

## (221) 制震実験モデルのパラメタ同定

東電設計(株) ○吉田郁政 黒瀬浩公 福井史朗

### 1. まえがき

土木・建築構造物への制震技術の適用性の研究が、数値シミュレーションと実験の両側面から数多く行われている。制震の実験あるいは実構造物への制震技術の適用を行う場合、対象構造物の動的特性を的確にとらえておくことが重要である。アクティブマスダンパー（以下AMDと記す）による制震のモデル実験を行うに当たって、その実験モデルの動的特性の同定を行なった。用いた同定手法は星谷らによる繰り返しカルマンフィルタ<sup>1)</sup>である。対象としたパラメタはモデルの剛性と減衰であり、AMDの動的特性の同定は対象外とした。検討ケースとしては、1) AMD固定、振動台加振に対する計測記録による同定、2) 振動台固定、AMD加振に対する計測記録による同定、の2種類を考えた。実構造物では1)は常時微動、地震観測記録からの同定、2)は起振実験による同定に相当すると考えられる。

### 2. 制震実験モデルの概要

実験に用いた入力地震動は2種類であり、その加速度時刻歴と加速度フーリエスペクトルを図-1、2に示す。入力1は比較的広い範囲の周波数成分を含んでいるのに対し、入力2は3 Hz付近に卓越した成分を有している。振動台に設置された実験モデルは図-3に示すように3枚の鋼板からなり4本の鋼棒で支えられている。高さは各層間31 cm、計93 cmで、重量は約85 kgfである。AMDは最上層に取り付けられており、可動マスの重量は3.5 kgfである。各層及び振動台には速度計が、AMDの可動マスには加速度計が取り付けられている。

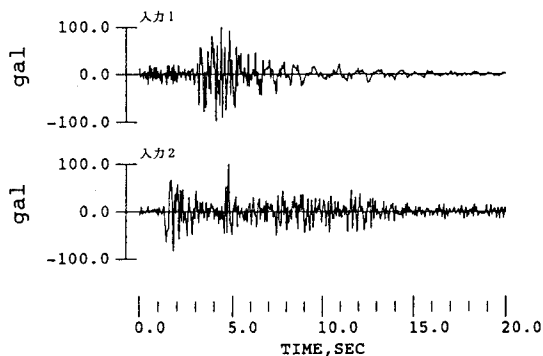


図-1 入力の加速度時刻歴

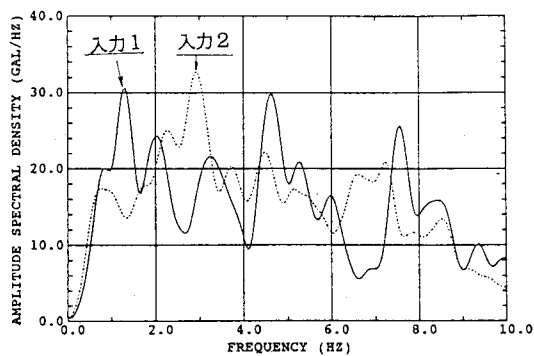


図-2 入力の加速度フーリエスペクトル

### 3. 振動台加振によるパラメタ同定

AMDを固定して、振動台による加振を行い各層の応答時刻歴を求めた。その際の入力は2.に示した2波である。用いたパラメタ同定の手法は繰り返しカルマンフィルタであり、定式化の方法は星谷ら<sup>1)</sup>と同様である。ただし、未知量の共分散マトリックスについては、グローバルイタレーションで更新せず初期化した点で、星谷らのEK-WGI法と異なる。パラメタ同定の対象としたのは各層の剛性と減衰であり、剛性の初期値は材料定数から定め、減衰については1%と仮定した。

まず、全層の応答時刻歴を観測量としてパラメタ同定を行った。入

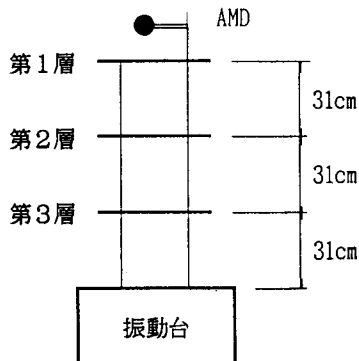


図-3 実験モデル

力1に対する収束過程を図-4に示す。用いた手法はオンライン方式なので各タイムステップごとにパラメタが改良される。剛性は10秒ぐらいで、減衰は15秒ぐらいで安定している。最終時刻のパラメタを初期値とした同定を収束値が得られるまで繰り返した。今回行なったケースではだいたい数回のイタレーションで収束した。第1層についての実験による応答時刻歴と、初期モデル（同定を行う前のモデル）及び改良モデル（同定計算の収束結果のモデル）による時刻歴の比較を図-5に示す。初期モデルも最初の10秒ぐらまではよく一致しているが、後半にずれが見られる。それに対し、改良モデルでは後半部もよく一致している。次に全層についてのスペクトル比（各層の応答／入力）の比較を図-6に示す。スペクトル比も全体的に改良されており、特に1次のピークの適合度が改善されていることがわかる。

入力2に対しても同様にパラメタ同定を行った。同定された剛性、減衰を図-7に示す。結果は、入力1の場合とほぼ同様である。剛性は上から順に大きい傾向が見られる。減衰については同定結果のバラツキは大きい、ほぼ一様の値が得られた。次に1層の計測記録だけを用いてパラメタの同定を行った。同定結果の剛性、減衰も図-7に示した。第1層の計測記録だけを用いた場合は、入力1に対しても入力2に対しても収束値が得られなかった。図-6に示したスペクトル比からわかるように、第1層の応答は1次モードが非常に卓越しており、高次モードの情報が乏しいことが原因と考えられる。第2層あるいは第3層の計測記録を用いた場合は収束しており、剛性についてはこれまでとほぼ同様な結果が得られた。減衰についてはばらつきが大きく、剛性の同定に比べて不安定なことがわかる。

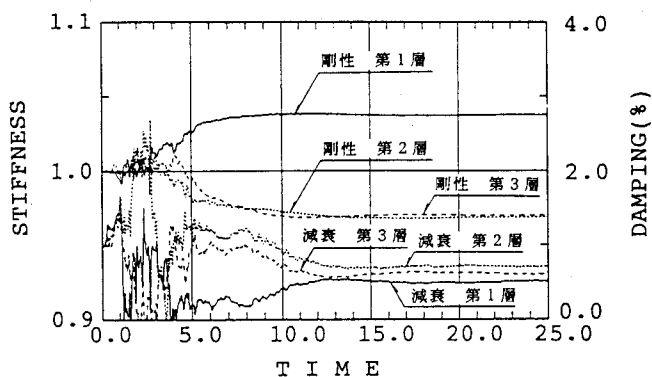


図-4 収束過程（入力1、全層観測）

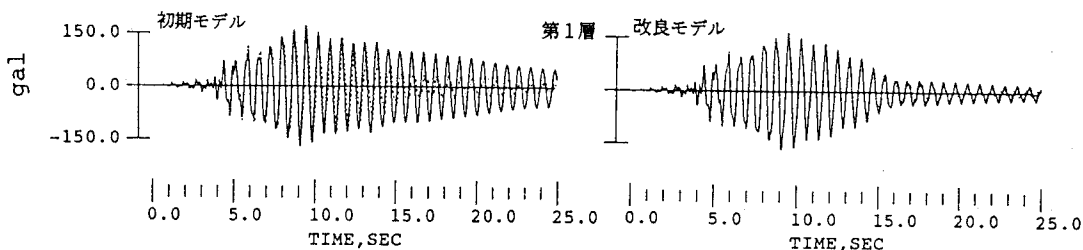


図-5 初期モデル及び改良モデルによる加速度応答時刻歴の比較（振動台加振）

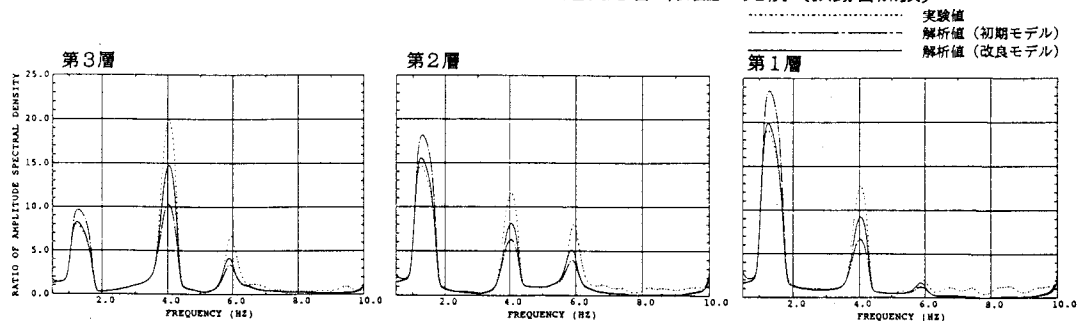


図-6 初期モデル及び改良モデルによるスペクトル比の比較（振動台加振）

#### 4. AMD加振によるパラメタ 同定

次に振動台を固定してAMDによる加振を行い応答時刻歴を求め、剛性と減衰の同定を行った。前節と同様に2種類の入力地震動、観測点が3点の場合と1点の場合、その組み合わせで計8ケースについて同定を行った。第1層を観測点とした場合は入力2で、第3層を観測点とした場合は入力1で収束値が得られなかった。それ以外のケースでは数回のグローバルイタレーションで収束している。入力1、全層を観測点とした場合の応答時刻歴の比較を図-8に、入力に対するスペクトル比の比較を図-9に示す。また同定された剛性、減衰の比較を図-10に示す。初期モデルによる結果は時刻歴もスペクトル比も実験結果と傾向が異なる。振動台加振の場合は1次のスペクトル比は実験よりも大きく、2、3次のスペクトル比は逆に小さかったのに対し、AMD加振の場合はスペクトル比全体が実験結果より小さくなっている。時刻歴も全体的に実験結果よりも振幅が小さい。改良モデルでは時刻歴の一致度も良好であるし、スペクトル比も1次、2次はよく一致している。全層を観測量とした同定結果は、剛性がやや小さいものの振動台加振の場合とほぼ同様の結果が得られた。1層だけを観測量とした場合にも上部の方が剛性が大きいという特徴はとらえられているが、振動台加振の場合に比べ（減衰も含め）同定結果のばらつきが大きい。

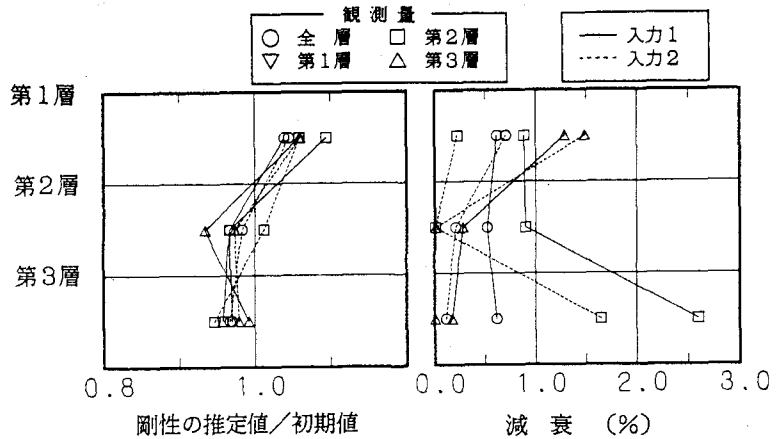


図-7 同定された剛性、減衰の比較（振動台加振）

入力1、全層を観測点とした場合の応答時刻歴の比較を図-8に、入力に対するスペクトル比の比較を図-9に示す。また同定された剛性、減衰の比較を図-10に示す。初期モデルによる結果は時刻歴もスペクトル比も実験結果と傾向が異なる。振動台加振の場合は1次のスペクトル比は実験よりも大きく、2、3次のスペクトル比は逆に小さかったのに対し、AMD加振の場合はスペクトル比全体が実験結果より小さくなっている。時刻歴も全体的に実験結果よりも振幅が小さい。改良モデルでは時刻歴の一致度も良好であるし、スペクトル比も1次、2次はよく一致している。全層を観測量とした同定結果は、剛性がやや小さいものの振動台加振の場合とほぼ同様の結果が得られた。1層だけを観測量とした場合にも上部の方が剛性が大きいという特徴はとらえられているが、振動台加振の場合に比べ（減衰も含め）同定結果のばらつきが大きい。

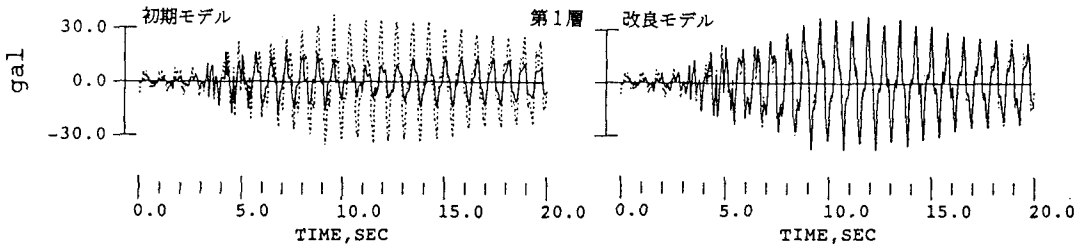


図-8 初期モデル及び改良モデルによる加速度応答時刻歴の比較（AMD加振）

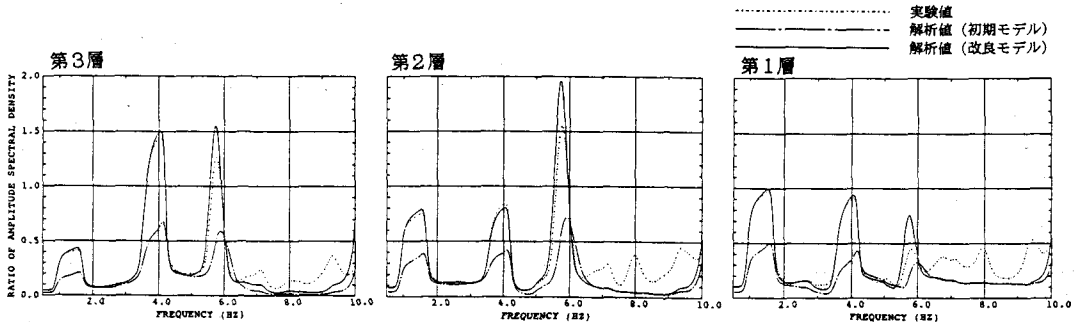


図-9 初期モデル及び改良モデルによるスペクトル比の比較（AMD加振）

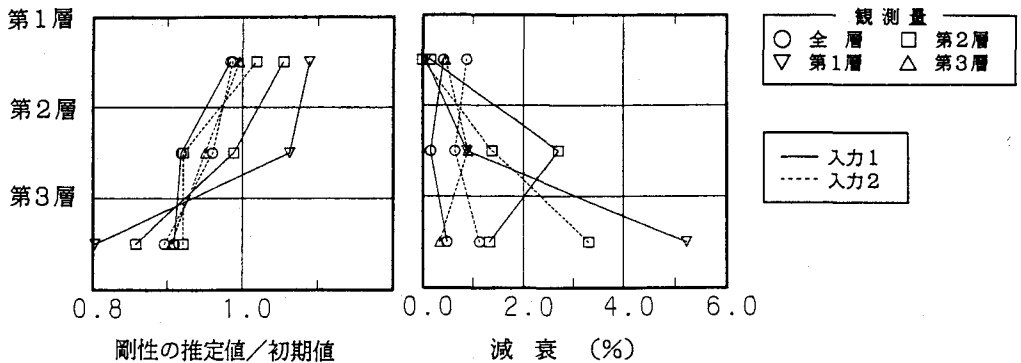


図-10 同定された剛性、減衰の比較 (AMD加振)

## 5. 制震実験のシミュレーション

改良したモデル (全層観測、振動台加振のケース) を用いてAMDによる制震実験のシミュレーションを行った。制御実験は、Direct Velocity Feedback による制御ゲインを数種類設定し、入力1、2に対して行った。シミュレーションで求めたトレードオフ曲線と実験結果の比較を図-11に示す。縦軸は応答値 (状態量) の rms 値を無制震の場合の応答で基準化した量、横軸は制御力の rms 値を入力加速度の rms 値に構造物の総質量を乗じた量で基準化した量を表している。従って縦軸の1.0は制震効果が全くないことに、横軸の1.0は地震外力を完全に相殺するのに必要な力に相当する。図-11によると、シミュレーション結果と実験結果はほぼ一致しており、シミュレーションによって制御成績の評価ができることがわかる。

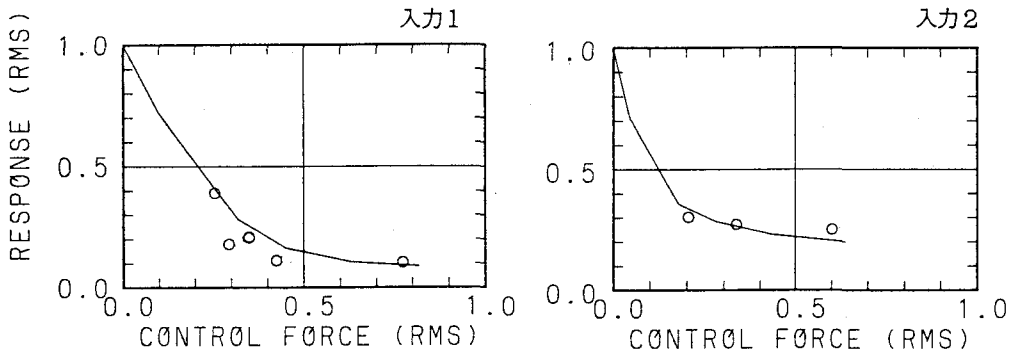


図-11 トレードオフ曲線による実験とシミュレーションの比較

## 6. おわりに

振動台による起振の場合も、AMDによる起振の場合も実験モデルの動的特性を同定することができ、シミュレーションの精度を向上できることがわかった。ただし、観測点が一点の場合は不安定になり、収束が得られない場合があった。また、AMD加振の場合に比べ、振動台加振の場合の同定の方が収束値のばらつきが小さく安定していることがわかった。今回示した例では初期値が収束値に比較的近かったが、初期値を意識的にずらして同定を行なっても同じ収束値を得ることができた。従って、実構造物のように事前に十分な情報がない場合にも当手法が適用できると期待される。制震実験についても、ほぼ良好に数値シミュレーションできることがわかり、その有効性が確認できた。

武蔵工科大学星谷教授には同定問題全般にわたって議論していただき有益な助言をいただいた。京都大学家村助教授には有益なご意見とともに、京都大学で実験を行うに当たって多くの便宜を計っていただいた。また、同大学院生見坂茂範君に実験を行う上で御助力をいただいた。ここに謝意を表します。

**参考文献** 1) 星谷勝・斉藤悦郎：拡張カルマンフィルタを用いた各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, 第339号, 1983