I－514　地震波を受ける骨組構造物の最適自動制御

名古屋大学　学生会員　○林　保弘
名古屋大学　正会員　馬場　俊介
名古屋大学　正会員　二宮　公紀
名古屋大学　正会員　梶田　建夫

1　序論

今日工学一般に広く浸透し始めた自動制御は、積極的に信号を離散化しコントロールを行なおうとするディジタル制御の立場を取っている[1)]。しかし、電気・機械の分野と異なり、系の巨大さという点から従来のディジタル制御の手法をそのまま構造物の解析に用いると、行列指数関数の形で表される制御行列の性質が悪いため、数値計算における安定性や精度の点で不利になる[2)]。著者らは、「振動解析の技法として汎用されている複素モーダルアナリシスを最適制御の状態方程式に適用することにより、行列指数関数の形での式展開を回避する」という新しい方法を提案してきた[3)]。今回この最適自動制御システムを平面骨組構造物の減振対策に適用し、地震時の制御の有効性を検討した。

地震時や強風時にのみ制御を行なうこの方法を用いると、構造物の設計では常時荷重のみを考慮すればよいことになる。更に構造物全体の設計とは無関係にコントロール部分の性能を強化するだけで現行設計法よりも再現確率の小さな地震・強風にも対応できる。これらは結果としてより安全かつ経済的ですっきりとした構造物を実現する可能性につながると期待される。最近、建設業界を中心として注目されている「免震構造」は、本格的な最適自動制御の第一歩である。

2　制御理論

構造物をＦＥＭの手法によって有限個の要素を用いて離散化して表示すると、状態方程式は最終的に次に示す形式の一階の微分方程式となる。

$$A\dot{X}+BX=CU+DF \tag{1}$$

ここにXは、変位xと速度$\dot{x}$を合成した状態ベクトルであり、

$$A=\begin{bmatrix}0 & M\\ M & 0\end{bmatrix}\qquad B=\begin{bmatrix}-M & 0\\ 0 & K\end{bmatrix}\qquad \begin{aligned}C&=[0\quad E_u]^T\\ D&=[0\quad E_f]^T\end{aligned}$$

である。M、Kはそれぞれ質量マトリクス、剛性マトリクス、E_u、E_fは制御力U、外力Fの各節点への配分を表すマトリクスである。ここで変数変換を行い、一般化変位Qを導入する。即ち、

$$X=\Phi Q=[\phi\omega\quad \phi]^T Q \tag{2}$$

である。ここに、ϕ、ωはそれぞれ系の固有ベクトル、固有値からなるマトリクスである。複素モーダルアナリシスの手法を用いて、式(1)の係数マトリクスを対角化し、離散化された漸化式の形で解を求める。さらに系のハミルトニアンHを計算し、これを未知量で偏微分することにより、最適制御力Uが得られる。最終的には、図1に示すような流れで計算が行われる。

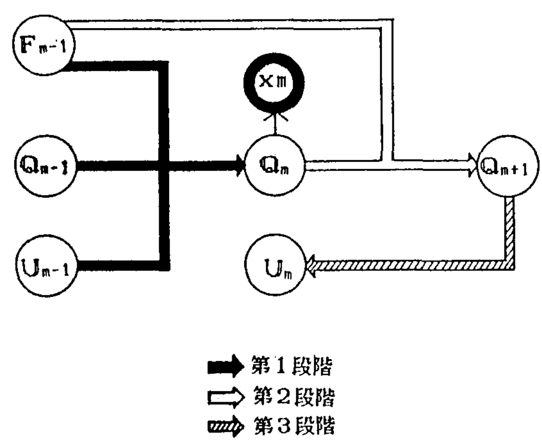

図1：制御力Uを求めるルーチン

3　骨組構造物の振動問題への適用

支点を固定した１層１スパンの平面骨組構造物の水平部材中央に、一定の水平集中力Pを作用させた場合に、適当な制御を行うことを確認した上で、ここでは、模擬地震（エルセントロ地震のデータを使用）が作用する場合を想定し、揺れ始めから20秒間地震荷重を

与えて、数値シミュレーションを行った。制御は、構造物の互いに隣合わない２節点間にそれぞれ一本の筋交いを挿入し、筋交いが縮む方向にのみ制御を行うものとする。各図において、上側の図の実線は荷重作用点の水平方向の変位応答、破線は制御を行わない場合の変位応答、下側の図はその際必要とされた制御力の応答で、太線が一方の筋交いの、細線がもう一方のそれぞれ応答を表す。また変位応答図の縦軸は無制御時の最大変位に対する百分率、制御力応答図のそれは外力の最大値に対する百分率である。

制御における振動の収れんの早さと制御力の大きさは、ハミルトニアンH中の重み関数の影響を受ける。この関数値をパラメータαで代表させ、αを変化させて系の地震波による応答の相違を比較検討する。図2～4によりαの値によって制御状態がどのように変化するかを見て取ることができる。αを大きくする、つまり制御力が大きくなることを許容するほど、振動の急速な収れんが実現する。αは、制御後の変位と制御力との大きさのバランスを規定するものであり、$0 \leqq \alpha < \infty$の範囲で選択すればよい。$\alpha = 0$ は無制御状態、$\alpha \to \infty$のときは無変形制御状態にそれぞれ相当する。実際に制御させる場合は、変位を無制御時の変位の何パーセント程度に抑えるかの目標値を決め、それに相当するαを与えてやればよい。

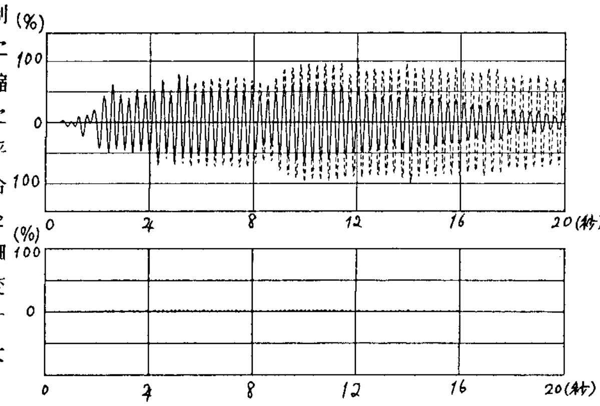

図2：地震に対する応答（$\alpha = 5.0 \times 10^{-5}$）

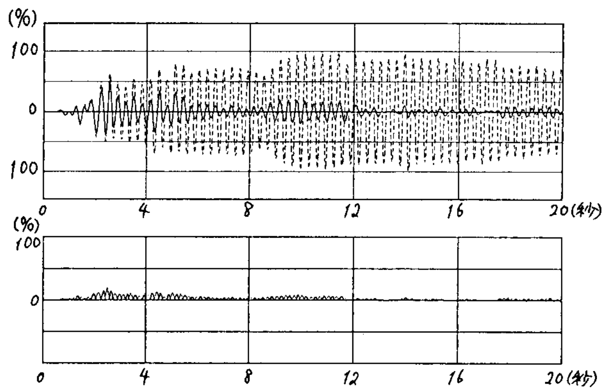

図3：地震に対する応答（$\alpha = 4.0 \times 10^{-4}$）

4 結論

今回、構造物の地震時における最適自動制御に複素モーダルアナリシスを導入するという新しい手法を平面骨組構造物に適用することを試み、重み関数を適切に選ぶことにより変位を希望するレベルまで短い時間で低減することができる、という結論を得た。今後の検討課題として、重み関数の最適値を考察することを含めて、それらパラメータと制御特性との関係をより明確にすること、減衰を考慮した状態式の解析、固有周期がさらに短い多層階骨組構造物における制御状態等の観察などが望まれる。

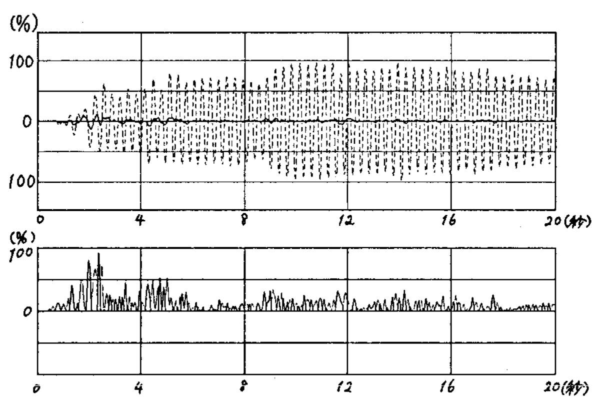

図4：地震に対する応答（$\alpha = 2.0 \times 10^{-2}$）

参考文献

1)美多　勉：デジタル制御理論、昭晃堂、1984

2)Baba,S.,Ninomiya,K.,Kajita,T.:Servo-strengthning system in large scale suspension bridge, Proc. 13th IASTED Inter. Conf. of Modelling and Simulation,Lugano,PP.341-344,1985

3)馬場　俊介、二宮　公紀、梶田　建夫：土木構造物の最適自動制御、土木学会論文集（投稿中）