

[2085] 動の実験における相似則の検証と載荷速度の影響について

正会員 小野 新 (日本大学理工学部)  
 同 安達 洋 (日本大学理工学部)  
 同 ○中西 三和 (日本大学理工学部)  
 高梨 成次 (日本大学 大学院)

1. はじめに

近年、構造物(部材)の動的挙動を調べるために振動台実験やオンライン応答実験が行なわれるようになった。振動台実験は実時間での応答が得られる半面、装置上の制約から試験体は縮小模型にならざるをえない場合が多い。一方、オンライン応答実験は比較的事物大に近い試験体での実験が可能であるが、加力が準静的であるといった特徴がある[1]。これら実験法を通して総合的に構造物の動的性状を論じる場合には、縮尺や載荷速度等の違いをもつ双方の実験結果を共通のテーブルで評価するための基礎的な研究が必要となる。

本論文では、鉄筋コンクリート(以後、RC)造柱を対象に縮尺の異なる複数の模型試験体を作製し、静的実験および一質点系の振動台実験とオンライン応答実験を行い載荷速度が応答結果に及ぼす影響と相似則を検証することを目的とする。

2. 実験概要

実験は2シリーズ行った。振動台実験結果を評価する際、前提となるべき数学モデルの妥当性と載荷速度の影響を調べたシリーズIの実験と、静的実験、振動台実験、オンライン応答実験結果の比較から相似則の検証を行ったシリーズIIの実験である。

2.1 相似則

縮尺の異なる試験体の静的実験、振動台実験およびオンライン応答実験結果に対し共通の評価を行うために、1質点系とした場合の弾性固有周期が約0.25secの実大構造物(以後、プロトタイプ)を想定した。模型試験体の縮尺率は振動実験用で1/9、オンライン応答実験用で1/3である。種々の物理量のプロトタイプに対する相似比と両実験供試体の相似比を整理して表1に示した。

2.2 試験体および使用材料

前項の相似比を参考に作製したシリーズIとシリーズIIのRC造柱供試体配筋図および構造諸元を図1および表2に示

表1 模型実験における相似則

物理量	次元	振動実験	オンライン	$\lambda_p/\lambda_s$
		相似比 $\lambda_p$	相似比 $\lambda_s$	
長さ	L	1/9	1/3	3
時間	T	1/3	1/√3	√3
質量	M	1/81	1/9	9
加速度	L T <sup>-2</sup>	1	1	1
速度	L T <sup>-1</sup>	1/3	1/√3	√3
変位	L	1/9	1/3	3
力	M L T <sup>-2</sup>	1/81	1/9	9
ヤング率	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	1	1	1
応力度	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	1	1	1
ひずみ	1	1	1	1
ばね定数	M T <sup>-2</sup>	1/9	1/3	3
周波数	T <sup>-1</sup>	3	√3	1/√3

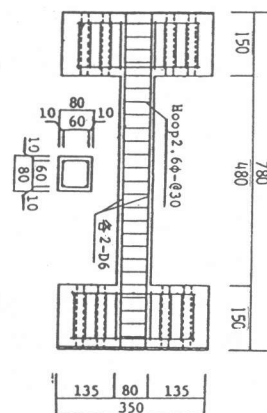


図1 試験体配筋図

表2 構造諸元

	B (cm)	D (cm)	主筋量 (Pg%)	帯筋量 (Pw%)	L (cm)	軸力 (ton)
シリーズI 振動実験	8.0	8.0	4-D6 (2.00%)	2.0 φ-@20 (0.39%)	48	2.20
シリーズII 振動実験	8.0	8.0	4-D6 (2.00%)	2.6 φ-@30 (0.44%)	48	2.70
オンライン	24.0	24.0	4-D19 (1.99%)	D6-@60 (0.44%)	144	24.3

した。市販されている材料を使ったために主筋比、せん断補強筋比に若干の差がある。また、コンクリートは普通ポルトランドセメントを用い、骨材はシリーズⅠでは最大粒径が7.5mm、シリーズⅡでは10mmとし振動台実験、オンライン応答実験用供試体とも同一材料とした。表3にコンクリートと鉄筋の材料試験結果を示した。

表3 材料試験結果

シリーズⅠ			シリーズⅡ・オンライン		
コンクリート 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	鉄筋降伏強度		コンクリート 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	鉄筋降伏強度	
	D6	2.0φ		D19	D6
266	4545	2212 *	276	3726	2656 *

※) \*については最大強度鉄筋降伏強度: (kg/cm<sup>2</sup>)

### 2.3 実験装置

振動台実験装置およびオンライン応答実験装置を図2、図3に示した。振動台実験では供試体に振動を励起させるための質量として約2.5tonの鋼製のおもりを載せるが、回転を拘束するためシリーズⅠの実験ではおもりの前後をピンサポートで支持し、シリーズⅡではパンタグラフ機構を用いた。また、オンライン応答実験では、建研式加力装置(パンタグラフ機構)を用いた。これら装置を用いると両実験とも部材は一質点系せん断型モデルに対応した逆対称な応力状態となる。測定は、振動台実験では、振動台および質点の加速度、相対変位、主筋ひずみであり、オンライン応答実験では、復元力、相対変位、主筋ひずみである。

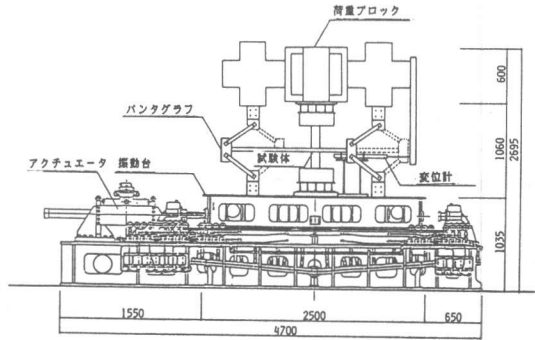


図2 振動台実験装置(シリーズⅡ)

### 2.4 実験方法

#### シリーズⅠ

振動台実験は、プロトタイプに対する入力地震波が 1940 El-Centro NS 成分であるとし、最大加速度を683.4galに補正した。また、時間の相似比から原波形の時間軸(30秒間)を1/3に圧縮した。静的実験は、振動台実験より得られた部材の時刻歴応答変位と同経路の変位履歴をオイルジャッキにより静的に制御し、対応する復元力の測定を行った。

#### シリーズⅡ

1) 静的実験は縮尺の異なる2体の試験体に対し、予め設定した载荷則(漸増変位制御)のもとに行った。2) 振動台実験はシリーズⅠと同様の方法で行った。3) オンライン応答実験は、振動台実験で実測した振動台加速度波形を入力地震波として用いるが、データのサンプリング時間(1/200sec)を相似比( $\sqrt{3}$ )倍に引き伸ばして入力した。また、計算機内でシュミレートした1質点系の数学モデルの減衰定数(h)や固有円振動数( $\omega$ )は、振動台実験結果に対するパラメータ同定(次節参照)の結果に相似則を適用して求めた値を使用した。

### 3. 数学モデルとパラメータ同定

各シリーズの動的実験結果を一質点系せん断型モデルとして扱うために、ここではまず振動台

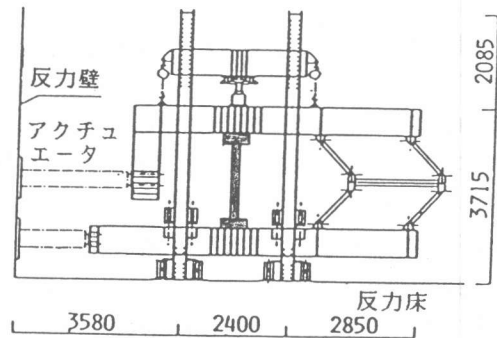


図3 オンライン応答実験装置

実験結果から非線形最小二乗法[2]を用いて数学モデルのパラメータを同定する方法について述べる。この結果を用いて他の実験結果との比較を行った。

一質点系の振動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{y} \quad \dots (1)$$

実験結果が(1)式で再現できる挙動であると仮定すると、実験では質量(m)、絶対加速度( $\ddot{x} + \ddot{y}$ )、相対変位(x)が計測され既知であり、速度( $\dot{x}$ )はxを微分して得られるから、c、kが未知なパラメータとなる。

このパラメータを同定する流れ図を図4に示した。ただし減衰係数cはピンサポートやパンタグラフの装置上の摩擦効果を含んだ値であり、複雑に変化するものと考えられるが、ここでは振動中絶えず一定であるとした。また、弾塑性状態でのkの評価には適切な部材の復元力特性モデルを設定する必要がある。ここでは、図5に示すように、RCの履歴曲線の特徴を表現するために、バイリニアモデル、最大点指向モデル、スリップモデルを組合わせた複合モデルとした[3]。この複合モデルにおけるパラメータは、各モデルの初期剛性、弾性限変形、バイリニア係数(第二勾配の初期剛性に対する比)となる。

表4に同定結果を示した。また、このパラメータを用いて解析した時刻歴応答変位および応答履歴曲線を実験値と比較して図6、図7に示した。実験値と解析値は非常に良い適合性を示した。

#### 4. 載荷速度の影響 (シリーズIの検討)

載荷速度の影響を調べるために、振動台実験より得られた時刻歴応答変位に従って静的な載荷実験を行った。この荷重-変形曲線を図8に

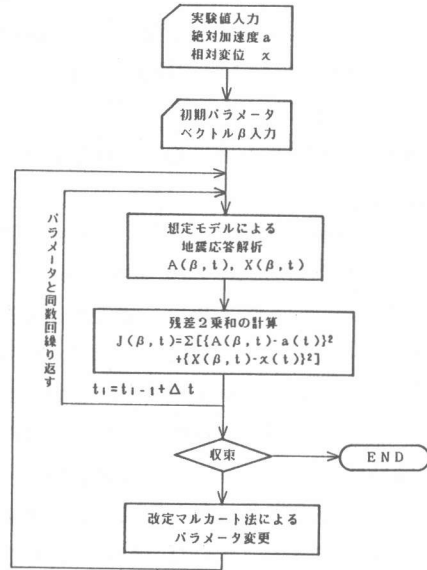


図4 同定のフローチャート

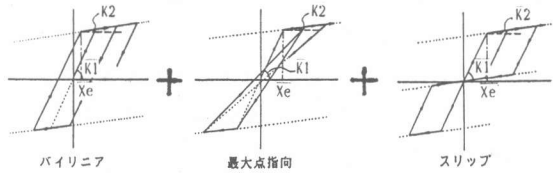


図5 復元力モデル

表4 振動台実験同定結果

数学モデル	初期剛性(K1)	第二勾配(K2)	弾性限変形(Xe)	減衰係数
バイリニア	378.947	157.422	0.0825	4.034
最大点指向	1578.777	-235.109	0.1301	
スリップ	1489.717	514.463	0.4965	

表4に同定結果を示した。また、このパラメータを用いて解析した時刻歴応答変位および応答履歴曲線を実験値と比較して図6、図7に示した。実験値と解析値は非常に良い適合性を示した。

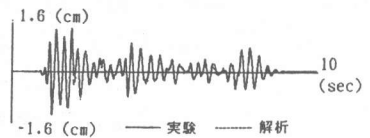


図6 時刻歴応答変位 (シリーズI)

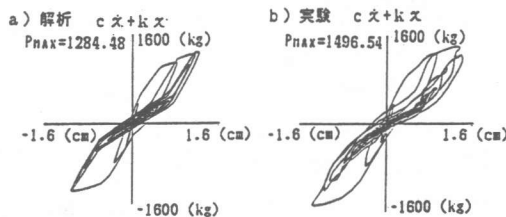


図7 応答履歴曲線

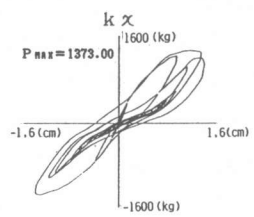


図8 荷重-変形曲線

示した。図7の振動台実験結果に比べ静的実験結果の履歴曲線は膨らみの大きなループ性状を示している。また、振動台実験結果の最大応答せん断力は同経路をたどった静的実験結果のそれと比べ約10%上昇しているが、最大耐力近傍での速度が0に近いことを考えると、減衰力以外の原因によるものと考えられる。

振動台実験を対象に、速度効果に対し以下の検討を行なった。

### エネルギー的な検討

一質点系の振動方程式をエネルギー的な釣り合いとして考えると(1)式の左辺の第一項は、運動エネルギー( $E_t$ )、第二項は、減衰力による消費エネルギー( $E_h$ )、第三項は、変形エネルギー( $E_d$ )である。これらは時間の経過とともに累積され、そのエネルギーの総和は、構造物に投入された地震外乱の総エネルギーに等しい。

図9に実験結果より得られた $E_t$ ,  $E_h$ ,  $E_d$ の諸量の占める時間的な変動を示した。なお、 $E_h$ を求める際に使用した粘性減衰係数 $c$ はパラメータ同定の結果から得られた値を用いている。この $c$ を用いた消費エネルギー量 $E_h$ は、応答の後半でも増加する傾向にある。一方変形エネルギー量 $E_d$ は初期の塑性化に伴って大きなエネルギー量を蓄積するが、その後の増加はみられずほぼ一定値を示した。

### 主筋のひずみ速度

柱頭主筋の荷重-ひずみ関係を図10に、荷重-ひずみ速度関係を図11に示した。また、経験したひずみ速度の頻度分布を図12に示した。荷重-ひずみ曲線は、比較的応答の早い時期に明瞭な降伏現象を示し、引張りひずみが残留する。ひずみ速度は、最大荷重近傍で生じた瞬間的な降伏時に最大値を示しているが、それ以外の荷重反転時には最小になるような傾向がある。また、荷重が0近傍の圧縮側で負のひずみ速度が増大する傾向がみられる。尚、ひずみ速度の最大値は降伏時を除けば負側で約 $-25 \times 10^{-2} (1/sec)$ 、正側で約 $15 \times 10^{-2} (1/sec)$ であり、また図12の頻度分布からそのひずみ速度は、 $5.0 \times 10^{-2} \sim 0.1 \times 10^{-2} (1/sec)$ が大半を占めている。これはプロトタイプひずみ速度が実験値の1/3となる相似則を考慮すれば既往の研究[4]でRC部材の鉄筋が地震時に受けるとされ

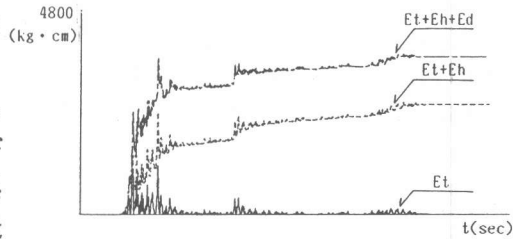


図9 エネルギーの時間的变化

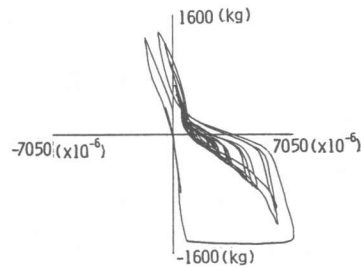


図10 荷重-ひずみ曲線

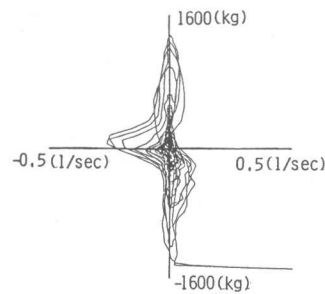


図11 荷重-ひずみ速度曲線

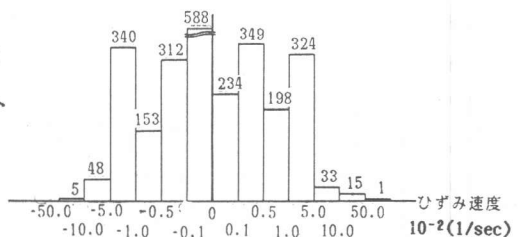


図12 ひずみ速度頻度分布

ている $10^{-3} \sim 10^{-1}$ (1/sec)のひずみ速度の範囲にあることがわかる。また、単調荷重時の鋼材の実験例をまとめて小谷[4]が推定した次式により鉄筋の降伏強度上昇率を本実験結果にあてはめ検討した。

$$f_y' = f_y (1.20 + 0.05 \log \dot{\epsilon}) \dots (2)$$

$f_y$ : 静的な降伏点強度  $\dot{\epsilon}$ : ひずみ速度  
 上式によると、本実験におけるひずみ速度の最も頻度の多い範囲( $10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$ /sec)では、降伏強度の上昇率は約5%~15%、最大のひずみ速度( $5 \times 10^{-1}$ /sec)で約20%の上昇となり、静的最大強度に対する振動実験結果の強度増加率(約10%)がある程度説明できる。

### 5. 相似則の検証(シリーズIIの検討)

縮尺の異なる試験体を用いたRC造柱の静的実験結果の比較および振動台実験とオンライン応答実験結果の比較から相似則の検証を行った。

#### 静的実験結果の比較

両試験体の諸強度および変形を比較し表5に示した。また、表中には材料強度をもとに既往の提案式によって計算した推定値を示し、両試験体の強度比および変形比の確認を行った。図13に最終破壊状況を、図14には、荷重-変形曲線の荷重と変位をそれぞれ相似比によって合わせ、重ね書きし比較した。

破壊経過はいずれも、主筋の降伏後、最大耐力を経験し最終的に圧縮側コンクリートの圧壊が生じている点で同一であるが、ひび割れ本数に差が生じている。また、荷重-変形曲線を比較すると縮尺の小さな振動実験用試験体ではスリップ現象が顕著にみられ、その履歴面積が多少小さいことを除けば全般的に両試験体の履歴性状は相似した結果である。

#### 動的実験結果の比較

振動台実験およびオンライン応答実験における最大応答値を表6に示し比較を行った。

また、両実験における応答履歴曲線および時刻

表5 静的実験結果一覧(シリーズII)

	曲げひび割れ		曲げ降伏		最大耐力		
	強度(Kg)		変形		強度(Kg)		変形(mm)
	実験	解析	(mm)	(mm)	実験	解析	
振動実験用試験体	358 (1.01)	362	0.73	880   968 (1.10)	4.32	965   968 (1.00)	18.25
オンライン用試験体	2082 (1.57)	3282	1.08	8567   9134 (1.07)	11.52	9114   9134 (1.00)	20.16
両結果の比	5.82	9.00	1.48	9.74   9.44	2.67	9.44   9.44	1.10

( )内の数字は実験値に対する解析値の比

$$Q_{bc} = (N/A + 1.8 F_c) Z / h$$

$$Q_y = (0.8 a \sigma_y D + 0.5 N D (1 - N / b D F_c)) / h$$

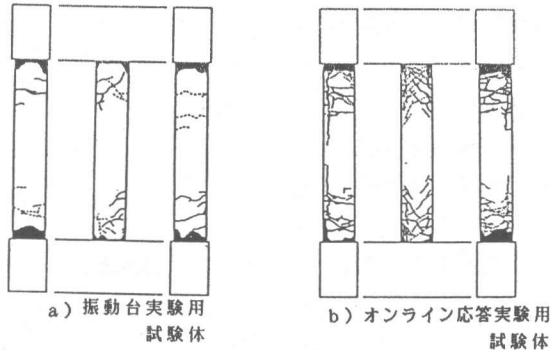


図13 最終破壊図[静的実験]

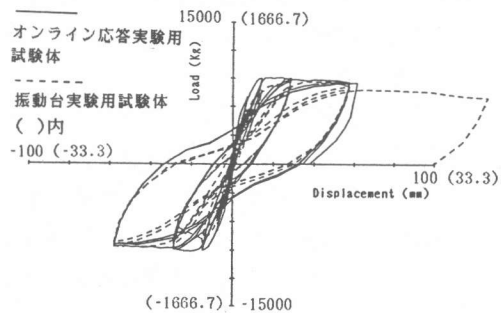


図14 荷重-変形曲線(シリーズII)  
[静的実験]

表6 最大応答値の比較

	振動実験	オンライン	オ/振	相似比
変位 (mm)	14.56	29.58	2.03	3.00
速度 (kine)	30.88	45.53	1.47	1.73
加速度 (gal)	598.80	714.53	1.19	1.00
せん断力(kg)	1416.87	9382.90	6.62	9.00

変位・速度・加速度は、振動台に対する質点の相対応答値

歴応答変位を比較し図15および図16に示した。振動台実験結果はその応答履歴曲線に示されるように荷重の反転時に応答値が跳ね上がるような現象が生じオンライン応答実験結果と多少の差異がみられるが、両実験結果の最大応答値の比は相似比に比較的一致している。また、時刻歴応答変位の比較においても、部分的に振動台実験結果が大きな応答を示しているものの全体的には比較的良好な結果といえる。

6. まとめ

以上、振動台実験とオンライン応答実験結果の相関性を調べるために行なった2シリーズの

実験から载荷速度と縮尺の異なる模型試験体の相似則に対し以下の知見を得た。

- 1) 振動実験結果を非線形最小二乗法によって同定したパラメータを用い解析した結果は実験値の応答性状を良好に再現できた。
- 2) 振動実験結果とその時刻歴応答変位の経路をたどった静的実験結果の比較から、载荷速度が最大耐力におよぼす影響は主筋のひずみ速度による降伏強度の上昇で説明できる。
- 3) 縮尺の異なる試験体による静的実験結果の比較から、静的な力学的性状に対して相似則を満足する結果を得た。
- 4) シリーズIIの振動台実験では、応答値の跳ね上がるような現象で最大応答せん断力がやや大きな値を示し、オンライン応答実験との比を力の相似比(9倍)と比較すると若干の差がみられた。しかし両実験の全般的な応答性状は近似している。

謝辞 本論文は昭和62年度文部省科学研究費補助金(海外学術研究)『繰り返し荷重に対する鉄筋コンクリート構造物の応答性状に関する研究』(代表者:日本大学 教授 色部 誠)によるものである。

参考文献

- 1) Aktan, H. M. : Pseudo-Dynamic of Structures, Proc. Of the ASCE, Vol. 112, No. EM2, February 1986, PP183-197
- 2) 中川徹、小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会
- 3) 石丸辰治、安達洋、中西三和、牛丸裕: 多入力地震波を受ける鉄筋コンクリート構造物の応答性状, コンクリート工学年次論文報告集 第九巻 第二号、1987、pp423-428
- 4) 小谷俊介: 鉄筋コンクリートにおける载荷速度の影響、コンクリート工学 Vol. 21, No. 11, Nov. 1983, pp. 23-34

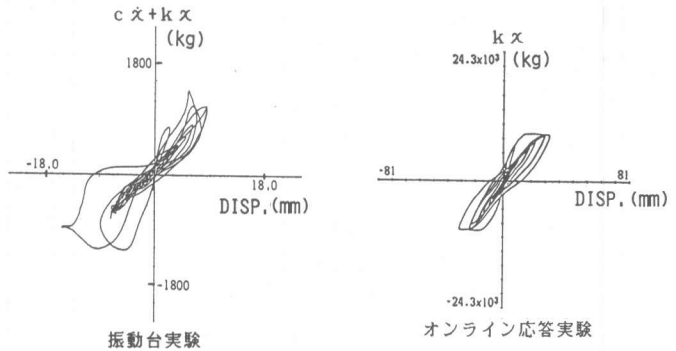


図15 応答履歴曲線

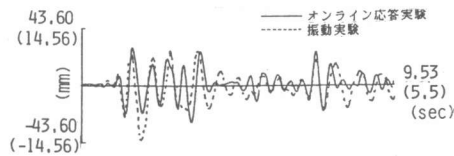


図16 時刻歴応答変位