

慣性接統要素による構造物の風応答制御に関する研究
日大生産工(学部) ○諸沢 柁治 日大生産工 神田 亮

1. 序論

構造物の耐震性向上のために Dynamic Mass Damper(減衰ごま)の研究が行われている。Dynamic Mass Damper は、慣性接統要素を有し、構造物に対し慣性効果と減衰効果の両効果を与える応答制御装置である。Dynamic Mass Damper に関する既往の研究は^{1)~9)}、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。

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る。地震力が作用した時は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大させることができ、応答制御の仕組みとしては極めて巧妙である。さらに、構造物に作用するもう 1 つの動的な外力である風外力も慣性接統要素の機構を考えれば入力低減効果を期待できる。慣性接統要素の風外力に対する有効性を確認できれば 1 つの制御装置で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を行うことが可能になる。

以上を踏まえて、本論文は、Dynamic Mass Damper の慣性効果すなわち慣性接統要素に着目し、慣性接統要素の風外力に対する基本的な制御効果を調べることを目的とする。本論文では、まず、慣性接統要素に有する振動パラメータを整理し、風外力が作用した場合に慣性接統要素が振動系に及ぼす影響について考察する。特に、ここでは、風外力による構造物の応答の指標であるスクルーン数や質量パラメータについて考察する。さらに、1 質点系モデルに風外力を入力し、風外力に対する基本特性を明らかにする。

2. 慣性接統要素を有する振動系

本章ではまず、慣性接統要素を有する振動系が風外力を受ける場合の振動方程式や振動系の質量、減衰、固有振動数などの振動パラメータについて検討する。また、構造物の風応答特性や空力安定性のパラメータであるスクルーン数 S_c や質量減衰パラメータ δ について考察する。なお、本論文で取り扱う式中の記号や原理の図は基本的に参考文献 1)を参考にした。

2.1. 風外力を受ける場合の振動パラメータ

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。

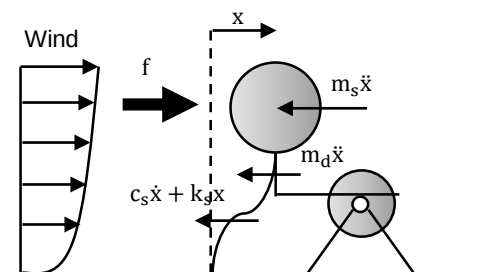


Fig.1 Model of single-degree-of-freedom system under wind excitation

Fig.1 より、 m_s : 質点系の質量、 m_d : 慣性接統要素の質量効果、 c_s : 粘性減衰係数、 k_s : 剛性、 $\ddot{x}$: 加速度、 $\dot{x}$: 速度、 x : 変位、 f : 風外力である。よって、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。

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

この慣性接統要素による質量効果と質点系の質量の質量比からなる慣性接統質量比 γ を式(2)のように定義する。

$$\gamma = \frac{m_d}{m_s} \quad (2)$$

式(2)を用いて式(1)の質量項を整理すれば、式(3)が得られる。

$$m'_s = (m_s + m_d) = \left(1 + \frac{m_d}{m_s}\right)m_s = (1 + \gamma)m_s \quad (3)$$

ここに、 m'_s : 慣性接統要素を考慮した振動系の質量である。これを考慮する振動方程式は

$$(1 + \gamma)m_s\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_sx = f \quad (4)$$

と表すことができ、式(4)の両辺を m_s で除し、 $k_s/m_s = \omega_s^2$ と $c_s/m_s = 2h_s\omega_s$ を代入すると式(5)となる。

$$(1 + \gamma)\ddot{x} + 2h_s\omega_s\dot{x} + \omega_s^2x = \frac{f}{m_s} \quad (5)$$

ここに、 ω_s : 固有円振動数、 h_s : 減衰定数である。さらに、式(5)の両辺を $(1 + \gamma)$ で除することで、式(6)、(7)となる。

$$\ddot{x} + \frac{2h_s\omega_s}{1 + \gamma}\dot{x} + \frac{\omega_s^2}{1 + \gamma}x = \frac{1}{1 + \gamma}\frac{f}{m_s} \quad (6)$$

$$\ddot{x} + 2h'_s\omega'_s\dot{x} + \omega'^2_sx = \frac{f'}{m_s} \quad (7)$$

ここに、 ω'_s : 慣性接統要素を有する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、 f' : 慣性接統要素を有する振動系に作用する風外力であ

(8)～(10)が得られる。

$$\dot{h}_s = \frac{c_s}{2\sqrt{m_s k_s}} = \frac{c_s}{2\sqrt{(1+\gamma)m_s k_s}} = \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} \quad (8)$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} = \sqrt{\frac{k_s}{(1+\gamma)m_s}} = \frac{\omega_s}{\sqrt{1+\gamma}} \quad (9)$$

$$\dot{f} = \frac{f}{1+\gamma} \quad (10)$$

また、慣性接続要素を有する振動系の固有周期 T' 、慣性接続要素を有する振動系の固有振動数 n_s' は式(11)、(12)のように表される。

$$T' = \frac{2\pi}{\omega_s'} = \sqrt{1+\gamma} \frac{2\pi}{\omega_s} = \sqrt{1+\gamma} T \quad (11)$$

$$n_s' = \frac{\omega_s'}{2\pi} = \frac{\omega_s}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} = \frac{n_s}{\sqrt{1+\gamma}} \quad (12)$$

ここに、 T ：固有周期、 n_s ：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、風直交方向振動の振動系に対しても同様である。

式(8)～(12)から、慣性接続要素は振動系に以下のような効果を与える。

- ① 外力の入力レベルが $1/(1+\gamma)$ 倍され、入力レベルが減衰される。
- ② 固有周期が $\sqrt{1+\gamma}$ 倍され、振動系の周期が伸長される。
- ③ 減衰定数が $1/\sqrt{1+\gamma}$ 倍され、振動系の減衰が低減される。

外力の入力レベルが低減されることは風応答を低減する効果が期待できる。これに対して、固有周期が伸長することは風外力に対する共振効果が著しくなり、また、振動系の減衰が低減されることは風応答の増大を招く危険性がある。これらの事実を考えると、慣性接続要素を有する振動系の風応答が低減されるか否かについては包絡的な検討が必要である。

2.2. スクルートン数 S_c と質量減衰パラメータ δ

本節では、構造物の空力安定性を示す指標の一つであるスクルートン数 S_c や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と原振動系とどのように異なるかについて検討する。 S_c 、 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、 S_c 、 δ が大きいほど空力安定性は高くなる傾向にある。 S_c 、 δ は式(13)、(14)のように表される。

$$S_c = 4\pi \frac{\rho_s}{\rho} h_s \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\rho_s}{\rho} h_s \quad (14)$$

ここに、 ρ_s ：構造物の密度、 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 S_c' と質量減衰パラメータについて δ' について考える。慣性接続要素を有する振動系では前節の検討により、 m_s は m_s' に、 h_s は h_s' に変化する。したがって S_c' 、 δ' は式(15)、(16)のように表される。

$$S_c' = 4\pi \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = 4\pi \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma} S_c \quad (15)$$

$$\delta' = \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma} \delta \quad (16)$$

ここに、 ρ_s' ：慣性接続要素を有する構造物の密度である。式(15)、(16)より、原振動系に比べて S_c 、 δ が $\sqrt{1+\gamma}$ 倍されていることから、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と予測される。

3. 風外力に対する応答

慣性接続要素を有する振動系の風応答に対する基本特性を明らかにするため、多自由度系モデルを縮約した1質点系モデルを対象に時刻歴応答解析を行う。時刻歴応答解析では Newmark β 法の $\beta = 1/6$ (線形加速度法)を使用し、応答評価時間は10分間相当とした。応答解析は、風外力は一般に構造物の固有周期より長い周期にてパワーピークを有する。その風外力を入力し、入力レベルの低減に対して応答の増大につながる減衰の低減や周期の伸長による外力との共振効果を調べる。

3.1. 解析諸元

本解析では Fig.2 a)に示すような、高さ150m、アスペクト比5の均一な密度 ρ_s を有する正方形角柱状の建築物を1次モードが支配的であると、1質点1自由度系モデルに縮約したものを対象とした。このモデルのパラメータを Table.1 に示す。

1次固有ベクトル $\{\Phi\}$ ($\Phi_i = Z_i/H_i$)は Fig.2 b)のように直線モードを仮定し任意の高さ Z_i に比例する。頂部高

Table1 Analysis parameters of original model

Density of model ρ_s [kg/m ³]	183.0
Damping factor h_s [%]	2.00
Density ratio $\tilde{\rho}_s/\rho(=\rho_s/3\rho)$	50.0
Mass-damping parameters δ	1.00
Height of building H [m]	150
Width B and depth D [m]	30

※Density of air $\rho = 1.22$ [kg/m³]

さ H での Φ_i は1になるようにした。なお、1次固有ベクトルを用いて、構造物を Fig.2 c)のような1自由度系に置き換えると、一般化座標上の質量 M_s 、剛性 K_s 、粘性減衰係数 C_s は式(17)～(19)で求められる。

$$M_s = \int_0^H \rho_s B D \left(\frac{Z}{H}\right)^2 dZ = \frac{\rho_s B D H}{3} = \tilde{\rho}_s B D H \quad (17)$$

$$K_s = \omega_s^2 M_s \quad (18)$$

$$C_s = 2h_s \omega_s M_s \quad (19)$$

ただし、 $\tilde{\rho}_s = \rho_s/3$

ここに、 $\tilde{\rho}_s$ ：構造物の一般化密度、 B ：見付幅、 D ：奥行である。

風外力は、風洞実験により境界層乱層中において静止モデルより求めた風外力を用いた。両外力とも頂部風速50 m/s相当とした。実験の地表面粗度区分はⅡ相当である。質量を離散化し、実座標系の風外力 $\{f\}$ に1次の固有ベクトルの転置 $\{\Phi\}^T$ を乗じて一般化座標系の風外力 F を作成した。

$$F = \{\Phi\}^T \{f\} \quad (20)$$

Fig.3 に風方向と風直交方向の一般化風外力スペクトルを示す。

3.2. 風外力に対する応答

Fig.5,6 に無次元周期 $T\bar{V}/B = 2.0, 4.0, 6.0, 8.0$ の原振動系に対し、慣性接続要素を徐々に増加させた場合の応答角加速度 $\ddot{\theta}$ 、応答角速度 $\dot{\theta}$ 、変位角 θ の標準偏差を示す。また、比較のため $\gamma = 0$ で p_s と h_s は一定とし、固有周期を変化させた振動系の応答を合わせて示す。同一無次元周期上で慣性接続要素を有する振動系と原振動系を比較した場合、風方向、風直交方向を問わず応答角加速度、応答角速度、変位角のいずれにおいても低減効果が顕著にみられる。

同一の振動系で γ を増大させた場合、応答角加速度では低減効果がみられる。しかし、応答角速度では低減効果がみられない。また、変位角はやや増大する傾向にある。この理由としては、慣性接続要素の周期伸長効果によって振動系の周期が伸長し、風外力との共振効果が著しくなったためと考えられる。

慣性接続要素を増大させると応答角加速度は低減される傾向が顕著であるが、これは耐風性の向上のみならず、居住性を向上させる効果が期待できる。また、風外力に対し、応答角速度、変位角は周期の増大とともにやや増大する傾向を示した。この結果は、慣性接続要素のみ応答制御の結果であるが、慣性効果とともに減衰効果を併せ持つ **Dynamic Mass Damper** などを適用した場合、その減衰効果を発揮させることで応答角速度や変位角の増大を抑えることができると考えられる。

4. 結論

- ① 慣性接続質量比 γ を用いて慣性接続要素を有する振動系の質量、減衰、固有周期、スクルートン数、質量減衰パラメータについて整理した。慣性接続要素を有する振動系が風外力を受けた場合、入力レベルは低減され風応答を低減させるが、周期の伸長は共振風速の低下を招き、また減衰の低減は風応答を増大させる要因となる。空力安定性の指標である S_c 、 δ が $\sqrt{1+\gamma}$ 倍されるため、原振動系に比べて空力安定性の向上が予測できる。
- ② 風外力に対する応答の一例を示した。風外力に対する応答では、応答加速度の低減が見られた。しかし、固有周期の伸長による共振効果が入力レベルの低減効果を上回って、応答速度、応答変位はやや増大する傾向を示した。応答加速度が低減されることは、耐風性の向上のみならず、居住性を向上させる効果が期待できる。また、慣性効果とともに減衰効果を併せ持つ **Dynamic Mass Damper** などを適用した場合、その減衰効果を発

揮させることで応答角速度や変位角の増大を抑えることができると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 郭鈞恒, 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

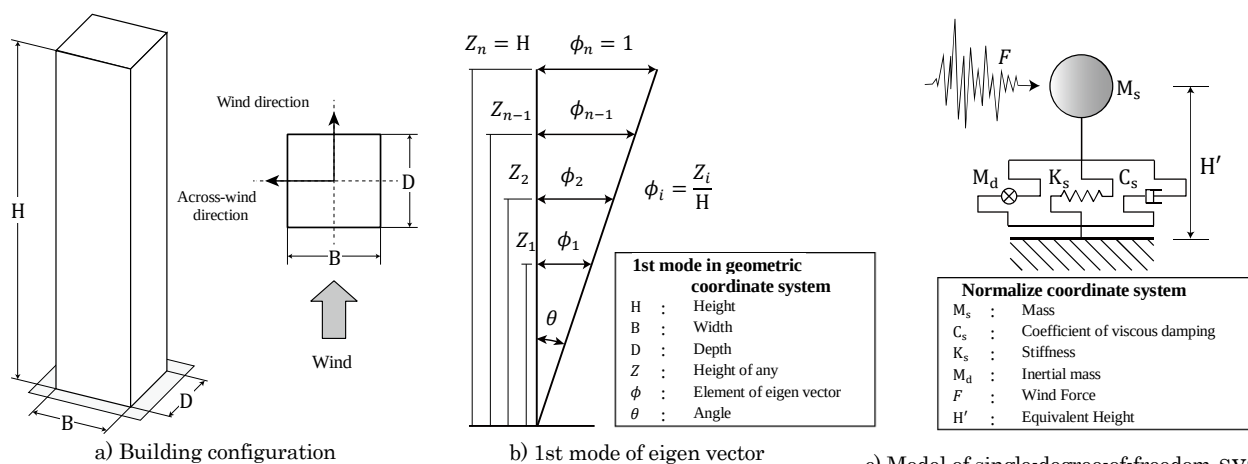
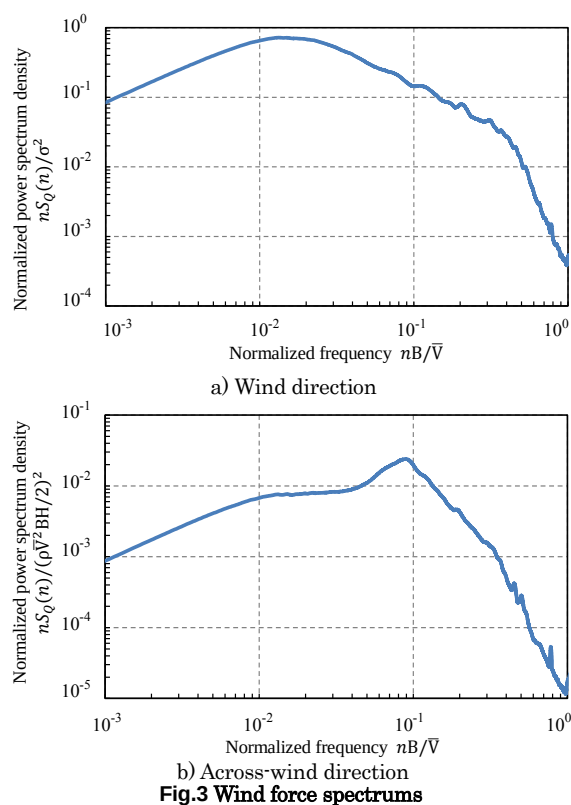


Fig.2 Building configuration and analysis model

集, 第 686 号, pp.693~702, 2013.4

- 4) 齊藤賢二, 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, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.53B, pp.53~66, 2007.3
- 5) 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, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.731~732, 2006.9
- 6) 齊藤賢二, 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
- 7) 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
- 8) 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

- 9) 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

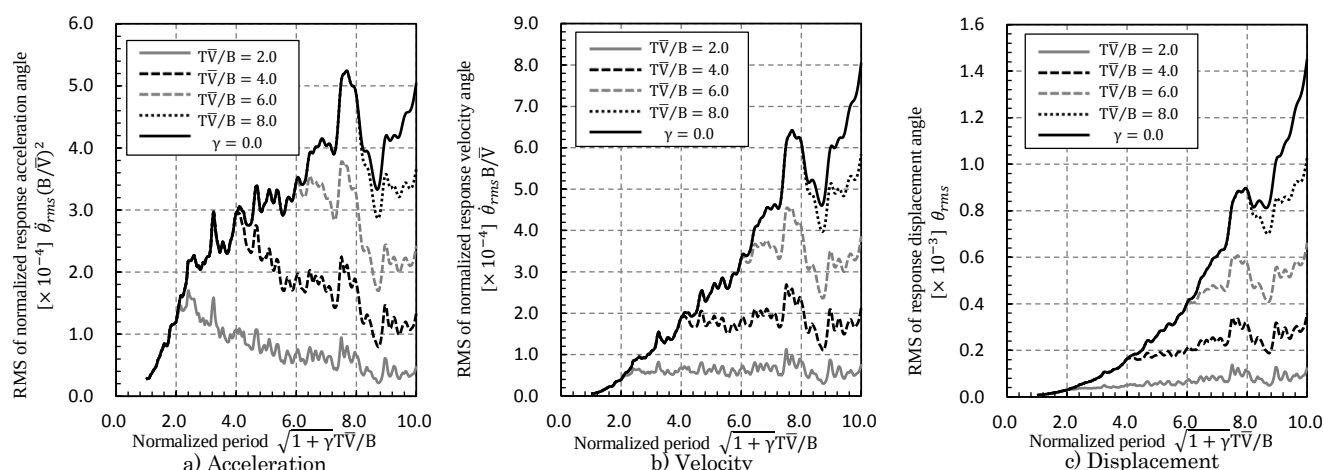


Fig.5 Response of vibration system with inertial mass under wind direction

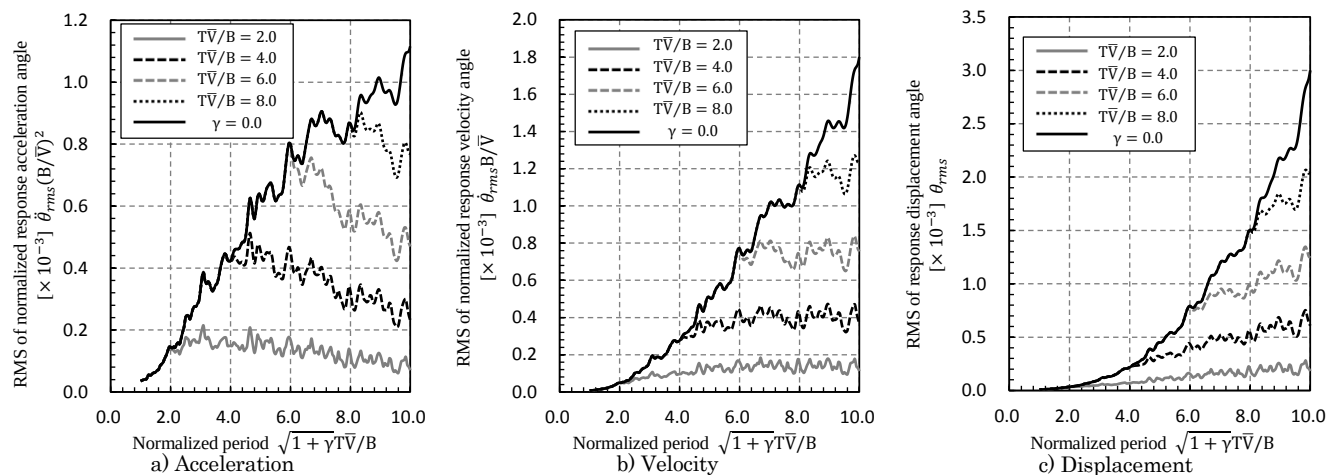


Fig.6 Response of vibration system with inertial mass under across-wind direction