

# 論文 鉄筋コンクリート内柱・梁接合部のせん断入力と梁主筋付着性状に関する解析的研究

金 成澤\*<sup>1</sup>・柏崎 隆志\*<sup>2</sup>・野口 博\*<sup>3</sup>

**要旨:** 澤田らが実験を行ったせん断入力量及び付着指標を変数とした試験体を対象として、3次元 FEM 解析を行った。実験結果との比較や解析手法の検証を行い、応力の分布や破壊性状、累積消費ひずみエネルギーなどの実験での把握が困難な項目についても、3次元的な把握も含めて検討し、主筋の付着性状が接合部を含む架構の破壊性状への影響について考察した。領域を分けて付着特性を入れることにより主筋ひずみを精度よく評価することができた。接合部内の圧縮応力のコンターを示し、付着指標と入力せん断入力量の差異によるせん断伝達機構に及ぼす影響について検討した。

**キーワード:** 柱・梁接合部, 付着指標, せん断入力量, 梁主筋付着性状, 3次元 FEM 解析

## 1. はじめに

柱・梁接合部内に通し配筋される梁主筋の付着性状は、架構の耐震性能に大きな影響を及ぼす。そこで、梁主筋の付着性状を明らかにし、梁・柱接合部の設計に反映させることが重要である。

柱・梁接合部を設計する際に用いられる鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説<sup>1)</sup>の付着強度式は、接合部を模擬した藤井等<sup>2)</sup>の実験により導かれたもので、コンクリート強度と柱圧縮軸応力度による関係式となっている。しかし、この実験式では接合部内梁主筋付着性状に影響を及ぼすと考えられる接合部せん断入力量<sup>3)</sup> ( $\tau_{py}/\nu\sigma_B, \tau_{py}$ : 理論梁曲げ降伏時の接合部せん断応力度,  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度,  $\nu$ : 有効圧縮強度係数 ( $\nu=0.7-\sigma_B/200$ ))や付着指標<sup>1)</sup> ( $\mu=d_b\cdot\sigma_y/(2D_c\cdot\sigma_B^{2/3})$ ,  $d_b$ : 梁主筋径,  $\sigma_y$ : 梁主筋降伏応力度,  $\sigma_B$ : コンクリート強度)の影響が考慮されていない。

そこで、本研究では、RC 柱・梁接合部の付着指標と入力せん断入力量をパラメータとして、3次元 FEM 解析を行い、実験と解析との整合性、解析結果から履歴性状、破壊性状、内部応力状況、ひび割れ進展状況、累積ひずみエネルギーの負担割合などについて検討する。特に、実験では観察が困難な圧縮ストラットの形成状況や内部の応力状態、ひび割れ状況を視覚化、検討し、せん断入力量と主筋の付着性状による違いが接合部を含む架構の破壊性状への影響について考察する。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析対象試験体

解析対象とした試験体は 2006 年に澤田、林、上村<sup>4)</sup>

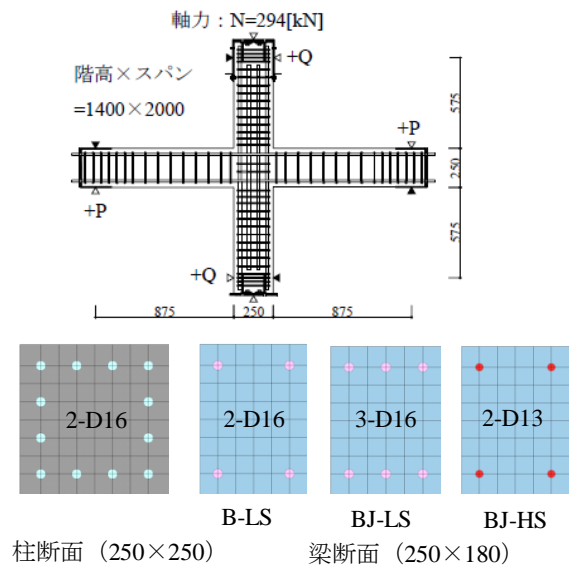


図-1 試験体の形状・寸法及び配筋状況 (mm)

らによる実験試験体の解析を行った。B-LS と BJ-LS は使用鉄筋が同じで梁主筋本数、即ち、接合部せん断入力量が異なる試験体である。BJ-HS は梁主筋に細径高強度鉄筋を用いて付着指標を変化させた試験体で、BJ-LS と接合部せん断入力量はほぼ同等である。

表-1 に各試験体諸元一覧、表-2 にコンクリート、鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。図-1 に試験体の形状・寸法及び配筋状況を示す。梁主筋の種類、本数以外の試験体形状・寸法等は、全試験体共通である。

### 2.2 解析モデル

本研究では、余・野口<sup>5)</sup>らにより開発され、洪・野口<sup>6)</sup>により改良された 3次元 FEM 解析プログラムを用いた。せん断補強筋の拘束効果を表現するために 3次元解析

\*1 (株) マイダスアイティジャパン (前千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻) 工修 (正会員)

\*2 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 助教 工修 (正会員)

\*3 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 教授 工博 (正会員)

として、形状及び加力の対称性を利用して試験体の半分をモデル化した。コンクリートは8節点ソリッド要素を用い、鉄筋は軸方向のみに剛性を有する2節点トラス要素により試験体の配筋状況を忠実に再現した。梁主筋に関しては、コンクリートと鉄筋の節点を別々に定義し、その間に接合要素を挿入し、両者の相対すべりを考慮した。他の鉄筋は完全付着とした。

コンクリートの構成則には Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性非弾性モデルを3次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面は Willam-Warnke の5パラメータモデルを用いて表現し、Kupfer らの基礎実験データを使用し曲面を定義した。応力-ひずみ関係は圧縮側の上昇域では Saenz 式、圧縮下降域では、中村<sup>7)</sup>らの圧縮破壊エネルギーから定義した直線モデルを用いた。引張側応力上昇域では引張強度点まで直線モデル、下降域では、Tension Stiffness 効果を考慮した白井式により定義した。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には野口・濱田式、ひび割れモデルは固定非直交分散ひび割れモデル、ひび割れ方向のせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデルを使用した。

鉄筋の応力-ひずみ関係には、包絡線はバイリニアを仮定し、履歴特性は修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。

鉄筋とコンクリート間の付着の応力-すべり関係には森田・角モデル<sup>8)</sup>を用いた。本研究で用いたボンドリンク要素位置とボンドリンク特性を図-2、表-3に示す。ボンドリンク要素位置は柱・梁接合部の梁主筋ひずみ分布の特徴より梁圧縮、接合部、梁引張領域に分けた。接合部内梁主筋の平均付着応力度は、柱曲げひびわれの発生によって梁主筋の接合部端引張側付近にコンクリートの拘束効果が低下し劣化することを表現するため、更に接合部内部を圧縮、中央、引張領域に分けて解析を行った。付着ボンドリンク特性は、各領域においての実験で測定したコンクリートひずみを無視した鉄筋ひずみの積分値をすべり量として決定し、付着応力度は各領域の梁主筋の鉄筋力の差より算定した実験結果に従った。

各モデルの詳細は文献<sup>5)</sup>を参照されたい。

解析対象試験体の要素分割および境界条件を図-3に示す。実験の配筋間隔に従って要素分割を行うと節点数および要素数が多くなり、解析に長時間を要し、実用的でないため、接合部付近を細かく、それ以外を粗く設定した。また、柱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。

### 2.3 加力方法

最初に柱脚をピン支持として、一定軸力 294kN(軸力比:0.16)を載荷し、その後柱頭をローラー支持、柱脚をピン支持として梁端部に強制変位制により層間変形角  $R=1/250, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25$  をそれぞれ1サ

イクルずつ正負交番繰り返し載荷した。

表-1 試験体諸元

試験体		B-LS	BJ-LS	BJ-HS
梁	主筋	2-D16 (SD295)	3-D16 (SD295)	2-D13 (USD685)
	補強筋	□-D6@80[cm](SD345)		
	$\mu$	2.5	2.5	4.2
柱	主筋	12-D16(SD245)		
	補強筋	□-D6@50[cm](SD345)		
接合部	補強筋比	0.30(%)		
	$\tau_{py}/\sqrt{\sigma_B}$	0.35	0.52	0.45

表-2 コンクリートと鉄筋の材料特性

鉄筋	梁主筋		柱主筋	補強筋
	D16	D13	D16	D6
降伏強度[MPa]	368	751	401	335
ヤング係数[10 <sup>5</sup> MPa]	1.96	1.95	1.92	1.75
コンクリート圧縮強度[MPa]			$\sigma_B=30.7$	

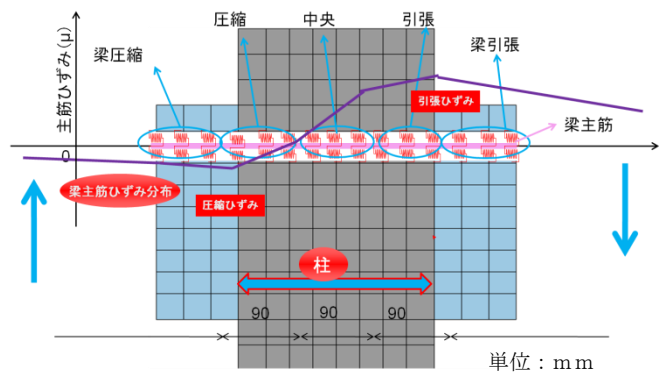


図-2 ボンドリンク要素位置

表-3 ボンドリンク材料特性

試験体	ボンドリンク位置	弾性付着剛性 (N/mm <sup>3</sup> )	第2付着剛性 (N/mm <sup>3</sup> )	折れ点付着応力 (N/mm <sup>2</sup> )	最大付着応力 (N/mm <sup>2</sup> )
B-L S	梁圧縮	800	40	2.5	12
	圧縮	800	40	3.5	12
	中央	800	40	3.0	9
	引張	800	40	2.5	8
	梁引張	800	40	2.5	12
B J-L S	梁圧縮	800	40	1.5	12
	圧縮	800	40	3.0	12
	中央	800	40	2.5	10
	引張	800	40	2.0	7
	梁引張	800	40	1.5	12
B J-H S	梁圧縮	800	80	2.5	40
	圧縮	800	50	3.0	40
	中央	800	40	2.5	40
	引張	800	40	2.5	40
	梁引張	400	20	1.5	40

### 3. 解析結果

#### 3.1 層せん断力-層間変形角関係

繰り返し及び単調載荷における各試験体の層せん断力—層間変形角関係を図-4 に示す。各試験体の圧壊状況（最大耐力時）を荷重—変位関係の左上に示す。本研究では、一軸圧縮試験から得られた圧縮強度時のひずみを超えている領域でコンクリートが圧壊したと判断し、赤く塗り潰して表現する。

各試験体において、初期剛性は良好な対応を示した。最大耐力に関してもそれぞれ良好な対応を示したといえる。各試験体とも主筋降伏後の繰り返し載荷によって逆S字形のやせたループを呈している。B-LS, BJ-LS 繰り返し解析結果において最大耐力後の耐力低下が実験に比べて過大評価されている。

せん断入力量が小さい B-LS では、最大耐力時までに梁主筋は降伏したが、実験と同様に終了まで接合部補強筋と柱主筋は降伏しなかった。また、梁付け根部のコンクリートが梁主筋の降伏後すぐに圧壊し、実験より早めに耐力低下が生じた。せん断入力量が大きい試験体 BJ-LS では、最大耐力時までに梁主筋が降伏し、その後耐力低下が見られてその後接合部補強筋が降伏した。梁主筋に高強度鉄筋を使用した BJ-HS では、最大耐力前に梁付け根部のコンクリート圧縮域で圧壊現象が見られ、最大耐力時には梁主筋が降伏し、その後、梁付け根部の圧壊現象が進行し、耐力低下を生じた。圧壊が生じた理由として、高強度鉄筋を使用したことにより、鉄筋の伸び量と共に梁主筋の接合部からの抜け出し量が増大し、接合部の変形が大きくなったためと考えられる。

圧壊状況について、BJ-LS では端部の圧壊が生じた後、接合部内部にまで圧壊が進展し、接合部破壊していることがわかる。それに対し B-LS, BJ-HS では梁端部、柱端部に圧壊領域が集中している。これらの結果から、実験と同じように B-LS は梁曲げ破壊型、BJ-LS は梁曲げ降伏後の接合部破壊型、BJ-HS は梁曲げ圧壊型と判断した。

以上より、繰り返し解析結果において最大耐力以降の耐力低下が実験より若干激しいが、剛性、最大耐力、履歴ループ、破壊モードを含めて解析は実験の荷重—変位関係を精度よく再現できたことがわかる。

#### 3.2 接合部内梁主筋のひずみ分布

図-5 に実験との最大耐力までの梁上端筋ひずみ分布の比較を示す。B-LS, BJ-LS の主筋ひずみの値、勾配ともに、よい対応を示している。各試験体において、主筋降伏時には接合部危険断面の引張側梁主筋ひずみが大きくなった。各試験体とも接合部内圧縮側の主筋ひずみが圧縮ひずみから引張ひずみに転じている。これにより、繰り返し載荷時、主筋が周辺のコンクリートに対して滑って主筋に沿った付着劣化が生じて逆S字形の瘦せた履

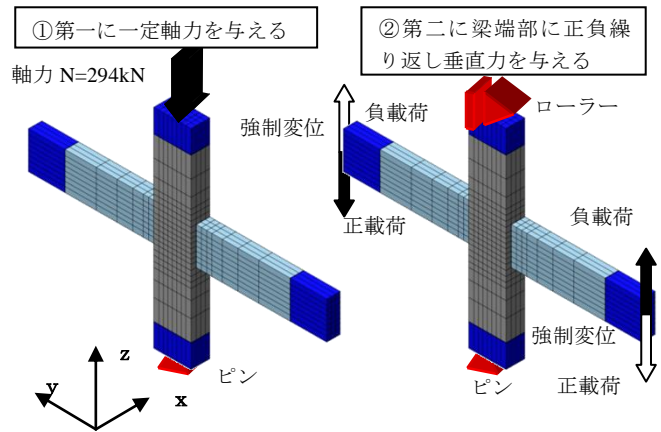


図-3 要素分割および境界条件

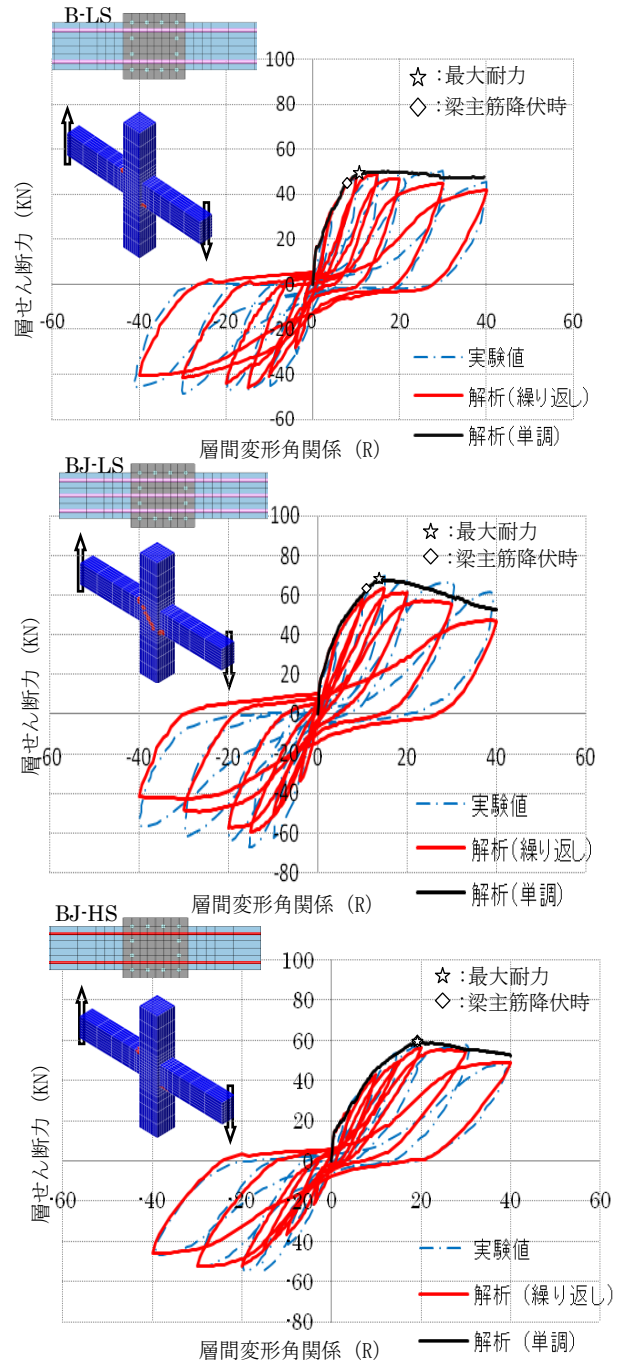


図-4 層せん断力—層間変形角関係

歴ループになっている。

BJ-HS では、 $R=1/250\text{rad}$ と $R=1/100\text{rad}$ はよく対応しているが、 $R=1/100\text{rad}$ と $R=1/50\text{rad}$ では引張側では実験より高く、圧縮側では実験より低くなった。実験では圧縮側の主筋ひずみが圧縮ひずみから引張ひずみに転じているが、解析では層間変形角が大きくなってその主筋ひずみは圧縮のまま推移し、解析と実験で異なるひずみ性状を示している。この原因としては、解析の安定性を考慮して接合部領域のボンドリンク要素の第2付着剛性と最大付着応力度を大きくしたためである。これについては今後、検討の余地がある。

### 3.3 接合部内梁主筋の平均付着応力度

図-6には各試験体の接合部領域内の梁主筋の平均付着応力度と接合部端引張側梁主筋のひずみ関係を示す。各試験体とも接合部端引張側梁主筋降伏時まで示した。B-LSとBJ-LSについては初期の付着剛性と低下点は実験値よりやや高めに評価しているが、何れも柱曲げひびわれ発生後に剛性低下が見られた。付着特性のモデルが不十分で柱曲げひびわれ発生が実験より遅れていると考えられる。

分散ひび割れモデルを利用した解析では柱曲げひびわれ発生時を正確に評価しにくいと、実験の柱曲げひびわれ発生時変形角でのひび割れ状況を図-7に示す。本研究ではひび割れは引張主ひずみが引張強度時ひずみを超えた時に生じたと仮定した。ひび割れを円で表現しており、円の色が赤に近いほどひび割れ幅が大きいことを示している。また、円の傾きがひび割れ方向を示す。各要素における積分点での平均値を用いた。

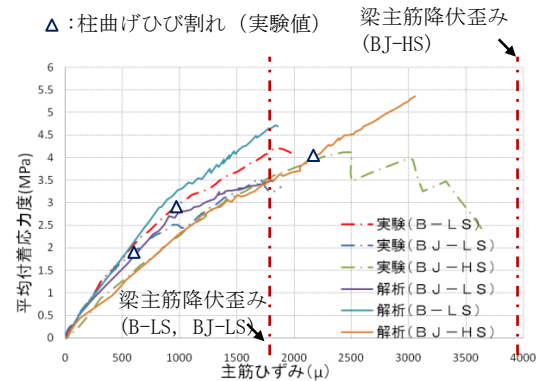


図-6 平均付着応力と主筋ひずみ関係

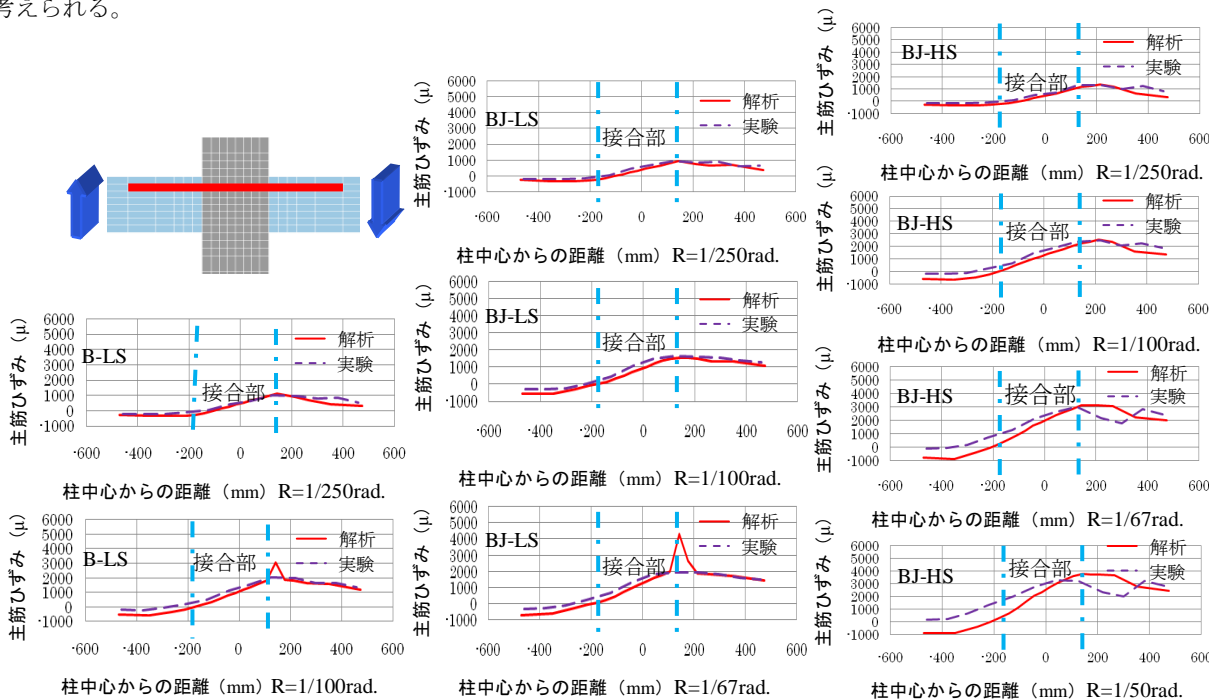


図-5 主筋ひずみ分布 (μ) —柱中心からの距離 (mm)

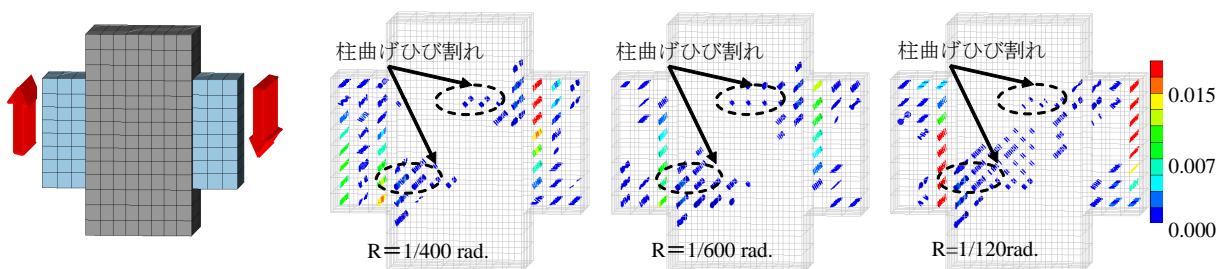


図-7 柱曲げひび割れ時のひび割れ状況

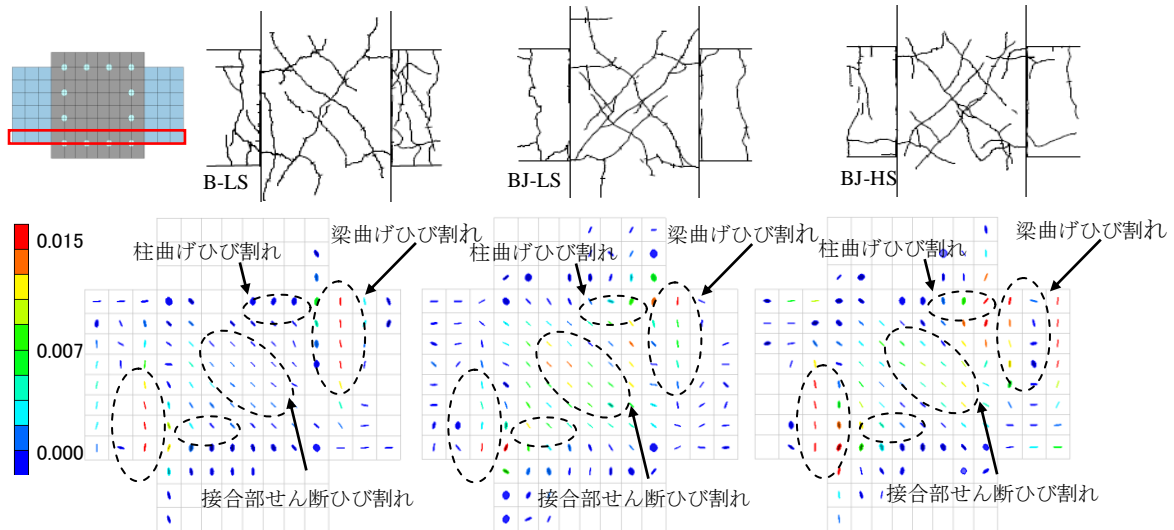


図-8 ひび割れ状況（主筋降伏時）

実験の柱曲げひびわれ発生時、解析ひび割れ状況でも梁主筋方向に沿う接合部引張領域に柱曲げひびわれが徐々に発生していくことが見られる。

### 3.4 ひび割れ性状

図-8 より、解析結果から、分散ひび割れモデルを使った解析で梁曲げひびわれ、柱曲げひびわれ、接合部せん断ひび割れを良く評価できたことがわかる。

### 3.5 応力コンター

図-9 に接合部垂直断面の圧縮主応力コンターを示す。R=1/400 rad. 時 BJ-LS は B-LS, BJ-HS よりせん断入力量が多いため、圧縮主応力が幅広い範囲に広がっていることがわかる。B-LS は変形が進むほど付着劣化により梁端部に負担する応力が大きくなっていくことがわかる。しかし、早めに梁主筋降伏に至ったため、接合部に入力されるせん断力が少なく、梁端部に圧壊が生じた。

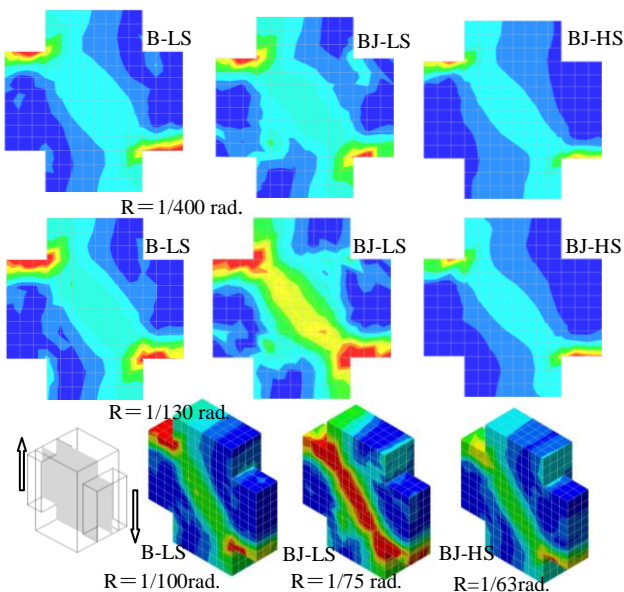


図-9 接合部垂直断面圧縮主応力コンター

BJ-LS において変形が進むほど付着劣化に伴う梁危険断面コンクリート圧縮域の拡大による梁応力中心間距離が減少して接合部の損傷が大きくなる。

BJ-HS は付着が悪いため同じ変形角で見ると、トラス機構により、接合部に入力されるせん断力が BJ-LS より少なく、主にストラット機構により、幅狭い範囲で集中して伝達されている。付着劣化後にコンクリートの負担分が増えているが、接合部に入力される分が少ないため、主に梁端部に集中していることがわかる。付着劣化は部材端部コンクリートの圧壊や履歴性状のピンチ化により、RC 部材のエネルギー吸収能力を低下させるため、現実的な設計が困難になる理由から、高強度鉄筋を使用する場合に圧壊防止に十分注意する必要がある。

### 3.6 接合部入力せん断力-層間変形角関係

図-10 に接合部入力せん断力-層間変形角関係を示す。接合部入力せん断力はパネル中央高さに生じるコンクリートせん断力の積分値の合力で求めて、付着力は梁危険断面の主筋応力の差で求めた。変形が進むにつれて、付着劣化により、コンクリートの負担分が大きくなっていくことがわかる。

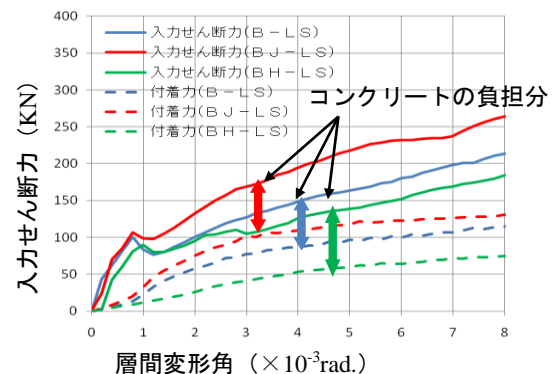


図-10 接合部入力せん断力-層間変形角関係

### 3.7 累積消費ひずみエネルギー

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、

$U$  : 累積消費ひずみエネルギー、 $V$  : 要素体積、

$\sigma_{ij}$  : 微小区間の平均応力、 $\varepsilon_{ij}$  : 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としての累積消費ひずみエネルギーは、鉄筋要素をコンクリート要素のエネルギーへ加えることにより、定量的評価を行った。

図-11に各部材ごとの累積消費ひずみエネルギー負担割合を示す。各試験体において柱のエネルギー負担割合はほぼ同一である。せん断入力量が大きいBJ-LSでは主筋降伏後、変形が進むに従い、接合部のエネルギー負担割合が卓越してきており、接合部破壊したことを裏付けている。B-LSでは、主筋降伏後接合部の割合は大きく変わらず、梁の負担割合が増加する。BJ-HSでは、接合部の割合は大きく変わらず、梁の負担割合も大きく変わりません。大変形時において接合部の負担割合が若干小さくなっている。以上より解析と実験は損傷状況及び破壊モードに関して概ねに良好に対応していることを裏付けている。

表-4に主筋降伏時のB-LS、BJ-HSの累積消費ひずみエネルギー負担割合を示す。図に示したとおり、B-LS、BJ-HSにおいて主筋降伏時に接合部付着及び梁付着による累積消費ひずみエネルギー負担割合はほぼ一緒になっていることがわかる。

### 4 まとめ

- (1) 層せん断力-層間変形角関係において、剛性、最大耐力、履歴性状、破壊モードについて実験と良い対応を示した。
- (2) 領域を分けて付着特性を入れることにより主筋ひずみを精度よく評価することができた。BJ-HSにおいてはまだ改善の余地がある。
- (3) 接合部内梁主筋の平均付着応力度は、柱曲げひびわれの発生によって梁主筋の接合部端引張側付近にコンクリートの拘束効果が低下し劣化することを解析上で確認できた。
- (4) 接合部内の圧縮応力のコンターを示し、付着指標と入力せん断力量の差異によるせん断伝達機構に及ぼす影響について検討した。
- (5) 累積消費ひずみエネルギーの部材別の負担割合を示し、破壊性状、負担割合の推移を検討した。

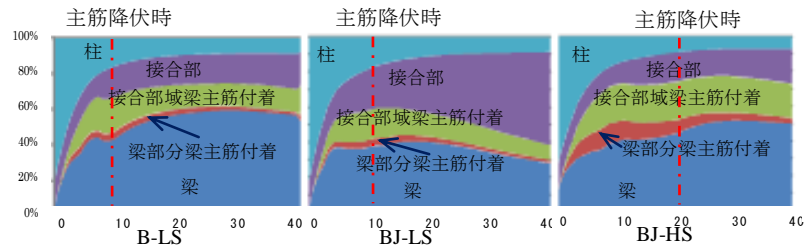


図-11 各部材ごとの累積消費ひずみエネルギー負担割合

表-4 累積消費ひずみエネルギー負担割合

試験体	柱	梁	梁付着	接合部付着	接合部
B-LS	17%	42%	4%	20%	17%
BJ-HS	7%	51%	5%	21%	16%

### 謝辞

本研究を行うにあたり、芝浦工業大学・上村智彦教授、東京工業大学・林静雄教授から、貴重な実験研究論文を提供して頂きました。ここに記して深謝致します。また、本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究C(研究者：野口博)により行われた。

### 参考文献

- 1) 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・同解説，pp.255-258，1999.8
- 2) 藤井栄ほか：高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部における梁通し筋の付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13-2，pp.483-488，1991.6
- 3) 乗物丈巳ほか：RC内部梁・柱接合部終局強度への諸因子の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.109-110，1995
- 4) 澤田和宏・岸本直樹・林静雄・上村智彦：鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部のせん断入力量と付着指標の変化に伴う梁主筋付着性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，2006
- 5) 余勇，柏崎隆志，野口博：繰返し載荷時のRC柱部材の性能評価に関する3次元FEM解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.157-162，2005.6
- 6) 洪杰，柏崎隆志，野口博：3次元FEM解析によるRC造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.301-306，2009.7
- 7) Nakamura, H., et al. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, Japan Concrete Institute, JCI-C51E; Vol.2, pp.259-272, 1999
- 8) 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，日本建築学会論文報告集 No.299, pp.15-24, 1975.3