

論文 3次元FEMによる降伏型が異なるRCスラブ付きフレームの耐震性能に関する解析的研究

月山 由紀子^{*1}・柏崎 隆志^{*2}・野口 博^{*3}

要旨：実験では確認することの難しいRCスラブ付きフレームの立体的な変形や応力状態を把握するために、スラブ付き2層1スパンラーメンを対象として、3次元非線形FEM解析を行った。梁降伏先行型と柱降伏先行型の2体を解析し比較することにより、降伏型の違いがどのように解析できるかを検討した。梁降伏型と柱降伏型の応力分布、変形の違いが3次元的に表現できたことに加え、ひびわれ進展状況や累積吸収ひずみエネルギーの検討から、柱降伏型では柱への損傷が集中することが解析的にわかった。

キーワード：立体フレーム, 直交梁, スラブ, 3次元解析, FEM

1. はじめに

実構造物中の各部材の挙動は周辺部材が相互に連動し合うため、部材単体の挙動とは強度、剛性、変形などが若干異なることが知られている。床スラブ付きRCフレームの耐震挙動には、直交梁や梁主筋の付着劣化、スラブ、接合部の劣化など様々な因子がある。立体効果や部材相互作用の効果など、部材内部の応力状態の考察が求められる因子も多く、3次元的な解析的検討が必要である。

本研究では、実験では確認することの困難な立体的変形や応力状態を把握するために、スラブ付き2層1スパンラーメンを対象として、3次元非線形FEM解析を行う。また、梁降伏先行型と柱降伏先行型の2体を解析し比較することにより、降伏型の違いがどのように解析できるかを検討する。実験結果との比較により解析手法の検証を行うとともに、内部のひび割れ進展状況、降伏の進行状況、累積ひずみエネルギーなどの検討による耐震性能評価を行う。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

千葉大学で尾崎、曾田、森田ら¹⁾により実験

が行われたRCスラブ付き2層1スパンフレームを解析対象とした。試験体は、柱、梁にSRC構造を含むが、本研究では、柱・梁ともにRC構造の2体を対象として解析を行った。NO.1試験体は柱降伏型、NO.2試験体は梁降伏型である。断面リストを表-1に、材料特性を表-2に示す。NO.1、NO.2の柱と梁は曲げ降伏が先行するように十分なせん断補強がなされている。また、スラブ筋はD6鉄筋が100ピッチでシングル配筋されている。

2.2 仮想試験体

尾崎ら¹⁾による実験試験体の他に、柱降伏型と梁降伏型の違いをより詳細に検討する目的で、NO.1試験体の梁主筋強度を1.5倍とした仮想試験体(NO.1'試験体)を想定した解析も行った。

2.3 解析モデル

本解析では、当研究室で櫻井²⁾、余、柏崎、野口ら³⁾により開発された繰り返し載荷モデルを導入した3次元FEMプログラムを使用した。コンクリートは8節点を有するアイソパラメトリックソリッド要素で表現し、コンクリートの破壊条件については、Kupferらの実験に基づく

*1 千葉大学大学院 自然科学研究科 建築専攻 工修 (正会員)

*2 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 助手 工修 (正会員)

*3 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 教授 工博 (正会員)

表-1 断面リスト

	COLUMN	BEAM
NO.1		
NO.2		
Base		

表-2 材料特性
鉄筋 コンクリート

径	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)
D6	405	564	1.91
D10	365	538	1.86
D13	355	552	1.87
D16	424	619	2.26

階	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)
2F	23.5	2.49
1F	16.7	1.93
Base	24.8	2.48

Willam-Warneke の 5 パラメータモデルを用いた。3 軸応力下でのひび割れモデルには単調載荷解析では余ら³⁾による多方向固定ひび割れモデル、繰り返し載荷解析では回転ひび割れモデルを用いた。ひび割れ直交方向の引張剛性 (Tension Stiffening 効果) については、白井式⁴⁾を用いた。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には、野口・飯塚式³⁾を用い、ひび割れ面に沿ったせん断剛性には Al-Mahaidi モデル⁵⁾を用いた。鉄筋は 2 節点線材トラス要素で表現し、応力-ひずみ曲線は、Ciampi らによって提案された修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とした。プログラムで用いられている各モデルの詳細は参考文献³⁾を参照されたい。

試験体の要素分割を図-1 に示す。試験体の対称性を利用し、試験体の半分をモデル化した。加力は 2 階柱の頂部に一定軸力 (98kN) を載荷した後、R 階および 2 階の梁中央部に水平力を載荷し、実験と同様に変位制御とした。その際、実験の変形分布をもとに、R 階と 2 階の変位比を決定した。NO.2 試験体では RF:2F=1:0.5 の変位比とし、NO.1 試験体では、はじめの 3 ループについては、RF:2F=1:0.52、後の 3 ループについては RF:2F=1:0.55 とした。境界条件は、対称面において面外方向の変位を拘束し、基礎底面において全自由度を拘束した。

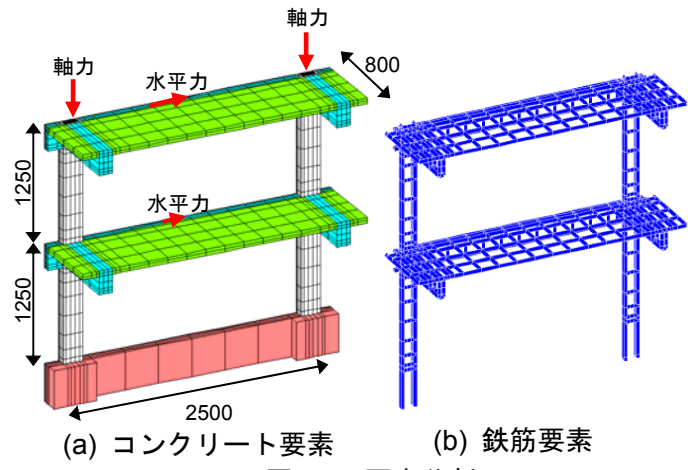


図-1 要素分割

3. 解析結果

3.1 荷重-変形関係

各試験体の層せん断力-層間変形関係を図-2、図-3 に示す。

初期剛性は、NO.1'試験体、NO.2 試験体ともに実験とよく対応した。また、NO.2 試験体では、最大耐力も実験とよく対応した。NO.1'試験体の最大耐力は、1 階は実験より低く、2 階は実験より高い結果となったが、これは R 階と 2 階の変位の比を一定に保って解析を行っているためであると考えられる。

NO.1'試験体、NO.2 試験体とも、実験では逆 S 字型の履歴ループを描いているが、解析での 1 階のループは大変形時においても紡錘型の履歴ループを描いている。この理由としては、NO.1 と NO.2 の実験では、それぞれ柱と梁降伏とそれに伴う付着破壊により逆 S 字型のループを描いているのに対し、解析では完全付着と仮定したためと考えられる。

各試験体の履歴ループ性状は、NO.1'では 3 ループ (層間変形角 1/100) までは実験と解析に良好な対応が見られる。NO.2 では、2 ループ (層間変形角 1/200) までは、実験と良好な対応を示したが、3 ループ以降は剛性が実験に比べ若干低くなり、耐力も低くなる傾向を示した。その後、NO.1', NO.2 とも、大変形時には、載荷、除荷時は良好な対応を示すものの、除荷後の再載荷時には実験のように剛性が下がり、紡錘型の履歴ループを示した。また、2 階の履歴ループに関しては、解析においても若干の逆 S 字型のル

ープ性状が見られる。

3.2 降伏順序

主筋の降伏ヒンジの発生順序を図-4、図-5に示す。NO.1 試験体は、梁主筋強度を1.5倍とした仮想試験体の降伏順序を示している。NO.1 試験体では、1階柱脚と2階梁が同時に降伏する結果となり、柱降伏型の降伏過程を示さなかった。そのため、検討には柱降伏型の降伏順序を示したNO.1'試験体の結果を用いた。

NO.1', NO.2 に共通する傾向として、解析は梁の中央部で加力を行っているため、梁に引張を受ける箇所が発生した。そのため、片側が早く降伏する結果となった。

NO.1'試験体では、正側も負側も柱脚がまず降伏した。負側はその後1階、2階柱頭が降伏したが、実験では2階梁が降伏した。

NO.2 試験体では、2階梁端部から降伏しており、梁降伏型を示した。上記に記した片側が早く降伏してしまう点を除けば、実験とよく対応している。

3.3 ひびわれ状況

最大応力時のひびわれ状況に引張ひずみコンタを重ねて図-4、図-5に示す。

変形も重ねて示したが、その変形倍率は5倍である。

NO.1'試験体（柱降伏型）では、1階の柱にひびわれが集中し、引張ひずみも集中しているのに対し、NO.2 試験体（梁降伏型）では、梁端部に引張側にひびわれが集中しているのが見られる。NO.2 試験体では、2階・

R階に均等にひびわれが分布しているのに対し、NO.1'試験体では1階部分にひびわれ、引張ひずみが集中、破壊が進行し、不安定な機構となっていることが視覚的にも確認できた。また、柱降伏型では、接合部内にも多くのひびわれが生じているのに対し、梁降伏型では、それほど多くのひびわれが入っておらず、引張ひずみも柱降伏型と比較すると小さくなっている。

NO.1'試験体の1階柱では、引張域だけでなく圧縮域にも引張ひびわれが生じている。これは、NO.1'試験体では1階柱に損傷が集中し、鉄筋の塑性ひずみが大きくなり、逆載荷後も塑性ひずみが残留したためと考えられる。また、完全付着を仮定しているため、コンクリートのひびわれが鉄筋の残留ひずみによって開いたままになっていると考えられる。

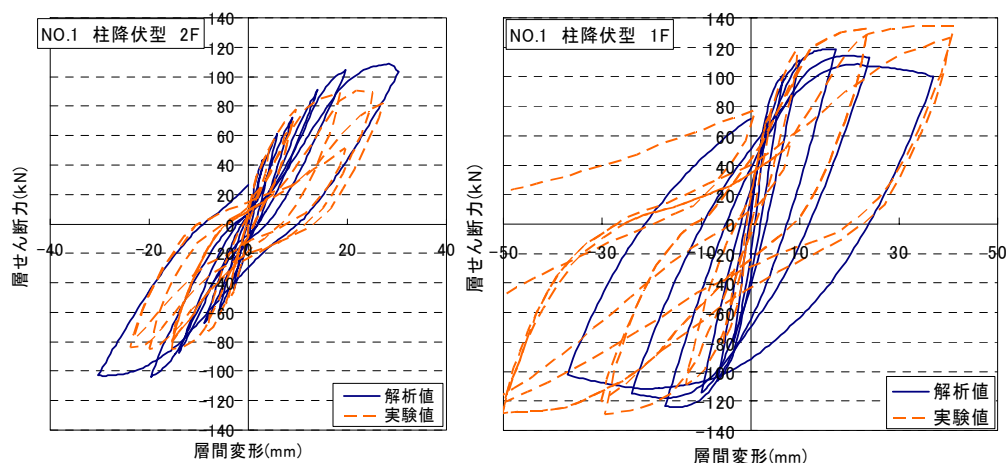


図-2 NO.1'試験体（柱降伏型）層せん断力－層間変形関係

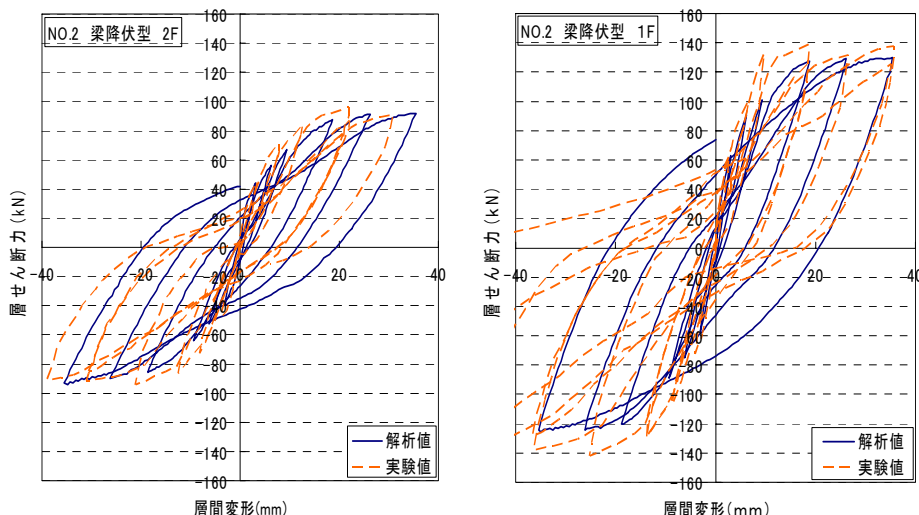


図-3 NO.2（梁降伏型）層せん断力－層間変形関係

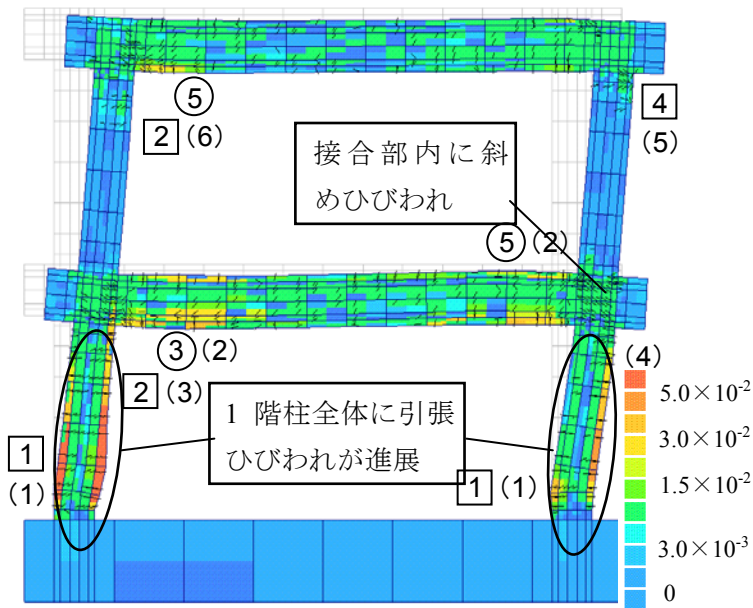


図-4 NO.1'試験体（柱降伏型）降伏順序，ひびわれ状況，引張ひずみコンター（最大耐力時，変形 5 倍）

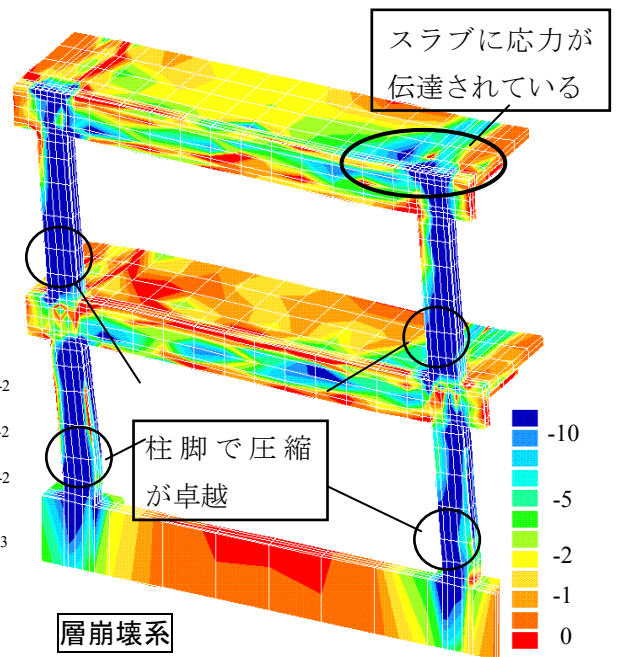


図-6 NO.1'試験体（柱降伏型）最小主応力（最大耐力時，変形 5 倍）

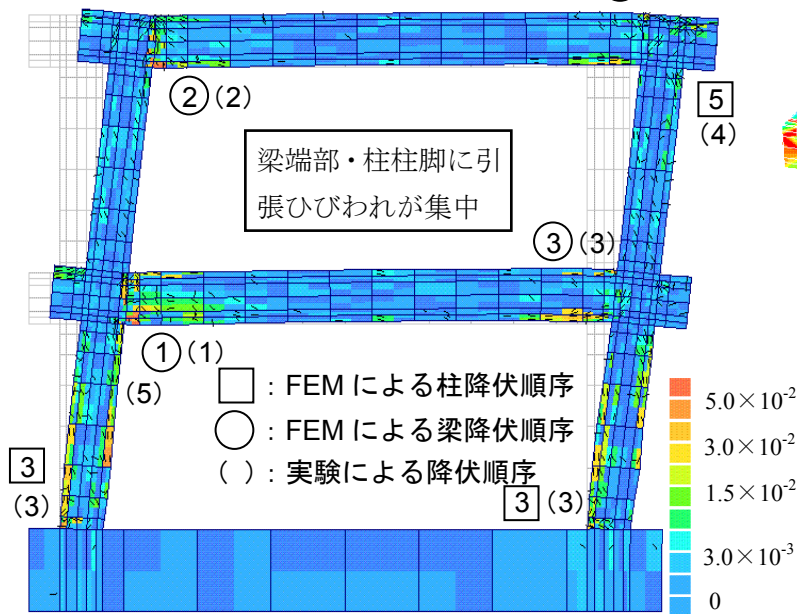


図-5 NO.2（梁降伏型）降伏順序，ひびわれ状況，引張ひずみコンター（最大耐力時，変形 5 倍）

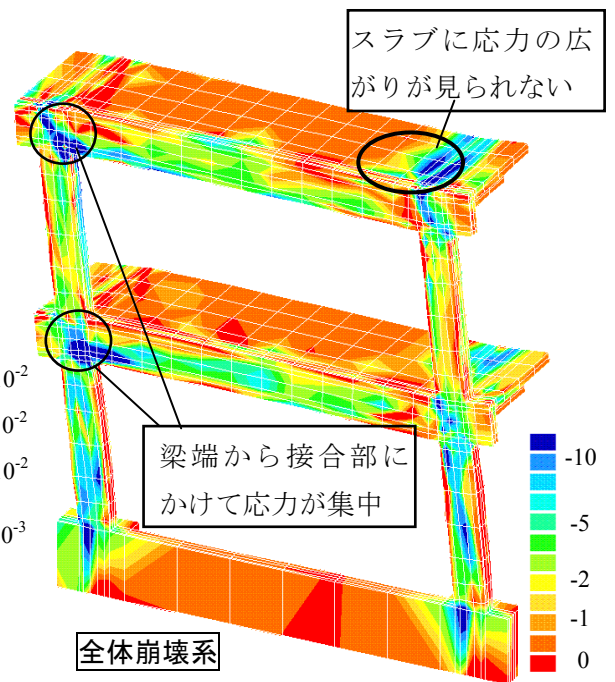


図-7 NO.2（梁降伏型）最小主応力（最大耐力時，変形 5 倍）

3.4 最小主応力

図-6，図-7 に最大耐力時の NO.1'試験体と NO.2 試験体の最小主応力分布を示す。全体変形も重ねて示しているが，変形倍率は 5 倍である。

NO.1'柱降伏型試験体では，柱に圧縮応力が集中しており，柱端部で脆性的な変形が起きている。つまり大きな塑性変形が集中して層崩壊機構を形成していると考えられる。NO.2 梁降伏型試験体では，圧縮側の梁端部と柱端部に応力

の集中が見られるが，NO.1'試験体ほど大きな力が集中していない。これらのことから，梁降伏型の特徴である全体崩壊機構を構成していると考えられる。

スラブでの応力の広がり，NO.1'試験体の方が顕著であり，NO.2 試験体ではそれほどスラブには広がらない結果となった。

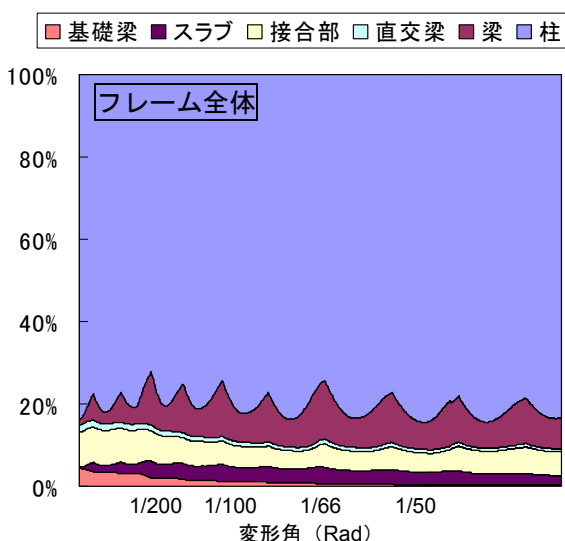
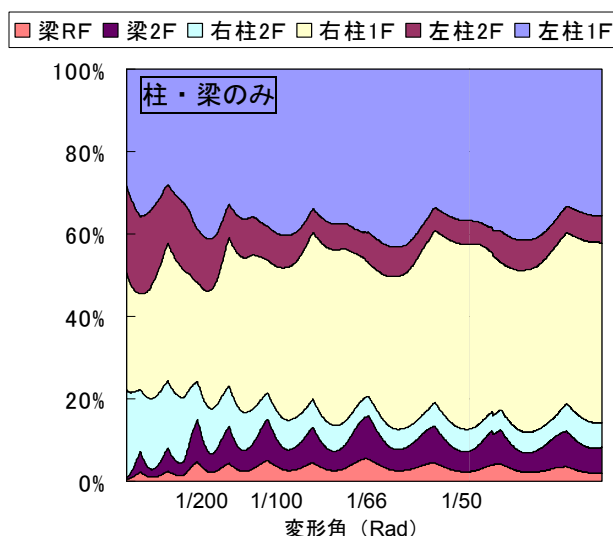


図-8 NO.1'試験体累積吸収エネルギー

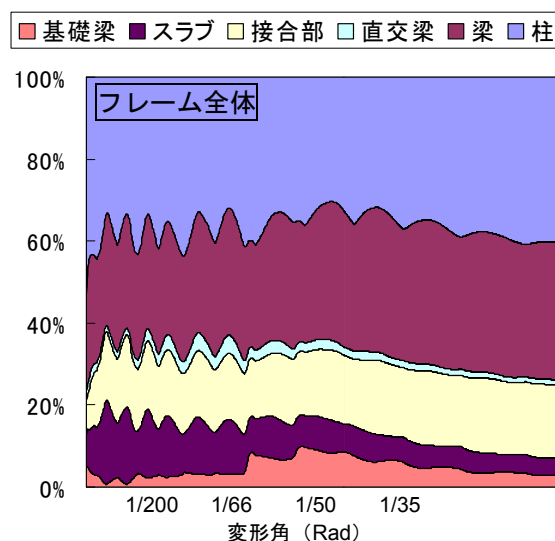
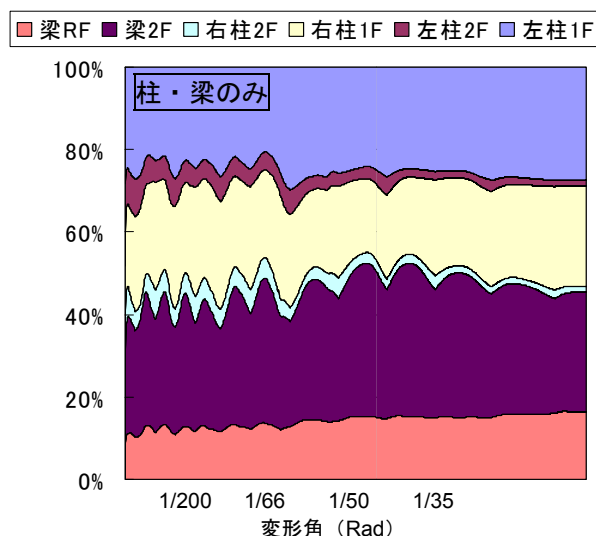


図-9 NO.2 累積吸収エネルギー

また、梁中央部で载荷しているため、梁中央部に局所的な圧縮応力が生じている。

3.5 累積吸収ひずみエネルギー

部材ごとに累積吸収ひずみエネルギーを算出し、その分布を図-8、図-9に示す。上のグラフは柱と梁だけを抜き出して比較した結果であり、下のグラフはフレーム全体の部材の割合を示している。

どの図もグラフが波打っているのは、逆载荷後、部材内の弾性エネルギーがよりエネルギー集中する部材に移動したためと考えられる。

NO.1'試験体では、エネルギーの80%以上が柱に集中しているが、NO.2試験体では、柱と梁が均等にエネルギーを負担している。また、NO.2試験体では梁だけでなく、スラブや接合部もエ

ネルギーを吸収していることがわかった。特に、接合部では、NO.1'試験体のエネルギー吸収率の倍以上をNO.2が負担している結果となった。

また、1階のエネルギー負担率（1階柱、2階梁、スラブの和）が大きくなり、2階の負担率（2階柱、R階梁、スラブの和）は総じて大きくないが、試験体、部材によって1階と2階の負担割合は異なる結果となった。NO.2試験体では、2階の梁の負担率が大きくなり、またNO.1'試験体では、柱における2階の負担率が大きくなっているため、負担割合は降伏型の影響を受けていると考えられる。また、部材としては、柱よりも梁の方が2階の負担率が高い結果となった。

3.6 圧壊状況

NO.1'試験体、NO.2試験体の最大変形時の圧

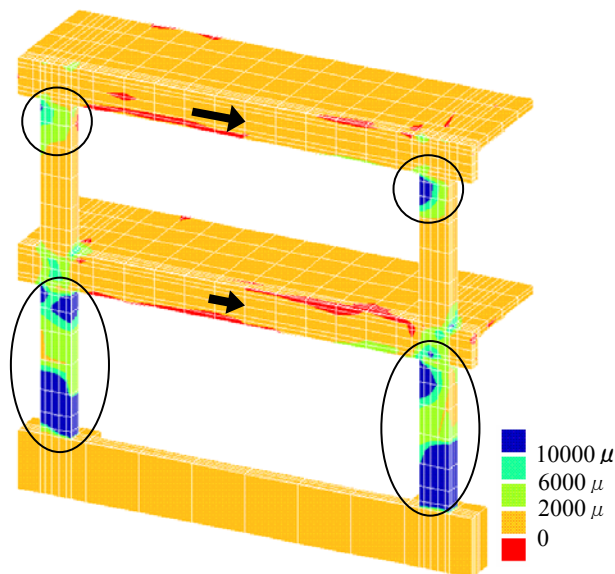


図-10 NO.1'試験体（柱降伏型）圧壊状況

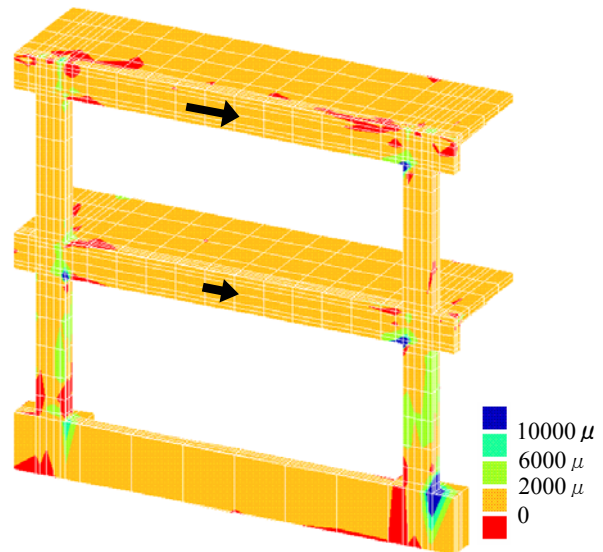


図-11 NO.2（梁降伏型）圧壊状況

壊状況を図-10，図-11 に示す。

NO.1'柱降伏型試験体では，最大耐力時から1階柱下部全体に圧壊域が広がり，最大変形時には1階柱上部にも圧壊域が広がった。NO.2 梁降伏型試験体では，最大耐力時にはほとんど圧壊域見られないが，最大変形時には2階梁端部，R階梁端部，1階柱脚部に圧壊域が広がった。

しかし，NO.1'柱降伏型試験体と NO.2 梁降伏型試験体を比較すると，NO.2 試験体の圧壊域は小さく，破壊が進んでいないことがわかった。

4. まとめ

梁偏心接合の有無と直交梁，スラブの有無を変動因子とした立体フレームのパラメータ解析を行い，以下の知見を得た。

- (1) 最大耐力はやや低めであったが，初期剛性，破壊形式は概ね実験と良好に対応した。
- (2) 柱降伏型試験体では，柱降伏型の降伏過程を示さなかったが，柱降伏型仮想試験体（NO.1'試験体）では，柱降伏過程を示し，層崩壊機構を形成した。梁降伏型試験体では，梁降伏型を示し，全体崩壊機構を形成した。
- (3) 梁降伏型と柱降伏型の応力分布，変形の違いが3次元的に表現できたことに加え，ひびわれ進展状況や累積吸収ひずみエネルギーの検討が

ら，柱降伏型の柱への損傷の集中を，定量的，視覚的に検討することができた。

参考文献

- 1) 曾田五月也，川崎清彦，尾崎昌凡，森田耕次ほか：柱 SRC・梁 RC のスラブ付き2層複合ラーメン構造の力学的性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.2291-2296，1982
- 2) 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，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.139-144，2002.7
- 3) 余勇，柏崎隆志，野口博：RC 構造部材の3次元繰返し載荷時の FEM 解析プログラムの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.67-70，2004.9
- 4) 佐藤稔雄，白井伸明ほか：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1615-1618，1978.9
- 5) Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, No.79-1, Dept. of Structural Engrg, Cornell Univ., Jan.1979 No.5, pp.32-100, Sep./Oct.1980