

論文 繰返し載荷時の直交部材付き RC 偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究

洪 杰^{*1}・柏崎 隆志^{*2}・野口 博^{*3}

要旨：柱心と梁心が偏心して接合した柱・梁接合部について、直交梁およびスラブの有無を変数として取り上げ、正負交番繰返し載荷時の 3 次元 FEM 解析を行い、直交梁およびスラブが偏心側および非偏心側に付く場合や、偏心のない柱・梁接合部の片側および両側に付く場合の、荷重変形関係やせん断耐力、ひび割れの発生状況、接合部内部のせん断変形、捩り変形、圧縮主応力の伝達やせん断応力分布について検討を行った。解析結果から、偏心接合した場合に偏心側に偏って高応力度で圧縮応力が伝達されることや直交梁およびスラブが付くことにより応力集中が緩和されせん断耐力が改善されるなどの知見が得られた。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱・梁接合部、偏心、有限要素法解析、繰返し載荷

1. はじめに

兵庫県南部地震では RC 建造物の柱・梁接合部に多くの被害が見られ、その原因の一つとして偏心接合による影響が指摘¹⁾された。筆者らは偏心接合部の解析的研究^{2~4)}を行い、接合部の変形や応力状態等に関して検討してきた。直交梁やスラブが偏心接合部に及ぼす影響についても検討され、直交部材が偏心側に取り付く場合に関する検討の必要性も指摘⁴⁾した。

本研究では、偏心の有無および直交部材の有無を変数とした柱・梁接合部について正負交番繰返し載荷時の 3 次元有限要素法 (FEM) 解析を行い、偏心接合部の耐震性能について荷重変形関係や接合部内部の変形、応力伝達等から検討を行った。

2. 解析対象試験体

解析対象試験体は藤井ら^{5,6)}により実験された外周構面を対象とした十字型柱・梁接合部試験体の中から、偏心のない CN, CN の片側に直交梁および床スラブ (以下、直交部材と略称) が取り付いた CS, 柱心と梁心の偏心距離を 135 mm とした EN, EN の非偏心側 (偏心して梁から寄った柱面の側を偏心側とし、その対面側を非偏心側とする) に直交部材の取り付いた ES の 4 体を選んだ。さらに、CN の両側に直交梁およびスラブを取り付けた CSv, 偏心接合部 EN の偏心側に直交梁および床スラブを取り付けた ESv の 2 体の仮想試験体を追加し、計 6 体とした。解析対象試験体の概要を表-1 に示す。全試験体ともに、直交梁および載荷梁の断面は 750×450 mm, 柱断面は 700×800 mm, 床スラブ厚さは 130 mm, 梁および柱の反曲点間距離はそれぞれ 4500 mm, 2730 mm となっている。

実験で示されたコンクリートと鉄筋の材料特性を表-2 と表-3 に、接合部の形状および配筋を図-1, 表-4 に、載荷装置を図-2 に示す。

表-1 解析対象試験体の概要

実験因子	偏心	偏心距離 (mm)	接合部せん断余裕度	床スラブ・直交梁
CN	無	—	1.17	無
CS	無	—	1.0	片側
EN	有	135	1.17	無
ES	有	135	1.0	非偏心側
CSv *	無	—	1.05	両側
ESv *	有	135	1.0	偏心側

注) *付きは仮想試験体を示す。

表-2 コンクリートの材料特性⁵⁾

圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
33.4	2000	25900	2.21

表-3 鉄筋の材料特性⁵⁾

鋼種	呼び径	用途	降伏強度 (N/mm ²)
SD390	D29	柱主筋	464
	D25	梁主筋	462
SD295A	D13	せん断補強筋	365
	D10	スラブ筋	369

表-4 試験体の部材断面⁵⁾

試験体	柱(800×700 mm)		梁 (450×750 mm)			接合部
	主筋	帯筋	主筋	肋筋	スラブ筋	帯筋
EN,CN	14-D29	2-D13 @100	8-D25	2-D13 @100	—	2-D13 ×5
ES,ESv					10-D10	
CS,CSv						

*1 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)

*2 千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 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 教授 工博 (正会員)

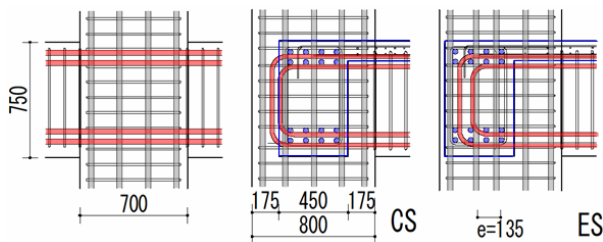


図-1 接合部の形状および配筋⁶⁾

3. 解析方法

本研究では、内田、余、柏崎、野口^{7,8)}らにより開発された 3 次元非線形有限要素法解析プログラムを用いて、正負交番繰返し載荷時および単調載荷時の解析を行った。以下解析モデルの概要を示す。

3.1 材料モデル

(1) コンクリート

コンクリートはアイソパラメトリック 8 節点ソリッド要素を用いた。構成則は等価 1 軸ひずみに基づいた直交異方性重弾性モデルを用いた。Willam-Warneke らの 5 パラメータモデルによる破壊曲面から応力ひずみ関係の最大強度点を求めた後、圧縮側での上昇域は Saenz 式を、下降域は Kent-Park モデルを用いた。引張側ではひび割れた後の引張軟化は白井モデルを用いた。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には野口・飯塚式を用い、ひび割れ面に沿ったせん断剛性は修正前川モデルを用いてせん断応力ひずみ関係から求めた。本解析での垂直応力ひずみ関係は、繰返し載荷時には一方固定軸上で適用し、単調載荷時には回転ひび割れモデルを用いた。以上、本解析で用いられたモデルの詳細および関連文献は文献^{7,8)}を参照されたい。コンクリートの圧縮強度、圧縮強度時ひずみ、引張強度およびヤング係数は表-2の実験結果に基づいた。

(2) 鉄筋

鉄筋は軸方向剛性のみを考慮した 2 節点線材要素を用いた。応力ひずみ関係はバイリニアモデルを用い、ヤング係数は $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とし、降伏強度は表-3 の実験結果に基づいた。降伏以後の剛性は初期剛性の 1/100 と仮定した。

(3) 付着

鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着と仮定した。

3.2 要素分割および境界条件

解析対象試験体の要素分割および境界条件を CS と ES の場合を例として図-3 に示す。形状が左右対称の試験体 CN および CSv では試験体の対称面をローラーとし、片側のみについてモデル化を行った。実験と同様な境界条件(図-2 の載荷装置で、柱上反曲点をピンローラー、柱下反曲点をピン支持、梁両端はピン位置で加力)を与

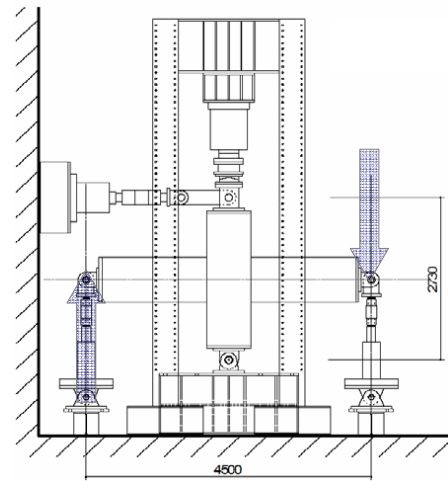


図-2 載荷装置⁶⁾

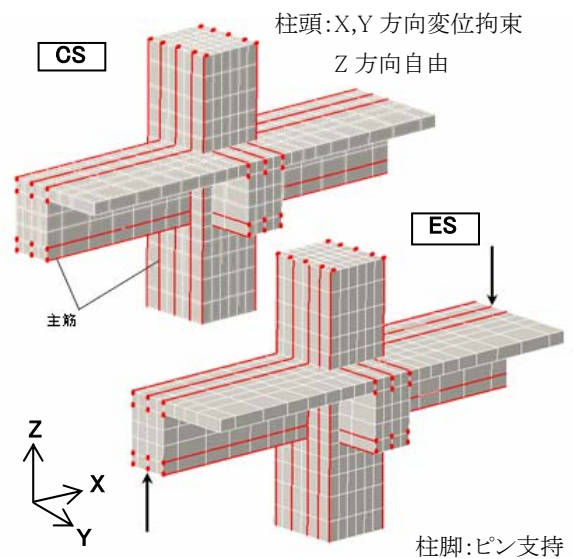


図-3 試験体の要素分割および境界条件

えるように、梁両端部の梁断面中央付近の 1 節点上で正負交番繰返し載荷を行い、柱頭および柱脚は柱断面中央の 1 節点上で水平拘束およびピン支持とした。また拘束点付近のコンクリート要素が破壊しないように梁および柱の両端部のコンクリート要素の強度を大きくし、変形は弾性範囲内とした。鉄筋要素は離散モデルを用い、安定して計算させるために試験体の外側に配置し、梁および柱の主筋は曲げ耐力が元の試験体と等しくなるように主筋の断面積を計算し直した。柱の軸圧縮力は実験と同じく 1770KN と一定に載荷し、せん断力の繰返し載荷は 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33 で各 1 回ずつ行った。

4. 解析結果

4.1 層せん断力-層間変形角関係

図-4 に繰返し載荷および単調載荷時における各試験体の層せん断力と層間変形角の関係を示す。単調載荷時

の層せん断力-層間変形角関係は実験結果より高く評価されるものの、繰返し載荷時にはいずれも正負側ともに実験結果と最大耐力においてはよい対応を示している。仮想試験体を含めた6体試験体は実験と同様に層間変形角1/67で最大耐力を向かっている。実験では梁降伏後に接合部が破壊したことに対し、解析では層間変形角1/100の付近で鉄筋が降伏した。また、解析では初期剛性が実験より高く、履歴ループの形状における逆S字形表現や、最大耐力後の耐力低下の表現がまだ不

十分であるが、これらは本解析において鉄筋とコンクリート間の付着がモデル化されていなかったこと、繰返しルール上においてひび割れたコンクリートの劣化表現が過小評価された等の原因が考えられ、今後解析上のモデル化およびプログラム上の対応を必要としている。

4.2 せん断耐力

図-5では解析結果から得られた各試験体の最大耐力を偏心のない接合部CNの最大耐力を用いて無次元化した場合の比較を示す。無偏心接合部CNに対して、片側に直交部材の付いたCSでは約1割程度の耐力上昇を、両側直交部材付きのCSvでは約2割以上の耐力上昇を示している。また、CNのせん断耐力をCSvのせん断耐力により除すると0.83となり、これは靱性指針⁹⁾の直交梁の有無による補正係数 $\phi=0.85$ とよく対応している。偏心接合部ENでは1割以上の耐力低下を示している。偏心接合部ENに直交部材が付くことにより耐力低下が制御され、無偏心接合部のCNとほぼ同等以上の値を示し、偏心側に直交部材の付いたESvでは非偏心側に直交部材の付いたESより耐力が若干高く評価されている。

4.3 ひび割れ状況

図-6に層間変形角1/67時におけるひび割れの発生状

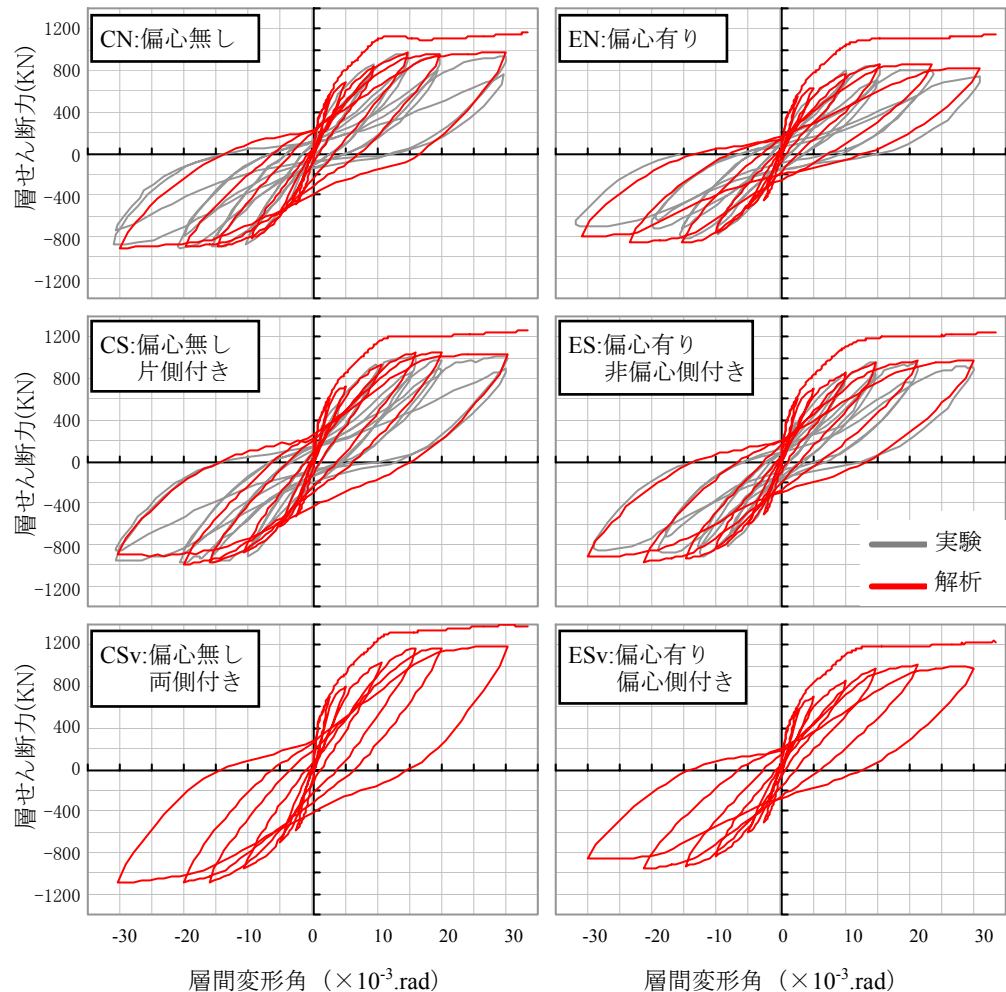


図-4 層せん断力—層間変形角関係

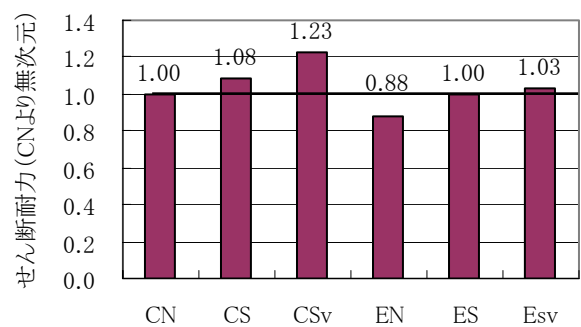


図-5 各試験体のせん断耐力

況を示す。本研究では、引張主ひずみが引張強度時ひずみを超えた場合にひび割れが生じたと仮定し、引張主ひずみに引張強度時ひずみを引いた値をクラックひずみとして定義し、ひび割れ幅の大きさを表現した。ひび割れ面の方向については、円盤を用いて、円盤の法線と引張ひずみの主軸を一致させることにより表現した。また、クラックひずみが最大値となる積分点のデータを用いて、コンクリート要素の中心位置に描画した。いずれの試験体においても層間変形角の早い内に接合部側梁端部から曲げひび割れが先行して発生し、せん断力の増加

とともに梁の内部に急速に拡散しひび割れの大きさも増大している。その後多少は遅れながらほぼ同時に接合部内部にも拡散している。特に偏心接合部 EN では曲げ引張を受ける梁端部から、偏心側の接合部パネルで先行して発生し、徐々にパネル中心および接合部内部に拡散、伝播している。

図-6 で示すように、最大耐力時には全試験体ともに梁の危険断面に大きな曲げひび割れが顕著に現れ、梁内部ではせん断ひび割れが広範囲にわたって発生している。また接合部の内部においてはほぼ同じ方向を向きながら斜めのせん断ひび割れが発生している。偏心のない試験体 CN では片側および両側に直交部

材が付くことにより接合部内部のせん断ひび割れが若干小さくなる傾向を示している。偏心接合部ではいずれも偏心側のほうが非偏心側に比べひび割れ幅が大きくなっている。非偏心側に直交部材の付いた ES では直交部材の付いていない EN に比べ、偏心側の接合部パネルではそれほどひび割れの開きが収まっていないのに対して、偏心側に直交部材の付いた ESv ではひび割れの開きが制御されていることがわかる。また、偏心のない接合部 CN では接合部内部のせん断ひび割れがほぼパネルに直交して生じることにに対して、偏心接合部の EN では振り応力の付加によりパネルの直交方向から多少回転して生じていることが確認された。また、曲げ圧縮を受ける接合部側の梁端部では圧縮によっても梁心とほぼ平行方向にひび割れが生じていることが見られる。最大耐力時には柱にも曲げ引張を受ける接合部側の端部にひび割れが大きく開いている。直交部材の付いた CS, CSv, ES, ESv では直交梁、スラブにもひび割れが進展している。

4.4 振り変形

図-7 に層間変形角 1/67 時の柱軸方向における振り角の分布を示す。本研究では柱と接合部の断面が接合部の中央部分の断面に対する相対回転角を振り角と定義した。形状が左右対称の CN および CSv では振りによる変形が

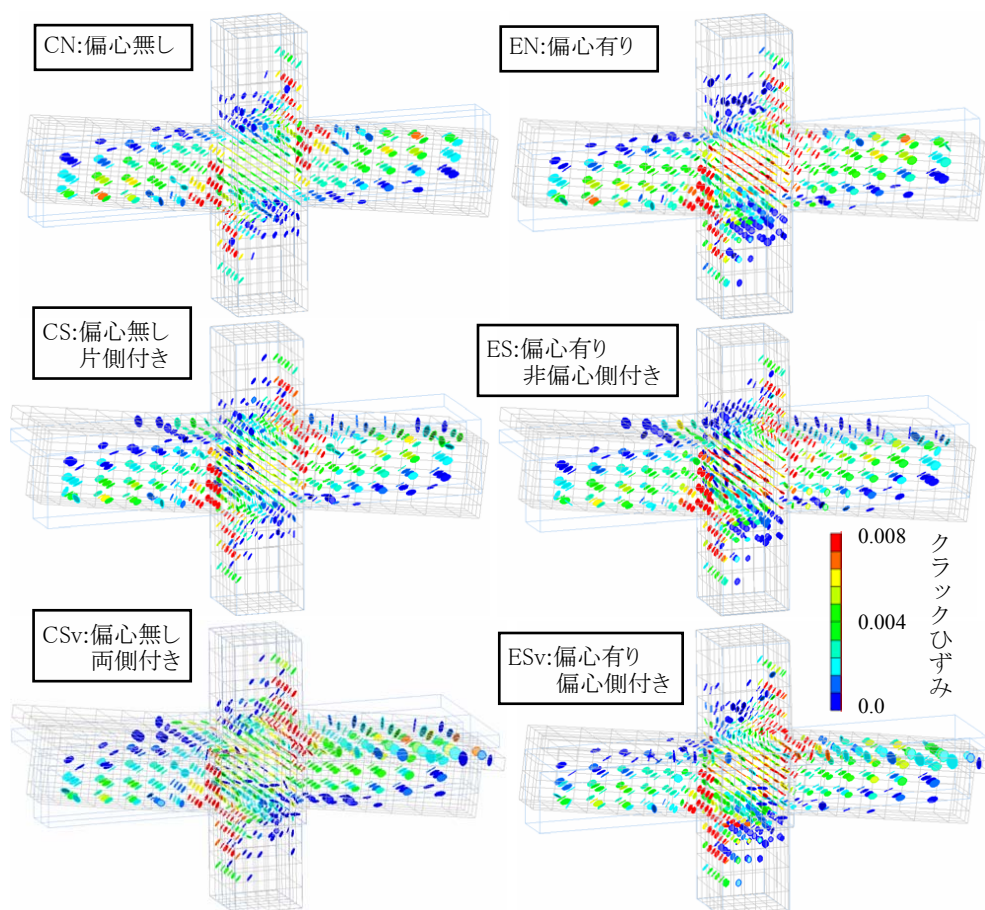


図 6 ひび割れ発生状況 (R=1/67, 変形 10 倍)

生じなく、片側に直交部材の付いた CS でも振り変形が認められない。偏心接合した柱・梁接合部では直交部材の有無にかかわらず振りによって大きく変形が生じていることがわかる。偏心接合部の内部では振り変形が集中的に生じており、接合部以外の柱部分ではねじりによる変形が見られず、振り角がほぼ一定となっている。ただし、直交部材が付くことにより接合部内部での振り変形が若干小さくなる傾向を示し、これにより柱部分での振り角が小さく現れる。偏心側に直交部材の付いた試験体 ESv では非偏心側に直交部材の付いた試験体 ES より柱部分での振り角が若干大きい値となっているが、これは偏心側に直交部材が取り付けることによりねじり変形への拘束効果が現れる一方、偏心側に取り付けいたスラブから入力されるせん断力により生じる振りモーメントが、柱と梁の偏心接合により生じる振りモーメントに付加され、接合部のねじり変形を増大させたためと思われる。偏心接合により生じる振り変形は筆者らの既往の研究結果^{2~4)}と同様の傾向を示している。

4.5 せん断変形角

図-8 に層間変形角 1/67 時の接合部幅方向におけるせん断変形角の分布を示す。偏心のない接合部では接合部の内部ほどせん断変形が大きくなる傾向を示している。

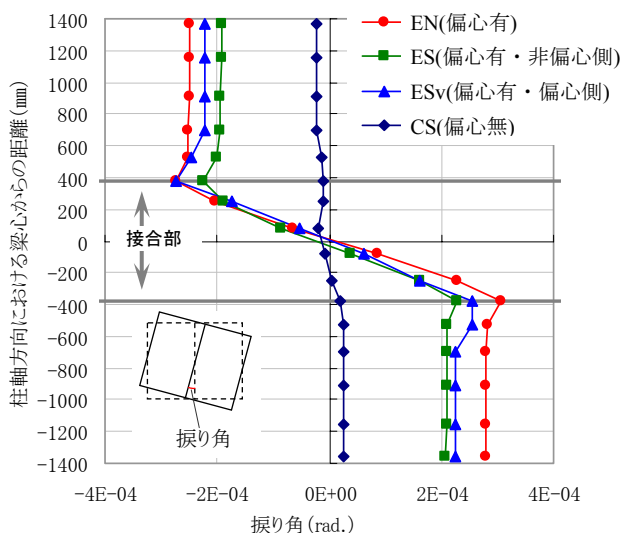


図-7 柱軸方向における振り角分布 (R=1/67)

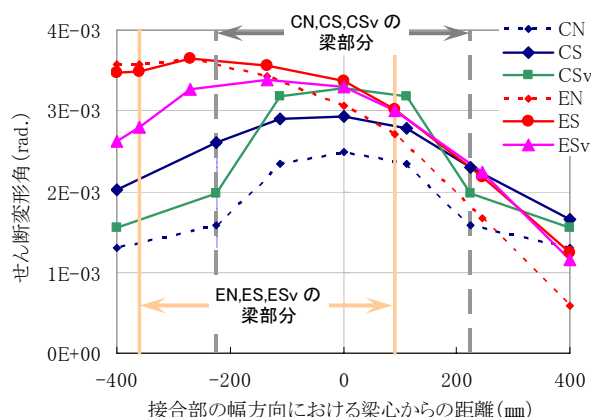


図-8 接合部幅方向におけるせん断変形角分布(R=1/67)

片側に直交部材の付いた CS では直交梁の拘束効果により、直交部材の取り付け側がそうでない側よりせん断変形が若干小さくなる傾向を示す。偏心接合した試験体ではいずれも偏心側のせん断変形が非偏心側より大きくなる傾向を示している。偏心接合部に直交部材が付く場合、直交部材の取り付け側では直交梁の拘束効果により、直交部材の付いていない EN よりせん断変形が小さくなっていることがわかる。また、偏心のない試験体では直交部材が付く場合、直交部材の数が多いほど接合部内部でのせん断変形が大きくなる傾向を示しているが、これは直交梁が付くことにより接合部のせん断変形への拘束効果が現れる一方、スラブからはせん断力入力が増加されせん断変形を増大させるためだと思われる。

4.6 圧縮主応力およびせん断応力分布

図-9 に偏心接合部 EN の梁心を通る接合部パネルでの圧縮主応力分布を、図-10 に接合部対角方向に沿って切断して示した場合の圧縮主応力分布を、図-11 に梁心を通る水平断面での圧縮主応力分布を、図-12 には図-11 で示した断面でのせん断応力 (X 方向成分) 分布を示す。図-9～12 は層間変形角 1/67 時の結果から得られた。

(1) パネルでの圧縮応力伝達

本解析では試験体 6 体ともに、接合部内部では圧縮ストラットによる応力の伝達が確認された。6 体ともに接合部の梁心を通るパネルでの圧縮主応力分布と圧縮主応力のベクトルがほぼ同様な形状となっているため、図-9 では EN の場合を例として示した。図-9 で示すように、柱・梁接合部周辺では、曲げ圧縮を受ける梁および柱の降伏ヒンジ内において高応力度の曲げ圧縮域が形成され、接合部側の梁および柱の降伏ヒンジから圧縮主応力が接合部の内部に伝達される。柱および梁の曲げ圧縮域から伝達された圧縮主応力は接合部内部において、対角線方向の高応力度の圧縮ストラットを形成し、ベクトルの方向からもわかるように対角線圧縮ストラットにより圧縮応力が伝達され、せん断抵抗機構が形成されることが考えられる。いずれの試験体もこのように対角線圧縮ストラットを形成されるものの、偏心のない接合部 CN では接合部幅方向の全域にわたって圧縮応力が伝達されるのに対して、偏心接合部の EN では偏心側に偏って圧縮ストラットが形成されることが、接合部を対角線に寄って切断して圧縮主応力分布を示した図-10 より確認される。また、以上の偏心接合部内での圧縮ストラットの偏在は図-11 からも見られる。

(2) 水平断面での応力伝達

図-11 および図-12 で示すように、梁心を通る水平断面では、圧縮主応力およびせん断応力はほぼ同様な形状として分布している。いずれも柱せい方向においては柱せいの中心ほど応力度が高くなる傾向を示すものの、接合部有効せい⁹⁾のほぼ全域にわたって圧縮応力が伝達される。これは本研究では鉄筋とコンクリートの間を完全付着として仮定したため、斜め圧縮ストラットによって応力が伝達されるほかに、トラス作用による応力伝達の寄与分も大きく現れるためだと考えられる。

接合部の幅方向においては試験体によって圧縮主応力、せん断応力はそれぞれ異なる応力伝達機構となっている。偏心のない接合部 CN では柱幅のほぼ全域にわたって圧縮主応力の伝達を形成している。これに片側およ

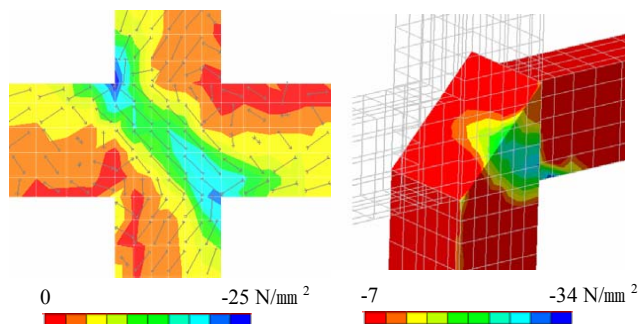


図-9 接合部パネルでの圧縮主応力分布

図-10 接合部表面および内部での圧縮主応力

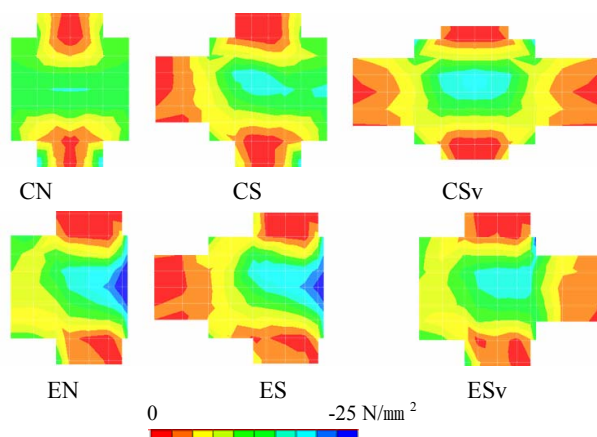


図-11 接合部水平断面での圧縮主応力 ($R=1/67$)

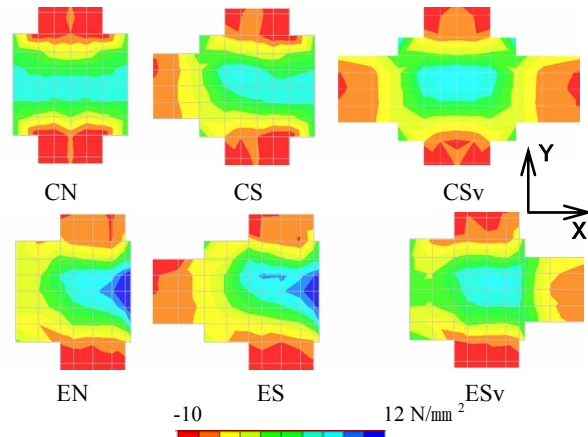


図-12 接合部水平断面でのせん断応力 τ_{zx} ($R=1/67$)

び両側に直交部材が取り付けいた CS, CSv では直交梁を介しても圧縮主応力が伝達されることが確認され、直交梁の協力効果が耐力上昇の一因となっていると考えられる。偏心接合部は偏心側ほど高応力度となり、非偏心側の有効幅範囲外では接合部内部の梁幅範囲内よりかなり小さい値を示している。偏心接合部 EN では偏心側および非偏心側に直交部材が取付くことによりせん断耐力は上昇されるものの、圧縮主応力が偏心側に偏って伝達されることはほとんど変わらない。ただし、非偏心側に直交部材の取り付けいた ES では、直交梁での応力の伝達が見られる一方、偏心側では応力度が依然として高い値を示している。これに対して、偏心側に直交部材の取り付けいた ESv では、直交梁での応力伝達が大きく寄与され、偏心側の応力集中も緩和されることが見られる。

5. まとめ

直交梁およびスラブの付いた偏心柱・梁接合部について 3 次元 FEM 解析を行い、次の結果を得た。

- (1) 偏心接合によりせん断耐力が低下するものの、直交梁およびスラブが取り付けくことにより耐力が上昇し、偏心側に付く場合にその効果が若干大きくなった。
- (2) 偏心接合により接合部内部で振り変形が生じるものの、直交梁およびスラブが取り付けくことにより、変形が小さくなる傾向を示した。
- (3) 偏心接合部では偏心側でせん断変形が大きく生じるが、直交梁の拘束効果により直交梁およびスラブの付いた側のせん断変形が小さくなる傾向となった。
- (4) 柱・梁接合部内部では、圧縮ストラットによる応力伝達が見られ、偏心接合部では偏心側に偏って高応力度で伝達されるが、直交梁の協力効果により応力集中が緩和される。
- (5) 柱・梁接合部内部で斜めのせん断ひび割れが生じ、偏心接合の偏心側ほどひび割れが大きくなる傾向が解析結果から見られた。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金による基盤研究 (C) (課題番号: 19560563, 研究代表者: 柏崎隆志・千葉大学助教) の一環として行われた。

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—特徴的被害の原因と設計への提案—, 1998.10
- 2) 洪杰, 柏崎隆志, 野口博: 繰返し載荷時の RC 造偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する 3 次元 FEM 解析, JCI 年次論文集, Vol.28, No.2, pp.319-324, 2006
- 3) 野口博, 洪杰, 柏崎隆志: 繰返し荷重を受ける RC 偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する 3 次元 FEM 解析, その 1—その 2, AIJ 大会梗概集, pp.75-78, 2006.9
- 4) 洪杰, 柏崎隆志, 野口博: 3 次元 FEM 解析による直交部材付き RC 偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する研究, その 1—その 2, AIJ 大会梗概集, pp.605-608, 2007.8
- 5) 石田健吾, 藤井栄, ほか: 鉄筋コンクリート十字型柱・梁接合部の実大実験, JCI 年次論文集, Vol.23, No.2, pp.343-348, 2001
- 6) 赤田匠, 藤井栄, ほか: RC 実大柱・梁接合部の耐震性能に関する実験的研究—その 1—その 3, AIJ 大会梗概集, pp.189-194, 2002
- 7) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: 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), AIJ 大会梗概集, pp.67-70, 2004.9
- 8) 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, Vol.51, pp.207-214, 1998.12
- 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・同解説, 1999