日大生産工(院) 〇小宮 巧 日大生産工 神田 亮

1. はじめに

建築物の地震応答制御の分野において,慣性接続要素を含む応答制御システムの研究がある^{1), 2), 3)}。これらは,慣性接続要素の地震応答制御の基本特性を1質点系モデルで調べたものから,最近では高さ200mの超高層建築物を対象とした実設計まで研究が行われている。

これら慣性接続要素を含む応答制御システムは,原 理的に考えても地震応答のみならず風応答制御につい ても有効性が高いことは容易に想像できる。このシス テムの風応答制御の特性が定量的に把握できれば,1 つの制振装置で地震荷重のみならず風荷重についても 制御が可能となる。すなわち,居住性に影響する再現 期間1年程度の風による揺れから,地震の激震時の揺れ までも1つのシステムで制御できる可能性が現実的な ものとなる。

建築物の慣性項を制御可能な慣性接続要素の風外力 に対する有効性を考えてみると,風外力の入力を低減 する効果が期待できるのに対し,建築物の固有周期が 伸長するため共振を招くことが懸念される。

以上を踏まえて、本論文は慣性接続要素を含む応答 制御システムを風応答制御に適用することを前提に、 まず建築物の慣性項に対する効果(慣性接続要素)のみ に着目し、慣性接続要素を有する1質点振動系の風応答 の基本特性について調べることを目的とする。

2. 慣性接続要素を有する振動系の振動パラメータ

本章では,風外力を受ける振動系に慣性接続要素を 付加した場合の振動方程式や振動パラメータについて 考える。

2.1. 風外力を受ける振動系の振動方程式

風外力を受ける1質点1自由度振動系に慣性接続要素を付加したモデルをFig.1に示す。



 Fig.1 より,風外力を受ける慣性接続要素を有する

 1 自由度系の振動方程式は下式のようになる。

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

 (1)

ここに、質点系の質量: m_s ,粘性減衰係数: c_s ,剛 性: k_s ,慣性接続要素: m_d ,質点の加速度: \ddot{x} ,速 度: \dot{x} ,変位:x,風外力:fである。この振動系に付 加されている慣性接続要素と原振動系の質量比 γ を 下式のように定義する。

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

このyは、慣性接続質量比と呼ぶ。(2)式を用いて(1)式 の質量項を整理すれば、以下の式が得られる。

$$m_{s}' = m_{s} + m_{d} = \left(1 + \frac{m_{d}}{m_{s}}\right)m_{s} = (1 + \gamma)m_{s}$$
 (3)

ここに,慣性接続要素を有する振動系の質量:*m_s*'で ある。また,振動方程式は

$$(1+\gamma)\mathbf{m}_{s}\ddot{x} + \mathbf{c}_{s}\dot{x} + \mathbf{k}_{s}x = f \tag{4}$$

となる。(4)式の両辺を質量m_sで除すると下式が得ら れる。

$$(1+\gamma)\ddot{x} + 2h_{s}\omega_{s}\dot{x} + \omega_{s}^{2}x = \frac{f}{m_{s}}$$
(5)

ここに、原振動系の固有円振動数: ω_s ,減衰定数: h_s で ある。さらに、(5)式の両辺を $1 + \gamma$ で除することで、 以下の式が得られる。

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

$$\ddot{x} + 2h_{s}'\omega_{s}'\dot{x} + \omega_{s}'^{2}x = \frac{f'}{m_{s}}$$
(7)

ここに、慣性接続要素を有する振動系の固有円振動 数: ω_{s}' 、減衰定数: h_{s}' 、風外力:f'である。原振動 系と慣性接続要素を有する振動系の固有円振動数と 減衰定数,風外力の関係を γ で表わすと下式のように なる。

$$\omega_{s'} = \sqrt{\frac{\mathbf{k}_{s}}{m_{s'}}} = \sqrt{\frac{\mathbf{k}_{s}}{(1+\gamma)\mathbf{m}_{s}}} = \frac{\omega_{s}}{\sqrt{1+\gamma}}$$
(8)

$$h_{s}' = \frac{c_{s}}{2\sqrt{m_{s}'k_{s}}} = \frac{c_{s}}{2\sqrt{(1+\gamma)m_{s}k_{s}}} = \frac{h_{s}}{\sqrt{1+\gamma}}$$
 (9)

$$f' = \frac{f}{1+\gamma} \tag{10}$$

また、固有周期T'は下式のように表される。

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

Basic study on wind response control of high rise buildings with Dynamic Mass Damper

Takumi KOMIYA and Makoto KANDA

タは以下のように変化する。

- 固有周期を√1+γ倍する周期伸長効果
- ② 減衰定数を1/√1+γ倍する減衰低減効果

③ 入力を1/(1+γ)倍する入力低減効果

風外力の入力レベルが低減されることは,風応答制 御において効果が期待できる。しかし,建築物の固 有周期が伸長すると,風外力に対して共振効果が増 す。また,減衰効果が低減すると応答は増大する。 これらを総合的に考えると,慣性接続要素を有する 建築物は風外力を受けた場合に応答が低減するかあ るいは増大するかは疑問である。

2.2. 質量減衰パラメータ

次に、空力振動の指標の一つである質量減衰パラ メータと慣性接続要素について考える。一般に、質 量減衰パラメータは、建築物と流体の密度比と建築 物の減衰定数の積によって求められる。質量減衰パ ラメータδは下式のように表される。

$$\delta = \frac{\rho_s}{\rho} h_s \tag{12}$$

ここに、建築物の密度: ρ_s ,空気密度: ρ である。一般に、質量減衰パラメータの値が大きければ応答は小さく、小さければ応答は大きいとされる。

次に、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。慣性接続要素を有する振動系 では前節の検討より、 m_s は m_s' に、 h_s は h_s' に変化す る。したがって、 δ' は下式のように表される。

$$\delta' = \frac{\rho_s'}{\rho} h_s' = \frac{(1+\gamma)\rho_s}{\rho} \frac{h_s}{\sqrt{1+\gamma}} = \sqrt{1+\gamma}\delta$$
(13)

(13)式より、 δ' は $\delta'\sqrt{1+\gamma}$ 倍されたものとなる。また(13)式より、慣性接続要素を有する振動系の応答は、原振動系よりも低減されることが予測できる。

3. ホワイトノイズに対する応答

慣性接続要素を有する建築物の風外力に対する応 答を調べるため、まず風外力に見立てたホワイトノ

イズを入力した応答解析を行った。

3.1. 解析諸元

まず本解析対象の建築物は, 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psを有する 正方角柱を1 質点系モデルに置換したものである。 このモデルのパラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Analysis parameters of original model

Density of Model $\rho_s[kg/m^3]$	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 H[m]	150
Width and Depth B and D[m]	30
Y D : (A: 100[/ 3]	

* Density of Air $\rho = 1.22[kg/m^3]$

1次固有ベクトル ϕ (= z/H)はFig.2 b)のように建築物 の任意の高さzに高さ比例し,頂部高さHで1となるよ うに仮定する。この1次固有ベクトルを用いて,建築物 をFig.2 c)のような1質点系に置き換えると,一般化座標 系上の質量 M_s ,剛性 K_s ,粘性減衰係数 C_s は以下の式で 求められる。

$$M_{s} = \int_{0}^{H} \rho_{s} BD\left(\frac{z}{H}\right)^{2} dz = \frac{\rho_{s} BDH}{3} = \tilde{\rho_{s}} BDH$$
(14)

$$K_{s} = \omega_{s}^{2} M_{s}$$
(15)

$$C_{\rm s} = 2h_{\rm s}\omega_{\rm s}M_{\rm s} \tag{16}$$

ここに,建築物の一般化密度: p_s,見付幅:B,奥行: Dである。なお,風外力Fは風直交方向を模擬し,平均 値0.0[kN],標準偏差1017.1[kN]の正規乱数とした。

3.2. 応答解析

Fig.3 に無次元周期T $\overline{\nabla}/B = 2.0,4.0,6.0,8.0$ (ここに, 頂部風速: $\overline{\nabla}$)の振動系(以下, 原振動系)に慣性接続要 素を付加し, 固有周期を伸長させた振動系の応答角 加速度 $\ddot{\theta}$ と角速度 $\dot{\theta}$,変位角 θ の標準偏差を示す。また 比較として, $\gamma = 0$ で ρ_s 及び h_s は常に Table 1 の値で一 定とした振動系の応答を合わせて示す。なお $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$, θ は



Fig.2 Concept of analysis

下式で表される。

$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{X}}{H}$$
, $\dot{\theta} = \frac{\dot{X}}{H}$, $\theta = \frac{X}{H}$ (18)

ここに、一般化座標系の応答加速度: \vec{X} ,速度: \dot{X} ,変 位:Xである。Fig.3の横軸は(11)式で示す慣性接続要 素を考慮した無次元周期であり、縦軸は応答角加速度 には $(B/\overline{V})^2$ を、角速度には B/\overline{V} を乗じた無次元応答で ある。

Fig.3 において,慣性接続要素を付加した振動系と 同一無次元周期の $\gamma = 0$ を比較すると,慣性接続要素 を付加した振動系の応答は, $\gamma = 0$ 応答より必ず小さ くなる。

次に Fig.3 より, γの増大による応答の変化につい て述べる。この場合,慣性接続要素の付加によって, 応答角加速度と角速度は原振動系より低減されるが, 応答変位角にはその低減効果は見られない。慣性接 続要素はその質量効果によって振動系の固有周期が 伸長するが,応答は低減する。

4. 風外力に対する応答

本章では,前章と同様な建築物に対し,風洞実験 より計測した風外力を入力した場合の応答について 考察する。

4.1. 風外力の概要

ここでは、文献 4)の静止実験より評価した風外力 を用いる。建築物周辺の地表面粗度区分は II 相当で ある。風外力は、実座標系の風外力 $\{f\}$ に 1 次の固有 ベクトルの転置 ϕ^T を乗じて一般化座標系の風外力Fを作成した。したがって、風外力Fは下式のように表 される。

 $F = \phi^{\mathrm{T}} \{f\}$

(19)

また, Fig.4に風方向と風直交方向の一般化風力スペクトルを示す。

4.2. 応答解析

Fig.5,6に風方向と風直交方向の応答角加速度と角速 度,変位角の標準偏差を示す。 Fig.5, 6より, 慣性接続要素を付加した振動系と同一 無次元周期の $\gamma = 0$ を比較する。ホワイトノイズの場合 と同様に慣性接続要素を付加した振動系の応答は, $\gamma = 0$ 応答より必ず小さくなる。これは風方向, 直交方 向を問わず同じである。

また Fig.4~6 より, γの増大による応答の変化について述べる。慣性接続要素はその質量効果によって 振動系の周期が伸長し,風外力に対して共振効果が 高まるが,入力レベル低減効果によってトータル的 には応答を低減できる。しかし,応答速度は風方向 では低減せず,風直交方向ではやや上昇する傾向に ある。さらに,応答変位についても上昇する傾向が みられる。

これまでの解析結果を踏まえ,慣性接続要素による1 質点振動系の風外力に対する応答制御では,慣 性接続要素を増大させるほど応答加速度が低減され るため,耐風性の向上のみならず居住性の向上に効 果がある。しかし,応答速度と変位については慣性 接続要素の効果がほとんど見られない,あるいは逆 に応答を増大させてしまう傾向にある。

なお、本論文での検討は慣性接続要素を含む応答 制御システムの慣性項に対する効果のみに着目した 結果である。そのため、ここに文献 1)~3)等で用いら れる減衰や線形バネを加えることによって、前述の 問題点は改善させるよう努めることが望ましい。

5. まとめ

本論文では、慣性接続要素を付加した1 質点振動 系の風応答について検討した。その結果以下のよう な知見が得られた。

- ・ 慣性接続要素によって振動系の固有周期,減衰定
 数,また質量減衰パラメータがどのように影響を
 受けるかについて示した。
- ホワイトノイズ及び風外力に対する応答の一例 を示した。その結果より、慣性接続要素は外力の 入力レベルを低減効果により、応答加速度を低減





させる効果が著しいことがわかった。これは耐風 性の向上のみならず,建築物の居住性を向上に大 いに役立つと考えられる。

今後の展望として,慣性接続要素に減衰や線形バ ネを加えた応答制御システムの風応答制御について 調べていくつもりである。

「参考文献」

6.0

5.0

0.0

1.2

1.0

0.0

0.0

2.0

4.0

a) Acceleration

Normalized Period $\sqrt{1+\gamma}T\overline{V}/B$

6.0 8.0 10.0

RMS of Normalized Response Acceleration

0.0

RMS of Normalized Response Acceleration

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, 55-62, 2004年2月

2) 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, 693-702, 2013年4月

3) 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, 53-66, 2007年3月

4) 扇谷匠己,神田亮,山下忠道,梁川幸盛,佐藤大樹,原田浩之,中 村遼太郎:台風通過時に高層免震建築物に作用する風外乱の作成とそ の応答に関する研究-構造工学論文集, Vol.59B, 427-433, 2013年3月 5) 西将志,神田亮:空気流体中で応答振動する三次元正方角柱の付 加質量効果と発進風速に関する研究-日本建築学会構造系論文集,第 75号, 895-904, 2010年5月

 $T\overline{V}/B = 2.0$

 $T\overline{V}/B = 4.0$

 $T\overline{V}/B = 6.0$

 $T\overline{V}/B = 8.0$

v = 0.0

0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 1 Normalized Period $\sqrt{1 + \gamma} T \overline{V} / B$

a) Acceleration

 $\begin{array}{l} T\overline{V}/B = 2.0 \\ T\overline{V}/B = 4.0 \end{array}$

 $T\overline{V}/B = 6.0$

 $T\overline{V}/B = 8.0$

 $\gamma = 0.0$

9.0

8.0

7.0

6.0

5.0

4.0

3.0

2.0

1.0

0.0

2.0

1.8

1.6

1.4

1.2

1.0

0.8 0.6

0.4

0.2

0.0

0.0

 $\dot{\theta}_{rms} \mathbf{B}/\overline{\mathbf{V}}$

Angle $[\times 10^{-3}]$

RMS of Normalized Response Velocity

0.0

RMS of Normalized Response Velocity

10.0

 $\dot{\theta}_{rms} \mathbf{B}/\overline{\mathbf{V}}$

Angle [$\times 10^{-4}$]



Fig.6 Response of Vibration System with Dynamic Mass Damper (Across-wind direction)