

論文 RC 柱の耐震性能に関する 3 次元繰返し非線形 FEM 解析

坂本 憲吾^{*1}・余 勇^{*2}・柏崎 隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨：本研究では、内田・野口の単調載荷時の 3 次元 FEM 解析プログラムをベースとし、地震時の 3 次元問題について検討可能な 3 次元繰返し FEM 解析プログラムの開発を行い、多方向載荷時の RC 柱の破壊挙動、及び繰返し加力により曲げ降伏後にせん断破壊した RC 柱の破壊挙動を把握するとともに、RC 柱の内部破壊状況、載荷履歴の違いによる影響について検討を行った。更に、解析結果より、RC 柱の大変形域までの劣化性状や累積吸収エネルギーについて定量的に検討した。

キーワード：RC 柱，有限要素法，繰返し荷重，累積吸収エネルギー，3 次元解析

1. はじめに

現行の RC 柱の設計法では、水平 2 方向の地震動は別々に作用していると仮定し、X, Y 両方向の設計が独立に行われている。しかし、この仮定は弾性範囲では成り立つが、大変形塑性域では成立しない。大変形塑性域にまで及ぶ多方向繰返し載荷時の RC 部材に関する実験的研究は、市之瀬¹⁾・芳村²⁾・衣笠³⁾らにより近年精力的に行われてきているが、繰返し載荷時の解析的研究は未だ十分に行われていたとは言えない。

本研究では、内田・野口の 3 次元 FEM 解析プログラム⁴⁾をベースとし、RC 部材の 3 次元繰返し FEM 解析プログラムの開発を行い、多方向載荷時の RC 柱の破壊挙動、及び繰返し加力により曲げ降伏後にせん断破壊した RC 柱の破壊挙動について解析的検討を行った。更に、解析結果より RC 柱の大変形域までの劣化性状や累積吸収エネルギーについて定量的に検討した。

2. 解析モデル

2.1 コンクリート

コンクリートには、アイソパラメトリック 8 節点ソリッド要素を用いた。構成則には、

Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性重弾性モデルを 3 次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面には、Kupfer らの実験に基づく Willam-Warnke の 5 パラメータモデルを仮定した。応力-ひずみ関係には、野崎・小林・櫻井⁵⁾らにより開発された繰返しモデルを導入した(図-1)。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には、飯塚式(図-2)を用いた。ひび割れモデルは、直交固定ひび割れモデルを用い、ひび割れ方向のせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデル⁶⁾(図-3)を用いた。また、ひび割れの判定は、引張先行、圧縮先行共に図-1中の T 点のひずみで行った。

2.2 鉄筋

鉄筋には、2 節点トラス要素を用いた。繰返し載荷モデルとして、バウシinger 効果を考慮できる Ciampiらにより提案された修正 Menegotto-Pinto モデル(図-4)を導入した。

2.3 付着

付着特性には、2 節点のボンドリンク要素を用いた。繰返し載荷モデルとして、森田・角モデル⁷⁾(図-5)を導入した。

*1 松田平田設計(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)

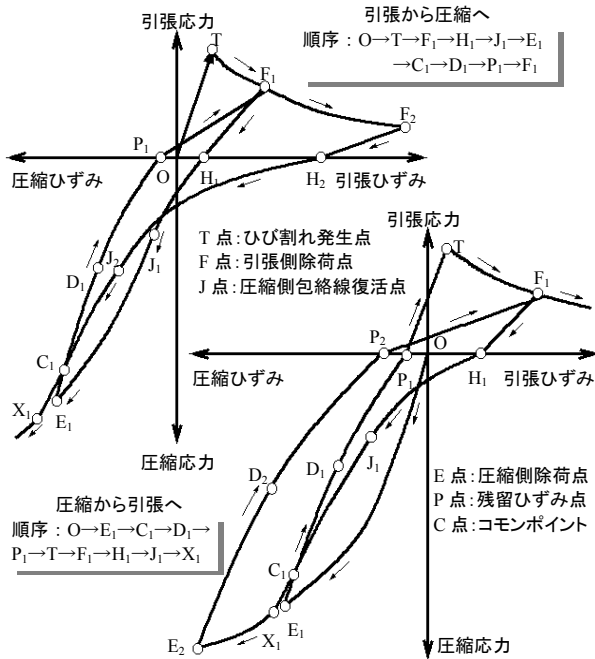


図-1 コンクリートの圧縮～引張間の履歴ルール

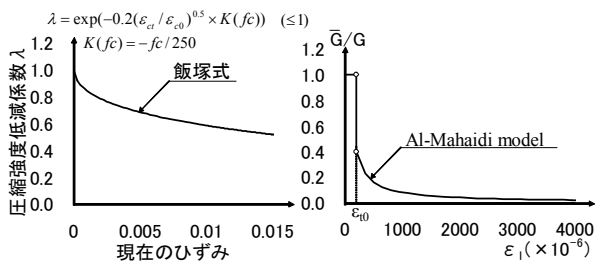


図-2 圧縮強度低減係数 λ

図-3 ひび割れ方向のせん断伝達モデル

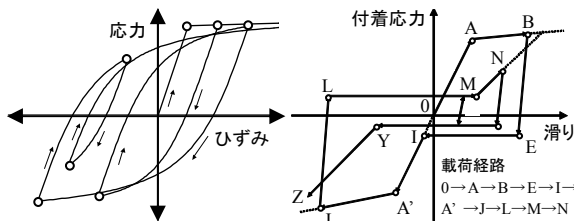


図-4 鉄筋の履歴ルール 図-5 付着の履歴ルール

3. 荷重履歴が異なる RC 柱の FEM 解析

3.1 解析概要

市之瀬ら²⁾により行われた試験体を解析対象とした。試験体は 25cm×25cm の柱部材で、主筋には D16 を用いた(引張鉄筋比 1.27%)。また、横補強筋には 4φ の丸鋼を用い、横補強筋間隔を 40mm とした(横補強筋比 0.25%)。要素分割を図-6 に示す。XZ 平面での対称性を利用して、対称面を面ローラ拘束し、試験体の半分をモデル

化した(1/2 モデル)。コンクリート及び鉄筋の材料特性を表-1 に示す。荷重方法は一方向単調荷重(軸力有り, 軸力無し), 正負繰返し荷重(軸力有り, 軸力無し), 片側繰返し荷重(軸力有り)の計 5 種類である。軸力比 0.062 (軸力有りの場合), 繰返し荷重の加力サイクルは, 8/1000rad (水平変位 4.8mm) 漸増タイプとした。

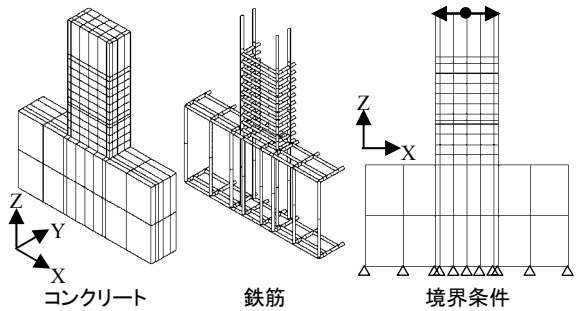


図-6 要素分割及び境界条件

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度(MPa)	引張強度(MPa)	1/3割線弾性係数(MPa)
	31.3	2.69	2.33×10^4
鉄筋	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)	ヤング係数(MPa)
	D16 4φ	359 531	455 577

3.2 荷重-変形関係

各試験体の実験及び解析から得られた荷重-変形関係を図-7 に示す。実験と解析の比較から、全試験体において初期剛性は概ね良好な結果となった。最大耐力についても軸力なしの試験体においては実験の約 1.2 倍, 軸力有りの試験体においては約 1.1 倍と良好な結果が得られたといえる。単調荷重の試験体については、耐力劣化の起こる変位が、実験より解析の方が早い結果となった。正負繰返し荷重の試験体について、実験では逆 S 字型となっているのに対し、解析では紡錘型の履歴形状となった。片側繰返し荷重の試験体については概ね良好な結果が得られたといえる。荷重履歴の違いによる耐力低下点の違いは実験同様、解析でも見られなかった。

3.3 内部ひずみ-変形関係

各試験体の実験及び解析から得られた内部ひずみ-変形関係を図-8 に示す。ここで、内部ひずみは実験同様、危険断面から 175mm の位置の水平方向の相対変位を有効せい 212mm で除した

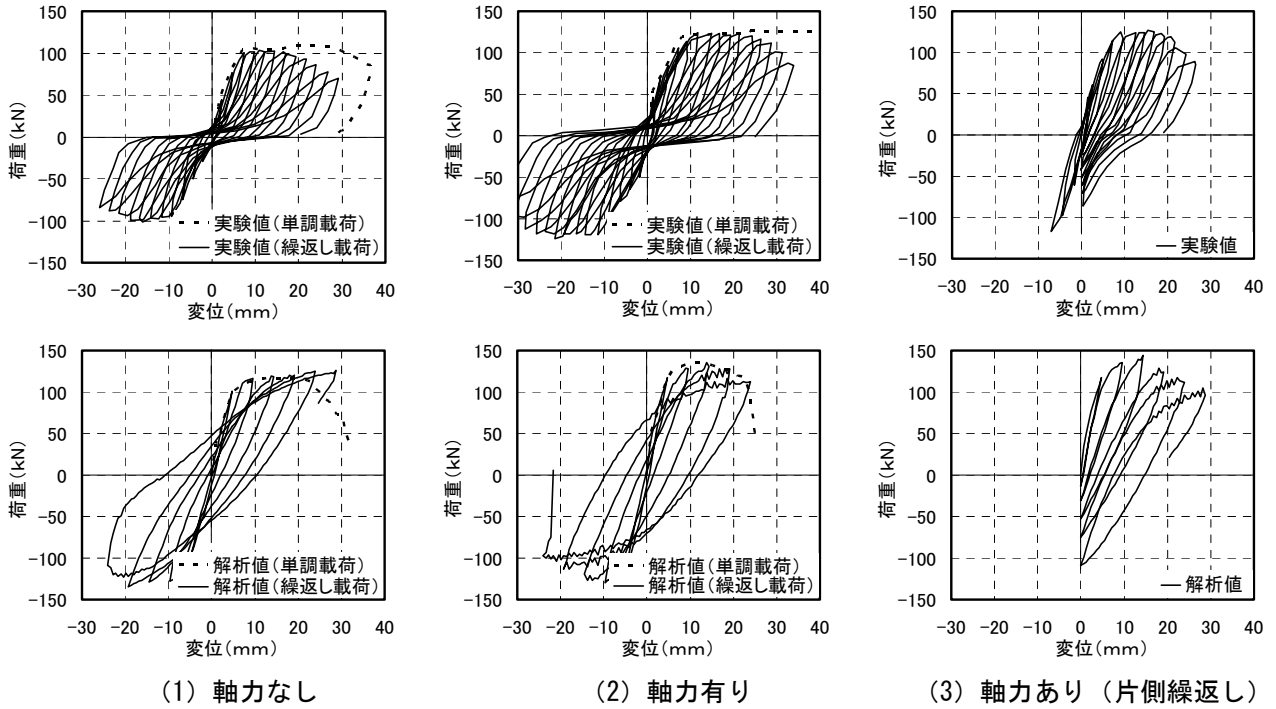


図-7 荷重－変形関係

値をとった。「Center」は断面中央のひずみ、「Side」は部材表面から 1/5 の位置のひずみである。実験値と解析値の比較から、単調載荷及び繰返し載荷の両試験体において、軸力のない場合には、ほぼ同等のひずみとなっているのに対し、軸力のある場合は解析の方がひずみが小さくなる傾向が見られた。

3.4 軸方向ひずみ－変形関係

各試験体の実験及び解析から得られた軸方向ひずみ－変形関係を図-9に示す。ここで、軸方向ひずみは、実験同様、危険断面から 401mm の位置での鉛直変位を柱長さ 401mm で除した値をとった。軸力の無い試験体については実験と同等のひずみとなったが、軸力のある試験体につ

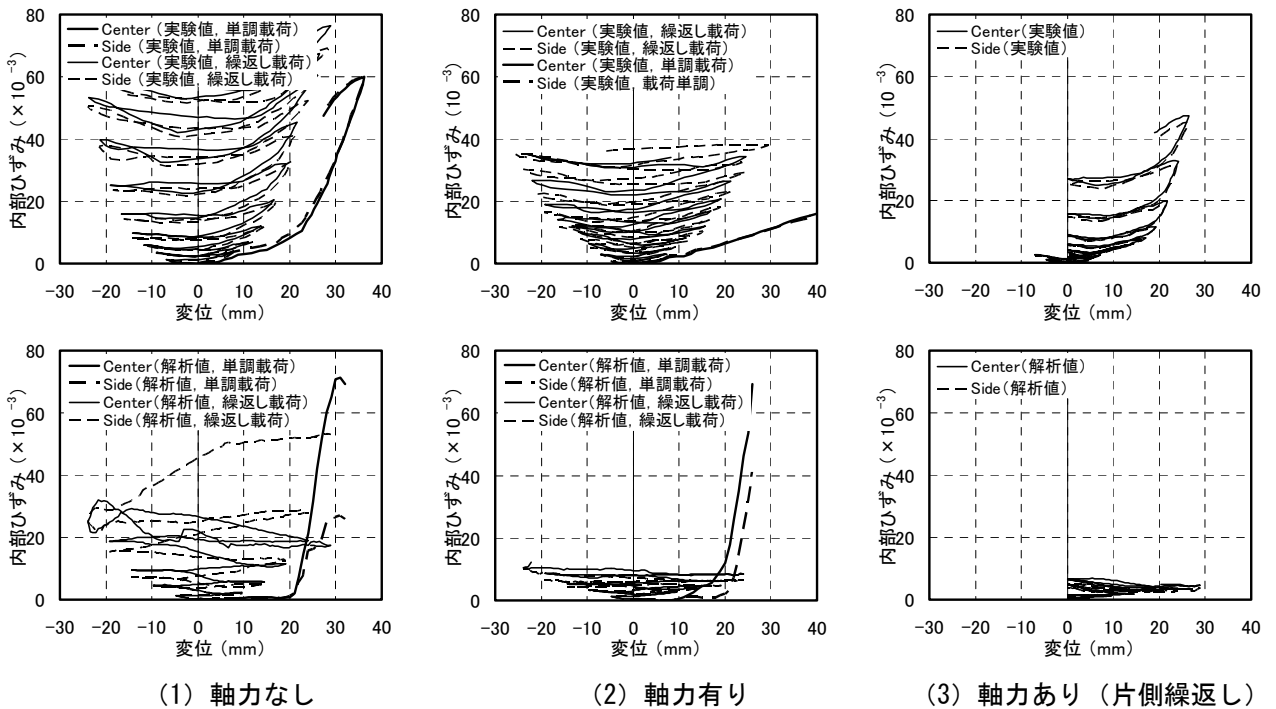


図-8 内部ひずみ－変形関係

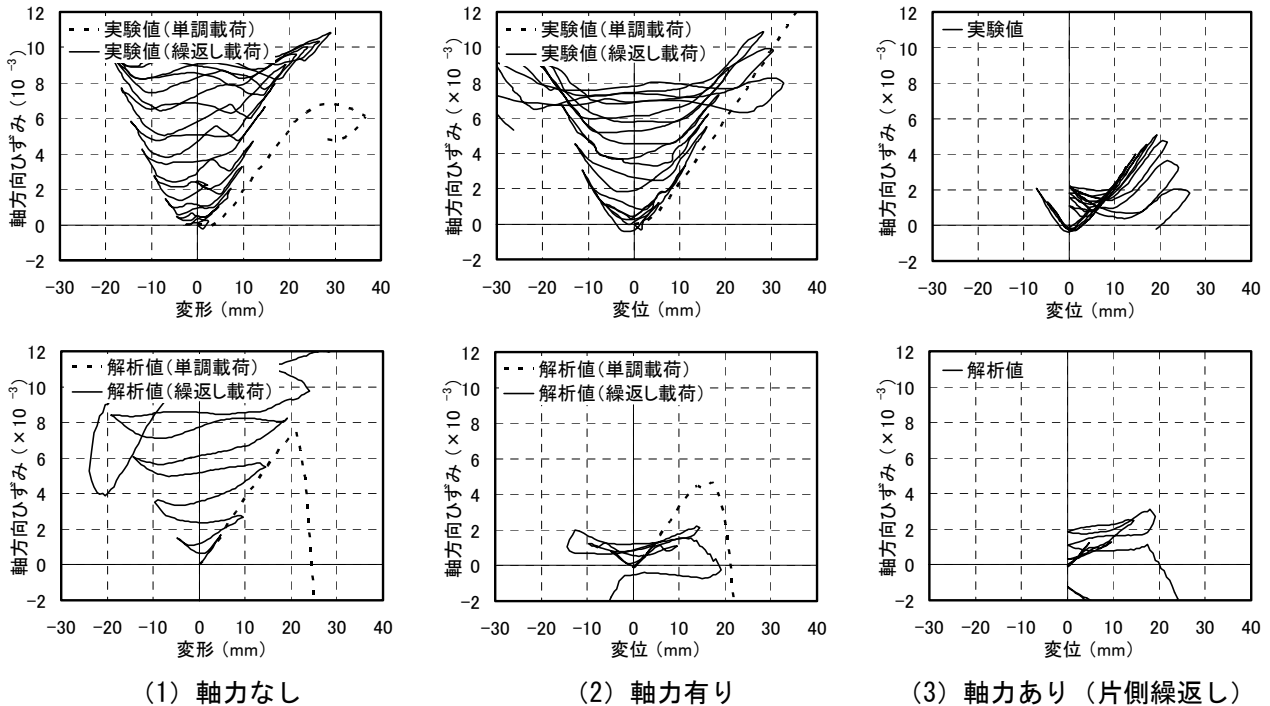


図-9 軸方向ひずみ-変形関係

いては、実験値より小さい結果となった。

4. 二方向入力を受ける RC 柱の FEM 解析

4.1 解析概要

芳村ら³⁾により行われた試験体を解析対象とした。試験体は、曲げ降伏後にせん断破壊するタイプ (FS シリーズ) と曲げ降伏せずにせん断破壊するタイプ (S シリーズ) の 2 種類である。試験体数は、各タイプで 3 体ずつ計 6 体である (尚、実験では S0 試験体は行われていないため計 5 体である)。断面は FS シリーズでは 30cm × 30cm, S シリーズでは 40cm × 40cm の正方形で、試験体高さは両シリーズとも 60cm である。主筋は、FS シリーズでは、12-D19 (引張鉄筋比 1.91%), S シリーズでは 16-D22 (引張鉄筋比 1.69%) である。横補強筋は、FS シリーズでは □-D10@75 (横補強筋比 0.63%), S シリーズでは □-D10@180 (横補強筋比 0.20%) である。コンクリート及び鉄筋の材料特性を表-2に示す。図-10に要素分割を示す。軸力比は FS シリーズでは 0.26, S シリーズでは 0.20 とした。荷履歴を模式的に図-11に示す。水平 1 方向の「単調荷」と「両振り荷」、水平「2 方向荷」の荷履歴を考慮した。試験体名中の数字が 0 は単調荷

表-2 材料特性

コンクリート	最大強度(MPa)	最大強度時ひずみ(%)	1/3割線剛性(MPa)
FSシリーズ	27.0	0.209	2.57×10^4
Sシリーズ	25.1	0.200	2.59×10^4
鉄筋	降伏強度(MPa)	降伏時ひずみ(%)	ヤング係数(MPa)
D10(SD295A)	355	0.186	1.91×10^5
D19(SD345)	387	0.194	1.99×10^5
D22(SD490)	547	0.281	1.95×10^5

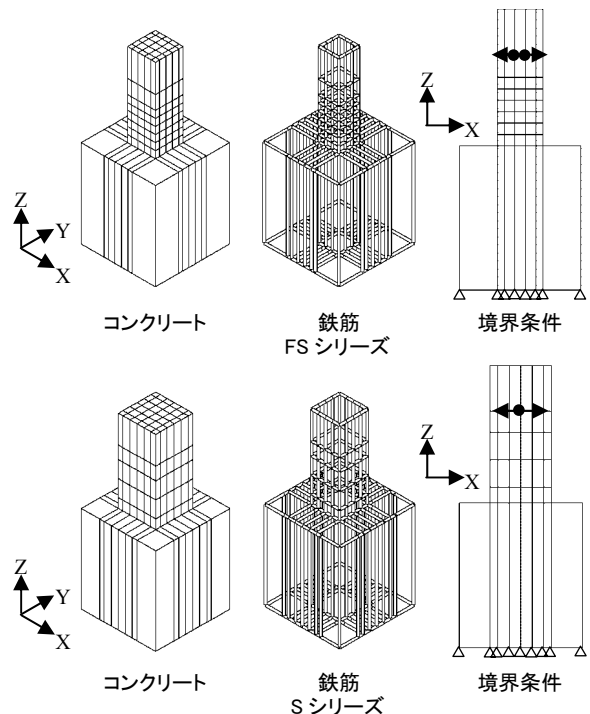
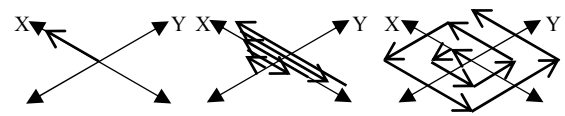


図-10 要素分割及び境界条件



単調荷 (FS0, S0) 両振り荷 (FS1, S1) 2方向荷 (FS2, S2)

図-11 荷履歴

荷を、1は両振り載荷を、2は2方向載荷を、それぞれ表している。

4.2 荷重-変形関係

各試験体の実験及び解析から得られた荷重-変形関係を図-12に示す。尚、2方向載荷のFS2、S2については両方向の荷重-変形関係を示した(図-12中の(3)、(4))。図中に最大耐力点(2方向載荷では2方向のベクトル和)及び限界状態点(軸力を保持できなくなった時点)をそれぞれ◇、○で示す。S1については、実験と比較し概ね良好な結果が得られたと言えるが、実験では逆S字型の履歴形状であるのに対し、解析では紡錘型の履歴形状となった。FS1については、最大耐力付近まで良好な結果となったが、最大耐力後、耐力低下が激しくなった。S2、FS2では、最大耐力付近までは良好な結果が得られたが、その後、解が安定せず、限界状態時まで表現することができなかった。本解析では、直交固定ひび割れモデルを用いているため、特に繰返し載荷による非直交ひび割れの発生を許容していない。従って、多方向から荷重を受ける部材(S2、FS2)に対して、大変形域でのひび割れ状況を完全に表現できない問題点が挙げられる。

4.3 累積吸収エネルギー

累積吸収エネルギーは軸力と水平力にそれぞれの変形増分をかけたものの累積として求めた。軸力による累積吸収エネルギー E_V 及び水平力による累積吸収エネルギー E_H の和を部材全体の累積吸収エネルギー E として計算した。S1とFS1に関する累積吸収エネルギーと水平変形の関係及び、限界状態での E の比較を図-13に示す。FS1において、全体累積吸収エネルギー E は、限界状態時まで実験とほぼ同等のエネルギー特性となった。しかし、実験では、軸力による累積吸収

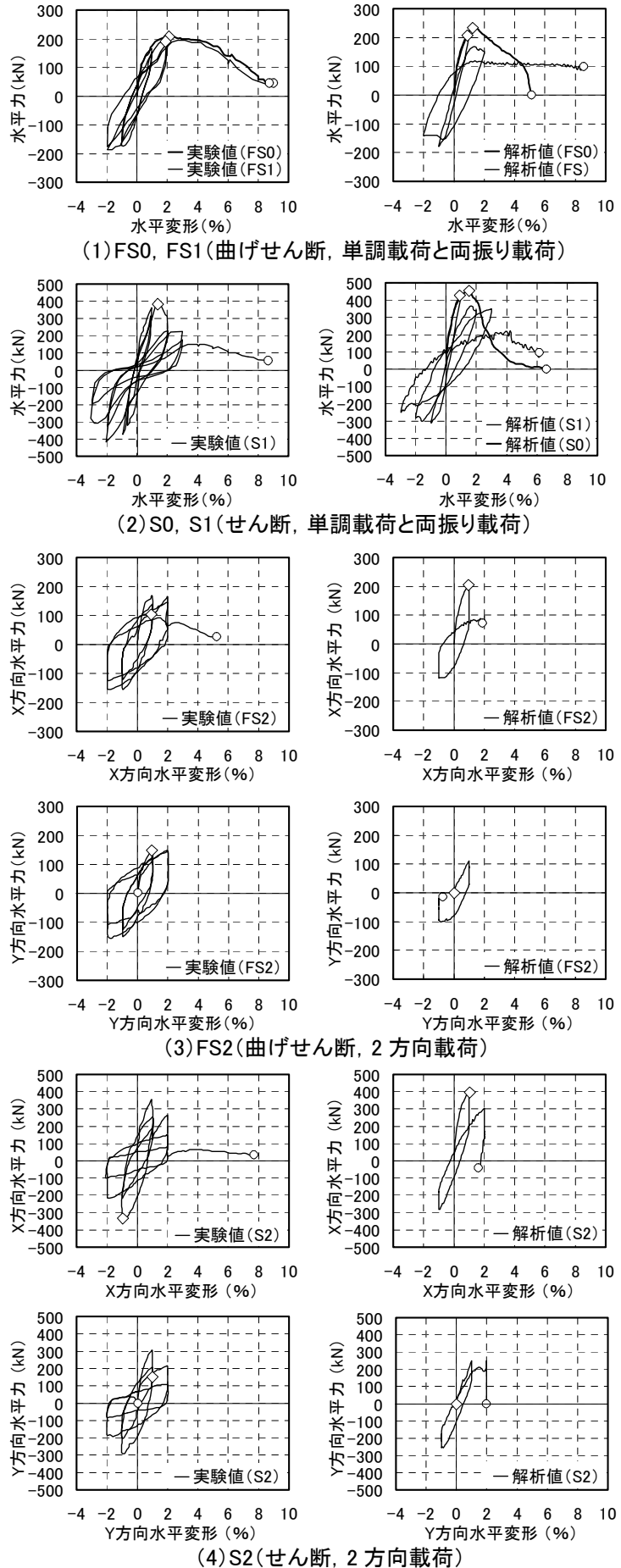


図-12 荷重-変形関係

エネルギー E_V が最終載荷時の水平変形約5%以降に増大しているのに対し、解析では、早い段階から軸縮みが生じたため、全体累積吸収エネルギー E に対する軸力による累積吸収エネルギー E_V の比率が大きい結果となった。図-13中の●で示した点における累積吸収エネルギーの分布状況を図-14に示す。図-14からFS1、S1ともに柱脚に累積吸収エネルギーが集中していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、3次元繰返しFEM解析プログラムの開発を行い、多方向から加力を受けるRC柱の劣化性状、累積吸収エネルギーについて検討を行った。その結果、初期剛性、最大耐力、耐力低下点、及び累積吸収エネルギーについて概ね良好な結果が得られた。更にせん断や付着劣化による履歴ループの逆S字化などを表現するため、非直交固定ひび割れモデル、及び繰返し載荷に対応したひび割れ方向のせん断伝達モデルを開発中である。

謝辞

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) 松澤敦行, 伊吉允, 梅村恒, 市之瀬敏勝: 載荷履歴と軸力がRC部材の耐力低下に及ぼす影響, JCI年次論文集, Vol.24, No.2, pp.877-882, 2002
- 2) 山中憲行, 芳村学: 低軸力下での曲げせん断型及びせん断破壊型RC柱の崩壊に関する研究, JCI年次論文集, Vol.22, No.3, pp.325-330, 2000
- 3) 衣笠秀行, 野村設郎, 西村徹, 西村俊彦: RC柱部材の曲げ降伏後の繰返し載荷によって発生する破壊メカニズムについて, JCI年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.485-490, 1994
- 4) 内田和弘, 野口博: 梁貫通型接合部を有する柱

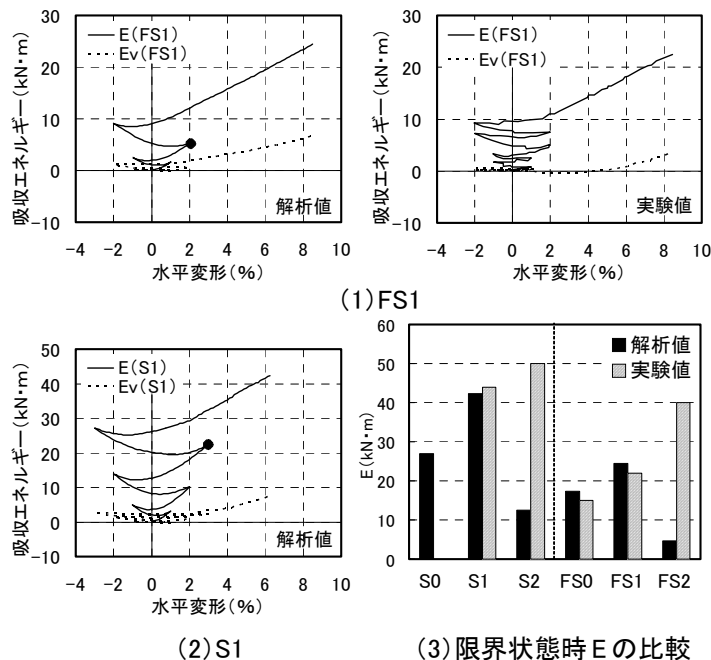


図-13 累積吸収エネルギーと水平変形関係(FS1, S1), 及び限界状態時Eの比較

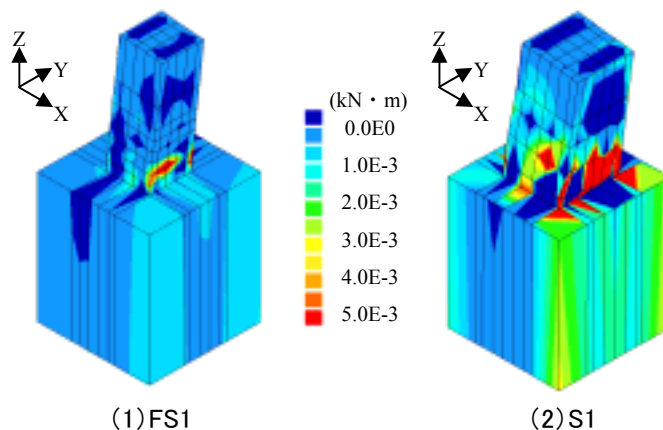


図-14 累積吸収エネルギーコンター図

RC・梁S構造2層2スパン架構の力学的挙動に関する解析的研究, AIJ構造系論文集, 1998.12

- 5) 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
- 6) Al-Mahaidi, R. S. h.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report No.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan.1979.
- 7) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, AIJ論文報告集, 第229号, pp.15-24, 昭和50年3月