

振動台の破壊試験向け制御法の開発

奥田 幸人¹・前川 明寛²・安田 千秋²・作野 誠³

¹工修 三菱重工業株式会社 高砂研究所 (〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1)

²工博 三菱重工業株式会社 高砂研究所 (〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1)

³三菱重工業株式会社 下関造船所 (〒750-8505 山口県下関市東大和町 2-16-1)

In this paper, we explain a new compensate method named 'online adaptive equalization.' With this method, we identify the characteristic of the shaking table and specimen during real earthquake excitation. To identify the characteristic with short time earthquake data, we use AR model and restrict identification frequency band.

To show effect of this method, we evaluate with 3-D shaking table model. As a result, error of acceleration response spectrum is decreased from 600% to 40%. And identification period is 3 second, we get possibility to realize this method.

Key Words : Adaptive Control, Shaking Table, Collapse Test

1. 緒言

平成7年1月の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）において、建物が倒壊するなど予想を上回る大被害が生じ、これを契機に各種構造物の耐震設計を見直す動きにある。特にこれらの構造物が破壊へ至る過程を解明するには従来のような小規模なモデル試験による耐震性の把握に限界があり、実物規模のモデル試験の重要性がクローズアップされてきた。

このような背景から、科学技術庁防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設¹⁾²⁾など、破壊試験を目的とした振動台が計画されている。本施設の振動台は図-1に示すものであり、破壊試験に必要な大きな加振力を得るため、水平加振機は各5本、垂直加振機は14本の計24本の加振機からなる。また、主な仕様を表-1に示す。

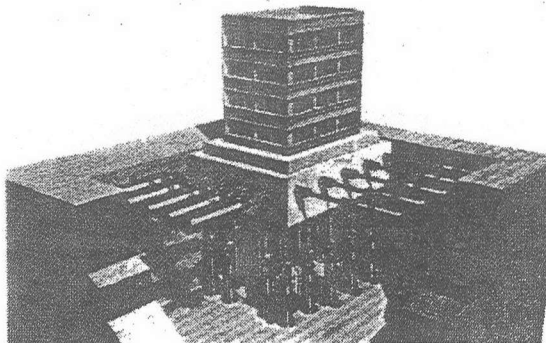


図-1 実大三次元震動破壊実験施設

表-1 実大三次元震動破壊実験施設の主要諸元

	水平方向	垂直方向
最大搭載重量	1200ton	
震動台寸法	20m × 15m	
加振機加振力	450tonf × 5本	450tonf × 14本
最大変位	±100cm	±50cm
最大速度	200cm/s	70cm/s
最大加速度	0.9G	1.5G

破壊試験では供試体の塑性領域で加振を実施するため、加振レベルが大きくなるに従い供試体の特性が大きく変化する。特に、供試体の剛性の低下による共振周波数の低下が発生する。このため、共振周波数の変化を想定していない従来の入力補償を適用することが困難である。

そこで本研究では破壊試験に対しても適用することができるように、加振中の地震波データからオンラインで振動台応答特性を同定し補償する高速適応型入力補償を考案した。本手法は、「短時間の地震波データにより振動台応答特性を同定するため自己回帰(AR)モデルを用いる」、「高域のみ同定結果を使用する」等の特徴をもつ。

本論文では本手法のシステム構成・理論および同定手法について述べ、本手法をシミュレーションにより評価した結果について述べる。

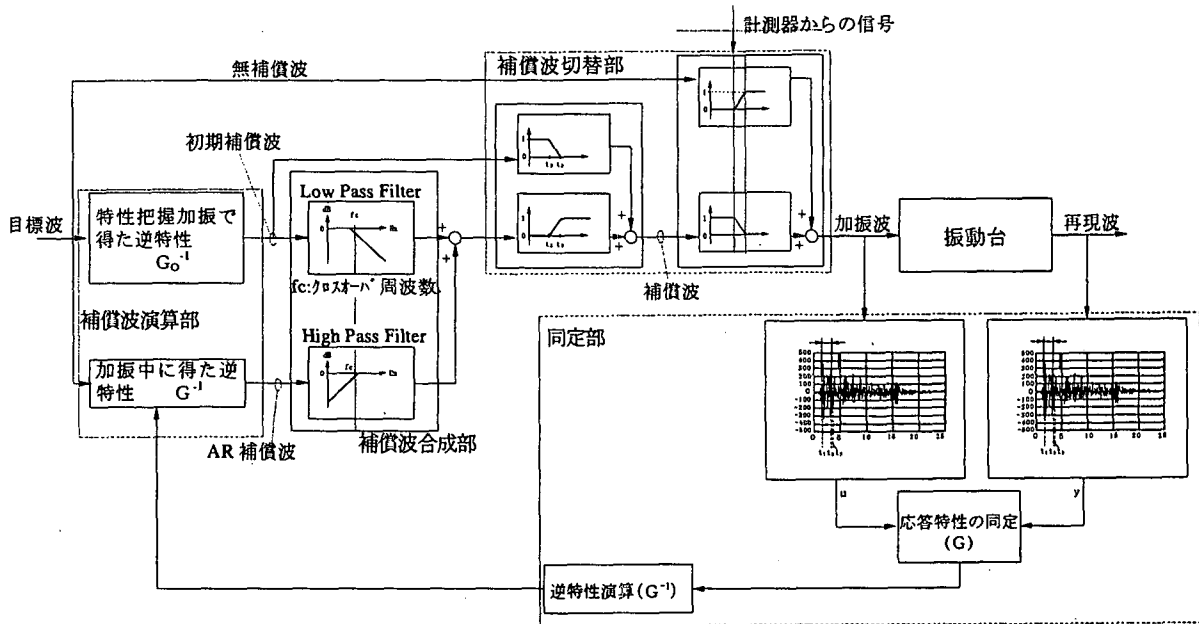


図-2 高速適応型入力補償のシステム構成

2. 高速適応型入力補償

開発した高速適応型入力補償は、加振後に地震波加振結果を用いて同定を行う逐次適応型入力補償³⁾をオンライン化したものである。本手法では応答特性の同定および補償波の生成をオンラインで実施するため、特性把握加振後、直ちに本加振を行う一発破壊試験に適用可能である。以下に本手法のシステム構成と手順を述べる。

(1) システム構成と理論

本手法のシステム構成は図-2 に示す通りであり、ARモデルを用いて地震波データから振動台特性を同定し、逆特性を求める同定部、特性把握加振で得られた応答特性または同定部で得られた応答特性から補償波を算出する補償波演算部、初期補償波とAR補償波を合成する補償波合成部、

および補償波を時間的に滑らかに切替える補償波切替部からなる。

また、本手法の特徴は次の通りである。

- 1) 応答特性の同定は地震波での同定の実績があるARモデルを用いて行う。
- 2) 加振開始直後の低レベル加振区間では特性把握加振で得られた応答特性を用いて生成した加振波（初期補償波）で加振する。
- 3) 加振前に予め設定された高レベル加振前半部のデータで応答特性を同定し、補償波を再計算する。
- 4) 高レベル加振後半部以降は再計算した補償波を用いて加振する。
- 5) 短時間データでの同定が困難な低周波域は初期補償波をそのまま利用する。
- 6) 補償波の切替は波形の連続性を確保するために時間的に内挿して変更する。

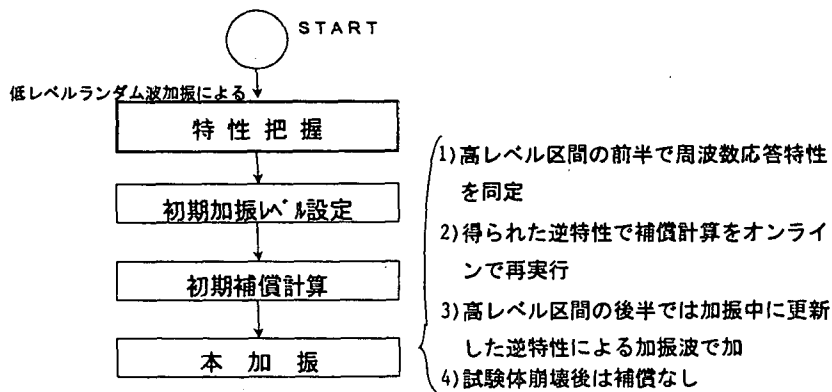


図-3 高速適応型入力補償のフロー

図-3 に高速適応型入力補償のフローを示す。本手法の特徴は本加振が1回のみであることであり、振動台の同定および補償波の更新は加振中にオンラインで実現されている。このため、使用者からみると通常の入力補償加振と同様の操作で本手法を実現することができる。

(2) 同定手法

本手法では、実地震波加振時の実データからリアルタイムで振動台の周波数応答特性の再同定を行う。実地震波は非定常かつ過渡的な信号であるため、短時間のデータ長の時系列データに対してスペクトル推定が可能な AR モデルを用いたパラメトリック推定法（赤池法⁴⁾）により同定している。また、同定に用いるデータの収集開始・終了時間は加振前に設定しておき、データの収集後に直ちに同定演算を実施する。以下に AR モデルを用いた同定手法と、三次元振動台に適用した際の問題を示す。

a) AR モデルを用いた同定手法

周波数応答特性 $G(f)$ は式(1)で推定できる。

$$G(f) = \frac{p_{yx}(f)}{p_{xx}(f)} \quad (1)$$

ここで、 $p_{yx}(f)$ 、 $p_{xx}(f)$ はパワースペクトル密度であり、AR モデルで近似した成形フィルタ $A(f)$ を用いて表すことができる。成形フィルタの係数 a_m は信号の自己相関関数 $R_{xx}(l)$ を用いると式(2)で与えられる。

$$\sum_{m=1}^M a_m R_{xx}(l-m) = R_{xx}(l) \quad (l=1,2,\dots,M) \quad (2)$$

ここで、AR モデルの次数 M を与えるのが赤池法であり、はじめに式(3)で与えられる L を求め、次に $M=1 \sim L$ (L の最大値は 30) に対して式(4)を最小にする M をモデルの次数とする。

$$L = 3\sqrt{N}/k \quad (k \text{ は AR モデルの変数数}) \quad (3)$$

$$FPE(M) = \frac{N+M+1}{N-M-1} \hat{\sigma}^2(M) \quad (4)$$

N : サンプル数

$\hat{\sigma}^2$: ホワイトノイズ $\hat{\xi}_n$ の分散

b) 三次元振動台での同定手法

三次元振動台は並進 (X, Y, Z) と、回転 ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) の計 6 軸の自由度を持つため、同定すべき周波数応答関数は 6 入力 6 出力の計 36 成分となる。前述の AR モデルを用いた同定手法により 6 入力 6 出力の周波数応答関数を求めるこ

とは可能であるが、実地震波には回転成分の目標値が含まれていないため、回転成分に関する項の同定が困難となることが多い。このため、軸間の干渉が小さく 6 入力 6 出力の周波数応答関数の同定が困難である場合には、並進対角項のみをそれぞれ 1 入力 1 出力の関数として同定する。6 入力 6 出力の応答関数行列と 1 入力 1 出力のものを図-4 に示す。この際、各軸間の干渉は全く補償されないが、本研究で対象とした科技厅実大三次元震動実験施設の振動台のように軸間の干渉が小さい場合には問題とならない。

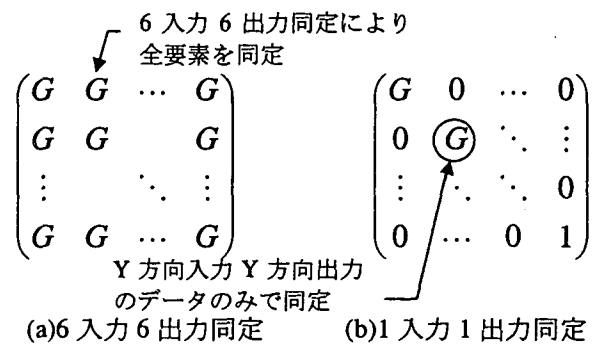


図-4 伝達関数行列

(3) 補償波作成法

高速適応型入力補償では加振開始直後は従来の初期補償波で加振を行い、同定終了後より更新した補償波で加振する。ここで、実地震波により同定された応答特性を用いて補償波が更新されるが、加振中に同定される応答特性は短時間のデータで同定するため低周波域の精度が悪くなる。このため、補償波合成部では高周波域のみ新しい補償波を使用し、低周波域は初期補償波を使用するように補償波を合成する。

また、補償波の切替時に不連続とならないように、初期補償波と新しい補償波の割合を徐々に変えるようにする。

3. シミュレーション評価

(1) シミュレーション条件

高速適応型入力補償を検証するためにシミュレーションによる評価を実施した。制御対象は科技厅の実大三次元震動実験施設を諸元とする線形モデルとした。本施設は加振機が 24 本であるが、モデルでは合計の加振力が等しい 8 本の加振機と

表-2 供試体条件

項目	値
質量	1200ton
固有値 (初期値)	X:3.5Hz, Y:3HzZ:4Hz
固有値 (加振中)	X:2.5Hz, Y:2HzZ:3Hz

した。供試体として表 2 に示す負荷を搭載するものとした。その固有値は実際の建築物に近いものとして、特性把握加振時では約 3Hz、実地震波加振前に既に約 2Hz に低下しているものとした。

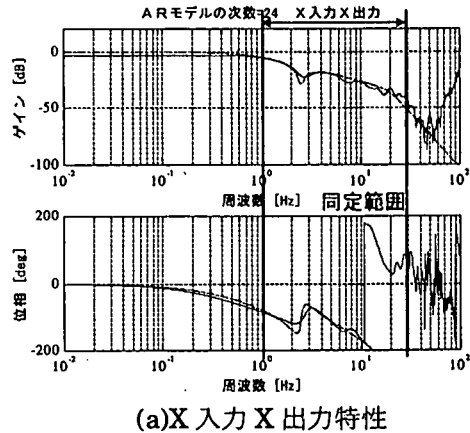
データのサンプリング周期は 100Hz であり、図-5 に示す神戸海洋気象台観測波を入力波とした。その時の同定に用いるデータを採取する時間 (同定時間) は加振開始 3 秒から 6 秒まで 3 秒間とした。

同定で用いる AR モデルの最大次数は計算機の精度限界より 30 次とした。補償波合成部のクロスオーバー周波数は制御対象である振動台の下位制御帯域となる 1Hz とした。また、補償波の切替は 0.5 秒間に変更するものとした。

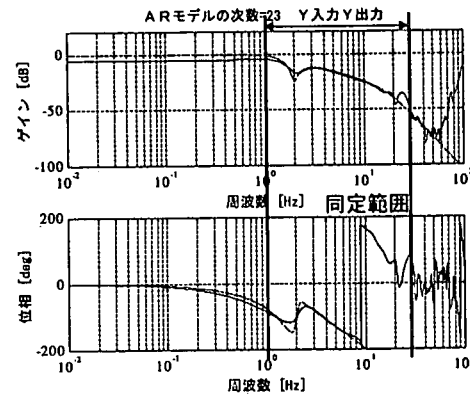
(2) シミュレーション結果

はじめに振動台特性の同定結果について示す。前述の通り同定は 6 入力 6 出力同定と 1 入力 1 出力同定があるが、本諸元の振動台では軸間の干渉が小さく、1 入力 1 出力同定による補償の方が精度が良かった。このため、3 秒間のデータで 1 入

力 1 出力同定を行った結果を図-6 に示す。



(a) X 入力 X 出力特性



(b) Y 入力 Y 出力特性

図-6 実地震波で同定した応答特性

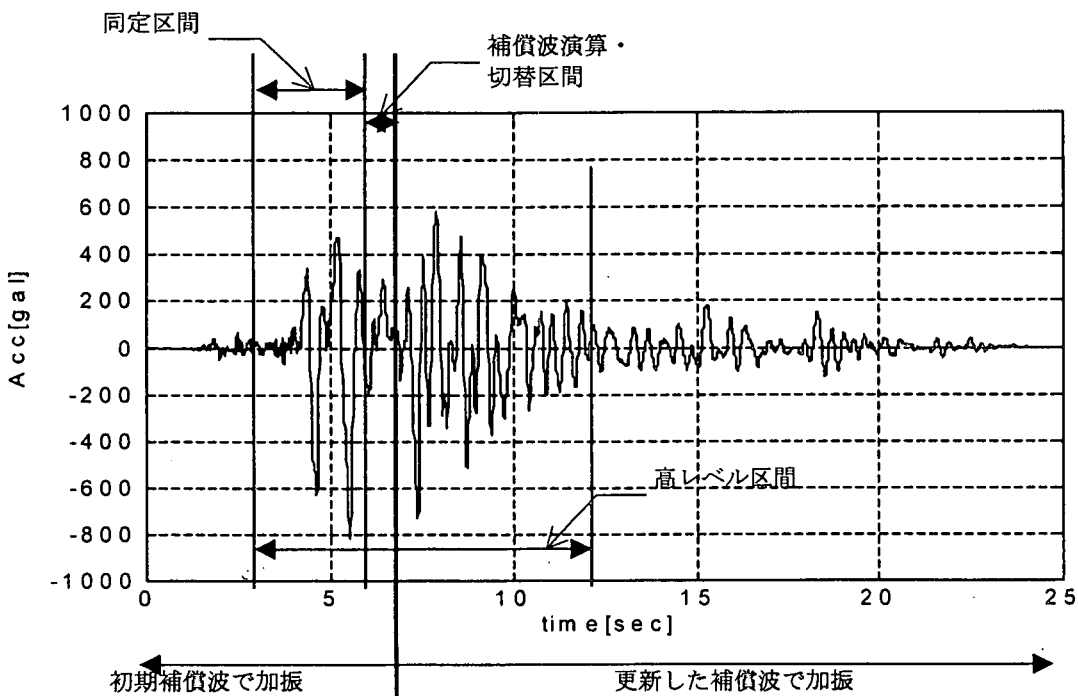


図-5 Y 方向入力地震波 (神戸波)

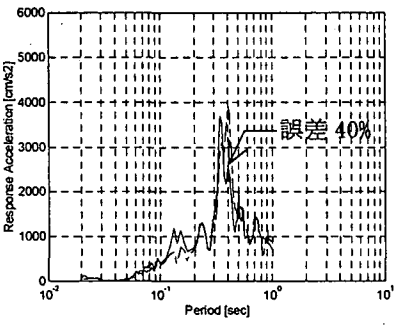
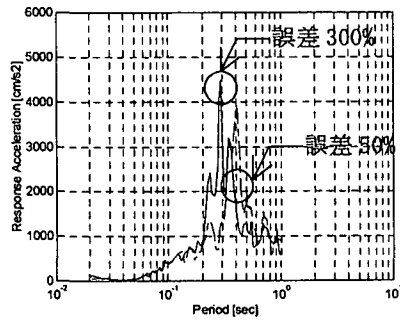
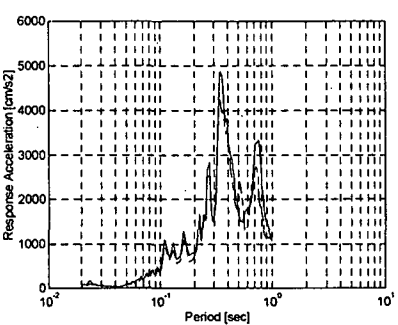
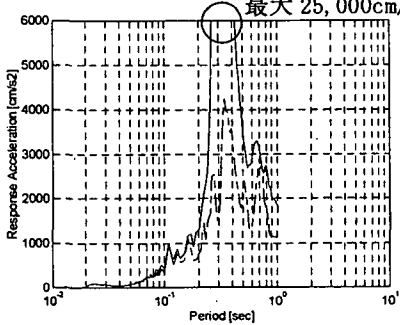
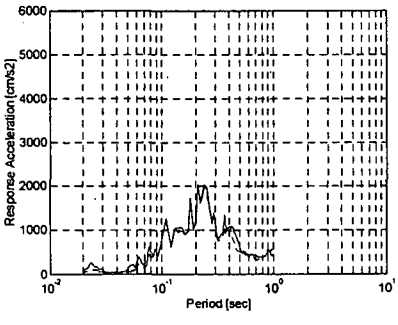
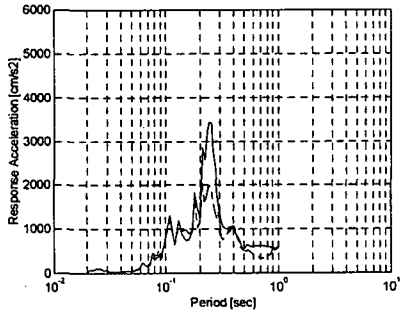
本振動台では、下位のフィードバック制御帯域である 1Hz から振動台の性能限界である 30Hz. まで補償可能であれば良いので、図中の同定範囲内の精度で評価する。同定範囲内ではゲイン・位相とも点線で示される理論値に十分一致しており、同定が精度よく実現されている。また、赤池法で決定される AR モデルの次数は X 軸：23 次，Y 軸：24 次であり，30 次以内に最適な次数が存在している。

次に上記同定結果を用いて補償を実施した結果を表-3 に示す。表中のグラフは振動台の波形再現性を表す一般的な指標である応答スペクトルを横軸：周期として表したものであり，左が本手法，右が従来法（入力補償）による結果である。グラフ中の点

線が目標波の応答スペクトルであり，この点線に対する誤差が小さいほど波形再現精度が良い。

結果は，従来法では初期状態の共振点付近で大きな誤差が生じていた。これは共振点が高い特性把握での応答関数を用いて補償を行うため，地震波加振により共振点が低下することにより初期の共振点付近で過補償となるためである。これに対し，本手法を用いると共振点の変化を同定するため，過補償は回避された。波形再現性を表す最も一般的な指標である応答スペクトルの誤差で評価して，従来法では 600%の誤差が 3 秒間で同定した本手法では 40%に低減され，本手法の原理的有効性が確認できた。

表-3 地震波加振シミュレーション結果

軸	高速適応型入力補償	従来法	評価
X 軸	 <p>誤差 40%</p> <p>周期 0.4 秒で誤差 40%</p>	 <p>誤差 300%</p> <p>誤差 30%</p> <p>周期 0.3 秒で誤差 300%</p>	<p>高速適応型入力補償により従来法の誤差 300%を 40%に低減</p> <p>—— 補償再現波の スペクトル - - - 目標波の スペクトル</p>
Y 軸	 <p>周期 0.3 秒で誤差 20%</p>	 <p>最大 25,000cm/s²</p> <p>周期 0.3 秒で誤差 600%</p>	<p>高速適応型入力補償により従来法の誤差 600%を 40%に低減</p>
Z 軸	 <p>誤差 10%未満</p>	 <p>周期 0.25 秒で誤差 60%</p>	<p>高速適応型入力補償により従来法の誤差 60%を 10%以下に低減</p>

4. 結言

本稿では振動台の破壊試験など加振中にその特性が大きく変化する場合でも補償可能な高速適応型入力補償について述べ、その原理的有効性をシミュレーションで示した。本手法は実地震波加振中の予め設定した時刻に短時間の実地震波データを用いてオンライン同定し、補償を実現する。

結果、シミュレーションによる評価で応答スペクトル誤差を低減することが可能であり、本手法の有効性が確認できた。今後は当社振動台を用いて実験検証を行い、実大三次元震動破壊実験施設の破壊試験向け制御法として実用化を図る。

参考文献

- 1) 大谷, 小川ほか: 超大型三次元震動台加振機構の開発紹介, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, No. 974-1
- 2) 大谷, 原田, 前川: 実大三次元震動破壊実験施設—加振機構の要素技術開発—, 計測と制御, vol. 37-8(1998)
- 3) 安田, 藤田ほか: 振動台の逐次適応型入力補償の研究, 日本機械学会第 67 回通常総会講演論文集(vol. C. 1508)
- 4) 赤池, 中川「統計的解析と制御」サイエンス社