

論文 新補強法による RC 柱・梁接合部のせん断性能の 3 次元 FEM 解析

野口 博^{*1}・張 大長^{*2}・柏崎 隆志^{*3}

要旨：本研究では，新たに提案された立体的な柱梁接合部補強法による RC 柱梁接合部の補強効果を解析的に検討するために，3次元非線形 FEM 解析を行った。解析結果より補強法と梁主筋の付着向上が接合部破壊モードの改善と，せん断耐力を高めるのに有効であることが分った。また，3次元解析により立体的に忠実にモデル化した補強用タイプレートとアンカープレートが接合部の剛性に及ぼす影響について，実験結果とも比較して，解析的に検討した。

キーワード：新柱梁接合部補強法，3次元 FEM，せん断性能，破壊モード，せん断耐力。

1. はじめに

梁主筋を通し配筋とした十字型柱梁接合部の接合部せん断強度と破壊モードに及ぼす影響因子は，(a) 接合部せん断力，(b) 梁主筋の付着強度，(c) 接合部横補強筋量の3つである。柱や梁部材の脆性破壊を防ぐための配筋規定の強化により，接合部せん断応力レベルが高くなり，架構中の相対的弱点は，柱梁接合部へ移行しつつある。このような状況下では，柱・梁接合部への入力せん断力や接合部域梁主筋の付着応力が増大する傾向にある。その接合部内の梁主筋の付着劣化と梁主筋の拔出しによって，極端な場合は，梁降伏前に抜け出しが過大になり，梁端回転角が大きくなりコンクリートの圧壊が早まる。その結果，柱・梁接合部の靱性が低下し，接合部の脆性破壊が発生する可能性が指摘されており、柱・梁接合部のせん断強度を高めるために，種々の補強方法が探索されている。本研究では，塩原らにより提案された抵抗機構に基づく補強試験体¹⁾を対象として，RC 内柱・梁接合部の 3 次元 FEM 解析を行い，層せん断力 層間変位角関係，接合部域の梁主筋ひずみ分布，コンクリートの応力分布及び柱・梁接合部の補強効果を検討することを目的とした。3次元解析により立体的に忠実にモデル

化した補強用プレートが接合部の剛性に及ぼす影響について，実験結果とも比較して，変形性状や破壊モードについても検討を行った。

2. 解析対象試験体

2.1 塩原らの破壊モデル²⁾

塩原らが提案した柱梁接合部破壊モデルは図1に示すような B モード，J モード 2 種類の接合部の破壊変形モードである。B モードは，梁主筋が梁端部のひび割れ部分からに抜け出して梁端部のひび割れを拡大させ梁端回転角が大きくなり，コンクリートの圧壊が早まるモードである。一方，J モードは接合部内に生じた斜めひび割れ幅の開口により接合部パネルの回転，すなわちせん断変形が卓越するモードである。

2.2 解析試験体

2.1 に述べた変形モードを考慮した補強法の効果を検討するために，塩原らが実験を行った

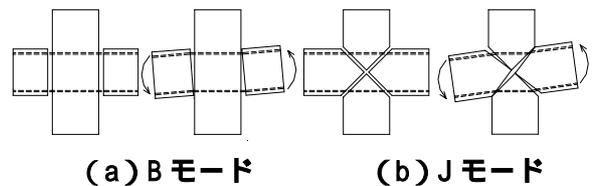


図1 2種類の接合部変形モード

*1 千葉大学教授 工学部デザイン工学科建築系 工博(正会員)

*2 千葉大学大学院 自然科学研究科 工修(正会員)

*3 千葉大学助手 工学部デザイン工学科建築系 工修(正会員)

柱・梁接合部試験体 S3, S4 を解析対象とした。試験体の寸法・配筋と接合部の補強詳細を図 2 に示す。従来型補強試験体 S3 は、在来の梁通し配筋とした柱・梁接合部で梁降伏前に接合部がせん断破壊するように設計された。新補強型試験体 S4 は、従来型補強試験体 S3 と寸法・配筋、材料強度は共通としたが、梁主筋付着強度を高めるために、梁主筋にタイプレートとアンカープレートという補強ディテールが追加された。コンクリートの平均圧縮強度は現場養生シリンドラーの圧縮試験で 28MPa となり、ヤング

係数は 24800MPa となった。表 1 に鉄筋とタイプレートの材料特性を示す。

実験では、柱に 100kN の定軸力を載荷して、柱頭位置に正負繰り返し水平変位が載荷された。試験体 S3, S4 の実験から得られた層せん断力 Q - 層間変位角 R の関係を図 7 に示す。実験では、新補強型試験体 S4 の最大層せん断力 165kN は、従来型補強試験体 S3 の 128kN より 28% 高く、補強による有意な強度差が認められた。また、実験では、試験体 S3 は接合部せん断破壊が発生したが、S4 は梁曲げ破壊が発生し、新補強法により接合部の破壊モードが接合部せん断破壊から梁曲げ破壊に変化することが認められた。耐力低下も、S3 の R=3% 以降に対し、S4 では R=4% 以降のように遅れて生じ、新補強による靱性の向上が見られた。

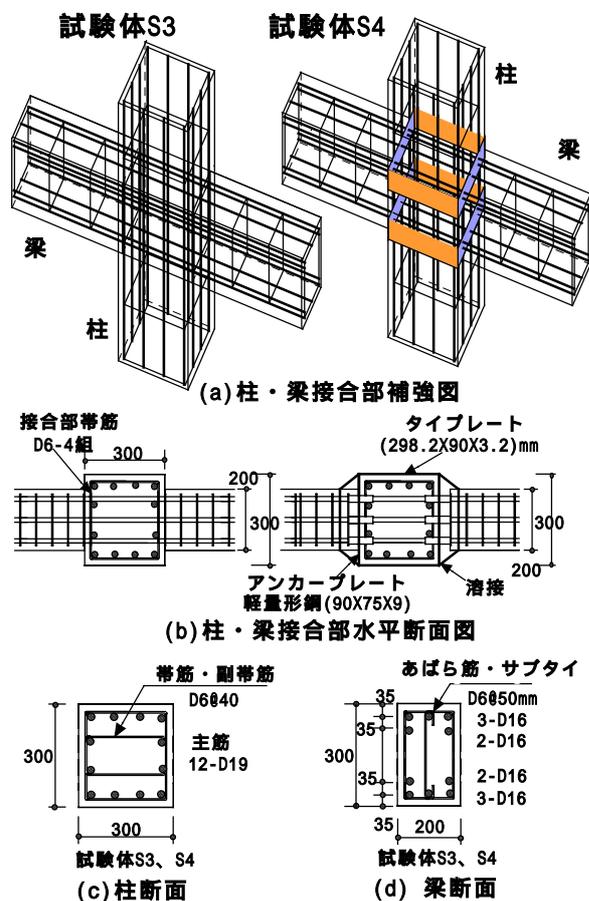


図 2 試験体寸法・配筋・補強詳細図

表 1 鉄筋とタイプレートの材料特性

鉄筋及びタイプレート	公称断面積 (cm ²)	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	ヤング率 E_s (GPa)
D6 帯筋	0.32	390	580	185
D16 梁主筋	1.99	470	660	194
D19 柱主筋	2.87	450	680	208
タイプレート	2.88	353	475	205

3. 解析プログラム

汎用構造解析プログラム DIANA にユーザサブルーチン機能を用いて、以下の材料モデルを付加した。なお、解析では、実験時の材料定数を用いた (表 1 参照)。

3.1 有限要素と材料モデル

(1) コンクリート

コンクリートには、8 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いた。三軸応力下の構成則には、Selby and Vecchio が Vecchio and Collins³⁾の全ひずみに基づく 3 次元モデルを用いた。図 3 に示すコンクリートの圧縮応力 - 歪

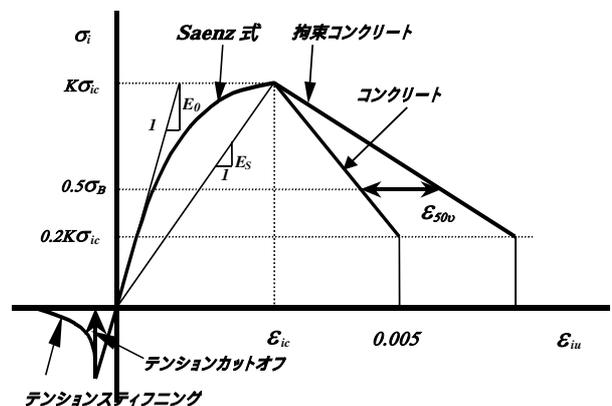


図 3 コンクリートの応力 ひずみ関係

関係の上昇域には Saenz モデル⁴⁾を、下降域には Modified Kent-Park モデル⁵⁾をそれぞれ用いた。引張側では、ひび割れ発生後は、鉄筋付着効果を考え、応力を部分解放するテンションスティフニングモデルとし、引張軟化域は白井モデル⁶⁾を用いて、コンクリートひび割れ後のせん断剛性低下率として5%を用いた。

(2) 鉄筋

主筋には、2 節点トラス要素を用いた。応力ひずみ曲線は図4に示すバイ・リニアに近似し、 $E_2 = E_1 / 100$ とした。帯筋とあばら筋にも2 節点トラス要素で主筋と同じモデルを用いた。

(3) 補強タイプレート

補強タイプレートには、4 節点アイソパラメトリック平面応力要素と積層要素の2種類の要素を用いた。更に、平面応力要素の場合は、コンクリートとの付着考慮と完全付着の2種類について解析を行った。

アンカープレートには、4 節点アイソパラメトリック曲面シェル要素を用いた。シェル要素の厚さは、剛性を等価になるように換算した。補強タイプレートとアンカープレートは Von Mises の降伏条件に基づき、等方硬化モデルとした。

(4) 接合要素

鉄筋とコンクリート間の付着特性には、2 節点のボンドリンク要素を用いた。付着応力 - すべり関係は、図5に示すバイ・リニアモデルとした。付着強度の算定には、藤井、森田⁷⁾の提案式を用い、初期剛性は森田、角⁸⁾の実験結果により定めたコンクリートソリッド要素と、タイプレートとアンカープレート要素間の接合要素

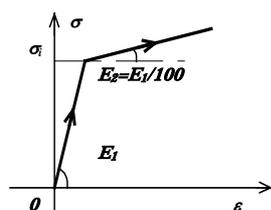


図4 鉄筋応力-ひずみモデル

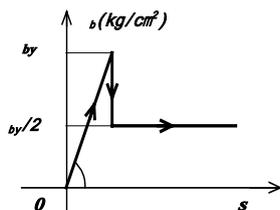


図5 付着応力-すべり関係

素は、要素節点間の接合要素で表現された。

3.2 試験体のモデル化

解析対象では、試験体の梁幅と柱幅の対称面を利用して試験体半分とした。有限要素分割を図6に示す。柱、梁主筋とコンクリート間には、ボンドリンク要素なし及び、ボンドリンク要素ありの2種類とした。ひび割れモデルは、分布ひび割れモデルとした。柱梁接合部の繰り返し載荷時の FEM 解析はまだ困難な所が残っていますので、それで、柱梁接合部の FEM 解析は、単調載荷で行っています。タイプレートは平面要素とした場合には、コンクリートとの付着は完全付着とボンドリンク滑りを考慮した2種類について検討する。

3.3 加力方法及び境界条件

図6に示すように、解析での加力は、柱に50kNの一定軸力載荷後、梁両端に鉛直変位増分(左梁:下向き,右梁:上向き)を加えた。実験では柱頭に正負繰り返し荷重が与えられたが、解析では梁両端の単調載荷とした。境界条件は、柱上下両端ではx方向にローラーで固定した。接合部中央点ではx,y方向にピンで固定した。また、対称面では、y方向にローラーで固定した。実験でのP-δ効果としての接合部柱梁の曲げ変形は、水平力からの柱梁の曲げ変形の1/100しかないので、解析では無視した。

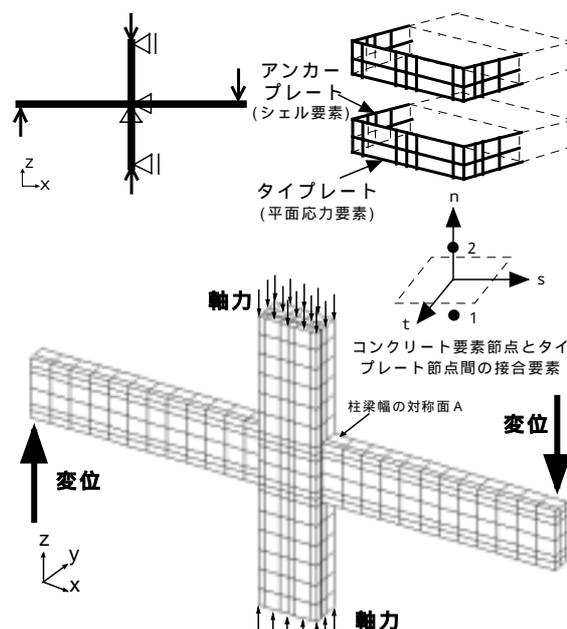


図6 試験体要素分割と境界条件

4. 解析結果

4.1 荷重 変形関係

図7に層せん断力 層間変位角の実験結果と、アンカプレートには曲面シェル要素，タイププレートには平面応力要素を用いた解析結果を比較して示す。図中には，梁主筋完全付着解析結果（FEM2）とボンドリンク要素により付着特性を考慮した解析結果（FEM1）を示す。試験体 S3, S4 とともに，柱、梁主筋の付着を完全付着とした接合部の最大耐力は実験結果 128kN, 165kN よりそれぞれ 11.7% ,3.8% 高めとなり，付着を考慮した場合は 耐力と剛性はやや高い。付着補強された S4 の梁主筋は接合部パネル内で殆ど滑らないので，解析結果は試験体 S3 のような差がなく 解析での試験体 S4 の耐力は，実験値とほぼ対応している。また，試験体 S3 では最大耐力後に耐力低下が顕著であるのに対し，試験体 S4 では，耐力低下が小さい傾向は解析でも実験とほぼ対応している。柱、梁主筋

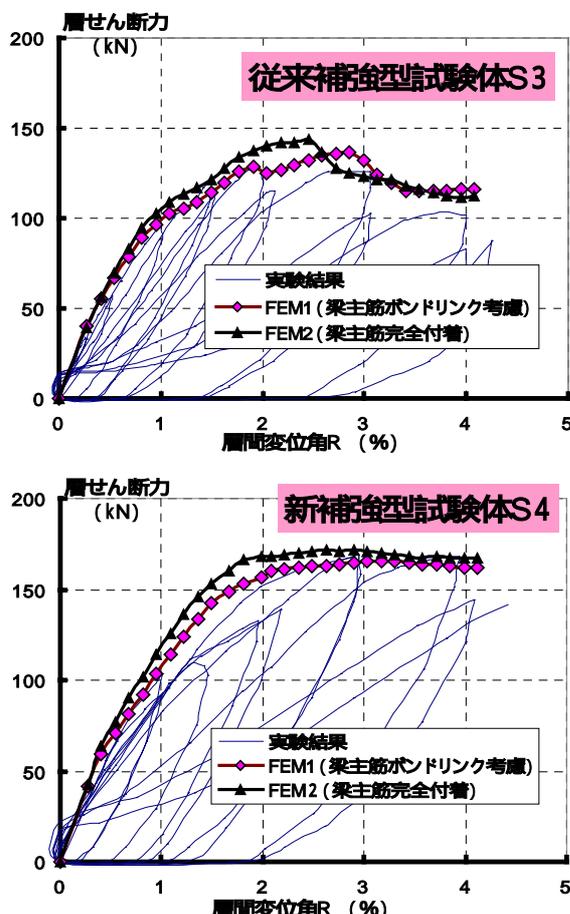


図7 層せん断力 - 層間変位角の関係

付着を考慮した解析結果が，最大耐力や剛性については完全付着の場合より良好な対応を示した。

4.2 コンクリートと梁主筋応力，ひずみ性状 (1) 接合部コンクリートの主応力分布

梁主筋の付着を考慮した試験体 S3, S4 の図6に示す接合部パネルの梁幅、柱幅対称面 A の圧縮主応力分布を図8に示す。この図変位角 $R=2\%$, 3% , 4% の試験体 S3, S4 では，接合部パネルのコンクリートには，対角方向に圧縮ストラットが生じている。変位角の増大に伴い，従来補強型試験体 S3 の対角線上のコンクリートが圧縮破壊の進行により圧縮ストラットが降伏し，消失していくが，新補強型 S4 では，変位角 $R=4\%$ までも圧縮ストラットは維持されていた。更に，S4 では，対角線上のコンクリートは圧壊せず，最終的には梁危険断面の曲げ圧縮領域のコンクリートに圧縮破壊が生じた。このことから，新補強法により，接合部破壊モードは接合部せん断破壊から梁曲げ降伏に変化することが解析的にも検証された。

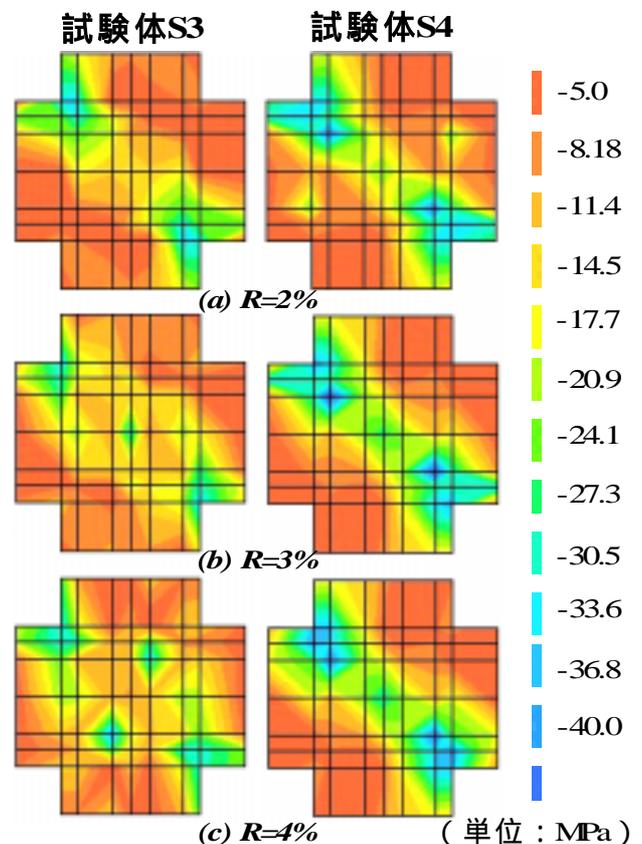


図8 接合部パネルの対称面Aの圧縮主応力分布

(2) 接合部せん断応力

接合部コンクリートのせん断応力 - 層間変位角関係を図9に示す。塩原らの計算値は梁主筋歪度を主筋応力に換算し接合部の有効断面で除して求めた。FEM解析値は、パネルのコンクリート要素水平面の応力成分を積分し接合部の有効断面で除して求めた。層間変位角 R=3%時に、S3とS4のパネルのコンクリートはせん断耐力をほぼ達した。R=3%以降には、S3の接合部せん断応力は低下していくが、S4ではやや増大した。補強により接合部のコンクリートの劣化を抑制する効果があることと、FEM解析値と塩原らの計算値の相違がわかる。

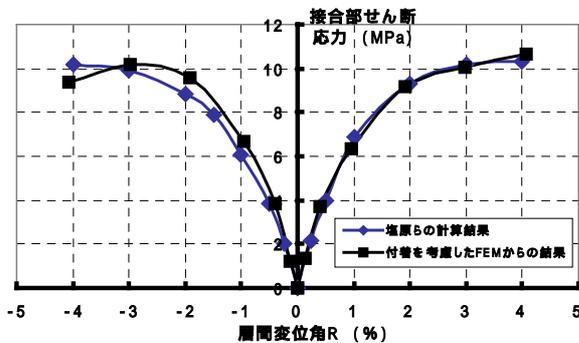


図9 接合部せん断応力 - 層間変位角関係

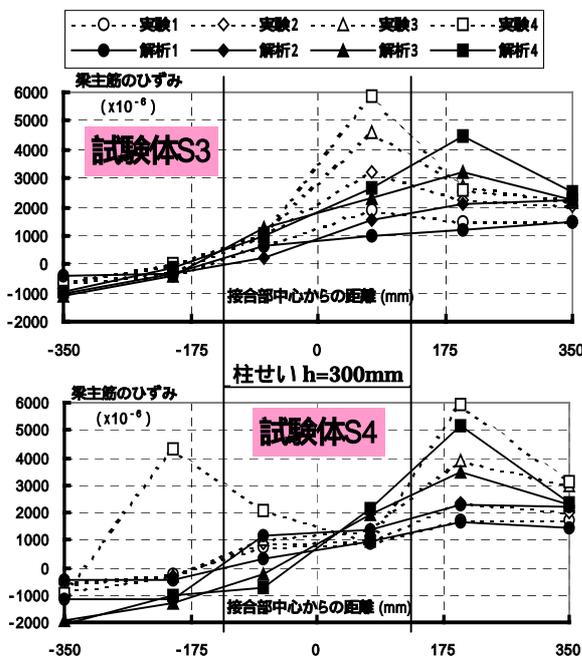


図10 梁主筋のひずみ図

(3) 梁主筋ひずみ分布

梁主筋のひずみ分布を図10に示す。実験1, 2, 3, 4は層間変位角 R=1, 2, 3, 4%時の梁

主筋ひずみの実験値である。同様に、解析1, 2, 3, 4は解析値である。柱幅内でS4の梁主筋はS3のほうより引張ひずみが小さく、周りのコンクリートは劣化が遅い。

4.3 補強タイププレートが接合部剛性に及ぼす影響

(1) タイプレートの各モデルによる層せん断力 - 層間変位角関係

図11にタイププレートモデル化の違いによる層せん断力 - 層間変位角関係を示す。F1~F3ではタイププレートは平面要素あるいは積層要素図を用い、タイププレートとコンクリートとの滑りは完全付着の場合とボンドリンク要素で考慮した場合とで区別している。F4はアンカープレートとタイププレートを積層要素として解析結果である。F1~F4の解析結果ではある程度の相違はあるが、実験による荷重 - 変形角関係を表現できる。平面要素は曲げ変形を考慮できるが、積層要素は曲げ変形を考慮できないというモデルの特性によって、タイププレートの曲げ成分は、接合部剛性に及ぼす影響が少ない。

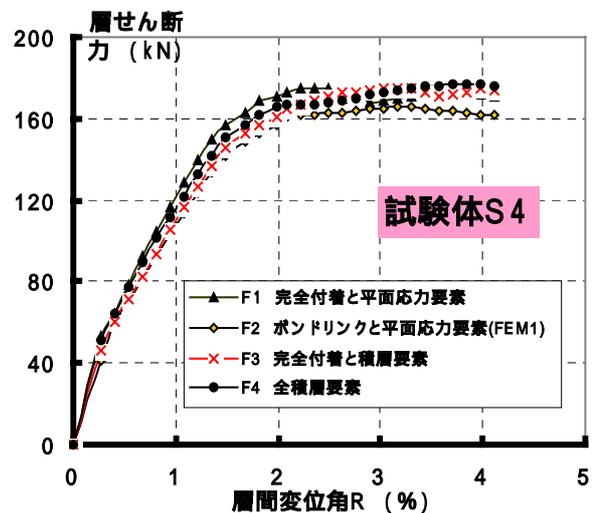


図11 各モデル化層間せん断力 - 層間変位角関係

(2) 補強タイププレートの応力分布, 変形状

図12に平面要素とした補強タイププレートの応力と、Scale=20時の変形状を示す。接合部コンクリートとタイププレートの付着をボンドリンクにより考慮した場合と完全付着の場合の応力分布, 変形状を見ると、層間変位角の進

行に伴いタイプレートにはせん断成分と曲げ成分が発生した。圧縮主応力分布図を見ると、タイプレートの対角方向に圧縮ストラットが生じているので、曲げ成分が少なく、せん断成分が顕著であることがわかる。即ち、タイプレート曲げ成分が接合部の剛性に及ぼす影響は小さいことがわかる。

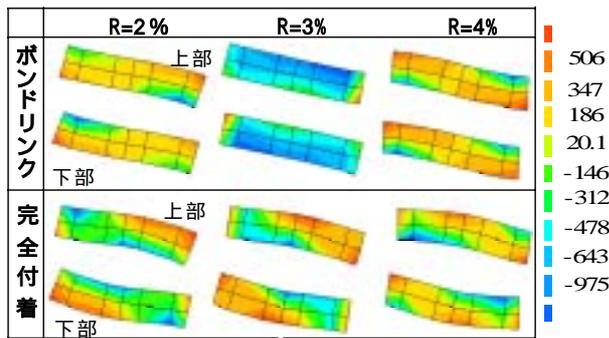


図 12 タイプレートの応力分布(MPa), 変形性状

4.4 接合部変形状況と破壊モード

図 13 層間変位角 $R=2 \sim 4\%$ の接合部の変形状況を示す。この図から、最大耐力に達する以前の試験体 S3, S4 の変形状況はほぼ同様 ($R=2\%$ 以前) であったが、 $R=3\%$ 以後、試験体 S3 の接合部のせん断変形が大きく進行した。 $R=4\%$ 時の試験体 S3 では、梁変形が小さく、接合部の

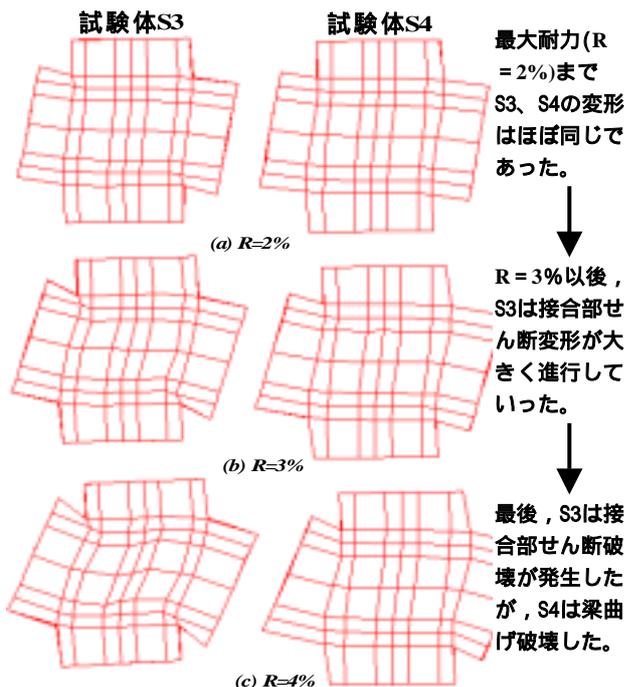


図 13 接合部パネルの変形特性(Scale=10)

対角方向のコンクリートは圧縮破壊し、最終的にせん断破壊が発生した。一方、試験体 S4 の $R=4\%$ の時の変形は、接合部のせん断変形が小さく接合部の対角方向のコンクリートに圧縮破壊が見られなかったが、梁危険断面位置で曲げ圧縮域のコンクリートが圧縮破壊し、破壊モードは梁曲げ破壊であった。

以上から、試験体 S3 の J モードから試験体 S4 の B モードへの移行は、タイプレートとアンカープレートの補強により接合部の変形状況が変化したことに関連していることか、FEM 解析により確認された。

5. まとめ

(1) 新接合部補強法は接合部せん断耐力を上昇させ、破壊モードを接合部せん断破壊から梁曲げ降伏に変化させるのに有効であることが解析的にも確認された。

(2) 接合部補強用タイプレートが接合部の剛性に及ぼす影響は小さい。

(3) 梁主筋の付着性状を向上させることは、接合部のせん断耐力の上昇や接合部コンクリートの劣化を抑制する効果がある。

参考文献

- 1) Safaa ZAID, Hitoshi SHIOHARA and Shunsuke OTANI : Test of Joint Reinforcing Detail Improving Joint Capacity of R/C Interior Beam-Column Joint, The 1st Japan Korea Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Seoul, Korea, Faculty Club House, Seoul National University, pp.1-11, 1999.10
- 2) 塩原等：鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の2つの接合部破壊モードの解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 CII, pp797-799, 2000.9
- 3) DIANA 7.1, User's Manual, Nonlinear Analysis, 1998.8.
- 4) Saenz, L.P : Discussion of "Equation for the stress-strain curve of concrete" by Desayi and Krishnan, Proc. ACI, Vol.61, No.9, pp1229-1235, 1964.8
- 5) Robert Park, M. J. Nigel Priestley, and Wayne D. Gill : Ductility of Square Confined Concrete Column, pp.929-950, April, 1982.4
- 6) 佐藤稼雄, 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, pp1615-1616, 1978.9
- 7) 藤井栄, 森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, pp.45-52, 1983.2
- 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に関する研究, 日本建築学会論文報告集, pp.1524, 1975.9
- 9) 張大長, 野口博, 柏崎隆志, 新しい柱梁接合部補強法による柱梁接合部せん断性能に関する2次元 FEM 解析の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.123, No.3, pp.403-408, 2001.6