

二次元流中における正方形角柱の空力振動特性に関する研究

日大生産工(院) ○久保田 理人 日大生産工 神田 亮

日大生産工(院) 茂木 大佑

1. はじめに

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。これに対し、これらの研究を新たな点から見直すために本研究室では、改良型ハイブリッド空力振動法(以下、IHAT)による三次元正方形角柱の研究を実施してきた¹⁾。

本論文では、IHATにより今まで実施されなかったスクルートン(以下、Sc)数、密度比 ρ/ρ_s (ρ : 空気密度、 ρ_s : 構造物の密度)に対し、二次元正方形角柱の風直交方向振動を再現し、その応答値や風圧変動場を測定するとともに空力振動時の変動揚力係数(以下、 $C_{L,rms}$)、応答加速度と外力の位相角について検討を行う。

2. 実験諸元

実験で使用した二次元正方形角柱を Fig.1 に示す。振動の自由度は風直交方向の並進1自由度とする。風圧測定孔は1面に16点、4面で計64点設けた。気流はほぼ一様流に近い(乱れ強さ0.05%)ものとした。実験パラメータを Table1 に

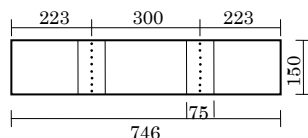


Fig.1 Elevation of Model

Table1 List of Experimental Parameters

(a) Sc = 10			(b) Sc = 20		
ρ/ρ_s	h [%]	Sc	ρ/ρ_s	h [%]	Sc
1/20	3.98	10	1/20	7.96	20
1/80	1.00		1/80	1.99	
1/160	0.50		1/160	0.99	
1/640	0.12		1/640	0.25	

(c) Sc = 30			(d) Sc = 14,15		
ρ/ρ_s	h [%]	Sc	ρ/ρ_s	h [%]	Sc
1/20	11.94	30	1/160	0.69	14
1/80	2.99		1/160	0.75	15
1/160	1.49				
1/640	0.37				

示す。Sc数を10, 14, 15, 20, 30となるように ρ/ρ_s および減衰定数 h を表中の様に定めた。Sc数を式(1)に示す。

$$Sc = 2 \frac{\rho_s}{\rho} 2\pi h \quad (1)$$

二次元正方形角柱の応答値のサンプリング間隔は2[msec]とした。サンプリングデータ数は16384個を1セットとして、標準偏差などの統計量を算定した。二次元正方形角柱の固有振動数は4[Hz]とした。

3. 応答曲線

Fig.2 に無次元風速(以下、 V_r)に対する応答曲線を示す。なお、縦軸は無次元振幅 $Z(= \sqrt{2} \cdot \dot{z}/B)$ ここで、 $\dot{z}$: 応答変位の標準偏差、 B : 見つけ幅)である。Sc = 20,30では、 $V_r=2.5\sim5.0$ 付近で応答が増加し、 $V_r=7.0\sim10.0$ 付近で最大となる。その後、 V_r の増加と共に応答値は収束する。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、高い V_r において再び応答の急激な増加が確認できる。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。Sc = 10の場合はSc = 20,30と同様な V_r から応答が増大し始めるが応答が収束せず発散したことから、渦励振からギャロッピング振動に振動現象が直接移行したと推察される。また、Sc = 14では、Sc = 10と同様、渦励振後、応答は収束せず、発散した。これに対し、Sc = 15では渦励振後、応答の収束が確認できた。この結果より、渦励振からギャロッピング振動に振動現象が直接移行するSc数の境界値は14~15の間にあると推察される。Sc数が異なり ρ/ρ_s が同

Study on Characteristics of Aerodynamic Vibration of a Square Prism in 2 Dimensional Flow

Rihito KUBOTA, Makoto KANDA and Daisuke MOTEKI

じ場合、渦励振時の応答が立ち上がる Vr は Sc 数によらず一定となり、渦励振時では同じ増加傾向を示す。これに対し、 Sc 数が同じで ρ/ρ_s が異なる場合、 ρ/ρ_s が大きくなると応答の立ち上がる Vr は低くなることが確認できる。

4. 変動揚力係数

Fig.3に $C_{L,rms}$ を示す。なお、縦軸は $C_{L,rms}$ 、横軸は Vr である。 $C_{L,rms}$ は式(2)より算出した。

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

ここで、 $\bar{F}_L$ ：揚力の標準偏差、 $\bar{V}$ ：平均風速、 S ：模型の代表面積である。

$Sc = 20, 30$ の場合、低風速において渦励振が発生していると考えられる領域では、 $C_{L,rms}$ は応答の増加とともにわずかに増加した後、減少する。その現象が始まる Vr は ρ/ρ_s が大きいほど小さい。その後、応答が最大値となる Vr で

$C_{L,rms}$ は最小値となる。渦励振が発生している領域より高風速でギャロッピング振動が発生していると考えられる領域では、 $C_{L,rms}$ の値は異なるがほぼ一定値となる。 $Sc = 10$ の場合、

$Vr=10$ 付近までは $Sc = 20, 30$ と同様な傾向を示すが、 $Vr=10$ より高風速領域では、測定不能でデータが無く明確な考察は行えない。 $Sc = 14, 15$ の場合、両者ともほぼ同様な値をとり、また、その傾向は $Sc = 10, 20, 30$ とほぼ同様な値をとり、また、その傾向は $Sc = 10, 20, 30$ と同様である。 Sc 数は異なるが、 $\rho/\rho_s = 1/20$ の場合、渦励振時に $C_{L,rms}$ が減少する Vr は Sc 数によらず一定となり、そのときの $C_{L,rms}$ は Sc 数が大きいほど小さい値となる。 Sc 数は異なるが、

$\rho/\rho_s = 1/640$ の場合には $\rho/\rho_s = 1/20$ と同様の傾向を示すがその度合いは小さい。

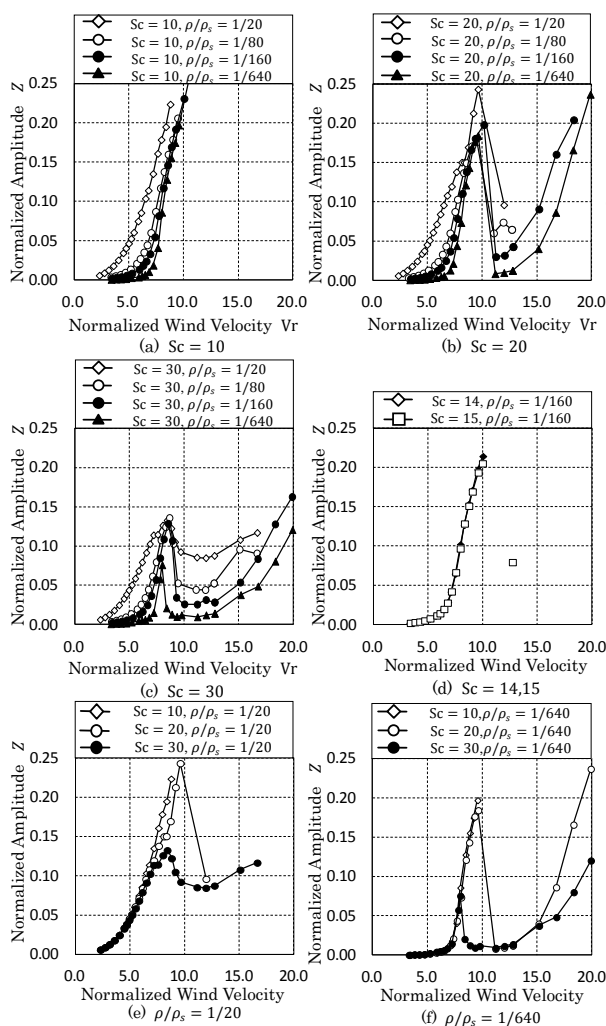


Fig.2 Response Curves

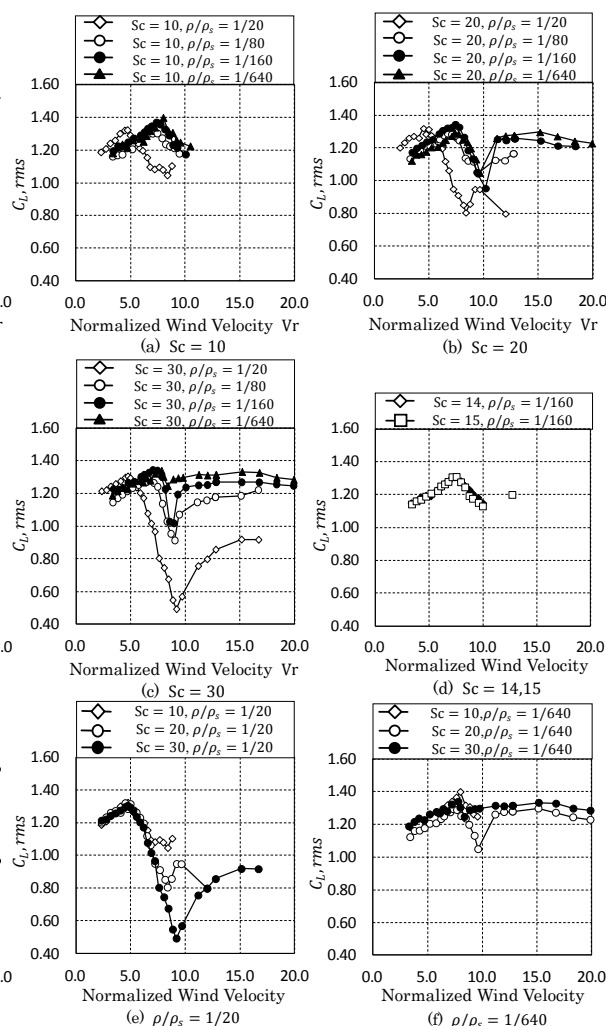


Fig.3 Fluctuate Lift Coefficient

5. 外力と応答加速度の位相角

1 質点 1 自由度の並進振動する構造物に空気流体力が作用した場合の振動方程式は式(3)となる。

$$M_s \ddot{z}(t) + C_s \dot{z}(t) + K_s z(t) = F(t) \quad (3)$$

ここで、 M_s ：構造物の質量、 C_s ：構造物の減衰係数、 K_s ：構造物の剛性、 $\ddot{z}(t)$ ：応答加速度、 $\dot{z}(t)$ ：応答速度、 $z(t)$ ：応答変位、 $F(t)$ ：外力である。3 節より、ある範囲の応答変位は定常振動に近いので、 $z(t)$ と $F(t)$ は式(4),(5)のように定められる。

$$z(t) = Z e^{i\omega t} \quad (4) \quad F(t) = F_L e^{i(\omega t + \phi)} \quad (5)$$

ここで、 Z ：応答変位の振幅、 ω ：応答の卓越円振動数、 F_L ：外力の振幅、 ϕ ：外力と応答加速度の位相角である。式(4)、(5)を式(3)に代入し、両辺を $e^{i\omega t}$ で除し、右辺を左辺に移行すると式(6)となる。

$$-M_s \omega^2 y + C_s i \omega y + K_s y - F_L e^{i\phi} = 0 \quad (6)$$

式(6)において左辺第 3 項の復元力項を複素平面上の実数軸上にあるとすると他の項は Fig.4 に示すようになる。Fig.4 の右図は、左図の各項のベクトルを合成したもので、式(6)が常に釣り合い状態にあることを示し、閉じる。

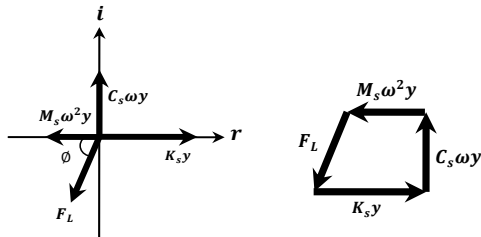


Fig.4 Equilibrium Forces in Harmonic Response on Complex

6. 振動数比と位相角

固有振動数に対する外力卓越振動数(以下、 f_f/f_s)、応答卓越振動数(以下、 f_r/f_s)、応答卓越振動数成分における外力と応答加速度の位相角 ϕ を Fig.5 に示す。横軸は V_r 、縦軸は、 f_f/f_s 、 f_r/f_s 、 ϕ である。なお、参考のため応答曲線を同図に示した。全体的な傾向として、渦励振が発生する前の領域で振動数比は、 V_r に対し線形に変化しているが、渦励振が発生している領域では、 V_r が増加しても後流渦の振動数が構造物の固有振

動数に等しくなるロックイン現象が生じている¹⁾。渦励振が収まる $V_r = 10$ 付近を過ぎると f_r/f_s は、固有振動数付近で卓越をしているケースが多くみられるが、 f_f/f_s は静止時の渦発生周波数と同様に風速に比例して増大している。その後、ギャロッピング振動が発生している領域では、 f_r/f_s は固有振動数付近で卓越をしているケースが多くみられる。次に ϕ についてであるが、 $Sc = 10, 14, 15$ の場合、低い V_r において ϕ は約 0deg 付近となり、渦励振領域では約 20deg 付近まで増加する。 $Sc = 20$ の場合、渦励振領域では約 30deg 付近まで増加をしており、その後、応答が収束する領域では ϕ は約 20deg まで低下する。ギャロッピング振動が発生している領域では、約 20deg 一定値となる。 $Sc = 30$ の場合、渦励振領域では $Sc = 10, 20$ と同様の傾向を示すが、収束する領域で位相角は一時 180deg まで増加しその後、約 30deg まで低下する。ギャロッピング振動が発生している領域では $Sc = 20$ と同様、約 20deg 一定値となった。全体的な傾向としては、同じ Sc であれば、密度比によらず同じ傾向を示した。また、応答が収束する領域では多少異なった傾向を示したが、渦励振、ギャロッピング振動領域では全パラメータ同様の傾向を示した。

5. まとめ

IHAT を用いて二次元正方形角柱の空力振動実験を行い、応答特性や $C_{L,rms}$ 、応答加速度と外力の位相角について検討した。以下に得られた知見を示す。

- ① $Sc = 15, 20, 30$ では低風速で渦励振、高風速でギャロッピング振動が発生していると推察される。その発振無次元風速は密度比が小さいほど低風速となる。また、 $Sc = 10, 14$ では渦励振からギャロッピング振動へ振動現象が移行していると推察される。
- ② $C_{L,rms}$ は渦励振中の応答の増加と共に減少していき、応答が最大値となる風速で最小値をとる。また、ギャロッピング振動中は

1.2 付近でほぼ一定値となる。

- ③ f_f/f_s では渦励振領域において渦の発生振動数が構造物の固有振動数に引き込まれるロックイン現象が生じていると推察される

- ④ $\emptyset$ では、渦励振領域において約 30deg 付近ま

で増加をし、ギャロッピング振動が発生している領域では、約 20deg 一定値となった。

参考文献

- 1) 小泉達也, 神田亮, 西将志, 田中秀和, 久保田理人: 「空力振動する 3 次元正方形角柱の風力特性に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第 671 号, pp1-10, 2012 年 1 月
- 2) 社団法人鋼構造境界編: 「構造物の耐風工学」, 東京電機大学出版, 初版, 1997

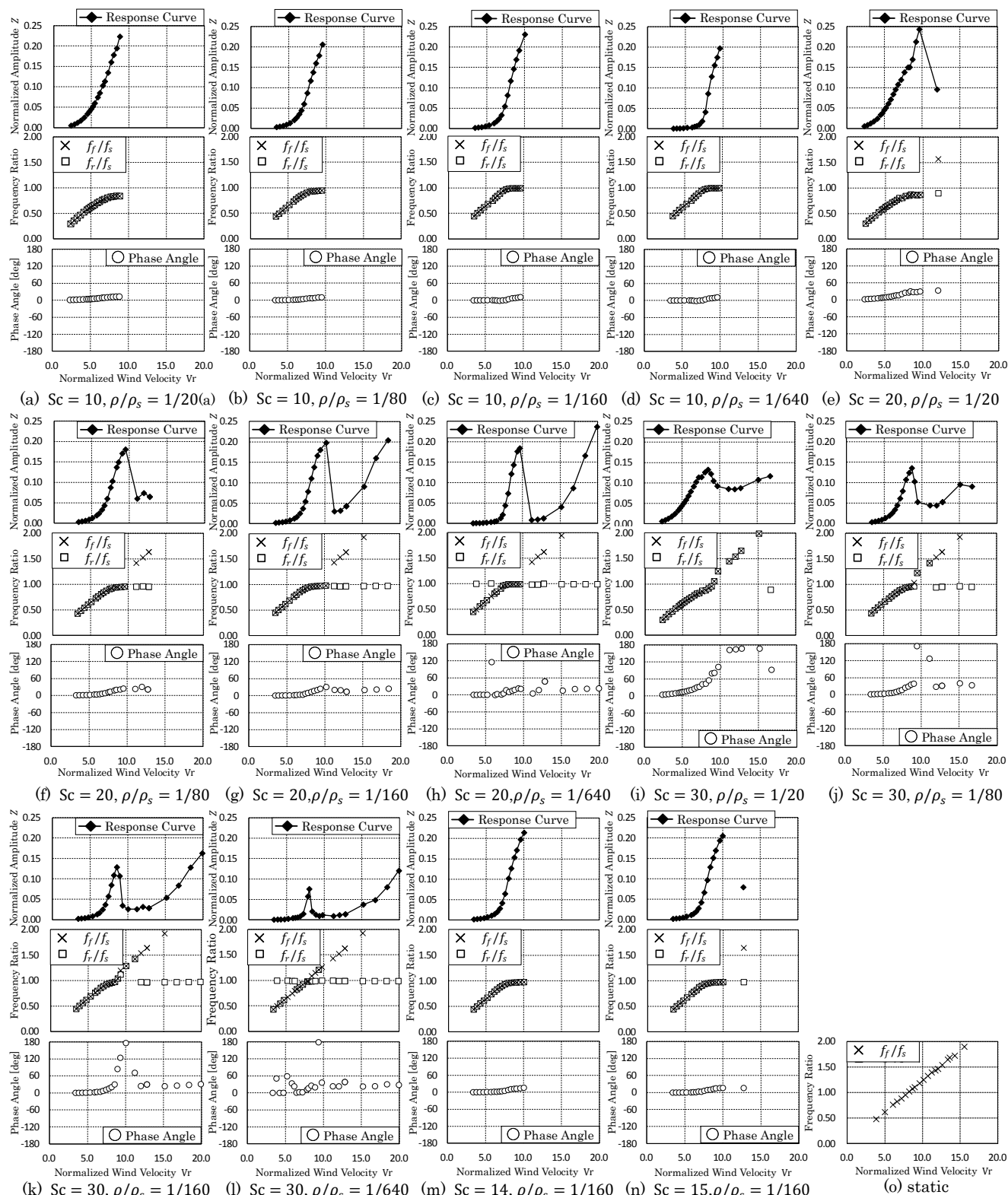


Fig.5 Response Curve and Frequency Ratio and Phase