

論文 動的加力を受けるRC耐震壁のエネルギー消費に関する解析的研究

中村 尚弘^{*1}・鈴木 琢也^{*2}・木下 拓也^{*2}

要旨: 消費エネルギーに基づく構造物の損傷評価の一環として、積層シェル要素を用いた3次元非線形FEMにより、RC耐震壁の動的載荷試験のシミュレーション解析を行った。まず、加速度と変位の時刻歴応答が実験と解析で良好に一致することを確認した。次に、試験体内での消費エネルギー分布性状を検討した。その結果、最終破壊時には消費エネルギーは、圧壊を生じるウェブ壁最下層部で増加すること、その多くはコンクリートにより消費されることがわかった。

キーワード: RC耐震壁, 振動台試験, エネルギー消費, 3次元FEM, 非線形解析

1. はじめに

RC構造物の構造解析において、有限要素法(以下、FEM)は極めて有効な手段である。これまで多数の研究が行われ、構成則の改良とともに、静的繰返し載荷問題や動的問題にも拡張されてきた。

著者等もこれを用いて、原子力発電所建屋を対象とし、詳細な3次元非線形モデルを作成して地震応答解析を行い、地盤との連成挙動に関する検討¹⁾や建屋の限界時挙動評価及びそれに基づく地震PSA(確率論的安全性評価)²⁾等を行ってきた。

これまで、原子力建屋の非線形地震応答解析は主として質点系モデルにより行われ、建屋の損傷評価指標として各層のせん断歪等が用いられてきた。これに対してFEMを用いた場合には、各部の局所的損傷状況は詳細に把握できるものの、これより建屋全体の損傷度をどのように評価するかが課題となっている。

このような観点から、著者等は建屋の主要耐震要素であるRC耐震壁を対象として、消費されたエネルギー量を指標とする損傷度評価法の構築を目的とする検討を行ってきた。これまで静的繰返し載荷を受ける耐震壁のエネルギー消費性状の分析³⁾や、大地震時の建屋の消費エネルギー分布の把握⁴⁾、及び損傷評価指標として消費エネルギーを想定した場合の地震PSAの試行⁵⁾などを実施した。

本論文ではその一環として、既往実験のシミュレーション解析により、動的載荷を受けるI型RC耐震壁のエネルギー消費性状について検討する。

まず、実験結果に対して加速度時刻歴波形や加速度-変位関係の対応を調べ、解析の精度を確認する。次に消費エネルギーの試験体内での分布を検討する。特に鉄筋とコンクリートの負担分を分離し、各々の消費エネルギーの性状を検討する。

2. 検討対象とする実験の概要

検討対象とする実験は、(財)原子力発電技術機構で実施された終局応答試験⁶⁾とする。この試験は、原子炉建屋のRC造耐震壁の終局に至るまでの動的性状把握と解析手法の妥当性確認を目的とし、多度津工学試験所で実施されたものである。

試験体は、同一形状のI型断面耐震壁試験体2体である(図-1参照)。ウェブ壁の壁長300cm、壁厚7.5cm、シアスパン比は0.8、壁筋比は1.2%としている。トップスラブに重錘を付し、壁の軸方向応力度(σ_0)を1.47N/mm²(15kgf/cm²)としている。

目標応答レベルを図-2のようにRUN1~5まで設定し、振動台の水平加振を行った。実験はRUN2とRUN3の間にRUN2'が設定され、6ステップで行われた。2体の試験体はほぼ同様の応答性状を示した。主要な結果は以下である。

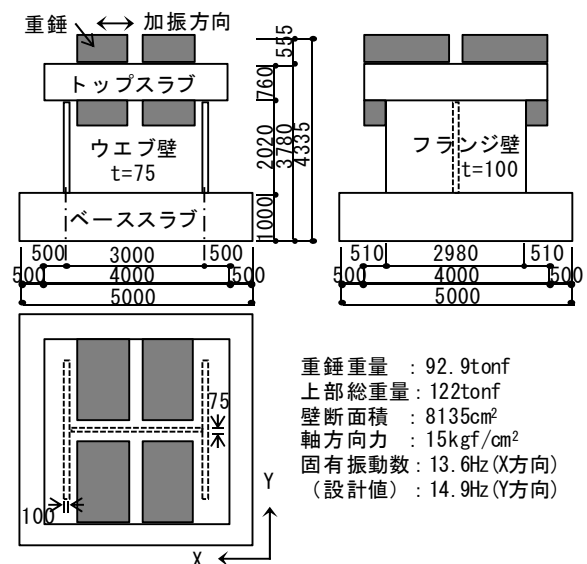


図-1 I型断面耐震壁試験体の形状

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 研究員 博士(工学)

試験体は、RUN2'でウェブ壁中央にせん断ひび割れを生じ、RUN4でフランジ壁中央に水平ひび割れが生じた。RUN5でウェブ壁脚部にせん断すべり破壊を生じ、その部分のコンクリートが崩落した(図-3参照)。

試験体の塑性化に伴い、固有振動数は13Hz付近から7~8Hzへ低下し、等価粘性減衰定数は約1%から約4%へ増加した。

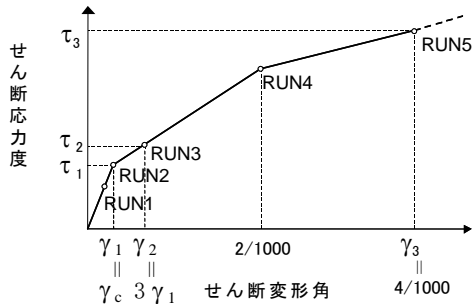


図-2 加振各ステップ(RUN1~RUN5)の目標応答

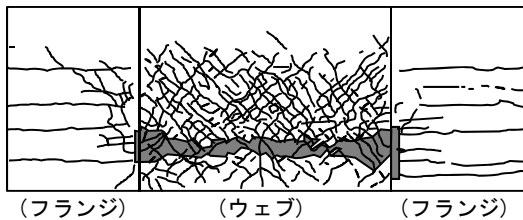


図-3 最終ひび割れ状況

3. シミュレーション解析の概要

上記実験を対象としてシミュレーション解析を実施した。解析条件は、文献7,8と同様である。振動台上での計測波をRUN1~5まで連続して順次入力し、各ステップでの応答性状を実験と比較した。各ステップの入力波の最大加速度は、各々58, 122, 317, 361, 583, 1256Galである。

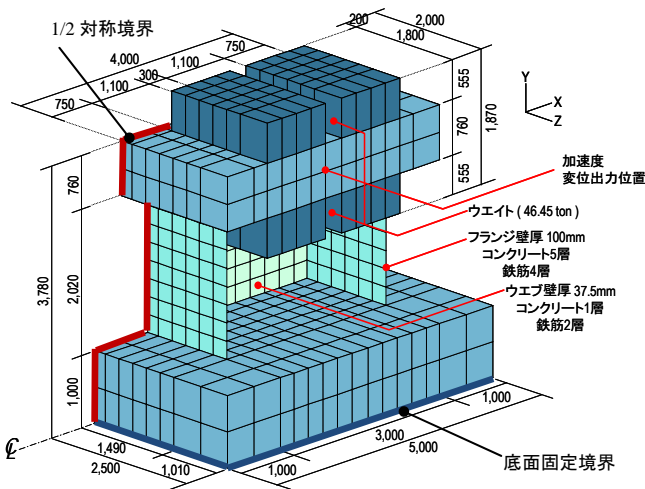


図-4 解析モデル図

3.1 解析モデル及び解析条件

解析モデルを図-4に示す。加振に平行な方向に対称面

を有する1/2モデルとした。トップスラブおよびベーススラブは線形ソリッド要素とし、耐震壁は非線形積層シェル要素でモデル化した。

RUN1~5とも入力動の継続時間は12秒、時間刻みは0.005秒である。時間積分はNewmark- β 法($\beta=0.25$)とした。減衰は初期剛性比例型とし、1次振動数で減衰定数1%とした。この値は、RUN1の実験結果より同定された等価粘性減衰定数の値である。この減衰が消費エネルギーに及ぼす影響は小さいものと考えられる。

3.2 RC非線形解析モデル

耐震壁の非線形性を考慮するため、鉄筋とコンクリートを層状に置換した積層シェル要素でモデル化する(図-5参照)。材料の非線形性は、面内の応力-ひずみ関係について考慮し、面外のせん断変形成分は線形として扱う。

ひび割れ前のコンクリートは、一軸応力-歪関係を図-6のように折れ線で近似し、図-7に示すようにDrucker-Pragerの降伏条件に従う弾塑性体とする。ひび割れはSmeared Crackを仮定し、その発生は引張主応力度に基づいて判定する。図中の σ_{cr} はひび割れ発生応力であり、対応する歪を ϵ_{cr} とする。第2方向のひび割れは、第1方向と直交方向に生じるものとする。

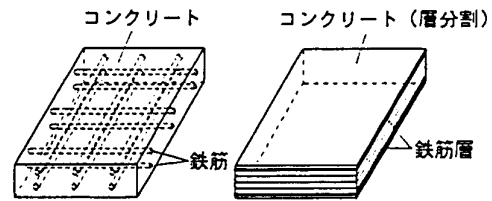


図-5 積層シェル要素

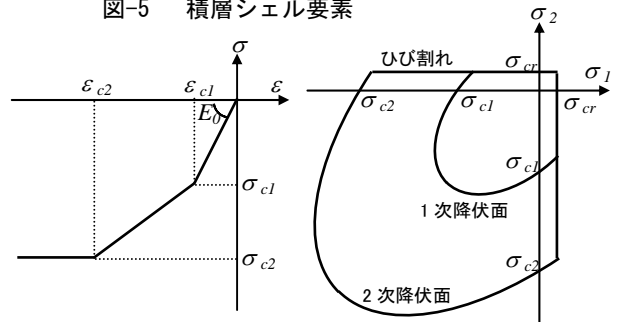


図-6 ひび割れ前のコンクリートの一軸応力-歪関係

図-7 ひび割れ条件と降伏条件

ひび割れ発生後のコンクリートは、ひび割れ面直交および平行方向の軸ばねと、ひび割れ面に沿うせん断ばねによりモデル化する。

図-8に、ひび割れ後のコンクリートの軸ばねの応力-歪包絡曲線を示す。最大圧縮応力時までの応力-ひずみ関係は、Fafits等による提案式⁹⁾、引張側のテンションステイフネスモデルは、Stevens等の提案式¹⁰⁾を参考にして設定している。ひび割れ平行方向の圧縮側剛性および圧縮側強度は一定値 λ (0.63)で低減させる。この値は長沼の提

案式¹¹⁾では $\sigma_{c2}=29\text{N/mm}^2$ に相当する。

軸ばねの繰返し応力時の履歴特性は、Stevens等¹⁰⁾ およびKarsan等¹²⁾の検討に基づき図-9の双曲線を用いて近似する。ひび割れを生じた要素のせん断剛性 (G_{12}) は、山田・青柳のひび割れ面のせん断伝達剛性に関する提案式¹³⁾を用いる (図-10参照)。

鉄筋は配筋方向に対する単軸材料とし、図-11に示すバイリニア型の復元力特性とする。第2勾配は初期剛性の1/100とし、鉄筋とコンクリート間は完全付着を仮定する。

3.3. 消費エネルギーの評価方法

建屋に入力されるエネルギーの総量は、(1)式で表される。運動エネルギー、粘性減衰による減衰エネルギー、ひずみエネルギーはそれぞれ(2)~(4)で表される。

$$E = W_k + W_d + W_s \quad (1)$$

$$W_k = M \int_0^t \ddot{y} dt \quad (2)$$

$$W_d = C \int_0^t \dot{y}^2 dt \quad (3)$$

$$W_s = K \int_0^t y \dot{y} dt \quad (4)$$

ここで、 E : エネルギー総量, W_k : 運動エネルギー
 W_d : 減衰エネルギー, W_s : ひずみエネルギー
 t : 解析時間, M : 質量マトリックス
 C : 減衰マトリックス, K : 剛性マトリックス
 y : 相対変位 である。

このうちひずみエネルギー W_s は、弾性ひずみエネルギー W_{se} と塑性ひずみエネルギー W_{sp} の和として表すことができる。加振終了後は W_{se} は0となり、 $W_s = W_{sp}$ となる。本研究では、この塑性ひずみエネルギー W_{sp} (累積塑性ひずみエネルギー)が構造物の損傷に寄与するものと考え、損傷エネルギーとして評価する。

積層シェル要素を用いる場合、ひずみエネルギー W_s は要素の各層のひずみエネルギーの和として(5)式で算定することができる。ここで、 N は要素の総数、 A_i は i 番目の要素の面積、 L は当該要素内の層数、 t_j は j 層の厚さ、 $\{\epsilon_j\} \cdot \{\sigma_j\}$ は各々 j 層のひずみ・応力ベクトルである。

$$W = U = \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^L t_j \cdot \int \{d\epsilon_{j(t)}\}^T \cdot \{\sigma_{j(t)}\} dA_i \right) dt \quad (5)$$

また積層シェル要素の層を、コンクリート層と鉄筋層 (L_c と L_s)に分けて(6)式を適用すると、 U をコンクリートと鉄筋の消費エネルギー (U_c と U_s)に分けられる。

$$\left. \begin{aligned} U_c &= \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{L_c} t_j \cdot \int \{d\epsilon_{j(t)}\}^T \cdot \{\sigma_{j(t)}\} dA_i \right) dt \\ U_s &= \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{L_s} t_j \cdot \int \{d\epsilon_{j(t)}\}^T \cdot \{\sigma_{j(t)}\} dA_i \right) dt \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

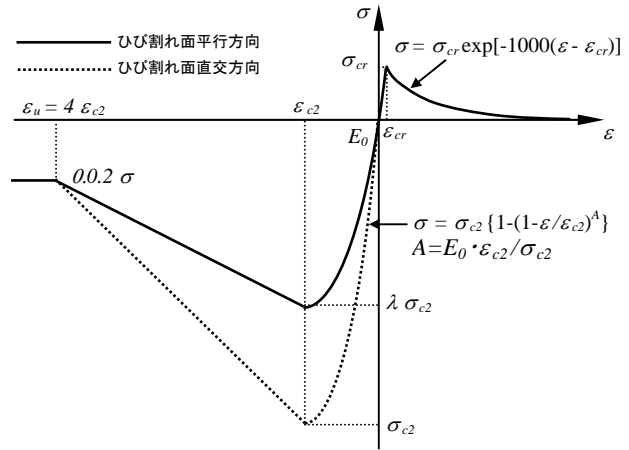


図-8 ひび割れ後のコンクリートの一軸応力-歪関係

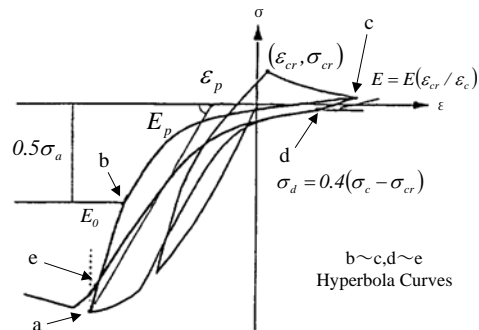


図-9 ひび割れ後のコンクリートの繰返し時の履歴特性

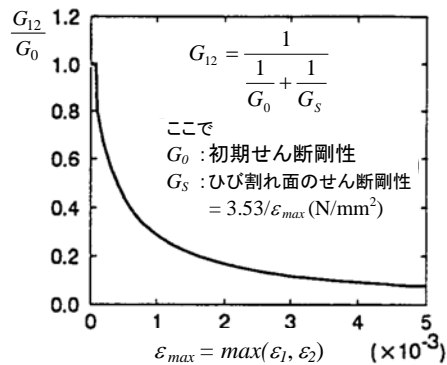


図-10 ひび割れ後のせん断伝達剛性

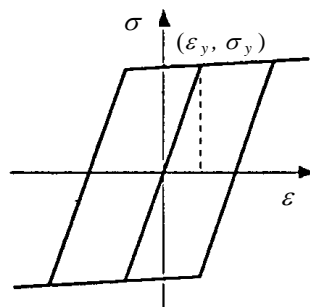


図-11 鉄筋の履歴特性

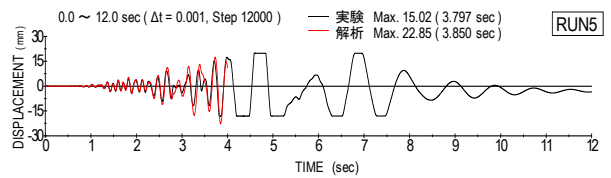
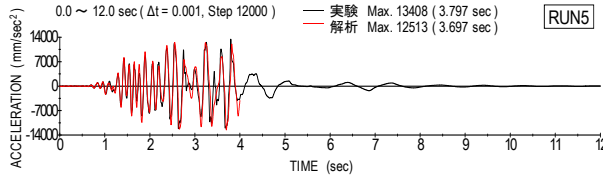
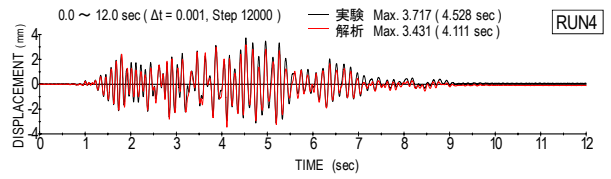
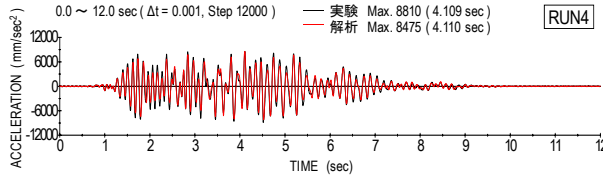
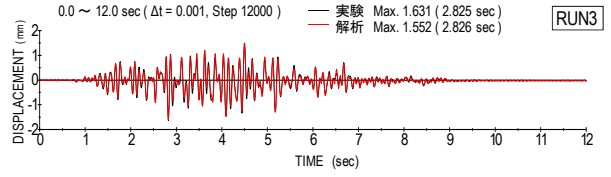
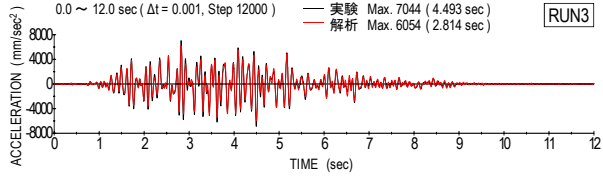
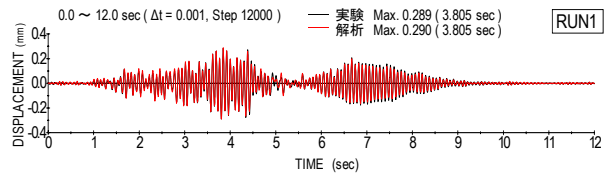
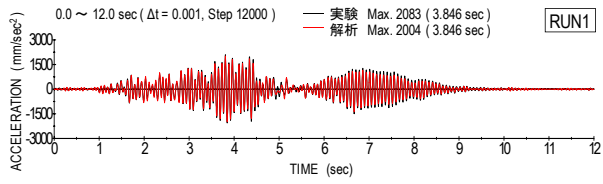


図-12 水平加速度時刻歴

図-13 水平変位時刻歴

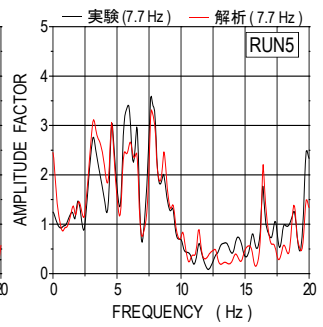
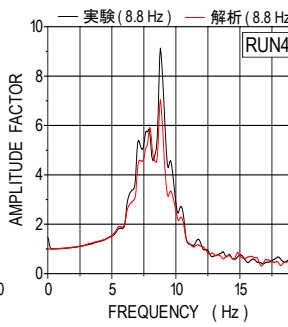
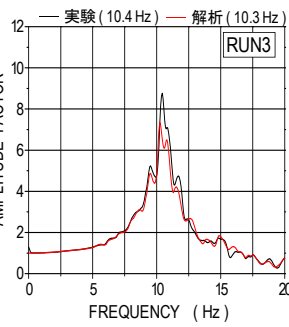
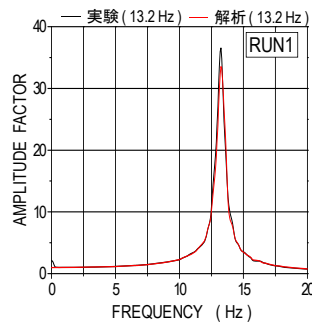


図-14 伝達関数

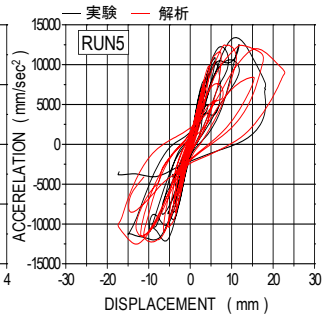
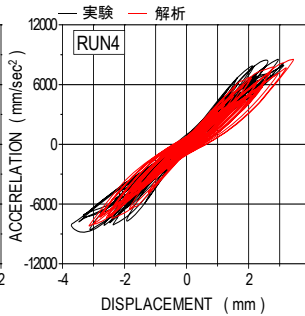
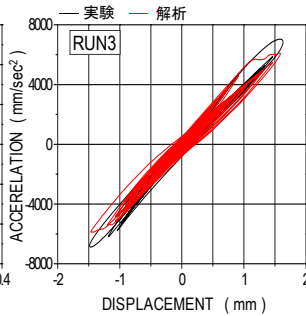
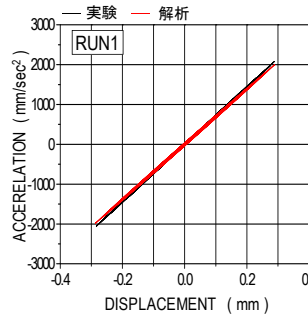


図-15 加速度-変位関係

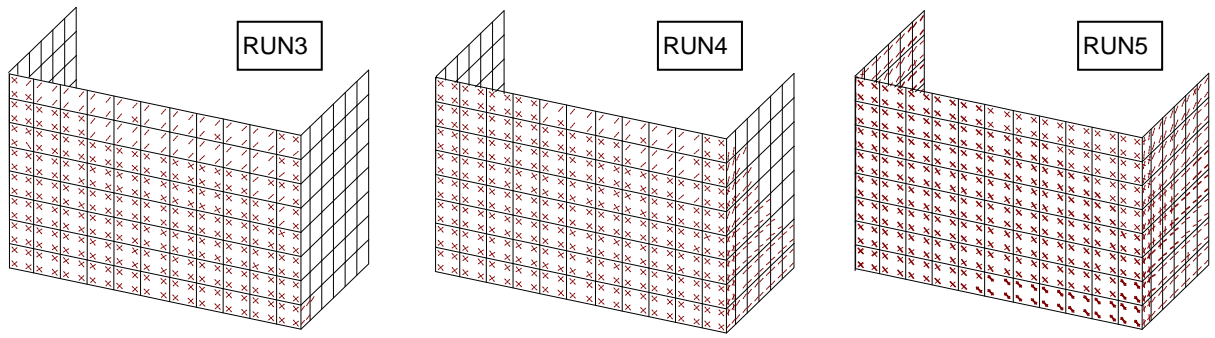
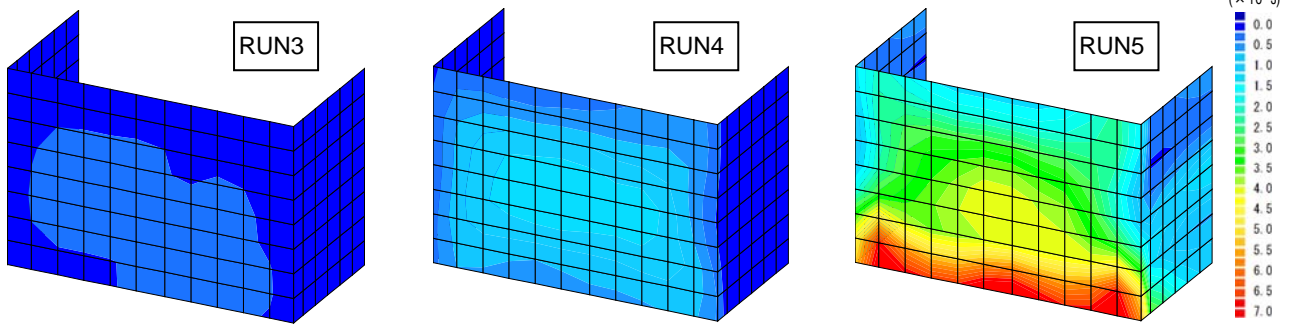
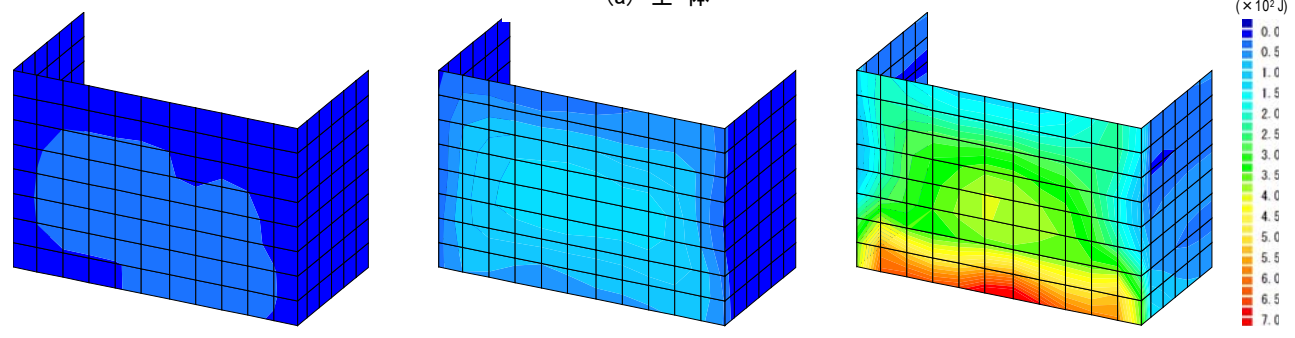


図-16 ひび割れ図

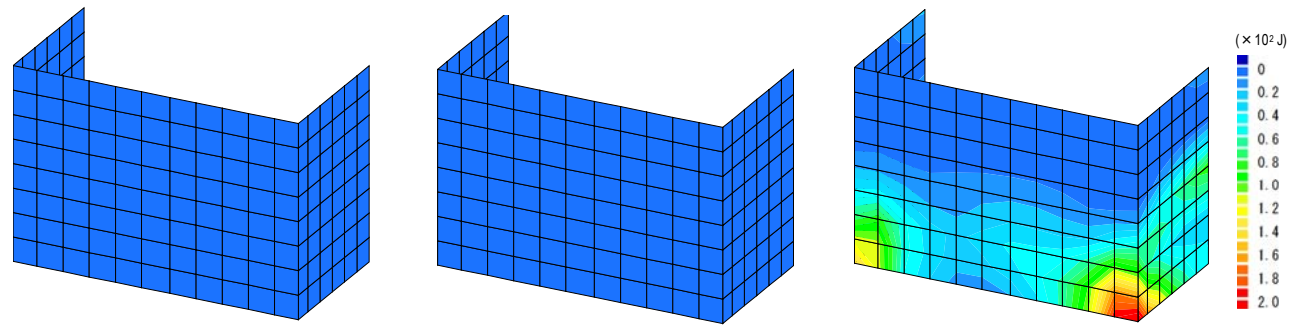
注) 矢印はひび割れ直交方向の歪が鉄筋降伏歪を超えたことを表す。



(a) 全体



(b) コンクリート



(c) 鉄筋

図-17 消費エネルギーの分布図

4. 解析結果

図-12, 13 に, RUN1, 3, 4, 5 の FEM 解析の水平加速度時刻歴波形及び水平変位時刻歴波形を実験と比較する。RUN5 は 4 秒以降で変位計が振り切れているため, 解析は 4 秒までとした。また図-14 に伝達関数 (応答加速度を入力加速度で除したものを), 図-15 に加速度 - 変位関係を, 解析と実験で比較して示す。いずれの解析結果

においても, 解析結果は実験と極めて良好に対応している。

図-16 に, RUN3~5 のひび割れ図を示す。RUN3 ではウェブ全面にひび割れが生じ, RUN4 ではフランジ面にもひび割れが生じている。RUN5 ではウェブ最下層右半分の要素で圧壊が生じている (図中の赤丸印)。

図-17(a) に, RUN3~5 の消費エネルギーのコンターを

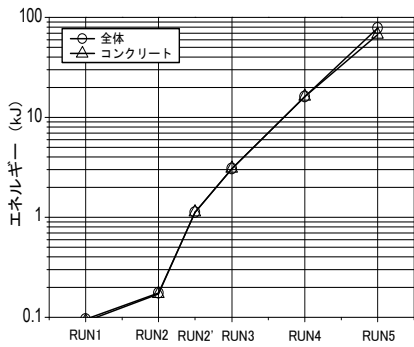


図-18 各ステップの消費エネルギー量

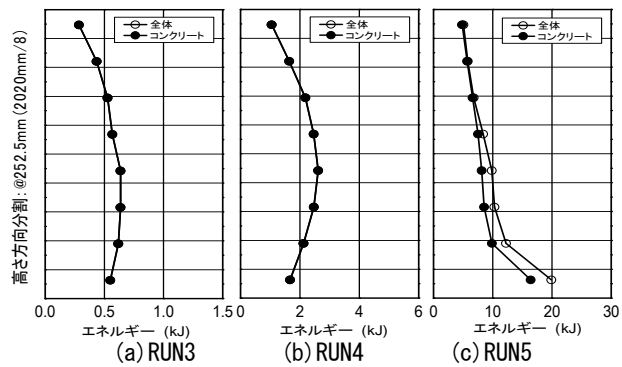


図-19 消費エネルギーの高さ方向分布

示す。同図(b), (c)にコンクリートと鉄筋の消費エネルギーを分けて示す。エネルギー消費はRUN5において顕著で、多くはウェブ部最下層でコンクリートにより消費される。これは図-16の圧壊位置と対応する。また図-3の破壊位置とも傾向的には対応するが、高さがやや異なる。この原因については明確ではないが、壁脚部の拘束度の差異等が考えられる。

図-18にRUN1~5の各ステップにおける消費エネルギーの総量を示す。いずれのステップにおいても多くがコンクリートにより消費される。RUN5では鉄筋でもある程度の消費が見られるが、コンクリートの消費量の約1/7である。

図-19にRUN3~5の消費エネルギーの高さ方向の分布を示す。RUN3, 4ではウェブ全層で消費される傾向があり、RUN5で最下層の比率が増加したことがわかる。

5. まとめ

本論文では、RC耐震壁の動的載荷試験のシミュレーション解析を行い、試験体各部での消費エネルギー分布や、鉄筋とコンクリートの負担について調べた。今後はエネルギー消費量と損傷の進展状況との対応を調べ、損傷度評価指標としての適用性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 中村尚弘, 山田淳, 他: 基礎浮上りを考慮した3次元FEMモデルによる原子力施設建屋の水平・鉛直同時入力時の応答性状に関する検討, 構造工学論文集 Vol.54B, pp.581-589, 2008.3
- 2) Nakamura N., Akita S., et al.: Study of Ultimate Seismic Response and Fragility Evaluation of Nuclear Power Building Using Nonlinear Three-dimensional Finite Element Model, Nuclear Engineering and Design Vol.240, pp.166-180, 2010.1
- 3) 中村尚弘, 春日康博, 他: 水平繰返し加力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のエネルギー消費に関す

る解析的研究, 日本建築学会構造系論文集 No.565, pp.87-94, 2003.3

- 4) 春日康博, 網嶋直彦, 他: 大規模鉄筋コンクリート構造物の地震時非線形挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集 Vol.49B, pp.193-202, 2003.3
- 5) 猪田幸司, 中村壮志, 他: 非線形3次元FEMによる原子力発電所建屋の損傷エネルギーに基づくフラジリティ評価の試み その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1115-1118, 2010.9
- 6) 丸田誠, 内山義英, 他: 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験, その11~12, 日本建築学会大会梗概集, pp.1559-1562, 1993.9
- 7) Ueda, M., Seya, H., et al.: Nonlinear Analysis on RC Shear Wall Shaking Table Test, Proc. 14th Int. Conf. Struct. Mech. Reactor Tech., pp.433-440, 1997.8
- 8) 中村尚弘, 伏見実, 他: 原子力発電所建屋のフラジリティ評価における建屋の強非線形域でのモデル化誤差の検討, 日本建築学会技術報告集 No.26, pp.499-504, 2007.12
- 9) Fafitis A., Shah S.P.: Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns, ACI Special Publication, No.SP-87, pp.213-233, 1985
- 10) Stevens, I.D., Uzumeri, S.M. and Collins, M.P.: Analytical Modeling of Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loadings, Department of Civil Engineering, Publication No.87-1, University of Toronto, 1987.2
- 11) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, pp.39-48, 1991.3
- 12) Karsan, I.D., and Jirsa, J.O.: Behavior of Concrete under Compressive Loading, Journal of Structural Division, ASCE, pp.2543-2563, 1969.12
- 13) 山田一字・青柳征夫: ひび割れ面におけるせん断伝達機構, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.19-28, 1983