二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基礎的研究

MOTION-INDUCED WIND FORCES ON TWO DIMENSIONAL LONG
AFTER RECTANGULAR MODELS

大熊 武司*, 丸川 比佐夫**, 片桐 純治***, 鶴見 俊雄****

Takeshi OHKUMA, Hisao MARUKAWA, Junji KATAGIRI
and Toshio TSURUMI

Motion-induced wind forces on two-dimensional rectangular section models with aspect ratio 1, 2 and 3 are investigated by a wind tunnel test using uniform turbulent flow. In this study, the motion-induced wind pressures and wind forces during across-wind vibration and torsional vibration are measured by forced-oscillation method. Furthermore, the wind responses of two dimensional rectangular structures are estimated by spectrum modal analysis using the motion-induced wind forces measured in this study, and the analytical results are compared with the free vibration experimental results.

Keywords : Forced-oscillation method, Across-wind vibration, Torsional vibration,
Motion-induced wind force, Two dimensional model

強制振動法, 風直角方向振動, 捩れ振動, 振動依存風力, 二次元模型

1. はじめに

超高層建築物あるいは大スパン構造物といった超大, 軽量・低減衰構造物の出現に伴って, 構造物の不安定振動の発生の有無の検討が設計段階で重要になる。高無次元風速での風直角方向の不安定振動, いわゆるギャロッピングに関しては, 準定常理論により検討できる事が多くの研究により明らかになっている¹⁾。それ以外の自励的渦励振およびフラッターに関しては準定常理論による検討はほとんど不可能である。自励的渦励振およびフラッターに関する研究は, 超大吊り橋を対象とした橋梁関係に多く見られ, その発生要因は解明されつつある²⁾。これらの振動あるいは, 振動時の風力特性は形状にもよるが, 接近流に含まれる乱れによって影響を受ける事が指摘されている^{3)~8)}。

本研究は, 高層建築物を対象とする際に必要となる乱流における振動時の風力特に振動依存風力の特性の把握および不安定振動の発生に関する知見を得る事を目的とし, その第一段階として, 振動時の二次元矩形断面模型に作用する振動依存風力性状を明らかにした。本研究では, 模型の振動は強制加振によって与え, 風力測定は力場の場が詳細に吟味できる事より風圧測定によって行った。また, 測定した振動依存風力を用いて二次元構造物の応答予

測を行い, 自由振動実験結果と比較した。

2. 実験方法

使用風洞は神奈川大学所有の吹出し型境界層風洞である。使用模型は, 図-1に示すように辺長比 $D/B=1.2$ および3(D :奥行き, B :見附幅)の矩形断面二次元模型である。風圧測定孔は, 模型のスパン中央に設け, 両端部には直径34cmの端板を取り付けてある。模型への振動は, 風洞床下に設けた強制振動装置(図-2)によって与え, 振動形態は模型の取り付け位置を変える事で風直角方向振動, 捩れ振動および風直角・捩り連成振動を与える事が出来る。本論文では, 図-3に示す風直角方向および捩れ振動時の結果について報告する。なお, ここでいう捩れ振動とは, 回転中心を模型断面中心とした振動である。風直角方向振動時の無次元加振振幅 A^* ($=A/B$, A :風直角方向加振片振幅)は0.008~0.067, 捩れ振動時の加振振幅 θ (θ :回転角片振幅rad.)は0.005~0.02(本論文では主に無次元加振振幅 $\theta^*=\theta D/2B$ で表している)とした。実験風速は, 4~8m/sであり, 加振振動数 f_0 および模型見附幅による無次元風速 $U^*(=U/f_0 B)$ は3~26である。実験気流は, 乱流格子により作成した乱れ強さ8%, 乱れのスケール4cmの一樣乱流である。

本論文は文献15)に加筆・修正したものである。

* 神奈川大学建築学科 教授・工博

** ㈱泉創建エンジニアリング構造システム研究室 室長

*** ㈱風工学研究所 主任研究員

**** 佐藤工業㈱中央技術研究所 工修

Prof., Kanagawa University, Dep. of Arch., Dr. Eng.
General Manager, R & D, Izumi Sohken Engineering Co., Ltd.
Chief Research Eng., Wind Engineering Institute Co., Ltd.
Engineering Research Center, Sato Kogyo Co., Ltd., M. Eng.

3. 実験結果

3.1 平均風圧係数

図-4に風直角方向および捩れ振動時における側面の平均風圧係数分布を示す。

辺長比1の場合、風直角方向振動時には振動の影響が顕著ではないが、捩れ振動時には振動の影響を受け、平均風圧係数は全体的に負圧が大きくなる傾向がある。辺長比2および3の場合、振動形態に関係なく振動の影響を受け、中央より風上側の領域で負圧が大きくなっている。

図-3 振動形態

図-4 側壁面の平均風圧係数分布(●: 非振動時を示す)

3.2 変動風圧係数

図-5に風直角方向および捩れ振動時の側面の変動風圧係数分布を示す。

辺長比1の場合、風直角方向振動時には、概して非振動時に比べ変動風圧係数は全体的に若干小さくなる傾向がある。辺長比2および3の風直角方向振動時の、低風速時(辺長比2の $U^* \leq 5$, 辺長比3の $U^* \leq 6$)では、振動の影響を顕著に受け、風上側と風下側にピークが見られる。辺長比3の場合、高風速時の変動風圧係数は、非振動時に比べ小さくなる。

図-2 強制振動装置

図-5 側壁面の変動風圧係数分布(●: 非振動時を示す)

3.3 変動風圧のパワースペクトル密度および流れ方向の空間的位相差

図-6および図-7に風上端部より約3D/4風下の測定点の非振動時と風直角方向振動時の変動風圧のパワースペクトル密度および流れ方向の2点間の空間的位相差を示す。

辺長比1の場合、風直角方向振動時のパワースペクトル密度形状は、非振動時と類似し、 $U^* \div 8$ にピークを有する。位相差も、振動の影響は顕著でなく非振動時によく類似している。辺長比2および3の場合、風直角方向振動時のパワースペクトル密度は、加振振動数に基づく無次元風速 U^* が非振動時のパワースペクトル密度のピーク振動数に対応する無次元風速 U_{SP}^* (辺長比2の場合 $U_{SP}^* \div 5$, 辺長比3の場合 $U_{SP}^* \div 6$)以下において、加振振動数付近に顕著なピークが見られる。位相差は、 $U^* \leq U_{SP}^*$ においては、振動の影響を受け、 $f\delta/U$ (δ : 2点間距離) が約0.1以下の低無次元振動数で位相の遅れが大きくなる傾向がある。 $U^* \geq U_{SP}^*$ では、位相差は非振動時の形状に類似している。

以上の傾向は、振れ振動時にも見られる。

3.4 振動依存風圧係数

振動依存風圧は、変動風圧に加振振動数の約3倍の周波数のローパスフィルターを介した風圧データから得られたものである。変位についても同様にローパスフィルターを介した。サンプリング周波数は加振振動数の約40倍とし、サンプリング個数は8192個とした。加振速度データは、加振変位データのフーリエ係数に角振動数 ω を掛けて逆フーリエ変換して求めた。

振動依存風圧係数の変位比例成分 C_{PR} 、速度比例成分 C_{PI} および変位と振動依存風力の位相差 β_P は下式により求めた。

$$C_{PR} = \frac{2}{Tq} \int_0^T P_i(t) \frac{\dot{\eta}(t)}{\eta_0} dt \quad (1.1)$$

$$C_{PI} = \frac{2}{Tq} \int_0^T P_i(t) \frac{\ddot{\eta}(t)}{\dot{\eta}_0} dt \quad (1.2)$$

$$\beta_P = \tan^{-1} \left(\frac{C_{PI}}{C_{PR}} \right) \quad (1.3)$$

ここに、 T : 平均時間、 q : 速度圧、 $P_i(t)$: i 点の変動風圧、 $\eta(t)$: 変位あるいは回転角、 η_0 : η の片振幅、 $\dot{\eta}(t)$: 速度あるいは角速度、 $\dot{\eta}_0$: $\dot{\eta}$ の片振幅である。なお、変位、回転角はそれぞれ上向き、時計周りを正とした。得られた振動依存風圧係数は、 $A^*(=A/B)$ および $\theta^*(=\theta D/2B)$ で基準化した。

図-8に不安定振動に関係する振動依存風圧係数の速度比例成分および変位との位相差を示す。

風直角方向振動時 辺長比1の場合、速度比例成分の値は、 $U^* < U_{SP}^*$ ($U_{SP}^* \div 8$) では全測定点において負であり、風下側になるほど負の値が大きくなる。また、 $U^* \geq U_{SP}^*$ では、速度比例成分は全測定点で正となるが、風下になるほどその値は小さくなる。 $U^* = U_{SP}^*$ では、加振振幅による振動依存風圧係数の変化が見られるが、他の風速では振動依存風力は加振振幅にほぼ比例している。

変位との位相差は、 $U^* < U_{SP}^*$ では風上において0付近であるが、風下に行くにしたがい低減する。 $U^* \div U_{SP}^*$ で位相差は全測定点で負から正に変化する。 $U^* > U_{SP}^*$ の場合、風下端部付近のみで位相差は負の値を示す。

辺長比2の場合、 $U^* \leq U_{SP}^*$ ($U_{SP}^* \div 5$) において、速度比例成分は中央付近から風上の領域で負の値、風下の領域で正の値を示す。

(a) 非振動時

(b) 辺長比1 ($A^*=0.033$)

(c) 辺長比2 ($A^*=0.033$)

図-6 変動風圧のパワースペクトル密度(風直角方向振動時)

(a) 辺長比1

(b) 辺長比2

図-7 空間位相差(風直角方向振動時 $A^*=0.033$)

辺長比3の場合 $U^* \leq U_{SP}^*$ ($U_{SP}^* \div 6$) では、速度比例成分は中央部では正の値、端部で負の値を示す。辺長比2,3とも $U^* \geq U_{SP}^*$ では、速度比例成分は無次元風速の増加に伴い正となる領域は風下側へと移動し狭く、速度比例成分の値も小さくなる。加振振幅による差は、 U_{SP}^* 以下の風速で見られるが、 $U^* \geq U_{SP}^*$ では加振振幅にほぼ比例する。低風速時における振動依存風圧の速度比例成分の傾向は山田他⁹⁾の一樣乱流中での結果と一致する。

辺長比2,3の場合の位相差は、 $U^* \leq U_{SP}^*$ で風上端部付近では風下側になるにつれて緩やかに低減する。 $U^* \geq U_{SP}^*$ では、風上端部付近では位相は一定であるが、中央より風下側では位相差が直線的に変化する。

振れ振動時 辺長比1の場合、速度比例成分および位相差の定性的傾向は、風直角方向振動時に類似している。

辺長比2,3の場合、速度比例成分の定性的傾向は風直角方向振動時によく類似しているが、 $U^* \leq U_{SP}^*$ で風上端部における値は小

さく、 $U^* \geq 16$ の場合、速度比例成分は中央より風上で正、風下で負の値を示す。辺長比 2, 3 の位相差は、定性的傾向は風直角方向振動時に類似している。

3.5 振動依存風力

振動依存揚力係数 $C_{LR(l)}$, 振りモーメント係数 $C_{MR(l)}$ および変位

速度比例成分	位相差	A^*	θ
●	○	0.067	0.020
■	□	0.033	0.010
◆	◇	0.017	0.005
▲	△	0.008	—

図-8 振動依存風圧係数

との位相差 $\beta_{L(M)}$ は、振動依存風圧係数より下式により求めた。

$$C_{LR(I)} = \frac{1}{D} \sum_{\text{上下面}} C_{PR(I)} \Delta \ell \quad (2.1)$$

$$C_{MR(I)} = \frac{1}{D^2} \sum_{\text{全面}} C_{PR(I)} \ell_s \Delta \ell \quad (2.2)$$

$$\beta_{L(M)} = \tan^{-1} \left(\frac{C_{L(M)I}}{C_{L(M)R}} \right) \quad (2.3)$$

ここで、 $\Delta \ell$: 負担幅、 ℓ_s : 断面中心からの距離であり、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。なお、力の向きは変位および回転角と同じ向きとした。振動依存風力も風圧同様無次元加振振幅で基準化した。

図-9 および図-10 に振動依存揚力係数および振動依存振りモーメント係数を示す。ここでは特に、構造物の不安定振動に関係する振動依存風力係数の速度比例成分および位相差について述べる。

風直角方向振動時 辺長比 1 の場合、振動依存揚力係数の速度比例成分は、 $U^* \div U^*_{SP}$ において負から正に急激に変化し正の極値を示した後、無次元風速の増加に伴い指数的に減少する。辺長比 2、3 の場合、速度比例成分の値は $0.8U^*_{SP} \leq U^* \leq 1.2U^*_{SP}$ の範囲で正の値を示し、 $U^* \div U^*_{SP}$ で極大となる。辺長比 2 では、 $U^* \geq 27$ の高風速で再び正値を示す傾向が見られるが、辺長比 3 ではこの傾向は見られない。辺長比 1～3 のいずれにおいても $U^* \div U^*_{SP}$ を除き振動依存風力は加振振幅にほぼ比例する。 $U^* \div U^*_{SP}$ では加振振幅が大きなほど振動依存風力が小さくなる傾向を示す。

風直角方向振動時の位相差は、辺長比 1～3 のいずれの場合も $U^* \div U^*_{SP}$ で急激に変化し、 $U^* \geq 10$ の高風速では緩やかな変化を示す。 $U^* \div U^*_{SP}$ の位相変化は、辺長比 1 の場合に最も著しい。

捩れ振動時 辺長比 1 の場合、振動依存振りモーメント係数の速度比例成分は $U^* \div U^*_{SP}$ および $U^* \div 0.5U^*_{SP}$ で正の値を示す。辺長比 2 の場合、速度比例成分の値は $U^* \div U^*_{SP}$ から正となり、 $U^* \div 1.2U^*_{SP}$ で正の極値を示す。無次元風速の増加に伴い速度比例成分の値は小さくなるが、 $U^* \geq 10$ で再び増加し、 $U^* \div 20$ においてふたたび極大値となる。辺長比 3 の場合、速度比例成分は $U^* \div 0.5U^*_{SP}$ および $U^* \geq 10$ において正の値を示す。 $U^* \div U^*_{SP}$ における加振振幅による振動依存風力の変化は捩れ振動の場合風直角方向振動時ほど明瞭ではなく、振動依存風力は概ね加振振幅に比例する。

捩れ振動時の位相差の風速による変化の定性的傾向は風直角方向振動時と同様である。

以上の結果を一樣流中での実験結果^{10),11)}と比較した場合、辺長比 2 の風直角方向振動時の振動依存揚力において明瞭な差が見られる。一樣流中の場合、振動依存揚力は、 $U^* \div 15$ 前後において位相差の急激な変化に伴って速度比例成分が負から正に変化する。一方、本研究の一樣乱流中の結果ではこのような傾向は示さず、振動依存風力の急激な変化は見られない。これは、辺長比 2 の場合、一樣流中では後流域にカルマン渦が形成されるのに対し、乱流中では流れの再付着によってカルマン渦が形成されないためである。

4. 振動依存風力を考慮した応答予測

本研究で測定された振動依存風力係数を用いてスペクトルモーダル法により応答解析を行い、大熊他による二次元模型の自由振動実験結果^{12),13),14)}と比較する。なお、自由振動実験は、本研究

と同じ形状の模型および気流を用いて行われたものである。

4.1 応答解析方法

並進振動を例にとると、振動依存風力を変位・速度比例成分で表した場合の振動方程式は周波数領域で表すと次式のようにになる。

$$\left[-(2\pi f)^2 M_S + i(2\pi f) C_S + K_S \right] \xi(f) = F_W(f) + F_{aR}(f) + iF_{aI}(f) \quad (3)$$

ここで、 M_S : 一般化質量、 C_S : 一般化減衰、 K_S : 一般化剛性、 $F_W(f)$: 一般化外力、 $F_{aR}(f)$: 振動依存一般化風力の変位(速度)比例成分、 $\xi(f)$: 一般化変位、 $i = \sqrt{-1}$ である。

右辺の振動依存風力を左辺に移項して整理すると、振動方程式は以下のようにになる。

$$K_S \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \left(\frac{K_a}{K_S} \right) + i2(hs + ha) \left(\frac{f}{f_0} \right) \right] \xi(f) = F_W(f) \quad (4)$$

ここで、 f_0 : 固有振動数、 K_a : 一般化空力剛性、 hs : 一般化構造減衰定数、 ha : 一般化空力減衰定数である。

振動モードを一樣とすると K_a/K_S および ha は下式のようにになる。

$$\frac{K_a}{K_S} = -\frac{1}{8\pi^2} \frac{\rho_a}{\rho_S} \left(\frac{U}{faB} \right)^2 \frac{1}{A^*} C_{LR} \left(\frac{U}{faB} \right) \quad (5)$$

$$ha = -\frac{1}{16\pi^2} \frac{\rho_a}{\rho_S} \left(\frac{U}{faB} \right)^2 \frac{1}{A^*} C_{LI} \left(\frac{U}{faB} \right) \quad (6)$$

$$fa = f_0 \sqrt{1 + \frac{K_a}{K_S}} \quad (7)$$

ここで、 fa : 見かけ上の構造物の固有振動数、 ρ_a : 空気密度、 ρ_S : 構造物の密度である。

したがって、応答変位の標準偏差は振動依存風力を考慮した場合、下式のようにになる。

$$\sigma_\xi = \frac{\sigma_{FW}}{M_S (2\pi f_0)^2} \sqrt{\int \frac{S_{FW}(f)}{\sigma_{FW}^2} |\chi(f)|^2 df} \quad (8)$$

$$|\chi(f)| = \frac{1}{\{1 - (f/f_0)^2 + K_a/K_S\}^2 + 4(hs + ha)^2 (f/f_0)^2} \quad (9)$$

ここで、 σ_{FW} : 一般化外力の標準偏差、 $S_{FW}(f)$: 一般化外力のパワースペクトル密度である。

本研究の応答解析では、風外力および振動依存風力は中央部分での測定値を用いた。スパン方向の風外力および振動依存風力の分布は一樣、風力相関は完全相関とし、変位に対する振動依存風力の位相差はスパン方向に一定とした。また、振動依存風力は振幅に比例するとして、空力減衰および空力剛性は実験を行った最大加振振幅の振動依存風力を 3 次元スプライン関数で補間したものを用いて (5) 式および (6) 式より求めた。

4.2 応答予測結果

図-11 に応答変位の標準偏差の予測値と自由振動実験値との比較を示す。なお、図中に示した質量減衰パラメータはそれぞれ $S_{CL} = 2\pi hs M/\rho_a BDL$ 、 $S_{CM} = 2\pi hs I/\rho_a B^2 D^2 L$ (M : 模型の質量、 I : 模型の回転慣性モーメント) である。

振動依存風力を考慮した応答予測値は、振動依存風力を考慮しない場合に比べ実験値により近い結果が得られている。しかし、質量減衰パラメータが小さな場合、 $U^* \div U^*_{SP}$ の予測値が実験値に比べ大きく、また、辺長比 2 の風直角方向の渦励振および捩れフ

(a) 辺長比 1

(b) 辺長比 2

(c) 辺長比 3

図-9 風直角方向振動時の振動依存揚力係数および位相差 (▼は U^*_{SP} を示す)

(1) 変位比例成分

(2) 速度比例成分

(a) 辺長比 1

(3) 位相差

(1) 変位比例成分

(2) 速度比例成分

(b) 辺長比 2

(3) 位相差

(1) 変位比例成分

(2) 速度比例成分

(c) 辺長比 3

(3) 位相差

図-10 揺れ振動時の振動依存振りモーメント係数および位相差 (▼は U^*_{SP} を示す)

ラッターの生じる無次元風速が異なる。この内、 $U^* \div U_{SP}^*$ の時、実験値に比較し予測値が大きな値となるのは、自由振動実験での振幅が本実験の加振振幅に比べ大きな値が生じており、本実験結果および文献10), 11)に示されているように振動依存風力が振幅に対して非線形に変化するためと思われる。辺長比2の自励振動の発振風速が振動実験結果と異なること、特に、振れフラッターの発振風速が異なることは、無次元風速8および14の振動依存風圧の性状より判断して振れフラッターが流れの再付着性状に大きく依存すると思われることより、強制振動実験と自由振動実験の振動性状および端板付近での気流性状の違いなどに起因するものと考えられる。

5. 結論

一様乱流中における矩形断面構造物に作用する振動依存風力特性について二次元模型を用いた風洞実験により明らかにした。また、測定した振動依存風力を用いて応答予測を行い、自由振動実験結果との比較を行った。結果は以下のとおりである。

- 1) 風直角方向振動の場合、辺長比1～3の断面では $U^* \div U_{SP}^*$ において振動依存風力の速度成分が正值の極大値を示す。
- 2) 振れ振動の場合、辺長比1では $U^* \div U_{SP}^*$ において振動依存風力の速度成分が正值の極大値を示す。辺長比2では、 $U^* \div U_{SP}^*$ および $U^* \div 20$ において正值の極大値を示す。辺長比3では $U^* \div U_{SP}^*$ で正值とならず $U^* > 10$ において正の値を示す。
- 3) 測定した振動依存風力を考慮した応答予測値は、振動依存風力を考慮しない場合に比べ自由振動実験結果により近い結果が得られた。しかし、質量減衰パラメーターが小さな場合、不安定振動の生じる風速範囲では応答予測値は実験値より大きな値となった。

参考文献

- 1) 例えば Parkinson, G.V., Wind-induced instability of structures, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A.269, 1971
- 2) 例えば 白石成人, 松本勝, 渦励振の発生機構と応答評価, 日本風工学会誌第20号, 1984年6月
- 3) 山田均, 宮田利雄, 伊藤学, たわみ振動する角柱の周辺風圧分布に関する一考察, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980年11月
- 4) 松本勝, 白石成人, 白土博通, 真下義章, 湯川雅之, 平井滋登, 各種空力振動現象に及ぼす乱れの影響, 第10回風工学シンポジウム論文集1988年12月
- 5) 谷池義人, 京都大学博士学位論文, 1983年
- 6) Steckley A., Ph.D thesis The University of Western Ontario, 1989
- 7) 小林紘士, 川谷充朗, 金照恵, 上島秀作, 乱流中における角柱の渦励振時の動的圧力特性, 日本風工学会誌, 第47号, 1991年4月
- 8) 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集, 1992年12月
- 9) 山田均, 宮田利雄, 山下幸俊, 長方形断面柱のたわみ渦励振時の剥離流に対する初期迎角の支配効果, 第7回風工学シンポジウム論文集, 1982年12月
- 10) Nakamura, Y. and Mizota, T., Unsteady lifts and wakes of oscillating rectangular prisms, J. Eng. Mech. Div., Proc. of ASCE 101, EM6, 1975, 12
- 11) 鷲津久一郎, 大屋昭男, 大築志夫, 藤井邦雄, 箱型模型の空力弾性特性に関する風洞実験, 第4回風工学シンポジウム論文集, 1976年12月
- 12) 大熊武司, 丸川比佐夫, 山本学, 鶴見俊雄, 矩形断面構造物の風直角方向空力不安定振動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)1993年9月
- 13) 大熊武司, 丸川比佐夫, 山本学, 矩形断面構造物の振れ空力不安定振動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)1995年8月
- 14) 山本学, 矩形断面構造物の空力不安定振動の時刻歴解析に関する研究, 神奈川大学大学院1994年度修士論文
- 15) 丸川比佐夫, 大熊武司, 鶴見俊雄, 山本学, 百村幸男, 矩形断面構造物に作用する振動依存風力特性に関する基礎的研究, 第12回風工学シンポジウム論文集, 1992年12月

図-11 応答解析結果

(1997年12月10日原稿受理, 1998年5月8日採用決定)