

論文 光学的全視野計測法によるRCはりのひび割れ発生・進展の可視化

浜岡 広^{*1}・松田 浩^{*2}・山下 務^{*3}・中島 朋史^{*4}

要旨：RC曲げ試験体（10×10×40cm）を対象として，せん断スパン比を変化させた曲げ試験を行った。その際，光学的全視野計測法である電子スペックルパターン干渉とデジタル画像相関法を用いて，曲げおよび斜めひび割れの発生・進展の可視化を行った。また，本計測法で得られる全視野変位計測データを用いてひび割れ幅算定法やひび割れ図自動作図法を検討した。

キーワード：光学的全視野計測法，RCはり，曲げ試験，曲げひび割れ，斜めひび割れ

1. はじめに

従来，鉄筋コンクリート(以下RCと略記)の表面ひずみを計測する際，ひずみゲージを貼付した計測が行われてきた。しかし，ひずみゲージでは，ひび割れ発生後のひずみ値に信頼性がないことや計測範囲が局所的になることなど，ひび割れ追跡には困難である。そもそも，ひずみゲージで計測されるひずみ値は貼付したゲージ長の平均のひずみ値であり，ひび割れ近傍のひずみ値を正確に表しているわけではない。また，計測中にひずみゲージ自体が切れてしまい計測不能となることも多い。

本研究では，非接触で全視野計測が可能な電子スペックルパターン干渉法(以下ESPIと略記)¹⁾，デジタル画像相関法を用いて，RCはりの曲げひび割れや斜めひび割れの発生から進展に至る過程の可視化を目的とし，せん断補強筋がないRCはり試験体の載荷試験を行った。

2. 計測器の原理と概要²⁾³⁾

2.1 ESPI計測器

レーザー光(波長： λ)を粗面に照射した場合レーザー光の可干渉性によりランダムな位相の光が重ね合い干渉し，ざらざらした斑点模様が観察される。この干渉パターンがスペックルパター

ンと呼ばれるものである。ESPI計測は，2つ以上の光路を通ったレーザー光を重ね合わせた時に生じるスペックルパターンを利用して変位を求める方法である。本研究で用いたESPIによる変位・ひずみ計測の概要を図-1に示す。図-1(a)はESPI計測のx方向の光学系である。y方向についても同様である。CCDカメラにより，変形前の物体のスペックルパターンを撮像し，それを基準パターンとする(図-1(b))。次に変形後の物体のスペックルパターンを撮像し(図-1(c))，基準パターンとの差画像をリアルタイムでモニター上に表示する。この差画像からスペックルの強度と位相変化について減算処理を行うことにより，干渉縞を得ることができる(図-1(d))。この干渉縞を画像解析することにより，全視野における変形の分布を，光波の 2π 位相変化を単位とする等高線として描かせることができる(図-1(e))。ひずみ分布は変位分布の微分により求められる(図-1(f))。

なお，本計測装置は，試験終了後に測定位置や測定長を任意に与えることができるので，任意の基準長さの平均ひずみ値を求めることができ，ひび割れ幅近傍のひずみ集中を精度よく測定することができる。

本研究では，ETTEMEYER社のレーザストレ

*1 長崎大学大学院生産科学研究科 修士課程 (正会員)

*2 長崎大学 工学部構造工学科教授 工博 (正会員)

*3 長崎大学 工学部構造工学科技術職員 (非会員)

*4 長崎大学大学院生産科学研究科 修士課程 (非会員)

インアナライザー2D-ESPI を使用した。図-1 (g)はセンサーヘッド部である。x 方向, y 方向のレーザ投光器が各 2 個ずつ, また中央部に CCD カメラが取付けてある。照射レーザ光には, 波長が 780nm(50mW×2)のダイオードレーザを用いており, 計測感度は 0.03~0.1 μm, 計測レンジは 1~20 μm(20 μm 以上は分割計測)である。

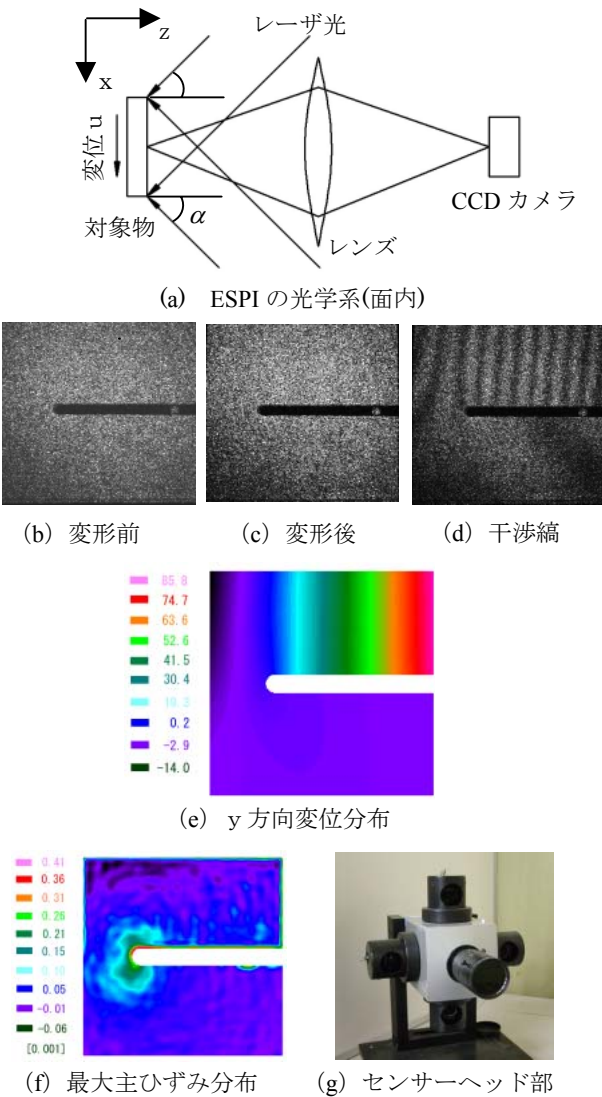


図-1 ESPI による変位・ひずみ計測の概要

2.2 3D デジタル画像相関法⁴⁾

3D デジタル画像相関法は, 2 台の CCD カメラで撮影した, 変形前後の計測対象物のデジタル画像を画像処理することで, 全視野変位分布を求める方法である。計測原理を図-2 に示す。変形前の画像において, 任意の点(画素)を中心とした任意領域(サブセット)を指定し(図(a)),

カメラを固定したままの状態計測物に変位を与える。変形後の画像でのサブセットの位置は変化し, これらの変形前後のサブセットのデジタル情報を比較し, 変形後のサブセットの位置を決定する。このサブセットの中心の移動が計測点の変形量および変形方向となる(図(b))。

本研究では, Correlated Solutions 社の 3D コリレーションシステムを使用した。図-3 に計測装置の概要を示す。2 台の CCD カメラ(1280×1024 ピクセル)が取付けてある。本計測装置の仕様を表-1 に示す。また, ESPI 計測とデジタル画像相関法の比較を表-2 に示す。

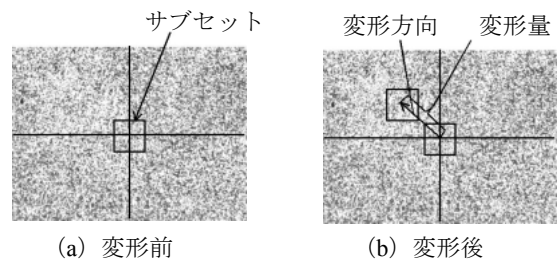


図-2 デジタル画像相関法の計測原理



図-3 本計測装置の概要

表-1 本計測装置の仕様

計測エリア	10×10mm~1000×1000mm
計測感度	ピクセル間の距離の1/10
計測レンジ	数回に分割すれば制限なし
計測距離	約5~10cm
空間分解能	ピクセル上では100 μm
出力形式	表面三次元形状, 変位, ひずみ

表-2 ESPI 計測とデジタル画像相関法の比較

	ESPI計測	デジタル画像相関法
長所	・非接触・全視野計測が可能 ・任意位置での値を出力できる	ESPIに比べロバスタ的計測
短所	リアルタイム計測が可能 振動の影響を受けやすい	カメラの性能に依存

3. RC はりのひび割れ計測

3.1 試験概要

試験体、計測範囲、および試験体設置状況を図-4に、試験体の配合を表-3に示す。試験体中央下部にひび割れを誘発させるために切欠きを設け、試験中は、切欠き先端部に取付けたクリップゲージによりひび割れ幅を計測した。また、計測面の裏面には60 mmのひずみゲージを貼付(鉄筋位置)し、ひずみを計測した。さらに、ESPI およびデジタル画像相関法により、コンクリート表面の全視野ひずみ計測を実施した。

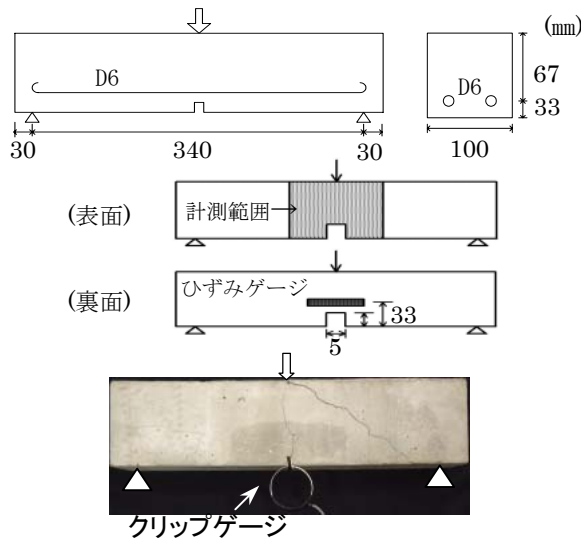


図-4 試験体概要

表-3 コンクリート配合表 (kg/m³)

水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤
175	350	748	971	7.00

3.2 試験結果

(1) ESPI 計測による試験結果

クリップゲージによって計測されたひび割れ幅と、ESPI 計測により得られたひび割れ幅との比較、およびひずみゲージと ESPI 計測により得られたひずみとの比較を図-5に示す。両者とも破壊前までは一致しており、ESPI の計測精度は、ゲージと同等であることが確認できた。

ESPI 計測により得られた各荷重段階におけるひずみ分布およびスペックル干渉縞の進展を図-6に示す。ESPI 計測により、各荷重段階におけるひずみ分布の変化を計測範囲全体で得ることができ、ひび割れ発生、進展を確認できた。

また、試験期間中にモニター上に表示されるスペックル干渉縞が、ひび割れの発生、進展とともに変化する様子が確認でき、リアルタイムでのモニタリング可能性を見出すことができた。このことは、ESPI によるひび割れなどの欠陥検知の可能性を示唆するものである。

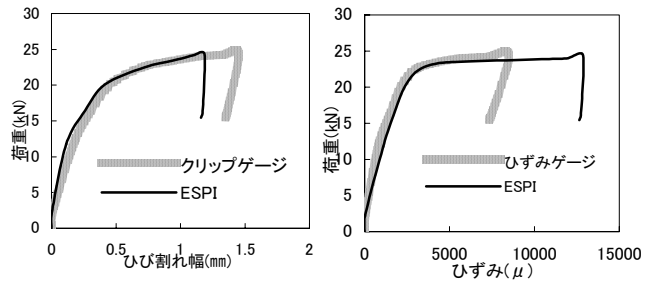
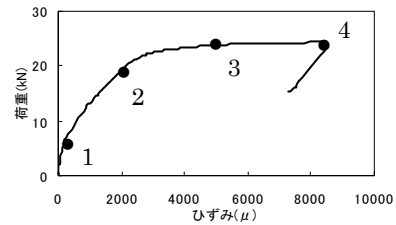
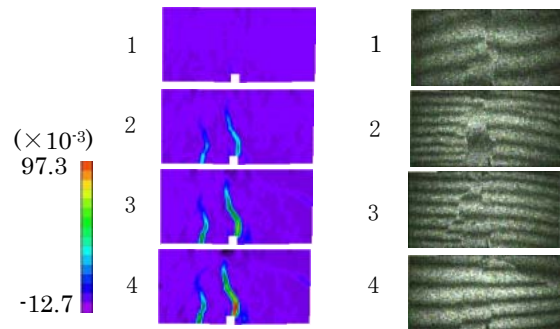


図-5 ひび割れ幅、ひずみの比較



(a) 荷重-ひずみ曲線



(b) x 方向のひずみ分布

(c) 干渉縞



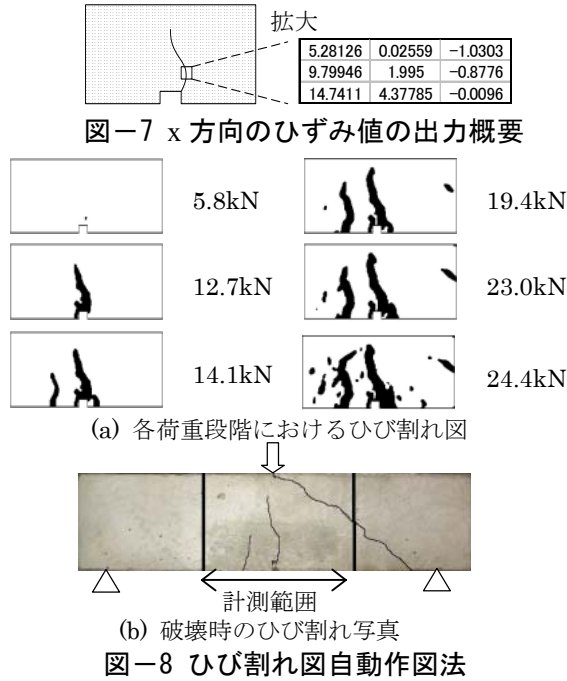
(d) 破壊形態

図-6 ESPI 計測による試験結果

(2) ESPI 計測によるひび割れ図自動作図法

ESPI 計測から得られる x 方向のひずみ値は 1 ピクセルごとに図-7のように表示される。1 ピクセル当たりのひずみ値の中から任意の値を表示させ、ひずみ集中箇所を荷重段階に沿って結ぶことで、非接触でひび割れ図を作成することができる。図-8に各荷重段階において、2000 μ以上のひずみ値を出力した場合を示す。ESPI

計測により得られたひずみのデータから、ひび割れ図を自動的に描くことができ、また破壊時のひび割れ写真とも一致していることが分かる。



(3) デジタル画像相関法による試験結果

デジタル画像相関法により得られたひび割れ幅、ひずみの比較を図-9、各荷重段階におけるひずみ分布の進展及び破壊形態を図-10に示す。ひび割れ幅、ひずみともゲージの値と終始一致している。ひずみ分布図から、ひび割れ発生、進展を確認できた。さらに、曲げひび割れ先端部から発生した斜めひび割れも確認できた。なお、図(b)のx方向のひずみ分布は図(a)の1~4の破壊前の各荷重時のひずみ分布図で、図(c)は急激に生じた斜めひび割れ破壊後の写真であるため、両図は対応していないように見受けられるが、本計測により斜めひび割れの発生が荷重3、4の段階で可視化されていることがわかる。

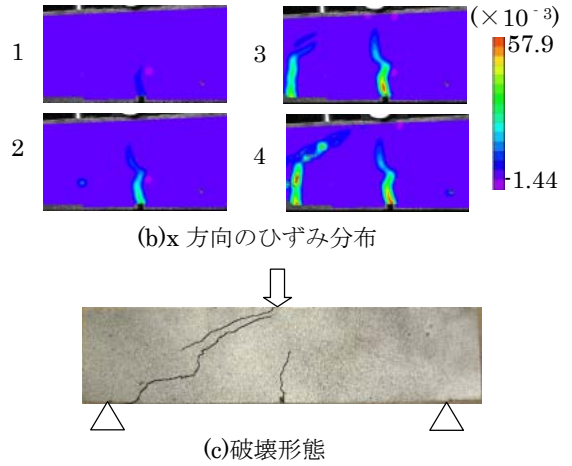
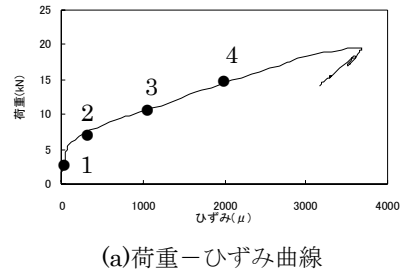
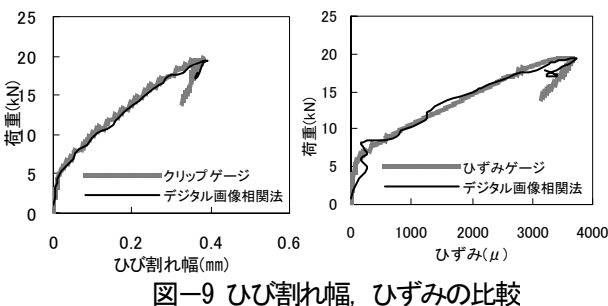


図-10 デジタル画像相関法による試験結果

4. せん断スパン比の異なる RC はり曲げ試験

4.1 試験概要

本研究では、ESPI 計測により、RC はりの曲げひび割れやせん断ひび割れの発生・進展過程の可視化を確認することを目的としている。そのため、せん断スパン比(以下 a/d と略記)によりひび割れ発生・進展状況が明確に異なる RC はり曲げ試験を採用した。

試験体寸法を図-11、試験体諸元を表-4に示す。本試験のコンクリート配合は表-3と同一配合である。a/d を 0.5~2 の範囲で変化させ、二点载荷による曲げ試験を行うことにより、a/d の違いによるひび割れ発生および破壊形態を検討した。また、試験中はスパン中央の変位を測定した。試験後、ESPI により得られたデータより、RC はりの曲げ・せん断ひび割れの発生・進展の可視化、表面のひずみ分布について検討した。

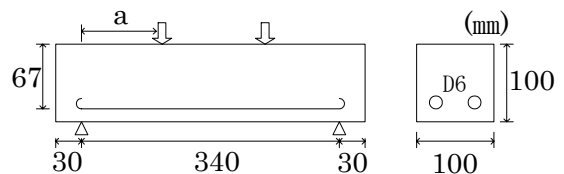


図-11 試験体寸法

表-4 試験体の载荷条件, 寸法, 材料強度

a/d	寸法(mm)		材料強度(MPa)	
	d	a	圧縮	引張
0.5	67	33.5	58.0	3.95
1.0		67		
1.5		100.5		
2.0		134		

4.2 試験結果

各試験体の荷重-スパン中央変位曲線を図-12に示す。また、 $a/d=0.5$ と 1.5 の試験体のひずみ分布と干渉縞の推移、破壊形態、および任意面でのひずみの変化を図-13, 14に示す。同図にはひずみが大きい箇所(ひび割れ発生箇所)を明色で表示している。また、ひずみ値は任意位置での値が算定されるが、図(d), (e)には载荷点及び支点近傍のひずみ分布を示している。なお、ひずみ図が完全対称でないのは、試験体の材料・強度・寸法等のバラツキがあること、さらには完全な対称载荷が不可能なためである。

$a/d=0.5$ では、せん断ひずみ、最大主ひずみとも、はじめ表面全体でほぼ一定である。荷重増加により、A-A 線上では支点部付近のひずみが大きくなっていることが分布図、ひずみ値より分かる。さらに、C-C 線上では荷重増加にともなうひずみの変化は見られず、支点部に集中したひずみにより破壊したと考えられる。

$a/d=1.5$ では、せん断ひずみ、最大主ひずみとも、はじめ表面全体でほぼ一定である。荷重増加により、B-B 線上では下縁 40 mm 付近でひずみ値が大きくなっている。破壊形態図からも同一箇所に斜めひび割れが発生していることが分かる。従って、ESPI 計測よりひび割れ発生・進展の可視化を確認することができた。また、 $a/d=1.0$, 2.0 の試験体においても同様のひずみ、スペクル干渉縞の変化が確認できた。

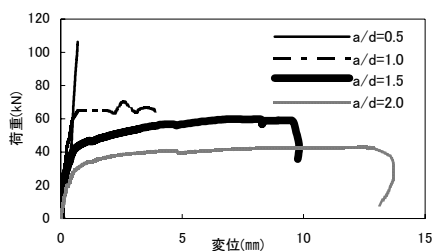
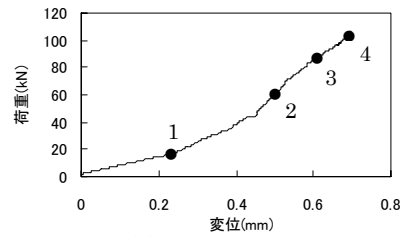
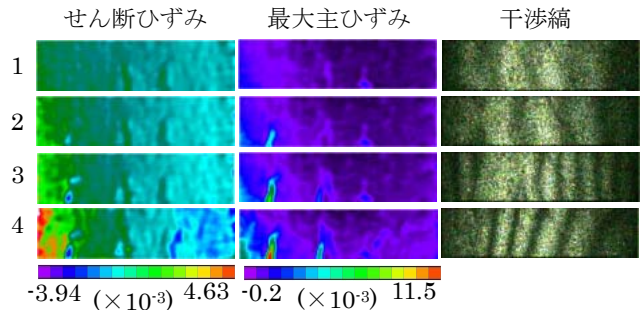


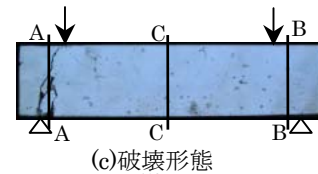
図-12 荷重-変位曲線の比較



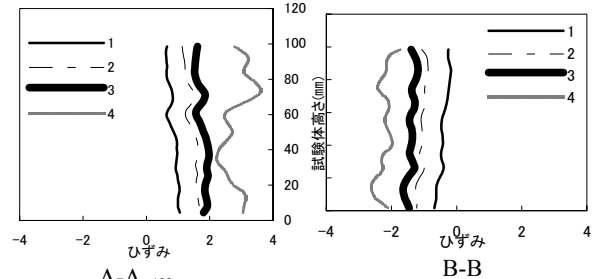
(a) 荷重-変位曲線



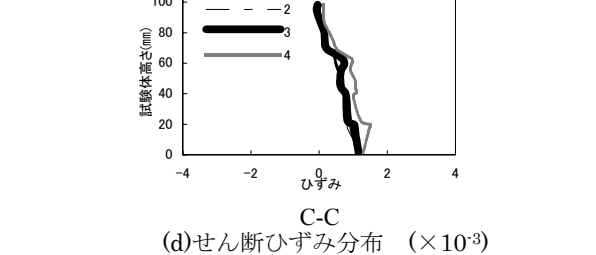
(b) ひずみ分布, 干渉縞の推移



(c) 破壊形態

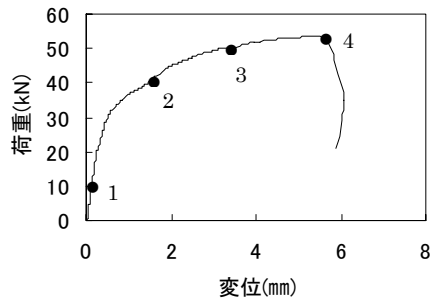


(d) せん断ひずみ分布 ($\times 10^{-3}$)

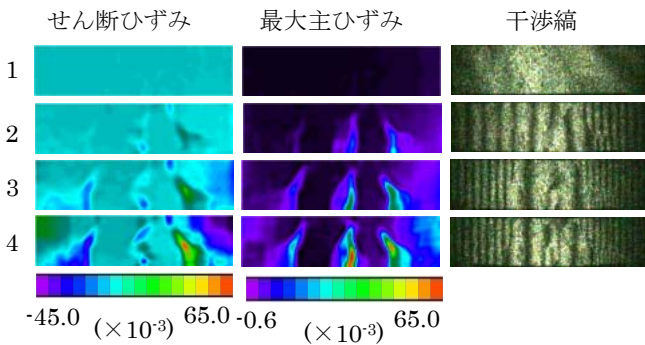


(e) 最大主ひずみ分布 ($\times 10^{-3}$)

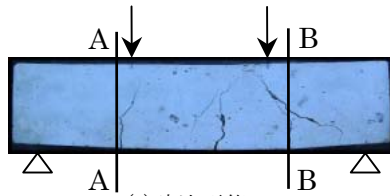
図-13 $a/d=0.5$ の試験体の計測結果



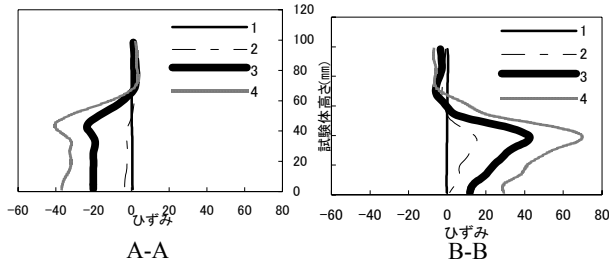
(a)荷重-変位曲線



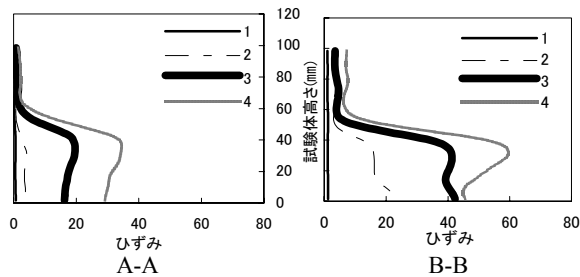
(b)ひずみ分布, 干渉縞の推移



(c)破壊形態



(d)せん断ひずみ分布 ($\times 10^{-3}$)



(e)最大主ひずみ分布 ($\times 10^{-3}$)

図-14 a/d=1.5 の試験体の計測結果

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめて示す。

(1) ESPI 計測およびデジタル画像相関法を用い

ることにより、非接触で全視野でのひずみ分布を取得することができ、ひび割れの発生、進展状況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は、ひび割れ箇所と一致する。

(3) コンクリートの任意領域でのひび割れ幅、ひずみ値を非接触により算出することができ、ひずみゲージを用いない計測手法の一つとしての有効性を確認することができた。

(4) a/d を変化させることによる RC はりの破壊形態の違いを、ESPI 計測により確認することができ、せん断ひずみや最大主ひずみ分布を表示することにより、ひび割れ発生と関連づけられるような結果が得られた。

(5) ESPI 計測により得られた変位、ひずみのデータより、ひび割れ幅算定法やひび割れ図自動作図法を考案した。

(6) ESPI 計測でのスペックル干渉縞のリアルタイムでのモニタリングの可能性を確認することができた。

6. あとがき

本研究は平成 17 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：17360217)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：スペックル干渉法による非接触全視野計測法，応用力学論文集，Vol.6，pp.1081-1088，2003
- 2) 高橋賞：フォトメカニクス，山海堂，1997
- 3) 豊岡了：ダイナミック電子スペックルパターン干渉法による動的な全視野計測，日本実験力学学会誌，Vol.2，No.1，pp.20-25，2002.
- 4) 内野正和：デジタル画像相関法の原理について，JCI-JSEM ジョイントセミナー，光学的計測法の基礎と応用，2005.12.22