

平成 30 年 9 月 28 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K06309

研究課題名(和文) 慣性接続要素による構造物の風応答制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on Wind Response Control of Structure by Using Inerter

研究代表者

神田 亮 (KANDA, Makoto)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：00204800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本報告は、慣性接続要素を用いた構造物の空力安定性について述べたものである。質量、減衰定数、固有周期は、慣性接続質量比によって定められる。最初に、ハイブリッド空力振動実験法を用いて、慣性接続要素を用いた2次元正方形角柱の空力安定性を調べた。以下、ハイブリッド空力振動実験法をMHATと称す。次に、2次元正方形角柱と同様に、慣性接続要素を用いた3次元正方形角柱の空力安定性をMHATで調べた。結果として、2次元正方形角柱だけでなく、3次元正方形角柱の空力安定性に改善が見られた。たとえば、慣性接続要素によって、渦励振のピーク値が小さくなったり、空力振動モードがフラッター振動から渦励振変化したりした。

研究成果の概要(英文)：This paper describes aerodynamic stability of structures using the inertial mass. The change of mass, damping parameter, natural period, Scruton number are defined using the inertia mass ratio. At first, the aerodynamic stability of a 2 dimensional square prism using the inertial mass is examined by means of Modified Hybrid Aerodynamic vibration Technique, which is referred as to MHAT. Secondly, similar to the 2 dimensional square prism, the aerodynamic stability of a 3 dimensional square prism using the inertial mass is examined by means of MHAT. As a results, the aerodynamic stability of not only 2 dimensional square prism but also 3 dimensional square prism get better. For example, the peak of vortex-induced vibration gets smaller and the aerodynamic vibration mode is changed from flutter vibration to vortex-induced vibration by the effect of inertial mass.

研究分野：建築 構造・材料

キーワード：慣性接続要素 空力安定性 スクルートン数 質量減衰パラメタ 改良型ハイブリッド空力振動実験法

1. 研究開始当初の背景

著者らは前論文<sup>1)</sup>において、慣性接統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、前論文<sup>1)</sup>の位置付けを明確にするため、Dynamic mass damper に関する既往の研究<sup>2)-13)</sup>は、慣性接統要素の地震応答制御に関する基本特性を1質点系モデルで調べたものから、Dynamic Mass Damper を適用した高さ200mを超える超々高層建築物を対象とした試設計にまで及ぶことを述べた。慣性接統要素は、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ことのできる応答制御の仕組みとしては極めて巧妙なものである。構造物に作用するもう一つの動的な外乱である風外力を慣性接統要素で制御しようとする研究はほとんど行われていないようであるが、地震外力に対する慣性接統要素の機構を考えれば、地震力とはその作用の原理が異なる風外力に対しても入力低減効果を発揮できる可能性を有する。慣性接統要素の風外力に対する有効性が確認できれば1つの制振装置で地震外力と風外力の制御を行えることが可能になる。具体的に述べれば、風外力による居住性の低下から震度7クラスの激震時の応答制御が一つの装置で行えることが現実的なものとなる。しかし慣性接統要素は、その適用により構造物の周期を伸長させたり減衰を低減させたりする効果を有するため、風外力に対する共振効果を増長するなど、応答を増大させる危険性も含んでいる。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、Dynamic mass damper を用いて同一構造物の耐震性・耐風性を同時に向上させることである。その中で、本論文では、前論文<sup>1)</sup>同様、Dynamic mass damper の慣性接統要素に着目し、慣性接統要素の風外力に対する空力安定性について基礎資料を提供することを目的とする。また、慣性接統要素の耐震性について検討した文献<sup>2)</sup>と同様な構造物と慣性接統要素の質量比 $\gamma$ を用いて、風外力に対する応答の低減効果を定量的に示し、慣性接統要素による耐震性に対する耐風性の向上がどの程度であるかを比較できるような基礎資料を提供する。

具体的には、改良型ハイブリッド空力振動実験法<sup>14),15)</sup>(以下、MHAT)を用いて、慣性接統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、その安定性が乏しい原振動系の密度 $\rho_s$ がさらに小さなものまで含めて検討した。

3. 研究の方法

(1) 慣性接統要素を有する構造物の空力振動パラメータ

風外力を受ける慣性接統要素を有する1質点1自由度振動系の振動モデルを Fig.1 に示す。

$$(m_s + m_d)\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_sx = f \tag{1}$$

Fig.1 より、風外力を受ける慣性接統要素を有する1自由度系の振動方程式は式(1)のように表される。

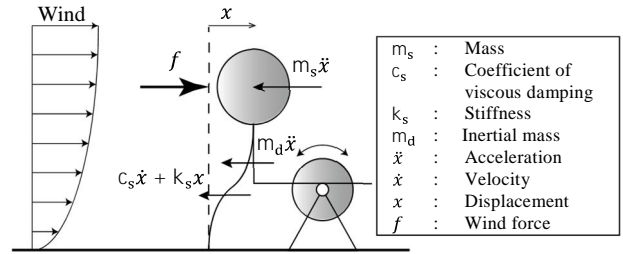


Fig.1 Model of single-degree-of-freedom system under wind excitation

ここに、 $m_s$ : 質点系の質量、 $c_s$ : 粘性減衰係数、 $k_s$ : 剛性、 $m_d$ : 慣性接統要素の質量効果、 $\ddot{x}$ : 質点の加速度、 $\dot{x}$ : 速度、 $x$ : 変位、 $f$ : 風外力である。この振動系の有する慣性接統要素と原振動系(慣性接統要素を有しない振動系)の質量比からなる慣性接統質量比 $\gamma$ を式(2)のように定義する。

$$\gamma = \frac{m_d}{m_s} \tag{2}$$

$\gamma$ を用いて原振動系と慣性接統要素を有する振動系の振動パラメータの関係を表わすと式(3)、(4)が得られる。パラメータ $\gamma$ は文献<sup>2)</sup>と同様であり、文献<sup>2)</sup>で示された慣性接統要素の耐震性が評価できると同様に、耐風性も評価できるようにするため導入した。

$$\omega_s' = \sqrt{\frac{k_s}{m_s'}} = \sqrt{\frac{k_s}{(1+\gamma)m_s}} = \frac{\omega_s}{\sqrt{1+\gamma}} \tag{3}$$

$$h_s' = \frac{c_s}{2\sqrt{m_s'k_s}} = \frac{c_s}{2\sqrt{(1+\gamma)m_s k_s}} = \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} \tag{4}$$

ただし、 $m_s' = (1 + \gamma)m_s$

ここに、 $\omega_s'$ : 慣性接統要素を有する振動系の固有円振動数、 $\omega_s$ : 原振動系の固有円振動数、 $h_s'$ : 慣性接統要素を有する振動系の減衰定数、 $h_s$ : 原振動系の減衰定数、 $m_s'$ : 慣性接統要素を考慮した振動系の質量である。

また、慣性接統要素を有する振動系の固有周期 $T'$ 、慣性接統要素を有する振動系の固有振動数 $n_s'$ は式(5)、(6)のように表される。

$$T' = \frac{2\pi}{\omega_s'} = \sqrt{1+\gamma} \frac{2\pi}{\omega_s} = \sqrt{1+\gamma} T \tag{5}$$

$$n_s' = \frac{\omega_s'}{2\pi} = \frac{\omega_s}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} = \frac{n_s}{\sqrt{1+\gamma}} \tag{6}$$

ここに、 $T$ : 原振動系の固有周期、 $n_s$ : 原振動系の固有振動数である。これらの振動パラメータの変化は風方向振動のみならず、風直交方向振動する振動系に対しても同様である。

次に、慣性接統要素を有する振動系のスクルートン数 $Sc'$ および質量減衰パラメータ $\delta'$ とすると、それらは $\gamma$ を用いて式(7)、(8)のように表される。

$$Sc' = 4\pi \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = 4\pi \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma} Sc \quad (7)$$

$$\delta' = \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma} \delta \quad (8)$$

ただし、 $\rho_s' = (1+\gamma)\rho_s$

ここに、 $\rho_s'$ ：慣性接続要素を考慮した構造物の密度、 $\rho_s$ ：原振動系の構造物の密度、 $\rho$ ：空気密度、 $Sc$ ：スクレートン数、 $\delta$ ：質量減衰パラメータである。式(7)、(8)より、原振動系に比べて $Sc$ 、 $\delta$ 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。なお、各パラメータの詳細な式誘導過程は文献1)を参照されたい。

次章より行われる実験の定性的な結果は、式(1)～(8)より、ただ単に質量が増加したものと同様な傾向を示すと考えられるが、序論の目的でも述べたように本研究の最終目標である Dynamic mass damper により耐震性・耐風性を同時に向上させるという実証の一つのステップとして行う。

(2) MHAT の概要

MHAT の概念図を Fig.2 に示す。MHAT はハイブリッド式実験を空力振動実験に応用したものである。ハイブリッド式実験は、1つの現象の一部を実験により他の部分をコンピュータのシミュレーションにより再現し、その現象を再現するものである。この手法には、実験の再現性の良さとコンピュータの数値シミュレーションの簡便性という両者の長所を生かそうという意図がある。今回の場合、式(1)の質量、慣性接続要素、減衰、復元力はコンピュータのシミュレーションによって、外力項は風洞実験により再現した。その原理

を Fig.2 に示す。MHAT を用いれば、慣性接続要素の慣性効果をパラメトリックに変化させて効率的かつ正確に空力振動実験が行える。

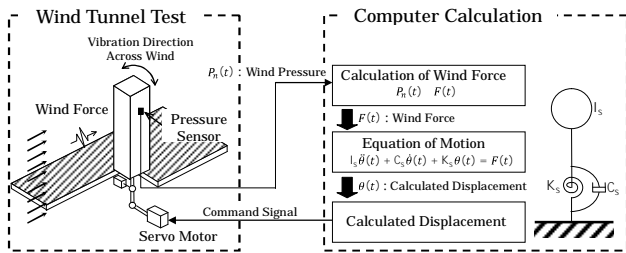


Fig.2 Concept of MHAT

(3) 三次元正方形角柱に関する検討

第2章でも示したように、慣性接続要素を付加した場合の $\delta'$ は原振動系の $\delta$ に比べて増大するため、慣性接続要素による構造物の空力安定性の向上が予測できる。本論文では、二次元正方形角柱の場合と同様に、構造物と風外力の相互作用によって生じる空力不安定性に着目し、慣性接続要素を有する構造物の空力安定性について考察する。本章では流れの三次元的効果を有し、ロッキング振動をする三次元正方形角柱の空力安定性について検討する。文献1)では、慣性接続要素を有する三次元正方形角柱の空力安定性に関する検討は行っていない。

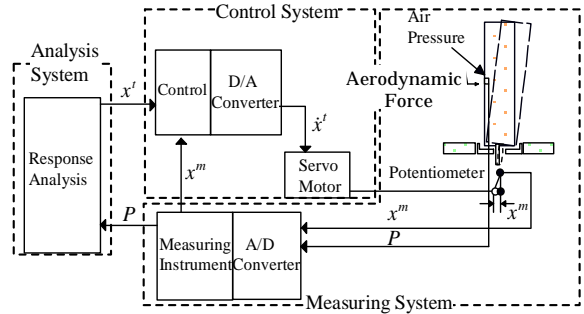


Fig.3 System flow chart of MHAT of 3-dimensional square prisms

(4) 三次元正方形角柱による MHAT 実験概要  
・三次元正方形角柱による MHAT のシステム概要

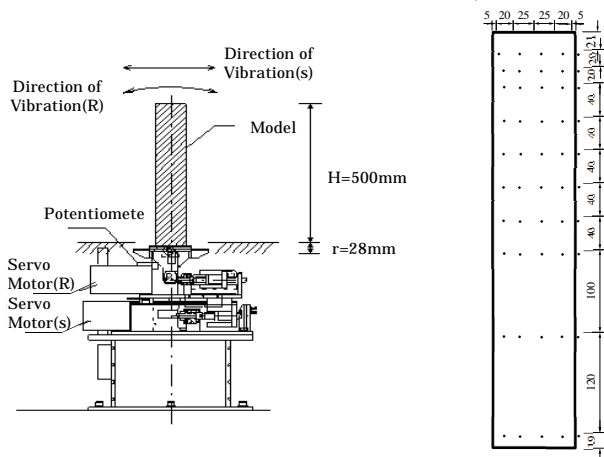


Fig.4 MHAT experimental equipment Fig.5 Elevation of the model of 3-dimensional square prisms

三次元正方形角柱による MHAT では、日本大学生産工学部所有の境界層風洞を用いた。Fig.12 に三次元正方形角柱による MHAT のシステムの原理を示す。また、三次元正方形角柱による MHAT で使用する加振機を Fig.13 に示す。加振機にはサーボモータが2つ取り付けられており、1つは模型を並進振動(Sway)させ、他方は模型を回転運動(Rocking)させる。三次元正方形角柱による MHAT では、ロッキング振動する場合を想定しているため、ロッキング振動を制御するサーボモータのみを稼働させ、並進振動を制御するサーボモータは固定しておいた。三次元正方形角柱による MHAT で使用した三次元角柱模型を Fig.14 に示す。圧力測定孔は、1面に50点、4面で計200点設けた。 airflow は乱れの少ないほぼ一様流であるものを使用した。

・三次元正方形角柱による MHAT の実験諸元

原振動系の $\delta$ を0.50、0.25、 $\rho_s$ を92、183 kg/m<sup>3</sup>とした4ケースについてそれぞれ(8)式より $h_s$ を定める。 $\gamma$ 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。 $\delta'$ 、 $\rho_s'$ 、 $h_s'$ はTable2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、8192個を1セットとし、3セット計測し、応答変位角の標準偏差を平均し代表値とした。対象とした無次元風速 $Vr'$ の範囲は5～25とした。なお、振動方向は風直交方向である

(5) 実験結果および考察

Fig.15 に $\delta = 0.50$ 及び $\delta = 0.25$ の応答曲線を示す。なお、縦軸は応答変位角の標準偏差 $\theta_{rms}$ 、横軸は無次元風速 $Vr'$ である。

まず、 $\delta = 0.50$ の場合について述べる。 $Vr' = 7 \sim 8$ 付近で応答が立

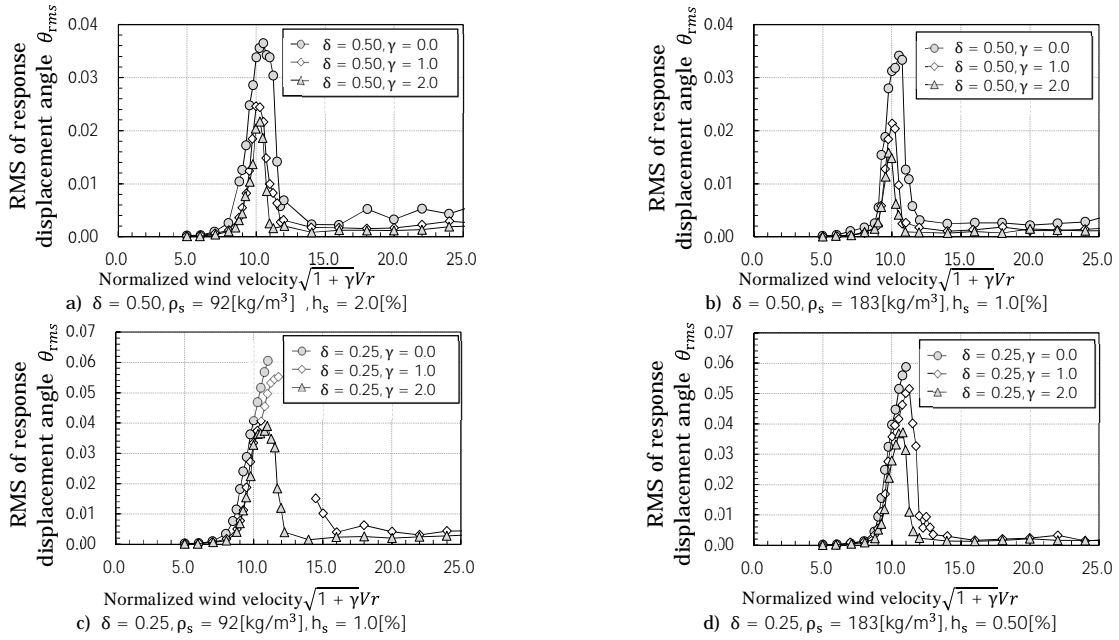


Fig.15 Response curves of 3-dimensional square prisms

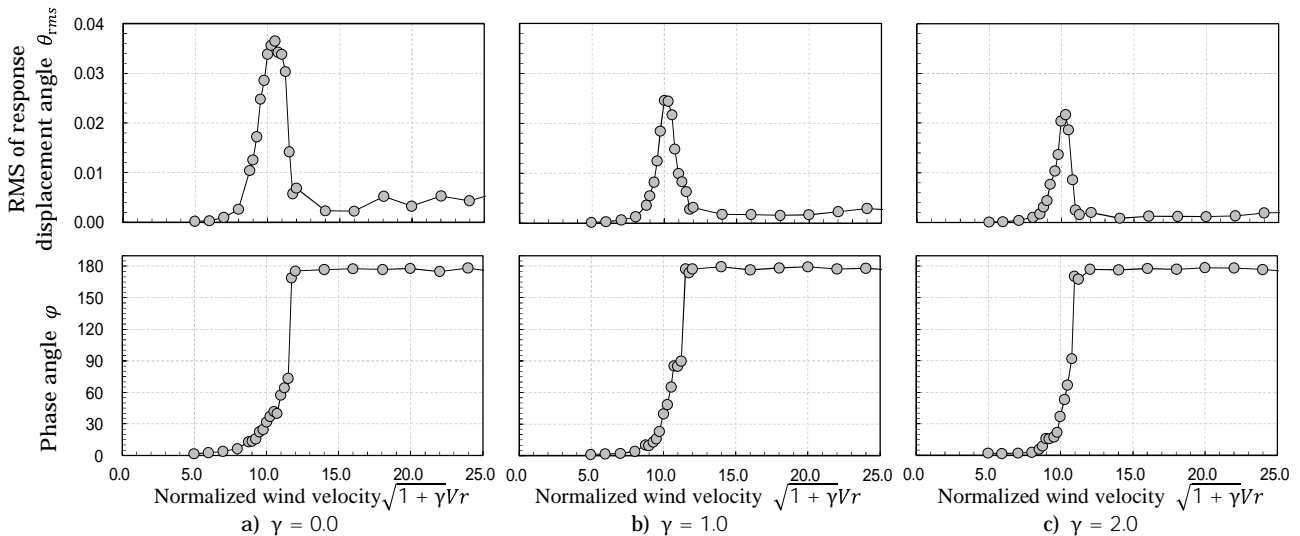


Fig.16 Response curve and phase angle of 3-dimensional square prisms ( $\delta = 0.50, \rho_s = 92[\text{kg/m}^3], h_s = 2.0[\%]$ )

ち上がり、 $Vr' = 10$  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、渦励振は収束する。Fig.16 及び Fig.17 に  $\delta = 0.50$  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  $\varphi$  を示す。縦軸、横軸は Fig.8 と同様である。なお、参考のために応答曲線を同図に示す。渦励振により応答が立ち上がり始めた頃は、とともに応答は上昇し、計測リミットを  $Vr' = 11$  付近で超え、これ以上いくら風速を上昇させても応答の収束が確認されなかった。このことから、低風速フラッターが発現していると推察される。 $\rho_s = 92 \text{kg/m}^3$  の  $\gamma = 1.0$  では、 $Vr' = 8$  付近で応答が立ち上がり、 $Vr' = 12$  付近で計測リミットを一旦超え、 $Vr' = 14$  付近で再び応答値が算出できた。このことにより、渦励振の収束が確認できた。 $\rho_s = 92 \text{kg/m}^3$   $\varphi$  は約  $10 \sim 40$  度を示し、ピーク時で  $60$  度となる。その後、渦励振が収まると  $\varphi$  は約  $180$  度を示す。この傾向は二次元正方形角柱の場合と同様である。渦励振領域において、慣性接続要素を増大させるほど渦励振のピークの応答値が小さくなっている。この傾向も二次元正方形角柱の場合と同様である。応答曲線上、位

相角曲線上的現象は、 $\rho_s$  が  $92, 183 \text{kg/m}^3$  であっても、同様の傾向を示す。次に、 $\delta = 0.25$  の場合について述べる。 $\gamma = 0.0$  では、風速上昇の  $\gamma = 2.0$  及び  $\rho_s = 183 \text{kg/m}^3$  の  $\gamma = 1.0, 2.0$  では、 $Vr' = 8$  付近で応答が立ち上がり、 $Vr' = 10 \sim 11$  付近でピークとなるような渦励振が発生している。このことから  $\gamma = 1.0, 2.0$  では渦励振が発現していると推察される。Fig.18 及び Fig.19 に  $\delta = 0.25$  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  $\varphi$  を示す。縦軸、横軸は Fig.8 と同様である。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  $\gamma = 0.0$  では  $\varphi$  が約  $30$  度で最終的に応答が発散している。 $\gamma = 1.0$  では応答が増大している時、 $\varphi$  は約  $40$  度まで徐々に増加し、その後、渦励振が収まると  $\varphi$  は約  $180$  度を示す。 $\gamma = 2.0$  では、応答が増大している時、 $\varphi$  は約  $90$  度まで徐々に増加し、その後、渦励振が収まると  $\varphi$  は約  $180$  度を示す。これらは、いずれも二次元正方形角柱の場合と同様な傾向を示している。慣性接続要素の慣性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、渦励振が発現するようになる。

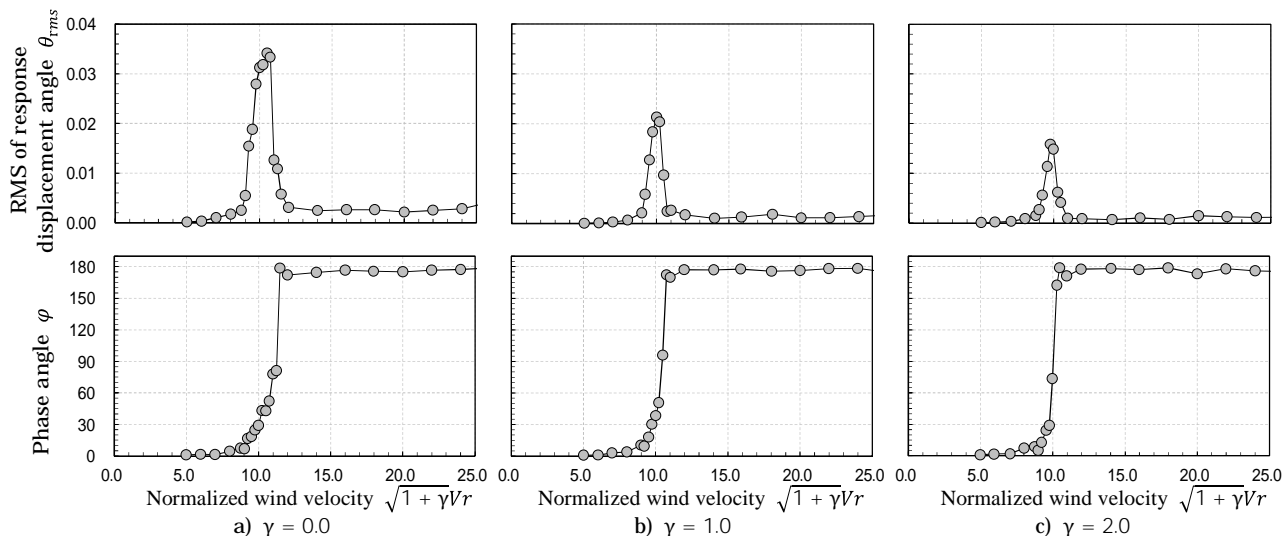


Fig.17 Response curve and phase angle of 3-dimensional square prisms ( $\delta = 0.50, \rho_s = 183[\text{kg/m}^3], h_s = 1.0[\%]$ )

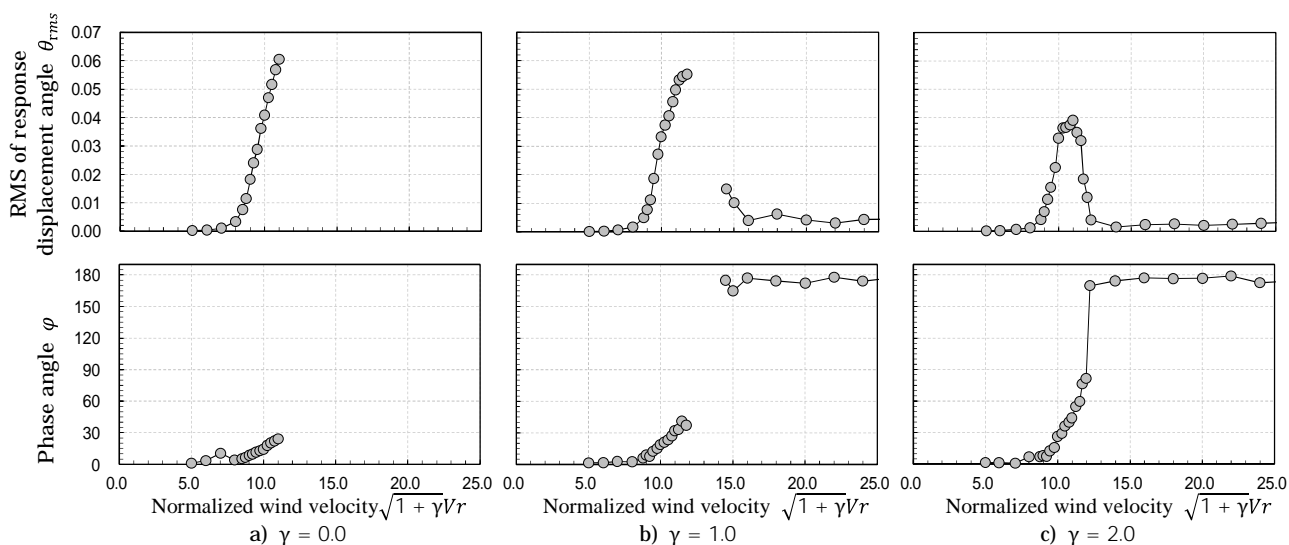


Fig.18 Response curve and phase angle of 3-dimensional square prisms ( $\delta = 0.25, \rho_s = 92 [\text{kg/m}^3], h_s = 1.0[\%]$ )

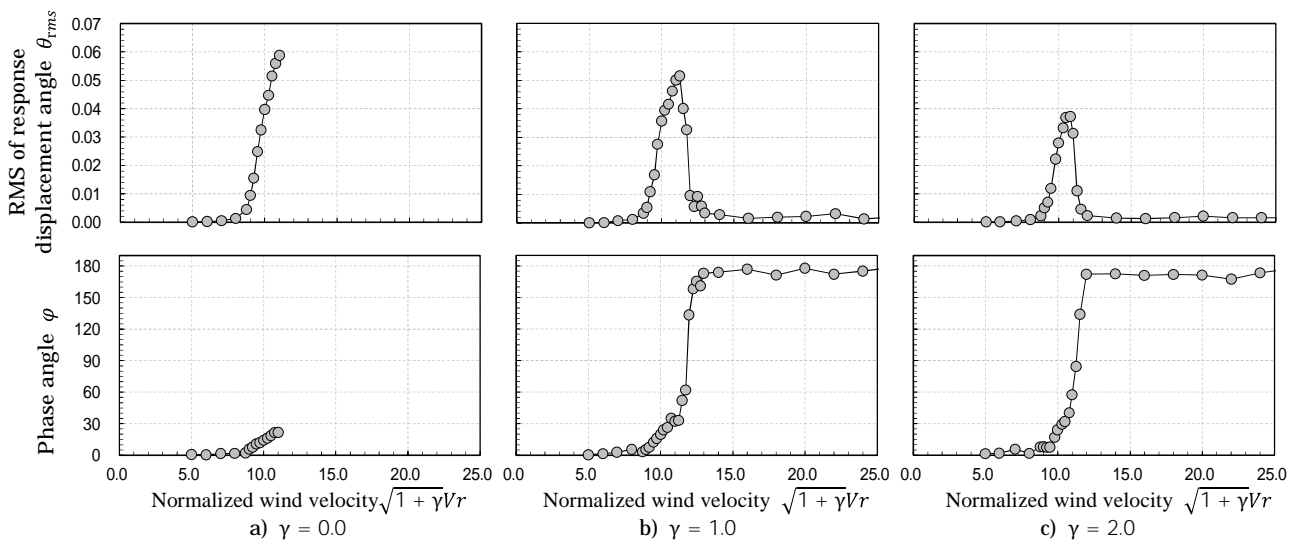


Fig.19 Response curve and phase angle of 3-dimensional square prisms ( $\delta = 0.25, \rho_s = 183[\text{kg/m}^3], h_s = 0.50[\%]$ )

以上をまとめると、応答曲線上、位相角曲線上の現象は、 $\gamma = 0.0$ では、 $\rho_s$ が92, 183kg/m<sup>3</sup>であっても、ともに低風速フラッターが発生している。 $\gamma = 1.0$ では、 $\rho_s$ が92 kg/m<sup>3</sup>の際には、一度計測リミットを超えた後に応答が収束している。それに対し、 $\rho_s$ が183kg/m<sup>3</sup>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に至った。 $\gamma = 2.0$ では、 $\rho_s$ が92, 183kg/m<sup>3</sup>であっても、ともに渦励振が発生した。

二次元正方形角柱と同様に、慣性接続要素の質量効果を増大させるほど渦励振が発生した場合にはその応答のピーク値が低減されたり、低風速フラッター振動が渦励振に変化したりするなど、空力安定性が向上することがわかった。なお、Fig.15の無次元風速は $\sqrt{1+\gamma}V_f$ であるから、 $\gamma$ の値が大きいくほど応答の立ち上がる実風速は低くなることに注意を要する。

#### 4. 研究成果

慣性接続要素による空力安定性の向上について本論文で得られた知見について述べる。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以下のようなことが分かった。

慣性接続要素の慣性効果を増大させると、原振動系で渦励振が発生している場合にはそのピーク値が小さくなる。

慣性接続要素の慣性効果を増大させると、原振動系で低風速フラッターが発生している場合、その空力振動モードを渦励振に変化させることができる。

慣性接続要素は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。

また、今後の課題、展望について述べる。今後は、慣性接続要素による慣性効果と減衰効果を有するDynamic mass damperの風応答制御について調べていくつもりである。また、多自由度系における慣性接続要素の効果についても検討していくつもりである。さらに、MHATは実験のパラメータを容易に変化させることが可能なため多くのスクリーン数や質量減衰パラメータに対して検討が行える。今後こういったMHATの利点を活かし、さらなる研究促進を図りたい。

#### 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 79(706), 1773-1781, 2014-12
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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

- 5) 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
- 6) 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
- 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
- 15) 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
- 16) 岡田玲, 松山哲雄, 神田亮, 磯野由佳, 丸田榮蔵: 2次元流中におかれた角柱の振動時の性状を明らかにするためのニューハイブリッド空力振動技術の開発, 日本建築学会技術報告集 Vol. 22, pp.145-150, 2005.12

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

諸沢征治, 神田亮 “構造物における慣性接続要素の地震外乱ならびに風外乱に対する制御性能の比較, 日本大学生産工学部研究報告 A, 2017年6月, 第50巻第1号

[学会発表] (計1件)

小林啓樹, 神田亮 “慣性接続要素による構造物の風応答制御に関する研究 その4. 二次元及び三次元正方形角柱の空力安定性について” 日本建築学会大会学術講演会梗概集 (関東) 2015年9月, pp691-692

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 亮 (KANDA, Makoto)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号 00204800