論文　繊維補強鉄筋コンクリート部材のひび割れ性状に関する解析的検討

磯部　岳[*1]・竹山　忠臣[*2]・佐々木　亘[*3]・内田　裕市[*4]

要旨：本研究では，繊維補強コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材を対象として，コンクリートの引張軟化特性を変化させた場合の一軸引張荷重下における荷重－変位関係およびひび割れの分散性を FEM 解析によって検討を行った。材料試験で得られた材料特性を用いて解析すると，テンションスティフニング効果および鉄筋降伏後の荷重を過大に評価し，引張残留強度を半分程度低減することで荷重―変位関係は実験結果とほぼ一致し，試験体中央の変位－鉄筋ひずみ関係も鉄筋ひずみが 1000μ 程度までは実験結果とほぼ一致した。

キーワード：繊維補強コンクリート，鉄筋コンクリート，有限要素法，ひび割れ性状，引張軟化特性

1. はじめに

繊維補強コンクリートに関する研究は古くから行われており，繊維補強の目的の一つにひび割れ幅の抑制が挙げられる。繊維補強コンクリート中の繊維が効果を発揮するのはひび割れ発生後であり，繊維がひび割れ面に架橋することで，引張力を受け持つ。筆者らは[1),2)]ひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮したコンクリート部材の引張性能の評価を目的として，鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した部材を対象に両引き試験により実験的に検討してきた。今後，ひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮した部材設計を行うためには実験的検討のみでなく，数値解析による評価も必要であると考えられる。

近年，数値解析によるひび割れの進展や付着挙動を解明する研究が進められており[3)]，有限要素法（以下 FEM）と剛体バネモデル（以下 RBSM）によるものがある。車谷ら[4)]は FEM 解析によって鉄筋引抜き時に鉄筋周方向に発生する Goto crack の進展を再現している。また Salem ら[5)]はコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の付着挙動を再現している。小倉ら[6)]は RBSM で繊維の架橋力に注目した破壊挙動を検討している。これらの研究により異形鉄筋の節のサイズまでモデル化することで鉄筋周囲のひび割れ状況を再現できることが分かっている。

しかしながら，これまでの研究ではひび割れ断面におけるひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係やひび割れ間隔などの詳細な検討は十分ではない。加えて鉄筋と繊維補強コンクリートを併用した場合のひび割れ性状を解析的に検討した事例は少ない。

そこで本研究では，一軸引張を受ける鉄筋コンクリート部材を対象として，まず，異形鉄筋の節のサイズまで再現したメッシュを用いて 3 次元 FEM 解析により，繊維を混入していないプレーンコンクリート試験体のひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係およびひび割れ発生状況の再現を試みた。その後，繊維補強コンクリートを用いた場合に，引張軟化特性の違いが荷重－変位関係やひび割れ挙動に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

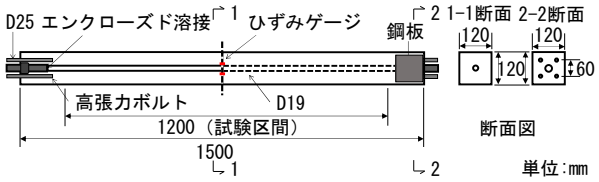
2.1 試験体

筆者ら[1),2)]が行った実験の試験体を**図－1** に示す。試験体は 1 辺が 120mm の正方形断面の中心に D19(SD345)の異形鉄筋 1 本を配置したものである。鉄筋ひずみの測定では，鉄筋とコンクリートの付着性能に与える影響を小さくするため，試験体中央の一カ所のみにひずみゲージを設置した。本実験では，端部を引っ張る構造として，試験体区間を 1200mm とした。

試験体パラメータは目標圧縮強度を 40，80，120N/mm^2 の 3 水準，引張軟化特性をプレーンコンクリートも含めた 4 水準（目標圧縮強度 40N/mm^2 は 3 水準）である。本研究ではこれらの中から目標圧縮強度が中間の水準である 80N/mm^2 の水準を対象とした。検討した試験体一覧および試験体パラメータを材料試験結果とともに**表－1**，**図－2** に示す。また，鉄筋の力学特性を**表－2** に示す。

2.2 両引き試験

本実験では，ひび割れ面における鉄筋ひずみを測定す

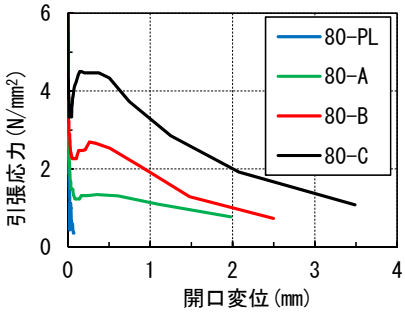


図－1　試験体

*1 岐阜大学大学院　自然科学技術研究科　環境社会基盤工学専攻　(学生会員)
*2 三井住友建設(株)　技術研究所　土木構造グループ　工修　(正会員)
*3 三井住友建設(株)　技術研究所　建設材料グループ　博士(工学)　(正会員)
*4 岐阜大学　工学部社会基盤工学科教授　博士(工学)　(正会員)

表－1　試験体パラメータ，材料試験結果

名称	粗骨材 G	目標圧縮強度 (N/mm^2)	目標引張軟化特性		圧縮強度試験結果		割裂強度試験結果		曲げ試験結果
			引張軟化水準	繊維混入量 (vol.%)	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)	ひび割れ発生強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
80-PL	Gmax 15mm	80	PL	-	92.6	41.9	4.77	4.49	4.72
80-A			A	0.35	91.7	41.6	-	4.98	5.46
80-B			B	0.75	94.0	42.0	-	4.86	7.62
80-C			C	1.5	94.9	44.2	-	5.74	12.99

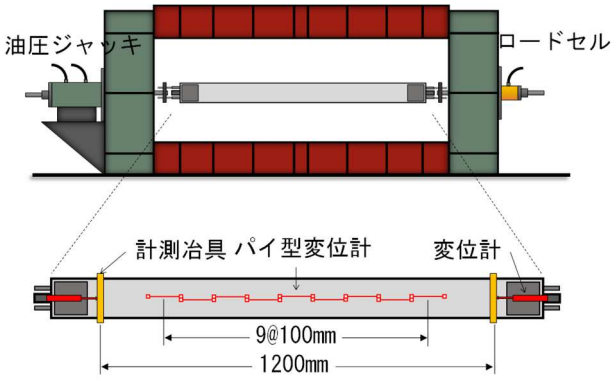


図－2　引張軟化曲線

表－2　鉄筋の材料試験結果

鉄筋径 材質	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
D19 SD345 異形棒鋼（竹節）	389.4	184.6	573.6

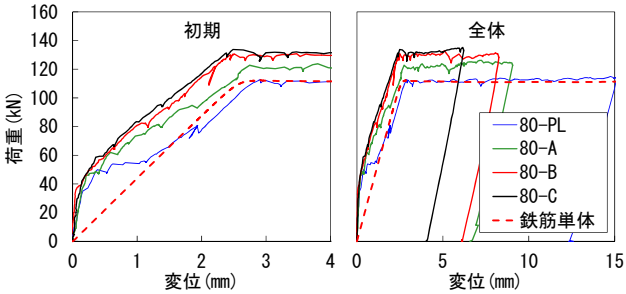
るため，鉄筋ひずみゲージを設置した試験体中央の断面に予めひび割れを導入 [1]してから両引き試験を実施した。なお，ひび割れ導入直後の鉄筋の残留ひずみは 100～400μ 程度であり，ひび割れ幅は 0.005～0.100mm 程度であった。また，載荷試験までひび割れが開閉しないように，試験体の両側面に鋼板を設置し，万力で挟み込んで固定した。計測項目は荷重，変位，鉄筋ひずみ，パイ型変位計による開口幅とし，計測項目を**図－3** に示す。変位の計測は試験体端部から 150mm の位置に変位計を設置し，開口幅は試験体両面に検長 100mm，容量 5mm のパイ型変位計を軸方向に沿って片面 9 台ずつ，計 18 箇所で測定した。



図－3　測定項目

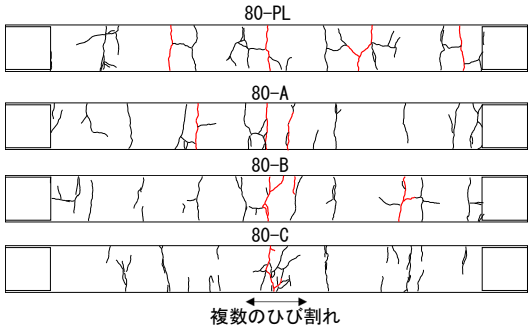
2.3 実験結果

図－4 に試験で得られた荷重－変位関係を示す。図中には鉄筋単体の応力－ひずみ関係から変換した鉄筋単体の荷重－変位も示している。80-PL の降伏荷重は鉄筋単体の降伏荷重と一致した。一方，引張軟化特性の水準が高くなるにつれて，テンションスティフニングおよび繊維の架橋効果も高くなり，降伏までの傾きが高く降伏荷重も高い結果となった。降伏以降も引張軟化特性の高い順に荷重も高くなっている。



図－4　試験結果（荷重－変位関係）

図－5 に試験体 2 体のうち 1 体の試験終了後のひび割れ図を示す。図中，赤色で示しているひび割れは 2.0mm 以上に拡幅したひび割れである。なお，鉄筋降伏以降は鉄筋降伏前に発生したひび割れの一本ないし数本が拡幅する傾向が見られたため，試験終了後のひび割れ図で比較することとした。PL 試験体と短繊維補強コンクリートのひび割れを比較すると，ひび割れ本数（ひび割れ



図－5　ひび割れ図（試験終了後）

間隔）はほぼ同程度であった。ただし，80-C では試験体中央の主ひび割れの近傍に複数のひび割れが発生する現象が見られた。また，図中，赤色で示しているように 80-PL では 4 カ所のひび割れが拡幅したのに対し，繊維補強コンクリートの試験体は 1 本ないし数本のひび割れのみが拡幅し，特に引張軟化特性が高くなるほどその傾向が強く見られた。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

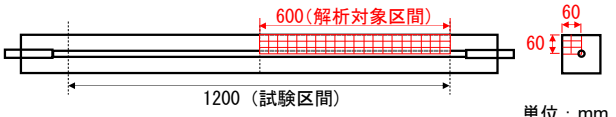
解析は汎用有限要素解析プログラム DIANA(ver10.2) を用いた。**図－6** に示すように解析対象は対称性を考慮して断面の 1/4 をモデル化した。境界条件は，**図－7** に示すように試験体の一端全面に強制変位を与え，他端の断面及び対称面を固定した。コンクリートには 8 節点ソリッド要素を用いた。

異形鉄筋のモデル及び境界要素を**図－8** に示す。鉄筋の節間隔，高さ，および形状は JIS 規格を参考し，6 節点および 8 節点ソリッド要素を用いてモデル化した。異形鉄筋の場合，鉄筋の節前面において機械的抵抗作用によって付着が発揮されるため，異形鉄筋とコンクリート界面に界面要素を設けた。界面要素の材料特性は既往の研究 [3]を参考にした。このモデルでは節前面のみで力の伝達が行われるようにしており，鉄筋の軸方向と平行の界面 A は摩擦，付着力の影響は小さいとみなし剛性を十分低くし，節の斜面にあたる界面 B は，支圧抵抗力が発揮されるように圧縮に対しては十分に高い剛性，引張に対してはほぼゼロの剛性とした。

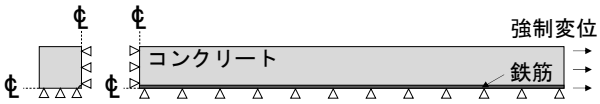
コンクリートの材料特性値は材料試験結果 [1]から決定し，ポアソン比は 0.2 とした。コンクリートは全ひずみ理論に基づく回転ひび割れモデルを使用した。圧縮側の構成則は完全弾塑性モデルとし，引張側の構成則はひび割れ発生強度まで線形弾性，ひび割れ後の軟化は材料試験を近似するモデルとした（**図－9**）。また，実験では試験体中央にひび割れ導入後に引張載荷試験を行ったため，解析では試験体中央のひび割れ発生強度はプレーンコンクリートで 2N/mm^2，繊維補強コンクリートで各水準の引張残留強度とした。鉄筋要素では節までモデル化しているため，鉄筋単体を一軸引張しても軸方向のひずみは一様にはならず，鉄筋単体の見かけの降伏荷重は材料試験で得られた荷重より大きくなった。そのため，降伏強度を低減した bi-linear の弾塑性体とし，降伏以降の傾きはヤング率の 1/300 とした。ポアソン比は 0.3 とした。本解析で使用した材料定数を**表－3** に示す。

3.2 プレーンコンクリート試験体のひび割れ分散性

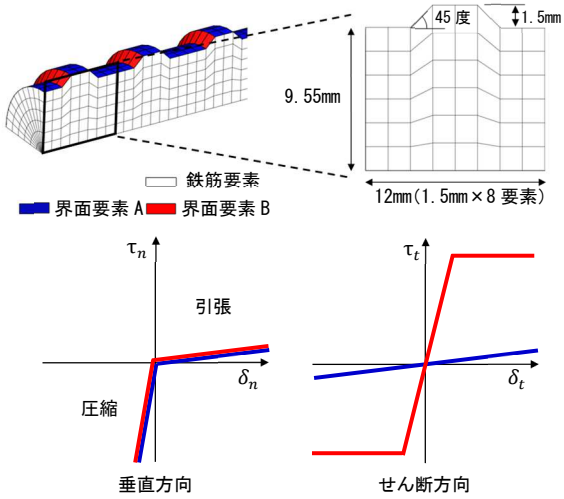
繊維の引張分担力を評価するために，まず，プレーンコンクリート試験体を対象に鉄筋ひずみとひび割れ幅



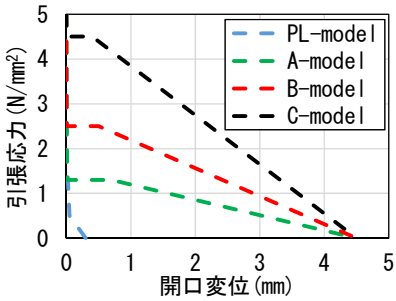
図－6　解析対象区間



図－7　境界条件



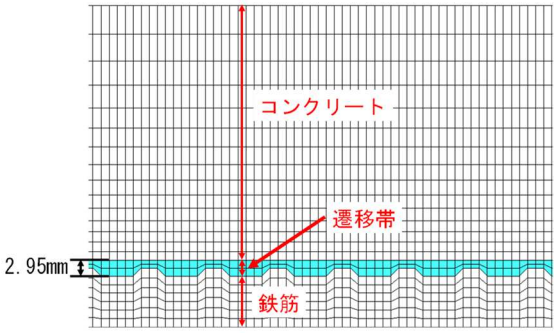
図－8　異形鉄筋モデル及び境界要素



図－9　解析に用いた引張軟化曲線

表－3　材料定数

コンクリート		鉄筋	
ヤング率	42.0kN/mm^2	ヤング率	175.0kN/mm^2
ポアソン比	0.2	ポアソン比	0.3
圧縮強度	93.0N/mm^2	降伏強度	357N/mm^2
ひび割れ発生強度	5.0N/mm^2		



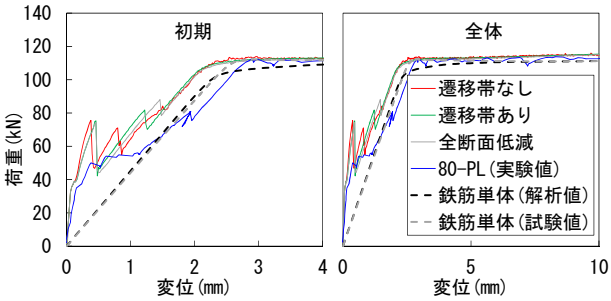
図－10　遷移帯を有するモデル

の関係，およびひび割れの発生状況について検討した。既往の研究 [3]では鉄筋コンクリートの付着挙動に及ぼす影響因子について FEM 解析による検討が行われており，付着挙動は鉄筋周囲の非常に狭い範囲のコンクリートの圧縮強度に依存していることが報告されている。そこで本検討では 80-PL 試験体を対象として**図－10** に示すように鉄筋周辺に一般部のコンクリートと強度が異なる領域（以下では遷移帯と呼ぶこととする）を設けて解析を行った。遷移帯のコンクリートの圧縮強度は一般部の強度の 1/4 倍と極端に低減させた。加えて試験体全体のコンクリート強度を遷移帯と同じとした場合の解析も行った。

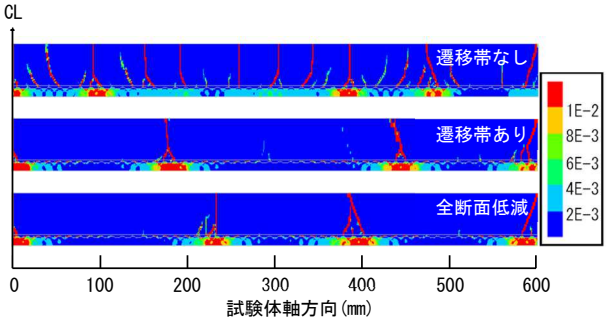
図－11 に解析で得られた荷重－変位関係を示す。解析での変位は実験と比較できるよう 10mm まで行った。また，同図には鉄筋単体の解析結果も示している。遷移帯の圧縮強度を変化させても荷重－変位関係の解析結果は同程度の挙動となった。一方，実験と解析を比較すると，鉄筋降伏以前では実験と解析で差が生じた。これは解析においてコンクリートの収縮を考慮していないことや実験では試験体中央に予めひび割れを導入しているためと思われる。コンクリートに収縮を与えると鉄筋が変形を拘束しコンクリートに引張応力が生じ,ひび割れ後の剛性は収縮を考慮しない場合に比べて低くなると考えられる。

図－12 に鉄筋降伏後（変位 5mm 時）の主ひずみ分布を示す。遷移帯のないモデルではひび割れが試験体全体に分散しており，それに伴って鉄筋も降伏している。実験では**図－5** に示したとおり，試験体全長で 4 カ所のみでひび割れが拡幅していることから，この解析では実験のひび割れの発生状況を再現できていないと言える。一方，遷移帯を有するモデルはひび割れの局所化が再現されており，その部分のみひずみが増大し鉄筋が降伏した。

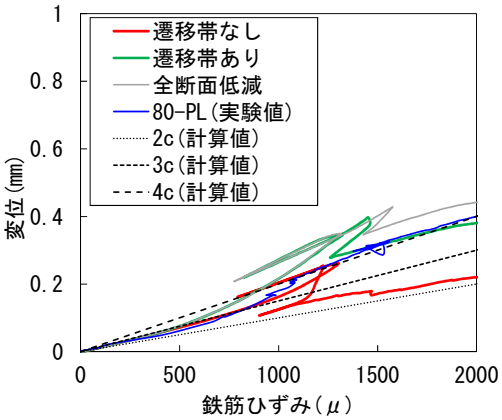
図－13 に試験体中央で測定された変位と鉄筋ひずみの関係を示す。なお，実験において，試験体中央の変位は検長 100mm 区間の変位としているため，解析でも実験と同様の位置にあるコンクリート表面の節点の変位を出力した。ここで，ひび割れ幅は鉄筋ひずみに比例し，その比例定数はかぶりの 4 倍程度になると言われており，同図には参考のため，比例定数をかぶり c の 2，3，4 倍とした直線も示す。実験では鉄筋ひずみ 1000μ 付近で変位が増大し，かぶりの 4 倍の直線に漸近したのに対し，遷移帯のないケースでは鉄筋ひずみ 500μ までの領域は実験と整合しているが試験体中の他の断面でひび割れが生じることにより試験体中央の開口幅は小さくなり，鉄筋ひずみ 1000μ 付近ではかぶりの 2 倍の直線に漸近する挙動となった。一方，遷移帯を設けたケースではひび割れが局所化し，鉄筋ひずみ 1000μ 付近でかぶりの 4 倍の



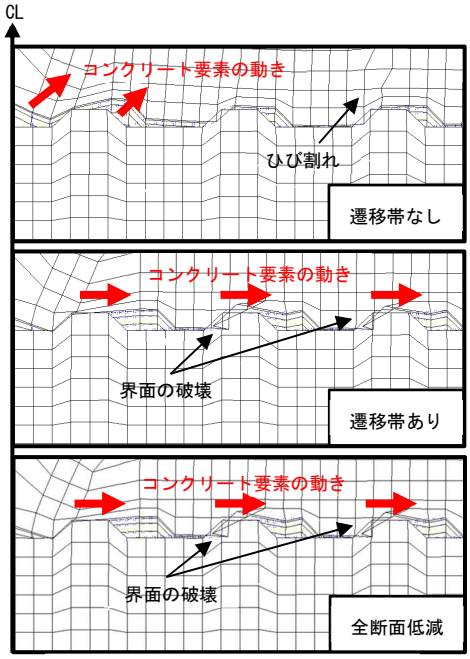
図－11　PL 試験体の荷重－変位関係



図－12　鉄筋降伏後の主ひずみ分布



図－13　試験体中央の変位と鉄筋ひずみの関係



図－14　ひび割れ直後の変形図

直線に漸近する実験と近い挙動となった。

ここで，遷移帯を有さないモデルと遷移帯を有するモデルの違いを検討するため，鉄筋周囲の変形を比較する。**図－14** に試験体中央付近のひび割れ直後の変形図を示す。変形は極微小であるため同図では変形を 45 倍にして表示している。遷移帯を有さないモデルではコンクリート要素が鉄筋から引き離されるように変形し，鉄筋の節前面で引張応力が局所的に生じひび割れが生じたと思われる。一方，遷移帯を有するモデルでは鉄筋軸方向に沿って鉄筋が移動したような変形となり，鉄筋近傍の界面が鉄筋に潰されるように破壊が進行した。

このことから，遷移帯のないモデルではひび割れが分散して発生し，実験のひび割れ性状を再現できないが，鉄筋とコンクリート界面に圧縮強度を低減させた遷移帯を設けることでひび割れは局所化し実験のひび割れ性状に近い結果となった。

以上の結果は全断面のコンクリートの圧縮強度を低減させた場合でも遷移帯を設けたモデルと同程度の結果となり，圧縮強度の影響範囲は鉄筋の極近傍のみに依存することが示された。そのため，以下の本検討においても遷移帯を鉄筋から約 3mm の厚さとした。

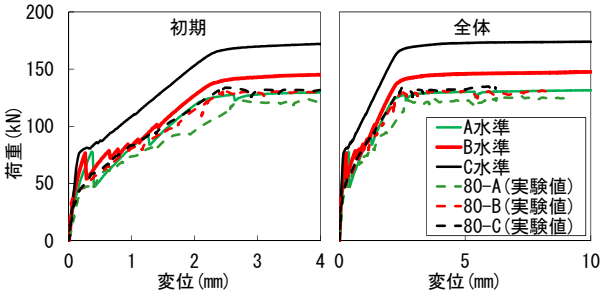
3.3 短繊維の引張分担力の解析的検討

80-PL 解析において鉄筋とコンクリートの界面に圧縮強度を低減した遷移帯を設けることでひび割れ性状が実験結果に近づくことがわかった。そこで遷移帯を設けたモデルを用いて繊維補強コンクリートの引張軟化特性を変化させた A，B，C 水準の解析を行うことで短繊維の分担による評価を行った。

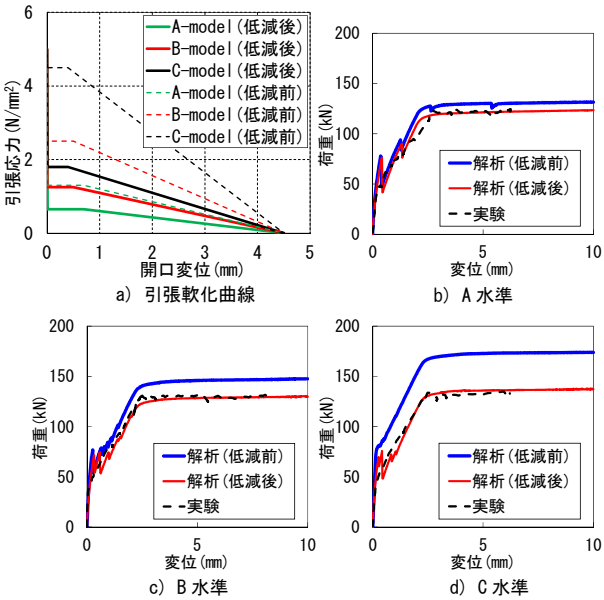
図－15 に解析と実験から得られた荷重－変位関係を示す。すべての引張軟化水準において，テンションスティフニング効果および鉄筋降伏後の荷重は実験結果より高くなっており，引張軟化特性が高くなるほど，実験との荷重差が大きく，材料試験で得られた値を用いると過大に評価していると言える。

そこで，実験と同程度の挙動となるまで引張残留強度を低減させることとした。**図－16** に引張残留強度を低減した引張軟化曲線と，その解析によって得られた荷重－変位関係を示す。実験値と同定させた結果，引張残留強度を引張軟化水準 A，B では材料試験で得られた引張残留強度の 0.5 倍，C では基準の 0.4 倍低減させる結果となった。これは，引張軟化曲線は JCI 試験方法 [7]に準じ，切欠きはりの三点曲げ試験によって得られた荷重－開口変位曲線を逆解析することで算出するため，ひび割れ性状に違いがあることや，材料試験に用いられた試験体と一軸引張試験に使用した試験体では，寸法や断面形状が異なっていることが考えられる。要因特定は今後の課題であるが，解析で繊維補強コンクリートを扱う場合は引張残留強度を適切に設定する必要があると言える。

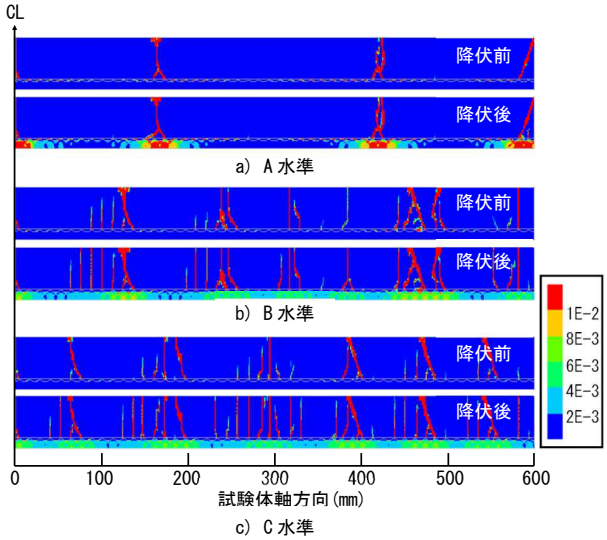
図－17 に引張残留強度を低減させた解析における鉄筋降伏前後（降伏前は荷重 100kN，降伏後を変位 5mm 時）の主ひずみ分布を示す。引張軟化特性の低い A 水準では PL 水準と同様に数本のひび割れが鉄筋降伏前に発生し，鉄筋降伏後に新たなひび割れが発生することなく，鉄筋降伏前に発生したひび割れのみが拡幅していく局所化が



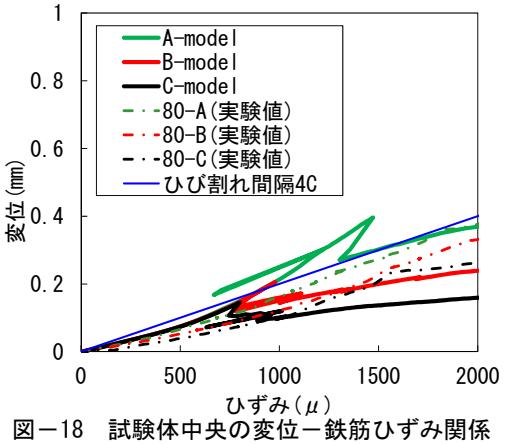
図－15　荷重－変位関係



図－16　引張残留強度低減後の荷重－変位関係



図－17　鉄筋降伏前後の主ひずみ分布



図－18　試験体中央の変位－鉄筋ひずみ関係

生じた。引張軟化特性 B，C 水準では，数本のひび割れが鉄筋降伏前に発生し，そのひび割れ近傍に表面まで達していない微細なひび割れの進展がみられる。このひび割れは荷重の増加と共に，主ひび割れの近傍に新たなひび割れとして発生する。この傾向は引張軟化特性が高くなるほど顕著に生じている。**図－5** に示した実験のひび割れ図と比較すると，引張軟化特性の低い A 水準は実験結果と整合している。引張軟化特性が高くなる B 水準は解析で得られた主ひずみ近傍に複数のひび割れが発生する傾向は見られなかったが，引張軟化特性の最も高い C 水準の試験体中央で解析と同様の主ひび割れの近傍に複数のひび割れが発生しており，解析と同様の傾向を示した。

図－18 に解析と実験から得られた試験体中央の変位－鉄筋ひずみ関係を示す。なお，変位は**図－13** 同様に検長 100mm の開口幅としている。解析は引張残留強度を低減して得られた挙動である。引張軟化水準が高くなるほど同一の鉄筋ひずみの変位は小さくなっており実験と同様の挙動となった。実験値と比較すると，鉄筋ひずみ 1000μ 前後の領域まではほぼ一致している。一方，鉄筋ひずみ 2000μ での変位は， A 水準では実験値と解析値はほぼ一致したのに対し，B，C 水準では解析値が実験値より小さい値となった。**図–5**，**図–17** の実験と解析のひび割れ図および主ひずみ分布から，解析では引張軟化水準が高くなるほどひび割れは実験より分散して発生したため，同一の鉄筋ひずみにおける変位は実験値より小さくなったと考えられる。

今回の検討では圧縮強度のパラメータ [1),2)]や収縮の影響を検討していないため，今後の検討が必要である。

4.　まとめ

本検討では，鉄筋と短繊維を併用した一軸引張部材において，引張軟化特性の違いが荷重－変位関係やひび割れの分散性に与える影響を異形鉄筋の節のサイズまでモデル化した FEM 解析により検討した。以下に得られた知見を検討する。

(1) プレーンコンクリートを用いた両引き解析では，圧縮強度を低減させた遷移帯を設けることで，実験より得られたひび割れ性状および試験体中央の変位－鉄筋ひずみ関係を再現できる。

(2) 繊維補強コンクリートを用いた場合には，材料試験で得られる引張軟化特性を用いて解析すると荷重が過大に評価される。本検討では，引張残留強度を 0.4～0.5 倍程度とすることで，荷重－変位関係は再現できる。

(3) 引張軟化特性が高くなるほど主ひび割れ近傍に複数のひび割れが発生する挙動は概ね再現できる。試験体中央の変位－鉄筋ひずみ関係は鉄筋ひずみが 1000μ 程度までほぼ実験値と一致するのに対し，2000μ 程度になるとひび割れが分散して発生し，同一の鉄筋ひずみに対する変位は実験値より小さくなる。

参考文献

1) 竹山忠臣，佐々木亘，篠崎裕生，内田裕市：鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1207-1212，2018

2) 竹山忠臣，磯部岳，佐々木亘，内田裕市：鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ間隔に関する検討，第 27 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム集，pp.461-464，2018

3) 日本コンクリート工学会：コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム，pp166-177，2011.9

4) 車谷麻緒，根本優輝，岡崎慎一郎，廣瀬壮一：異形鉄筋周辺のコンクリートに形成する内部ひび割れモードの再現シミュレーション，日本計算工学会論文集，Vol.2014，No.20140008，2014

5) Hamed M. Salem，Koichi Maekawa：Pre-and Postyield Finite Element Method Simulation of Bond of Ribbed Reinforcing Bars，Journal of Structural Engineering，ASCE，130，pp671-680，2004

6) 小倉大李，国枝稔，中村光：鉄筋補強した繊維補強セメント系複合材料の引張破壊解析と架橋力に着目した破壊挙動評価，土木学会論文集 E2，Vol.72，No.3，249-267，2016

7) JCI 基準：切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法 JCI-S-002-2003