEL E と MODEL F はある程度偏平になると渦励振が全く発生しないことが明らかになった。

吊橋主塔の迎角変化、形状変化、及び主柱間隔の変化による渦励振に及ぼす影響について

(1) 迎角を 0° , 3° , 5° , 7° に変化させた場合、たわみねじれ渦励振発現風速はほとんど変化せず、応答振幅については、ねじれ渦励振においては迎角が小さくなるほど若干大きな振幅を示したものの、たわみ渦励振では、ほとんど差がみられなかった。

(2) 主柱の形状変化に関しては、たわみ渦励振に対して、主柱の隅切りによりかなり、応答振幅を低減させることができるものと判断された。

(3) 主柱間隔が大きくなるにしたがって、たわみ、ねじれ渦励振発現風速が高風速側へ移行する傾向が認められ、たわみ渦励振については最大応答振幅も減少したが、ねじれ渦励振については最大応答振幅が増加する傾向が見られた。しかし、ねじれ渦励振発現風速はたわみ渦励振発現風速に比べて大きい風速を示しており、その風速発生頻度を考慮すれば、他の制約条件が許す限り主柱間隔を大きくすることが、主塔の渦励振に対する防振対策の1つと考えられる。

なお、本研究では、ほとんどの断面について迎角を固定して実験を行っているが、今後、迎角を変化させた数多くの実験や、圧力分布測定実験等を加えたより詳しい研究により、不明な点を解明していくことが課題と考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、実験、データ整理等に多大な御助力を得た、京都大学佐川信之氏、真下英人氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中村泰治, 渡辺公彦・“H型断面柱の低風速励振について”, 土木学会第34回年次学術講演会論文集, 1979.
- 2) 小林敏士: “風による長大橋の限定振動に関する研究”, 博士学位論文, 昭和53年11月.

- 3) 白石成人, 松本 勝: “充実構造断面の渦励振動特性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.
- 4) G. H. Toebes, P. S. Eagleson: “Hydroelastic Vibration of Flat Plates Related to Trailing Edge Geometry”, Journal of Basic Engineering, Trans of ASCE, 1961.
- 5) M. E. Greenway, C. J. Wood: “The Effect of a Bevelled Trailing Edge on Vortex shedding and Vibration”, Journal of Fluid Mechanics, vol. 61, part 2, pp. 323-335, 1973.
- 6) 岡島 厚: “一様流中におかれた矩型断面構造物周りの流れ”, 構造物の耐風性に関する第5回シンポジウム論文集, 1978.