

慣性接続要素を有する構造物の空力安定性に関する研究

日大生産工 ○小林 啓樹 日大生産工 神田 亮

1. 序論

筆者らは前論文¹⁾において、慣性接続要素を有する構造物が風外力を受けた場合、地震力を受けた場合と同様、構造物の制御にその有用性を発揮する可能性があることを示唆し、実際にその応答制御性能について調べた。その中で、まず、慣性接続要素を有する構造物の空力振動パラメータがどのように変化するかについて整理した。また、慣性接続要素を有する構造物にホワイトノイズ及び風外力を入力し、入力レベルの低減と減衰の低減及び周期の伸長による共振効果の相反性について検討した。さらに、改良型ハイブリッド空力振動実験法²⁾(以下、MHAT)を用いて、二次元正方形角柱の空力安定性について調べた。その結果として、慣性接続要素は、風外力に対してその入力レベルを低減させるだけではなく構造物の空力安定性を向上させる効果があることが分かった。

周知のことではあるが、慣性接続要素とは、構造物の応答加速度に対する慣性質量のみを増大させその応答を制御しようというものであり、地震力が作用した時も外力として作用する項の慣性質量は増加させずに構造物の慣性質量のみを増加させる。応答制御の仕組みとしては極めて巧妙なものである。慣性接続要素を利用した構造物の応答制御に関する研究は国内外で数多く行われている³⁾⁻¹⁴⁾が、その大半は地震外力に関するものである。

以上を踏まえて本論文の目的は、MHATを用いて、慣性接続要素を有する二次元及び三次元正方形角柱の空力安定性についてさらに詳しく検討することである。

2. 慣性接続要素を有する振動系のスクルートン数Scと質量減衰パラメータ δ

本章ではまず、慣性接続要素を有する構造物の風応答特性や空力安定性を示す指標の一つであるスクルートン数Scと質量減衰パラメータ δ について慣性接続要素を有する振動系では原振動系とどの様に異なるかについて検討する。

Sc, δ は構造物と流体の密度の比と減衰定数の積から求まる無次元数であり、一般的な構造物の場合、 δ が大きいほど空力安定性は高くなる傾向にある。Sc, δ は式(1), (2)のように表される。

$$Sc = 4\pi \frac{\rho_s}{\rho} h_s \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\rho_s}{\rho} h_s \quad (2)$$

ここに、 ρ_s : 構造物の密度, h_s : 減衰定数, ρ : 空気密度である。

次に、慣性接続要素を有する振動系のスクルートン数Sc', 慣性接続要素を有する振動系の質量減衰パラメータ δ' を考える。まず、振動系の有する慣性接続要素と原振動系の質量比からなる慣性接続質量比 γ を式(3)のように定義する。

$$\gamma = \frac{m_d}{m_s} \quad (3)$$

ここに、 m_s : 質点系の質量, m_d : 慣性接続要素の質量効果である。また、慣性接続要素を有する振動系では前報の検討より、 ρ_s は ρ_s' に、 h_s は h_s' に変化する。したがって、Sc', δ' は式(4), (5)のように表される。

$$Sc' = 4\pi \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = 4\pi \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma} Sc \quad (4)$$

$$\delta' = \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma} \delta \quad (5)$$

ただし、 $\rho_s' = (1+\gamma)\rho_s$, $h_s' = h_s/\sqrt{1+\gamma}$

ここに、 ρ_s' : 慣性接続要素を考慮した構造物の密度, h_s' : 慣性接続要素を有する振動系の減衰定数である。式(4), (5)より、原振動系に比べてSc, δ が $\sqrt{1+\gamma}$ 倍されることから、慣性接続要素を有する振動系は原振動系より空力安定性が向上することが予測される。

3. 二次元正方形角柱に関する検討

3.1. 実験諸言

Fig.1 に使用した空力振動実験モデルとその測定孔位置を示す。図に示すように圧力測定孔は、1面に16点、4面で計64点設けた。気流は、空力不安定振動現象が表れやすく、慣性接続要素の安定性について調べやすいほぼ一様流に近いものとした。Scは、 ρ_s が49, 97kg/m³であるのに対し、原振動系で30, 10となるように h_s をそれぞれ定めた。 γ は原振動系では $\gamma = 0.0$ であり、0.0, 1.0, 2.0の三段階とした。Sc', ρ_s' , h_s' は、Table1のように定まる。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、3セット計測し、各値を平均し代表値とした。対象とした無次元風速 $Vr' (= \sqrt{1+\gamma} Vr = \sqrt{1+\gamma} \bar{V}/n_s B)$, \bar{V} : 平均流速, B: 見つけ幅)の範囲は3~35とした。

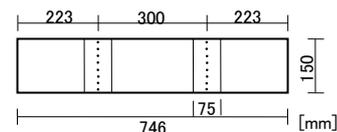


Fig.1 Elevation of the model of 2-dimensional square prisms

Study on Aerodynamic Stability of Structures Using the Inertial Mass

Hiroki KOBAYASHI and Makoto KANDA

3.2. 実験結果および考察

Fig.2に $Sc = 30$ 及び $Sc = 10$ の応答曲線を示す。なお、縦軸は無次元振幅 $\tilde{Y} (= \sqrt{2} \cdot Y_{rms}/B, Y_{rms}$: 応答変位の標準偏差)、横軸は無次元風速 Vr' である。

まず、 $Sc = 30$ の場合について述べる。 $Vr' = 4$ 付近で応答が立ち上がり、 $Vr' = 7 \sim 10$ 付近でピークとなるような渦励振が発生している。それより高風速になると、一旦渦励振は収まりさらに高風速領域ではギャロッピング振動が発生している。原振動系において、渦励振が発生している場合、慣性接続要素の質量効果を増大させるほど渦励振のピークの応答値は小さくなっている。この現象は、 ρ_s が $49, 97\text{kg/m}^3$ であっても、同様の傾向を示す。

次に、 $Sc = 10$ の場合について述べる。 $\gamma = 0.0, 1.0$ では、風速をいくら上昇させても応答は計測リミットを超え、収束が確認されなかった。このことから、 $\gamma = 0.0, 1.0$ では低風速フラッターが発現していると推察される。 $\gamma = 2.0$ では、 $Vr' = 4$ 付近で応答が立ち上がり、 $Vr' = 8 \sim 10$ 付近でピークとなるような渦励振が発生している。Fig.3に $Sc = 10, \rho_s = 97\text{kg/m}^3, h_s = 3.0\%$ における外力の卓越振動数に関する外力と応答の位相角 ϕ を示す。縦軸は位相角 ϕ 、

横軸は無次元風速 Vr' であるなお、参考のために応答曲線を同図に示す。位相角に着目すると、 $\gamma = 0.0, 1.0$ では ϕ は約 20deg で計測リミットに達している。 $\gamma = 2.0$ では、応答が増大している時、 ϕ は約 30deg まで徐々に増加し、一度応答が収束した時に ϕ は約 180deg を示す。その後、渦励振が収まると ϕ は約 180deg を示す。これらの ϕ の変化から、 $\gamma = 0.0, 1.0$ と $\gamma = 2.0$ では、空力不安定振動のメカニズムが異なると考えられる。慣性接続要素の質量効果を増大させると本来低風速フラッターが発現する領域で低風速フラッターが発現せずに渦励振が発現するようになる。以上をまとめると、応答曲線上、位相角曲線上の現象は、 $\gamma = 0.0, 1.0$ の際は、 ρ_s が $49, 97\text{kg/m}^3$ であっても、ともに低風速フラッターが発生している。 $\gamma = 2.0$ では、 ρ_s が 49kg/m^3 の際には、一度計測リミットを超えた後に応答が収束し、すぐに応答が増大し再度計測リミットを超えた。それに対し、 ρ_s が 97kg/m^3 の際には、一度も計測リミットを超えずに渦励振が発生し収束した後、徐々に応答が増大した。なお、 $\gamma = 2.0$ では、 $\gamma = 0.0, 1.0$ で低風速フラッター振動が発生している場合の 0deg 付近から 30deg 付近に徐々に変化するのは異なり、 $Sc=30$ の渦励振が

Table1 Experimental parameters of 2-dimensional square prisms

a) $Sc = 30, \rho_s = 49[\text{kg/m}^3], h_s = 6.0[\%]$

γ	0.0	1.0	2.0
Sc'	30	42	52
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	49	97	146
$h_s' [\%]$	6.0	4.3	3.5

b) $Sc = 30, \rho_s = 97[\text{kg/m}^3], h_s = 3.0[\%]$

γ	0.0	1.0	2.0
Sc'	30	42	52
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	97	195	292
$h_s' [\%]$	3.0	2.1	1.7

c) $Sc = 10, \rho_s = 49[\text{kg/m}^3], h_s = 2.0[\%]$

γ	0.0	1.0	2.0
Sc'	10	14	17
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	49	97	146
$h_s' [\%]$	2.0	1.4	1.2

d) $Sc = 10, \rho_s = 97[\text{kg/m}^3], h_s = 1.0[\%]$

γ	0.0	1.0	2.0
Sc'	10	14	17
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	97	195	292
$h_s' [\%]$	1.0	0.71	0.58

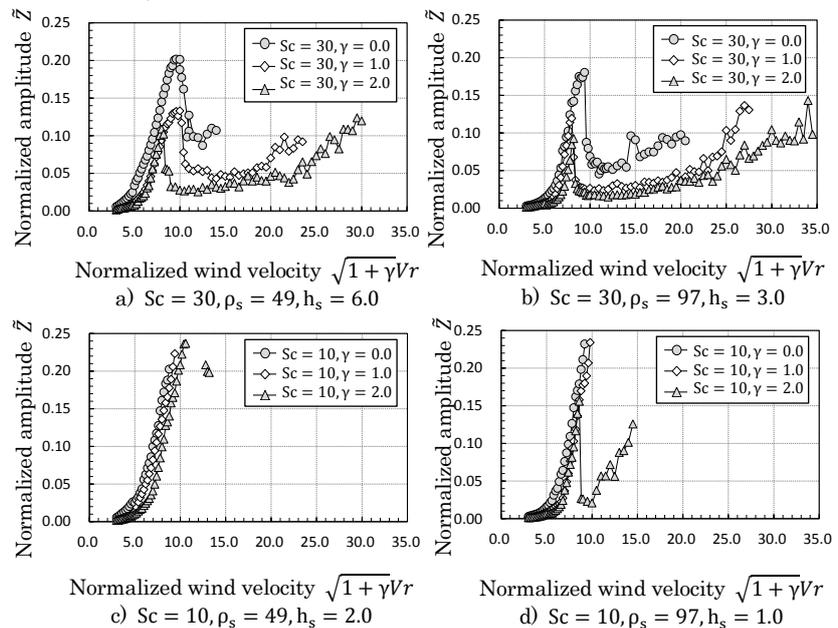


Fig.2 Response curves of 2-dimensional square prisms

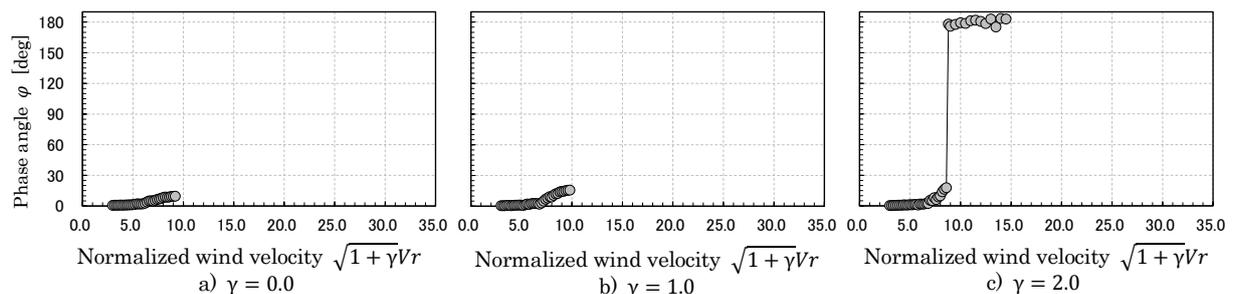


Fig.3 Phase angle of 2-dimensional square prisms ($Sc = 10, \rho_s = 97, h_s = 3.0$)

立ち上がる実風速は低くなることに注意を要する。

5. 結論

MHATを用いて慣性接続要素を有する二次元及び三次元正方形角柱の空力振動実験を実施した。このことより、慣性接続要素は、渦励振発生時のピーク値を小さくしたり、空力振動モードをフラッター振動から渦励振に変化させたりするなど、構造物の空力安定性を向上させる効果を有する。この傾向は二次元正方形角柱、三次元正方形角柱共に変わらない。

「参考文献」

- 1) 小宮巧, 神田亮, 小林啓樹: 慣性接続要素による構造物の風応答制御に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集 日本建築学会構造系論文集 79(706), 1773-1781, 2014-12 日本建築学会
- 2) Yuki Kato and Makoto Kanda: Development of a modified hybrid aerodynamic vibration technique for simulating aerodynamic vibration of structures in a wind tunnel, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 135, Pages 10-21, 2014.12
- 3) 古橋剛, 石丸辰治: 慣性接続要素によるモード分離 慣性接続要素による応答制御に関する研究その1, 日本建築学会構造系論文集, 第576号, pp.55-62, 2004.2
- 4) 石丸辰治: 対震設計の方法 ダイナミックデザインへの誘い, 株式会社建築技術, 2008
- 5) 郭鈞桓, 石丸辰治, 古橋剛, 秦一平: 同調D.M.システムを有する構造物設計法に関する研究 長周期波及びパルス波地震動に対する次世代超高層構造物の制震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第686号, pp.693-702, 2013.4
- 6) 斉藤賢二, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーをもつ制振構造の最適応答制御に関する一考察, 構造工学論

文集, Vol.53B, pp.53-66, 2007.3

- 7) 柴田和彦, 飯山文也, 五十幡直文, 袖山博, 奥村敦史, 久田俊明: 慣性接続要素を用いた免震装置の開発 その1.基本特性試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.731-732, 2006.9
- 8) 斉藤賢二, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーをもつ制振構造の最適応答制御に関する一考察 最適設計における線形粘性要素の等価非線形粘性要素への置換法, 日本建築学会技術報告集, 第13巻, 第26号, pp.457-462, 2007.12
- 9) 荒井達朗, 油川健樹, 五十子幸樹, 堀則男, 井上範夫: 同調粘性マスダンパーの有効性の検証と弾塑性構造物への適用性, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第645号, pp.1993-2002, 2009.11
- 10) 村上翔, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出: 慣性接続要素を含む構造物の定点理論を用いた構造制御 慣性接続要素と粘性ダンパーが直列接続された場合, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系第51号, pp.57-60, 2011.5
- 11) 由川太一, 長瀬拓也, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 等価線形モデルを用いた軸力制限機構付き同調粘性マスダンパーの有効性の検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系第75号, pp.113-116, 2012.6
- 12) Wang F-C, Chen C-W, Liao M-K and Hong M-F: Performance analyses of building suspension control with inerters, Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, pp.3786-3791, 2007.12
- 13) I.F. Lazar, S.A. Neild and D.J. Wagg: Using an inerter-based device for structural vibration suppression, Earthquake Engng Struct. Dyn. Vol.43, Issue 8, pp.1129-1147, 2014.7
- 14) Irina Lazar and S.A. Neild, D.J. Wagg: Inerter-based Vibration Suppression Systems for Laterally and Base-Excited Structures, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014, Portugal, pp.1525-1530, 2014.7

Table2 Experimental parameters of 3-dimensional square prisms

a) $\delta = 0.50, \rho_s = 92[\text{kg/m}^3], h_s = 1.0[\%]$			
γ	0.0	1.0	2.0
δ'	0.50	0.71	0.87
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	92	183	275
$h_s' [\%]$	2.0	1.4	1.2
b) $\delta = 0.50, \rho_s = 183[\text{kg/m}^3], h_s = 2.0[\%]$			
γ	0.0	1.0	2.0
δ'	0.50	0.71	0.87
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	183	366	549
$h_s' [\%]$	1.0	0.71	0.58
c) $\delta = 0.25, \rho_s = 92[\text{kg/m}^3], h_s = 0.50[\%]$			
γ	0.0	1.0	2.0
δ'	0.25	0.35	0.43
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	92	183	275
$h_s' [\%]$	1.0	0.71	0.58
d) $\delta = 0.25, \rho_s = 183[\text{kg/m}^3], h_s = 1.0[\%]$			
γ	0.0	1.0	2.0
δ'	0.25	0.35	0.43
$\rho_s' [\text{kg/m}^3]$	183	366	549
$h_s' [\%]$	0.50	0.35	0.29

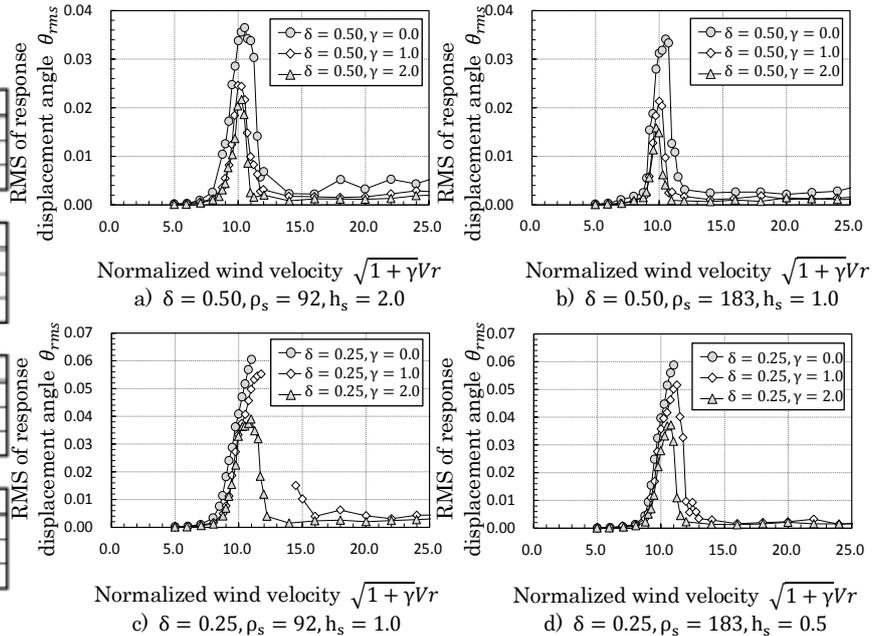


Fig.5 Response curves of 3-dimensional square prisms

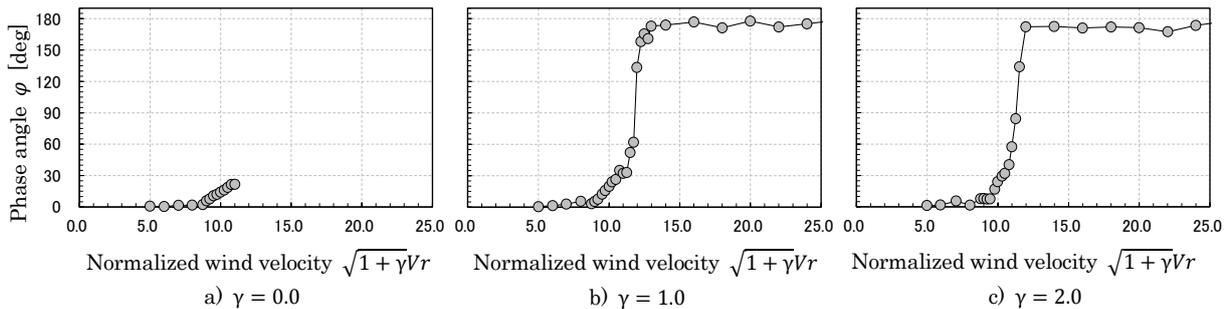


Fig.6 Phase angle of 3-dimensional square prisms ($\delta = 0.25, \rho_s = 183, h_s = 0.50$)