

鉄筋コンクリート造フレームのオンライン地震応答実験

On-Line Test on Reinforced Concrete Frame

梶 山 健 二*・豊 嶋 学*・隈 澤 文 俊*

中 埜 良 昭*・岡 田 恒 男*

Kenji KABAYAMA, Manabu TOYOSHIMA, Fumitoshi KUMAZAWA,
Yoshiaki NAKANO and Tsuneo OKADA

1. はじめに

オンライン地震応答実験（以下オンライン実験）は、コンピューターによる地震応答解析と加力実験装置を組み合わせることで、部材や構造物の動的な挙動をシミュレートできる実験手法として注目され、これまでに多数の実験が行われてきた¹⁾。これらの実験では、数値積分法として中央差分法が用いられることが多かった。しかし、多自由度系のオンライン実験に中央差分法を適用する場合、積分時間刻みを系の最小固有周期の $1/\pi$ 以下の値にしなければ解が発散することから、自由度が多いほどその適用が困難となる。この問題を解決するため、最近、中島らにより多自由度系オンライン実験に適用しやすい数値積分法として、オペレータ・スプリッティング法（以下 OS 法）が提案された²⁾。OS 法は剛性が初期剛性を上回らない限り無条件安定であり、多自由度系に適用した場合でも、比較的大きな時間刻みで安定した解を得ることができるとされており、今後のオンライン実験において利用される可能性が高い。そこで多自由度系オンライン実験手法の開発を目指して、まず、数値積分法に OS 法を用いた 1 質点系 1 自由度のオンライン実験手法を開発した。

本実験では粘性減衰の影響を検討するために、試験体に初期剛性比例型の粘性減衰が働くものと仮定し、減衰定数をパラメータとした。

なお本実験に先立ち、本実験と同じ仕様の試験体を用いた振動台破壊実験（以下振動台実験）が実施されており、この振動台実験結果との比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験方法

本実験における実験システムの概略を図-1に示す。

*東京大学生産技術研究所 第1部

パソコンによる数値計算とアクチュエータによる加力実験をオンラインで結合したシステムであり、数値計算部分と加力実験部分の間で変位指令、荷重、制御用変位などのデータの授受を繰り返し、試験体の動的応答をシミュレートしながら実験を進めた。なお、リアルタイムであれば20秒弱の地震応答であるが、本実験では時間軸を大きく延ばし、平均約10時間をかけた。

本実験では数値計算部分において、初期剛性比例型の粘性減衰が作用するものとし、減衰定数をパラメータとして3セットの実験を行った。実験名と減衰定数の関係は表-1のとおりである。

表-1 実験名と減衰定数

実験名	減衰定数
RC-OL1	0%
RC-OL2	1%
RC-OL3	3%

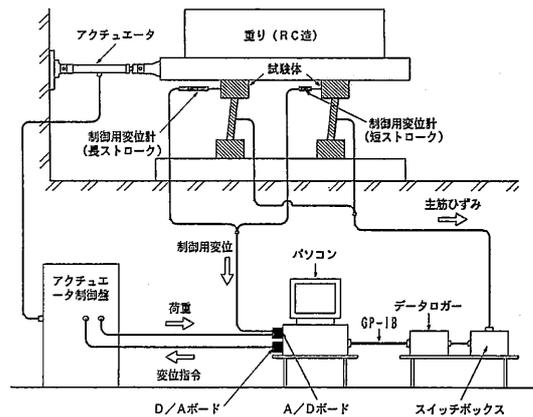


図-1 実験システムの概略

研究速報

2.2 数値計算

本実験で数値積分法として採用した OS 法の基本原理は、系の非線形な要素（剛性、粘性減衰など）を線形な部分と非線形な部分に分離し、線形部分は陰的積分法で、非線形部分は陽的積分法で積分しようとするもので、陰的積分法には無条件安定な Newmark-β法 (β=1/4) を、陽的積分法には予測子・修正子法を用いる³⁾。以下に系の剛性を分割した場合の運動方程式を示す。

$$m\ddot{x}_{i+1} + c\dot{x}_{i+1} + k^l x_{i+1} + k^E x_{i+1} x_{i+1}^* = -m\ddot{y}_{i+1}$$

予測子

$$x_{i+1}^* = x_i + \Delta t \dot{x}_i + \Delta t^2 \ddot{x}_i / 4$$

修正子

$$x_{i+1} = x_{i+1}^* + \Delta t^2 \ddot{x}_{i+1} / 4$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \Delta t (\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1}) / 2$$

$$k^E x_{i+1} x_{i+1}^* = f_{i+1} - k^l x_{i+1}^*$$

ここで、 x は変位、 \dot{x} は速度、 \ddot{x} は加速度、 m は質量、 c は減衰係数、 \ddot{y} は入力地震動、 Δt は積分時間刻みを表す。また k^l は線形部分の剛性、 k^E は復元力を非線形化するための剛性である。そして f_{i+1} は予測子変位 (x_{i+1}^*) のときの復元力であり、実験より求める。

なお本実験では、時間刻み (Δt) を 0.005 秒、線形部分の剛性 (k^l) を計算から求めた試験体の弾性剛性 (k_{el}) とした。また減衰係数 (c) は初期剛性比例型とし ($c = 2h\sqrt{mk_{el}}$)、減衰定数 (h) は表-1 による。

振動台実験では入力地震動として八戸 E-W (600gal) 波を用いたが、本実験では振動台実験と同一条件とするために、振動台上で得られた加速度を入力地震動とした。ただし、実験に先立ち弾性応答解析を行い、試験体の応答が弾性域にある範囲は省略し、塑性域に入るとされる直前で変位がほぼ 0 となる時刻 (26.88 秒) をオンライン実験の開始時刻とし、解析結果から初期条件を定めた。図-2 に本実験における入力地震動の加速度波形 (振動台上で得られた加速度のうち 26.88 秒以降の部分に相当) を示す。

2.3 実験装置および試験体

振動台実験では、4本の鉄筋コンクリート柱からなる立体試験体の上に鋼製架台と鉄筋コンクリートの重り (合計約 27tf) を載せ、試験体に長期軸力を与えた。この時の柱の軸応力度は 41.4 kgf/cm² となり、中低層建物の 1 階の柱に相当する。本実験ではできる限り振動台実験と同一条件で実験を行えるよう、振動台実験で用いた装置をそのまま利用し、鋼製架台に 2 台のアクチュエータを並列に設置し、加力によるねじれが生じないように制御した。また試験体の応答変位を制御するため、外部変位計を設置して変位を測定した。この時、精度の向上を図るために、小変形時には短ストローク (±4 cm)

の変位計を使い、大変形時には長ストローク (±20cm) の変位計に切り換えた。実験装置の概略図を図-3 に示す。

試験体の材料として、コンクリートには $F_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ 、鉄筋には SD30A を用いた。試験体の概要は図-4 に示すとおりで、引張鉄筋比 2.36%、せん断補強筋比 1.54%、シアスパン比 3.27 である。

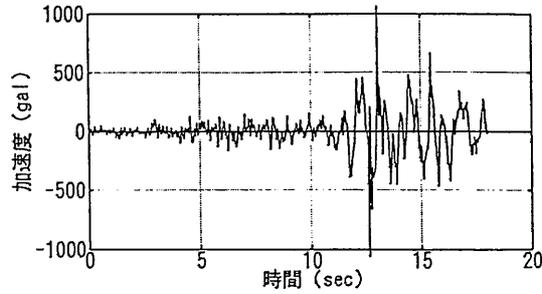


図-2 入力地震動の加速度波形

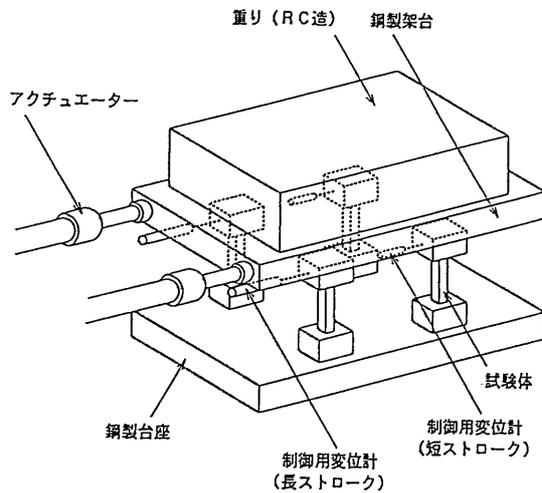


図-3 実験装置の概略

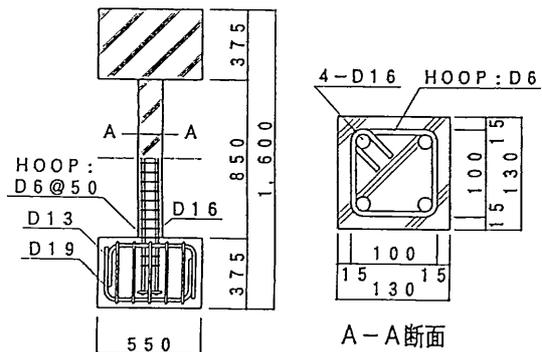


図-4 試験体の概要

3. 実験結果および考察

3.1 亀裂性状

オンライン実験における応答時刻4.5秒付近のときの、各実験の柱脚部での亀裂性状とその時の変形角を図-5に示す。図中の実線が正加力時、破線が負加力時に発生した亀裂を表し、細い点線は鉄筋位置を示している。4.5秒付近で、RC-OL3 (減衰定数3%)では曲げ亀裂がわずかに生じたばかりであったのに対し、RC-OL2 (減衰定数1%)では曲げせん断亀裂が生じ始めていた。RC-OL1 (減衰定数0%)においてはせん断ひび割れが大きく成長しており、この時、RC-OL1 (減衰定数0%)の変形角はRC-OL3 (減衰定数3%)の2倍以上であった。同一仕様の試験体で、同一の入力地震動であるにもかかわらず、減衰定数の差により変形角に大きな違いが生じ、その結果、亀裂の進展状況もまったく異なっている。

3.2 履歴曲線

各実験の履歴曲線に振動台実験の結果を重ねたものを図-6(a), (b), (c)に示す。なお、振動台実験においては慣性力を復元力とみなした。オンライン実験の結果を見ると、塑性ヒンジを形成した後、RC-OL1 (減衰定数0%)は比較的早い段階で変形が大きくなり正側で崩壊に至り、RC-OL2 (減衰定数1%)はいくつかのループを描いた後負側で崩壊した。これに対し、RC-OL3 (減衰定数3%)は負側で多くのループを繰り返したが結局崩壊には至らなかった。ここでいう崩壊とは試験体が軸力を保持できなくなり、試験体上の鋼製架台が安全確保のため設置したフレームに着座した状態を指す。

各実験と振動台実験の結果を比較すると、変形が大き

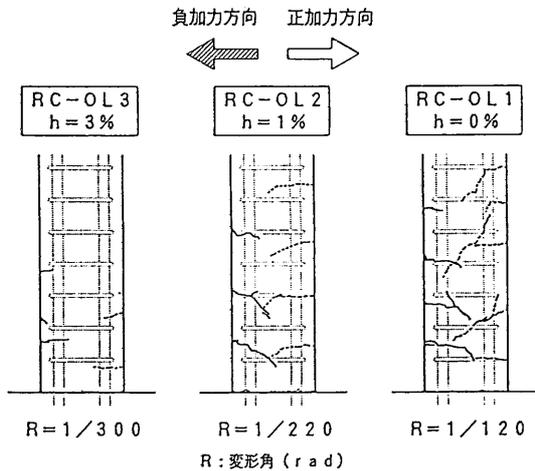
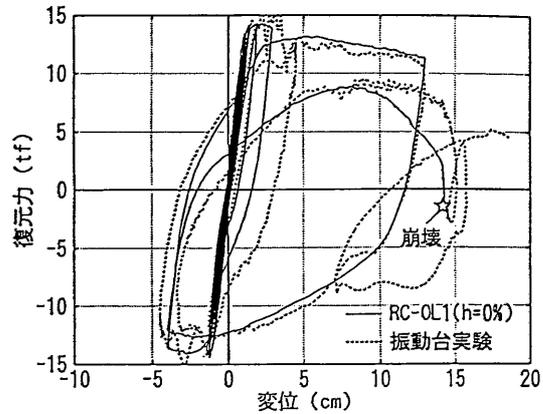
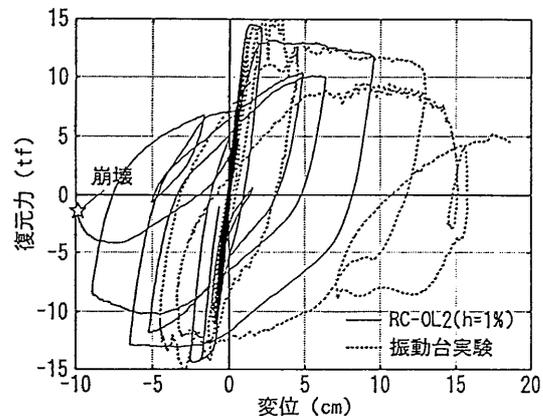


図-5 応答時刻4.5秒付近での亀裂性状

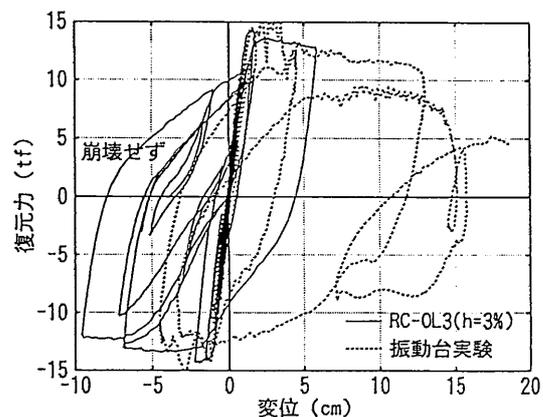
くなった後(約11.2秒以降)はRC-OL1 (減衰定数0%)が振動台実験をきわめてよく再現していることがわかる。



(a) RC-OL1 (減衰定数0%)



(b) RC-OL2 (減衰定数1%)



(c) RC-OL3 (減衰定数3%)

図-6 履歴曲線

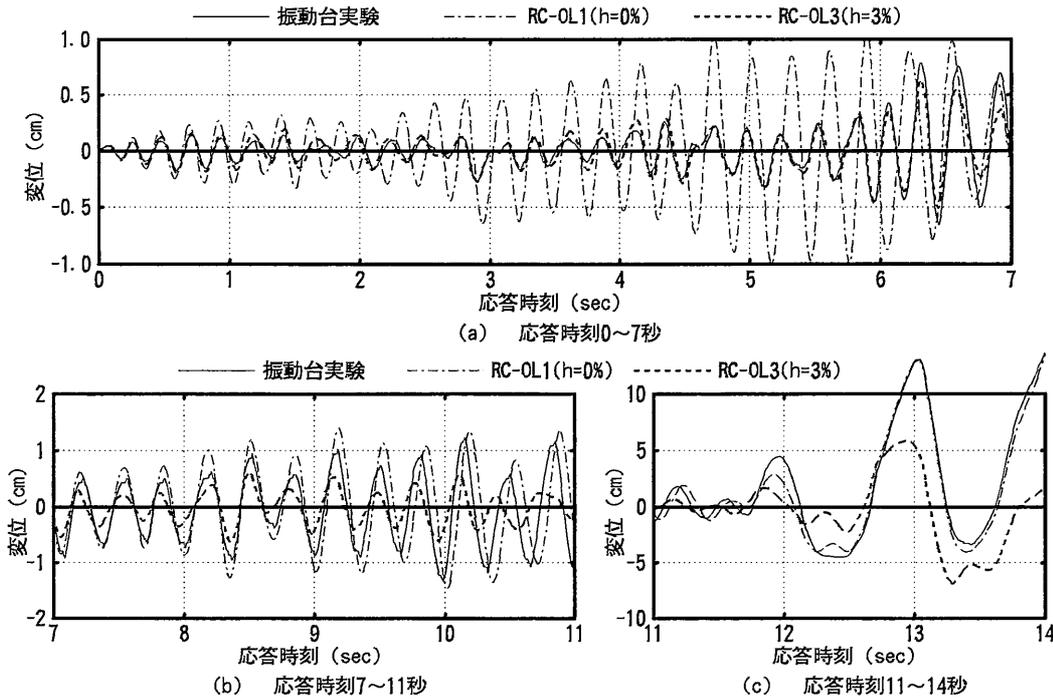


図-7 変位波形

3.3 変位波形

本実験と振動台実験の結果をより詳細に比較検討するために、振動台実験、RC-OL1 (減衰定数 0%), RC-OL3 (減衰定数 3%) の変位波形を応答時刻 0~7 秒、7~11 秒、11~14 秒に分けて図-7(a), (b), (c)に示す。図-7(a)からわかるように、0~6 秒付近までは RC-OL3 (減衰定数 3%) がひじょうによく振動台実験を再現しており、図-7(b), (c)から、7~12 秒付近までは RC-OL1 (減衰定数 0%) の結果が振動台実験に比較的近く、12 秒以降は RC-OL1 (減衰定数 0%) がきわめてよく振動台実験と一致していることがわかる。よって、粘性減衰を初期剛性比例型として表すことは適切な方法ではないことがわかった。

以上のことから、全応答時間を通して振動台実験を精度よく再現するには、コンクリートの亀裂状況や主筋のひずみ状況といった部材の損傷状態などを考慮した上で、粘性減衰の効果を適切に表現する方法を考案する必要がある。

4. ま と め

数値積分法に OS 法を用い、減衰定数をパラメータとして、鉄筋コンクリート造フレームのオンライン実験を実施した。同一仕様の試験体による振動台実験の結果と

の比較から、以下の知見を得た。

- ・初期剛性比例型の粘性減衰はオンライン実験の応答に大きな影響を及ぼす。
- ・初期剛性比例型の粘性減衰では振動台実験の応答を十分に再現できない。

今後は、コンクリートの亀裂、主筋のひずみと応答の変化の関係について詳しく検討し、オンライン実験における粘性減衰の適切な評価方法を検討する必要がある。

(1992年7月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 岡田, 関: 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, 日本建築学会論文報告集, 第275号, 1979年1月。
- 2) 中島, 石田, 安藤: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第417号, 1990年11月。
- 3) Plesha, Belytschko: A Constitutive Operator Splitting Method for Nonlinear Transient Analysis, Computers & Structures Vol. 20, No. 4, 1985.