

スペckル干渉法を用いたRCはりの ひび割れ発生・進展過程の非接触全視野計測

Noncontact and whole field measurement of the cracking generation and development process
of the RC beam by the speckle interference method

松田浩*, 山下務**, 中島朋史***, 浜岡広****, 伊藤幸広*****

Hiroshi MATSUDA, Tsutomu YAMASHITA, Tomohito NAKASHIMA, Hiroshi HAMAOKA and Yukihiko ITOH

*工博 長崎大学教授 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

**長崎大学工学部技術職員 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

***長崎大学大学院生 生産科学研究科環境システム工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

****長崎大学大学院生 生産科学研究科環境システム工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

*****博士 (工学) 佐賀大学理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1)

The first branching point into nonlinearity in reinforced concrete is the generation of cracks. Namely, the rigidity shows the sudden decrease with the generation of cracks. However, the precise prediction is quite difficult, because the generation of cracks is greatly affected by so many factors. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) offers the possibility of whole-field and non contact measurement of displacements and strains. In this paper, ESPI is applied to observe generation and development of cracks in the bending tests of reinforced concrete beams. According to the present method, it can inspect the change of the strain of the arbitrary specific point without strain gauge. In addition, the strain distribution from crack generation to destruction of RC beam is observable by noncontact. The effectiveness of ESPI can be confirmed from these results to the measurement by the experiment on the RC beam.

Key Words: noncontact and whole field measurement, electronic speckle pattern interferometry (ESPI),

RC beam, cracking, bending and shearing failure

キーワード: 非接触全視野計測, スペckル干渉RCはり, ひび割れ, 曲げ・せん断破壊

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以後, RC と略記) において, まず現れる非線形性の分岐点はひび割れの発生による剛性低下である. そのため, ひび割れの発生から破壊に至るまでのひび割れ発生・進展状況を正確に観察することが, RC 構造物の挙動を解明する上で重要となる.

しかしながら, ひび割れ発生を正確に予測し, ひび割れ進展を追跡することは極めて困難である. なぜなら, コンクリートのひび割れ発生は, 寸法効果, 養生条件, 乾燥収縮など多くの要因に影響され, ひび割れの発生箇所を特定することはできないからである. また, 偶然にもひずみゲージ貼付位置にひび割れが発生したとしても, RC はりの斜めひび割れのように進展方向が変化したりするため, ひび割れの進展を追跡することはほとんど不可能である. そもそも, ひずみゲージで計測されるひずみ値は貼付され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く, また, ひび割れ発生やひび割れ幅の増大にともなって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.

筆者らは, ここ数年来, レーザ光を用いた光計測技術に着目し, 三次元形状計測, ホログラフィ干渉計測, スペckル干渉計測などの種々の光計測を実施してきた^{1)~5)}. 本研究では, このような光計測技術のうち, 可視光線下で非接触全視野計測を可能とする電子スペckルパターン干渉法 (以後, ESPI と略記) に注目した. ESPI は, 粗面でのレーザ光の乱反射によって生じるスペckル模様⁶⁾の明暗の変化を検出する計測方法であり, ①光学系が簡単, ②可視光線下で計測可能, ③CCDカメラなどの比較的低廉像度の記録材料で可能, ④準リアルタイム計測が可能, などの利点が挙げられる⁶⁾.

本研究では, ESPI 計測法を用いて, 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プロセスの可視化の可能性を確認するために, せん断補強鉄筋がない

RC はり試験体を製作し、せん断スパン長を変化させて載荷試験を実施した。

2. E S P I 計測の原理と概要

2.1 スペックル干渉縞

レーザ光（波長： λ ）を粗面に照射した場合、レーザ光のコヒーレント性（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。スペックル干渉法は、2つ以上の光路を通ったレーザ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⁹⁾⁸⁾。

面外方向に w 、面内方向に u （または v ）だけ変形したとすると、変形前後で二つの光路を通る光の位相差 $\Delta\phi$ は、それぞれ次式で与えられる。なお、 α は面内計測において照射光が測定面の法線となす角である。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi w(x, y)}{\lambda} \quad (\text{面外}) \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi u(x, y)}{\lambda} \sin \alpha \quad (\text{面内}) \quad (2)$$

光学系を工夫することによって、上記の関係より面外変形またはその空間微分、面内変形の2成分等を独立に求めることができる。ホログラフィ干渉法と比べると、外乱に対する安定性は高いが、得られる干渉縞はスペックルノイズが重畳した画質の悪いものである。しかし、これは干渉縞を位相分布に変換する画像処理と、それに続く位相接続等の処理により解決される。

いま、測定物と参照物からの反射光が CCD カメラの画素上の1点に到達する光の振幅を a_1 、 a_2 とし、粗面の凹凸によるランダムな位相を ϕ とすると、個々のスペックルの強度 I_1 は次式で与えられる。

$$I_1(x, y) = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \phi \quad (3)$$

検査面が変形し、その位相差が $\Delta\phi$ だけ変化したとすると、スペックルパターンの強度分布 I_2 は次式で与えられる。

$$I_2(x, y) = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (4)$$

次に変形前 I_1 と変形後 I_2 のスペックルパターンの差の絶対値を取ると、次式で表される。

$$\begin{aligned} |I_2 - I_1| &= |2a_1a_2 [\cos(\phi + \Delta\phi) - \cos \phi]| \\ &= 4a_1a_2 |\sin(\phi + \Delta\phi/2)| |\sin(\Delta\phi/2)| \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)より $|\sin(\phi + \Delta\phi/2)|$ は、0 から 1 までランダムな値をとり、 $|\sin(\Delta\phi/2)|$ は 0 から 1 まで規則的に変化することがわかる。そのため、変形による位相差 $\Delta\phi$ が π の奇数倍 $(2n+1)\pi$ の場合は $|\sin(\Delta\phi/2)|=1$ となり、強度が最も大きくなり、偶数倍 $2n\pi$ の場合は $|\sin(\Delta\phi/2)|=0$ となり、強度がゼロとなる。これにより、スペックル干渉縞が形成される。干渉縞 1 本当りの変位量は面外変位 w および面内変位 u 、

v の場合は、それぞれ式(1)、(2)よりレーザ光の波長の半分となり、光波の波長を基準とした高精度の計測が行えることが示される。

2.2 位相シフト法と位相接続

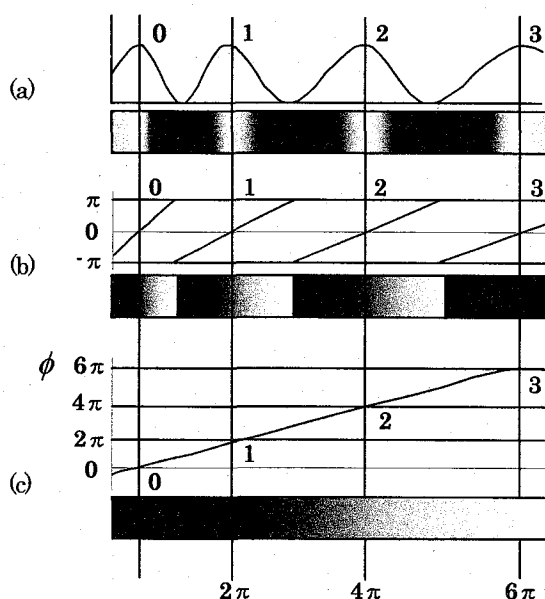
式(3)(4)に示されるように、干渉縞の輝度値 I は空間 (x, y) 上に余弦波状に分布する。そのため、位相は実数全体で表すことができ、 $-\pi$ から π までの 2π 周期の繰返しとみなすことができる。また、前述のように得られるスペックル干渉縞の画質は悪いので、位相シフト法⁹⁾などにより位相値 ϕ を求め鮮明なフェーズマップが作成される。

位相シフト法は、位相を 1 周期分だけ変化させながら複数枚の画像を撮影し、得られた複数枚の画像から位相分布を求める手法である。すべての画素において輝度は 1 周期分変化するため、その輝度変化から各点ごとに独立して位相値が求められる。位相シフト法によって得られる位相分布は、位相接続前の位相値、またはラッピングされた位相と呼ばれ、その値は $-\pi$ から π の値の繰返しの不連続な位相分布である。

このようにして得られた位相分布を変位計測で用いるには、連続化された単調増加の位相分布が必要となる。図-1 に縞次数と位相接続後の位相の関係を示す。図(a)は余弦波状の輝度分布を持つ干渉縞画像であり、その輝度分布が図(b)である。縞次数が順番に付与されている。図(c)に位相の範囲が $-\pi \sim \pi$ の位相接続前の位相値 θ の分布を示す。位相接続前の位相値 θ と縞次数から、次式(6)の計算

$$\phi(x, y) = \theta(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (6)$$

を行うことにより位相を連続化することができる。このような位相値を位相接続後の位相値、アンラップされた位相と呼び、この操作を位相接続または位相の連続化、アンラッピングという。



(a) 干渉縞, (b) 位相分布, (c) 位相接続

図-1 干渉縞の輝度と位相分布

2.3 ESPI計測の概要

本計測装置の画像解析部も、上記の方法を用いて、基本的には1ピクセル当りの変位およびひずみが求められる。面内変形を例にとると、まず、変形前後の位相連続された位相分布値 ϕ より位相差 $\Delta\phi$ が得られ、それを式(2)に代入して連続的な変位分布 $\Delta u(x,y)$ 、 $\Delta v(x,y)$ が得られる。次に、それを次式のように通常の空間微分することにより、ひずみ値が算定される。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (7)$$

なお、 Δx および Δy は、計測前処理（画像処理）において計測領域（通常 512×512 ピクセル）とその長さを指定することにより、1ピクセル当りの長さが求まる。これによりCCDカメラ画像の1ピクセルを基準とした変位、ひずみ成分が計算される。また、応力の計算は、線形弾性論の構成則（応力とひずみの関係式）より算定される。

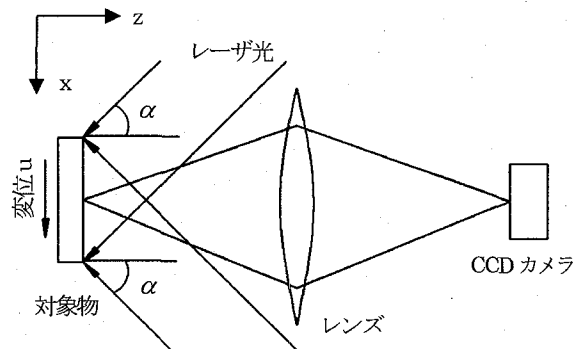
本研究で用いた ESPI による変位・ひずみ計測の概要を図-2に示す。図(a)は ESPI 計測の x 方向の光学系である。y 方向についても同様である。同一面内の2方向から、同一波長のレーザー光が対象物の粗面に照射されると、レーザー光は粗面の各点で乱反射する。これらの光波は粗面の各点ごとに不規則に変化するため互いにランダムな位相関係で重ね合わされ、CCD カメラに取り込まれた画像にはコントラストの高い流動性の斑点模様が形成される。これがスペックルパターンと呼ばれるものである（図(b)）。

試験片が面内方向に光波の半波長の距離（ $0.39 \mu\text{m}$ ）変位すると、対応するスペックルは明暗を変えるが、図(c)のように模様全体は同じように見える。スペックルの明暗の変化の分布は物体の変形前後の光強度の相互相関値の分布に対応する。

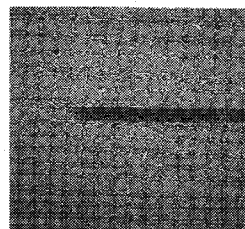
CCD カメラにより、はじめに静止した物体のスペックルパターンを撮像し（図(b)）、それを基準パターンとする。次に変形した物体によるスペックルパターンを撮像し（図(c)）、基準パターンとの差画像をリアルタイムでモニター上に表示する。この差画像からスペックルの強度と位相変化について減算処理を行えば、変形による位相差が 2π 変化するごとに差画像の明暗が1周期変化する干渉縞を得ることができる（図(d)）。

このようにして全視野変位分布を、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(e)）。ひずみ分布は変位分布の微分により求められる（図(f)）。ひずみ値が得られると、弾性応力状態の範囲内における応力値は、計測対象物の弾性係数、ポアソン比を応力-ひずみ関係式（構成式）に代入することにより求めることができる。さらに、数値的な変位やひずみの加算を行うことができるので、大きな変形にも適用することができる。

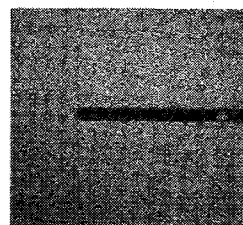
なお、本計測装置は、試験終了後に測定位置や測定長を任意に与えることができるので、任意の基準長さの平均ひずみ値を求めることができ、ひび割れ近傍のひずみ集中を精度よく測定することができる。



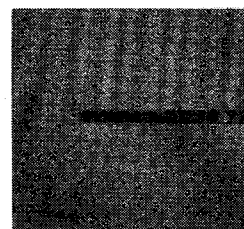
(a) ESPIの光学系(面内)



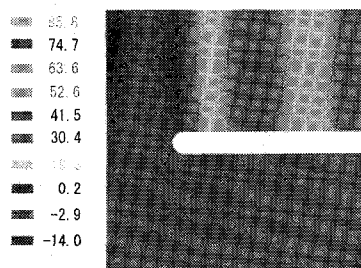
(b) 変形前



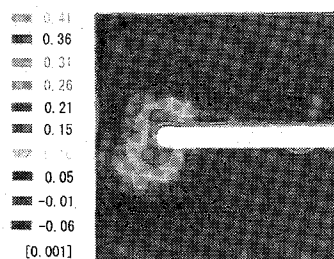
(c) 変形後



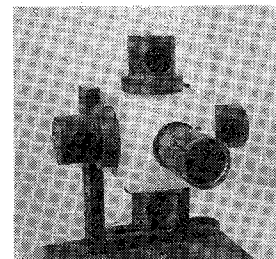
(d) スペックル干渉縞



(e) y方向変位分布 (μm)



(f) 最大主ひずみ分布



(g) センサーヘッド部

図-2 ESPIによる変位・ひずみ計測の概要

以上のように、ESPI 計測で得られる縞パターンはホログラフィ干渉法によるものと等価であるので、光波長をものさしにした高精度全視野計測ができる。ホログラフィーと違って、CCD カメラとコンピュータさえあれば、すべてデジタル処理で結果が得られることから、電子スペckルパターン干渉法 (ESPI) と呼ばれる。

本研究では、変位・ひずみ分布の計測には、ETTEMEYER 社のレーザストレインアナライザー 2D-ESPI を使用した。図(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 個ずつ取付けてあり、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。

2.4 計測性能照査

ESPI のひずみ測定結果の精度を確認するために、図-3に示すアルミニウム合金製の試験片 (板厚 2mm) を用い、一軸引張試験を行った。試験片にはひずみゲージ (5mm) を貼付し、ESPI による計測はひずみゲージが貼付されていない面を計測した。なお、ESPI によるひずみ値は貼付ひずみゲージと同位置および同一長さ (5mm) の平均ひずみ値である。

得られた結果を図-4に示す。弾性域および塑性域においても ESPI 計測によって得られたひずみ値はひずみゲージ法によるひずみ値とほぼ一致する。以上より ESPI によるひずみ計測の精度はひずみゲージ法と同程度の計測精度があることがわかる。

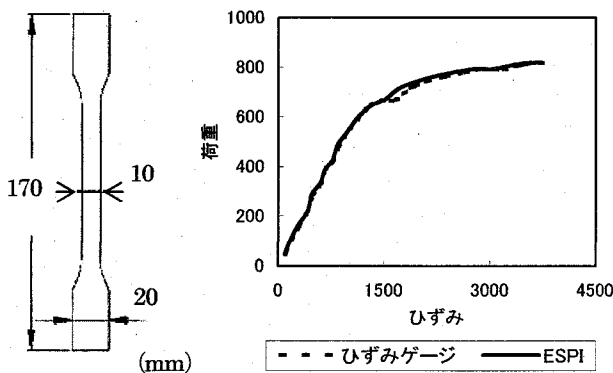


図-3 一軸引張り試験片

図-4 荷重-ひずみ曲線

3. せん断スパン有効高さ比の異なる RC はりの曲げ試験

3.1 試験概要

本研究では、ESPI により全視野ひずみ計測の有効性を確認することを第一目的としている。そのため、せん断スパン有効高さ比 a/d によりひび割れ発生・進展状況が明確に異なる RC はりの曲げ試験を採用した。

図-5に示す RC はり試験体を用いて、せん断スパン有効高さ比 a/d を 0.5~4 の範囲で変化させ、二点載荷による曲げ試験を行うことにより、せん断スパン有効高さ比によ

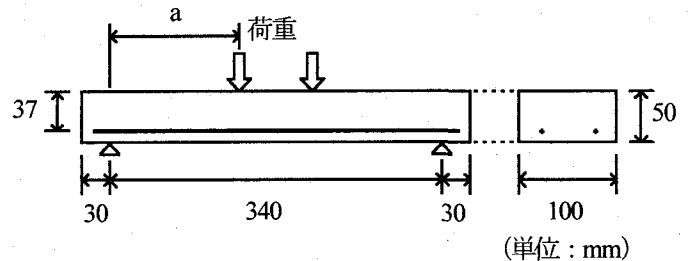


図-5 試験体寸法

表-1 試験体の載荷条件、寸法、材料強度、破壊形態

a/d	寸法 (mm)		材料強度 (MPa)		破壊形態
	d	a	圧縮	引張	
1.0	37	37	40.1	3.49	せん断圧縮
2.0	74	74			せん断圧縮
3.0	111	111			斜め引張
4.0	148	148			斜め引張
0.5	18.5	18.5	48.4	3.78	せん断圧縮
1.5	55.5	55.5			せん断圧縮
2.5	92.5	92.5			せん断圧縮
3.5	129.5	129.5			斜め引張

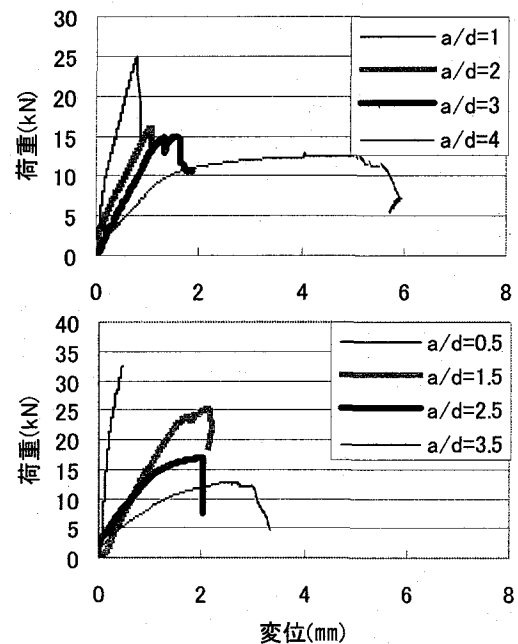
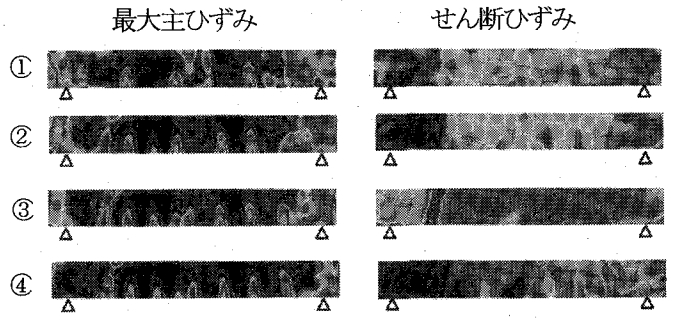
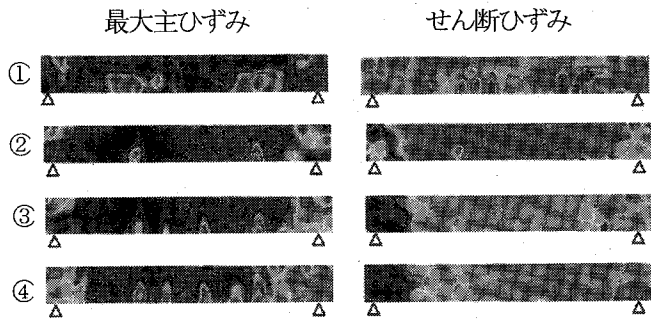
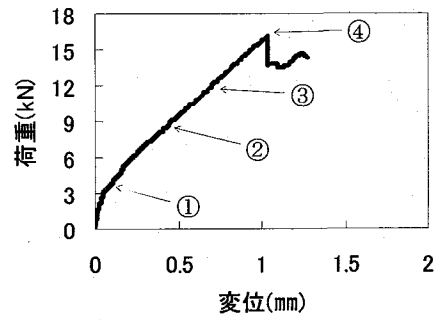
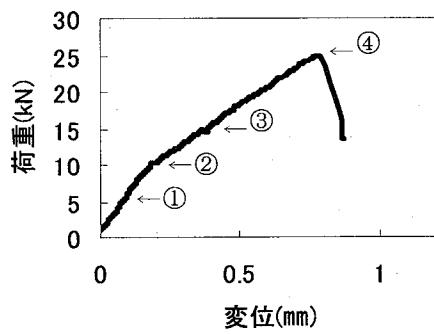


図-6 荷重-変位曲線

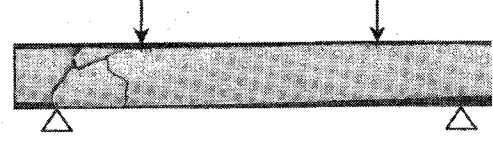
るひび割れ発生及び破壊形態について検討した。

有効高さ $d=37\text{mm}$ を一定として、支点から荷重点までの距離 a を変化させることでせん断スパン有効高さ比 a/d を変化させた。試験体にはモルタルを使用し、セメント:水:細骨材の重量比は 1:0.5:2 とした。鉄筋は D6 鉄筋を使用し、引張側に 2 本配置した。鉄筋比は 1.2% である。なお、試験体はスターラップ等が配置されていないせん断補強筋のない RC はりである。

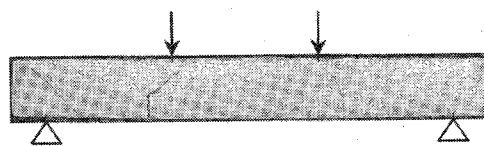
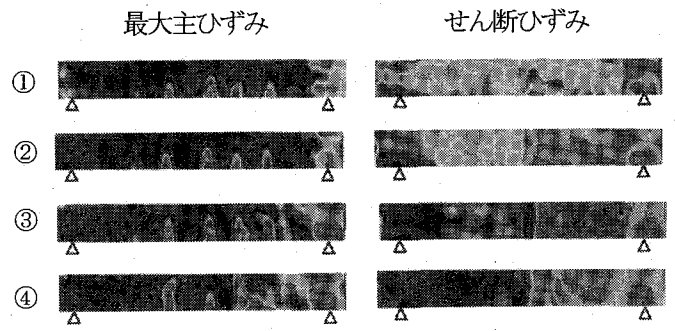
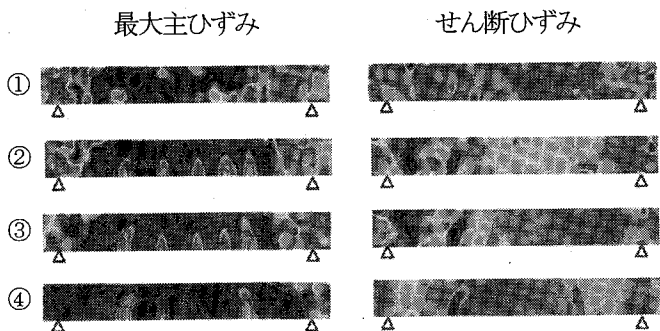
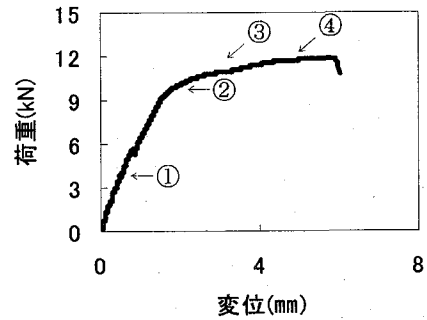
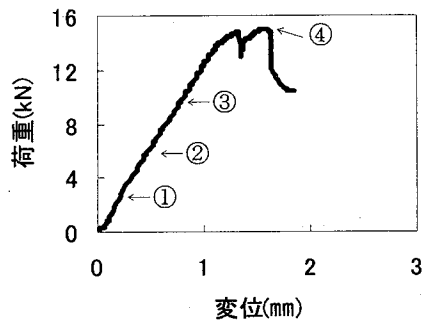
せん断スパン有効高さ比 a/d を変化させた試験体の載荷条件、寸法、材料強度および破壊形態を表-1に示す。試験体はそれぞれ 3 体ずつ製作した。なお、 $a/d=1, 2, 3, 4$ と



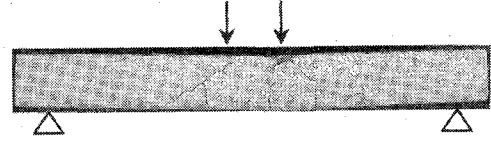
(a) せん断スパン比 $a/d=1$



(b) せん断スパン比 $a/d=2$



(c) せん断スパン比 $a/d=3$



(d) せん断スパン比 $a/d=4$

図-7 せん断スパン比(a/d)が異なる RC はりの各荷重段階でのひずみ分布および破壊形態

$a/d=0.5, 1.5, 2.5, 3.5$ は同一配合であるが、打設製作日が異なり、材料強度が異なるため表-1のように表記した。

また、載荷試験中は ESPI によりコンクリート表面の非接触全視野変位・ひずみ計測を実施した。なお、今回の実験では、スパン中央の変位は変位計で測定した。載荷試験後、ESPI により得られた変位・ひずみ分布を用いて、RC はり部材の曲げ・せん断ひび割れの発生・進展の可視化、断面のひずみ分布などについて検討した。

3.2 試験結果

3.2.1 ひずみ分布および破壊形態

各試験体の荷重-スパン中央変位曲線を図-6に示す。また、せん断スパン有効高さ比 $a/d=1, 2, 3, 4$ 試験体のひずみ分布の推移と破壊形態を図-7に示す。同図の荷重変位曲線中の①～④の各荷重段階における最大主ひずみ分布とせん断ひずみ分布、および破壊形態図を各々同図 (a) ～ (d) に示す。

破壊形態は $a/d=0.5\sim 2$ ではせん断圧縮破壊、 $a/d=2.5$ ではせん断引張り破壊あるいは斜め引張り破壊、 $a/d=3\sim 4$ では斜め引張破壊であった。ESPI 計測による全ひずみ分布図より、ひび割れの発生・進展を確認することができた。

斜めひび割れ発生は斜め引張破壊の開始である。しかし、これまで、曲げひび割れ発生や斜めひび割れ発生箇所を正確に特定し、さらに、その後のひび割れ進展過程を、全変位場で、かつ、比較的簡便な方法で、可視化することはあまり検討されていない。ここで述べたような斜めひび割れの開始や進展の可視化技術が、今後、破壊メカニズムを支配するようなひび割れの不安定伝播現象の計測の基礎となるものと考えられる。

なお、ひずみ分布図におけるひずみ値は1ピクセルにおけるひずみ値である。ひび割れ直上ではレーザ光が反射せず、また、ひび割れ近傍では変形が大きく、干渉縞が生じず、ひずみは求められない。にもかかわらず、同図に示されるように大きなひずみ集中が示されるのは、CCD カメラの空間分解能が低いことと、位相解析での位相接続処理によるものであると考えられ、ひび割れ部のひずみ値は正確な値ではない。ひび割れ箇所のひずみ値を表示しないような処理も考えられるが、これらの図から、ひび割れ部やその近傍においてひずみが局所的に集中している様子を可視化でき、また、実際のひび割れ発生箇所と一致するため、未補正のひずみ分布図を示した。また、本実験ではひび割れ幅を測定していないが、クリップゲージと ESPI によるひび割れ幅の計測結果（ひび割れを跨ぐ二点間の軸方向変位の差）は一致することを確認している。これに関しては、あらためて報告する予定である。

3.2.2 鉄筋位置におけるコンクリート表面のひずみ

図-8に示すように、試験体の鉄筋位置におけるコンクリート表面のスパン長平均ひずみ (I)、ひび割れ部 (II～IV) およびひび割れ無部 (V) の x 方向ひずみ (ゲージ長 15mm の平均ひずみ) の推移について検討した。

図-9に鉄筋位置におけるコンクリート表面ひずみの

推移を示す。(b) 図のひずみ値は (a) 図の荷重-変位曲線の①～④の荷重値におけるひずみ値を示したものである。同図より、(b) 図の上に示すひび割れ発生箇所、ひずみ値が局所的に大きくなっている。したがって、各位置でのひび割れ箇所をデジタル情報として特定することが可能となり、ひび割れ図を描画することができる。

また、図-10は図-8の I～V 位置の荷重-ひずみ曲線を示す。同図より、ひび割れ部では、ひずみが大きくなり、ひび割れ無部ではひずみは小さくなっている。

3.2.3 任意断面におけるひずみ値の推移

斜めひび割れの発生について検討するため、RC はりの任意断面におけるひずみ値の変化について調べた。図-

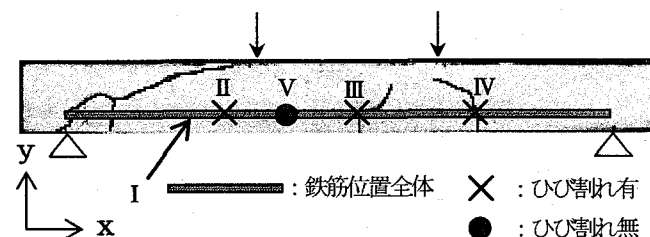
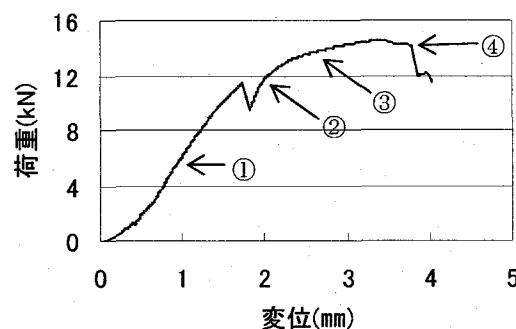
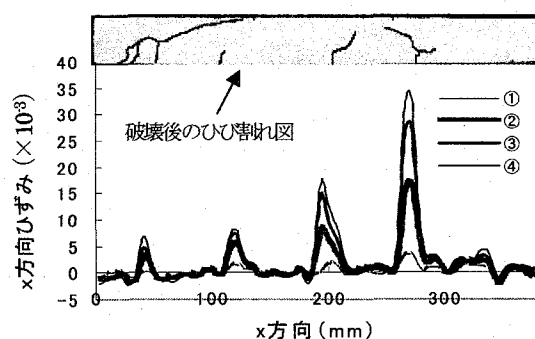


図-8 計測範囲詳細



(a) 荷重-変位曲線



(b) 鉄筋位置のひずみ値

図-9 鉄筋位置におけるコンクリート表面ひずみの推移

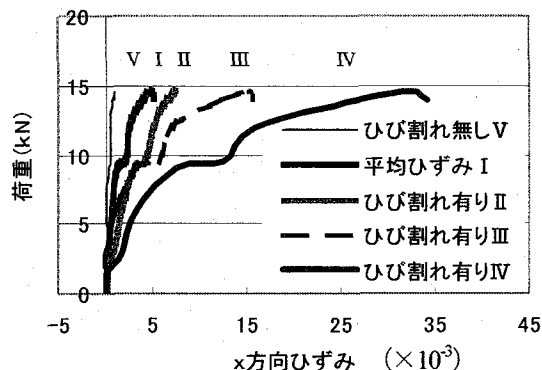
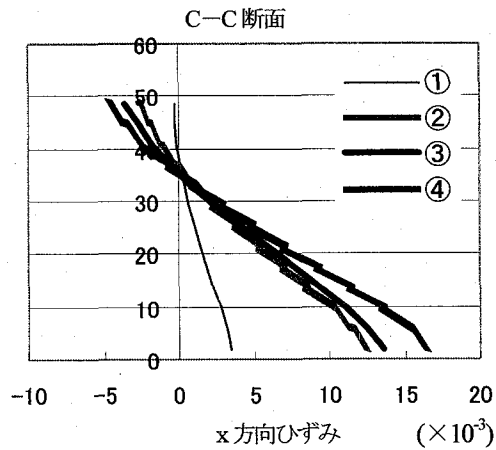
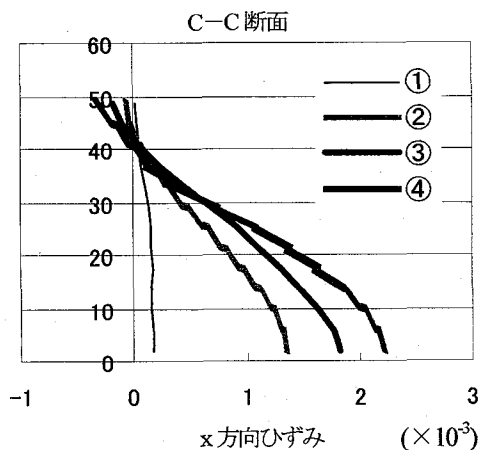
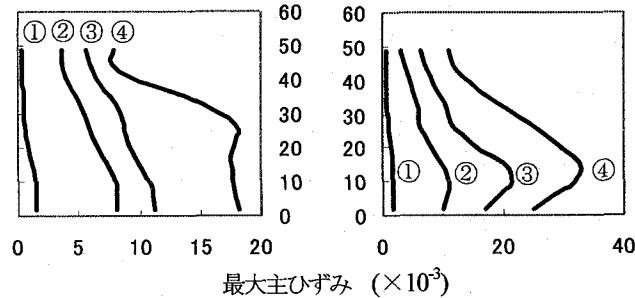
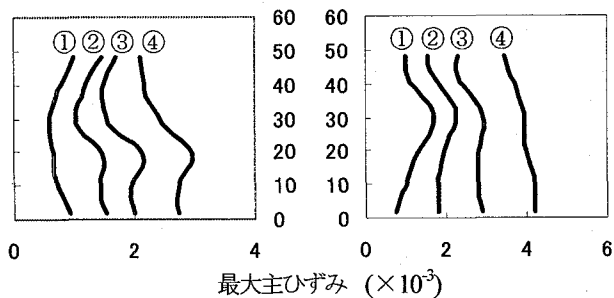
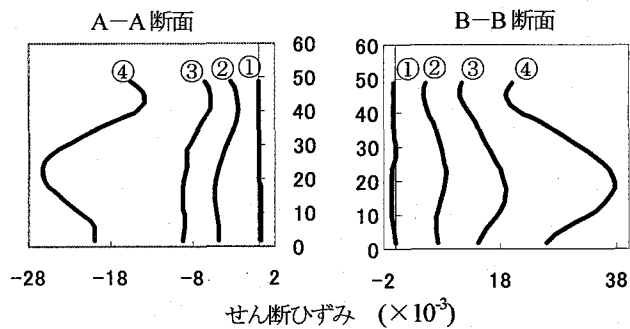
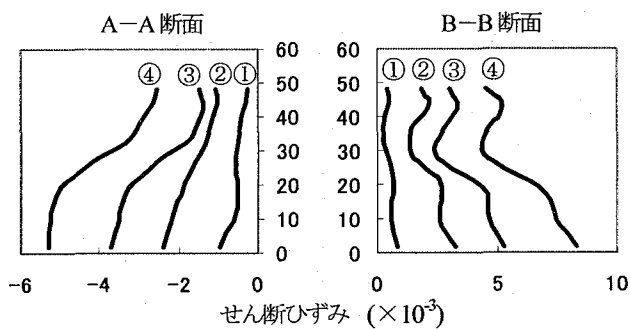
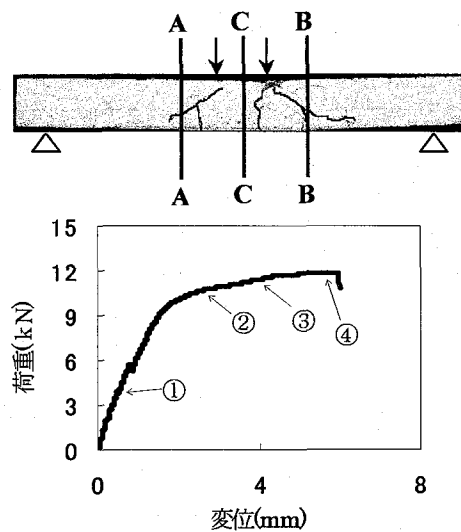
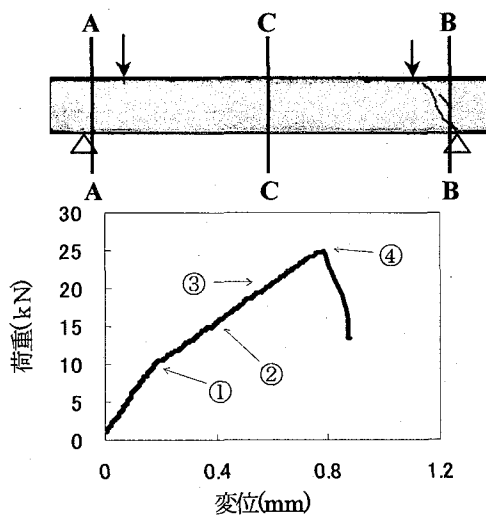


図-10 荷重-ひずみ曲線



(a) せん断スパン比 $a/d=1$

(b) せん断スパン比 $a/d=4$

図-11 各断面における、最大主ひずみ、せん断ひずみおよびx方向ひずみの変化

11 (a) (b) に $a/d=1$, 4 試験体の A-A, B-B 断面におけるせん断ひずみ、最大主ひずみ、および、C-C 断面の x 方向ひずみの推移を示す。

図から、 $a/d=1$ のせん断ひずみ分布は、はじめ断面全体ではほぼ一定値であるが、荷重の増加とともに支点部付近の

ひずみが大きくなっている。また、荷重-変位曲線の変位も小さく、急激に耐力が低下している（荷重-変位曲線図の点④）。したがって、支点部におけるせん断ひずみが許容限界せん断ひずみ値を超えたことにより、せん断破壊となったと考えられる。

一方、 $a/d=4$ のせん断ひずみ分布は、初めは $a/d=1$ 同様に断面全体ではほぼ一定である。しかし、荷重が増加するにつれて、A-A 断面、B-B 断面において、下縁から 20mm 付近でせん断ひずみが大きくなっているのがわかる。また、B-B 断面の最大主ひずみは下縁から 15mm 付近で大きくなっている。さらに、ひび割れ図より、B-B 断面でも下縁から 15mm 付近に斜めひび割れが発生していることが確認できる。したがって、最大主ひずみがコンクリートの許容限界引張りひずみ値を超えたことにより、斜め引張りひび割れが生じたものと考えられる。このことは、斜めひび割れが、断面中央位置付近から斜め上下方向に向かって発生するという定説と同じ結果である。

さらに、試験体中央断面の x 方向ひずみを観察すると、下縁から 37~40mm 付近に中立軸が存在していることがわかる。これは RC の中立軸の計算式により求めた値が下縁から 37mm であったため、ほぼ計算式と実験の値が一致していることがわかる。このように、ESPI 計測により、多くのひずみゲージを貼付することなく、中立軸位置も簡単に計測することができる。

3.2.4 最大ひび割れ間隔

本試験体の最大ひび割れ間隔に関して、計算値と実験値の比較を行った。最大ひび割れ間隔 l の計算式は式(8)で表される。

$$l = 4c + 0.7(c_s - \phi) \quad (8)$$

ここに、 c はかぶり、 c_s は鋼材中心間隔、 ϕ は鋼材径である。

ひび割れ間隔の比較結果を表-2に示す。実験値の最大ひび割れ間隔は図-9の結果から得られたものである。計算値と実験値がよく一致していることがわかる。よって ESPI によりひび割れ間隔を算定できることがわかった。本実験では、小さい RC 試験体を用いて曲げ試験を行ったが、最大ひび割れ間隔に関しては、算定式(8)とほぼ同じ結果が得られた。

表-2 最大ひび割れ間隔の比較

a/d	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
実験値	73	72	69	70	68	78	76	61
計算値	78							

4. まとめ

本論文では、スペックル干渉法を用いてせん断補強筋のない RC はりの曲げひび割れ、斜めひび割れの発生・進展過程の非接触全視野計測を実施した。その結果は以下のようにならめられる。

1. 長さ 40cm の曲げ試験体による RC はりの載荷試験に

おいても、 a/d を変化させることにより、ひび割れ発生および破壊形態の違いを確認することができた。

2. ESPI 計測による局所的なひずみ集中箇所はひび割れ箇所と一致する。
3. ESPI 計測は、準リアルタイム、非接触、および全視野計測が可能であるので、主ひずみやせん断ひずみ分布を表示することにより、曲げおよび斜めひび割れ発生箇所を特定することができ、またひび割れの進展を可視化することができる。
4. ひび割れ幅はひび割れを跨ぐ二点間の軸変位の差から算定することができる。
5. 全視野かつ 1 ピクセル単位でのひずみデータが得られるので、ひび割れ発生ひずみ以上となる点をプロットすることによりひび割れ図を描くことができる。

5. あとがき

本研究を遂行するにあたって、豊岡了教授(埼玉大学)、内野正和氏(福岡県工業技術センター)には光学的計測法について多大なるご助言を戴きました。また、本研究は科学研究補助金、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) 和田真禎ほか: レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会年次講演会発表論文集, pp.299-302, 1999.
- 2) 和田真禎ほか: レーザと CCD カメラを用いた三次元計測装置の開発とその適用例, 土木学会第 54 回年次学術講演会, 1999.
- 3) 松田浩ほか: ホログラフィ干渉計測および三次元計測による薄肉構造部材の非破壊検査法に関する研究, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.5, pp.847-854, 2002.
- 4) 松田浩, 神原天鳴ほか: スペックル干渉法による非接触全視野ひずみ計測法, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1081-1088, 2003.
- 5) 松田浩ほか: 電子スペックルパターン干渉法によるアルミニウム合金版の破壊挙動の全視野ひずみ計測, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.7, pp.1241-1250, 2004.
- 6) 高橋貴監修: フォトメカニクス, 山海堂, 1997.
- 7) 豊岡了: ダイナミック電子スペックルパターン干渉法(DESPI)による動的な全視野計測, 日本実験力学会誌, Vol.2, No.1, pp.20-25, 2002.
- 8) 内野正和: レーザスペックル計測とその応用, 実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫, 九州大学応用力学研究所編, pp.71-75, 2002.
- 9) 森本吉春ほか: 応力・ひずみ・形状・変形の高速度高精度全視野計測と光情報処理の研究, 和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科研究成果報告書, pp.2-6, 2002.

(2005 年 9 月 10 日受付)