

# 論文 RC 造内部柱梁接合部における耐震挙動の非線形 3 次元有限要素解析

砂井貴秀\*1・後藤康明\*2・城 攻\*3

**要旨**：RC 造構造物が地震動を受ける際の内部柱梁接合部挙動の把握には 2 次元非線形有限要素解析を用いることが多いが、柱軸に対して梁が偏心している接合部等のように非対称な形状の場合には 3 次元的な考慮が必要である。偏心のない場合でも柱幅と梁幅が異なるときには幅方向で均一の性状を示さなくなるために、3 次元非線形有限要素解析を用いた検討が必要となる。本研究では、梁主筋の断面積と付着性状を変化させることにより接合部入力せん断力を変化させて接合部コンクリート圧縮ストラットの形成とその破壊過程を 3 次元的に解析した。

**キーワード**：3 次元非線形有限要素解析, RC 造内部柱梁接合部, コンクリートストラット, 梁主筋の付着

## 1. はじめに

RC 造骨組式建築物における柱梁接合部は、一般に 2 方向の梁が存在するために、弾塑性性状を論ずる際には形状的にも荷重条件においても 2 つの方向に分離した平面架構として扱うのは無理が多い。仮に直交梁のない接合部であっても、柱幅と梁幅が異なっていたり、両者が偏心して接合される場合には、接合部内の応力状態が幅方向に異なる。従って、柱梁接合部の解析的検討では、応力や変形を立体的に把握する必要があり、3 次元非線形有限要素解析が適している。本研究ではこの種の解析的検討における基本的問題点として、立体要素によるコンクリートの破壊認識方法等について各種の形状を有する RC 造柱梁接合部試験体を用いて解析を試みた。このうち本報告では、偏心のない上下左右に対称な平面十字形接合部について鉄筋の強度及び付着性状を影響要因として、その破壊性状を検討したものである。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析対象試験体

本解析では過去に当研究室で行った RC 造

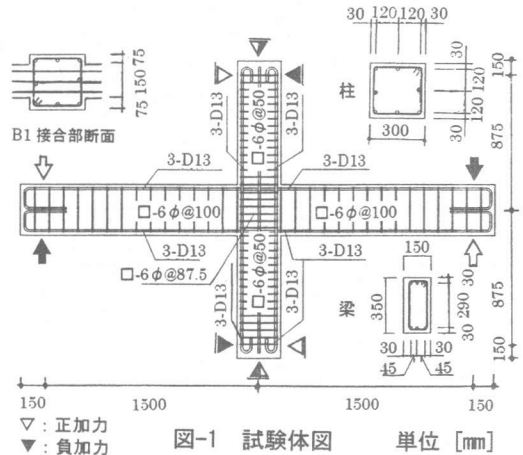


図-1 試験体図 単位 [mm]

表-1 試験体諸元

| 試験体名 |    | B1                             |
|------|----|--------------------------------|
| 梁    | 主筋 | 3-D13 ( $p_t=0.79\%$ )         |
|      | 帯筋 | 6φ @100 [mm] ( $p_w=0.37\%$ )  |
|      | 断面 | 150×350 [mm]                   |
| 柱    | 主筋 | 8-D13 ( $p_g=0.42\%$ )         |
|      | 帯筋 | 6φ @50 [mm] ( $p_w=0.37\%$ )   |
|      | 断面 | 300×300 [mm]                   |
| 接合部  | 帯筋 | 6φ @87.5 [mm] ( $p_w=0.21\%$ ) |

内部柱梁接合部の実験的研究<sup>1)</sup>のうち、上下左右対称の最も単純な平面十字形接合部試験体 (B1) を解析対象とした。図-1 に示すように解析対象試験体は実大想定階高 3500mm、スパ

\*1 株式会社 中工務店

工修 (正会員)

\*2 北海道大学大学院助教授

工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

\*3 北海道大学大学院教授

工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

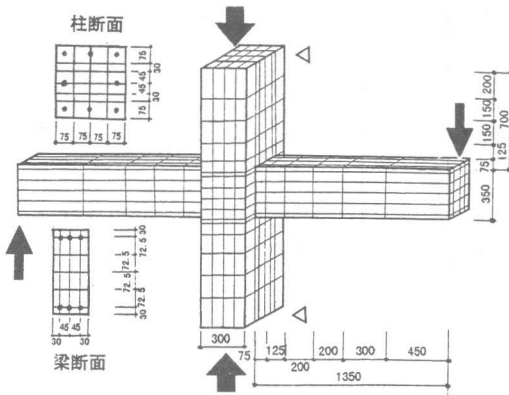


図-2 要素分割図

表-2 材料特性

| 試験体名   |                            | B1   |          |
|--------|----------------------------|------|----------|
| コンクリート | $\sigma_B$ [MPa]           | 21.2 |          |
|        | $\sigma_{cr}$ [MPa]        | 2.30 |          |
|        | $\epsilon_{max}$ [ $\mu$ ] | 1950 |          |
| 鉄筋     | 種類                         | D13  | 6 $\phi$ |
|        | $\sigma_y$ [MPa]           | 369  | 366      |
|        | $\epsilon_y$ [ $\mu$ ]     | 1864 | 1858     |
|        | $E_s$ [GPa]                | 198  | 197      |
|        |                            |      |          |

表-3 解析モデル一覧

| 解析試験体 | 完全付着 (A-モデル) | 付着劣化 (B-モデル) | 梁降伏時接合部せん断応力度* |
|-------|--------------|--------------|----------------|
| 実験と同じ | A-B1x1       | B-B1x1       | 3.43MPa        |
| 3倍入力  | A-B1x3       | B-B1x3       | 10.3MPa        |
| 5倍入力  | A-B1x5       | B-B1x5       | 17.2MPa        |

\*接合部有効幅を梁と柱の平均幅として計算

ン 6000mm の RC 架構の中間階を取り出して 1/2 に縮小した模型である。試験体寸法は梁加力点間 3000mm, 柱支点間距離 1750mm で, それぞれ端部に 150mm の余長部を有する。使用した材料のうち, コンクリートの実測強度  $\sigma_B$  は 21.2MPa, 梁筋及び柱筋には共に降伏応力度 369MPa の D13 を使用し, 柱主筋は 8-D13 ( $p_g=0.42\%$ ), 梁主筋は 3-D13 ( $p_g=0.79\%$ ) である。柱と梁のせん断補筋にはいずれも  $\square-6\phi$  を使い, 補筋間隔は梁, 柱それぞれ@100mm と @50mm とし, 接合部パネル内の柱せん断補筋間隔は@87.5mm としている。試験体の諸元及び材料特性をそれぞれ表-1 と表-2 に示す。加力は柱の上下端をピン支持とし,  $\sigma_B/6$  の定軸力を与えた後, 両梁端に逆対称の上下方向変位制御による正負繰り返し静的漸増加力を行った。

破壊性状は梁降伏後大変形時に接合部中央で剪断破壊が生じた。

## 2.2 解析手法

解析には RC を主たる対象としてオランダの TNO で開発された 3 次元非線形有限要素解析プログラム DIANA.Ver.6.1 を用いた。また解析では他の形状への展開を考慮して対称性によるモデルの省略は行わずに, 試験体全体を解析対象とした。解析モデルは試験体と同じ材料定数を有するもの(B1)を基本とし, 全ての鉄筋とコンクリートを完全付着としたもの(A-B1)と梁筋の付着劣化をボンドリンク要素により表現したものの(B-B1), さらに入力を大きくして接合部破壊を生じさせるために梁筋及び柱筋の断面積を 3 倍(B1x3)・5 倍(B1x5)にしたものをそれぞれについて加えて, 計 6 体とした。平面十字形柱梁接合部架構の要素分割法を図-2 に, 解析モデル一覧を表-3 に示す。上下の柱端や両梁端の支持条件は実験に対応するように決定した。解析では変位増分による単調載荷とした。

## 2.3 解析の材料モデル

### (a) コンクリート

8 節点直方体要素を用い, 要素内 8 個の積分点で主応力, 剛性等を評価する。応力-歪み関係は図-3 に示すように圧縮上昇域は Saenz 式に従い, 引張域では引張強度に達した後直線で強度低下を表現した。硬化則及び流れ則が整合するように破壊基準として採用した Drucker - Prager の降伏曲面(1)式の係数を決めた。

$$f(I_1, J_2) = \alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

$$I_1: \text{応力の 1 次不変量} \quad \alpha = 0.23$$

$$J_2: \text{偏差応力の 2 次不変量} \quad k = 7.34 \times 10^6$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad k = \frac{6 \cos \phi \cdot c}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$$

$$c: \text{粘着力} \quad \phi: \text{内部摩擦角}$$

ひび割れには分布ひび割れモデルを用い, 主歪みの方向が第 1 ひび割れ方向と 60 度以上離れたときに第 2 ひび割れを発生させる過程を繰り返す。

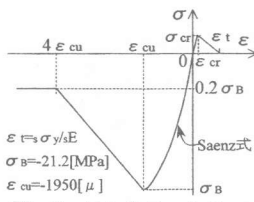


図-3 コンクリートの応力-歪み関係

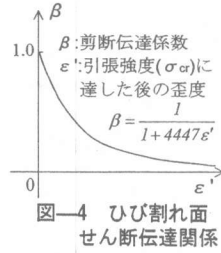


図-4 ひび割れ面せん断伝達関係

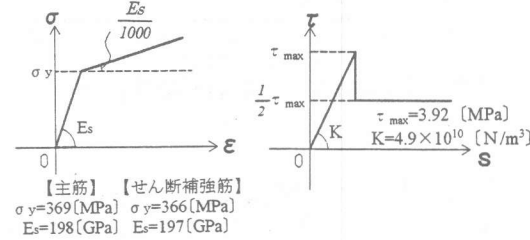


図-5 鉄筋の応力-歪み関係

返す多方向固定ひび割れモデルを用いた。ひび割れ発生後におけるせん断応力の伝達係数<sup>2)</sup>を図-4に示す。解析に必要な材料定数はコンクリートのシリンダー圧縮試験結果より決定した。

(b) 鉄筋

梁筋、柱筋、せん断補強筋の各種鉄筋は2節点を有する1次元線材要素とした。それぞれの応力-歪み関係は図-5に示すようにbi-linear型とした。

(c) 付着

鉄筋とコンクリートの付着には完全付着のものとボンドリンク要素で表現した2種類のモデルを設定した。完全付着モデルはコンクリート節点の変位に対応して挙動する1次元線材要素を鉄筋要素として用い、全ての鉄筋を完全付着(Aタイプ)とした。ボンドリンク要素を用いて付着特性を表現したモデル(Bタイプ)は、梁筋にのみ付着特性を与え、他の鉄筋に関しては完全付着とした。図-6に鉄筋軸方向のボンドリンク要素のτ-S関係を示す。剛性及び付着強度は大和田らの研究<sup>3)</sup>を元にし、特性は接合部内外の区別なく全ての梁筋に一樣とした。

3. 解析結果

3.1 コンクリート要素の破壊について

3軸応力状態となっているコンクリート要素

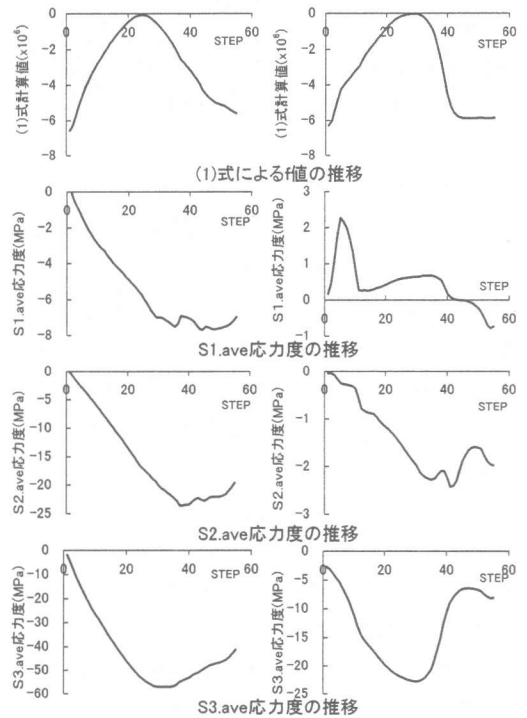
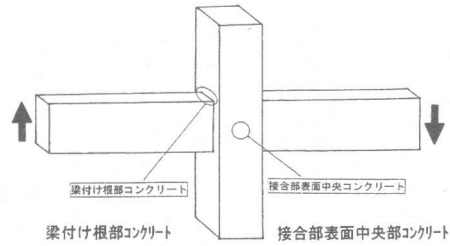


図-7 コンクリート要素の主応力変位(A-Bx3)

の主応力は3軸引張、1軸圧縮+2軸引張、2軸圧縮+1軸引張、3軸圧縮の4つの状態が考えられる。コンクリートの3軸応力状態と破壊の関係が明らかにされていないため、3次元非線形有限要素解析ではコンクリート要素の破壊をどのように定義するかが重要となってくる。そこで各変位ステップごとに要素内の8つの積分点それぞれで得られる3つの主応力をS1,S2,S3 (S1>S2>S3)とし、1つの要素内で各主応力をステップごとに平均して得られた3つの主応力平均値 S1.ave, S2.ave, S3.ave を Drucker-Prager の破壊基準式(1)に代入し、その計算値 f の各変位ステップごとの推移と S1.ave, S2.ave, S3.ave の関係を調べた(図-7)。

表-4 諸耐力一覧 (梁せん断力:kN)

| 試験体    | 接合部せん断亀裂 | 付着劣化 | 梁筋降伏 | 最大耐力 ( $\tau_j$ :MPa) |
|--------|----------|------|------|-----------------------|
| 実験     | 27.0     |      | 33.3 | 34.4 (4.04)           |
| A-B1x1 | 30.4     | -    | 34.2 | 41.2 (4.84)           |
| B-B1x1 | 37.7     | 25.6 | 36.8 | 40.8 (4.79)           |
| A-B1x3 | 56.6     | -    | 90.1 | 94.2 (11.1)           |
| B-B1x3 | 30.2     | 75.1 | 88.5 | 88.5 (10.4)           |
| A-B1x5 | 30.2     | -    | -    | 102 (12.0)            |
| B-B1x5 | 36.3     | 97.3 | -    | 102 (12.0)            |

最大耐力欄でカッコ内は接合部せん断応力度。但し、有効幅は柱と梁の平均幅とした。

例として A-B1x3 試験体について応力状態が異なると考えられる梁付け根部と接合部表面中央のコンクリート要素のグラフを示す。梁付け根部コンクリートは常に3軸圧縮応力状態となっており、それに対し接合部表面中央コンクリートは圧縮応力と引張応力が混在している。それぞれについて(1)式の計算値の推移を見ると値がゼロとなる変位ステップが存在し、その時の主応力の状態を比較すると、どちらも S3.ave の強度増大が停止する。その後、接合部表面中央コンクリート要素においては応力低下が激しくなっているのに対して、梁付け根コンクリートにおいては緩やかな応力低下が見られる。両者の相違は接合部表面中央コンクリートでは1軸応力状態に近い圧縮応力となっているが、梁付け根コンクリートでは3軸圧縮応力となっているためであると考えられる。また応力度の値にも違いが見られ、接合部表面中央コンクリートの S3.ave はほぼコンクリートシリンダー試験で得られた1軸圧縮強度であるのに対し、梁付け根部コンクリートのそれは約 60MPa まで上昇している。これは、3軸拘束状態における圧縮強度の増大に対応している。これらの解析結果から(1)式の値がゼロとなる時に、そのコンクリート要素が破壊したと定義し、以下で述べる破壊とはこの条件を満たしたものである。

### 3.2 履歴性状

表-4 に諸耐力の結果を、図-8 に B1x1 モデルの梁せん断力-梁部材角関係を示す。実験値と A-B1x1 モデル、B-B1x1 モデルを比較する

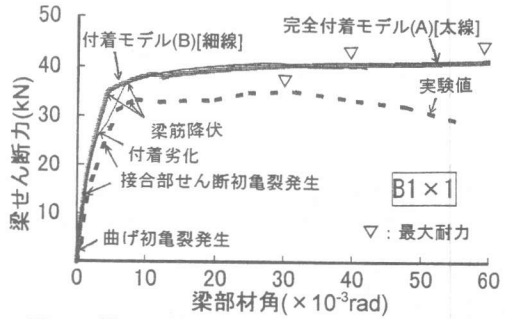


図-8 梁せん断力-梁部材角関係(B1x1)

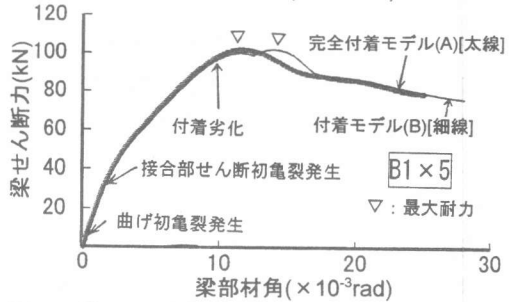
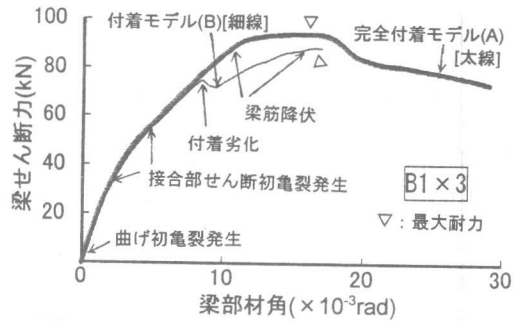


図-9 梁せん断力-梁部材角関係(B1x3,B1x5)

と両解析モデルとも大きな剛性低下を示すせん断初亀裂発生までの初期剛性が実験値よりも若干高い傾向を示している。これは実験の初期段階で発生する梁危険断面付近の局所的な曲げひび割れを、解析では離散ひび割れ等を用いたモデル化をしていないためであると考えられる。しかし、B-B1x1 モデルの様に付着強度に達して劣化を生じると剛性が低下し実験値に比較的近づく。また、梁の曲げ降伏せん断力は両モデルともに実験値と対応している。最大耐力は解析値が実験値より高くなっているが、A,B モデルに差はない。初期剛性、最大耐力に若干の差

はあるものの、梁危険断面付近に生じる曲げ初亀裂、接合部パネルせん断初亀裂等の発生過程は両解析モデルとも実験と比較的良好に対応している。この解析結果からほぼ実験の性状を解析が表現していると判断した。接合部コンクリート圧縮ストラットの形成過程を把握するためにA-B1x1とB-B1x1両モデルの梁筋及び柱筋の断面積を3倍・5倍にし接合部コンクリート入力せん断力を増加させて解析を行った。これらのモデルの梁せん断力-梁部材角関係を図-9に示す。B1x3とB1x5のモデルはともに初期剛性に付着特性の影響は見られず、付着劣化が生じると剛性が低下した。また、付着の有無による最大耐力の差は見られず、ひび割れ発生耐力もほぼ一致した。解析対象を破壊モード別に分類するとA-B1x3モデルが梁降伏先行接合部せん断破壊型(BJ型)、A-B1x5、B-B1x3、B-B1x5モデルが接合部せん断破壊先行型(J型)と考えられる。A-B1x1とB-B1x1モデルに関しては両モデルともに梁が降伏した後、梁付け根付近コンクリートの破壊は見られたが、接合部コンクリートには破壊が見られないまま発散して計算が止まった。この解析結果から判断して、梁付け根付近のコンクリートの破壊によって最大耐力が決定したのと考えられる。これに対し、実験で接合部コンクリートが破壊したのは、繰り返し加力の影響と思われる。

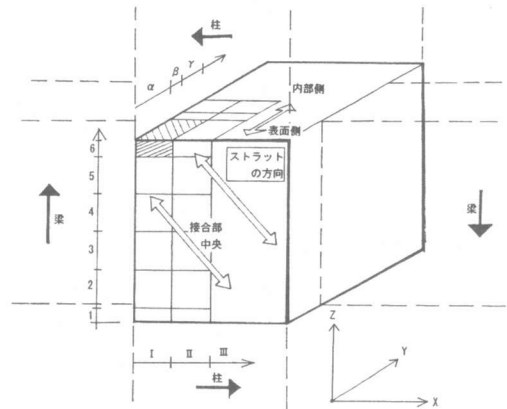


図-10 接合部コンクリート要素分割図

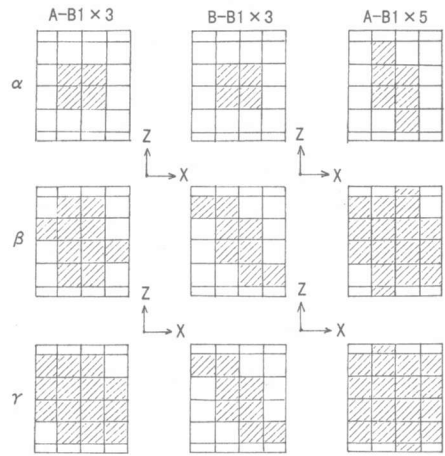


図-12 最大耐力時接合部コンクリート破壊状況

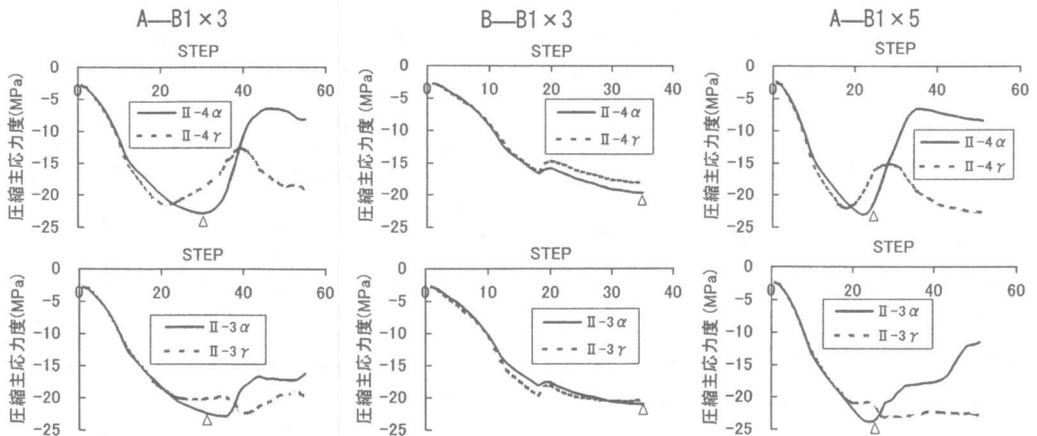


図-11 接合部コンクリート圧縮応力度推移

▽: 最大耐力

### 3.3 圧縮ストラットの形成

付着特性と破壊モードが接合部コンクリート圧縮ストラットの形成に与える影響を比較検討するため、接合部コンクリートの破壊が顕著であった A-B1x3, B-B1x3, A-B1x5 の3つのモデルを用いて、A-B1x3, B-B1x3 の両モデルで付着特性の影響、A-B1x3, A-B1x5 の両モデルで破壊モードが与える影響を検討する。図-10 に接合部コンクリートの要素分割図を示す。解析対象の対称性を考慮し、接合部コンクリートの1/4を抽出し、X方向の分割をI,II, Y方向の分割を $\alpha, \beta, \gamma$ , Z方向の分割を1~6の記号で表し要素位置を特定する。例えば図の斜線部はI-6 $\alpha$ である。また図-11 に接合部中央の内部側と表面側のコンクリート要素に作用するストラット方向主応力の推移を示し、図-12 にそれぞれのモデルの最大耐力時接合部中央コンクリート要素の破壊状況を示す。接合部コンクリートの圧縮ストラットは接合部内部から表面へと形成されていく。破壊も内部側の接合部中央コンクリートから発生し表面側へと進行する。部材の最大耐力は表面側接合部中央コンクリートが破壊することで決定される。また、圧縮ストラットの強度はほぼコンクリートシリンダー試験より得られた一軸圧縮強度近傍となった。これらの性状は3モデルに共通したものであった。

#### 付着特性の影響(A-B1x3, B-B1x3)

B-B1x3 において付着劣化が生じるとストラット方向主応力は若干減少する。またこの減少量は梁主筋に近いコンクリート要素ほど大きくなった。付着劣化が生じることにより接合部に入力されるせん断力が減少したため、最大耐力時に破壊したコンクリート要素の数は完全付着のものより減少した。

#### 破壊モードの影響(A-B1x3, A-B1x5)

A-B1x3 では梁の降伏とほぼ同時に内部側の接合部中央コンクリートの破壊が発生する。表面側の接合部中央コンクリートはストラット方向の主応力の上昇が緩やかになる。その後破壊

に至るが A-B1x5 ではコンクリート要素が破壊に至るまで一定の割合で主応力が上昇し、最大耐力時の破壊状況は A-B1x5 が著しかった。これらの解析結果より、接合部コンクリート圧縮ストラットはある幅を持ち、接合部内部から破壊が生じることが示された。また、接合部入力せん断力量が増加すると、接合部せん断破壊先行型となることが示された。

### 4. まとめ

RC 造内部柱梁接合部のうち、上下左右対称の平面十字形接合部の3次元非線形有限要素法解析を行い以下の知見を得た。

- 1) 3次元非線形有限要素解析におけるコンクリート要素の破壊の定義に関する一手法として Drucker - Prager の破壊基準式を用い破壊を表現した。
- 2) 接合部コンクリート圧縮ストラットは、その方向の圧縮主応力がほぼコンクリートの1軸圧縮強度に達すると破壊する。
- 3) 接合部コンクリート圧縮ストラットは接合部内部から破壊を生じ、接合部入力せん断力が大きいほど接合部コンクリートの破壊範囲が大きくなる。
- 4) 接合部コンクリート圧縮ストラットがある幅を持つことを接合部コンクリートの破壊状況から明らかにした。

#### 【参考文献】

- 1)小澤・城・柴田ほか：十字形 RC 柱梁接合部のディテールと破壊性状の関係，日本建築学会北海道支部研究報告集，pp.185-196，1983.3
- 2)J.G.Rots：Computational modeling of concrete fracture, Dissertation, Delft Univ. of Technology, 1988
- 3)菅谷・大和田：地震時応力を受ける RC 梁柱接合部の弾塑性挙動に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.669-670，1996.9
- 4)永井・柏崎・野口ほか：2方向加力を受ける超高強度 RC 内柱・梁接合部の3次元非線形有限要素解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.711-714，C-2，1996.9
- 5)天野・後藤・城：掻き出し破壊を伴う梁筋定着機構に関する2次元非線形有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，20-3，pp.511-516，1998