

動く表面を用いた境界層制御による塔状構造物の空力弾性振動に対する制振
 SUPPRESSION OF AERODYNAMIC VIBRATION OF TALL STRUCTURE BY MOVING SURFACE
 BOUNDARY-LAYER CONTROL

久保喜延*, V.J. モディ**, 小坪千野***, 加藤九州男****, 山口栄輝*****
 Yoshinobu KUBO, V.J.MODI, Chino KOTSUBO, Kusuo KATO and Eiki YAMAGUCHI

*工博 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1 丁目)

**Ph.D University of British Columbia 工学部機械工学科 (Vancouver, British Columbia, Canada)

***工修 大成建設 (〒163 東京都新宿区西新宿 1 丁目) (研究当時九州工業大学大学院生)

****九州工業大学助手 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1 丁目)

*****Ph.D 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1 丁目)

The suppression of aerodynamic response of square-section tall structures, like pylons of long-span bridges and very high buildings, is studied. A method is the moving surface boundary-layer control achieved through rotating cylinders at leading edges of the structure. Effectiveness of the approach in suppressing aerodynamic instabilities of the square prism was confirmed in the earlier studies by the authors. The method also proves successful in suppressing torsional vibrations. Previous study was conducted by using 2-dimensional model to obtain fundamental properties of moving surface boundary-layer control. Since tall structure has truncated configuration at the top, the flow around the structure has 3-dimensional characteristics. Considering the 3-dimensional flow properties around the structure, effective and economical arrangements of rotors are investigated with reference to prototype tall structures.

Key Words: boundary-layer control, tall structure, aerodynamic vibration

1. まえがき

超長大橋、超高層ビルなどの建設計画が、21世紀のプロジェクトとして世界的な規模で議論されてきている。しかしながら、これらの構造物は従来の構造物に比べ、よりスレンダーでかつ撓みやすい構造となるため、これまでの構造物よりも、さらに風による振動が誘起されやすいものとなる。

風による振動に対しては、これまでも種々の方法で振動を抑制することが行われてきている。構造形式や構造部材によって、その方法も異なっている。代表的なものとしては、粘性減衰装置を付加して、構造減衰を高める方法、T.M.D.やT.L.D.によって振動エネルギーを逸散させ、見かけ上減衰を高める方法である。これらは、これまでの規模の構造物にはかなりの成果を上げてきている。構造規模が大きくなると、それに作用する外力も大きくなり、操作すべき構造部分も大きくなるため、使用性にも限界が生じることになる。これに対して、構造系の操作ではなく、外力を小さくする方法もある。これまでに最もよく使われてきている方法が、構造物の形状を変化させて風による振動外力を制御する方法である。ス

ポイラーやスプリッター板などの付加物を付ける方法も形状の流線型化によって外力を抑制する方法に含まれる。この方法で問題が解決されればよいが、本来の形状を変更せざるを得ないということがある。本来の形状を極力保持した形での風による振動の抑制ができることが必要である。構造系に負担をかけず、外力を小さくできる方法として、剥離点に設置したローターで、境界層制御を行い、空力弾性振動を抑制する方法がある。すなわち空力的アクティブ制御である。

これまでの研究^{1)~3)}では、二次元正方形角柱を用いて、ローターの回転数と剥離流れとの関係、ローターの配置と空力特性および空力弾性振動との関係について検討を進めてきた。その結果、ローターを用いた境界層制御は、空力弾性振動の抑制に非常に有効であること、抗力の低減にも有効であることなどが分かった。

本報告では、さらに本手法の実用化に向けて、超長大橋の主塔や超高層ビルを対象として、塔状正方形角柱を用いて、この角柱に発生する空力弾性振動の抑制に経済的かつ有効性の高いローターの配置について実験的検討を行っている。

2. 実験模型と実験方法

本実験に用いた模型は、図1に示す1辺10cmの正方形角柱で、高さ120cmの弾性模型である。境界層制御用のローターの直径は辺長の20%である2cmで、角柱模型の四隅に設けられている。このローターは、回転慣性を小さくするために、直径1cmのアルミ棒にバalsa材を巻いて作られている。また、ローターの配置による模型の空力振動の制振状況を検討するために、模型は高さ方向に長さ10cmずつの12ブロックに分けられている。ローターはブロックごとに支持されており、ブロック間は直径2cmのカップラーで結合されている。それぞれのローターを駆動するサーボモーターは、模型下部の台座の中にセットされて、個々に制御できるようになっている。実験時の振動諸元は、以下の通りである。模型重量 $w=7.5\text{kgf}(73.55\text{N})$ 、風向および風向直角方向の1次の曲げ固有振動数 $f=2.5\text{Hz}$ 、対数構造減衰率 $\delta=0.018$ である。

実験には、高さ1.8m、幅2.5m、長さ20mの測定断面を持つ九州工業大学所有の境界層型波浪風洞を用いた。模型の振動状態の計測には、模型頂部に設けられた光学式変位計を使い、風向方向および風向直角方向の振動を測定した。

模型の四隅にローターを設置しているが、ローター部を薄いプラスチック板で直角にカバーすることによって、図2に示すローター配置による実験を行った。図中矢印のないものは、ローターを回転させていない。また、高さ方向のローター配置を検討するために、図3のパターンを検討した。図中斜線を施した部分がローターが回転する部分で、他の部分は、薄いプラスチック板でカバーされている。ローター配置による空力応答の基本的特性を見るために、これらのパターンのうちTypeB2およびB3について特に検討を行った。

実験として行ったものは、(1)ローターが回転していない場合、(2)ローターが高さ方向に全て回転している場合、(3)高さ方向に部分的にローターが回転している場合の3ケースである。

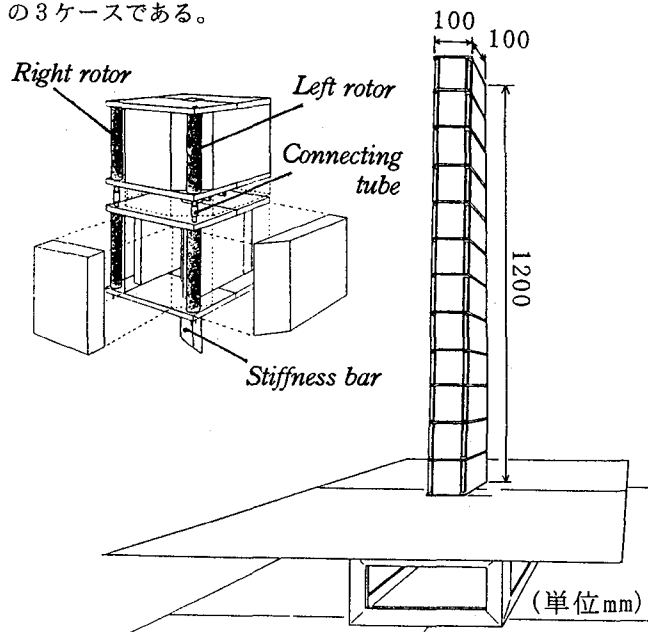


図1 ローター付き正方形角柱三次元弾性模型

特に、ローター静止時である(1)は前縁隅角部の形状および後縁隅角部の形状がそれぞれ変化した場合、またそれらを組み合わせた場合に、空力応答特性がどのように変わるかをみるためのものである。すなわち、渦励振の発生やギャロッピングの発生に前縁形状および後縁形状がどのような関わりを持つのかを見るのが目的である。このことは、空力的なパッシブ制振とした場合の効果の程度をみることでもある。

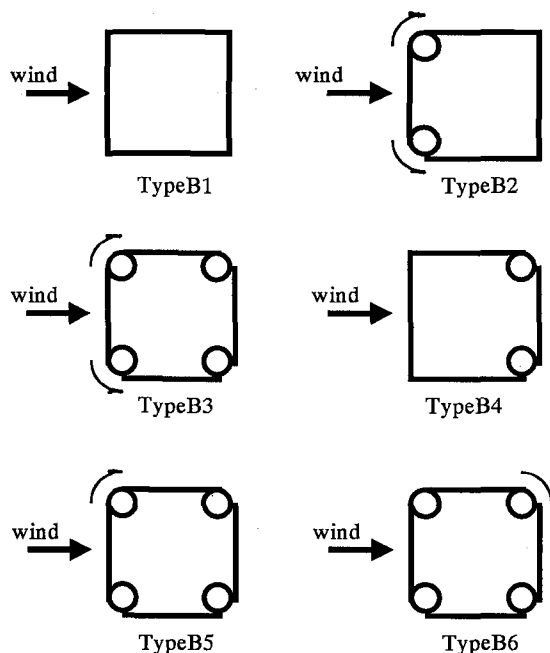


図2 三次元模型のローター配置とローターの回転方向

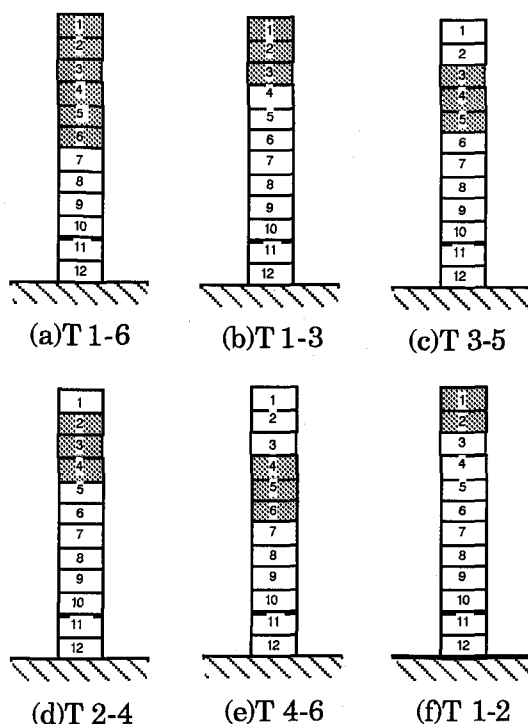


図3 三次元模型の軸方向におけるローター配置（ローター回転部分は斜線部）

3. ローター付き正方形角柱の三次元空力弾性振動

二次元正方形角柱で検討されたローターによる境界層制御^{1)~3)}が三次元塔状角柱においても同程度の効果を発揮するか否かをみるために三次元弾性模型による検討が行われた。

3.1 ローター静止時の応答特性

サーボモーターの性能からローターの直径を、辺長の20%にせざるを得なかったが、この程度の隅角部の形状変更で応答特性がどのように変化するかをみる。TypeB1は、正方形角柱としての応答特性を見るためのものである。TypeB2は、前縁隅角部のみを円形状としたものである。TypeB3は後縁隅角部も円形状としたもので、前縁および後縁の両形状を円形状に変更したときの影響を見るためのものである。TypeB4は後縁隅角部のみを円形状としたものである。図4は、これらの応答特性を示したものである。横軸に換算風速(V_r)をとり、縦軸に塔高 H を基準とした風向直角方向の無次元たわみ倍振幅をとっている。

これによると、いずれのケースにおいても $V_r=8$ あたりで、渦励振が発生している。特に、前縁隅角部が直角となっているTypeB1,B4では、渦励振が顕著に現れている。この場合、TypeB1よりもTypeB4の方が大きな振幅となっていることは、興味深いことである。渦励振の応答に後縁形状も大きく関与していると言える。これに対して、TypeB1とB2を比較すると、前縁隅角部が円形状となっているTypeB2では渦励振振幅もTypeB1の10%程度に小さくなり、TypeB3とB4では、ギャロッピングが発生している高風速域では、これらの振幅は同程度の大きさとなっている。これと同様な見方をすると、TypeB3とB4においても前縁隅角部が直角であるTypeB4の渦励振域での振幅がB3の約3.5倍にもなっているが、ギャロッピング

域での振動振幅は同程度となっている。これらの中で特徴的なことは、正方形角柱の場合、渦励振域では、前縁形状のみならず後縁形状もその特性を左右する大きな要素となっていることと、ギャロッピングが生じる高風速域では、後縁形状が応答特性に対して支配的となっていることである。すなわち、TypeB1とB2の比較およびTypeB3とB4の比較から、前縁隅角部に丸みが存在することで渦励振は抑制される。また、TypeB1とB4の比較およびTypeB2とB3の比較から後縁隅角部が丸みを持つことでギャロッピングが発生しやすくなっている。さらに、TypeB1とB4の比較およびTypeB2とB3の比較から、後縁隅角部に丸みが存在することで、渦励振が発生しやすくなっている。すなわち、正方形角柱においては、前縁および後縁での隅角部形状が、空力弾性振動の発生に以下のような形で関与している。

・渦励振の発生 ----- 前縁隅角部が直角であること
後縁隅角部が丸みを持つこと

・ギャロッピング
の発生 ----- 後縁隅角部が丸みを持つこと
従って、各空力弾性振動の抑制は、上記の隅角部形状と反対のものとなる。それぞれの空力弾性振動と隅角部形状との関係について考察してみると、以下のように考えられるであろう。

- ①渦励振の発生について ----- 前縁隅角部が直角であることによって、前縁での流れの剥離が生じやすい。さらに後縁隅角部が円形状であることにより、発生した剥離流れが、巻き込みやすくなり、渦の形成を助長する。
- ②ギャロッピングの発生について ---- 後縁隅角部が丸みを持つことによって、剥離流れが流下しやすくなる。例えば、二次元物体において下向きに最大速度となると、後縁部が丸みを持っていることにより、物体表面を流下する剥離流れの流下速度が速められ、下面に作用する下向きの負圧が大きくなる。すなわち、ギャロッピングが発生しやすい状態となる。

以上の結果からすると、前縁隅角部に丸みがあり、後縁隅角部が直角のものが渦励振もギャロッピングも発生しにくい断面となる。すなわち、TypeB2である。図4の応答結果を見ると、TypeB2は渦励振もギャロッピングも発生しにくい結果となっている。

3.2 軸方向に一樣にローターが付いている場合

図5は、TypeB2においてローターの回転数を変化させたときの応答である。ローターが回転していないときは、高風速側で小振幅のギャロッピングが発生している。ローターの周速度を接近流速の1.0以上にすると、ギャロッピング域での振幅は、約1/5程度にまで抑制される。渦励振域についてみると、ローター静止時に大振幅の渦励振が発生しにくかった。その原因として構造減衰率が二次元実験に比較して大きかったこと、模型の三次元性が関与していることなどが考えられる。これに対して、二次元実験では、ローターの周速度を接近流速の1.2倍以上とすると、ギャロッピングはほぼ抑制できるものの、ローターの回転数を上げて、渦励振を完全には抑制することはできなかった。

図6は、TypeB3の応答図である。このローター配置の

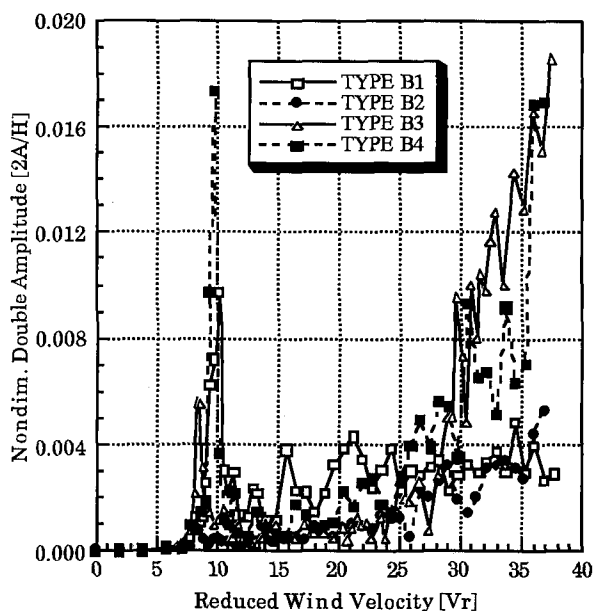


図4 異なった隅角部を持つ正方形角柱三次元弾性模型の応答 (ローター静止時)

場合に興味深いことは、ローターの回転比が0.4のとき、ギャロッピングがローター静止時より大きな振幅で誘起されていることである。このことは、ローターの回転比の選び方によっては、より強いギャロッピングが誘起される可能性を有していることになる。しかしながら、回転比1.0以上になると、ギャロッピングはほぼ完全に抑制される。これに対して図7および8において後縁形状が同一であるTypeB5およびB6の回転比0.4では、ギャロッピングが誘起されやすくなっている。特に、TypeB5では、TypeB3よりもギャロッピングの発生がより顕著となっている。このことは、片側ローターによる剥離流れの片側加速がより大きな鉛直方向力を生み出したものと考えられる。しかしながら、二次元実験の結果と同様に、ローターの回転数を上げることによって、ギャロッピングに対する制振効果は高められ、回転比1.0以上で十分な制振性を有する。これに対して、図8の後流側の片側ローターのみを回転させたものでは、ほとんどの制振効果を有しておらず、逆に回転比1.0でもギャロッピングの振幅は、ローターの回転をさせない場合よりも大きくな

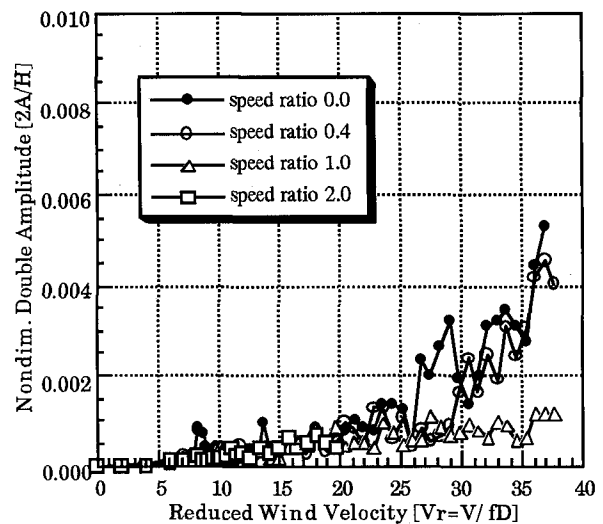


図5 TypeB2のローター配置における応答 (T1-12)

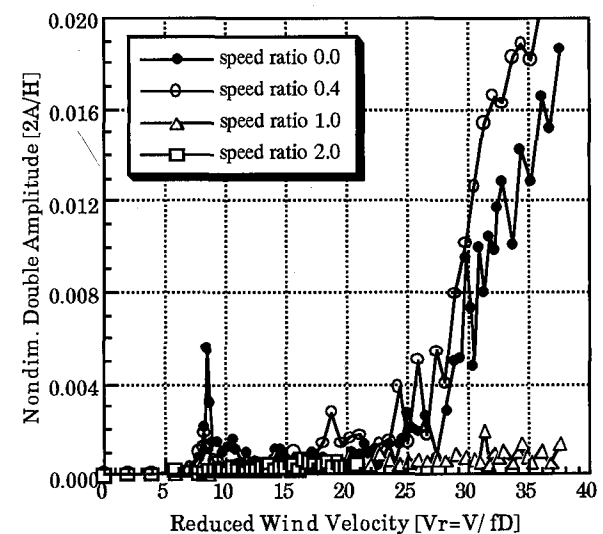


図6 TypeB3のローター配置における応答 (T1-12)

っている。したがって、ローターの回転によって三次元弾性正方形角柱における空力振動を制振できるのは、二次元の場合と同様に、前縁側のローターによる場合である。後援側ローターの回転により前縁からの剥離流の流下が促進されることでギャロッピングが促進されていることは、3.1での考察と一致する。

3.3 部分的にローターを設置した場合の応答

経済的なローター配置を探すために、図3に示したローターの高さ方向の配置について応答性の検討を行った。ローター部を示すT2-4とは、塔頂部から2,3,4ブロックにローターが付いていることを意味している。TypeB2とB3のローター配置について検討を行っている。

(TypeB2の場合)

図9はT1-6の応答図である。T1-6はT1-12とほとんど変わらない応答を示している。このことは、正方形角柱の下半部の断面は全体の空力特性にほとんど寄与していないといえる。図10は、T1-3の応答図である。この場合もT1-6と同程度の応答振幅を有しており、ローターの回転数比を1.0以上とすれば、ほとんど応答振幅は現れない。図

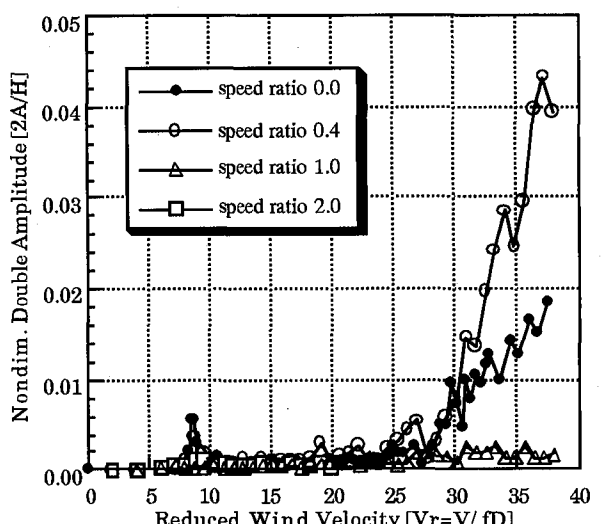


図7 TypeB5のローター配置における応答 (T1-12)

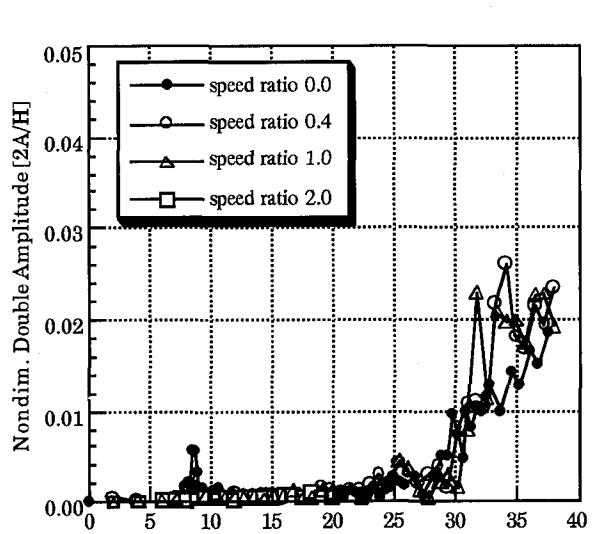


図8 TypeB6のローター配置における応答 (T1-12)

11は、T2-4の応答図である。回転比0.0の場合、 $Vr=33$ 程度でギャロッピングが発生している。ローターの回転数比を0.4以上とすれば、振動はほぼ抑制される。図12は、T3-5の応答図である。回転比0.0のとき、 $Vr=35$ でギャロッピングが発生するが、回転数比を1.0以上とすれば、こ

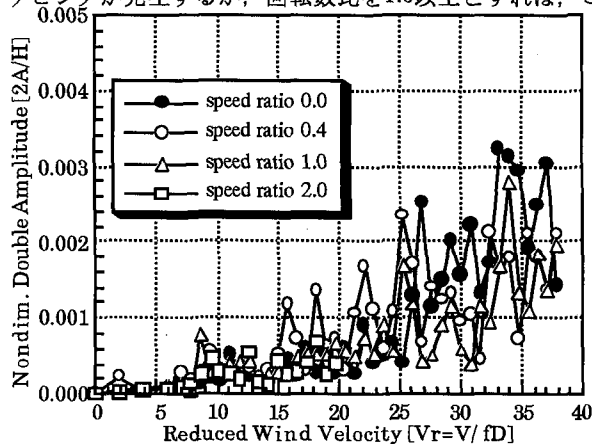


図9 TypeB2のローター配置における応答 (T1-6)

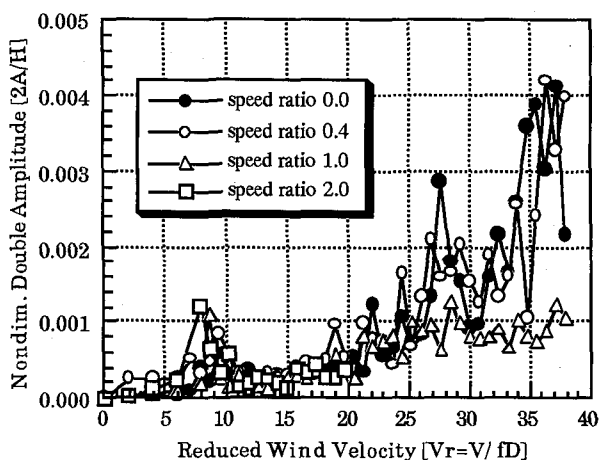


図10 TypeB2のローター配置における応答 (T1-3)

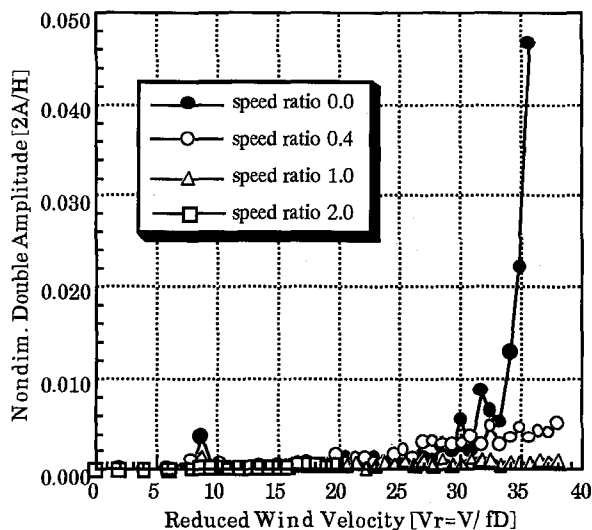


図11 TypeB2のローター配置における応答 (T2-4)

のギャロッピングも抑制される。図13は、T4-6の応答図である。この場合は、回転比0.0、 $Vr=7$ で振幅が $2A/H=0.021$ 程度の大振幅の渦励振が発生している。この場合、回転数比を上げて完全には振動を抑制できず、ローターの効果は非常に少なくなっている。これは、流れの二次元性が強められたためであると考えられる。図14は、T1-2の応答図である。この場合も渦励振は、発生するが、回転数比を1.0以上とすれば、ほぼ振動を抑制できる。TypeB2についての検討で、塔頂から3ブロックずつ下方にローター部を設けた応答実験を行ったが、T1-3の場合が最も振動振幅が小さく、ローターによる抑制は必要ない程度である。ローター部が下方に移るに従い、ギャロッピングの発生、ギャロッピングから渦励振の発生へと振動現象が変化することは、興味深いことである。T4-6は、1-3ブロックで隅角部が直角の正方形角柱となっている区間であり、この区間の空気力が振動発生に最も有効に働いているため、渦励振が顕著に発生していると考えられる。すなわち、1-3ブロック（塔頂から25%程度以内）に作用する空気力を抑制すれば、正方形角柱の風による励振を抑制できるといえる。

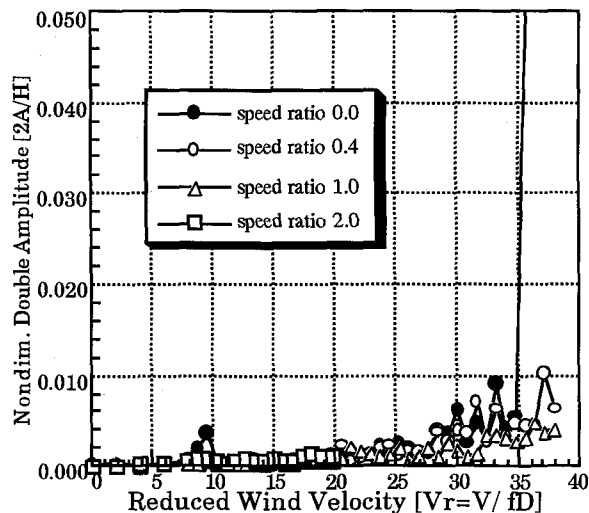


図12 TypeB2のローター配置における応答 (T3-5)

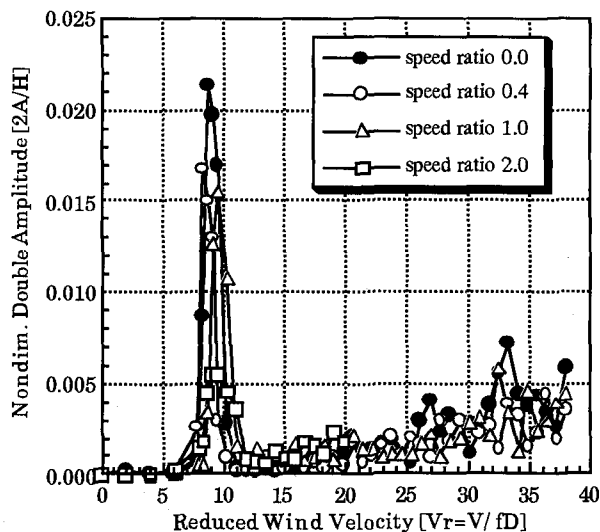


図13 TypeB2のローター配置における応答 (T4-6)

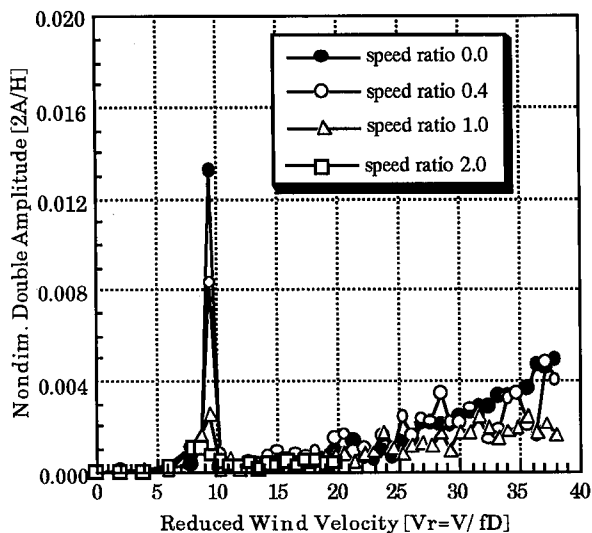


図14 TypeB2のローター配置における応答 (T1-2)

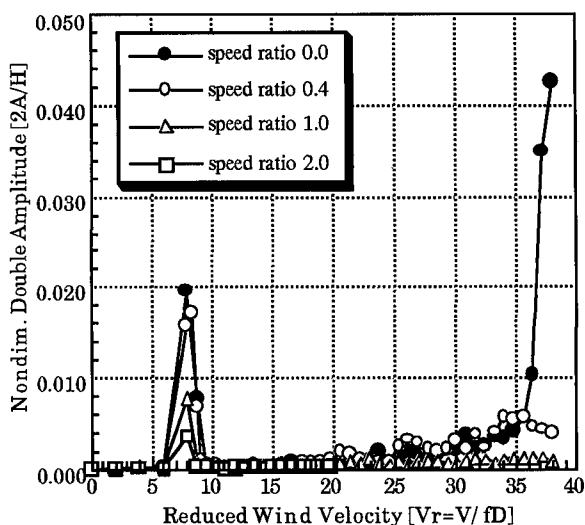


図15 TypeB3のローター配置における応答 (T1-3)

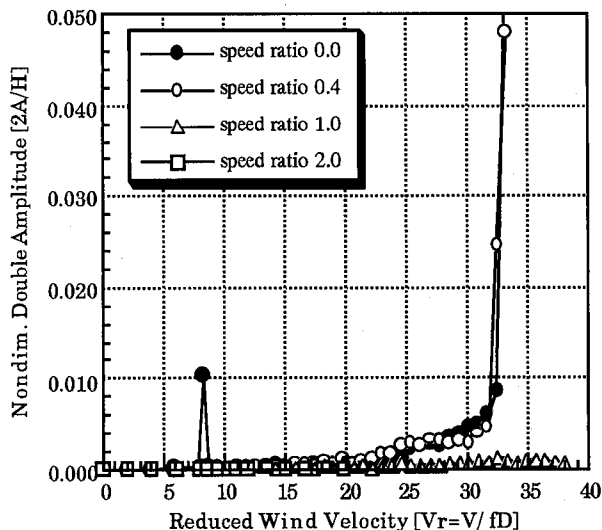


図16 TypeB3のローター配置における応答 (T1-6)

(TypeB3の場合)

風があらゆる方向から吹くことを考えれば、TypeB2よりもTypeB3の方が、実際の構造物に近くなるであろう。図15は、T1-3の応答図である。渦励振およびギャロッピングが発生しているが、ローターで渦励振を完全に抑制することはできないが、図16のT1-6であれば、回転数比1.0で渦励振およびギャロッピングとも完全に抑制できている。すなわち、TypeB3の場合には、TypeB2よりも経済的な配置とすることは困難であるといえる。

4. まとめ

塔状構造物の空力弾性振動の抑制を目的として、ローターを用いた境界層制御による手法の検討を正方形角柱弾性模型を用いて行ってきた。その結果、以下のような結果を得た。

- (1)ローター静止時について、前縁および後縁の隅角部形状と、正方形角柱の空力弾性振動との関係を見いだした。すなわち、渦励振の発生には上流側隅角部が直角であることに加えて、下流隅角部が丸みを有することが、重要なファクターとなっている。また、ギャロッピングの発生には、下流側隅角部が丸みを有することが重要な要素となっている。
- (2)高さ方向全体にローターを取り付けた場合についてみると、後縁部に丸みがあるケースで、ローターの回転数比が低いと逆にギャロッピングを誘起しやすい場合がある。発生機構的には、ローター静止時の場合とほぼ同じであると考えられる。
- (3)高さ方向全体にローターを取り付けた場合に、ローターの効率的な配置について二次元の結果と比較すると、ほぼ対応しており、前縁片側ローターの場合が回転数比1.0以上でほぼ制振可能である。
- (4)部分的にローターを取り付けた場合、頂部から25%の範囲内にローターを取り付けると、空力弾性振動はほぼ抑制されることから、この範囲の空気力が塔状構造物の空力弾性振動の発生に対して支配的であるといえる。
- (5)実構造物として考えたとき、四隅にローターを配置したものが、いずれの風向にも対処できるが、4個のローター相互の干渉等についてさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) Kubo, Y. and Yasuda, H.: Surface Pressure Characteristics of a Square Prism under Aerodynamic Response Control by Boundary-layer Acceleration, Proc. of 5th International Conference on Flow-induced Vibration, pp.411-416, 1991.
- 2) 久保喜延, 安田英明, 加藤九州男: 境界層加速による正方形角柱の耐風制振法, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp.989-994, 1991.
- 3) Kubo, Y., Modi, V.J., Yasuda, H. and Kato, K.: On the Suppression of Aerodynamic Instabilities through The Moving Surface Boundary-layer Control, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.41-44, pp.205-216, 1992.

(1994年9月14日受付)