辺長比2の高層建築物に作用する振動依存風力特性に関する研究

—風直角方向および捩れ振動時振動依存風力特性—

MOTION-INDUCED WIND FORCES ACTING ON RECTANGULAR HIGH-RISE BUILDINGS
WITH SIDE RATIO OF 2

—Characteristics of motion-induced wind forces during across-wind and torsional vibrations—

片桐 純治*, 大熊 武司**, 丸川 比佐夫***, 下村 祥一****

Junji KATAGIRI, Takeshi OHKUMA, Hisao MARUKAWA
and Shoichi SHIMOMURA

This paper presents characteristics of motion-induced wind forces acting on a rectangular high-rise building with a side ratio of 2 during across-wind and torsional vibration. The motion-induced wind forces are measured by a forced-vibration method in a wind tunnel. Main results are as follows:

1. The characteristics of motion-induced modal wind force acting on high-rise buildings with a side ratio of 2 during turbulent flows are different from those during a uniform smooth flow in the case of reduced wind speeds of 7 or more. 2. The wind speed in which the out-of-phase components of motion-induced across wind force shows a positive value during turbulent flows is limited to the vicinity of 5 for the reduced wind speed in the case of across-wind vibrations. In the case of the motion-induced torsional moment, the positive value of out-of-phase components is shown in the wind speed area where the reduced wind speed is 5 or more. 3. The aerodynamic damping ratios and response displacements obtained from the spectral-modal analysis using the out-of-phase components of motion-induced wind forces almost agree with the results of multi-degree-of-freedom aeroelastic model tests.

Keywords : Aerodynamic instability, Motion-induced wind force, Forced vibration method,
Across-wind vibration, Torsional vibration, Side ratio of 2

空力不安定振動, 振動依存風力, 強制振動法, 風直角方向振動, 捩れ振動, 辺長比2

1. はじめに

構造物に生じる空力不安定振動は、構造物の振動と周囲の流れとの相互作用によって生じる振動依存風力に起因する。風洞実験による振動依存風力の測定方法としては、実験模型に強制的に正弦波振動を与え加振変位および速度に比例する風力成分を測定する強制振動法あるいは弾性模型に初期変位を与えて自由振動させることにより測定する自由振動法が用いられている。これまでの振動依存風力の測定は、主に橋桁を対象とした二次元模型を用いたものであり、辺長比が3以下の矩形平面を対象としたものは、大熊他¹⁾などの数例を除き、乱れのほとんどない気流中で行われている。高層建築物を対象とした三次元模型による振動依存風力に関する研究としては、強制振動法を用いた谷池²⁾, Steckley³⁾, 西村他^{4,5)}によるものがある。しかし、これらはいずれも風直角方向振動を対象としており、3次元模型を用いて高層建築物の捩れ振動時に作用する振動依存風力に関して検討したものはない。

一方、捩れの自由度を有する弾性模型を用いた高層建築物の空力不安定振動に関する研究としては、河井⁶⁾による3自由度の弾性模型を用いたものあるいは丸川他⁷⁾, 片桐他^{8,9)}による多自由度の弾

性模型を用いたものがある。これらの風洞実験結果によれば、辺長比(B/D , B :幅, D :奥行)が2~4の風方向に細長い矩形平面では、捩れ振動において低風速域での自励的渦励振および捩れフラッターが生じる可能性のあることが報告されており、捩れ振動における空力不安定振動あるいは振動依存風力特性に関する検討の必要性が示されている。

本研究は、弾性模型実験において低風速域の自励的渦励振、捩れフラッターの生じる事が確認されている辺長比2の矩形平面を有する高層建築物に作用する振動依存風力特性を把握することを目的とし、風直角方向振動および捩れ振動を与えることが可能な強制振動装置を用いて風直角方向および捩れ振動時に作用する振動依存風力ならびに線形モードを対象とした振動依存一般化風力の特性について検討を行う。また、振動依存風力の発生要因に関して側壁面の振動依存風圧より検討を行う。

2. 実験方法

実験は、神奈川大学所有の吹き出し型境界層風洞で行った。実験模型は、辺長比 $D/B=2$ 、アスペクト比 $H/\sqrt{BD}=5$ ($B=80\text{mm}$,

* ㈱泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所
主任研究員

** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

*** ㈱泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 所長

**** 神奈川大学工学部建築学科 助手

Senior Research Eng., Urban Environment Research Center, ISEC

Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Kanagawa University, Dr. Eng.

Director, Urban Environment Research Center, ISEC

Research Assoc., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Kanagawa University

$D=160\text{mm}$, 高さ $H=562.5\text{mm}$)の三次元角柱である。模型静止時の閉塞率は4.2%であり,風圧力の補正は行っていない。風直角方向振動用模型はアクリル製の剛模型であり,振れ振動用模型は図-1に示す7質点系の弾性模型である。実験模型の加振は,風洞床下の強制加振装置で行った。本装置は加振部分を図-2のように取り替えることによって風直角方向もしくは振れの正弦波振動を模型に与えることができる。模型の加振方法は,風直角方向振動時は風洞床高さに回転軸を設置し,模型と一体となったシャフトを水平方向に加振する事によって行う。振れ振動時は模型頂部に設置した厚さ5mmの鉄板に弾性模型の柱を固定し,鉄板を振り加振することによって模型全体に振れ変位を与える。加振振幅の調整は,偏心カムの偏心量を変えることによって行い,風直角方向転倒角 $\pm 1.15^\circ$,振れ角 $\pm 2^\circ$ の範囲の変形を与えることができる。なお,図-3に示すように,模型の振動波形は正弦波形に一致しており,模型の振動モード形は直線モードにほぼ一致している。加振装置のシャフトの変位と模型変位の位相差はほとんど無い。

実験では,図-1に示す6レベルの層風力を測定した。模型全体に作用する風力は層風力に各測定高さの振動モードおよび負担高さを掛けて総和することにより一般化風力を求めた。また,振動依存風力の発生要因に関する詳細な検討を行うため $2H/3$ 高さ(上から3レベル目)では側壁面の振動依存風圧の測定も行った。層風力の測定は,壁面の風圧をマニホールドによって空間平均することによって行った。各レベルの測定点は図-4に示すように,風圧および風直角方向層風力測定の場合,側壁面に等間隔に8点設置した。層振りモーメント測定の場合,側壁面および風上・風下それぞれの測定点の平面中心からの距離 $\times$ 負担幅が等しくなるように測定点を配置した。なお, $2H/3$ 高さにおいて等間隔の測定点の風圧より求めた振動依存層振りモーメントとマニホールドから求めた振動依存層振りモーメントが一致することは確認した。

実験気流は図-5に示す4種類とした。ここで,一樣流とは風洞床に何も置かない時の気流であり,一樣乱流は乱流格子によって,勾配流はラフネスおよびスパイヤーによって作成した。無次元加振振幅 $A_H^*=A_H/H$ および $\theta_H^*=\theta_H/D/2H$ (A_H :風直角方向振動時の模型頂部高さの加振片振幅, θ_H :振れ振動時の模型頂部高さの回転角片振幅)は, $\alpha=1/4$ の勾配流の場合それぞれ $0.001\sim 0.01$ (転倒角で $0.05\sim 0.5^\circ$)および $0.0005\sim 0.005$ (回転角で $0.2\sim 2^\circ$)とし,他の気流の場合は $A_H^*=0.005$ および $\theta_H^*=0.0025$ とした。実験風速は加振振幅 $A_H^*=0.005$ および $\theta_H^*=0.0025$ の場合,模型頂部高さの無次元風速 $U_H^*=U_H/n_0B$ (U_H :模型高さの平均風速, n_0 :加振振動

図-1 振れ振動用模型

図-2 強制加振装置

図-4 風圧測定点

図-3 振動波形

図-5 実験気流

数, B :見付幅)で1.5~140とし, その他の測定では1.5~25とした。実験では風圧力および加振装置の水平シャフトの変位の信号に加振振動数の3倍のローパスフィルターを介して同時測定した。測定時のサンプリング間隔は加振振動数の40倍, データ数8192個とし4回測定した。加振速度は加振変位を正弦波で近似し換算して求めた。本論文で示す振動依存風圧および振動依存風力の変位比例成分は, 無風時に加振した時に作用する慣性抵抗による風圧力および風力(加振振動数の2乗に比例する, 図-5に示した)を差し引いたものである。

3. 実験結果および考察

振動依存層風力係数は(1)式により求めた。

$$C_{LR}(z) = \frac{1}{Tq_z D} \int_0^T F_L(z; t) \frac{\xi(t)}{\xi_0} dt \quad (1.1)$$

$$C_{LI}(z) = \frac{1}{Tq_z D} \int_0^T F_L(z; t) \frac{\dot{\xi}(t)}{\dot{\xi}_0} dt \quad (1.2)$$

$$C_{MR}(z) = \frac{1}{Tq_z D^2} \int_0^T M_z(z; t) \frac{\xi(t)}{\xi_0} dt \quad (1.3)$$

$$C_{MI}(z) = \frac{1}{Tq_z D^2} \int_0^T M_z(z; t) \frac{\dot{\xi}(t)}{\dot{\xi}_0} dt \quad (1.4)$$

ここで, $C_{L(M)R(I)}(z)$:振動依存層風力係数あるいは層振りモーメント係数であり, 最初の添え字 L, M はそれぞれ風直角方向層風力および層振りモーメントを, 2番目の添え字 R, I はそれぞれ変位比例成分および速度比例成分を表す, $F_L(z; t)$:高さ z の風直角方向層風力, $M_z(z; t)$:高さ z の層振りモーメント, T :測定時間, q_z :測定高さ z の速度圧, $\xi(t)$, $\dot{\xi}(t)$:模型頂部の変位および速度, $\xi_0, \dot{\xi}_0$:変位および速度の片振幅である。

模型全体に作用する振動依存一般化風力係数は(2)式によって求めた。

$$C_{L(M)R(I)} = \sum_{j=1}^6 C_{L(M)R(I)}(z_j) u(z_j) \frac{\Delta z_j}{H} \frac{q_{zj}}{q_H} \quad (2)$$

ここで, $C_{L(M)R(I)}$:振動依存一般化風力係数あるいは振動依存

一般化振りモーメント係数であり, 添え字は層風力の場合と同様である, $C_{L(M)R(I)}(z_j)$:高さ z_j の振動依存層風力係数, $u(z_j)$:高さ z_j の振動モード($=z_j/H$), Δz_j : z_j 質点の負担高さ, q_H :模型頂部高さ H の速度圧である。なお, 層風力の時刻歴に振動モードおよび負担高さを掛けて総和して得られる一般化風力の時刻歴より求めた振動依存一般化風力と(2)式より求めたものが一致することは確認した。

2H/3高さの振動依存風圧係数および加振変位との位相差は(3)式により求めた。

$$C_{PRI} = \frac{1}{Tq_z} \int_0^T P_i(t) \frac{\xi(t)}{\xi_0} dt \quad (3.1)$$

$$C_{PI} = \frac{1}{Tq_z} \int_0^T P_i(t) \frac{\dot{\xi}(t)}{\dot{\xi}_0} dt \quad (3.3)$$

$$|C_{Pi}| = \sqrt{C_{PRI}^2 + C_{PI}^2} \quad (3.2)$$

$$\beta_{Pi} = \tan^{-1} \frac{C_{PI}}{C_{PRI}} \quad (3.4)$$

ここで, $C_{PRI(i)}$:測定点 i の振動依存風圧係数の変位あるいは速度比例成分, $|C_{Pi}|$:測定点 i の振動依存風圧係数の絶対値, β_{Pi} :測定点 i の振動依存風圧と変位の位相差, $P_i(t)$:測定点 i の風圧である。

3.1 振動依存風力特性

3.1.1 気流による振動依存一般化風力特性の変化

図-6に気流による振動依存一般化風力特性(以下,「振動依存」は省略する)の変化を示す。加振振幅は $A_H^*=0.005$, $\theta_H^*=0.0025$ である。図-6の風力係数は無次元加振振幅 A_H^* および θ_H^* で基準化したものである。

乱流中の風直角方向一般化風力係数の速度比例成分 C_{LI}/A_H^* は無次元風速 $U_H^*=5$ 付近において正值, すなわち負減衰となる。 $U_H^*=7$ 以上の風速では, C_{LI}/A_H^* は負値を示すが, $U_H^*=23$ を超える風速付近から再び正值となる傾向を示す。一般化振りモーメント係数の速度比例成分 C_{MI}/θ_H^* は $U_H^*=5$ 以下では負の値であり, $U_H^*=5$ を超える風速付近から正值となる。一様乱流中の C_{MI}/θ_H^* は, $U_H^*=15$ 以上にお

図-6 実験気流による振動依存一般化風力特性の変化 ($A_H^*=0.005$, $\theta_H^*=0.0025$)

図-7 高無次元風速域における振動依存一般化風力特性 ($A_H^*=0.005, \theta_H^*=0.0025$)

図-8 加振振幅による振動依存一般化風力特性の変化 (1/4 勾配流)

図-9 振動依存層風力特性 (1/4 勾配流, $A_H^*=0.005, \theta_H^*=0.0025$)

図-10 側面の振動依存風圧特性 (1/4 勾配流, 2H/3 高さ, $A_H^*=0.005$)

いて勾配流に比べ大きな値を示している。

一方、一樣流の場合、無次元風速 $U_H^*=7$ 以下では他の気流と同様の傾向を示しているが、 $U_H^*=7$ 以上では異なった傾向を示す。一樣流中の一般化風力係数の速度比例成分は $U_H^*=13$ 付近で C_{Lr}/A_H^* の場合負から正に、 C_{Ml}/θ_H^* の場合正から負に急変する。変位比例成分 C_{Lr}/A_H^* および C_{Ml}/θ_H^* は、 $U_H^*=13$ 付近にピークを有する。

一樣流と乱流による振動依存風力の差は、辺長比2の矩形平面の場合、一樣流中では完全剥離型の流れ性状を示すのに対し、乱流では再付着型の流れ性状であるために生じるものと思われる。また、 $U_H^*=7$ 以下では気流による風力特性の定性的傾向に大きな差が見られないことから、低風速域では気流によらず3.2項で述べるものと同じメカニズムによって振動依存風力が作用しているものと考えられる。

図-7に高無次元風速域における一般化風力係数を示す。加振振幅は、図-6と同様 $A_H^*=0.005$ 、 $\theta_H^*=0.0025$ である。図-7の風直角方向振動時の一般化風力係数は、準定常仮定に基づく理論値(以下、準定常理論値と呼ぶ)と比較するため、無次元振幅ではなく相対迎角 $\varphi_H=2m_0A_H/U_H$ で基準化したものを示した。図-7の $U_H^*=150$ の位置には、振れ振動用模型に静的変形を与えて頂部風向角 $\pm 2^\circ$ の範囲で測定した風方向および風直角方向一般化平均風力係数 $\bar{C}_D$ 、 $\bar{C}_L$ および一般化平均振りモーメント係数 $\bar{C}_M$ から求めた準定常理論値 $\bar{C}_D + d\bar{C}_L/d\alpha$ 、 $d\bar{C}_M/d\alpha \cdot 2H/D$ (α : 風向角) も示した。

C_{Lr}/φ_H および C_{Ml}/θ_H^* は、 $U_H^*=40$ 以上の風速ではほぼ一定値を示し、準定常理論値と概ね一致する。 C_{Lr}/φ_H および C_{Ml}/θ_H^* は、乱流中の場合 $U_H^*=20$ 付近でピークを示し、この風速以上では風速の増加に伴い減少し0に漸近する傾向を示す。

3.1.2 加振振幅による振動依存一般化風力特性の変化

図-8に加振振幅による一般化風力特性の変化を示す。気流は1/4勾配流である。図-8の風力係数は図-6と同様に A_H^* および θ_H^* で基準化されている。

一般化風力係数は風直角方向風力および振りモーメントとも無次元風速 $U_H^*=5$ 前後のピークを除き本実験の加振振幅範囲では加振振幅にほぼ比例する。 $U_H^*=5$ 前後のピークでは加振振幅が大きくなるほど

図-11 片側側面風上および風下部分の振動依存風力の速度比例成分 (1/4 勾配流, 2H/3 高さ, $A_H^*=0.005$, $\theta_H^*=0.0025$)

一般化風力係数は小さくなる傾向を示す。

3.1.3 振動依存層風力特性

図-9に1/4勾配流の時の振動依存層風力特性を示す。なお、図-9は各層の層風力であるための縦軸は各測定高さの無次元加振振幅 $A_z^*=A_z/H$ 、 $\theta_z^*=\theta_z D/2H$ および速度圧 q_z で基準化したものであり、横軸は各測定高さの平均風速 U_z から求めた無次元風速 $U_z^*=U_z/n_0B$ である。層風力は、風直角方向層風力係数の $U_z^*=7$ 以下、層振りモーメント係数の $U_z^*=6$ 以下の低風速域では高さによらずほぼ同様の値を示している。一方、高風速域では、下層ほど層風力係数は大きくなる傾向を示す。

3.2 振動依存風圧特性

図-10に1/4勾配流中の2H/3高さで求めた風直角方向振動時の振動依存風圧係数(以下、「振動依存」は省略する)の絶対値 $|C_{Pi}|/A_z^*$ および加振変位との位相差 β_{Pi} の無次元風速 U_z^* による変化を示す。な

お、図-10(b)の位相差の図において $U_z^*=8$ 以上の $x/D=1/16 \sim 5/16$ (図中黒印, x :前縁からの距離)のデータはほとんど同じ値が示されている。振れ振動時の風圧は図示していないが、風直角方向振動時と比べ位相に $\pi/2$ 前後の差がある他はほぼ同様の性状を示す。

風圧係数の絶対値 $|C_{pi}|/A_z^*$ および位相差 β_{pi} は、側面の風上側と風下側では異なる性状を示している。風下部分の $|C_{pi}|/A_z^*$ は、 $U_z^*=5$ 付近にピークを有し、 $U_z^*=5$ 以上では風速の増加とともに減少する。風下部分の β_{pi} は、風速の増加とともに単調に増加する。図-10(c)は風下部分の β_{pi} を横軸を風上端部からの距離 x で基準化した無次元風速 U_z/n_0x で表したものであるが、風下部分の β_{pi} の U_z/n_0x による変化は風圧測定点の位置によらずほぼ一致する。図-10(c)中の曲線は、側面における移流速度が振動時においても一定と仮定し、 β_{pi} が無次元風速の逆数 n_0x/U_z に比例するととして求めた近似曲線であるが、低風速域では実験値とよく一致する。一方、風上部分の $|C_{pi}|/A_z^*$ は、 $U_z^*=7$ 以下の風速では風速の増加とともに減少し、 $U_z^*=7.5$ 付近

で極小値を示した後、増加し $U_z^*=13$ 付近で極大値を示す。 β_{pi} は、 $|C_{pi}|/A_z^*$ が極小値を示す $U_z^*=7$ 付近で急変し、この風速以上では風速にほぼ比例する。また、 $U_z^*=7$ 以上の風上部分では、 $|C_{pi}|/A_z^*$ 、 β_{pi} とも測定点によらずほぼ同様の値を示す。

図-11に片側側面の中央部より風上部分および風下部分の風圧係数の速度比例成分 $C_{pi}(z)$ より求めた層風力係数の速度比例成分 $C_{Li}(z)$ 、 $C_{Mi}(z)$ および片側側面全面の $C_{pi}(z)$ より求めた $C_{Li}(z)$ 、 $C_{Mi}(z)$ を示す。図-11より、 $C_{Li}(z)$ の $U_H^*=5$ および $C_{Mi}(z)$ の $U_z^*=7$ 付近の正值のピークは側面風下側の風圧が寄与しており、 $C_{Mi}(z)$ における $U_z^*=10$ 以上の正值は側面風上側の風圧が寄与していることが分かる。

図-12に変位が同位相時の変動風圧を平均して求めた風圧係数 $\bar{C}_p$ を示す。風直角方向振動時の $U_H^*=5, 10$ および振れ振動時の $U_H^*=7$ の $\bar{C}_p$ には、振動に同期して負圧のピークが風上から風下に移行していく様子が見られる。これは、Komatsu et al.¹¹⁾、Kubo et al.¹²⁾ に示さ

図-12 変位が同位相時の変動風圧係数の平均値 ($2H/3$ 高さ)

れているように、前縁剥離渦の移流に伴った風圧変動が生じているためと思われる。風直角方向振動時および捩れ振動時の $U_H^*=20$ の $\tilde{C}_p$ には、低風速時のような渦の移流に伴う負圧のピークの移動は見られず、各点の $\tilde{C}_p$ は正弦波と類似した変動を示している。しかし、変位あるいは速度とは位相差を有している。

以上の結果より、辺長比2の高層建築物に生じる空力不安定振動現象の内、風直角方向の $U_H^*=5$ 付近および捩れの $U_H^*=7$ 付近の限定した風速に生じる不安定振動は、前縁剥離渦の流下に伴って生じる側面風下側の風圧変動と振動との相互作用によるものと考えられる。捩れの $U_H^*=13$ 以上で生じる空力不安定振動は、側面風上側の風圧変動と振動との相互作用によるものであり、図10に示したように側面風上部分によって生じており、前縁剥離渦の形成との相互作用によって負減衰効果が生じるものと考えられる。

3.3 空力減衰定数および振動依存風力を考慮した応答解析

図-13に図-6の勾配流中における一般化風力係数の速度比例成分から(4)式によって求めた空力減衰定数を、弾性模型実験から求めた空力減衰定数とともに示す。加振振幅は $A_H^*=0.005$ 、 $\theta_H^*=0.0025$ で

の結果を用いた。なお、弾性模型実験は、文献8)および13)に示されているものであり、弾性模型の変位波形の自己相関関数を近似して得られた等価減衰より構造減衰を引いて求められたものである。図中に示した hs は弾性模型実験時の構造減衰定数である。

$$ha_x = \frac{3}{16\pi^2} \frac{\rho_a}{\rho_b} \left(\frac{U_H}{n_0 B} \right)^2 \frac{C_{Ll}}{A_H^*} \quad (4.1)$$

$$ha_\theta = \frac{3}{16\pi^2} \frac{\rho_a}{\rho_b} \left(\frac{U_H}{n_0 B} \right)^2 \frac{DB}{i_0^2} \frac{C_{Ml}}{\theta_H^*} \quad (4.2)$$

ここで、 ha_x は風直角方向振動時空力減衰定数、 ha_θ は捩れ振動時空力減衰定数、 ρ_a は空気密度、 ρ_b は建物密度、 $i_0 = \sqrt{I/M}$ である。(4)式からの空力減衰定数の算定では、文献13)における弾性模型の条件に合わせて $\rho_b/\rho_a=203$ 、 $i_0=0.64B$ とした。

風直角方向振動時空力減衰定数 ha_x は、無次元風速5前後の限定した風速範囲で負減衰となり、無次元風速7以上では正減衰となる。捩れ振動時空力減衰定数 ha_θ は、無次元風速5付近で正から負に変化する。 ha_θ は無次元風速7～12で-0.5～-1.0%程度の値を示し、無次元風速14付近から急激に減少する。

弾性模型実験結果から得られた空力減衰定数と比較した場合、風直角方向振動時の無次元風速5付近および無次元風速15付近の絶対値が多少異なることおよび捩れ振動時の無次元風速13付近における急激な減少が(4)式から求めたものが弾性模型実験結果よりやや高風速側から始まることを除きほぼ一致する。

図-15に(4)式より求めた空力減衰定数 ha を用いて(5)式により求めた応答解析結果と弾性模型実験結果との比較を示す。

図-13 振動依存一般化風力から求めた空力減衰定数と弾性模型実験から求めた空力減衰定数¹³⁾の比較

図-14 静止模型に作用する一般化風力のパワースペクトル密度(1/4 勾配流)¹³⁾

図-15 振動依存風力を考慮した応答解析結果と弾性模型実験結果¹³⁾の比較(1/4勾配流)

$$\sigma_z = \sqrt{S_{FW}(n) |\chi(n)|^2 dn} \quad (5.1)$$

$$|\chi(n)| = \frac{1}{M_S (2\pi n_0)^2 \{ [1 - (n/n_0)^2]^2 + 4(hs + ha)^2 (n/n_0)^2 \}} \quad (5.2)$$

ここで、 $S_{FW}(n)$:一般化外力のパワースペクトル密度、 $|\chi(n)|$:メカニカルアドミッタンス、 hs :構造減衰定数、 M_S :一般化質量である。一般化風外力のパワースペクトル密度は、弾性模型と同じ大きさの剛模型を用いて風力天秤により測定したものであり、図-14に示した。ただし、 ϕ は振りモーメントから一般化振りモーメントへのモード補正係数であり建築物荷重指針・同解説¹⁴⁾を参考に0.59とした。

応答解析結果は、弾性模型実験結果と比較し、風直角方向振動の構造減衰定数が0.6%の時を除きよく一致している。風直角方向振動の $h_{sx}=0.6\%$ の時の差は、本研究で用いた解析方法では文献⁸⁾に示されている振動依存風力の連成項が考慮されていないためと考えられる。

4. 結論

辺長比2の矩形断面構造物の風直角方向および振れ振動時に作用する振動依存風力特性を強制振動法を用いた風洞実験により検討した。結果は以下のとおりである。

1. 辺長比2の高層建築物に作用する振動依存一般化風力は、乱流中と同様流中では無次元風速7以上では異なった振動依存風力特性となる。乱流中において振動依存一般化風力の速度比例成分が正值を示す風速は、風直角方向振動依存一般化風力の場合無次元風速5付近および無次元風速20以上の風速域であり、振動依存一般化振りモーメントの場合、無次元風速5以上の風速域である。
2. 振動依存一般化風力は、無次元風速5付近を除き加振振幅にほぼ比例する。無次元風速5付近では、加振振幅が大きなほど振動依存一般化風力は小さくなる傾向を示す。
3. 振動依存風力係数は、各高さの振幅および速度圧で基準化した場合、無次元風速6以下の低風速域では高さによらずほぼ同様の値を示す。無次元風速6以上の高風速域では、下層ほど振動依

存風力係数は大きくなる。

4. 辺長比2の矩形断面の場合、無次元風速5~7における風直角方向および振り振動時の振動依存風力の速度比例成分の正值は、主に風下側側壁面に作用する風圧が寄与しており、前縁剥離渦の移流による風圧変動と振動の相互作用によって生じるものと考えられる。無次元風速13以上の振り振動時の振動依存風力の速度比例成分の正值は、側壁面風上側に作用する風圧が主に寄与しており、振動に伴って生じる側壁面風上側の風圧変動が振れ変位に対して位相後れを有するために負減衰効果が生じるものと考えられる。
5. 振動依存一般化風力の速度比例成分を用いて求めた空力減衰定数は、多質点系弾性模型実験より求めたものとほぼ一致する。また、この空力減衰定数を用いて求めた応答解析結果も弾性模型実験結果とほぼ一致した。

謝辞

本研究の風洞実験を行うに当たり、当時神奈川大学大学院生の宮澤浩史君には多大なるご協力をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

1. 大熊武司, 丸川比佐夫, 片桐純治, 鶴見俊雄, 2次元矩形断面構造物に作用する振動依存風力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第512号, 1998年10月, pp39-46
2. 谷池義人, 京都大学博士学位論文, 1983年
3. Steckley A., Ph.D thesis The university of Western Ontario, 1989
4. 西村宏昭, 谷池義人, 境界層流中における空力不安定振動, 日本建築学会構造系論文集第456号, 1994年2月, pp31-37
5. 西村宏昭, 谷池義人, 境界層流中における高層建築物の空力不安定振動(続)-種々の長方形断面を持つ高層建築物の場合-, 日本建築学会構造系論文集第482号, 1996年4月, pp27-32
6. 河井宏允, 高層建築物の渦励振, ギャロッピング, フラッター, 第12回風工学シンポジウム論文報告集, 1992年12月, pp267-272
7. 丸川比佐夫, 片桐純治, 勝村章, 藤井邦雄, 多質点系弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討, 日本建築学会構造系論文集第484号, 1996年6月, pp39-48
8. 片桐純治, 丸川比佐夫, 大熊武司, 藤井邦雄, 高層建築物の風応答における固有振動数比の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第507号, 1998年5月, pp21-27
9. 片桐純治, 勝村章, 丸川比佐夫, 藤井邦雄, 辺長比による高層建築物の風直角方向および振れの風応答性状の変化に関する研究, 第15回風工学シンポジウム, 1998年12月, pp473-478
10. 大熊武司, 片桐純治, 丸川比佐夫, 宮澤浩史, 片岡里美, 高層建築物に作用する振動依存風力特性に関する実験的研究 その1強制振動装置の開発および実験模型の特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)1997年9月, pp187-188
11. Komatsu, S. and Kobayashi, H., Vortex-induced oscillation of bluff cylinders, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn, Vol.6, 1980, pp335-362
12. Kubo, Y. Hirata, K. and Mikawa, K., Mechanism of aerodynamic vibration of shallow bridge girder sections, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn, Vol.41-44, 1992, pp1297-1308
13. 片桐純治, 勝村章, 丸川比佐夫, 藤井邦雄, 気流特性による辺長比2の高層建築物の振れ応答性状の変化に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)1999年9月, pp147-148
14. 日本建築学会編, 建築物荷重指針・同解説, 1993年

(1999年12月20日原稿受理, 2000年3月10日採用決定)