

## [2086] RC 構造物の地震損傷評価のための仮動的実験装置

正会員 ○早川淳一（東京都立大学大学院）

長浜 至（フジタ工業イチケン）

正会員 山崎 淳（東京都立大学）

## 1. はじめに

構造物の地震挙動を研究する手法として、構造物の復元力特性を数学的モデルで置換してコンピュータ解析する方法、振動台実験、コンピュータによる解析と加力装置による実験を併用した仮動的実験などが挙げられる。本論文では、著者らが開発中の仮動的実験の特徴を述べる。

仮動的実験の手順は、地震挙動を研究する構造物のモデルを作成し、その供試体モデルをバネマス系の振動モデルに仮定する。一般の振動方程式では仮定された粘性減衰、剛性を使って数値積分法で解いているが、本手法ではある積分時刻における構造物の復元力を取り込み、実験値と振動方程式から次のステップの変位を算出する。算出した目標変位まで加力し、復元力を取り込んで振動方程式を解くという実験と数値解析を繰り返すと、あたかも構造物が実地震動を受けたように時刻歴応答をするというものである。

仮動的実験の開発、その信頼性などの研究の流れをみると、伯野ら(1969)が構造物の地震挙動を研究するための新しいタイプの実験を考案し、それは振動台を使わずともリアルタイムに構造物の地震挙動を直接模擬できるものであった<sup>1)</sup>。高梨ら(1975)は地震応答程度の速度では応力-歪関係が静的試験によるものとほとんど差がないとしてこの手法を発展させている<sup>2)</sup>。陸好、町田(1985)は動的外力を受けるRC部材において載荷速度の違いがRC部材の荷重-変位関係や減衰特性への影響の度合を明らかにしており<sup>3)</sup>、同様に北川ら(1984)は変形速度及び応力緩和効果が構造物の復元力特性、粘性係数に与える影響を検討し<sup>4)</sup>、中島ら(1986)が振動台実験と仮動的実験を比較検討し、仮動的実験の有利性、信頼性を検証している<sup>5)</sup>。

## 2. 仮動的実験の目的

仮動的実験の目的は、構造物が地震力を受けた場合どのような挙動を示し、かつ構造物の破壊状態がどのように推移するかを調べるものである。しかし、仮動的実験と振動台実験の両者を比較すると、仮動的実験は以下のような特徴を持つと考えられる。

仮動的実験の長所は、

- ①加力が準静的であるため同じ構造物のモデルを試験する場合よりも装置が小さくて済む。
- ②各ステップ毎に載荷を中断するので、振動台実験のような同時計測を行う装置が必要ない。
- ③加力が準静的であり、載荷を中断することができるので、モデルの部材の状態を詳細に観察できる。
- ④構造物の復元力特性を数学的モデルではなく、直接時刻歴応答解析に取り込める。

であり、一方短所は、

- ①RC構造物のような連続体であるものをバネマス系と仮定する。

- ②加力が準静的であるため、載荷速度による構造特性の変化が考慮できない。
- ③運動方程式を微分方程式としてではなく、時間軸に対して離散化した差分法で解いている。
- ④モデルの持つ減衰特性を速度に比例する粘性減衰として代表させ、粘性減衰定数を仮定する（履歴減衰は必然的に実験に取り込まれる）。

などが挙げられる。上記のような種々の仮定を含んでいるため、構造物の真の地震応答と同一でないということも否定できない。仮動的実験の有利性を最大限に生かすためには、真の応答との差異が何の影響によって生じるかを正確に把握しておく必要がある。この点を考慮し、既往の研究と対応させながら、著者らの仮動的実験システムを検討した。さらに、RC構造物の地震損傷評価を研究するためにこのシステムを用いようとするものである。

### 3. 既往の研究

仮動的実験について、既往の研究成果の一部をまとめたものが表1である。主に各々の仮動的実験のシステムの各項目を取り上げる。その内容は計算機の種類、加力装置、対象構造物、入力地震波、1ステップ当りの時間、誤差の補正方法、振動方程式などで、著者らのシステムと比較してみた。本システムは加力装置に電動モーターを用い、経済性の面でも安くでき、他のシステムにはみられない。最大許容荷重が小さいため、実際の構造物部材の地震挙動を対象にすることは困難で、構造物の地震挙動における基礎的な実験を目標にしていると位置付けられる。

表1 既往の研究における仮動的実験のシステム構成

文献名	著者名	加力装置	計算機	対象構造物 (供試体)	入力地震波	1ステップ 当りの時間	誤差の補正方法	振動方程式
計算機に制御された、はりの動的破壊実験 (1969.11)	伯野、四 儀、原	電気油圧 式(1.5t) 7kgf/cm <sup>2</sup>	アナログ	1自由度振動 系(鋼板)	4種類の疑似 地震波			数値積分
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 (1975.3)	高梨、宇 田川、関 岡田、田 中	電気油圧 式(30t) 7kgf/cm <sup>2</sup>	デジタル	柱、及び梁崩 壊型の1層ラ ーメン (1部材)				
電算機-7kgf/cm <sup>2</sup> 非ライ 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 (1979.1)	岡田、関	電気油圧 式(30t) 7kgf/cm <sup>2</sup>	デジタル				0.01cmを基準量 (定変位出力方式)	弾性時・・・ 線形加速度法 塑性時・・・ 中央差分法
ハイブリッド方式のオン ライン地震応答載荷実験 の開発と若干の動的実験 (1983.7)	金多、 西澤	電気油圧 式7kgf/cm <sup>2</sup>	デジタル	1層鉄骨ラ ーメン(片持 ち梁形式)	Taft(195 2)NS波	演算制御・・・ 0.5(sec) 実験時・・・ 1.6(sec)	7kgf/cm <sup>2</sup> のオンライ ンを防止するた めに1kgf/cm <sup>2</sup> 電 圧を変化させる	弾性時・・・ 線形加速度法 塑性時・・・ 中央差分法
振動台実験と仮動的実験 による鉄筋骨組の応答 (1986.6)	山崎、中 島、上之 園、井崎 前田	電子式油 圧9kgf/cm <sup>2</sup>	デジタル	鉄骨2層ラ ーメン(純ラ ーメン、筋連 付きラーメン)	1978年宮城県 沖地震の4種 (max=239,491 500,2376)		変位計によってフ ィードバックし、 誤差範囲を0.02mm として制御	
地震力を受ける鉄筋コン クリート構造物の弾塑性応 答に関する研究(1987.2)	町田、睦 好、鶴田	7kgf/cm <sup>2</sup>	デジタル	RC2層ラ ーメン橋脚	E1-Centro 19 40NS成分の 合成波	約1分程度		自重を無視し、 1質点系と仮定
ハイブリッド実験による 修復、補強の地震時剛性 劣化過程 (1987.10)	山田、家 村、伊津 野、大本	ハイドロ 疲労試験 機	デジタル (8bit)	独立柱式のR C橋脚(1質 点系)	八戸NS記録 E1-Centro 19 40NS成分			
本システム		DCモタ (1.5t)	デジタル (16bit)	片持ち梁形 式の鉄骨橋脚	E1-Centro 19 40NS成分	約1~20 (sec)		一定加速度法 1質点系と仮定

#### 4. 仮動的実験のシステム構成

仮動的実験のシステム構成は図1に示すように、制御装置として16ビットのパーソナルコンピュータを用い、载荷装置は電動モーターを使用している。モーターとパソコンとの伝達は変換器（インバータ）を通じて行い、この変換については5節に詳細を示す。ここで使用したモーターは、電磁ブレーキ付きギヤードモーターであり、インバータとの対応を示す性能について表2の通りである。本システムで使用しているモーターの出力軸回転数は最低3.3(rpm)～最高60(rpm)で、供試体に加える変位速度に換算すると、0.03～0.54(mm/sec)となる。

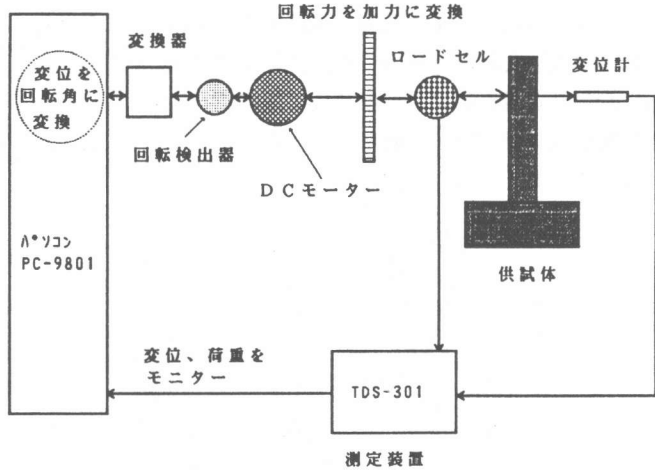


図1 仮動的実験のシステム構成

表2 モーターとインバータの関係

モーター	出力回転数(rpm)	2	4	13.3	20	33.3	60	80
	出力トルク(kg・m)	15.2	27.3	39.5	42.3	51.6	36.4	23.1
インバータ	周波数(Hz)	3	6	20	30	50	90	120

また、本システムでは入力地震波、測定装置の較正係数などの設定を行った後は、自動で実験を行うことができ、人的な誤差の影響を取り除いている。モニターには、復元力-変位、時刻歴応答変位、モーターの回転状況などが出力され、各ステップ毎の構造物の状態を把握できる。

#### 5. 算出変位から駆動軸回転への変換

本システムのフローチャートを図2に示す。ここで、一定加速度法によって算出した変位をモーターの回転数、回転角に変換する仕組みを説明する。図3に示すように、パソコン、変換器、回転検出器、モーターが一連の流れの中に組み込まれている。このモーター制御のフローチャートは図4のように、パソコン内で増分変位を回転数、回転角に変換し、さらにモーターの出力軸回転数を目標回転数と現在の回転数から算出し、変換器に周波数として送出され、モーターに伝達する。モーターの出力軸回転数は回転検出器から変換器を通して、随時パソコンに送られ、目標回転数との差からモーターの出力軸回転数を調整している。モーターの出力軸

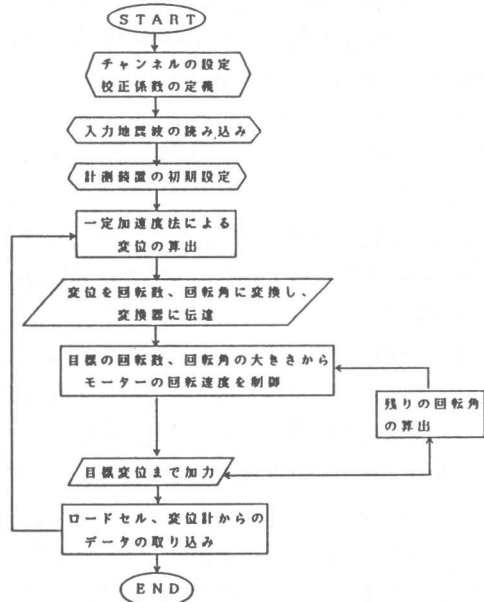


図2 本システムのフローチャート

回転数は、残り回転数によって図5のように8段階に設定されている。速度を調節する理由は、一定加速度法で算出した変位を誤差精度0.02(mm)に到達させるために、目標変位に近づくとき出力軸回転数を極力抑え、精度の向上をはかっているためである。

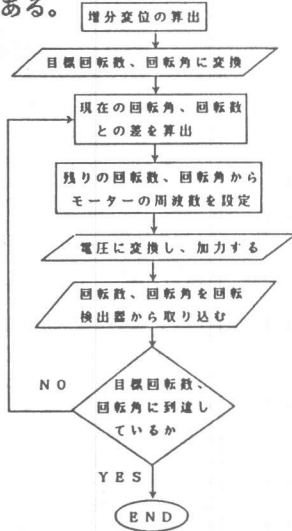


図4 モーター制御のフローチャート

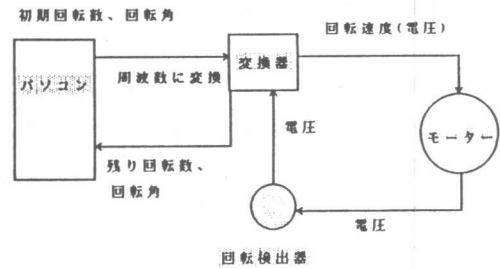


図3 モーター回転数の制御機構

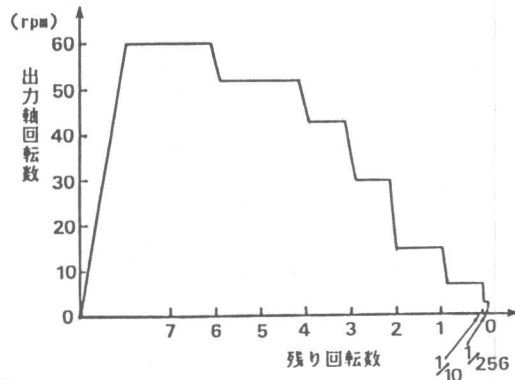


図5 モーター回転数の設定方法

## 6. 本システムにおける誤差の発生源

加力装置側では、モーターの回転力を加力に変換する際に歯車間にかみ合わせ誤差が生じる。モーター側の歯車数(20)と加力側の歯車数(80)の比が1:4であり、モーターが1回転すると、供試体は0.54(mm)変位するという仕組みである。この歯車間のかみ合わせ誤差により供試体の最大変位誤差が0.01(mm)生じることになる。これは、第8節で述べる本実験の最大変位4(mm)に対して0.25(%)となる。また、回転検出器において、パソコン内で目標の回転角と現在の回転角との差において、許容誤差を0.1(%)に設定しており、これにより供試体の変位に換算すると0.005(mm)となるが、精度的には問題がないと考えられる。測定装置内の変位計及び荷重計の精度が、各々0.01(mm)、0.508(kg)であり、本実験の最大変位、最大荷重に対し、0.25(%)、0.05(%)の許容誤差が存在する。

装置の構造上の誤差として、加力の増加とともに反力壁部分が変形を起こすため、変形量の増加が大きくなるにつれて復元力の取り込み時に、復元力の低下を招いている。この構造上の誤差については現在改善をしているところである。その他の誤差として、アンダーシューティング誤差があり、算出した変位よりも誤差精度εだけ小さい変位で加力を終了するので起こるものである。また、振動台実験との違いとして、仮動的実験が断続荷重であることから起こる復元力の低下が指摘されている<sup>9)</sup>。上記のことから、本システムにおいて起こり得る最大誤差は、変位では0.02(mm)ぐらいであり、復元力の低下についてはさらに調査する必要がある。

## 7. 1ステップの所要時間

一定加速度法によって次のステップの変位を求め、その目標変位まで加力し、データを取り込むまでの1ステップに要する時間と時刻歴応答変位を同時に示したものが図6である。この図より、変位が大きくなるにつれて当然1ステップにかかる時間も増えている。しかし、以前の装置<sup>10)</sup>では、駆動ハンドルを用いて加力しており、1ステップ当り30(sec)かかっていたものが、このシ

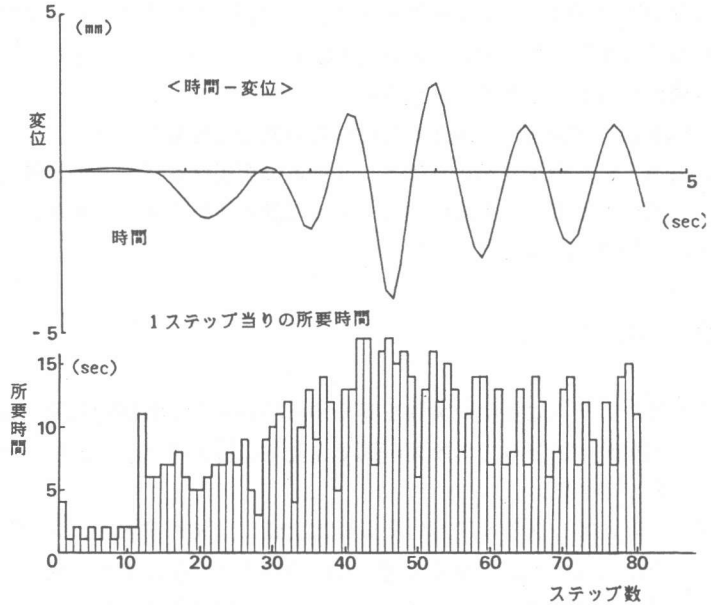


図6 仮動的実験での1ステップ当りの所要時間推移

テムでは現在の変位と目標変位との差によってモーターの回転速度を制御しているために最大17(sec)に抑えられている。さらに、以前の装置では加力速度が一定せず、加力速度のばらつきによる影響が大きかったが、その影響を取り除くことが可能となった。

## 8. 本システムにおける地震時挙動の再現性

装置の性能、精度の確認用に鉄骨ラーメン形式の供試体を用いて実験を行った。今回は軸力を作用させていない。想定構造物の重量を29.8(ton)、すなわち質量を29.8(kg·sec<sup>2</sup>/cm)とした場合の固有周期は0.67(sec)である。入力地震波は、1940EI-C entro地震波のNS成分を用い、想定構造物との相似則関係で最大10(gal)、時間ステップを0.06(sec)、総ステップ数200とした。この実験の所要時間は約30分弱であった。

初めに一定加速度法で算出した変位と供試体で測定した変位を示した図7は負の方向で違いがみられる。この理由は第6節で述べた誤差の中

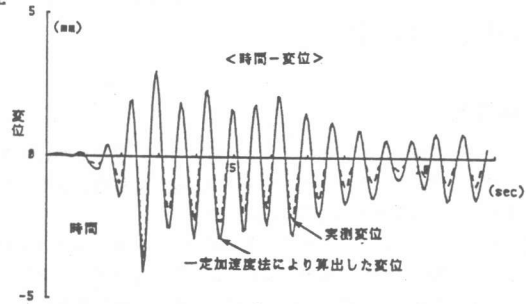


図7 一定加速度法で算出された変位と実測変位の関係

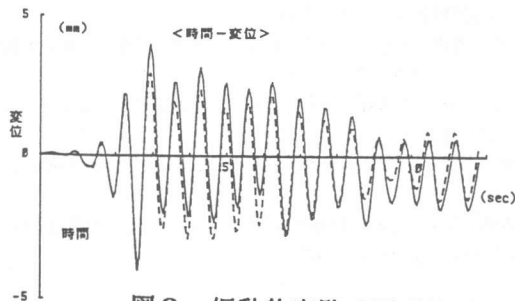


図8 仮動的実験の再現性

で、反力部分が変形することによる復元力の低下や回転力を加力に変換する際の歯車間のかみ合わせ誤差の影響が大であると考え。この誤差を修正するためには、ある時刻において計算された変位と測定された変位との差を算出し、フィードバックさせる必要がある。この点に関しては今後取り入れていきたいと思う。

図8は、実験条件を変えずに行った時刻歴応答変位であり、本システムの再現性を確かめたものである。この両実験からは本システムの再現性をはっきりと裏付けることは困難であろう。この両実験の差異は、上記に述べたように計算された変位と測定された変位が一致していないことが最大の理由であろう。

## 9. 結論

- 1) 本システムは仮動的実験を初めから終わりまで断続的载荷ではあるが、ステップ数200の入力地震波で約30分の所要時間で自動的に行えるものであり、実験中の人的誤差を取り除くことができた。
- 2) また、本システムにおいて仮動的実験に含まれる誤差、具体的には歯車間のかみ合わせ誤差、強制変位が大きくなると起こる反力壁部の変形による復元力の低下などの加力システム内の誤差が確認でき、今後改良すべき点を解明することができた。
- 3) このシステムを用いてRC構造物の地震損傷評価を得ることが、他のシステムと比較して経済面で安く実験できる。

## 謝辞

本研究は文部省科学研究費(No.61460161)により行った。装置の制作を協力して頂いた組田良則氏(フジタ工業イチケン)、実験に協力してくれた杉本優氏(東京都立大学大学院)の両氏に厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 伯野、四袋、原：計算機により制御された、梁の動的破壊実験、土木学会論文報告集(1969)PP.1~9
- 2) 高梨、宇田川、関、岡田、田中：電算機一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)、日本建築学会論文報告集(1975)、PP.77~82
- 3) 睦好、町田：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究、土木学会論文集(1985)、PP81~90
- 4) 北川、長嶺、鹿嶋：変形速度および応力緩和効果を考慮した地震応答解析、日本建築学会論文報告集(1984)、PP.32~41
- 5) 山崎、中島、上之蘭、井崎、前田：振動台実験と仮動的実験による鉄骨骨組の地震応答、日本建築学会構造系論文報告集(1986)、PP.23~32
- 6) 岡田、関：電算機一アクチュエータ 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、日本建築学会論文報告集(1979)、PP.25~31
- 7) 金多、西澤：ハイブリッド方式のオンライン地震応答載荷実験法の開発と若干の動的実験、第2報、日本建築学会論文報告集(1983)、PP.36~42
- 8) 山田、家村、伊津野、大本：ハイブリッド実験による修復・補強RC部材の地震時剛性劣化過程、土木学会論文集(1987)、PP.407~416
- 9) 横山、睦好、町田：仮動的手法を用いたRC部材の弾塑性応答、土木学会年次講演会論文集(1987)、第5部、PP.238~239
- 10) 本橋、尾崎、山崎：鉄筋コンクリート片持ち梁の地震時応答への入力波形の影響、第7回コンクリート工学協会年次講演会論文集(1985)、PP.449~452