境界層流中における高層建物の空力不安定振動(続)

種々の長方形断面をもつ高層建物の場合

AEROELASTIC INSTABILITIES OF HIGH-RISE BUILDINGS
IN A TURBULENT BOUNDARY LAYER

High-rise buildings with several rectangular sections

西村 宏昭*, 谷池 義人**

Hiroaki NISHIMURA and Yoshihito TANIKE

It was reported in our previous paper that the aeroelastic instability of a tall square sectioned building occurs in a turbulent flow. This paper describes the characteristics of unsteady aerodynamic forces acting on high-rise buildings with various sections in a turbulent boundary layer. Unsteady aerodynamic forces were severely affected by the side ratio D/B (D :depth, B :breadth) of the buildings. In order to obtain the aerodynamic forces, wind tunnel experiments were conducted by use of the forced oscillation technique. The response curves related to oscillating amplitude and the reduced wind velocity were obtained, which were plotted with the product parameters of the damping ratio and the generalized mass of the buildings. Aeroelastic instability regions for several rectangular sectioned tall buildings were clarified. The aeroelastic instability regions for prisms of $D/B \leq 1$ clearly appeared near the resonance wind velocity, while the regions for prisms of $D/B \geq 1$ appeared at lower velocities when mass-damping parameter became extremely small.

Key Words: *aeroelastic instability, unsteady aerodynamic force, self-excited oscillation, high-rise building, side ratio, forced oscillation technique*

空力負減衰, 非定常空気力, 自励的振動, 高層建築物, 辺長比, 強制振動法

1. はじめに

物体が接近流の変動空気力あるいは物体自身が発生する渦によって振動を始めると, その作用空気力は静止時のそれとは異なるものになる。それは振動する物体周りの流れが静止時のものと異なるからで, その原因は振動する物体が振動成分の空気力を新たに生み出すからに他ならない。振動時の空気力は静止時のそれと区別され, 非定常空気力と呼ばれる。構造物が非定常空気力の作用を受け, 振動を大きくし, さらに大きな非定常空気力を受けるという循環現象に陥った場合, 構造物は激しく振動し, 致命的なダメージを受ける恐れがある。空力不安定現象はこのようなメカニズムのもとに発生する自励振動として説明される。したがって, 空力不安定現象の解明には非定常空気力の特性を正確に知る必要がある。

物体に作用する非定常空気力を実験的に求める代表的な方法には, 自由振動法と強制振動法の2つがある。自由振動法は気流中で対象とする物体をばねなどによって弾

性支持し, これに適当な振幅の振動を与えてその後の振動の減衰あるいは発散の状態から非定常空気力を推定する方法である。これに対し, 強制振動法は, 対象物体を気流中で強制振動させ, 物体の慣性力を適当な方法で除去して非定常空気力のみを直接取り出す方法である。これまでに, 強制振動法を用いて高層建築物を対象とした非定常空気力が測定された例は, 谷池^{1),2),3)}, Steckley⁴⁾, 丸川⁵⁾等および筆者ら^{6),7),8)}がある。筆者らは前報⁷⁾で境界層乱流中における正方形断面柱に作用する非定常空気力の特性を明らかにした。今回はこの研究をさらに進め, 様々な辺長比の角柱が風直角方向に振動するときの非定常空気力を測定し, それらの空力負減衰効果から空力不安定領域を同定した。また, 非定常空気力に及ぼすカルマン渦の働きを明らかにした。なお本研究では, 高層建築物を対象とし, それが都市部に建設される場合を想定し, 気流は乱れの大きい境界層乱流とした。

本論文の一部は, 参考文献8)に発表した。

* 財団法人建築総合試験所 主任研究員

** 大阪市立大学工学部建築学科 教授・工博

Senior Research Engineer, General Building Research Corporation
Prof., Osaka City Univ., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering,
Dr. Eng.

2. 実験概要

本実験の方法は前報とほぼ同じであり⁷⁾、ここでは実験の要点だけを記す。風洞気流はべき指数 $\alpha=1/4$ 、地表面近くの乱れ強さ約25%の境界層乱流で、風洞断面は $1.8\text{m}\times 1.5\text{m}$ である。模型は図-1に示す3次元角柱で、いずれもアスペクト比 $H/\sqrt{BD}=7$ とし、辺長比を $D/B=1/3\sim 3$ の間で変化させた。ここで、 H は角柱の高さ($=49\text{cm}$)、 B, D はそれぞれ見付け幅と奥行きで、断面積 BD はいずれの模型でも同じとした。模型は図-2に示す実験装置に取付けられ、風直角方向に強制的に振動させられる。その際、風洞の内と外で同時に振動する2個の同一の模型の基部で測定される力の差が模型の慣性力を除いた非定常空気力として得られる。本実験で求められる非定常空気力はモーメント量で表わされ、振動モードは1次を対象とし、それを直線と仮定している。角柱の加振振動数は $f_m=6.8\text{Hz}$ とした。加振振幅はカムを交換することにより5段階に変化させ、角柱頂部の水平振幅 y_0 を回転中心から角柱頂部までの距離 L で割った無次元振幅 $\bar{y}=(y_0/L)$ で表し、0.002, 0.004, 0.008, 0.016, 0.032の5種類とした。実験風速 V は、角柱頂部高さにおいて $1\text{m/s}\sim 11\text{m/s}$ までの70段階とし、無次元風速 $\bar{V}=(V/f_m\sqrt{BD})$ に換算し2~24の範囲とした。

3. 非定常空気力の解析方法

一般化外力で表したときの非定常空気力 $Q(t)$ は、直線モードをもつ場合にはモーメントで表され、 $Q(t)=\int_L f(z,t)z\,dz$ とできる。ここで、 $f(z,t)$ は図-1に示すように高さ z 点における単位長さ当たりの空気力、 L, r はそれぞれ角柱頂部と底面のゲージからの距離で $L=55\text{cm}$ 、 $r=6\text{cm}$ とした。一方、一般化変位は $\bar{Y}(t)=\bar{y}\cos 2\pi f_m t$ となる。 $Q(t)$ のうち振動数 f_m の調和振動に寄与する f_m と同じ振動数成分 $Q_m(t)$ はフーリエ級数展開により次式で与えられる。

$$Q_m(t)=|Q_L|\cos(2\pi f_m t+\beta_Q) \\ =Q_R\cos 2\pi f_m t-Q_I\sin 2\pi f_m t \quad \dots\dots(1)$$

$$|Q_L|=\sqrt{Q_R^2+Q_I^2}, \beta_Q=\tan^{-1}\left(\frac{Q_I}{Q_R}\right) \quad \dots\dots(2)$$

Q_R は変位と同位相、 Q_I は速度と同位相の成分で、 β_Q は $Q_m(t)$ と変位との位相差を示す。解析時間は、読み取り時間間隔 $1\text{ms}\times$ 個数 $4096\text{pts}\approx 4.1\text{s}$ とし、これを6回平均して各々の値を求めた。 Q_R と Q_I はモーメント量であり、それらを速度圧と代表寸法で無次元化して次の空気力係数で表わす。

$$C_R=Q_R/\frac{1}{2}\rho V^2DH\ell=|C_L|\cos\beta_Q, \\ C_I=Q_I/\frac{1}{2}\rho V^2DH\ell=|C_L|\sin\beta_Q \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 ρ は空気密度、 $\ell=r+H/2$ 。 ℓ を用いることにより、空気力係数が2次元角柱の値と比較できる。非定常空気力は、建物の代表長さ、振動数、振幅、風速、空気密度に依存すると考えられるので、(3)式の各空気力係数は、 $\bar{V}$ と $\bar{y}$ の関数になる。

建物が固有振動数で振動するという仮定を設けると、振動が定常あるいは増大するときの条件は次式で表わされる⁷⁾。

$$C_I\geq 32\pi^2\frac{H}{D}\delta\bar{y}\frac{1}{\bar{V}^2} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $\delta=\frac{\eta M_G}{\rho BDH}=\frac{\eta M}{3\rho BDH}$ は質量減衰パラメータ、 η は減衰定数、 M は建物の質量、 $M_G(=\frac{I}{H^2})$ は一般化質量、 I は建物の慣性モーメントをそれぞれ表し、さらに、 $r=0$ の場合を仮定し、 $\ell=H/2$ とおいた。

図-1 実験模型と非定常空気力の定義

図-2 強制振動装置

4. 実験結果と考察

4.1 速度同相空気力係数 C_1

C_1 は建物の振動速度と同位相の成分であるから、振動系の減衰に関係する。 C_1 の値が正のとき空気力は振動系に対して負の仕事をし、負のとき正の仕事をする。つまり、 C_1 が正のときは非定常空気力は負減衰に、負のときは正減衰に作用する。各角柱の C_1 を図-3に示す。 C_1 の各曲線は図-9の例に示す実験値をスプライン曲線で近似して表わした。近似誤差は±10%以下である。横軸は無次元風速 $\bar{V}$ 、縦軸は C_1 、横軸上の↓は静止角柱のストローハル数 $St(=f_s\sqrt{BD}/V)$ から求めた無次元共振風速 $\bar{V}_{res}(=1/St)$ を示す。 f_s は渦の発生周波数である。 C_1 の性状はいずれも $\bar{y}$ と $\bar{V}$ に関して非線形となる。

風に対し幅広い断面をもつ $D/B=1/2$, $1/3$ の角柱の場合、 C_1 は $\bar{V}_{res}$ の $1/3 \sim 1/2$ の低風速域において負から正に転じ、 $\bar{V}_{res}$ 付近で正の鋭い極値を示す。また、 $\bar{V}_{res}$ を過ぎると C_1 は急激に減少し、各振幅毎に正の一定値に近づく。 C_1 の符号が変わる風速は $\bar{y}$ が大きいほど高風速側に寄り、 C_1 の正の値とその極値は $\bar{y}$ の増加につれて大きくなることから、空力負減衰効果による振動は $\bar{V}_{res}$ 以下の低風速域から発振し、風速と共に振幅を大きくして激しく揺れるが、共振風速を過ぎると振動が収まることが予想される。

一方、風方向に細長い断面をもつ $D/B=2, 3$ の角柱では、剥離流の再付着の影響でストローハル数が明確でないので、 $\bar{V}_{res}$ の位置は記入していない。 C_1 は $\bar{V} \approx 3 \sim 4$ 付近の低風速域で小さい正の極値を示すが、振幅が大きくなるとその極値も負となる。低風速域における正の極値は、建築物が軽量で減衰が小さいときには、いわゆる低風速励振の発生要因になるが、そのときの空力負減衰効果による応答は限定的なものになる。 C_1 は、その後、負の値を保ちながら高風速域でゼロに漸近する。一様流中では C_1 は $\bar{V}_{res}$ を超えた風速域で再び正の値を示した³⁾が、乱流境界層中では高風速側で明確な正の値をもたないことがわかる。

これに対し、正方形断面をもつ $D/B=1$ の角柱では、風直角方向に幅広い断面をもつ角柱と、風方向に細長い断面をもつ角柱の両方の特徴をもっている。すなわち、 C_1 は $\bar{V}_{res}$ 以下の低風速域でのピークと $\bar{V}_{res}$ 付近のピークの2つのピークをもち、各ピークにおける C_1 の振幅に関する依存傾向も、低風速側では風方向に細長い角柱の C_1 と、高風速側では風直角方向に細長い角柱の C_1 と同じ特徴をもつ。したがって、正方形断面角柱では、低風速励振と自励的渦励振の両方の空力不安定振動の生じる危険性がある。

$\bar{y}=0.008$ のときの C_1 の辺長比による変化を図-4に示す。 $D/B \leq 1$ の角柱では、 D/B が小さくなるにつれて、 C_1 の負から正への変化点はさらに低風速側に移行していることから、断面の幅が広がるにつれて、空力負減衰効果がよ

図-3 非定常空気力係数 C_1

り低風速域から生じることがわかる。また、 D/B の減少に伴い、 C_l の正の極値は高風速側に移行していることから、空力負減衰効果はより高風速域にわたって生じる。したがって、断面の幅が広がるにつれて、空力不安定振動はより広範囲の風速域で生じる危険性がある。

$D/B \geq 1$ の角柱では、 $\bar{V} < 5$ の低風速域で、 C_l は小さい正の極値をもつが、 $\bar{V} \geq 5$ の高風速域では、 D/B が大きくなるにつれて C_l は小さくなり、 $D/B \geq 1.5$ の角柱では明確な正の値をもたない。したがって、 $\bar{V}$ が5を超える風速域では、 $D/B \geq 1.5$ の風方向に細長い建物では空力負減衰効果は生じず、空力不安定振動は起こらないものと考えられる。

4.2 変位同相空気力係数 C_R

C_R は変位同相成分の空気力係数で、振動系の剛性に関係する。 C_R が正のとき振動系は剛性を弱め振動数を低くするように作用し、負のときは逆に振動数を高くするように作用する。 $\bar{y}=0.008$ のときの C_R の結果を図-5に示す。

$D/B \leq 1$ の角柱では、 $\bar{V}_{res}$ より低風速側で C_R が正になるが、 $\bar{V}_{res}$ 付近で C_R が急激に減少し、その後ゼロに近づく。一方、 $D/B \geq 2$ の角柱では、逆に、 C_R は低風速側で負となり、その後緩やかに上昇してゼロに近づく。このことは、低風速域では、振動変位と同位相の非定常空気力によって建築物の振動数が変化することを示しているが、通常の建築物の剛性は変位同相の空気力成分から得られる空力剛性より十分大きいので、実際には振動数の変化は小さい。したがって、空力不安定状態にある実際の建物は、ほぼその固有振動数で振動すると考えて差し支えない。

4.3 位相差 β_Q

非定常空気力 $Q_m(t)$ と振動変位との位相差 β_Q を図-6に示す。 β_Q が正になる風速域は、(3)式より C_l が正になる風速域と一致し、また、 $\beta_Q=90^\circ$ となる風速において C_l が正の極値をとる。

風方向に細長い $D/B \geq 2$ の角柱では、全風速域で位相は遅れ、特に $\bar{V}_{res}$ 以下の低風速域で位相の遅れが急激に大きくなり、 $\bar{V} \leq 4 \sim 5$ の領域において、その遅れは 180° 以上になって見掛け上の位相の進みとなる。(3)式より、このことが C_l を正に移行させる要因になる。

同じ傾向が $D/B=1$ の正方形断面角柱にも見られるが、共振風速付近では逆に急激に位相が進んで正となり、風直角方向に細長い $D/B \leq 1/2$ の角柱の傾向に近くなる。 $\bar{V}_{res}$ を少し超えた風速で、 $D/B=1$ の角柱は $\beta_Q \approx 90^\circ$ となり、ギャロッピング解析の準定常的表現に基づく理論値に近づくが、 $D/B \geq 2$ の角柱では $\beta_Q \approx 150^\circ \sim 160^\circ$ となり、準定常理論の適用は困難になる。また、 $D/B \leq 1$ の角柱に見られる $\bar{V}_{res}$ 付近での位相の急激な上昇は、振動数成分の渦がストローハル数成分の渦を取り込む同期現象の形成に関係すると思われる。

図-4 C_l の D/B による変化($\bar{y}=0.008$)

図-5 非定常空気力係数 C_R ($\bar{y}=0.008$)

図-6 位相差 β_Q ($\bar{y}=0.008$)

4.4 非定常空気に及ぼすカルマン渦の影響

角柱の背後にスプリッタ板を挿入すると、ストローハル数成分の渦、すなわち、カルマン渦の発生を妨げることができる。これは図-7の非定常空気のパワースペクトルにおいて、スプリッタ板の挿入により、ストローハル数成分の空気が見られなくなることから明らかである。なお、図中の m, s はそれぞれ角柱の振動数成分とストローハル数成分を表わし、前者は主として角柱の振動に伴って発生する渦によって、後者は角柱静止時に発生するストローハル数成分の渦によって引き起こされる空気力である。

このときの非定常空気力 C_L 、 C_R および位相差 β_Q を、スプリッタ板がないときのそれらと比較して図-8に示す。スプリッタ板を挿入して、カルマン渦の発生を妨げても、 C_L は共振風速以下の低風速域との $\bar{V}_{res}$ 以上の風速域において、それぞれ正になり、空力負減衰効果が生じる。このことから、カルマン渦の存在が、空力負減衰効果の発現に直接には影響を及ぼさないことがわかる。

一方、スプリッタ板のない場合、共振風速付近では、同期現象が生じてより強い渦が形成されるために、 β_Q の急激な上昇と C_L の正の鋭い極値が現われるが、スプリッ

図-7 非定常空気のスペクトル

図-8 スプリッタ板の有無による非定常空気の比較 ($\bar{y}=0.008$)

タ板のある場合には、これらの傾向は見られず、なだらかに上昇する。したがって、 $\bar{V}_{res}$ 付近ではカルマン渦の存在が非定常空気を増大させ、空力負減衰効果を高める働きをする。

なお、これらの現象は、カルマン渦の発生が顕著に現われる $D/B \leq 1$ の角柱に特徴的なことである。風方向に細長い $D/B \geq 2$ の角柱では、剥離流の再付着の影響でもともとカルマン渦の発生が妨げられているので、スプリッタ板の挿入による非定常空気にへの影響はほとんどない。

4.5 応答曲線と空力不安定領域

図-9は $D/B=1/2$ の角柱における $\bar{y}=0.008$ の場合の(4)式の判別式を図示したもので、 δ を0.1から2.0まで変化させたときの C_L の各曲線(4)式の右辺)と測定値($\circ$ 印)との交点は、そのときの δ と $\bar{V}$ において、振動は $\bar{y}=0.008$ の振幅をもつ定常振動になることを示し、 C_L の実験値が曲線を上回る場合には振動が $\bar{y}=0.008$ より大きくなることを意味する。

加振振幅 $\bar{y}$ に応じて図-9の判別図を描き、 C_L の測定値と(4)式の曲線との交点から、空力不安定状態にある角柱の振動数が固有振動数に等しいとして求めた風速と振幅の関係を表わす応答曲線を図-10に示す。

風直角方向に広がった断面をもつ角柱($D/B=2$)では、質量減衰パラメーター δ が小さいとき、低風速域で空力不安定振動が発振し、そのままギャロッピングへと移行するが、 δ が大きくなると、共振風速 $\bar{V}_{res}$ 付近での自動的な渦励振のみ生じる。一方、風方向に細長い断面をもつ角柱($D/B=2$)では、 δ が非常に小さいとき、低風速域での限定振動、いわゆる低風速励振を生じるが、通常の建築物では $\delta \geq 0.4 \sim 0.5$ になるために空力不安定振動は生じない。正方形断面角柱($D/B=1$)では、両者の特性を併せもつが、 δ が小さいときの $\bar{V}_{res}$ 付近での空力不安定振動の発振風速は、 $D/B=1/2$ の角柱に比べて高くなる。

図-9 空力不安定領域の判別 ($D/B=1/2$, $\bar{y}=0.008$)

図-10 応答曲線

振幅が $\bar{y}=0.008$ になるときの、質量減衰パラメータ δ と無次元風速 $\bar{V}$ の関係を図-11に示す。陰を付けた領域が $\bar{y} \geq 0.008$ となる空力不安定領域である。いずれの角柱も δ の増加につれて空力不安定領域が高風速側に移行し、空力不安定振動が生じにくくなる。辺長比 $D/B \leq 1$ の角柱の空力不安定領域は $\delta \approx 0.5$ 、 $\bar{V} \approx 10$ 付近ではほぼ1点に交わり、この点を境にして $\delta \geq 0.5$ のときには D/B が大きいほど、逆に $\delta \leq 0.5$ のときには D/B が小さいほど空力的に不安定となる。また、風方向に細長い $D/B > 1$ の角柱では D/B が大きいほど空力不安定領域は高風速側に移行するが、前述のように $\delta \geq 0.1 \sim 0.2$ になると、空力不安定領域は存在しなくなる。

5. まとめ

境界層乱流中における高層建築物の空力不安定性を知る目的で、種々の長方形断面をもつ三次元角柱が風直角方向に振動するときの角柱に作用する非定常空気力を強制振動法によって測定し、辺長比の影響を明らかにした。以下にまとめを記す。

- (1) 辺長比が小さく風に対して幅広い断面をもつ角柱の場合、速度同相成分の非定常空気力係数 C_l は共振風速付近で正の鋭い極値をもつ。また、 C_l の負から正への変化点は辺長比が小さくなるにつれてより低風速側に移行する。
- (2) 辺長比が大きく風方向に細長い断面をもつ角柱は、無

図-11 空力不安定領域 ($\bar{y}=0.008$)

- 次元風速 $\bar{V} \approx 3 \sim 5$ 付近で C_l が正の領域をもつ。このことが、軽くて減衰の小さい角柱においては、低風速励振の要因となる。
- (3) 変位同相成分の非定常空気力 C_R は、辺長比の小さい角柱で共振風速付近に急激な減少が見られる。
- (4) 角柱の変位と非定常空気力との位相差 β_0 は、辺長比の小さい角柱では、共振風速付近で急激な位相の進みが見られる。
- (5) 共振風速付近の各非定常空気力の変化は、カルマン渦の影響を強く受けているが、カルマン渦の存在は空力負減衰効果の発現に直接には関係しないことが、角柱背後にスプリッタ板を挿入した実験で明らかになった。
- (6) 空力不安定領域は、 $D/B \leq 1$ の角柱については、質量減衰パラメータ $\delta \approx 0.5$ 、無次元風速 $\bar{V} \approx 10$ 付近のほぼ1点で空力不安定領域が交差する。 δ がこれより大きい場合には、辺長比が大きくなるにつれて、逆に δ がこれより小さい場合には、辺長比が小さくなるにつれて、空力的により不安定になる。

参考文献

- 1) 谷池義人：高層建築物の空力不安定性に関する研究，京都大学博士論文，1983。
- 2) 石崎澁雄・谷池義人：風向直角方向に振動する角柱の空力不安定性について，日本建築学会論文報告集，第306号，1981，pp.11-19。
- 3) 石崎澁雄・谷池義人：風向直角方向に振動する角柱の空力不安定性について（続報），日本建築学会論文報告集，第307号，1981，pp.24-34。
- 4) Steckley, A., B. J. Vickery and N. Isyumov: On the Measurement of Motion Induced Forces on Models in Turbulent Shear Flow, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, 1990, pp.339-350。
- 5) 丸川久佐夫・大熊武司・他：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，1992，pp.201-206。
- 6) 西村宏昭・谷池義人：超高層建築物に作用する非定常空気力，第12回風工学シンポジウム，1992，pp.195-200。
- 7) 西村宏昭・谷池義人：境界層乱流中における高層建物の空力不安定振動—正方形断面をもつ高層建物の場合—，日本建築学会論文報告集，第456号，1994，pp.31-37。
- 8) 西村宏昭・谷池義人：種々の長方形断面をもつ高層建築物の空力不安定振動，第13回風工学シンポジウム，1994，pp.341-346。

(1995年7月4日原稿受理，1995年11月27日採用決定)