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

日大生産工(院) ○加藤 優輝 日大生産工 神田 亮

1. 序論

ブラッフボディの空力振動現象である二次元およ び三次元角柱の流れ直交振動の研究は古くから行わ れている^{例えば1)~9)}。特に、構造物の空力不安定振動を 含む応答性状は、構造物の密度比 n_s (= ρ/ρ_s , ρ_s :構 造物の密度, ρ: 空気密度)の逆数と減衰定数h。の積で あるスクルートン数Sc, あるいは質量減衰パラメー 等しければ応答特性はほぼ同じであるとされてきた ¹⁰⁾。しかし、Sc、 δ が同じであっても n_s が大きい場合 に発振流速が低下する現象が報告されている 11),12)。 また、この要因の一つと考えられる流体力の付加質 量効果についていくつかの研究例も報告されている ^{13)~16)}。これらの研究を新たな視点から見直すために 本研究室では、実験的手法と解析的手法を組み合わ せた空力振動実験法として改良型ハイブリッド空力 振動法(以下, IHAT)を開発し17, この手法による三 次元正方形角柱の研究を実施してきた。その結果, 発振流速が低下する現象は、準定常理論に基づく空 気流体力による付加質量効果で説明できることなど を示した¹⁶⁾。

以上を踏まえて本論文では、ブラッフボディの流体力による付加質量効果に着目し、二次元正方形角柱の空力振動現象を付加質量係数yを導入することで、新たな視点から分析するとともに、その分析に基づいて従来の方法^{11),13),14}とは異なる方法によって 渦励振が発現する流速を推定することを目的とする。

IHAT を用いた空力振動実験

2.1 実験緒言

実験で使用した二次元正方形角柱をFig.1に示す。振動の自由度は,流れ直交方向の並進1自由度とした。圧力測定孔は,1面に16点,計4面で計64点設けた。実験気流は,ほぼ一様流に近い(乱れ強さ約0.5%,基準高さ700mm)ものとした。Scを式(1)に示す。

$$Sc = 2\frac{1}{n_s}2\pi h_s \tag{1}$$

Scに従って定めた実験パラメータをTable1に示す。 固有振動数は4~6Hzとした。応答値のサンプリング間 隔は、2msecとした。サンプリングデータ数は、16384 個を1セットとした。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:見つけ幅)の範囲は 2~24とした。IHATの特長の一つとして、ランダム応 答下でも物体に作用する流体力が測定可能なことが挙 げられるが、強制振動法^{2),13)}とは異なり、準定常下で の現象を分析できる。この実験では、ギャロッピング 振動のほか、渦励振を対象とすることが予測されるが、 IHATを用いれば、準定常的な領域でも、定常理論を適 用できるか否かについても調べられる。まず,応答曲 線や変動揚力係数といった基本的な実験結果について 分析を行う。



Fig.1 Elevation of the model

 Table1
 Experimental parameters

(a) $Sc = 10.0$				(b) $Sc = 30.0$		
n _s	h _s [%]	Sc		n _s	h _s [%]	Sc
1/20	3.98		1	1/20	11.94	
1/25	3.18	1		1/25	9.55]
1/33	2.41	10.0		1/33	7.23	30.0
1/50	1.59			1/50	4.77	
1/100	0.80			1/100	2.39	

2.2 応答曲線

Fig.2 に*Sc*=10.0, Fig.3 に*Sc*=30.0 の応答曲線を示 す。なお,縦軸は無次元振幅Ź(=√2·z_{rms}/B, z_{rms}: 応答変位の標準偏差)である。

Sc=10.0では、Vr=2~6付近で応答は増大し、Vr=8~ 10付近で発散した。Vr=15~20としても、応答は収束 せず発散した。この結果より、応答が増加している領 域では渦励振が発生し、その後ギャロッピング振動に 現象が直接移行したと推察される。

Sc=30.0 では、Sc=10.0 と同様の以で応答は立ち上がり、U=8~10 付近で最大となる。その後、Uの増加とともに応答は収束した。この結果より、応答が増加している領域では渦励振が発生していると推察される。更に、U=20 付近において再び応答の急激な増加、発散が確認できる。この領域ではギャロッピング振動が発生していると推察される。

本来, *Sc*が同値であれば,応答が発振する V_{r} もほぼ 等しいと考えられてきたが,今回の実験では n_{s} が大 きい(ρ_{s} が小さい)ほど発振する V_{r} は低くなるという 結果になった。



Study on added-mass effect and on-set fluid velocity of a 2-dimensional square prism under aerodynamic vibration

Yuki KATOU, and Makoto KANDA



2.3 変動揚力係数C_{L,rms}

Fig.4 にSc=10.0, Fig.5 にSc=30.0 の $C_{L,rms}$ を V_r に対して示す。 $C_{L,rms}$ は式(2)より算定した。

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

ここで, *F_{L,rms}*: 揚力の標準偏差, S: 模型の代表面 積である。

Sc=10.0の場合, $V_r=3\sim10$ において $C_{L,rms}$ は, ほぼ 一定値となる。 $V_r=8\sim10$ 付近からはギャロッピング 振動と思われる現象で応答値が発散し, $C_{L,rms}$ が算定 不能である。

Sc=30.0の場合,低いV,の領域においてほぼ一定値 となる。渦励振が発生していると考えられる領域で は、C_{L,rms}は急激に減少する。このC_{L,rms}の減少はn_sが 大きい(p_sが小さい)ほど大きくなる。応答が最大値と なるV,でC_{L,rms}は最小値となる。収束後のギャロッピ ング振動が発生するまでの領域では、C_{L,rms}の値はn_s によって異なるが、V,に対してほぼ一定値となる。な お、これら一連のC_{L,rms}に関する現象は強制振動法で 測定された結果²⁰と同様な傾向を示している。

3. 付加質量係数γ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るべき点は、本来、Scが同値であれば、発振するV_rを含めてその応答性状はほぼ同様な



傾向を示すはずであるが、今回の実験ではScが同値 であってもnsが大きければ(psが小さい)発振するV, は低くなったことである。本論文では、これが流体 力の付加質量効果¹³⁾によることを実験結果などを分 析することにより示していくが、本章では、まず、 式(3)で定義される付加質量係数y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。

$$\gamma = \frac{M_a}{M_s} = \frac{\rho_a}{\rho_s} \tag{3}$$

ここで, M_a は空気流体力により作用する付加質量, ρ_a は付加密度である。また、 $\rho \ge \rho_a$ の比である付加密度 比 n_a は式(4)で表される。

$$n_a = \frac{\rho}{\rho_a} \tag{4}$$

付加質量効果を考慮した全質量を M_s^* とすると、 M_s^* は γ と M_s を用いて式(5)のように表される。

$$M_s^* = M_s + M_a = (1 + \gamma)M_s$$
 (5)

同様に、付加質量効果を考慮したそれぞれのパラメ ータである固有円振動数 ω_s^* 、固有振動数 f_s^* 、減衰定 数 h_s^* 、無次元流速 V_r^* 、スクルートン数 Sc^* を式(6)に 示す。

$$\omega_{s}^{*} = \sqrt{\frac{K_{s}}{M_{s}^{*}}} = \frac{\omega_{s}}{\sqrt{1+\gamma}}$$
(6a)

$$f_s^* = \frac{{\omega_s}^*}{2\pi} = \frac{\omega_s}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} = \frac{f_s}{\sqrt{1+\gamma}}$$
 (6b)

$$h_s^* = \frac{C_s}{4\pi f_s^* M_s^*} = \frac{C_s}{4\pi f_s M_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} = \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}}$$
 (6c)

$$V_r^* = \frac{V}{f_s^* B} = \frac{V}{f_s B} \cdot \sqrt{1 + \gamma} = V_r \sqrt{1 + \gamma}$$
(6d)

$$Sc^* = 2\frac{1}{n_s}2\pi h_s \sqrt{1+\gamma} = Sc\sqrt{1+\gamma}$$
(6e)



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

次に本論文で導入した n_a および γ について検討す る。Sc=10.0, 30.0 において V_r に対する付加密度比の 逆数 $1/n_a$ を Fig.6 に示す。Sc=10.0 では、 V_r が最も低 い時 $1/n_a$ は最大値(約160~750)を示す。また、 n_s が 小さい(ρ_s が大きい)ほど高い。その後、 V_r が増加する とともに減少しX軸に漸近する。なお、 n_s が小さい (ρ_s が大きい)ほど $1/n_a$ は緩やかに減少する。Sc=30.0では、Sc=10.0 とほぼ一致する値を示した。これらの 事実から、Scが異なる値であっても n_s が同値であれ ば V_r に対する $1/n_a$ もほぼ同値を示す傾向があること が予測できる。



Sc=10.0, 30.0において V_{r} に対する $\gamma \varepsilon$ Fig.7に示す。 全体的な傾向として、 V_{r} が最も低い時、 γ は最大値を示 し、渦励振が著しい領域($V_{r}=7\sim10$)で $\gamma=0$ に近似する。 また、 V_{r} の全領域で $Sc \varepsilon n_{s}$ が異なっても γ は等しい。



4.2 V_r, V_r*に対する応答曲線

さらに、これらの結果を受けて、付加質量効果を 考慮した無次元流速 $V_{*}(=V_{r} \cdot \sqrt{1+\gamma})$ に対する応答 曲線について検討する。

V,および*V*,*に対する応答曲線をFig.8に示す。なお, 応答曲線は,応答が上昇していく \hat{Z} =0~0.085までを示 した。第2章, Fig.2,3でも示したが,Fig.8において, *V*,に対する応答曲線(黒印)は n_s が大きい(ρ_s が小さい)ほ ど図中左側に位置するが,*V*,*に対する応答曲線(白印) は, n_s によって異ならず,ほぼ直線を示す。Fig.7で*V*,が 大きくなるのに対して γ が0に漸近することから,この 直線は γ = 0すなわち, $\rho_a \rightarrow 0$ または $\rho_s \rightarrow \infty$ の時(式(3) 参照)の応答曲線になると推察される。また,この直線 とX軸の交点の値はおおよそストローハル数の逆数 1/Stと一致する。Fig.8はSc=30.0のみの表記だが Sc=10.0でも同様の傾向を示した。



5. 発振流速の推定

第4章において、いかなる応答曲線であっても付 加質量効果を考慮することで、ほぼ同一な応答曲線 となることを示した。本章では、これに加えて、n_aと Žに線形な関係があるという事実に基づいて任意の 発振無次元振幅Ž_oにおけるγを求め、最終的に渦励振 の発振無次元流速の推定を行う。

5.1 推定の概念

ここで用いる推定の概念を模式化し, Fig.9 に示す。 直線nは, $\gamma=0$ の応答曲線, 曲線kは任意の応答曲線 で, Fig.9 では発振無次元流速の推定の対象になる応 答曲線である。 \tilde{Z}_0 における直線n上の無次元振幅は $\tilde{Z}_0 = 0$ であると予測されるため $V_r^*(\tilde{Z}_0) (= 1/St)$ とな る。曲線k上の \tilde{Z}_0 における付加質量係数を $\gamma_k(\tilde{Z}_0)$ とす ると, 曲線k上の \tilde{Z}_0 における無次元流速 $V_{rk}(\tilde{Z}_0)$ は式 (6d)より式(7)のように表される。

$$V_{rk}(\tilde{Z}_{o}) = \frac{V_{r}^{*}(\tilde{Z}_{o})}{\sqrt{1 + \gamma_{k}(\tilde{Z}_{o})}} = \frac{1/\text{St}}{\sqrt{1 + \gamma_{k}(\tilde{Z}_{o})}}$$
(7)

したがって、 $1/St \geq \gamma_k(\tilde{Z}_o)$ が既知であれば、 $V_{rk}(\tilde{Z}_o)$ 、 すなわち発振無次元流速に極めて近い値を推定するこ とが可能となる。なお、周知のようにStは既往の文献 や静止実験から知る事ができる。



5.2 *Ĩとna*の関係

式(3)より、 $\gamma_k(\tilde{\mathbf{Z}}_o)$ は、 ρ_s が既知であるから $\tilde{\mathbf{Z}}_o$ の場合 の ρ_a が分かれば算定可能である。 $\gamma_k(\tilde{\mathbf{Z}}_o)$ を算出するた め、 $\tilde{\mathbf{Z}} \ge n_a$ の関係について検討する。Fig.10に $\tilde{\mathbf{Z}}$ に対す る n_a を示す。なお、発振流速の推定では、応答の立ち 上がりや渦励振の発現を推定するため、検討の対象範 囲を応答の立ち上がり付近と判断される $\tilde{z} < 0.02$ まで の実験値とした。図より、 $\tilde{z} \ge n_a$ は比例関係にあり、 ほぼ n_a は \tilde{z} の0.8倍である。この事実から、任意の \tilde{z}_o に 対して n_a を求めることができると同時に、式(3)より、 \tilde{z}_o における $\gamma_k(\tilde{z}_o)$ を算定することができる。



5.4 発振無次元流速の推定結果

Fig.11 にSc = 10.0における推定した $V_{rk}(\tilde{Z}_o)$ を示 す。今回の推定では、St = 0.125(1/St = 8.0)とした。 Fig.11 において、シンボル〇、◆などは実験値であ る。推定値は実験値と良く一致しており、推定の精 度が良いことを示している。なお、紙面の都合上記 載していないがSc = 30.0においても、同様の結果を 示している。



6. 結論

IHATを用いて二次元正方形角柱の空力振動特性お よび付加質量効果について調べ,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。

 応答曲線において、スクルートン数Sc = 10.0では 無次元流速以 = 8~10付近で渦励振からギャロッ ピング振動へ振動現象が直接移行していると推察 される。また、Sc = 30.0では以 = 8~10付近で渦 励振、以 = 20付近でギャロッピング振動が発生し ていると推察される。渦励振およびギャロッピング 振動が発生するV_rは密度比n_sが大きい(構造物の密 度_Psが小さい)ほど低流速となる。

- ② 複数の応答曲線を付加質量効果を考慮した無次元 流速 $V_r^* (= V_r \cdot \sqrt{1+\gamma})$ に対して描いてみると、その 線は同一線上に描かれる。その線はほぼ直線となり $\tilde{Z}_a \rightarrow 0$ において $V_r^* = 1/St$ となる。
- ③ 結語②の過程を逆に辿ることによって,発振無次元 流速の推定が可能である。すなわち,Stは既知であ るから, γ が求まれば任意の応答値 $\tilde{Z}_{o}(\tilde{Z}_{o} = 0)$ にお ける発振無次元流速 $V_{rk}(\tilde{Z}_{o})$ を推定することが可能 である。また, γ はFig.10に示すように \tilde{Z} と n_{a} が比 例関係にあることから推定可能である。Fig.11にお いて推定値は実験値と良好な一致を示した。

「参考文献」

1) G.V.Parkinson., and M.A.Wawzonek : Some considerations of combined effects of galloping and vortex resonance, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.8, pp.135-143, 1981,7, 2) 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回構造物の耐風性に関するシンポ ジウム, pp.191-198, 1976.12, 3) Bishop, R.E.D., and A. Y. Hassan : The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc. A, Vol.277, pp.51-75, 1964,1, 4) Scanlan R. H., and Tomko J. J. : Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives, Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, Vol.97. EM6(1971), pp.1717-1737, 1971,11, 5) M. Novak. : Galloping Oscillations of Prismatic Structures, Journal of Engineering Mechanics Division ASCE EM1, pp.27-46, 1972,1, 6) 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, 7) 山田均, 宮田利雄: 非定常圧力特性による1:2長方形 断面柱のギャロッピング現象の評価、土木学会論文集、第 344 号, pp235-241, 1984,4, 8) 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(1974), pp.201-208, 1974,12, 9) 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(1978), pp.87-95, 1978,4, 10) 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), 1963, 11) 河井宏充, 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, 2000.12, 12) 田村哲郎,伊藤嘉晃:動力学特性値の変化 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, 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,2000,16) 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風速に関する研究,日本建築学会 構造系論文集, 第651号, pp.895-903, 2010,5, 17)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, pp191-205, 2011,7