

論文 機械式継手を有する RC 柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究

梁 生鈿^{*1}・柏崎 隆志^{*2}・野口 博^{*3}

要旨：東北大学の前田らが実験を行った接合部の試験体を対象とし、機械式継手の有無及び寸法の違いをパラメータとし、単調載荷の3次元 FEM 解析を行い、実験結果との比較により解析手法の検証を行った。解析結果から、No.3 のみ剛性が実験より高く、最大耐力は各試験体とも実験と良い対応を示した。機械式継手を用いることで、接合部に新たな応力伝達機構を生じ、圧縮ストラット領域が増大し、軟化域における高支圧応力が集中している様子が見られた。これらのことから、継手の付着特性が接合部の耐震性能を向上させ、接合される主筋の付着劣化による滑りを抑え、軟化域における接合部の耐力低下を軽減させたと推察される。

キーワード：高強度材料, 機械式継手, 付着, 支圧, 柱・梁接合部, 3次元 FEM 解析

1. はじめに

RC 造高層建築物では、高強度材料を用いることにより、部材の断面積が小さくなり、柱・梁接合部に入力される応力が大きくなったため、コンクリートと鉄筋間の付着が接合部の耐震性能により大きく影響する。また、プレキャスト化、大スパン化に伴い、柱・梁接合部に機械式継手(写真-1)を用いるケースが多い。機械式継手の見かけの付着力として、表面の付着力と端部の支圧力が存在すると考えられる。既往の研究¹⁾により、継手表面の付着性能は丸鋼と同等であると判断することができるが、継手端部の支圧等が接合部への耐震性能に与える影響については未だ解明されていない。

そこで本研究では、主筋 SD590, コンクリート Fc60 を用いた RC 十字型柱・梁接合部の部分架構を対象とし、機械式継手の有無及び寸法の違いをパラメータとして 3次元 FEM 解析を行い、内部応力状態やひび割れ進展状況等について詳細に検討を行うことで、機械式継手の付着特性が接合部の耐震性能に与える影響を考察した。

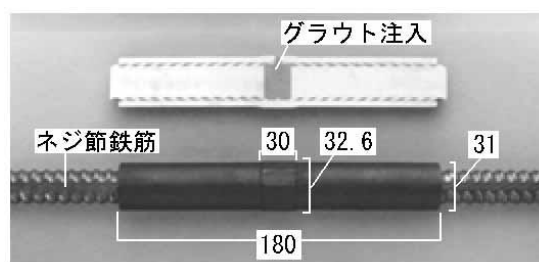


写真-1 機械式継手 (D19 用)

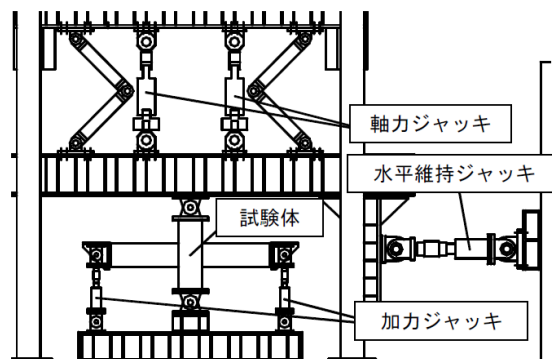


図-1 加力装置

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東北大の前田ら²⁾によって 2008 年に実験が行われた試験体、梁曲げ降伏先行型となる No.1(通し配筋), No.2(継手寸法: 外径×内径×長さ=29×22.3×180mm), 付着破壊先行型となる No.3(継手寸法: 外径×内径×長さ=38×29×250mm, 付着余裕度 0.76 倍)の計 3 体である。全試験体ともに、梁の断面は 300×400mm, 柱の断面は 400×400mm, 梁, 柱の反曲点間距離はそれぞれ 3200, 1600mm となっている。実験の加力装置を図-1, 各試験体諸元一覧を表-1, コンクリート, 鉄筋, 機械式継手の材料特性を表-2,3,4 にそれぞれ示す。

解析対象試験体の要素分割および境界条件は図-2 に示すように、要素分割は試験体の対称性を利用し、Y 方向で全体架構を 1/2 にした。境界条件は切断面を Y 方向面ローラー支持とし、柱圧縮軸力を受ける時は柱脚全面を Z 方向拘束, せん断力を与える時は柱の回転を考慮し、柱頭では中央列を X 方向拘束(切断面と交差する節点は XY 方向拘束), 柱脚では中央列を XZ 方向拘束(切断面と交差する節点は XYZ 方向拘束)とした。

加力方法は最初に実験と同じ軸力比 0.15 の一定軸力を荷重制御により加力し、その後梁端中央列にせん断力を変位制御により単調載荷を行った。

*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 工博 (正会員)

表一 各試験体諸元一覧

試験体名	No.1	No.2	No.3
パラメータ	通し配筋	機械式継手あり (長さ180mm)	機械式継手あり (長さ250mm)
軸力	720KN 圧縮一定 (軸力比=0.15)		
梁配筋	上下端主筋: 3 - D19		2 - D25
	あばら筋: D10 pw=0.476%		D10 pw=0.476%
柱配筋	主筋: 6 - D19 帯筋: D10 pw=0.509%		
接合部横補強筋	D10 pw=0.509%		

表二 コンクリート材料特性

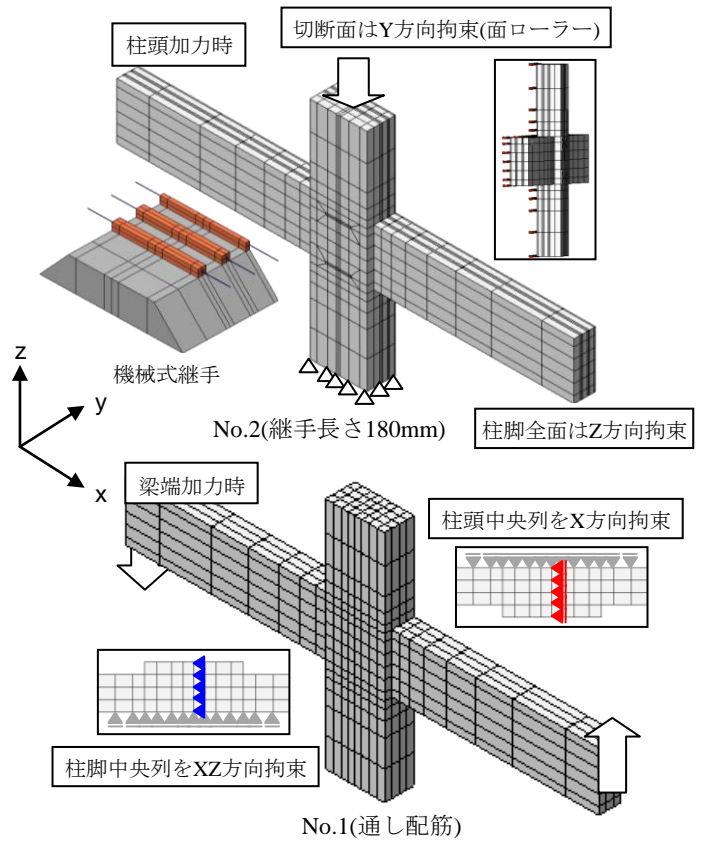
試験体	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1,2,3	3.2×10 ⁴	68.2	4.48

表三 鉄筋材料特性

鉄筋径(鋼種)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D19(SD590)	1.85×10 ⁵	613	833
D25(SD590)	1.87×10 ⁵	622	812
D10(SD590)	2.05×10 ⁵	854	1011

表四 機械式継手材料特性

適用鉄筋径	ヤング係数 (N/mm ²)	信頼強度 (N/mm ²)	二次勾配 (N/mm ²)	上限強度 (N/mm ²)	断面積 (mm ²)
D19	2.58×10 ⁵	900	2.58×10 ³	1200	268.96
D25	2.58×10 ⁵	900	2.58×10 ³	1200	475.24



図二 要素分割及び境界条件

2.2 解析モデル

本研究では、余・野口³⁾らにより開発され、洪⁴⁾により改良された3次元 FEM 解析プログラムを用いた。

(1) コンクリート

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-Warnke⁵⁾ の 5 パラメータモデルを用いて表現し、Kupfer⁶⁾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 Fafitis-Shah⁷⁾式、下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park⁸⁾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⁹⁾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・飯塚¹⁰⁾式、ひび割れモデルは固定ひび割れモデル、ひび割れ方向のせん断伝達特性には青柳・山田¹¹⁾モデルを使用した。

(2) 鉄筋

鉄筋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 Bi-linear モデルを用いた。

(3) 付着

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¹²⁾を用いた。付着応力は接合部内梁主

筋の軸力の差と梁主筋表面積から算出した実験値に従い、すべり量はコンクリートひずみを無視した鉄筋ひずみの積分値を使用した。梁主筋は D19 を用いた No.1, No.2 では最大付着応力度 9.13MPa, D25 を用いた No.3 では最大付着応力度 7.19MPa を設定した。また、柱主筋については 3 体の試験体とも D19 を用い、最大付着応力度 9.13MPa を設定した。

(4) 機械式継手

機械式継手の要素分割を図-3 に示す。断面が円形である継手のカプラーは同断面積の 8 節点ソリッド要素を用い、応力-ひずみ関係には Bi-linear モデルを用いた。カプラーと挿入される鉄筋間の応力伝達機構は山崎ら¹³⁾の研究から、ボンドリンク要素の付着応力-すべり関係で表現し、森田・角モデルを用いた。鉄筋のすべり量は松崎ら¹⁴⁾の研究で行われた継手内鉄筋のひずみ分布性状を参考にし、研究対象となる実験で行われた機械式継手の引張試験結果から導いた。ボンドリンク材料特性を図-4 に示す。図-5 は継手と周辺コンクリートのボンドリンクの設定状況を示したものである。継手表面の付着は既往の研究¹⁾を参考にし、最大付着応力度 4.0MPa の丸鋼の特性を考慮したモデルを採用した。また、継手端部のボンドリンク特性は、支圧端では支圧力が十分伝達できるように大きな剛性値を用い、剥離端では表面の付着と同様に設定した。



図-3 機械式継手 (D19 用) の要素分割

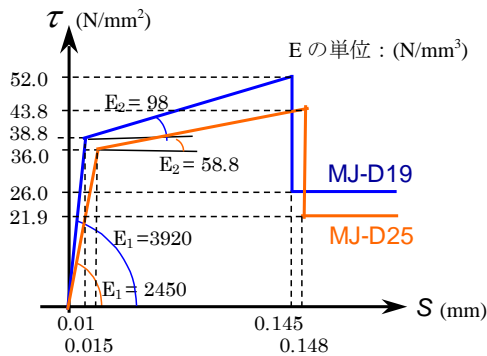


図-4 継手内のボンドリック材料特性

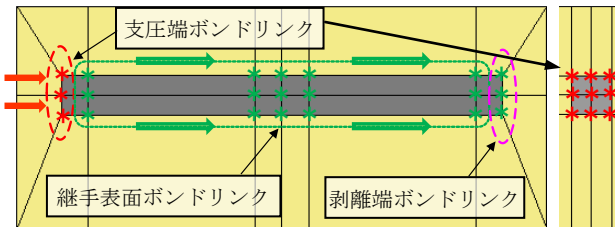


図-5 継手と周辺コンクリートのボンドリック

3. 機械式継手の検証解析

継手内のボンドリック材料特性の妥当性を検証するため、対象実験で行われた機械式継手の引張試験をシミュレートした。試験体の要素分割と計測位置は図-3を参照されたい。継手及び挿入される鉄筋の引張荷重-引張ひずみ関係を図-6に示す。図より、機械式継手の適用鉄筋径D19とD25の両方も解析結果は実験結果と良く対応していることが分かる。

4. 接合部の耐震性能に関する解析的検討

4.1 層せん断力-層間変形角関係

各試験体の解析と実験結果の層せん断力-層間変形角関係を図-7に示す。No.1(通し配筋)では、主筋が降伏するまで、剛性が良好な対応を示し、最大耐力後の耐力低下は実験より早まったが、その勾配は実験と同様の傾向を示した。No.2(機械式継手長さ180mm)では、主筋が降伏するまで、剛性も良い対応を示し、最大耐力後の耐力低下傾向が実験のような緩やかな傾向を再現できていない。No.3(機械式継手長さ250mm)では、剛性が実験よりやや高い結果となり、最大耐力後の耐力低下傾向も実験のような緩やかな傾向を再現できていない。各試験体ともR=0.1%rad.で梁曲げひび割れ、R=0.75%rad.で接合部せん断ひび割れ、R=1.5%rad.で梁主筋降伏がそれぞれ発生し、実験と良好な対応を示した。最大耐力に関しては、いずれの試験体においても、解析が実験を若干下回る

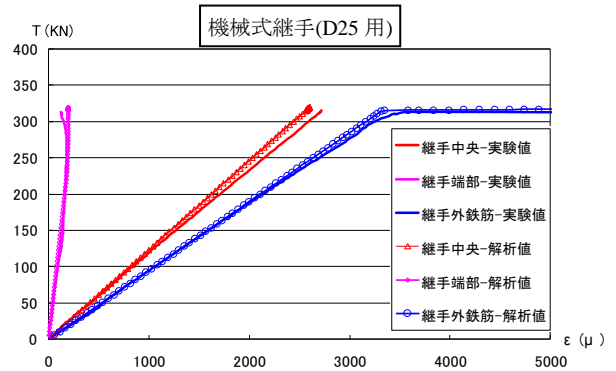
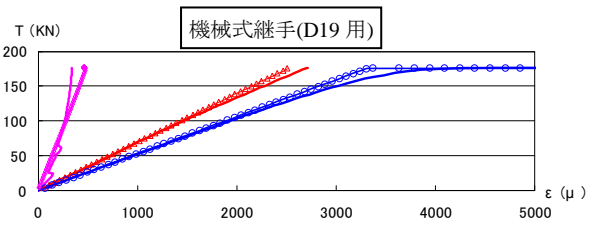
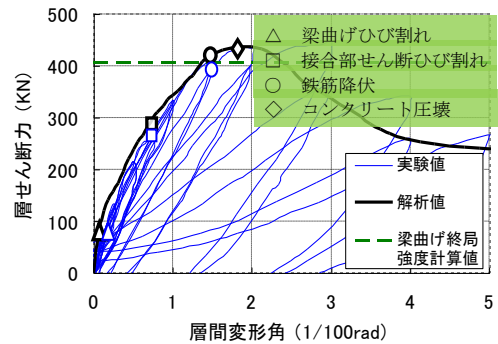
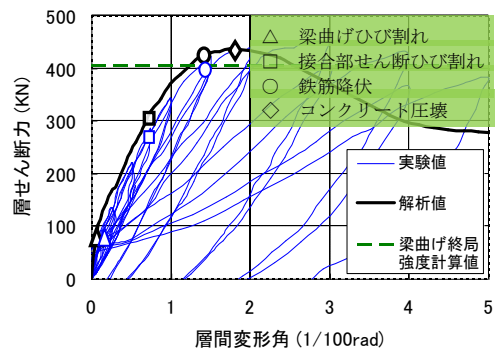


図-6 機械式継手の引張荷重-引張ひずみ関係

No.1 (通し配筋・梁曲げ降伏先行型)



No.2 (継手長さ180・梁曲げ降伏先行型)



No.3 (継手長さ250・付着破壊先行型)

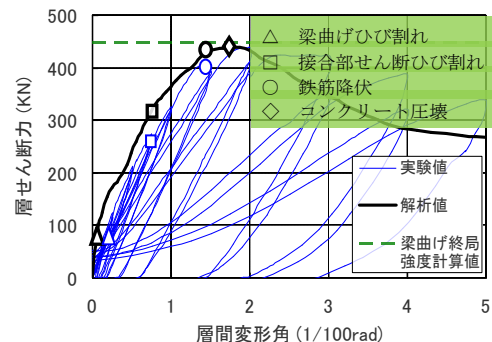


図-7 層せん断力-層間変形角

結果となったが、概ね良好に対応している。また、各試験体とも最大耐力時に付け根部の被りコンクリートが圧壊した。このことにより最大耐力が決まり、更に層間変形角の増加に伴って圧壊が急激に接合部内部まで進行したため、耐力保持能力が早期に失われたと推察される。そのため、解析では実験よりも早期に最大耐力に至り、その後急激な耐力低下を引き起こしたと考えられる。

図-8 に包絡線で解析同士の比較を示す。各試験体は最大耐力まで実験と同様にほぼ違いが無く、その後は互いの耐力低下傾向の差が実験ほど顕著ではないが、低下傾向の順番が実験と同様であることが分かる。このことから、軟化域においても実験結果をある程度表現できたと考えられる。

4.2 梁主筋ひずみ分布

図-9 に接合部付近の梁上端筋中央のひずみ分布を示す。No.1(通し配筋)では、引張側及び接合部内のひずみは実験とほぼ同様な分布を示している。一方、圧縮側のひずみは実験より若干小さいが、変形が進むにつれて実験と同様に引張側へシフトした。No.2 (機械式継手長さ 180mm), No.3 (機械式継手長さ 250mm)では、継手部のひずみは実験のような山型分布となっている。これは、継手両端部では鉄筋が負担している応力がカプラーと挿入される鉄筋の両者が負担するのに対し、継手中央部では応力はカプラーのみが負担すると考えられる。また R=1.5%時、全試験体ともに梁危険断面位置のひずみが実験値を大幅に超えている。これは、解析では付け根部のコンクリートの圧壊が実験より早まったためであると考えられる。

4.3 接合部内圧縮主応力カウンター

図-10 に試験体の接合部切断面の圧縮主応力カウンター図を示す。最大耐力時、全試験体とも対角方向に応力の圧縮ストラットが形成され、梁及び柱の端部への圧縮応力の集中が著しい。応力伝達においては、No.1(通し配筋)が接合部の対角方向の中心領域で応力を負担するのに対し、No.2(機械式継手長さ 180mm)と No.3(機械式継手長さ 250mm)は一部の応力が継手に沿って伝達される。また継手端部の負担する支圧応力が高くなると共に、圧縮ストラットは継手の支圧端へ移動し、2本になる傾向が見られる。これは、梁端の圧縮側とその引張側の近く

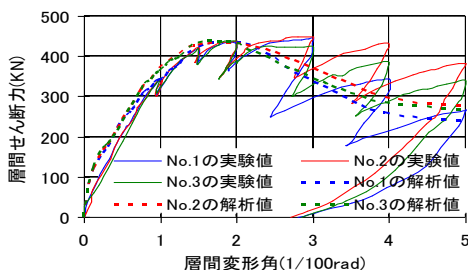


図-8 包絡線の比較

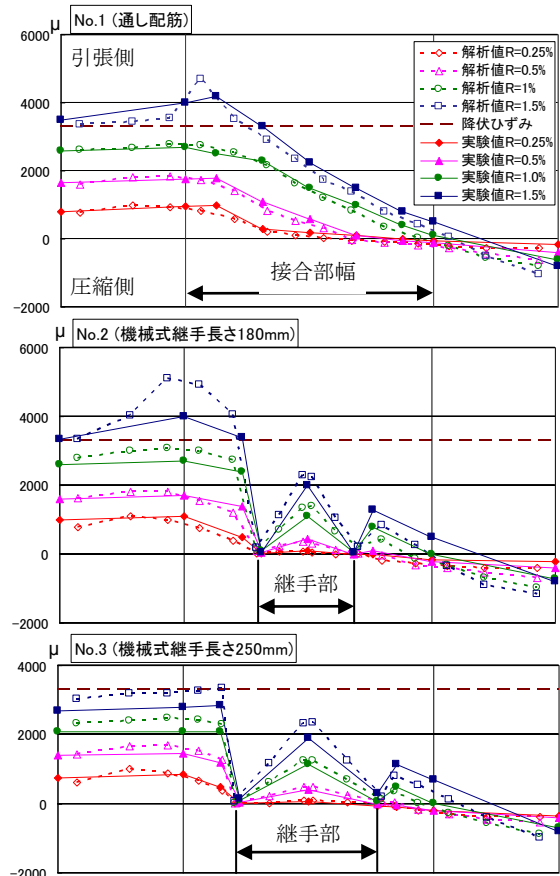


図-9 接合部付近梁上端筋のひずみ分布

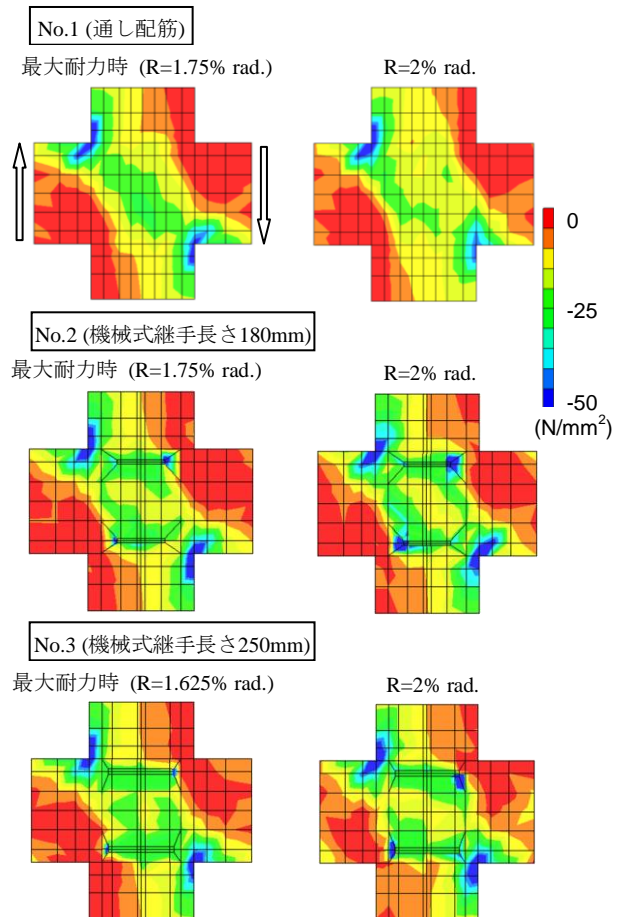


図-10 接合部切断面圧縮主応力カウンター

にある継手の支圧端に新たな応力伝達機構を生じたと言える。R=2.0% rad.で、付け根部分のコンクリートの圧壊はさらに進行し、いずれの試験体においても圧縮ストラットは消え始めた。また、応力コンターの比較により、継手端部の支圧による圧縮ストラット領域が増大することと継手の寸法が大きいほど領域の増大が著しいことが分かる。以上のことから、機械式継手を用いることで、接合部の耐震性能を向上させたと考えられる。

図-11 に No.2, No.3 の対角断面の圧縮主応力コンター図を示す。解析の軟化域での R=2.5% rad.時、両試験体とも断面の継手支圧端にある箇所周辺部分より 2 倍以上の高い支圧応力が集中していることが見てとれる。このことから、軟化域では継手端部の支圧が接合される主筋の付着劣化による滑りを抑え、接合部の耐力低下を軽減させたと推察される。変形が進むにつれ、R=3.0% rad.時、両試験体とも応力が下がっていくと共に、継手端部の支圧応力も低下していくが、継手断面積が小さい No.2 の方が低下の度合いは大きいことが分かる。

4.4 ひび割れ性状

図-12 に No.1(通し配筋), No.2 (機械式継手長さ 180mm)と No.3 (機械式継手長さ 250mm)の実験結果の最大耐力時におけるひび割れ状況と、解析結果の R=0.25% rad.時と最大耐力時におけるひび割れ状況を示す。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、円の色が黒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。図では各要素における積分点での値の平均を用いた。解析では、最大耐力は実験より小さい変形角で達したため、

最大耐力時のひび割れ幅を実験より若干過小評価しているものの、概ね良好に表現できている。R=0.25% rad.時、全試験体とも梁の引張側の付け根部分からひび割れが生じているが、機械式継手を用いる No.2, No.3 では、通し配筋の No.1 よりひび割れが早く接合部内部へ進行していることが分かる。また、変形が進むにつれて柱端部に細かいひび割れが広がっていく。最大耐力時において、全試験体とも引張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。また No.2, No.3 では、継手端部の支圧による接合部のせん断ひび割れ幅が No.1 より拡大していることが確認できる。

4.5 接合部内せん断応力分布

図-13 に接合部中央水平断面におけるせん断応力分布を示す。最大耐力時において、No.1(通し配筋)では断面の幅方向に沿って広い範囲でほぼ同様な高応力が流れているのに対し、No.2 (機械式継手長さ 180mm)と No.3 (機械式継手長さ 250mm)では、断面の背方向の右側における応力度が高いが、中心部から左側へ下がっていく。これは接合部の中心にある継手の支圧によるものであると考えられる。R=2.5% rad.時、いずれの試験体においても応力が低くなるが、断面の背の左側では端部に行くに従って応力が高くなる。また、せん断応力の低下は、対角断面の継手の支圧応力の低下と同様に、継手の寸法が小さい No.2 の方が No.3 より大きいことが分かる。

5. まとめ

機械式継手の有無及び寸法の違いをパラメータとした十字型柱・梁接合部の 3 次元 FEM 解析を行い、以下の知見を得た。

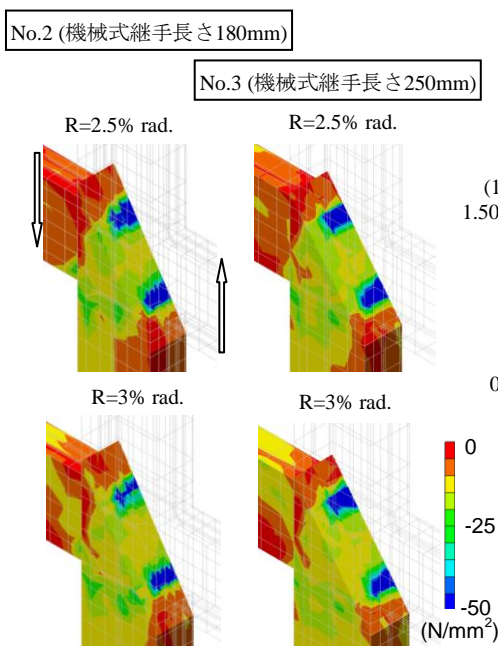


図-11 接合部対角断面圧縮主応力コンター

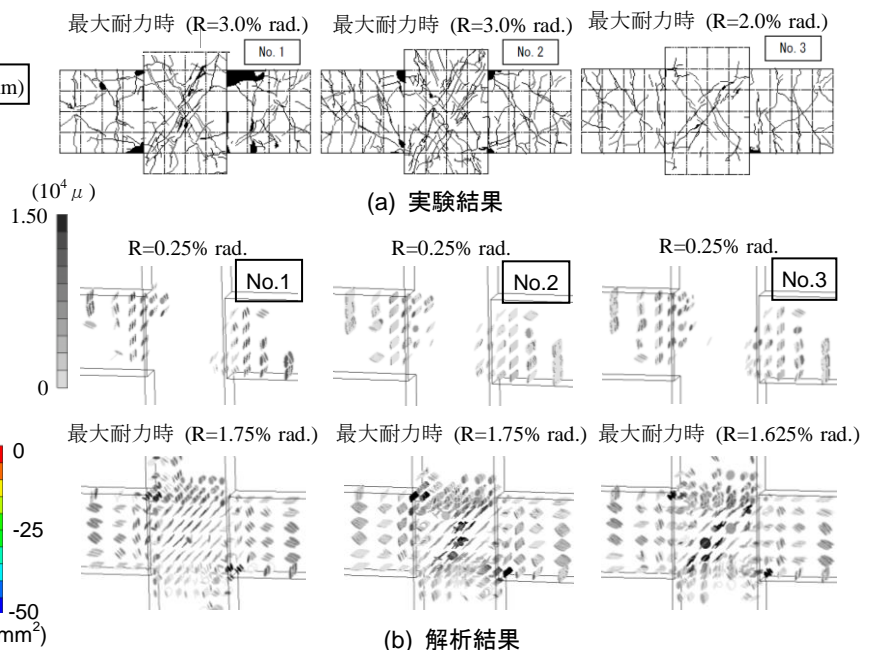


図-12 ひび割れ進展状況

- (1) 機械式継手の引張検証解析を行い、解析結果は実験結果と良く対応していることが分かった。
- (2) 機械式継手を用いることで、梁端の圧縮側とその引張側の近くにある継手の支圧端に新たな応力伝達機構を生じ、圧縮ストラット領域が増大し、接合部の耐震性能を向上させたと考えられる。
- (3) 対角断面の圧縮主応力の検討により、軟化域では継手端部の支圧が接合される主筋の付着劣化による滑りを抑え、接合部の耐力低下を軽減させたと推察される。
- (4) 機械式継手を用いることで、ひび割れがより早く接合部内部へ進行し、接合部のせん断ひび割れ幅がより拡大していることが確認された。
- (5) 接合部内中央水平断面のせん断応力の分布を示し、通し配筋の場合では応力が断面の広い範囲でばば同様に、継手を有する場合は応力が断面の背方向の中心部から左側へ下がっていくという差異が認められた。

謝辞

本研究を行うにあたり、東北大学・前田匡樹准教授、同大学院生・佐川隆之氏から貴重な実験データと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) 高谷真次, 丸田誠: 柱梁接合部内機械式継手の付着性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.463-468, 2003
- 2) 佐川隆之, 伯田丈志, 前田匡樹, 足立智弘: 高強度梁主筋を接合部内機械式継手とした十字型接合部の構造性能に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.367-372, 2008
- 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, 野口博, 柏崎隆志: 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) Willam, K.J., and Warnke, E.P.: Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete, IABSE Seminar on 'Concrete Structures subjected to Triaxial Stresses', Bergamo, Italy, 1974, Proceedings, Vol.19, pp1-31, 1975
- 6) Kupfer, H.B., and Gerstle, K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp853-866, 1973
- 7) Fafitis, F. and Shah, S., P., "Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns," ACI Journal, pp.213-232, 1985

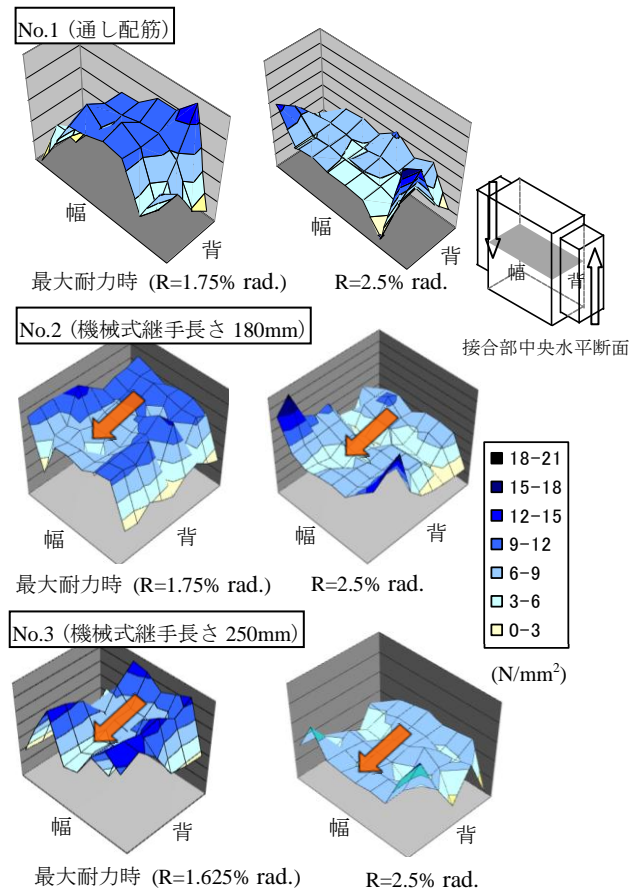


図-13 接合部内中央水平断面せん断応力分布

- 8) Park, R., Kent D. C. and Sampson R. A. "Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading," Proc. of ASCE, ST7, Jul.1972
- 9) 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
- 10) 飯塚崇文: 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリートの構成則と有限要素解析に関する研究, 千葉大学学位論文, 1992
- 11) 山田一字, 青柳征夫: ひび割れ面におけるせん断伝達, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.19-28, 1983.9
- 12) 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
- 13) 山崎章, 白川潔, 小山清一: ねじ鉄筋樹脂充填の力学的特性, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.385-388, 1984
- 14) 松崎育弘ほか: 機械式継手を有する RC はり部材の挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.561-566, 1987