

有限要素法による RC 部材の一軸引張挙動に関する各種モデル化の影響

Influence of various modeling concerning uniaxial tensile behavior of RC member by finite element method

(株)リテック ○正会員 関下 裕太 (Yuta SEKISHITA)
 JIP テクノサイエンス(株) 正会員 川口 和広 (Kazuhiro KAWAGUCHI)
 (株)ドーコン 正会員 小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
 北武コンサルタント(株) 正会員 宮本 真一 (Shinichi MIYAMOTO)

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）部材の非線形挙動を有限要素解析によって再現する場合、ひび割れの発生や進展のモデル化および鉄筋のモデル化が数値解析結果に大きな影響を及ぼす¹⁾。コンクリートのひび割れや鉄筋を有限要素解析で取り扱う場合には、両者に対してそれぞれ離散的に表現する方法（離散型モデル）と有限要素内に一様に分布させる方法（分散型モデル）があり、その組み合わせとしては1) 分散ひび割れ-分散鉄筋モデル、2) 分散ひび割れ-離散鉄筋モデル、3) 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルの3つの方法に分類される。解析によって得られる応答値は、いずれのモデル、いずれの組み合わせに対しても同一の解が得られる必要があるが、各モデルの特性を十分に把握した上で適切な設定を行わなければならない解析結果に大きな相違を生じる可能性がある。

このような観点から、本論文ではコンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とその組み合わせ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て、各モデルの特性を整理し、同一の解を得るための解析手法に関する各種検討を行った。なお、本検討では、一軸引張作用を受ける RC 部材の非線形挙動に着目して検討を行うこととした。

2. 解析対象および解析条件の概要

本検討では、玉井ら²⁾が実施した RC 部材の鉄筋降伏後の引張剛性すなわちテンションスティフニングモデルを導いた一軸引張試験を解析対象とした。図-1 に試験体の概要を示す。試験体は部材長 2,700mm、断面寸法 200mm×150mm の角柱断面であり、断面中心に異形鉄筋 D19 を 1 本埋込んだ鉄筋比 1.0% の試験体を選定した。

解析はいずれも平面応力場を仮定した 2 次元解析とし、汎用の有限要素解析プログラムを使用した。分散ひび割れ-分散鉄筋モデルによる解析には WCOMD(Ver.2)を、分散ひび割れ-離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れ-離散鉄筋モデルによる解析には DIANA(Ver.9.3)を使用した。境界条件および荷重条件は、モデル端部の一端を拘束して、他端に水平方向の強制変位による漸増荷重とした。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、解析では解の安定性に配慮して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。使用した有限要素タイプは、コンクリート要素にはいずれのモデルに対しても 8 節点平面応力要素を用いた。鉄筋要素には分散ひび割れ-分散鉄筋モデルでは RC 要素に鉄筋比として与え、分散ひ

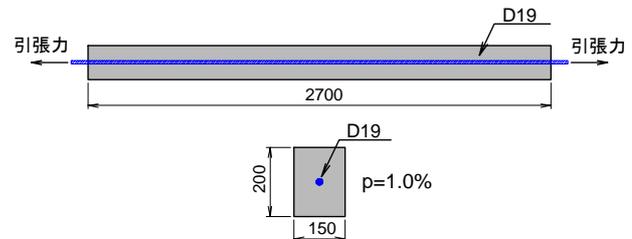


図-1 解析で対象とした試験体の形状寸法

表-1 コンクリートの力学的特性値

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
45.0	2.9	30.0	0.2

表-2 鉄筋の力学的特性値

鉄筋径	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D19	610.0	190.0	0.3

び割れ-離散鉄筋モデルおよび離散ひび割れ-離散鉄筋モデルでは 3 節点梁要素を用いた。また、離散鉄筋モデルに対して付着-すべりの影響を考慮する場合および離散ひび割れ要素には DIANA に組み込まれている界面接合要素を用いている。なお、本解析における分散ひび割れモデルは、いずれも固定ひび割れモデルである。収束計算法には Newton-Raphson 法あるいは割線剛性法を採用した。表-1, 2 には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

3. 分散ひび割れ-分散鉄筋モデルに対する検討

3.1 解析モデル

図-2 (a)に分散ひび割れ-分散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示す。本モデルではコンクリートと鉄筋の特性を重ね合わせた RC 要素を用いるため、部材高さ方向には 1 分割、部材軸方向には 10 分割を基本とした。材料構成モデルは、コンクリートの引張応力下における平均応力-平均ひずみ関係には岡村ら³⁾が提案した引張軟化特性である図-3(a)を用いた。ここで、付着パラメータ（引張硬化・軟化係数）は $C=0.4$ を標準値とし、このパラメータの影響については別途検討を行った。鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、図-4 の点線で示した降伏棚を無視したバイリニアモデルとし、かつ降伏強度を鉄筋単体（同図実線）のそれよりも低下させている。

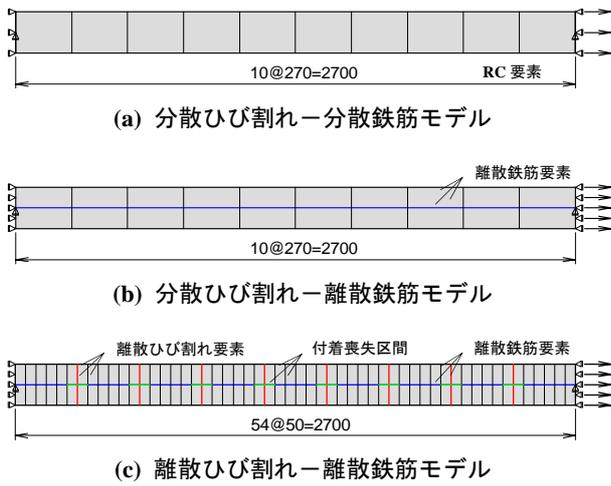


図-2 各モデルの要素分割図の一例

これは、コンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、ひび割れや付着の影響によって鉄筋単体の応力-ひずみ関係と異なるためである。すなわち、鉄筋単体においては存在する降伏棚もコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係には現れないことと、ひび割れ発生後における鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係での降伏点はコンクリートとの付着によって鉄筋単体の降伏強度よりも低下するためである。

3. 2 解析結果および考察

図-5 には、分散ひび割れ-分散鉄筋モデルで得られた荷重-変位応答を示している。図中、○印は実験結果を示している。また、図中には鉄筋単体のみに引張力を作用させた場合の荷重-変位関係も合わせて示している。

図より、実験結果に着目すると、変位 7.0mm 程度までは鉄筋とコンクリートの付着作用のために、ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートが引張力を負担するテンションスティフニング効果によって、引張剛性は鉄筋単体の引張剛性よりも大きく、その後は鉄筋単体の挙動に近づくことが分かる。一方、解析結果に着目すると、解析結果は実験結果と精度良く一致していることが分かる。また、要素寸法の影響を検討するために、部材軸方向の要素分割数を 3, 5, 15, 30 分割とした場合の解析を実施したが、本モデルにおける平均応力-平均ひずみ関係が要素寸法にかかわらず等しいことから、要素分割の影響はなく解の唯一性が保証されていることが分かる。

図-6 には、付着パラメータ C が解析結果に及ぼす影響を検討するために、 $C=0.2$, 2.0 と設定した場合の荷重-変位応答を $C=0.4$ と設定した解析結果と比較して示している。図より、本解析では $C=0.4$ と設定した場合には実験結果と精度良く一致しているが、 $C=0.2$ および 2.0 と設定した場合には、実験結果をそれぞれ過大あるいは過小に評価していることが分かる。

4. 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルに対する検討

4. 1 解析モデル

図-2 (b)に分散ひび割れ-離散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示す。本モデルでは、鉄筋を梁要素を用

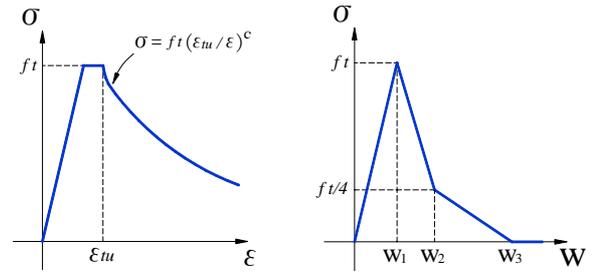


図-3 コンクリートの材料構成モデル (引張応力下)

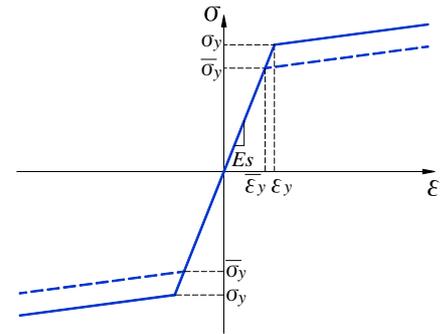


図-4 鉄筋の材料構成モデル

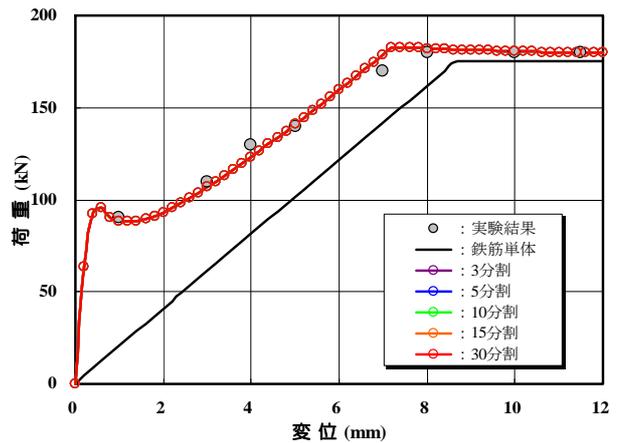


図-5 分散ひび割れ-分散鉄筋モデルにおける荷重-変位応答の比較 (要素分割数の影響)

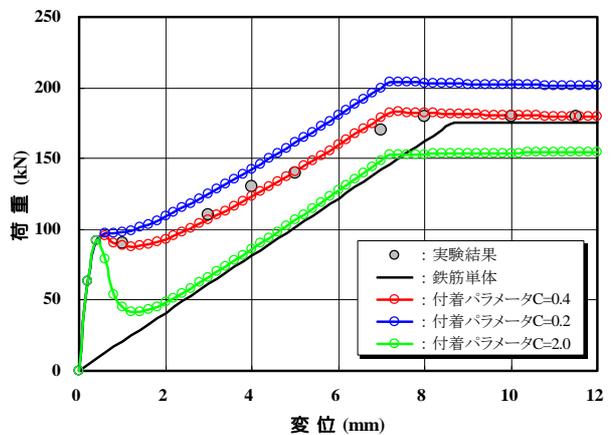


図-6 分散ひび割れ-分散鉄筋モデルにおける荷重-変位応答の比較 (付着パラメータ C の影響)

いて離散的にモデル化するため、部材高さ方向に2分割して鉄筋要素をコンクリート要素に貼り付けた。また、部材軸方向には分散ひび割れ分散鉄筋モデルと同様に10分割とした。コンクリートの引張軟化特性には図-3に示すテンションスティフニングとテンションソフトニングモデルの両者を用いて検討を行った。ここで、テンションソフトニングモデルでは、土木学会コンクリート示方書【設計編】における引張破壊エネルギーを考慮した2直線モデルを用いて、要素の等価長さを要素面積の平方根と仮定してひび割れ幅をひずみに変換している。なお、引張破壊エネルギーは0.1N/mmと仮定した。

鉄筋は、図-4の実線で示した鉄筋単体の応力-ひずみ関係を用いて、降伏後は弾性係数の1/100倍の勾配で硬化するバイリニアモデルとした。コンクリートと鉄筋の要素間には、界面接合要素を用いて両者間の相対変位(すべり)を考慮し、付着モデルにはマッシブなコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の引き抜き試験により得られた島ら⁴⁾が提案した式(1)の付着モデルを用いた。なお、コンクリートの引張軟化特性にテンションスティフニングモデルを用いた場合には、マクロな付着挙動が応力-ひずみ関係に取り込まれていることから、コンクリートと鉄筋の要素間は完全付着とした。但し、鉄筋の降伏強度は、分散ひび割れ分散鉄筋モデルと同様に鉄筋単体の降伏強度よりも低下させた。

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

τ : 付着応力, f'_c : コンクリート強度
 S : すべり量, D : 鉄筋径

4.2 解析結果および考察

1) 付着特性の影響

付着応力が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。図-7には式(1)の付着応力を1.0倍、0.1倍、10倍とした場合の荷重-変位応答を比較して示している。

図より、いずれのケースにおいてもひび割れ発生後に急激に荷重が低下し、鉄筋単体と比較して引張剛性は若干大きいものの実験結果の再現性は低い。また、付着応力の影響は顕著ではないが、付着剛性を増加させる、すなわち完全付着に近づけるほどひび割れ発生後に早期に鉄筋単体の挙動に近づく傾向にあることが分かる。

2) 引張軟化特性の影響

引張軟化特性が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。図-8にはコンクリートの引張軟化特性としてテンションソフトニングとテンションスティフニングを設定した場合の荷重-変位応答を比較して示している。図より、テンションソフトニング(付着モデルも設定)では実験結果の再現性は低いが、テンションスティフニング(完全付着)では良い一致を示していることが分かる。テンションソフトニングモデルでは、別途付着の影響を考慮することでテンションスティフニングと同等の効果が得られるものと考えられるが、コンクリート要素に分散ひび割れモデルを適用した場合には、コンクリート要素のひび割れが局所化せず分散されるため相対変位(すべり)が極大化する位置が表現できないため、結果として付着モデルが有効に機能しないためと考えられる。

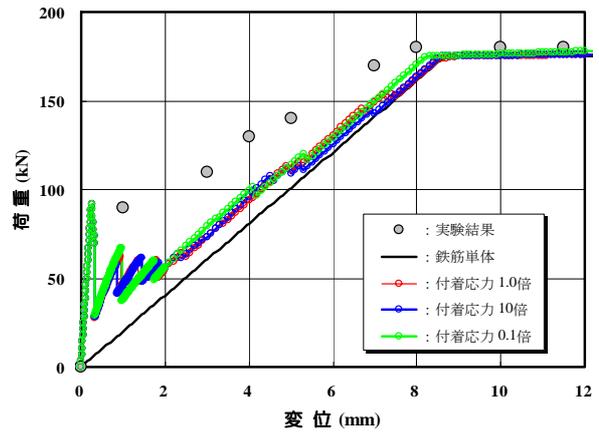


図-7 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルにおける荷重-変位応答の比較(付着応力の影響)

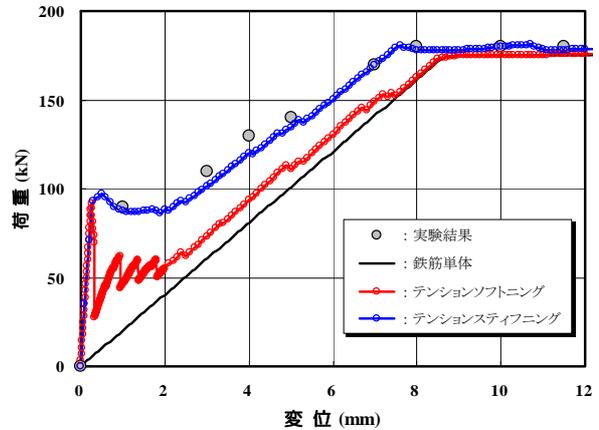


図-8 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルにおける荷重-変位応答の比較(引張軟化特性の影響)

これより、分散ひび割れ-離散鉄筋モデルでは、コンクリートの引張軟化特性にテンションソフトニングを適用した場合には実験結果を精度良く再現することができず、テンションスティフニングを用いた方が精度の良い解を与えることが明らかとなった。

5. 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルに対する検討

5.1 解析モデル

図-2(c)に離散ひび割れ-離散鉄筋モデルによる要素分割図の一例を示す。離散ひび割れは、実験で得られた平均ひび割れ間隔(約300mm)を参考にして、部材軸方向に計8本のひび割れをモデル化した。コンクリートの引張応力-ひび割れ幅(変位)関係には、図-3(b)のテンションソフトニングモデルを用い、コンクリートと鉄筋の要素間には式(1)の付着モデルによる付着-すべり関係を設定した。離散ひび割れ-離散鉄筋モデルでは、個々のひび割れ面や鉄筋、そして鉄筋とコンクリート間の付着界面を離散化してモデル化するため、RC部材の全体挙動のみならず、ひび割れ幅や鉄筋ひずみ、付着応力等の個々の局所的な力学的挙動を結果として得ることが可能である。しかしながら、それらの正確な挙動を表現するためには、ひび割れ発生位置を予めモデル化する

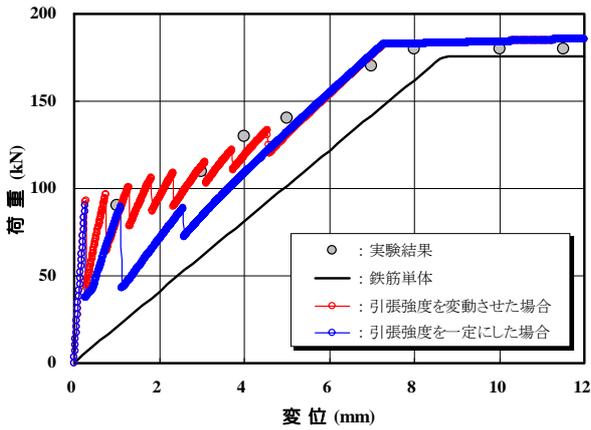


図-9 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルにおける荷重-変位応答の比較 (引張強度設定の影響)

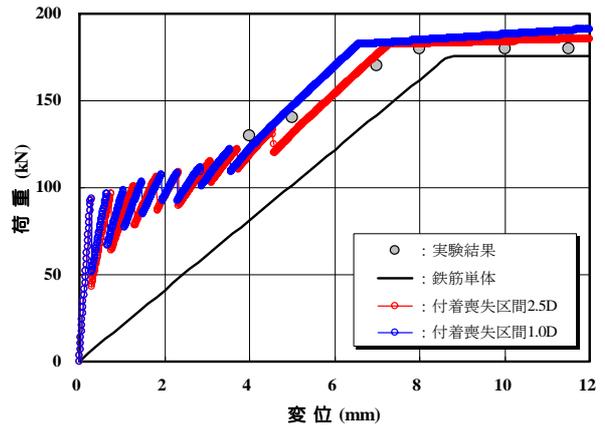


図-10 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルにおける荷重-変位応答の比較 (付着喪失区間の影響)

必要があり、同時に付着特性の設定が重要となる。特に、ひび割れ近傍では鉄筋とコンクリート間の肌離れ、すなわち付着劣化が生じることから、鉄筋とコンクリートの界面に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。そこで、本検討では、離散ひび割れ要素に対する引張強度の設定および付着喪失区間に関する検討を行った。

5. 2 解析結果および考察

1) 引張強度設定の影響

離散ひび割れモデルでは、コンクリートの引張強度を一定とすると、解析上複数本のひび割れが同時に発生し引張剛性が適切に評価できないことが指摘されている¹⁾。そこで、本検討では離散ひび割れ要素に対する引張強度を一定とした場合と、ひび割れが徐々に発生するように引張強度を変動させた場合で比較を行った。なお、引張強度の変動値は 2.90~3.95MPa (変動係数で約 10%) と仮定し、付着喪失区間は鉄筋径(D)の 2.5 倍と設定した。

図-9 に荷重-変位応答の比較を示す。図より、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するため引張剛性が過小評価され、実験結果の再現性も低いことが分かる。一方、引張強度を変動させた場合には、ひび割れが順次発生する現象を捉えており、実験結果とも良い一致を示している。また、ひび割れが順次発生して、ひび割れ間隔が小さくなる過程において部材の引張剛性が次第に低下する現象が再現されている。

2) 付着喪失区間の影響

付着喪失区間が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。図-10 には付着喪失区間をそれぞれ 1.0D, 2.5D とした場合の荷重-変位応答を比較して示している。図より、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ており、鉄筋降伏が早期に生じている。これは、付着劣化によって鉄筋のみで引張力を負担する付着喪失区間が小さい場合には鉄筋の応力やひずみが増大するためである。一方、2.5D と設定した場合には実験結果と良い一致を示している。

これより、離散ひび割れ-離散鉄筋モデルでは付着喪失区間を適切に設定することが重要であり、RC 部材の非線形挙動に大きな影響を与えることが確認された。

6. まとめ

本検討では、コンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とその組み合わせ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て、一軸引張を受ける RC 部材の非線形挙動に着目した各種検討を行った。本検討の範囲内で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) 分散ひび割れ-分散鉄筋モデルを採用する場合には、引張軟化特性にテンションスティフニングを用いて、付着パラメータおよび鉄筋の平均降伏強度を適切に設定することで実験結果を精度良く再現できる。
- 2) 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルを採用する場合には、引張軟化特性にテンションソフトニングではなく、テンションスティフニングを用いた方が実験結果を精度良く再現できる。
- 3) 離散ひび割れ-離散鉄筋モデルを採用する場合には、ひび割れ部に鉄筋径の 2.5 倍程度の付着喪失区間を設定する必要がある。また、ひび割れを除々に発生・進展させるための解析上の工夫が必要である。

本検討は、北海道土木技術会コンクリート研究委員会に設置された「材料劣化を考慮した構造性能評価に関する研究会」における活動成果の一部である。北海道大学大学院の佐藤靖彦准教授、北武コンサルタント(株)の渡辺忠朋副社長をはじめ、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) 田所敏弥, 佐藤靖彦, 上田多門：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) 玉井真一, 島 弘, 出雲淳一, 岡村 甫：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.
- 3) 岡村 甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1990.
- 4) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫：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.