

I-447 遅延時間を考慮した地震応答の予測制御

日立製作所(株) 正員 近藤 良平
鳥取大学工学部 正員 野田 茂

1. まえがき

最近, 地震動や構造物の振動応答をセンサーで感知し, 振動制御を行うアクティブコントロールが実施されつつある。その際, 制御装置の作動時刻と地震動・振動応答の時刻は一般に異なる。遅延時間が存在する理由としては, 地震動と振動応答の測定結果の情報伝達の遅れ, 制御力の計算には時間がかかること, および制御装置の追従能力に問題があること, などが考えられる。

本研究では, まず, 測定地震動をARモデルで表わし, 現時刻から少し将来の地震動と振動応答をカルマンフィルターを用いて予測する。その結果を用いて, 制御力の遅延時間を考慮した逐次型最適予測制震法を提案し, その妥当性を検討する。

2. 研究の方法

- 1) バイリニア履歴系の力学モデルを導入することにより, 非線形多自由度構造物を表現した。
- 2) 最適化の評価関数としては, 制御力の時間遅れを考慮した上で, 現時刻から少し将来の時刻までの振動エネルギーと制御エネルギーの和の2次形式を用いた。現時刻の最適制御力は, この評価関数を最小にするように決定され, 逆時間解析により定式化できる。数学的には, 動的計画法と最適性の原理を用いる。ここでは, フィードバック・フィードフォワード型の予測制御を実施する。
- 3) 制御力の決定に当たっては, 現時刻から将来の評価時間内において, 構造物の振動応答(変位・速度と履歴変位)と地震動の予測値が必要となる。そのため, 地震動は, 現時刻までの観測値を用いて, ARモデルにより表わす。AR係数は, カルマンフィルターを適用することにより, 逐次的に決定する。将来の地震動は, このAR係数を用いると, 状態方程式によって予測することが出来る。
- 4) 振動応答の全てが観測されるのは, 非現実的である。そこで, 観測応答をもとにして, カルマンフィルターの適用により, 未観測の応答量は推定する。将来時刻の振動応答の予測値は, 3)で求めた地震動予測と併せて, 運動方程式を漸化的に処理することにより求めることが可能である。ただし, 時々刻々, 非線形状態を推定しながら, 振動応答の計算をしなければならない。

3. 数値解析結果および考察

本研究では, 非線形多自由度構造物として5質点系を扱い, 最上階に制御装置を取り付けた。対象とした構造物は, 特に最上階が揺れ易い構造をしており, また強い非線形性を示す。地震入力加速度としては, El centro波形を用いた。計算は0.005秒間隔に実施した。

実地震加速度をARモデルで表わし, カルマンフィルターを適用してAR係数(次数5)を求めた。その結果, 物理的に意味ある係数が得られた。カルマンフィルターによる推定地震加速度と実データはほぼ一致しており, 将来の地震動を的確に予測することが可能である。

図1は, 無制御時における最上階質点の変位応答を示したものである。塑性変形のために, 永久変位が生じている。最上階は揺れやすい構造となっているので, 相対変位は20cm近くにも達している。このため, 最上階の制震を行う必要のあることがわかる。

図2は, 制御したときの最上階質点の変位応答である。図中(a)は制御力に遅延時間が存在しないときの, 同図(b)は0.2秒の時間遅れがあるときの結果である。評価関数中の制御力の重み係数Rは 10^{-4} としている。図1と比べると, 制御することにより, 応答の抑制効果が顕著である。また, 無制御時に生じていた塑性変形も解消されている。ただし, 遅延時間の影響により, 制御力の時間遅れが大きくなれば, 制震効果は劣化していることがわかる。それでも, 無制御時と比較すれば, 地震応答はかなり小さくなっている。

図3は、最上階質点に加えた制御力を示したものである。図(a)は制御入力に時間遅れのない場合、(b)は遅延時間が0.2秒存在する場合の制御力である。図(a)と(b)の比較から、図(b)の制御力には時間遅れが存在しており、最大振幅も若干小さくなっていることがわかる。しかし、遅延時間の有無により、制御力の波形はそれほど大きく変化していない。このことは、本アルゴリズムの有効性を示唆している。

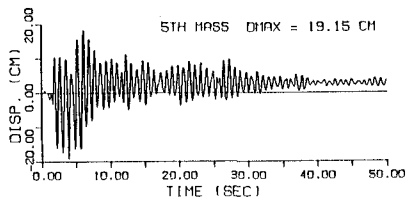
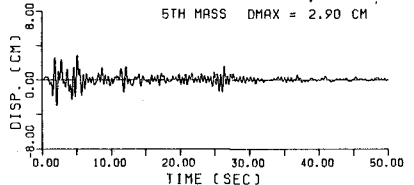
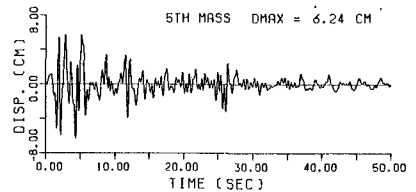


図1 無制御時の最上階質点の変位応答

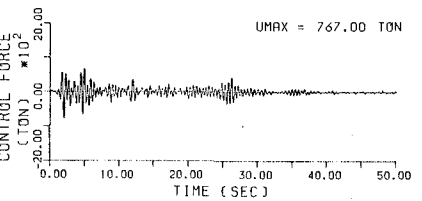


(a) 遅延時間 なし

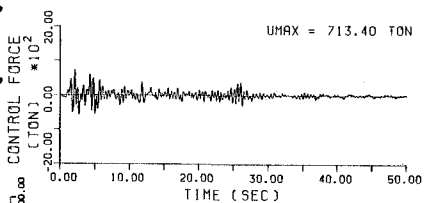


(b) 遅延時間 0.2 秒

図2 最上階質点の変位応答



(a) 遅延時間 なし



(b) 遅延時間 0.2 秒

図3 最上階質点に加えた制御力

参考文献

- 野田茂：非線形履歴構造物の地震応答の即時的最適制御，鳥取大学工学部研究報告，第21巻第1号，pp.233～248，1990年11月。

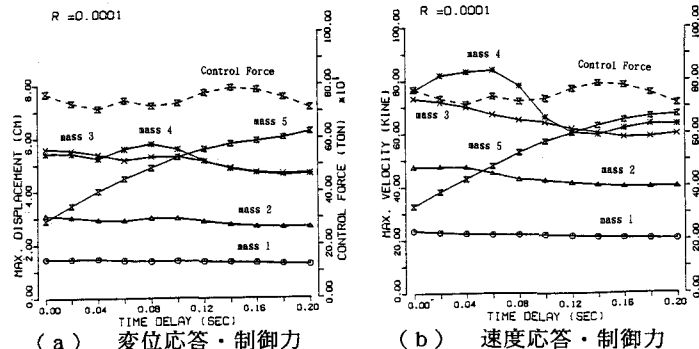
図4は、0秒から0.2秒まで0.02秒おきに遅延時間を変化させたときの最大地震応答と最大制御力を示したものである。図中(a)は変位応答、(b)は速度応答である。同図から、図2と図3の関係が理解できる。制御力の遅延時間が増加しても、質点1から3の応答は極端に変化していない。

制御力に遅延時間が存在すれば、制御力と振動応答の間に位相が出現する。位相によって、振動のモードは変化することが考えられる。対象とした構造物の微小振動時の固有周期は、1次で0.8秒、2次で0.44秒、3次で0.23秒である。この周期は、非線形状態や制御力の遅れによって変化する。制御力の存在は、本質的に、構造物の動特性(周期，減衰，モード)を変化させることを意味する。

図4より、制御力の遅れが大きくなっても、最大制御力はそれほど大きくなっていない。最上階質点の最大応答は増大の傾向にある。遅延時間に依存して、制御力が大きくなると、質点4の応答は小さくなり、また制御力が小さくなると、応答は大きくなっている。上述したように、時間遅れによる予測制御力に伴い、動的特性の変化が生じたためである。

4. あとがき

本研究では、制御力の遅延時間を考慮して、非線形履歴構造物の地震応答の予測制御法を提案した。方法論的には、ARモデル、カルマンフィルター、動的計画法と最適性の原理を用いた。数値シミュレーションの結果、制御力の遅延時間が増加するにつれて、制震効果は劣化し、制御力は多少大きくなるものの、極端な振動抑制とはならないことが明らかになった。



(a) 変位応答・制御力

(b) 速度応答・制御力

図4 遅延時間の違いによる最大地震応答・最大制御力