

# 地震動を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁の 損傷挙動シミュレーション

DAMAGE AND COLLAPSE SIMULATION OF RC SHEAR WALL SUBJECTED TO SEISMIC LOADS

酒井新吉<sup>1)</sup>, 三井雅一<sup>2)</sup>, 秋山伸一<sup>2)</sup>, 吉川弘道<sup>3)</sup>, 佐藤一雄<sup>4)</sup>, 井根達比古<sup>5)</sup>

Shinkichi SAKAI, Masakazu MITSUI, Shinichi AKIYAMA,  
Hiromichi YOSHIKAWA, Kazuo SATO and Tatsuhiko INE

1) 工修 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 エネルギー・産業技術部  
(〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5霞が関ビル, shinkichi.sakai@ctc-g.co.jp)

2) 工博 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 社会基盤ソリューション部

3) 工博 武蔵工業大学 工学部 都市工学科 教授 (〒158-8557 東京都 世田谷区 玉堤 1-28-1)

4) (財)国際科学振興財団(元(独)防災科学技術研究所) (〒305-0062 茨城県つくば市赤塚586-9)

5) 工博(独)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

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. In this paper, shear fracture model for over damaged part in RC structure is introduced to this system. And 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.

**Key Words** Seismic damage, Collapse, RC model, Shear Fracture

## 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。また、この実験結果を有効に活用するため、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を進めている[1]。

震動破壊実験シミュレータは、新たな知見を容易に組み込むことが可能な保守性・拡張性に富むものとするため、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に基づくものとした。また、RC構造の繰返し載荷時の材料挙動を正確に捕らえる材料構成モデルとして、前川らによる構成則モデル[2]を採用している。

本研究では、過大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て、コンクリート構成モデルにおけるせん断破壊のモデル化について検討した。また、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、動的解析への適用について考察している。

## 2. コンクリートのせん断破壊モデルの検討

一般的にコンクリートの非線形特性を有する解析では、局所的に損傷が進むことで要素の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を回避する

ため、損傷が進んだコンクリートについて、せん断ひずみを閾値として、損傷要素を低剛性の弾性要素に置き換えるモデルを導入し、その効果について梁のせん断曲げ実験結果[3]との比較による検討を行なった。

### (1) 試験概要

試験体は図1に示すような、断面150×200mm、部材長1400mm、支持スパン長1200mmの鉄筋コンクリート梁であり、図2に示す3種類のせん断スパン比を設定した。

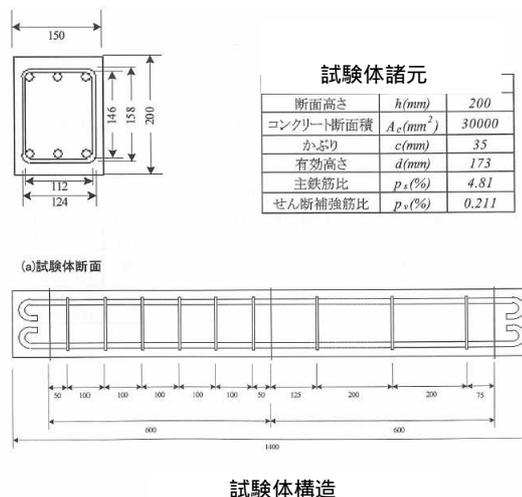


図1 せん断曲げ試験試験体概要

試験体名	せん断スパン a(mm)	せん断スパン比 a/d(-)	試験体数
V-400	400	2.31	2
V-475	475	2.75	2
V-550	550	3.18	2

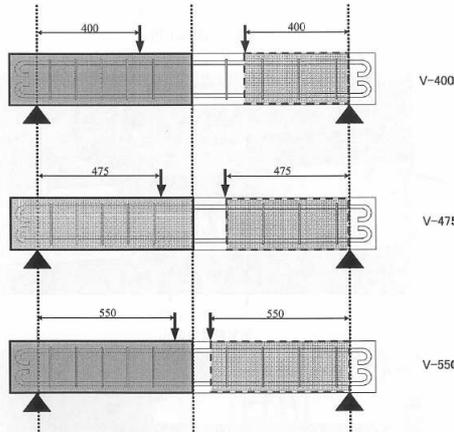


図2 試験体せん断スパン

### (2) 解析条件

解析モデルを図3に示す。2次元問題として解析を行いシェル要素にてモデル化を行った。載荷点及び支点には弾性要素を配置している。

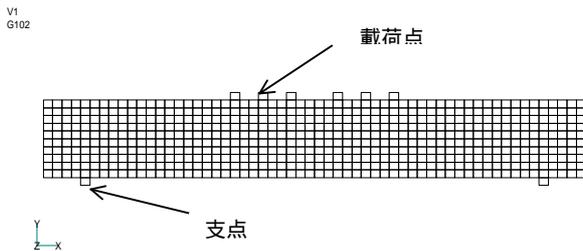


図3 解析モデル

### (3) せん断破壊挙動モデル

鉄筋コンクリートのせん断挙動について図4に示す2種類の方法を用いた。Case01は、せん断ひずみの増加によりせん断応力は最大値に漸近し、耐力を保つモデルを用いた場合であり、Case02はある限界せん断ひずみ $\bar{\gamma}$ に達した時点で低剛性の弾性挙動を示すモデルによる場合である。なお、今回の解析では限界せん断ひずみ $\bar{\gamma}$ は2000 $\mu$ 、剛性低減は初期剛性の1/10000とした。

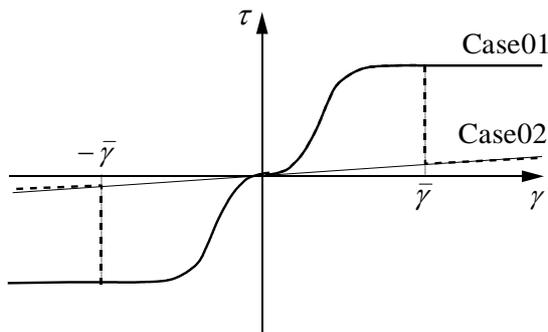
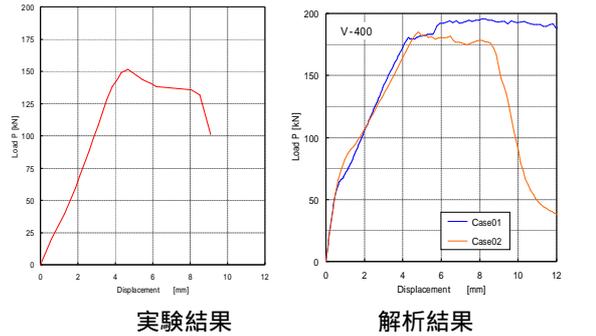


図4 解析に用いたせん断挙動モデル

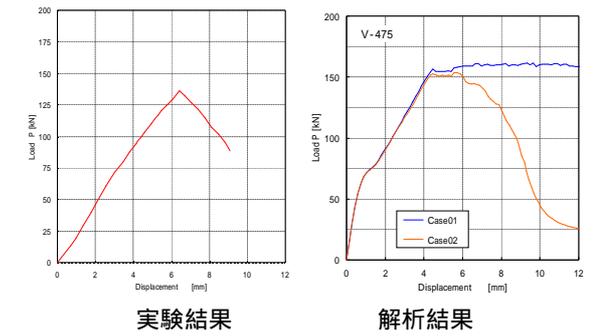
### (4) 解析結果及び検討

解析による荷重-変形関係と実験との比較を図5に示す。

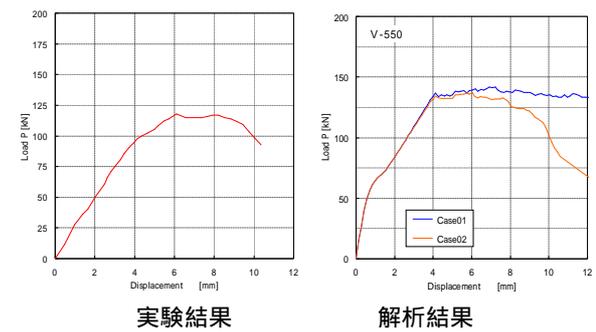
いずれの試験体においてもCase01では、最大耐力後の耐力の低下が生じていない。これに対し、Case02の解析結果は実験結果の特徴を再現できている。これは、せん断挙動モデルに低剛性弾性要素への置き換えを導入したことにより、ひび割れ面のずれ挙動が妥当に評価できたためと思われる。



(a) V-400



(b) V-475



(c) V-550

図5 荷重-変形関係

## 3. 震動実験のシミュレーション

### (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、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[4]を対象としたシミュレーション解析を実施した。図6及び表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表 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。

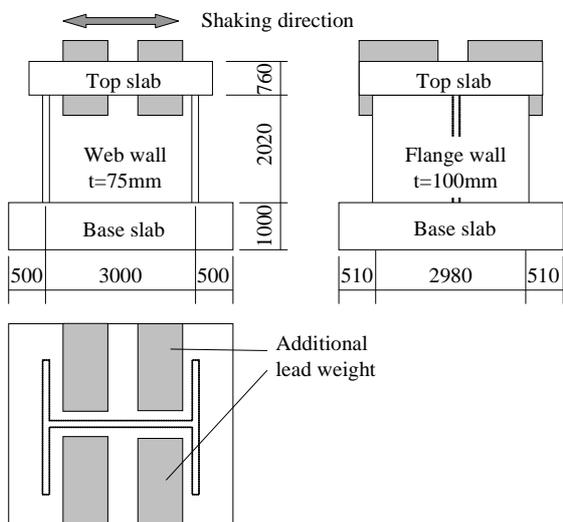


図 6 試験体概要

表 1 試験体材料特性

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

表 2 入力地震動

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) 解析モデルの概要

図 7 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 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た。動的解析における時間積分は Newmark 法により係数は  $\gamma=0.25$  とした。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する。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した。解析に用いた入力加速度波は表 2 に示す RUN-1 から RUN-5 までを順に入力した。

解析の安定性のため、2 章で検討したせん断破壊挙動モデルを導入した他、時間刻み 1 ステップの入力が過大にならないよう、入力加速度の増分が 15gal に収まるようにサブステップを設定し、解析時間刻みを制限した。

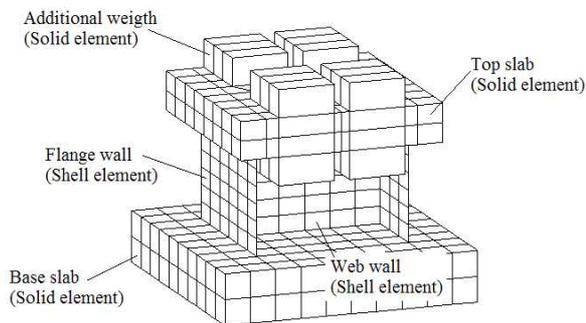


図 7 解析モデル

### (3) 解析結果

図 8 に RUN-4, RUN-5 の慣性力と上部スラブの水平変位の関係を示す。また RUN-5 について、上部スラブの応答加速度の時刻歴波形及び応答水平変位の時刻歴波形を図 9 に示す。

図 8 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る。

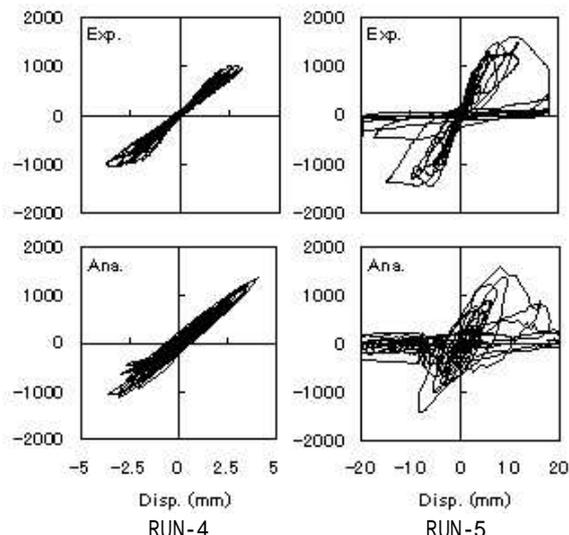
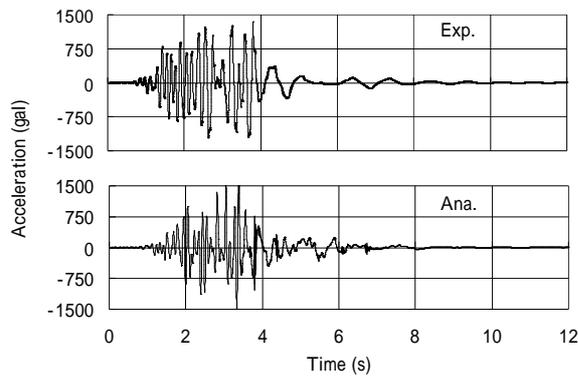


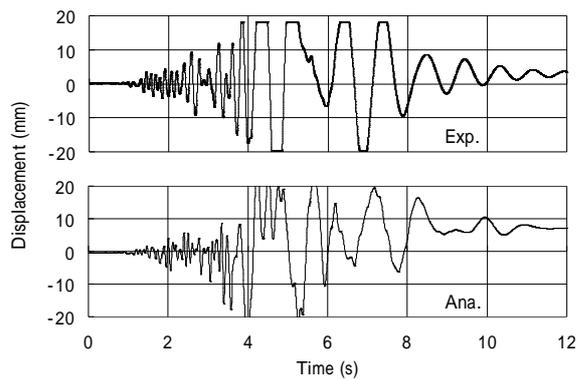
図 8 慣性力と上部スラブの水平変位の関係

図 9 によると、RUN-5 の応答変位の時刻歴波形では 4.0s を経過した時点にて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が、解析結果においてもこの応答が再現できている。

図 10 に RUN-4, RUN-5 終了時のひび割れ分布を示す。RUN-4 の入力後には、実験ではウェブ壁にせん断ひび割



(a) 加速度時刻歴



(b) 変位時刻歴

図9 上部スラブ 応答時刻歴 RUN-5

れが全面に生じ、フランジに曲げひび割れが生じている。解析においてもこの様子が捉えられている。

RUN-5の4.0s経過後のひび割れ分布図によると、ウェブ壁にせん断ひび割れが全面に分布するとともに、ウェブ壁の下部一列の要素について弾性要素への置き換えが起きている。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おり、解析においてこの破壊挙動がほぼ正確に再現することが確認される。この低剛性特性への置き換えにより図9の特徴である加速度及び変位の応答の長周期化が解析でも妥当に再現できたものと考えられる。

## 5 まとめ

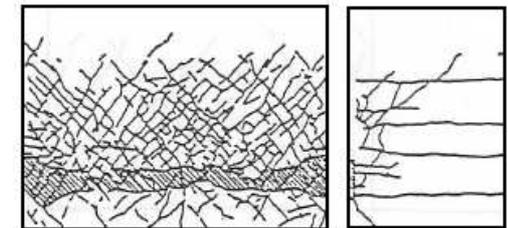
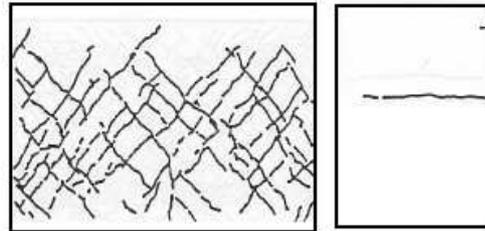
鉄筋コンクリート構造物の震動破壊挙動を高精度に解析が可能なシミュレータの開発を進めてきた。本研究では、RC構造物の損傷が大きく進展した場合の破壊挙動の再現を目的としたせん断破壊モデルについて検討した。

また、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の全過程において、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。

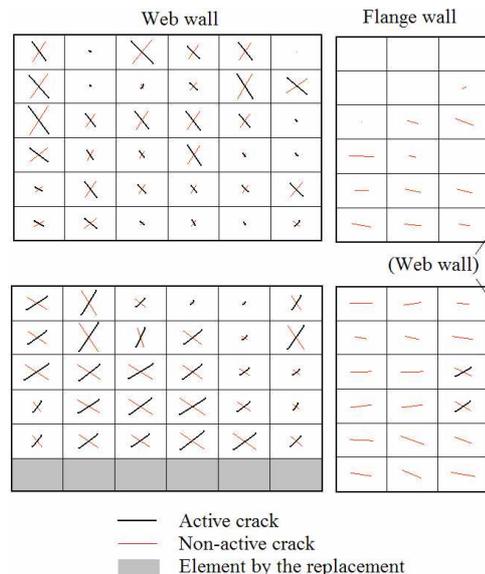
## 謝辞

本研究に当たり、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る。



(a) 実験 (上:RUN-4終了時 下:RUN-5終了時)



(b) 解析 (上:RUN-4終了時 下:RUN-54.0s経過後)

図10 ひび割れ状態

## 参考文献

- 1) 酒井新吉, 秋山伸一, 金伝栄, 三井雅一, 佐藤一雄: 実大構造物震動破壊実験シミュレーションシステムの開発, 計算工学講演会論文集 Vol.10, 2005
- 2) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, 2003.
- 3) 依田宏之: RC単純梁のせん断スパンにおける非線形挙動に関する実験的研究, 武蔵工業大学修士論文, 平成17年度
- 4) (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.