

論文 デジタル画像相関法による鋼繊維補強 RC はりのひび割れ計測とせん断補強効果

牧野 高平*1・西田 博詞*2・板井 達志*3・松田 浩*4

要旨：せん断補強筋のない RC はり及び鋼繊維補強 RC はりのひび割れ挙動特性を明らかにするため、光学的計測法であるデジタル画像相関法を用いて、全視野・非接触での変位、ひずみ計測を実施した。ひび割れの発生から破壊に至るまでの変位、ひずみを精度よく計測することができ、ひずみやひび割れの発生・進展の挙動を可視化することができた。また、鋼繊維が曲げ・せん断ひび割れ特性に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：鋼繊維，せん断ひずみ，ひび割れ，光学的全視野計測

1. はじめに

筆者らは鋼繊維のせん断補強材としての効果を明らかにすることを目的として、ここ数年来、短スパン RC はりを対象として鋼繊維がせん断耐力に及ぼす影響を検討してきた^{1) 2)}。短繊維を混入したコンクリートは、弾性係数やじん性が增大するので、ひび割れの発生・進展過程も通常のコンクリートとは異なる³⁾。

RC はりのひび割れの発生から破壊に至るまでのひび割れの進展状況の計測には、これまで 0.05~2mm (約 0.05mm 単位) の簡易なクラックメーターを用いて主として目視による測定が行われてきた。また、自動でひび割れ幅を測定可能な CCD ラインセンサを搭載したひび割れ幅測定器なども開発されているが、ひび割れ部に設置して測定することには変わりはない。一方、デジタルカメラと画像処理技術を用いて、ひび割れ幅やひび割れ分布を自動的に計測する研究開発も近年多数開発されている⁴⁾。

本研究では、スパン長 1.6m のせん断補強筋のない RC はりおよび鋼繊維混入率を変化させた鋼繊維補強 RC はり供試体を作製し、曲げひび割れや斜めひび割れの発生・進展過程の可視化と鋼繊維のせん断補強効果を検討することを目的として荷重試験を実施した。

実験では、荷重の荷重とともに時々刻々と変化するひび割れ発生から破壊に至るまでのひび割れの進展状況を計測するために、デジタル画像相関法⁵⁾を用いて全視野計測を実施した。デジタル画像相関法 (以下 DICM) は、変形前後の測定対象物表面を CCD カメラやデジタルカメラ等で撮影したデジタル画像⁵⁾を画像処理することにより、計測範囲全体に渡って表面変形の大きさと方向の両方の要素を計測することが可能な方法である。

2. DICM を用いた鋼繊維補強 RC はりの曲げ試験

2.1 試験概要

スパン長が 1.6m の鋼繊維補強 RC はりおよび比較用としての通常の RC はりを作製し、荷重実験を行った。鋼繊維補強 RC はりの曲げ・せん断ひび割れ発生時の可視化の可能性を検討するとともに、鋼繊維の実構造物大材に対する補強効果および曲げ・せん断ひび割れ特性と変形能に及ぼす影響について検討を行った。

2.2 試験体概要

試験体作成に使用した配合表を表-1 に、試験体寸法及び荷重方法を図-1 に示す。鋼繊維混入がない RC はり (C1, C2 試験体)、鋼繊維補強 RC はり (F1, F2 試験体) を各 1 体ずつ作製した。なお、鋼繊維は 1 種 (角形断面)、両端フック型の鋼繊維 (長さ 30mm) を用いた。コンクリートの材料特性を表-2 に示す。なお、引張強度は割裂引張強度であり、鋼繊維の混入によりじん性の大幅な向上が確認された。鉄筋は SD345 を使用し、各 3 本を引張側に配置した。せん断スパン長は a 、試験体の有効高さは $d=210\text{mm}$ である。 $a/d=2.3, 1.5$ とし、4 点曲げ荷重試験を実施した。その他試験体の種類等の破壊モードや設計耐力等を表-3 に示す。なお、表中に示す設計耐力は鋼繊維混入率 0% の試験体 (C1, C2) の値とする。

本試験では、試験体の表面を DICM により、主ひずみ、せん断ひずみの全視野変位計測を実施した。裏面にはロゼットゲージを貼付し、さらに、スパン中央部の変位を変位計により測定した。図-2 に計測箇所を示す。DICM による全視野ひずみ計測の適用の可能性について検討すると同時に、鋼繊維が曲げ・せん断ひび割れ特性に及ぼす影響について検討を行った。

*1 長崎大学工学部インフラ長寿命化センター 研究員 (正会員)

*2 長崎大学大学院生産科学研究科 修士課程 (非会員)

*3 長崎大学工学部構造工学科 (非会員)

*4 長崎大学工学部構造工学科教授 工博 (正会員)

2.3 試験結果

2.3.1 スパン中央部のたわみ

a/d=2.3 の曲げ破壊した RC はりおよび a/d=1.5 のせん断破壊した RC はりのスパン中央部のたわみについて計測結果を図-3 に示す。

a/d=2.3 では、C1 試験体に比べ、F1 試験体の降伏荷重の増加が確認できる。なお、図では F1 試験体は約 22mm までしか変位が表示されていないが、測定装置の不具合で計測を取りやめた荷重ステップでの変位である。実際は载荷を続けており、C1 試験体以上に大きな変位まで変形し、最終的にはコンクリートの圧壊には至っていない。曲げ破壊においては、コンクリートにひび割れが発生した後も鋼繊維が引張力を負担することでスパン全体に発生しているひび割れ幅を低減し、変形能が向上するためであると考えられる。

a/d=1.5 では、C2 試験体は最大荷重を示した後、急激に破壊しているが、F2 試験体は試験体降伏後も緩やかに荷重が落ちた。さらに、F2 試験体は荷重は落ちるものの 100kN 以降の変形能を保持しており、コンクリートのせん断破壊に対する脆性的特性の欠点を改善する結果となった。

鋼繊維補強 RC はりはコンクリート全体に鋼繊維が分散して配置しているため、発生の予測が難しいせん断ひび割れに対しても有効であると考えられる。

今回のスパン中央部のたわみ計測では、a/d=2.3 試験体では、鋼繊維を混入することで曲げ耐力は向上したが、a/d=1.5 試験体では、鋼繊維の混入の有無によって耐力に大きな変化を確認することができなかった。これは、曲げ耐力の場合は、曲げひび割れが発生した後すぐに鋼繊維が抵抗するため曲げ耐力が向上するのにに対して、せん断耐力に対しては、圧縮域コンクリートのせん断抵抗、鉄筋のダウエル効果、骨材のかみ合わせ作用が主として分担されるもので、鋼繊維を混入しても圧縮強度がほぼ同じ値となるので、圧縮域コンクリートのせん断抵抗も鋼繊維の影響を受けないものと考えられる。なお、100kN の荷重で変形が増大するのは、鋼繊維によりせん断ひび割れに対する変形能の向上には寄与するためである。

2.3.2 せん断ひずみ計測

せん断ひずみ計測箇所を図-4 に、DICM とひずみゲージにより得られた C1, F1 試験体のせん断ひずみの推移を図-5 に示す。各試験体の DICM とひずみゲージのひずみ値は、ひび割れが発生するまでの弾性域内では、多少のずれが生じているがほぼ一致していることが確認できる。なお、本試験で使用した DICM の仕様は、ひずみ感度 0.01% 程度である⁶⁾。

各試験体のせん断ひずみの推移を図-6 に示す。

表-1 配合表

	鋼繊維混入率	単位量 (kg/m ³)					AE 剤
		セメント	細骨材	粗骨材	水	鋼繊維	
C1	0%	377.3	712.0	937.7	170.7	0.0	3.0
C2	0%	377.3	700.9	923.0	170.7	78.5	3.0
F1	1.0%	377.3	695.3	915.7	170.7	117.8	3.0
F2	1.5%	377.3	695.3	915.7	170.7	117.8	3.0

W/C=45%

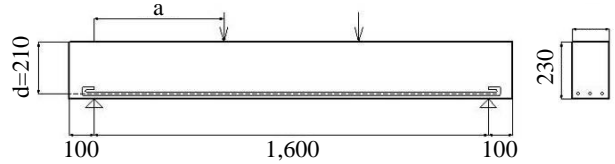


図-1 試験体概要 (mm)

表-2 材料特性

	鋼繊維混入率 (%)	a/d	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
C1	0	2.3	44.6	2.98	37166	0.212
F1	1.0	2.3	40.3	4.35	38430	0.195
C2	0	1.5	43.8	2.93	45742	0.202
F2	1.5	1.5	38.2	5.03	33494	0.187

表-3 試験体詳細

	設計耐力 (kN)		破壊モード
	曲げ	せん断	
C1 (F1)	104	205	曲げ破壊
C2 (F2)	345	294	せん断破壊

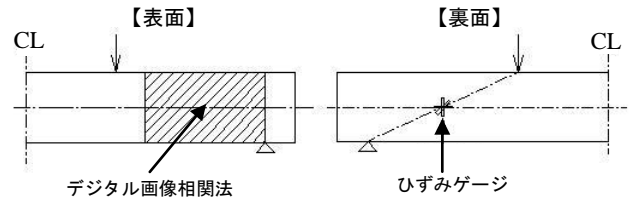
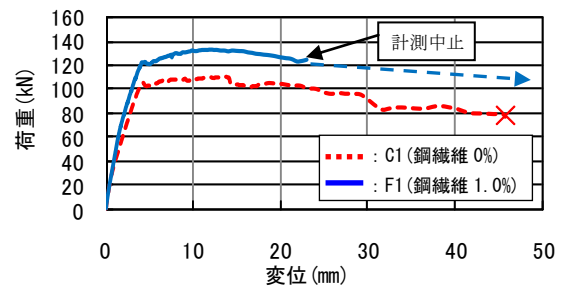
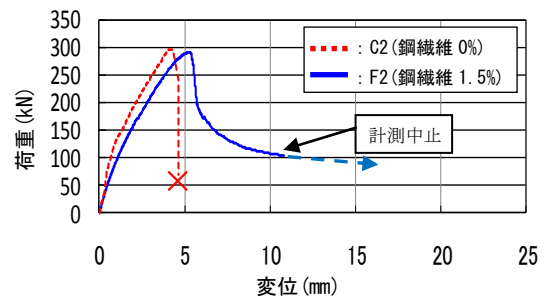


図-2 計測箇所



(a) a/d=2.3



(b) =1.5

図-3 スパン中央部のたわみ

a/d=2.3 において、C1 試験体最大応力時のせん断ひずみを比較すると、F1 試験体は C1 試験体と比べ、せん断ひずみを大幅に低減していることが確認できる。これは、コンクリートにひび割れが発生した後も、鋼繊維がひび割れの進展を抑制しているため、ひずみ値が小さくなったと考えられる。

a/d=1.5 においては、C2 試験体は、終局時、試験体が脆性的なせん断破壊したが、F2 試験体は脆性破壊することなく粘り強く破壊し、その後もひずみ値が上昇した。鋼繊維補強コンクリートによる引張破壊特性の改善が見られ、鋼繊維のせん断補強材としての適応の可能性を確認することができた。

2.3.3 ひずみ分布の推移

曲げ破壊した C1, F1 試験体およびせん断破壊した C2, F2 試験体における(a)破壊形態、(b)荷重-変位曲線、(c)各荷重段階のひずみ分布図、(d)ひび割れ箇所のひずみ計測を図-7, 8, 9, 10 に示す。

C1 試験体では、③において曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに斜めひび割れへと進展していく様子と、その際、せん断ひずみの進展も確認できた。a-a 断面では、⑤の段階で最大主ひずみ値、せん断ひずみ値の増大が確認できた。これは、試験体が脆性破壊し、ひび割れが進展したためだと考えられる。

F1 試験体では、①における、ひび割れが発生していない段階でもひずみの集中が確認でき、その後、曲げひび割れが進展するとともに、せん断ひずみに顕著な集中が見られ②、せん断ひび割れが斜め方向に発生し、大きく進展していく様子を可視化することができた。b-b 断面では、斜めひび割れ発生位置においてせん断ひずみが局所的に増大していることが確認できた。また、ひずみ値が徐々に増加していることから、試験体が粘り強く破壊したと推察できる。

C2 試験体では、せん断ひび割れと思われるひずみの集中が②において発生し、斜め方向への進展過程を確認した。c-c 断面では、④まではひずみは徐々に増加しているが、⑤では最大主ひずみ、せん断ひずみのどちらも急激に増加した。C2 試験体が脆性的に破壊したためだと考えられる。さらに、斜めひび割れ発生位置におけるせん断ひずみが増大していることから、このひび割れはせん断ひび割れであることが確認できた。

F2 試験体では、破壊形態からも目視で確認できる、直接の破壊の原因となった斜めひび割れに沿ったひずみの発生・進展過程を可視化することができた。d-d 断面のひび割れ発生位置のひずみは、C2 試験体に比べ徐々に増加していることが確認できる。これは、鋼繊維を混入したことにより、ひび割れ発生後も引張力を受け持ち、

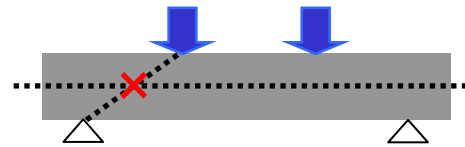
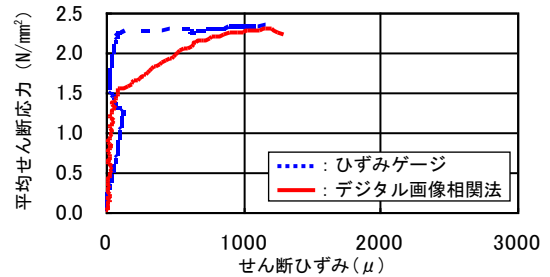
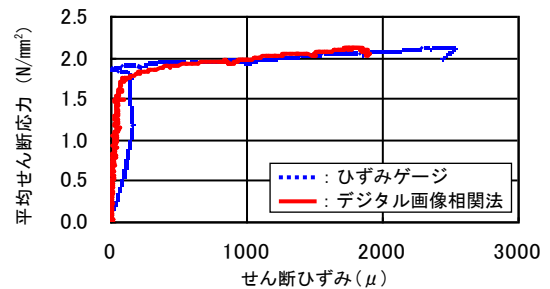


図-4 せん断ひずみ計測箇所

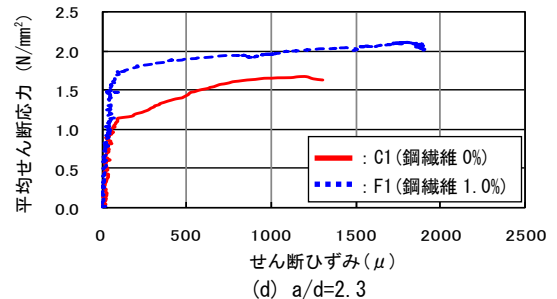


(a) 鋼繊維混入率 0%

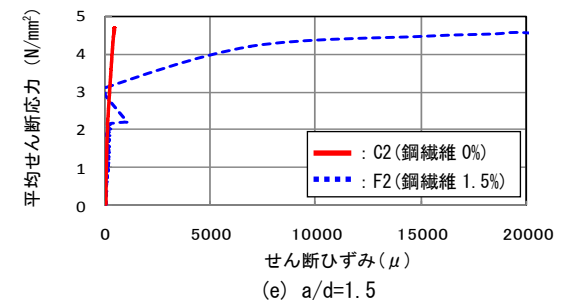


(b) 鋼繊維混入率 1.0%

図-5 せん断ひずみ計測 (a/d=2.3 各試験体)



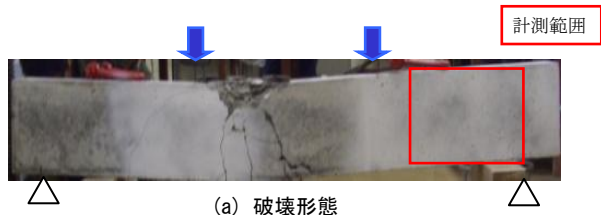
(d) a/d=2.3



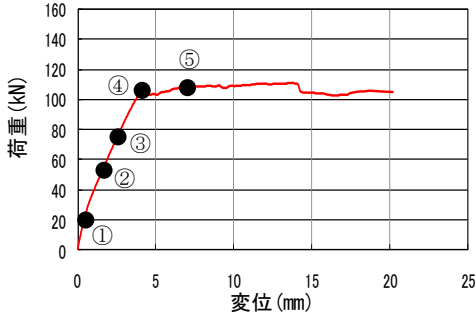
(e) a/d=1.5

図-6 せん断ひずみ計測 (a/d=2.3, 1.5)

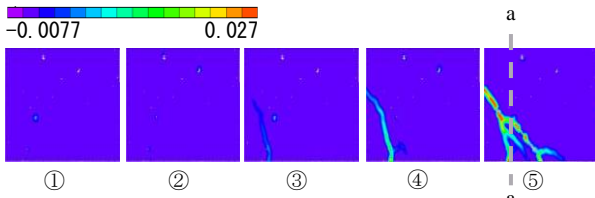
ひび割れ幅を低減したことによる効果と考えられる。また、ひび割れ箇所のひずみ計測によって、任意の断面においてひずみ計測が可能であることが確認でき、ひび割れのような予測不可能な任意断面についても計測が可能であることがわかった。各試験結果とも、最大主ひずみ、せん断ひずみともに、はじめは全断面で一定であるが、荷重の増加に伴い、各断面のひび割れ発生箇所における最大主ひずみ、せん断ひずみ値が局所的に増大しており、ひび割れを可視化できていることがわかる。



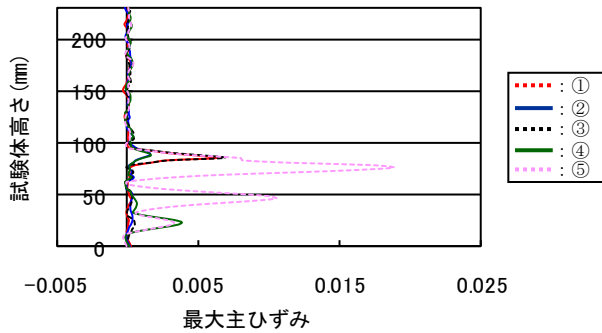
(a) 破壊形態



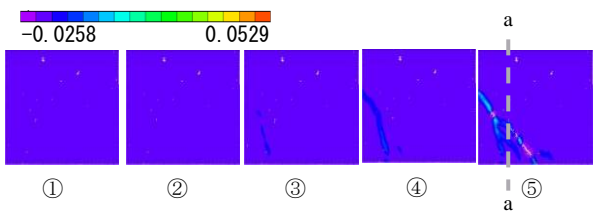
(b) 荷重—変位曲線



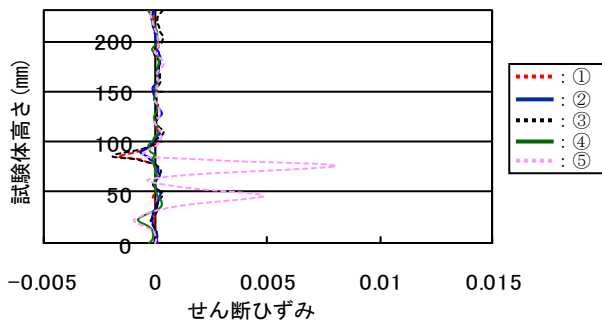
(c) 最大主ひずみ分布図



(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (最大主ひずみ)

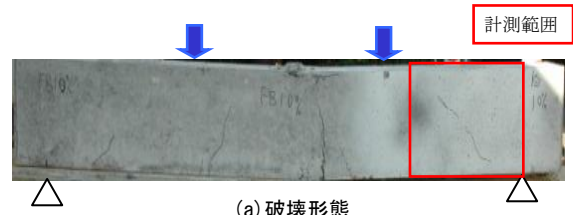


(c) せん断ひずみ分布図

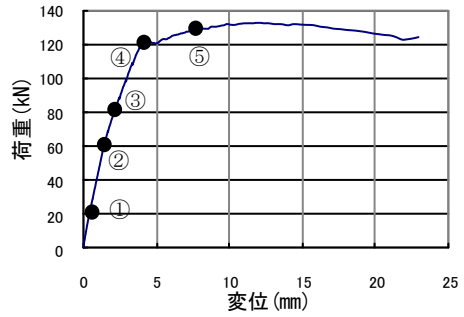


(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (せん断ひずみ)

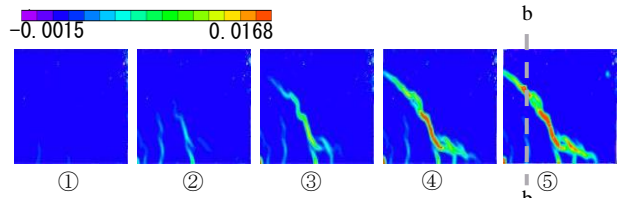
図-7 鋼繊維混入率 0%(C1) 試験体



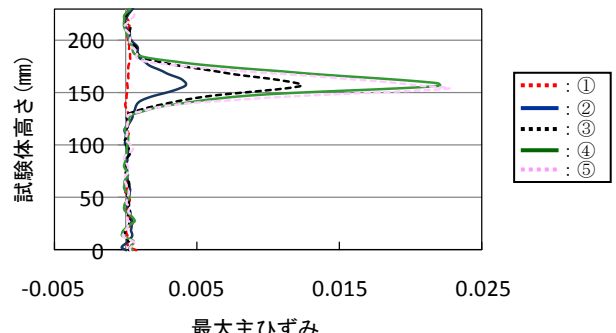
(a) 破壊形態



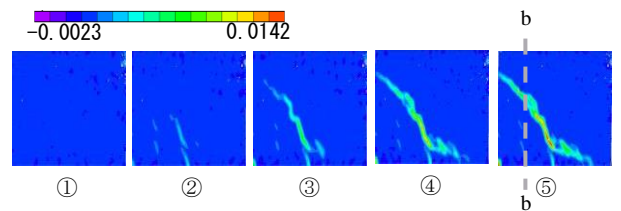
(b) 荷重—変位曲線



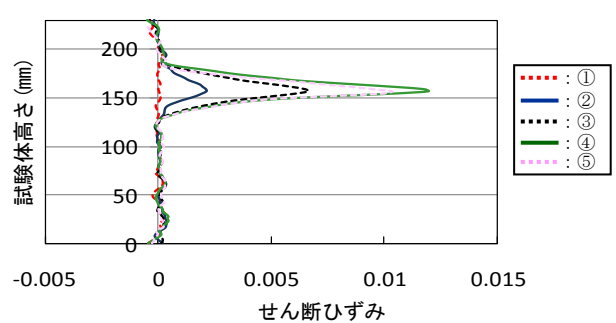
(c) 最大主ひずみ分布図



(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (最大主ひずみ)



(c) せん断ひずみ分布図

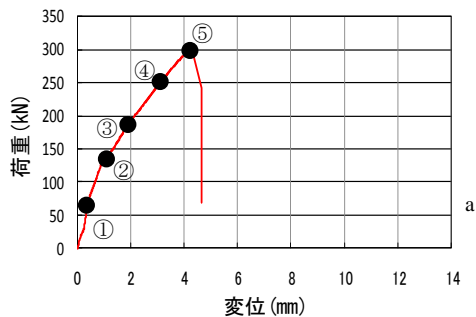


(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (せん断ひずみ)

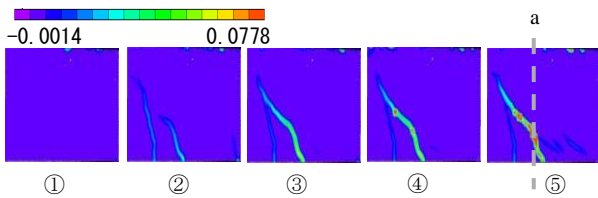
図-8 鋼繊維混入率 1.0%(F1) 試験体



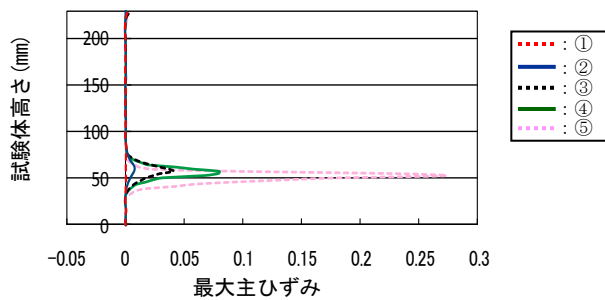
(a) 破壊形態



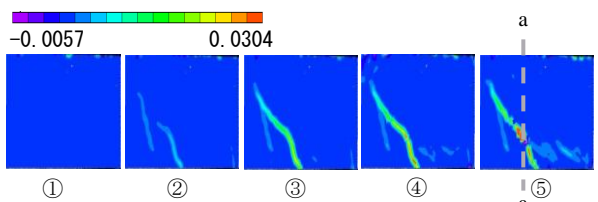
(b) 荷重-変位曲線



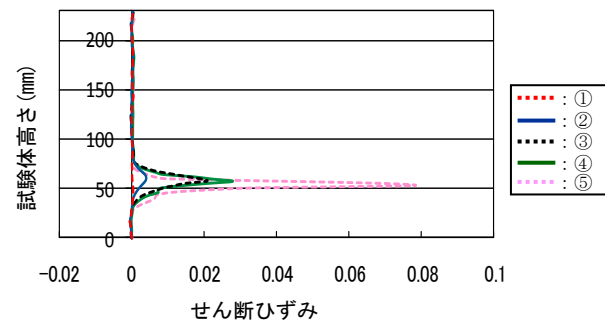
(c) 最大主ひずみ分布図



(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (最大主ひずみ)



(c) せん断ひずみ分布図

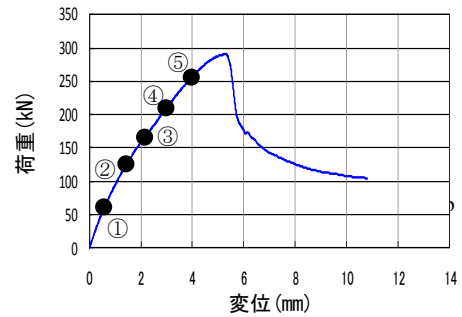


(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (せん断ひずみ)

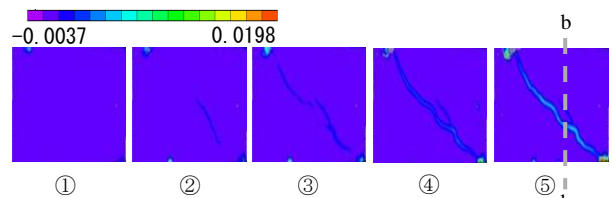
図-9 鋼繊維混入率 0%(C2) 試験体



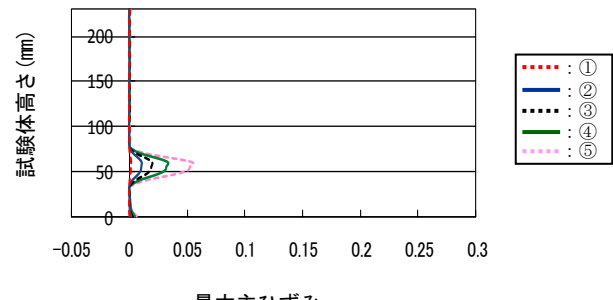
(a) 破壊形態



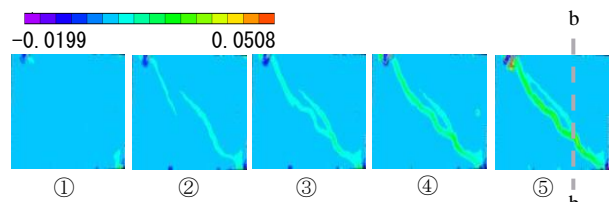
(b) 荷重-変位曲線



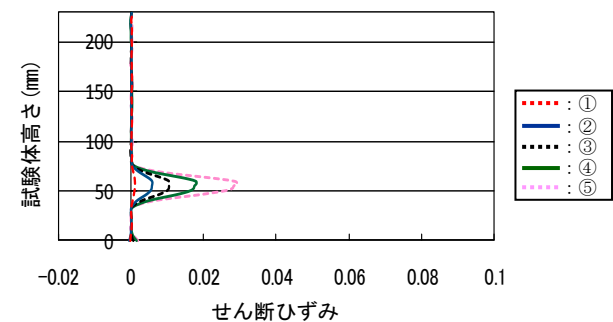
(c) 最大主ひずみ分布図



(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (最大主ひずみ)



(c) せん断ひずみ分布図



(d) ひび割れ箇所のひずみ計測 (せん断ひずみ)

図-10 鋼繊維混入率 1.5%(F2) 試験体

2.3.4 鉄筋位置の X 方向ひずみ計測

デジタル画像相関法の計測範囲において、 $a/d=2.3$ 試験体の各荷重段階における鉄筋位置のコンクリート表面の X 方向ひずみの推移の計測範囲を図-11、計測結果を図-12に示す。ひび割れ位置近傍では、ひずみ値が局所的に大きくなっていることが確認できる。また、C1 試験体に比べて、F1 試験体の X 方向ひずみは約 1/2 ほど小さくなっている。鋼繊維の混入によるひずみの進展の低減により、それに伴うひび割れ幅の低減もみられ、鋼繊維補強 RC はりのじん性の向上も確認できた。

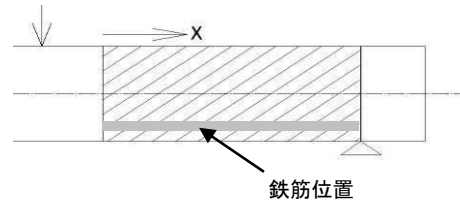
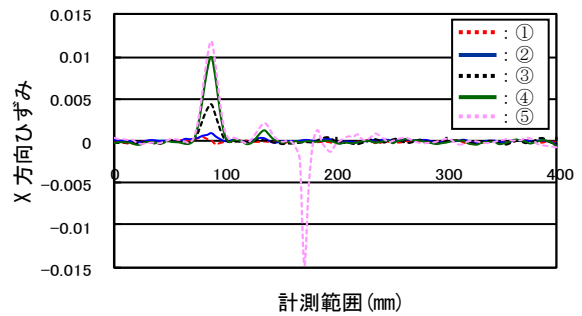
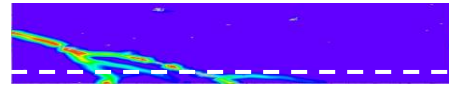
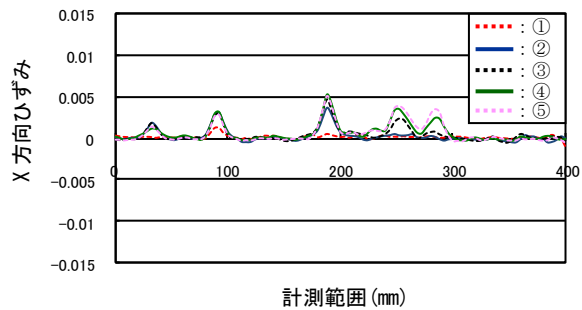
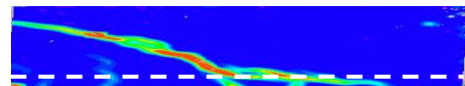


図-11 計測範囲



(a) 鋼繊維混入率 0%試験体 (C1)



(b) 鋼繊維混入率 1.0%試験体 (F1)

図-12 鉄筋位置の X 方向ひずみ ($a/d=2.3$)

3. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめて示す。

- 1) デジタル画像相関法を用いて計測範囲全体のひずみ分布を得ることで、ひび割れの発生・進展過程を可視化することができた。
- 2) 非接触全視野計測により得られた局所的なひずみ集中箇所により、目視では確認できないひび割れ箇所のひずみ値を取得でき、ひび割れ箇所の予測をすることが可能であることが確認できた。
- 3) 鋼繊維がひび割れ発生後も引張力を負担しているため、鋼繊維補強 RC はりのひび割れ幅の低減の効果を確認することができた。
- 4) 実構造物大の RC はりにおいて、脆性的なせん断破壊を鋼繊維を混入することで防止できることが確認できた。
- 5) 鋼繊維補強 RC はりの曲げ耐力が増加したことで、鋼繊維の混入による曲げ・せん断耐力の向上の可能性を確認できた。

謝辞

本研究は平成 20 年度日本学術振興会科学研究補助金、基盤研究(B)(2)(研究代表者:松田浩, 課題番号: 19360205)により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 松田浩ほか, せん断補強鉄筋のない鋼繊維補強 RC はりの非線形挙動特性に関する研究, 土木学会学術講演会講演概要集, Vol.63, No.5, pp523-524, 2008
- 2) Nyomboi, T. et al. Theoretical prediction of shear strength evolution in steel fiber reinforced concrete beams without stirrups, Reports of the Faculty of Engineering, Nagasaki University, Vol.38(71):20-27, 2008.
- 3) 真嶋光保ほか著: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, 1994

- 4) 藤野陽三ほか, 木構造状フィルタを用いたコンクリートのクラック抽出のためのロバストな画像処理システム, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp.599-616, 2007
- 5) 松田浩ほか, 光学的全視野計測技術による建設構造物の劣化・変状メカニズムの解明と診断法の開発, 平成 17~18 年度科学研究費補助金基盤研究(B)研究成果報告書, 第 2 章, 研究課題番号 17360217, 長崎大学図書館リポジトリ, 2007
- 6) 松田浩ほか, デジタル画像相関法を用いた薄肉円筒シェルの変形挙動の可視化, 日本実験力学学会講演論文集, No.7, pp.12-17, 2007