

- 5 超高層建築物の空力不安定振動の発生機構に関する研究 Study on Mechanism of Aerodynamic Unstable Vibration for High-rise Buildings

(研究期間 平成14～16年度)

構造研究グループ

Dept. of Structural Engineering

喜々津仁密

Hitomitsu Kikitsu

This study discusses interactive characteristics between a vibrating high-rise building model and wake. Based on the results of PIV (Particle Image Velocimetry) measurement, differential equation on wake-oscillator model was modified and wind response of the building model was numerically simulated by Runge-Kutta's scheme. Representative averaged length l of wake can be simulated as downstream stagnation in PIV measurement.

[研究目的及び経過]

超高層建築物を想定したアスペクト比の大きい3次元角柱の空力不安定振動に関しては、角柱背面の後流域の挙動が角柱と流体との相互作用に影響を及ぼしており、振動時の当該領域の物理パラメータを把握することが現象を考察する上で重要である。また、これまでに熱線プローブによる測定や可視化手法に基づいて振動時の後流性状が論じられてきたが、瞬間毎の面計測による実験的知見は得られていない。本研究では、面計測によって得られる相互作用現象を数学モデルに当てはめることにより、3次元角柱の空力不安定振動の発生機構の考察に資することを目的とする。

[研究内容]

代表的な面計測手法であるPIV(Particle Image Velocimetry)システムを用いて、3次元振動角柱後流域の水平断面の流速測定を実施した。また、振動角柱の渦励振機構に関する既往のモデルを用いることにより、PIV測定結果の定性的傾向を模擬して角柱と流体との相互作用現象の把握を行った。

[研究結果]

1. PIV測定結果¹⁾

図1に、自由振動時の3次元正方形角柱(アスペクト比8、減衰定数 $\eta=0.01$)について、風直角方向変位と後方よどみ点距離(角柱背面から後方よどみ点までの距離を角柱幅で基準化した値)の結果を示す。一様流での後方よどみ点距離は無次元風速 $U^*=10$ 付近で概ね4.0から1.5までに急激に小さくなった。 $U^*=10$ は渦励振によって応答が最大となる風速とも概ね一致しており、渦励振機構を把握する上で後方よどみ点距離は流体系の挙動を示す基本的な値となりうる事がわかる。図2に、PIV測定による角柱の振動変位に対する後流域の挙動の一例を示す。後流域では、角柱の背後に回り込む循環流れと流下方向に蛇行する流れが捉えられている。

2. 後流振動子モデルを用いた考察²⁾

円柱や角柱等の渦励振機構に関しては、物体の振動と後流域の挙動との間の相互作用現象に着目して考察がされてきているが、特に、後流振動子モデル(Wake-Oscillator Model, 図3参照)は、相互作用現象を直感的に捉えやすく渦励振機構の考察に有効な概念であると考えられる。本研究でも後流振動子モデルを用いて、前節で示したPIV測定結果の考察を行う。なお、以下の議論では2次元正方形角柱を対象としている。

(1) 後流域の振動方程式

文献3)による定式化においては、後流振動子の平均的な長さは接近流の風速によらず一定と仮定している。しかし、図1の後方よどみ点距離は共振風速近傍で風直角方向変位が大きくなるとともに小さくなるという非線形な傾向を示しており、この傾向は2次元角柱についても同様だと考えられる。

これらの実験結果を踏まえて、ここでは、角柱背面から質量中心 G までの距離 l が、後流振動子の回転角に応じて非線形な傾向を示すと仮定して、後流振動子の長さ $2l$ を以下のように表す。

$$2l = 2 \left\{ c(1 - a_1\alpha^2 - a_2\alpha'^2) - \frac{\delta}{\omega_v} \alpha\alpha' \right\} \quad (1)$$

ここで、 α :後流振動子の回転角、 c :後流振動子の長さに係るパラメータ、 a_1, a_2 : α に係る係数(>0)、 ω_v :後流振動子の周波数、 δ :後流振動子の回転振幅に係るパラメータである。(1)式を用いて文献3)の定式化に倣えば、後流域の振動方程式は以下になる。

$$\alpha'' - 2\zeta v(1 - P'\alpha^2 - Q'v\alpha\alpha')\alpha' + v^2(1 + R'\alpha^2)\alpha = -m^*Y'' - v\pi^*Y' \quad (2)$$

ここで、 ζ :後流振動子の減衰定数、 v :無次元風速、

$$m^* = \frac{1}{1+c^*}, P' = \frac{4f^2}{C_{L0}^2}, Q' = \frac{a_2c^*}{2\zeta(1+c^*)}, R' = \frac{a_1c^*}{1+c^*}, c^* = \frac{c}{d}, Y = \frac{y}{d},$$

y :角柱の風直角方向変位、 d :角柱の代表幅、 f :マグナス効果に係る定数、 C_{L0} :静止正方形角柱の揚力係数振幅である。

(2) 振動角柱の運動方程式

振動する2次元正方形角柱の運動方程式については、文献4)の以下の式による。

$$Y'' + \left[2\eta + n(f - A_1) \frac{v}{\pi^*} - \frac{nA_3\pi^*}{v} Y'^2 - \frac{nA_5\pi^{*3}}{v^3} Y'^4 - \dots \right] Y' + Y = - \frac{fiv^2}{\pi^*} \alpha \quad (3)$$

ここで、 η : 角柱の減衰定数、 n : 角柱の質量比、 $\pi^* = 2\pi S$ (S : Strouhal 数) であり、文献4)に倣って $A_1=4.0$, $A_3=260$, $A_5 = -10^4$, $A_7=10^5$ とした。

(3) 数値解析結果

(2)式と(3)式を用いて、 Y と α の値をRunge-Kuttaの方法により求めた。解析条件は既往の解析方法³⁾⁴⁾を参考にし、 $v=0.0$ から0.01刻みで $v=2.0$ までの200段階、各風速での計算個数は20000個とし、各風速での初期値は1段階前の風速での最終値を与えた。2次元正方形角柱を対象とした文献4)を参考にし、 $f_1=1.16$, $C_{L0}=0.7$, $C_D=1.2$, $S=0.12$, $\eta=0.0097$, $n=0.00134$ とした。 c^* の値については、文献4)で与えている後流振動子の無次元幅=1.8と $S=0.12$ から求まる2.1とした。

$(a_1, a_2) = (0.0, 0.0)$, $(0.0, 0.5)$, $(0.5, 0.0)$ の3通りについて、無次元風速 v に対する Y の標準偏差と距離 l の平均値を図4に示す。これらは、各風速での後半の定常状態となっている部分の値から求めた結果である。図中には、一様流中の2次元正方形角柱を対象とした既往の実験結果($\eta=0.00682, n=0.00134$)⁵⁾も参考に白丸で示した。図1に掲げた一様流下での結果と同様に、いずれも渦励振の性状を示しているが、(1)式により距離 l の非線形性を考慮した場合は、考慮しない場合よりも応答結果が小さくなっている。また、距離 l の長さ変化に α が寄与しているとした $(a_1, a_2) = (0.5, 0.0)$ の場合は、他の2つの場合よりも渦励振の発現風速が小さくなる傾向を示す。

次に、距離 l の平均値を後流振動子の代表値とみなせば、PIV測定結果の後方よどみ点距離と対応させることができよう。無次元風速 v に対する距離 l の変化については、(1)式による非線形性を考慮すると、渦励振の発現に合わせて急激に小さくなっており、図1に掲げる後方よどみ点距離の変化と同様の定性的傾向が模擬できている。

【参考文献】1) 喜々津ほか, 3次元振動角柱の後流性状に関する実験的研究, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp.275-280, 2004. 2) 喜々津ほか, PIV測定結果に基づく振動角柱と後流域との相互作用に関する一考察, 第54回理論応用力学講演会講演論文集 NCTAM2005, pp.401-402, 2005. 3) 田村, 円筒の渦励振に関する研究 その1, 日本建築学会論文報告集, 第266号, pp.87-95, 1978. 4) 田村ほか, 正方形角柱の風直角方向振動のモデル化, 第9回風工学シンポジウム論文集, pp.163-168, 1986. 5) Wawzonek, M.A., Aeroelastic behavior of square section prisms in uniform flow, Thesis of M.A.Sc., The University of British Columbia, 1979.

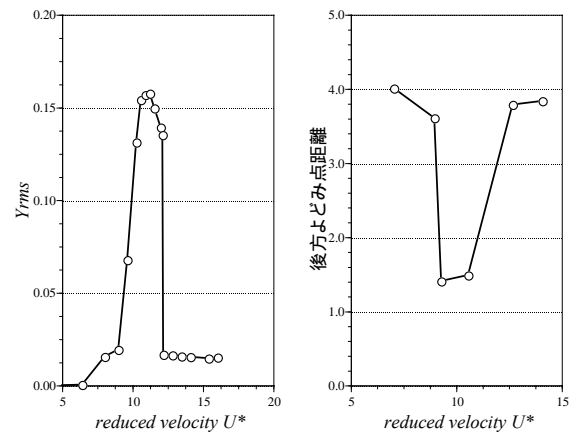


図1 空力振動実験結果と後方よどみ点の性状

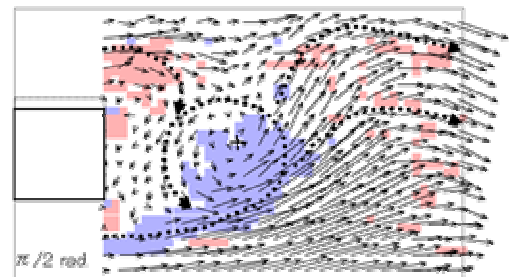


図2 PIV測定結果

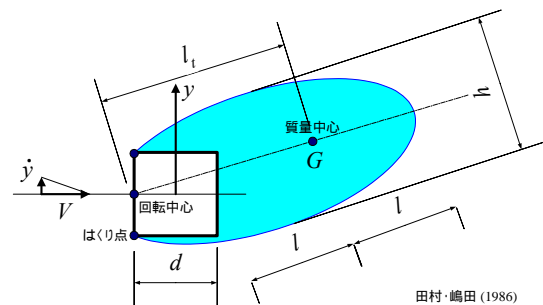


図3 後流振動子モデル⁴⁾

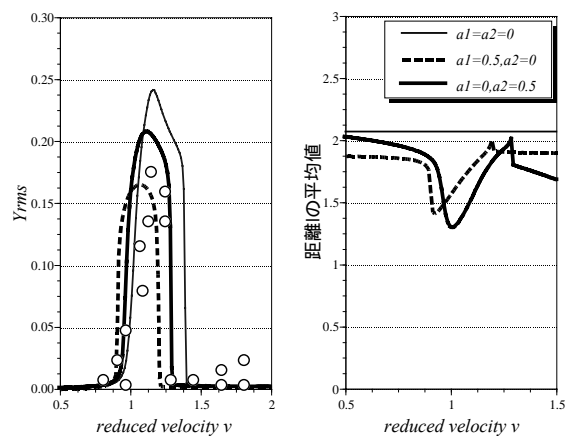


図4 数値解析結果