

論文 正負繰返し荷重を受けるRC造H型立体耐震壁に関する3次元FEM解析

東 竜太郎^{*1}・余 勇^{*2}・柏崎 隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨: 本研究では, 正負繰返し荷重下でのRC造H型立体耐震壁を対象に3次元非線形FEM解析を実施し, 実験結果との比較により解析手法の検証を行った。また, 解析結果から履歴特性, 破壊性状の検討を行い, さらに, 累積吸収ひずみエネルギーによる性能評価を行い, H型耐震壁について, ウェブ壁, フランジ壁のエネルギー吸収状況の検討を行った。

キーワード: RC, 立体耐震壁, 正負繰返し荷重, FEM, 累積吸収ひずみエネルギー, 3次元解析

1. はじめに

近年, 鉄筋コンクリート (RC) 造建築物の構造解析に関しては, 3次元解析が精力的に実施されているが, その殆どが単調載荷での解析にとどまっている。繰返し荷重下におけるRC部材の挙動は単調載荷の場合と異なり, その載荷経路の違いが強度及び靱性能に大きな影響を与えることが既往の実験で明らかにされている。また, 建築物の設計は許容応力度設計法から性能評価型設計へと移行しつつあり, RC部材の耐震性能を合理的に評価する手法の確立が急務である。

そこで, 本研究では, 正負繰返し荷重下でのRC造H型立体耐震壁を対象に3次元非線形FEM解析を実施し, 実験結果との比較により解析手法の検証を行った。また, 解析結果を用いて, 履歴特性の検討を行い, さらに, 累積吸収ひずみエネルギーによる性能評価を行った。

2. 解析モデル

2.1 構成則モデル

本研究で使用した解析プログラムは, RC部材全般に適用が可能な汎用性を有することを目的に開発したプログラムである。

本研究では, 実験的研究から得られているコンクリートの繰返し挙動に関する知見を参考に

図-1のように応力-ひずみ関係を定めた。詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。圧縮側応力-ひずみ関係の包絡線には, 高強度コンクリートを考慮したFafitis-Shahモデル²⁾, 引張側のテンションスティフニング特性の包絡線には, 白井式³⁾を用いた。コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル⁴⁾により表現し, 3軸応力下の破壊条件としては, Willam, Warnkeら⁴⁾の5パラメーターモデルを用いた。ひび割れ発生後の圧縮強度低減には, 野口・飯塚式¹⁾を用いた。

鉄筋に関しては, 図-2に示すようにCiampiらが提案した修正Menegotto-Pintoモデルを用いた¹⁾。また, 鉄筋とコンクリート間は完全付着とした。

2.2 コンクリートの主軸の取り扱い

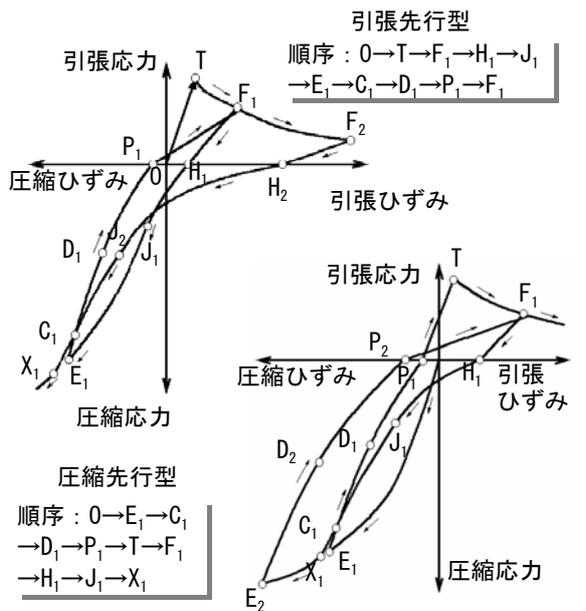
現状における3軸応力下の分布ひび割れモデルは, 回転ひび割れモデルと固定ひび割れモデルに大別される。回転ひび割れモデルは, 主応力軸とひび割れ軸の一致を仮定したもので, 主応力の回転に伴いひび割れも回転するモデルである。固定ひび割れモデルは, コンクリートの各積分点において引張強度を越えた時点で, その最大主応力に直交する方向, すなわちひび割れ方向を決定する。このひび割れ方向は後の最大主応力方向には影響されずに固定され (剛性

*1 東海興業 (株) (前千葉大学大学院自然科学研究科博士前期課程) 工修 (正会員)

*2 千葉大学大学院 自然科学研究科博士後期課程 工修 (正会員)

*3 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 助手 工修 (正会員)

*4 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 教授 工博 (正会員)



T 点：ひび割れ発生点 F 点：引張側除荷点
 J 点：圧縮側包絡線復活点 E 点：圧縮側除荷点
 P 点：残留ひずみ点 C 点：コモンポイント

図-1 コンクリートの履歴ルール

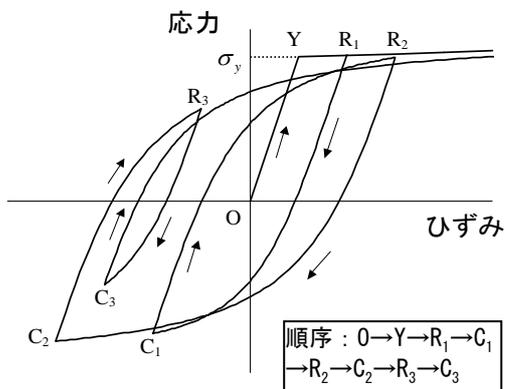


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係

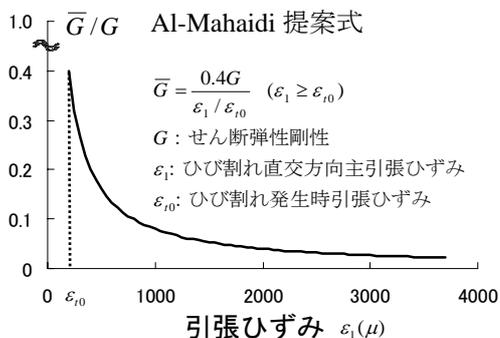


図-3 Al-Mahaidi の提案モデル

評価点の主軸が決定する), 単一のひび割れ座標系により表現される (直交固定ひび割れモデル)。

本研究では, 上記に示す回転ひび割れモデルと直交固定ひび割れモデル (以下, 単に固定ひび割れモデル) を用いた解析を行い, 実験結果との比較により, 両モデルの違いについて検証を行った。なお, ひび割れたコンクリートのせん断剛性に関して, 固定ひび割れモデルでは, ひび割れ座標系において Al-Mahaidi の提案に従いせん断剛性を定義する¹⁾ (図-3 参照)。回転ひび割れモデルでは, せん断剛性は直交異方性⁴⁾により, ひび割れに直交方向のヤング係数の低下とポアソン比に依存する。

3. 累積吸収ひずみエネルギー評価

従来, コンクリートの損傷評価としてひび割れ発生状況や, 最小主応力コンター図などを用いて行っていた。

本研究では, 累積吸収ひずみエネルギーは, 構造物の損傷度に対応する量であることに着目し⁵⁾, 部材のコンクリート要素(C), 鉄筋要素(R), 両者を重ね合わせた RC 要素の累積吸収ひずみエネルギーによる損傷の定量的評価や, 視覚的評価により, 部材の損傷の集中箇所の検討を行った。ここで, 累積吸収ひずみエネルギーの定義を式(1)に示す。すなわち, 要素の各積分点に対しての応力-ひずみ関係を積分し, その値に各積分点相当分の体積を掛けることにより算出する。

$$U = \sum \Delta U, \Delta U = \int_V \int_{\epsilon_i}^{\epsilon_j} \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij} \cdot dV \quad (1)$$

なお, 式 (1) の記号は, U : 累積吸収ひずみエネルギー, ϵ_{ij} : ひずみ増分, σ_{ij} : 微小区間での平均応力, V : 要素体積, である。

4. H型立体耐震壁の解析

4.1 解析概要

解析対象試験体は, 井上ら⁶⁾により行われた RC コア壁のせん断破壊実験の試験体とした。試験体は平面壁 3 体, H 型壁 3 体の計 6 体製作され, 水平加力方向と断面形状が変動因子とされ

た。本研究では、このうち H 型壁試験体 3 体 (H000, H450, H634) に平面壁試験体 P000 を含む計 4 体を対象に解析を行った。平面壁は面外強度が低いので、実験では面内破壊が先行するように面外変形を拘束させるような加力方法が用いられた。また、曲げ破壊よりもせん断破壊が先行するように、平面壁、H 型壁ともに、面内载荷は逆対称加力とし、せん断スパン比は 0.8 である。平面壁試験体の加力方向は壁面に対して 0° (P000) とし、H 型壁試験体の加力方向はウェブ壁に対して 0° (H000)、 45° (H450)、 63.4° (H634) である。表-1 に試験体一覧を、図-4 に試験体形状を示す。H634 のウェブ壁面内方向の水平力とフランジ壁面内方向水平力の比は 1:2 となり、H 型壁を構成する 3 枚の平面壁は、それぞれ同じせん断力を負担することになる。軸力は $0.2F_c$ (F_c : 設計コンクリート強度) の応力を作用させ、平面壁試験体では 1440kN、H 型壁試験体では 3970 kN が与えられた。また、試験体は特定の試設計建物の壁を縮尺したものではないが、壁厚の縮尺率は 1/8 程度である。

図-5 に解析での要素分割および境界条件を示す。実験と同じく逆対称加力にするため、上スタブの X 方向正負側の両側面を X・Y 方向拘束、下スタブの下面を Z 方向拘束し、下スタブに X 方向の水平変位を作用させた。また、平面壁は実験と同様に面内破壊が先行するように、下スタブの Y 方向を拘束し、H 型試験体についてはねじれを制御するように、下スタブに Z 方向に直交な面で X 方向に変位制御加力とした。

4.2 解析結果

(1) 荷重変形関係

図-6 に、回転ひび割れモデルと固定ひび割れモデルを用いた解析のせん断力-水平変形関係を実験結果と併せて示す。なお、図-6 の荷重と変形について、P000 試験体は、面内方向成分について示し、H 型壁試験体はウェブ方向成分を示す。

図-6 から分かるように各試験体に対して回転ひび割れモデルを用いた場合には、最大耐力、最大耐力以降の耐力劣化、除荷・再載荷時剛性

表-1 試験体一覧

試験体名	形状	備考
P000		壁 設計コンクリート強度 F_c 60 (kN/mm ²) 鉄筋
H000		柱型 主筋 D13 $\sigma_y=364$ (kN/mm ²) 横補強筋 D6 $\sigma_y=511$ (kN/mm ²) @90 ($P_s=0.59\%$)
H450		壁筋 D6 $\sigma_y=511$ (kN/mm ²) @90 ($P_s=0.59\%$)
H634		軸力 $\sigma_0=12$ kN/mm ² (0.2 F_c) P000 1440kN H000、H450、H634 3970kN

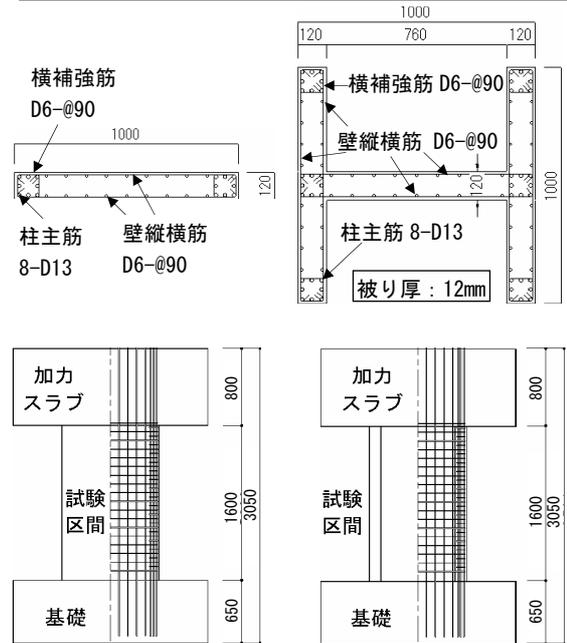


図-4 試験体形状 (単位: mm)

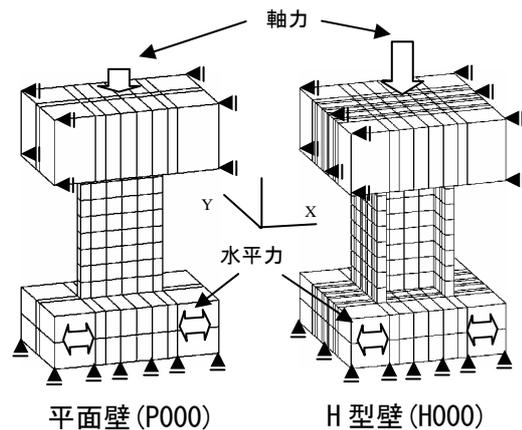


図-5 要素分割および境界条件

を比較的良好に表現できた。しかし、解析は、実験と比較して、最大耐力時の水平変形を過小評価する結果となった。固定ひび割れモデルでは、H450 試験体を除いて、最終サイクルにおいても最大耐力に至らなかった。この理由として、

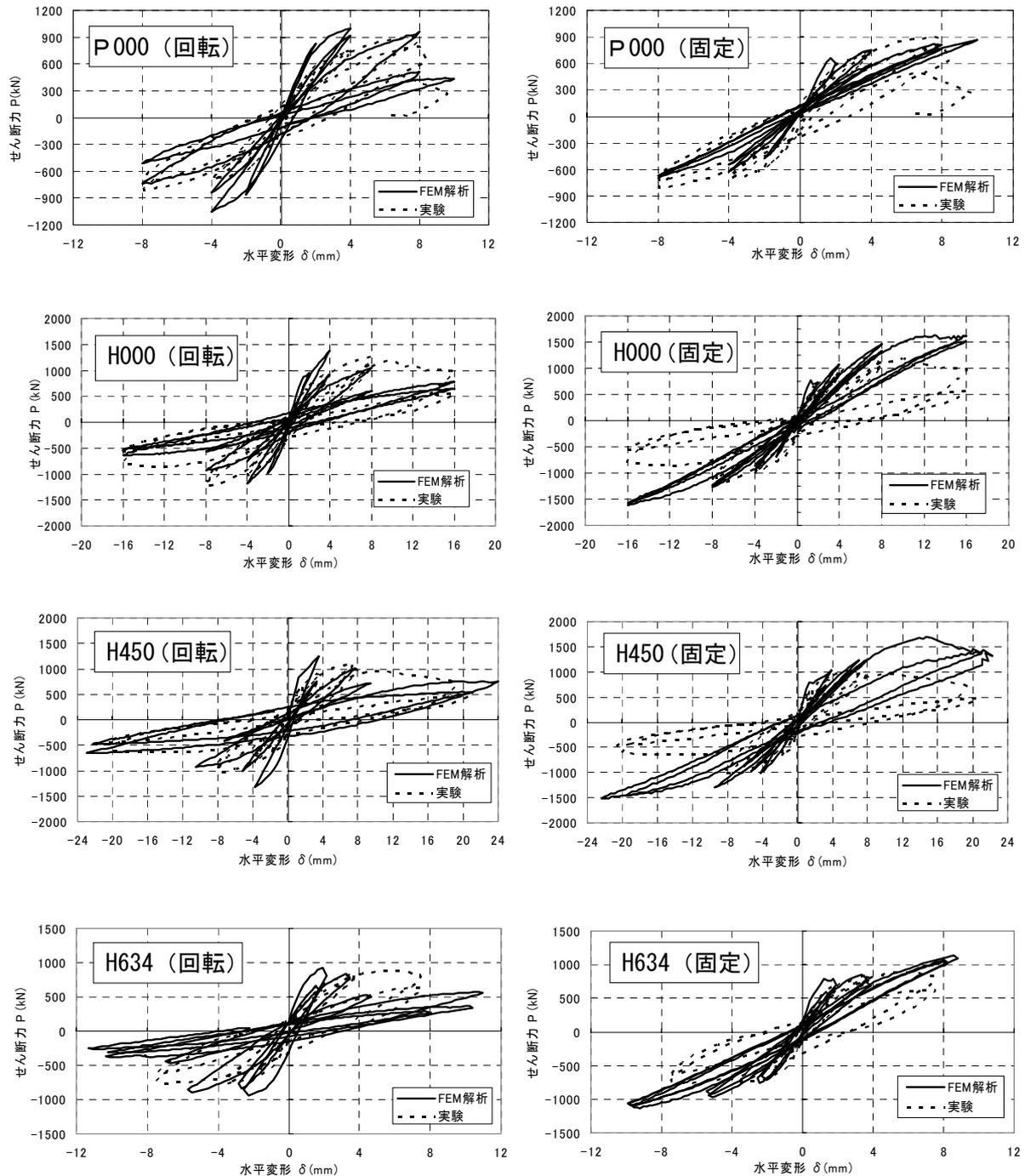


図-6 せん断力-水平変形関係

回転ひび割れモデルでは、主応力の回転に伴いひび割れも回転させるため、コンクリートの損傷を過大に評価してしまうことから早期に最大耐力に至ったと考えられる。それに比べ固定ひび割れモデルでは、コンクリートに初期ひび割れが発生した時点で、ひび割れ直交方向に関するひび割れ座標が決定し、それ以降においてひ

び割れ直交方向の主軸を回転させないため、コンクリートの損傷を過小評価し、耐力を過大に評価したものと考えられる。

以上の考察より、H型耐震壁について正負繰返し载荷下の解析に関して、回転ひび割れモデルを用いた際に最大耐力時の変形を過小評価したが、ある程度実験と良好な対応をしたと考えられる。

(2) 累積吸収ひずみエネルギー

本研究においては上記より、回転ひび割れモデルを用いた場合の累積吸収ひずみエネルギーによる性能評価を行う。図-7に各試験体の最大耐力時（正載荷）の累積吸収ひずみエネルギーコンター図を示す。また、表-2に最大耐力時、および解析終了時のH型壁のウェブ壁と2枚のフランジ壁のエネルギー吸収負担率を示す。図-7のP000試験体においてコンクリートのエネルギー吸収量と鉄筋のエネルギー吸収量を加算したものがRCとしてのエネルギー吸収量である。H型壁試験体においては、同様にRCのみの累積吸収ひずみエネルギーコンター図を示す。

図-7のP000試験体について、コンクリート、鉄筋とも損傷集中箇所が、壁脚から壁頭にH000試験体について、ウェブ壁は全体にわたってエネルギー吸収をしていることが確認された。F1壁は上部に、F2壁は下部にエネルギー吸収が集中している。H450試験体では、H000試験体に比べ吸収エネルギーがフランジ壁に分散しているのが確認できる。H634試験体では、吸収エネルギーの分散がさらに顕著に表れた。図-8のH450試験体のエネルギー吸収立体図より、エネルギー吸収が集中している箇所の流れが立体的に把握できる。表-2より、H634試験体では、3枚の平面壁が、それぞれ同じせん断力を負担するが、最大耐力時においてウェブ壁は、試験体全体の1割程度しかエネルギー吸収しておらず、残りのエネルギー吸収を2枚のフランジが担っていることが分かる。

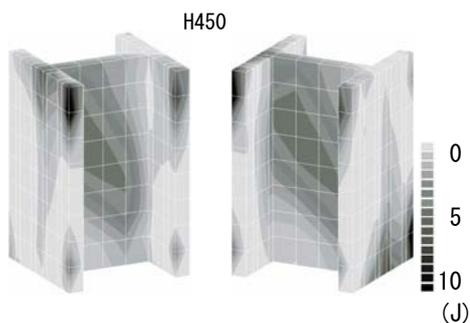


図-8 立体エネルギー吸収コンター図
(最大耐力時)

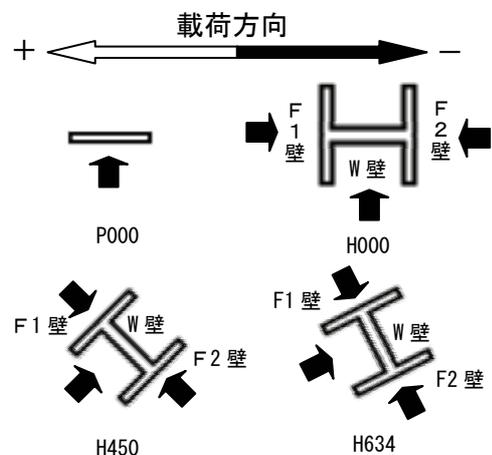
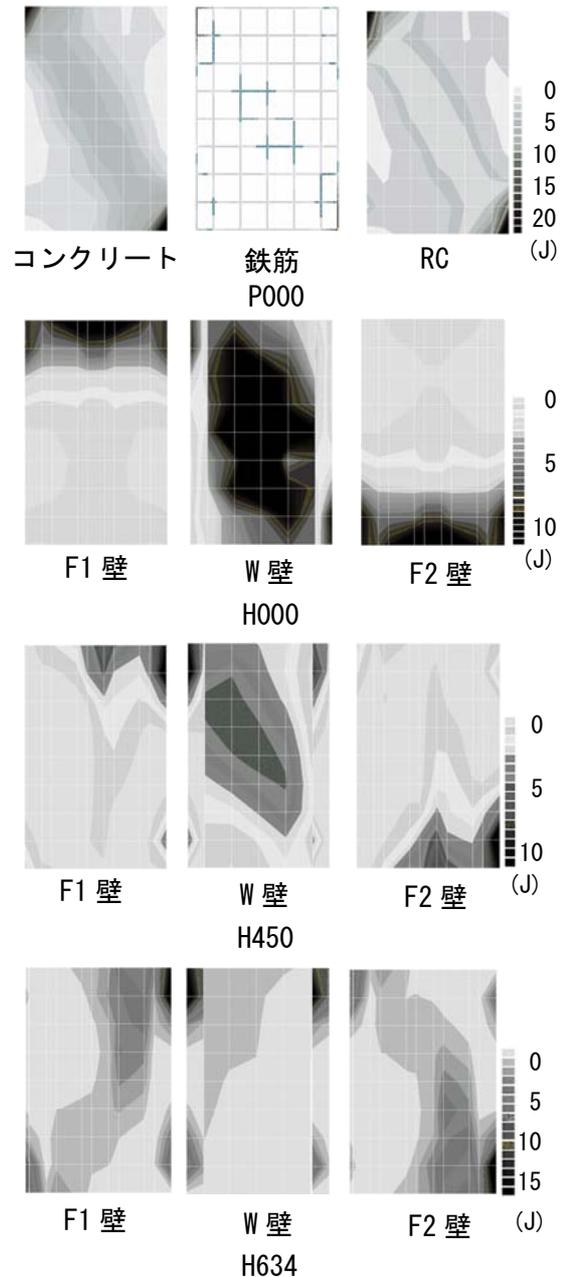


図-7 エネルギー吸収コンター図
(最大耐力時)

表-2 エネルギー吸収負担率

試験体	最大耐力時			解析終了時		
	W壁負担率(%)	F1壁負担率(%)	F2壁負担率(%)	W壁負担率(%)	F1壁負担率(%)	F2壁負担率(%)
H000	49.9	31.6	18.5	32.8	32.1	35.1
H450	44.4	30.1	25.5	33.1	34.1	32.8
H634	10.2	46.1	43.6	8.1	45.8	46.2

また、表-2より解析終了時のエネルギー吸収負担率は、H000、H450試験体では、3枚の壁がエネルギー吸収をほぼ同じ割合で負担し、H634試験体ではW壁は、試験体全体の8%程度のエネルギー吸収で、2枚のフランジ壁に集中してエネルギー吸収がなされた。従って、せん断入力に関わらず、エネルギー吸収（損傷集中）がなされる場合があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、RC耐震壁を対象に3次元FEM解析を行い、コンクリートのひび割れモデルの違いによる解析精度の検証を実験結果との比較により考察した。また、累積吸収ひずみエネルギーによる性能評価を行った。これにより、構造物の定量的な損傷評価が行え、正負繰返し荷重下での累積損傷度が把握できた。以下に解析結果から得られた知見と今後の課題を示す。

回転ひび割れモデルでは、ひび割れによるコンクリートの損傷を過大評価することによって最大耐力時の変形を過少評価したが、最大耐力、最大耐力以降の耐力劣化、除荷・再載荷時剛性が、実験と比較的良好に対応した。一方、直交固定ひび割れモデルでは、単一のひび割れ座標系（直交3方向）で剛性評価を行うため、ひび割れ損傷を過小評価し、その結果、耐力を大きく評価し、耐力劣化がほとんど生じなかったと考えられる。

繰返し荷重を受けるRC部材には、一般的に非直交なせん断ひび割れが発生する。従って、ひび割れによるコンクリートの損傷を適切に評価するために、現在、参考文献⁷⁾で提案されているような非直交ひび割れを考慮出来るモデルの開発を行っている。

謝辞

本研究を行うにあたり、丸田誠博士（鹿島技術研究所）から貴重な実験資料を提供して頂きました。ここに、記して感謝の意を表します。

また、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)(課題番号:14350293, 研究代表者:野口博)により行われた。

参考文献

- 1) 櫻井輝雄, 柏崎隆志, 野口博: 繰返し荷重を受けるRC面材に関する非線形FEM解析モデルの開発, JCI年次論文集, Vol.24, No.2, pp.139-144, 2002.7
- 2) Fafitis, F. and Shah, S. P.: Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns, ACI Journal, pp.213-232, 1985
- 3) 佐藤稔雄, 白井伸明: 鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究, AIJ大会学術講演梗概集, pp.1615-1618, 1978.9
- 4) 色部誠, 河角誠, 安達洋: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985
- 5) 魚本健人, 矢島哲司, 本郷和徳: 繰返し曲げを受けるRC梁の消費エネルギーによる破壊特性評価, JSCE論文集, No.460/Vol-18, pp.85-91, 1993.2
- 6) 井上貴之, 鈴木紀雄, 別所佐登志, 丸田誠: 斜め方向の水平力を受ける鉄筋コンクリート造立体耐震壁のせん断強度, AIJ大会学術講演梗概集, pp.433-436, 1999.9
- 7) 福浦尚之, 前川宏一: 非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則, JSCE論文集, No.634/V-45, pp.177-195, 1999.1