241 同一特性を有するビル構造物のハイブリッド連結振動制御

Vibration Control for the Same Characteristic Connected Flexible Structures

○学 佐野 雅春 (日本大) 学 加藤 敏幸 (日本大)
 正 渡辺 亨 (日本大) 正 背戸 一登 (日本大)

Masaharu SANO, Nihon University, 1-8 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo
 Toshiyuki Kato, Nihon University
 Toru Watanabe, Nihon University
 Kazuto SETO, Nihon University

This paper proposes a new vibration control method for multiple tall buildings connected with active controlled bridges. Although the method to control the vibration of multiple tall buildings with a different height and dynamic property has been already established, it is difficult to control these buildings with the same height and dynamic property, because a reaction force is not obtained by each building. To solve this problem, the new method to set the active controlled bridge by different height is introduced. The method is confirmed by simulation to be effective.

Key Words: Vibration Control, Multiple tall buildings, Connected control method, Modeling, LQ control

A 1. 緒言

近年、経済力や技術の向上に伴い、数多くの超高層建築物が次々に建設されている。しかし、構造物の高層化は固有振動数の低下を招き、さらなる高層化が進んだ場合、従来の補助質量の慣性力を反力とする動吸振器方式では十分な制振効果を得ることが出来ないと考えられている。

この問題に対して背戸ら⁽³⁾⁽⁴⁾は超高層ビルが複数隣接している場合、各ビル間に制振装置を設置し、構造物相互の動きを利用して制振作用を得るビル連結制御方式を提案し、東京晴海地区のトリトンタワーと呼ばれる200m、175m、140mの異なる高さの3棟の高層ビルで実用化された。

しかし、この方法では同一高さ、同一固有振動数である複数の構造物を連結した場合制御できない

そこで本研究では複数の同一特性の高層ビルモデルに対して制御する新しい方法を編み出し、その有効性をシミュレーションにより検討するものである。

制振装置にはリニアアクチュエータを用い、ハイブリッド制御とする。また連結部には板ばねを介し磁気ダンパと共に、外乱に対しての緩衝材の役割を果たしている。制御系設計にはパッシブ系は定点理論の応用、アクティブ系はフィルタ包含LQ制御理論を用いることにし、インパルス加振に対する制御効果を検証する。

A 2. 構造物の振動特性と低次元化モデルの作成

本研究で用いる振動制御対象は2棟の高層ビルモデルである。構造物は同一の特性を持つように設計した。本研究では弾性構造物の1次と2次の曲げモードの制振を行うものとして、2自由度モデルに低次元化する。各構造物の各々2つのモード制御のためには2質点モデルが必要になる。モデル作成方法として「低次元化物理モデル作成法」を用いる。まず、各質点の固有モードとモデリング点の等価質量より正規化固有モード行列を求める。しかし、このままでは集中定数系の条件を満たさない為、誤差関数を定義しこれを零にする様な修正を行う。

A 3. 振動制御シミュレーション

Fig.A1, A2にシミュレーションの結果を示す。図中の細線は

非制御時、薄い色の太線はパッシブ制御時、濃い色の太線はハイブリッド制御時のデータである。周波数応答のグラフを見ての通り、各質点とも非制御時に比べハイブリッド制御時は1次、2次のピークが落ちており、曲げに対する制御がかかっていることが分かる。また、時間応答も速やかに収束していることがわかる。

Fig.A1 The frequency responses measured at the mass point 11

Fig.A2 The time responses observed at mass point 11

A 4. 結論

本稿では、従来不可能視されていた同一振動特性を有する複数構造物の連結制振法について、アクチュエータの取り付け位置に段差を付けることで以下の知見を得た。

- (1) 同一振動特性を有する複数構造物の連結制御について、アクチュエータの取り付け位置に段差を付けることで制御可能である。
- (2) このことがシミュレーションによって実証された。今後は実験によってこのシミュレーション結果を検証することにする。

1. はじめに

阪神淡路南部地震を契機に、地震に強い都市づくりが強く求められるようになってきた。従来、風や小地震による揺れを制御する方法としてアクティブ動吸振器方式が広くもちいられてきたが、これは重りの慣性力を制振力に利用しているため大地震に対抗できるような大きな力を得ることができない⁽¹⁾。この問題に対応できる方法として、著者らはビル連結制振法を提案し、2棟⁽²⁾、3棟⁽³⁾、4棟⁽⁴⁾の模型ビル構造物の組み合わせに対する地震応答制御の可能性を調べてきた。そして、各棟の高さが異なるか固有振動数が異なる場合には大地震に対しても応答制御が可能であることを模型実験によって実証してきた。

一方、平成13年3月には東京晴海地区のトリトンスクエアにトリントンタワーと呼ばれる200, 175, 140mの3棟の高層ビルが竣工され⁽⁵⁾、著者らの提案するこの方法が世界で初めてこれらのビルの風による揺れの制御に採用された。原理的にはこの方法の有効性は立証されていたのであるが、具体的にビル間を連結するアクティブ制御ブリッジ建設されて実用可能性が実証された。その結果、従来のアクティブ動吸振器方式では1棟のビルの制御に2機の重い制振装置が必要であるのに対して、本方式では2棟に最低1機の制振装置で済むこと、慣性力を利用しないので制振装置の軽量化が可能であること、制振装置がビル間を結ぶ通路に利用できること、パッシブ装置と組合わせることにより大地震にも対する地震応答制御にも対応することなどの利点が浮かび上がってきた。

そのような背景の元で、トリントンタワーに引き続いて連結制振ビルの建設が検討され始めた。その中には同一高さのツインタワーに採用したい意向の計画もある。しかし、前述したように同一高さ、同一固有振動数ではこの方法による制御はできない。

そこで本研究では、同一高さ、同一固有振動数の複数の高層ビルを制御する新しい方法を編みだし、その有効性をシミュレーションによって検討しようとするものである。シミュレーションの結果制御可能であるとの見通しが得られたので報告する。

2. 同一特性を有する複数高層ビル構造物の連結制御法

同一特性を有する複数の高層ビル構造物が振動制御できない理由は、各ビルが同一挙動で振動するので、同一高さで制御装置を連結するのでは相対運動が得られず、したがって相互に反力が得られないことによる。この問題は制振装置の取り付け位置を変えることで解決できそうである。そこで、アクティブ制御ブリッジは水平に配置しながら段差を支持構造物で確保する新しい連結制振法を提案する。Fig. 1 には幅の広い2棟の高層ビルの場合、4棟の高層ビルの場合について基本構想を図示する。前者は、ビルが幅の広い構造なので曲げとねじれを制御する必要があり、2機のアクティブ制御ブリッジを両サイドに配置する構造である。後者は、平面2方向の制御が必要なので、各ビル間をアクティブ制御ブリッジで直交して配置する構造とする。

アクティブ制御ブリッジはスライドできる2重のセル構造物をACサーボモータとボールネジ機構から成るリニア駆動機構によってアクティブに伸縮できる構造物である。これがビル間に制御力を与えるアクチュエータの役割をする。このアクティブ制御ブリッジはビル間を繋ぐ通路の役割もする。セルの外筒の一端はビルAに連結され、セルの

内筒の一端はビルBの上端で支持された片持ち梁状構造物の下端と連結されている。アクチュエータの反力は全てビルBの上端で受ける必要があるので、このセルの内筒はビルBの内部のガイドラインを自由にスライドできる構造にする。

Fig. 1 Concept of vibration control of tall buildings with the same height

3. 構造物の振動特性

本研究で提案する方法の有効性を検証するために構成した2棟の高層ビル模型構造物をFig. 2に示す。構造物の相互作用が得られるように壁面部分の板厚を構造物1は2mm、構造物2は2mmとして同一の振動特性を持つようにしている。この制振装置はボイスコイルモータを使用し、その先端に片持ち梁状支持構造物を取り付ける。この装置を2セット用い各ビル構造物の中間部の両側に各アクチュエータを配慮する。Fig. 2のように構造物は制振装置によって連結されているがこの連結部には板ばねを介している。この板ばねを用いることによってビルに大きな衝撃が加わった場合でもアクチュエータの破損を防止することができる。また衝撃が連結されたビルに直接伝わることなく、力を和らげる緩衝材の効果をもっている。

Fig. 2. Schematic of the model buildings

この構造物の振動特性を調べるために汎用有限要素解析ソフトANSYSを用いて解析した。その結果得られた1次から3次までの振動モード形、及び固有振動数をFig. 3に示す。

Fig.3 The vibration mode shapes of the structures

4. 構造物の低次元化モデルの作成

本研究では、弾性構造物の1次と2次の曲げモードを振動制御の対象とする。「不可制御・不可観測性を活用した低次元化モデル作成法」を用いる。得られた各構造物の2質点集中定数系モデルを Fig. 4 に示す。左側の構造物を Structure1, 右側の構造物を Structure2 とする。アクチュエータは質点 m_{12} と m_{22} に取り付けられ前者のアクチュエータは質点 m_{21} との間に支持構造物のばね定数 k_{02} で結ばれ、後者は質点 m_{11} との間に支持構造物のばね定数 k_{01} で結ばれている。まず、各質点の固有モードとモデリング点の等価質量より正規化固有モード行列を求める。しかし、このままでは集中定数系の条件を満たさない為、誤差関数を定義しこれを零にする様な修正を行う。Table 1 に物理パラメータを示す。

Table.1. Physical parameters

	Structure1	Structure2	Actuator
M[kg]	M11=7.3484 M12=6.7591	M11=7.3484 M12=6.7592	
K[N]	K11=-88.20 K12=663.30 K13=511.80	K11=-88.20 K12=663.30 K13=511.80	K0=200.00
c[Ns/m]	c11=1.0 c12=1.0 c13=0.5	c21=1.0 c22=1.0 c23=0.5	c0=40.0

Fig.4. The reduced order lumped model

5. 状態方程式と制御系の設計

5・1 支持構造物のばね定数の振動特性に与える影響

本研究ではアクチュエータの取り付け位置に段差をつけるために支持構造物を必要とするが、その支持構造物のもたらす制振効果への影響を知っておく必要がある。そこで、Fig. 4 に示した k_{12} の値を 200%、100%、50%、20%と変化させた時の1次モードの固有振動数とピークの変化を調べて Fig. 5 に示す。これより、200%に剛性を高めても固有振動数の変化は見られないが、50%で変化が顕著であり、それに伴いピークの低下も見られるので、本報では支持構造物の剛性を k_{12} の 50%に定めた。

Fig.5. Influence of stiffness of supporting structure on dynamics of structures

5・2 状態方程式の作成

Fig. 4 の力学モデルから運動方程式を状態方程式で表すと下式の様になる。

$$\dot{X}_c = A_c X_c + B_c u_c \quad (1)$$

ここで、 X_c は次のような状態ベクトルである。

$$X_c = \{\dot{x}_{11}, \dot{x}_{12}, \dot{x}_{21}, \dot{x}_{22}, x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}\}^T$$

ここに各係数行列 A_c , B_c , C_c は以下のようにになる。

$$A_c = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \frac{(C_{05}+C_{11}+C_{12})}{M_1} & \frac{C_{12}}{M_1} & 0 & \frac{C_{05}}{M_1} \\ \frac{C_{12}}{M_2} & \frac{(C_{04}+C_{12}+C_{13})}{M_2} & \frac{C_{04}}{M_2} & 0 \\ 0 & \frac{C_{04}}{M_{21}} & \frac{(C_{04}+C_{21}+C_{22})}{M_{21}} & \frac{C_{21}}{M_{21}} \\ \frac{C_{05}}{M_2} & 0 & \frac{C_{22}}{M_2} & \frac{(C_{05}+C_{22}+C_{23})}{M_2} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{(k_u+k_v+k_{11}+k_{12})}{M_1} & \frac{k_v}{M_1} & 0 & \frac{+k_v}{M_1} \\ \frac{k_v}{M_2} & \frac{(k_v+k_u+k_{12}+k_{13})}{M_2} & \frac{C_{04}}{M_2} & 0 \\ 0 & \frac{C_{04}}{M_2} & \frac{(C_{04}+C_{21}+C_{22})}{M_2} & \frac{C_{21}}{M_2} \\ \frac{C_{06}}{M_2} & 0 & \frac{C_{22}}{M_2} & \frac{(C_{06}+C_{22}+C_{23})}{M_2} \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \mathbf{I}(4 \times 4)$$

$$A_{22} = \mathbf{0}(4 \times 4)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_{11}} & \frac{1}{M_{12}} & -\frac{1}{M_{21}} & -\frac{1}{M_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である。

5・3 フィルタを含む拡張系の状態方程式の作成

ローパスフィルタを設置することにより高次モードへの制御信号をカット、つまり本研究では、3次モードより高いモードにおけるスピルオーバー発生防止のためにローパスフィルタを用いる。 ω_n をローパスフィルタのカットオフ周波数、 ζ をローパスフィルタの減衰率とすると、フィルタの状態方程式は以下ようになる。

$$\dot{X}_f = A_f X_f + B_f U_f \quad (7)$$

$$Y_f = C_f X_f \quad (8)$$

$$X_f = \{\dot{x} \quad x\}^T \quad (9)$$

また、各係数行列は次のようになる。

$$A_f = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_n & -\omega_n^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} \omega_n^2 & 0 \end{bmatrix}^T$$

ここで並列弾性構造物モデルの状態方程式と結合し拡張系の状態方程式を作成する⁽⁶⁾。ここでは、フィルタを制御入力段に挿入しているのでフィルタの出力 Y_c と制御量 U_c には次の関係が成り立つ。

$$Y_f = U_c \quad (10)$$

よって、拡張系の状態方程式、出力方程式は以下のようになる。

$$\dot{X} = AX + BU \quad (11)$$

$$Y = CX \quad (12)$$

ここに、各係数行列は以下になる。

$$X = \{X_f \quad X_c\}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_f & 0 \\ B_f C_f & A_c \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_f & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} C_f & 0 \\ 0 & C_c \end{bmatrix}$$

以上の関係をブロック線図で表して Fig. 6 に示す。

Fig.6. Block diagram representation of expanded system

5・4 LQ制御理論の導入

制御系の設計にはLQ制御理論を用いる。この制御理論は、次に示す線形2次形式評価関数Jを最小にするように制御量uを決定するものである。また、設計パラメータは重み係数行列Qと重み係数Rである。

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (13)$$

重み係数Rはアクチュエータの制御量にかかる重み係数である。LQ制御理論に基づけば、この評価関数Jを最小にする制御量uは次のように定式化されており、リカッチ方程式を解くことによりフィードバックゲインKを決定することができる。

$$u = -R^{-1} B^T P X = -K X \quad (14)$$

ただし、Kは拡張系の状態フィードバックゲインベクトルであり次式によって表せる。

$$K = \{K_f \quad K_c\} \quad (15)$$

ここに K_f はフィルタ、 K_c は制御対象へのフィードバックゲインベクトルである。またPは次のリカッチ方程式の解である。

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (16)$$

重み係数行列Q、重み係数Rはそれぞれ以下のように決定した。

$$Q = \text{diag} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 \times 0.7^2 & 1.0 \times 0.7^2 & 1.0 \times 1.88^2 & 1.0 \times 1.88^2 \end{bmatrix}$$

$$R = 1 \times 10^{-6}$$

6. 振動制御シミュレーション

本研究で提案した方法によって同一高さ、同一固有振動数を有する2つの構造物の2次モードまでの振動が制御できるかどうかシミュレーションによって調べる。

Fig. 7, 8は m_{11} を加振することによって得られた質点 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} の各周波数応答である。従来のアクチュエータの配置場所を同一高さに置く方法では固有振動数が接近していると共振ピークの抑制に限界があったが、このようにアクチュエータの取り付け位置に段差を設けることによって固有振動数が一致しているにも関わらず大きな制振性能が得られる。図中の細い線は非制御時、薄い色の太線はパッシブ制御時、濃い色の太線はハイブリッド制御時のデータである。周波数応答は、各質点とも非制御時に比べハイブリッド制御時では1次、2次のピークが落ちており、曲げに対する制御がかかっていることが分かる。またFig. 9, 10はFig. 7, 8に対応する時間応答である。いずれの応答も速やかに減衰しており、ここに提案した新しいビル連結制振法の有効性が確認された。

Fig.7. Frequency response of structure1

Fig.7. Frequency response of structure2

Fig.9. Time response of structure 1

Fig.10. Time response of structure2

6. 結論

本稿では、従来不可能視されていた同一振動特性を有する複数構造物の連結制振法について、アクチュエータの取り付け位置に段差を付けることで以下の知見を得た。

(3) 同一振動特性を有する複数構造物の連結制御について、アクチュエータの取り付け位置に段差を付けることで制御可能である。

(4) このことがシミュレーションによって実証された。

今後は実験によってこのシミュレーション結果を検証することにする。

文 献

- (1) K. Seto, trends on Active Vibration Control in Japan, Proceedings of the 1st International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), pp.1-11, (1992).
- (2) 栗原和昭, 原本英毅, 背戸一登, 並立弾性構造物の地震応答制御に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集C編, 63巻, 616号, pp.4114-4121, (1997).
- (3) H. Haramoto, K. Seto, Y. Koike, Active Vibration Control of Triple Flexible Structures Arranged in Parallel, JSME International Journal, Series C, 43-.3, pp.712-718., (2000)
- (4) 松本幸人, 背戸一登, 多連ビル構造物のアクティブ振動制御(第2報, 4連ビル模型構造物の曲げねじれ振動制御の地震応答にもたらす効果), 日本機械学会論文集C編, 65巻 639号, pp.4286-4292, (1999).
- (5) 背戸一登, 建築構造物の制御, 日本機械学会誌, Vol.103 No.981, pp.559-562, (2000).
- (6) 背戸一登, 他1名: パソコンで解く振動の制御, 丸善 (1999)