

論文 梁主筋付着性状を変化させた RC 立体柱・梁接合部の解析的研究

三浦 浩太^{*1}・坂下 智幸^{*2}・柏崎 隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨: 岸田らが実験を行った接合部破壊型スラブ無し鉄筋コンクリート造平面・立体柱・梁接合部試験体を対象として、3次元 FEM 解析を行った。実験結果との比較により解析手法の検証を行うとともに、実験では観察が難しい内部応力の検討などを行った。解析結果は、実験より剛性が高いものの、最大耐力は実験とよい対応を示した。接合部内付着の有無により、試験体の破壊性状に差異が認められた。圧縮主応力図において、立体試験体では対角断面などの検討によりストラットの形成状況に平面試験体と同様な傾向が確認された。

キーワード: 立体柱・梁接合部, 付着, 水平2方向同時載荷, 3次元 FEM 解析

1. はじめに

地震発生時、通し梁主筋を有する RC 内部柱・梁接合部においては、非常に大きなせん断力が作用する。接合部内における梁主筋は接合部内に直線定着され、引張側から圧縮側までひずみが逆転するので大きな付着応力が作用する。接合部内梁主筋の付着の劣化は履歴特性及びせん断抵抗機構に大きく影響するが、接合部内梁主筋の付着劣化に関する既往の実験では平面架構を対象とした1方向載荷時のものがほとんどである。

そこで本研究では1方向載荷を受ける平面架構試験体に加えて2方向の載荷を受ける直交梁付きの立体架構試験体について解析を行い、付着性状と架構形式をパラメータとして実験との比較、応力状況などの検討を行った。

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2005年に岸田ら¹⁾によって行われた実験で扱われた試験体、MP1(平面付着あり)、MP2(平面付着絶縁)、MT1(立体付着あり)、MT2(立体付着絶縁)に加えて、接合部内の付着を完全に絶縁したMP3(平面付着完全絶縁)、MT3(立体付着完全絶縁)について解析を行った。MP試験体は平面試験体を表し、MT試験体は立体試験体を表す。1, 2, 3がそれぞれ付着あり、付着絶縁、付着完全絶縁を表す。全試験体ともに、梁の断面は250×400 mm、柱断面は350×350 mm、梁、柱の反曲点間距離はそれぞれ2800 mm, 2330 mmとなっている。

実験では付着絶縁試験体 MP2, MT2 の接合部内の柱、梁主筋の凹部に紙粘土をつめ、ビニールを巻きつけている。MP1, MT1 では接合部内の付着性状を良好にするためにネジ鉄筋を接合するために用いるネジ継手を 7mm

幅に切断し、図-1 に示すように梁主筋 1 本につき 3 ヶ所溶接してある(溶接節と呼ぶ)。表-1 に各試験体諸元一覧、表-2,3 にコンクリート、鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。ボンドリックは、コンクリートひずみを無視した鉄筋ひずみの積分値をすべり量として決定し、付着応力度は接合部内梁主筋の鉄筋力の差から算定した実験結果に従った。MP1(平面付着あり)、MT1(立体付着あり)ではそれぞれ最大付着応力度 4.1N/mm², 5N/mm²を設定した。MP2(平面付着絶縁)、MT2(立体付着絶縁)については実験においてわずかながら付着応力度が生じたため、MP2 では剛性 9.8N/mm³, 最大付着応力度 0.9N/mm², MT2 では剛性 14.7 N/mm³, 最大付着応力度 3.9 N/mm²を設定し、実験結果の再現を試みた。また、付着完全絶縁試験体については付着剛性を 0 とすることで表現した。接合部域以外の梁主筋、柱主筋の付着は、接合部域以外での早期の付着劣化を防ぎ、解析を安定させるため付着強度を高く設定した。

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-Warneke 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ひび割れモデル、ひび割れ方向のせ

*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 大学院生

*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 助教 工修 (正会員)

*4 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-1 各試験体諸元一覧

架構	平面試験体			立体試験体			
	MP1	MP2	MP3	MT1	MT2	MT3	
試験体名	MP1	MP2	MP3	MT1	MT2	MT3	
軸力	883kN 圧縮一定 (軸力比0.32)						
梁の配筋	上下端主筋:4-D25 あばら筋:4-D10@60						
柱の配筋	主筋:16-D22 帯筋:2-D10@60						
接合部横補強筋	2-D13@80(3sets) pwj=0.141%						
接合部内	梁	溶接節	絶縁	完全絶縁	溶接節	絶縁	完全絶縁
付着性状	柱	通常	絶縁	完全絶縁	通常	絶縁	完全絶縁

表-2 コンクリート材料特性

架構	平面試験体	立体試験体
圧縮強度(MPa)	22.3	22.8
引張強度(MPa)	1.96	2.02

表-3 鉄筋材料

	径	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
帯筋、あばら筋	D10	1045.8	187.7
接合部横補強筋	D13	991.1	220.3
柱主筋	D22	563.9	201.7
梁主筋	D25	525.8	194.4

断面伝達特性には青柳・山田モデルを使用した。また、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Bi-linear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⁾を用いた。各モデルの詳細は文献²⁾を参照されたい。

解析対象試験体の要素分割および境界条件を図-2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くなり、解析に長時間を要し、実用的でないため、接合部付近を細かく、それ以外を粗く設定した。また、柱梁端部の加力部分は応力集中を考慮して、強度を上げて補強した。梁および柱の主筋はかぶり部分の早期の破壊を防ぎ、安定して計算させるために試験体の外側に配置し、降伏曲げモーメント M_y 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。

2.3 荷重方法

最初に一定軸力を荷重制御により荷重し、その後梁端部をローラー支持、柱脚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形角 $R=1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33$ をそれぞれ1サイクルずつ荷重した。平面試験体には東西方向、立体試験体には45度方向からの荷重力をそれぞれ加えた。

3. 解析結果

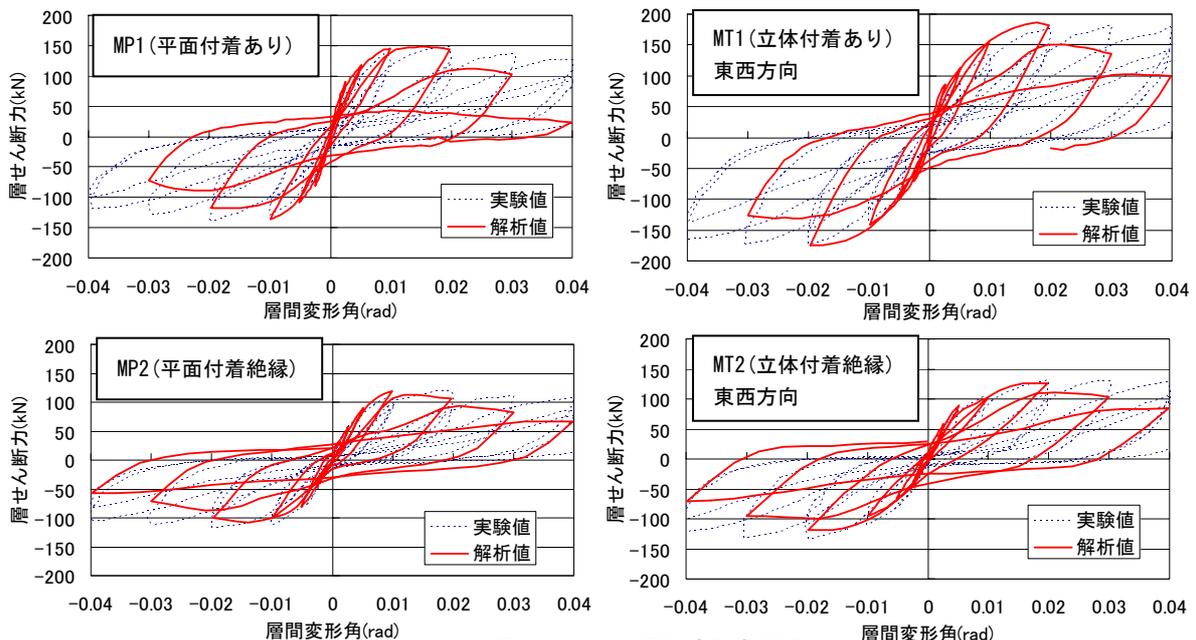
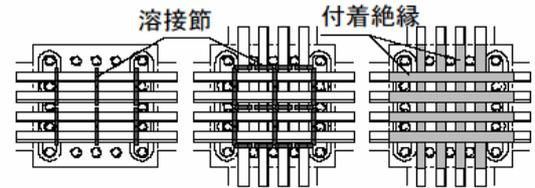


図-3 層せん断力—層間変形角関係



(a)試験体 MP1 (b)試験体 MT1 (c)試験体 MT2

図-1 接合部詳細

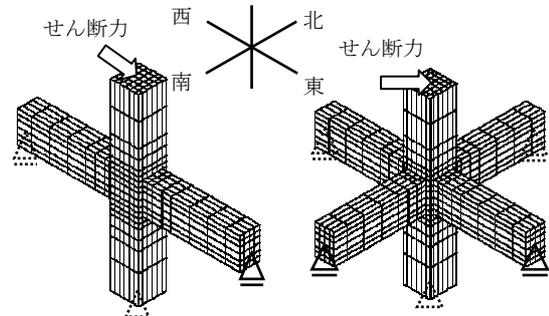


図-2 要素分割および境界条件

3.1 層せん断力—層間変形角関係

各試験体の層せん断力—層間変形角関係を図-3に示す。立体試験体に関しては東西方向のみ示した。初期剛性は若干高めの値を示したが、最大耐力に関してはそれぞれ良好な対応を示したといえる。MP2(平面付着絶縁)試験体では層せん断力のピークが1%時となり、実験に

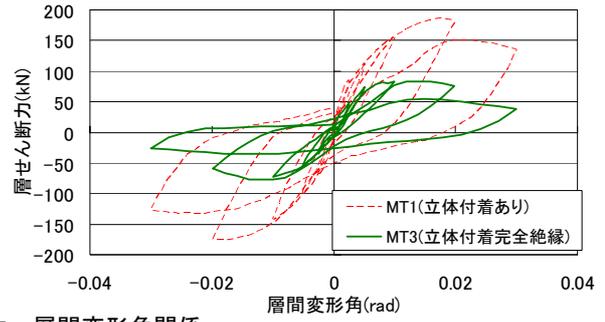
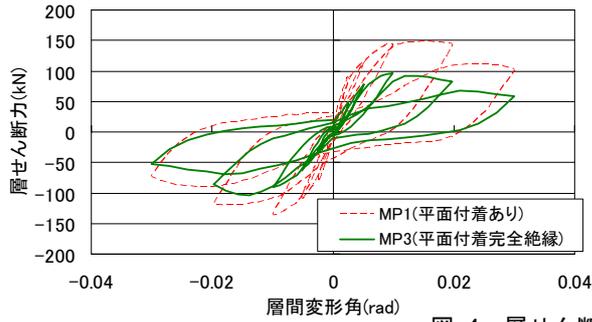


図-4 層せん断力—層間変形角関係

比べて早まった。層間変形角 2% 以後、各試験体において耐力低下が著しくなった。また、実験では特に付着絶縁試験体においてスリップ性状が顕著であったが、解析上でのスリップの表現が不十分であると言わざるをえない。付着のモデル化の見直しが必要であると思われる。

図-4 に MP3(平面付着完全絶縁)、MT3(立体付着完全絶縁)試験体の層せん断力—層間変形角関係を付着ありの場合とあわせて示す。最大耐力は MP3 では 96.9kN、MT3 では 83.9kN となり、付着絶縁試験体よりもさらに剛性、耐力が低下した。立体試験体のほうが耐力が低いのは、2 方向の加力による柱付け根への圧縮集中と、付着完全絶縁による危険断面への圧集中により早期に付け根部分が破壊してしまったと考えられる。

3.2 接合部内梁主筋ひずみ分布

図-5 に接合部内東西梁上端筋のひずみ分布を示す。MP1(平面付着あり)試験体ではひずみの値、勾配ともに、よい対応を示している。MP2(平面付着絶縁)試験体では、解析が実験結果よりも若干ひずみが大いだが、付着を絶縁することにより圧縮鉄筋が引張に転化する現象を表現できた。MT1(立体付着あり)試験体では引張側のひずみが大きく出ているが、圧縮側ではよい対応を示している。MT2(立体付着絶縁)では 0.25%、0.5% 時により対応を示しているが、1.0% 時には実験よりも若干低い値となっている。こちらも MP2 と同様に引張への転化が見られる。

3.3 接合部入力せん断力—層間変形角関係

図-6 に接合部入力せん断力—層間変形角関係を示す。立体試験体は東西方向のものを示す。MP3(平面付着完全絶縁)、MT3(立体付着完全絶縁)試験体においては接合部内の付着力が 0 なので、接合部内にはストラット機構だけが存在し、トラス機構は形成されず、MP1(平面付着あり)、MT1(立体付着あり)の接合部入力せん断力と差が生じる。平面、立体どちらも変形が進むにしたがって接合部入力せん断力の差が増加したのは、MP1、MT1 のトラス機構の負担分が増加したことが考えられるが、そのほかに、接合部入力せん断力を層せん断力から計算したため、MP3 では梁端部の圧壊、MT3 では柱端部の圧壊の影響により差が広がる可能性がある。

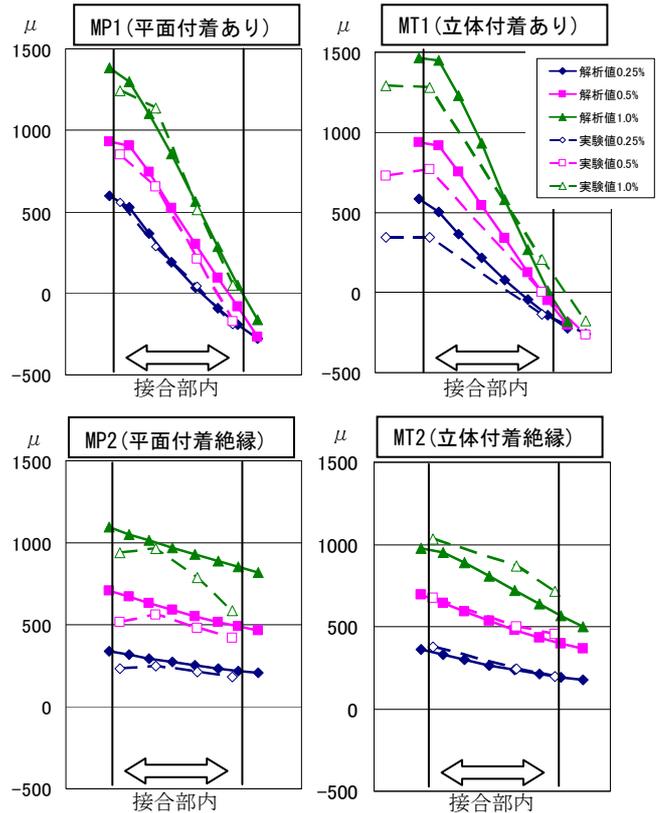


図-5 接合部内東西梁上端筋のひずみ分布

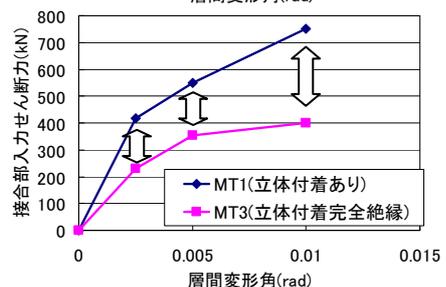
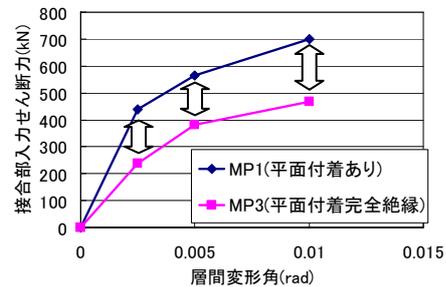


図-6 接合部入力せん断力—層間変形角関係

3.4 接合部内圧縮主応力図

(1) 平面試験体

図-7 に MP1(平面付着あり), MP3(平面付着完全絶縁)の垂直断面の圧縮主応力及びベクトル図を示す。最大耐力時, MP1 では対角方向に高応力の圧縮ストラットが形成され, コンクリートが圧壊した。また最大耐力時に最もストラットの幅が広がる。MP3 でもストラットは形成されるものの, 梁及び柱の端部への圧縮力の集中が著しい。ストラットの幅が狭く, 図中に楕円で示した箇所を比較すると応力を負担しない箇所が MP1 に比べて広い。MP1 が接合部内でストラット機構とトラス機構により大きい領域で応力を負担するのに対し, MP3 は接合部内ではストラットのみ小さい領域で応力を負担する。また, ベクトルの角度を見ると特に中心部において付着力の差により MP1 の方が勾配が大きく, MP3 はそれよりも緩やかでほぼ対角方向である。R=2.0%時, MP1 では接合部破壊後, 応力は中央部分から低くなっていき, ベクトルの方向が乱れ始める。MP3 では梁端部が圧壊し, 層せん断力が下がっていくが, まだ健全な部分が残る接合部内に応力が流れていっている。

図-8 に R=1.0%時の MP1, MP3 の対角断面の圧縮主応力図を示す。MP1 では断面の中心に高い応力が集中していることが見てとれる。MP3 では幅方向に様に応力が分布している。また, せい方向でみると MP3 では端部で応力負担が小さく, 中央部だけで応力を負担していることがわかる。

(2) 立体試験体

図-9 に MT1(立体付着あり), MT3(立体付着完全絶縁)の斜め垂直断面の圧縮主応力及びベクトル図を示す。最大耐力時, MT1 では斜め垂直断面の対角方向に太いストラットが形成され, コンクリートが圧壊する。2 方向の加力により柱端部への圧縮集中も厳しくなる。MT3 ではストラットが狭く, 柱, 梁端部に圧縮集中する。2 方向の加力を受ける立体試験体においても, 平面試験体と同じ断面内で応力が負担されずにいる領域が存在する。ベクトルの角度は MT1 に比べて緩やかで, ほぼ対角方向である。MT1 は接合部破壊, MT3 は柱端部の圧縮破壊となった。R=3.0%時, MT1, MT3 ともに中央部の応力が低くなり, ベクトルの方向が乱れる。MT3 では依然低応力域が存在し, 応力負担に寄与していないことがわかる。

図-10 に R=2.0%時の MT1, MT3 の斜め対角断面の圧縮主応力図を示す。MT1 のほうが広く応力を伝達し, MT3 では応力伝達域が狭い。MT3 では中央部分のみ応力を負担し, その他の部分は応力負担に寄与しない。立体試験体において, 断面の形状は違っても, 平面試験体と同じような傾向となった。

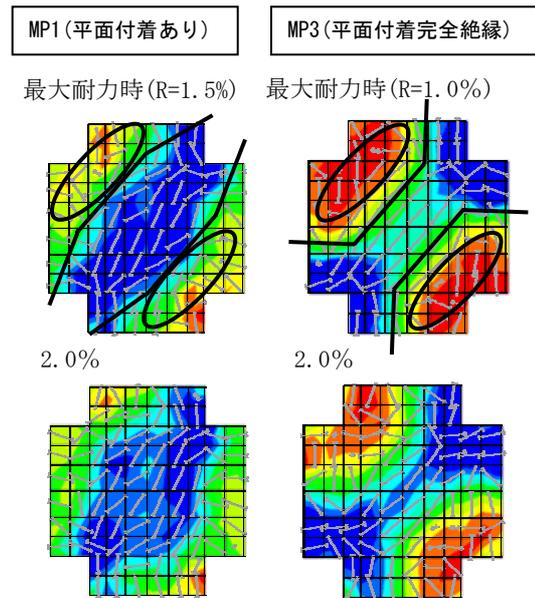


図-7 接合部垂直断面圧縮主応力及びベクトル図

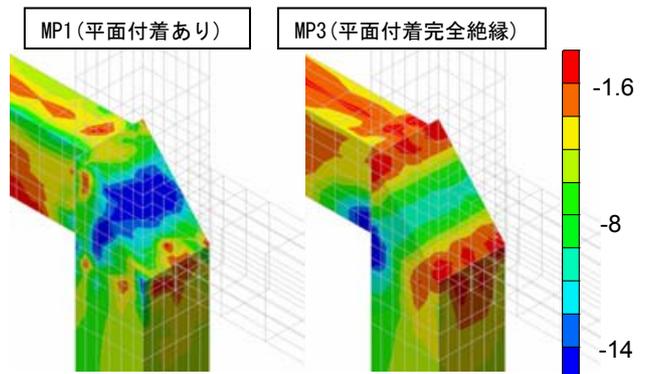


図-8 接合部対角断面圧縮主応力図(R=1.0%) (N/mm²)

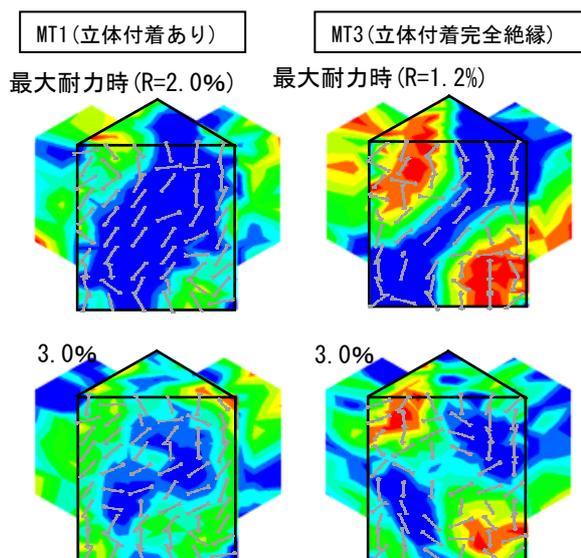


図-9 立体接合部斜め垂直断面圧縮主応力及びベクトル図

3.5 接合部内せん断応力度分布

図-11 に接合部中央水平断面におけるせん断応力度分布図を示す。せん断応力は断面の τ_{zx} , τ_{zy} のベクトル和である。MP1(平面付着あり)試験体において $R=1.0\%$ 時、断面中央部の応力度が高い。最大耐力時から中央部の応力度が低くなる。MP3(平面付着完全絶縁)試験体において $R=1.0\%$ 時は南北方向に一樣、東西方向中央が盛り上がる。梁の圧壊による最大耐力後の $R=2.0\%$ 時にはさらに応力度は高くなり、せん断力が入力され続けていることがわかる。立体試験体においては、平面試験体と比べて 45 度傾く応力分布となる。MT1(立体付着あり)と MT3(立体付着完全絶縁)を比較すると、中央部では応力度は同程度だが、MT1 のほうが端部まで高い応力の分布が見られ、MT3 では端部にいくにしたがって応力が低くなる。また、MT3 は $R=1.2\%$ で最大耐力を迎えたが、その後の $R=2.0\%$ 時にも高い応力度分布が見られ、柱端部の圧壊後も MP3 と同じくせん断力が入力され続けていることがわかる。

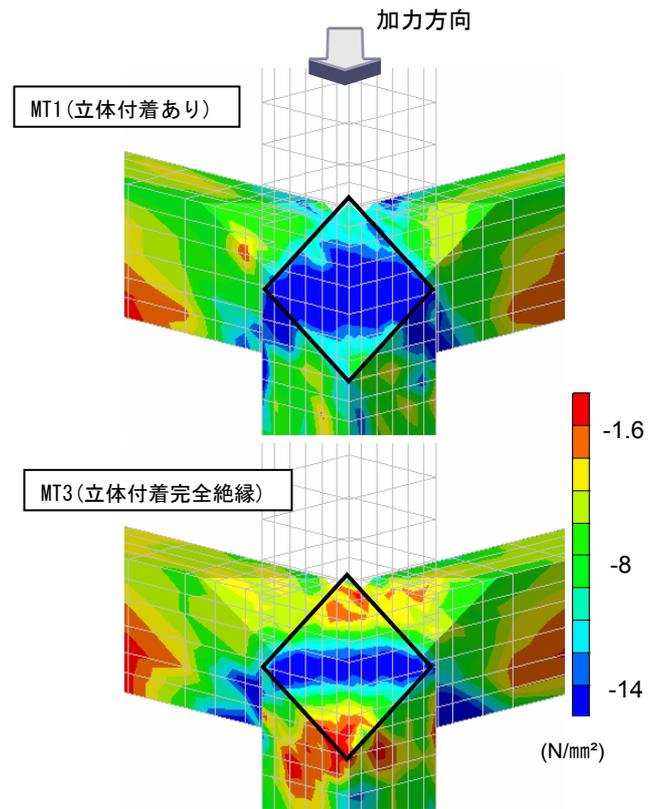


図-10 立体接合部斜め対角断面圧縮主応力図 (R=2.0%)

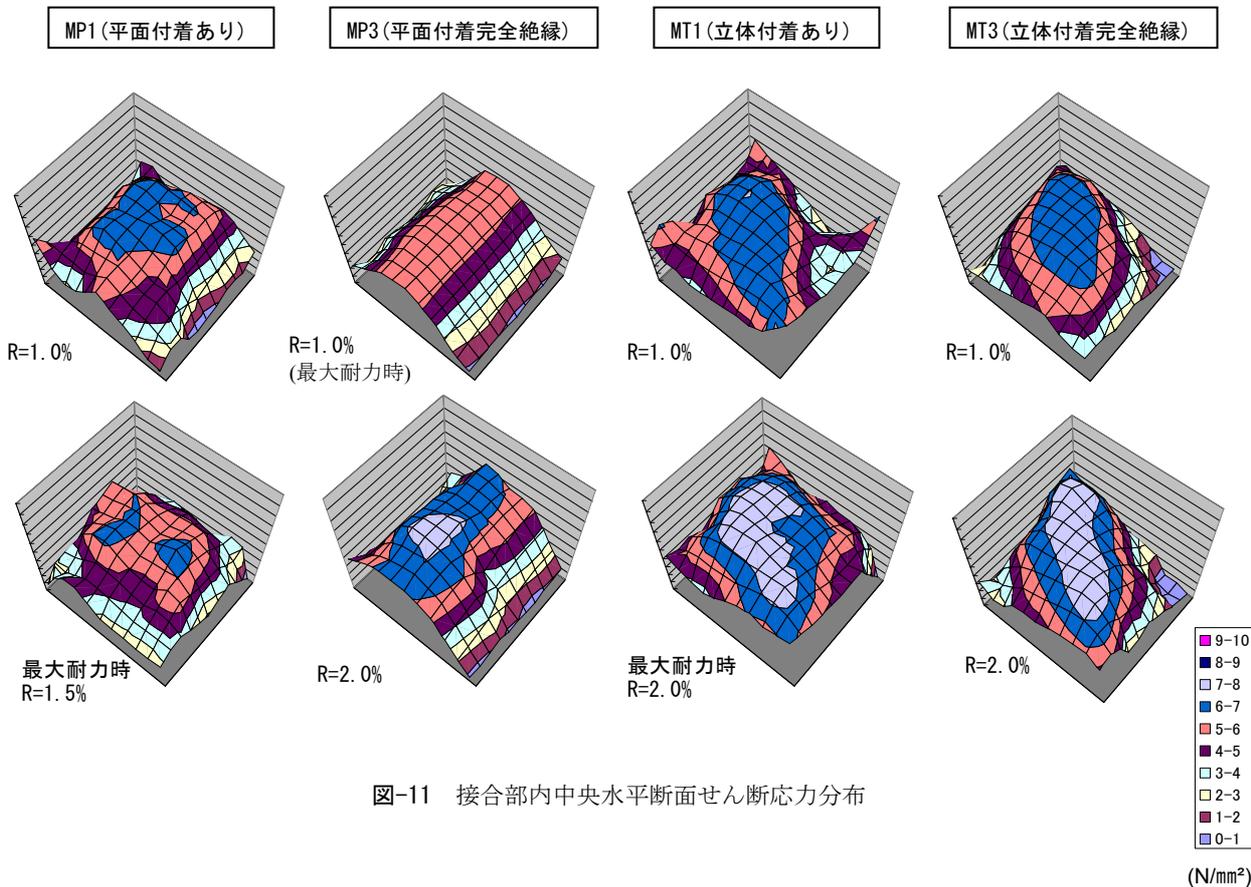
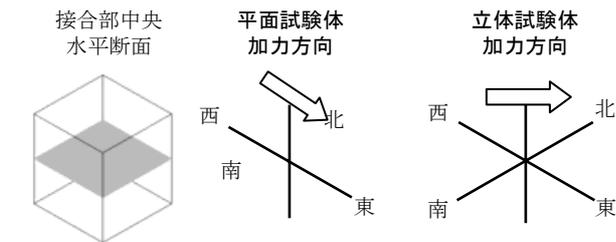


図-11 接合部内中央水平断面せん断応力分布

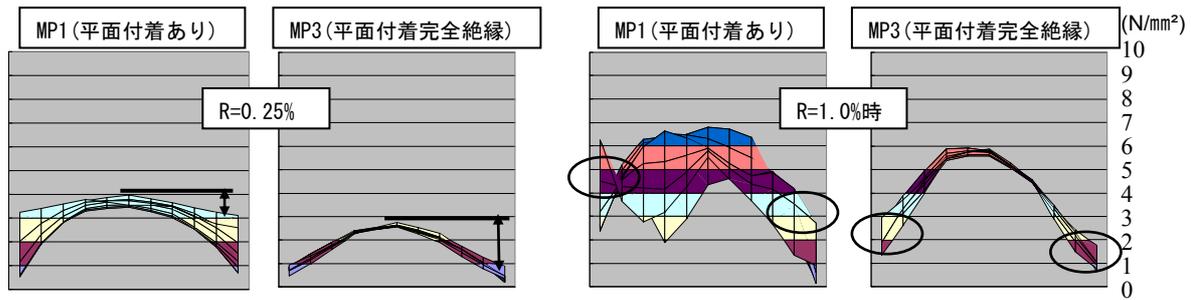


図-12 平面試験体 南面 接合部内中央水平断面せん断応力分布

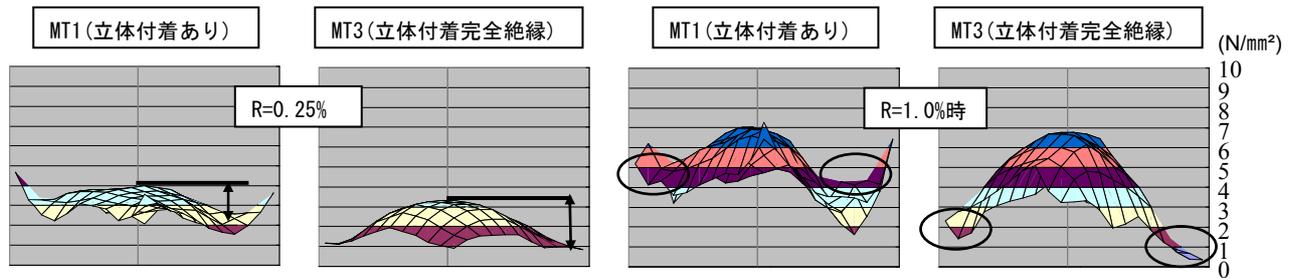


図-13 立体試験体 南東面 接合部内中央水平断面せん断応力分布

図-12 に平面試験体の、南面から見たせん断応力度分布、図-13 に立体試験体の、南東面から見たせん断応力度分布を示す。平面、立体ともに中央部の応力は高いが、端部の応力が付着があるほうが付着がないものより高くなっている。つまり中央部と端部との差が付着がある場合には小さく、付着がない場合には大きい。中央部はストラット機構により、付着の有無に関わらず応力が集中するが、付着がない場合トラス機構が存在しないため、中央部以外の応力分布に差が生じ、応力の伝達に寄与が少ない部分が存在する。

4 まとめ

- (1) 層せん断力-層間変形角関係において、実験に対して剛性が高めであったが、最大耐力については実験とよい対応を示した。解析において履歴のスリップ性状の表現が不十分で、改善の余地がある。
- (2) 接合部内付着ありの試験体と接合部内付着完全絶縁の試験体について主に検討を行った。付着ありの場合は接合部内に応力が伝達され接合部破壊となったが、付着完全絶縁の場合は柱、梁の端部に圧縮力が集中した。
- (3) 立体試験体において、対角断面などの圧縮主応力図を検討することによってストラット、トラスの負担について平面試験体と同様に付着ありの場合はストラット域が大きくなり、付着がない場合はストラットの幅が狭くなり、応力を負担しない箇所が存在することを視覚的に示した。
- (4) 接合部内のせん断応力の分布の様子を平面試験体、立体試験体において示し、付着ありの場合と付着がない場合で差異が認められた。

謝辞

本研究を行うにあたり、芝浦工業大学・岸田慎司准教授、東京都立大学大学院・森山健作氏、同・北山和宏准教授、同・西川孝夫名誉教授から、貴重な実験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。

参考文献

- 1) 岸田慎司, 森山健作, 北山和宏, 西川孝夫: 梁主筋付着性状を変化させた RC 立体柱・梁接合部のせん断性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, 2005
- 2) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.67-70, 2004.9
- 3) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.605-608, 2007.9
- 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