

離散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響

JIP テクノサイエンス(株) 正会員 川口 和広 (株)ドーコン 正会員 小林 竜太
 (株)リテック 正会員 関下 裕太 北武コンサルタント(株) 正会員 宮本 真一

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下, RC) 構造物の非線形有限要素解析において, ひび割れや鉄筋をそれぞれ離散的にモデル化する手法がある. この手法では, ひび割れ面や鉄筋, そして鉄筋とコンクリート間の付着界面を個々の要素と材料特性により直接的にモデル化するため, RC 部材の全体挙動だけではなく, ひび割れ幅や鉄筋ひずみ, 付着応力などの個々の局所的な力学挙動を解析結果として得ることができる. また, 材料劣化が生じた RC 構造物を対象とした場合, 鉄筋の断面減少や劣化した付着特性を直接的に考慮できるため, 鉄筋腐食の影響を考慮した解析検討に活用が可能な有用な手法の一つである. しかし, 得られる解析結果は個々のモデル化手法や特性値によって大きく影響するため, それらに対して適切な設定を行わなければならない^{例え¹}).

本検討では, 一軸引張を受ける RC 部材を対象に分散ひび割れモデルで解析検討した文献²⁾に引き続いて, 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルにおけるモデル化手法の相違が解析結果に及ぼす影響を把握することを目的とした.

2. 解析モデルの概要

文献²⁾と同様に, 玉井ら³⁾が実施した RC 部材の鉄筋降伏後の引張剛性を導いた一軸引張試験体(コンクリート圧縮強度 $f_c=45\text{MPa}$, 鉄筋比 $\rho=1.0\%$, 鉄筋種類 SD490) を解析対象とした. 試験体の概要は文献²⁾, ³⁾を参照されたい.

解析モデルの概要を図-1に示す. コンクリートにはアイソパラメトリック 8 節点四角形平面応力要素を用いた. 離散ひび割れモデルとして, コンクリート要素間に実験結果³⁾で得られた平均ひび割れ間隔(約 300mm)で合計 8 本の界面要素をモデル化した. 離散ひび割れ要素に設定したコンクリートの引張応力-ひび割れ幅関係には土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾による式を参照した. なお, ひび割れ発生は離散ひび割れ要素のみで表現することとし, ひび割れ間のコンクリート要素は弾性材料とした.

鉄筋は 3 節点梁要素でモデル化し, 文献²⁾と同様に鉄筋単体の応力-ひずみ関係を用いた. また, 鉄筋の付着-すべりを表現するためコンクリートと鉄筋要素間に界面要素

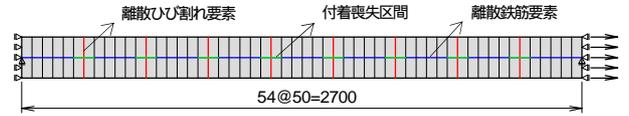


図-1 解析モデル概要

$$\tau = 0.9(f_c')^{2/3} \left[1 - \exp \left\{ -40 \left(\frac{S}{D} \right)^{0.6} \right\} \right] \quad (1)$$

: 付着応力(MPa), f_c' : コンクリート強度(MPa)

S : すべり量(mm), D : 鉄筋径(mm)

をモデル化し, 付着モデルには島ら⁵⁾の提案式(1)を用いた.

境界条件および荷重条件は, モデル端部を拘束して, 一端に水平方向の引張力を強制変位として与えた. なお, 実験ではコンクリート端部から突出した鉄筋に引張力を与えているが, 本検討では分散ひび割れモデルでの解析結果²⁾との比較のためモデル端部の全節点(コンクリートおよび鉄筋要素)に一樣な引張力を与えている. 解析には, 汎用の有限要素解析プログラム DIANA(ver.9.3)を用いた.

3. 解析結果および考察

3.1 引張強度設定の影響

離散ひび割れ要素における引張強度を一定 ($f_t=2.90\text{MPa}$) にした場合と, ひび割れが徐々に発生するように 8 本の離散ひび割れ要素で引張強度を変動 ($f_t=2.90 \sim 3.95\text{MPa}$, 変動係数約 10%) させた場合で比較を行った. 引張強度を一定にした場合には複数本のひび割れが同時に発生してしまい, 図-2(a)で見られるように, 引張剛性が過小評価されて実験結果の再現性が低い結果となった. 本解析モデルでは, 部材全域で軸方向の応力勾配は小さく全離散ひび割れ要素の引張応力もほぼ同じとなるため, 引張強度に達すると同時にひび割れが発生することとなる. 一方の引張強度を変動させた場合には, 1 本ずつ徐々に発生するひび割れを表現することができるため, ひび割れ発生とその進展に伴って付着応力伝達が適切に評価される. また, 図-2(a)のとおりひび割れ間隔が小さくなるに従い部材の引張剛性が次第に低下し, 実験結果との良い一致を示した.

3.2 付着喪失区間の影響

部材の貫通ひび割れ近傍では, 鉄筋の抜け出しに伴って

キーワード : 非線形有限要素法, 一軸引張挙動, 離散ひび割れモデル, 離散鉄筋モデル, 付着喪失区間, 付着特性

連絡先 : 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 1 丁目 2 番 5 号, JIP テクノサイエンス株式会社, TEL : 03-5614-3204

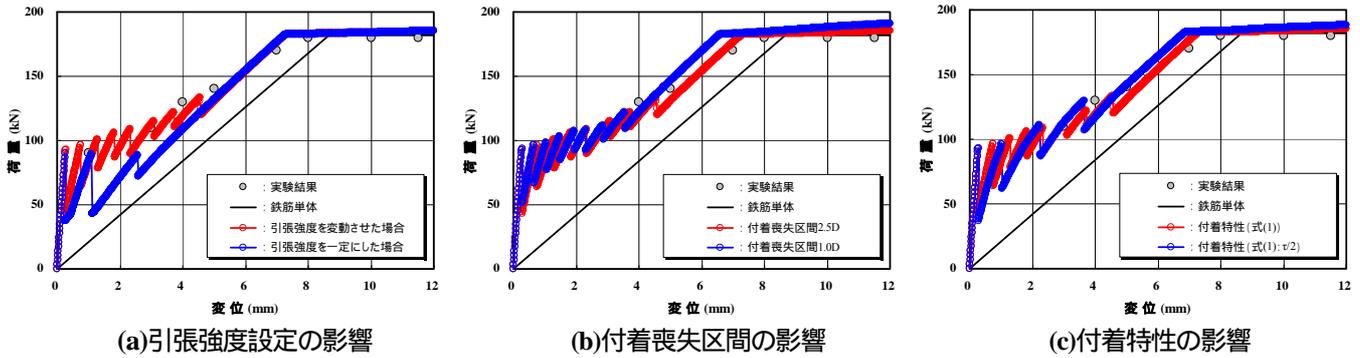


図 - 2 荷重 - 変位応答の比較

鉄筋周辺からコーン状のひび割れが生じてコンクリートによる鉄筋の拘束力が弱まり、鉄筋とコンクリートの肌離れによって付着劣化が生じる。そのため解析モデルでは離散ひび割れ要素近傍に付着劣化域（ここでは付着喪失区間という）を考慮する必要がある。付着喪失区間については、ひび割れ面より 5D (D は鉄筋径) から 2.5D は付着応力がゼロに線形的に減少し、2.5D からひび割れ面までは付着応力がゼロになると提案されている⁶⁾。そこで本検討では付着応力がゼロになる領域 2.5D のみを付着喪失区間とした場合と、それよりも短い区間として 1.0D の場合を比較した。付着喪失区間の界面要素に対しては σ - S 関係の剛性をほぼゼロとして付着すべりに対して付着応力が発生しない特性とした。図 - 2 (b) のとおり、付着喪失区間を 1.0D とした場合には、ひび割れ後の引張剛性が若干高く評価され、鉄筋降伏が早期に生じている。これは、鉄筋のみで引張力を負担する領域である付着喪失区間が短いと、当区間での鉄筋ひずみや応力が增大するためである。一方の 2.5D に設定した場合には実験結果と良い一致を示している。付着喪失区間はひび割れ幅の増大に伴って徐々にひび割れ面から深く進展するものと考えられるが、その区間の設定が RC 部材の挙動に影響することが確認でき、適切にモデル化することが重要であると考えられる。

3.3 付着特性の影響

解析対象とした一軸引張試験は、十分長い定着長を有する両引き試験であり、またかぶりも比較的大きいため割裂ひび割れの影響はないと考えて式(1)の付着モデルを用いた。ここで、感度解析として、式(1)において付着すべり S に対して付着応力 σ を $1/2$ にした場合の結果を比較した。図 - 2 (c) で示されるように、付着応力を $1/2$ にした場合には、最終的に 4 本のひび割れが生じて鉄筋降伏に至った。付着強度や剛性を $1/2$ に設定したため付着すべりがひび割れ面から奥まで進み、コンクリートに伝達される付着応力が小さくなることから 2 本目以降のひび割れ発生が遅れ、また、

ひび割れ間隔が大きくなる結果となった。この結果は、鉄筋腐食などにより付着劣化が生じた場合にひび割れ間隔が大きくなる一般的な結果とも整合する。付着特性の設定においては、適切な付着モデルを適用することが重要である。

4. 結論

一軸引張を受ける RC 部材を対象に離散ひび割れ - 離散鉄筋モデルを用いた非線形 FEM 解析を実施した。その結果、ひび割れ発生と鉄筋の付着応力伝達を適切に表現し、ひび割れ後の部材の引張剛性を精度よく評価するためには、モデル化において以下を考慮する必要があることがわかった。

- 1) 部材軸方向の応力勾配が小さいため、複数の離散ひび割れ要素が 1 本ずつ徐々にひび割れが発生するように各要素に設定する引張強度を変動させる必要がある。
 - 2) 鉄筋の抜け出しに伴って生じる付着劣化域を考慮するため、付着喪失区間を適切にモデル化する必要がある。
 - 3) 鉄筋とコンクリート間にモデル化する界面要素には、適切な付着特性 (σ - S 関係) を適用する必要がある。
- 本検討は、北海道土木技術会コンクリート研究委員会の「材料劣化を考慮した構造性能評価に関する研究会」での活動成果の一部である。関係委員からは多くの貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田所他：ひび割れおよび鉄筋のモデル化が RC 部材の引張挙動に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1239-1248，2002。
- 2) 関下他：分散ひび割れ型 FEM による RC 部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響，第 65 回年次学術講演会，2010。（投稿中）
- 3) 玉井他：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力 - 平均ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.239-247，1987。
- 4) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，2008.3。
- 5) 島他：マッシュパなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみ関係，土木学会論文集，No.378，pp.165-174，1987。
- 6) K.MAEKAWA et al.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.