

慣性接続要素を用いた建築構造物の風応答制御に関する研究

日大生産工(学部) ○柴川 佳史

日大生産工 神田 亮

1 はじめに

高層建物の設計では、その耐震性能向上のために建物の軽量化が常である。周知のように、建物の軽量化は耐震性には有利なものであるが耐風性には不利なものである。近年ランドマークタワーなどその高さが200mを超える建物も多く出現しており、更なる風荷重の増大と相まって高層建物の耐風設計はその技術の向上を迫られている。

これらの技術の中で制振技術が注目されて久しい。現在までの制振技術は建物の剛性や減衰に意図的に細工を施し、外力に対する揺れを低減させようとするものである。これらの原理に基づき多くのデバイスが開発されているが、それらデバイスの制振効果のある領域などの制約から対象とする荷重は風または地震のどちらかに限られていた。風外力による居住性の低下、風外力に対する構造安全性、地震外力に対する構造安全性を一つのデバイスで網羅するものは皆無に等しい。

慣性接続要素を用いた制震技術の開発が石丸等¹⁾により行われている。この手法では、振動方程式の質量項を制御することによって、振動系の周期や振動モードを制御することなどを行っているものもあり、今までの技術とは原理的に全く異なるものである。この手法を用いれば建物の重量を増加させずに応答に関する質量を増やすことができるため、原理的には地震力のみならず、風外力にも有効である。

また装置では、直線運動をボールねじと同様な原理により回転運動に変換しており、小さい変形から大きな変形にいたるまでの効果が期待でき、セミアクティブの適用も容易であると考えられる。

これらを総合的に判断すると、慣性接続要素は居住性に関する揺れから、建物を倒壊にいたらしめるレベルの風および地震荷重を1つの装置で全て有効的に制御できる可能性を有する。

本論文では、慣性接続要素による風外力に対する有効性を検討し、その適用範囲の拡張の第一歩を試みようとしたものである。

2 慣性接続要素を有する建物の振動方程式

慣性接続要素の原理を図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。慣性接続要素を有する振動系が地震外力を受けた場合の振動方程式は次式のように表される。

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

ここに $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ は質量、剛性、減衰トリックス、 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ は質点の加速度、速度、変位ベクトルである。 $\{\eta\}$ については次式のような関係が成り立つ。

$$\{\eta\} = [M]^{-1}[M_0]\{1\} \quad (2)$$

$$[M] = [M_0] + [M'] = \begin{bmatrix} m_2 + m'_2 & -m'_2 \\ -m'_2 & m'_2 + m_1 + m'_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[M_0] = \begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[M'] = \begin{bmatrix} m'_2 & -m'_2 \\ -m'_2 & m'_2 + m'_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$[M_0]$ は節点質量のみの質量マトリクス

$[M']$ は慣性接続要素のみの質量マトリクス

また、図2のように例えば風外力が加わる場合の振動方程式は以下になる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (6)$$

ここに $\{f(t)\}$ は外力ベクトルである。

3 慣性接続要素の配置法

慣性接続要素を有する振動系の地動による応答の制御を考えると、石丸等はこの η が1次の固有ベクトルと等しくなるように慣性接続要素を配置し、2次の刺激係数を0にするという制御を行っている。このとき、慣性接続要素を有する振動系の刺激係数は次式により表される。

$$\beta = \frac{\{u\}^T [M] \{\eta\}}{\{u\}^T [M] \{u\}} \quad (7)$$

ここに β はS次の刺激係数であり、 $\{u\}$ はS次の固有ベクトルを表す。しかし、慣性接続要素を有する振動系の風力による強制加振による応答の制御を考えると、刺激係数は評価できず、これをどのように評価

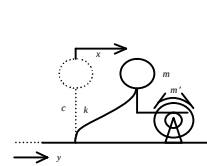


図1 回転体つき振動系

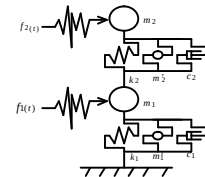


図2 慣性接続要素を有する2質点振動系

Study on Wind Response Control for Buildings using Inertial Mass

Yoshifumi SHIBAKAWA and Makoto KANDA

するかが本研究の一つの課題となる。風の場合、外力の分布は均一ではなく、異なる分布を持つ。ここで各質点に作用する風力の分布を $\{\alpha\} = \{\alpha_1, \alpha_2\}^T$ とし(2)式の $\{f\}$ に代入すると、(8)式を得る。

$$\{\eta_w\} = [M]^{-1} [M_0] \{\alpha\} \quad (8)$$

ここで、 $\{\eta_w\}$ が 1 次の固有ベクトルと等しくなったとする。このとき、(7)式により求まる 2 次の刺激係数は固有ベクトルの直交性より 0 となる。すなわち(9)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \{2u\}^T [M] \{\eta_w\} &= \{2u\}^T [M] [M]^{-1} [M_0] \{\alpha\} \\ &= \{2u\}^T [M_0] \{\alpha\} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

2 次の刺激係数を 0 にするという考えに基づき慣性接続要素を最適に配置する方法を以下に示す。2 次の固有円振動数を $2\omega^2$ 、固有ベクトルを $\{2u\}$ とすると、(10)式が成り立つ。

$$2\omega^2 [M] \{2u\} = [K] \{2u\} \quad (10)$$

(9)、(10)式より、2 次の刺激係数を 0 にするための条件式として三つの式が得られる。このとき、 m'_2 を既知とすると未知数は m'_1 、 $2\omega^2$ 、 u_2/u_1 であるから、この三元一次連立方程式は一意的に解ける。

$$\begin{cases} \frac{2u_2}{2u_1} = -\frac{m_1 \cdot \alpha_1}{m_2 \cdot \alpha_2} \\ 2\omega^2 = k_2 \left(\frac{1}{\frac{m_1 \cdot \alpha_1}{m_1 \cdot \alpha_1 + m_2 \cdot \alpha_2} + m'_2} \right) \\ m'_1 = \frac{k_1}{k_2} \left(\frac{m_1 \cdot m_2 \cdot \alpha_1}{m_1 \cdot \alpha_1 + m_2 \cdot \alpha_2} + m'_2 \right) \end{cases} \quad (11)$$

なかでも、 $m'_2 = 0$ とした場合が最小の慣性接続要素の組み合わせとなる。(11)式に示すように慣性接続要素を配置することが最適設計であると考えられる。

4 解析方法及び結果

第 3 章にて導いた理論を検証するために慣性接続要素を有する振動系の風外乱に対する挙動を調べる数値解析を行った。解析に用いたモデルは 2 質点 2 自由度系でそれらのパラメータを表 1 に示す。減衰係数 c_1 、 c_2 は原振動系(慣性接続要素を有しない振動系、すなわち $m'_1 = m'_2 = 0$ 、以下同様)の 1 次振動に対して $h = 0.05$ となるように各層の剛性に比例して与えた。慣性接続要素は、外力の分布ベクトルの $\{\alpha\}$ を、常に $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 = 1$ となるように α_1 、 α_2 を 0 から 1 まで変化させ、(11)式により求めた。外力は、風力を模擬したホワイトノイズを用いた。各層に入力したホワイトノイズの標準偏差は質点高さの風の乱れ強さに相当するものとし、 $\sigma_1 = 0.806$ 、 $\sigma_2 = 0.593$ (σ_1, σ_2 は 1, 2 層の標準偏差であり、 $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 1$)と定めた。各慣性質量を付加した場合の数値解析の結果を図 3, 4, 5, 6, 表 2 に示す。図 3, 4 に示すのが 1 層最大せん断力及び 1 層最大層間変位であり図 5 に示すのが 2 層最大せん断力である。2 層最大

せん断力は慣性質量が増加するにつれ減少していくのに対し、1 層最大せん断力は $m'_1 = 3.60 \times 10^3$ (ton) で最小となる。また、これ以降は増大していく傾向にある。このことを考慮すると、1 層最大せん断力が最小となる慣性接続要素の配置が最適であると考えられる。図 6 は α_1 の増加に伴い慣性質量がどのように変化するかを示したグラフである。図 6 より、 $m'_1 = 3.60 \times 10^3$ (ton) となるのは $\alpha_1 = 0.593$ 、 $\alpha_2 = 0.805$ のときである。この $\{\alpha\}$ の比率はホワイトノイズの標準偏差のベクトル $\{\sigma\}$ と逆の比率である。この結果より、慣性接続要素は、ホワイトノイズのような特性を有する外乱に対して各質点に入力されるホワイトノイズの標準偏差の逆数の比を分布ベクトルとしたときもっとも効果を発揮する。表 2 に原振動系と制御振動系 ($m'_1 = 3.60 \times 10^3$ (ton) を付加した振動系)の各層最大せん断力を示す。各層最大せん断力にて 1 割程度の低減が確認できる。

表 1 解析に用いた振動系

	質量(ton)	剛性(kN/m)
2	9750.0	368440.0
1	13000.0	275360.0

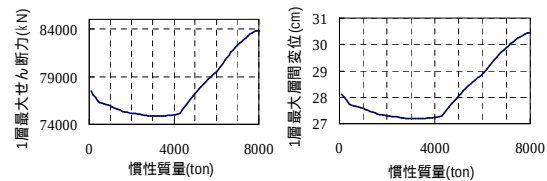


図 3 1 層最大せん断力 図 4 1 層の最大層間変位

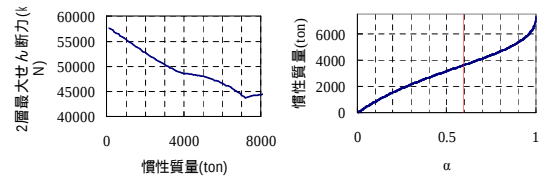


図 5 2 層最大せん断力 図 6 α_1 と慣性質量の関係

表 2 各層最大せん断力の比較(単位: kN)

	1 層最大せん断力	2 層最大せん断力
原振動系	7.85×10^4	5.87×10^4
制御振動系	7.49×10^4	4.99×10^4

5 まとめ

解析結果より、風力に対する慣性接続要素の有効性が確認できた。まだ多くの事例をもって確認する必要があるが、特に強制外力の標準偏差ベクトル $\{\sigma\}$ の逆の比率に $\{\alpha\}$ を設定するとその効果は最適に近づく。

「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, (2004), 第 576 号, 55-62