

論文 RC 部材の一軸引張実験を対象とした FEM および DEM による再現解析

平 陽兵*1・曾我部 直樹*2・十川 貴行*3・清水 浩之*4

要旨：コンクリート構造物に地震などの大きな外力が作用した際の損傷度，あるいは維持管理での健全度の評価において，コンクリートのひび割れの発生範囲や幅は重要な指標となる。これらを定量的に評価するためには，ひび割れの進展挙動に影響を与えると考えられる材料強度や鉄筋径，かぶりの大きさなど様々な要因を考慮する必要がある。これらの検討には数値解析が有効であると考えている。そこで，RC 部材の一軸引張実験を対象に，有限要素法（FEM）および粒状体個別要素法（DEM）による再現解析を実施した。その結果，ひび割れ本数や幅について FEM より DEM の方が良い精度で評価できることを確認した。

キーワード：ひび割れ幅，RC 部材，有限要素法，FEM，個別要素法，DEM

1. はじめに

コンクリート構造物に地震などの大きな外力が作用した際の損傷度，あるいは維持管理での健全度の評価において，ひび割れから得られる情報は重要である。ひび割れに関する定量的な物理量としては，長さ，幅，間隔，深さ，密度，進展速度などがある。これらの情報の中でも位置や幅は，構造物の損傷状態を把握する上で貴重な情報となる。例えば，地震などの外力が作用した場合には，その大きさによってひび割れの発生範囲が異なる。また，塑性化した鉄筋の近傍におけるひび割れは，外力が作用した後に残留するひび割れ幅が大きくなる傾向がある。つまり，構造物に外力が作用した際に生じるひび割れの位置や幅を計測することで，過去に作用した外力の大きさや鉄筋の降伏の有無を推定できる可能性がある。

筆者らは，ひび割れ幅から得られる情報として，外力が作用した後に残留するひび割れ幅に着目し，その大きさから外力作用時に鉄筋に生じた最大ひずみを推定することで，RC 部材の損傷を評価する検討を行っている¹⁾。この既往の検討では，RC 部材の一軸引張実験（以下，両引き実験）によって，残留するひび割れ幅と加力時に生じた鉄筋の最大ひずみとの間に相関関係があること，また，ひび割れ幅の増大に鉄筋の降伏やひび割れ近傍の鉄筋ひずみ分布の変化が影響することが明らかになっている。しかしながら，同実験は鉄筋径やかぶり等が限られた範囲で実施されたものであり，実験で確認された事象のメカニズムをより詳細に検討し，ひび割れと鉄筋ひずみの相関関係に各種諸元が及ぼす影響を考察するためには，数値計算によるシミュレーションも重要であると考えている。

コンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する

研究委員会報告書²⁾では，ひび割れの進展解析の手法として，有限要素法（FEM）や剛体ばねモデル（RBSM）を取り上げ，RC および繊維補強コンクリート梁を対象とした非線形解析によるひび割れ進展挙動の検討³⁾が行われているが，ひび割れ幅の再現性などについては検証されていない。

一方，筆者らはひび割れの進展挙動や幅を精緻に評価する手法として，RBSM と同様に不連続体解析手法の一つである粒状体個別要素法（DEM：Discrete Element Method）の適用検討に取り組んでいる⁴⁾。RBSM は主として微小変形問題を扱うのに対し，DEM は岩盤ブロックの大変形問題等に対する有効な方法として適用されてきたものであるが，本手法をコンクリートのひび割れ進展解析へ応用することを検討している。しかしながら，DEM でひび割れの幅やその近傍における鉄筋ひずみについて，定量的に評価した事例は少ない。

そこで，本研究では RC 部材のひび割れ本数や幅，およびひび割れ近傍における鉄筋ひずみを数値解析で評価することを目的として，RC 部材の両引き実験を対象とした FEM と DEM による再現解析を行った。

2. 両引き実験の概要

図-1 に解析の対象とした RC 部材の両引き実験の試験体を，表-1 に使用した材料の物性値を示す。試験体は断面が 140×140mm，長さが 2,500mm のコンクリートの中心に，D32 ネジ節鉄筋（SD345）を配置した RC 部材である。試験体の断面寸法とかぶりは，地震時に塑性化する RC 橋脚の基部における 1 本の軸方向鉄筋を想定して設定した。試験体の長さは，コンクリート標準示方書⁵⁾のひび割れ幅算定式によって事前にひび割れ間隔を算

*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ 担当部長 修 (工) (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ グループ長 博 (工) (正会員)

*3 鹿島建設(株) 土木設計本部構造設計部 橋梁・インフラ更新グループ 設計主任 修 (工) (正会員)

*4 鹿島建設(株) 土木設計本部解析技術部地盤解析グループ 博 (工) 課長代理

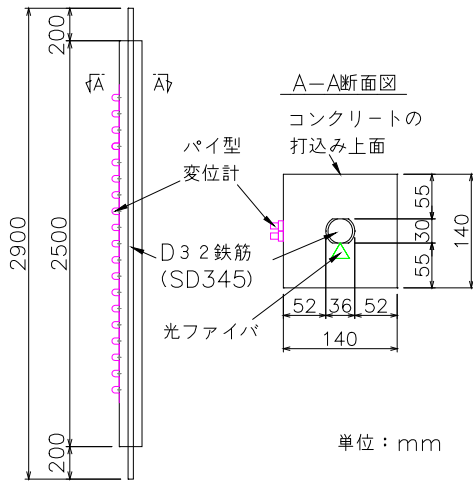


図-1 試験体概要

出し、加力に伴い試験体内に発生するひび割れ本数が 8 本以上となるように設定した。

実験では試験体を鉛直にした状態で、両端に露出した鉄筋を油圧ジャッキで引っ張ることで、RC 部材に引張力を作用させた。荷重はロードセルによって計測し、ひび割れ幅は試験体の片面に連続して設置したパイ型変位計（標点距離 100mm）によって計測した。また、鉄筋ひずみを解析と精緻に比較するため、鉄筋の表面に光ファイバセンサを設置してひずみ分布を計測した。光ファイバの計測システムには、Optical Frequency Domain Reflectometry⁶⁾ (OFDR, 光周波数領域反射計測法) を採用し、空間分解能(ひずみゲージの検長に相当)を 0.6mm, 計測間隔を 0.6mm としてひずみ分布を詳細に計測した。

表-2 に実験での荷重ステップを示す。実験では徐々に荷重あるいは変位を大きくしながら荷重、除荷を繰り返す、各ステップの荷重と除荷時にひび割れ幅や鉄筋ひずみを計測した。なお、次章以降の解析結果との比較は、鉄筋の降伏前としてひび割れ位置の鉄筋応力度が 180N/mm²（荷重 143kN=180N/mm²×D32 公称断面積 794.2mm²）となる時点、鉄筋降伏直後で実験での最大ひび割れ幅が 1.5mm となった変位 6.8mm の時点、および最大ひび割れ幅が 3.4mm となった変位 25.9mm の時点の 3 ステップで行った。以降、各ステップをそれぞれ Pa 時、変位 6.8mm 時、変位 25.9mm 時と呼ぶ。

3. 再現解析の概要

3.1 FEM の概要

FEM は、汎用解析プログラム DIANA10.5 を用いて実施した。解析モデルは、図-2 に示すように対称性を考慮して試験体の半断面とした。鉄筋とコンクリートはソリッド要素でモデル化し、上下対象となるように要素分割を行った。コンクリートはかぶり部分のひび割れ進展を詳細に把握するために、鉄筋の節の間隔が 13mm であ

表-1 材料物性値

材料	項目	実験, FEM※	DEM※
コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	29.0	30.2
	ヤング係数 (kN/mm ²)	24.6	24.1
	引張強度 (N/mm ²)	2.72	2.34
鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	402	402
	ヤング係数 (kN/mm ²)	193.4	193.4
	引張強度 (N/mm ²)	587	587

※実験は材料試験結果。FEM, DEM は解析の設定値

表-2 荷重ステップ

荷重ステップ	
鉄筋の降伏前	鉄筋応力度 94, 180, 270, 345N/mm ² で荷重、除荷を 1 回ずつ実施
鉄筋の降伏後	最大ひび割れ幅 0.6, 0.65, 1.1, 1.3, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5, 3.0, 3.4, 4.0, 4.9mm で荷重、除荷を 1 回ずつ実施 ※ただし、1.1, 1.5mm では 3 回繰返しを実施

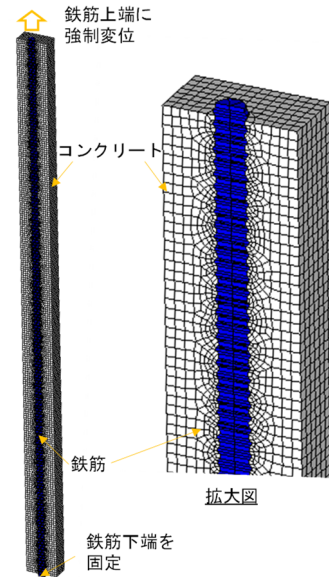
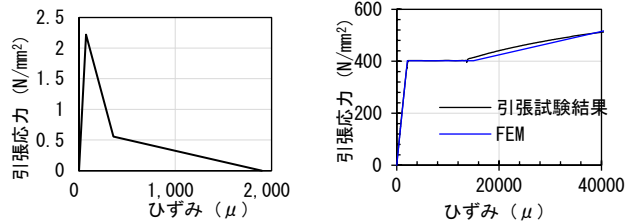


図-2 解析モデル (FEM)



(a) コンクリート (引張側) (b) 鉄筋
図-3 コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係

ることを考慮して表面における要素長が 10mm となるように分割し、鉄筋は節の高さ程度の要素長で、節の形状を含めてモデル化した。

材料構成則におけるコンクリートと鉄筋の物性値は表-1 に示す値とした。コンクリートには回転ひび割れモデルを適用し、応力-ひずみ関係は圧縮側と引張側ともにコンクリート標準示方書に基づき設定し、特に引張側の応力-ひずみ関係を図-3(a) に示すものとした。鉄

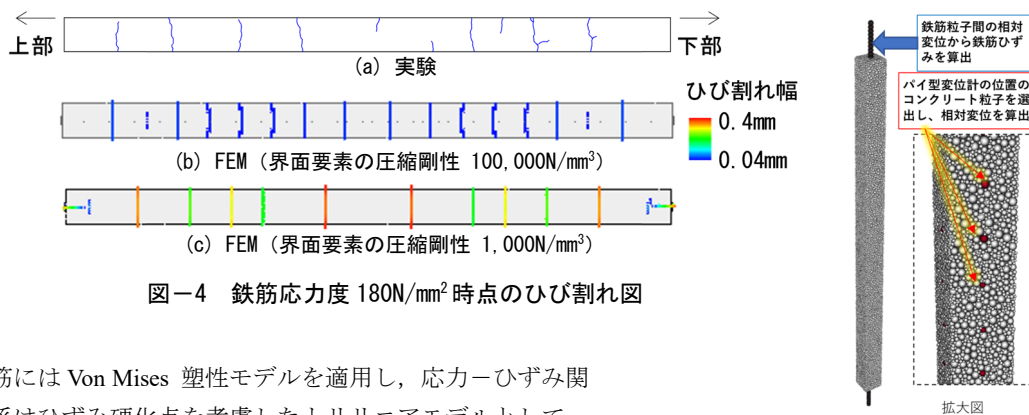


図-4 鉄筋応力度 180N/mm² 時点のひび割れ図

筋には Von Mises 塑性モデルを適用し、応力-ひずみ関係はひずみ硬化点を考慮したトリリニアモデルとして、ひずみ硬化領域を含めて鉄筋単体の引張試験結果と一致するように設定した(図-3(b))。鉄筋とコンクリートの間には、両者の接触を考慮するために鉄筋の全周にわたり線形の界面要素を設けた。鉄筋からコンクリートが離れる方向とずれる方向の界面要素の剛性は、コンクリートの変形を拘束しないようにするために十分小さな値とした。一方、コンクリートが鉄筋に押し付けられる方向となる界面要素の圧縮方向の剛性については、次節で示すとおり実験のひび割れ性状を再現できる大きさとした。

荷重は鉄筋の片側を固定し、もう片側に一方向の変位を与えることで実施した。なお、ひび割れ幅はコンクリート表面の各要素における引張ひずみに要素長を乗じて算出した。

3.2 FEMの界面要素の設定

前述のように鉄筋とコンクリートの界面要素における圧縮方向の剛性については、実験におけるひび割れ性状の再現性を考慮して設定した。図-4に鉄筋の引張応力度が 180N/mm² に達した時点における実験と界面要素の圧縮方向の剛性をパラメータとした解析結果のひび割れ図を示す。界面要素の圧縮剛性を 100,000N/mm³ としたケースでは、ひび割れ本数が実験に比べて多くなったのに対し、圧縮剛性を 1,000N/mm³ としたケースでは、実験で観測されたひび割れ性状と概ね一致した。鉄筋とコンクリートの界面付近、特に、鉄筋の節と節の間では、粗骨材を含まないモルタル分となっていることや微細な空隙が生じていることなどによって、周囲のコンクリートよりも局所的に弱部となっている可能性がある。そのため、界面要素の圧縮剛性を小さくすることで、節周辺のコンクリートへの応力伝達状況が実験と同様となり、ひび割れ性状の再現性が向上したものと考えられる。以下では、界面要素の圧縮剛性を 1,000N/mm³ とした解析結果について述べる。

3.3 DEMの概要

図-5にDEMモデルの概要を示す。解析には鉄筋コンクリートを対象として独自に開発を行ったDEMプログラムを使用した⁴⁾。解析モデルの形状寸法は、実験の

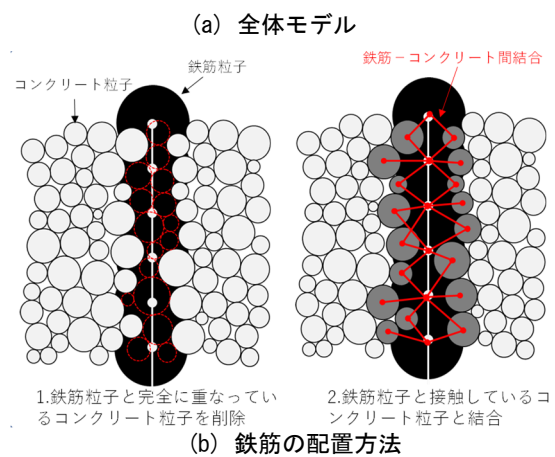


図-5 DEMモデルの概要

表-3 DEM入力パラメータ

材料	項目	
コンクリート粒子間	法線方向ばね剛性 (kN/mm ²)	50.0
	せん断方向ばね剛性 (kN/mm ²)	11.5
	引張強度 (N/mm ²)	5.0
	せん断強度 (kN/mm ²)	65.0
	摩擦係数	0.3
鉄筋粒子間	法線方向ばね剛性 (kN/mm ²)	193.4
	降伏前	
	降伏後	4.0
	せん断方向ばね剛性 (kN/mm ²)	74.3
	降伏強度 (N/mm ²)	402
	引張強度 (N/mm ²)	587
	硬化開始ひずみ	0.015
	摩擦係数	0.3

※コンクリート-鉄筋粒子間は、コンクリート粒子間と同一

試験体と同じとなるようにコンクリート粒子をランダムに配置することで構築した。コンクリート粒子の粒度分布は、実験に用いたコンクリートの粗骨材寸法を模擬して最大粒径 20mm、最小粒径 5mm とし、通過率が試験体と同程度になるように調整した。その結果、粒子数は 56,875 となった。

鉄筋は図-5(b)に示すように、コンクリートモデルの中心に粒子を一行に配置することでモデル化し、鉄筋粒子は D32 ネジ筋鉄筋を想定して直径 32mm とした。鉄筋粒子の挿入はコンクリート粒子のみでモデル全体を構築

した後に、想定した挿入位置のコンクリート粒子を削除して鉄筋粒子に置き替えることで行った。

DEMで設定した材料物性を表-1に、各材料間の入力パラメータを表-3に示す。DEMでは、解析対象をばねで結合した粒子の集合体として表現し、粒子間の結合ばねに作用する応力が設定した強度に達した時、ばねを破断させることでひび割れの発生を表現する⁷⁾。ばね破断後の粒子間には引張力は作用せず、再び粒子同士が接触することで反発力と摩擦力が作用する。本検討では、DEMの入力パラメータとして、コンクリート粒子同士、鉄筋粒子同士、およびコンクリート-鉄筋粒子間の3種類が必要となる。コンクリート粒子間は線形ばねにより結合するが、入力パラメータは粒子間を結合するばね値であるため、材料物性値をそのまま使用することができない。そこで、別途、コンクリート供試体による圧縮強度試験と引張強度試験の再現解析をDEMで行い、その結果が試験結果と一致するようにばね値を設定した。

鉄筋粒子間の法線方向ばねは、実際の鉄筋の降伏点とひずみ硬化点を表現するためトリリニアモデルとし、図-6に示すように鉄筋単体の引張試験と同等の結果となるように設定した。せん断方向については、両引き実験では鉄筋にせん断応力は作用しないと想定し、線形ばねとした。コンクリート-鉄筋粒子間の結合は、鉄筋との付着挙動を表し、ひび割れ挙動に重要なパラメータであるが、実験で用いた鉄筋の付着強度に関する試験結果が無かったため、本検討ではコンクリート粒子間と同じく線形ばねによる結合とし、入力パラメータも同一とした。

解析結果については、鉄筋ひずみは鉄筋粒子間の相対変位から算出し、コンクリート表面のひび割れ幅は実験におけるパイ型変位計と同じ位置にあるモデル表面の粒子(図-5(a)の赤い粒子)を探索し、それらの粒子間距離の変化量から評価した。载荷は前述の3つのステップに着目し、試験体の変位が実験と同程度となった時点で除荷と载荷を行った。

4. 解析結果

4.1 荷重-変位関係

図-7に実験、FEMおよびDEMで得られた荷重と変位関係の比較を示す。なお、図中の破線は鉄筋単体の降伏点に公称断面積を乗じた降伏荷重(319kN=402N/mm²×794.2mm²)である。

FEMは実験よりも早い段階で剛性の変化が始まり、降伏後は実験結果と同じ荷重となったのに対し、DEMは降伏時の荷重と剛性変化時の変位が実験とよく一致し、降伏後は荷重が3%程度、実験結果よりも大きくなった。

4.2 鉄筋ひずみとひび割れ性状(幅と分布)

図-8に前述した各ステップにおける鉄筋ひずみと

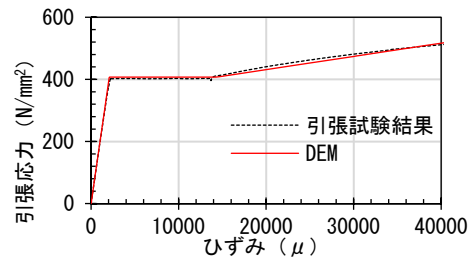


図-6 鉄筋単体の荷重とひずみの関係

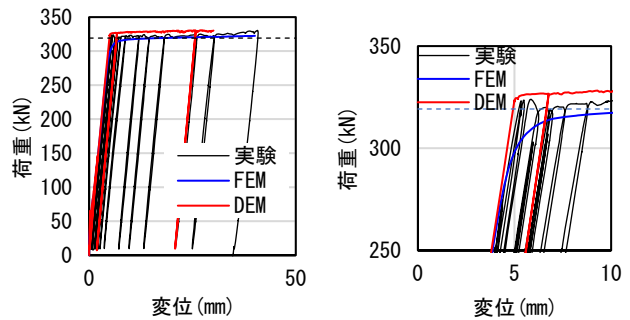


図-7 荷重-変位関係の比較

ひび割れ幅の分布およびひび割れ図について、実験結果と各解析の結果を示す。また、表-4に各ステップにおけるコンクリート表面のひび割れについて、最大ひび割れ幅、平均ひび割れ幅およびひび割れ本数、並びに鉄筋ひずみの最大値、最小値および平均値をそれぞれ示す。なお、ひび割れは、幅0.01mm以上のものを抽出した。

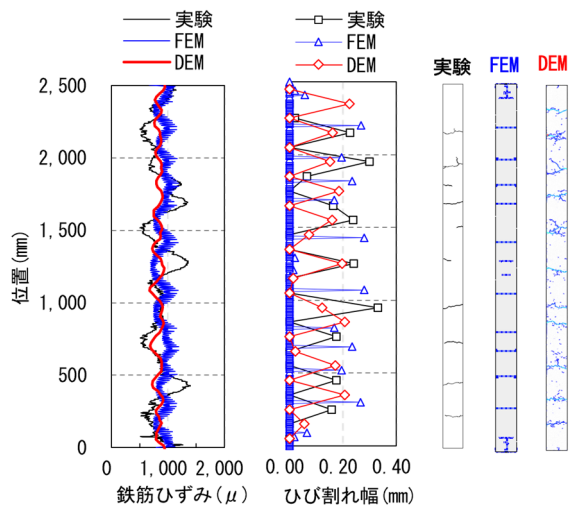
(1) Pa (鉄筋応力度 180N/mm²) 時

鉄筋応力度 180N/mm² 時点(図-8(a))では、鉄筋が降伏する前でありひび割れの位置や本数が定常化する前であるが、実験では11本のひび割れが発生し、最大ひび割れ幅は0.33mmであった。鉄筋ひずみはひび割れ位置で極大値となる山形の分布を示し、最大値は降伏ひずみ2,079μに対して1,392μであった。FEMではひび割れ位置が実験結果と異なるもののひび割れ位置で鉄筋ひずみが極大値となる分布となり、最大ひび割れ幅は0.28mm、最大ひずみは1,190μと実験結果と同程度であった。DEMでは、鉄筋ひずみの最大値が実験やFEMに比べて943μと小さく、全体的に緩やかな山形の分布となり、最大ひび割れ幅も0.22mmと小さい値であった。

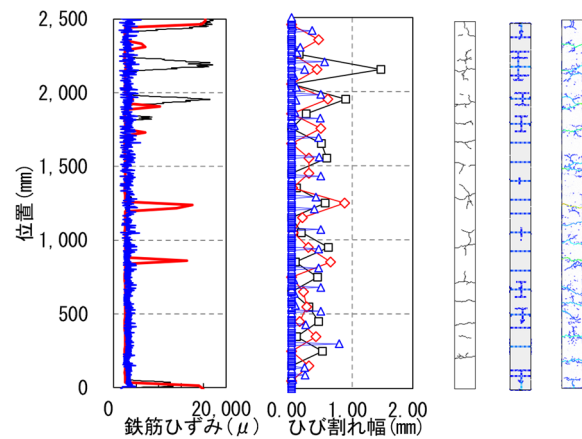
この時点における鉄筋ひずみが局所的に増加する様子や、ひび割れ幅の再現性については、FEMの方が高い結果となった。

(2) 変位 6.8mm 時

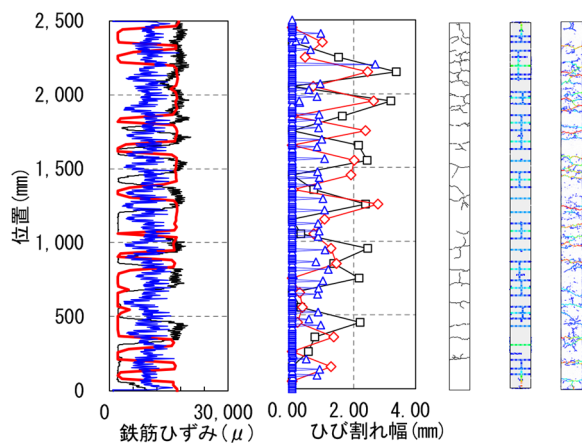
鉄筋が降伏した後となる変位が6.8mm時点(図-8(b))では、ひび割れ本数が増え、実験では試験体上部のひび割れ位置で鉄筋ひずみがひずみ硬化領域に達し、最大ひずみが約18,000μ、同付近のひび割れ幅が1.48mmとなった。FEMでは鉄筋ひずみの最大値は4,000μと降伏ひ



(a) Pa : 鉄筋引張応力度 180N/mm²



(b) 変位 6.8mm 時



(c) 変位 25.9mm 時

図-8 鉄筋ひずみとひび割れ幅分布

ずみを超えているものの局所的な増加は見られず、ひずみが全長に亘りほぼ一定となる結果であった。ひび割れについては、本数は実験よりも増加し、幅の最大値と平均値は実験よりも小さくなった。DEM では、実験と同様に鉄筋ひずみが局所的に増加する事象が再現され、その最大値も実験結果に近い約 16,000 μ となった。また、ひび割れ本数および幅の最大値と平均値も実験との乖離は

表-4 ひび割れ性状と鉄筋ひずみ

(a) Pa 時

コンクリート	実験	FEM	DEM
最大ひび割れ幅 (mm)	0.33	0.28	0.22
平均ひび割れ幅 (mm)	0.19	0.15	0.14
ひび割れ本数	11	16	14
鉄筋	実験	FEM	DEM
鉄筋ひずみの最大値 (μ)	1,392	1,190	943
鉄筋ひずみの最小値 (μ)	497	666	671
鉄筋ひずみの平均値 (μ)	860	909	832

(b) 変位 6.8mm 時

コンクリート	実験	FEM	DEM
最大ひび割れ幅 (mm)	1.48	0.78	0.87
平均ひび割れ幅 (mm)	0.44	0.28	0.32
ひび割れ本数	16	31	18
鉄筋	実験	FEM	DEM
鉄筋ひずみの最大値 (μ)	17,827	4,848	16,283
鉄筋ひずみの最小値 (μ)	1,879	1,041	1,941
鉄筋ひずみの平均値 (μ)	3,258	2,608	3,086

(c) 変位 25.9mm 時

コンクリート	実験	FEM	DEM
最大ひび割れ幅 (mm)	3.37	2.69	2.79
平均ひび割れ幅 (mm)	1.71	0.79	1.20
ひび割れ本数	16	42	20
鉄筋	実験	FEM	DEM
鉄筋ひずみの最大値 (μ)	20,496	17,550	17,430
鉄筋ひずみの最小値 (μ)	1,880	3,163	2,033
鉄筋ひずみの平均値 (μ)	11,443	9,583	10,609

あるものの、FEM よりも実験に近似した。

鉄筋が降伏して、新しいひび割れの発生が鈍化する変位 6.8mm 時点では、Pa 時点と異なり DEM の方が実験の再現性が高い結果であった。

(3) 変位 25.9mm 時

変位が 25.9mm 時点 (図-8(c)) では、実験における鉄筋ひずみがひずみ硬化領域に達することで、その増加が約 20,000 μ 付近で鈍化する一方で、同程度の大きさのひずみがひび割れ位置を中心に拡がっていく傾向が確認できた。そのため、鉄筋ひずみは増加しないものの、ひび割れ近傍において鉄筋の降伏範囲が拡大することでひび割れ幅が増加し、その最大値は 3.37mm となった。これに対して FEM では、変位 6.8mm 時と異なり、ひび割れ近傍における鉄筋ひずみの増加が確認されるものの、全体的に実験よりも小さい傾向であった。また、ひび割れ位置を中心とした降伏領域の拡大も、明確には再現されていない。ひび割れ本数は、実験よりもかなり多くなっており、幅の最大値、平均値ともに実験と乖離した。

DEM では、FEM よりもひび割れ位置における鉄筋ひずみの局所的な増加と、同位置を中心とした降伏領域の拡大が明瞭に再現された。また、ひび割れ本数やひび割れ幅の最大値と平均値は、変位 6.8mm 時と同様に、FEM よりも実験結果に近似する結果であった。

5. 実験の再現性に関する考察

前述の解析結果では、鉄筋降伏前のステップではFEM、鉄筋降伏後では、DEMの方が両引き実験の再現性が高い結果が得られた。特にFEMでは、変位6.8mm時、25.9mm時で見られるようなひび割れ近傍における鉄筋ひずみの局所的な増加や、降伏領域の拡大が明瞭に再現できない結果となった。実験結果における鉄筋降伏後の鉄筋ひずみの局所的な増加は、試験体における材料や付着の不均一性による可能性があるが、FEMでは要素を均一にモデル化していることでひずみがモデル全体に平均的に分散するため、同傾向を再現できず、ひび割れ本数が実験に比べて大きくなったものと思われる。ここで図-9に変位25.9mm時のひび割れ幅の度数分布を示す。図に示すようにFEMではひび割れ幅1mm以下のひび割れ本数が多く、実験よりもひび割れが均一的に分散していることが分かる。

一方、DEMはランダムに配置された粒子の集合体としてモデル化するため、解析において材料の不均質性を反映することができ、鉄筋ひずみの局所的な増加を再現できたものと考えられる。コンクリート表面のひび割れについては、実験結果に対してひび割れ本数がわずかに多く、幅が小さくなる傾向であったが、FEMと比較するとひび割れ幅の度数分布(図-9)が実験結果に近似した。

以上の結果から、鉄筋粒子を導入したDEM鉄筋コンクリートモデルを用いることで、従来の連続体解析手法よりも良い精度でひび割れやその近傍の鉄筋ひずみを評価できることが示された。ただし、今回のDEMではコンクリートと鉄筋の付着に影響する両粒子間の結合を暫定的にコンクリート粒子間と同じパラメータとしているため、さらなる検討が必要と考えている。特に、実験よりもひび割れ本数が多いという結果は、鉄筋とコンクリート間の付着を実験よりも強くモデル化していることを示唆している。鉄筋の付着強度試験に基づいて同パラメータの設定を行うことなどで、解析精度の向上に繋がるものと考えている。

6. まとめ

RC部材におけるひび割れ性状と鉄筋ひずみを数値解析によって評価することを目的として、FEMとDEMによるRC部材の両引き実験の再現解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) FEMでは鉄筋とコンクリート間の界面要素の圧縮剛性を小さくすることで、実験におけるひび割れ性状の再現性が向上した。
- 2) FEMのひび割れ本数と幅は、鉄筋降伏前では実験と概ね一致したものの、鉄筋の降伏以降はひび割れ近傍における鉄筋ひずみの局所的な増加や、それに伴

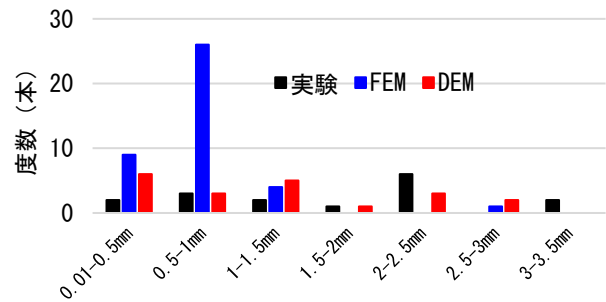


図-9 ひび割れ幅の度数分布

う降伏領域の拡大が再現できず、ひび割れ本数や幅が実験結果と乖離する結果となった。

- 3) DEMでは鉄筋の降伏以降におけるひび割れ近傍の鉄筋ひずみの局所的な増加や降伏領域の拡大を再現でき、ひび割れ本数、幅ともにFEMよりも実験結果に近似した。
- 4) FEMとの比較
- 5) により、DEMを用いることで従来の連続体解析手法よりも鉄筋の降伏以降のひび割れ性状や鉄筋ひずみを良い精度で評価できることが示された。

本検討は一つの実験に対する基礎的な検討であり、引き続き形状の異なる両引き実験や部材実験の結果との比較検証を進める予定である。

参考文献

- 1) 十川貴行, 曾我部直樹, 平陽兵; 残留ひび割れ幅に基づくRC部材の損傷度評価に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.221-216, 2023
- 2) 中村光, 今本啓一, 長井宏平ほか; コンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 3) 塩永亮介・佐藤靖彦・Joost C.W.; 高性能繊維補強モルタルを適用したRC部材の一軸引張挙動に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.366-379 2010
- 4) 清水浩之, 大野進太郎, 大家史, 十川貴行; 個別要素法によるRC部材の両引き実験の再現解析, 土木学会第79回年次学術講演会, CS5-07, 2024
- 5) 土木学会; コンクリート標準示方書【設計編】, 2022
- 6) 井川寛隆, 太田圭一, 葛西時雄ほか; OFDRを用いた長ゲージFBGによる分布計測の研究, 日本機械学会論文集(A編), 72巻724号, pp.102-110, 2006
- 7) 清水浩之, 村田澄彦, 石田毅; 粒状体個別要素法における岩石力学物性の設定に及ぼす粒子数および粒度分布の影響, 材料, Vol. 59, No. 3, pp. 219-226, 2010