

空力振動する三次元正方形角柱の付加質量効果に関する研究

日大生産工(院) ○小島 千里 日大生産工 神田 亮
日大生産工(院) 加藤 優輝

1. はじめに

構造物の流体力による振動性状に関する研究は、多くの研究者により古くから行われてきた^{1)~5)}。特に構造物の空力不安定振動を含む応答性状は、Eq.(1)に示すような質量減衰パラメータ δ やスクルートン数 Sc が同値であれば、構造物の密度 ρ_s や減衰定数 h_s の値によらず、発振流速は同一とされてきた⁶⁾。

$$\delta = \frac{\rho_s}{3\rho} h_s \quad (1)$$

ここで ρ_s ：構造物の密度、 ρ ：空気密度、 h_s ：減衰定数である。しかし、 ρ_s が小さい場合に発振流速が低くなることが報告されている^{7)~8)}。これに対し、本研究室では、三次元正方形角柱を対象とした実験により、発振流速の低下する現象は付加質量効果の理論により説明できること、さらに、 δ や h_s に依存せず、 ρ_s のみに起因することを示した⁹⁾。また、この考えを元に、二次元正方形角柱を対象に、付加質量係数 γ を導入し、無次元振幅と付加密度比 n_a がほぼ比例関係にあるという事実から、発振流速の推定法を示した^{10),11)}。

以上を踏まえて、本論文では、三次元正方形角柱を対象とし、 ρ_s と三次元正方形角柱の流体力による付加質量効果の関係を調べるとともに、付加質量係数 γ を導入し、付加質量効果が生じている場合の見かけ上の各空力振動パラメータの変化を示し、渦励振の発振流速の予測を行うことを目的とする。

2. 3D-IHATを用いた空力振動実験

2.1 実験諸元

本実験では日本大学生産工学部所有のエッフェル型境界層風洞装置を使用した。空力振動実験は改良型ハイブリッド空力振動法(以下、IHAT)を用いて、行った。IHATの特長は、振動系パラメータの設定が容易であるほか、慣性力、減衰力、復元力、外力などの重要な物理量を個々に評価でき、準定常下での現象も分析が可能なことである¹²⁾。実験模型をFig.1に示す。実験模型の形状は、100×100×500[mm](B:幅×D:奥行き×H:高さ)、アスペクト比5の正方形角柱である。模型の振動の自由度は風直交方向に角柱足元から回転運動する1自由度ロッキング振動である。風圧測定孔は1面50点、4面で計200点設けた。IHATの制御の1サイクルは2msecとし、サンプリングデータ数は8192個を1セット、3回計測とした。実験気流は一樣流(乱れ強さ0.5%以下)である。実験パラメータは、Table1に示すように、 h_s を一定値とし、 ρ_s を変化させ δ が0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6となるよう定めた。 δ はEq.(1)より求めた。

また、 $n_s(=\rho/\rho_s)$ は構造物の密度比である。対象とした無次元流速 $V_r(=\bar{V}/f_s B)$ 、 $\bar{V}$ ：平均流速、 f_s ：固有振動数、 B ：模型見付幅)は5~10である。

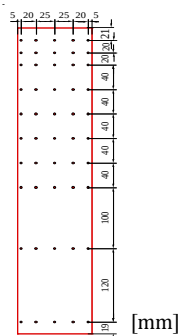


Table1 Experimental Parameters

ρ_s [kg/m ³]	h_s [%]	n_s	δ
18.3	2.0	0.066	0.1
36.6		0.033	0.2
54.9		0.022	0.3
73.2		0.016	0.4
91.5		0.013	0.5
109.8		0.011	0.6

Fig.1 Elevation of Model

2.2 応答曲線

Fig.2に実験より得られた応答曲線を示す。なお、横軸は V_r 、縦軸は応答回転角の標準偏差 θ_{rms} である。 ρ_s が小さいほど(δ が小さいほど)、応答の立ち上がる V_r が小さくなり、また、その応答の最大値は大きくなる。

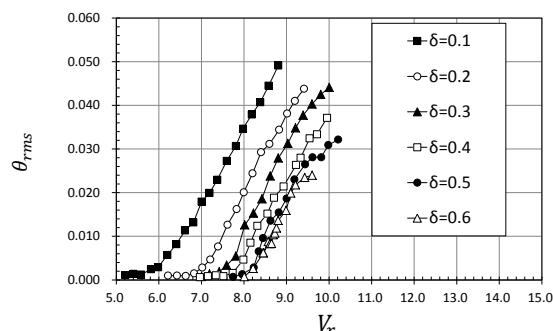


Fig.2 Response Curves

2.3 変動転倒モーメント係数 $C_{L,rms}$

Fig.3に変動転倒モーメント係数 $C_{L,rms}$ を示す。なお、 $C_{L,rms}$ はEq.(2)より算出した。

$$C_{L,rms} = \frac{F_{rms}}{\frac{1}{2}\rho\bar{V}^2BHl} \quad (2)$$

ここで F_{rms} ：外力の標準偏差、 B ：模型の見付け幅、 H ：模型高さ、 l ：加振機の回転中心から模型高さ方向の中央部までの長さである。 ρ_s が小さい(δ が小さい)と $C_{L,rms}$ の立ち上がりの V_r が小さくなり、また、ピーク値は大きくなる。また、ピーク値の V_r も ρ_s が小さいほど(δ が小さいほど)低くなる。計測した全てのパラメータにおいて、 $V_r = 8 \sim 9$ 付近で $C_{L,rms}$ は最大値(0.3~0.6)を示し、 $V_r = 9$ 以上では、減少する。

Study on added-mass effect of a 3-dimensional square prism under aerodynamic vibration

Chisato KOJIMA, Makoto KANDA, and Yuki KATO

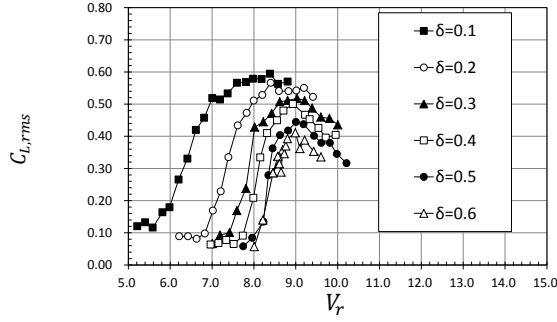


Fig.3 Normalized Fluid Velocity vs. Variation Coefficient of Overturning Moment

3. 付加質量係数 γ の定義と諸パラメータの誘導

前章では、IHATを用いた実験概要、応答特性および空力振動時の $C_{L,rms}$ について検討を行った。それらの中で特に着目すべき点は、 ρ_s が小さい場合に、応答の立ち上がる V_r が低下したことである^{7~9)}。本論文ではこれが流体力の付加質量効果^{13)~15)}によることを実験結果を分析することにより示していくが、本章では、まず、Eq.(3)に定義する付加質量係数 γ を導入し、各空力振動パラメータは付加質量効果が生じた場合、見かけ上どの様に変化するかについて示す。

$$\gamma = \frac{I_a}{I_s} = \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (3)$$

ここで、 I_a ：空気流体力によって作用する付加質量、 I_s ：構造物の質量、 ρ_a ：付加密度である。また、 ρ と ρ_a の比である付加密度比 n_a はEq.(4)で表される。

$$n_a = \frac{\rho}{\rho_a} \quad (4)$$

付加質量効果を考慮した全質量を I_s^* とすると、 I_s^* は γ と I_s を用いてEq.(5)で表される。

$$I_s^* = I_s + I_a = (1 + \gamma)I_s \quad (5)$$

同様に、付加質量効果を考慮したパラメータ(固有円振動数 ω_s^* 、固有振動数 f_s^* 、無次元流速 V_r^* 、減衰定数 h_s^* 、質量減衰パラメータ δ)を Eq.(6)~Eq.(10)に、Table2 に各空力振動パラメータをまとめて示す。

$$\omega_s^* = \sqrt{\frac{K_s}{I_s^*}} = \frac{\omega_s}{\sqrt{1+\gamma}} \quad (6)$$

$$f_s^* = \frac{\omega_s^*}{2\pi} = \frac{\omega_s}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} = \frac{f_s}{\sqrt{1+\gamma}} \quad (7)$$

$$V_r^* = \frac{V}{f_s^* B} = \frac{V}{f_s B} \cdot \sqrt{1+\gamma} = V_r \sqrt{1+\gamma} \quad (8)$$

$$h_s^* = \frac{C_s}{4\pi f_s^* M_s^*} = \frac{C_s}{4\pi f_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} = \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} \quad (9)$$

$$\delta^* = 2 \frac{\rho_s^*}{\rho} 2\pi h_s^* = 2 \frac{1}{n} 2\pi h_s \sqrt{1+\gamma} = \delta \sqrt{1+\gamma} \quad (10)$$

4. 実験結果および考察

4.1 付加密度比 n_a と付加質量係数 γ

本節では、前章で定義した付加密度比 n_a と付加質量係数 γ について検討する。Fig.4に V_r に対する $1/n_a$ (n_a の逆数)を、Fig.5に V_r に対する γ を示す。 $1/n_a$ は V_r が小さい領域において、最大値を示し、 V_r の増加と共に減少する。 $\rho_s(\delta)$ が小さいほど $1/n_a$ の最大値は増大する。また、 γ は V_r が小さい領域において、最大値を示し、 V_r の増加と共に徐々に減少し $V_r = 10$ 付近で0に漸近する。ほぼ全てのパラメータは、 $\rho_s(\delta)$ によらず同様の傾向を示す。

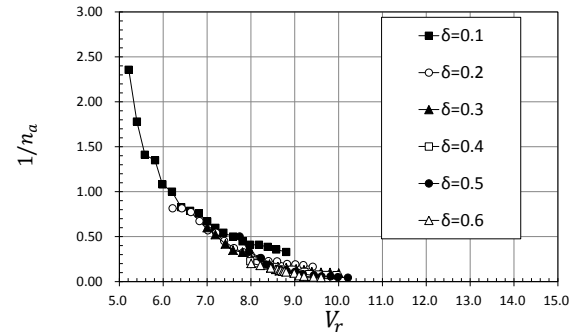


Fig.4 V_r vs. Added-Density Ratio

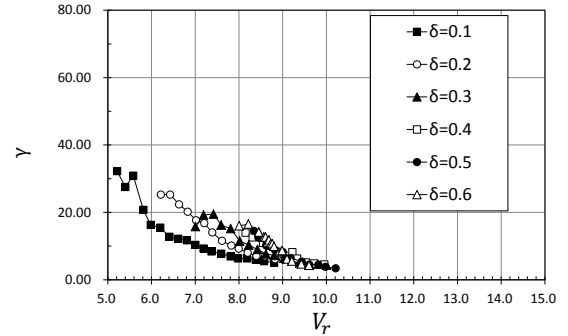


Fig.5 V_r vs Coefficient of Added-Mass

Table2 Parameters of Aerodynamic Vibration

	Ordinary parameters	Parameters with added-mass effect
Mass of model	I_s	$I_s^* (= (1 + \gamma)I_s)$
Density of model	ρ_s	$\rho_s^* (= (1 + \gamma)\rho_s)$
Natural circular frequency	ω_s	$\omega_s^* (= \omega_s / \sqrt{1 + \gamma})$
Natural frequency	f_s	$f_s^* (= f_s / \sqrt{1 + \gamma})$
Damping parameter of model	h_s	$h_s^* (= h_s / \sqrt{1 + \gamma})$
Phase angle	$0 \leq \varphi \leq \pi/2$	$\varphi^* (= \pi/2)$
Normalized fluid velocity	V_r	$V_r^* (= V_r \sqrt{1 + \gamma})$
Mass damping parameter	δ	$\delta^* (= \delta \sqrt{1 + \gamma})$

4.2 V_r , V_r^* に対する応答曲線 θ_{rms}

Fig.6に V_r に対する θ_{rms} および V_r^* に対する θ_{rms} を示す。 V_r に対する θ_{rms} は、 ρ_s が小さいほど(δ が小さいほど)発振流速の低下が確認できるが、 V_r^* に対する θ_{rms} は $\rho_s(\delta)$ の値によらず $V_r = 9$ 付近で立ち上がりほぼ直線となる。また、この直線とX軸との交点の値はストローハル数の逆数に近似する。なお、応答が非常に小さい領域で、 V_r^* に対する θ_{rms} が直線とならず、ややばらつくのは、計測時の流速が低く、圧力センサーの感度に限界があるためと考えられる。

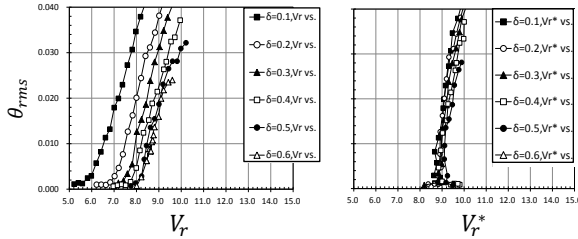


Fig.6 V_r and V_r^* vs. Response Curves

5. 発振流速の推定

前章より V_r^* に対する θ_{rms} が $\rho_s(\delta)$ の値によらずほぼ同一な直線となることを示した。これに加えて本章では、 n_a と θ_{rms} の関係に着目し、任意の発振無次元振幅 $\tilde{\theta}_0$ における γ を求め、渦励振の発現する無次元流速の推定を行う。

5.1 発振流速推定の概念

発振無次元流速推定の概念図を Fig.7 に示す。Fig.7 において、 k は任意の応答曲線で、ここでは発振流速推定の対象となる応答曲線である。直線 n は $\gamma = 0$ 時の応答曲線を示す。 $\tilde{\theta}_0$ は任意の無次元振幅、 $V_{rk}(\tilde{\theta}_0)$ は任意の応答曲線 k の $\tilde{\theta}_0$ における V_r である。 $V_{rk}(\tilde{\theta}_0) \cdot \sqrt{1 + \gamma_k(\tilde{\theta}_0)}$ ($k=1, 2, \dots, m$)は $\tilde{\theta}_0$ に対して k がいくつある値であっても同値である。これを式で表すと Eq.(11)のようになる。

$$V_r^*(\tilde{\theta}_0) = V_{rk}(\tilde{\theta}_0) \cdot \sqrt{1 + \gamma_k(\tilde{\theta}_0)} \quad (11)$$

なお、 $\tilde{\theta}_0 \rightarrow 0$ の時、 $V_r^*(\tilde{\theta}_0) \cong 1/St$ となる。直線 k は、Fig.7 上で発振無次元流速推定の対象となる応答曲線である。 $\tilde{\theta}_0$ における直線 n 上の無次元振幅は $\tilde{\theta}_0 \cong 0$ と予想されるため $V_r^*(\tilde{\theta}_0) (\cong 1/St)$ となる。曲線 k 上の $\tilde{\theta}_0$ における付加質量係数を $\gamma_k(\tilde{\theta}_0)$ とすると、曲線 k 上の $\tilde{\theta}_0$ における無次元流速 $V_{rk}(\tilde{\theta}_0)$ は Eq.(11)より Eq.(12)のように表される。

$$V_{rk}(\tilde{\theta}_0) = \frac{V_r^*(\tilde{\theta}_0)}{\sqrt{1 + \gamma_k(\tilde{\theta}_0)}} = \frac{1/St}{\sqrt{1 + \gamma_k(\tilde{\theta}_0)}} \quad (12)$$

よって、 $1/St$ と $\gamma_k(\tilde{\theta}_0)$ が既知であれば、 $V_{rk}(\tilde{\theta}_0)$ 、すなわち発振無次元流速にきわめて近い値を推定することが可能となる。なお、 St は既往の文献や静止実験より知ることができる。

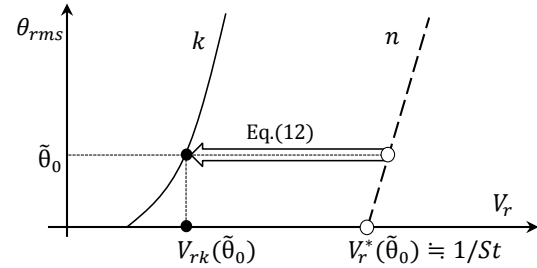


Fig.7 Concept of Estimation of Normalized Fluid Velocity

5.2 θ_{rms} と n_a の関係

Eq.(12)より、 $\gamma_k(\tilde{\theta}_0)$ は、 ρ_s が既知であるから $\tilde{\theta}_0$ の場合の ρ_a が分かれば算定可能である。 $\gamma_k(\tilde{\theta}_0)$ を算出するため、 θ_{rms} との n_a 関係について検討する。Fig.7に θ_{rms} に対する n_a を示す。なお、発振流速推定では、応答の立ち上がりを推定するため、検討の対象範囲を応答の立ち上がり付近($\theta_{rms} = 0.02$)までの実験値とした。Fig.7より、 θ_{rms} と $1/n_a$ にはほぼ線形関係にある。これより、任意の $\tilde{\theta}_0$ に対して n_a を求めることが出来ると同時にEq.(12)より $\tilde{\theta}_0$ における $\gamma_k(\tilde{\theta}_0)$ を算定することが出来る。

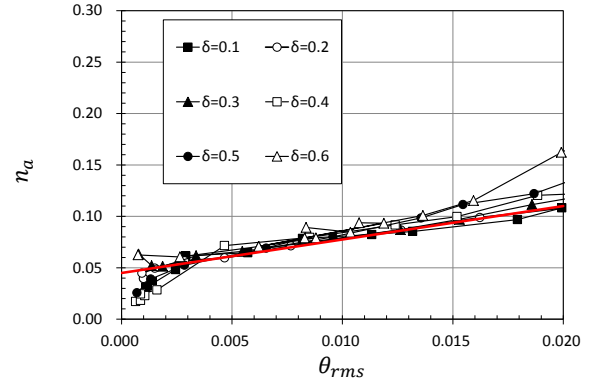


Fig.7 θ_{rms} vs. Added-Density Ratio

5.3 発振無次元流速の推定結果

Fig.8に推定した $V_{rk}(\tilde{\theta}_0)$ を示す。今回の推定では $St=0.11(1/St=9.0)$ とした。Fig.8では実験値と推定値とはおおむね一致している。これより二次元正方形柱で示した推定法が三次元正方形柱においても適用できる可能性を示した。

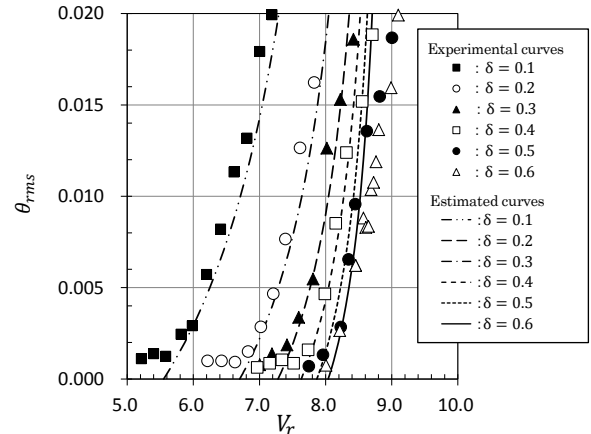


Fig.8 Experimental Response Curves and Estimated Response Curves

6. 結論

IHATを用いて減衰定数 h_s を一定とし、構造物の密度 ρ_s を変化させ実験を行い、三次元正方形角柱の空力振動特性および付加質量効について調べた。さらに、それらに基づいて発振流速の推定を行った。以下に得られた知見を示す。

1. 応答曲線は、 ρ_s が小さいほど発振流速が低下し、応答の最大値は大きくなる。また、 $C_{L,rms}$ は ρ_s が小さいと $C_{L,rms}$ の立ち上がりの V_r が低くなり、そのピーク値は大きくなる。また、ピーク値の V_r も ρ_s が小さいと低くなる。
2. 本論文では、付加質量係数 γ を導入し、付加質量効果が生じている時に振動パラメータ、固有円振動数 ω_s 、固有振動数 f_s 、無次元流速 V_r などが見かけ上どのように変化するかを示した。
3. 付加密度比 n_a は、 V_r が小さければその値は大きく、 V_r の上昇とともに0値に漸近する。また、 γ は ρ_s によらず全 V_r 領域において同値を示し、 V_r が小さければその値は大きく、 V_r の上昇とともに0値に漸近する。
4. 複数の応答曲線を付加質量効果を考慮した無次元流速 V_r^* に対して描いてみるとほぼ直線を示し、その線の応答の立ち上がりはほぼ $1/St$ となる。応答が小さい場合に、 V_r^* に対する θ_{rms} が直線とならず、あるばらつきを持っているのは、測定時の流速が低く、圧力センサーの精度に限界があるためであると考えられる。
5. 5章より無次元流速に対する応答値 $V_{rk}(\tilde{\theta}_0)$ の推定は次の手順で行う。 St が既知でありFig.7のように、 θ_{rms} に対する n_a が線形関係であることから、 γ を推定し、任意の応答値 $\tilde{\theta}_0$ に対して推定可能である。
6. 発振流速推定法に従って求めた $V_{rk}(\tilde{\theta}_0)$ は実験値とおおむね一致することを示した。

これより、二次元正方形角柱を用いて示した推定法が三次元正方形角柱でも適用できる可能性を示した。
「参考文献」

- 1) G.V.Parkinson., and M.A.Wazonek : Some considerations of combined effects of galloping and vortex resonance , Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , Vol.8, pp.135-143. , (1981)
- 2) 鷺津久一郎, 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回構造物の耐風性に関するシンポジウム, pp.191-198, 1976.12
- 3) 松本勝, 白石成人, 白土博通, 重高浩一, 新原雄二, 山口滋弘 : 構造基本断面の非定常空気力に関する研究, 第12回風工学シンポジウム, pp.231-236, 1992.12
- 4) 溝田武人, 中村泰治 : 矩形断面柱の非定常揚力と後流の速度変動について, 構造物の耐風性に

関する第3回シンポジウム論文集, pp.201-208, 1974.12

5) 田村幸雄 : 円筒の渦励振に関する研究 - その1 円筒後流域のモデル化 -, 日本建築学会論文報告集, 第266号, pp.87-95, 1978.4

6) Scruton C. : On the wind-excited oscillations of stacks, towers and masts, Proceeding International Conference on Wind Effects on Buildings & Structure (Teddington), Her Majesty's Stationary Office, 1963

7) 河井宏允, 藤波潔 : 一様流中の辺長比2の3次元角柱の空力不安定振動, 風工学シンポジウム論文集, 第16回, pp.285-290, 2000

8) 田村哲郎, 伊藤嘉晃 : 動力特性値の変化による空力不安定振動の応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第504号, pp.15-21, 1998.2

9) 西将志, 神田亮 : 空気流体中で応答振動する三次元正方形角柱の付加質量効果と発振流速に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第651号, pp.895-903, 2010.5

10) 小島千里, 茂木大祐, 神田亮, 加藤優輝, 小宮巧 : 空力振動する二次元正方形角柱の付加質量効果および発振流速に関する研究-その2 付加質量係数 γ と各空力振動パラメータ-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 論文番号.20103, 2013.7

11) 加藤優輝, 茂木大祐, 神田亮, 小島千里, 小宮巧 : 空力振動する二次元正方形角柱の付加質量効果および発振流速に関する研究-その4 発振流速の推定-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 論文番号.20105, 2013.7

12) 西将志, 神田亮, 渡辺亨, 渡辺昌宏, 田中秀和 : 空気流体振動現象を対象としたリアルタイムハイブリッド式実験法とその応用, 日本機械学会論文集, 77巻779号, pp.191-205, 2011.7

13) 石崎潑雄, 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, 日本建築学会構造系論文集, 第306号, pp.11-20, 1981.8

14) 大熊武司, 丸川比佐夫, 片桐純治, 鶴見俊雄 : 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, 日本建築学会構造系論文集, 第512号, pp.39-46, 1998.10

15) 谷口徹郎 : 建築構造物に作用する非定常風力の評価に関する研究, 大阪市立大学学位論文, 2000