第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

面内せん断型クラックの発生を考慮したX-FEMモデルによるRC部材のひび割れ進展解析

市川　大颯[1]・植村　佳大[2]・高橋　良和[3]

[1]学生会員　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
[2]正会員　工博　京都大学助教　工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
[3]正会員　工博　京都大学教授　工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. 背景

現在，RC構造物に対して有限要素解析を用いたひび割れ進展解析を実施する場合，ひび割れモデルに離散ひび割れモデルまたは分散ひび割れモデルを採用することが一般的になっている．しかし，これらのモデルは，材料構成則に依存するところが多い，詳細なひび割れ性状を示すことができないなどの欠点を抱えている．一方で，Belytschko and Black[1)]やMoës et al[2)]によって提案されたX-FEMは材料構成則を単純化でき，明瞭にひび割れを示せる点で優れているといえる．しかし，X-FEMはRC構造物を対象とした解析手法としての汎用性の確立には至っておらず，X-FEMを用いた解析において，材料構成則を用いずに圧縮軟化をモデル化している研究は見当たらない．

そこで本研究では，X-FEMを用いて，材料非線形則を考慮せずに圧縮場におけるひずみ軟化を表現し，RC構造物の破壊挙動を再現することを試みる．具体的には，筆者らの過去の検討[3)]で採用されたX-FEMモデルに，新たに面内せん断型クラックを実装することによってモデルの改良を行う．また，この中空断面RC橋脚の再現解析に先立って，コンクリートの一軸圧縮試験を模擬した解析を行い，本研究の提案モデルによってコンクリートの圧縮軟化が再現されるかを検証するとともに，一軸圧縮下におけるコンクリートの破壊挙動の再現性について考察を与える．

2. X-FEMの定式化とクラックのモデル化

(1) X-FEM の定式化

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$\boldsymbol{u}$を次式のように近似する．

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} N_i(\boldsymbol{x})\,\bar{\boldsymbol{u}}_i + \sum_{i\in j} N_j(\boldsymbol{x})\,\psi_j(\boldsymbol{x})\bar{\boldsymbol{a}}_j \qquad (1)$$

ここに，Nは形状関数，$\boldsymbol{x}$は座標，iは節点番号，mは要素内の節点の総数，$\bar{\boldsymbol{u}}$は節点変位である．ここで，$\psi_j(\boldsymbol{x})$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，$\bar{\boldsymbol{a}}$はエンリッチノードに付加された自由度である．なお本検討では，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[4)])を用いる．

$$\psi_j(\boldsymbol{x}) = H\big(\phi(\boldsymbol{x})\big) - H\left(\phi(\boldsymbol{x}_j)\right) \qquad (2)$$

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

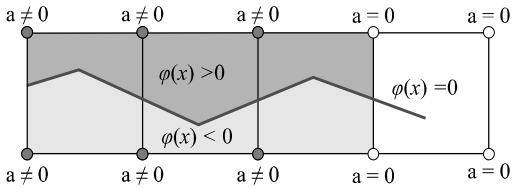


図-1　エンリッチ関数およびエンリッチノードに付加された自由度の設定

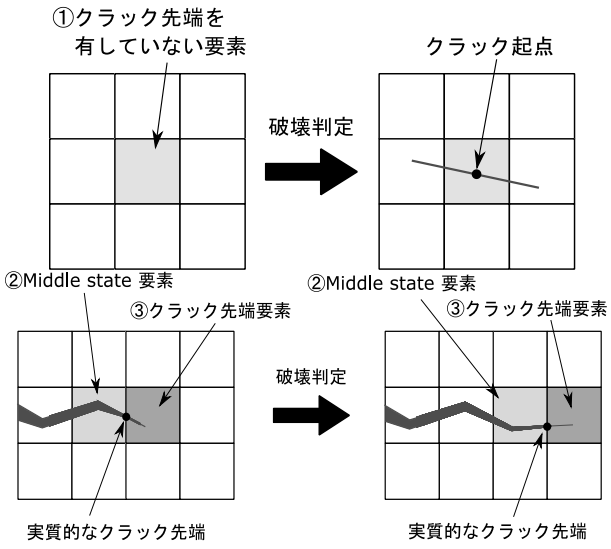


図-2　モードⅠのクラックの進展

ここに，Hはヘビサイド関数であり，$\phi(\boldsymbol{x})$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．$\psi_j(\boldsymbol{x})$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$\psi_j(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{0}$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．

(2) クラックのモデル化

a) モードⅠのクラックの発生・進展処理

モードⅠのクラックの発生条件には，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，傾斜角はクラックを発生させる要素の最大主応力方向に従うこととする．また本研究では，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) のエンリッチ関数 $\psi_j(\boldsymbol{x})$ の値をゼロとし，不連続性を表す自由度$\bar{\boldsymbol{a}}_i$もゼロとする拘束条件を与えた(**図-1**)．これにより，クラック先端要素およびクラック先端要素周辺のブレンディング要素は通常のFEMで定式化され，見かけ上のクラック先端はクラック先端要素の辺上に位置することになる．

さらに，破壊判定において，Middle state 要素[5]の概念を用いた手法を採用する．これは,クラック先端要素の一つ前の要素を Middle state 要素とし，この要素が破壊基準を満たした場合，クラック先端要素からクラックを進展させるものである．これにより，クラックが交差するケースをモデル化することが可能になる．したがって，クラックの発生・進展は，以下の 3 パターンの破壊判定によって進行する(**図-2**)．

i. クラック先端を有していない要素が破壊判定した場合，要素中央にクラック先端を発生させる．このとき，不連続面は発生しておらず，不連続面はパターン 2 またはパターン 3の破壊判定によってクラックが進展して始めて発生する．

ii. クラック先端要素が破壊判定した場合，その要素の主応力方向にクラックを進展させる．このとき，クラック先端要素では不連続面は発生していない．

iii. Middle state要素が破壊判定した場合，クラック先端を有する要素の主応力方向にクラックを進展させる．このとき，クラック先端要素要素では不連続面は発生していない．

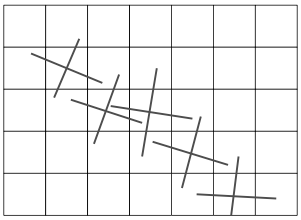


図-3　モードⅡのクラックの表現

b) モードⅡのクラックの発生・進展処理

モードIIのクラックは圧縮軟化挙動の表現を意図して実装するものであり，モードIのクラックとは異なる方法で不連続面を表現する．具体的には，モードIIのクラックは進展させず，**図-3**のように多数のクラックを発生させることにより不連続面を表現する．これにより圧縮が卓越する場においてせん断ひび割れが多数発生し，その領域での圧縮抵抗性が低下することで，材料非線形性を考慮することなくコンクリートの圧縮軟化を表現できることを期待する．このような方法によりモードIIのクラックを実装した例は他になく，新たな試みといえる．以下でその詳細を説明する．

まず，モードIIのクラックは，次式 (4) に示す破壊基準を満たしたときに発生させる．最大主応力σ_{max}と最小主応力σ_{min}がともに負となる多軸圧縮下では，一軸圧縮強度を基準とした式(4)は適用できないと考え，ひび割れを発生させない．

$$\begin{cases} \sigma_{max} \geq 0 \\ \sigma_{min} < -f_c \end{cases} \quad (4)$$

また，モードIIのクラックの傾斜角は池田・後藤ら[6]の方法を参考にし，せん断応力が最大となる方向に従うこととする．この場合の傾斜角は共役に2方向存在し，モードIIのクラックが発生する際には十字形にクラックが発生することになる．実材料で発生するモードIIのクラックは通常一方向であるが，本解析のように1要素に2方向のクラックを発生させても，周辺の応力状態により，すべり変位がより大きい方のクラックの傾斜方向に選択的にクラックが発生し，こちらの変位が卓越するので，もう一方のクラックが全体に与える影響は小さいと考えられる[6]．

また，クラック先端要素の変位は山下・後藤ら[7]の方法を参照し，以下に示す式により定式化することとする(**図-4**).

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} N_i(\boldsymbol{x})\bar{\boldsymbol{u}}_i + \sum_{i \in k} N_i(\boldsymbol{x}) g(\boldsymbol{x}) h(\emptyset) \bar{\boldsymbol{b}}_i \quad (5)$$

$$h(\emptyset) = 1 - \frac{|\emptyset|}{\pi} \quad (-\pi < \emptyset \leq \pi) \quad (6)$$

ここに，$\boldsymbol{x}$は座標，iは節点番号，mは要素内の節点の総数，$\bar{\boldsymbol{u}}_i$は節点変位である．$N_i(\boldsymbol{x})$は形状関数，$\bar{\boldsymbol{b}}_i$は節点に付加された不連続性を表す自由度である．$\emptyset$はクラック先端と$\boldsymbol{x}$とを結ぶ直線と，不連続面が為す角である．また，$g(\boldsymbol{x})$は不連続関数であり，$g(\boldsymbol{x})$に式(6)に示す関数を乗ずることで，クラック発生直後に不連続変位を付与するように要素内のクラック先端を表現することができる．したがって，モードIのクラックとは異なり，クラック先端を有していない要素が破壊判定した段階で不連続面が発生する．なお，モードIとモードIIのクラックは互いに独立しており，発生・進展に関して，一方のクラックの先端から他方のクラックが発生・進展することはない．

c) 不連続面の境界条件

本検討では，不連続面に働く表面力に関してcohesive crack model[8]を採用し，不連続面に粘着力を与える(**図-5**)．図中のf_tは引張強度であり，w_cは粘着力がゼロになる開口変位(限界開口変位)である．ここで限界開口変位は0.06mm とした．また，ペナルティ法 (Penalty method) を用いることで，不連続面において領域が重ならない，すなわち開口変位が非負という境界条件を与えている．

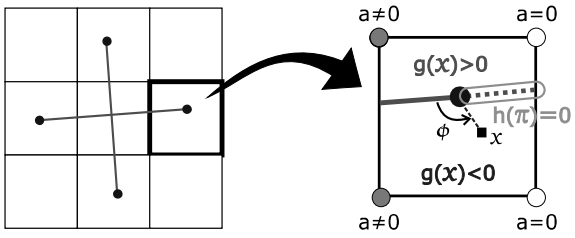


図-4 モードⅡのクラック先端の定式化

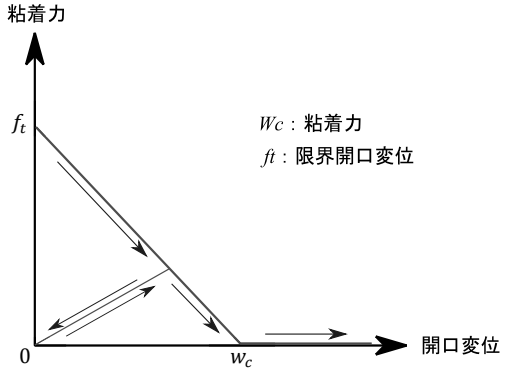


図-5 cohesive crack model に基づく粘着力-開口変位関係

さらに本解析モデルにおいては，不連続面のすべりを考慮し，不連続面が発生した要素の，不連続面に垂直な応力成分に比例する動摩擦力を与えた．その際，動摩擦係数は道路橋示方書・同解説[9]に記載のコンクリート同士の摩擦係数に準拠して$\mu = 0.6$とした．なお，ここでいう動摩擦力とは，局所的に直線となるクラックに作用する力のことであり，ひび割れ面同士がかみ合うことによって発生する伝達力とは異なる．ひび割れ面同士のかみ合わせは，クラックの折線同士が接触し，上述のペナルティ法が適用されることによって表現されることに注意されたい．

本解析モデルでは，コンクリート要素を線形弾性体と仮定し，ひび割れ発生に伴うエネルギー吸収をクラック発生後の粘着力によって表現している．しかし実際の破壊挙動では，目視できるようなマクロなひび割れが生じる前の段階で，マイクロクラックの発生や塑性変形によるエネルギー吸収が生じていると考えられる．そのため本解析モデルでは，粘着力が0となる限界開口変位を閾値として，不連続面の鉛直方向変位が限界開口変位w_cを超えたクラックをマクロなひび割れと考え，factual crackと呼び，限界開口変位に達していないクラックをcohesive crackと呼ぶこととする．

3. コンクリートの一軸圧縮試験を模擬した解析

(1) 一軸圧縮試験体のモデル化

a) メッシュ分割および材料特性

解析対象とする試験体形状は，一般的なコンクリートの圧縮試験で用いられる試験体を想定し，直径100mm，高さ200mmの円柱形とした．要素サイズの異なる2種類のモデルを作成し，それぞれの要素サイズを1辺20mm，10mmの正方形とした．なお，本解析では，試験体の円形断面を近似的に表現した．

また，先述のようにX-FEMではひび割れを材料構成則によりモデル化せず，要素内の変位の不連続性を直接的に表現できるため，材料構成則を単純化できる利点がある．そこで，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することとした．その際，計算の安定性のため，コンクリート要素のヤング率は25000N/mm^2，密度は2.5g/cm^3，ポアソン比は0.2とした．また，コンクリートの引張強度f_tを2.5N/mm^2，一軸圧縮強度 f_cを30.0N/mm^{2}として与えた．

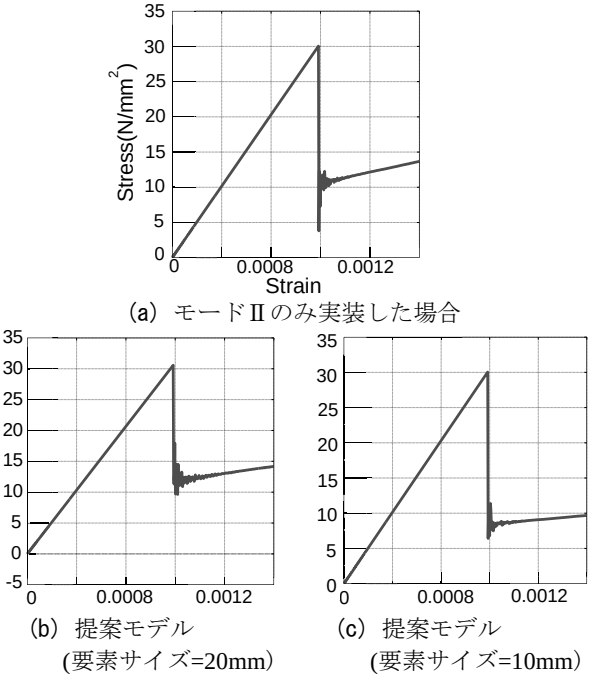
b) 載荷条件・拘束条件

載荷条件は軸力載荷を変位制御とし，モデル上端の節点に鉛直方向下向きに力を与え，上端中央の鉛直変位が30秒間で0.4mmとなるように解析を行った．また，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である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[10]．

また，一般的な一軸圧縮試験では供試体端面と載荷板間に摩擦が存在し，この影響を考慮する場合は鈴木ら[11]の検討のように，供試体端面と載荷板間にバネ要素を設定するなどの処理が必要である．しかし本解析では，コンクリートに線形の材料特性を用いることで可能な限りモデルを単純化し，コンクリートの一軸圧縮試験において一般に観察できるひび割れ性状を再現することに主眼を置いており，一軸圧縮試験の厳密な再現を意図していない．よって本解析では，簡易的に境界面を固定することとし，モデル下端を完全固定，上端を水平方向固定・鉛直方向自由とした．

(2) 解析結果

本検討では一軸圧縮下のコンクリートの破壊挙動について考察するため，モードIのクラックのみ実装した場合，モードIIのクラックのみ実装した場合，

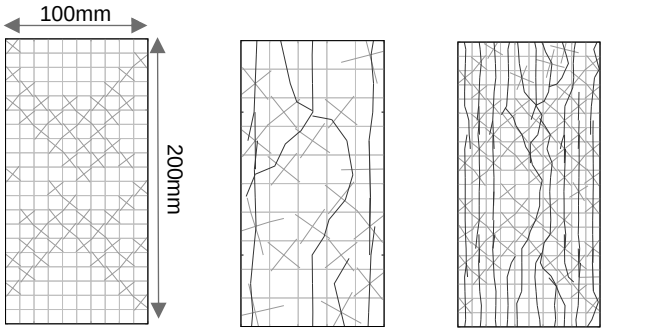


(a) モードⅡのみ実装した場合

(b) 提案モデル (要素サイズ=20mm)

(c) 提案モデル (要素サイズ=10mm)

図-7 見かけの応力−ひずみ関係



(a) モードⅡのみ実装した場合　(b) 提案モデル (要素サイズ=20mm)　(c) 提案モデル (要素サイズ=10mm)

図-8 ひび割れ性状

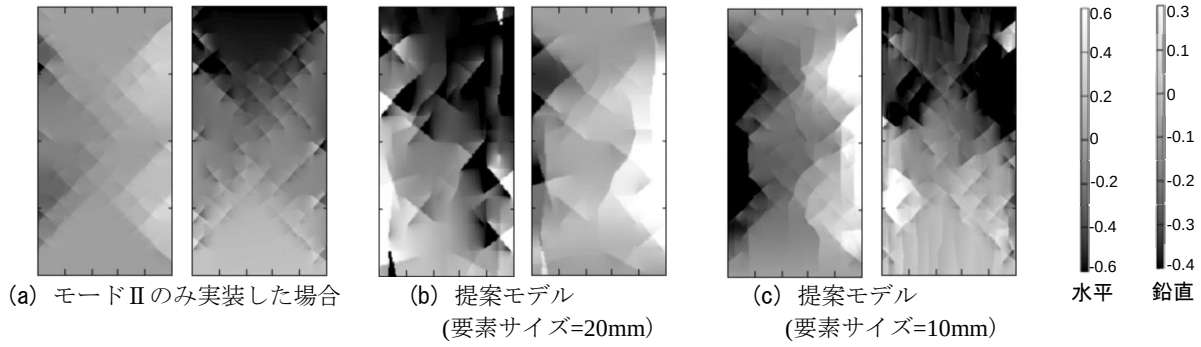
そしてその両方を実装した場合の3パターンの解析を行った．なお，モードIのクラックのみ実装した検討とモードIIのクラックのみ実装した検討については，要素サイズが1辺10mmのモデルを用いた．また，両方のクラックを実装した検討では,要素サイズの異なる2種類のモデルを比較検討し，本研究の採用モデルの要素サイズ依存性を検証する．

a) モードIのクラックのみ実装した場合

モードIのクラックのみ実装したケースでは，見かけの応力が50.0N/mm^{2}に達し，一軸圧縮強度として与えた30.0N/mm^{2}を大幅に超えてもクラックが発生せず，応力低下も起こらなかった．

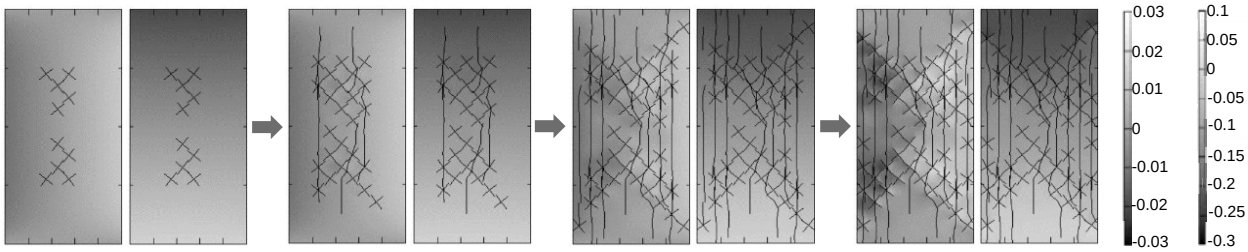
b) モードIIのクラックのみ実装した場合

モードIIのクラックのみを実装した場合には，**図-7(a)**に示すみかけの応力-ひずみ関係からわかるように，一軸圧縮強度=30.0N/mm^{2}で急激な応力低下が発生した．また，**図-8(a)**に示すひび割れ性状から，



(a) モードⅡのみ実装した場合　(b) 提案モデル (要素サイズ=20mm)　(c) 提案モデル (要素サイズ=10mm)

図-9 水平変位分布(左)・鉛直変位分布(右)



(a)応力低下率=0.0%　(b)応力低下率=0.0%　(c)応力低下率=3.2%　(d)応力低下率=75.9%

図-10 荷重低下時のひび割れ性状および変形性状
(左：水平変位分布　右：鉛直変位分布)

水平に対してほぼ45°の角度で,モードIIのクラックが隣接する形で複数本発生していることがわかる．このときの変形性状(**図-9(a)**)をみると，上部と下部にくさび形の変位が認められる．このくさび形の変位は一般的な一軸圧縮試験にみられる特徴である．

c) 提案モデル(モードⅠ・Ⅱ両方)の解析結果

図-7(b)，**図-7(c)**より，いずれのケースにおいてもモードIIのクラックのみを実装した場合と同様に線形で増加し，一軸圧縮強度に達して急激に応力が低下している．よって,コンクリートを線形弾性体と仮定しているにもかかわらず，本研究で提案するX-FEMモデルにより一軸圧縮試験における応力低下を再現することができていることがわかる．

また，ひび割れ性状に関して，モードIIのクラックに注目すると，要素サイズ=20mmのモデルでは，点対称にクラックが発生しており上下左右方向の軸対称性は見られない(**図-8(b)**)．要素サイズ=20mmのモデルでは，モードIIのクラックのみを実装した場合とほぼ一致している(**図-8(c)**)．モードIのクラックに関しては，概してモデルの上端から下端に縦方向のひび割れが発生している．変形性状 (**図-9(b)**, **図-9(c)**) を見ると，いずれの要素サイズのモデルでもモードIIのクラックのみを実装した場合と比較して，左右の領域の変位差が顕著に見られ，上部と下部のくさび形の領域で変位が小さい傾向が確認できる．

さらに，荷重低下が起きる付近におけるひび割れ性状および変形性状の変化の様子を**図-10**に示す．供試体の中部の領域でモードIIのクラックが発生し，外側に広がるとともに，モードIのクラックがモードIIのクラックに重なるように縦方向に発生している．モードIIのクラックを起点となってくさび型の変位が現れ，さらに変位が大きくなるとモードIのクラックの影響が加わることで最終的に**図-9(b)**，**図-9(c)**のような変形性状に至ると考えられる．

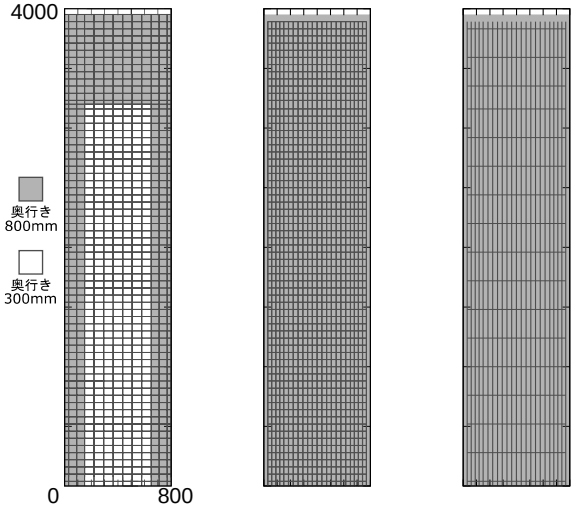
4. 中空断面RC橋脚を対象とする解析

(1) 解析対象とする柱構造

本解析では，門谷ら[12]が行った中空断面RC大型柱模型の正負交番載荷実験を対象とする．ただし，本解析においては正負交番載荷ではなく，片押し載荷を模擬したプッシュオーバー解析を行うものとする．

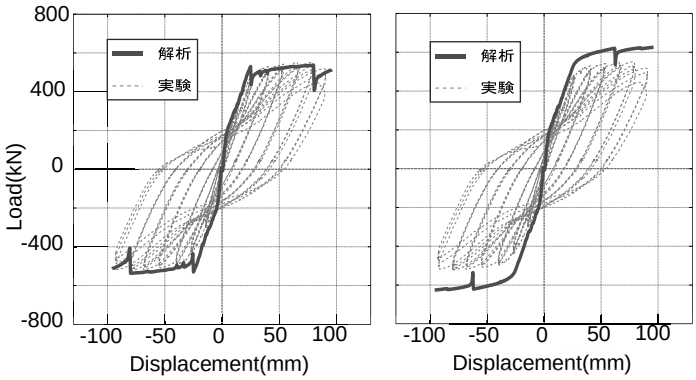
柱模型は，柱高さ3950mmのうち，柱基部から高さ3200mmまでが中空断面となっており，断面は500mm四方である．軸方向鉄筋にはSD345-D10を用い，帯鉄筋にはSD345-D6を用いている．なお，この正負交番載荷実験では，基準振幅を$1\delta_{y0}$ (= 16mm)として，同一振幅3回の繰り返し載荷が実施されており，$7\delta_{y0}$の載荷において，軸方向鉄筋の座屈が発生し終局を迎えている．

また，本解析の比較対象とする筆者らの過去の検討[3]においても，同実験の柱構造を解析対象としてプッシュオーバー解析を行っている．



(a) コンクリート要素図　(b) 鉄筋要素図（帯筋間隔:60mm）　(c) 鉄筋要素図（帯筋間隔:240mm）

図-11　供試体モデル



(a)　本研究（曲げ破壊型モデル）　(b) 過去の検討

図-12　荷重-変位関係

(2) 柱供試体モデル

図-11に中空断面RC橋脚に対して作成した解析モデルを示す．一軸圧縮試験の解析と同様に，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とし，ヤング率25000N/mm^2，密度2.5g/cm^3，ポアソン比0.2とした．また，コンクリートの引張強度f_tを2.5N/mm^2，一軸圧縮強度f_cを30.0N/mm^{2}とした．軸方向鉄筋および帯鉄筋のモデル化については，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．また，時刻歴応答を求めるために中央差分法を用いた点も同じである．

また，鉄筋要素について，帯鉄筋の間隔の異なる2種類のモデルを作成し,それぞれの間隔を，曲げ破壊型となる60mmとせん断破壊型となる240mmとした．以下，それぞれを曲げ破壊型モデル，せん断破壊型モデルと呼ぶ．前者が実験をモデル化したものである．軸鉄筋・帯鉄筋の降伏強度は，それぞれ引張試験により得られた実強度である396N/mm^2，367N/mm^{2}とした．コンクリート断面に関しては，フランジ部分のコンクリート要素を奥行き800mmとし，ウェブ部分のコンクリート要素を奥行き300mmとすることで中空断面を再現した．なお，柱高さ2800mm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．コンクリート・鉄筋間の付着挙動については，本研究では簡易的に鉄筋・コンクリート間は完全固定としている．

(3) 載荷条件・拘束条件

拘束条件は，供試体モデルの下端(z = 0mm)のみ完全固定とした．載荷条件に関しては，軸力載荷を荷重制御とし，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，水平載荷を変位制御とし，治具先端に100mmの変位を与えた．なお，せん断破壊型モデルに関しては，コンクリート標準示方書 [設計編][13]に記載の算定式によりせん断耐力(395kN)を超過した付近で解析を中止した．

(4) 解析結果

a) 荷重−変位関係

図-12に，本研究の曲げ破壊型モデルの荷重-変位関係と，筆者らの過去の検討[3]における荷重-変位関係の比較を示す．比較するにあたって，解析で得られた荷重-変位関係のグラフを原点対象となるように反転させたグラフも併せて示している．また，解析モデルにおいて柱下端の節点を完全固定としたが，実験ではフーチングからの軸方向鉄筋の抜け出しが発生し，柱基部は厳密な完全固定とならないことを考慮し，実験結果では変位の補正を行っている．

本研究の解析モデルが過去の検討[3]同様，初期剛性をよく再現できているといえる．さらに，水平変位が25mm以降の範囲において，過去の検討[3]では荷重が実験結果よりも過大となっているのに対して，本研究の解析結果では，水平変位が25mmを超えた時点で荷重低下が発生し，その後の軌跡も実験の包絡線とほぼ一致している．また，水平変位が80mmの時点で再び荷重低下が起きているが，これはモードIIのクラックの発生によるものと考えられる．

以上より，提案モデルは材料非線形を考慮していないにもかかわらず，実験の荷重-変位関係の包絡

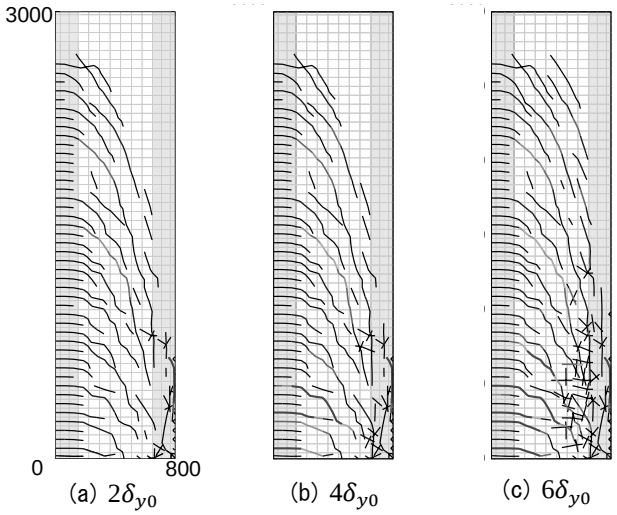


図-13 曲げ破壊型モデルのひび割れ性状

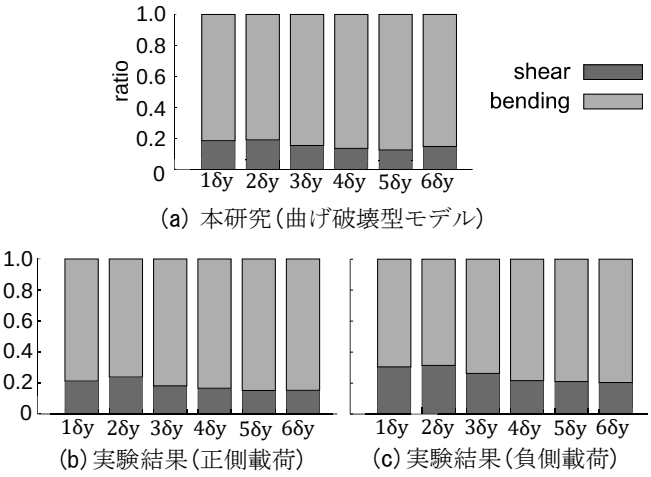


図-14 曲げ・せん断成分比の比較

線を再現することができており，過去の検討[3]と比較して解析制度が向上したといえる．

b) ひび割れ性状

図-13に，曲げ破壊型モデルの$2\delta_{y0}$，$4\delta_{y0}$，$6\delta_{y0}$時それぞれのひび割れ性状を示す．$2\delta_{y0}$時点で，基部右端の領域でモードIIのクラックが発生し，その後，モードIIのクラックが基部右端の限られた領域で広がる過程がみられる．このモードIIのクラックの発生は，荷重-変位関係における25mm時点での荷重低下のタイミングと重なっていることから，モードIIのクラックにより柱基部のコンクリートの圧縮軟化挙動が再現され，荷重低下が起きたと考えられる．また，$2\delta_{y0}$時以降，基部右端にモードIIのクラックが集中的に発生する現象については，圧縮が特に卓越する柱基部のコンクリートが圧縮軟化する様子を再現できているといえる．実際の中空断面橋脚実験においても，$4\delta_{y0}$・$5\delta_{y0}$時点で，圧縮によるコンクリートの剥離がみられる．

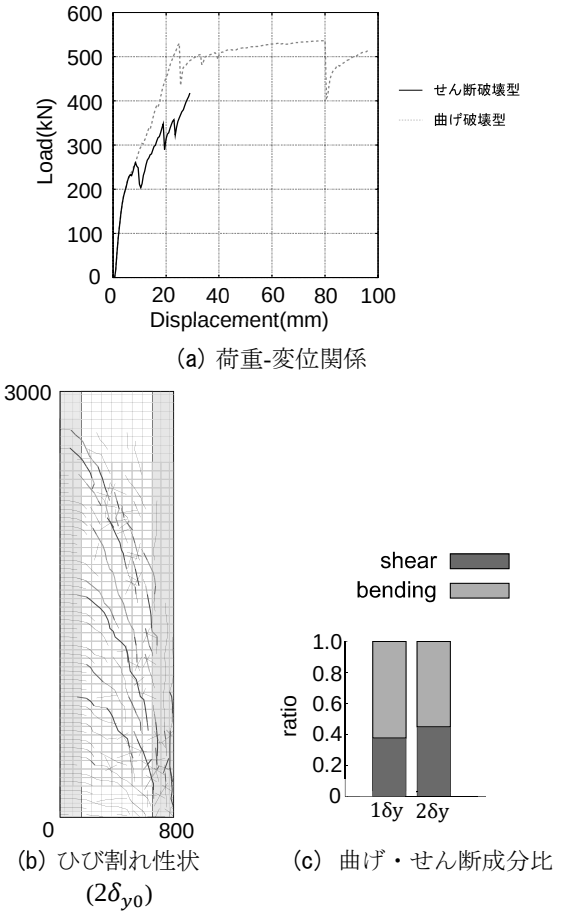


図-15 せん断破壊型モデルの結果

c) 曲げ・せん断変形成分比

図-14に曲げ破壊型モデルと実験それぞれの曲げ・せん断変形成分比を示す．曲げ・せん断変形成分比を算出するにあたっては，高さ40mmの位置から120mm間隔(高さ3160mm～3232mmのみ72mm間隔)の柱両端に位置する節点の変位を算出し，柱全体の水平変位量に占める曲げ変形成分とせん断変形成分の割合を計算した．実験の曲げ・せん断変形成分比は正側・負側載荷で結果に差異があり評価が難しいものの，解析結果は正側載荷に近しい比率となっている．

d) せん断破壊型モデルの解析結果

図-15に，せん断破壊型モデルの解析結果を示す．せん断破壊型モデルは，曲げせん断耐力比が0.81であることから，せん断破壊による急激な荷重低下が発生すると考えられる．しかし解析的検討の結果，急激な荷重低下を示すことはなかったため，荷重がせん断耐力(395kN)付近となった水平変位=34mmまでの解析結果を示す．

荷重-変位関係から，初期剛性は曲げ破壊型モデルと一致し，水平変位が10mmの時点で荷重低下が

起きていることがわかる．その後も複数回の荷重低下がみられ，剛性が低下しているが，せん断破壊による著しい荷重低下を再現することはできていない．ひび割れ性状を見ると，$2\delta_{y0}$時点で高さ2700mmに及ぶ広い範囲でモードIの斜めひび割れが発生していることがわかる．また，モードIIのクラックも，柱基部だけでなく開口幅の大きな斜めひび割れに沿う形で広い範囲に発生している．曲げ・せん断変形成分比については，$2\delta_{y0}$時のせん断変形成分が45.0%であり，曲げ破壊型モデルの$2\delta_{y0}$時の19.0%を大きく上回っており，顕著なせん断損傷によりせん断変形が卓越する挙動が再現できている．

5. 結論

本研究は，X-FEMのRC構造物に対する適用性向上を目的とした研究と位置づけられ，圧縮軟化を表現することを意図して，筆者らの過去の検討[3)]で採用したX-FEMモデルに，新たに面内せん断型(モードII)のクラックを実装することでモデルの改良を試みた．

以下，本研究によって得られた知見を示す．

- クラックのモデル化に際して材料非線形則を用いていない本研究の提案モデルによって，一軸圧縮下におけるひずみ軟化挙動を再現することができた．
- 一般的なコンクリートの一軸圧縮試験において，モードIIのクラックが発生した後にモードIのクラックが併せて発生し，さらにひび割れ幅が増大するという過程を経て破壊に至ることが示唆された．また，異なる要素サイズのモデルによる解析結果の比較から，いずれの要素サイズのモデルでもコンクリートの一軸圧縮試験の破壊挙動を概ね再現できており，提案モデルの要素サイズ依存性が小さいことが示唆された．
- 提案したX-FEMモデルにより，中空断面RC柱基部における圧縮損傷とそれに伴う剛性低下が再現され，RC構造物においても圧縮軟化挙動を再現することができた．これにより，材料非線形を考慮せずに，実験の荷重-変位関係の包絡線を再現でき，過去の検討[3)]のモデルが改善したことが確かめられた．
- せん断破壊型モデルの解析結果において，複数のせん断ひび割れおよびせん断変形成分の増加を確認でき，提案モデルによって，せん断補強筋を減ずることによるせん断剛性の低下が再現された．

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574と，科学研究費補助金若手研究21K14231の助成を受けて実施した．謝意を表します．

参考文献

1) 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.
2) 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.
3) 笠原然，植村佳大，高橋良和：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，第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集．pp.137-144，2022.
4) 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.
5) H. Goto. and J. Bielak.:Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems: SH-case, Geophys. J. Int. Vol.172, pp.1083-1103, 2008.
6) 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.
7) 山下大輝，後藤浩之，澤田純男：分岐断層の破壊進展方向に関する XFEM シミュレーション, 土木学会論文集 A2，Vol.76，No.2，I 217-I 224，2020.
8) D. S. Dugdale.:Yielding of steel sheets containing slits, J. Mech. Phys. Solids, Vol.8, pp.100-104, 1960.
9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2017.
10) J. Zhao., M. A. Bessa., J. Oswald., Z. Liu. and T. Belytschko. : A method for modeling the transition of weak disconti-nuities to strong discontinuities: from interface to cracks, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol.105, pp.834-854, 2015.
11) 鈴木孝典，斉藤成彦，檜貝勇：メソスケール解析によるコンクリートの圧縮破壊性状の予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.169-174 2005.
12) 門谷晃太，植村佳大，高橋良和：中空断面RC大型柱模型に基づく耐力劣化性状の把握，第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集．pp.283-290．2022.
13) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2017.