

渦励振における風洞実験法の評価 WIND TUNNEL TESTS TO ESTIMATE THE VORTEX INDUCED OSCILLATION

宇都宮英彦* 長尾文明** 高島秀明***

By Hidehiko UTSUNOMIYA, Fumiaki NAGAO and Hideaki TAKASHIMA

Concerning the bridge aerodynamics, the validity of wind tunnel test with sectional model to estimate the full scale behavior is discussed on the vortex induced oscillation. This study used sectional model and taut strip model (three dimensional model) with two simple rectangular cross sections (width/depth ratios are 2.0 and 6.0) and investigated the bending amplitudes, aerodynamic forces, surrounding flow patterns and unsteady pressure distributions. Its result makes clear that there is a significant difference of the responses between 2D and 3D models for the reason of the non-linear dependence of unsteady aerodynamic force on amplitude and the existence of spanwise flow.

1. まえがき

長大橋の耐風性を検討する際に、部分模型(2D模型)は、経済性、風洞規模等の制約の下で、橋梁断面の空力特性を簡便に調べる模型としてよく用いられている。しかし、2D模型は、2次元性のため、実橋の振動モードの影響など3次元空間の特性を再現できない。この問題に関して、いくつかの研究^{(1)~(9)}が発表されている。ここでは、一様流中のたわみ渦励振を対象として、橋梁基本断面の空力安定性を評価するために、渦励振の発生原因が異なる2つの断面形⁽¹⁰⁾、すなわち、桁高(D):幅員(B)比が1:2矩形断面(前縁剝離型)、および、1:6矩形断面(再付着型、あるいは混在型)を有する2D模型について、応答曲線、空力減衰、非定常表面圧力、流れの可視化実験をふまえて、その有効性を議論する。

2. 渦励振応答曲線と空力減衰

2-1. 実験概要

使用した模型は、図1に示す1:2、1:6矩形断面柱であり、自由振動法にて実験を行った。ここで、

* 工博 徳島大学 教授 工学部 建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2丁目1番地)

** 工修 徳島大学 助手 工学部 建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2丁目1番地)

*** 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒532 大阪市淀川区東三国3丁目5番地26号)

全橋模型として、全橋の3次元性を表現するものとしてタウト・ストリップ模型（3D模型、図2）を使用し、模型ブロック間は、構造減衰にはほとんど影響を与えないような非常に薄いゴムを用いて密閉している。また2D、3D両模型の寸法、単位長さ当りの質量は同一にしている。変位測定は、模型中央に鉛直ワイヤーを張り、弱いバネを介して連結したひずみゲージ式荷重計により検出し、構造減衰は、オイル・ダッシュポットを用いて調整した。

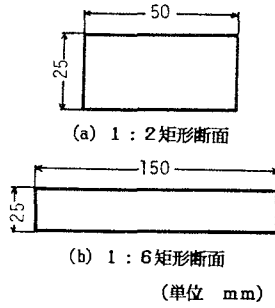


図 1. 模型断面

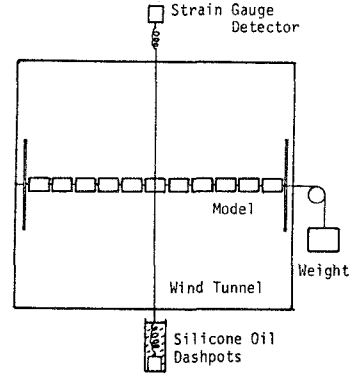


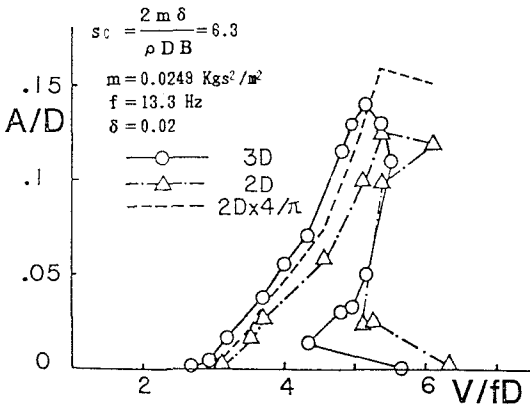
図 2. タウト・ストリップ模型

本研究すべての実験は、一様流中（乱れの強さ1%以内）で行い、風洞は、徳島大学の実験断面積1m×1m長さ2mの測定部をもち、最大風速15m/sの小型開回路式風洞を用いた。

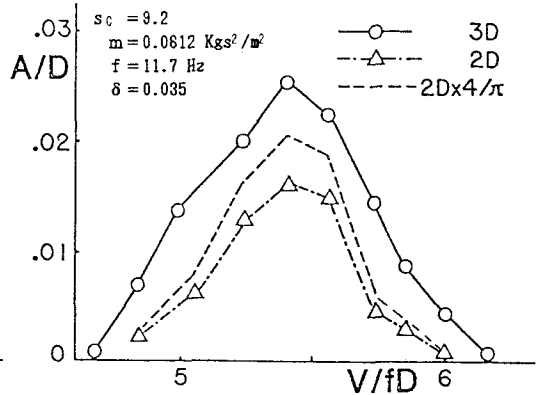
2-2. 実験結果および考察

図3は、1:2、1:6矩形断面柱の2Dおよび3D模型の応答曲線を示す。図中の破線は、2D模型の応答結果を用い等価質量を考慮してモード補正（ $2D \times 4/\pi$ ）を行い、3D模型の応答を推定したものである。

図3より、2D模型からの推定値と、3D模型の応答には、次のような違いが見られる。1:2矩形断面柱の場合、最大応答振幅において3D模型の方が小さく、ピーク出現風速は3D模型の方が低風速側に現れる。一方、1:6矩形断面柱の場合には、ピーク出現風速は同じで、最大応答振幅は3D模型の方が大きくなっていることがわかる。



(a) 1:2 矩形断面応答曲線



(b) 1:6 矩形断面応答曲線

図 3. 応答曲線

このような現象が生じる理由は、図4に示す2D模型の空力減衰比曲線によって定性的に説明することができる。

1:2矩形断面柱の場合、2D模型の最大応答値が生じる風速では、小振幅側で正の減衰力が作用している。この場合、3D模型応答は、モードの影響により、スパン端部で正の減衰力が働き、模型中央で負の減

衰力（励振力）が働く。それに対し、モード補正された2D模型応答は、模型全体で同一の励振力が働いており、3D模型応答より大きくなる。また3D模型の最大応答値は、模型全体に励振力が働くときに出現している。

1:6矩形断面柱の場合、空力減衰の非線形性は、比較的弱まっており、1:2矩形断面柱の場合と同様に考えると、最大応答値出現風速付近で空力減衰はすべての振幅に対して負になっている。さらに、小振幅側でより大きな励振力を受けていることから、3D模型の応答の方が大きくなると考えられる。またこの場合、ピーク応答出現風速は、2D、3D模型とも同じになると考えられる。

このように、振幅および風速に対して空気力の非線形な依存が強い場合には、2D模型による3D模型の応答の推定には、誤差が生じる可能性が大きい。

ここで、2D模型の空気力が3次元状態においても保存されると仮定するストリップ理論により、3D模型応答の推定を試みたが、自由振動法による空気力の正確な測定を行うことの困難性により、かなりの誤差が生じた⁽⁸⁾。

そこで、次に、物体表面の流れの可視化、および、非定常表面圧力を測定することにより、3D模型と2D模型の結果を比較して、ストリップ理論の適用の妥当性について検討する。

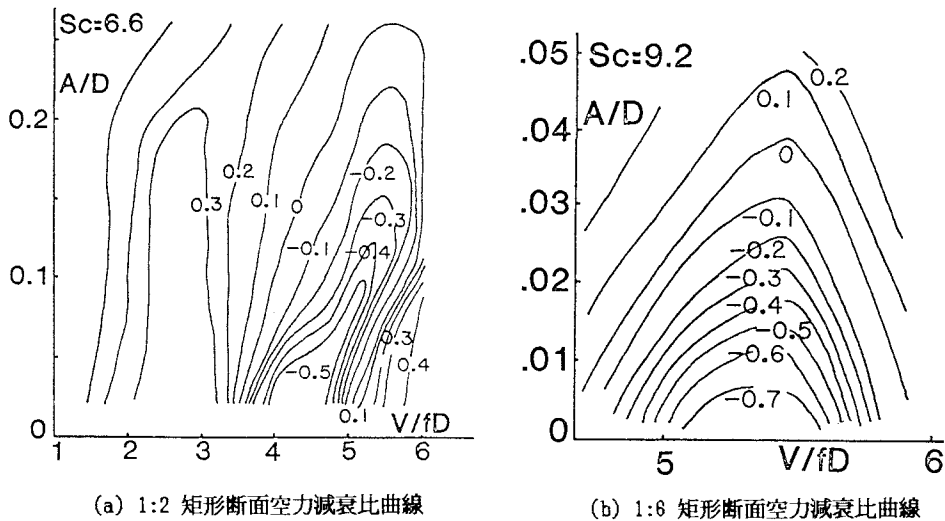


図 4. 空力減衰比曲線 (2D模型)

3. 流れの可視化および非定常表面圧力分布測定実験

3-1. 実験概要

非定常表面圧力分布に用いた1:2、1:6矩形断面柱の断面図を図5に示す。流れの可視化も同寸法のものを用いた。本実験において、3D模型は、モードに3次元性を持たせるのに簡単な方法としての片持支持形式(図6)を用い、強制振動法にて行った。可視化実験は、スモークワイヤー法により行ない、また、片持模型と実際の3次元状態での現象とを比較するために、1:2矩形断面柱において、タウト・ストリップ模型(断面寸法同じ)を用いた流れの可視化も試みた。

非定常表面圧力測定においては、図7に示す、圧力を導くチューブ自身(長さ1m、直径2mm)による応答特性が含まれることより、測定結果すべてに対し、図7の結果に基づく補正を行っている。また表面圧力は、風洞内のピトー管の静圧を基準とし、動圧によって無次元化した。そして、時間平均圧力係数を C_p 、非定

常圧力変動振幅を $|C_p|$ 、変位からの位相遅れを β ($\beta > 0$ のとき、圧力は変位に対して位相の遅れをもつ)と定義している。また、変動振幅の速度比例成分 C_{pi} は、 $C_{pi} = -|C_p| \sin \beta$ として求め、 C_{pi} が正のとき励振力、負のとき減衰力を表わし、作用空気力の分布に相当する。

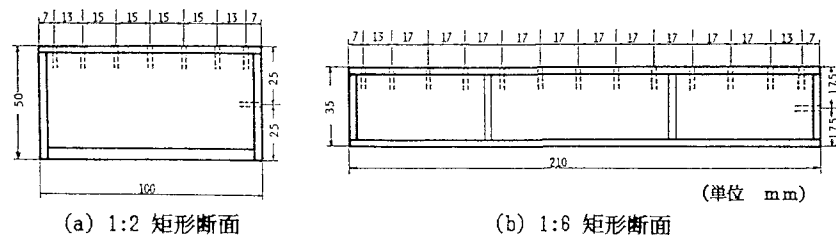


図 5. 模型断面

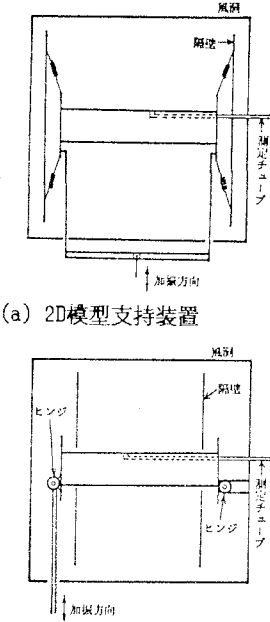


図 6. 模型支持

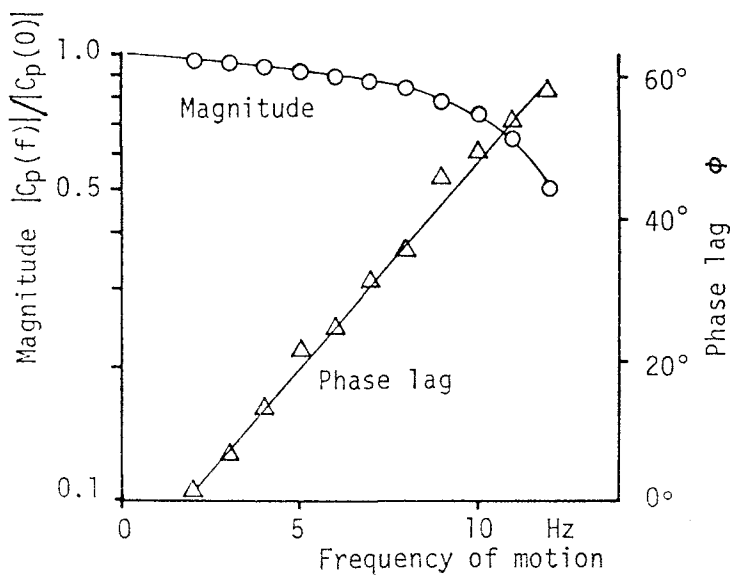
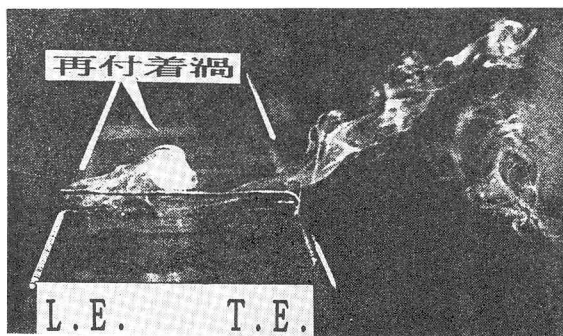
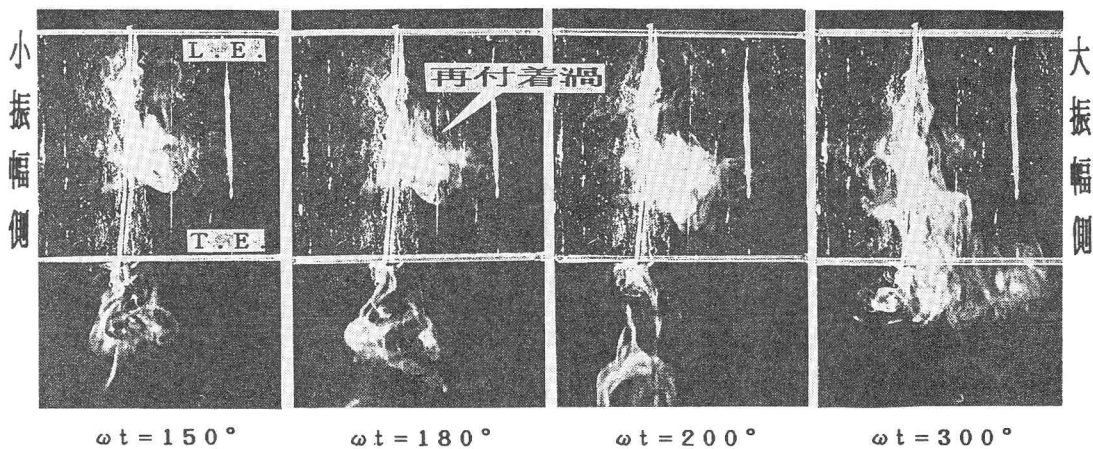
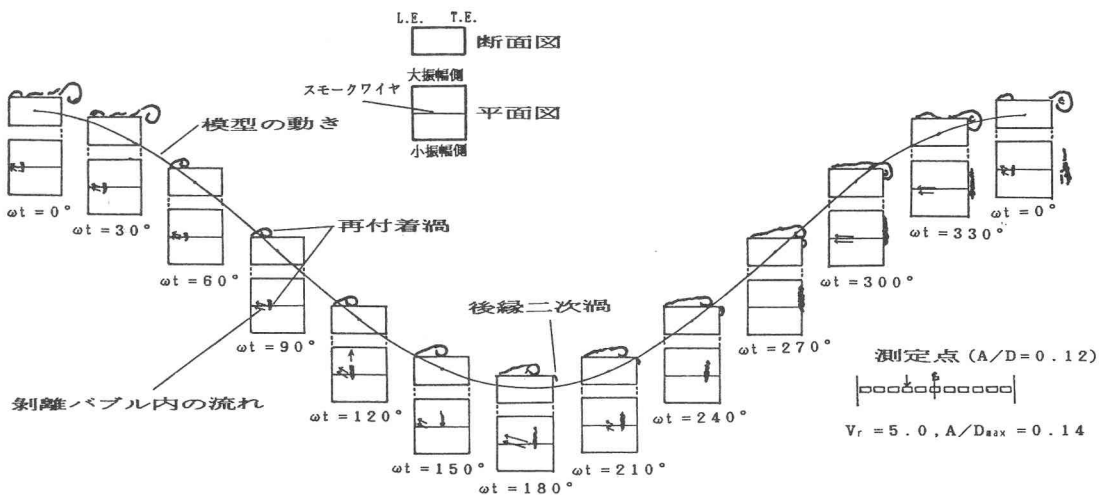


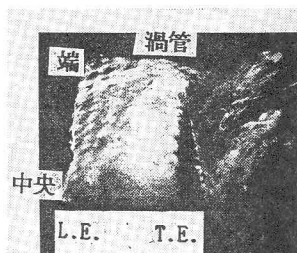
図 7. チューブの圧力特性 (長さ 1 m ,直径 2 mm)

3-2. 流れの可視化結果

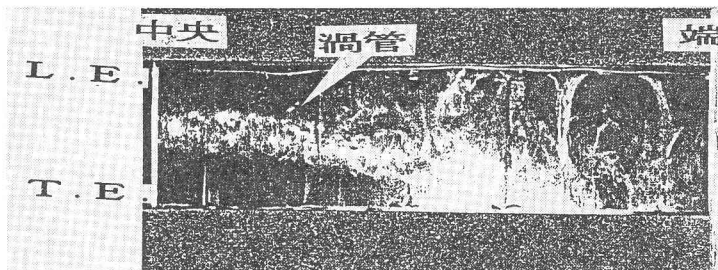
1:2 矩形断面柱に関する流れの可視化結果より、3D 模型として用いた片持、タウト・ストリップ模型とも類似した流れのパターンが観測され、2D と 3D 模型の空気力及び応答特性の違いに影響を及ぼすと考えられる橋軸方向の流れが見られた。

タウト・ストリップ模型を用いて、3D 模型の最大応答時の換算風速 $V_r=5.0$ 、無次元最大振幅 $A/D=0.14$ (図3) に設定したとき、 $A/D=0.12$ 付近における流れの様子を図8、写真1、2に示す。これより、模型振動変位の位相角 $\omega t \approx 0^\circ$ ($\omega t=0^\circ$ 上死点、 $\omega t=180^\circ$ 下死点) のとき、再付着渦 (再付着点付近での剥離流の死水領域への巻込により渦が生じており、ここでは、これを再付着渦と呼ぶ) が形成され始め、 $\omega t \approx 120^\circ$ で風下側へ流下し始める。そのとき、同時に、橋軸方向への再付着渦の流れが見られた。その流れは、再付着渦の位置で、小振幅側より、大振幅側へ向って流れ始め、これより、大振幅側へ流れながら、再付着渦が側面上を流下し、 $\omega t \approx 270^\circ$ で後縁より離脱する。そして、離脱後、 $\omega t \approx 180^\circ$ より形成し始めた後縁二次





(側方より)



(上方より)

写真 3. 再付着渦による渦管 (タウト・ストリップ模型、 $V_r=5.0, A/D_{max}=0.14$)

渦⁽¹⁰⁾と $\omega t \approx 300^\circ$ で一体化し始める。再付着渦は、振動振幅が大きいほど、風速が低いほど前縁寄りで形成される。また、前縁の剥離バブル内の流れとしては、 $\omega t \approx 0^\circ \sim 180^\circ$ で、大振幅側へ偏った逆流が起こっている。以上述べた橋軸方向の流れは、2D模型や、タウト・ストリップ模型中央部では見られなかった。また写真3に示すように、再付着渦は、橋軸方向には一つの渦管のように分布している。

次に、1:6矩形断面柱について結果を示す。

1:6矩形断面柱においては、1:2矩形断面柱に比べ、振動振幅がかなり小さいことから、明確な流れを捉えることができなかった。しかしながら、ビデオ撮影の結果を観察すると、1:2矩形断面柱同様の再付着渦が形成され、それが流下する過程で、その渦が、大振幅側、小振幅側、そしてさらに大振幅側へと交互に瞬間的な橋軸方向の流れが生じるようである。そして、流下とともにだんだん拡散し弱くなり、約振動2周期で離脱する。このような橋軸方向の流れは、2D模型においては見られなかった複雑なものであり、1:2矩形断面柱と同様に、空気力に影響を与えることが予想されるため、より大断面の模型による可視化実験によって、正確に流れを捉えることを検討している。

3-3. 非定常圧力測定結果との対比

可視化実験にある程度成功した1:2矩形断面柱について考える。

図9は、2D模型上の $V_r=5.0, A/D=0.14$ において、流れの可視化により得られた表面上の流れの様子と、非定常表面圧力分布の測定結果より求めた各位相角 ωt に対する瞬間圧力分布(ペン書きレコーダより求めた)を並べた図である。図中の矢印(↑)は、図10より求めた負圧のピークの位置を示す。この図より、負圧のピークは、再付着渦に関係し、図10の位相角の変化は、再付着渦の位置に対応していることがわかる。そして、再付着渦の運動に対して、次の3つの過程に分類することがで

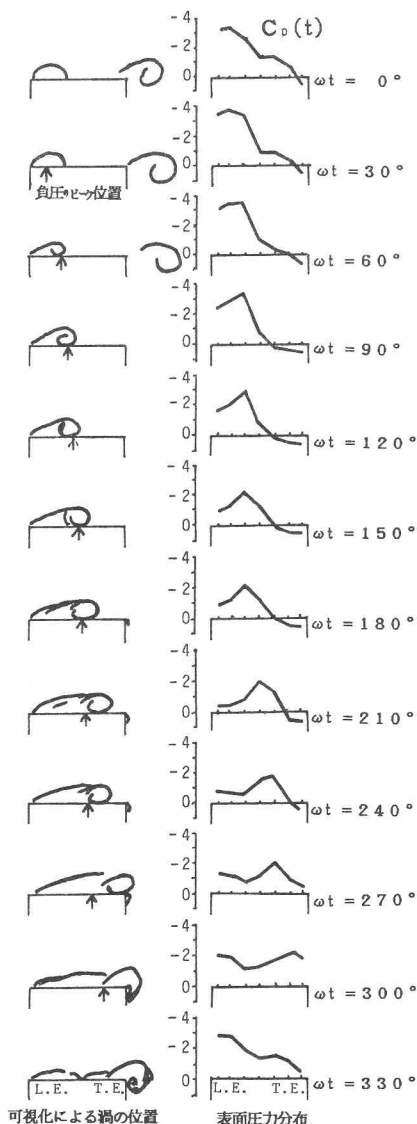


図 9. 1:2 矩形断面柱の流れの様子と瞬間圧力分布

(2D模型、 $V_r=5.0, A/D=0.14$)

きる。(Ⅰ)再付着渦形成過程、(Ⅱ)再付着渦流下過程、(Ⅲ)再付着渦離脱過程。このように、再付着渦そのものが表面圧力を支配している主な要因になり、(Ⅱ)、(Ⅲ)過程が、再付着渦の橋軸方向流れによる影響を受けると考えられる。まず、橋軸方向の流れが生じる原因について考えていく。

この流れを考えるにあたって、模型表面を次の2ヶ所に分けて考える。

(a) 常に剝離バブル内にある前縁部分

(b) 再付着渦が流れる表面部分

(a)での流れを考える。図11は、各振幅における2D模型表面圧力の瞬間圧力 $C_p(t)$ 分布である。これは、圧力変動が正弦的で、断面振動と同周期と考え、 $C_p(t) = C_p - |C_p| \cos(\omega t - \beta)$ より求めた。圧力差があると、高圧部より低圧部に向かって流れが生じることより、 $\omega t = \text{約} -30^\circ (330^\circ) \sim 150^\circ$ にかけて、小振幅側から大振幅側への流れが考えられ、これが可視化における、前縁部剝離バブル内での流れと対応している。

次に(b)での流れを考える。再付着渦による渦管が形成された後、再付着渦が橋軸方向に流れることが可視化結果からわかった。この渦管部での圧力差、つまり、振動振幅に大きく依存する負圧の橋軸方向の差により、橋軸方向の流れが生じると考えられる。この負圧の値は、大振幅の方が大きく、これにより、小振幅側から大振幅側への流れが起こると考えられる。

この橋軸方向流れが及ぼす影響を2Dと片持(3D)模型の非定常表面圧力分布測定結果を用いて考察する。

図12は、時間平均圧力係数 C_p の分布図であり、片持(3D)模型圧力分布において、前縁部での圧力の均一化が起こっている。これは、剝離バブル内に生じた流れの影響と考えられる。さらに、わずかではあるが、片持模型圧力分布の方が圧力回復点が前縁側に移動しており、再付着点の前縁側への移動が現れることを意味している。また、再付着渦が流れだす付近(Ⅱ)の過程)では、2D模型圧力分布と比べて、片持模型圧力分布の方が変位からの位相遅れ β (再付着渦の位置を示す)が大きくなる(図13)。大振幅の場合ほど位相遅れが大きくなる(図13)ことから、再付着渦の橋軸方向流れにより、大振幅側の影響を受け、再付着点が全体に前縁側に引き込まれていると考えられる。次に、非定常圧力変動振幅 $|C_p|$ について、2D、片持模型の圧力分布を比較(図14)するとき、後縁において少し大振幅側の影響(図14)を、再付着渦の橋軸方向流れによって受けていると考えられる。ここで非定常圧力分布結果を基に定常応答振幅の推定結果を考え、図15に実測応答と共に示す。図において、○、△は、図3と同じもので、自由振動法によって求めた応答曲線で、●、▲は、片持、2D模型の非定常圧力分布結果を用いて、応答を推定したものである。この図より片持模型データによる推定は、2D模型データを用いたときより最大応答振幅が大きくなり、その出現風速が低風速側に現れ、測定結果とよい対応を示している。このような結果が得られた理由について考える。振動振幅が一定のとき、変位からの位相遅れ β は、換算風速 V_r が低いほど遅れが大きいく(図10)。同一の V_r と A/D の下では、片持模型を用いたときのほうが2D模型に比べて β の遅れが大きいく(図13)、 β の遅れが大きいくほど V_r が低いという実験結果から、2D模型に生じた振幅と同一の振幅が3D模型では、より低風速側で出現するということが考えられる。しかしながら、最大応答値とその出現風速値においては、橋軸方向流れによる $|C_p|$ の変化などの影響もあるため、さらに複雑な関係が存在することが予想される。以上述べたように、橋軸方向の流れの存在により、3D模型上の空気力が、2D模型での空気力とは異なったものとなり、ストリップ理論による3次元応答の推定には誤差が生じる恐れがある。

次に1:6矩形断面柱の表面圧力測定結果について考える。1:6矩形断面柱は、片持での橋軸方向の圧力差が小さいため強い明確な流れは見られないが、わずかながら圧力差による弱い橋軸方向流れが生じており、この橋軸方向流れが及ぼす影響について考える。

図18は、1:6矩形断面柱での、非定常な表面圧力分布特性(C_p 、 β 、 $|C_p|$ 、 C_{pi} 分布)である。図により2D、片持模型の圧力分布を比較してみると、変位からの位相遅れ β は、ほとんど影響が見られないが、時間平均圧力係数 C_p 、非定常変動圧力振幅 $|C_p|$ 、そして、空気力仕事に影響を与える変動振幅の速度比例成分 C_{pi} において、片持模型圧力分布が前縁を除いて均一化している。この圧力の均一化という点では、この

断面の3D模型の特性に大きくかわかる現象と思われる、現在詳細な実験を検討中である。このような流れによる圧力の均一化により、2D、片持模型圧力データを用いたとき、両者の応答に違いが生じるものと考えられ、1:2矩形断面柱同様、厳密な意味では、ストリップ理論は成立しないと考えられる。

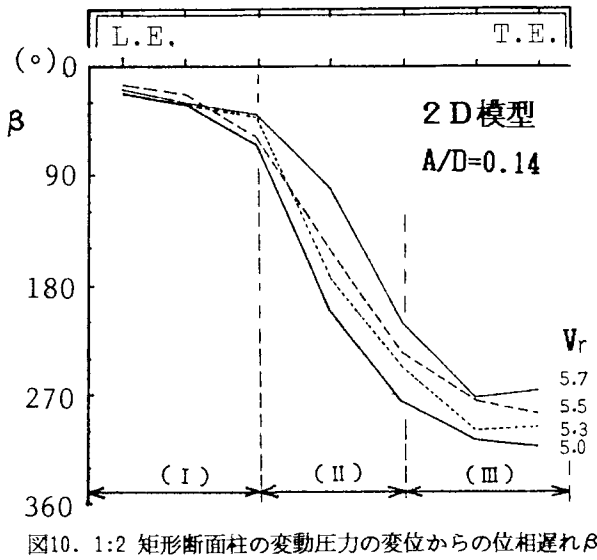


図10. 1:2 矩形断面柱の変動圧力の変位からの位相遅れ β

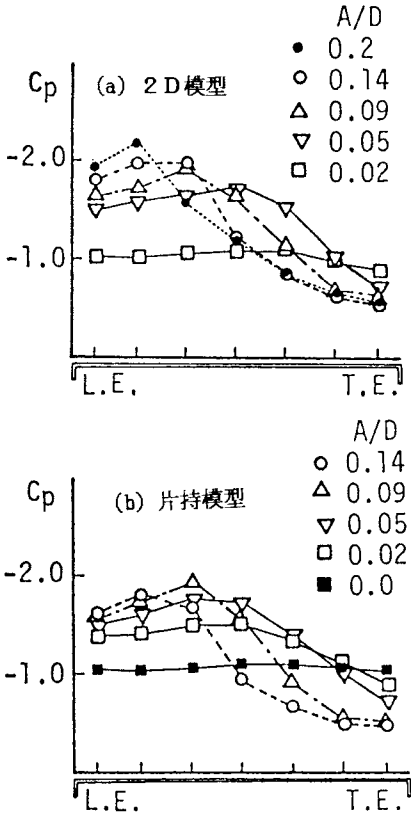


図12. 1:2 矩形断面柱の時間平均圧力係数 C_p 分布

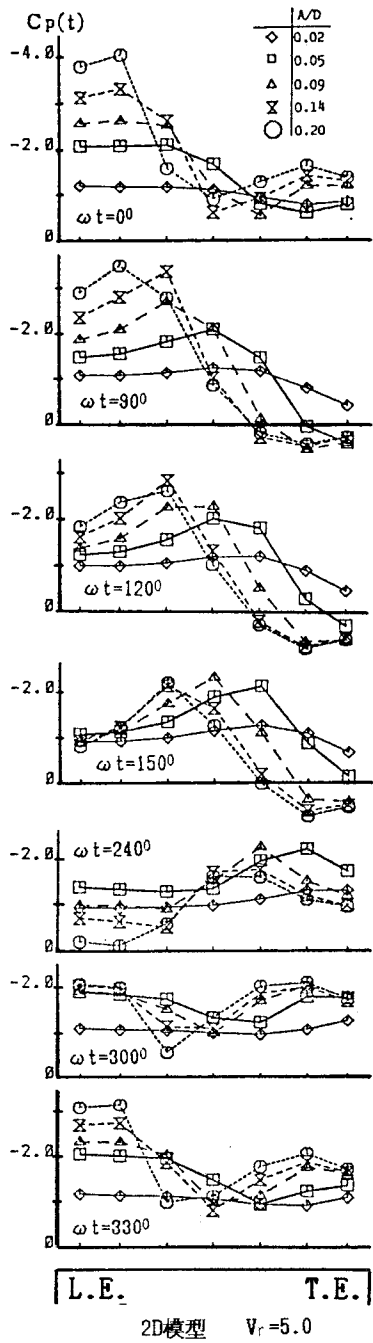


図11. 1:2 矩形断面柱における
2D模型の瞬間圧力分布

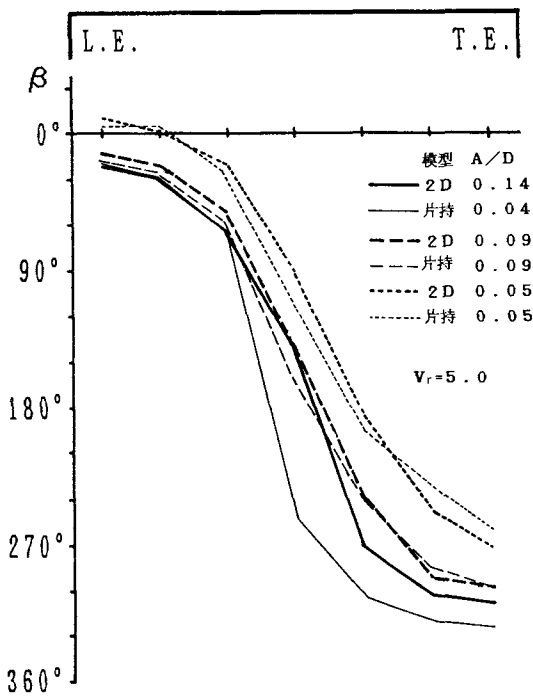


図13. 1:2 矩形断面柱における
変動圧力の変位からの位相遅れ β

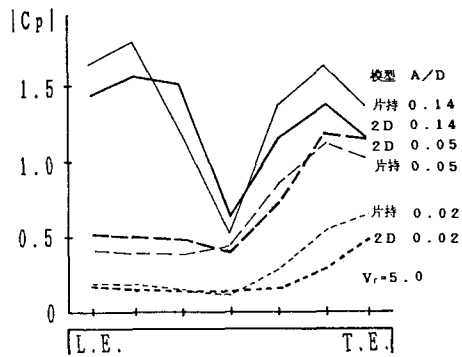


図14. 1:2 矩形断面柱の変動圧力振幅 $|C_p|$ 分布

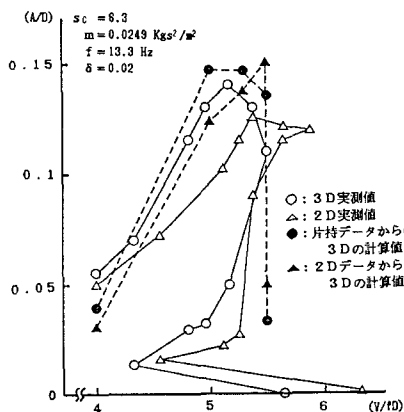


図15. 1:2 矩形断面柱の応答曲線

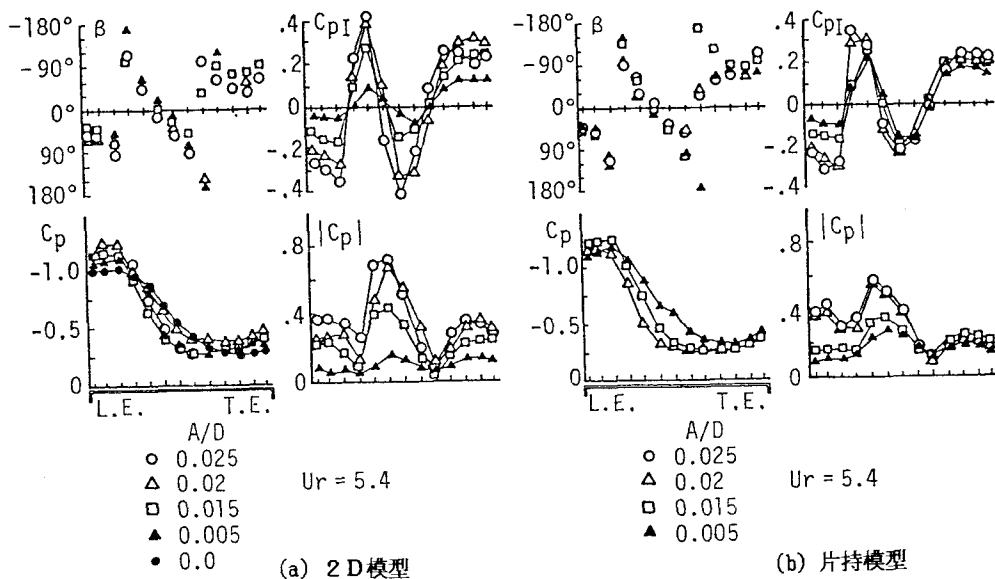


図16. 1:6 矩形断面柱の非定常圧力分布特性

4. 結論

一様流のたわみ渦励振における、1:2、1:6矩形断面を有する部分模型の有効性について、全橋（3次元）模型の応答と比較検討した。本研究で得られた結果を要約すると次のようである。

1. 断面形状によって、部分模型と全橋模型の間の空力特性に違いが生じる。
2. 振動振幅に対して、空気力の非線形な依存が強い場合、部分模型による全橋模型の応答推定は、必ずしも正しい結果を得ない。
3. 1:2矩形断面柱において、表面圧力分布は、再付着付近での剥離流の死水領域への巻込による渦（再付着渦）によって支配される。
4. 全橋（3次元）模型において、空気力に影響を及ぼすと考えられる橋軸方向流れが存在する。この橋軸方向流れにより、空気力の振幅に対する非線形性が強い場合、ストリップ理論に基いた3D模型応答の推定には問題があると考えられる。

今後の課題として、1:6矩形断面柱において、橋軸方向流れの及ぼす影響を明らかにすると共に、他の断面形状についても調査し、部分模型結果を用いた、より合理的な3次元応答推定方法の確立に努めたいと考えている。

最後に、本研究遂行に際し多大な援助を受けた徳島大学宗田和之技官、川田工業（株）畠山圭司氏、鴻池組（株）寺岡潔氏、徳島大学竹口昌弘氏に謝意を表わす。

参考文献

- (1) Davenport, A.G., Isyumov, N., Miyata, T., The experimental determination of the response of suspension bridges to turbulent wind, Proc. 3rd Int. Conf. on Wind Effects on Struc., Sept. 1971.
- (2) Wardlaw, R.L., Tanaka, H., Utsumiya, H., Wind tunnel experiments on the effects of turbulence on the aerodynamic behavior of bridge road decks, Proc. 6th Int. Conf. on Wind Engineering, 1983.
- (3) 武田勝昭, 藤澤仲光, 園部好洋, 基本矩形断面の鉛直応答たわみ振幅——2, 3次元風洞実験結果の相互比較, 土木学会第38回年次学術講演会概要集, 1983. 9
- (4) 樋上瑋一, 鈴木利彦, 渦励振振幅推定へのストリップ理論の適応性, 土木学会第38回年次学術講演会概要集, 1983. 9
- (5) 園部好洋, 武田勝昭, 2, 3次元実験における渦励振たわみ応答振幅の比較, 土木学会第39回年次学術講演会概要集, 1984. 10
- (6) 宇都宮英彦, 畠山圭司, 渦励振における2次元および3次元模型実験による応答の比較, 土木学会第39回年次学術講演会概要集, 1984. 10
- (7) 山田均, 田中宏, 部分模型実験の質量相似則とそれに基づく応答予測, 土木学会論文集, 第380号1987. 4
- (8) Utsumiya, H., Nagao, F., The validity of sectional models on wind tunnel tests for vortex induced oscillation of bridges, Proc. 7th Int. Conf. on Wind Engineering, Aachen, July 1987.
- (9) 宇都宮英彦, 長尾文明, 高島秀明, 寺岡潔, 渦励振における部分模型による風洞実験法に関する考察, 土木学会第42回年次学術講演会概要集, 1987. 9.
- (10) 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, 土木学会論文集, 第322号1982. 6
(1987年10月16日受付)