

モード解析による多自由度系構造物の予測震動制御

Prediction Control of Structural Earthquake Response in Multi Degree of Freedom System
by Means of Modal Analysis

杉山毅*・立石彰**・西岡隆***

Tsuyoshi SUGIYAMA, Akira TATEISHI and Takashi NISHIOKA

* 学生員 工修 筑波大学大学院博士課程工学研究科 (〒 305-0006 つくば市天王台 1-1-1)
** 正会員 工博 筑波大学大学院博士課程工学研究科 (〒 305-0006 つくば市天王台 1-1-1)
*** 正会員 工博 筑波大学教授 機能工学系 (〒 305-0006 つくば市天王台 1-1-1)

This paper shows a method of an active seismic feedback control of structure. To take into account the time delay of control force, kalman filtering prediction algorithm is used for the prediction of mode response in a multi degree of freedom system. The relation between the characteristics of structure and the precision of prediction was examined by calculating a single degree of freedom system. Simulation analysis was used to clarify the usefulness and the characteristics of the proposed method. It is concluded that the proposed method has effective control efficiency than a system not taking account of time delay of control force.

Key Words : active control, prediction control, modal analysis, kalman filter

1. まえがき

構造物の震動制御については、近年の周辺技術の進展とあいまって、安全の確保と居住性の向上のために高度利用への期待が高まっている。最適レギュレータ理論を基礎とする定常フィードバック制御に始まったアクティブ制御への取り組みは、最近ではフィードフォワード制御にまで発展を見せるなどこれまでに多くの知見が得られた^{1)~6)}。

本研究が対象とする構造物のフィードバック震動制御問題では、1) 地震動が作用する構造物の状態を観測する、2) 観測結果から逐次最適な制御力を算定する、3) 求められた制御力の指令を制御装置へ送る、という一連の制御過程において制御力の作用時間遅れが生じる。これに関して佐藤等²⁾はカルマンフィルターによる予測アルゴリズムを地震加速度に対して用いることで、時間遅れを考慮した評価関数の構築による予測制御の効果を示した。ここでの地震加速度の予測は、長期予測における予測波の位相遅れや振幅の減少などが顕著で予測精度が低下することも同時に示された。

これに対し狭帯域なランダム過程をカルマンフィルターで予測する場合、比較的長い予測ステップにおいても予測が精度良く行なわれることが知られている。このことを利用して立石・西岡⁴⁾はウェーブレット分解による特定周波数帯の地震加速度の予測を行ない、フィードバック・フィードフォワード併合系での応用に良好な成果を得ている。本来構造物のフィードバック制御において制御力の算定に必要な状態量は、外乱として構造物に作用した地震波を構造物によって帯域フィルタリングした結果に他ならない。よって構造物の状態

量をカルマンフィルターの予測アルゴリズムによって直接予測することは、予測制御に関してよい成果をおさめることが期待できる。このことから本研究はカルマンフィルターの直接状態量予測への応用と震動制御における実用性について考える。

状態量の直接予測による類似の震動制御の方法については、過去佐藤等⁵⁾がニューラルネットワークの自己学習機能を利用した状態量の予測法についての提案を行なっている。そこで提案された、入出力関数に線形関数を使用するニューラルネットワークの、逐次学習による予測制御と、本研究がカルマンフィルターを用いて行なう自己回帰係数の逐次同定による予測制御とは、成果の上で同等の意味を持ちうる。また誤差評価の基準が確立されているカルマンフィルターでの予測制御には、まだ多くの考察の余地が残されているものと思われる。本研究では制御対象となる構造物の特性やフィードバック制御の特性と予測制御の効果を、モード解析による考察から、まず単純な1自由度系において考える。また得られた内容から多自由度系での予測制御の効果について考察を行う。これらから、本研究が提案する制御方法が長期の作用時間遅れ問題についても有効であることを示す。

2. 解析方法

2.1 運動方程式と制御則

制御力型制振装置を持つ構造物の運動方程式は構造物を線形と仮定し自由度を n 、制御力数を m とした場

合、離散時間系で次式のように表される。

$$M\ddot{\mathbf{q}}_k + C\dot{\mathbf{q}}_k + K\mathbf{q}_k = \mathbf{f}_k + U\mathbf{u}_k \quad (1)$$

ここに M, C, K はそれぞれ $n \times n$ の質量、減衰、剛性マトリクス、 $\mathbf{q}$ は n 次の変位ベクトル、 $\mathbf{f}$ は n 次の外乱ベクトル、 $\mathbf{u}$ は m 次の制御力ベクトル、 U は $n \times m$ の制御力分配マトリクスである。添字の k は離散時間のステップを意味する。 $\dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ は速度と加速度ベクトルを表し、形式的に $\mathbf{q}$ の微分をとった記号で与えた。

状態ベクトルを、

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_k \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

とおけば、運動方程式 (1) に対し離散時間系の状態方程式は以下のように与えられる。

$$\mathbf{x}_{k+1} = A\mathbf{x}_k + B\mathbf{u}_k + D\mathbf{f}_k \quad (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned} A &= I + (A_c\Delta) + \frac{(A_c\Delta)^2}{2!} + \cdots + \frac{(A_c\Delta)^N}{N!} + \cdots \\ B &= \Delta \left[I + \frac{(A_c\Delta)}{2!} + \cdots + \frac{(A_c\Delta)^N}{(N+1)!} + \cdots \right] B_c \\ D &= \Delta \left[I + \frac{(A_c\Delta)}{2!} + \cdots + \frac{(A_c\Delta)^N}{(N+1)!} + \cdots \right] D_c \\ A_c &= \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & O \end{bmatrix} \\ B_c &= \begin{bmatrix} M^{-1}U \\ O \end{bmatrix}, \quad D_c = \begin{bmatrix} M^{-1} \\ O \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここに Δ は離散時間系での時間刻みである。

解析は定常フィードバック制御を考え最適制御理論によって与えるものとする。制御力を算定するための評価関数は以下のように設定する。

$$J = \frac{1}{2} \sum_k [\mathbf{x}_k^T Q \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k^T R \mathbf{u}_k] \quad (4)$$

ここに Q, R はそれぞれ $2n \times 2n$ の状態量に関する重み行列と $m \times m$ の制御力に関する重み行列を表す。ここでは行列 Q を次式のように与えた。

$$Q = \begin{bmatrix} M & O \\ O & K \end{bmatrix} \quad (5)$$

このとき式 (4) の総和記号内の第 1 項は時刻 k における構造物の運動エネルギーとひずみエネルギーの和を表す。また行列 R は、成分 r を対角要素とする行列として次式のように与えた。

$$R = r \cdot I \quad (6)$$

状態方程式 (3) のもとで評価関数 (4) を最小にする最適化問題を解けば、最適制御力は以下のように与えられる。

$$\mathbf{u}_k = G_v \dot{\mathbf{q}}_k + G_d \mathbf{q}_k \quad (7)$$

ここに G_v, G_d は速度および変位に対する $n \times n$ のフィードバックゲイン行列であり、これらはリカッチ方程式、

$$A = Q + A^T \Lambda A - A^T \Lambda B [R + B^T \Lambda B]^{-1} B^T \Lambda A \quad (8)$$

の解 Λ を用いて、以下のように求められる。

$$[G_v \quad G_d] = -[R + B^T \Lambda B]^{-1} B^T \Lambda A \quad (9)$$

2.2 制御力の作用時間遅れ

最適化問題によって式 (7) のように制御力を算定する場合、実際には制御力の作用時間遅れが生ずるために、それによる制御効果の低下が避けられない。これに対して、制御力の作用が遅れる時間だけ事前に状態量を予測して疑似的に最適制御力を算定し、当初の制御効果を得ようとする方法が考えられる。すなわち

$$\tilde{\mathbf{u}}_k = G_v \tilde{\dot{\mathbf{q}}}_k + G_d \tilde{\mathbf{q}}_k \quad (10)$$

ここに上付きの記号 $\sim$ は諸量に対する予測値を示している。この場合状態量の予測値は制御効果に大きな影響を及ぼすため、予測に対しては高い精度が要求される。

状態量の予測を広帯域の地震加速度の予測から状態方程式を通して間接的に行なおうとすると、予測ステップ数が大きい場合予測された加速度波形に位相遅れや振幅の減少などの精度の低下が起こり、結局状態量の予測精度も低下してしまい問題が多い。比較的長期の予測制御が行なわれる場合には、予測制御力算定にあたって異なるアプローチが必要である。

2.3 モード解析

ここで、予測制御における提案の準備として、運動方程式 (1) のモード解析を行なう⁷⁾。固有値問題、

$$\omega_i^2 M \phi_i = K \phi_i \quad (11)$$

において、 ω_i を系の i 次の固有円振動数、 ϕ_i を対応する i 次の固有モードベクトルとする。固有モードマトリクス Φ を、

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \cdots \quad \phi_n] \quad (12)$$

として、モード変位ベクトルを $\mathbf{p}$ とすれば、

$$\mathbf{q}_k = \Phi \mathbf{p}_k \quad (13)$$

となる。減衰マトリクス C に対して Rayleigh 減衰などの比例減衰を仮定し、外乱である地震加速度 $\ddot{f}_g$ が一方向から作用する場合を想定すれば $\mathbf{f}_k = -M \mathbf{1} \ddot{f}_{g,k}$ となり、モード行列の転置行列 Φ^T を運動方程式 (1) の左側からかけることで、モード応答に関する以下の n 個の運動方程式が新たに得られる。

$$\ddot{p}_{i,k} + \frac{c_i}{m_i} \dot{p}_{i,k} + \frac{k_i}{m_i} p_{i,k} = -\beta_i \ddot{f}_{g,k} + \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} u_{j,k} \quad (14)$$

ここに、 m_i, c_i, k_i はそれぞれ一般化された i 次の質量、減衰、剛性であり、 β_i は地震外力に対する刺激係数で

ある。1 を全ての成分が1の n 次地震入力ベクトルであるとし、 U_j を制御力配分行列 U の第 j 列の列ベクトルとすると各値の与え方は以下の通りになる。

$$\begin{aligned} m_i &= \phi_i^T M \phi_i \\ c_i &= \phi_i^T C \phi_i \\ k_i &= \phi_i^T K \phi_i \\ \beta_i &= \phi_i^T M \mathbf{1} / m_i \\ \alpha_{ij} &= \phi_i^T U_j / m_i \end{aligned}$$

モード毎の運動方程式 (14) はフィードバック制御力項を右辺第2項に含む。定常フィードバック制御力は式 (7) において一般的に全質点の応答から決定される。つまり式 (14) の i 次のモード応答はそれ以外のモードのモード応答を含むため、連成問題である。したがって個々の運動方程式を全継続時間にわたって別々に解いた上で多自由度系の解を構成する一般的なモード重ね合わせの手法はここでは適用できない。

しかし、式 (14) は線形多自由度系を基本的に構成していることにはかわりがない。本解析では多自由度系においてできるだけ具体論に偏らない考察を行なうために、式 (14) で表されるモード応答をもとにした予測制御について考えた。まずモード毎の運動方程式により決定されるモード応答において、作用時間遅れステップ d を考慮した応答予測を行なう。予測されたモード応答によって多自由度系の状態量の予測値が与えられ、結局 d ステップ後の予測制御における制御力が決定される。得られた d ステップ後の予測制御力は再びモード方程式に反映され、逐次モード応答の予測と予測制御力の算定が行なわれる。

2.4 予測制御の方法

2.3 節で示したように、本研究では予測制御の方法としてモードの変位と速度応答のそれぞれについて、制御力の作用時間遅れステップ d だけ事前に応答の予測値を求める。モードの予測応答によって固有モードの重ね合わせを行い、得られた多自由度系の状態量の予測値から、 d ステップ後の予測制御力を算定する方法を試みる。モード応答が予測精度へ与える影響を明らかにし、多自由度系における予測制御の問題を一般化する上ではこのような解析が有用であると思われる。

任意時刻 k での多自由度系における全状態量が観測されるものとして、 i 次のモード変位 p_i を、

$$p_{i,k} = \phi_i^T q_k / \|\phi_i\|^2 \quad (15)$$

で求め時系列として逐次記憶する。ここに $\|\phi_i\|$ は ϕ_i のノルムを表す。このモード変位の各時系列が時変 AR 過程で表現できるものと仮定し、状態空間モデルを以下のように表す。

$$\begin{cases} [a_1 \cdots a_m]_k^T = [a_1 \cdots a_m]_{k-1}^T \\ p_{i,k} = [p_{i,k-1} \cdots p_{i,k-m}] [a_1 \cdots a_m]_k^T + v \end{cases} \quad (16)$$

ここに m は AR 次数、 $[a_1 \cdots a_m]_k$ は時刻 k での時変 AR 係数、 v は平均 0、分散 σ^2 の正規白色ノイズを表す。各モードの速度応答 $\dot{p}_{i,k}$ についても同様に考え、また各モード応答の変位および速度に対して、時変 AR 係数は個別に用意されるものとする。

式 (16) で与えられる状態空間モデルに対して、カルマンフィルターのアルゴリズムは時変 AR 係数の条件付き期待値と共分散を逐次与える。すなわち、時変 AR 係数の条件付き期待値は、

$$\begin{aligned} [a_1 \cdots a_m]_{k+1|k} &\equiv \\ E \{ [a_1 \cdots a_m]_{k+1} | p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,k} \} \end{aligned} \quad (17)$$

上式は時刻 k までのモード応答を利用した時変 AR 係数の 1 ステップ先予測を表している。これにより時刻 $k+1$ でのモード応答の予測値 $\tilde{p}_{i,k+1}$ は次式によって与えることができる。

$$\tilde{p}_{i,k+1} = [p_{i,k} \cdots p_{i,k-m+1}] [a_1 \cdots a_m]_{k+1|k}^T \quad (18)$$

すなわちモード応答に対してカルマンフィルターによる時変 AR 係数の逐次同定および式 (18) による予測を順次行なう。

なお 2 ステップ先以上の予測については、上記の方法によって得られる 1 ステップ先の予測値が正解値であると仮定し、その予測値をモード応答値と同様に扱うことによって順次求めるものとする。すなわち 2 ステップ先以上の予測値 $\tilde{p}_{i,k+2}, \tilde{p}_{i,k+3}, \dots$ は以下のように示される。

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{i,k+2} &= [\tilde{p}_{i,k+1} \ p_{i,k} \cdots p_{i,k-m+2}] \\ &\quad [a_1 \cdots a_m]_{k+2|k+1}^T \\ \tilde{p}_{i,k+3} &= [\tilde{p}_{i,k+2} \ \tilde{p}_{i,k+1} \cdots p_{i,k-m+3}] \\ &\quad [a_1 \cdots a_m]_{k+3|k+2}^T \\ &\vdots \\ \tilde{p}_{i,k+d} &= [\tilde{p}_{i,k+d-1} \ \tilde{p}_{i,k+d-2} \cdots] \\ &\quad [a_1 \cdots a_m]_{k+d|k+d-1}^T \end{aligned} \quad (19)$$

予測されたモード応答の変位および速度応答から、時刻 $k+d$ における多自由度系の応答の予測値は以下のように与えられる。

$$\tilde{q}_{k+d} = \Phi \tilde{p}_{k+d} \quad (20)$$

$$\tilde{\dot{q}}_{k+d} = \Phi \tilde{\dot{p}}_{k+d} \quad (21)$$

ただし $\tilde{p}_{k+d}, \tilde{\dot{p}}_{k+d}$ はそれぞれ第 i 行に $\tilde{p}_{i,k+d}, \tilde{\dot{p}}_{i,k+d}$ を格納する各モードの予測変位および予測速度のベクトルである。以上のように各時刻毎に求められる多自由度系の応答の予測値から、時刻 $k+d$ での予測制御力 (10) が求められる。

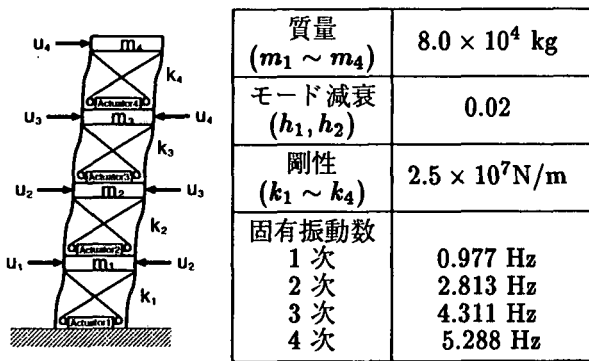


図-1 解析モデルとモデルの諸元

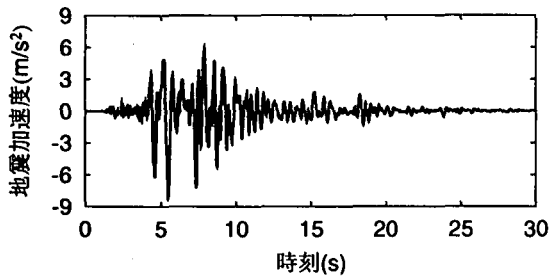


図-2 入力地震波の加速度記録 (兵庫県南部地震)

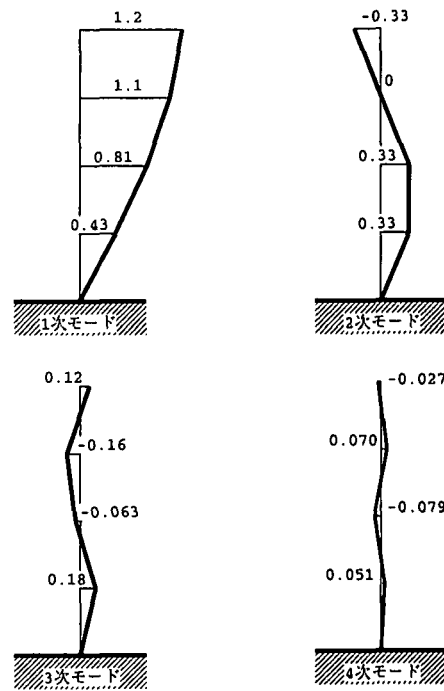


図-3 刺激関数

(固有モード ϕ_i に対して刺激係数 β_i を乗算した値)

3. 数値シミュレーションと考察

3.1 解析モデル

前節で示した多自由度系の予測方法を利用した予測震動制御について検討を行なう。解析の対象となるモデルを図-1に示す。解析モデルは各層にアクティブテンドンを配する4自由度4制御力系のせん断構造物とする。構造物の物性値は図中の表に示されている通りである。減衰マトリクスには Rayleigh 減衰を仮定し1次および2次の減衰定数をそれぞれ0.02に定めて算出した。また入力地震波には兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台において記録された地震加速度のN-S成分(最大加速度 8.18 m/s^2 , 時間刻み $\Delta = 0.01$, データ個数3000個)を用いるものとし、図-2にその加速度波形を示した。また解析モデルの固有モードに各次数の刺激係数 β_i を乗じた刺激関数を図-3に示す。

アクティブテンドン型制震構造物に対する制御力分配マトリクスは、図-1に示す制御力の作用位置より、次式のように定められる。

$$U = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

3.2 1自由度系でのパラメータ解析と予測精度の検討

ここで運動方程式(1)に対して、最適制御力 u を与

える式(7)を代入して整理すれば、以下の関係が得られる。

$$M\ddot{q}_k + (C - UG_v)\dot{q}_k + (K - UG_d)q_k = f_k \quad (23)$$

上の式は定常フィードバック制御の効果が理論上構造物の減衰および剛性の特性を定常的に変化させることに等価であることを示している。

解析は、式(6)における r の値を増減することにより、速度と変位に対するフィードバックゲインの効果を調整することができる。しかし本節の解析モデルにおいては、フィードバックゲインによって算定される制御力が解析上妥当な範囲に収まるように r の値を調整する場合、変位に対するフィードバックゲインの効果は非常に小さい。解析モデルにおけるフィードバック制御の効果は、専ら系に減衰を付加し、高減衰の構造物を実現しようとするものであるとわかる。

また式(9)および本解析モデルの制御力配分マトリクス(22)から求められるマトリクス UG_v に対して、その右側からモードマトリクス Φ を、また左側からその転置 Φ^T をそれぞれかける。このとき解析範囲内の任意の r の値に対して、 $\Phi^T(UG_v)\Phi$ は非対角要素が対角要素に対して十分に小さく無視できるため、数値的には対角行列とみなすことができる。すなわち

$$\Phi^T(UG_v)\Phi \simeq - \begin{bmatrix} c_1' & & & \\ & c_2' & & \\ & & c_3' & \\ & & & c_4' \end{bmatrix} \quad (24)$$

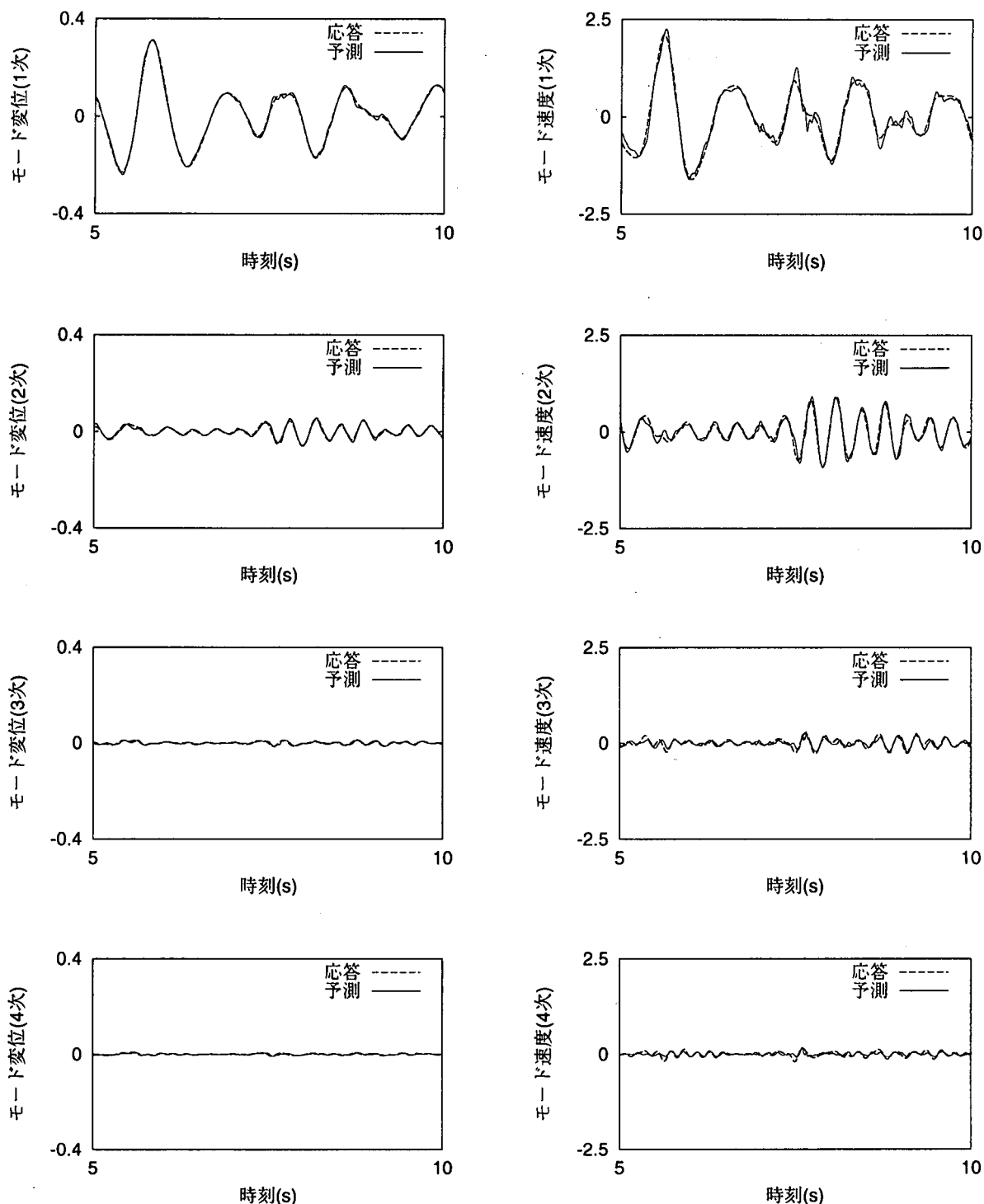


図-4 モード応答と予測の時刻歴
 $h_i = 0.1 (i = 1 \sim 4)$, 0.1 秒先予測

これらの事実と、2.3 節のモード解析の結果から、 $i = 1 \sim 4$ について近似的に以下の 1 自由度系の運動方程式を考える。

$$\ddot{p}_{i,k} + \frac{c_i + c_i'}{m_i} \dot{p}_{i,k} + \frac{k_i}{m_i} p_{i,k} = -\beta_i \ddot{f}_{g,k} \quad (25)$$

さらに $p_i = \beta_i p_{0i}$ とおきなおして整理すれば

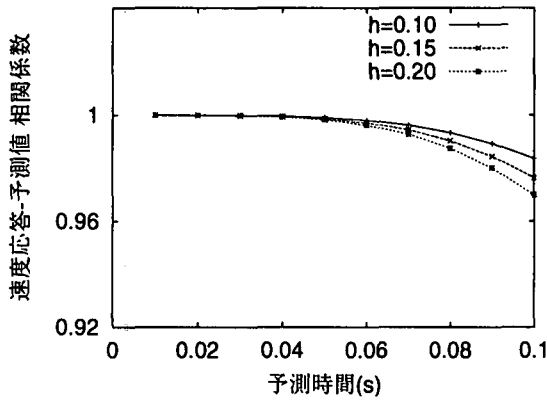
$$\ddot{p}_{0i,k} + 2h_i' \omega_i \dot{p}_{0i,k} + \omega_i^2 p_{0i,k} = -\ddot{f}_{g,k} \quad (26)$$

ここに

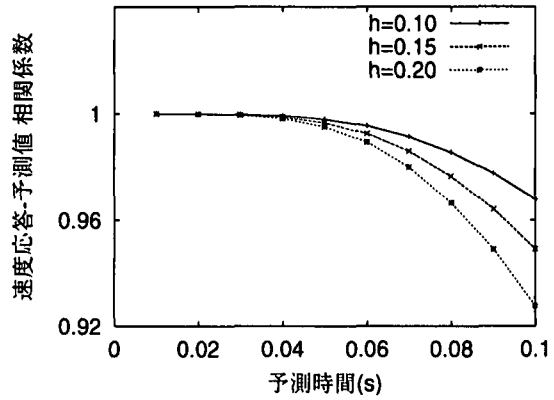
$$\omega_i = \sqrt{k_i/m_i}$$

$$h_i' = (c_i + c_i')/(2m_i \omega_i)$$

式 (26) において ω_i を解析モデルにおける各モードの固有円振動数とし、式中の減衰定数 h_i' をパラメータとして変化させることは、多自由度系の予測制御において速度に対するフィードバックゲインの値をかえて



(a) 1次モード



(b) 2次モード

図-5 速度応答における予測時間と予測精度との関係 (減衰定数変化の場合)

制御力を変化させることと同様の意味を持つ。すなわちモード応答の予測精度について情報を得ることで多自由度系に対する予測制御の考察が一般化される。以下にその解析の結果を示す。

図-4は、式(26)における減衰定数 h_i' をそれぞれ10%とした場合の各モードにおける応答とその予測値を示したものである。なおここで解析モデルにおいては、定められたゲイン行列から概算されるモード毎の減衰定数 h_i' は、1%程度の増減の範囲で同程度の値をとることから、簡単のためにここでは各モードにおける減衰定数を同じ値で与えた。

図中の破線は式(26)に地震加速度として兵庫県南部地震における地震波の加速度記録を作用させた場合の変位および速度応答の時刻歴のうち、震動の主要部分(5～10秒)を示す。実線は2.4節で示したカルマンフィルターによる予測手法によって、10ステップ(0.1秒)先の応答予測を逐次行なったものである。応答の予測精度は高次モードほど予測が低下し、また各モードにおいて変位応答よりも速度応答の方が予測精度が低下する傾向がみられるが、変位と速度はともに精度良く予測されている。また1次あるいは2次モードの応答の振幅レベルと比較して3,4次の応答は小さい。各モードの刺激関数の大きさを考えあわせれば、解析モデルにおける予測制御力の算定には1次あるいは2次モードの予測精度の影響が大きく、高次モードにおける応答の予測精度は全体に及ぼす影響が小さいものと思われる。

図-5は、1次および2次モードにおける減衰定数と予測時間ステップを変化させて、フィードバック制御力を決定する主要な項である速度応答の予測精度を、応答と予測値との相関係数、

$$\rho_{\dot{p}_i, \hat{\dot{p}}_i} = \frac{\kappa_{\dot{p}_i, \hat{\dot{p}}_i}}{\sigma_{\dot{p}_i} \sigma_{\hat{\dot{p}}_i}} \quad (27)$$

を用いて表したものである。ここに $\kappa_{\dot{p}_i, \hat{\dot{p}}_i}$ は速度応答とその予測値との共分散であり、 σ は各々の標準偏差である。

グラフの横軸はある時刻から何秒後の予測を行なったかを示す予測時間で、制御時の作用時間遅れに相当する。また縦軸に相関係数をとっている。パラメータとしての減衰の増加はフィードバック制御においては制御力の増加を意味する。

図-5を見ると、1次および2次モードにおける速度応答とその予測値との相関性は予測時間が伸びるにつれて低くなるが、相関係数の値は概して高い。最大で10ステップ(0.1秒)の予測時間に対しても本解析で用いる応答の予測が高い精度で行なわれていることが分かる。各モードにおいて減衰定数を増加させていった場合も、相関係数はそれに応じて小さくなるが、20%の減衰に対しても比較的相関性が高い。

多自由度系に対する予測制御において、これらのことは速度に対するフィードバック制御力を増加させることで予測精度は低下するが、応答の主なモードである1次および2次モードにおいてはその影響が小さいことを示している。それらの予測値をもとにして決定されるフィードバック制御力についても、理論値に近い制御力が算出されることが期待できる。

3.3 予測制御の効果

前節までの結果を受けて、本節では最終的に図-1に示す多自由度モデルでの数値シミュレーションを行なった。速度に対するフィードバックゲインを1次モードでの減衰定数に換算して10%, 15%, 20%となるように

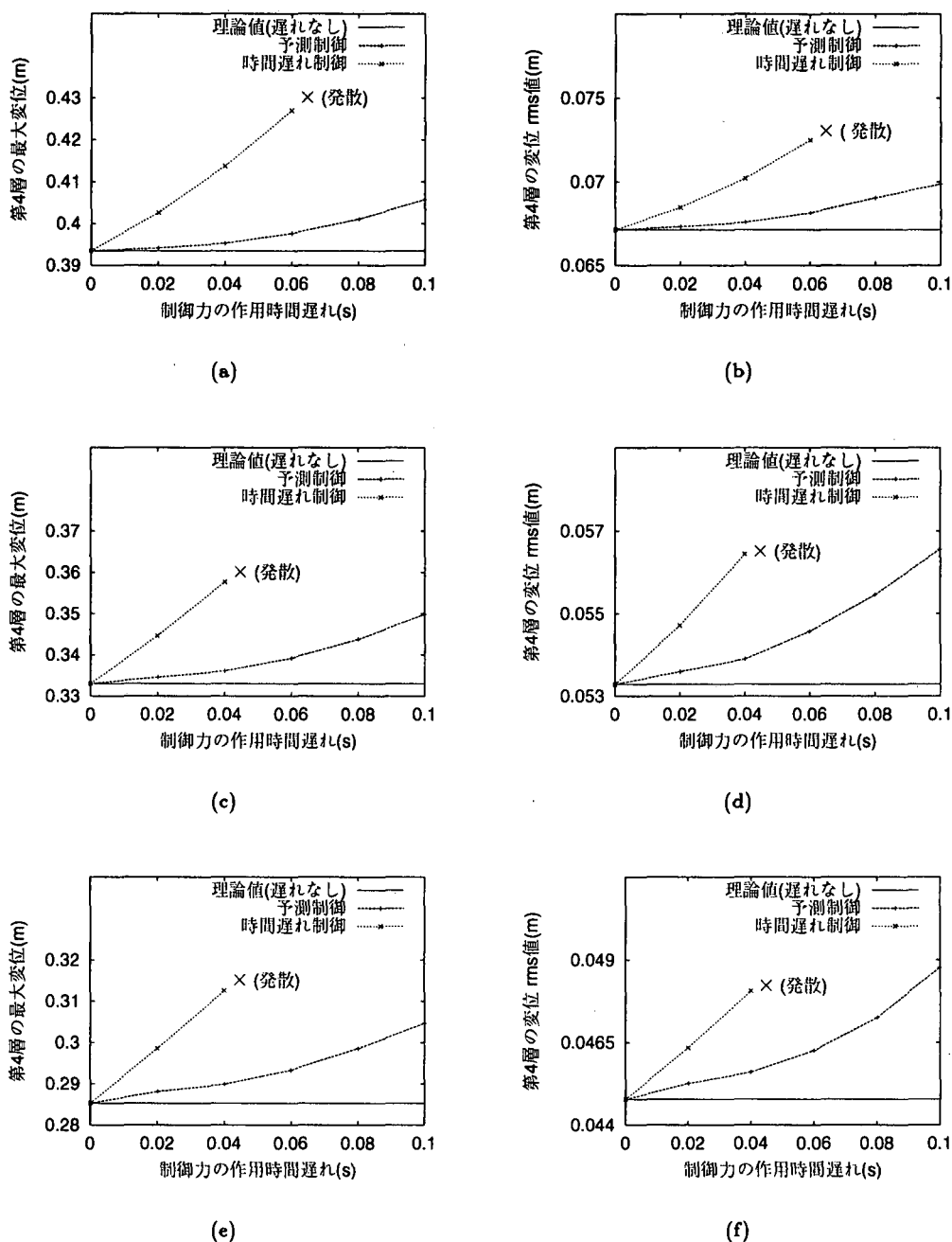


図-6 多自由度系における制御効果

(a),(b): $h_1 = 10\%$
(c),(d): $h_1 = 15\%$
(e),(f): $h_1 = 20\%$

式 (6) の r を調整して、それぞれの結果から比較検討を行なう。入力地震波はここでも兵庫県南部地震の加速度記録を用いている。対比のために、提案手法の他に、作用時間遅れがない理想的な制御を行なった場合と、制御力の作用時間遅れに対して対処を行なわない場合、すなわち時間遅れ制御を行なった場合についても同様に解析を行なった。図-6の (a)~(f) にその結果を示す。

図-6の左側のグラフはそれぞれ解析モデルの最上層における最大変位を示し、右側のグラフは同じく変位の rms 値を示す。構造の最大変位は主に構造物の安全性の指標を与え、また rms 値はそれに加えて居住性に関する指標を与える。各グラフの一番下の実線が、制御力に作用時間遅れのない理想的な状態を表している。これに対して予測制御と時間遅れ制御についての結果をそれぞれ比較する。

図中の時間遅れ制御についての結果は、フィードバック制御力の影響が1次モードの減衰定数に換算して10%の場合については作用時間遅れが0.08秒から、また15%と20%の場合については作用時間遅れが0.06秒から応答が発散をしてしまったため、計算を打ち切った。この現象は制御力の作用時間遅れが大きくなるにつれて高次モードの応答が発散してしまうことに起因している。これは時間遅れ制御における制御力の時系列が、高次モードにおいては本来かけるべき状態と逆位相に近い状態で働き、これが結果的に系を不安定にしまったものであると推察できる。またこのことについては、解析モデルでは制御装置が出しうる制御力にとくに上限を設けなかったため現象がより顕著に現れた。実際には制御装置の性能によって制御効果の悪化はより緩慢になるものと思われるが、現象そのものには十分な注意が必要である。

これに対して、提案された予測制御によるシミュレーションは、フィードバックゲインを大きくして制御力の効果を上げた場合や、作用時間遅れが大きな系に対しても、時間遅れのない理想的な制御状態に近い結果を与えている。最大変位と変位のrms値の両方について、遅れ時間の全般にわたって提案手法は時間遅れのある系よりも高い制御効果を示している。提案された予測制御の方法は制御力に比較的長期の作用時間遅れのある場合において非常に高い成果をおさめられた。

4. 結論

本研究は作用時間遅れを考慮した多自由度系でのフィードバック震動制御問題において、状態量の直接予測による予測制御の効果について考察を行なった。対象構造物のモード解析を行ない、カルマンフィルターによるモード応答の予測と固有モードの重ね合わせから状態量を直接予測する方法を示した。またモード応答における予測精度が予測制御に対して与える影響や本手法の有効性について、解析モデルにおいて考察を行なった。

それによれば、モード解析をもとにした本手法の提案の過程において、多自由度系での予測制御の制御力を精度良く与えるためには、その系の1次あるいは2次という低次モードにおける予測の精度が大きく関わることが明らかになった。これに関してカルマンフィルターによるモード応答の予測は低次モードに限らず予測精度が高かった。モード応答の予測は、フィードバック制御力への寄与率が高い速度応答が変位応答の予測と比較して精度が若干低くなる傾向はあるが、予測制御の成果からみて制御力の算定に対しては十分な精度であるといえる。同様に高減衰の系におけるモード応答についても同じように予測精度の低下がみられるが、その場合においても提案手法による予測制御は、制御力に作用時間遅れのない理想的な制御状態に近い成果をおさめた。また時間遅れのある制御が、作用時間遅れが長くなるにつれて高次モードに起因する不安定現象を示すなど、制御力の時間遅れに対して制御効果を悪化させたのに対して、提案手法による予測制御では高い制御効果が維持された。総じて、提案手法によって多自由度系での予測制御のあり方が解明され、また高い制御効果があることが示された。

参考文献

- 1) J.N.Yang, A.Akbarpour and P.Ghaemmaghami: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, Vol.113, No.9, pp.1369~1386, Sep. 1987.
- 2) 佐藤忠信, 土岐憲三, 橋本雅道: 作用時間遅れを考慮した構造物の震動制御, 土木学会論文集, No.428/I-15, pp.193~202, 1991.4
- 3) 斉藤芳人, 星谷勝: 時系列モデルを用いた多自由度系の瞬間最適予測制御, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.159~166, 1995.1
- 4) 立石彰, 西岡隆: ウェーブレット分解を利用した構造物の瞬間最適制御, 土木学会論文集, No.605/I-45, pp.231~239, 1998.10
- 5) 佐藤忠信, 土岐憲三, 橋本雅道: 構造物の地震応答における自己学習機能を有する震動制御, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.115~124, 1993.7
- 6) 野田茂: 遅延時間を考慮した非線形構造物の地震応答の予測制御, アクティブ制震(振)シンポジウム論文集, pp.17~24, 1992.3
- 7) 小堀鐸二: 制震構造 理論と実際, 鹿島出版会, pp.76~78, 1998.10

(1999年4月23日受付)