

# 分散ひび割れ型 FEM による RC 梁の非線形曲げ挙動に関する各種モデル化の影響

*Influence on Various Modeling Concerning Nonlinear Bending Behavior of RC Beam Members by Smeared Crack Based FEM*

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

## 1. はじめに

著者らは、RC 部材を対象とした非線形有限要素解析に着目し、一軸引張力が作用する RC 部材を対象としてコンクリートのひび割れモデルと鉄筋のモデル化の組み合わせの違い等が解析結果に及ぼす影響について検討を行った<sup>1)~3)</sup>。その結果、分散ひび割れ-分散鉄筋モデルによる検討結果に限定すると、1)要素寸法(要素分割数)の影響は受けないこと、2)コンクリートの引張領域における引張応力-ひずみ関係の軟化勾配が解析結果に大きな影響を及ぼすこと、等を明らかにしている。しかしながら、これらの検討は断面内のひずみ分布がほぼ一様となる比較的単純な場合であり、曲げを受ける梁部材のようにひずみがある領域に局所化するような部材に対しても、それらの影響を十分に把握しておく必要がある。

このような観点から、本検討では曲げ破壊する RC 梁部材を対象として、要素分割、引張領域におけるコンクリートの引張応力-ひずみ関係の軟化勾配および圧縮領域のモデル化が荷重-変位応答に与える影響について検討を行った。なお、本検討では分散ひび割れ-分散鉄筋モデルに限定した形で各種検討を実施することとした。

## 2. 解析対象の概要

図-1 には、本検討で対象とした RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。供試体は、断面寸法 200×400mm、スパン長 2,600mm、せん断スパン比 2.86 とした複鉄筋矩形 RC 梁である。設計上のせん断余裕度は 2.52 であり、静載荷時に曲げ引張破壊が生じるように断面設計を行っている。表-1, 2 には、それぞれコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

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
25.7	2.0	25.9	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
D10	355.0	179.0	0.3
D16	356.0	177.0	

## 3. 数値解析の概要

### 3.1 解析モデル

本解析では、2次元非線形有限要素解析プログラム WCOMD を用いた。図-2 には、要素分割の影響を調べるために設定した各ケースの要素分割図を示している。

解析モデルは、供試体と荷重条件の対称性を考慮してハーフスパンモデルとした。適用した有限要素は、計 9 つのガウス積分点を有する 8 節点平面応力要素であり、鉄筋はその剛性を要素中に平均化して取り扱う RC 要素によってモデル化した。ただし、比較的粗い要素分割に対しても解析精度を確保するために、鉄筋との付着によってひび割れの分散が期待できる領域 (RC ゾーン: 図中、水色の領域) と、ひび割れの分散が期待できない領域 (無筋ゾーン: 図中、灰色の領域) を区分している。

本解析では、軸方向鉄筋に対する RC ゾーンは梁高方向に縁からかぶりの 2 倍の 100mm とし、奥行き方向には梁の全幅である 200mm とした。一方、せん断補強筋

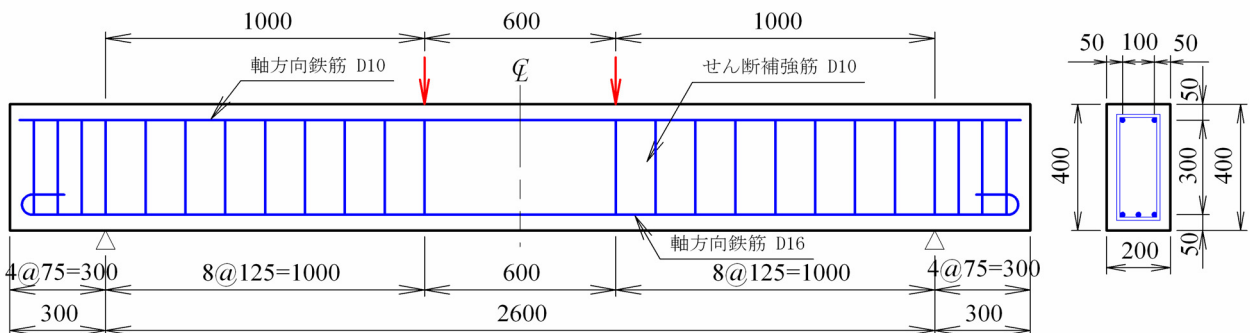


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表-3 解析ケース一覧

解析ケース	要素分割の パターン	引張領域の付 着パラメータ	圧縮領域の付 着パラメータ	載荷点近傍要 素の圧縮強度	備 考
CASE1	標準	0.4	0.4	1.0f <sup>c</sup>	標準ケース
CASE2	細				要素分割の影響
CASE3	粗				要素分割の影響
CASE4	標準	0.2	無筋相当	2.0f <sup>c</sup>	引張領域の引張軟化勾配(付着パラメータ)の影響
CASE5		1.0			
CASE6		2.0			
CASE7		0.4			
CASE8		0.4	0.4	3.0f <sup>c</sup>	圧縮領域(載荷点近傍)の引張軟化勾配(付着パラメータ)および圧縮強度の影響
CASE9			3.0f <sup>c</sup>		

は梁軸方向に密に配置されていることから、せん断スパン内および支点から外側に至る領域を RC ゾーンとし、奥行き方向は梁の全幅とした。したがって、軸方向鉄筋による付着の効果及ばず、かつ、せん断補強筋が配置されていないスパン中央部近傍の要素に関しては無筋ゾーンとしてモデル化した。なお、載荷板および支持板については簡略化して弾性要素でモデル化を行っている。

### 3.2 境界条件および荷重条件

境界条件は、スパン中央部における対称切断面においてはその面に対する水平方向変位成分を、載荷板および支持板は要素中心節点位置の鉛直方向変位成分をそれぞれ拘束した。荷重条件は、載荷点位置を鉛直方向に強制変位させる 1STEP あたり 0.1mm 刻みの漸増載荷とした。なお、収束計算には Newton-Raphson 法と修正 Newton-Raphson 法を組み合わせた手法を用いており、収束判定基準は正規化された残差力ノルムとそれに対応する変位ノルムで許容値を 10<sup>-6</sup> として、1STEP 当たりの反復回数は 12 回と設定している。

### 3.3 材料構成則

図-3 には、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。材料構成則は、岡村・前川らによって開発された履歴依存型の非線形材料構成則を適用した。本構成則は、分散ひび割れの仮定に基づく非直交多方向固定ひび割れモデルおよびコンクリートと鉄筋の非線形モデルで構成されており、RC の非線形領域における適用性が既に検証されているものである<sup>4)</sup>。ひび割れ発生後の引張応力-引張ひずみ関係の軟化勾配は、前述のように RC ゾーンと無筋ゾーンを区分していることから、RC ゾーンに対しては tension-stiffening モデルを、無筋ゾーンに対しては要素寸法と破壊エネルギーから求まる軟化勾配を設定した。ここで、RC ゾーンの tension-stiffening モデルにおける付着パラメータ C は推奨値である 0.4 を標準とした。また、鉄筋にはひび割れた鉄筋コンクリート中のひび割れを複数含む領域内において空間平均化した平均応力-平均ひずみ関係を用いており、鉄筋単体で見られるような塑性棚がなく、かつ鉄筋とコンクリートの付着によって降伏強度が鉄筋単体の降伏強度よりも低下する現象(図中、実線)が考慮されている。なお、破壊基準は、最大引張ひずみ、最大圧縮ひずみ、および最大せん断ひずみをそれぞれ 10%と設定した。

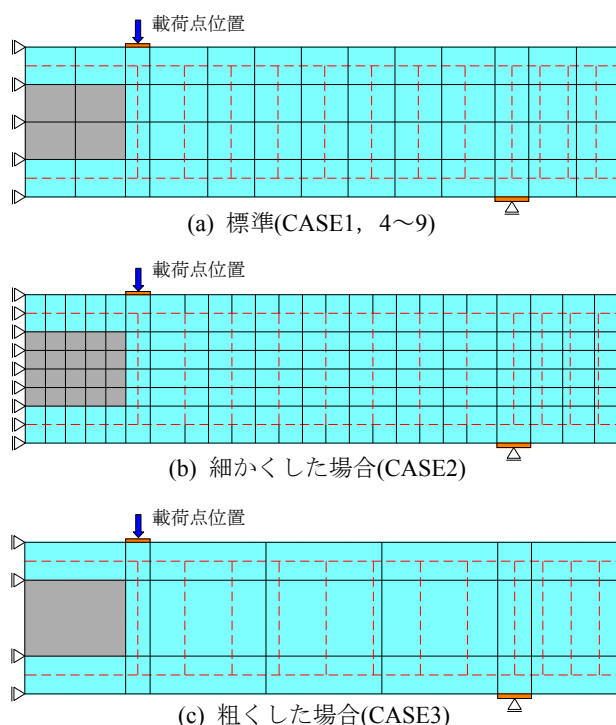


図-2 各ケースの要素分割図

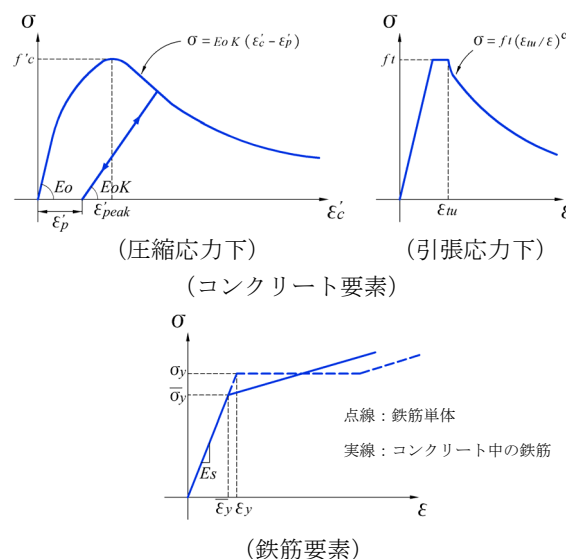


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

### 3. 4 解析ケース

表-3 には、解析ケース一覧を示している。本検討では、要素分割の影響(CASE1, 2~3), 引張領域の引張軟化勾配の影響(CASE1, 4~6), 圧縮領域の引張軟化勾配の影響(CASE1, 7), 載荷点近傍要素の強度設定の影響(CASE1, 8~9)に着目した計9ケースを実施した。

## 4. 解析結果および考察

### 4. 1 要素分割の影響

図-4(a)には、要素分割の違いが解析結果に与える影響を把握するために、図-2 に示した3パターンの要素分割に対する荷重-変位関係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鉄筋降伏に至るまでの荷重および変位は実験結果と良く一致している。しかしながら、荷重が低下し始める変位レベルが各ケースで大きく異なっており、ポストピーク領域では要素分割の影響を受けていることが分かる。また、要素分割が細かい、すなわち要素寸法が小さい場合ほど早期に荷重が低下する傾向にある。これは、数値解析において荷重が低下する理由は、載荷点近傍の圧縮領域における要素が軟化域に達するためであるが、要素寸法が小さい場合ほど軟化域に達する要素が局所化するためである。

したがって、既報<sup>1)</sup>の一軸引張力が作用するRC部材の解析では要素寸法の影響は受けなかったが、曲げが作用する梁部材のようにひずみがある領域に局所化する部材では、要素寸法の影響を受けることが明らかとなった。よって、非線形有限要素解析を用いてポストピーク領域まで予測する必要がある場合には、引張領域のみならず圧縮領域に対しても破壊エネルギーの概念を用いる等、要素寸法依存性を低減可能な構成則を適用する必要があるものと考えられる<sup>5)</sup>。

### 4. 2 引張領域における付着パラメータの影響

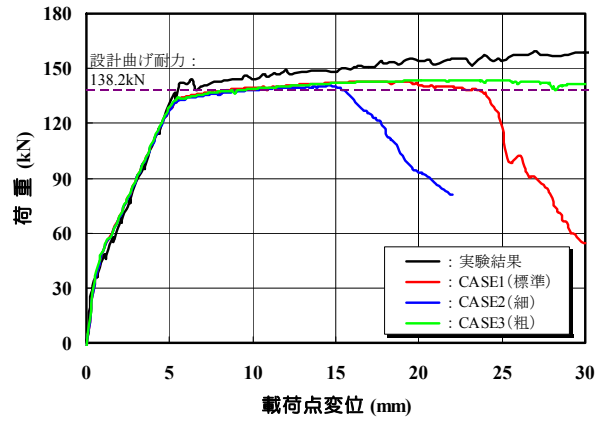
ここでは、引張領域におけるコンクリートの引張応力-ひずみ関係の軟化勾配 (tension-stiffening モデル) の違いが解析結果に与える影響を把握するために、引張鉄筋が配置されているRCゾーンに対して軟化勾配を表す付着パラメータCを種々に変化させた場合の検討を行うこととした。図-4(b)には、付着パラメータをそれぞれC=0.2, 0.4, 1.0, 2.0とした場合の荷重-変位関係を比較して示している。

図より、付着パラメータはひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの剛性のみならず、降伏荷重および降伏以後の挙動にも大きな影響を与えており、付着パラメータが大きいほど、すなわち鉄筋とコンクリートの付着性能が劣化するほど剛性および荷重ともに小さく評価される傾向にあることが分かる。なお、この傾向は既報<sup>1), 2)</sup>の一軸引張力が作用するRC部材においても同様であった。

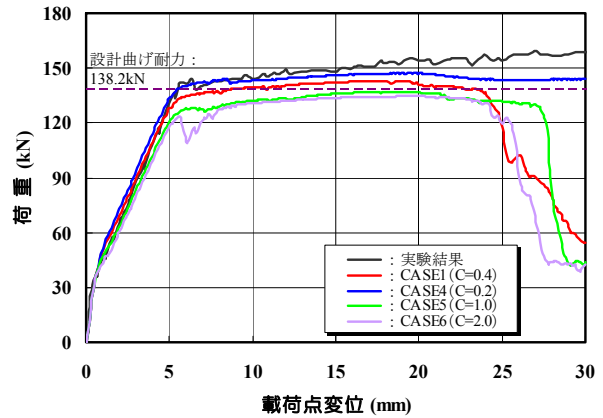
したがって、引張領域におけるRCゾーンの付着パラメータは解析結果に大きな影響を与えるため、付着パラメータの設定にあたっては十分に留意する必要がある。

### 4. 3 圧縮領域における付着パラメータの影響

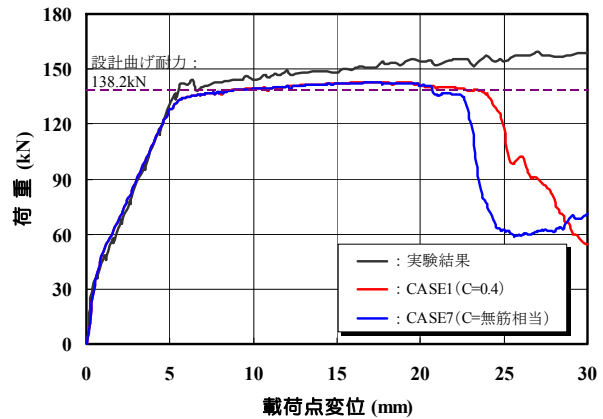
複鉄筋RC梁の場合には圧縮鉄筋が配置されるため、一般には圧縮領域もRC要素によってモデル化し、かつこの領域では圧縮応力が卓越するものの、引張領域と同



(a) 要素分割の影響



(b) 引張領域における付着パラメータの影響

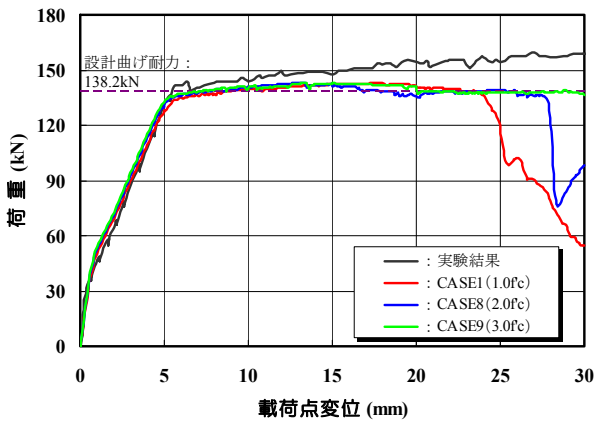


(c) 圧縮領域における付着パラメータの影響

図-4 各ケースにおける荷重-変位関係の比較 (1)

様に tension-stiffening モデルが適用されている。そこで、ここでは圧縮領域におけるRCゾーンに適用する付着パラメータが解析結果に与える影響について検討を行うこととした。図-4(c)には、付着パラメータを推奨値であるC=0.4として軟化勾配を設定した場合と、無筋コンクリート相当の付着パラメータとして軟化勾配を設定した場合の荷重-変位関係を比較して示している。

図より、荷重が低下し始める変位レベルに若干の差異が見られるものの、鉄筋降伏以後の変位20mm程度まではほぼ一致しており、付着パラメータの影響は比較的小さいことが分かる。



(d) 載荷点近傍の圧縮強度の影響

図-4 各ケースにおける荷重-変位関係の比較 (2)

#### 4. 4 載荷点近傍の圧縮強度の影響

4. 1 で述べたように、解析結果が実験結果と比較して早期に荷重が低下するのは、載荷点近傍の圧縮領域における要素が局所的に軟化域に達するためである。一方で、載荷点近傍は載荷板を介して支圧による圧縮応力が作用し、同時に曲げによる圧縮応力が作用する2軸の圧縮応力状態となっているため、その拘束効果によってコンクリートの強度が増加するものと考えられる。したがって、その効果を表現することで早期の荷重低下を抑制できる可能性があるため、載荷点近傍要素の圧縮強度を実強度の2倍、3倍と意図的に増加させて、それが荷重-変位関係に与える影響について検討を行うこととした。ここで、コンクリートの圧縮強度を増加させた要素は、載荷板の直下とその両隣の要素とした。なお、引張強度は、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準拠して圧縮強度から設定しているが、圧縮強度の増加に伴って引張強度も増加させると、圧縮鉄筋の平均降伏強度が大幅に低下して引張鉄筋に先行して圧縮鉄筋が降伏に至る結果が得られたため、ここでは圧縮強度のみを変化させることとした。すなわち、圧縮強度は増加させているが、引張強度は実圧縮強度に相当する引張強度( $f_t=2.0\text{MPa}$ )としている。

図-4(d)には、載荷点近傍要素の圧縮強度を変化させた各ケースの荷重-変位関係を比較して示している。

図より、載荷点近傍要素の圧縮強度を変化させてもひび割れ発生から鉄筋降伏に至るまでの挙動に対してはほとんど影響を与えないが、荷重が早期に低下する現象は改善されていることが分かる。実強度である $1.0f'c$ としたCASE1では変位24mm程度で荷重が低下しているが、 $2.0f'c$ としたCASE8では28mm程度、 $3.0f'c$ としたCASE9では30mm時点においても荷重低下は生じていない。これより、本検討は圧縮領域における破壊の局所化に起因する早期の荷重低下を改善することを目的として試みたものであるが、載荷点近傍の拘束効果によるコンクリート強度の増加を意図的に考慮することである程度改善されることが明らかとなった。しかしながら、この手法はあくまでも数値解析上のテクニックの1つであり、本質的な対応策ではないことに留意する必要がある。前述のように、圧縮破壊エネルギーの概念を用いて要素寸法依存性を低減し、かつ載荷点近傍の拘束効果による

コンクリート強度の増加を適切に考慮可能な材料構成則を適用しなければならない。

#### 5. まとめ

本検討では、分散ひび割れモデル-分散鉄筋モデルによる曲げ破壊型のRC梁部材の非線形挙動解析に着目し、モデル化の違いが解析結果に及ぼす影響について検討を行った。具体的には、要素分割、引張領域におけるコンクリートの引張応力-ひずみ関係の軟化勾配(付着パラメータ)および圧縮領域のモデル化が荷重-変位応答に与える影響について検討を行った。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) 要素分割の影響は鉄筋降伏に至るまでの領域では小さいが、ポストピーク領域では大きい。したがって、ポストピーク領域を含めて精度良く予測する必要がある場合には、引張領域のみならず圧縮領域に対しても破壊エネルギーの概念を用いる等、要素寸法依存性を低減可能な構成則を適用する必要がある。
- 2) 引張領域におけるRCゾーンの付着パラメータは解析結果に大きな影響を与えるため、その設定にあたっては十分に留意する必要がある。
- 3) 圧縮領域におけるRCゾーンの付着パラメータは解析結果にほとんど影響を与えない。
- 4) 圧縮領域における破壊の局所化に起因する早期の荷重低下現象は、載荷点近傍の拘束効果によるコンクリート強度の増加を意図的に考慮することで、ある程度改善される。

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「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」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始め、委員各位から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) 関下裕太, 川口和広, 小林竜太, 宮本真一：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, 土木学会北海道支部論文報告集, 第66号, E-20, 2010.2.
- 2) 関下裕太, 川口和広, 小林竜太, 宮本真一：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, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, V-572, 2010.9.
- 3) 川口和広, 関下裕太, 小林竜太, 宮本真一：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, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, V-573, 2010.9.
- 4) 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.
- 5) 田所敏弥, 佐藤靖彦, 上田多門：鉄筋コンクリート部材の終局変形に及ぼす圧縮軟化の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, No.3, pp.1309-1314, 2001.
- 6) 2007年制定：コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2008.3.