

論文 繊維補強 RC 部材の一軸引張試験における内部ひび割れの実験的検討及び分散ひび割れ－分散鉄筋モデルによる再現解析

大丸 彩希^{*1}・佐野 弘之輔^{*2}・柳田 龍平^{*3}・五十嵐 心一^{*4}

要旨：本研究では、短繊維補強コンクリート（FRCC）を用いた RC 部材における鉄筋近傍のひび割れ性状を解明するため、一軸引張試験において内部ひび割れの可視化を試み、繊維の混入による鉄筋近傍ひび割れの分散性向上を確認した。また、その荷重－変位関係の再現解析から、FRCC において鉄筋による引張硬化を考慮できるよう、付着の影響範囲における引張応力－ひずみ関係を種々検討し、それらが FRCC の破壊エネルギーと等価となるようにすることで実験結果と同様の荷重－変位関係を得られることを明らかにした。

キーワード：FRCC, 一軸引張試験, 内部ひび割れ, 分散ひび割れ－分散鉄筋モデル

1. はじめに

短繊維補強コンクリート（FRCC）は、コンクリートの引張特性を向上可能な材料であり、構造利用による部材の靱性向上、ひび割れ幅の低減に伴う耐久性向上が期待できる。FRCC は新設部材への使用だけでなく、部材の補修・補強に対しても期待されるが、短繊維を用いた RC 部材の安全性を構造解析により評価する場合、コンクリートと鉄筋を完全付着と仮定することが一般的である¹⁾。コンクリートと鉄筋の付着特性に関しては様々な検討があり、普通コンクリートにおいて鉄筋コンクリート要素は鉄筋単体よりも高い引張剛性を持つことや、RC 部材の鉄筋の平均応力－平均ひずみ曲線の降伏点は、鉄筋単体の応力－ひずみ曲線の降伏点より低いことなどが知られる²⁾。FRCC においては、繊維補強 RC の一軸引張試験から繊維混入によりひび割れ分散性が高くなること³⁾、繊維混入率の増加により部材のひび割れ発生荷重及び降伏荷重が増加し、テンションスティフニングも向上すること⁴⁾が示されている。さらに小倉ら⁵⁾は、繊維補強により鉄筋－コンクリート間の付着特性が向上するという実験的知見に基づき、付着特性が破壊挙動に与える影響を解析的に検証し、付着特性の変化によりひび割れ間隔だけでなく鉄筋降伏後の荷重－平均ひずみ関係やひび割れ進展挙動も変化することを示しており、鉄筋との付着を適切に考慮することの必要性を指摘している。このような解析的なアプローチを FEM など一般的な手法で行うことができるようになれば、より FRCC の材料特性を活かした設計ができるようになる可能性がある。

そこで本研究では、非線形 FEM により一軸引張試験の荷重－変位関係の再現を行う。解析におけるひび割れや鉄筋のモデル化方法は、[1]離散ひび割れ－離散鉄筋

モデル、[2]分散ひび割れ－離散鉄筋モデル、[3]分散ひび割れ－分散鉄筋モデルの3種類に分けられる。[1]は接合部を有する場合などあらかじめひび割れ位置を想定できる場合に有効な方法である。[2]はFRCCにおいて最も事例のある解析手法である。[3]は鉄筋の効果をコンクリートに重ね合わせ、付着の効果を平均応力－平均ひずみ関係で考慮する手法であり、モデル化や数値計算に要する時間が軽減し、要素分割によるばらつきが小さいことにより土木学会コンクリート標準示方書（以下示方書）で標準とされているが、FRCC においては事例が少なく、材料特性のモデル化方法の検討が必要である。そこで本研究では、[3]の手法を用いてFRCCの一軸引張試験を対象に再現解析を行い、解析モデルの適用性の検討を行う。

2. 繊維補強 RC 部材の一軸引張試験

2.1 一軸引張試験の概要

表－1 に使用したコンクリートの配合を、表－2 にコンクリートの材料試験結果を、図－1 に後述する計測項目とともに試験体の概要を、図－2 に切欠きはりの3点曲げ試験結果から逆解析で得られた引張軟化曲線をそれぞれ示す。試験体は、1辺が100mmの正方形断面の中心に D22（SD390、降伏強度 $f_y=421\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E_s=210\text{kN/mm}^2$ ）の異形鉄筋を一本、縦リブが試験体側面になるように配置した。また、端部補強のため D5 鉄筋を端部から 50mm 区間に配置するとともに、試験体側面に厚さ 32mm の鉄板を貼付した。さらに、D22 の端部から 50mm の区間に非付着部を設け、端部の割裂ひび割れを防いだ。試験体は長さ 400mm と 700mm のものを作製した。試験体長が 400mm の試験体では、繊維無混入と繊維混入率 1.0vol%で各 3 体ずつ作製し、内部ひび割

*1 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類環境都市コース (学生会員)

*2 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類環境都市コース (学生会員)

*3 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系助教 (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系教授 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合	Vf (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水道水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G1	粗骨材 G2	短繊維 F	SP (C×%)
vf0	0.0	37.5	61.1	165	440	1013	332	327	-	4.62
vf1	1.0	37.5	60.5	165	440	988	332	327	78.5	4.62

C：早強ポルトランドセメント，G1：G_{max}=20mm，G2：G_{max}=13mm，F：鋼繊維（両端で各2か所の曲げ加工がされた両端フック型，長さ30mm，密度7.85g/cm³，線径0.62mm），SP：高性能減水剤（カルボン酸エーテル系），

表-2 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	ひび割れ発生強度 f_{cr}^* (N/mm ²)
vf0	75.9	32.3	4.12
vf1	73.3	30.9	4.03

$f_{cr}^*=0.23f'_c{}^{2/3}$ とした計算値

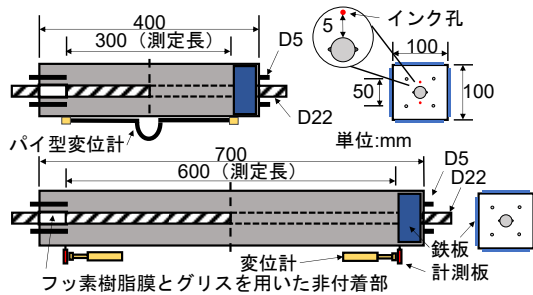


図-1 試験体概要と計測項目

れの可視化を試みた。700mmの試験体では繊維補強した試験体1体のみ作製し，降伏後までの荷重－平均ひずみ関係の取得を行った。

使用したFRCCはスランブ14cmで材料分離抵抗性があり，打ち込み時には突き棒や棒状パイプレーターを用いず型枠内に一層で流し込んだ後，気泡の除去のため型枠外側から約10秒の振動のみ与えて打ち込み終了とした。試験体は材齢24時間で脱型を行い，材齢7日まで水中養生を行った。その後，室温20℃で気中養生し，材齢19～21日に試験を行った。この材齢における圧縮強度は75N/mm²程度で繊維の有無による差は小さく，図-2の通り繊維混入によって3.14N/mm²の高い引張残留強度 f_{tk} を有するFRCCであり，ひび割れ発生強度は表-2に示す4.03N/mm²より大きい値である5.2N/mm²であった。また，この曲線下の面積として算出される引張破壊エネルギーは $G_F=7.18$ N/mmであった。

引張試験は容量1000kNの万能試験機を用い，鉄筋の端部に引張力を加えることで行った。計測項目は荷重と変位のみとし，400mm試験体では300mm検長のPI型変位計を，700mm試験体では変位計を用いて2側面で変位を測定した。端部から50mmを除いた部分を測定長とし，計測した変位をもとに試験体の平均ひずみを求めた。

2.2 内部ひび割れ可視化方法

鉄筋近傍の微細ひび割れを可視化することを目的に，Gotoら⁹⁾が行った方法を参考に，試験体の鉄筋に沿うようにシリコンゴムを設置し硬化後に引き抜くことで

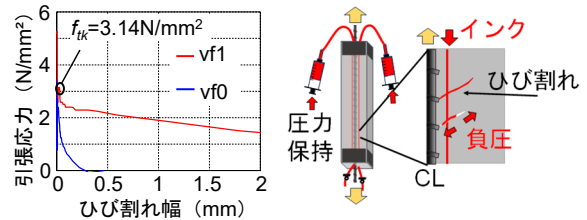


図-2 引張軟化曲線 図-3 ひび割れ可視化方法

φ1.1mmの孔を設け，載荷前にインクを注入した。図-3に概要を示す。インクの注入圧を保ちながら載荷を行い，ひび割れ発生による負圧を利用してひび割れ内にインクを行き渡らせた。除荷後，ダイヤモンドカッターを用いて鉄筋を残すように試験体を切断し，ひび割れの観察を行った。FRCCに関する従来の研究では，降伏後まで載荷した後にひび割れ観察を行っているが，その場合，低荷重段階での微細ひび割れの状況を把握できない。そこで本実験では，最大荷重以前の3段階（ひび割れ発生直後，試験体平均ひずみ500μ，800μ）まで載荷を行い，これらの各段階でひび割れの可視化を試みた。

2.3 実験結果

図-4に400mm試験体の試験で得られた荷重－平均ひずみ関係を示す。同じ試験体で比較すると，800μまでの結果はその他の場合とそれぞれ同様の挙動を示した。

図-5に内部ひび割れの結果を示す。空隙や予め設けた孔など，載荷により生じたひび割れとは異なる箇所にインク着色がみられたため，貫通ひび割れを黒線，微細ひび割れを赤線で画像データ上にプロットして示した。vf0の試験体では微細な内部ひび割れがほとんど現れず，おおよそ側面まで貫通したひび割れのみであった。一方でvf1の試験体では，初期のひずみ段階である500μ，800μの時点でも鉄筋近傍に微細な内部ひび割れが多く確認された。このことから，繊維の混入により鉄筋近傍ひび割れが分散する傾向となることが明らかである。なお，貫通ひび割れは，試験体ごとに1本あるいは2本発生し，ばらつきはあるもののひび割れ本数，ひび割れ間隔ともに，繊維の混入に関わらず同程度であった。

図-6(a)に700mm試験体の試験で得られた荷重－平均ひずみ関係を， E_s と f_y から完全弾塑性を仮定して算出される鉄筋単体の荷重－ひずみ関係ならびにコンクリートと鉄筋を複合材料とした際の理論値と共に示す。ひび割れ発生後，荷重は直ちに増加しており，降伏まで鉄筋

と RC 部材の荷重増分はおおよそ等しい。降伏以降も RC 部材は鉄筋単体と比べて大きな荷重を保持しており、ひび割れ発生後に大変形するまでコンクリートが引張抵抗を示すことがわかる。図-6(b)に鉄筋の荷重負担分を差し引いて算出したコンクリート引張応力と平均ひずみの関係を示す。コンクリートはひび割れ発生後も平均ひずみが約 0.18%まで引張残留強度 $f_{tk}=3.14\text{N/mm}^2$ と同程度の高い応力を保った。また、鉄筋降伏の直前から引張応力が低下したが、鉄筋の降伏ひずみ $\epsilon_{sy}=0.2\%$ 以降も 1N/mm^2 以上の引張応力を保ち続けた。すなわち、鉄筋降伏の前後の両方で、繊維の補強効果が現れたと言える。

以上の結果から、繊維補強により鉄筋近傍ひび割れが微細に分散し、コンクリートが高い引張応力を保ち続けることを確認した。繊維無混入の場合に生じない鉄筋近傍ひび割れを FRCC において確認できたことから、ひび割れ発生直後の段階から、繊維無補強の RC 部材と異なるテンションステフニング効果を発揮している可能性があると考えられる。

3. 一軸引張試験の再現解析

図-6(b)の通り、FRCC は急激に軟化することなく応力を保持することから、実験挙動を再現する場合には FRCC の材料特性のモデル化方法について検討が必要である。そこで、700mm 試験体を対象に解析を行った。

3.1 モデルの概要

非線形 3 次元 FEM 解析に汎用解析コード DIANA (ver.10.9) を用い、コンクリートは後述する An 7 が定義する RCzone 最大面積に近い値で設定できるように要素寸法 8.33mm の 20 節点ソリッド要素でモデル化した。コンクリートのひび割れモデルは固定ひび割れモデルとし、圧縮挙動は放物線モデルに圧縮強度から算出した圧縮破壊エネルギーを用いた。解析は主に分散ひび割れ-分散鉄筋モデルを適用するが、初めに分散ひび割れ-離散鉄筋モデルの結果を確認することとした。

(1) 分散ひび割れ-離散鉄筋モデル

図-7 に解析モデルの概要を、図-8 にコンクリート引張特性の材料モデルを示す。対称性を考慮して軸方向に 1/2 でモデル化する。境界条件はモデルの一端の軸方向変位を固定し、他端に水平方向の強制変位を与えた。

引張特性は、引張軟化曲線の軟化域の形状は図-2 の実験結果を用い、ひび割れ発生強度は圧縮強度から算出した $f_{cr}=4.03\text{N/mm}^2$ とした。鉄筋要素はトラス要素とし、応力ひずみ関係は完全弾塑性型とした。コンクリートとの界面特性には島ら⁸⁾の付着応力-すべり関係を用いた。

(2) 分散ひび割れ-分散鉄筋モデル

対称性を考慮して軸方向に 1/2、断面の 1/4 をモデル化し、境界条件は、試験体の一端の RC 領域に強制変位を

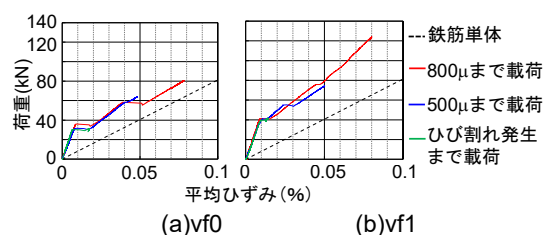


図-4 400mm 試験体の荷重-平均ひずみ関係

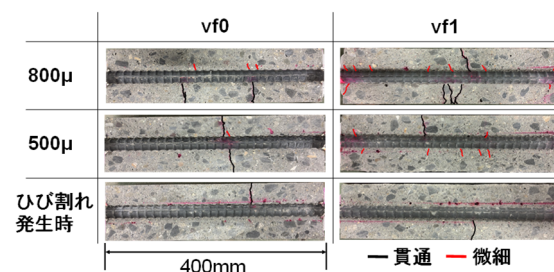


図-5 400mm 試験体のひび割れ性状

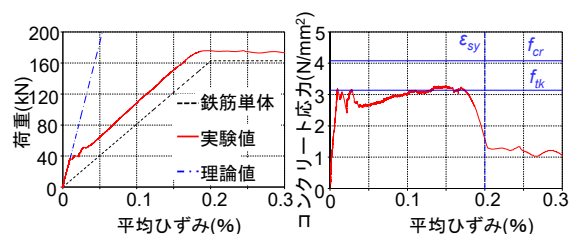


図-6 700mm 試験体の実験結果



図-7 境界条件

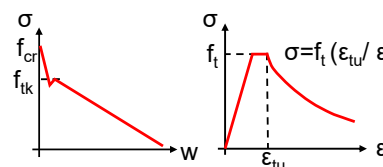


図-8 コンクリート引張特性の材料モデル

与え、他端の断面及び対称面を拘束した。コンクリートと軸方向鉄筋の付着を考慮するため、無筋領域 (PLzone) と鉄筋領域 (RCzone) の2種類に分ける方法を用いる⁷⁾。PLzoneは付着の影響を考慮しない領域であり、普通コンクリートであれば一般に無筋コンクリートの引張軟化モデルを用いるため、ひび割れ発生後の引張軟化勾配が急であり、応力の解放が大きく、ひび割れが急激に開口しやすい。一方、RCzone では、一般的には図-8(b)のようなべき関数モデルによりひび割れ発生後

の引張軟化勾配を緩やかにし、応力の解放を小さく仮定する。本研究では、FRCC の引張特性として、図-8 に示すように PLzone には引張軟化曲線の実験結果を、RCzone にはべき関数モデルを用いる。また、RCzone の範囲は式(1)～(3)が提案されている⁷⁾。

$$h_{max} = K \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot d_p \cdot \sqrt{\frac{f_y}{f_t}} \quad (1)$$

$$h_{max}^2 = A_{cmax} \quad (2)$$

$$K = \left(\frac{t_c - d_p}{5.5d_p} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$t_c < d_p \rightarrow K = 0, t_c > 6.5d_p \rightarrow K = 1$$

ここで、 h_{max} ：RCzone の最大高さ、 d_p ：鉄筋径、 f_y ：鉄筋降伏強度、 f_t ：コンクリート引張強度、 A_{cmax} ：RCzone の最大面積、 K ：かぶりに関する補正係数、 t_c ：かぶり厚さである。本研究では、An らの最大面積 A_{cmax} を基準とし、この領域の大きさの影響についても検討を行うこととした。また、鉄筋要素は RCzone のソリッド要素に鉄筋の効果を重ね合わせ、示方書に示される平均応力-平均ひずみ関係を用いた。

3.2 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルの解析結果

図-9 に解析と実験から得られた荷重-平均ひずみ関係を示す。解析値は、ひび割れ発生後の二次剛性が大きく、降伏後の荷重も大きくなっており、テンションステイニングの効果が実験に比べて大きいといえる。また、本解析では異なる境界条件を有する鉄筋引抜き実験から定式化された普通コンクリートと鉄筋の付着応力すべり関係を用いている。この再現性の向上のためには、境界条件や繊維補強効果も考慮した鉄筋と FRCC の一般化された付着応力すべり関係が必要と考えられ、今後の課題といえる。

3.3 分散ひび割れ-分散鉄筋モデルの解析結果

分散ひび割れ-分散鉄筋モデルを用いた解析における FRCC の材料特性のモデル化方法について、引張強度 f_t 、RCzone 面積、軟化開始ひずみ ε_{tu} 、引張軟化勾配を決定する付着パラメーター C をパラメーターとして種々検討し、これらが一軸引張試験の荷重-平均ひずみ関係に及ぼす影響を検討した。

(1) 引張強度の影響

図-10 に RCzone の引張強度を変化させた際の解析結果を示す。ここでは RCzone 面積は式(2)より求められる最大面積 $A_{cmax}=84 \times 84\text{mm}$ 、軟化開始ひずみ $\varepsilon_{tu}=0.02\%$ 、付着パラメーター $C=0.4$ とした。磯部ら⁹⁾は、同様の解析において引張強度を引張残留強度 f_{tk} とし、これを低減させることで実験のひび割れ発生荷重を再現できると報告している。これを参考に、本解析においても同様に引張強度を引張残留強度に低減させた $f_{tk}=3.14\text{N/mm}^2$ と、引張強度を圧縮強度から算出した値 $f_{cr}=4.03\text{N/mm}^2$ の2水

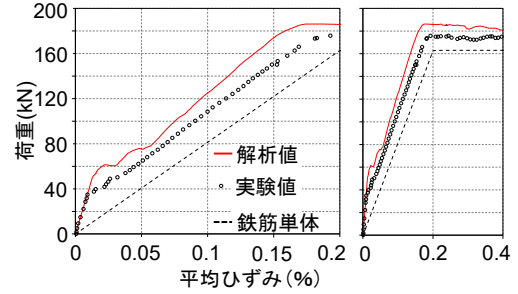


図-9 分散ひび割れ-離散鉄筋モデル解析結果

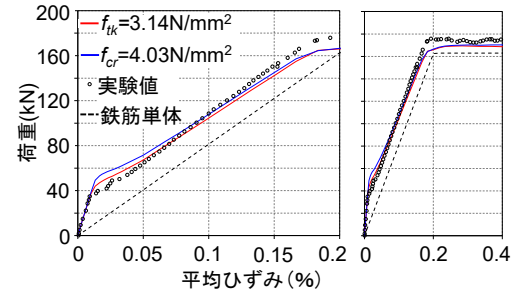


図-10 荷重-平均ひずみ関係
(引張強度 f_t の影響)

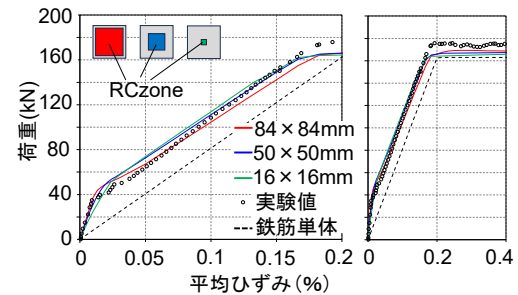


図-11 荷重-平均ひずみ関係
(RCzone 面積の影響)

準で解析を行った。

$f_{cr}=4.03\text{N/mm}^2$ の解析結果は、実験値と比較してひび割れ発生荷重が大きく、二次剛性は小さく、降伏後の荷重が小さくなった。引張強度を低減させると $f_t=4.03\text{N/mm}^2$ の場合よりひび割れ発生荷重が低くなり、実験と近い挙動となった。一方、降伏後の荷重はほとんど変化しなかった。

(2) RCzone 面積の影響

前項の検討から、以降の解析では RCzone で $f_{tk}=3.14\text{N/mm}^2$ とし、軟化開始ひずみ $\varepsilon_{tu}=0.02\%$ 、付着パラメーター $C=0.4$ とした。

図-11 に、RCzone 面積の影響を検討するために面積を $50 \times 50\text{mm}$ 、 $16 \times 16\text{mm}$ と設定した場合の荷重-平均ひずみ関係を、面積 $84 \times 84\text{mm}$ (最大面積 A_{cmax}) と設定した解析結果とともに示す。式(1)より、この面積は鉄筋降伏強度の変化により増減するが、解析では载荷中も一定の面積を保つものと仮定している。結果的に、平均ひずみ 0.05% 以降から降伏までの剛性は RCzone 面積を

変えてもほとんど変化しないことが確認された。一方、初期剛性と降伏後の荷重については最大面積とすることで実験に近い値となった。

(3) 引張軟化開始ひずみ ϵ_{tu} の影響

前項までの検討より、引張強度 $f_t=f_{tk}=3.14\text{N/mm}^2$ ，RCzone は最大面積 A_{cmax} ，付着パラメーター $C=0.4$ とした。軟化開始ひずみの変化が荷重－平均ひずみ関係に与える影響を検討するため、示方書に定められる $\epsilon_{tu}=0.02\%$ とした場合、ひび割れ発生強度時のひずみ $\epsilon_{tu}=0.013\%$ とした場合、図－6(b)の実験結果よりコンクリート応力を保持した後に軟化を開始するひずみ $\epsilon_{tu}=0.18\%$ の場合の3水準で解析を行った。

図－12 に結果を示す。図より、 $\epsilon_{tu}=0.02\%$ では実験値と比較して二次剛性が小さく、降伏後の荷重も小さくなった。これをひび割れ発生強度時のひずみ $\epsilon_{tu}=0.013\%$ とした場合も大きな変化はなく、同様の挙動であった。一方、実験と同様に $\epsilon_{tu}=0.18\%$ まで引張応力が保持されるとした場合は二次剛性が実験と近くなり、実験値と概ね同じ荷重で降伏を向かえた。

(4) 付着パラメーターCの影響

前項までの検討から、軟化開始ひずみ $\epsilon_{tu}=0.18\%$ ，引張強度 $f_t=f_{tk}=3.14\text{N/mm}^2$ ，RCzone 面積は最大面積 A_{cmax} とした。コンクリート応力は式(4)で表される。

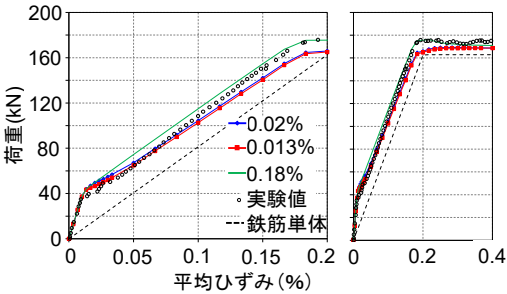
$$\sigma_c = f_t (\epsilon_{tu} / \epsilon_c)^C \tag{4}$$

式(4)の付着パラメーター C が荷重－平均ひずみ関係に与える影響を検討するため、示方書で定められる $C=0.4$ の場合と、図－8(b)のべき関数モデルから計算される破壊エネルギー G_F が実験値の $G_F=7.18\text{N/mm}$ と等しくなるように定めた $C=0.188$ の場合の2水準で解析を行った。

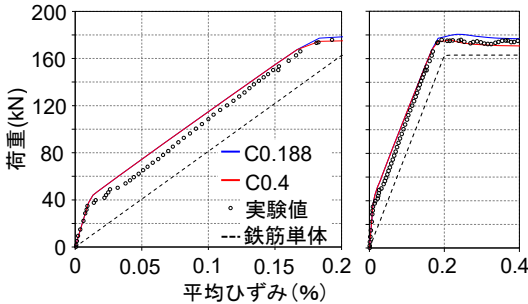
図－13 に結果を示す。図より、降伏までは同等の挙動となり、その後は $C=0.4$ の場合に実験値よりも荷重が低くなった。一方で C を小さくすることで降伏後の荷重が大きくなった。また、 C の値に関わらず、ひび割れ発生時の荷重は実験値より大きい値となった。これを小さくすることでより再現度が高い解析となると考えられる。

(5) 引張残留強度の低減

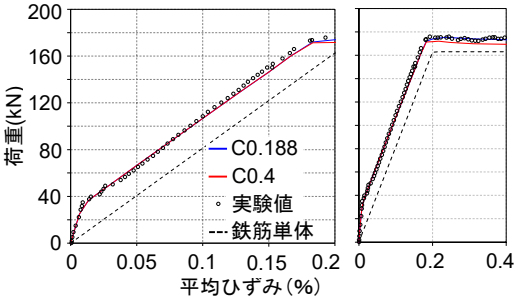
前項までの検討より、RCzone 面積は最大面積 A_{cmax} ， $\epsilon_{tu}=0.18\%$ とし、ひび割れ発生時の荷重が実験値と同程度となるよう引張残留強度 f_{tk} を低減させると 2.0N/mm^2 ($0.63f_{tk}$)となった。 2.0N/mm^2 に低減させた場合の付着パラメーター C の変化が荷重－平均ひずみに与える影響を検討した結果を図－14 に示す。図－13 の $f_{tk}=3.14\text{N/mm}^2$ の結果と同様に降伏以前の挙動に影響はないものの、 C が大きいほど降伏後の荷重が小さくなり、 $C=0.188$ としたときに降伏後の荷重が実験値に近い値となった。本研究のFRCCは高強度のマトリクスを有するため、普通強度の場合に比べて大きな収縮ひずみが生じていたものと



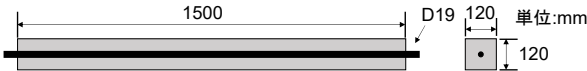
図－12 荷重－平均ひずみ関係
(引張軟化開始ひずみ ϵ_{tu} の影響)



図－13 荷重－平均ひずみ関係
(付着パラメーターCの影響)



図－14 荷重－平均ひずみ関係
($f_t=2\text{N/mm}^2$ における付着パラメーターCの影響)



図－15 解析で対象とした試験体寸法

表－3 コンクリートの力学特性

圧縮強度 f'_c (N/mm^2)	引張残留強度 f_{tk} (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (kN/mm^2)
94.0	2.7	42.0

表－4 解析に用いた材料定数

引張強度 f_t (N/mm^2)	軟化開始 ひずみ ϵ_{tu}	付着 パラメーター C
1.7 (=0.63 f_{tk})	0.001	0.2

推察される。すなわち、載荷開始からひび割れ発生までに要する引張りひずみは無収縮の場合より小さくなることから、引張残留強度を低減しない場合には実験と解析でひび割れ発生荷重に差が生じたと考えられる。収縮ひずみの影響を考慮してモデル化することを今後の課題としたい。

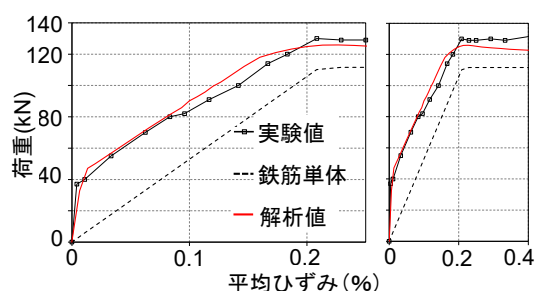


図-16 磯部らの試験体の荷重-平均ひずみ関係

3.4 圧縮強度と寸法の異なる実験の再現解析

磯部ら⁹⁾が実施した FRCC 部材の一軸引張試験を対象に前節のモデル化手法により解析を行う。図-15 に試験体の概要を、表-3 に実験時のコンクリートの力学特性を、表-4 に解析に用いた材料定数を示す。また、図-16 に実験結果を後述する解析結果と併せて示す。使用鉄筋は D19 ($f_y=389.4\text{N/mm}^2$, $E_s=184.6\text{kN/mm}^2$) である。前節で得られた解析結果を踏まえ、引張強度は、RCzone に引張残留強度 f_{tk} を 0.63 倍に低減させた値を、PLzone に引張軟化曲線の実験結果を用いた。RCzone 面積は式(2)より得られる最大面積 A_{cmax} を、付着パラメーター C は、図-8(b)のべき関数モデルから G_F を算出すると実験値と等しくなる $C=0.2$ を用いた。図-16 の実験結果から、ひずみ 0.1%まで荷重の増分が鉄筋と等しく、ここまでコンクリートが引張応力を保持しているとわかる。そこで軟化開始ひずみ ε_{tu} は 0.1%とした。

解析結果は初期剛性、二次剛性ともに実験を再現できているが、実験値よりひび割れ発生時の荷重がやや大きく、降伏後の荷重は小さかった。この要因として、コンクリートの圧縮強度の違いや、かぶり c と鉄筋径 D の比 c/D の違いが挙げられる。磯部らの圧縮強度は 94N/mm^2 と本研究より高く、先述したように収縮の影響がさらに大きいと考えられる。また、飯塚ら¹⁰⁾は、最大付着応力やその際のすべり量は c/D と相関関係があることを示しており、本実験で用いた試験体は $c/D=1.75$ 、磯部らは $c/D=2.64$ である。普通コンクリートでは c/D が 2 以上では付着応力、すべり量ともに一定になるとしているが、FRCC においては明らかになっていない。また、最大付着応力は、コンクリート圧縮強度の 1/2 乗に比例するとしており、この違いを考慮できていないことも挙げられる。今後、 c/D や圧縮強度 f'_c の違いによる影響の検討が必要と考えられる。

4. まとめ

FRCC の一軸引張試験とその分散ひび割れ-分散鉄筋モデルを用いた解析から材料モデルを検討した。以下に本研究の範囲内で得られた知見を示す。

1) 内部ひび割れ性状を観察した結果、繊維の混入に

より鉄筋近傍ひび割れの分散性が向上した。

- 2) RCzone の面積を変化させてもテンションステイニングには大きな影響が無いことが確認された。
- 3) 付着の影響のない PLzone には通常の FRCC の引張特性を、付着の影響範囲である RCzone では、ひび割れ発生強度には FRCC の引張残留強度を低減させた値を用いることでひび割れ発生直後までの挙動を再現可能であった。
- 4) テンションステイニングを再現できるように、軟化開始ひずみ ε_{tu} を通常のコンクリートの 10 倍程度まで大きく設定し、付着パラメーター C はひび割れ後の引張破壊エネルギーがその FRCC の引張軟化曲線から算出される値と等価になるように設定することで実験値に近い挙動を示した。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート柱部材の設計指針（案）、コンクリートライブラリー97，1999.7
- 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，第 378 号，V-6，1987.2
- 3) 中道優太，上田尚史：R/FRC 部材の付着挙動に及ぼす引張軟化特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.319-324，2021
- 4) 塩永亮介，今村紅音：鉄筋を有する高強度繊維補強コンクリート部材の両引き試験，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-527，pp.1053-1054，2010.9
- 5) 小倉大季，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，pp.249-267，2016
- 6) Goto, Y.:Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, Journal of ACI, Vol.68, pp.224-251, 1971.4
- 7) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.:Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Journal of JSCE, No.564, V-35, pp.297-316, 1997.5
- 8) 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，第 378 号，V-6，1987.2
- 9) 磯部岳，竹山忠臣，佐々木亘，内田裕市：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No2，2019
- 10) 飯塚敬一，檜貝勇，斎藤成彦，高橋良輔：かぶり厚の影響を考慮し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 E2，Vol.67，No.2，pp.280-296，2011