

第 I 部門 面内せん断型クラックを実装した X-FEM モデルの開発と RC 部材への適用性検討

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○市川 大颯

京都大学大学院工学研究科 正会員 植村 佳大

京都大学大学院工学研究科 正会員 高橋 良和

1. 背景・目的

RC構造物に対して有限要素解析を用いてひび割れ進展解析を適用する場合、一般にひび割れモデルに分散ひび割れモデルまたは離散ひび割れモデルが用いられる。しかし、これらのモデルは、材料構成則への依存性が高く、詳細なひび割れ性状を示すことができないなどの欠点がある。対して、拡張有限要素法(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においてこれらのモデルよりも優れている。しかし、X-FEMのRC構造物への適用例は少なく、また、X-FEMを用いた検討において材料構成則を用いずにコンクリートの圧縮軟化をモデル化した例は見当たらない。

そこで本研究では、筆者らの過去の検討¹⁾の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で、材料非線形則を考慮せずにコンクリートの圧縮軟化を表現し、モデルの改良を行う。RC柱実験の再現解析により、本提案モデルの適用性を検証する。

2. クラックのモデル化

(1) 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、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。クラック先端を有する要素

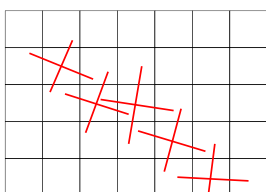


図-1 モードIIのクラックの表現

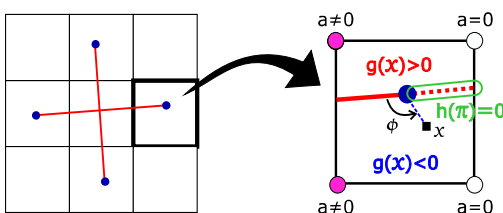


図-2 モードIIのクラック先端の定式化

素やクラック先端要素の一つ前の要素が破壊基準を満たすことで、クラックが進展する。

(2) モードIIのクラックの発生・進展処理

モードIのクラックとは異なり、面内せん断型(モードII)のクラックは進展させず、図-1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、圧縮軟化特性が現れる現象が表現できる。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、新たな試みである。

モードIIのクラックは、次式(1)に示す破壊基準を満たしたときに発生させる。

$$\begin{cases} \sigma_{max} \geq 0 \\ \sigma_{min} < -f_c \end{cases} \quad (1)$$

また、モードIIのクラックの傾斜角は池田・後藤ら²⁾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。クラック先端を有する要素の変位は山下・後藤ら³⁾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-2)。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m N_i(\mathbf{x}) \bar{\mathbf{u}}_i + \sum_{i \in k} N_i(\mathbf{x}) g(\mathbf{x}) h(\phi) \bar{\mathbf{b}}_i \quad (2)$$

$$h(\phi) = 1 - \frac{|\phi|}{\pi} \quad (-\pi < \phi \leq \pi) \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{x}$ は座標、 i は節点番号、 m は要素内の節点の総数、 $\bar{\mathbf{u}}_i$ は節点変位である。 $N_i(\mathbf{x})$ は形状関数、 $g(\mathbf{x})$ は不連続関数、 $\bar{\mathbf{b}}_i$ は節点に付加された不連続性を表す自由度である。

3. 中空断面 RC 橋脚を対象とする解析

(1) 対象とする柱構造および供試体モデル

本解析では、筆者らの過去の検討¹⁾と同様に、門谷ら⁴⁾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して、片押し載荷を模擬したプッシュオーバー解析を行う。

表-1 コンクリートの材料特性

柱高さ(mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
0~1600	23.7	2.20	19596	0.186
1600~3200	30.8	2.42	22952	0.183
3200~3952	33.5	2.50	28888	0.174

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、鉄筋要素は非線形トラス要素でモデル化した。また、鉄筋及びコンクリートの材料特性を表-1に示す。拘束条件は、供試体モデルの下端($z=0\text{mm}$)のみ完全固定とした。载荷条件に関しては、軸力载荷を荷重制御とし、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た上で、水平载荷を変位制御として治具先端に100mmの変位を与えた。

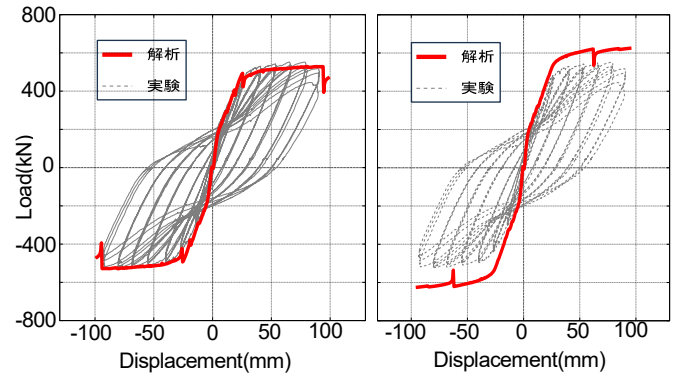
(2)解析結果

図-3に、本研究で得られた荷重-変位関係と、筆者らの過去の検討¹⁾における荷重-変位関係を示す。本研究の解析モデルが過去の検討¹⁾同様、初期剛性をよく捉えられており、水平変位が25mm以降の範囲において、過去の検討¹⁾では荷重が実験結果よりも過大となったのに対して、本研究の解析結果では、水平変位25mm付近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。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-変位関係の包絡線を再現することができ、過去の検討¹⁾と比較して解析精度が向上したといえる。

図-4に、ひび割れ性状を示す。基部右端にモードIIのクラックが集中的に発生し、圧縮が特に卓越する柱基部におけるコンクリートの圧縮軟化の様子が再現されている。また、柱基部においてモードIIのクラックが発生した $2\delta_{y0}$ 時点で、荷重-変位関係においても剛性の低下がみられる。

4. まとめ

本研究で提案するモードIIのクラックを実装した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部材の圧縮軟化挙動を再現することができた。これにより、材料非線形を考慮することなく、実験の荷重-変位関係の包絡線が再現され、過去の検討¹⁾のモデルを改善することができた。



(a) 本研究

(b) 過去の検討

図-3 荷重-変位関係

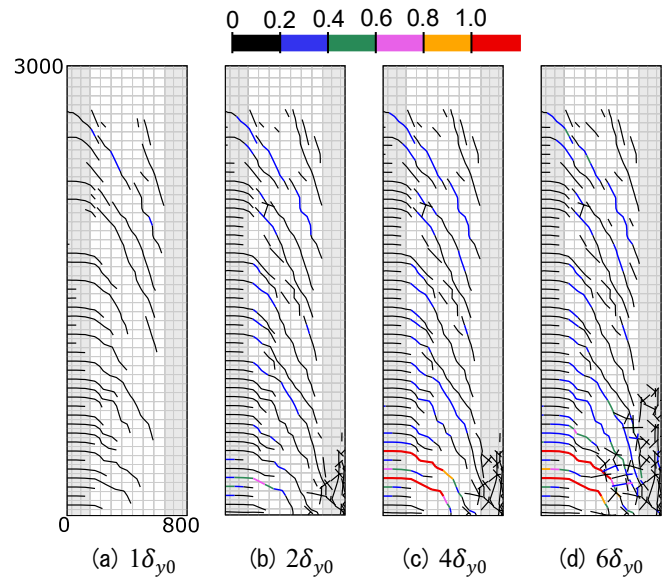
(a) $1\delta_{y0}$ (b) $2\delta_{y0}$ (c) $4\delta_{y0}$ (d) $6\delta_{y0}$

図-4 ひび割れ性状(Unit:mm)

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) 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.
- 2) 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, 1227-1235, 2016.
- 3) 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, 1217-1224, 2020.
- 4) 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.