

論文 スラブ付RC柱・梁接合部の3次元繰返しFEM解析

堀部 明久^{*1}・余 勇^{*2}・柏崎 隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨：本研究は、繰返し載荷時の3次元FEM解析プログラムを用い、プログラムの解析精度の確認のため、繰返し荷重を受けるスラブ付RC柱・梁接合部試験体を対象に検証解析を行った。鉄筋とコンクリート間に付着すべりを考慮した場合と完全付着を仮定した場合を比較すると、付着すべりを考慮した解析では、エネルギー吸収能力の低い逆S字型の履歴ループを表現できた。また、解析結果の構造性能評価には累積吸収ひずみエネルギーに関する評価を検討項目に加えた。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱・梁接合部、FEM、ひずみエネルギー、付着すべり

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)造柱・梁接合部が地震時を想定した正負繰返し荷重を受ける場合、履歴ループのエネルギー吸収能力は破壊形式、直交梁の有無、スラブの有無によって大きく変わってくる。さらに梁主筋の付着劣化は、履歴ループの逆S字化の原因と考えられる。これらの特徴は、既往の数多くの実験によって確認されてきたが、有限要素法(FEM)を用いた非線形解析では、繰返し載荷時の材料挙動のモデル化が困難なために単調載荷時の解析に比べると解析例は少ないのが現状である。また多くの実験から、RC部材の変形性能は、荷重履歴によって大きく変化することが確認され、部材の正負繰返し載荷実験では、一定変位における載荷でも、繰返し回数の増加とともに剛性や強度が低下していくことが報告されている。そこで、エネルギーの観点から構造物の耐震安全性を評価しようとする試みが最近盛んに行われている^{1),2)}。

本研究では、当研究室で開発した繰返し載荷時の3次元FEM解析プログラムを用い、プログラムの解析精度の確認のため、繰返し荷重を受けるスラブ付RC柱・梁接合部試験体を対象に検証

解析を行った。また、解析結果の構造性能評価として検討項目に累積吸収ひずみエネルギーに関する評価を加えた。

2. 解析モデル

2.1 コンクリート要素

本解析では、櫻井・柏崎・野口³⁾らにより開発された繰返し載荷モデルを導入した。図-1に、応力ひずみ関係において、圧縮・引張両応力域における履歴と、圧縮～引張間の相互関係の履歴を示す。付着によるひび割れ直交方向の引張剛性(Tension Stiffening 効果)については、白井らによる式⁴⁾を用いた。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Willam-Warnkeの5パラメータモデル⁵⁾を仮定した。

3軸応力下でのひび割れモデルは、固定ひび割れモデルと回転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し、複数のひび割れの相互関係を表現できない。一方、固定ひび割れモデルに

*1 ムトーテクノサービス(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)

は直交固定ひび割れモデルなどがあり、直交固定ひび割れモデルは単一のひび割れ座標系（直交3方向）により表現され、1本目のひび割れに直交することを条件に2, 3本目のひび割れの発生を許容する。そのため、複数のひび割れの相互関係を表現できる。したがって、本研究では直交固定ひび割れモデルを用いた。

ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減は、野口・飯塚式³⁾を用い、ひび割れ面に沿ったせん断剛性はAl-Mahaidiモデル⁶⁾を用いた。

また、解析対象試験体でのひび割れ箇所を予測した要素分割とはしておらず、収斂の不安定さを避ける意味からもクラックリンク要素を用いたひび割れの開きは表現していない。

2.2 鉄筋要素

鉄筋の応力ひずみ関係については、**図-2**に示すように、Ciampi⁷⁾らが提案した修正Menegotto-Pintoモデルを用いた。

2.3 付着要素

コンクリート、鉄筋間の付着の応力-すべり関係については、繰り返し履歴モデルとして、**図-3**に示すように、森田・角モデル⁵⁾を導入した。最大付着応力 τ_{max} はRC 靱性指針⁸⁾により算出した。

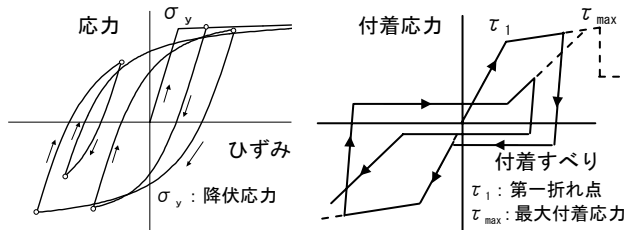


図-2 鉄筋の履歴ルール 図-3 付着の履歴ルール

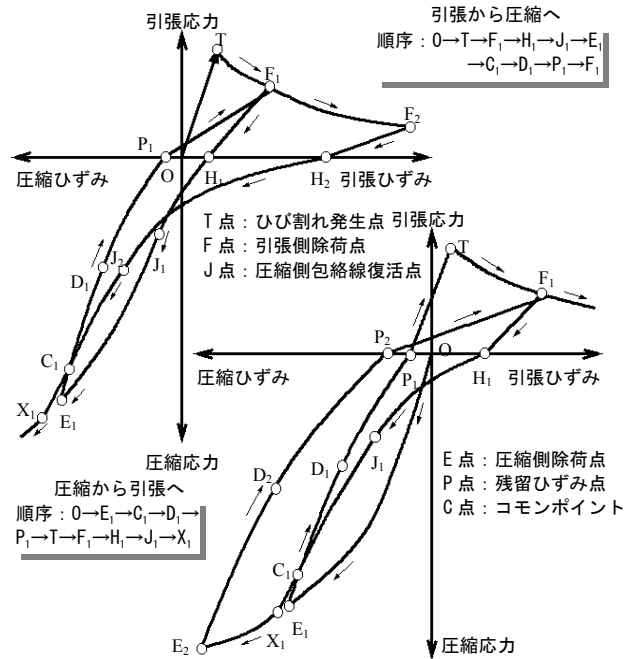


図-1 コンクリートの圧縮～引張間の履歴ルール

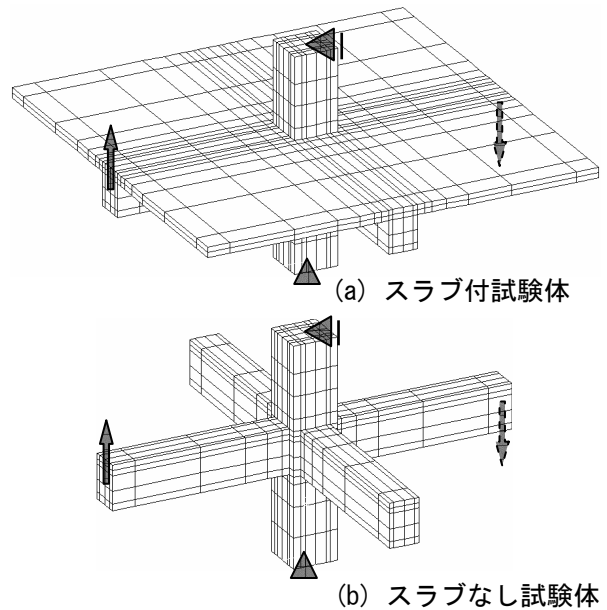


図-4 要素分割図と境界条件

表-1 試験体諸元

試験体名	SU60	SU10	SU20	SU20N	BB20								
柱	断面寸法(mm ²)												
	300×300												
	主筋	16-D10	16-D10	8-D13	12-D10	8-D13							
	帯筋	4-D6@50	4-D6@50	2-D6@50	4-D6@50	2-D6@50							
梁	断面寸法(mm ²)												
	200×300												
	主筋	3-D13	3-D13	4-D13	3-D13	7-D13							
	あばら筋	2-D6@50	2-D6@50	2-D6@80	2-D6@50	2-D6@80							
接合部	帯筋	4-D6@34	4-D6@34	2-D6@37.5	4-D6@23.3	2-D6@37.5							
スラブ	スラブ厚(mm)												
	70												
	スラブ筋	D6-@200	D6-@200	D6-@200	D6-@140								
コンクリート材料特性(下柱, 梁, スラブ)													
割線係数 (10 ³ N/mm)	2.55	2.27	1.87	2.51	1.87								
圧縮強度 (N/mm ²)	23.4	21.6	17.8	34.5	17.8								
圧縮強度時ひずみ(%)	0.24	0.26	0.22	0.25	0.22								
引張強度(N/mm ²)	2.36	2.57	1.39	2.01	1.39								
鉄筋材料特性													
鉄筋種類	D6	D10	D13	D6	D10	D13	D6	D10	D13	D6	D13		
降伏強度(N/mm ²)	380	375	394	380	375	394	333	352	342	399	363	333	352

3. スラブ付 RC 柱・梁接合部試験体の解析

3.1 解析概要

本解析で対象とした試験体は、鈴木ら⁹⁾によって行われたスラブ付 RC 柱・梁接合部試験体（縮尺約 1/2）のうち、水平 1 方向加力を行ったスラブ付試験体 SU シリーズ 4 体 (SU60, SU10, SU20, SU20N)、水平 2 方向加力を行ったスラブなし試験体 1 体 (BB20) である (実験では 2 方向加力を行った試験体であるが、解析では水平 1 方向加力を行い BB20 の実験結果と比較した)。BB20 は SU20 のスラブを除き、その代わりにスラブの鉄筋の効果を考慮して、梁の上端筋量を SU20 の梁の上端筋と全スラブ筋の断面積の和とほぼ等量になるように配筋されたものである。

試験体名の数字は柱軸力 (kg/cm²) を表し、SU20N は SU20 と比べ柱、梁、接合部の補強筋を増やしている。

表-1 に試験体諸元、図-4 (a) にスラブ付試験体、図-4 (b) にスラブなし試験体の要素分割図と境界条件を示す。試験体の柱反曲点距離は 1470mm、梁反曲点距離は 2700mm である。載荷方法については、一定柱軸力載荷後、実験では柱頭に水平力が加力されたが、解析では梁端部に逆対称の鉛直方向荷重を作用させた。また、直交梁の端部は自由端とした。破壊形式に関しては、各試験体とも梁の曲げ破壊が先行した。

載荷パスに関しては解析時間の都合上、実験と異なり、各変位 (7,16,32mm) 1 サイクルずつ載荷を行い、最終サイクル (64mm) で押し切ることにした。また、実験では P-δ 効果の影響を考慮しているがその影響はわずかであったので、解析では無視した。

3.2 解析結果

3.2.1 層せん断力-層間変位関係

図-5 に各試験体の層せん断力-層間変位関係を示す。更に、接合部内梁主筋を完全付着とした場合と付着すべりを考慮した場合との履歴曲線の違いを比較した。

各試験体とも梁主筋（付着を考慮してある場合は接合部付近以外の箇所の梁主筋）、またス

ラブ筋が完全付着であるなどが原因のため初期剛性が実験よりも高い。また、付着を考慮した解析では、付着特性が多直線モデルなので収斂計算をする上で連続性に欠けるため、最終サイクルまで押し切れず、また 3 サイクル目途中で解析が止まってしまう試験体もあった。

柱軸力の大きい試験体 SU60 の実験では、層間変位 32mm 強からスリップ性状を示した。これに対し解析では、完全付着の場合、最終サイクルまでスリップ性状は見られなかったが、付着すべりを考慮した解析では、完全付着と比較して層間変位 32mm ぐらいからスリップ性状を表現することができた。

柱軸力の低い試験体 SU10 の実験では、最大耐力の 5 割程度の層せん断力から急激に剛性が低下し、層間変位 32mm で最大耐力に達し、層間変位 64mm の正方向加力でも最大耐力を維持している。解析の最大耐力は、実験値と比べ 2 割ほど高い。

試験体 SU20 の実験では、SU10 と同様に最大耐力の 5 割程度の層せん断力から急激に剛性が低下している。SU20 の解析では完全付着、付着考慮ともに、最大耐力の 5 割程度の層せん断力から急激に剛性が低下し、実験と良い対応を示した。最大耐力に関しては、完全付着で層間変位が約 54mm のところで最大耐力を維持できなくなって耐力が低下してしまうが、3 サイクル目（層間変位 32mm）で向かえる最大耐力は良い対応を示していると考えられる。

試験体 SU20 の横補強筋を増やした試験体 SU20N の実験値は、SU20 の実験値と比べ層間変位 16mm のときの耐力は SU20N の方が高く、層間変位 32mm を超えてから、スリップ性状を示すものの、その履歴面積は大きい。また、補強筋の少ない SU20 に比べると、全てのサイクルにおいて剛性、耐力とも高くなっている。一方、SU20N の実験値は、完全付着と比べると付着すべりを考慮した試験体の方が、前述の実験結果と良く対応しているといえる。

スラブなしの試験体 BB20 の実験結果は前述した理由により、SU20 と似たような挙動をしている。また、解析値も若干の違いはあるものの両者の挙動は類似しているといえる。

付着すべりを考慮した解析では、各試験体とも第3サイクルピーク付近で、完全付着の解析と比べ、除荷前で剛性が低く、除荷後に剛性が高くなり、ピーク付近での履歴曲線が膨らみ実験の履歴曲線に近くなった。これは第3サイクルあたりから付着要素で付着応力すべり関係の第一折れ点を越えて第2剛性へ移行し、付着の剛性が低下したことが原因として挙げられる。

3.2.2 累積吸収ひずみエネルギーによる評価

魚本ら¹⁾の研究では、曲げ破壊する RC 単純梁を対象に、破壊時までの吸収エネルギーを求め、それを加算した累積吸収エネルギーを算出した。その結果、載荷変位及び載荷履歴の相違にも関わらずほぼ同一の累積吸収エネルギー量で破壊し、破壊形態によっては累積吸収エネルギー量により破壊時までの載荷回数が推定できる可能性が示された。また、鈴木ら²⁾の研究では、部材で累積吸収されるエネルギー量を指標として損傷度を評価

する手法を提案し、さらにそれを RC 構造の信頼性の尺度とし、耐震設計への適用を試みている。

これらの研究は、梁や柱を対象とし、累積吸収ひずみエネルギーをもとに RC 部材の損傷に

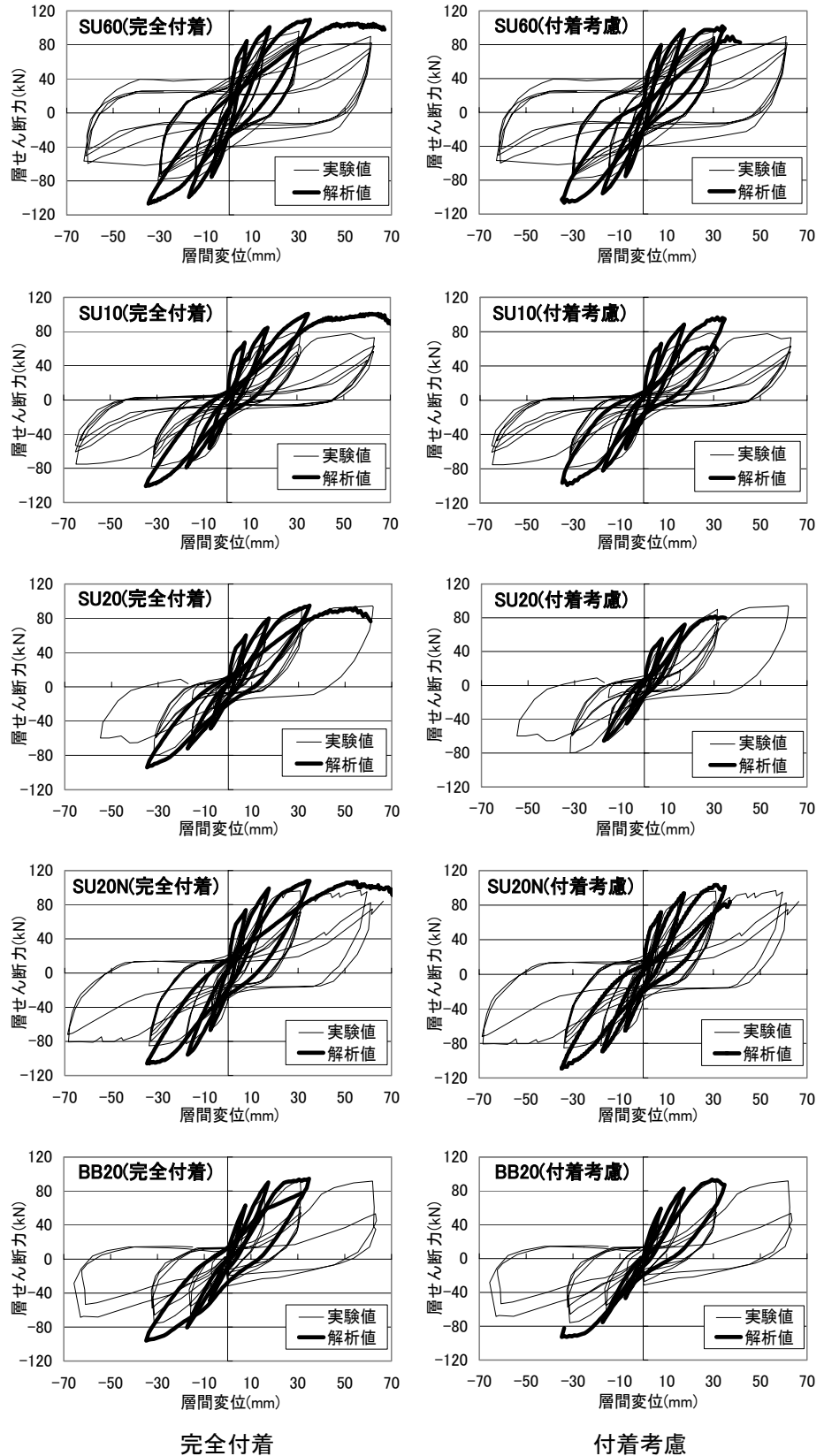


図-5 試験体の層せん断力-層間変位関係

ついて研究したものであるが、接合部についてもせん断変形による損傷が累積されると予想されるため、本解析では、FEM 解析の特色を活かし、接合部の損傷についても分析する。

累積吸収ひずみエネルギーを損傷度に対応する量として、RC 構造物の終局状態に至るまでの詳細な損傷進展状況を解析的に把握するため、また性能評価にも役立てるために、各部材のコンクリート要素、鉄筋要素、両者を重ね合わせた鉄筋コンクリート (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、視覚的評価を行った。累積吸収ひずみエネルギーの定義は以下の式 (1) による。

$$\Delta U = \int_V \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_j} \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} \cdot dV \quad (1)$$

$$U = \sum \Delta U$$

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

コンクリート要素のひずみエネルギーは、各積分点ごとに計算を行う。RC としての累積吸収ひずみエネルギーは、鉄筋要素と付着要素のエネルギーをコンクリート要素のエネルギーへ加えることにより、定量的に求め、更にコンター

図を用いて視覚的評価を行った。

図-6 に、高軸力でスラブ付きの試験体 SU60、スラブなし試験体 BB20 の完全付着の場合と付着すべりを考慮した場合の累積吸収ひずみエネルギーの部材分担率を示す。ここで、部材分担率とは、柱、梁、接合部、スラブ(スラブ付きの場合)それぞれでコンクリート、鉄筋、付着(付着考慮の場合)のエネルギーを合計し、試験体全体のエネルギーを 100%としたときの各部材のエネルギーの分担割合と定義する。

試験体 SU60 は、完全付着の試験体よりも付着を考慮した試験体の方が、試験体全体のエネルギーに占める接合部の累積吸収ひずみエネルギーの割合が大きい。累積吸収ひずみエネルギーを RC 部材の損傷度に対応する量と考えれば、これは接合部内に付着要素を入れたことにより、完全付着のときよりも、損傷が大きくなったと考えられる。繰返し荷重による付着要素の吸収エネルギーが大きくなることにより、接合部の損傷はより大きくなるといえる。SU60 の柱とスラブは、サイクルが多くなるほど、全体の損傷に占める割合が小さくなり、梁の累積吸収ひずみエネルギーの占める割合が、破壊形式からも明らかのように大きくなっていく。

スラブなしの試験体である試験体 BB20 は、

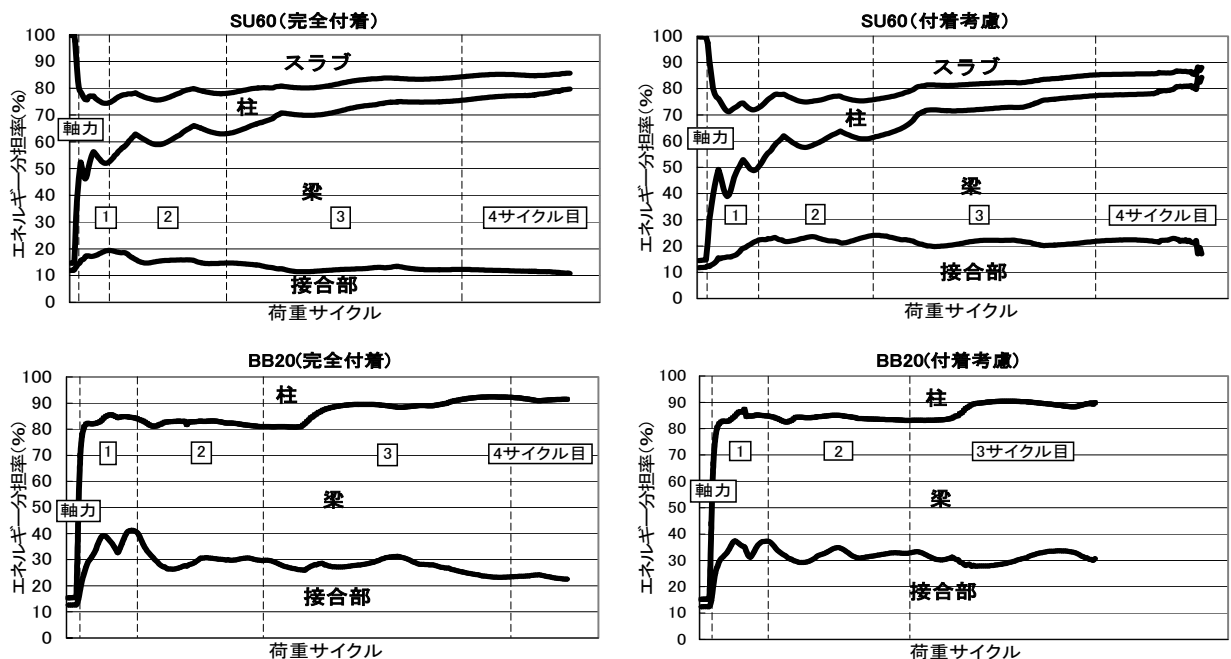


図-6 累積吸収ひずみエネルギーの部材分担率

SU20のスラブを除き、その代わりにスラブの鉄筋の効果を考慮して梁主筋の断面積を大きくするために、梁主筋本数を増やした試験体である。その結果、付着面積が大きく付着応力も弾性域に留まったために、エネルギーの割合にさほど差が見られなかったと考えられる。

図-7 (a)に試験体 SU60(完全付着)の4サイクル目(層間変形 32mm)における累積吸収ひずみエネルギーを、図-7 (b)に試験体 BB20(完全付着)の4サイクル目(層間変形 32mm)における累積吸収ひずみエネルギー(梁主筋位置での鉛直断面)を示す。破壊形式が梁曲げ先行型なので、RCとしてのエネルギーは、繰返し载荷によるエネルギーの集中が梁上、下端筋近辺に多くみられ、各試験体とも梁付け根の梁主筋に大きな損傷が見られる。また、スラブにも累積吸収ひずみエネルギーによる損傷を確認することができた。

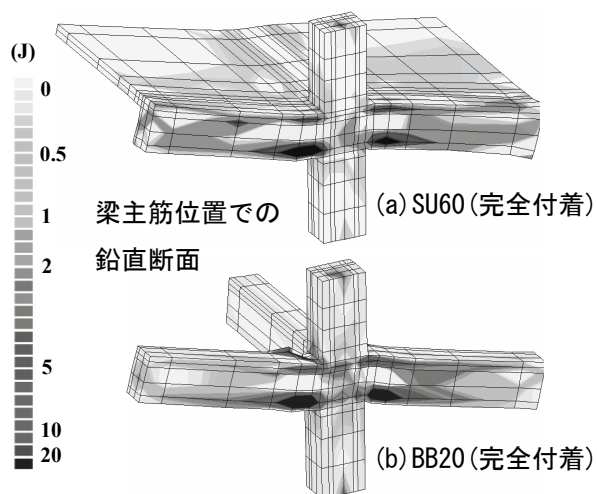


図-7 4サイクル目(層間変形 32mm)における累積吸収ひずみエネルギー

4. まとめ

開発した3次元FEM解析プログラムを用いて解析を行った結果、次のことがわかった。

- (1) 付着要素を導入することで履歴特性にスリップ形状が表現でき、より実験に近い挙動を表現することができた。
- (2) 累積吸収ひずみエネルギーをRC部材の損傷度に対応する量として、定量的、視覚的に検討することができた。

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) 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, 土木学会論文集, No.460/V-18, pp.85-91, 1993.2.
- 2) 鈴木基行, 赤倉康寛, 足立英明, 尾坂芳夫: RC構造の損傷度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.121-129, 1994.5
- 3) 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
- 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(その6), (その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1615-1618, 1978.9.
- 5) 内田和弘, 野口博: 梁貫通型接合部を有する柱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, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, 207-214, 1998.2.
- 6) 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.
- 7) Ciampi, V. and Paolo, E.: Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitations, No.UCB/EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Nov.1982.
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 1997
- 9) 鈴木紀雄, ヨシ K. ハリム, 小谷俊介, 青山博之: 鉄筋コンクリート造スラブ付立体柱梁接合部の挙動に関する研究, 東京大学工学部建築学科青山研究室, 1984