

# シュード ダイナミック加振システム

## Pseudo Dynamic Testing Systems

近年、原子力関連や超高層ビルなどの極めて高い信頼性を要求される大形構造物の耐震試験法として、シュード ダイナミックス(仮動的載荷方式)という手法が考案された。これは、構造物の加力載荷実験と計算機による数値解析をオンラインで結合し、構造物の地震時の非線形応答をシミュレートするという画期的な方法であり、国内数箇所で研究されている。

日立製作所では、株式会社奥村組と共同でシュード ダイナミック加振システムの開発を行い、システムの妥当性確認のため、鋼材を試験体として弾性範囲内の実験を行った。その結果は、理論計算結果と良好な一致を示した。

本稿では、システムの構成、特徴を中心に、耐震試験システムとしての実用化に向けた課題などについて述べる。

杉本博史\* *Hiroshi Sugimoto*  
石井敏之\* *Toshiyuki Ishii*  
中村正弘\*\* *Masahiro Nakamura*  
菅野正治\*\* *Masaharu Sugano*  
今野隆雄\*\* *Takao Konno*

### 1 緒言

耐震設計の技術はコンピュータの発達に伴って著しい進歩を見せているが、地震に対する構造物の複雑な動的挙動については多くの問題が残されている。地震国である我が国では、より信頼性の高い耐震設計法の確立が急務であるが、理論解析だけで構造物の耐震性を把握するにはまだ日時を要し、実証試験は今もって必要不可欠である。

従来から行われてきた耐震実証試験法として、振動台による振動実験と静的載荷実験がある。ここで、構造物の耐震実験に関して、より信頼性を高めるという意味で、実物大の試験体を用いて地震時の応答を再現することを考えると、振動台実験では、適用できる試験体の大きさがシステムの許容量に制限されるため、大形構造物に対する実験は困難である。また、リアルタイムで加振するため、破壊に至るまでの過程をつぶさに観察することができない。静的載荷実験では試験体の静的な諸特性データを得ることはできるが、地震時の構造物の動的挙動を再現することはできない。

そこで、実物大規模の試験体に、地震時に受ける相当変位量を時間的にゆっくりと与え、コンピュータで制御しながら地震時挙動をゆっくりと再現させる方法が考案された。これがシュード ダイナミックス(仮動的載荷方式)である。

### 2 シュード ダイナミックスの概要

#### 2.1 シュード ダイナミックスの原理

シュード ダイナミック加振システムは、構造物の加力載荷実験と計算機による地震応答数値解析とをオンラインで結合したシステムである。本システムの目的は、構造物が地震動を受けた場合の動的挙動を、できるだけ忠実に再現することにある。シュード ダイナミックスの原理を図1に示す。

一般に、構造物の振動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_0\}$$

ここで  $[M]$  : 質量マトリックス  
 $[C]$  : 減衰マトリックス  
 $[K]$  : 剛性マトリックス  
 $\{x\}$  : 応答変位ベクトル  
 $\{\dot{x}\}$  : 応答速度ベクトル  
 $\{\ddot{x}\}$  : 応答加速度ベクトル  
 $\{\ddot{x}_0\}$  : 地動加速度ベクトル

入力地震波としては、ある微小時間刻み(ステップ)ごとに収集された実地震波加速度データを用いる。シュード ダイナミックスは、一方で構造物の加力載荷実験を行い、他方で計算機による振動方程式の数値解析を行う。両者の関係は次に述べるとおりである。

シュード ダイナミック実験のあるステップで、

- (1) 計算機システムでは、それまでのステップでのデータに基づいて、次のステップでの応答変位を計算する。
- (2) 実験システムでは、その計算変位を試験体を与え、復元力を測定する。
- (3) 測定された復元力データを計算機システムで読み込み、次のステップへ進む。

このように、復元力を得るための実験と振動方程式の数値解析とを並行して同時に行うことにより、与えられた地震動に対応して一連の非線形応答が得られ、同時に復元力特性を得る方法がシュード ダイナミックスである。

#### 2.2 数値積分法と実験フロー

シュード ダイナミックスの実験では、振動方程式をある時間刻み(ステップ)ごとに逐次数値積分して、次に試験体を与えるべき変位量を算出している。よって、数値解法として何を選択するかが実験の精度を左右する。数値解法の手段は数

\* 株式会社奥村組 筑波研究所 \*\* 日立製作所土浦工場

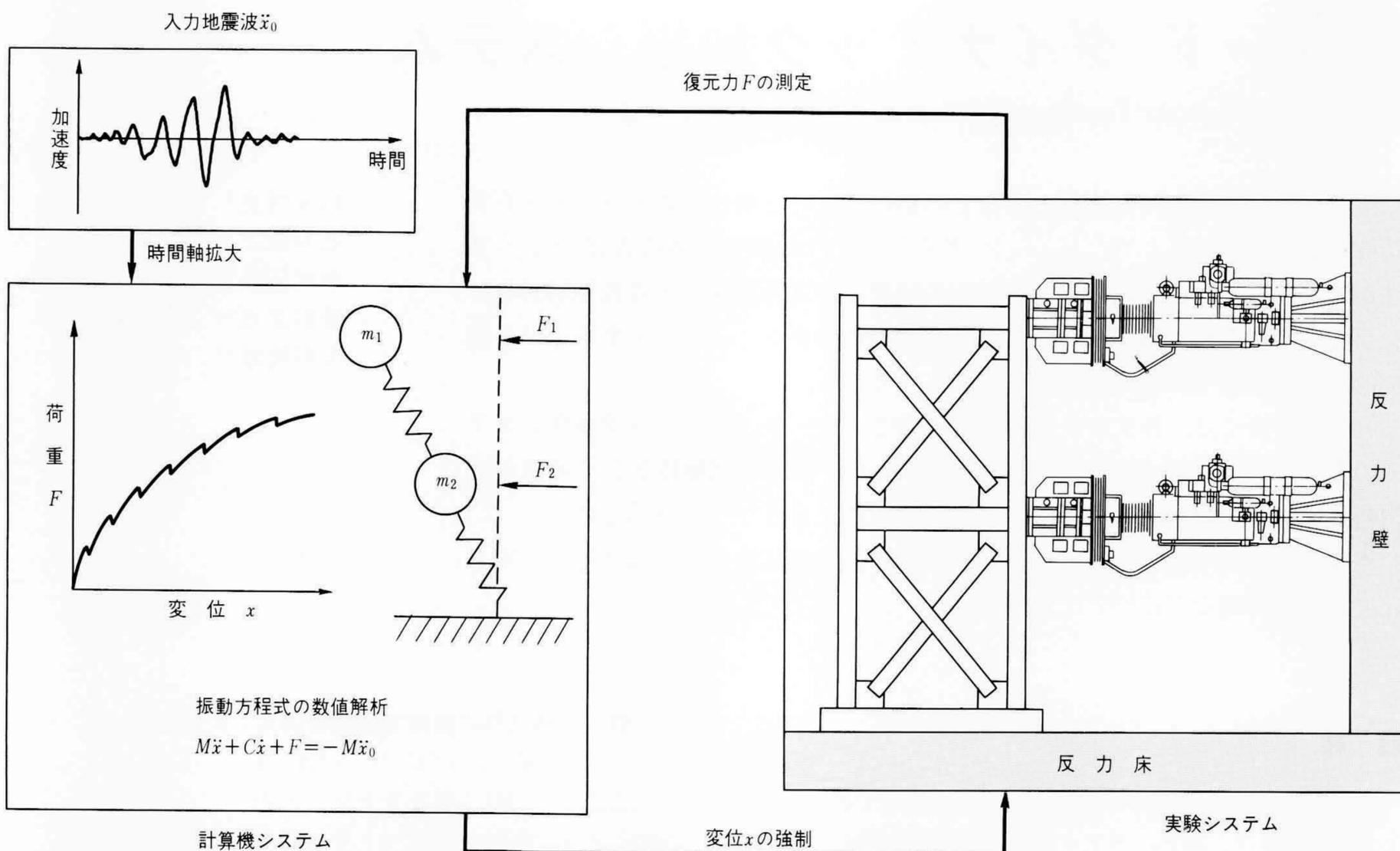


図1 シュード ダイナミクスの原理 シュード ダイナミクスは、計算機による振動解析と構造物のモデル実験をオンラインで結合することにより、地震時の動的応答シミュレーションを可能にした。

多く存在するが、解法の精度と速度の面を考慮し、本システムでは次の解法を採用している。

(1) 線形加速度法

線形加速度法は、次の式を用いて数値積分を行う解法である。

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_n \Delta t + \frac{1}{6} (2 \ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1}) \Delta t^2$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \frac{1}{2} (\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1}) \Delta t$$

$$\ddot{x}_{n+1} = -\frac{C}{M} \dot{x}_{n+1} - \frac{K}{M} x_{n+1} - \ddot{x}_{0n+1}$$

ここで  $\Delta t$  : 数値積分刻み幅  
 $n$  : ステップ番号

$n$ ステップデータと $(n+1)$ ステップでの振動方程式を用いて、 $(n+1)$ ステップの加速度、速度、変位を求める。実験の各ステップで、試験体のばね定数が必要となるため、通常はばね定数が一定な弾性範囲でだけ用いられる。

(2) 中央差分法

中央差分法は次の式を用いて数値積分を行う解法である。

$$\dot{x}_n = \frac{1}{2 \Delta t} (x_{n+1} - x_{n-1})$$

$$\ddot{x}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1})$$

$$\ddot{x}_n = -\frac{C}{M} \dot{x}_n - \frac{Q(x_n)}{M} - \ddot{x}_{0n}$$

ここで  $Q(x_n)$  : 変位 $x_n$ 時の復元力  
 $n, (n-1)$ ステップの変位データと $n$ ステップでの振動方程

式を用いて、 $(n+1)$ ステップの変位を求める。 $n$ ステップの速度、加速度はその後に求まる点に特徴があり、 $n$ ステップでの方程式を解く際に、復元力 $Q(x_n)$ が分かれば(実測すれば)、 $(n+1)$ ステップの変位が求まる。

上記二つの解法を採用したシュード ダイナミクスの実験フローを図2に示す。

3 システムの概要

3.1 システム開発の方針

シュード ダイナミクスの考え方は、1969年に発表された東京大学地震研究所の伯野らによる「計算機により制御された、はりの動的破壊実験」に端を発する<sup>1)</sup>。その後、東京大学生産技術研究所を筆頭に<sup>2), 3)</sup>、建設省建築研究所や二、三の建設会社で研究が進められている。本手法は、開発されて十数年程度の新しい実験手法であり、多くの問題点が残されているが、構造物の地震時の挙動を把握するための有力な手法として、近い将来の実用化が期待される<sup>4), 5)</sup>。

日立製作所は、このような状況を踏まえ、株式会社奥村組と共同でシュード ダイナミック加振システムの開発を行った。開発に当たっては、現在学術的に最も認知されている東京大学生産技術研究所の方式に沿って進め、更に実験の高速化、高精度化を図ることとした。

3.2 システム構成

本システムは図3に示すように、以下の三つの設備により構成される。

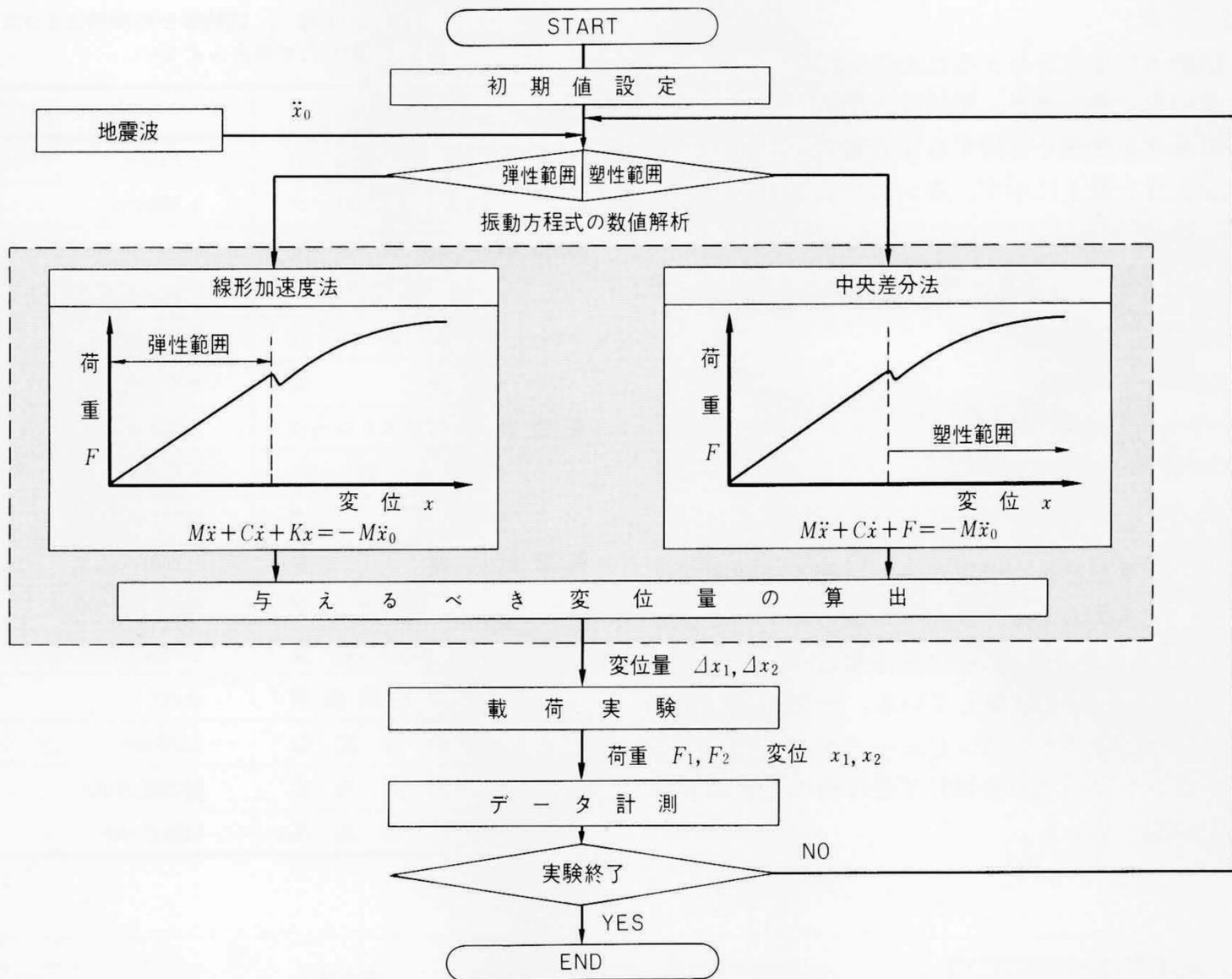


図2 シュード ダイナミックスフロー 通常は、弾性範囲で線形加速度法が、塑性範囲で中央差分法が用いられる。

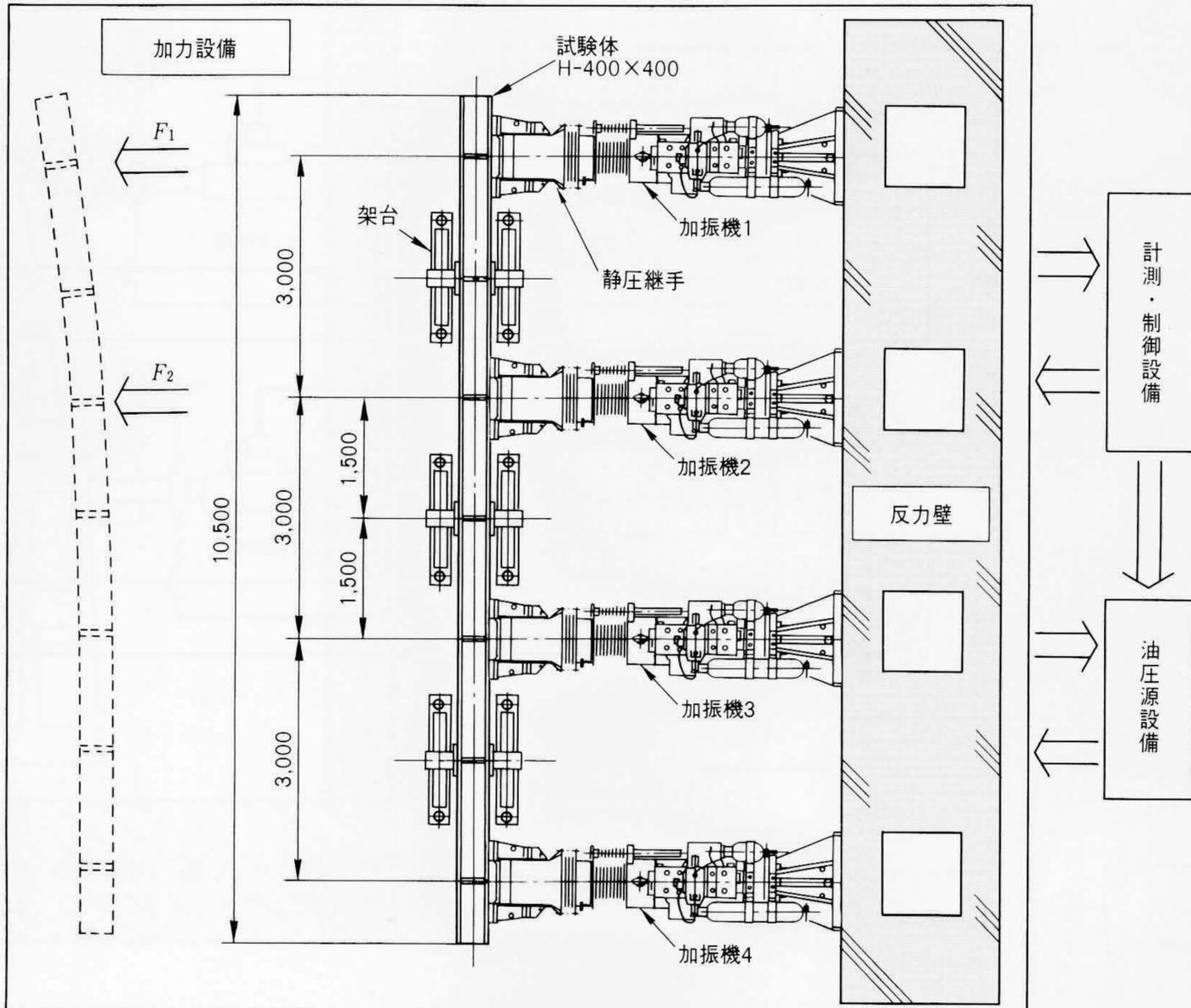


図3 実験設備 1質点系の実験では、加振機1だけを動かし、加振機2～4は変位0に固定する。2質点系の実験では、加振機1と2を動かし、加振機3と4は変位0に固定する。

(1) 加力設備

本設備は、試験体に変位を与えるための油圧加振機、試験体と加振機とをつなぐ静圧継手、変位計、荷重計、試験体を支持する反力床及び加振機を支持する反力壁で構成される。加力設備の主な仕様を表1に示す。本システムで採用している静圧継手は、他の継手(スイベルジョイントなど)に比べて機械的がたのないことを特徴とし、実験の高精度化を図る上で重要なポイントとなっている。

(2) 油圧源設備

本設備は、加振機を駆動するための圧油及び静圧継手に必要な圧油を供給するための設備である。

(3) 計測・制御設備

本設備は、メインコンピュータ、デジタルコントローラ、アナログコントローラなどから構成される。図4に制御ブロック図を示す。本システムでは、メインコンピュータとして32ビットのスーパーミニコンピュータを採用し、その下にデジタルコントローラ2台を配置している。振動方程式の数値解析及びデータ計測をメインコンピュータが、加振機の制御をデジタルコントローラが分担して受け持つことによって実験の高速化を図っている。

表1 加力設備の主な仕様 試験体と加振機とをつなぐ静圧継手は、静油圧方式により機械的がたがほとんどない。

項目	仕様	
加振機	最大出力	±130t
	有効ストローク	±300mm
	最大速度	50cm/s
	駆動方式	電気油圧サーボ方式
	供給油圧	210kg/cm <sup>2</sup>
変位計	形式	ポテンシオメータ
	有効ストローク	±50mm
	直線性	±0.1%FS
荷重計	形式	ひずみゲージ式
	容量	±200t
	直線性	±0.5%FS
静圧継手	許容荷重	±150t
	許容回転角	±3°
	許容変位	±20mm
	潤滑方式	静油圧方式
	供給油圧	140kg/cm <sup>2</sup>

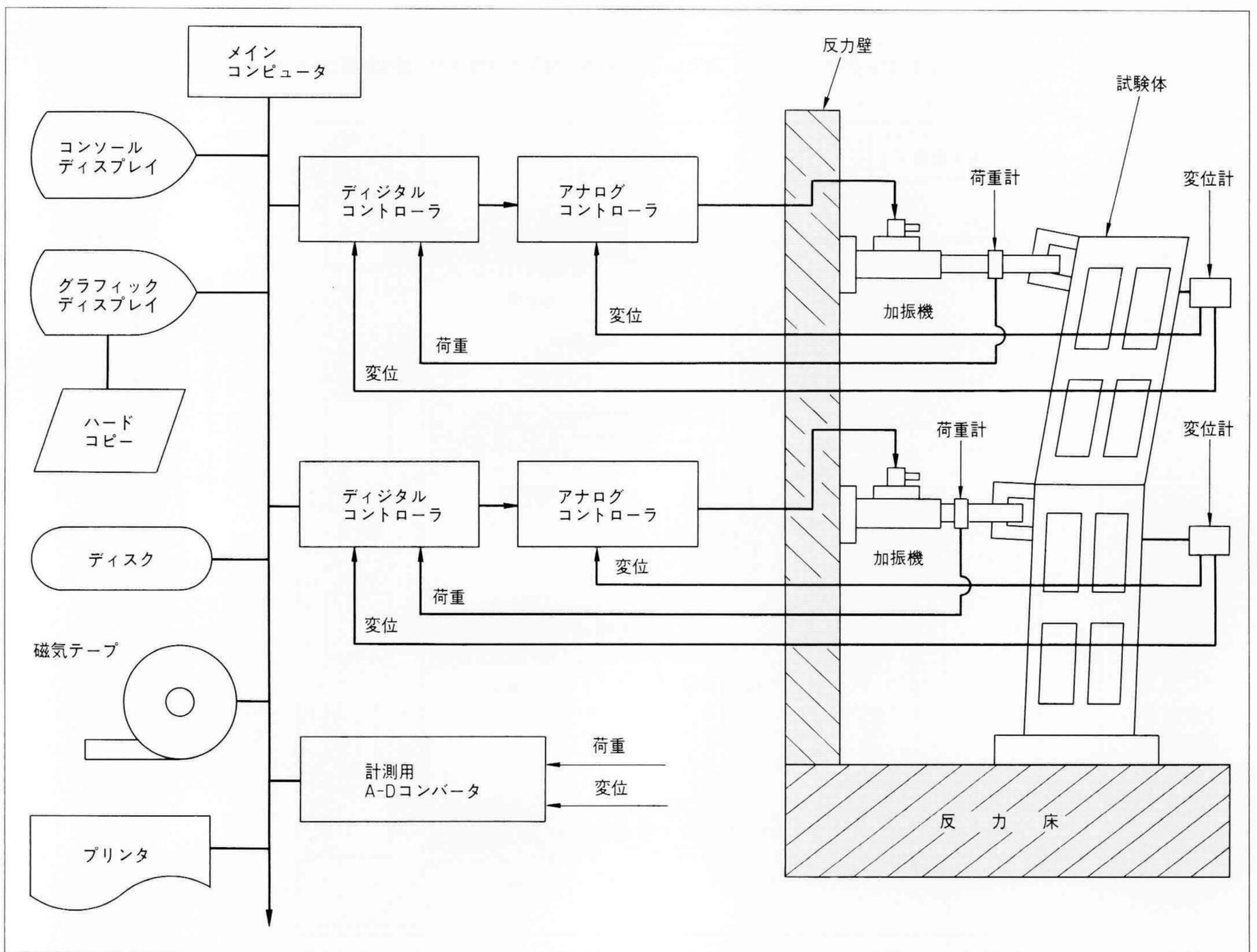


図4 システム制御ブロック図 加振機の制御をデジタルコントローラに受け持たせて役割を分担することにより、実験の高速化を図っている。

#### 4 実験の概要

本システムの妥当性を確認するため、H形鋼材を試験体として弾性範囲での実証試験を行った。

##### 4.1 実験条件

入力地震波としては、1940エルセントロ波のNS成分を用いた。その加速度波形を図5に示す。地震波の初期微動では

応答変位が小さく、加振機の制御が困難であるため、計算変位の絶対値が2mmを超えるまでは線形加速度法による理論計算だけを行い、2mmを超えた時点で中央差分法による加振機の制御を開始した。数値積分の時間刻みは0.01秒とした。

##### 4.2 実験結果及び評価

1質点系及び2質点系の実験を行い、それぞれ図6、7に示す結果を得た。理論計算値と実験値を比較すると、1質点

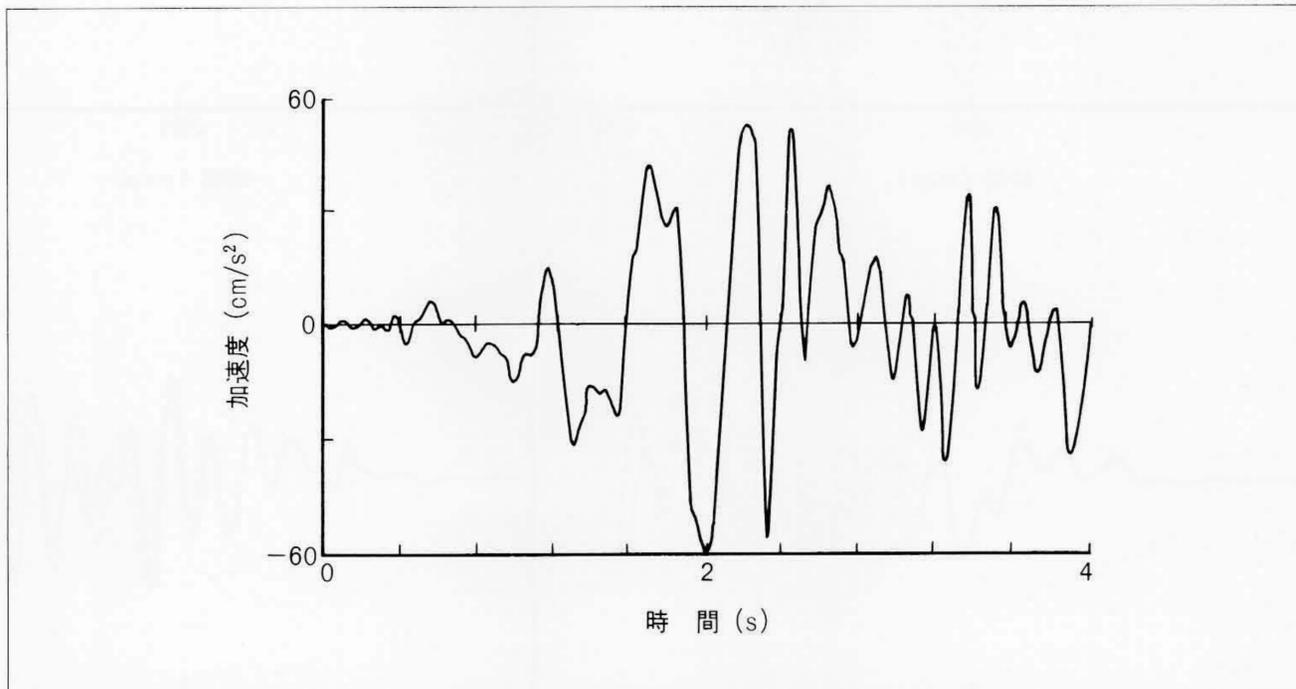
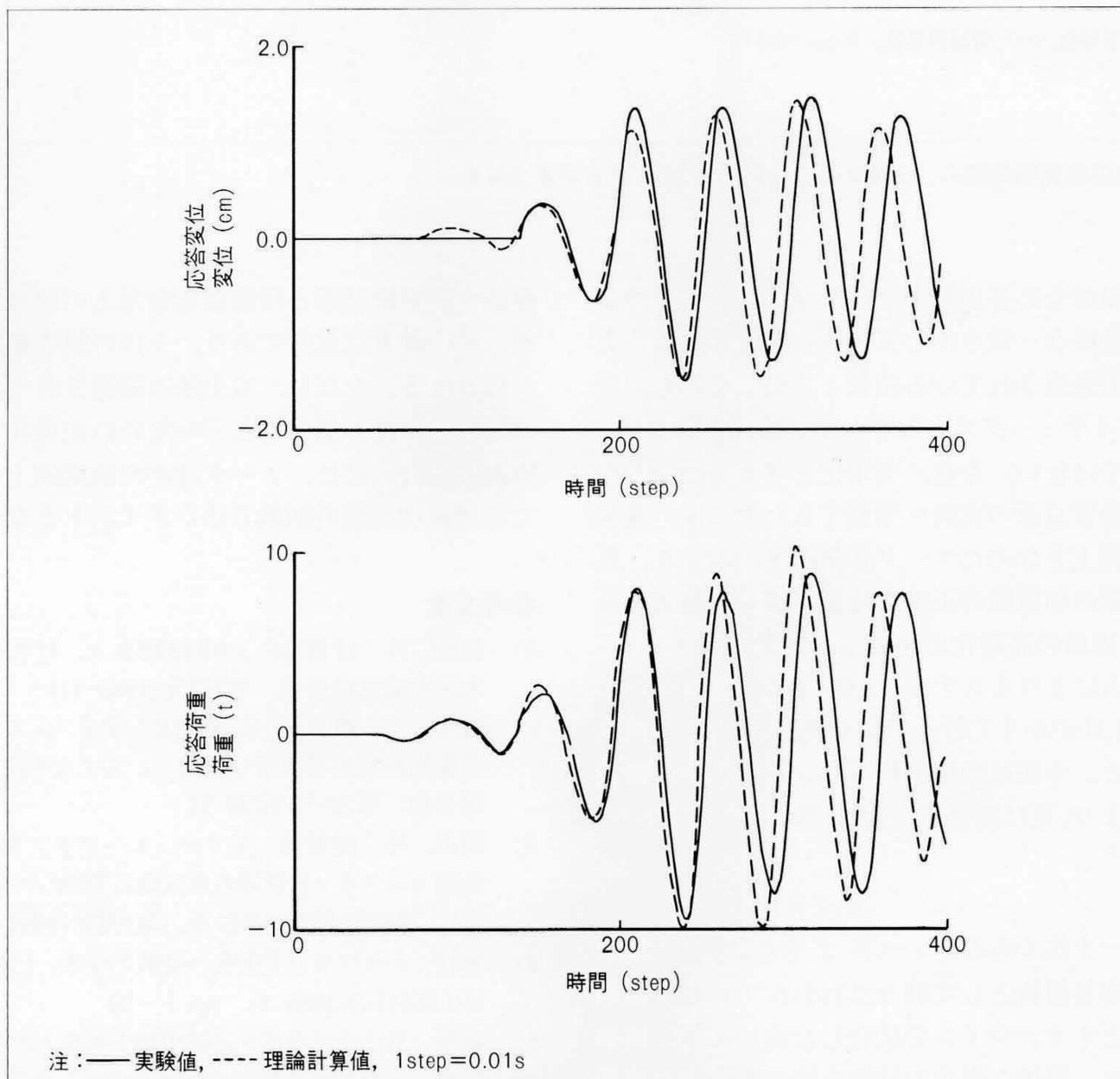


図5 入力地震波 1940エルセントロ波のNS成分は、耐震実験によく用いられる。



注：—— 実験値，---- 理論計算値，1step=0.01s

図6 1質点系地震応答実験結果 1質点系実験の応答変位と応答荷重である。

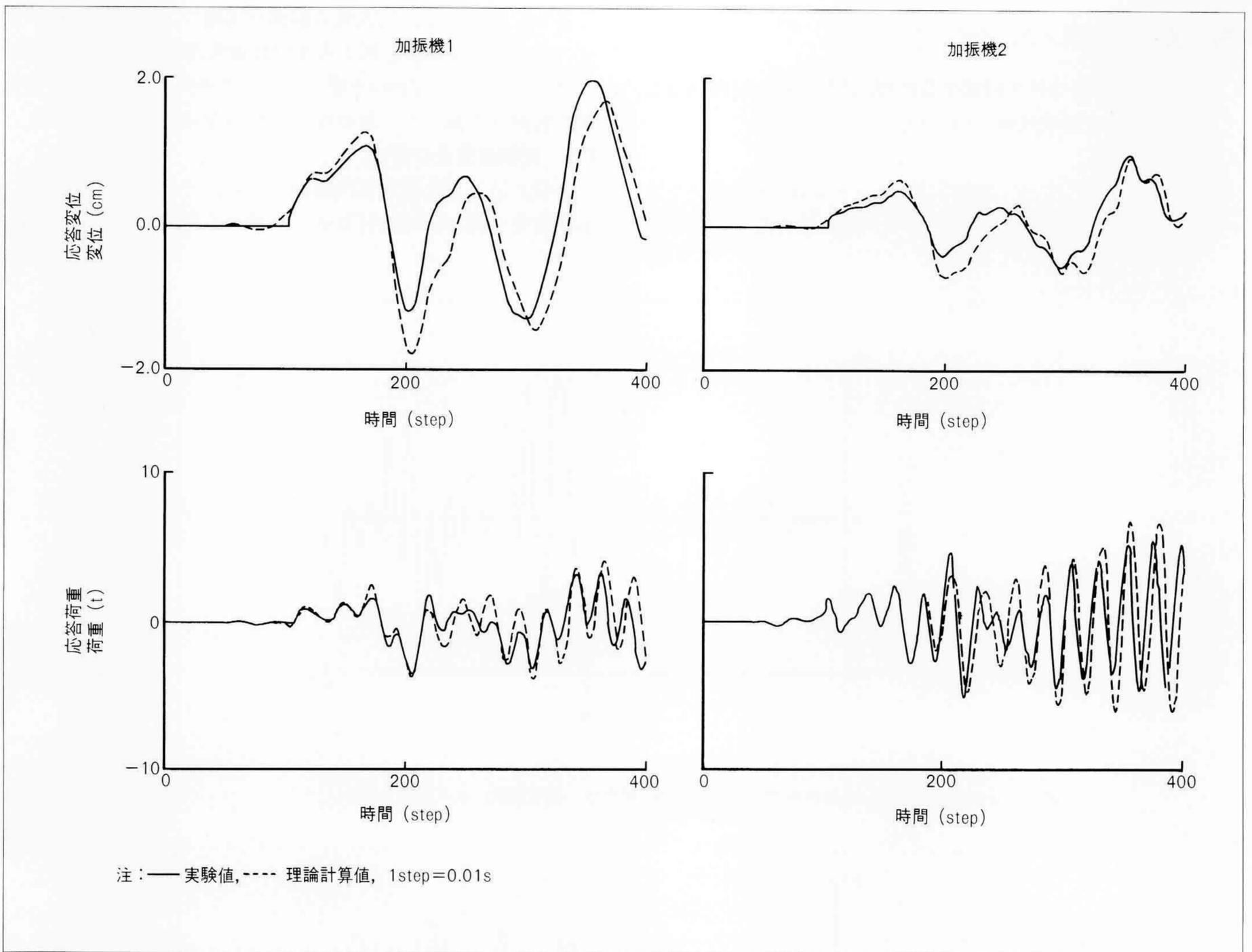


図7 2質点系地震応答実験結果 2質点系実験の応答変位と応答荷重である。

系，2質点系共に微妙な応答周期のずれ及び細かな動きの違いはあるものの，良好な一致を示している。ただし，この見解はこれまで他社で発表されている結果と比較してのものであり，シュードダイナミックスとして十分な精度を持つという意味合いのものではない。今後，実用化を考えたコンクリート構造試験体の多質点系の実験へ発展するためには，変位計，荷重計の精度向上を含めたデータ計測精度の向上と，互いに干渉しあう複数の加振機の正確な位置制御を可能とする必要がある。また，実験の高速化の面では，今回スーパーミニコンピュータの導入により1ステップ当たりの所要時間が十数秒となり，従来1日ばかりで行っていた実験が，2，3時間程度で可能となった。今後は数値解析アルゴリズムや加振機制御方法の検討により，更に高速化を図っていく考えである。

## 5 結 言

耐震実証試験の一手法であるシュードダイナミックスは，従来構造物の地震応答解析として別々に行われていた理論解析法と実験解析法とをオンラインで結合した点に大きな特徴がある。これにより，複雑な復元力特性を持つ構造物の地震時の動的挙動を再現することが可能となる。本稿では，弾性

範囲での実験結果と理論解析結果との照合だけにとどまったが，その結果は良好であり，今後の塑性範囲での実験に期待が持たれる。ただし，本手法は開発されて間もないため，国内外では研究の域を脱していないのが現状である。本手法の実用化のためには，データ計測の精度向上と多質点系モデルでの複数加振機の制御方法がポイントとなるであろう。

## 参考文献

- 1) 伯野，外：計算機により制御された，はりの動的破壊実験，土木学会論文報告集，第171号(1969-11)
- 2) 高梨，外：電算機—試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その1：システムの内容)，建築学会論文報告集，第229号(昭50-3)
- 3) 岡田，外：電算機—アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その1：目的および方法論)：建築学会論文報告集，第275号(昭54-1)
- 4) 家村：ハイブリッド実験の発展と将来，土木学会論文報告集，No. 356/I-3(1985-4)，pp. 1～10
- 5) 高梨，外：オンライン応答実験システムの開発と構造実験への適用，建築研究振興協会，オンライン応答実験研究委員会 昭和60年度成果報告集(昭61-3)