

# 論文 L字型 RC 柱梁接合部の破壊性状に及ぼす鉄筋曲げ内半径の影響に関する解析的研究

生田 浩一郎\*1・長井 宏平\*2・林 大輔\*3・吉武 謙二\*4

**要旨:** 構造物中の鉄筋量増加により RC 柱梁接合部では過密配筋が発生しその解消が求められているが, RC 柱梁接合部内の配筋が破壊性状に与える影響は明らかではない。本研究では, L字型 RC 柱梁接合部の配筋が破壊性状に与える影響を解明することを目的に, 簡易な配筋状態において主鉄筋の曲げ内半径を変化させたモデルを三次元離散解析手法により解析し, 実験との比較により解析の適合性を検証した。結果, 解析により得られた荷重, ひび割れ性状は実験のものと同様となり, 鉄筋の曲げ内半径が小さい場合には折曲げ部のコンクリートの圧壊により耐力が低下することを三次元離散解析により再現可能であることを示した。

**キーワード:** RBSM, L字型 RC 柱梁接合部, 曲げ内半径, 局所破壊

## 1. はじめに

近年, 耐震性能への要求が高まることでコンクリート構造物中の鉄筋量が増加している。それに伴い, 特にラーメン高架橋の柱梁接合部など, 多方向から鉄筋が交差している箇所では過密配筋が生じ, 鉄筋組立時間の増加と施工不良の可能性が増しているという問題が起きている。この要因のひとつとして, コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>が性能照査設計法に移行するなか, 鉄筋の曲げ内半径やあきなどの基準は構造細目として仕様規定的な取り扱いとなっており, 数値の根拠が不明瞭なまま残っている項目が数多くあることがあげられる<sup>2)</sup>。例えば, ラーメン隅角部の外側に沿う鉄筋の曲げ内半径は, 初版のコンクリート標準示方書である昭和6年度版以来, 全く同じ数値である10φ以上が用いられている<sup>2)</sup>。実務上は配筋作業と施工が容易となる小さい曲げ内半径が望まれているが, 柱梁接合部における主鉄筋の曲げ内半径が接合部の破壊性状に与える影響はまだ十分に解明されていないのが現状である。既往の研究では, 吉武らは, L字型柱梁接合部において, 異なる主鉄筋の曲げ内半径によって, 最大荷重と破壊性状が変わらない事を実験によって示したが<sup>3)</sup>, 一方で, 堀田らは, 曲げ内半径により破壊性状が異なる事を実験により示し<sup>4)</sup>, これらのことよりも, 曲げ内半径がL字型柱梁接合部の破壊性状に与える影響は十分に解明されていないのが現状といえる。これに対し著者らは, 鉄筋を節までモデル化しひび割れ進展を直接的に表現する離散解析手法による微細構造解析が有用であると考えている。本研究では, L字型 RC 柱梁接合部内の配筋が, 柱梁接合部の破壊性状に与える影響を解明することを目的とし, 接合部内の主鉄筋の曲げ内半径を変

化させたモデルの数値解析を行う。解析手法としては, 離散解析のひとつである剛体ばねモデル(RBSM)を用いる。この手法を用いて既往の研究において長井らは, コンクリートの微視的な破壊挙動を再現することに成功した<sup>5)</sup>。更に, 林らは, 長井により構築された解析システムに鉄筋要素を加え, 付着モデルを組み込むことで, 吉武らにより行われた実験<sup>6)</sup>における柱梁接合部の一部を模擬した引抜き挙動の再現に成功した<sup>7)</sup>。しかし, 林らの解析では, 1軸のみの引抜き力を対象とし実際の柱梁接合部の入力を再現しておらず, 更に鉄筋降伏も考慮していない。そこで本研究では, 長井, 林らの解析システムに鉄筋降伏モデルを導入したうえで, 離散解析手法による接合部破壊の再現を試み, 堀田らにより行われた実験を対象に, 鉄筋の曲げ内半径の破壊性状への影響を検討する。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析手法

本研究では, 川井<sup>8)</sup>によって開発された離散解析のひとつである剛体ばねモデル(RBSM)を用いて解析を行う。この手法は分割した要素間にバネ(垂直ばね, せん断ばね)を設定し, ばねにより力を伝達することで破壊挙動を表現するものである。RBSMでは, 剛体要素間の接触面が潜在的な破壊面であるため, 要素形状が破壊現象を再現するうえで大きく影響を与える。したがって, 図1(1)のように, ボロノイ分割法を用いてコンクリート要素はランダムな形状になるように分割を行った。ただし, 本研究では鉄筋コンクリートの破壊形態を再現するために, 鉄筋の節形状を幾何的にモデル化することで鉄筋節

\*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 修士(工学) (正会員)

\*4 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 博士(工学) (正会員)

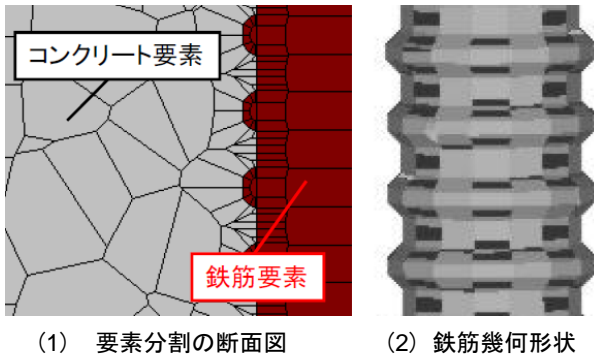


図-1 解析要素形状

から発生する応力を再現する (図-1(2))。このため、鉄筋周辺のコンクリート要素は鉄筋要素のモデル化の都合上、ランダムには設定されていない。また、コンクリート要素のサイズは、ひび割れ面の粗さを再現することを念頭に、最大粗骨材径を基準に 1,000mm<sup>3</sup>程度とした。

## 2.2 ばねの構成モデル

ひび割れの進展及び応力伝達の表現に適していると考えられる離散解析手法を用いて検討を行うため、以下のように鉄筋コンクリートの構成モデルを設定する。

### (1) 鉄筋モデル

柱梁接合部における鉄筋降伏の影響を再現するために、降伏強度までは弾性挙動、降伏後は塑性するパイロニアモデルを採用した。

### (2) コンクリートモデル

コンクリートの垂直ばね及びせん断ばねの構成則を図-2に示す。垂直ばねは圧縮領域では弾性挙動を示し、引張領域では要素の引張強度までは弾性挙動、引張強度以降はひび割れ幅に応じて応力を低下させるモデルを適用させた (図-2(1))。なお、 $f_c$ と $f_t$ は、それぞれコンクリートの圧縮、引張強度であり、 $w_{max}$ は 0.003mmと設定した。せん断ばねは弾塑性挙動を示し (図-2(2))、ばねの降伏強度を武藤らの研究<sup>9)</sup>を参考に式(1)と(2)で算出されるものとした (図-2(3))。ここで $\phi=37^\circ$ である。ひび割れ発生後には、図-2(2)に求めたせん断応力を、さらにひび割れ幅に応じて線形に低下させる (図-2(4))。

$$\tau = \begin{cases} c - \sigma \tan \theta \\ c - 0.5f_c \tan \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$c = f_t(1 + \tan \theta) \quad (2)$$

### (3) コンクリート-鉄筋界面モデル

鉄筋-コンクリート界面の垂直ばねのモデルはコンクリートと同じモデル (図-2(1)) を使い、 $f_t$ は既往の研究と同様にコンクリートの引張強度の 1/2 とした<sup>5)7)</sup>。せん断ばねは圧縮領域で弾性挙動、引張領域では降伏強度をコンクリートの引張強度の 1/2 と設定して (図-2(2))

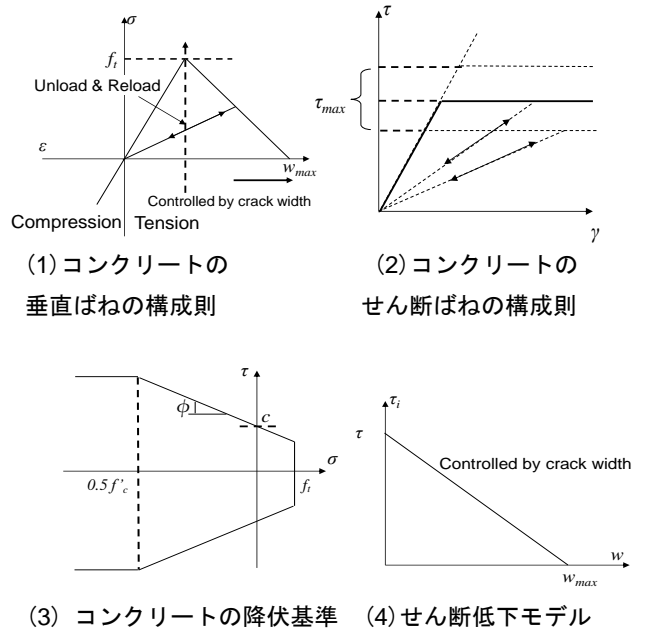


図-2 ばねの構成則

と同様の弾塑性モデルより計算した $\tau$ を、ひび割れ幅に応じて線形に低下させるモデルを適用させることで付着応力の低減を再現した (図-2(4))。ここで、界面が脆性的であることを考慮して、界面の $w_{max}$ は 0.001mmと設定した。

## 3. L字型 RC 柱梁接合部解析

### 3.1 解析概要

L字型 RC 柱梁接合部における隅角部外側に沿う主鉄筋の曲げ内半径が接合部の破壊性状に与える影響を解明すべく、L字型柱梁接合部を模擬した堀田らの実験の再現を含む数値解析を、曲げ内半径を変数に行う。実際の柱梁接合部の配筋は非常に複雑で、現在の解析システムの計算時間を考慮すると全ての鉄筋をモデル化することは困難である。また、全てをモデル化できた場合でも、その複雑さがここで着目する曲げ内半径の影響の解明の妨げになると考えられる。そこでここでは、簡易な配筋を用いた堀田らの実験 (図-3) を基に、曲げ内半径の影響の再現を試み、検討を加える。

### 3.2 解析ケース

解析モデル形状を図-4に、解析入力値を表-1に示す。コンクリートと鉄筋の材料定数は実験での値と基本的に同様に設定してある。解析モデルは、主鉄筋以外の鉄筋径は、要素分割の都合上、実験での D6 とは異なり、主鉄筋と同じ D10 としてある。既往の実験において、堀田らは図-3に示す荷重装置を用いて L字型柱梁接合部の実験を行った。本解析では、堀田らの実験と同様に柱端部と梁端部に鉄板を設けた (図-4)。この鉄板内部は、要素分割の都合上ランダムな形状となっているが、各要

素間を繋ぐ垂直ばねとせん断ばねの弾性係数を、変形を許さない十分に剛なものとしている。また、実験におけるピンとピン・ローラーの代わりとして、解析ではピン要素を導入した。ここでは力は全て垂直ばねのみを通して伝わるようにしている。このピン要素を実験と同様に、柱端部の鉄板内と梁端部の鉄板内に設置し、柱端部のピン要素は固定、梁端部のピン要素に対して、斜め下 45 度の接合部が閉じる方向に 0.2mm/step の増加率で強制変位を与えることで荷重を行った (図-4)。解析モデルの変数として、主鉄筋の曲げ内半径を設定する。実験を参考に C3 (曲げ内半径 30mm : 3D), C8 (曲げ内半径 80mm : 8D) の 2 ケース, 加えて C11.5 (曲げ内半径 11.5mm : 11.5D) のケースを加えた計 3 ケースの解析を行った (図-5)。C3 は実験における曲げ内半径 2D のものを対象にした解析であるが、要素分割の都合上、曲げ内半径は 3D としている。詳細配筋は、計算時間コストの都合上、実験の配筋に比べ、シンプルなものにしてあり、実験では用いられている巾止筋(D6)はモデル化していない。ただし、柱部と梁部でのせん断破壊を防ぎ、接合部での挙動を捉えるために、柱梁横補強筋(D10)は適宜設置されている。

#### 4. 解析結果

##### 4.1 荷重-変位関係

解析より得られた荷重-変位関係を 図-6 に、堀田らの実験結果を 図-7 に示す。また、実験と解析の最大荷重を表-2 に示す。ここでのピン変位は、強制変位が与えられている斜め下 45 度方向の変位である。実験では、曲げ内半径 80mm のケースは接合部内部では破壊せずに、部材危険断面にて部材降伏が生じ、そのため、最大荷重後も荷重は低下せずに変位が大きくなっている。解析でも同様に部材危険断面にて鉄筋の降伏が観測され、最大荷重後も荷重は低下しない。実験では、曲げ内半径 20mm のケースは接合部内で鉄筋折曲げ部の局所応力より支圧破壊が生じ、最大荷重後に荷重の低下が観測された。解析でも後述のように鉄筋折曲げ部の局所応力により折曲げ部から斜め方向に損傷が確認され、これが耐力低下の原因と考えられる。しかし、最大荷重後も荷重は低下せずに変位が増加し、この傾向は実験と一致していない。原因としては、ばねに与えた構成モデルが局

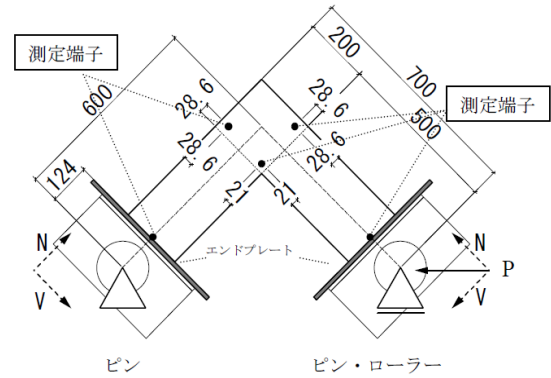


図-3 実験試験体概要 (単位: mm) (堀田ら, 2012)

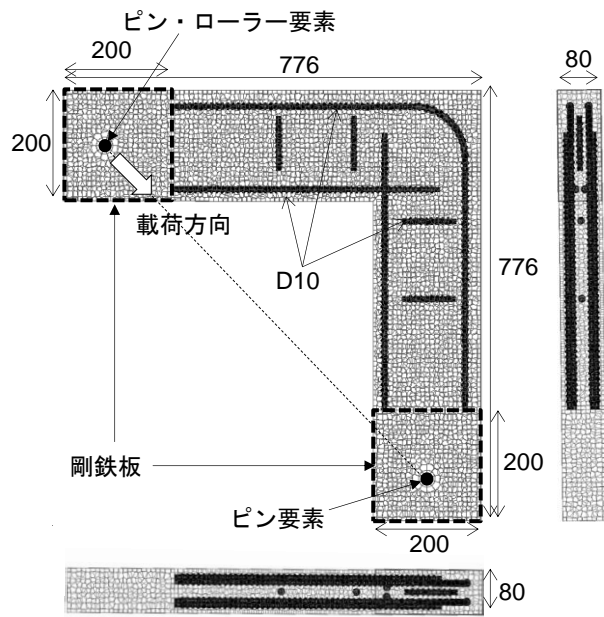


図-4 解析モデル形状と荷重方法 (単位: mm)

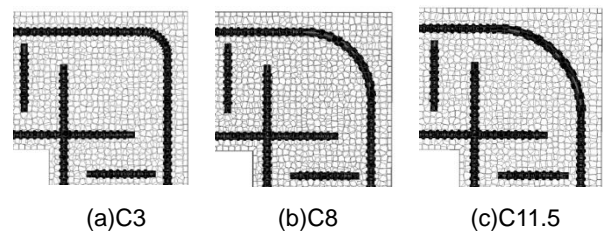


図-5 各解析ケースの接合部配筋

表-1 解析ケース

解析ケース	曲げ内半径 (mm)	コンクリート				鉄筋			要素数
		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (MPa)	ポアソン比	
C3	30	39.3	2.97	29,900	0.18	190,000	457	0.25	234,393
C8	80								223,143
C11.5	11.5								217,541

表-2 最大荷重値

解析ケース	実験値 Pexp[kN]	解析値 Pana[kN]	Pana/Pexp [%]
C3	38.6	33.6	87.0
C8	39.7	38.8	97.7
C11.5	-	38.9	-

所の圧縮軟化を表現し切れていないことと、柱梁横補強筋が実験に比べ少ない為、折曲げ部の支圧破壊後も柱梁でのせん断変形等が徐々に進んでいることが考えられる。また、解析のみ行われた C11.5 は C8 と同じ結果を示しており、ある程度以上の曲げ内半径を有すれば接合部破壊は起きず、柱または梁部で曲げ破壊を導入できることが解析からも確認された。表-2 に実験及び解析における最大荷重を示す。誤差は 15%以内であり、概ね実験の耐力を再現できた。また、曲げ内半径が小さい場合、鉄筋曲げ部の支圧破壊により最大荷重が小さくなる傾向も、実験ではその差は小さいものの一致している。C11.5 と C8 の最大荷重値はほぼ同等の値を示しているのは、上述のように、折曲げ部外の曲げ破壊であるからである。

#### 4.2 破壊形態と内部応力とひずみ

C3 と C8, C11.5 の間で荷重-変位関係に差が見られ始めた変位 2.8mm 時における内部挙動、また最大荷重時における内部挙動、そして接合部内の主鉄筋のひずみについて考察する。

##### (1) 変位 2.8mm 時における挙動

図-8 は、変位 2.8mm の際の、C3 の内部応力図である。柱梁接合部が閉じる際に、①柱内側部、梁内側部に沿って、また、②接合部内の主鉄筋折曲げ部から接合部内側隅にかけて、圧縮力が発生していることがわかる。①の柱内側部、梁内側部に沿う圧縮力は、他ケースでも同様に発生したことが確認された。しかし、②の接合部内の圧縮力は、折曲げ部から発生しているため、曲げ内半径が異なるケース毎に、その圧縮領域が異なる(図-9)。この領域が狭い程、圧縮力が狭い領域に集中し、そこで圧壊が生じやすい。すなわち、本解析においては、圧縮領域の大きさは C11.5, C8, C3 の順となり、C3 が最も接合部の折曲げ内部での圧壊が起こりやすい。変位 2.8mm において、曲げ内半径による応力状態の違いが生じており、それが荷重変位曲線の違いに表れている。

##### (2) 最大荷重時における挙動

図-10, 図-11, 図-12 は、最大荷重時の各ケースの外観図である。ひび割れ性状は、接合部内では、C3 で鉄筋折曲げ部から内側へ伸びるひび割れが確認されるのに対し、C8 および C11.5 では折曲げ部外側でひび割れが発生しており、破壊パターンが違うことが分かる。接

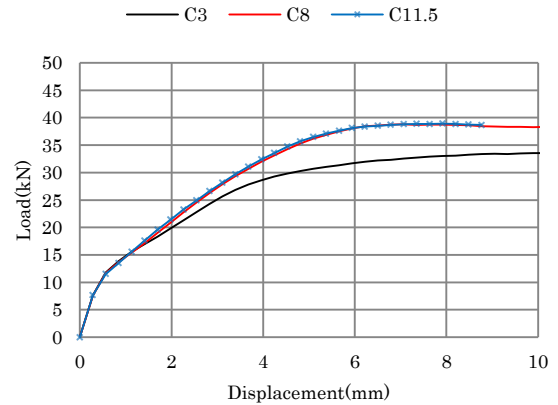


図-6 荷重-ピン変位関係(解析)

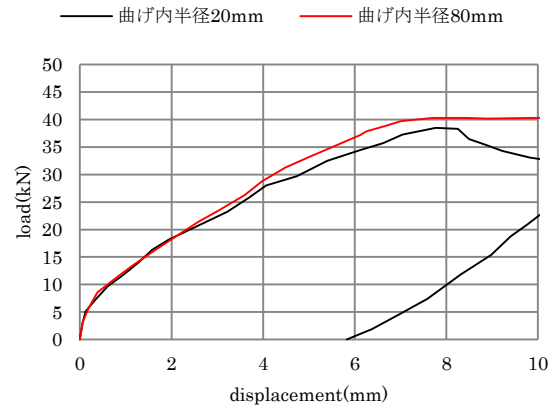


図-7 荷重-ピン変位関係(堀田ら, 2012)

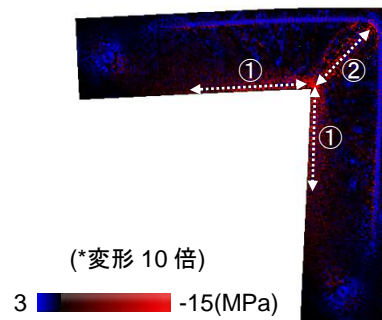


図-8 C3 の内部応力図(変位 2.8mm 時)

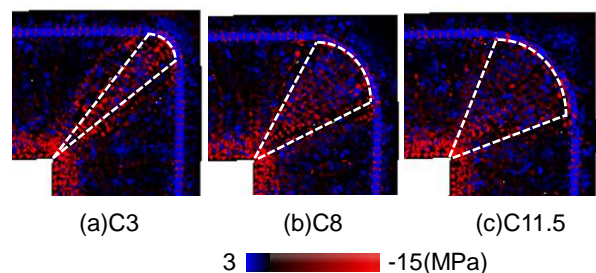


図-9 解析ケースの接合部内部応力図(変位 2.8mm 時)

合部外では柱部、梁部それぞれに多数のせん断ひび割れがみられる。この原因としては、実験に比べて柱梁横補強筋の量が少ないことが挙げられる。また、接合部内のひび割れに関しては、各ケースの内部ひび割れ図を図-13に示す。C3では、主鉄筋折曲げ内部から接合部内隅部にかけて多数のひび割れを確認できる一方、C8とC11.5では、主鉄筋折曲げ内部にかけてひび割れは発生せず、主鉄筋折曲げ始めと折曲げ終わり周辺に曲げひび割れが発生している。C3では、2.8mm時にも確認された、接合部折曲げ内部から発生する圧縮領域による圧壊が進んだ結果、破壊に至ったと考えられる。逆に、C8とC11.5では、接合部の主鉄筋折曲げ内部では圧壊は発生せずに、折曲げ部外側と柱梁部で曲げ破壊をした。実験でも、曲げ内半径20mmのケースは折曲げ部で支圧破壊しており、折曲げ内部からのひび割れも確認できるが(図-14(a))、曲げ内半径80mmのケースでは折曲げ内部からのひび割れは発生せずに、部材降伏が生じている(図-14(b))。本解析は、堀田らの実験<sup>4)</sup>によって示された、曲げ内半径の違いによるひび割れ性状と破壊性状の違いを再現できた。

### (3) 接合部内の主鉄筋ひずみ

図-15と図-16は、C3、C8それぞれの鉄筋降伏発生時と最大荷重時の接合部内の主鉄筋の外側部分のひずみ分布を示す。ひずみは鉄筋の中心より接合部外側の鉄筋要素のものを示している。横軸は柱接合部境界面～鉄筋折曲げ部～梁接合部境界面の鉄筋に沿ったひずみ分布であり、距離を鉄筋直径で割った数値である。横軸と対応する鉄筋位置の関係を図中に示している。鉄筋折曲げ部の中心部を0としている。C3では、変位5.6mm時に鉄筋折曲げ部の外側にて鉄筋降伏(ひずみ0.0025以上)が生じ、その際の荷重値は31.4kN、最大荷重値の93%である(図-15)。一方、C8では、変位3.7mm時に梁接合部境界面にて鉄筋降伏が生じ、その際の荷重値は30.7kN、最大荷重値の79%であり(図-16)、曲げ内半径が小さいC3では折曲げ部での破壊が進み最大荷重に近づいた段階で鉄筋降伏が生じたのに対し、曲げ内半径が大きいC8では早い段階で鉄筋降伏が生じており、ここからもC3とC8で破壊パターンが違うことを確認できる。また、降伏点以外の鉄筋についても、C3では鉄筋位置によってひずみ値に違いが見られ、折曲げ内部の鉄筋のひずみが相対的に低い(図-15)、C8では鉄筋位置によるひずみの違いは小さく、平均的にひずみが分散している(図-16)。曲げ内半径が小さいC3では、鉄筋折曲げ部からコンクリートを接合部内側へ圧縮する方向へ力を伝達するため鉄筋自体のひずみは小さい。一方、曲げ内半径が大きいC8では、鉄筋からコンクリートへの圧縮力は分散しており、折曲げ部での鉄筋ひずみは降伏した位置以

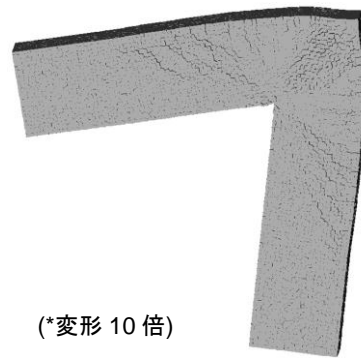


図-10 C3の外観図(最大荷重時)

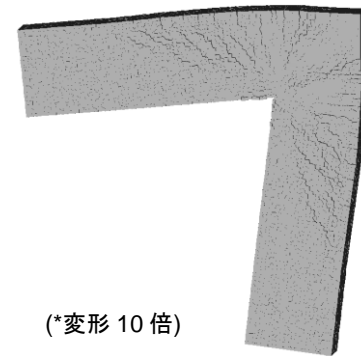


図-11 C8の外観図(最大荷重時)

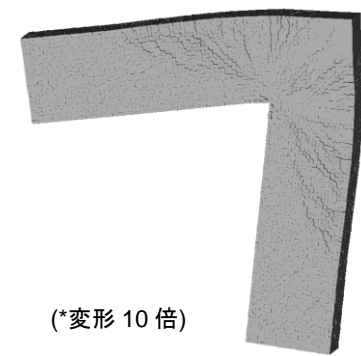


図-12 C11.5の外観図(最大荷重時)

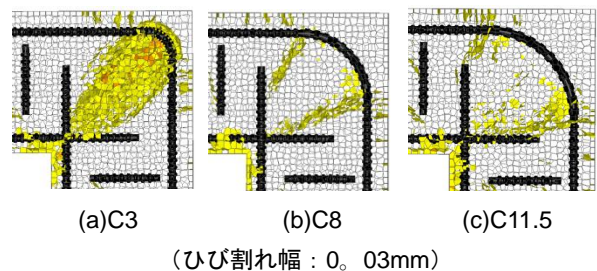


図-13 各解析ケースの接合部内部ひび割れ図

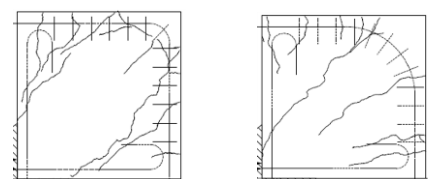


図-14 各実験ケースの接合部ひび割れ図(堀田ら, 2012)

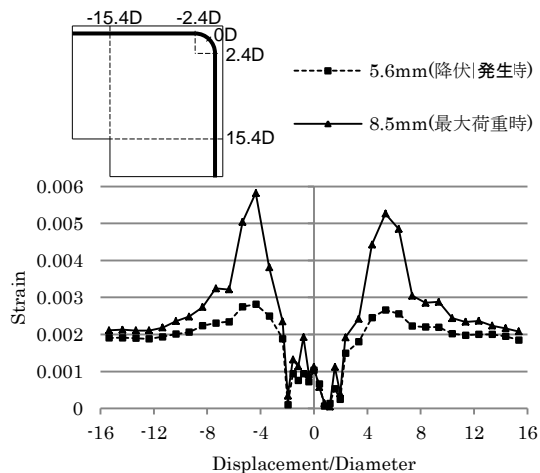


図-15 C3の接合部内の主鉄筋ひずみ

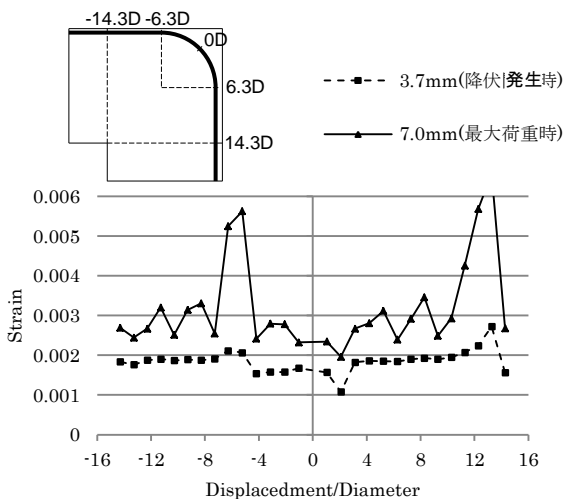


図-16 C8の接合部内の主鉄筋ひずみ

外に大きな差は無い。このように鉄筋のひずみ分布からも、曲げ内半径による接合部の応力状態と破壊パターンの違いを確認できた。

## 5. まとめ

三次元離散解析手法を用いた数値解析により、L字型RC柱梁接合部における配筋が破壊挙動に与える影響を再現、検討した本研究により得られた知見を以下に纏める。

- (1) 既往の微細構造解析システムを拡張することで、三次元離散解析手法により、簡易な配筋のRC柱梁接合部の破壊を解析できた。
- (2) 主鉄筋の曲げ内半径の大きさが、耐力と破壊性状に影響を与えることを数値解析により再現した。曲げ内半径が小さい場合は接合部内の鉄筋折曲げ部において支圧破壊が生じ、その結果、曲げ内半径が大

きく柱梁部で曲げ破壊する場合と比べ耐力が下がることを、破壊パターンと共に実験と同様に解析できた。

- (3) 数値解析から、曲げ内半径の大きさによって、内部応力状態とひび割れ性状が異なることを示した。曲げ内半径が小さい場合は、折曲げ部に圧縮力が集中し、局所破壊が発生する。曲げ内半径が大きい場合は、圧縮力が分散するため局所破壊をしない。このことを、接合部内の鉄筋ひずみ分布が、曲げ内半径が小さい場合でのみ折曲げ部のひずみに変化することからも確認した。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編【2007年制定】，2007
- 2) 土木学会：鉄筋コンクリート構造物の設計システム-Back to the Future-，コンクリート技術シリーズ95，2011
- 3) 吉武謙二，小川晃，小倉大季，前之園司：梁および柱の軸方向鉄筋の定着仕様が接合部性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.541-546,2012
- 4) 堀田久人，西澤直仁：鉄筋コンクリート柱梁L字形接合部せん断強度に及ぼす主筋配筋の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.2.83-2.88,2012
- 5) Nagai, K. , Sato, Y. and Ueda T : Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 3D RBS M, Journal of Advanced Concrete Technology Vol3, No.3, pp.385-402, October 2005
- 6) 吉武謙二，小倉大季，小川晃：接合部内の柱と梁主鉄筋の鉛直・垂直位置関係が鉄筋附着特性に及ぼす影響，第65回土木学会年次学術講演会，V-555,pp.947-948,2010
- 7) 林大輔，長井宏平，吉武謙二，小倉大季：三次元離散解析による鉄筋あきが定着性能に及ぼす影響の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.2, pp.559-564,2012
- 8) Kawai,T. : New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structure, Nuclear Engineering Design, 48, pp.207-229,1978
- 9) 武藤信太郎，Worapong Srisoros, 中村光，国枝稔：メゾスケール解析における異形鉄筋の附着挙動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.763-768,2005