

# 論文 2方向繰り返し水平力を受けるRC立体柱・梁接合部の3次元非線形FEM解析

日下部 桃子\*1・余 勇\*2・柏崎 隆志\*3・野口 博\*4

**要旨**：2方向繰り返し荷重下でのRC立体柱・梁接合部を対象に，载荷パターン及び形状をパラメータとして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性状，内部破壊性状（モード），変形，応力状況の検討を行い，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，立体柱・梁接合部の柱，梁，接合部のエネルギー吸収状況の検討を行った。

**キーワード**：RC，立体柱・梁接合部，FEM，2方向加力，繰り返し荷重

## 1. はじめに

実際の地震挙動では，建物内の接合部への地震動は多方向から入力する。1方向加力や2方向同時加力（45度方向加力）よりも実挙動に近い8の字型や田字型の加力下での実験が既往のRC柱・梁接合部の実験的研究でも近年行われている。しかし，解析的研究では繰り返し载荷での3次元解析を行う必要があり，また，そのモデル化の複雑さから，まだ数少ないのが現状である。

本研究では，当研究室で開発されたプログラムを用い，田字型の加力によるRC立体柱・梁接合部の既往の実験試験体を対象として，载荷パターン及び形状をパラメータとして3次元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。解析結果から履歴性状，破壊性状（モード），変形，応力状況の検討を行い，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。

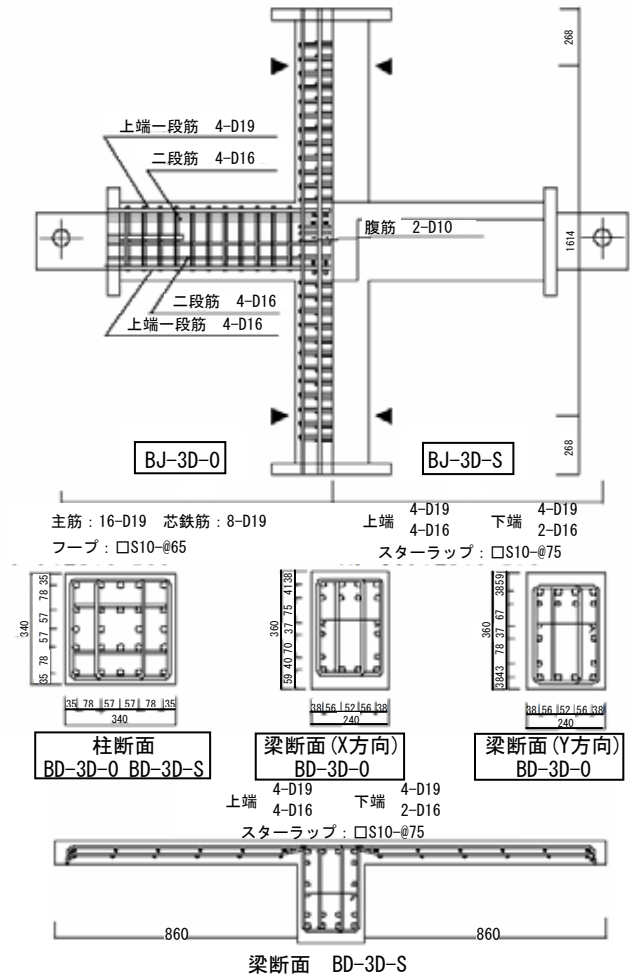


図-1 試験体の形状および配筋

## 2. RC立体柱・梁接合部試験体の解析

### 2.1 解析対象試験体概要

中野ら<sup>1), 2)</sup>によって実験が行われた試験体を解析対象とした。試験体は高強度コンクリート

を使用した内柱・梁接合部に，スラブの有無を

\*1 新宿区役所 (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)

実験変数として高軸力 ( $\eta \geq 0.3$ ) を作用させた状態で、2方向からの田字型加力を行ったものである。BJ-3D-0 試験体はスラブ無し、BJ-3D-S 試験体はスラブ付き（スラブの厚さ  $t=83\text{mm}$ ）である。BJ-3D-S 試験体のスラブ筋の曲げ耐力への寄与を考慮して、BJ-3D-0 試験体ではスラブ筋相当の上端筋（2段目）に4-D16（BJ-3D-S 試験体では2-D16）が配筋されている。試験体の形状および配筋を図-1に示す。

軸力 2940kN（軸力比、BJ-3D-0 試験体：0.59、BJ-3D-S 試験体：0.41）を柱頭に載荷した後、梁両端部にせん断力を加力する。荷重パターンは田字型とし、両方向共に変形角  $R=1/250, 1/100, 1/50\text{rad}$  および  $1/25\text{rad}$  で正負繰り返し、その後は両方向同時に  $R=1/15\text{rad}$  まで単調荷重とする。

## 2.2 解析方法

本解析では、当研究室で開発され、櫻井、柏崎、野口<sup>3)</sup>らにより開発された繰り返し荷重モデルを導入した3次元プログラムを使用した。

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<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>を仮定した。3軸応力下でのひび割れモデルには非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には、野口・飯塚式<sup>3)</sup>を用い、ひび割れ面に沿ったせん断剛性にはAl-Mahaidiモデル<sup>6)</sup>を用いた。鉄筋モデルにはバイリニアモデルを用いた。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、森田・角モデル<sup>7)</sup>を導入した。プログラムで用いられている各モデルの詳細は文献<sup>8)</sup>を参考にされたい。

解析で使用した材料特性を表-1に示す。ボンドリックは鉄筋の付着が厳しくなる梁主筋に設置し、柱主筋、横補強筋、スラブ筋は完全付着とした。梁主筋の最大付着応力  $\tau_{\max}$  は鉄筋コン

表-1 材料特性

コンクリート					
試験体名	BJ-3D-0	BJ-3D-S			
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	41.9	60.4			
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.3	4.3			
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$2.9 \times 10^4$	$3.3 \times 10^4$			
鉄筋					
鉄筋種類	降伏点強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
D19(柱主筋, 梁主筋)	373.4	579.1			
D16(梁主筋)	378.2	609.5			
D10(腹筋, スラブ筋)	410.0	563.8			
S10(補強筋)	963.3	1090.7			
ボンドリック					
試験体名	BJ-3D-0	BJ-3D-S			
第1剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	392.0	490.0			
第2剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	39.2	49.0			
		第1折れ点 (N/mm <sup>2</sup> )		第2折れ点 (N/mm <sup>2</sup> )	
試験体名		BJ-3D-0	BJ-3D-S	BJ-3D-0	BJ-3D-S
梁主筋	上端筋	2.8	3.1	5.6	6.2
	下端筋	3.3	3.4	6.5	6.9
接合部内梁主筋	上端筋	5.6	6.2	11.2	12.4
	下端筋	6.5	6.9	13.0	13.8

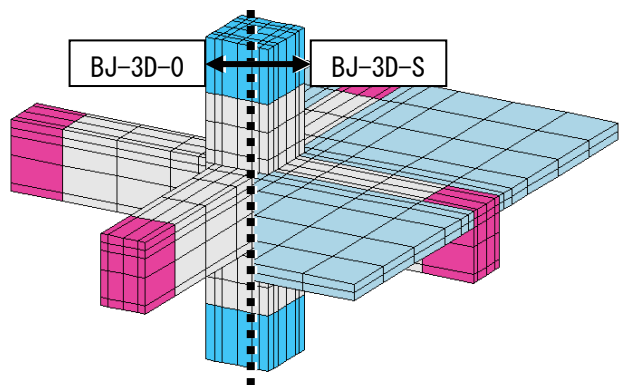


図-2 要素分割

クリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説<sup>9)</sup>（6.8節：柱および梁の付着強度）により算出し、接合部内では軸力を考慮して、 $\tau_{\max}$  を2倍に設定した。さらに、解析の収斂の不安定さを考慮して、第1剛性を低く設定した。

解析での要素分割を図-2に示す。実験に忠実に要素分割を行うと節点数および要素数がかかなり多くなり、解析に長時間を要し、実用的でない。そこで、柱主筋および梁主筋は2、3本を1本にまとめ、降伏曲げモーメント  $M_y$  が等しくなるように設定した。また、柱端部のスタブ部分および梁端部の加力部分は応力集中を考慮して、強度を上げて補強した。荷重方法については、実験と同様に、まず柱頭に一定軸力を荷重した

後、定軸力下で梁端部に逆対称の鉛直方向荷重を作用させることによってせん断力を载荷した。加力パスは図-3に示すような田字型载荷に加えて、さらに、解析では1方向加力で正負繰り返し载荷解析を行い、载荷パターンの違いによる比較を行った。解析での境界条件を図-4に示す。繰り返し载荷解析では変形角  $R=1/250, 1/100, 1/50\text{rad}$ までそれぞれ2サイクルずつ载荷した。このとき、境界条件は柱上端部は中央1点に水平2方向(X・Y方向)の変形を拘束し、柱下端部は中央1点に水平2方向および鉛直方向(X・Y・Z方向)の変形を拘束した。加力をしていない梁端部は、1方向ではフリーとし、田字型载荷では水平2方向および鉛直方向(X・Y・Z方向)の変形を拘束した。

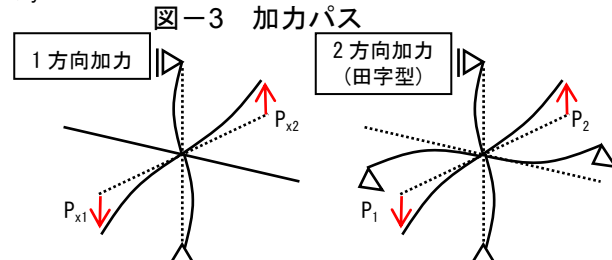
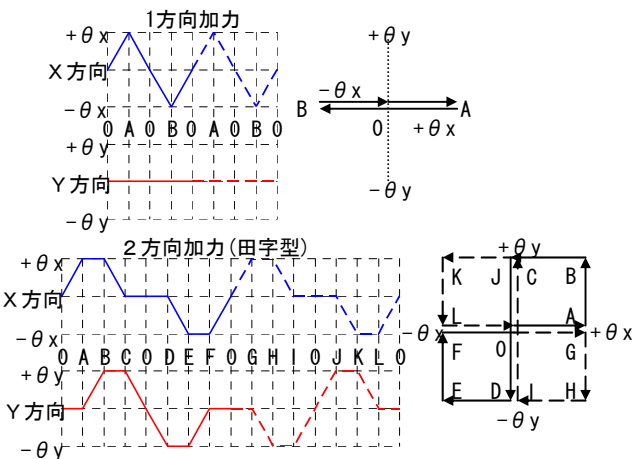


図-4 境界条件

### 3 解析結果

#### 3.1 荷重-変形関係

図-5にBJ-3D-0試験体およびBJ-3D-S試験体で、それぞれ1方向加力と田字型加力の各载荷パターンでのX方向における荷重-変形関係及び梁曲げ降伏時のせん断力の計算値を示す。実験値はそれぞれ田字型加力の結果である。解析

では解が安定しないため、3サイクル目付近で解析が止まる試験体があった。特に田字型加力の解析では多方向入力による複雑な応力状態が生まれ、塑性域に達すると解の収斂が難しくなる。両試験体とも初期剛性が2割程高い結果となった。この理由としては局部的な曲げひび割れを考慮していないことや、スラブに付着を考慮し

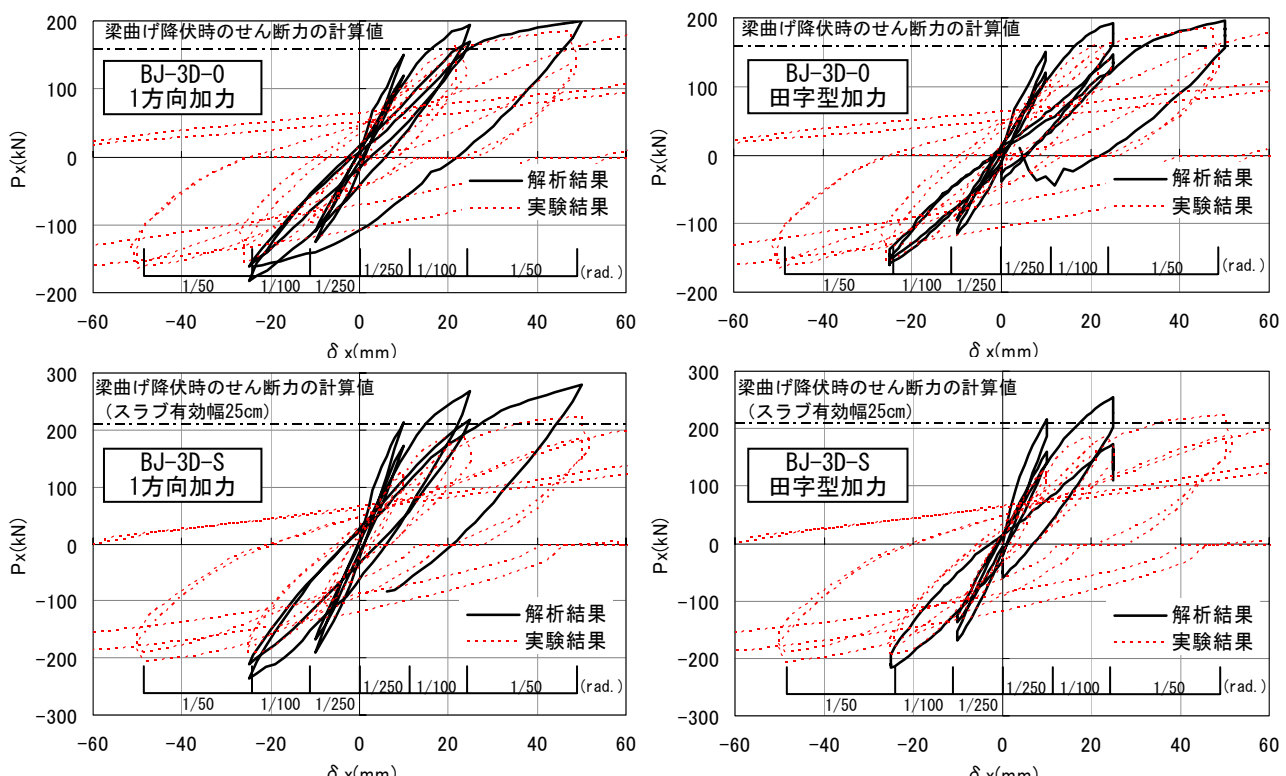


図-5 荷重-変形関係

ていないことが考えられる。初期剛性が高い結果、変位制御で解析を行っているため、耐力も高い値を示した。第2サイクル目からは剛性、耐力共に良好な対応を示した。

1方向加力と田字型加力共に  $R=1/100\text{rad}$  以降、剛性が徐々に軟化し、履歴ループ面積が大きくなり、梁主筋の降伏が認められた。その際、接合部内のコンクリート要素がひずみ軟化域に達したことは確認されなかったため、荷重パターン、スラブの有無によらず、解析も実験と同様に接合部の破壊モードは梁曲げ降伏先行型である。

図-6 に田字型加力における X 方向および Y 方向の荷重の軌跡を示す。(BJ-3D-S 試験体は解析結果のみ) 図-5, 図-6 からわかるように、1方向加力後に直交方向に加力を行うと、先に加力を受けた側のせん断力の低下が生じ、このせん断力の低下は層間変形角が大きくなるほど大きくなる。この挙動は解析でも確認でき、田字型加力を受ける立体接合部での加力状況が再現できたといえる。

### 3.2 鉄筋のひずみ性状

図-7 に BJ-3D-0 試験体および BJ-3D-S 試験体

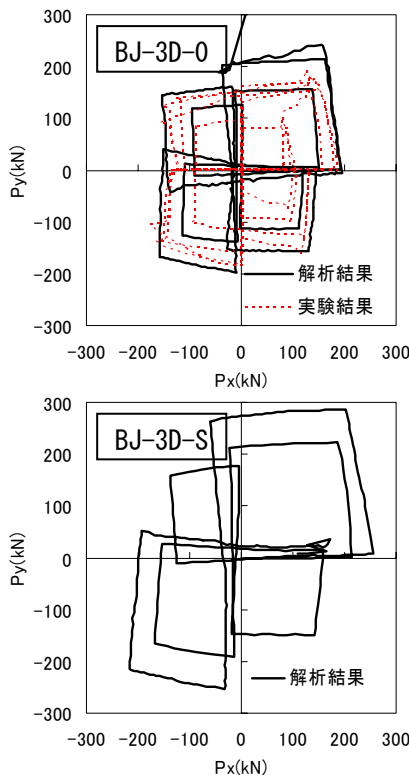


図-6 荷重の軌跡

の田字型加力時における梁主筋のひずみ性状を示す。両試験体とも、降伏に至っていない接合部中央部分の梁主筋のひずみは若干低いものの、ほぼ実験結果と対応し、ひずみの傾きが一致した。BJ-3D-0 試験体では実験、解析共に  $R=1/100\text{rad}$  で梁危険断面付近の梁主筋が降伏に到っている。BJ-3D-S 試験体では梁危険断面付近のひずみは実験よりも小さい結果となった。また、梁主筋のひずみ性状はスラブの有無によらず、両試験体とも直交方向の加力により梁端での荷重が低下するにもかかわらず、梁主筋のひずみ分布はほとんど変化していないことが、解析でも概ね一致している。なお、一部の梁主筋が直交方向加力によって降伏に到っているが、解析では解析時間短縮のため、直交する鉄筋の交差部分は1つの節点で表現した。そのため、直交方向の加力は鉄筋によっても多少伝達されたことが考えられる。

### 3.3 コンクリートのひずみ性状

図-8 に BJ-3D-0 試験体の加力パス 0→A→B における梁の圧縮縁のコンクリートのひずみ性状を示す。0→A パスにおいて、実験と同様に、解析も断面左右でほとんど同じひずみで進展し

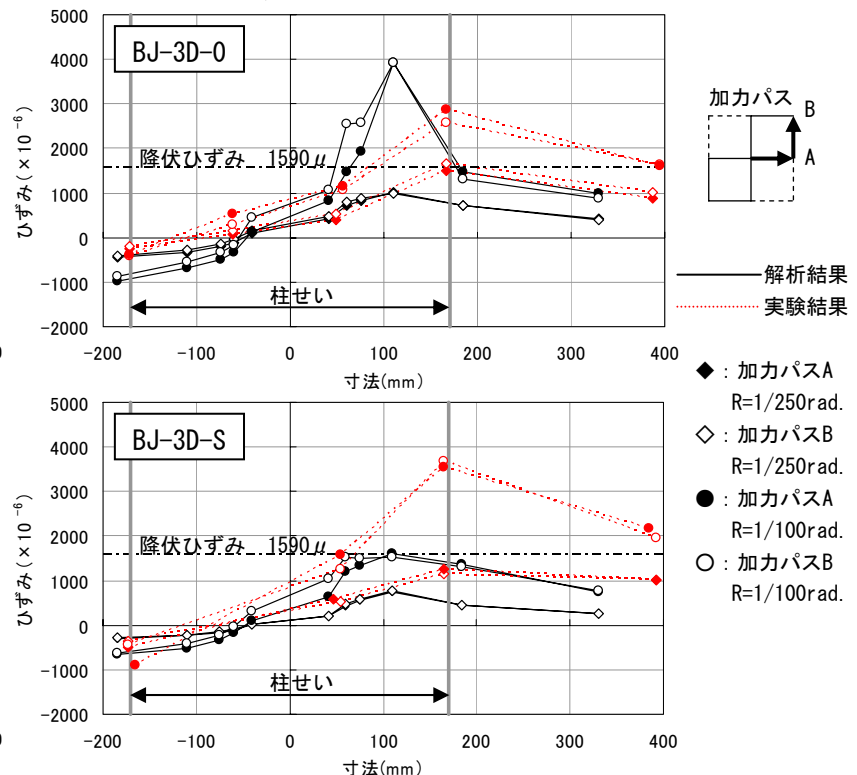


図-7 梁主筋のひずみ性状

ていき、荷重が大きいのので解析のひずみは実験の2倍以上となったが、傾きは実験とほぼ一致した。そして、A→Bパスにおいて、断面左右でひずみが逆方向に向かって進展していく。これは直交方向加力により柱部材に圧縮応力が生じる側は圧縮ひずみが増大し、引張応力が生じる側は圧縮ひずみが減少する傾向を示し、解析でも同様の傾向であった。

### 3.4 最小主応力分布

図-9に層間変形角  $R=1/250\text{rad}$ での接合部水平断面の加力パス A~B にかけての圧縮主応力コンターを示す。矢印に示すように、Y方向に加力するにつれて圧縮ストラットが斜め45度方向に移動していく様子が観察できる。

### 3.5 累積吸収ひずみエネルギーおよび変形

累積吸収ひずみエネルギーの定義は以下の式(1)による。

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

$$U = \sum \Delta U$$

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、 $\sigma_{ij}$ ：微小区間の平均応力、 $\epsilon_{ij}$ ：ひずみ増分である。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。

図-10に  $R=1/100\text{rad}$ の加力パスAでの各試験体の1方向加力と田字型加力を比較したコンクリート要素の累積吸収ひずみエネルギーを示す。部材ごとに接合部、柱、X方向梁、Y方向梁、スラブ、試験体全体の累積吸収ひずみエネルギーを算出した。数値はそれぞれ試験体全体に占めるエネルギーの吸収割合(%)である。

1方向加力ではY方向梁で加力していないため、エネルギーはほとんど0に近い。柱、X方向梁、スラブのエネルギーは加力パターンであり、接合部では田字型加力の方が大きいエネルギーを吸収していることが確認できる。接合部の試験体全体に占めるエネルギーの吸収割合でも田字型加力の方が大きい割合を

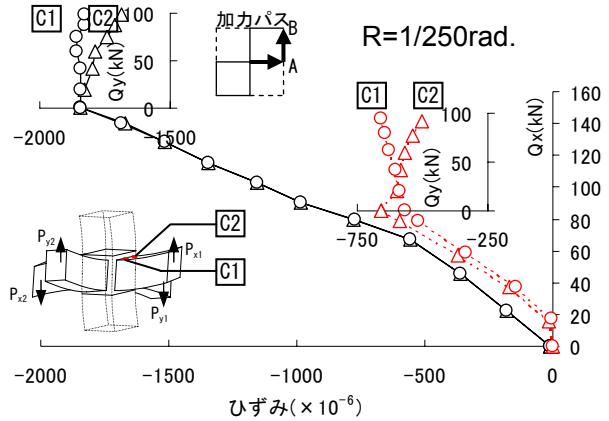


図-8 コンクリートのひずみ性状

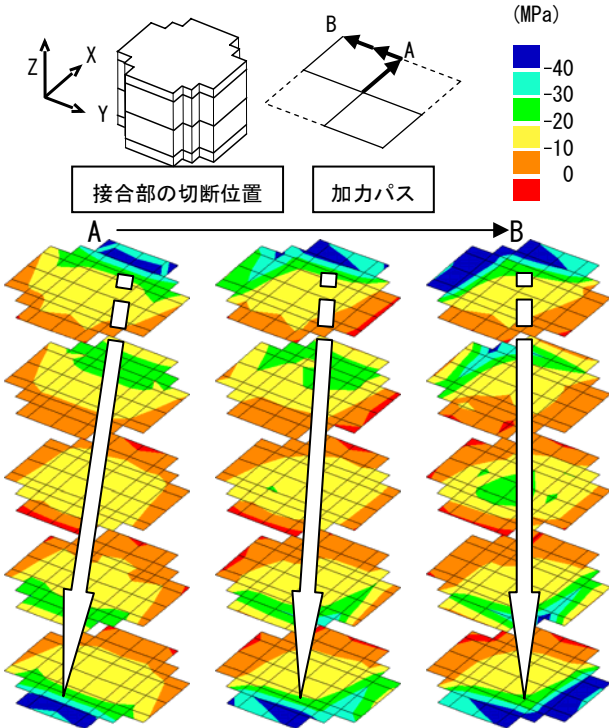


図-9 圧縮主応力コンター ( $R=1/250\text{rad}$ .)

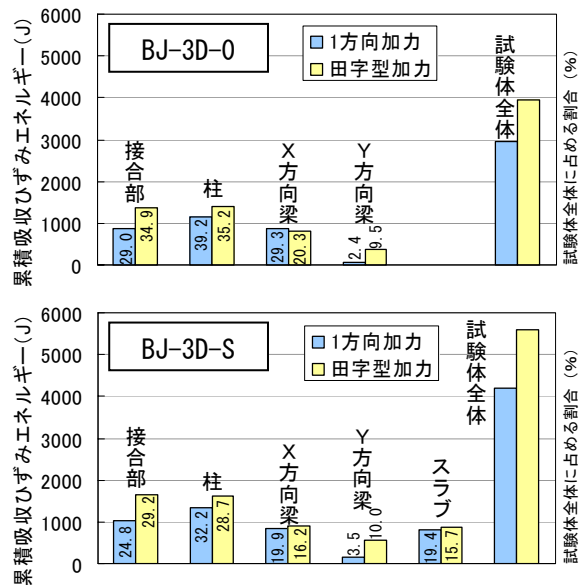


図-10 部材ごとの累積吸収ひずみエネルギー ( $R=1/100\text{rad}$ の加力パスA)

示した。このことから形状に関わらず、田字型加力を受ける柱・梁接合部は1方向加力を受ける柱・梁接合部より特に接合部の損傷が厳しくなるということがいえる。

図-11に $R=1/100\text{rad}$ .の加力パスAでの1方向加力と田字型加力のBJ-3D-0試験体のRCとしての累積吸収ひずみエネルギーカウンターおよび変形（倍率：30倍、梁主筋位置での鉛直断面位置）を示す。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、定量的に求めた。

田字型加力ではY方向梁に2方向加力の影響が見られる。また、梁上端筋、下端筋にエネルギーが集中し、鉄筋およびボンドリンクの影響が見られる。さらに田字型加力の方が接合部の損傷領域が広いことが視覚的に確認できる。

#### 4. まとめ

- ・初期剛性はやや高めであったが、履歴ループ、破壊形式は概ね実験と良好に対応した。
- ・梁主筋のひずみは直交方向加力によってほとんど影響を受けないが、コンクリートのひずみは影響を受けることが解析でも確認でき、田字型加力を受ける柱・梁接合部の挙動は概ねシミュレートできた。
- ・累積吸収ひずみエネルギーの検討から、田字型加力を受ける柱・梁接合部は接合部の損傷が厳しくなることを定量的、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) 深澤協三, 中野清司, 松井邦人, 吉村鉄也: RC内柱一はり接合部の二方向加力による実験的研究,

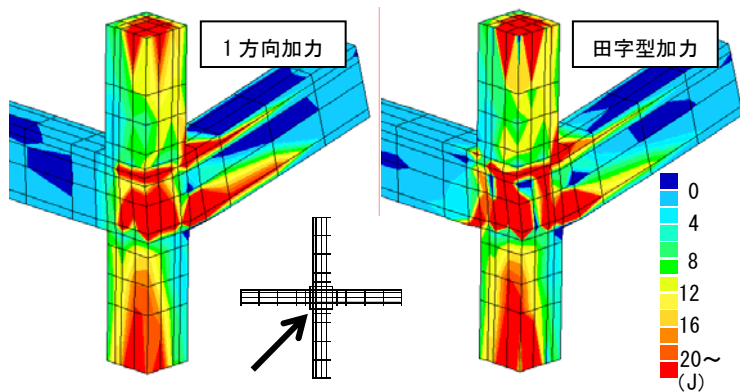


図-11 累積吸収ひずみエネルギーカウンター及び変形  
( $R=1/100\text{rad}$ .の加力パスA)

コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.745-750, 1994

- 2) 立花正彦, 中野清司ほか: 2方向地震力を受ける立体鉄筋コンクリート構造骨組の挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.498, p113-120, 1997
- 3) 櫻井輝雄, 柏崎隆志, 野口博ほか: 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, 1998.12.
- 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) 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
- 8) 野口博ほか: 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(その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.67-70, 2004.9.
- 9) 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