

## 震動破壊実験シミュレータによる鉄筋コンクリート構造物の動的解析

Seismic Damage and Collapse Simulation System of RC Structure Subjected to Dynamic Loads

三井雅一<sup>1</sup>, 酒井新吉<sup>1</sup>, 秋山伸一<sup>1</sup>, 佐藤一雄<sup>2</sup>

Masakazu MITSUI<sup>1</sup>, Shinkichi SAKAI<sup>1</sup>, Shinichi AKIYAMA<sup>1</sup> and Kazuo SATO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>株式会社CRCソリューションズ 科学システム事業部, Science and Engineering Systems Div., CRC Solutions Corp.

<sup>2</sup>独立行政法人防災科学技術研究所, National Institute for Earth Science and Disaster Prevention

**SUMMARY:** A system for the 3-D full scale earthquake testing facility (E-Defense) to adopt the object-oriented framework is developed. In this system, the material model includes reinforced concrete proposed by Maekawa and Fukuura. In this paper, this system is verified whether it could accurately reproduce a H-shaped reinforced concrete shear wall under the complex state. This specimen was tested dynamically using a large high-performance shaking table in order to determine the dynamic performance of shear wall both in an elastic range and in a plastic range up to failure. As the results of study, this system can accurately reproduce the experimental result on all range.

### 1 はじめに

防災科学技術研究所では、兵庫県三木市に実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defense) を建設し、昨年度より様々な実大規模の震動実験が実施されている。この施設における実験は、従来の縮尺実験と比較してより有用な成果が得られることが期待される反面、実大規模の実験では相当の費用と労力が必要となる。このような実験結果を有効に活用するためには、実験結果を高精度に再現することのできるシミュレータの構築が望まれる。本研究では、大規模な損傷を受けたときの鉄筋コンクリート構造物の詳細な力学的挙動の再現を目指したシミュレータの開発を進めている。これまで、このシミュレータの静的解析における精度の検証を報告している[例えば, 1]。本論文では、H型断面耐震壁の振動台実験[2]のシミュレーションを実施し動的解析への適用について考察する。

### 2 シミュレータ及び材料構成モデルの概要

#### 2.1 シミュレータの概要

震動破壊実験シミュレータは、以下の点に着目した開発を行う。

- ① 損傷の進展は陰解法に基づく解析モジュール、崩壊時の挙動は陽解法に基づく解析モジュールに分け、解析の途中でこれらモジュールの切り替えを行い、強い非線形挙動にも対応可能とする。
- ② 将来に得られる知見を容易に組み込むことが可能となるプラットフォームとする。
- ③ 解析対象とした鉄筋コンクリートは、終局状態にて、非常に強い非線形性が生じるため、計算中に着目点をモニタリングしながら必要に応じて解析パラメータを変更することが可能な動的制御機能を搭載する。

上記の機能を持たせるために震動破壊実験シミュレータ開発では、オブジェクト指向型フレームワークによるシステム構築を行う点为本シミュレータの大きな特長である。

#### 2.2 材料構成モデルの概要

RC 構造の繰返し載荷時の材料挙動を効率よく、正確に

捕らえる材料構成モデルとして、Fig.1 に示す前川らによる構成則モデル[3]を採用する。RC 要素の応力-ひずみ関係をコンクリート部分と鉄筋部分の組み合わせとして捉え、コンクリートについては、ひび割れ前は弾塑性破壊モデル、ひび割れ後については分散ひび割れモデルを用いる。分散ひび割れモデルでは、ひび割れ面直交方向の圧縮-引張繰返し挙動、ひび割れ面でのせん断伝達による平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係を組み合わせたモデルである。繰返し載荷時のひび割れの形成は、擬似直交の2方向ひび割れで表現する[4]。

### 3 震動実験のシミュレーション

#### 3.1 震動実験の概要

本研究では震動破壊実験シミュレータの動的解析の精

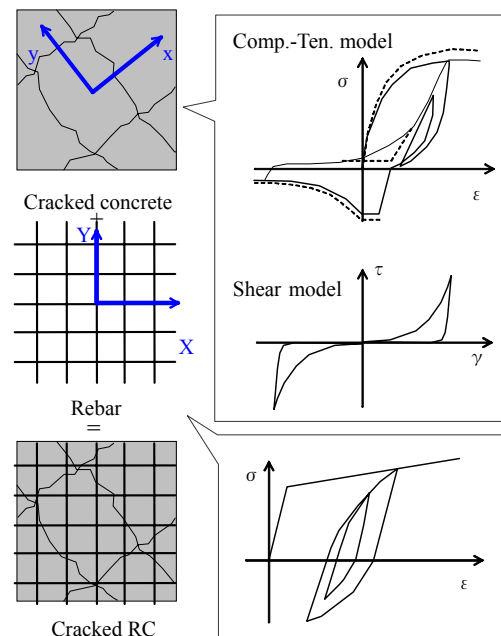


Fig.1 RC material model [3]

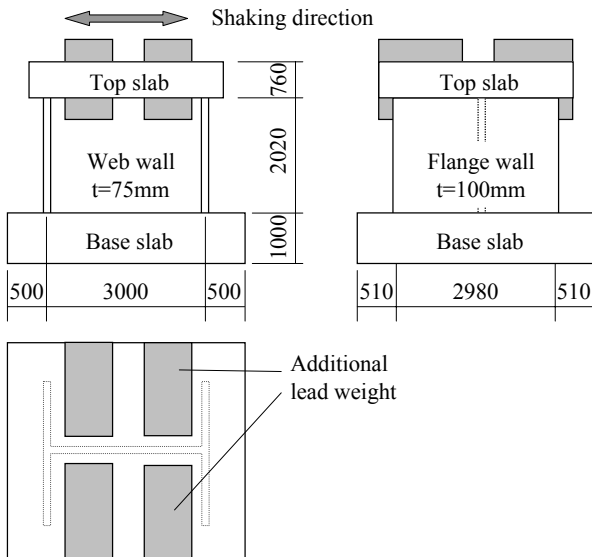


Fig.2 Test specimen (mm)

Table.1 Properties of specimen

Total weight of upper region (tf)	122.0
Compressive strength of concrete (MPa)	28.6
Tensile strength of concrete (MPa)	2.24
Elastic modulus of concrete (GPa)	22.9
Yield strength of rebar (MPa)	383
Elastic modulus of rebar (GPa)	184
Reinforcement ratio in flange, vertical (%)	0.472
Reinforcement ratio in flange, horizontal (%)	0.457
Reinforcement ratio in web, both (%)	1.219

Table.2 Input vibration steps

Vibration step	Max acc. (gal)	Input target behavior
RUN-1	53	Elastic behavior
RUN-2	112	Shear crack initiation
RUN-3	325	3 times the RUN-2's behavior
RUN-4	577	Deformation angle of 2/1000 rad
RUN-5	1230	Ultimate behavior

度を検証するために、これまでも数多くシミュレーション結果が報告されている原子力発電技術機構による鉄筋コンクリート H 型断面耐震壁の振動台実験を対象としたシミュレーション解析を実施する[例えば, 5].

Fig.2 及び Table.1 に試験体の概要を示す。試験体は、フランジ壁 100mm とウェブ壁 75mm の H 型断面を有しており、その上部にはスラブ及び付加マスを合わせて 122.0tf の重量が設置される。実験の入力地震動を Table.2 にまとめる。実験では RUN-5 の加震時にウェブ壁の下部にせん断滑り破壊が生じて終局状態に至った。

### 3.2 解析モデルの概要

Fig.3 に解析モデルを示す。耐震壁はシェル要素、その他は 8 節点 6 面体要素にてモデル化し、耐震壁のみ鉄筋コンクリートの非線形特性を与える。動的解析における時間積分は、Newmark  $\beta$  法により係数は  $\beta=0.25$  とする。また、

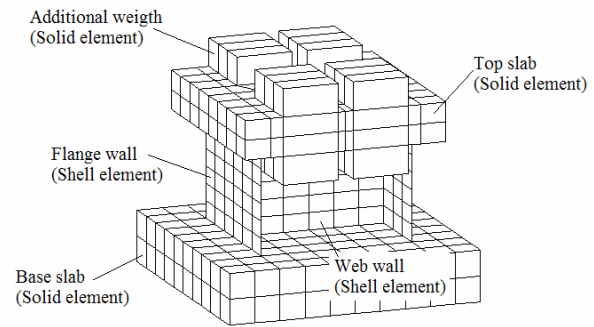


Fig.3 Finite element mesh

減衰は初期剛性比例型の内部粘性減衰とし、1 次固有周期に対して 1% として全解析ケース共通とする。なお、固有値解析による固有振動数は、13.5Hz となり実験にて得られた 13.2Hz に比べ若干高め値となった。

静的な自重解析を行った後に、基礎スラブ底面に、実験にて得られた震動台加速度を用いて動的解析を実施する。解析に用いた入力加速度波は、Table.2 に示す RUN-1 から RUN-5 の 5 波で、解析では RUN-1 から RUN-5 までを入力する。一般的に Fig.1 に示すようなコンクリートの非線形特性を有する解析を行う場合、局所的に損傷が進むことで要素の有する剛性が極めて小さくなり計算が不安定化する。この要素の不安定化により構造系全体が不安定となることを回避するために、①入力加速度に着目し、その増分量が 15gal を超える場合、その上限値以内になるようにサブステップを設定し、②計算中にある閾値を超えた要素は、コンクリートの非線形特性から低剛性の線形特性へ置き換え処理を試みる。なお、今回の解析では、時間間隔の基本値として 0.005s を設定し、また置き換え処理では、実験結果の再現性を考慮し主せん断ひずみが 2.5% を超えた要素に着目し、置き換え後の剛性は初期剛性の 1/10000 とする。なお、今回の解析ではコンクリートのせん断挙動にて不安定化が認められたためせん断ひずみを閾値とした。

### 3.3 解析結果

Fig.4 に慣性力と上部スラブの水平変位との関係を示す。Fig.5 には上部スラブの応答加速度を示す。また、Fig.6 には RUN-5 の上部スラブの応答水平変位を示す。

RUN-1 の入力後、実験では各耐震壁にひび割れは生じず、その応答はほぼ弾性挙動であった。Fig.4(a)及び Fig.5(a) に示す解析結果は、実験結果と同じく耐震壁にひび割れは発生せずに弾性挙動を示している。また、RUN-2 は、ウェブ壁の隅角部にひび割れが生じるが、ほぼ RUN-1 と同様な弾性挙動を示した。この RUN-2 については紙面の都合より割愛する。RUN-3 及び RUN-4 の入力後には、実験ではウェブ壁にせん断ひび割れが全面に生じ、部材としての非線形性がより強く生じている。解析においても、実験と同様にウェブ壁のせん断ひび割れが発生するとともに、フランジ壁に曲げひび割れが発生する。Fig.4(b), (c) に示す慣性力と水平変位の関係を比較すると実験結果では 8 の字を描く履歴曲線であるのに対し、解析結果では膨らみが大きな履歴曲線を描く。今回の動的解析では収束計算を行わずに前のステップにて生じた不釣り合い力を持ち越して次のステップの計算を進めている。この不釣り合い力が膨らみを持った履歴曲線となった一因として考えられ

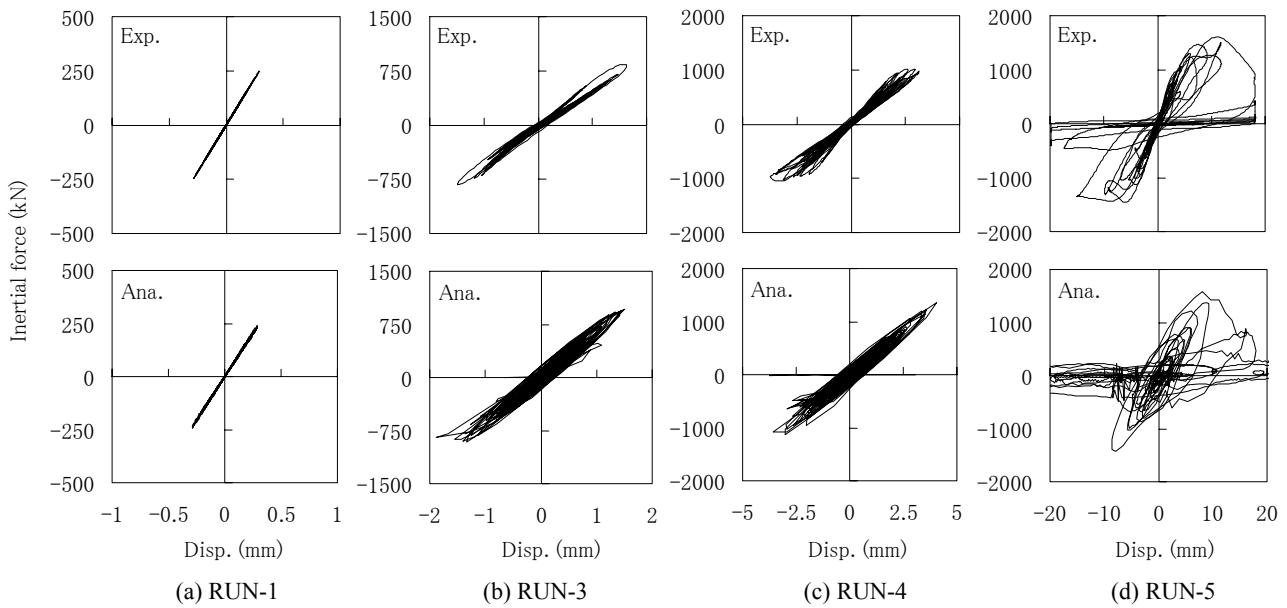


Fig.4 Relationship between inertial force and horizontal displacement of the upper slab

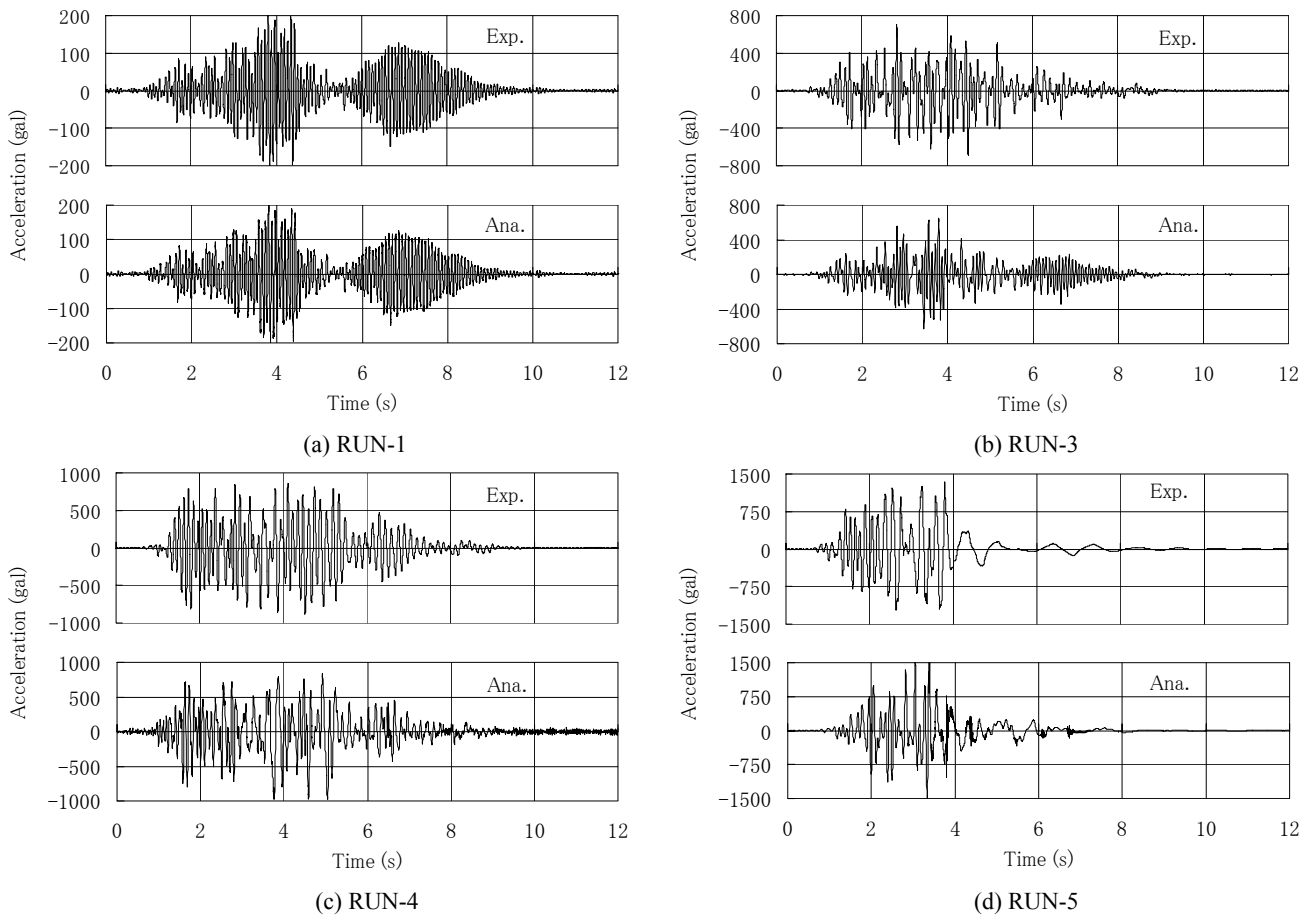


Fig.5 Horizontal response acceleration of the upper slab

る。Fig.5(b), (c)の応答加速度を比較するとほぼ実験結果を再現できている。Fig.7にRUN-4にて5.5s経過後のひび割れ分布図を示す。ウェブ壁は全面にせん断ひび割れが発生し、フランジ壁には曲げひび割れが発生している。

RUN-5の応答加速度をFig.5(d)に示す。図に示すように、

実験において4.0sを過ぎると長周期化する。また、Fig.6に示す応答変位についても長周期化する。これまで報告されている振動試験体に対するシミュレーション結果によると、RUN-5の4.0s以降に見られる長周期化の応答を十分に再現した結果は報告されていない。

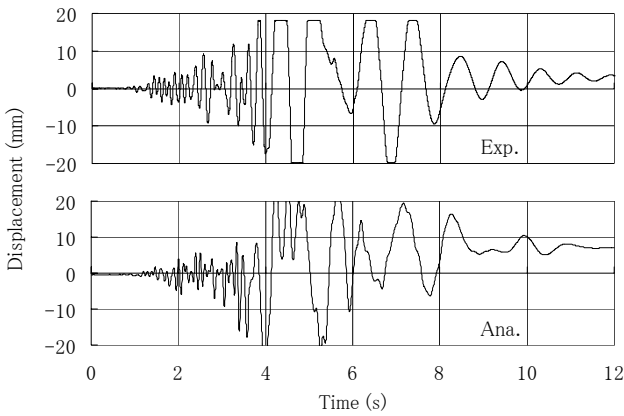
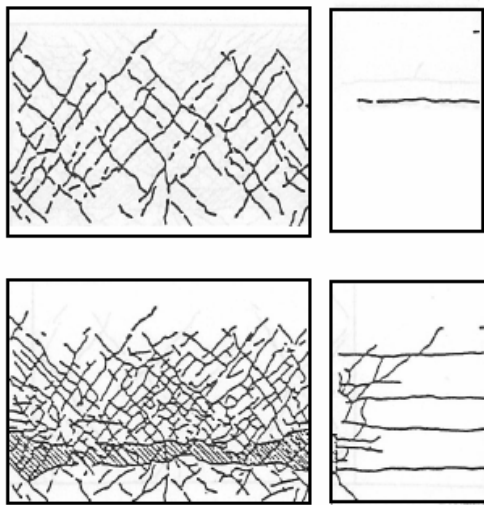
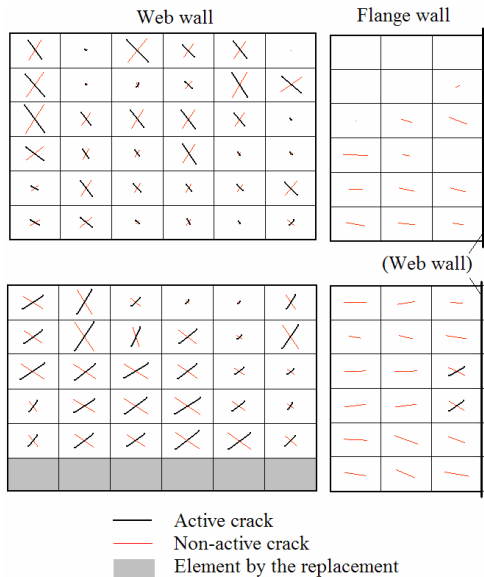


Fig.6 Horizontal response displacement of the upper slab



(a) Experiment (top: after RUN-4, bottom: after RUN-5)



(b) Analysis (top: RUN-4 5.5s bottom: RUN-5 4.0s)  
Fig.7 Damage situation

一方、本研究では、Fig.5(d)に示すように応答加速度に長周期化が見られる。また、Fig.6 に示す応答変位を見ると、実験では 4.0s 以降に長周期化し、しかも大きな変位

が現れるのに対し、解析においても同様な応答が見られる。

Fig.7 には、解析による 4.0s 経過後のひび割れ分布図を実験結果と共に示す。実験では、RUN-5 の加震後にウェブ壁の中腹より下部ですべり破壊が生じコンクリートが剥落している。一方、解析では、ウェブ壁にせん断ひび割れが全面に分布するとともに、ウェブ壁の下部に加震方向に列のせん断破壊による剛性低下が見られる。このことより、解析による破壊挙動は良い対応を示している。

以上をまとめると、本解析では RUN-5 の 4.0s 経過後にウェブ壁の下部が大きく損傷し、部材として大きく剛性が低下した。その結果、試験体全体の応答が長周期化し、実験結果と良い対応を示したと考えられる。

ただし、RUN-5 に見られるような終局挙動時にはコンクリートの引張軟化域の設定により要素寸法依存性が生じることが知られている。この点について、破壊エネルギー  $G_f$  の導入することにより要素寸法を考慮したコンクリートモデルへの改良を進めることが今後の課題と言える。

#### 4 まとめ

鉄筋コンクリート構造物の震動破壊挙動を高精度に解析が可能なシミュレータの開発を進めてきた。本研究では、動的解析の精度を検証するために、H 型断面耐震壁の震動台実験のシミュレーションを行った。その結果、弾性挙動を示す RUN-1 及び RUN-2、せん断ひび割れが生じ損傷が進む RUN-3 及び RUN-4 そして終局破壊に至る RUN-5 の全てにおいて、その再現を試みた。しかしながら、荷重-変位関係では履歴曲線が実験結果に比べ膨らみがある点など課題が明らかとなった。今後、不釣り合い力の最適な持ち越し方法の検討、損傷が進んだ要素についてコンクリートの圧縮破壊に着目したせん断滑りを表現する破壊基準の検討などを行い、終局後の挙動まで正確に再現できるシミュレータへ発展させたい。

#### 謝辞

本論の作成に当たって、独立行政法人原子力安全基盤機構より原子力発電施設耐震信頼性実証試験で行った H 型断面震動台実験の試験結果を提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] 秋山伸一, 酒井新吉, 三井雅一, 金伝栄, 佐藤一雄: 鉄筋コンクリート構造物の実大3次元震動破壊実験を対象としたシミュレータ開発, 日本地震工学会大会梗概集, pp.186-187, 2005.
- [2] (財)原子力発電技術機構:原子力発電施設耐震信頼性実証試験 原子炉建屋総合評価 原子炉建屋耐震壁終局強度評価に関する報告書. 平成 8 年度.
- [3] Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.
- [4] 福浦尚之: 4方向ひび割れを有する鉄筋コンクリート要素の履歴依存型構成モデル, 東京大学博士論文, 1999.
- [5] 長沼一洋, 栗本修, 江戸宏彰: 鉄筋コンクリート壁体の FEM による正負繰返し及び動的解析, 日本建築学会構造系論文集, 544 号, 125-132, 2001.