

# 論文 枠付き鉄骨ブレース耐震補強工法における間接接合部の破壊挙動に関する解析的研究

梁 生鈿<sup>\*1</sup>・柏崎 隆志<sup>\*2</sup>・野口 博<sup>\*3</sup>

**要旨:** 枠付き鉄骨ブレース耐震補強工法を用いる間接接合部の直接せん断実験試験体を対象とし、3次元 FEM 解析上のモデルを構築し、単調載荷の解析を行い、実験結果との比較により解析手法の検証を行った。異種材料間の接合面に離散ひび割れを導入し、スタッドとアンカーのダボ作用には節点界面要素を用い、間接接合部のせん断伝達及び破壊挙動を模擬することができた。接合面の挙動にはクーロン摩擦モデルを利用し、粘着力硬化と摩擦硬化を考慮することで、接合面における固着抵抗と摩擦抵抗を再現し、内付け試験体について実験を精度良くシミュレーションすることができ、外付け試験体においてはまだ改善の余地がある。

**キーワード:** 耐震補強, 間接接合部, ダボ作用, クーロン摩擦, 3次元 FEM 解析

## 1. はじめに

既存の RC 建造物の耐震補強において、多く用いられている工法として、枠付き鉄骨ブレースを躯体の内側に接合する従来工法と外側に接合する外付け工法がある。これらの補強工法では、主に無収縮モルタル、頭付きスタッドと後施工アンカーで出来た間接接合部を介し、既存 RC 躯体と補強鉄骨ブレースとを接合する。間接接合部には異種材料間の接合面が複数存在し、それらにおいて付着作用、固着作用、ダボ作用などによって応力が伝達され、その挙動が複雑である。特に、せん断力と偏心モーメントによる引張・圧縮応力を受ける外付け工法を用いる間接接合部の挙動については、これまでは実験的研究<sup>1)2)</sup>が殆どであり、いまだ未解明なところが多い。以上の背景から、FEM 解析により、間接接合部の挙動を明らかにし、枠付き鉄骨ブレース工法による補強効果を適切に評価することが必要であり、より合理的な設計にも繋がると考えられる。

本研究では、枠付き鉄骨ブレース耐震補強工法を用いる間接接合部の直接せん断実験試験体<sup>3)</sup>を対象とし、アンカーの配置とスラブの有無をパラメータとして、異種材料界面上の挙動を模擬できる解析モデルを構築し、3次元 FEM 解析を行った。

## 2. 解析対象試験体

竹中工務店の宮内ら<sup>3)</sup>が実施した枠付き鉄骨ブレース耐震補強工法を用いる間接接合部の直接せん断実験試験体を解析対象とし、図-1に示すように計4体である。NT-J1 は、従来工法の内付け接合部の試験体であり、アンカー(8-D19)とスタッド(10-22φ)の軸は平行に配置されている。これに対して、NT-J2 は外付け接合部の

試験体であり、アンカーは梁側面とスラブに打設されている(それぞれ4-D19)。また、NT-J3 はアンカー(8-D19)をすべて梁側面に打設した試験体、NT-J4 はスラブのない試験体である。図-2に実験の加力装置を、表-1, 表-2にコンクリート、鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

## 3. 基本解析モデルの構築

比較的シンプルな内付け間接接合部の NT-J1 試験体に基づいて解析モデルを構築する。解析には、汎用コード DIANA9.3 を用いた。

### 3.1 要素分割

解析対象試験体の要素分割と境界条件を図-3に示す。スタッドとアンカーによるせん断力の伝達を忠実に模擬できるように、配筋位置が実験試験体に従うような要素分割を採用した。また、計算時間を短縮するため、加力梁のモデル化を省略した。境界条件について、実験で

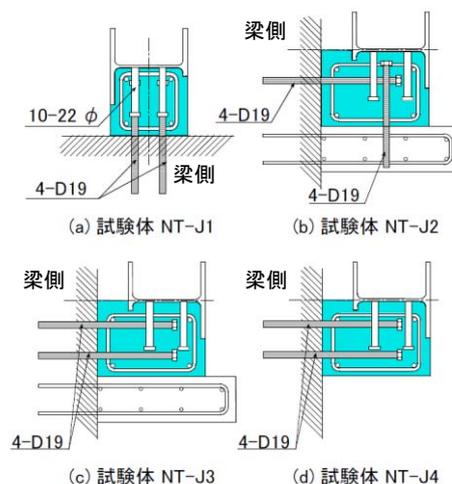


図-1 試験体一覧(宮内ら<sup>3)</sup>による)

\*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)

は加力装置に加力梁の回転を防ぐ振れ止めが取り付けられているため、H型鋼のフランジの上部をローラ支持、梁の底面をピン支持とした。

加力方法は一定の圧縮力(N=40KN)を線圧として接合部に加力した状態で、せん断力を変位制御によりH型鋼のウェブに単調載荷を行った。

### 3.2 材料構成則

#### (1) コンクリート

コンクリートはソリッド要素を用い、図-4に応力-ひずみ関係を示す。圧縮側では、下降域における圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$ を考慮する放物線のモデルを採用し、 $G_{fc}$ は中村<sup>4)</sup>らの提案式により求めた。一方、引張側では軟化曲線HORDYKモデルを使用し、引張破壊エネルギー $G_f$ は大岡<sup>5)</sup>らの提案式から求めた。ひび割れモデルは全ひずみ回転ひび割れモデルを用いた。

#### (2) 鉄筋、鉄骨

スタッド、アンカー及びスラブの補強筋は梁要素、それ以外の鉄筋はトラス要素、鉄骨ブレースは四辺形フラットシェル要素を用い、それぞれの応力-ひずみ関係にはBi-linearモデルを使用した。

#### (3) 異種材料間の接合面の挙動

H型鋼と充填モルタルとの接合面、及び充填モルタルと既存躯体の梁あるいはスラブとの接合面に沿って発生するひび割れを離散ひび割れによってモデル化する。離散ひび割れは平面界面要素で表現した。ただし、外付け接合部ではH型鋼のフランジはモルタルに差し込んだ部分があり、その接合面における離散ひび割れはモデル化上の便宜から、節点界面要素を使用した。図-5に離散ひび割れのモデル化を示す。

界面要素の応力-相対すべり関係には、垂直方向と接線方向との挙動を定義できるクーロン摩擦モデルを用いた。界面要素の垂直方向に対し、圧縮は十分大きな剛性値を用い、引張はモルタルあるいは既存コンクリート

表-1 コンクリート、モルタルの材料特性

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	22.1	1.90	$2.72 \times 10^4$
充填モルタル	59.4	4.50	$2.62 \times 10^4$

表-2 鉄筋、鉄骨の材料特性

種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
アンカーボルト	287	397	$1.856 \times 10^5$
スタッド	380.13	432	$2.043 \times 10^5$
D10	71.3	360	$1.9 \times 10^5$
H型鋼(LY100)		280.5	$2.087 \times 10^5$

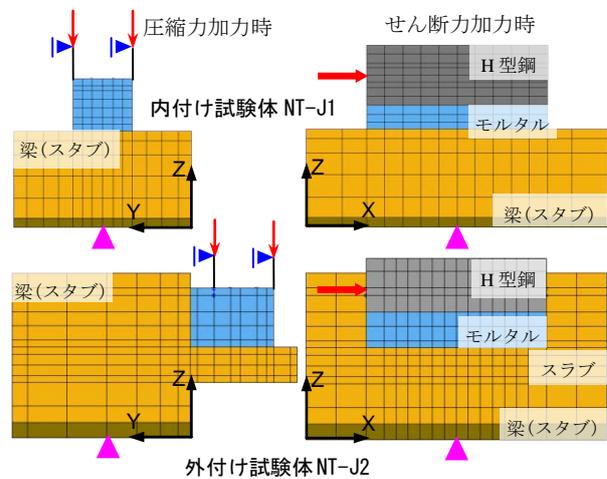


図-3 要素分割と境界条件

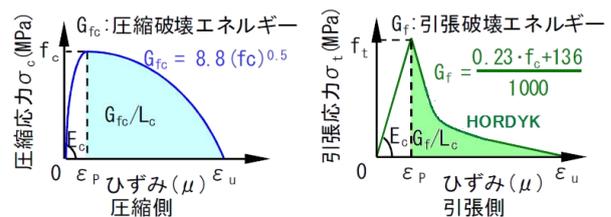


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

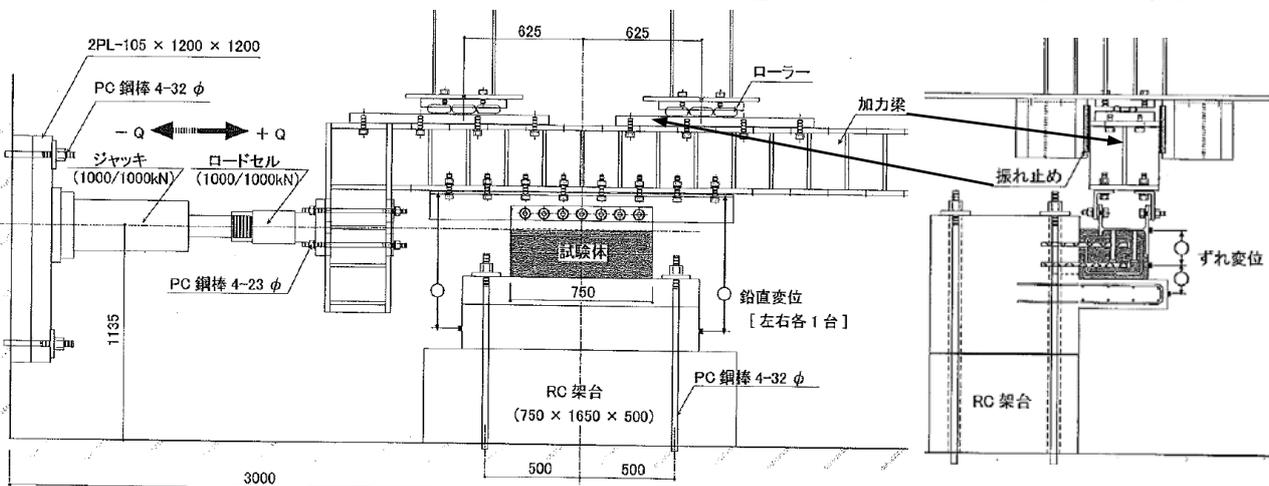


図-2 加力装置 (宮内ら<sup>3)</sup>による)

の割裂強度  $f_t$  に達した後に引張抵抗を失う脆性ひび割れモデルを仮定した。また、離散ひび割れ発生後は、せん断応力及びせん断剛性をゼロとした。界面要素の接線方向に対して鋼・モルタル接合面の場合では、固着作用を意味する粘着力  $c$  は中島ら<sup>9)</sup>の研究により  $0.9 \text{ N/mm}^2$ 、剛性は  $18.0 \text{ N/mm}^3$  を設定した。モルタル・躯体コンクリート接合面の場合では、粘着力  $c$  には純せん断応力状態での固着信頼強度の  $0.7f_t$ <sup>7)</sup>、剛性は田才ら<sup>8)</sup>の実験結果から  $60 \text{ N/mm}^3$  を設定した。摩擦係数については式  $\tan \phi = c/f_t$  から算出した。また、界面要素の粘着力の硬化特性を図-6に示す。膨張角  $\phi$  の  $\tan \phi$  に関しては、体積を持たない接合面に対してゼロのはずであるが、解析の安定性から  $0.1$  を採用することにした。なお、鉄筋とコンクリートとの付着を完全付着とした。

#### (4) ダボ作用

解析上鉄筋の曲げあるいはせん断への抵抗を強くするには、梁要素を用いることが有効である。しかし、梁要素でアンカー筋をモデル化する際、どれだけのせん断抵抗を模擬できるのかが不明である。せん断抵抗能力の解明がダボ作用のモデル化に繋がるため、梁要素の一要素解析を行った。解析試験体は長さ  $10, 20$  と  $40\text{mm}$  の3体、加力は片押し及び逆対称せん断加力の2パターンである。材料特性は表-2のアンカーを参照されたい。図-7に梁要素の境界条件、2パターンのせん断加力による荷重-変位関係及びせん断強度の計算値を併せて示す。解析結果から、梁要素のせん断降伏時のずれ変位が  $0.2\text{mm}$  を超えず、アンカー筋の降伏時ずれ変位(図-9を参照)より非常に小さく、その荷重-変位関係でダボ作用を適切にモデル化できないこと、回転拘束された梁要素のせん断伝達が期待できることがわかった。

図-8にダボ作用のモデル化を示す。接合面に離散ひび割れを導入することで、接合面境界で分割したアンカー同士及びスタッドとH型鋼を節点界面要素で接合した。スタッドのせん断伝達は付け根部の節点を回転拘束することによりモデル化した。アンカーのダボ作用は3直線モデル(図-9)で表現し、せん断応力は松崎ら<sup>9)</sup>の提案式から求めた。スタッドのせん断応力-せん断ずれ変位関係は、津田<sup>10)</sup>の提案する4直線モデル(図-10)を適用した。

本研究ではアンカー筋及びスタッドをダボ筋とし、図-11にダボ筋周辺の拘束状況を示す。ダボ筋から支圧を受けるコンクリートの局部支圧応力は、3次元応力状態になり、一軸圧縮強度の数倍程度になること<sup>11)</sup>を受け、支圧される接合面付近のモルタルの強度を2倍、躯体コンクリートの強度を3倍に上げた。線材のダボ筋から伝達されるせん断力がコンクリート要素の接する辺に集中し、早い段階で圧壊を引き起こす可能性が高い。また、コ

ンクリートの圧壊により、せん断力は主に梁要素が負担するようになっていくと予測される。しかし、曲げモーメントの拘束を考慮しない梁要素のせん断伝達が本解析の要素分割 ( $30\text{mm}$ ) では、図-7の解析結果より計算

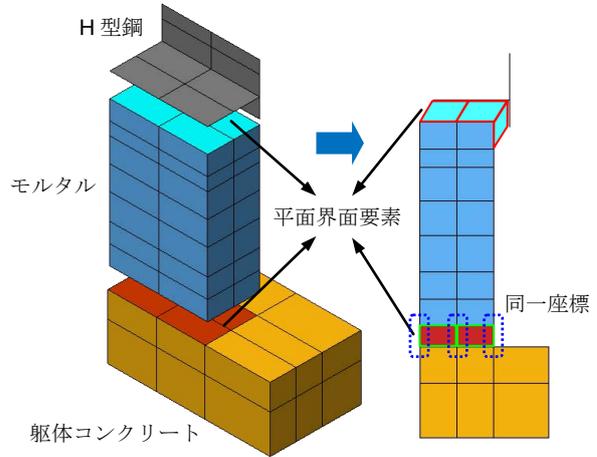


図-5 離散ひび割れのモデル化 (NTJ1 試験体)

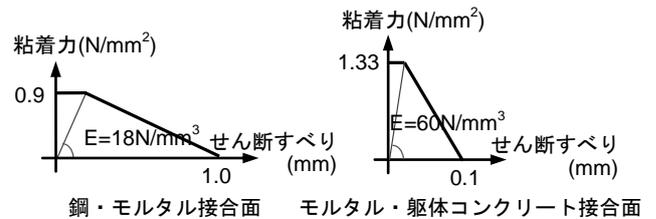


図-6 界面要素の粘着力硬化特性

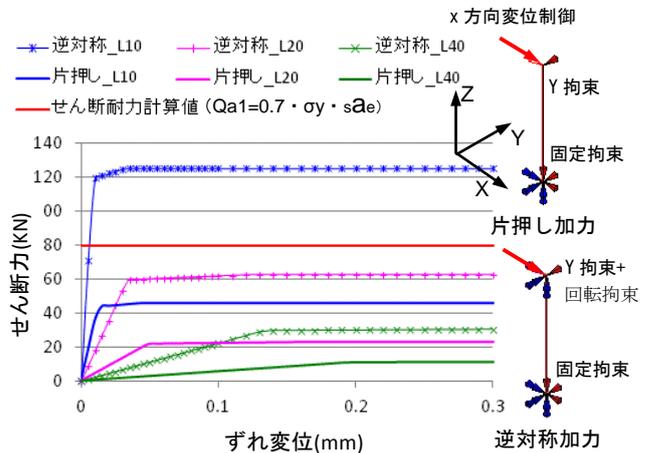


図-7 アンカー(D19)のせん断力-せん断ずれ変位関係

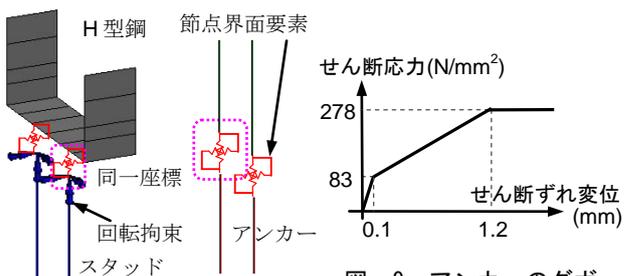


図-9 アンカーのダボ作用モデル

図-8 ダボ作用のモデル化

値の 1/5 の効果も期待できなく、せん断降伏することは無論である。これらのことを防ぐため、ダボ筋を回転拘束した。これにより、比較的大きいせん断力をダボ筋の長さ方向に沿って伝達させ、より多いコンクリート要素がせん断力を負担させることができる。

### 3.3 基本モデルの解析結果

本解析モデルでは、非線形性の強い節点界面要素と平面界面要素が多数混在し、解析途中で解が発散してしまう恐れがあるため、求解法として最も解析結果が安定する一定剛性法を採用することにした。

図-12 に基本モデルのせん断力-ずれ変位関係、図-13 にすべり量  $S=4\text{mm}$  時のダボ筋の変形状況を示す。比較のため、ダボ作用のモデル化における支圧補強と回転拘束状況に関するパラメータ解析の結果も併せて示す。支圧補強と回転拘束を考慮しない場合では、早い段階で梁側のアンカーの部分的せん断降伏により、最大耐力が決まった。支圧側のコンクリートを補強する場合は、アンカーは降伏せず、剛性と耐力とも実験値を下回るが、無補強の場合より良い結果となっている。ダボ筋を回転拘束した場合は、アンカーがせん断降伏まで実験結果を良好に対応している。基本モデルでは、支圧側のコンクリートの補強とダボ筋の回転拘束により、アンカーはせん断降伏せず、剛性と耐力とも実験値より高めた結果となっている。これは、モルタル・躯体コンクリート接合面における摩擦の硬化を考慮しないためであると考えられる。

## 4. 基本モデルの改良

本節では、基本モデルに適宜改良を加えることにより、最終的な解析モデルを構築する。

### 4.1 界面のせん断すべり挙動のモデル化に関する検討

一般に、異種材料間の界面は摩擦挙動により支配される。摩擦抵抗は、ずれ変形量に関係なく軸方向圧縮力及び接合面の状態により一定値を示す<sup>12)</sup>。しかし、本解析モデルの場合、モルタル・コンクリート接合面にアンカーの軸力によるモーメントが生じ、ずれ変位が増大するにつれて大きくなる。これにより、接合面の圧縮側に漸増応力が作用する状態になり、あるずれ変位で摩擦抵抗の限界を迎え、その後接合面の損傷により表面状態は劣化していくと推測され、平面界面要素の摩擦の硬化特性を図-14 に示すようにモデル化した。

界面要素の摩擦硬化特性を考慮した解析結果を図-15 に示す。接合面の状態による固着耐力（本研究では、せん断すべり開始時のせん断応力と定義した）がやや高めとなったが、最大耐力とその時のずれ変位は実験と良好に対応している。比較するため、基本モデル及びそれをもとに粘着力硬化を考慮しない場合の解析結果も

併せて示す。モルタル・コンクリート接合面における粘着力硬化と摩擦硬化を考慮したことにより、剛性と耐力が低下し、軟化域まで実験を精度良くシミュレーションできていることがわかった。

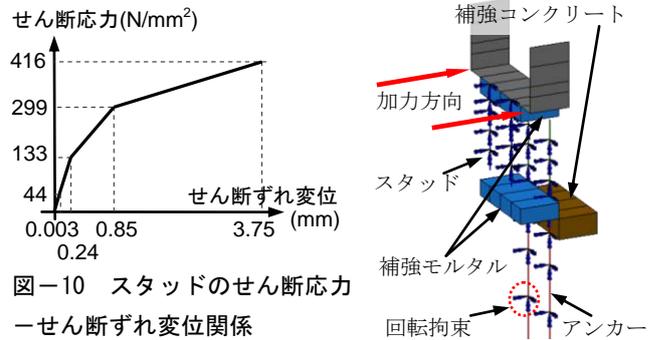


図-10 スタッドのせん断力-せん断ずれ変位関係

図-11 ダボ筋周辺の拘束状況

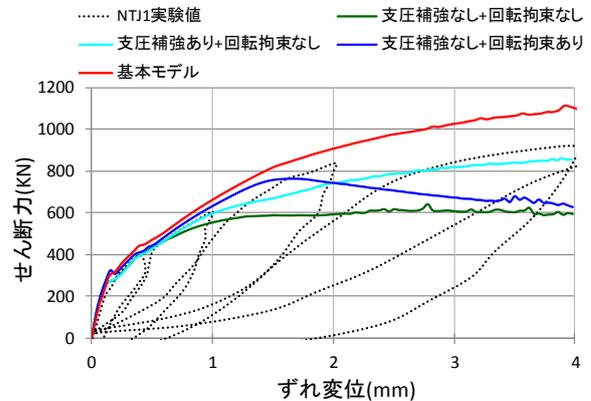


図-12 基本モデルと検証解析の荷重-変位関係

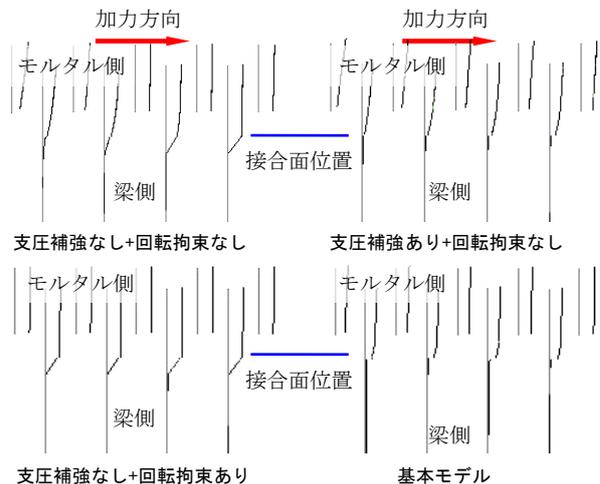


図-13 すべり量  $S=4\text{mm}$  時のダボ筋の変形状況

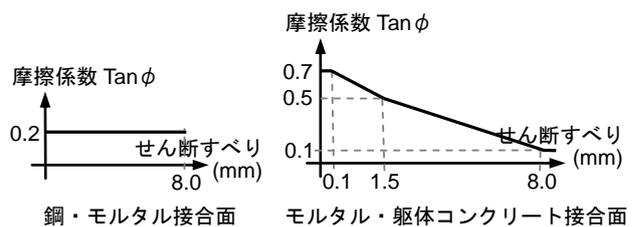


図-14 界面要素の摩擦硬化特性

## 5. 解析モデルの検証

本節では、内付け試験体 NTJ1 に基づいて構築した解析モデルを外付け試験体 NTJ2, NTJ3 と NTJ4 に適用し、解析的検証を行う。

### 5.1 セン断力-ずれ変位関係

図-16 に外付け試験体の荷重-変位関係について解析と実験の比較を示す。縦軸はせん断力を、横軸は梁あるいはスラブと H 型鋼との相対ずれ変位を示す。スラブありの NTJ2 と NTJ3 試験体では、初期剛性は良好に対応しているが、固着耐力は実験を上回る結果となった。これは、接合面の垂直方向の引張強度が高すぎることで、及び回転拘束しない補強筋はせん断に対する抵抗が弱いこと、断面が薄いスラブがせん断加力によるモーメントを受けて回転変形したことにより、接合面の引張側における離れひび割れの発生が緩和されたためであると考えられる。固着耐力以後において、NTJ2 試験体では、剛性の低下が緩やかであり、やや大きいずれ変位で実験より若干高い最大耐力に達した。一方、NTJ3 試験体では、最大耐力を若干過小評価する結果となったが、ポストピーク挙動の傾向を良く捉えている。スラブのない NTJ4 試験体について、実験の各サイクルのピーク時の正負耐力差が大きかったため、解析値と実験の正負両側の結果との比較を示す。固着耐力は実験より小さめであるが、初期剛性は良好に対応している。最大耐力に至るまでの挙動に関しては、解析は実験の正側と負側の中間的な結果となっている。これらのことから、解析はある程度の信頼性があると考えられる。

図-17 に解析同士の比較を示す。参考として、実験結果の包絡線も併せて示す。スラブのない NTJ1 と NTJ4 との固着耐力はほぼ等しい値となっている。これは両試験体の接合面の面積が同じためであると考えられる。スラブの有無が唯一の違いである NTJ3 と NTJ4 との荷重-変位関係はほぼ平行となり、ずれ変位の増大に従って進んでいく傾向が見られる。これは NTJ3 試験体の接合面に、接合部に載荷された一定の圧縮応力のみが作用しているため、摩擦抵抗が一定値となることから説明できる。以上のことから、NTJ4 試験体の解析結果は妥当で

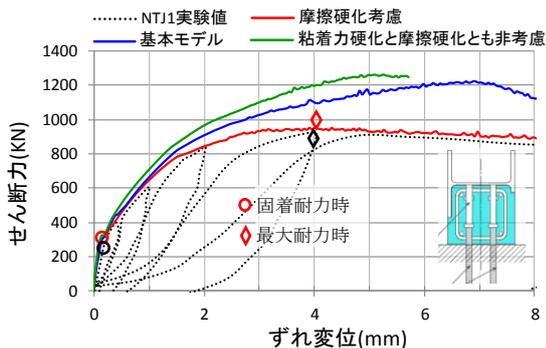


図-15 界面要素の摩擦硬化特性の検討結果

あると判断される。

### 5.2 間接接合部の応力伝達と変形状況

図-18 に NTJ4 以外の試験体の最大耐力時の圧縮主応力分布と変形状況の比較を示す。モルタル部分については Y 軸における中央位置の A 断面の応力分布を示す。全試験体ともモルタル部分において、ダボ筋のせん断伝達による斜め方向の圧縮ストラットが形成されている様子が見られる。また、NTJ1 試験体ではモルタルの切断面

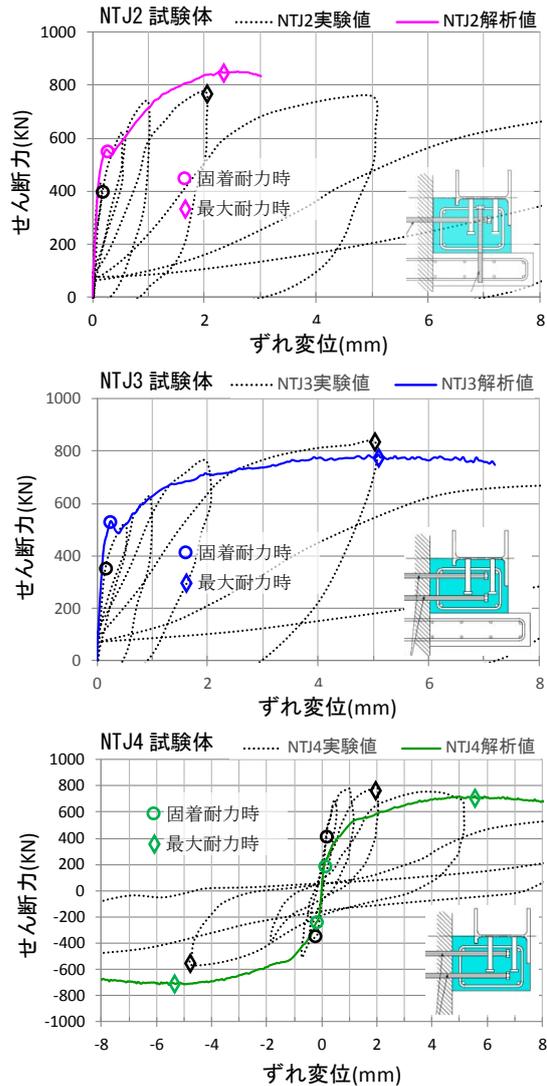


図-16 提案解析モデルの検証結果

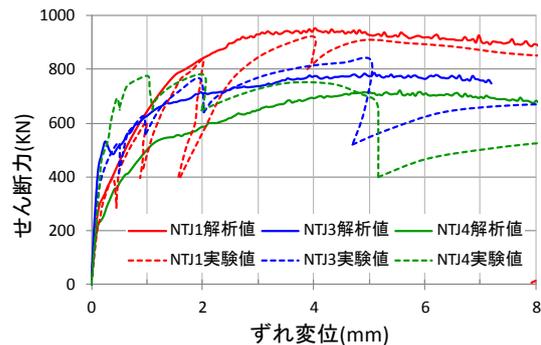


図-17 解析同士の比較

の下部, NTJ2 と NTJ3 試験体では切断面の上部に応力集中が著しい。変形状況に関しては, いずれの試験体においても鋼・モルタル間とモルタル・コンクリート間にずれ変位が生じ, 前者の方は比較的小さいずれ変位となった。また, アンカーの配置により, NTJ2 試験体においてスラブの回転変形が目立つのに対し, NTJ3 試験体では梁のせん断変形が顕著であることがわかった。

## 6. まとめ

- (1) 接合面に離散ひび割れを導入し, ダボ作用には節点界面要素を用い, 支圧を受けるコンクリートを補強し, ダボ筋を回転拘束することにより, 異種材料を用いて接合される間接接合部の破壊挙動を模擬可能な解析モデルを構築した。
- (2) 平面界面要素の粘着力硬化と摩擦硬化を考慮することにより, 異種材料間の接合面における固着抵抗と摩擦抵抗を再現し, 内付け試験体について実験結果を精度良くシミュレーションすることができ, 外付け試験体においてはまだ改善の余地がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり, 竹中工務店技術研究所・宮内靖昌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, 本研究の一部は, 科学研究費補助金・基盤研究 C (研究代表者: 野口 博, 研究課題番号: 21560581) により行われた。

## 参考文献

- 1) 植木理枝子, 今井克彦, 都祭弘幸ほか: 外付け鉄骨フレーム工法による耐震補強効果に及ぼす間接接合部の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 654 号, pp.1501-1508, 2010.8
- 2) 森下泰成, 大谷恭弘ほか: 外付け耐震補強工法における間接接合部の組合せ荷重下での剛性評価とモデル化, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.345-348, 2007
- 3) 宮内靖昌, 毛井崇博, 藤村勝, 木村充: 極低降伏点鋼ブレースを用いて耐震補強された RC 骨組の力学性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1189-1194, 2002
- 4) Nakamura, H., and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
- 5) 大岡督尚ほか: コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp.1-6, 2000.3

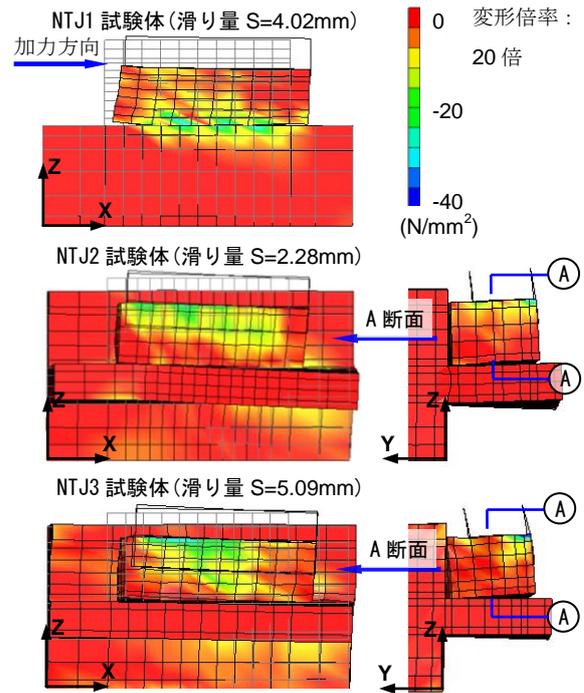


図-18 最大耐力時の圧縮主応力分布と変形状況

- 6) 中島章典ほか: 付着, 機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.758-767, 2007.11
- 7) 榎本将弘, 山田和夫ほか: あと施工アンカーによる接合面の固着強度に関する実験的研究 (その 2) 固着強度の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.573-574, 2006.9
- 8) 引寺隆世, 田才晃, 楠浩一ほか: ウォータージェット処理を施した既存 RC 躯体の表面粗さが接合面のせん断強度に与える影響に関する実験的研究 (その 3) 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.595-596, 2010.9
- 9) 大淵英夫, 鈴木基晴, 南尚吾, 中野克彦, 松崎育弘: ずれ変位を考慮したプレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 491 号, pp.97-104, 1997.1
- 10) 津田和明: スタッドによるコンクリートと鋼板間のせん断伝達に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1247-1248, 2007.8
- 11) 望月重, 榎谷栄次, 永坂具也: 壁式プレキャスト構造の鉛直接合部のせん断耐カウエル効果及び圧縮拘束力を考慮した場合, 日本建築学会構造系論文報告集, 424 号, pp.11-21, 1991.6
- 12) 中野克彦, 松崎育弘: プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断抵抗要素の耐力累加方法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 550 号, pp.151-158, 2001.12