

# 地震動を受ける鉄筋コンクリート構造物の損傷挙動シミュレーション

## Damage Behavior Simulation of RC Structure Subjected to Seismic Loads

正 酒井 新吉 (伊藤忠テクノソリューションズ)

佐藤 一雄 (防災科学技術研究所)

Shinkichi Sakai ITOCHU Techno-Solutions Corp.

Kazuo Sato National Research Institute  
for Earth Science and Disaster Prevention

三井 雅一 (伊藤忠テクノソリューションズ)

秋山 伸一 (伊藤忠テクノソリューションズ)

Masakazu Mitsui ITOCHU Techno-Solutions Corp.

Shinichi Akiyama ITOCHU Techno-Solutions Corp.

Key Words: Reinforced Concrete Structure, Seismic damage, FEM

### 1. 序

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を稼働を開始し、実大構造物の震動実験を実施している。また、この施設で行われる実験実験結果を有効に活用するため、巨大地震による構造物の損傷から崩壊に至るまでを高精度に予測するシミュレーションシステムの開発を進めている<sup>(1)</sup>。

ここでは、H 型断面耐震壁の振動台実験のシミュレーションを実施し、実験との比較により、動的解析への適用について考察している。

### 2. 震動実験のシミュレーション

#### 2.1 震動実験の概要

震動破壊実験シミュレータの動的解析の精度を検証するために、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<sup>(2)</sup>を対象としたシミュレーション解析を実施した。Fig.1 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含めて 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ている。

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

### 2.2 解析の概要

Fig.2 に解析モデルを示す。耐震壁はシェル要素でモデル化し、基礎スラブ、上部スラブ及び付加マスはソリッド要素でモデル化し、耐震壁のみ鉄筋コンクリートの非線形特性を与える。時間積分は Newmark 法( $\gamma=0.25$ )を用いた。また、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した。なお、固有値解析による固有振動数は、加震方向について 13.5Hz となり実験にて得られた 13.2Hz に比べ若干高めの値となった。

静的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加振した。Table.2 に示す RUN-1 から RUN-5 までの 5 波を順に入力した。

RC 構造の繰返し載荷時の材料挙動を効率よく、正確に再現するため、前川らによる構成則モデル<sup>(3)</sup>を採用しているが、一般的に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、入力加速度の増分が上限値(15gal)以内に収まるように時間刻みを調整し、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の置き換え処理を試みた。今回の解析では、時間刻みの初期値を 0.005s とし、また、主せん断ひずみが 2.5% を超えた要素について、初期剛性の 1/10000 の剛性への置き換えを行なった。

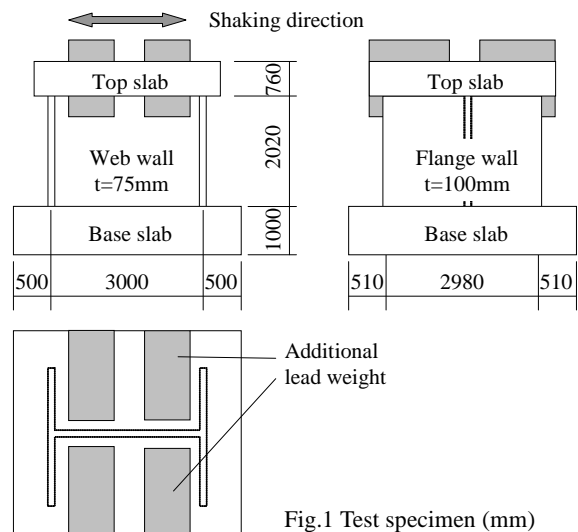


Fig.1 Test specimen (mm)

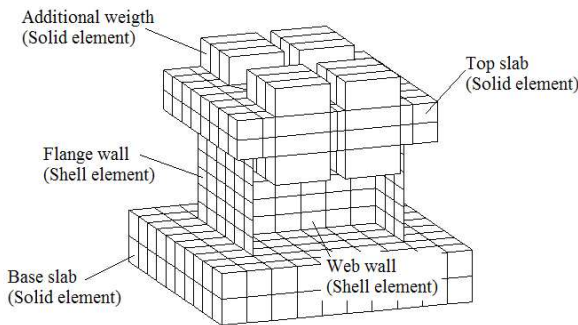


Fig.2 Finite element mesh

### 2.3 解析結果

Fig.3 に RUN-4, RUN-5 の慣性力と上部スラブの水平変位との関係を示す。また RUN5 について、Fig.5 に上部スラブの応答加速度の時刻歴波形、Fig.6 に上部スラブの応答水平変位の時刻歴波形を示す。

Fig.3 に示す慣性力と水平変位の関係を比較すると実験結果は原点指向の 8 の字を描く履歴曲線であるのに対し、解析結果では紡錘形の履歴曲線となっている。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る。

Fig.4 および 5 によると、応答加速度および応答変位の時刻歴波形を比較するとほぼ実験結果を再現できている。

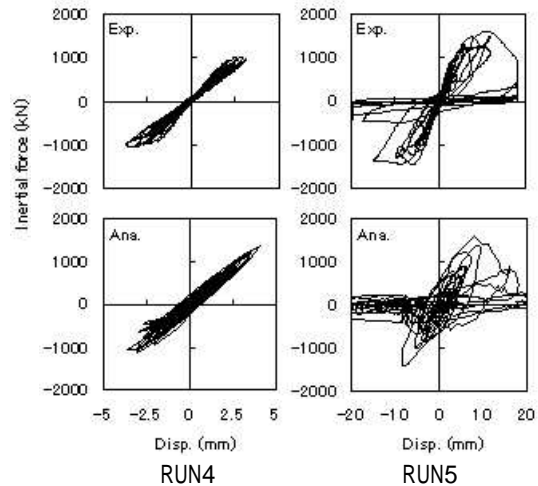


Fig.3. Relationship between inertial force and horizontal displacement of the upper slab

Fig.5 の応答変位の時刻歴波形では、4.0s を経過した時点で実験における計測機器の限界値 20mm を超える大きなせん断変形が生じている。同じく解析結果において、4.0s にて 20mm を超える大きな応答変位に至る。このとき実験では、ウェブ壁の中腹より下部ですべり破壊が生じてコンクリートが剥落したことが観察されている。解析においては、ウェブ壁下部の一系列の要素が低剛性の特性に置き換わっている。これにより、加速度及び変位の応答が長周期化する現象が再現できている。Fig.5 の応答水平変位の実験結果及び解析結果ともに残留変位が生じている。解析における残留変位は、損傷要素の置き換え処理の閾値設定や処理を行う要素の剛性の設定に大きく影響を受ける。今後、置き換え処理における検証を進め、終局後の力学的挙動の正確なシミュレーションが可能となるよう、震動破壊実験シミュレータの改良を行う予定である。

### 3. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の震動破壊挙動の高精度予測のためのシミュレータについて、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、震動破壊シミュレータは、実験結果を精度良く再現できた。

### 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) 酒井, 佐藤, 秋山, 金, 三井: 実大鉄筋コンクリート構造物震動破壊実験のシミュレーション, 第 18 回計算力学講演会論文集, pp513-514, 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

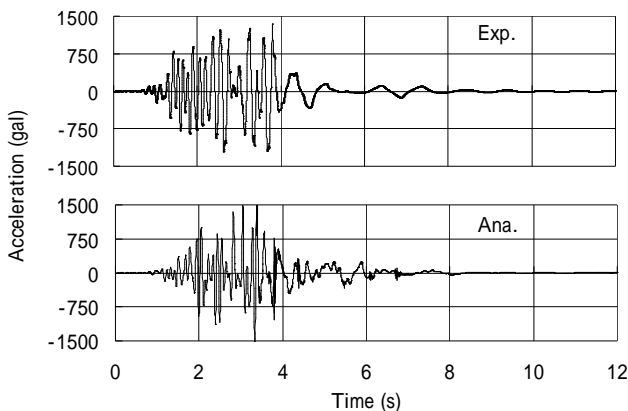


Fig.4 Horizontal response acceleration of the upper slab

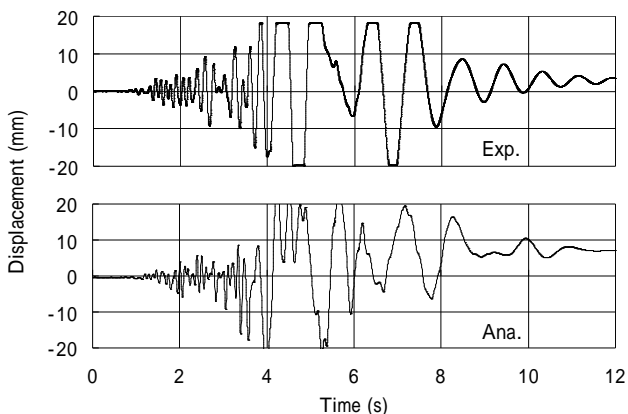


Fig.5 Horizontal response displacement of the upper slab