

# 論文 RC 立体柱・梁接合部の耐震性能に及ぼす梁主筋付着性状の影響に関する解析的研究

孫 宏晨<sup>\*1</sup>・柏崎 隆志<sup>\*2</sup>・野口 博<sup>\*3</sup>

**要旨：**本研究では、立体スラブ及び直交梁付き柱・梁接合部について、接合部せん断入力量、梁主筋付着性状、載荷履歴をパラメータとした既往の実験試験体を解析対象として、3次元 FEM 解析を行った。解析での履歴性状、応力分布、破壊性状などについて実験結果との比較により解析手法の検証を実施した。解析結果は、初期剛性及び最大耐力が実験と良い対応を示したが、最大耐力以降の耐力低下が顕著となった。また、梁主筋径を変えることによる付着性状の影響は解析においても確認できた。

**キーワード：**立体柱・梁接合部、付着、2方向繰返し載荷、3次元 FEM 解析

## 1. はじめに

既往の RC 柱・梁接合部を対象とした有限要素法 (FEM) 解析的研究では、1方向加力を受ける平面架構の試験体を対象とした研究が殆どで、スラブや直交梁が付き立体架構を対象とした解析はまだ数少ない。実際の立体架構である構造物の挙動は平面架構の挙動と異なると予想され、さらに地震力は構造物に対して任意の方向から入力されることから立体架構の2方向加力による影響について3次元解析により説明が必要である。

本研究では、2方向加力を受ける立体スラブ及び直交梁付き柱・梁接合部を対象とし、接合部せん断入力量、梁主筋付着性状、載荷履歴をパラメータとして解析を行い、解析結果から履歴性状、破壊性状(モード)、応力状況などについて実験結果との比較により接合部の耐震性能を検討した。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析対象試験体

北海道大学の後藤ら<sup>1)</sup>によって1999年に実験が行われた立体スラブ、直交梁付き柱・梁接合部を解析対象試験体とした。試験体は多層多スパンの RC 矩形ラーメンの中間階内部柱梁接合部とこれに連なる柱・梁の中心点位置で切り出したスラブ付き立体骨組十字架構である。実験では、全試験体ともに柱断面は 300×300mm、梁断面は 200×350mm、階高は 1750mm、梁スパン 3000mm である。梁主筋に 8-D13 (2段配筋) を使用した B17-13 を基本試験体とし、梁降伏後接合部せん断入力量 (梁主筋量)、梁主筋付着性状 (梁主筋径)、載荷履歴をパラメータとしている。すべての試験体は梁降伏先行型を目指

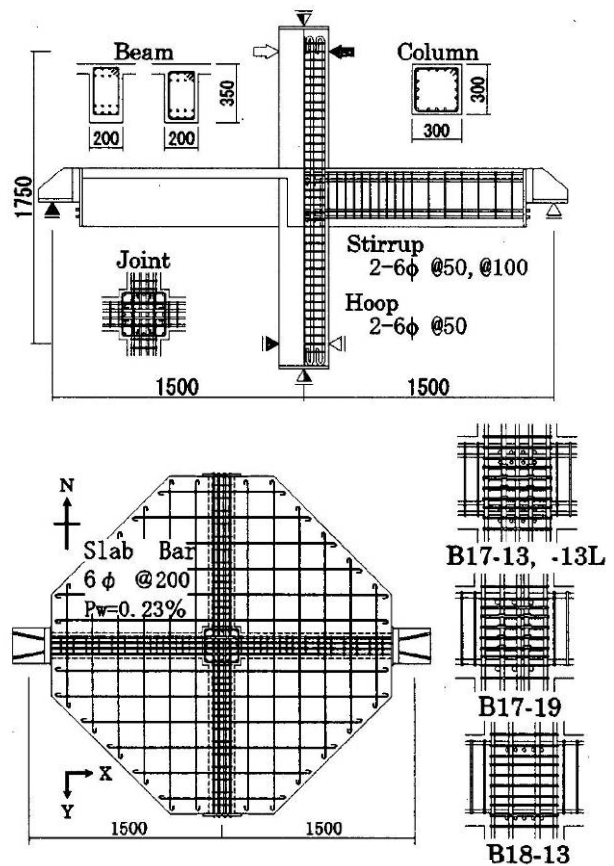


図-1 試験体形状および配筋<sup>1)</sup>

し、梁曲げ耐力が接合部せん断耐力・柱曲げ耐力・柱せん断耐力・梁せん断耐力よりも下回るように設計されている。梁降伏時接合部せん断入力量は2レベルを設定し、高入力の場合 B17 シリーズは梁曲げ降伏後接合部せん断破壊、低入力の場合 B18 シリーズは梁曲げ破壊を想定していた。試験体形状および配筋を図-1 に示す。

\*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 大学院生 (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-1 各試験体諸元

試験体	B17-13	B17-13L	B17-19	B18-13
パラメータ	基本試験体	異なる 載荷履歴	梁主筋 付着劣化	せん断入力量 小さい場合
柱主筋	16-D16			12-D16
梁主筋	8-D13(2段)		3-D19	5-D13
$a_t \cdot \sigma_y$	344(KN)		331(KN)	215(KN)

表-2 コンクリート材料特性

試験体	$\sigma_B$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ ( $\mu$ )	$\sigma_t$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
B17-13(L)	22.8	2840	1.99	22.8
B17-19	20.3	2500	1.86	21.9
B18-13	23.2	2640	1.83	22.6

表-3 鉄筋材料特性

鉄筋径	$\sigma_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\phi_s$ ( $cm^2$ )
D13	334	191	1.27
D16	387	192	1.99
D19	384	175	2.97
6 $\phi$ (フープ)	373	205	0.28
6 $\phi$ (タイ)	374	191	0.28
6 $\phi$ (スラブ)	291	221	0.28

解析対象試験体の諸元, 解析で使用した材料特性を表-1, 表-2, 表-3 に示す。試験体 B17-13L は異なる載荷履歴による影響に関する検討対象であるので, 基本試験体と全て同様な寸法と材料特性を採用した。コンクリートボンドリック要素は鉄筋の付着が厳しくなる梁主筋に設置し, 柱主筋, 補強筋, スラブ筋には完全付着とした。最大付着応力  $\tau_{max}$  は建築学会の鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針 (案)・同解説<sup>6)</sup> (6.8 節: 柱および梁の付着強度) により算出し, 接合部では軸力を考慮して,  $\tau_{max}$  を2倍に設定した。さらに, 解析の収斂の不安定さを考慮して, 第1剛性を高く設定した。

## 2.2 要素分割及び境界条件

解析での要素分割および境界条件を図-2 に示す。実験に忠実に要素分割を行うと節点数および要素数がかなり大きくなり, 解析に長時間を要する。そこで, 柱頭, 柱脚と梁端の要素を粗くし, 補強筋は2, 3本を1本にまとめて設定した。また, 柱端部のスタブ部分および梁端部の拘束部分には応力集中を考慮して, 強度を上げて補強した。境界条件は, 両方向の梁の反曲点位置の1点に鉛直方向 (Z) の変位を拘束し, 柱下端部は中央1点に水平2方向の変形および鉛直方向 (X・Y・Z 方向) の変位を拘束した。載荷方法については, まず柱頭に  $\sigma_B/6$  の定軸力を導入した後, 上柱頭に強制水平変位を与える

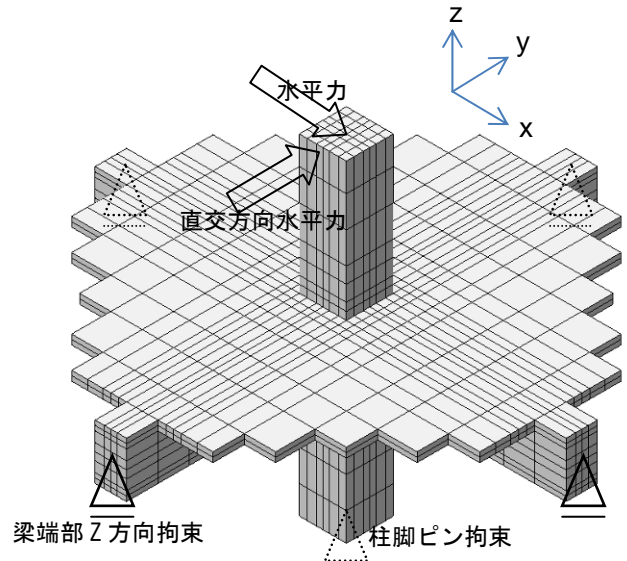


図-2 要素分割および境界条件

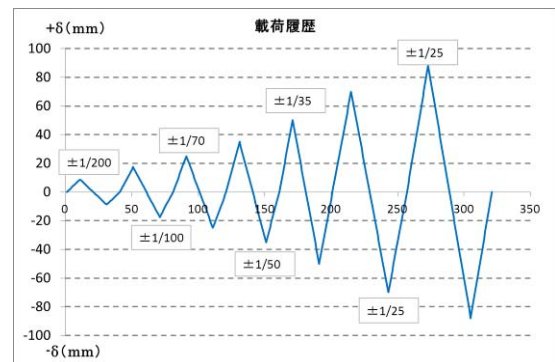
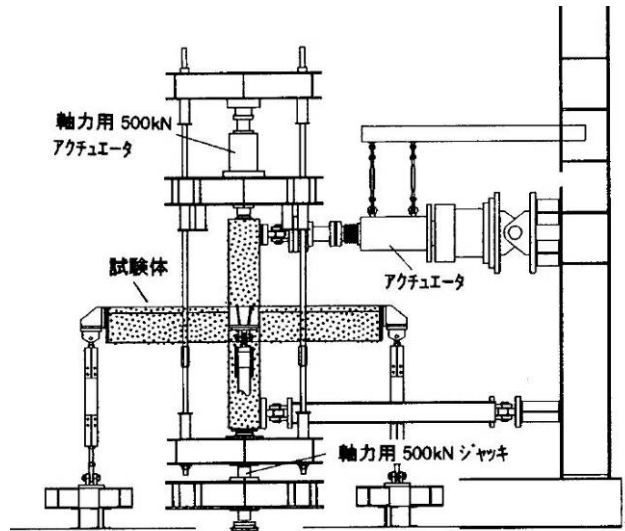


図-3 加力装置<sup>1)</sup>および解析加力パス

2 方向正負繰り返り載荷解析を行った。図-3 に実験での加力装置と解析での加力パスを示す。

## 2.3 解析モデル

本解析では, 当研究室で余・野口<sup>2)</sup>らにより開発され, 洪・野口<sup>3)</sup>により改良された3次元 FEM 解析プログラム

を用いた。コンクリート要素に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塑性モデルを 3 次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面については、William-Warnke 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<sup>4)</sup>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・飯塚式を使用し、ひび割れモデルに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・山田モデルでそれぞれ表現した。また、鉄筋要素は鉄筋軸方向のみに剛性を有する 2 節点トラス要素で表現し応力-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<sup>5)</sup>を用いた。各モデルの詳細は文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

### 3. 解析結果

#### 3.1 層せん断力-層間変形角関係

図-4 に各試験体の層せん断力-層間変形角を示す。解析では、全ての試験体で初期剛性が実験と良好に対応し、最大耐力に関しても計算値とほぼ対応したといえる。B17-13 (基本) 試験体では、最大層せん断力が実験結果よりやや高い結果となったが、層間変形角の  $R=1/50\text{rad}$  時にピークとなり、実験に比べて 2 サイクル程度早まった。実験のようなピーク後の大変形に至るまでの穏やかに耐力維持することは表現できていない。紡錘形の履歴ループを呈している。B17-19 では最大層せん断力が実験値より若干低くなったが、履歴ループにおいては基本試験体と同じく最大耐力以降に耐力低下が顕著となっている。基本試験体より最大耐力が低くなったのは、梁主筋付着が劣化したためと考える。B17 シリーズにおいては、層間変形角  $R=1/50\text{rad}$  に最大層せん断力となり、それ以後に耐力低下が著しくなり、実験のように耐力を維持し、エネルギー吸収能の良い紡錘形から逆 S 字形へスリップ性状に移行する傾向が見られた。

加力ルールを変えた B17-13L では、先に X 方向で  $R=1/50$  まで大変形させた後に Y 方向加力を行ったが、解析結果は実験に比べると大きな違いが見られた。Y 方向加力時に大変形まで耐力を維持することが出来ず、破壊したため解析が止まってしまった。これは、先行する X 方向加力時で受けた損傷が残っているため、Y 方向での加力に耐えられなくなったためと考える。

B18-13 では、最大耐力がやや対応したが、実験のような大変形まで耐力を維持することが出来ず、履歴ループ

が実験と異なり、紡錘形状を示した。

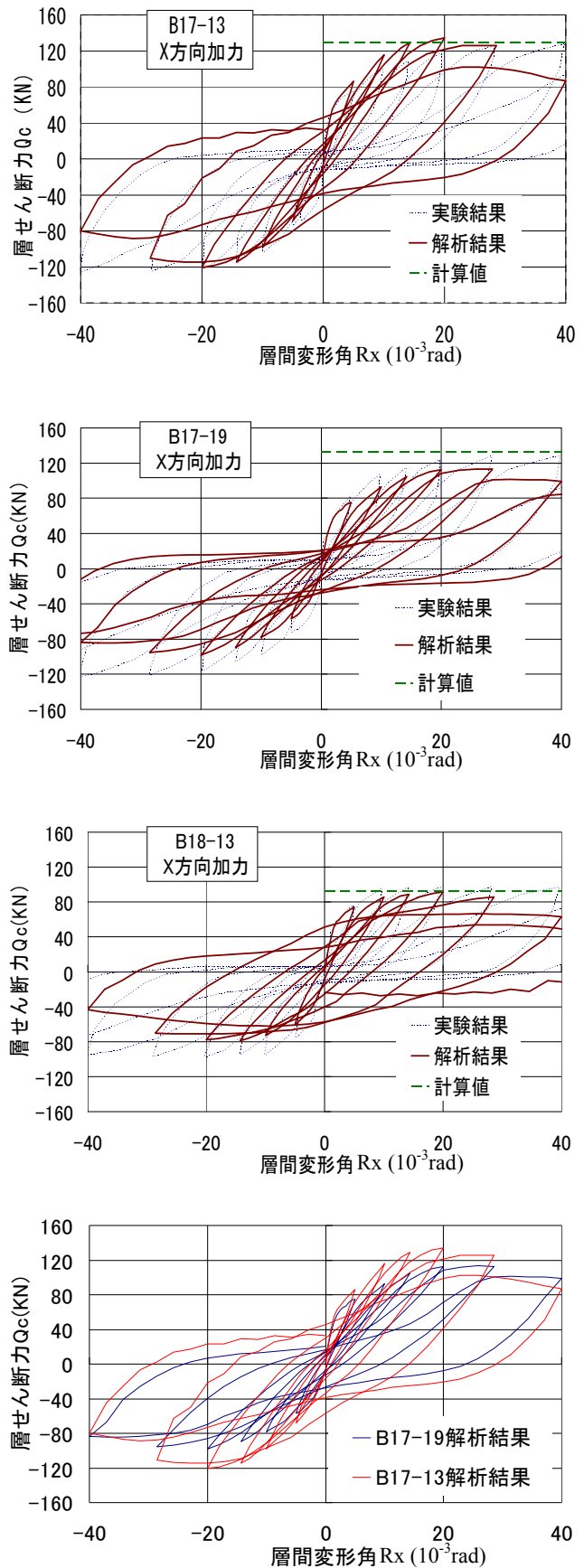


図-4 層せん断力-層間変形角関係

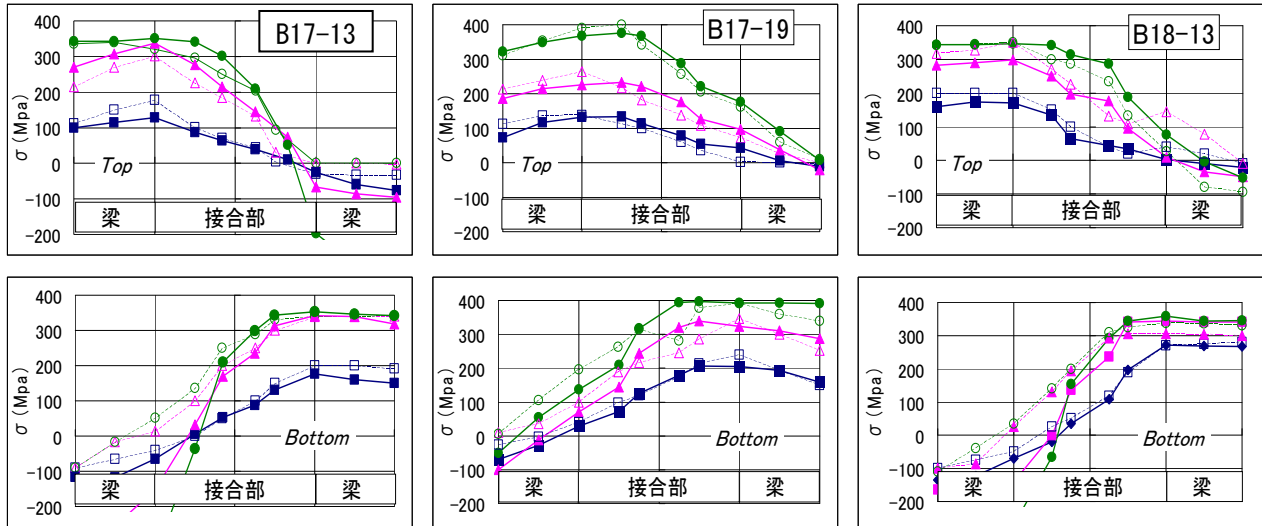


図-5 梁主筋応力度分布 (X方向)

### 3.2 梁主筋応力度

試験体 B17-13 (1 段目主筋), B17-19, B18-13 の梁主筋の正加力時の応力度分布を図-5 に示す。図-6 に実験でひずみ度を計測していた位置を示している。実験では梁主筋ひずみから応力度を計算した。正加力時の梁主筋応力度分布図を見ると、解析でも全ての梁端部の引張側で降伏したことが実験と良好に対応した。梁主筋に D13 を 2 段配筋で使用した B17-13 では、 $R=1/100, 1/50$  時に圧縮側の主筋で圧縮応力が大きく出ている、これは圧縮応力の一部を梁主筋が負担していると思われる。B17-19 では、圧縮側と引張側が実験と良好に対応し、特に梁主筋の付着劣化により圧縮側での引張への転化が再現されている。

### 3.3 接合部圧縮主応力

図-7 に接合部層間変形角  $R$  ごとの B17-13 (基本体), B17-19 (付着劣化), B18-13 (接合部せん断入力) の正方向加力時の試験体垂直切断面における圧縮主応力カウンター図を示す。

層間変形角  $R=1/200\text{rad}$  時、B17-13 では接合部隅角部と中央に圧縮応力が集中していることがわかる。 $R=1/50\text{rad}$  の最大耐力時には、接合部全域の対角方向に幅の広い圧縮ストラットが形成され、隅と中央部分のコンクリートが圧壊する。B17-19 に対しては、 $R=1/200\text{rad}$  時に基本試験体と同じく隅角部及び中央部に圧縮応力が集中し、基本試験体より低い圧縮応力が伝達していることが分かる。付着劣化により、圧縮主応力の広がり、柱、梁、接合部とも抑えられ、接合部の圧縮ストラットの応力も抑えられていると考える。接合部へせん断入力が低い B18-13 では、梁端部の危険断面で圧縮応力が集中して、圧縮ストラットが形成したが、接合部パネルに

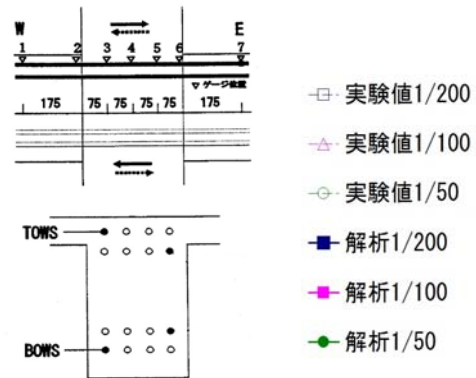


図-6 主筋ひずみ計測位置<sup>1)</sup>

相対的に少ない圧縮応力を負担させ、これは最初に梁曲げ破壊型と予想したことと一致している。接合部せん断入力が高い B17 シリーズは梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊が耐力低下の主要な原因と考えられる。

図-8 に B17-13 と B17-13L の最大耐力時 ( $R=1/50\text{rad}$ ) の斜め切断面の圧縮主応力分布を示す。B17-13 では、対角断面の圧縮主応力図から見ると接合部パネル断面の中心に高圧縮応力が集中していることが見て取れる。鉛直断面での圧縮主応力図で示した対角方向圧縮主応力が集中していることが立体的に再現できた。

B17-13L では、正方向 (X 方向) で大変形  $R=1/50\text{rad}$  まで加力が先行し、直交方向 (Y 方向) に方向が変えた後の接合部最大耐力時の応力図を示している。両方向で圧縮ストラットが形成し、高い圧縮応力が伝達していることが見られる。この場合は、先行正方向 (X 方向) 加力した後、残留応力が生じているため、2 方向加力による立体的な圧縮応力伝達することが確認できた。

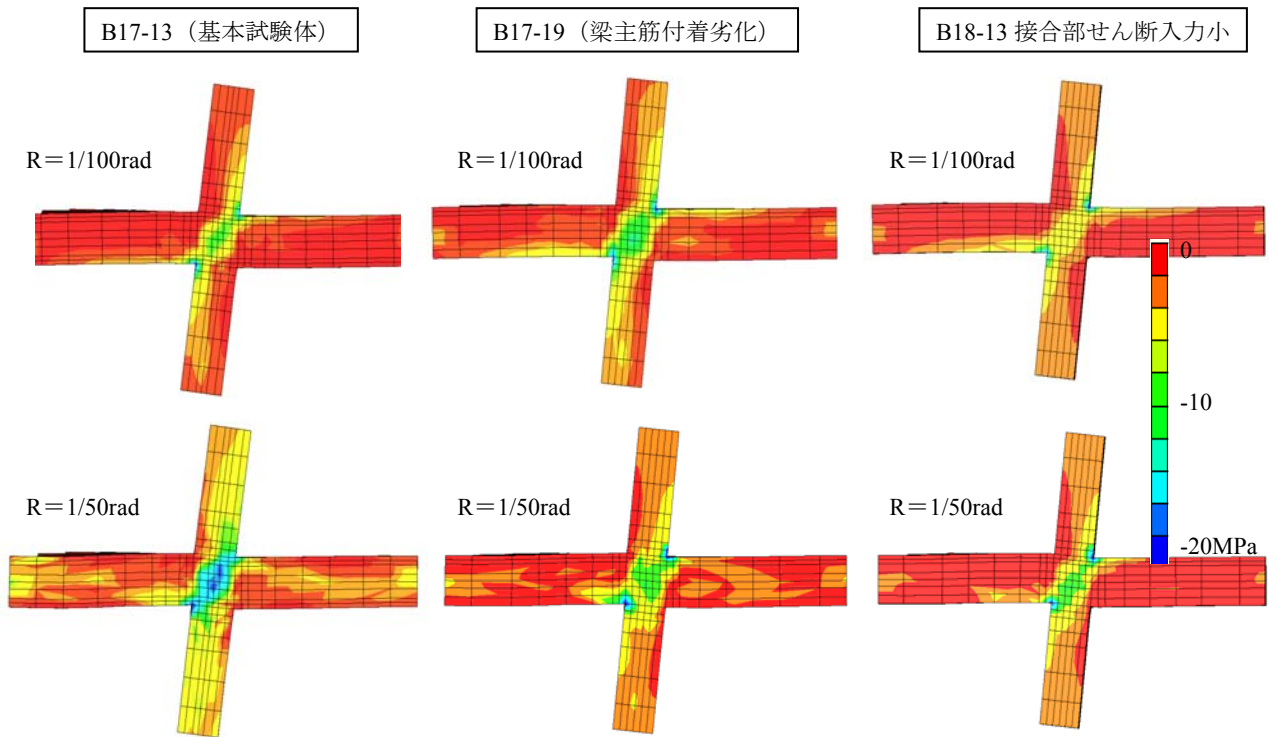


図-7 接合部鉛直断面圧縮主応力コンター

### 3.4 ひび割れ性状

図-9, 図-10 各試験体の最大耐力時 ( $R=1/50\text{rad}$ ) 及び最終破壊時における接合部付近のひび割れ状況を示す。解析では、試験体の表面でのひび割れの進展状況のみならず、試験体内部でのひび割れの進展にも表示される。ひび割れを円で表現しており、色でひび割れ幅の大きさを示している。また、円の傾きがひび割れ方向を示す。図では各要素における積分点での平均値を用いた。解析結果の最大耐力時におけるひび割れ状況と最終破壊時のひび割れ状況をそれぞれ3次元で表示する。

解析結果は実験のひび割れを若干過大評価しているものの、ひび割れの進展状況においては実験を概ね良好に表現できていることがわかる。全試験体とも  $R=1/50\text{rad}$  で梁端部に曲げひび割れが発生した。

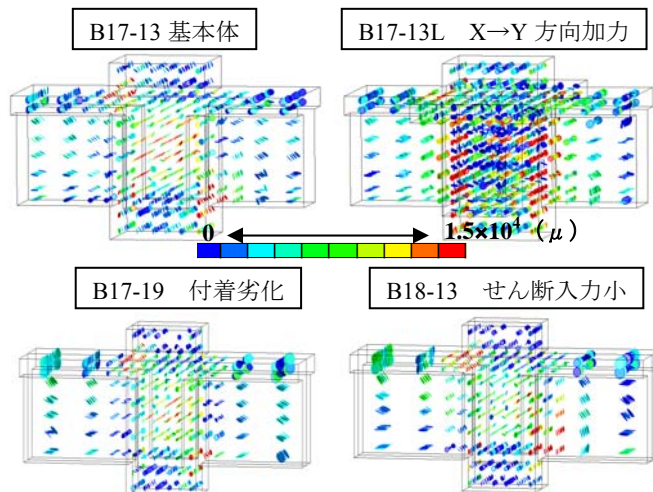


図-9 最大耐力時接合部ひび割れ状況

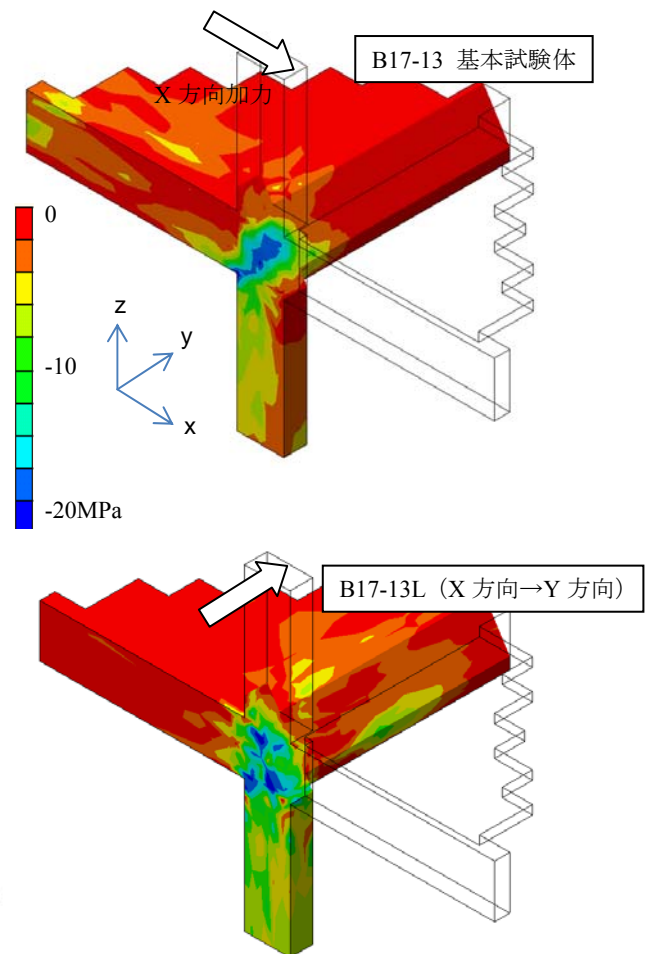


図-8 斜め切断面応力コンター

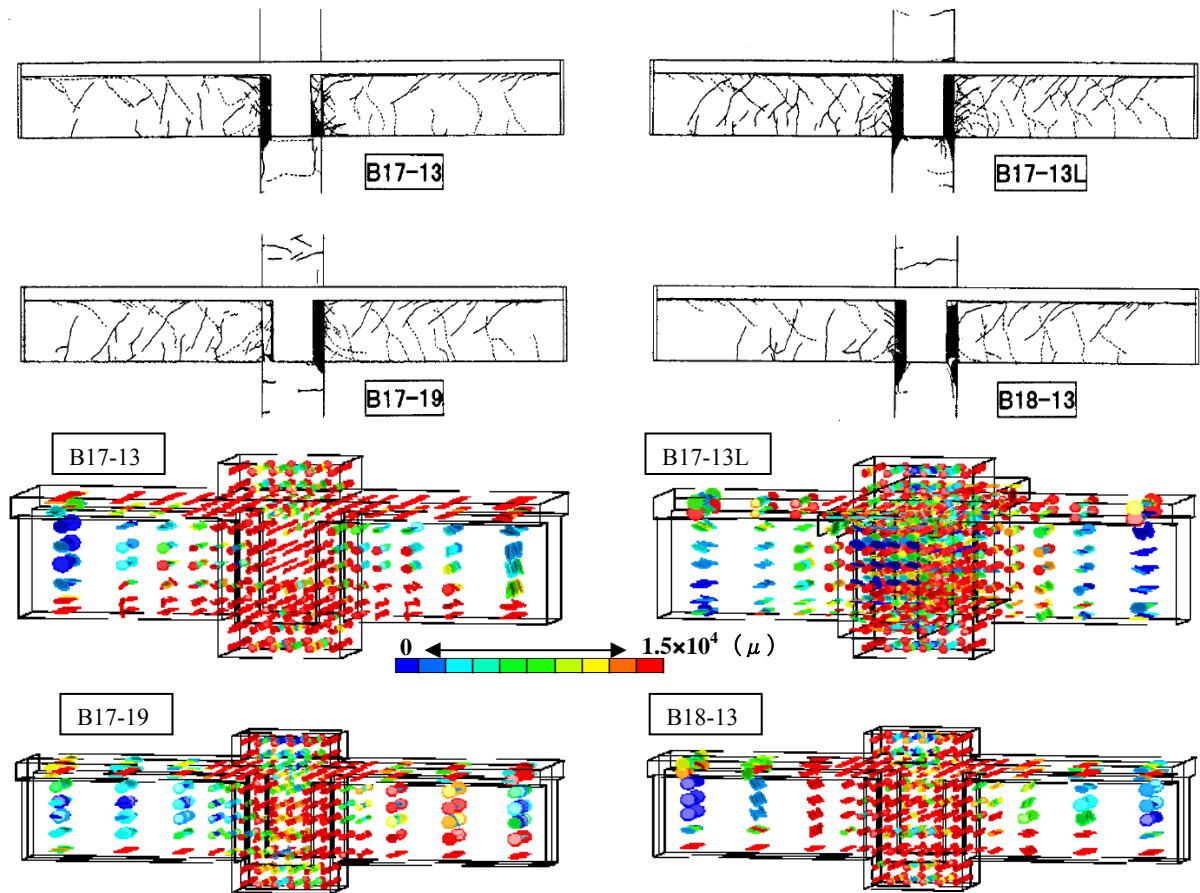


図-10 最終破壊時の接合部ひび割れ状況

最大耐力時、B17 シリーズ試験体では梁下端筋の降伏とともに梁危険断面で梁曲げひび割れの拡大幅が顕著となった。最終破壊状況においては、接合部内にせん断ひび割れが発生し、梁下端と柱部分のコンクリートが圧壊したことが分かる。

#### 4. まとめ

- (1) 層せん断力-層間変形角関係において、実験に対して解析での最大耐力及び初期剛性がよい対応を示したが、実験と異なる大変形までの耐力低下が履歴性状から見られた。解析において履歴のスリップ性状の表現が不十分と考え、再検討の必要がある。
- (2) 立体柱・梁接合部の履歴特性、鉄筋のひずみ、内部応力状態から2方向荷重の影響を確認することができた。
- (3) 接合部せん断入力量を高く設けた B17 シリーズでは、梁曲げ降伏後に接合部せん断破壊が生じたことが接合部内部応力分布の状況から分かる。梁曲げ破壊と接合部せん断破壊が混在する状況になった。
- (4) 梁主筋径で付着を変化させたことによる履歴性状に与える影響は解析上においても確認できた。

#### 謝辞

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) により行われた。

#### 参考文献

- 1) 後藤康明, 城攻, 吉田仁: RC 内部柱梁立体部分架構の梁降伏後の破壊性状と梁主筋付着特性の関係, コンクリート工学, Vo21, No.3, pp.655-660, 1999
- 2) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: RC 構造部材の3次元繰返し荷重時の 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) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1615-1618, 1978
- 5) 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
- 6) 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 (案)・同解説, 1999