

# 拡張有限要素法を用いた中空断面 RC 橋脚の ひび割れ進展解析と コンクリート充填補強策の評価

笠原 然<sup>1</sup>・植村 佳大<sup>2</sup>・高橋 良和<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kasahara.zen.36x@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

基部が中空断面である RC 橋脚 (中空断面 RC 橋脚) のコンクリート充填補強策の評価を目的として、柱基部が中実断面、中空断面、充填断面である 3 種類の RC 橋脚に対して、拡張有限要素法を用いたひび割れ進展解析を行った。その結果、本解析モデルにより、同時期に行われた中空断面 RC 橋脚のコンクリート充填補強策に関する実験結果を概ね再現できることが分かった。また、基部が充填断面の場合は、ひび割れ性状や変形成分の傾向が補強前の中空断面 RC 橋脚の場合と類似することが確認でき、中空断面 RC 橋脚のせん断抵抗力向上を期待する際は、コンクリート充填補強のみでは不十分である可能性が示された。さらに、コンクリート充填補強と併せて、既設部と充填部の結合を高めるアンカー補強を行うことで、中空断面 RC 橋脚のせん断耐力が向上する可能性を示した。

**Key Words:** X-FEM, Crack Propagation Analysis, RC Pier, Hollow Section

## 1. 背景

我が国では、高規格幹線道路網を整備する際、深い谷を有する山岳地帯を通過する場合が多く、高橋脚の建設が不可欠なものとなっている。高橋脚は必要な剛性を合理的に確保することが必要とされており、鉄筋コンクリート高橋脚を計画する場合には、橋脚自重を低減し、橋脚基礎への負担や橋脚に作用する地震力を低減することを目的として、中実断面ではなく中空断面を採用するケースが多い。このような中空断面を有する RC 橋脚は、曲げ剛性の合理的な確保が可能とされる一方で、中空断面特有の事象や問題が指摘されている。これまでの研究から、中空断面では、大規模地震時において大変形を生じた際に、相対的に断面積が小さいことからせん断力および軸応力に対する条件が厳しいものとなると同時に、ウェブ部における斜めひび割れの進行やコンクリートの損傷が断面外側、内側の両方で生じることによって脆性

的な破壊に至りやすいとの見解がなされている<sup>1)2)</sup>。

しかしながら、このような中空断面特有の事象や課題を適切に考慮した上で、耐力および変形性能を評価・把握するとともに、必要な安全余裕を設定する方法は現在明らかとなっていない。そのため、現行の道路橋示方書<sup>4)</sup>では、中空断面を有する RC 橋脚については中空断面特有の構造特性を加味し、塑性変形能が確実に発揮できるような形状とするよう改定がなされている。具体的には、塑性ヒンジ領域と、その近傍で塑性ヒンジ領域の影響を受ける領域においては中実断面とした上で、塑性ヒンジの影響を受けない部位のみを中空断面とし、さらに中実断面から中空断面へと変化する箇所が新たな損傷箇所とならないよう、構造的な配慮をするよう新たに構造細目が規定されている。

こうした現状を踏まえ、柱基部が中空である既存の中空断面 RC 橋脚に対して、中空断面となる基部にコンクリートを充填することによって、橋脚基部を中実化させ

るというコンクリート充填補強が現在、主として行われている。コンクリート充填補強では、塑性ヒンジ領域における軸方向鉄筋の内側座屈の抑制により、曲げ変形性能の向上が期待される。事実、高原ら<sup>9)</sup>の検討において、コンクリート充填補強を施すことで、軸方向鉄筋の内側座屈が抑制され、中空断面 RC 橋脚の曲げ変形性能が向上することが実験的に確認されている。

また、コンクリート充填では、橋脚断面積が増大することで、せん断への抵抗に寄与するウェブ幅が増大し、柱のせん断抵抗耐力向上にも繋がると考えられている。そのため、過去の補強事例の中には、コンクリート充填により中実断面となった RC 橋脚が、一体打ちの中実断面 RC 橋脚と同様のせん断耐力を有するとみなしているものも存在する<sup>3)</sup>。一方で、中空断面 RC 橋脚にコンクリート充填補強を行う際、実際の施工においては人が中空内部に入って内面処理を行うことができないために充填部と既設部の付着は見込めないケースが考えられる。この場合、充填部と既設部が一体となって挙動しないと考えられ、充填断面と一体打ちした中実断面が同等のせん断耐力を有するか否かに関して、検討の余地が残されているといえる。

そこで本研究では、Belytschko and Black<sup>6)</sup>や Moës et al<sup>7)</sup>によって提案された要素内に不連続な境界を再現可能な拡張有限要素法(eXtended Finite Element Method: X-FEM)を用いて中実断面 RC 橋脚、中空断面 RC 橋脚、基部充填補強 RC 橋脚の3種類の RC 柱を比較検討し、中空断面 RC 橋脚に対するコンクリート充填補強がせん断抵抗特性に与える効果について検討する。

## 2. 拡張有限要素法(X-FEM)

### (1) 定式化

X-FEM では、節点に新たな自由度と不連続性を有する形状関数を導入することによって、不連続面を含む要素分割が可能となる。そのため、要素配置と独立して変位の不連続性を定義できるという特徴がある。ここで、X-FEM における要素内変位  $\mathbf{u}$  を次式のように近似する。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m N_i(\mathbf{x}) \bar{\mathbf{u}}_i + \sum_{i \in J} N_j(\mathbf{x}) \psi_j(\mathbf{x}) \bar{\mathbf{a}}_j \quad (1)$$

ここに、 $N$  は形状関数、 $\mathbf{x}$  は座標、 $i$  は節点番号、 $m$  は要素内の節点の総数、 $\bar{\mathbf{u}}$  は節点変位である。ここで、 $\psi_j(\mathbf{x})$  はエンリッチ関数と呼ばれ、要素内の変位の不連続性を表す関数である。そして、エンリッチ関数に係る節点はエンリッチノードと呼ばれ、 $j$  はエンリッチノードを集めた集合、 $\bar{\mathbf{a}}$  はエンリッチノードに付加された自由度である。

### (2) RC 構造物への拡張有限要素法の適用事例

X-FEM は、亀裂発生およびその進展過程のシミュレーションに有効であり、コンクリート構造に対しても多くの適用事例が存在する。一方で、その多くは一般的な構造に対する検討ではなく、あらかじめスリッドを設けたり<sup>8)</sup>、試験体の形状を工夫する<sup>10)</sup>等して応力集中箇所を明確化し、その際のひび割れ進展が再現できるかを検証するに留まっているのが現状である。しかし、近年、一般的なコンクリート構造や RC 構造物に対する検討もいくつか行われている<sup>11)12)</sup>。これらの研究では、ダムや RC 柱といった一般的な構造に対して X-FEM を適用しており、対象構造の地震時挙動に対して、一定の結果が得られている。しかしその一方で、それぞれの検討事例を見ると、得られたひび割れの本数が少ないことが分かる。これは、X-FEM を用いて多数のひび割れが発生する要素を再現する場合、アルゴリズムが煩雑になる上、解析が不安定になることが一般的に知られており、発生するひび割れが少ない構造に対しての適用に留まっているためであるといえる。

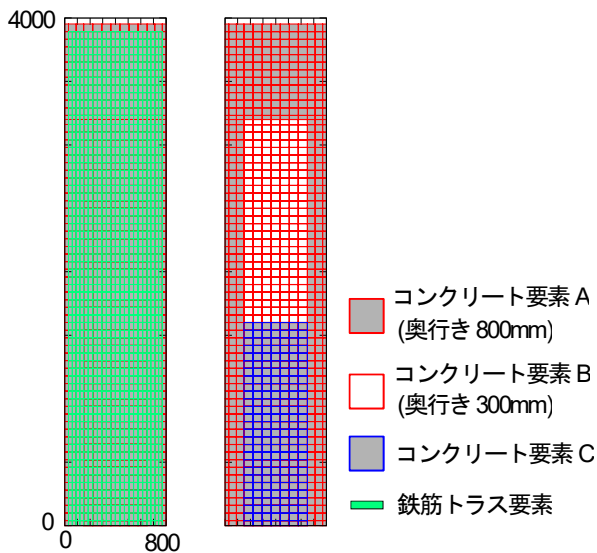
そうした中、X-FEM を用いて RC 構造物の比較的複雑なひび割れが再現されている事例が存在する<sup>14)15)</sup>。これらの研究では、RC フレームおよび RC 梁に現れる曲げひび割れやせん断ひび割れが見られ、多数のひび割れ発生および進展の様子が再現されていた。しかしながら、X-FEM を用いて、RC 構造物における多数のひび割れ発生時の挙動を再現した事例は未だ少ないのが現状であり、X-FEM を RC 構造物に適用する際の課題の抽出およびその改善が必要であるといえる。

### (3) X-FEM による RC 構造物のひび割れ進展解析の意義

FEM を用いた RC 構造物に対する一般的な数値解析では、ひび割れのモデル化に離散ひび割れモデルまたは分散ひび割れモデルが用いられることが多い。

離散ひび割れモデルは、隣り合う要素の節点を分離することによってひび割れを再現するモデルである。しかし、ひび割れの発生に応じて要素の再分割が必要となり、プログラムが非常に煩雑になる。そのため、離散ひび割れモデルを用いた解析の多くは、ひび割れ進展経路が既知のものに対して適用され、ひび割れ箇所があらかじめ設定されており、任意の位置でのひび割れ発生が表現できないという欠点がある。

分散ひび割れモデルは、ひび割れによる変位の不連続性を構成則で表現するモデルである。しかし、構成則には多くの経験則は含まれており、物理的な挙動が見えにくい側面がある。また、一つの要素に複数のひび割れが発生することが前提となっているため、応力集中によるひび割れが再現できず、ひび割れの進展も大まかにしか再現できない。



(a) 鉄筋要素図 (b) コンクリート要素図

図-1 解析モデル(Unit:mm)

一方、X-FEM を用いた数値解析では、不連続性を表す自由度を不連続関数で内挿することで要素内の変位の不連続性を表現するため、離散ひび割れモデルのような要素の再分割を必要とせず、任意位置でのひび割れ発生に対応可能である。また、ひび割れを構成則を用いて表現しないため、「連続体に不連続面が生じる」という、より現実に近いひび割れ挙動が再現可能である。また、構成則を単純化することが可能であり、経験則を含むパラメータを最小限としたひび割れ進展解析を行うことが可能となる。以上から、RC 構造物のひび割れ進展解析に X-FEM を適用する意義は大きいといえる。

### 3. 中空断面 RC 橋脚のコンクリート充填補強策の評価に向けた解析概要

#### (1) 解析対象とする柱構造

本解析では、綾城ら<sup>16)</sup>によって正負交番載荷実験が実施された、中実断面 RC 橋脚、中空断面 RC 橋脚、基部充填補強 RC 橋脚に対して解析を実施した。なお、綾城ら<sup>16)</sup>の検討では、基準振幅を $1\delta y_0 (= 16\text{mm})$ として、同一振幅 3 回の繰り返し載荷が行われている。本解析では、実験結果のうち、軸方向鉄筋座屈が確認されるまでの領域(載荷振幅 $6\delta y_0 (= 96\text{mm})$ )を検討対象とした。

#### (2) 解析モデル

図-1に中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚に対して作成した解析モデルを示す。解析モデルにおいて、軸方向鉄筋および帯鉄筋は非線形トラス要素でモデル化し、材料モデルにはMenegotto-Pintoモデルを採用した。軸方向鉄筋要素の断面積は、D10の異

形鉄筋の断面積 $71.33\text{mm}^2$ に奥行き方向の鉄筋本数を乗じた値とし、降伏強度は引張試験により得られた実強度である $396\text{N/mm}^2$ とした。一方、帯鉄筋の断面積は、D6の異形鉄筋の断面積 $31.67\text{mm}^2$ に奥行き方向の鉄筋本数を乗じた値とし、降伏強度は実強度である $367\text{N/mm}^2$ とした。なお、中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚の配筋は同一であり、鉄筋要素の位置は図-1(a)に示す通りである。

また、X-FEMでは、要素内の変位の不連続性を直接的に再現できるため、材料構成則を単純化できるという利点がある。そこで本検討では、コンクリート要素は平面応力状態を仮定して線形ソリッド要素でモデル化し、柱の破壊挙動の再現を試みることにした。その際、コンクリート要素のヤング率は $25000\text{N/mm}^2$ 、密度は $2.5\text{kg/mm}^3$ 、ポアソン比は $0.2$ とした。なお、柱高さ $2800\text{mm}$ 以上の要素は通常のFEMで定式化し、ひび割れの発生は考慮しないこととした。

また、各解析モデルにおける柱の断面構造の違いは、図-1(b)に示す柱基部におけるウェブ部のコンクリート要素Cの奥行きを変化させることで再現した。具体的には、中実断面RC橋脚では、コンクリート要素Cの奥行きを $800\text{mm}$ とすることで中実断面とした。中空断面RC橋脚では、コンクリート要素Cの奥行きを $300\text{mm}$ とすることで中空断面を再現した。基部充填補強RC橋脚では、奥行き $500\text{mm}$ のコンクリート要素Cををジョイント要素を介して中空断面部と結合することで、コンクリート充填補強を再現した。その際、ジョイント要素ではペナルティ法を用いて要素間の接触をモデル化した。なお、コンクリート充填部では奥行き $300\text{mm}$ のコンクリート要素と奥行き $500\text{mm}$ のコンクリート要素が重なっていることに注意されたい。以降、中空断面RC橋脚に対してコンクリート充填部をあと施工することを想定し、基部充填補強RC橋脚では、充填コンクリート部を除いた部分を「既設部」、充填コンクリート部を「充填部」と記す。

#### (3) クラックのモデル化について

##### a) 不連続面の発生の処理

二次元等方性線形弾性体中における任意のクラックを考える場合、クラック上下面の相対変位に着目すると、二種類の基本変形モード(モードI(開口型)、モードII(面内せん断型))に分類できる。

本検討ではモードIのクラックに関して、準脆性材料の引張破壊に対する簡易的な破壊基準として知られるランキン型の破壊基準(最大主応力説)を採用し、 $\sigma_{max} > f_t$ のときモードIのクラックが発生することとした。 $\sigma_{max}$ は最大主応力、 $f_t$ は引張強度である。

ここで、モードIのクラックのみを考慮して解析を実施した場合、コンクリートの圧縮軟化が再現されず、コ

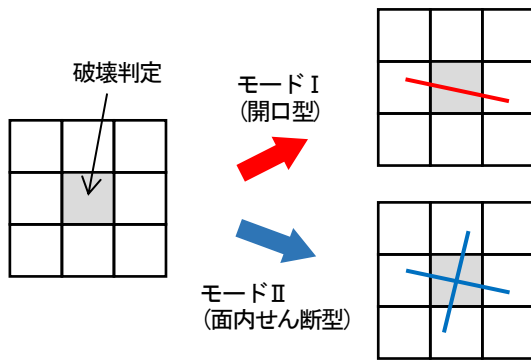


図-2 クラック発生

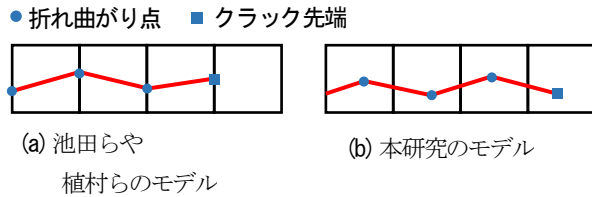


図-3 クラック先端の位置の違いによる不連続面の違い

コンクリートの圧縮強度を過大評価してしまう恐れがあると考えられる。一般的には、コンクリート要素の応力軟化は材料構成則によって表現されることが多く、X-FEMを用いた既往の研究においても、コンクリート要素の圧縮域にDrucker-Prager型の弾塑性構成則が適用されている。しかし、2.(3)で述べたように、「連続体に不連続面が生じる」という、より現実に近いひび割れ挙動の再現が可能なX-FEMにおいては、材料構成則を単純化した上でコンクリートの圧縮軟化を表現できることが理想であるといえる。そこで本検討では、コンクリートの圧縮軟化がモードⅡのクラック発生によるものであると考え、 $\sigma_{max} > 0$ かつ $\sigma_{min} > -f_c$ のときモードⅡのクラックが発生することとした。ここで $\sigma_{min}$ は最小主応力、 $f_c$ は圧縮強度である。このようにX-FEMを用いてコンクリートの圧縮軟化をモードⅡのクラックによって再現を試みた検討はこれまでになく、新たな試みであるといえる。

また、クラックの傾斜角については、池田ら<sup>17)</sup>の方法を参考にし、モードⅠでは最大主応力方向、モードⅡではせん断応力が最大となる方向に従うこととした。なお、モードⅡではせん断応力が最大となる方向が共役に二方向存在するため、それらに対応した二つのクラックを発生させることとした(図-2)。

#### b) 不連続面の進展の処理

X-FEMにおいてクラックの進展を再現する際、クラック先端の位置の決定方法が問題となる。池田ら<sup>17)</sup>や植村ら<sup>18)</sup>はクラックを要素の辺上まで進展させ、クラック先端が要素の辺上に位置するようにモデル化している。この場合、クラックは要素の辺上で折れ曲がり、図-3に示すような不連続面が表現される。しかし、クラック先端を要素の辺上に位置させた場合、図-4に示すように、ク

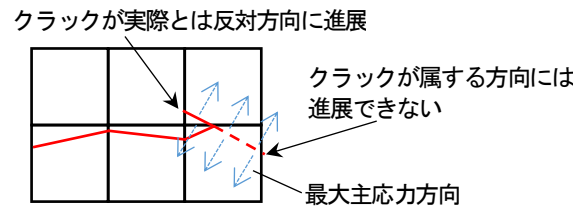


図-4 クラック先端を辺上とした場合のクラック進展

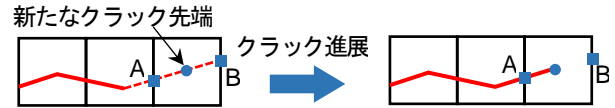


図-5 クラック先端の位置の決め方

ラックが属する要素に折り返すようにクラックが進展することができない。この場合、クラックの傾斜角は要素の最大主応力方向に従うため、隣接した要素にクラックを進展させることとなり、結果として、実際とは反対方向に進展してしまう。

そこで本研究では、クラック先端が要素内に位置するようにモデル化し、クラックの要素内の折れ曲がり表現できる定式化を行った。具体的には図-5に示すようにクラック進展方向に線を延長させ、最初に新たな要素の辺と交わった点をAとし、次に要素の辺と交わった点をBとする。このとき線分ABの中点までクラックを進展させ、この点をクラック先端とした。

#### c) エンリッチ関数

本検討では、エンリッチ関数として次式で表されるヘビサイド型の関数(shifted Heaviside function<sup>19)</sup>)を用いる。

$$\psi_j(\mathbf{x}) = H(\phi(\mathbf{x})) - H(\phi(\mathbf{x}_j)) \quad (2)$$

$$H(x) = \begin{cases} 1(x \geq 0) \\ -1(x \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $H$ はヘビサイド関数であり、 $\phi(\mathbf{x})$ はレベルセット関数(不連続面からの距離を符号付きで表す関数)である。 $\psi_j(\mathbf{x})$ は不連続な関数であるため、エンリッチ関数として用いることで要素内変位の不連続面を表すことができる。また、変位の不連続面が存在しない要素では $\psi_j(\mathbf{x}) = 0$ となるため、周辺の要素にはエンリッチノードが与える変位の不連続性による影響が及ばない。

#### d) クラック先端を有する要素の定式化

一般的な、X-FEMでは、クラック先端を有する要素(以下、クラック先端要素と呼ぶ)は、クラック先端の漸近解を表す基底関数を用いて定式化されることが多い。この場合、図-6に示すブレンディング要素(クラック先端近傍の漸近解基底を拡充された節点と拡充されていない節点を含む要素)が不可避免的に生じることが考えられている。その際、クラック先端周辺のブレンディング要

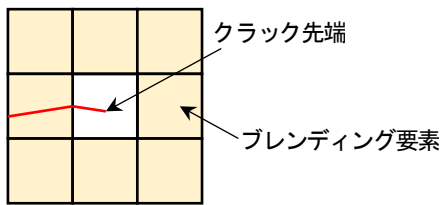


図-6 ブレンディング要素

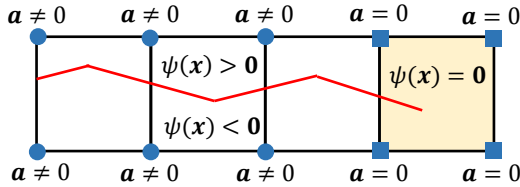


図-7 エンリッチ関数およびエンリッチノードに付加された自由度の設定

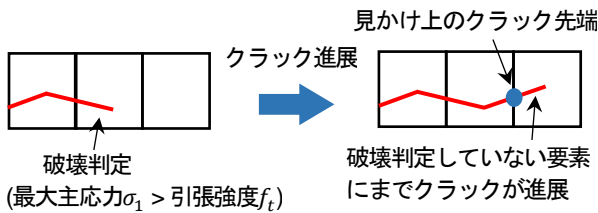
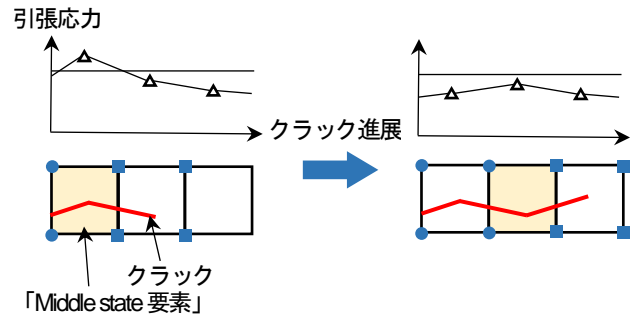


図-8 見かけ上のクラック先端

素では、拡充した関数が再構成することが保証されず、その近似精度は通常の FEM より低下することが示されている。そこで本研究では、上記のブレンディング要素の問題を回避するため、クラック先端の要素のエンリッチ関数 $\psi_j(x)$ の値をゼロとして定式化し、不連続性を表す自由度についても $\bar{a}_j = \mathbf{0}$ とする拘束条件を与えた(図-7)。これにより、ブレンディング要素に拡充された自由度はゼロとなるため、クラック先端要素周辺のブレンディング要素は FEM で定式化される。なお、クラックが横切っている要素で用いる shifted Heaviside 関数では、3.(4) c)で述べたように、ブレンディング要素ではエンリッチ関数がゼロとなるため、解析精度の低下は生じない。

また、クラック先端に対して上述した定式化を行うことで、クラック先端要素もブレンディング要素同様に FEM で定式化される。そのため、クラック先端要素には不連続性が生じず、見かけ上のクラック先端は図-8に示すように要素辺上に位置することとなる。ここで、3.(4)a)で述べたように、本解析において、クラック先端要素で破壊判定がなされた場合、隣接した要素にまでクラックが進展するような処理が行われる(図-8)。これは、本来、破壊判定していない要素に先行的にクラックが進展してしまうことを意味する。しかし、上述したモデル化によりクラック先端要素では変位の不連続性が生じないため、見かけ上は破壊判定がなされた要素のみに変位の不連続性が現れることとなり、より実際の挙動に適合したモデル化が可能となっている。



- ▲ 要素重心における引張応力
- エンリッチノードの自由度 $a$ を付加した節点( $a = 0$ )
- エンリッチノードの自由度 $a$ を付加した節点( $a \neq 0$ )

図-9 「Middle state 要素」を用いた不連続面進展の概念図

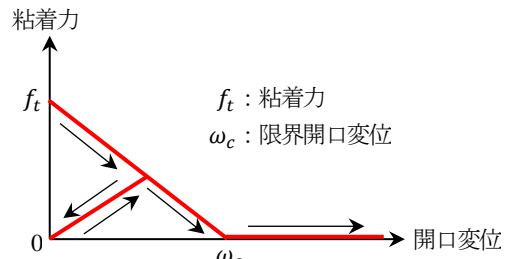


図-10 cohesive crack modelに基づく粘着力-開口変位関係

本手法のように、X-FEM を用いた既往研究の中で、ヘビサイド関数のみを用いて変位の不連続性を表現している研究はいくつか見受けられる<sup>17)18)</sup>。しかし、クラック先端要素を FEM で定式化し、クラック先端要素の辺上に見かけ上のクラック先端を発生させるモデル化を行っている検討は見当たらず、新たな試みであるといえる。

### c) Middle state 要素の採用

和田・後藤<sup>20)</sup>はX-FEMを用いた不連続面の動的進展解析において、不連続面の先端を有している要素のうち、不連続面が位置している要素をMiddle state要素<sup>21)</sup>と捉えて解析を行っている。不連続面の進展にMiddle state要素の考え方をを用いるとき、Middle state要素での破壊判定によりひび割れが発生する場合は、ひび割れ先端を介して隣接している要素にひび割れを進展させてMiddle state要素を遷移させる。

そこで本研究では、クラック先端を有する要素の一つ前の要素を「Middle state要素」とし、和田・後藤が行った手法に倣い、「Middle state要素」の最大主応力が引張強度に達した際は、その要素ではなく、クラック先端を有する要素からクラックを進展させることとした(図-9)。

### d) 不連続面の境界条件

X-FEMを用いたひび割れ進展解析では、エンリッチ関数を導入することでクラック位置に不連続変位を表現できるが、実際のクラックの挙動を再現するためには、変位の不連続面での境界条件を適切に与える必要がある。本検討では、ひび割れが開閉する際にひび割れ面に働く表面力に関して、池田ら<sup>17)</sup>が行った方法を参考とした。具体的には、ひび割れが開閉する場合は、ひび割れ先端

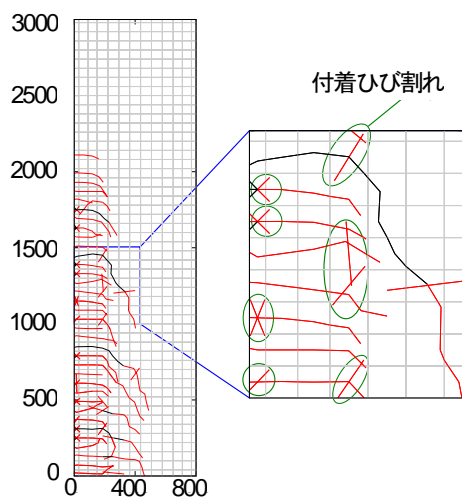


図-11 コンクリート・鉄筋間を完全固定とした場合のひび割れ性状

の塑性変形に伴う fracture process zone を考慮するため、cohesive crack model<sup>22,23)</sup>に基づいて、粘着力が開口変位の大きさに応じて徐々に低下するモデルを用いる(図-10)。図中の $f_t$ は引張強度、 $\omega_c$ は粘着力がゼロになる開口変位(限界開口変位)である。本研究では、限界開口変位は0.06mmとした。また、ひび割れが閉合する場合は、ペナルティ法(Penalty method)を用いることで、領域が重ならないように開口変位が非負という境界条件を与えた。

また、実際の挙動では、目視できるひび割れが生じるまでに、マイクロクラックや塑性変形などのエネルギー吸収が生じていると考えられる。一方、本解析では、コンクリート要素を線形弾性体と仮定しており、エネルギー吸収はクラック発生後の粘着力の作用により発生する。そのため本解析では、限界開口変位を閾値と考え、クラック面の鉛直方向および接線方向の不連続変位が閾値を超えたクラックを、解析結果のひび割れ図に示すこととした。

#### (4) 解析手法および荷重条件

本解析では、計算の高速化と省メモリ化を図るため、繰り返し計算が不要な動的陽解法の一つである中央差分法を用いた。その際、質量マトリクスを対角化する必要があるが、本解析ではshifted Heaviside関数に対して適用可能な質量集中化を行った<sup>24)</sup>。

また、荷重条件に関しては、軸力荷重を荷重制御とし、解析モデル天端の節点に合計が1190kNとなる下向きの鉛直力を常に作用させた。また、実験は正負交番荷重で行われたが、本解析はコンクリート充填補強策の評価に向けた基礎的な検討とし、片押し荷重を模擬したプッシュオーバー解析を実施した。そのため、水平荷重は $6\delta y_0 (= 96\text{mm})$ までの実験結果と比較することを踏まえ、治具先端に変位制御で100mmの変位を与えた。

#### (5) コンクリートと鉄筋の付着について

離散鉄筋要素を用いたRC構造に対する有限要素解析では、コンクリート・鉄筋間の付着挙動を接合要素によりモデル化することが一般的であり、島モデルやFIBモデル等のモデルが用いられる。しかし、これらの付着構成則は経験則であるため、構成則が単純化できるというX-FEMの特徴を考えると、経験的な付着構成則を用いずにRC構造挙動を再現することが望ましいといえる。

そうした中、本解析モデルにおけるコンクリート・鉄筋間を完全固定として中空断面RC橋脚の解析を実施したところ、水平変位7mmでのひび割れ性状が図-11に示す結果となった。なお、この図では不連続変位が限界開口変位を超えていないクラックも示している。実際のRC構造物において、異形鉄筋の付着すべりが発生する場合、鉄筋の節近傍では付着ひび割れが発生していると考えられる。そのため、図-11に示すように、軸方向鉄筋に沿って粘着力が開放されていない潜在的なひび割れ(図中の緑丸)が発生している結果は、鉄筋の付着すべりの要因となる付着ひび割れが再現されていると捉えることができる。しかし、解析中、多数の付着ひび割れが発生したことにより、解析の収束性が低下するという問題が生じた。したがって、X-FEMによってRC構造の破壊挙動を再現するためには、多数の付着ひび割れ発生により解析の収束性が低下しないよう、コンクリート・鉄筋間を完全固定とせず、適当な付着すべりモデルを実装する必要があるといえる。

しかし本研究では、付着すべりモデルの実装には至らなかったため、コンクリート・鉄筋間を完全固定としつつ、付着ひび割れが発生しないよう、解析上の制御を加えることとした。具体的には、曲げ変形を受けるRC柱では、まず始めにコンクリートに曲げひび割れおよびせん断ひび割れが発生し、その後、ひび割れ発生位置での鉄筋にひずみが集中することで付着ひび割れが発生すると考えられることから、一度クラックが発生した要素では破壊判定を行わないことで、コンクリート要素における付着ひび割れの発生を抑制した。このひび割れ発生の制御による影響は、次章にて述べることとする。

### 4. 中空断面 RC 橋脚のコンクリート充填補強策の評価に向けた解析的検討結果

#### (1) 荷重-変位関係

図-12に解析で得られた中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚の荷重-変位関係を示す。なお、図中では、比較として正負交番荷重実験で得られた各供試体の荷重-変位関係を示している。その際、本解析は片押しの単調荷重を模擬したものであるため、解

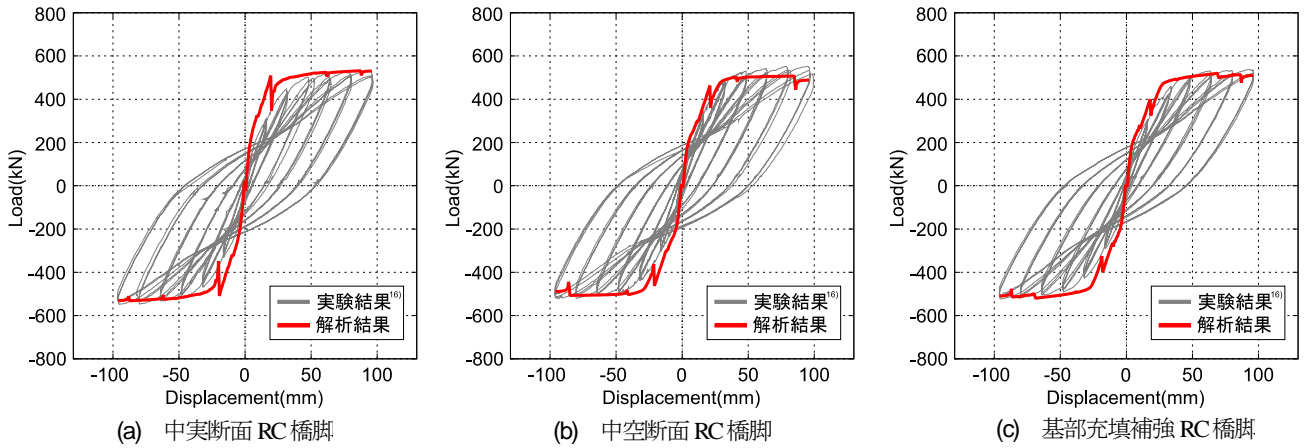


図-12 荷重-変位関係

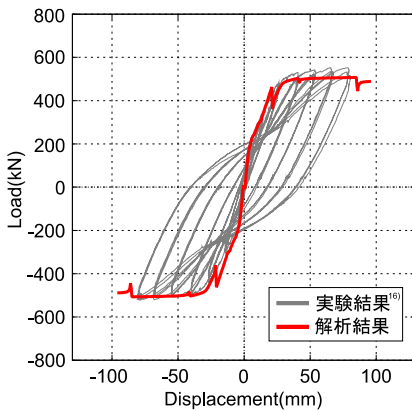


図-13 中空断面 RC 橋脚における荷重-変位関係 (鉄筋の引き抜け補正後)

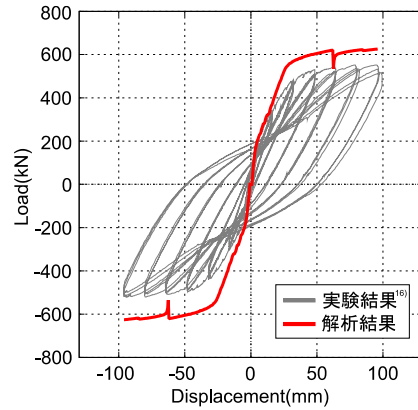


図-14 中空断面 RC 橋脚における荷重-変位関係 (せん断クラック実装前)

析結果と実験結果の荷重-変位関係を比較するにあたり、解析結果における荷重と変位を入れ替えたグラフも併せて図示している。

#### a) 初期剛性

図-12 より、水平変位 25mm までの範囲を見ると、実験結果と比較して、解析結果における初期剛性が過大となっていることがわかる。これは、本解析モデルでは軸方向鉄筋下端を完全固定としており、実験で確認された軸方向鉄筋のフーチングからの引き抜けを考慮していないことが原因であると考えられる。そこで、実験結果に対して軸方向鉄筋の引き抜けによる変位を差し引いた場合の中空断面 RC 橋脚の荷重-変位関係を図-13 に示す。ただし、中実断面 RC 橋脚と基部充填補強 RC 橋脚では、鉄筋の引き抜け量の算出に必要なデータが欠損していたため、鉄筋の引き抜け補正後の荷重-変位関係は算出できなかった。図より、鉄筋の引き抜け補正により、中空断面 RC 橋脚の初期剛性が実験結果と概ね一致していることが見て取れる。よって、本解析モデルにより、実験供試体における柱部の剛性が適切に再現されていることがわかった。

#### b) 最大荷重

各解析ケースでの橋脚の荷重について、実験結果と解析結果の比較を表-1 に示す。表-1 より、本解析結果は

表-1  $3\delta y_0$  における最大荷重の比較

	(解析値/実験値)	
	正	負
中実断面 RC 橋脚	1.099	1.03
中空断面 RC 橋脚	0.983	1.041
基部充填補強 RC 橋脚	1.047	1.047

実験結果の約±10%の精度で再現できていることから、実験供試体における柱の耐力を適切に評価できていると判断できる。

ここで、モード II(面内せん断型)のクラックを実装せず、モード I(開口型)のクラックのみを考慮した場合の中空断面 RC 橋脚の荷重-変位関係を図-14 に示す。図より、解析により得られた荷重を実験地と比較すると、 $+3\delta y_0$ (48mm) の点で (解析値/実験値) = 1.18、 $-3\delta y_0$ (48mm) の点で (解析値/実験値) = 1.25 であり、降伏後の荷重が過大に表現されていることがわかる。このことから、モード II(面内せん断型)のクラック発生を考慮することで、各実験供試体の最大荷重の再現に繋がったと考えられる。この結果は、X-FEM によってモード II のクラック発生を考慮することで、コンクリートを線形弾性体として材料構成則を単純化したとしても、コ

ンクリートの圧縮軟化を適切に再現できることを示している。すなわち、本解析によって、経験則を含む複雑な材料構成則を用いず、「連続体に不連続面が生じる」という、より現実に近いひび割れ挙動の再現のみで、RC柱の耐力を再現できたといえる。

## (2) ひび割れ性状

### a) 各解析ケース間での比較

本解析で得られた各ケースにおけるひび割れ図を図-15～図-17に示す。図-15より、水平変位 $1\delta y_0$ 時において、中実断面RC橋脚の中実部で比較的水平的にひび割れが発生しているのに対し、中実断面RC橋脚の中空部や中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚では、フランジ部で水平に発生したひび割れが、ウェブ部に到達すると斜め方向に進展していることが確認できる。また、基部充填補強RC橋脚の充填部では、既設部と異なり水平なひび割れが発生している。

水平変位が $3\delta y_0$ になると(図-16)、中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚において、柱の圧縮縁にせん断ひび割れが多数発生し、さらに縦方向にひび割れ幅の大きいひび割れが進展していることが確認できる。このことから圧縮割裂ひび割れが再現できていることがわかる。また、 $1\delta y_0$ と比較すると全体的にひび割れ進展が進み、柱の基部付近のひび割れが大きく開いていることがわかる。さらに、中空断面RC橋脚と基部充填補強RC橋脚では、多数の斜めひび割れのひび割れ幅増大が確認できる。

水平変位が $6\delta y_0$ になると(図-17)、中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚において、ひび割れの進展とひび割れ幅増大が確認されるが、 $3\delta y_0$ 時と比べてひび割れ性状に大きな変化は生じていない。

これらの結果から、基部充填補強RC橋脚では、柱全域でウェブ部における斜めひび割れが発生・進展する様子が確認でき、中実断面RC橋脚ではなく中空断面RC橋脚に近いひび割れ性状が現れたといえる。

### b) 実験結果との比較

図-18に中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚における各載荷ステップ終了時の実験結果を示す。図より、中実断面RC橋脚では、柱高さ1600mm以下の中実断面部においてフランジ部で発生したひび割れが比較的水平的に進展していることがわかる。一方、中実断面RC橋脚の中空部や中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚では、フランジ部で水平に発生したひび割れが、ウェブ部に到達すると斜め方向に進展していることが確認できる。以上より、4.(2)a)で述べた解析結果のひび割れ性状は、実験結果の傾向を概ね再現できているといえる。一方、中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚における水平変位 $1\delta y_0$ に着

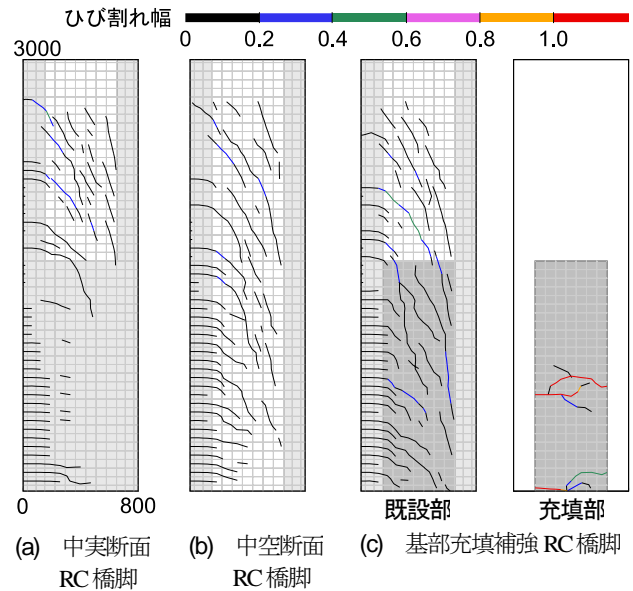


図-15  $1\delta y_0$ 時のひび割れ性状(Unit:mm)

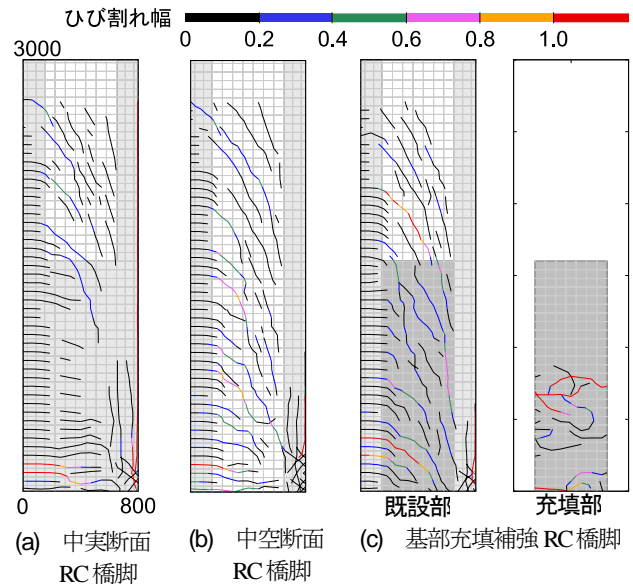


図-16  $3\delta y_0$ 時のひび割れ性状(Unit:mm)

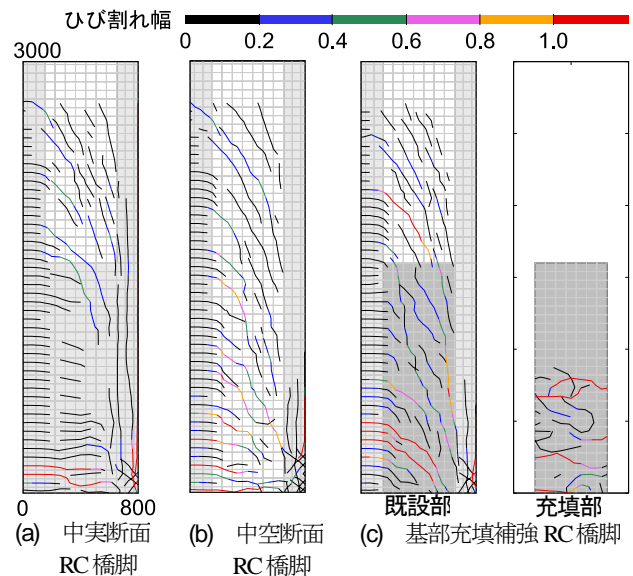
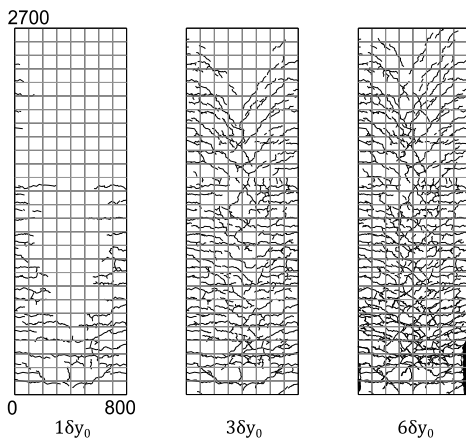
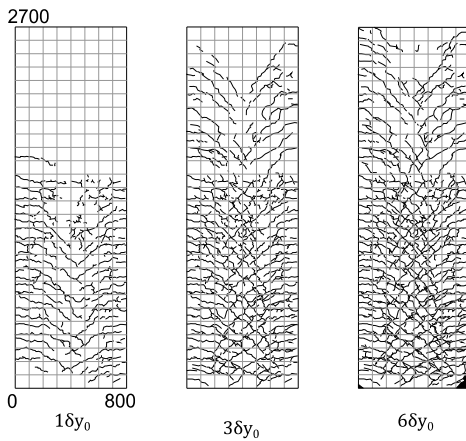


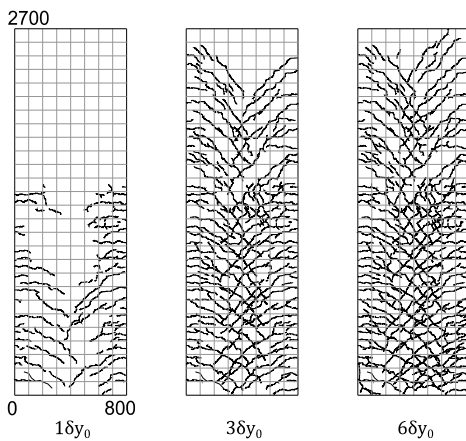
図-17  $6\delta y_0$ 時のひび割れ性状(Unit:mm)



(a) 中実断面 RC 橋脚



(b) 中空断面 RC 橋脚



(c) 基部充填補強 RC 橋脚

図-18 実験結果におけるひび割れ性状(Unit:mm)

目すると、図-15の解析結果では柱高さ1600mm～3200mmの範囲における中空部のウェブ部において斜めひび割れが発生しているのに対し、実験結果では斜めひび割れの発生がみられない。これは4.(1)で述べた実験供試体における鉄筋の引き抜けの影響により、解析結果において実験結果よりも早期にひび割れ性状に変化が生じるためであると考えられる。

次に、水平変位 $3\delta y_0$ に着目すると、図-16の解析結果

では柱基部の圧縮縁においてせん断ひび割れが発生し、そこから鉛直上向きにひび割れが進展しているのに対して、図-18の実験結果ではそのようなひび割れはみられない。これは、本検討においてコンクリートの圧縮軟化をモードII(面内せん断型)のクラックにより再現したため、実験では目視されなかったひび割れが解析上に現れたためであると考えられる。4.(1b)で述べたように、モードII(面内せん断型)のクラックを再現することで、実験における柱の最大荷重を再現できていたことを踏まえると、実験供試体においても、圧縮縁のコンクリートに微視的なせん断クラックが発生している可能性があるといえる。

以上の結果から本解析モデルにより、実験結果で見られたひび割れ性状の特徴が再現可能であるといえる。特に、中空断面RC橋脚では中空断面のフランジ部で発生した水平ひび割れがウェブ部に到達すると斜め方向に進展する現象が精度良く再現され、さらに、中実断面供試体における中実断面部と中空断面部でのひび割れ性状の差異や、基部充填補強RC橋脚における充填断面部での斜めひび割れの発生が再現可能であることが示されたといえる。

### (3) 柱部コンクリートの変形分布

図-19に載荷終了時(水平変位100mm時)の鉛直変位分布を示す。図より、図-17に示した開口幅の大きいひび割れが鉛直変位分布にも不連続面として現れており、ひび割れによる変位の不連続性が表現できていることが確認できる。また、中実断面RC橋脚では、ひび割れによる鉛直変位の不連続面がおおよそ水平方向に分布しているのに対し、中空断面RC橋脚における鉛直変位の不連続面は、中実断面RC橋脚に比べて斜めに傾斜していることがわかる。また、基部充填補強RC橋脚における鉛直変位の不連続面も同様に斜め方向に分布しており、中空断面RC橋脚に近い傾向を示していることがわかる。さらに、基部充填補強RC橋脚における充填部では、水平な不連続面が発生しており、充填部と既設部の境界でそれぞれの鉛直変位の値が異なることから、充填部と既設部が別々に挙動していることがわかる。ここで、図-20に基部充填補強RC橋脚における実験後の供試体の切断面を示す。図中の赤枠で囲んでいる部分が充填部である。図-19の基部充填補強RC橋脚における鉛直変位分布と比較すると、実験では充填部に支配的な水平不連続面が一つ発生しているのに対し、解析では複数個所で発生していることがわかる。これは、実験では充填部とフーチングの境界部にひび割れが生じており、早期にフーチングと分離していた一方、本解析モデルでは、充填部における高さ0mmの節点の拘束条件を完全固定とした

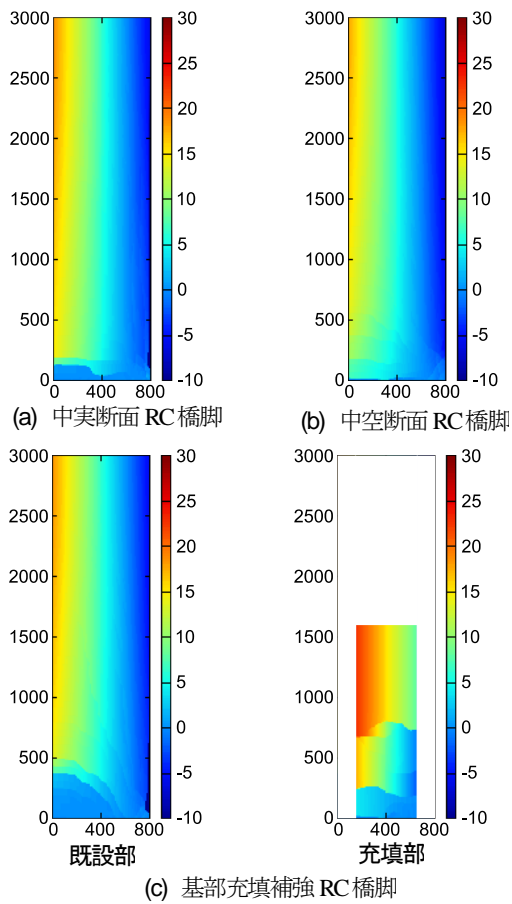


図-19 鉛直変位分布(Unit:mm)

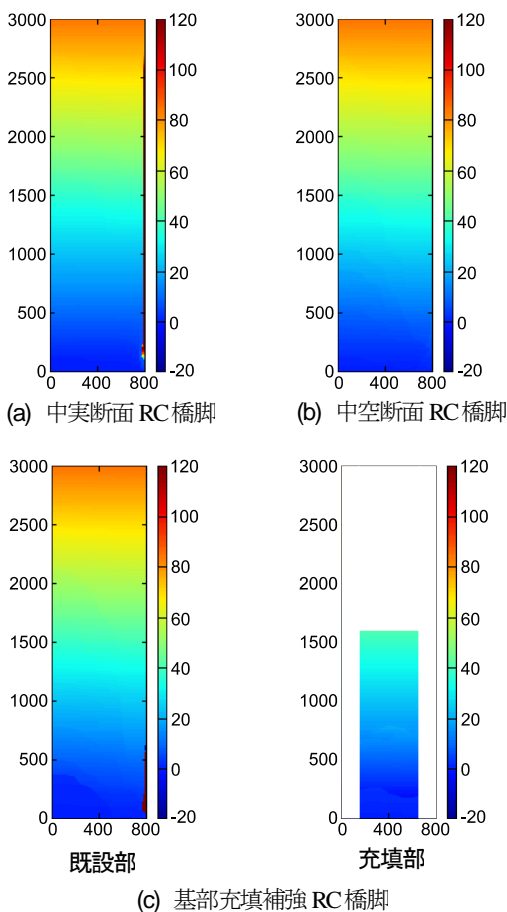


図-21 水平変位分布(Unit:mm)

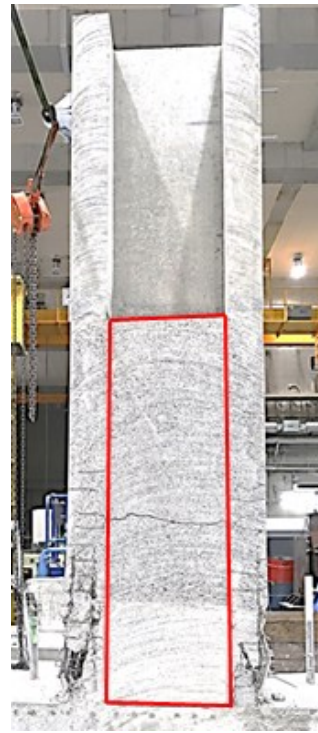


図-20 基部充填補強 RC 橋脚における実験供試体の切断面

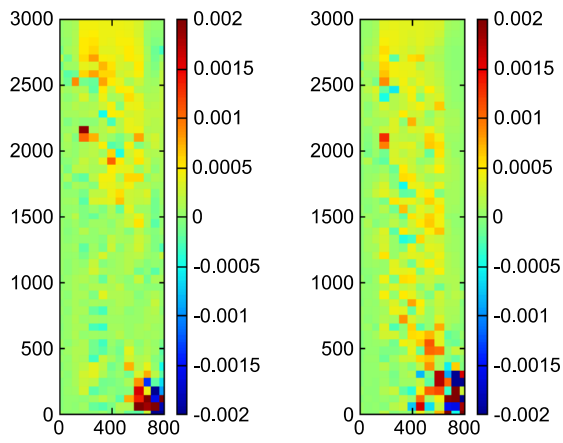
ため、本来であればフーチングとの境界で発生する不連続面が充填部に発生したためであるといえる。

また、図-21 に載荷終了時(水平変位 100mm 時)の水平変位分布を示す。中実断面 RC 橋脚では、変位の不連続部分がみられない。それに対して、中空断面 RC 橋脚、基部充填補強 RC 橋脚では高さ 500mm 付近と高さ 1500mm~2000mm の領域にわずかに斜めの不連続面がみられる。このことから、中空断面 RC 橋脚と基部充填補強 RC 橋脚では、柱のウェブ面における斜めひび割れが柱の水平分布に影響を与えていることがわかる。

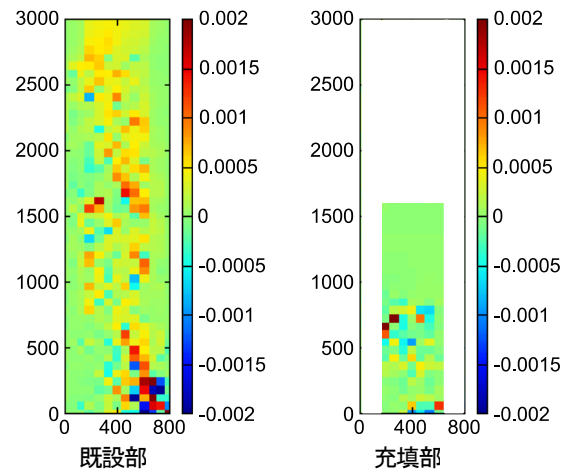
#### (4) せん断ひずみ分布図

図-22 に載荷終了時(水平変位100mm時)のせん断ひずみ分布図を示す。図-17 で示したように、柱基部の圧縮縁においてせん断ひび割れが発生しているため、柱基部の圧縮縁においてせん断ひずみが大きくなっている。また、斜めひび割れが発生している中実断面RC 橋脚の中空部や中空断面RC 橋脚、基部充填補強RC 橋脚では、中実断面RC 橋脚の中実断面部に比べてせん断ひずみが大きくなっている。

ここで、基部充填補強RC 橋脚に着目すると、充填部に発生しているせん断ひずみが既設部と比べて小さいことがわかる。これは、充填部が柱のせん断抵抗にほとんど寄与していないことを意味しており、中空断面RC 橋脚におけるコンクリート充填補強が柱のせん断抵抗特性に与える効果は小さいといえる。



(a) 中実断面 RC 橋脚 (b) 中空断面 RC 橋脚



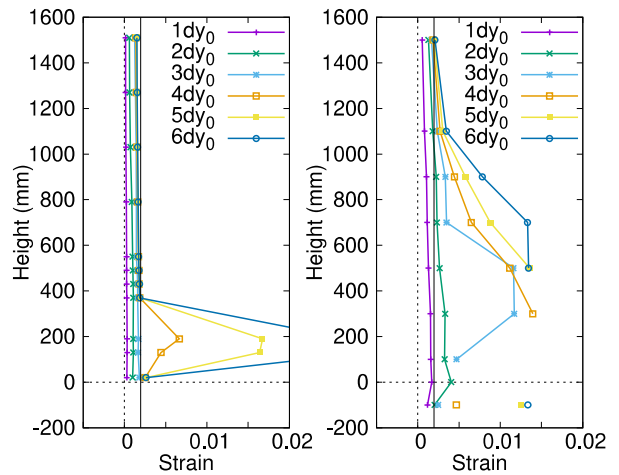
(c) 基部充填補強 RC 橋脚

図-22 せん断ひずみ分布図

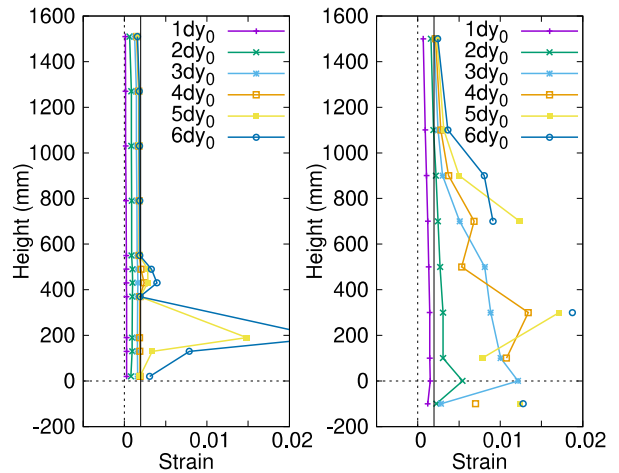
### (5) 鉄筋ひずみの高さ方向分布

図-23 に解析で得られた軸方向鉄筋ひずみの高さ方向分布を示す。なお、比較として実験結果も併せて示している。図より、すべての解析モデルにおいて、実験で見られたような塑性ヒンジ領域において軸方向鉄筋が大きく塑性化している様子が再現できている。しかしその一方で、解析結果では、軸方向鉄筋の塑性化区間が実験結果に比べて狭小化しており、柱高さ 200mm の位置でのひずみの値が過大となっている。これは、本解析モデルにおいて、コンクリート・鉄筋間を完全固定としており、鉄筋の付着すべりをモデル化していないことが要因であると考えられる。一般的に、コンクリート・鉄筋間を完全固定とした場合、ひび割れ発生箇所位置する鉄筋要素にひずみが過度に集中することが知られており、その部分に変形が集中することで、周辺の鉄筋要素に発生するひずみが低減されると考えられる。

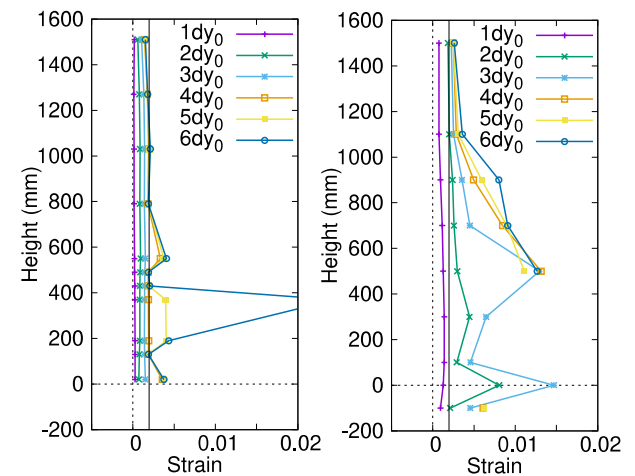
以上より、本解析モデルにより、実験で見られたような塑性ヒンジ領域において軸方向鉄筋が大きく塑性化する様子が概ね再現できた。その一方で、軸方向鉄筋に発



解析結果 実験結果  
(a) 中実断面 RC 橋脚



解析結果 実験結果  
(b) 中空断面 RC 橋脚



解析結果 実験結果  
(c) 基部充填補強 RC 橋脚

図-23 軸方向鉄筋の高さ方向分布

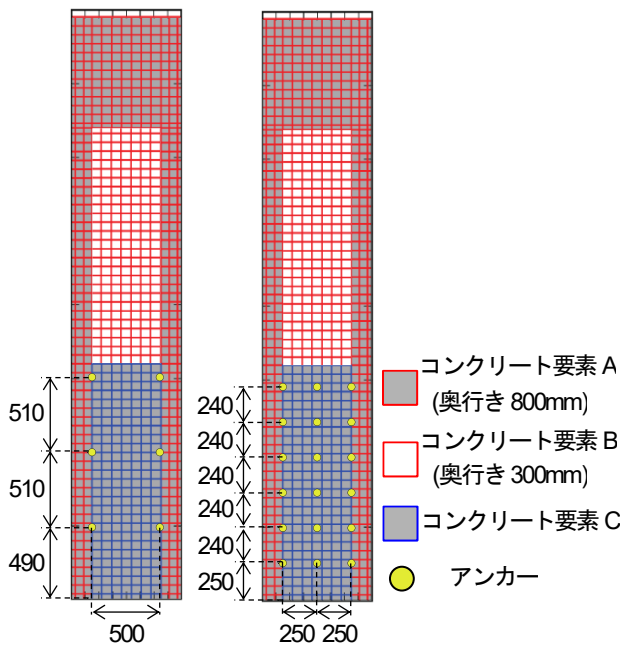


図-24 解析モデル(Unit:mm)

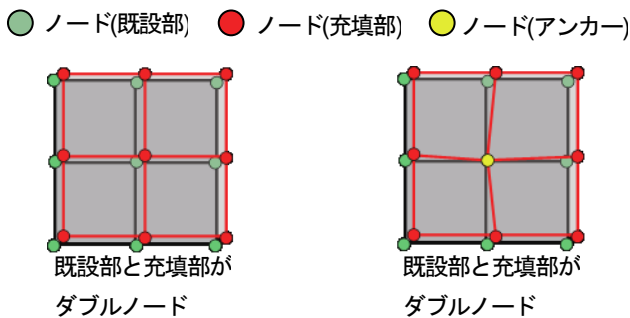


図-25 アンカーのモデル化

生するひずみをより精度良く再現するためには、コンクリート・鉄筋間に付着すべりをモデル化する必要があるといえる。

### (6) コンクリート充填補強策の評価

本章において、中実断面RC橋脚、中空断面RC橋脚、基部充填補強RC橋脚に対する解析を行った結果、基部充填補強RC橋脚において、コンクリートを充填し、充填断面とした柱基部においても中空断面同様の斜めひび割れがみられ、鉛直変位分布からも中空断面RC橋脚と同様の斜めの不連続面がみられた。また、充填コンクリート部にはほとんどせん断ひずみが発生しておらず、基部充填補強RC橋脚は中空断面RC橋脚と類似した結果を示した。以上のことから、コンクリート充填部は既設部と別々に挙動し、せん断抵抗特性に与える効果は小さいといえる。

一方で、今回行われた実験は曲げ破壊先行型の中実断面RC橋脚に対してコンクリート充填補強を施す場合の検討であったため、せん断抵抗に対してコンクリート充

填補強が想定通りの効果を発揮しなかった影響は少なかつたといえる。しかし、せん断破壊型の中実断面RC橋脚に対して耐震補強を行う場合、コンクリート充填補強のみではせん断耐力向上効果は見込めないと考えられ、十分な補強効果が得られない可能性があるといえる。

## 5. 中空断面 RC 橋脚のコンクリート充填とアンカー補強による効果

### (1) 本章の目的

前章では、既設中空断面 RC 橋脚にあと施工でコンクリートを充填した場合、中空部内で充填コンクリートが別々に挙動してしまい、その結果、充填部がせん断抵抗特性を示さない可能性を示した。そこで本検討では、中空断面 RC 橋脚にコンクリート充填に加え、アンカー補強により既設部とコンクリート充填部の結合を高めた場合の補強効果を基部充填補強 RC 橋脚、中実断面 RC 橋脚と比較し、コンクリート充填補強策のさらなる評価を行う。また、アンカー間隔の異なる解析モデルを作成し、アンカー間隔の違いが補強効果に与える影響についても検討を行う。

### (2) 解析モデル

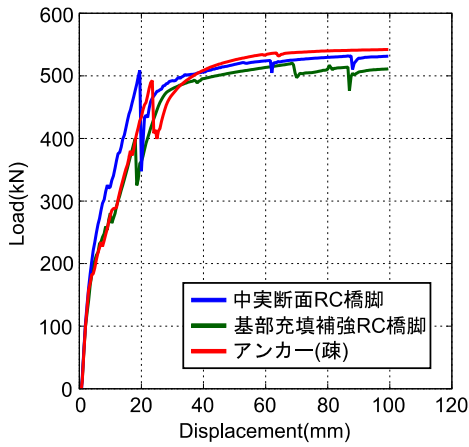
本検討では、アンカー補強により既設部とコンクリート充填部の結合を高めた基部充填補強 RC 橋脚の解析モデルを作成した。その際、アンカー間隔が疎のモデルをアンカー(疎)、アンカー間隔が密のモデルをアンカー(密)と記すこととする。

ここで、各モデルにおけるアンカーの位置を図-24に示す。アンカーのモデル化に関しては、図-25に示すように、基部充填補強 RC 橋脚ではダブルノードであった既設部と充填部の節点を、アンカー位置においてのみ単一ノードとし、その節点位置で既設部とコンクリート充填部が一体として挙動するようモデル化した。なお、アンカーのモデル化以外の部分は、3.(2)で述べた基部充填補強 RC 橋脚と同様にモデル化し、解析手法および載荷条件についても、3.(3)と同様とした。

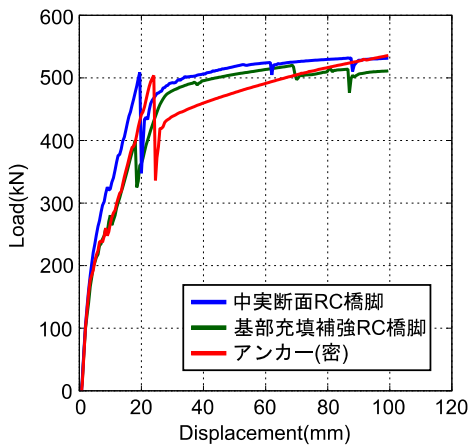
また、実際のコンクリート充填を行った中空断面 RC 橋脚に対してアンカー補強をあと施工する場合、充填部には上部工死荷重による軸力は作用しない。しかし本検討では、アンカー補強された基部充填補強 RC 橋脚のモデルに対して軸力を作用させたため、充填部は一定の初期軸力を負担することと注意されたい。

### (3) 解析結果

図-26に、本解析で得られた荷重-変位関係を示す。なお図中では、比較として4.(1)で示した中実断面 RC 橋



(a) アンカー(疎)



(b) アンカー(密)

図-26 荷重-変位関係

脚と基部充填補強 RC 橋脚の解析結果を併せて示している。

図より、アンカー補強を行った2つの解析モデルは、基部充填補強 RC 橋脚および中実断面 RC 橋脚と同程度の初期剛性を示している。また、アンカー(疎)では、柱の降伏点は基部充填補強 RC 橋脚と同程度であることがわかる。一方、アンカー(密)では、柱の降伏点は基部充填補強 RC 橋脚と同程度であるが、25mm~75mmの範囲で基部充填補強 RC 橋脚より荷重が小さくなっている。ここで、図-27 に示すひび割れ性状に着目すると、アンカー(密)では、基部充填補強 RC 橋脚とアンカー(疎)に比べて柱基部の圧縮縁において多くのせん断ひび割れが柱基部に到達していることが確認できる。これはアンカーが増えたことで既設部に応力がより伝達した結果、圧縮縁における損傷が大きくなったことが原因であると考えられる。

一方、既設部のひび割れ性状に着目すると(図-27)、アンカー(疎)のモデルでは、柱高さ 1000mm 以下の領域では、ウェブ部における斜めひび割れの傾きが基部充填補強 RC 橋脚に比べて緩やかであることが見てとれる。

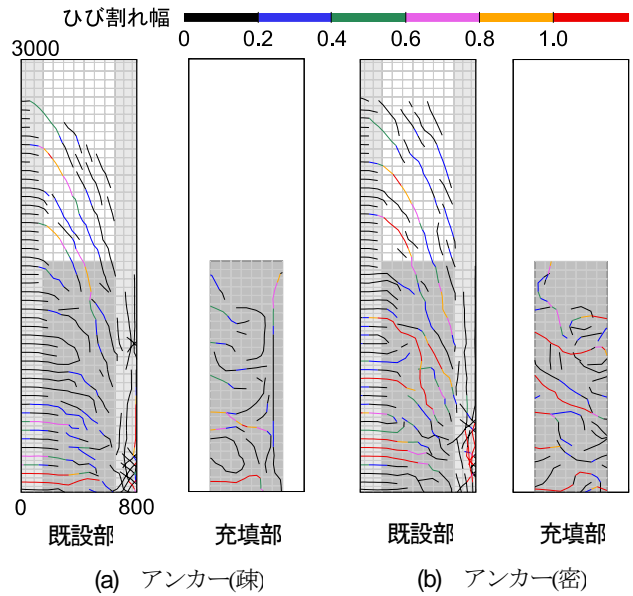


図-27 ひび割れ性状(Unit:mm)

さらに、アンカー(密)のモデルでは、柱高さ 1000mm 以下の領域において、フランジ部から進展したひび割れの角度がウェブ部に到達しても変化せず、ひび割れの角度が水平である区間が拡大し、中実断面 RC 橋脚のひび割れ性状に近づいたことがわかる。ここで、既設部および充填部におけるコンクリートの変位分布をみると(図-28、図-29)、卓越したひび割れが変位分布上に不連続面として表れており、鉛直変位分布からアンカー補強を行った両解析モデルともに、既設部において水平に近い緩やかな角度の変位の不連続面が生じていることが見て取れる。また、アンカー(密)のモデルでは、既設部と充填部の鉛直変位が概ね連続しており、既設部と充填部が一体として挙動していることがわかる。さらに、せん断ひずみ分布図(図-30)から、充填部においてもせん断ひずみが発生していることが確認されるため、充填部がせん断抵抗に寄与していることが確認できる。

以上の結果から、アンカー間隔が密になるほどせん断抵抗特性が中実断面 RC 橋脚に近づくことが示された。しかし、その一方でアンカー間隔が密になると既設部に応力が伝達し、圧縮縁での損傷が大きくなるため、アンカー補強を行う場合は適切なアンカー量を検討する必要があるといえる。

#### (4) 基部充填補強 RC 橋脚へのアンカー補強策の評価

本章において、アンカー補強により既設部とコンクリート充填部の結合を高めた基部充填補強 RC 橋脚に対する解析を行った結果、アンカーの間隔が密になるにつれ、基部充填補強 RC 橋脚の挙動が中実断面 RC 橋脚に近づくという結果が得られた。このことから、基部が中空である RC 橋脚において、現行の道路橋示方書が求める充

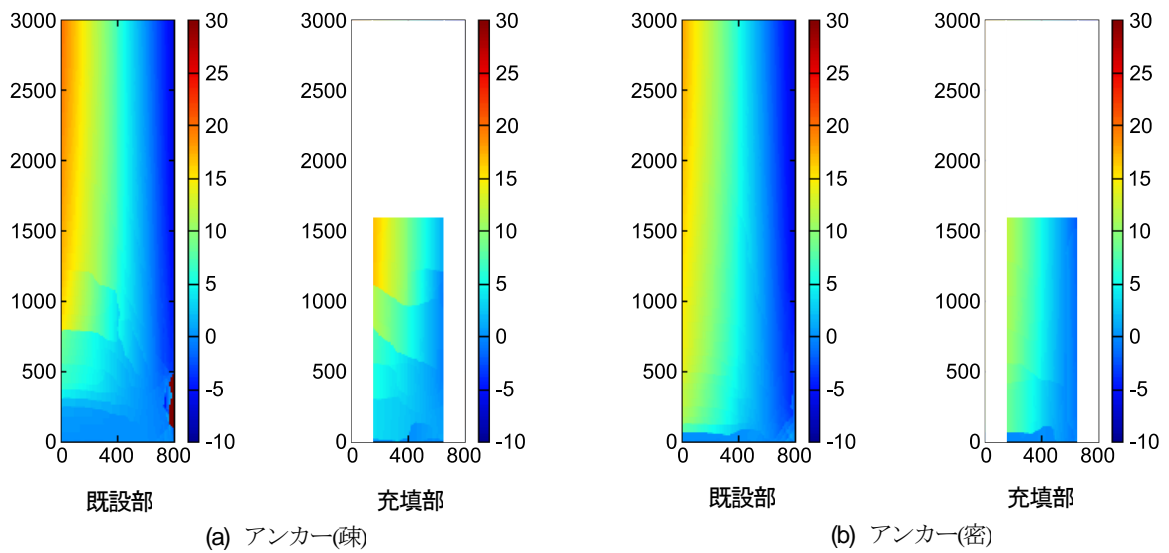


図-28 鉛直変位分布(Unit:mm)

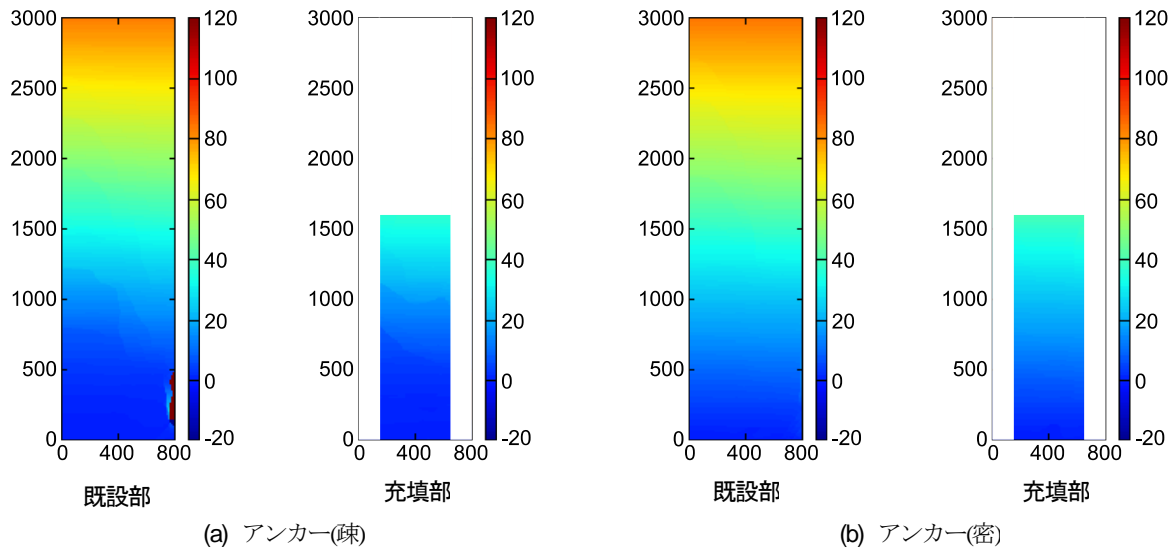


図-29 水平変位分布(Unit:mm)

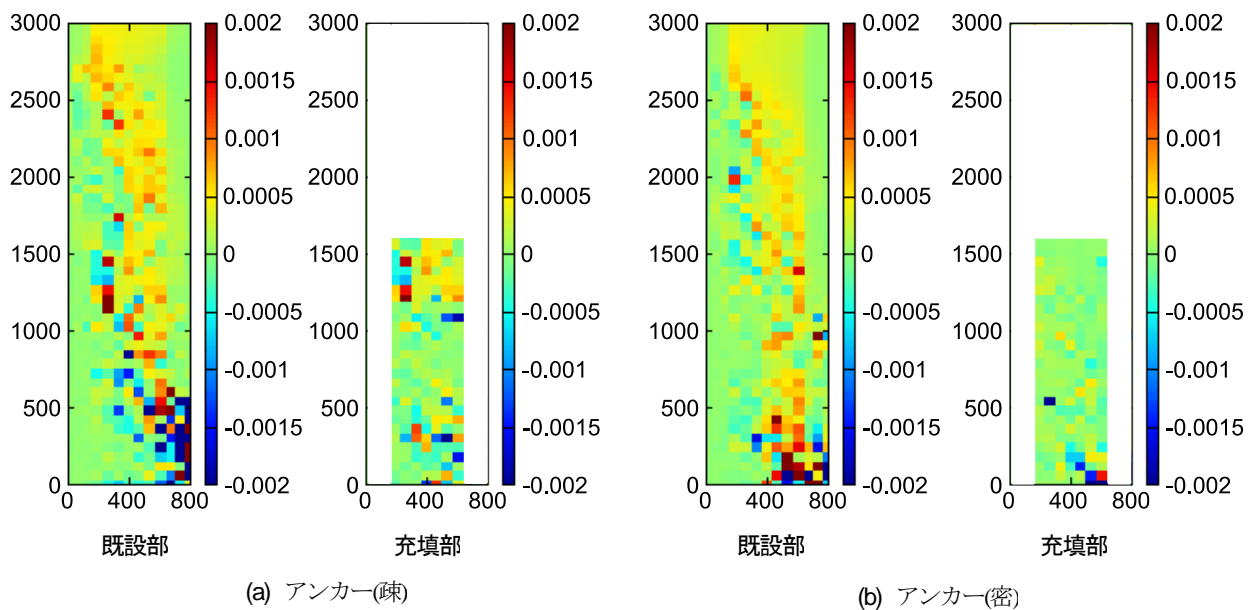


図-30 せん断ひずみ分布

実断面に近い性能を実現したい場合、コンクリート充填補強だけでなくアンカー補強を併せて実施する必要があるといえる。特に、コンクリート充填補強により、柱のせん断耐力向上を期待する際には、適切なアンカー量については検討の余地があるものの、アンカー補強により既設部と充填部の結合を高めることが不可欠であると考えられる。

## 6. 結論

本研究では、中空断面 RC 橋脚に対するコンクリート充填補強策がせん断抵抗特性に与える効果を把握するため、中実断面 RC 橋脚、中空断面 RC 橋脚、基部充填補強 RC 橋脚の 3 種類の RC 柱を比較検討した。その際、中空断面 RC 柱特有のひび割れ性状を再現するため、拡張有限要素法 (X-FEM) を RC 構造物に適用した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- エンリッチ関数に shifted Heaviside 関数を採用した X-FEM において、クラック先端要素を FEM で定式化し、クラック先端要素の辺上に見かけ上のクラック先端を発生させることで、ブレンディング要素の問題を回避することができ、また、適切なひび割れを再現できることが確認された。
- X-FEM によってモードII(面内せん断型)のクラック発生を考慮することで、コンクリートを線形弾性体として材料構成則を単純化したとしても、コンクリートの圧縮軟化を適切に再現できることが示された。
- 本解析では、実験結果で見られたひび割れ性状の特徴が再現可能であるといえる。特に、中空断面 RC 橋脚では中空断面のフランジ部で発生した水平ひび割れがウェブ部に到達すると斜め方向に進展する現象が精度良く再現され、さらに、中実断面供試体における中実断面部と中空断面部でのひび割れ性状の差異や、基部充填補強 RC 橋脚における充填断面部での中空断面同様に斜めひび割れの発生が再現できていた。
- 本解析では、鉛直変位分布からひび割れによる変位の不連続性が表現できていた。また、中実断面 RC 橋脚では、鉛直変位の不連続面がおおよそ水平方向に分布しているのに対し、中空断面 RC 橋脚における鉛直変位の不連続面は、中実断面 RC 橋脚に比べて斜めに傾斜していることがわかった。基部充填補強 RC 橋脚における鉛直変位の不連続面も同様に斜め方向に分布しており、中空断面 RC 橋脚に近い傾向を示していることがわかった。
- 基部充填補強 RC 橋脚における充填部では、水平な

不連続面が発生しており、充填部と既設部の境界でそれぞれの鉛直変位の値が異なることから、充填部と既設部が別々に挙動していることがわかった。

- 既設中空断面 RC 橋脚に対するコンクリート充填補強は、既設部とコンクリート充填部が独立して挙動し、コンクリート充填部が既設部のせん断抵抗特性の向上にあまり寄与しないため、柱のせん断耐力向上を期待する際には不十分であることがわかった。
- アンカー補強を行った場合、鉛直変位分布から既設部において中実断面 RC 橋脚に似た水平に近い緩やかな角度の不連続面が生じていることがみられ、また、アンカー間隔が密なモデルでは、既設部と充填部の鉛直変位が概ね連続していたことから既設部と充填部が一体として挙動していることがわかった。
- コンクリート充填補強に加え、アンカー補強を行った場合、柱基部で基部充填補強 RC 橋脚と比べ、斜めひび割れの角度が緩やかになっており、ひび割れ性状が中実断面 RC 橋脚に近づくことが確認された。
- コンクリート充填補強に加え、アンカー補強を行った場合、既設部とコンクリート充填部の結合が高まり、充填部が柱のせん断抵抗に寄与することが示された。このことから、コンクリート充填補強により、柱のせん断耐力向上を期待する際には、アンカー補強により既設部と充填部の結合を高めることが必要であるといえる。

謝辞：本研究の一部は「2020年度京都大学と西日本高速道路株式会社における共同研究」の助成を受けて実施した。謝意を表します。

## REFERENCES

- 1) 田中克直, 家村浩和, 高橋良和: 中空断面RC橋脚の変形性能に関する実験的検討, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.773-776, 1997. [Tanaka, K., Iemura, H. and Takahashi, Y.: Experimental study on deformation performance of hollow section RC piers, Proceedings of the 24th JSCE Earthquake Engineering Symposium, pp.773-776, 1997.]
- 2) 安保知紀, 大庭光商: 中空断面橋脚の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.955-960, 2008. [Abo, T. and Oba, M.: Experimental study on seismic performance of hollow section piers, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.30, No.3, pp.955-960, 2008.]
- 3) 川島一彦, 宇根寛, 堺淳一: 軸力変動を受けるRC中空断面アーチリブの耐震性に関する実験的研究, 構造工学論

- 文集, Vol.48A, pp.747-757, 2002. [Kawashima, K., Une, H. and Sakai, J.: Seismic performance of hollow reinforced concrete arch ribs subjected to cyclic lateral force under varying axial load, Journal of Structural Engineering, Vol.48A, pp.747-757, 2002.]
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 2017. [Japan Road Association: Dorokyoshihosyo & Doukaisetsu V Taishinsekkei-hen, pp. 110-119, 1996.]
  - 5) 高原良太, 青木圭一：RC中空断面橋脚の耐震性能に関する実験的検討, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, pp.235-236, 2015. [Takahara, R. and Aoki, K.: Experimental study on seismic performance of RC hollow section piers, The 70 Annual Academic Lecture of the Civil Engineering Society, pp.235-236, 2015.]
  - 6) Belytschko, T. and Black, T.: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol.45, No.5, pp.601-620, 1999.
  - 7) Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T. A: finite element method for crack growth without remeshing, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol.46, No.5, pp.131-150, 1999.
  - 8) D, Ferretti, E, Michelini, and G, Rosati.: Cracking in autoclaved aerated concrete: Experimental investigation and XFEM modeling, Cement and Concrete Reserch., Vol.67, pp.156-167, 2015.
  - 9) Jian-ying, Wu., Jie-Feng, Qiub., Vinh, Phu, Nguyenc., Tushar, Kanti, Mandalc. and Luo-Jia, Zhuangb.: Computational modeling of localized failure in solids: XFEM vs PF-CZM, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering., Vol.345, pp.618-643, 2019.
  - 10) Jörg, F, Unger., Stefan, Ehardt., Carsten, Könke.: Modelling of cohesive crack growth in concrete structures with the extended finite element method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering., Vol.196, I41-44, pp.4087-4100, 2007.
  - 11) Gaohui, Wang., Yongxiang, Wang., Wenbo, Lu., et al.: XFEM based seismic potential failure mode analysis of concrete gravity dam-water-foundation systems through incremental dynamic analysis, Engineering Structures., Vol.98, pp.81-94, 2015.
  - 12) M, Haghani, B, Navayi, Neya., M,T, Ahmadi. and J, vaseghi, Amiri.: Combining XFEM and time integration by  $\alpha$ -method for seismic analysis of dam-foundation-reservoir, Theoretical and Applied Fracture Mechanics., Vol.109, pp.1-17, 2020.
  - 13) Jiantao, Yu., Kaili, Zhan., Linbzh, Li. and Kequan, Yu.: Using XFEM to model the effect of different axial compression on the hysteretic behaviour of the flexure - dominant RC columns, The Structural Design of Tall and Special Buildings., Vol. 27, I-8, pp.1-12, 2018.
  - 14) Chanbhai, Zhai., Xiaomin, Wang., Jingchang, Kong., Shuang, Li., et al.: Numerical Simulation of Masonry-Filled RC Frames Using XFEM, Journal of Structural Engineering., Vol.143, No.10, pp.1-14, 2017.
  - 15) Feiyu, Liao., Zhaohui, Huang.: An extended finite element model for modelling localized fracture of reinforced concrete beams in fire, Computers and Structures., Vol.152, pp.11-26, 2015.
  - 16) 綾城威歩生, 植村佳大, 高橋良和：コンクリート充填補強を施した中空断面RC柱の正負交番載荷実験, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-56, (投稿中), 2022. [Ayashiro, I, Uemura, K. and Takahashi, Y.: Cyclic Loading Tests of Hollow RC Columns Retrofitted by Filling Concrete, Japan Society of Civil Engineers 2022 Annual Meeting, V-56, (Submission in progress), 2022.]
  - 17) 池田貴昭, 後藤浩之, 澤田純男：地震時盛土の引張破壊を考慮した拡張有限要素法によるクラック進展解析, 土木学会論文集A2, Vol.72, No.2, I 227-I 235, 2016. [Ikeda, T., Goto, H. and Sawada, S.: Crack propagation in soil embankment based on X-FEM considering tensile failure mode, Journal of Japan Society of Civil Engineers A2, Vol.72, No.2, I227-I235, 2016.]
  - 18) 植村佳大, 高橋良和, 後藤浩之：メナーゼヒンジにおける縦方向ひび割れの発生メカニズムに関する検討, 土木学会論文集A1, Vol.76, No.4, I 363-I 376, 2020. [Uemura, K., Takahashi, Y. and Goto, H.: Mechanism of vertical crack generation on mesnager hinge, Journal of Japan Society of Civil Engineers A1, Vol.76, No.4, I363-I376, 2020.]
  - 19) Zi, G. and Belytschko, T.: New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks, Int. J. Numer. Meth, Engng., Vol.57, pp.2221-2240, 2003.
  - 20) 和田一範, 後藤浩之：拡張有限要素法(X-FEM)を用いた自発的な断層破壊の数値解析手法の開発, 応用力学論集, Vol.13, pp.667-674, 2010. [Wada, K. and Goto, H.: Extended finite element method (X-FEM) for spontaneous rupture propagation, Journal of applied mechanics, Vol.13, pp.667-674, 2010.]
  - 21) Goto, H. and Bielak, J.: Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems: SH-case, Geophys. J. Int. Vol.172, pp.1083-1103, 2008.
  - 22) Dugdale, D. S.: Yielding of steel sheets containing slits, J. Mech. Phys. Solids, Vol.8, pp.100-104, 1960.
  - 23) Barenblatt G. I.: The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture, Advances in Applied Mechanics, Vol.7, pp.55-129, 1962.
  - 24) Zhao, J., Bessa, M. A., Oswald, J., Liu, Z. and Belytschko, T.: A method for modeling the transition of weak discontinuities to strong discontinuities: from interface to cracks, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol.105, pp.834-854, 2015.

# Crack Propagation Analysis and Evaluation of Concrete-Filled Retrofitting for Hollow Section RC Piers Using Extended Finite Element Method

Zen KASAHARA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

Crack propagation analysis using the eXtended Finite Element Method (X-FEM) was conducted on three types of RC piers with solid, hollow, and concrete-filled section to evaluate seismic retrofitting method by concrete filling for RC piers with hollow section (hollow section RC piers). The results showed that the analytical model was able to reproduce the experimental results of concrete-filled retrofitting for hollow-section RC piers. In addition, it was confirmed that horizontal cracks developed in the web of the solid section, whereas diagonal cracks developed in the web of the hollow and concrete-filled sections. Furthermore, the deformation ratio of concrete-filled RC piers were more similar to hollow section RC piers than to solid section RC piers. These results indicate that seismic retrofitting method by only concrete filling for RC piers with hollow section may not be sufficient to improve the shear resistance of RC piers with hollow section. Furthermore, the shear capacity of hollow section RC piers could be improved by using to increase the bond between the existing section and the concrete-filled section in addition to the concrete-filled retrofitting.