

非線形有限要素法による RC 部材の変形・破壊シミュレーション解析

(株)北未来技研

北海道大学大学院

(株)ドーコン

JIPテクノサイエンス(株)

正会員 工博

工修

工修

○関下 裕太

佐藤 靖彦

小林 竜太

川口 和広

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】では、維持管理の対象となる要求性能に対して必要な点検方法は示されているものの、現有耐荷性能のような構造性能の評価は必ずしも定量的なものにはなっていない。そのため、点検により把握した外観変状をもとにグレーディングを行い、構造物の性能低下を半定量的に評価しているのが現状であるが、構造性能を定量的に把握できる手段が確立されれば、より合理的な維持管理が実施できるものと期待されている。一方、近年ではコンクリート構造物の性能を定量的に評価する手法として、非線形構造解析が多く利用され始めており、鉄筋腐食やコンクリートの劣化等、材料劣化が生じた構造物の構造性能評価への適用性も検討されている¹⁾。

このような背景の下、北海道土木技術会コンクリート研究委員会では「劣化したコンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会」を設置し、材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価技術の現状を把握するとともに、非線形構造解析技術を利用するために必要な知識の習得を目指した活動を行っている。本稿では、本研究委員会における活動の一環として実施した、材料劣化が生じていない RC 部材を対象とした非線形有限要素法解析による基礎的な検討内容について紹介する。

2. 検討概要

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解析結果に大きな影響を及ぼすことになる。ひび割れや鉄筋を有限要素解析で取り扱う方法としては、それぞれを離散的に表現する方法と要素内に一様に分散させる方法があり、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つに分類される。解析によって得られる応答値は、いずれの解析モデルによっても同一の解が得られる必要があるが、各モデルの特性を把握した上で適切な設定を行わなければ解析結果に大きな相違が生じる可能性がある。

そこで、本検討では、最も基礎的な一軸引張応力状態の非線形挙動に着目し、コンクリートのひび割れモデルおよび鉄筋のモデル化とそれらの組み合わせの相違が解析結果に与える影響について種々の検討を実施することとした。

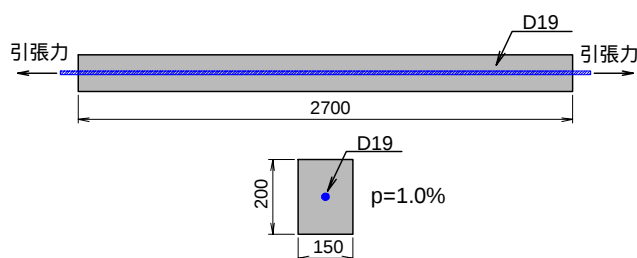
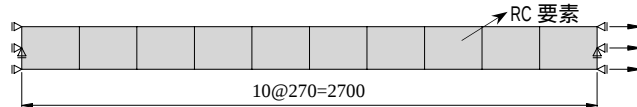
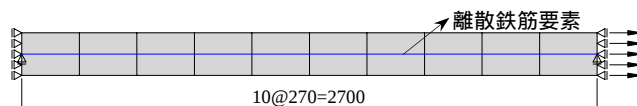


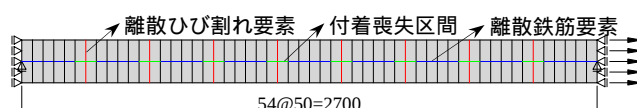
図-1 両引き試験体の形状寸法



(a) 分散ひび割れ - 分散鉄筋モデル



(b) 分散ひび割れ - 離散鉄筋モデル



(c) 離散ひび割れ - 離散鉄筋モデル

図-2 解析モデル（要素分割）の一例

3．解析対象および解析条件の概要

本検討では，玉井ら²⁾ が実施した両引き試験を解析対象とした。図-1に試験体の形状寸法を示す。試験体は，部材長が2,700mm，断面寸法が200mm×150mmの矩形断面であり，断面中心位置にD19が1本配置された鉄筋比1%の試験体である。表-1，2には，コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示す。

解析はいずれも2次元解析とし，コンクリートは8節点平面応力要素，離散化した鉄筋は3節点梁要素でモデル化した。また，離散ひび割れは界面接合要素によってモデル化し，離散鉄筋モデルにおけるコンクリートと鉄筋の要素間は界面接合要素を用いて付着 - すべり挙動を表現することとした。

境界条件および荷重条件は，図-2に示すように解析モデル両端部の水平方向変位成分を拘束し，その一端に水平方向の引張力を強制変位として与えた。ただし，モデル端部の鉄筋位置のみ鉛直向変位成分も拘束している。ここで，ひび割れモデルには，任意方向の複数本のひび割れを考慮可能な多方向固定ひび割れモデルを採用している。

4．分散ひび割れ - 分散鉄筋モデルに対する検討

4.1 解析モデルおよび検討内容

図-2(a)に，分散ひび割れ - 分散鉄筋モデルの要素分割の一例を示す。本モデルでは部材軸方向の要素分割は10分割を基本とした。コンクリートの引張軟化特性には，岡村ら³⁾ が提案した図-3(a)に示すTension Stiffeningモデルを適用し，付着パラメータは $C=0.4$ を標準値とした。また，鉄筋の

応力 - ひずみ関係には，図-4の実線で示した RC中の鉄筋の応力 - ひずみ関係を用いた。ここで，本モデルにおいては，部材軸方向の要素分割数と付着パラメータ C の影響に着目して検討を行うこととした。

4.2 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 - 変位応答を実験結果と比較して示している。なお，図中には，鉄筋単体に引張力を作用させた場合の荷重 - 変位応答も併せて示している。

図-5(a)は，部材軸方向の要素分割数を種々に変化させた場合の解析結果を比較したものである。図より，いずれの解析ケースも実験結果の荷重 - 変位応答と良い一致を示しており，かつ要素分割数の影響は受けていないことが分かる。これは，本モデルにおけるコンクリート引張応力下の平均応力 - 平均ひずみ関係は要素寸法にかかわらず等しいことから，解の唯一性が保証されているためである。

図-5(b)は，引張軟化勾配に影響を与える付着パラメータを変化させた場合の解析結果を比較したものである。図より， $C=0.4$ とした場合は実験結果と良い一致を示しているが， $C=0.2$ あるいは 2.0 とした場合には実験結果の荷重 - 変位応答を過大あるいは過小に評価しており，ひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの挙動のみならず，鉄筋降伏以後の挙動にも大きな影響を与えていることが分かる。

表-1 コンクリートの力学的特性値

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	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 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比
D19	610.0	190.0	0.3

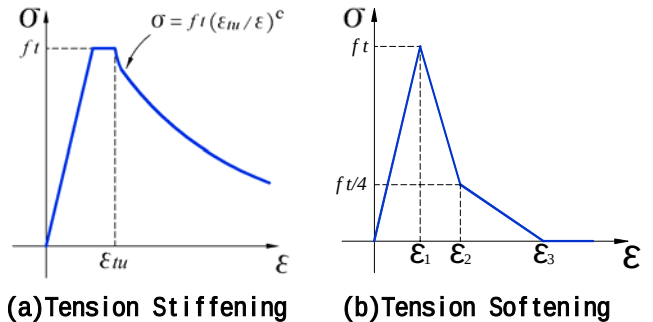


図-3 コンクリートの引張軟化特性

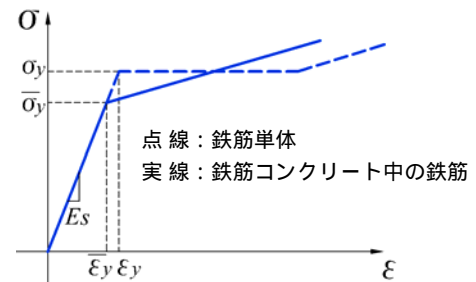


図-4 鉄筋の応力 - ひずみ関係

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

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

5. 分散ひび割れ - 離散鉄筋モデルに対する検討

5.1 解析モデルおよび検討内容

図-2(b)に、分散ひび割れ - 離散鉄筋モデルの要素分割の一例を示す。本モデルでは部材高さ方向および部材軸方向の要素分割をそれぞれ2分割、10分割と設定した。コンクリートの引張軟化特性には、図-3に示すTension StiffeningとTension Softeningの両者のモデルを適用した。ここで、Tension Softeningモデルには土木学会コンクリート標準示方書【設計編】に準拠した引張破壊エネルギーを考慮した2直線モデルを適用し、鉄筋には図-4の点線で示した鉄筋単体の応力 - ひずみ関係を用いた。また、付着応力 - すべり関係には式(1)に示す島ら⁴⁾によるモデルを適用した。ここで、本モデルにおいては、コンクリートの引張軟化特性と付着応力 - すべり関係における付着応力の影響に着目して検討を行うこととした。

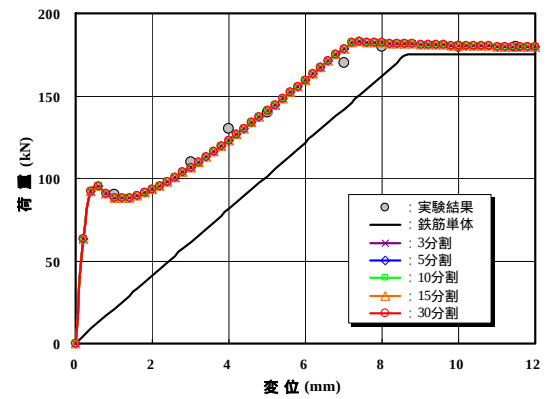
5.2 解析結果および考察

図-6には、分散ひび割れ - 離散鉄筋モデルで得られた荷重 - 変位応答を実験結果と比較して示している。

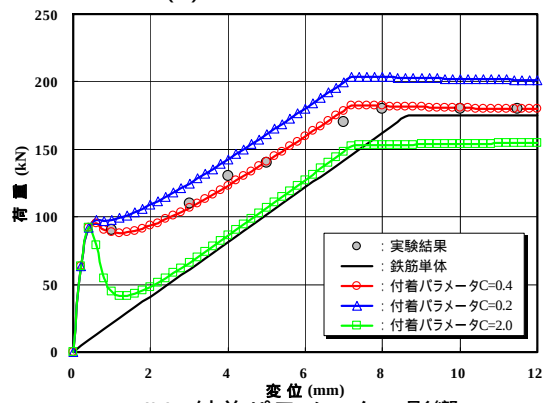
図-6(a)は、上述の2つの引張軟化特性モデルを用いた場合の解析結果を比較したものである。図より、Tension Softeningモデルを適用した場合には、ひび割れ発生後に荷重が急激に除荷され、実験で得られた荷重 - 変位応答の再現性は低い。Tension Stiffeningモデルを適用した場合には良い一致を示していることが分かる。これは、Tension Softeningモデルを適用した場合にはひび割れが局所化せず、広範囲に分散されて、すべりが極大化する位置が限定されないため、その結果として付着応力 - すべりモデルが有効に機能しなかったためと推察される。

図-6(b)は、式(1)で算定される付着応力を0.1倍あるいは10倍とした場合の解析結果を比較したものである。図より、いずれのケースにおいても実験で得られた荷重 - 変位応答の再現性は低い。付着応力が大きい場合にはひび割れ発生後に早期に鉄筋単体の挙動に近づき、逆に付着応力が小さい場合には実験結果に近づく傾向にあることが分かる。よって、分散ひび割れ - 離散鉄筋モデルにおいてTension Softeningモデルを用いる場合には、ひび割れを局所化させるための工夫が必要であるものと考えられる。その方法としては付着特性や境界条件の他、コンクリートの引張強度にばらつきを付与すること等が考えられるが、これらについては今後の課題としたい。

6. 離散ひび割れ - 離散鉄筋モデルに対する検討

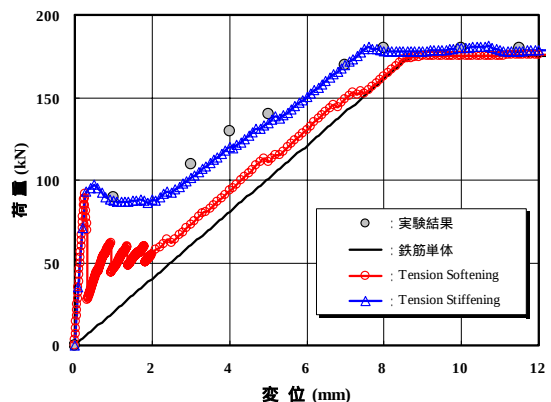


(a) 要素分割数の影響

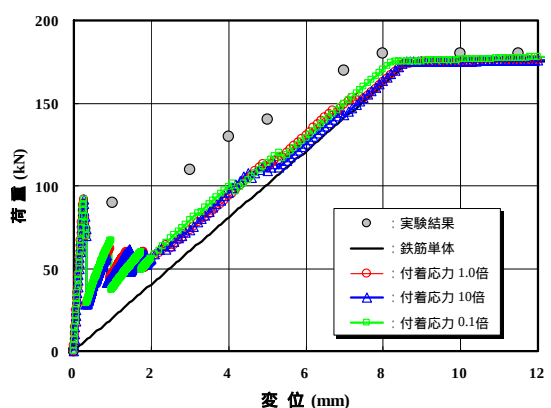


(b) 付着パラメータの影響

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



(a) 引張軟化特性の影響



(b) 付着応力の影響

図-6 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

6.1 解析モデルおよび検討内容

図-2(c)に、離散ひび割れ - 離散鉄筋モデルの要素分割の一例を示す。離散ひび割れは実験²⁾ 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、ひび割れ間のコンクリート要素は弾性要素とした。離散ひび割れ要素の引張応力 - ひび割れ幅関係には、前述のTension Softeningモデルを適用し、鉄筋には図-4の点線で示した鉄筋単体の応力 - ひずみ関係を、付着応力 - すべり関係には前述の島ら⁴⁾ によるモデルを適用した。また、開口するひび割れの近傍では付着劣化が生じることから、付着喪失区間 (鉄筋径Dの2.5倍の区間を標準とした) を考慮するために部材軸方向の要素分割数を54分割と細かく設定した。ここで、本モデルにおいては、離散ひび割れ要素の引張強度と付着喪失区間長の影響に着目して検討を行うこととした。

6.2 解析結果および考察

図-7には、離散ひび割れ - 離散鉄筋モデルで得られた荷重 - 変位応答を実験結果と比較して示している。

図-7(a)は、離散ひび割れ要素の引張強度を一定値とした場合と変動 ($f_t = 2.90 \sim 3.95\text{MPa}$, 変動係数で約10%) させた場合の解析結果を比較したものである。図より、引張強度を一定値とした場合には、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に評価されていることが分かる。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過程が良好に再現されることから実験結果と良い一致を示している。

図-7(b)は、離散ひび割れ要素近傍の付着喪失区間をそれぞれ1.0D, 2.5Dと設定した場合の解析結果を比較したものである。図より、付着喪失区間を1.0Dとした場合にはひび割れ発生後の引張剛性が若干大きく評価され、かつ鉄筋降伏が早期に生じていることが分かる。一方、2.5Dとした場合には実験結果と良い一致を示しており、付着喪失区間は解析結果に大きな影響を与えることが確認された。

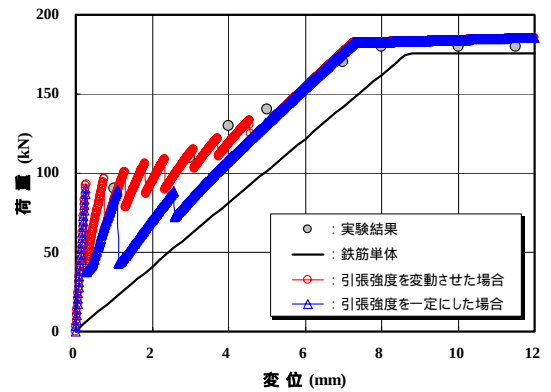
7. おわりに

本報告では、コンクリート構造物の構造性能を定量的に評価可能な手法の1つである非線形有限要素法解析に着目し、一軸引張作用を受ける RC 部材を対象としてコンクリートのひび割れおよび鉄筋のモデル化とそれらの組み合わせの相違が、解析結果に与える影響に関する基礎的な検討を行った。

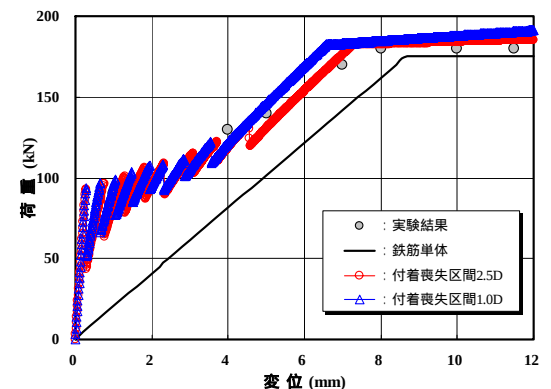
今後は、本検討で得られた知見をもとに、梁・柱部材に対しても同様な検討を実施し、最終的には材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能評価に応用していきたいと考えている。

参考文献：

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ71，2006.
- 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.



(a) 引張強度設定の影響



(b) 付着喪失区間の影響

図-7 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