

## I-475

## 非線形履歴構造物の地震応答のアクティブコントロール

鳥取大学大学院 学生員 久保田 秀樹

鳥取大学工学部 正 員 野田 茂

## 1. はじめに

強震時において、構造物は非線形応答を示す。応答が弾性限を越えても、その後の反転挙動のために直ちに破壊には至らない。かえって復元力特性において履歴ループを描き、地震動の入力エネルギーの一部を吸収する能力を有する。最近、構造物の振動応答を積極的に制御するための研究が活発である。しかし、このような構造物の非線形性を考慮した制震の研究はそれほど多くはない<sup>1)</sup>。そこで、本研究では、非線形多自由度構造物の制震システムを構築する。具体的には、逐次型開閉ループ制御の手法により、非線形振動応答の低減を図るとともに、非線形性が構造物の制震に与える影響について考察する。

## 2. 研究の方法

機械系などの制御においては、最適制御のために、リカッチ方程式の解を必要とする。しかし、地震入力には前もって既定されないため、この考えを構造応答の制震問題に適用することはできない。通常の最適制御理論とは異なり、地震特有の問題として制御手法を定式化する必要がある。文献2)の方法はその一つの有力な手法である。

本研究では、非線形多自由度構造物として、図1のように質点間がバイリニア履歴型復元力特性を有する非線形バネで模擬できるものを対象とし、アクティブコントロールを実施した。各質点間の相対変位 $x_i$ は、クーロンスライダが付加されたバネの伸び $w_i$  [剛性 $(1-\alpha_i)k_i$ 、降伏比 $\alpha_i$ 、微小線形振動時の剛性 $k_i$ ]とクーロンスライダの滑り $v_i$ に分けた。バイリニア系の運動は、降伏変位 $Y_i$ を介して、次式で規定される。

$$\ddot{w}_i = \ddot{x}_i \{1 - H(\dot{x}_i) H(w_i - Y_i) - H(-\dot{x}_i) H(-w_i - Y_i)\}$$

状態変数としては、構造物の層間変位 $x_i$ と層間速度 $\dot{x}_i$ および履歴変位 $w_i$ を用いる。このようにすると、非線形系であっても、物理的に系の状態方程式が定式化できる。

ここでは、文献2)の考え方を踏襲し、非線形時の逐次型最適制震システム（開閉ループ制御）を構築した。最適化の評価関数としては、構造応答のエネルギー（運動エネルギーとポテンシャルエネルギー）と制御力のエネルギーを考え、時間依存性に設定した。このようにすれば、変位と速度応答（フィードバック量）および地震動（フィードフォワード量）を情報源として、制御力が決定できる。このためには、状態方程式の解を制約条件として加え、ハミルトニアンを定義し、ラグランジェの未定乗数法を利用して、評価関数を最小にすればよい。なお、指数行列を求める必要があるが、ここでは級数展開による方法によった。

## 3. 解析結果と考察

対象構造物は、図1に示すように、20階建てのせん断型ビルを3質点系にモデル化した。この系の線形時動特性は大過ないように決めた。減衰マトリックスは、非連成化のために、剛性比例形とした。各質点間の降伏変位（基準降伏変位）は、下から上に向かって、10、12.2、12.4 cmとした。入力地震波は、1940年 Imperial Valley 地震時の El Centro で記録された加速度波（NS成分）である。

制御力はアクティブダンパー方式によった。この力については、最上階の質点に加える場合（タイプ1）と各質点を加力する場合（タイプ2）の2通りを考えた。ここでは、評価関数中の制御力の重み係数 $R$ 、降伏変位比（降伏変位／基準降伏変位） $\beta$ と降伏比（降伏剛性／初期剛性） $\alpha$ の変化が振動応答や制御力に及ぼす影響を調べた。なお、 $R$ 、 $\beta$ と $\alpha$ は各制御力および質点とも同一値とした。以下、主に、タイプ1の制御について考察する。

El Centro NS波（原入力波形）による非線形性（ $\alpha = 0.1, 0.5$ ）の影響はなく、線形時のものとほぼ

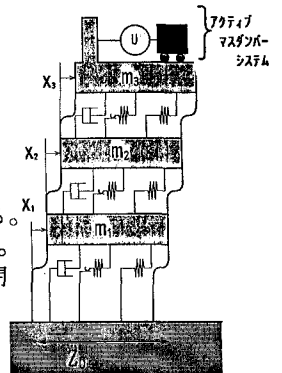


図1 対象モデル

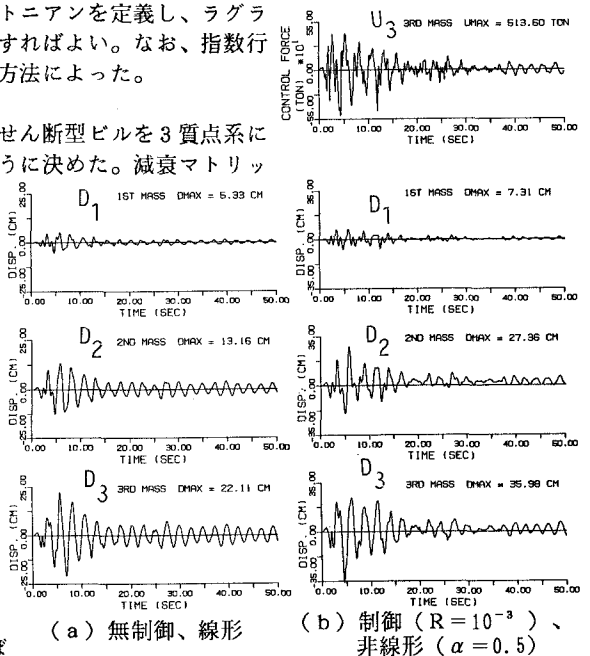


図2 変位応答と最上階制御力

同じになった。これは、入力強度に対し、各質点間の相対変位が降伏変位レベルを越える機会が少なく、非線形履歴復元力特性の効果が見られないためである。この場合、 $R$ を変化（ $10^{-3} \sim 10^{-1}$ ）させたときの、振動応答（変位・速度）と制御力の関係は次のようになる。 $R$ が小さくなるほど、制御力は反比例的に増大するが、応答は小さくなる。両者は、いわゆるトレードオフの関係になっている。 $R$ の変化に対する応答の感度は、上の質点ほど大きい。構造物重量の約5%の制御力（2000 ton程度）を加えることで、制御しない場合と比べて、最上階質点の変位は半分以下になる。さらに、質点1および質点2とも、振動応答は小さくなる。しかし、その制震効果は、振動モードとの関係で、下の質点ほど弱い。

入力強度を大きくするために、原波形の振幅レベルを倍（修正入力波形）にして、検討してみた。図2（a）は、原入力波形に対する無制御時の変位応答である。図2（b）には、修正入力波形に対する各質点の非線形変位応答（ $\alpha=0.5$ ）と最上端質点における制御力（ $R=10^{-3}$ ）を示す。制御力は質点3の速度応答と同一の波形となっている。この場合、特に質点2において、塑性変形に伴う残留変形が若干生じているが、その値は小さい。

図3は、評価関数中の制御力の重み $R$ を変化させたときの、修正入力波形に対する非線形（ $\alpha=0.5$ ）変位応答と制御力の最大値を示したものである。制御力は、現時刻の振動応答（変位・速度）と入力地震動によって決まる。従って、 $R$ が小さいほど、すなわち制御力が大きくなるほど、系の剛性は硬くなり、減衰量が増す。そのために、応答は小さくなるとともに、短周期の特徴を示す。

修正入力波形に対し、非線形時における図3と同様な線形時の結果を求め、比較検討した。各質点間で、非線形履歴復元力特性の効果はまったく異なる。質点1では、非線形応答が線形応答を上回っていた。ただし、 $R$ が $10^{-4}$ 弱においては逆の傾向を示した。質点3では $R$ が大きいと（ $R > 10^{-4}$ ）、線形応答が常に非線形応答を上回り、かつ最大応答に達する時間も非線形系よりかなり遅れた。一方、 $R$ が $10^{-4}$ ぐらいでは、非線形応答が線形応答よりも大きい。これらの挙動は、制御力と履歴復元力特性の複合効果によって、固有モード形状の変化となって現れてくるためと説明される。

図4は、修正入力波形に対し、各質点で制御を行ったとき（タイプ2）の非線形（ $\alpha=0.5$ ）変位応答と制御力である。質点2と質点3の最大制御力はほぼ同じである。質点1の最大制御力はこれらに比べて小さい。最上端質点の制御力はその質点の速度波形と同一だが、他の質点のそれは複雑な波形となる。 $R$ が小さくなるほど、変位波にはパルス的な波が目立つ。従って、速度波にはかなり高周波の波が乗り、全質点の制御力は速度波に近い形状を示す。なお、 $R$ が小さくすると、全質点の変位と質点3の速度は小さくなる。逆に、質点1と2の最大速度振幅は増大する傾向にある。図3の結果と比べると、 $R$ が小さいほど、全質点制御の応答が最上階制御のそれよりも大きくなっている。これは、上述したようなパルス波によるためである。アクティブコントロール手法としては、数値解析および具現化において、工夫が必要である。

図5は、降伏変位レベルの変化が制震効果に及ぼす影響を調べたものである。横軸に $\beta$ をとり、 $\alpha=0.5$ 、 $R=10^{-3}$ とした。地震動としては修正入力波形を用いた。降伏レベルが小さくなると、非線形性の影響が強くなる。振動応答を小さくするには、履歴吸収エネルギーの効果以外に、制御エネルギー（すなわち制御力）を大きくしなければならない。原入力波形を用いると、 $\beta$ が小さくなるほど、制御力および振動応答は低減する。図5の場合には、逆に、制御力は増大し、質点2と3の最大速度も大きくなる傾向にある。

#### 4. あとがき

本研究で導入した逐次型制震システムは、非線形多自由度構造物にも容易に適用でき、汎用性が高く、構造物の非共振化を図ることができる。今後は、地震動、振動応答やコントロールデバイスなどに対し、不確定性・あいまいさの考えを積極的に取り入れた制御を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 杉山和久・土岐憲三・佐藤忠信：第20回地震工学研究発表会講演概要、pp.501～504、平成元年7月。
- 2) J.N.Yang, A.Akbarpour and P.Ghaemmaghami : Journal of Engineering Mechanics, A.S.C.E., Vol. 113, No. 9, pp.1369～1386, September 1986.

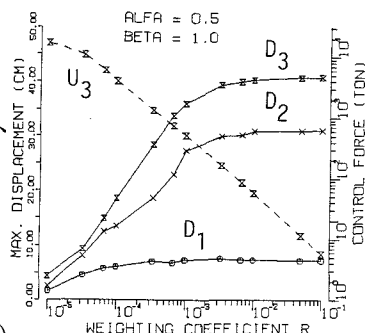


図3 重み係数 $R$ が変位応答と最上階制御力に及ぼす影響（非線形 $\alpha=0.5$ 、修正入力波形）

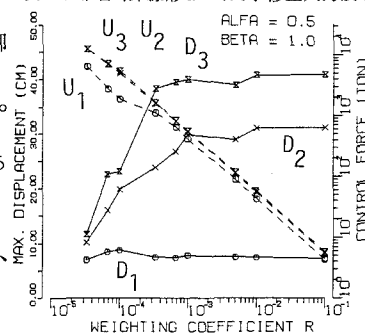


図4 重み係数 $R$ が変位応答と全質点での制御力に及ぼす影響（非線形 $\alpha=0.5$ 、修正入力波形）

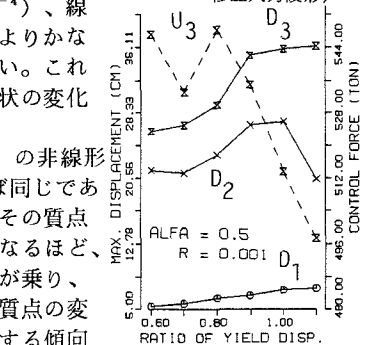


図5 降伏変位比 $\beta$ が変位応答と最上階制御力に及ぼす影響（ $R=10^{-3}$ 、非線形 $\alpha=0.5$ 、修正入力波形）