

慣性接統要素を有する高層建物の風応答評価に関する研究

日大生産工(院) ○柴川 佳史

日大生産工 神田 亮

1. はじめに

振動系の質点間に質点間の加速度差に比例して反力を生じる補助質量を付加することで応答を制御する研究がある。この質点間の補助質量は慣性接統要素と呼ばれている。

石丸らは、慣性接統要素を付加することで建築物の固有周期の伸長や、地震荷重に対する入力低減変動効果、高次モードの刺激係数を0にするなど、これまではない特徴的な応答制御法を提案している。^{1), 2)}しかし、対象とする建築物は住宅など中低層のものであり高層建築物に対する検討はなされていない。

近年、建築構造技術や施工技術の向上、及び社会的要求を受け、高層建築物が増加している。建築物が高層化するに従い、風荷重が増大することは周知の通りである。このことから、今後、建物高さが300mを越えるような超高層建築物の設計においては耐風設計を軽視することはできない。

しかし、地震荷重と風荷重はそれぞれ異なった特性を有しており、これまでの慣性接統要素の配置法が地震、風の両荷重に対して有効的に応答を制御できるかについては疑問が残る。特に、慣性接統要素を付加することで振動系の固有周期が伸長されることを考慮すると、地震荷重に比べ長周期側に卓越周期を持つ風荷重に対して不利に働くことも考えられる。

本論文では、石丸らによって提案されている地震荷重を対象としたとき、高次モードの刺激係数を0にするように慣性接統要素の配置を行った際、この配置法が風応答に対してどのような影響を及ぼすかについて評価を行う。

2. 慣性接統要素

慣性接統要素の原理である回転体を有する振動系を図1に示す。この制振装置は大きな回転慣性を有する回転体と、並進運動を回転運動に変換し並進力を回転体に回転力として伝える部位からなる。このような装置を有する建物が地震外乱を受けると回転慣性質量には水平の慣性力が生じず、建物の水平運動を防止する付加質量効果を生むことができる。この慣性接統要素を有する振動系が図2のように風外乱を受けたときの振動方程式は以下になる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$, $[K]$, $[C]$ は質量、剛性、減衰マトリックス、 $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ は質点の加速度、速度、変位ベクトル、 $\{f(t)\}$ は外力ベクトルである。各マトリックスは以下のようになる。

$$[M] = [M_0] + [M'] \quad (2)$$

$[M_0]$ は節点質量のみの質量マトリックス

$$[M_0] = \begin{bmatrix} m_n & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_{n-1} & & \vdots \\ & & \ddots & \\ \vdots & & & m_2 \\ 0 & \cdots & & \cdots & m_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$[M']$ は慣性接統要素のみの質量マトリックス

$$[M'] = \begin{bmatrix} m'_n & -m'_n & 0 & \cdots & 0 \\ -m'_n & m'_n + m'_{n-1} & & & \vdots \\ & & \ddots & & 0 \\ \vdots & & & m'_3 + m'_2 & -m'_2 \\ 0 & \cdots & 0 & -m'_2 & m'_2 + m'_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_n & -c_n & 0 & \cdots & 0 \\ -c_n & c_n + c_{n-1} & & & \vdots \\ & & \ddots & & 0 \\ \vdots & & & c_3 + c_2 & -c_2 \\ 0 & \cdots & 0 & -c_2 & c_2 + c_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_n & -k_n & 0 & \cdots & 0 \\ -k_n & k_n + k_{n-1} & & & \vdots \\ & & \ddots & & 0 \\ \vdots & & & k_3 + k_2 & -k_2 \\ 0 & \cdots & 0 & -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

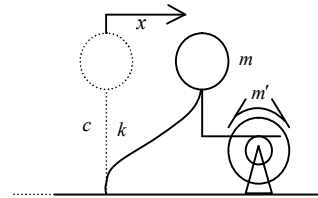


図1 回転体つき振動系

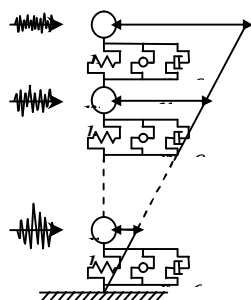


図2 慣性接続要素を有する振動系

3. 解析諸元

本論文では、風応答評価を行うにあたり時刻歴応答解析を行う。本章では、解析モデルの諸元、模擬風力波形作成諸元について示す。

3.1 解析モデル

解析モデルは、建物高さ 300m、アスペクト比 5 の超高層建築物を想定し、これを 60 質点系せん断バネマスモデルに置換したものを用いた。各層の質量分布は均等質量分布とし、質量を算定するにあたり、単位体積質量を 150、175、200kg/m³ と 3 種類想定した。各層の剛性は A_i 分布に基づく層せん断力に比例した剛性分布とし、1 次固有周期は 6.0sec とした。以後、単位体積質量が 150kg/m³ の振動系をモデル 1、単位体積質量が 175kg/m³ の振動系をモデル 2、単位体積質量が 200kg/m³ の振動系をモデル 3 と呼ぶ。

モデル 1 の固有値解析の結果を表 1 に示す。ここに β は各次の刺激係数を表す。

表 1 モデル 1 の固有値解析結果

次数	1 次	2 次	3 次	4 次
T(sec)	6.000	2.287	1.413	1.022
f (Hz)	0.167	0.437	0.708	0.978
β	1.396	0.647	0.435	0.328

3.2 慣性接続要素の配置法

風応答評価を行うにあたり、各モデルにおける慣性接続要素を算定した。既往の研究より石丸ら²⁾は、各層の慣性接続要素の値を調節することにより、多質点振動系の固有ベクトルを変化させることなく振動系の固有周期を伸長させることや、高次モードの刺激係数を 0 にすることを試みている。

今回の解析では、石丸らによって提案されている高次モードの刺激係数を 0 にする配置法に従い、各モデルにおける慣性接続要素を算定する。この慣性接続要素を有する振動系を以後、制御振動系と呼ぶ。対して、

各層の慣性接続要素の値が 0 である振動系を以後、原振動系と呼ぶ。モデル 1 の制御振動系の固有値解析の結果を表 2 に示す。

表 2 モデル 1 制御振動系の固有値解析結果

次数	1 次	2 次	3 次	4 次
T(sec)	6.891	4.345	4.291	4.238
f (Hz)	0.145	0.230	0.233	0.236
β	1.000	0.000	0.000	0.000

算定した慣性接続要素が地震荷重に対して有効であるか検証を行った。モデル 1 の原振動系と制御振動系に東北地震波(1978 年、宮城県沖地震東北大学位相、NS 成分)を入力地震波として与えたときの時刻歴応答解析の結果を図 3 に示す。左のグラフは各質点の最大応答変位を示し、右のグラフは各質点の層せん断力係数を示す。時刻歴応答解析には Newmark の β 法($\beta=1/4$)を用いた。図 3 より、応答変位は大きく低減しており、応答からは高次モードの影響が消滅し層せん断力係数は等しくなっていることがわかる。これより、石丸らによって提案されている慣性接続要素の配置法が地震荷重に対して有効的であることがわかる。

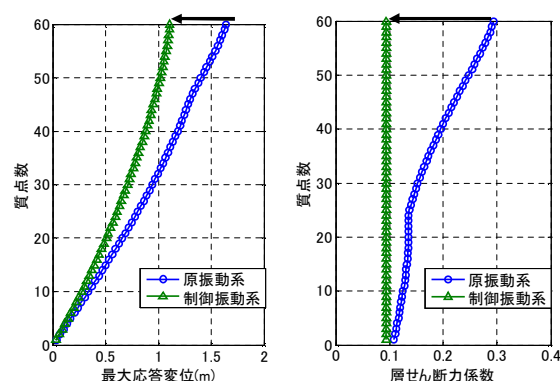


図3 モデル1時刻歴応答解析結果(東北地震波)

3.3 模擬風力波形の作成

模擬風力波形は粗度区分 II、再現期間 1 年及び 100 年相当のものとし、参考文献 3 の方法を参考に作成する鉛直方向に相関性を持つ風方向、風直角方向の変動風力波形とする。この際使用するパワースペクトル、コヒーレンス、フェイズは参考文献 4 を参考に設定した。模擬風力波形のサンプリング間隔は 0.05sec、サンプリング数は 16384 個、継続時間は約 820sec であり、後半の 10 分相当を評価対象とする。模擬風力波形は、再現期間 1 年、100 年ともに 5 波ずつ風方向、風直角方向合わせて計 20 波作成した。

4. 風応答評価

本章では、前章にて示した諸元に基づき、慣性接続要素を有する振動系に模擬風力波形を入力したときの応答を評価する。

4.1 風方向応答変位の評価

モデル 1～3 の原振動系と制御振動系に風方向の模擬風力波形を入力したときの応答変位の評価を行った。時刻歴応答解析の結果例を表 3、図 4、5 に示す。表 3 は各入力波形に対しての解析結果を示したものであり、○は原振動系に比べ応答変位が低減されているときを示し、それに対し×は応答変位が増大されているときを示す。図 4 は再現期間 1 年の風方向模擬風力波形を入力したときの各質点の最大応答変位であり、図 5 は再現期間 100 年の風方向模擬風力を入力したときの各質点の最大応答変位である。時刻歴応答解析には Newmark の β 法($\beta=1/4$)を用いた。表 3、図 4、5 より、各層の最大応答変位は低減されているときもあれば、増大しているときもある。これらは、慣性接続要素を付加することで、振動系の固有周期が伸長されたため、風方向外乱の卓越周期に近づいたために起こると考えられる。これより、今回の慣性接続要素の配置法が必ずしも風方向外乱に対して有利に働くとは限らないことがわかる。

表 3 風方向応答解析結果一覧

	再現期間	1	2	3	4	5
モデル 1	1 年	×	○	×	×	○
	100 年	×	×	×	○	○
モデル 2	1 年	×	○	×	×	○
	100 年	×	×	×	○	○
モデル 3	1 年	×	○	×	×	○
	100 年	×	×	○	○	○

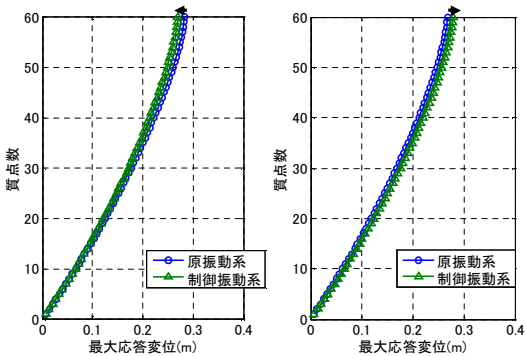


図 4 時刻歴応答解析結果(モデル 1)
(再現期間 1 年風方向模擬風力波形)

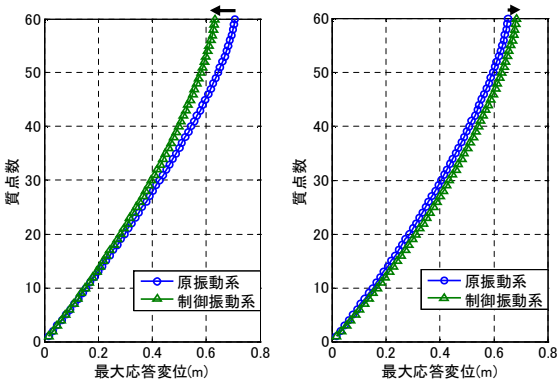


図 5 時刻歴応答解析結果(モデル 1)
(再現期間 100 年風方向模擬風力波形)

4.2 風直角方向応答変位の評価

モデル 1～3 の原振動系と制御振動系に風直角方向の模擬風力波形を入力したときの応答変位の評価を行った。時刻歴応答解析の結果例を表 4、図 6、7 に示す。表 4 は各入力波形に対しての解析結果を示したものであり、○は原振動系に比べ応答変位が低減されているときを示し、それに対し×は応答変位が増大されているときを示す。図 6 は再現期間 1 年の風直角方向模擬風力波形を入力したときの各質点の最大応答変位であり、図 7 は再現期間 100 年の風直角方向模擬風力を入力したときの各質点の最大応答変位である。時刻歴応答解析には Newmark の β 法($\beta=1/4$)を用いた。表 4、図 6、7 より、風直角方向の模擬風力を入力したときの応答においても、風方向の模擬風力を入力したときの応答と同様な結果が得られた。これらも慣性接続要素を付加することで振動系の固有周期が伸長されたため、風直角方向外乱の卓越周期に近づいたために起こると考えられる。これより、今回の慣性接続要素の配置法が必ずしも風直角方向外乱に対して有利に働くとは限らないことがわかる。

表 4 風直角方向応答解析結果一覧

	再現期間	1	2	3	4	5
モデル 1	1 年	○	×	○	×	×
	100 年	×	○	×	×	×
モデル 2	1 年	×	×	○	×	×
	100 年	×	○	×	×	×
モデル 3	1 年	○	×	○	×	×
	100 年	×	○	×	×	×

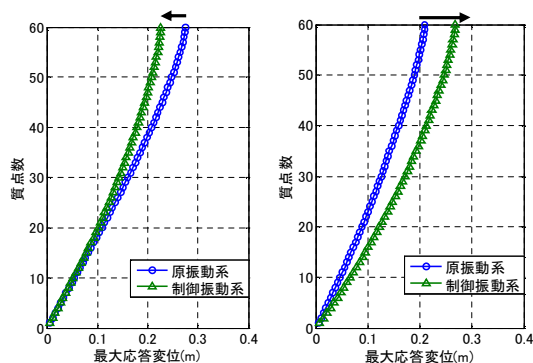


図 6 時刻歴応答解析結果(モデル 1)
(再現期間 1 年風直角方向模擬風力波形)

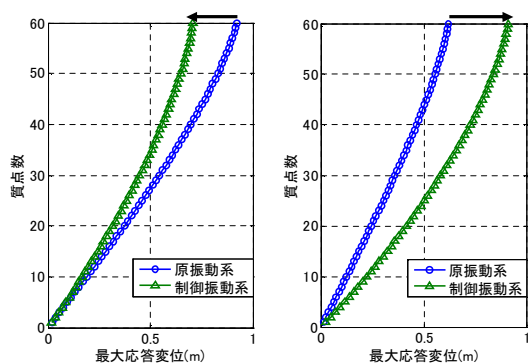


図 7 時刻歴応答解析結果(モデル 1)
(再現期間 100 年風直角方向模擬風力波形)

4.3 居住性能評価

前節までは、応答の中でも最大応答変位について評価した。本節では、想定した建築物の居住性能評価の面から風外乱に対する応答加速度の評価を行う。

居住性能評価は、日本建築学会編、居住性能評価指針⁵⁾に基づき行う。具体的には再現期間 1 年の水平方向の並進運動の最大応答加速度を算出し、固有振動数と共に性能評価曲線に照合することにより行う。

通常、今回想定した様な高層建築物の場合には、2 方向の振動と揺れ振動が合成して現れる。しかし、それぞれの大きな振動は揺れ振動と並進運動との間で交互に現れる傾向にある。さらに、並進 2 方向の最大応答が両方向同時に現れることはほとんどない。よって最大値に関する評価を行ううえでは、これら揺れ振動、風方向振動、風直角方向振動を独立した振動と考え、2 方向の並進振動のいずれかの最大加速度値を評価対象とする。

図 8 にモデル 1 の原振動系と制御振動系の最大応答加速度値(解析した 5 波の平均値)を性能評価曲線と併せて示す。これより、5 波解析を行った結果の平均値としては応答加速度が低減されていることがわかる。

しかし、中には最大応答変位のとくと同様に応答が増大しているものも見受けられた。これより、居住性能の面から評価しても、今回の慣性接統要素の配置法が風荷重に対して不利に働くこともあることを示している。

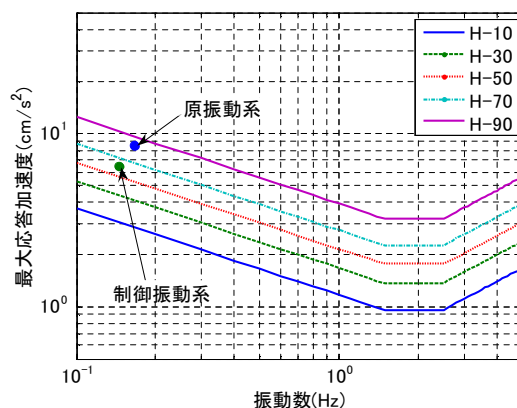


図 8 居住性能評価結果

5. まとめ

石丸らによって示されている慣性接統要素の配置法に基づき各層の慣性接統要素を算定することで、超高層を想定したモデルにおいても地震荷重に対する応答を有効的に制御できることが確認された。しかし、この慣性接統要素の配置法では風荷重に対して不利に働いてしまうこともあるということが本解析より確認された。

今後は、想定した建築物の風荷重に対する応答を制御するための慣性接統要素の配置法について検討していく所存である。

参考文献

- 1)古橋剛、石丸辰治、慣性接統要素によるモード分離-慣性接統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)古橋剛、石丸辰治、慣性接統要素による多質点振動系の応答制御-慣性接統要素による応答制御に関する研究その 2-日本建築学会構造系論文集、第 601 号、83-90、2006 年
- 3)岩谷祥美、任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション、日本風工学研究会誌、第 11 号、昭和 57 年
- 4)田村ら、基本角柱模型の層風力に関する研究、1996.2
- 5)日本建築学会、建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説