

論文 RC 内柱・梁接合部のせん断強度に及ぼす柱軸力と梁主筋付着の影響に関する 3次元 FEM 解析

藤原 賢二*1・柏崎 隆志*2・和泉 信之*3・野口 博*4

要旨: 柱軸力と梁主筋量が、RC 柱・梁接合部のせん断強度や、接合部を含む架構の破壊性状に与える影響について把握するために、既往の実験試験体を対象として 3次元 FEM 解析を行い、実験結果との比較や解析手法の検証を行った。3次元解析では、応力の分布や破壊性状、累積消費ひずみエネルギー等の実験での把握が困難である項目について検討した。また、周りのコンクリートの応力状態により変化する梁主筋の付着特性を、応力状態を考慮した領域に分けてモデル化した。その結果から、実験同様に層せん断力の低下は、梁主筋付着劣化に伴う梁応力中心間距離の減少が原因であることを 3次元解析により検証した。

キーワード: 鉄筋コンクリート柱・梁接合部、せん断強度、柱軸力、梁主筋付着、3次元 FEM 解析

1. はじめに

RC 柱・梁接合部のせん断耐力に影響を及ぼす要因としては、コンクリート圧縮強度や接合部のせん断補強筋量、柱・梁曲げ耐力比などがある。柱軸力も接合部を含む部分架構のせん断強度に影響を及ぼすことがわかっている。RC 柱・梁接合部に作用する柱軸力は、接合部内梁主筋の付着特性を変化させ、接合部を含む部分架構のせん断強度や破壊性状に影響を及ぼすと考えられる。これまでの実験的研究により、鉄筋コンクリート部材における鉄筋は、付近のコンクリートの応力状態に応じて、付着特性が変化することがわかっている。しかし、付着特性の変化を考慮した解析・研究はあまり多く行われておらず、付着特性の変化による影響は、3次元 FEM 解析において明確に評価されていないのが現状である。また、鉄筋径が異なれば、周囲のコンクリートの応力状態によって付着特性に変化が生じ、付着劣化によるせん断耐力へ影響を及ぼすことが考えられる。

そこで本研究では、RC 柱・梁接合部に作用する柱軸力と梁主筋量をパラメーターとして、3次元 FEM 解析を行い、実験と解析との整合性や、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。その際、実験では把握が困難な圧縮ストラットの形成状況や、内部の応力・破壊状況、ひび割れ状況を視覚化して検討し、接合部を含む部分架構のせん断強度へ及ぼす影響についても考察する。特に、実際の主筋の挙動のモデル化のため、本解析では、梁主筋の付着を再現しているボンディング要素の付着特性を、付近のコンクリートの応力状態を予測して設定する。

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、1999年に森田・北山ら¹⁾によって行われた実験試験体である。No.1とNo.3は圧縮軸力を与えた梁主筋径が異なる試験体、No.2とNo.4は引張軸力を与えた梁主筋径が異なる試験体である。また、No.1とNo.2、No.3とNo.4の主筋径がそれぞれ同じである。解析対象試験体の破壊形式は、柱・梁主筋が降伏しなかったことと、接合部中央でのひび割れ等の損傷が激しいことより、せん断破壊型と判定した。

図-1に、試験体の形状・寸法及び配筋状況等の試験体概要を示す。表-1に各試験体諸元、表-2にコンクリートの材料特性をそれぞれ示す。梁主筋は試験体No.1とNo.2は4-D25、No.3とNo.4は7-D16を使用しており、それ以外の配筋は全試験体共通である。梁の断面は250×350、柱断面は350×350となっている。

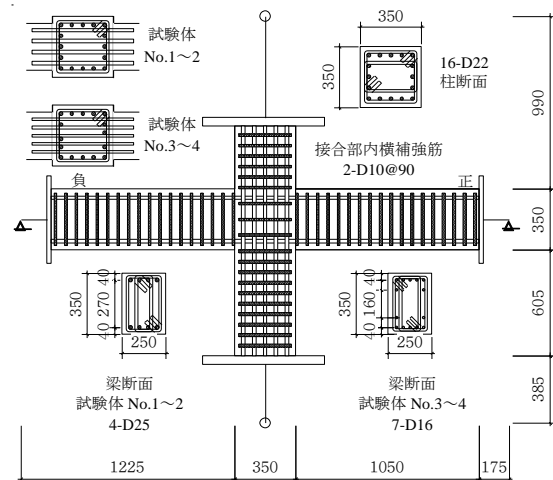


図-1 試験体概要

*1 千葉市役所 (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 博(工) (正会員)
 *4 工学院大学 教育開発センター 主幹・特任教授, 千葉大学 名誉教授 工博 (正会員)

表-1 試験体緒元

試験体名	No.1	No.2	No.3	No.4
軸力	圧縮一定	引張一定	圧縮一定	引張一定
kN	883	-883	883	-883
軸力比	0.33	-0.33	0.33	-0.33
梁主筋	上・下端とも4-D25		上・下端とも7-D16	
接合部横補強筋	2-D10@90 $p_{wj}=0.45\%$		2-D10@60 $p_{wj}=0.57\%$	

表-2 コンクリートの材料特性

試験体	ヤング係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
No.1	19.5	22.1	1.75
No.2	20.9	22.0	2.28
No.3	20.0	21.6	1.71
No.4	18.9	21.7	1.88

2.2 解析モデル

本研究では、余・野口²⁾らにより開発され、洪³⁾により改良された3次元FEM解析プログラムを用いた。コンクリート要素はアイソパラメトリック8節点ソリッド要素、構成則には Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性弾性モデルを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、下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park 式により定義した。引張側の下降域では、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飯塚式、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。

鉄筋要素は鉄筋軸方向のみに剛性を有する2節点トラス要素、応力-ひずみ関係には修正 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⁴⁾を用い、梁主筋の付着特性を再現しているボンドリック要素は、図-2に示す様に、圧縮、中央、引張の3種類に周囲のコンクリートの応力状態を予測して入力した。ボンドリック要素の材料特性は、参考文献5)を参考に材料特性を予想して設定し、パラメトリック解析を行い、実験の梁主筋付着応力度-層間変形角関係と最も対応した値を使用した。表-3にボンドリック要素の材料特性を示す。実験から領域の大きさが判断できないため、領域の設定は全試験体共通とした。折れ点付着応力と最大付着応力は、実験でおおよそ同じ応力度で変化していたため、全試験体、全領域で共通とした。解析対象試験体の要素分割及び境界条件を図-3に示す。解析時間を短縮するため、接合部を細かく分割し、それ以外を粗く分割した。柱及び梁の補強筋については、実験と同じ補強筋比となるように、鉄筋の断面積を大きくして調節した。また、柱梁端部の応力が集中する部分に関しては、強度を上げて補強した。

2.3 加力方法

はじめに、柱脚すべてをピン支持とし一定軸力を荷重制御により荷重した。その後、梁端部の梁せい中央にある全節点をローラー支持、柱脚の中心節点をピン支持として、柱頭に水平力を変位制御により層間変位角 $R=1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33, 1/25$ をそれぞれ1サイクルずつ荷重した。

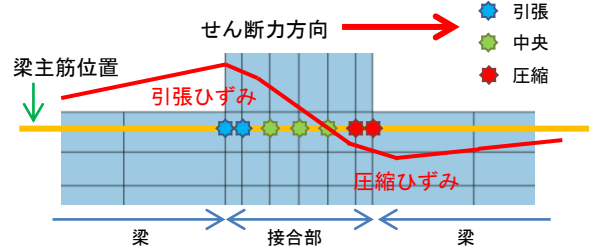
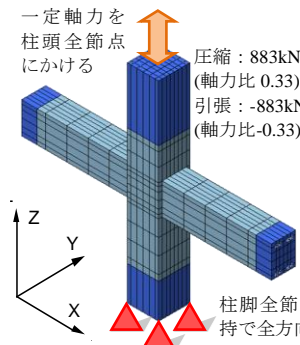


図-2 ボンドリンク要素位置

表-3 ボンドリンク材料特性

試験体	位置	弾性付着 (N/mm ²)	第2付着剛性 (N/mm ²)	折れ点付着応力 (N/mm ²)	最大付着応力 (N/mm ²)
No.1	圧縮	800	40	4.0	6.5
	中央	800	40	3.0	5.0
No.3	引張	800	40	2.0	3.5
	圧縮	400	20	4.0	6.0
No.2	中央	400	20	3.0	5.0
	引張	400	20	2.0	3.5

1. 軸力荷重時



2. 水平力荷重時

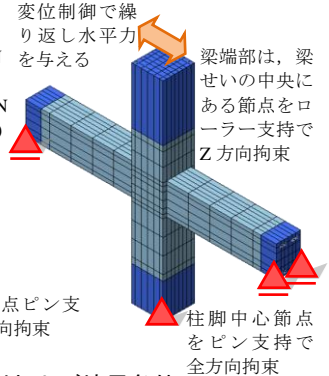


図-3 要素分割および境界条件

3 解析結果

3.1 層せん断力-層間変位角関係

図-4に、各試験体の層せん断力-層間変位角関係を、図-5に、解析同士の層せん断力-層間変位角関係の比較を示す。各試験体において、初期剛性は実験と同じかそれよりも大きくなった。最大耐力に関しても、それぞれ実験と良好な対応を示したが、圧縮軸力を受ける試験体の最大耐力以降の耐力低下が、実験と比較して大きくなった。軸力が異なる試験体同士では、圧縮軸力を受ける試験体 (No.1 と No.3) の方が、引張軸力を受ける試験体 (No.2 と No.4) より初期剛性が大きく、最大層せん断力は高くなった。これは、柱の曲げ強度が圧縮軸力により増大したことや、柱の曲げひび割れ等が、引張軸力を受ける試験体で早期に発生し、剛性低下することが考えられる。また、引張軸力を受ける試験体の方が、最大耐力以降の耐力低下が生じにくい結果となった。これらより、解析でも一定軸力下において軸力の違いが、層せん断力-層

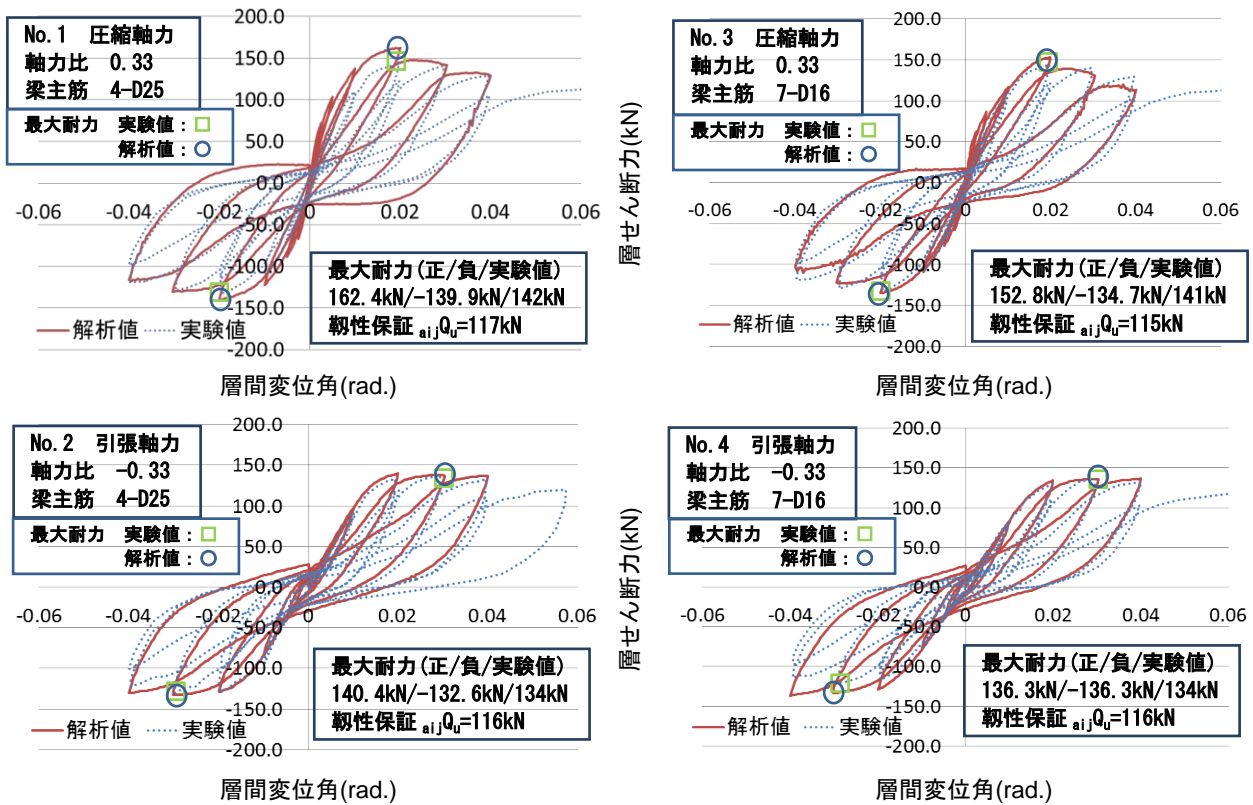


図-4 層せん断力-層間変位角関係

間変位角関係の履歴ループ及び層せん断力に影響を与えることが確認できた。No.1 と No.3, No.2 と No.4 の梁主筋径の異なる試験体同士の層せん断力-層間変位角を比較すると、実験同様に履歴ループ及び最大層せん断力に明確な変化は現れなかった。

解析試験体同士を比較すると、0.04rad.で引張軸力を受ける試験体が2体とも、圧縮軸力を受ける試験体よりも層せん断力が高くなった。剛性は低い、靱性は引張軸力を受ける試験体の方が高くなった。

図-6 に、コンクリートの圧壊状況を示す。圧壊について、本解析では、圧縮強度時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た。接合部内のコアコンクリートとかぶりコンクリートの圧壊がほぼ同時期に発生し、隅角部へと圧壊が進行した。解析から得られるひずみ分布より、最大耐力を迎える直前に、コンクリートの圧壊の進行が大きく進むことが確認できた。コアコンクリートの圧壊領域は、変形が進むにつれて広がり、全試験体においてほぼすべてのコアコンクリートが圧壊した。しかし、コアコンクリート圧壊は、接合部内にとどまり、柱や梁への進行は見受けられなかった。圧壊の進行は、引張軸力を受ける試験体の方が隅角部へと到達する変形が大きくなった。これは、引張軸力によって、危険断面での曲げ圧縮が緩和されたためと考えられる。解析では、0.04rad.まで変形しても、梁及び柱主筋は降伏しなかった。実験においても、最大耐力時に柱及び梁の主

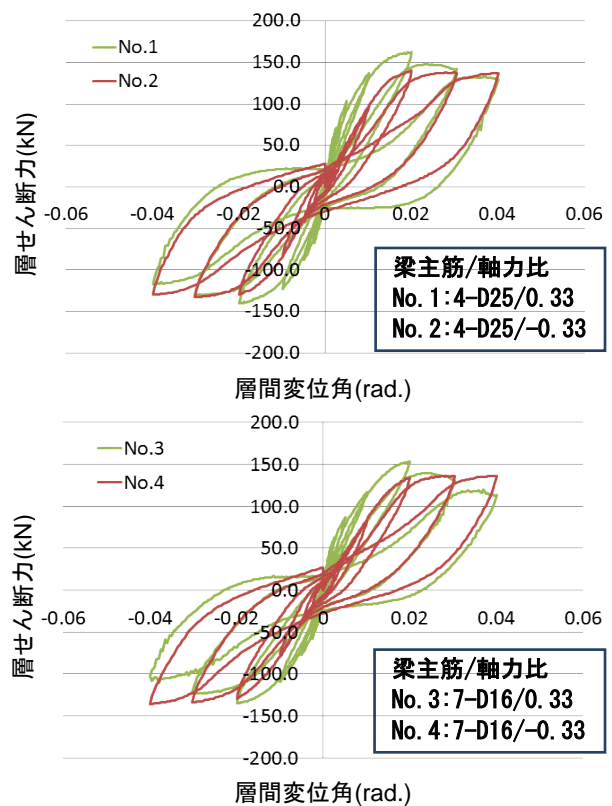


図-5 層せん断力-層間変位角関係の解析同士の比較

筋は、一部を除き降伏していないので、実験と概ね対応しており、最大耐力以降の耐力低下には、隅角部のコンクリートの破壊が関係していると考えられる。

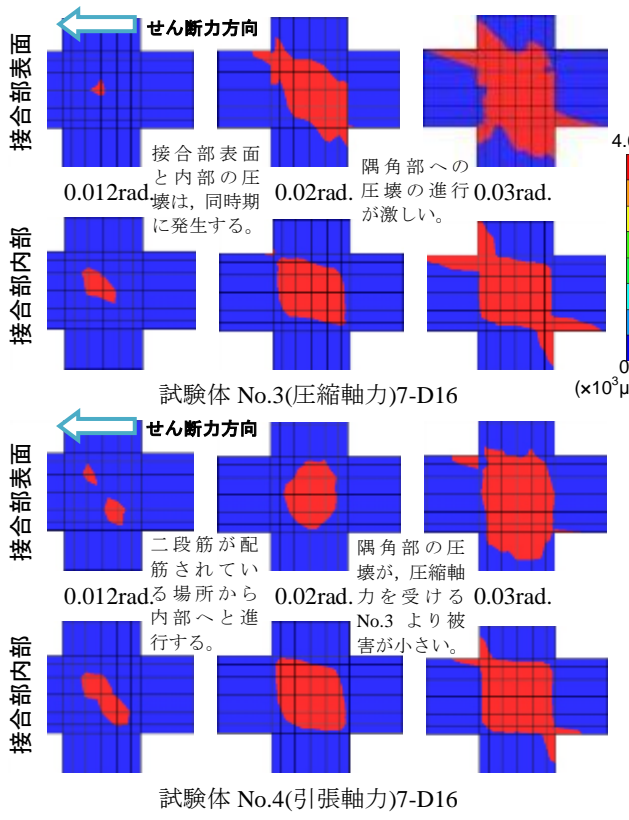


図-6 コンクリートの圧壊状況

3.2 ひび割れ状況

本解析では、コンクリートのひび割れは引張主歪が引張強度時ひずみを超えた時に生じたものと仮定した。円の色がひび割れ幅の大きさを示し、円の傾きがひび割れの方向を示す。コンクリートの引張強度時ひずみについては、各要素における積分点での値の平均値を使用した。

図-7に、各試験体の実験と解析とのひび割れ状況を示す。実線で囲まれている部分が接合部である。実験では、1/25rad.終了時のひび割れを示し、解析では1/200rad.時の最も開くと考えられる、初期のひび割れを示している。軸力の違いに関わらず、内・外部ともに接合部中央のひび割れが目立った。圧縮軸力を受ける試験体では、梁材軸に対してかなり角度の大きいひび割れが発生し、引張軸力を受ける試験体では、梁材軸に対して角度の小さいひび割れが多く発生している。実験でも、引張軸力を受ける試験体では、梁材軸に対して平行なひび割れが見られるので、良く対応している。実験では危険断面圧縮域に軸力も加わる接合部中央表面でのひび割れが大きく、コンクリートの剥落が激しく生じた。解析では、接合部のかぶりコンクリートの部分よりも、コアコンクリートのひび割れが大きくなったため、実験で目視できない接合部中央内部でも、激しくひび割れていると考えられる。

3.3 接合部内梁主筋の平均付着応力度

図-8に梁主筋付着応力度-層間変位角関係を示す。圧縮軸力を受ける試験体の方が、引張軸力を受ける試験体よ

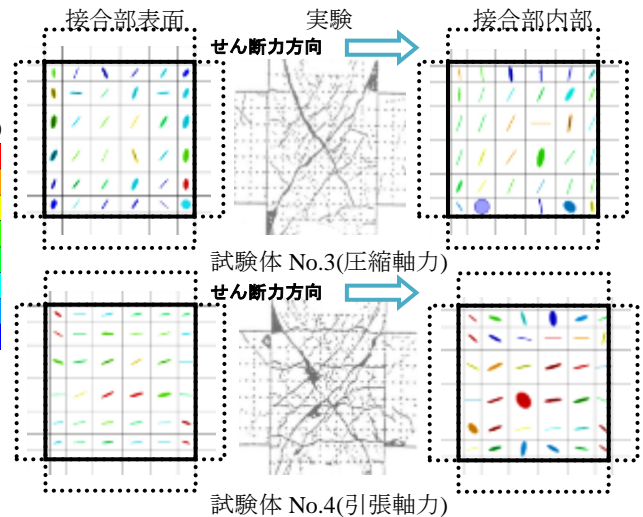


図-7 ひび割れ状況

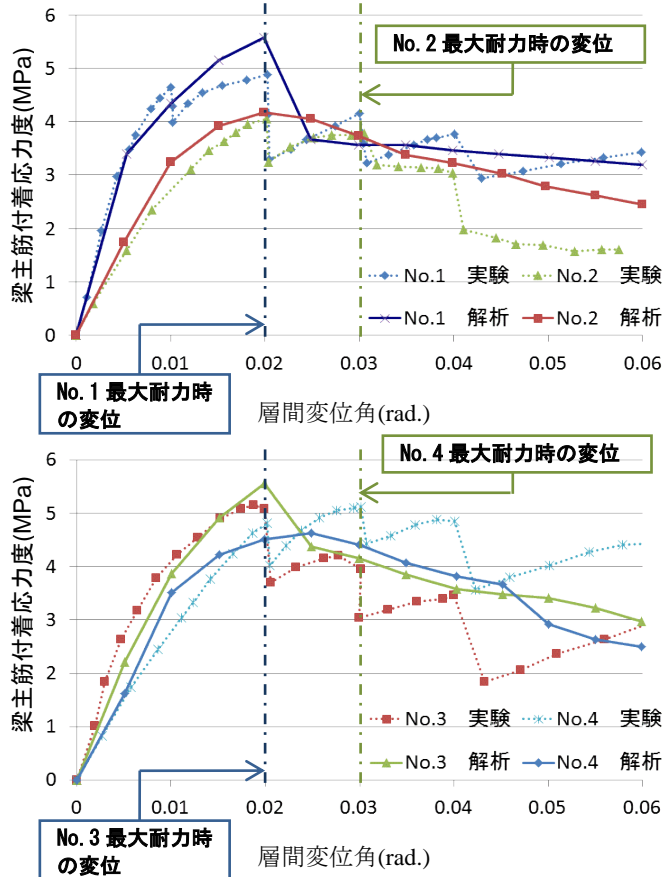


図-8 梁主筋付着応力度-層間変位角関係

りも付着が良好で、梁主筋付着応力度は実験とよく対応した。梁主筋径の違いによる初期剛性の変化は見られなかったが、圧縮軸力を受ける試験体の0.02rad.最大耐力付近以降の変形では、急激な付着応力度の低下が生じた。

3.4 応力中心間距離-層間変位角関係

梁主筋の付着劣化は、梁危険断面でのコンクリート圧縮域を増大させる。そして、圧縮域の増大は梁端部の応力中心間距離が減少させ、梁危険断面のモーメントが低

下するため、層せん断力が低下すると考えられる。図-9には、梁端部の応力中心間距離 j_b の推移を示す。解析においても、実験同様に応力中心間距離は $7/8d$ (梁断面有効せい:306mm)付近から減少していく傾向にあった。解析では、梁主筋径の太い 4-D25 を使用した試験体(No.1 と No.2)の応力中心間距離の低下が著しい。

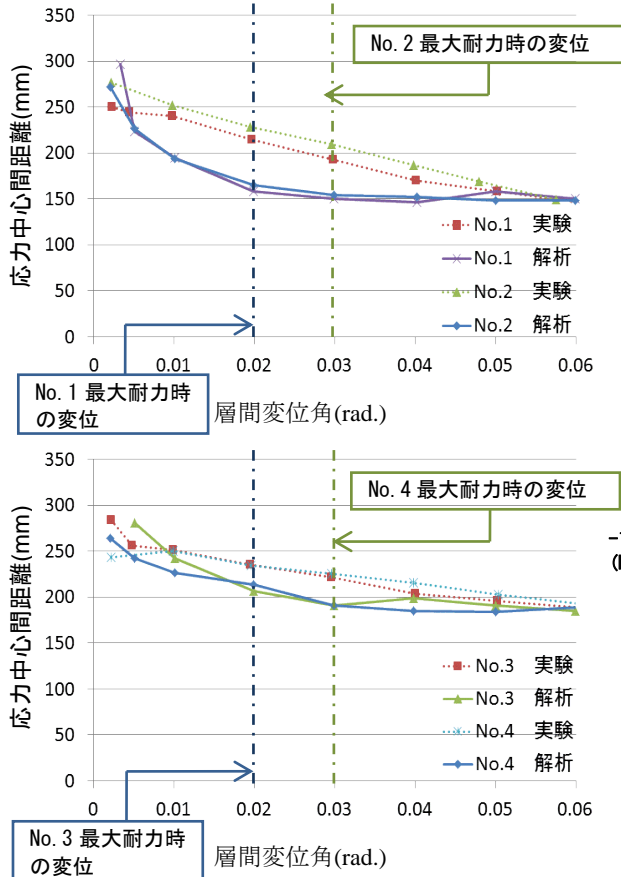


図-9 応力中心間距離-層間変位角関係

3.5 梁主筋応力-層間変位角関係

図-10に、No.1 と No.2の梁危険断面での梁主筋応力度-層間変位角関係を示す。図-3の層せん断力-層間変位角関係より、変位角の増大に伴い、どの試験体も層せん断力の低下がみられるが、梁主筋の引張応力度は増加する傾向にあった。

3.6 圧縮主応力コンター

図-11に、接合部垂直断面の圧縮主応力コンターを示す。変形が進むほど、コアコンクリートの圧壊が進行するため、圧壊部を迂回して応力が伝わり、接合部に広く圧縮ストラットが形成された。引張軸力を受ける試験体 No.2 では、変形が進むにつれて、圧縮ストラットの形が大きく崩れ、No.1 よりも応力集中が確認できなかった。

3.7 累積消費ひずみエネルギー

図-12に、各試験体の部材ごとの累積消費ひずみエネルギーの割合を示す。累積吸収ひずみエネルギーの定義は以下の式(1)による。

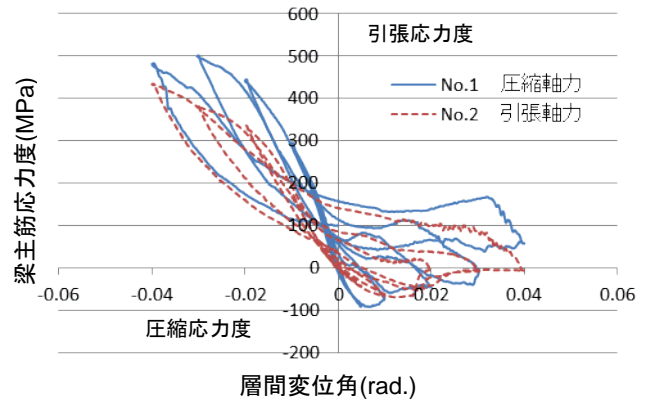


図-10 梁主筋応力度-層間変位角関係

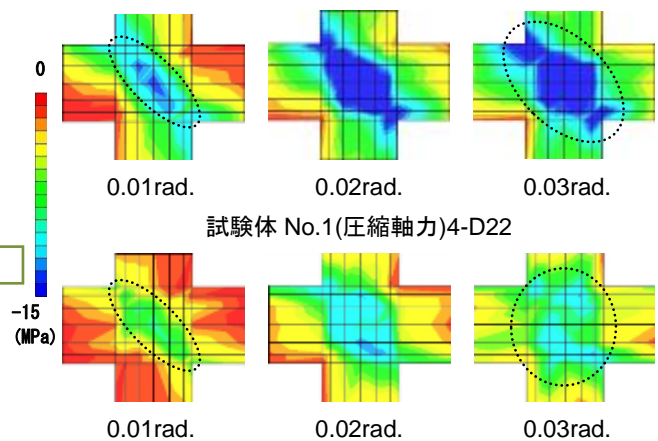


図-11 接合部断面の圧縮主応力コンター

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

$$U = \sum \Delta U$$

なお、式 (1) の記号は、U：累積消費ひずみエネルギー、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、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。

変形が進むに従い、柱が負担していたエネルギーは梁と接合部が負担するようになる。圧縮軸力を受ける試験体では梁と接合部付着の負担割合が引張軸力を受ける試験体よりも高く、引張軸力を受ける試験体では梁と付着が負担しない分、接合部における負担割合は増大した。

圧縮軸力を受ける試験体では、接合部付着の負担割合が高く、引張軸力を受ける試験体では、接合部内付着の負担割合は非常に小さいことが確認できた。No.2 に関しては、1/50rad.から接合部内付着が負担する割合が減少しても、接合部が負担するエネルギーの割合は増加し続けているので、接合部の付着劣化はひずみエネルギーの負

担割合に影響を与えないと考えられる。

最大耐力以降の負担割合の変動は小さくなり、1/25rad. 以降の変形では負担割合はほぼ一定となった。最終的には、全試験体とも接合部の負担割合が最も大きくなった。

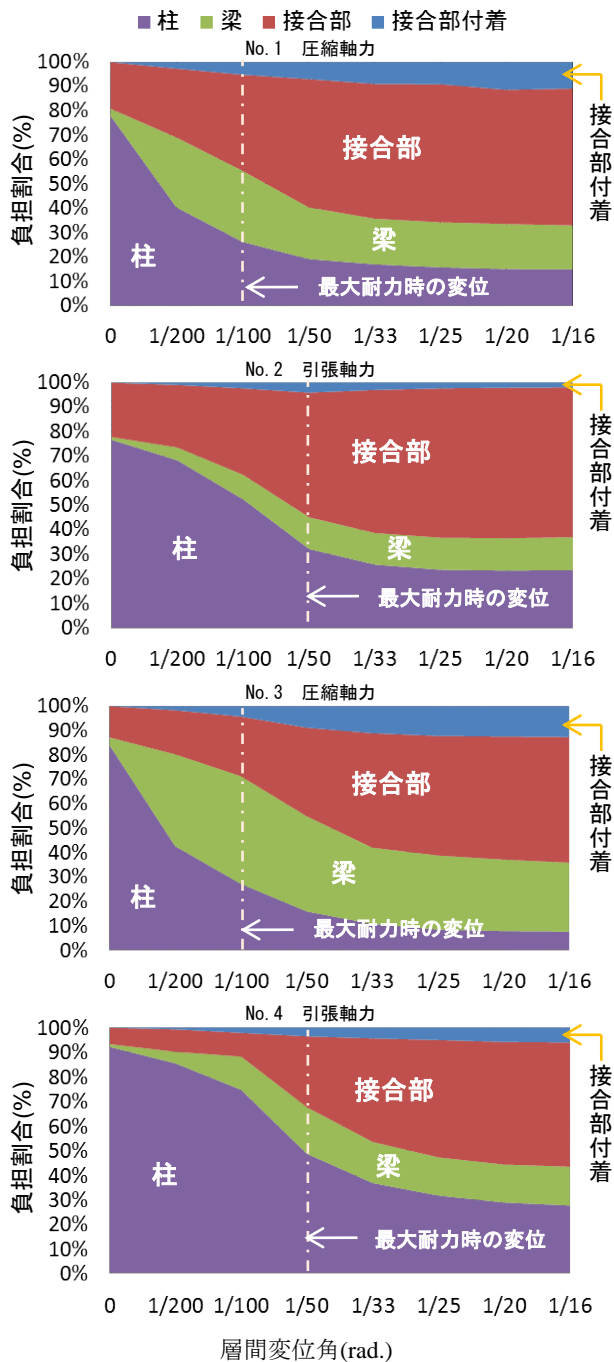


図-12 累積消費ひずみエネルギーの負担割合

表-4 最大耐力時の累積消費ひずみエネルギーの負担割合

試験体	最大耐力時 変位	柱	梁	接合部	接合部 付着
No.1	1/100	26.3%	29.1%	39.4%	5.2%
No.2	1/50	32.1%	13.0%	50.8%	4.1%
No.3	1/100	27.3%	44.0%	24.4%	4.2%
No.4	1/50	48.7%	18.9%	28.8%	3.6%

4 まとめ

本解析の範囲内であるが、以下の知見が得られた。

(1)層せん断力-層間変位角関係において、解析の最大耐力以降の耐力低下が実験とやや異なるが、初期剛性、最大耐力、破壊モードについては、実験と良好な対応を示した。

(2)梁主筋径が異なることによるせん断強度への明確な違いは見られなかった。

(3)実験と同様に、層せん断力の低下は、梁主筋の付着劣化による応力中心間距離の減少であった。しかし、梁主筋径の太い4-D25を使用した試験体で大きく応力中心間距離が減少したので、付着要素の材料特性の設定については、まだ改善の余地がある。

(4)変形が進むと、柱・梁接合部では圧壊部分を除いて圧縮主応力が伝達されるため、圧縮ストラット幅が広がった。

(5)累積消費ひずみエネルギーの負担割合より、軸力の違いが各部材の負担するひずみエネルギーの割合に大きく影響する事がわかった。圧縮軸力の場合には、接合部内の梁主筋付着と梁の割合が大きく、引張軸力の場合には、接合部内梁主筋の付着の働きは小さくなり、接合部と柱の負担割合が大きくなった。

参考文献

- 1) 森田真司, 北山和宏, 小山明男, 細野具貴: RC内柱梁接合部のせん断強度に及ぼす梁主筋付着と柱軸力の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.679-684, 1999
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 金成澤, 柏崎隆志, 野口博: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.349-354, 2011.6