

論文

[2104] 鉄筋コンクリート造柱の振動台実験とオンライン応答実験

堤秀樹*1・安達洋*2・神田亮*3・本木実*1

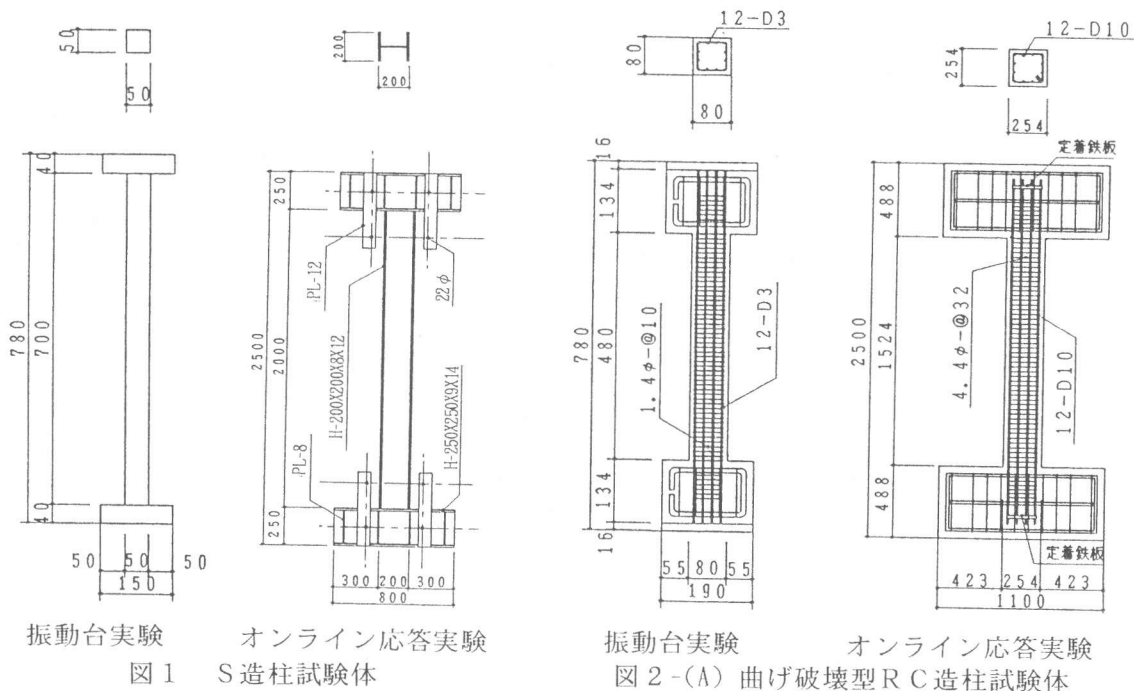
1. はじめに

構造物の動的非線形挙動を調べる手法として、サブストラクチャ解析法[1]の概念をオンライン応答実験法に適用したサブストラクチャ・オンライン応答実験（以下、SOT）法がある。オンライン応答実験では応答計算を行う際、実試験体の接線剛性を評価することが難しいために、“安定条件が緩やかな”陰な積分法は用いにくく、一般的には陽な積分法($\beta=0$ のNewmark- β 法または中央差分法)が用いられている。また、SOT法では、解析モデルの自由度が高くなりがちであることから、数値積分法は無条件安定で、かつ接線剛性の評価を必要としない方法が望ましい。これまで、この問題を解決するための数値積分法がいくつか提案されている[2][3]。また、筆者等も、積分計算に接線剛性を必要とせず安定精度が確保できる積分法として、陰な積分法に初期応力法を組み込んだ数値積分法（以下、提案法）を提案している[4]。

本論文は、まず鉄骨造（以下、S造）柱および鉄筋コンクリート造（以下、RC造）柱に対して1質点1自由度系を想定した振動台実験を行い、次に提案法を用いたSOT法によって振動台実験から得られた応答結果を再現可能であることを確認した。

2. 実験概要

2.1 試験体



*1日本大学大学院	理工学研究科海洋建築工学専攻、	(正会員)
*2日本大学教授	理工学部海洋建築工学科、	工博 (正会員)
*3日本大学助手	生産工学部建築工学科、	工修 (正会員)

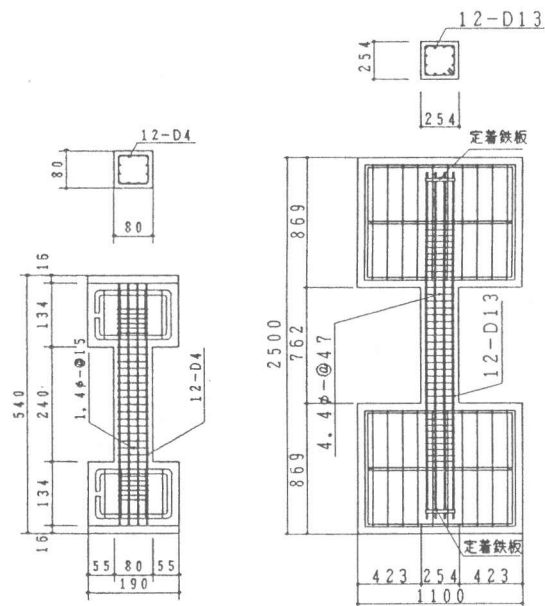
振動台実験で用いた試験体は、S造柱1体と、RC造柱2体の計3体で、オンライン応答実験で用いた試験体も振動台実験と同様にS造柱1体、RC造柱2体の計3体である。両実験で用いたRC造柱試験体は、それぞれ1体が曲げ破壊型、もう1体がせん断破壊型になるように設計されている。また、振動台実験で用いたRC造柱試験体は、実想定柱の約1/9、オンライン応答実験で用いたRC造柱試験体は、実想定柱の約1/3の縮小模型となるよう各パラメータを相似則に従って設定している。S造柱の試験体形状を図1に、RC造柱の試験体形状と構造諸元をそれぞれ図2-(A)、(B)および表1に示す。

2.2 使用材料

振動台実験およびオンライン応答実験で用いたRC造柱試験体の材料は、実想定柱に対する相似則をできるだけ満足するように選定した。振動台実験で用いたRC造柱試験体には、コンクリートに普通ポルトランドセメント、骨材に川砂を使用し1.2mm以上5.0mm以下を粗骨材、1.2mm以下を細骨材とした。主筋には曲げ破壊型でD3、せん断破壊型でD4の異形鉄筋を使用した。また、オンライン応答実験で用いたRC造柱試験体には、コンクリートに普通ポルトランドセメント、骨材に川砂利（最大粒径、10mm）・川砂を、主筋には曲げ破壊型でD10、せん断破壊型でD13の異形鉄筋を使用した。材料試験結果を表2に示す。

2.3 実験装置

振動台実験装置概念図を図3に示す。振動台実験装置[5]は、試験体の頭部に質点とした鋼製のおもりを負荷し、上下方向の回転をピンサポートによって、水平面内の回転をハンカゲワによって拘束し、試験体に逆対称な変形状態を与える1質点1自由度の振動系とする装置である。また、軸力の変動を少なくするために鋼製のおもりを直接試験体に負荷せずスプリングを介して試験体に載荷している。振動台実験における計測項目は、試験体の相対水平変位および鋼製のおもりと振動台との相対水平変位を非接触型レーザー変位計で、柱頭・柱脚部に生じる曲げモーメントを曲げモーメント計で、軸力をロードセルで、軸変位をストローク式変位計で、振動台および鋼製のおもりの加速度を加速度計でそれぞれ計測した。



振動台実験 オンライン応答実験
図2-(B) せん断破壊型RC造柱試験体

表1 構造諸元

		主筋 Pg (%)	帯筋 Pw (%)	シアスパン比 M/QD
振動台	曲げ破壊型	12-D3 1.49	1.4φ-@10 0.39	3.0
	せん断破壊型	12-D4 2.69	1.4φ-@15 0.26	1.5
オンライン	曲げ破壊型	12-D10 1.33	4.4φ-@32 0.38	3.0
	せん断破壊型	12-D13 2.36	4.4φ-@47 0.26	1.5

表2 材料試験結果

		コンクリート 圧縮強度 (kg/cm ²)	主筋 降伏強度 (kg/cm ²)	帯筋 降伏強度 (kg/cm ²)
振動台	曲げ破壊型	261	2632	4218*
	せん断破壊型	269	2956	
オンライン	曲げ破壊型	213	3647	2833
	せん断破壊型		3481	

注) *は引張強度

オンライン応答実験装置を図4に示す。オンライン応答実験装置は、通称建研式加力装置と呼ばれ常に上部加力ビームとベースが平行に保たれるようパンタグラフが取り付けられている。これにより試験体は常に逆対称の変形状態となる。計測項目は、応答解析に取り込まれる試験体の復元力と軸力をロードセルで、応答変位として制御される試験体の相対水平変位をマグネスケールによって計測した。

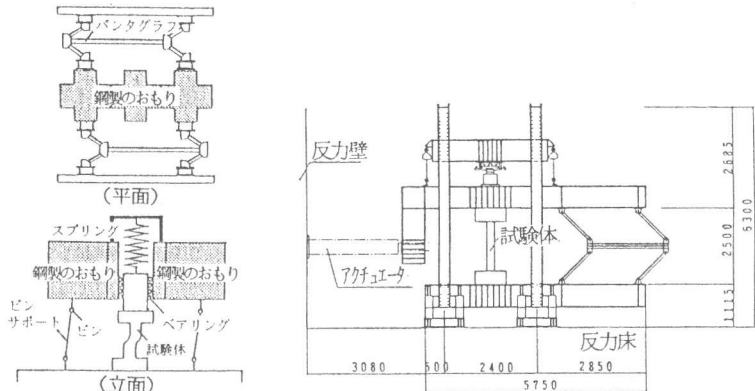


図3 振動台実験装置概念図 図4 オンライン応答実験装置

2.4 入力地震波

振動台実験で用いた入力地震波は、1968年十勝沖地震（八戸港湾）NSおよびEW方向成分であり、S造柱に対しては弾性、RC造柱に対しては、弾塑性範囲の応答が得られるように最大加速度を補正し、時間軸を相似則に従い1/3に圧縮した。オンライン応答実験の入力加速度波形は、振動台上で実測された加速度波形を用いるが時間軸は $\sqrt{3}$ 倍に引き延ばした。入力地震波諸元を表3に示す。

表3 入力地震波諸元

		入力地震波：1968年十勝沖地震（八戸港湾）		
		加振レベル	最大加速度	成分
振動台実験	S造柱	弾性	39(gal)	EW
	曲げ破壊型RC造柱	弾塑性	406(gal)	NS
	せん断破壊型RC造柱	弾塑性	398(gal)	EW
オンライン 応答実験	S造柱	振動台上で実測された加速度波形		
	曲げ破壊型RC造柱			
	せん断破壊型RC造柱			

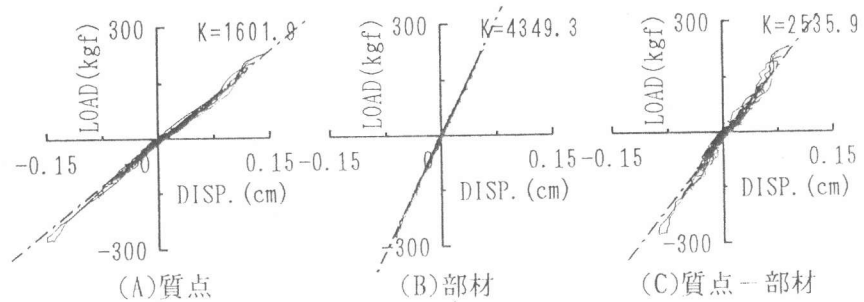


図5 荷重-変形曲線

3. 振動系のモデル化

S造柱試験体による弾性振動台実験の荷重-変形曲線を図5に示す。図5-(A)は応答せん断力と質点水平変位の関係、図5-(B)は応答せん断力と試験体水平変位の関係、図5-(C)は応答せん断力と質点水平変位から試験体水平変位を差し引いた変位の関係である。図5-(C)に示したような質点水平変位と試験体水平変位の差が生じた原因は、試験

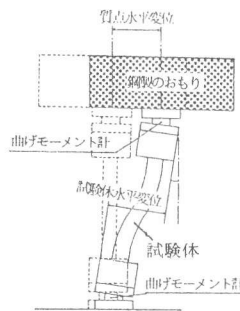


図6 変形概念図

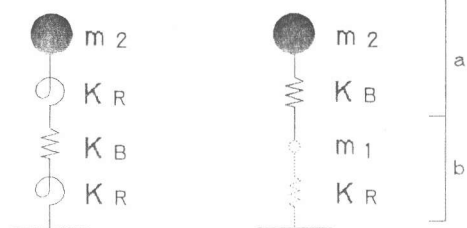


図7 解析モデル

a: 振動台実験における試験体部分
b: 回転変形を表す部分

図8 解析モデル

体に作用するせん断力を計測するために試験体の柱頭・柱脚に設置した曲げモーメント計の回転変形によるものと考えられる。この変形状態の概念図を図6に示す。これは、図7に示すように試験体の水平変形を表す弾塑性バネ(K_B)とモーメント計の回転変形を表す回転バネ(K_R)が直列に結合された解析モデルとして表現される。一方、オンライン応答実験装置では、試験体の相対水平変位のみが与えられる装置となっている。このためオンライン応答実験において図7に示す解析モデルを用いた場合、試験体の水平変形と材端の回転変形を分離することが出来ない。従って、ここではこの変形状態をシュミレーション可能なモデルとして図8に示す解析モデルを設定した。この解析モデルは、振動台実験の試験体部分を表現する質点と曲げモーメント計の回転変形に相当する水平変形を表現する質量の非常に小さい仮定の質点を持った2質点系モデルであり、仮定の質点部分は、計算機内で模擬するSOT法を採用した。

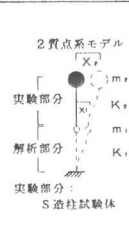


4. オンライン応答実験手法

オンライン応答実験の諸元を表4に示す。図8に示す解析モデルは、仮定の小さな質点を持つため、1次の固有振動数に対し2次の固有振動数が非常に高く、通常の陽なNewmark- β 法($\beta=0$)では、非常に小さな時間刻みとしない限り解を得ることが困難である。本実験では筆者等が提案した数値積分法[4]を用いて実施した。提案法は、以下のような条件を満足するものである。

- 1) 積分時間刻みを極端に小さくすることなく、解の安定性が確保できる。
- 2) 実試験体の接線剛性を用いずに材料非線形挙動を追跡できる。
- 3) 1ステップ内で変位増分方向が、反転しない制御が行える。

これらの条件を満足させるため、1)については陰なNewmark- β 法($\beta=1/4$)を基本とした数値積分法とし、2)については仮定の剛性 K_I を用いた修正計算によって非線形挙動を追跡する。この修正計算を複数回行うと、3)は満足されないことがあるが、提案法の修正計算は、その収束性が非常に良好であり修正計算1回でもかなりの精度の解が得られることが確認されている[4]。

表4 実験諸元

実験名	実験モデル	減衰定数
S造柱試験体 弾性実験	 $m_2 = 17.83$ $m_1 = 0.01$ $[kgf \cdot sec^2/cm]$ $(K_2 = 8463.0)^*$ $K_1 = 7607.7$ $[kgf/cm]$ $(\omega_1 = 15.0)^{**}$ $(\omega_2 = 1267.8)^{**}$ $[rad/sec]$ $K_{12} = 5 \cdot K_2$	V-型減衰 $h_1 = h_2 =$ 0.0759
曲げ破壊型RC造柱試験体 弾塑性実験	 $m_2 = 27.19$ $m_1 = 0.01$ $[kgf \cdot sec^2/cm]$ $(K_2 = 16102.6)^*$ $K_1 = 5808.5$ $[kgf/cm]$ $(\omega_1 = 12.5)^{**}$ $(\omega_2 = 1480.4)^{**}$ $[rad/sec]$ $K_{12} = K_2$	V-型減衰 $h_1 = h_2 =$ 0.0167
せん断破壊型RC造柱試験体 弾塑性実験	 $m_2 = 26.14$ $m_1 = 0.01$ $[kgf \cdot sec^2/cm]$ $(K_2 = 89691.2)^*$ $K_1 = 11518.4$ $[kgf/cm]$ $(\omega_1 = 19.8)^{**}$ $(\omega_2 = 3181.8)^{**}$ $[rad/sec]$ $K_{12} = K_2$	V-型減衰 $h_1 = h_2 =$ 0.0444

注) *弾性剛性計測実験による実験値 **弾性剛性を用いた計算値

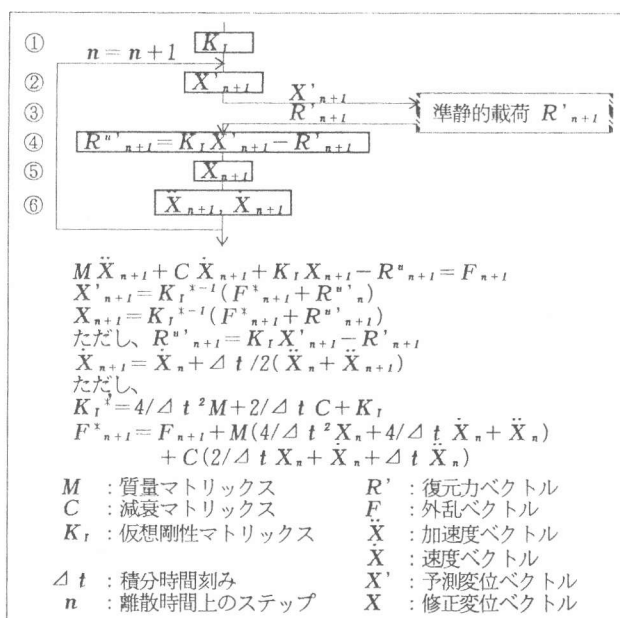


図9 実験手順

この特長を活用し、1ステップ内で変位制御1回、修正計算1回のアルゴリズムを組み立てる。図9に提案法を用いた実験手順を示した。以下にその手順を振動方程式の解法に従って説明する。

- ① 適切な仮定の剛性 K_I を定める。
- ② 予測変位 X'_{n+1} を計算する。
- ③ 予測変位 X'_{n+1} まで試験体を加力して、それに対応する復元力 R'_{n+1} を計測する。
- ④ 不釣り合い力 R''_{n+1} を計算する。
- ⑤ 不釣り合い力 R''_{n+1} により修正変位 X_{n+1} を計算する。
- ⑥ 応答加速度 \ddot{X}_{n+1} 、応答速度 \dot{X}_{n+1} を計算する。

この②から⑥の仮定を地震継続時間分繰り返す。なお、S造柱試験体によるオンライン応答実験で用いた仮定の剛性 K_I は、提案法が真の剛性を用いずに精度の良い解が得られるかを調べるために、弾性剛性を計測する実験から得られた弾性剛性 K_2 の5倍の値とした。また、RC造柱試験体によるオンライン応答実験で用いた仮定の剛性 K_I は、計測された弾性剛性 K_2 を用いた。また、減衰定数は振動台実験結果からパラメータ同定により求めた。さらに、実験では試験体摺動面の摩擦力による誤差が発生するため、エネルギー補正法[6]により誤差補正を行った。

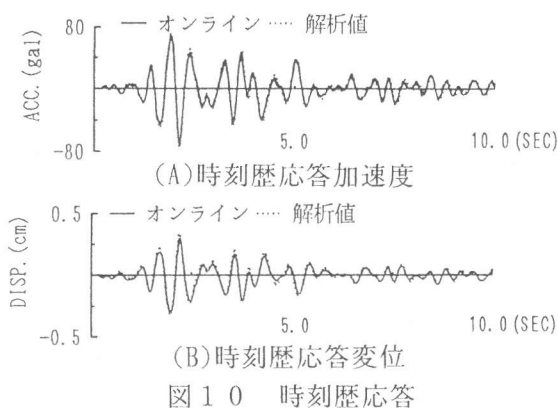


図10 時刻歴応答

5. 実験結果の比較および検討

5.1 S造柱試験体

S造柱試験体によるオンライン応答実験の時刻歴応答加速度と時刻歴応答変位を解析値と比較して図10-(A)、(B)に示す。なお、解析に用いた弾性剛性は弾性剛性計測実験から得られた値 K_2 を用いた。オンライン応答実験結果は、仮定の剛性として弾性剛性の5倍を用いているにもかかわらず、解析値と良く一致しており精度の良いしかも安定した解が得られることがわかった。次に、オンライン応答実験の時刻歴応答加速度と時刻歴応答変位を振動台実験結果と比較して図11-(A)、(B)に示す。応答加速度は良く一致している。一方、応答変位は振動台実験の振幅が幾分大きいことがわかる。

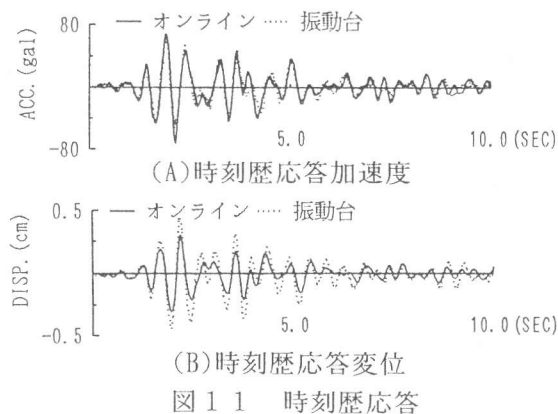


図11 時刻歴応答

5.2 曲げ破壊型RC造柱試験体

曲げ破壊型RC造柱試験体によるオンライン応答実験の時刻歴応答加速度と時刻歴応答変位を振動台実験結果と比較して図12-(A)、

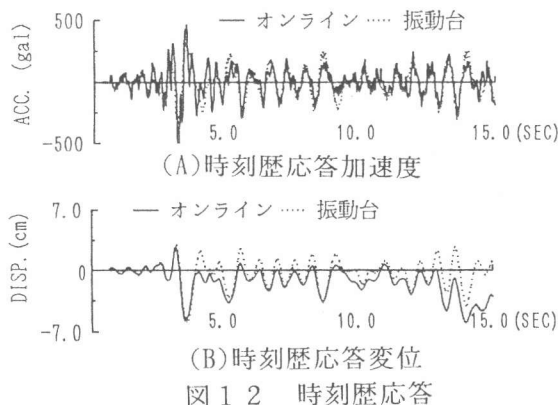


図12 時刻歴応答

(B)に示す。また、荷重-変位曲線を図13-(A)、(B)に示す。図12-(A)の時刻歴応答加速度はほぼ一致している。図12-(B)の時刻歴応答変位では両者の周期特性はほぼ一致しているが、オンライン応答実験の応答変位が4秒以降、負側にドリフトした。このドリフトの原因は、オンライン応答実験において試験体設置時に若干の初期変位が試験体に与えられ正負の耐力に差が生じたためと思われる。

5.3 せん断破壊型RC造柱試験体

せん断破壊型RC造柱試験体によるオンライン応答実験の時刻歴応答加速度と時刻歴応答変位を振動台実験結果と比較して図14-(A)、(B)に示す。また、荷重-変位曲線を図15-(A)、(B)に示す。振動台実験結果の荷重-変位曲線には乱れがみられるが、時刻歴応答値はほぼ一致している。また、荷重-変位曲線より両実験とも塑性化が進んでいないことがわかる。S造柱試験体や曲げ破壊型試験体に比べ剛性が高い試験体のオンライン応答実験でも、提案法が適用可能であることが確認された。

6. まとめ

振動台実験結果を模擬する解析モデルを設定し、提案法を用いたオンライン応答実験を実施した。両実験結果の比較から次のような見を得た。

- 1) 振動台実験を模擬する解析モデルを設定した。
- 2) 提案法を用いたSOT法は、高い振動成分を持つ系に対しても解が安定している。

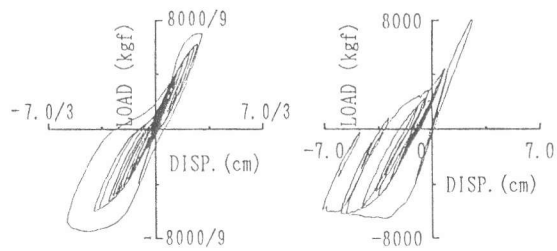
また、実試験体の接線剛性を用いずにRC造柱の弾塑性挙動を追跡できた。

- 3) 2)より提案法は、オンライン応答実験に適用可能であることが確認できた。

【謝辞】本研究を行うにあたり日本大学、白井伸明 助教授、中西三和 専任講師に多くの御助言をいただいたことに深く感謝致します。

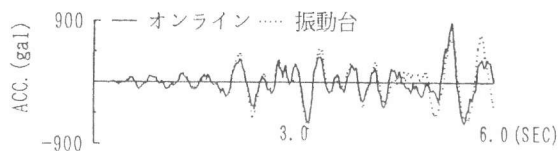
【参考文献】

- [1] K. Bathe "Finite Element Procedures In Engineering Analysis" Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New JE, pp449-454
- [2] 中島 他「非線形動的実験のための数値積分法」日本建築学会論文報告集, 第417号, 1990年, 11月, pp107-117
- [3] P. B Shing, M. T. Vannan and E. Cater "Implicit Time Integration for Pseudodynamic Tests" Earthquake eng. and Structural dynamics 20, pp551-576 (1991)
- [4] 神田 他「初期応力法を組み込んだ陰数値積分法(その1)~(その3)」日本建築学会大会学術講演会梗概集(北陸) 1992年8月, pp695-700
- [5] 北嶋 他「2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の応答性状に関する研究(その8. 実験概要)」日本建築学会大会学術講演会梗概集(北陸) 1992年8月, pp603-604
- [6] 神田 他「オンラインシステムによる疑似動的実験の誤差評価に関する研究(その2)」日本建築学会大会学術講演会梗概集 昭和60年10月, pp191-192

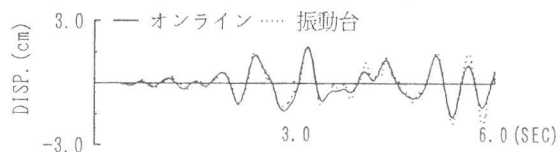


(A)振動台実験 (B)オンライン応答実験

図13 荷重-変位曲線

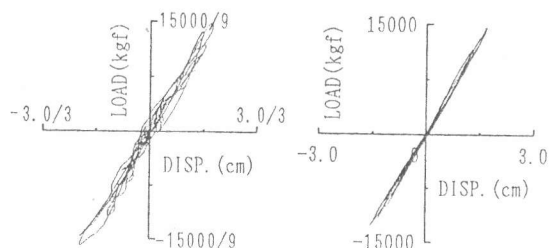


(A)時刻歴応答加速度



(B)時刻歴応答変位

図14 時刻歴応答



(A)振動台実験 (B)オンライン応答実験

図15 荷重-変位曲線

【注】図11~図15の振動台実験結果は下記の相似比を考慮して表現した。

相似比

長さ 振動台:オンライン = 1 : 3

力 振動台:オンライン = 1 : 9

時間 振動台:オンライン = 1 : $\sqrt{3}$