

論文 梁側面が柱側面を越える偏心 RC 柱・梁接合部の 3 次元 FEM 解析

張 毅*1・柏崎 隆志*2・和泉 信之*3・野口 博*4

要旨：梁側面が柱側面よりも外側に突出した偏心柱・梁接合部を有する架構の構造性能を把握するために、偏心率、接合部内配筋および梁主筋量を試験体の変動要因とし、実験を行われた。本研究では、その実験試験体を対象とし、3次元FEM解析のモデルを構築し、繰り返し載荷時の解析を行い、実験結果との比較により3次元FEM解析手法の妥当性を示した。解析結果から得られた、実験で見られない内部応力状況、ひび割れ進展状況などを考察し、柱・梁接合部耐力は、偏心することにより低下し、偏心量の増大と共に低下率も大きくなることを解析上から検証した。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱・梁接合部、偏心接合、耐震性能、有限要素法、3次元解析

1. はじめに

RC構造では、空間の自由度を高めるため、壁柱を用いることがあるが、架構は、外装材との納まり等から、梁部材芯が柱部材芯に対して外側に偏心した形状となることがある。このような架構の柱・梁接合部は、偏心量によって、壁梁の側面を柱幅よりも外側に配置した形状となる。一般的に柱幅範囲内で梁が偏心したRC造柱・梁接合部に関する既往の実験研究では、柱と梁の偏心接合により生じる振り応力がせん断応力に累加されることから、偏心の無い場合より接合部の耐力が低下するとの知見が示されている¹⁾。しかし、柱側面を越えて梁片側面が突出して偏心した柱・梁接合部に関しては、その耐震性能は評価されていない。

本研究では、梁側面が柱側面を越える偏心する柱・梁接合部の力学的挙動を把握することを目的として、当研究室で開発された3次元FEM解析プログラムを用い、十字型RC柱・梁接合部の繰り返し載荷解析を行う。解析対象は、偏心の有無、接合部せん断入力量および接合部内部の配筋をパラメータとした実験試験体である。解析モデルは実験試験体の材料特性、内部配筋や境界条件などを模擬した3次元FEMモデルである。得られた解析結果から、接合部内部の応力伝達状況やひび割れの変形状態、接合部の変形や破壊性状などを考察する。また、柱側面を越えて梁片側面のみが突出して偏心した柱・梁接合部の力学特性を明らかにするため、ひび割れの3次元表現による検討を行う。

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勝田ら²⁾によって実験が行われたRC梁と扁平柱により構成される十字型接合部ある。解析では試験体を4体選定し、架構の形状は実大の約1/2~1/1.5程度の大きさで、柱断面 $B_C \times D_C = 300 \times 900\text{mm}$ 、梁断面 $B_B \times D_B = 260 \times 600\text{mm}$ 、梁スパン(加力点間距離) $l=3600\text{mm}$ 、階高(柱加力点間距離) $h=2400\text{mm}$ とした。図-1に試験体形状及び柱と梁の配筋詳細を示した。

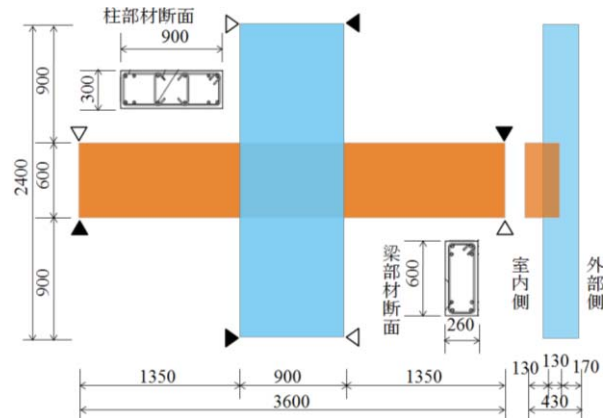


図-1 試験体形状及び断面配筋図²⁾ (mm)

試験体の変動要因は、偏心率 e 、接合部内配筋および梁主筋量とした。 e は梁芯の柱芯に対する偏心率であり、 $e=e_y/B_C$ (e_y : 偏心距離, B_C : 柱幅)としている。具体的に e は、No.1,2 を柱側面に梁芯が位置する $e=0.5$, No.3 を $e=0.3$, No.0 を偏心のない $e=0.0$ と設定している。接合部内のせん断補強筋は、図-3の接合部の配筋図に示すように、柱と梁の双方を配筋した。補強筋形状は、柱せん断補強筋を接合部外周に閉鎖型、梁せん断補強

*1 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 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)

筋を梁断面外周に閉鎖型とすることを基本とし、No.3のみ柱せん断強筋を柱断面内に閉鎖型、梁せん断補強筋をコの字型に配筋した。梁の引張主筋は、No.1を4-D22(SD390)、No.2、No.3およびNo.0を5-D22(SD685)とする。表-1、表-2にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。

表-1 コンクリートの材料特性

試験体	No.1	No.2	No.3	No.0
σ_B (MPa)	36.7	36.7	41.6	41.6
σ_T (MPa)	3.7	3.7	3.6	3.6
ϵ_{max} (μ)	2200	2200	2500	2500
E_c (GPa)	29.1	29.1	30.3	30.3
偏心率 e	0.5	0.5	0.3	0.0

表-2 鉄筋の材料特性

径	材質	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D22	SD390	456	655
D22	SD685	737	923
D22	SD490	525	713
D10	SD295A	383	538
U9.0	U1275	1383	1465
D10	UD785	953	1003

2.2 解析モデル

本研究では余・野口³⁾により開発され、洪・野口⁴⁾により改良された3次元FEM解析プログラムを用いた。コンクリートに8節点ソリッド要素、応力-ひずみ関係は圧縮側の上昇域ではSaenz式、圧縮下降域では横補強筋の拘束効果を考慮したKent-Park⁵⁾式により定義した。引張側の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⁶⁾により定義した。図-2にコンクリートの応力-ひずみ関係とひび割れ後の圧縮強度低減を示す。また、ひび割れは分布ひび割れモデルによって表現した。

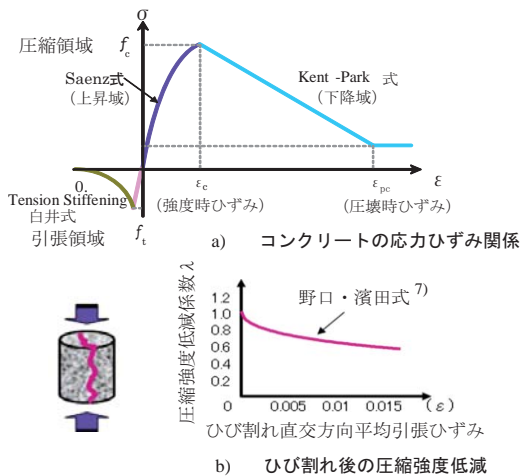
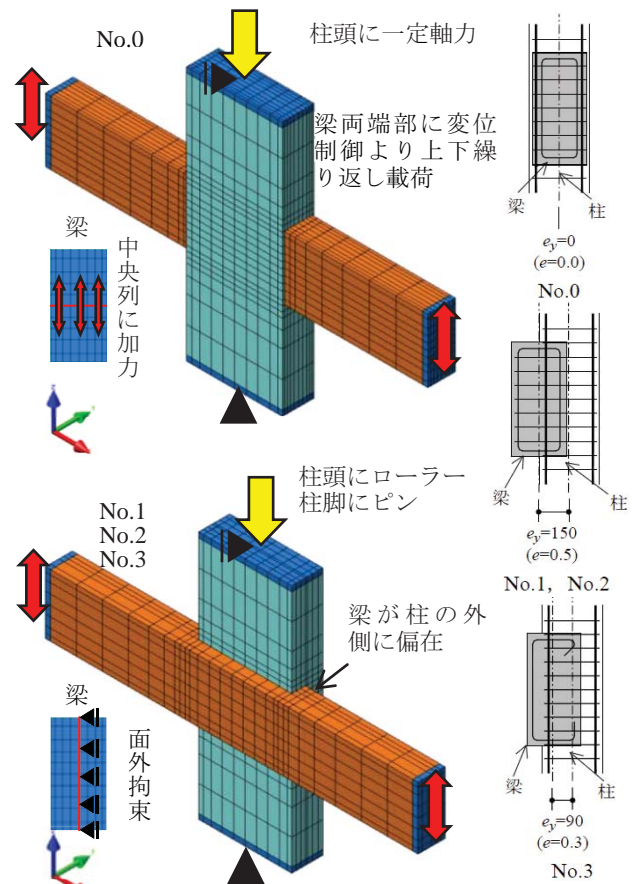


図-2 コンクリートのモデル化

鉄筋は軸方向のみ剛性を有する2節点トラス要素で、応力-ひずみ関係には、包絡線はバイリニアを仮定した。鉄筋とコンクリート間の付着すべり関係は完全付着とした。各モデルの詳細は文献³⁾⁴⁾を参照されたい。

2.3 要素分割と境界条件

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いので、解析時間を短縮するため、要素分割は接合部付近を細かく、それ以外を粗く分割した。No.0では、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。境界条件により柱、梁端部の拘束と加力部分には応力集中を考慮して、強度は5倍を上げて補強した。



2.4 加力方法

柱頭に軸力導入後、柱脚位置を固定し、梁両端部にせん断力を変位制御によって正負交番繰返し載荷した。実験と同様に、ねじれを防止するために、面外方向には、梁端・柱端の加力・反力点位置のみ拘束した。図-3に示すように、柱軸力 N は、軸力比 $\eta=0.1$ ($\eta=N/(A_c \cdot \sigma_B)$, A_c : 柱断面積, σ_B : コンクリート強度) とし、1000kN (No.1,2), 1080kN (No.3,0) を載荷し、その後梁両端中央列に強制変位を与える繰返し載荷を行った。図-4に実験の加力装置を示す。

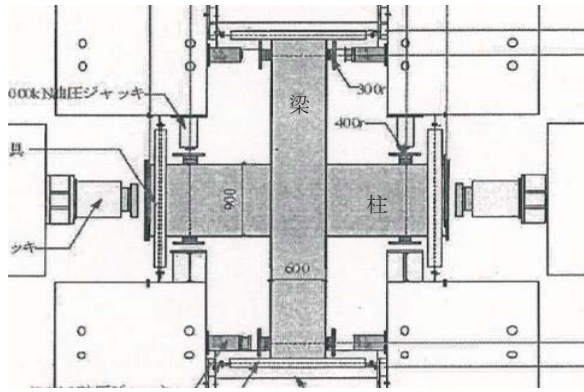


図-4 加力装置²⁾

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変位角関係

図-5 に各試験体の層せん断力-層間変位角関係について実験と解析の比較を示す。各試験体において、初期剛性は実験よりやや高いが、最大耐力に関しては試験体の No.1 において、解析が実験を若干下回る結果となったが、その他は概ね良好に対応した。偏心率 $e=0.5$ の No.1 では、実験と同様に $R=1/200$ 程度で梁曲げ降伏に至り、また最大耐力以降は、実験と同様に耐力を維持した。No.1 と同じ偏心率で、せん断入力量が大きい試験体の No.2 では、最大耐力時までに梁主筋は降伏したが、主筋降伏後の剛性の低下が顕著となり、接合部のせん断破

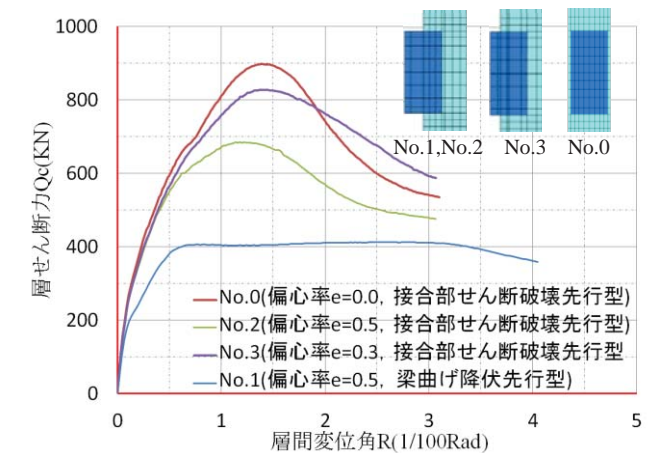
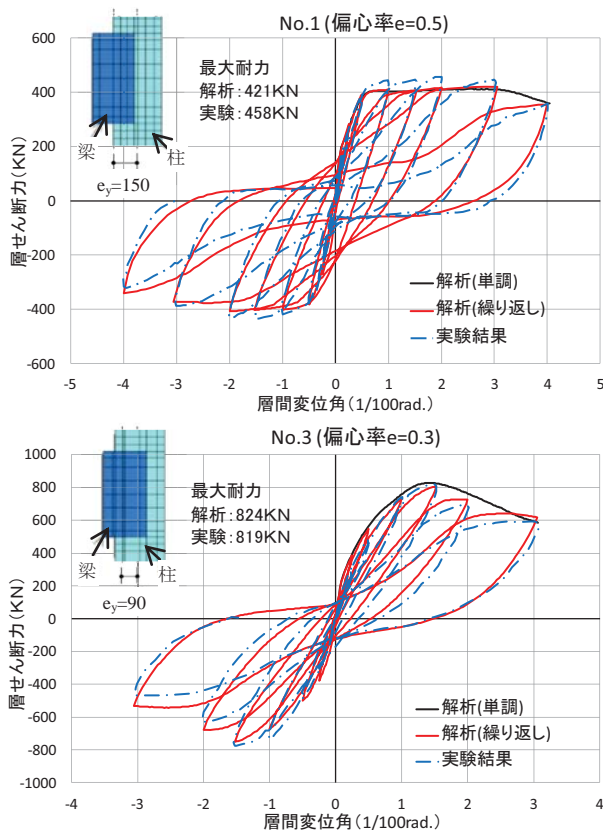


図-6 単調載荷解析の比較

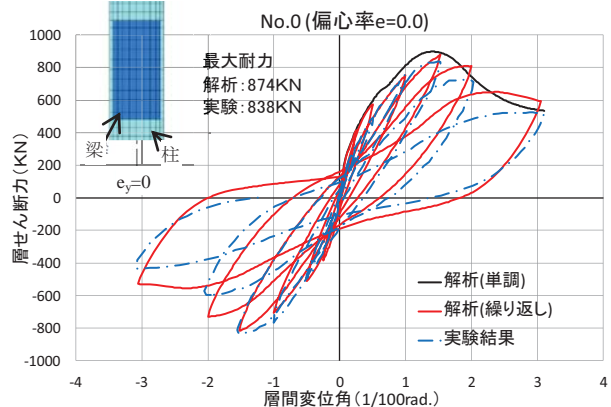
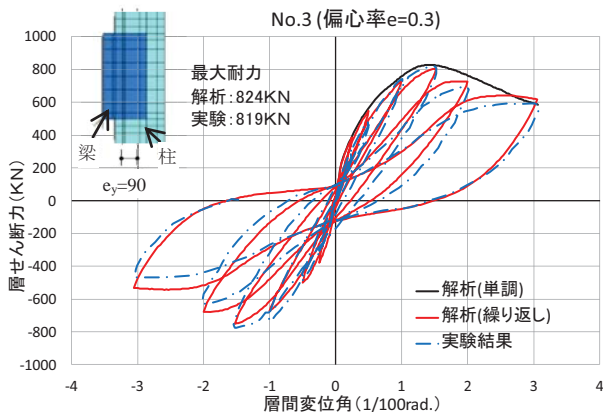
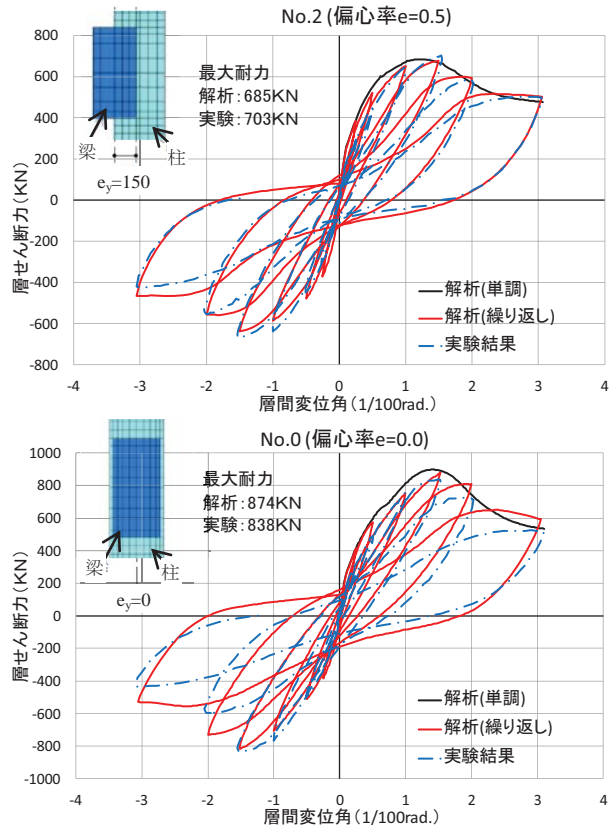


図-5 層せん断力-層間変位角関係

壊となった。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。

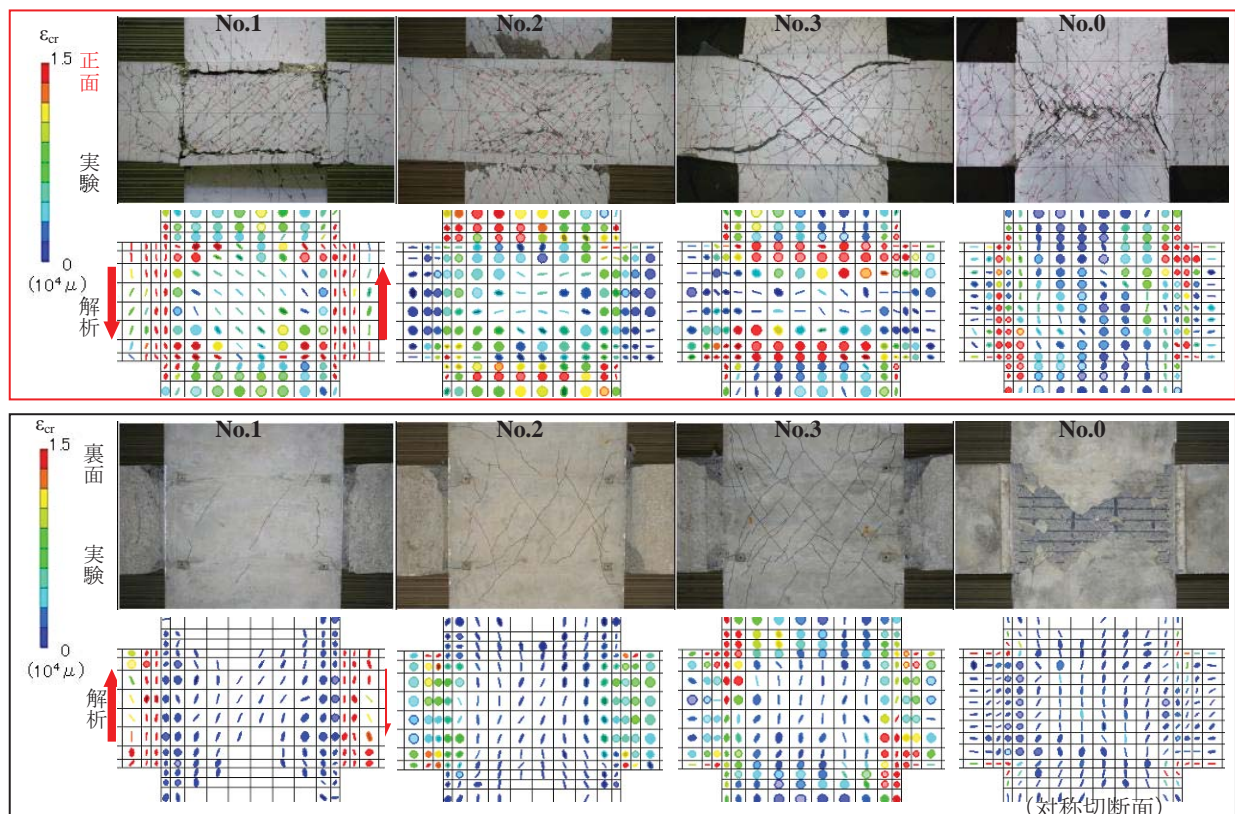
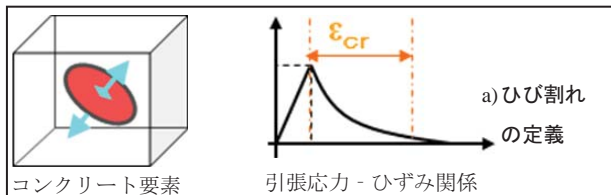
図-6 には試験体同士の単調解析結果の比較について示す。各試験体の初期剛性がほぼ同じで、ひび割れ発生後の剛性には、偏心率 e が大きくなるほど小さくなる傾向が見られる。

各試験体の最大耐力について、偏心接合によって試験体の最大耐力が偏心率の増大と共に低下することが確認できた。同一配筋で無偏心の No.0 と偏心率 $e=0.5$ の No.2 の試験体については、偏心により最大 20% の耐力低下が確認できた。

3.2 ひび割れ性状

本解析では、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ると仮定した。図-7 a)に示すように、ひび割れ面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の方向を示す。引張主ひずみは各要素における積分点での値の平均を用いた。

図-7 b)に解析から得られた接合部近傍の表面のひび割れ状況と実験の最終状況の比較を示した。この図から、破壊状況が良く対応していることがわかる。R=1/66rad.前後の最大耐力時には、偏心有りの試験体 No.1, No.2, No.3 では圧縮側の付け根部分と接合部対角領域に大きなひび割れが進展している。無偏心の No.0 では接合部の対角領域にひび割れが集中している。また、No.1 では柱内部に定着されていない梁隅筋の周りのコンクリートのひび割れが顕著になり最終破壊に至った。No.2 は最大耐力時に接合部のせん断破壊と共に No.1 と同じひび割れが卓越し、最終破壊に至った。No.3 と No.0 は、最大耐力にかけて接合部のせん断破壊に至った。



b)破壊状況のひび割れ比較

図-7 ひび割れの定義と破壊状況のひび割れ比較

全試験体において、偏心率による、柱付け根部のせん断ひび割れ幅が拡大することが確認できる。なお、接合部の柱側の損傷は、偏心率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られ、梁偏心の影響が認められる。以上のことから、分散ひび割れモデルを用いた解析により梁曲げひびわれ、柱曲げひびわれ、接合部せん断ひび割れを概ねに評価できることがわかる。

3.3 圧縮主応力コンター

図-8 に接合部の圧縮主応力コンターを示している。変位角 R=1/100rad.前後時に、全試験体とも梁・柱接合部の対角方向に圧縮ストラットが明らかに形成され、特に梁と柱が接する端部での圧縮力の集中が顕著となっている。偏心試験体の接合部の偏心側表面では応力伝達範囲の拡大が見られる、柱の曲げ圧縮域から接合部に伝達された圧縮応力が接合部内部で対角方向の高応力領域を形成する。これは柱・梁接合部の偏心側には圧縮ストラット機構が作用するためと考えられる。また、大偏心の No.2 では、梁主筋量が多いので、圧縮主応力が梁に沿って伝達された。偏心なし No.0 では、接合部の両側面においてほぼ同様な高圧縮応力が分布している。なお、梁および柱の曲げ圧縮域から伝達された応力が接合部内部で対角方向に圧縮応力として現れ、それによって対角方向への応力伝達機構、即ち圧縮ストラット機構により応力伝達されると考えられる。

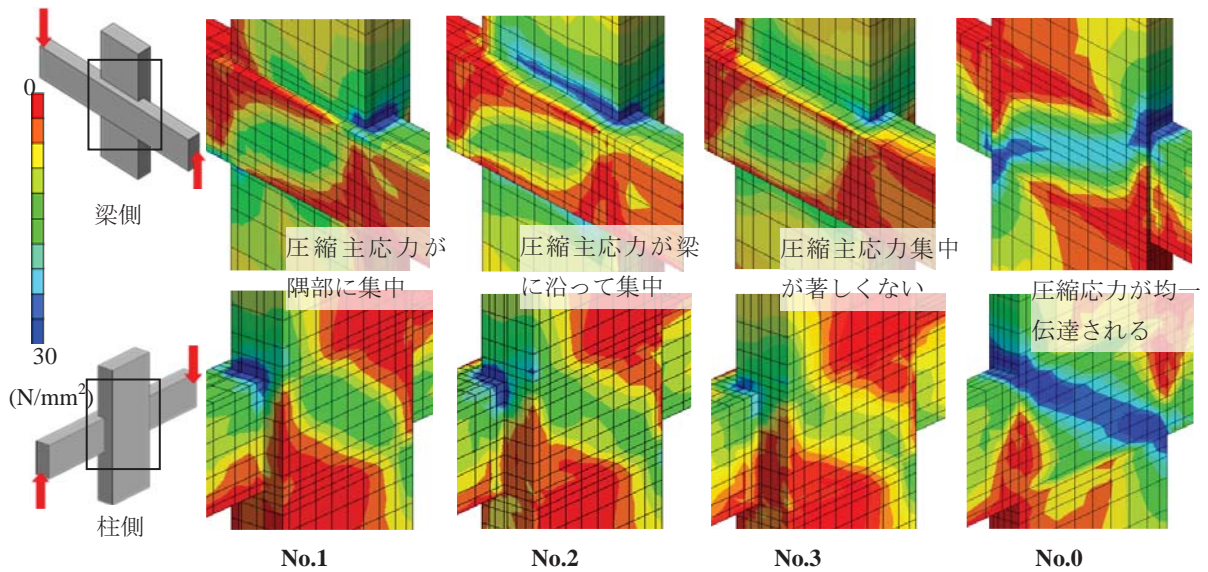


図-8 接合部の圧縮主応力コンター (R=1/100Rad.)

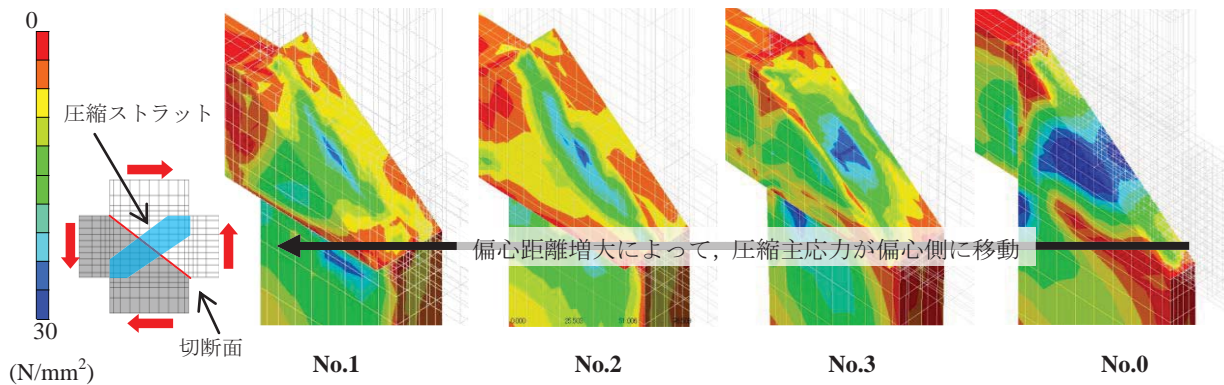


図-9 接合部対角切断面の圧縮主応力コンター (R=1/100Rad.)

図-9には、接合部を対角線に沿って切断して得られた斜め断面上の圧縮主応力コンターを示した。図より、斜め断面上の圧縮主応力の分布は、偏心の有無によって大きく異なっていることが認められる。偏心なしNo.0では、基本的に幅方向において、応力がほぼ均一に伝達されている。柱せいの方向から見ると、中央ほど圧縮応力が大きくなっており、斜め断面上の中央から長辺の約1/3範囲内で高応力領域が見られる。偏心接合部では、梁偏心側に高応力領域が形成され、圧縮応力が偏心側に偏って集中的に伝達されていることが認められた。接合部対角切断面上の圧縮応力分布は、圧縮ストラットをそれと直角方向に切断して表したものである。

3.4 接合部中央断面の圧縮主応力コンター

図-10に、接合部中央断面の圧縮主応力コンターを示す。図-11には柱と梁が重なっている部分の接合部中央断面のイメージを示している。図により、偏心率が大きくなるに従い、接合部の対角領域の圧縮ストラットが小さくなる傾向が見られた、これは応力伝達できる有効接合部が小さくなる原因と考えられる。偏心率

$e=0.5$ のNo.1では接合部の対角領域のみに応力集中していることが認められた、同じ偏心率 $e=0.5$ けど主筋量が多いNo.2では梁主筋に沿って応力が伝達された、さら

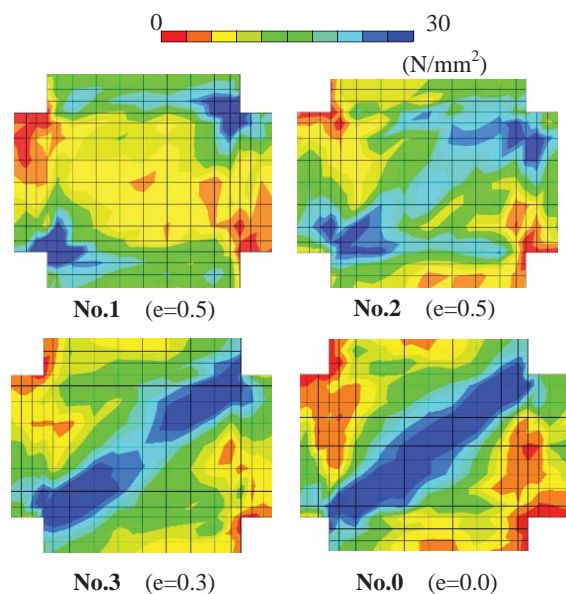


図-10 接合部中央断面の圧縮主応力コンター (R=1/100Rad.)

に、圧縮ストラットは中間部分で形成されたを見られた。梁主筋量が多いほどその傾向が顕著であることがわかった。偏心率 $e=0.3$ のNo.3では、偏心により圧縮ストラットが連続してないことが見られた。このことから、偏心率が大きくなると、接合部の応力伝達が低減になると言える。梁主筋の配筋位置及び配筋量が梁主筋に沿って方向の応力伝達に影響すると考えられる。

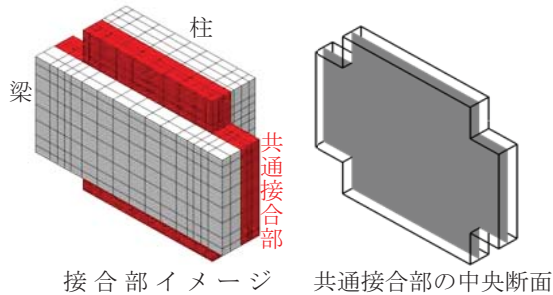


図-11 接合部中央断面

3.5 接合部内梁主筋付着性状

図-12 に梁主筋のひずみ分布を示す。ひずみの計測は、図-12(a)に示すより、1 段目隅筋について示しており、柱内に定着された主筋（柱側：赤色）と梁が偏心下側の主筋（梁側：黒色）それぞれを示している。

図-12(b)より、梁主筋ひずみ分布に関して、解析は実験と良く対応している。これについて、 $R=1/200rad$ までは比較的付着が良い状態なので、完全付着が仮定できる範囲での再現であり、妥当性があると考えられる。梁が偏心した場合、梁位置における梁側の主筋ひずみは、

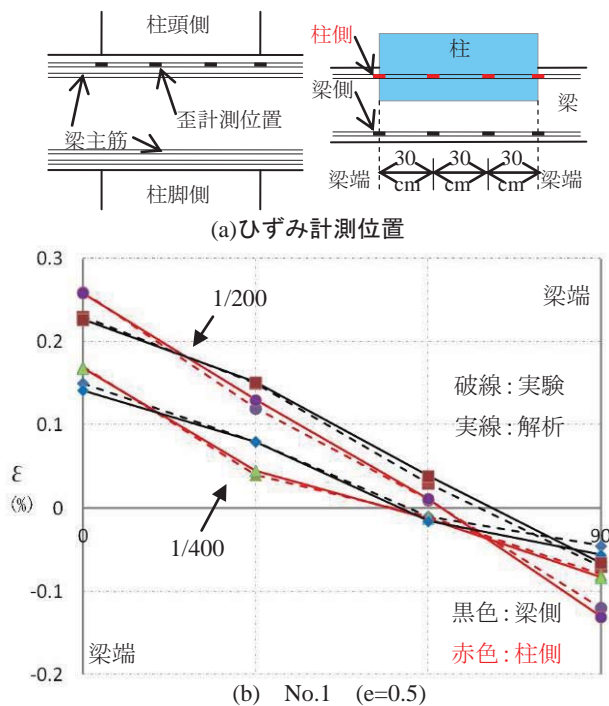


図-12 梁主筋ひずみ分布

柱側に比べて小さくなっていることが見られる。これにより、引張応力を受ける場合ではひずみが小さく、圧縮応力を受ける場合では大きくなるのがわかる。

4. まとめ

本研究の範囲内であるが、以下の知見が得られた。

- (1) 剛性、耐力とも解析結果は実験結果とほぼ同等であった。また、最大耐力までの挙動及びひび割れ分布状況とコンクリートの破壊性状は実験と良い対応を示した。
- (2) 偏心を有する柱・梁接合部の耐力は、偏心することにより低下し、偏心量の増大と共に低下率も大きくなる。
- (3) 偏心率が大きいほどせん断ひび割れの損傷の進展が著しい。
- (4) 柱・梁接合部内の圧縮ストラットが偏心率の増大に伴い、接合部の偏心側に移動する。梁主筋の配筋量の違いにより、接合部への入力レベルが異なり、応力伝達に影響を与える。

謝辞

本研究を行うにあたり、大成建設技術研究所の勝田庄二氏、竹崎真一氏らから貴重な実験データを提供して頂きました。ここに記して深謝致します。

また、本研究は、科学研究費補助金・基盤研究C（研究代表者：野口博）により行われた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計一特徴的被害の原因と設計への提案一、1998.10
- 2) 杉山智昭，山川慶二郎，西川泰弘，成原弘之，勝田庄二ら：梁側面が柱側面を越えて偏心したRC造柱・梁接合部の構造性能に関する研究その1～3，AIJ大会梗概，pp419～424,2010
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Park R.， Kent D. C. and Sampson R. A. "Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading," Proc. of ASCE, ST7, Jul.1972
- 6) 佐藤稔雄，白井伸明：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引張応力-歪曲線にボンド特性を考慮した非弾性解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1615-1616, 1978.9
- 7) 濱田聡，野口博：地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験，JCIコロキウム論文集，RC構造のせん断設計法に関する解析的研究，pp.17-22，1989.10