

論文

[2007] 繊維補強コンクリート梁のひび割れ先端における微小変形に関する実験的研究

上原匠\*1・梅原秀哲\*2・吉田弥智\*3・信田佳延\*4

1. まえがき

近年、コンクリート部材におけるひび割れの進展と強度との関係を解明するために、破壊力学を適用した研究が盛んに行われている。[1][2]破壊力学を適用する場合の課題の1つとして、ひび割れ先端で生じている変形や破壊プロセス等の現象の把握が挙げられる。そのためにはひび割れ先端近傍の微小変形状態を広範囲にわたり、二次元的に測定する必要がある。しかし、外力が作用する場合のひび割れ先端の微小変形状態は十分に把握されておらず、ひび割れ進展の現象が明らかにされているとは言えない。

そこで本研究では、破壊面が形成されるまでのひび割れ先端近傍での微小変形を測定する方法として、流体の粒子群の変位や流速分布等の把握に対して成果を挙げているレーザースペックル法[3]の適用について検討するとともに、繊維補強コンクリートのひび割れ先端近傍での微小変形領域の大きさ、形状、領域内での変形状態の把握を試みた。

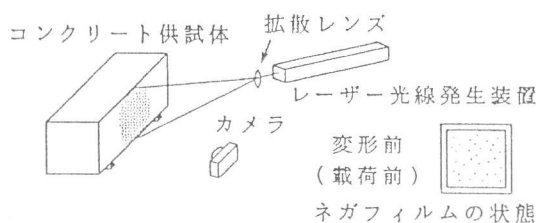
2. レーザースペックル法の測定精度

2.1 レーザースペックル法の概要

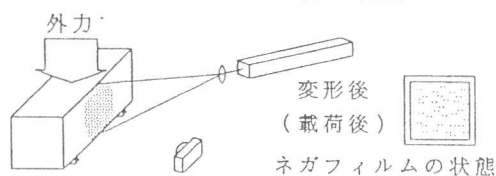
レーザースペックル法は、レーザー光線の干渉性を利用して物体表面の変位を測定する方法である。本研究では、繊維補強コンクリートの曲げ破壊試験におけるひび割れ先端近傍での微小変形を測定する方法として、スペックル写真法のヤング縞法を用いた。測定は図-1に示すように

《スペックルグラムの撮影》

◎1回目の撮影



◎同一フィルムでの2回目の撮影



《解像》

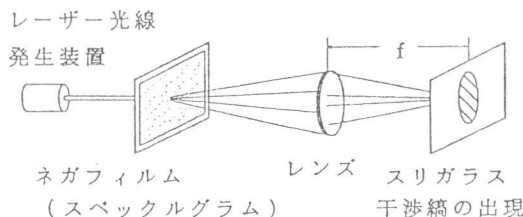
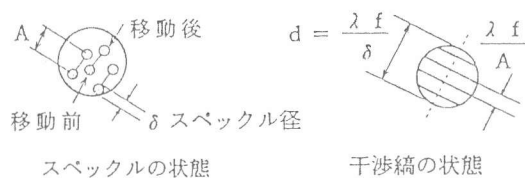


図-1 レーザースペックル法の手順

- \* 1 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科、工博（正会員）
- \* 2 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph. D.（正会員）
- \* 3 名古屋工業大学学長 工博（正会員）
- \* 4 鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第2研究室主任研究員、工修（正会員）

《スペックルグラムの撮影》と《解像》の2つの作業から構成される。レンズを通してシート状に拡げたレーザー光線をコンクリート表面に照射し、この状態のレーザー光線による斑点（以下スペックルと呼ぶ）の模様とコンクリート表面に微小変形が生じた状態、すなわち載荷後のコンクリート表面のスペックル模様をカメラで同一フィルム上に二重露光撮影することによって、二重露光撮影されたネガフィルムであるスペックルグラムを得る。次に得られたスペックルグラムにレーザー光線を拡散させずに照射し、干渉縞を出現させ、干渉縞の本数と傾きからコンクリート表面の微小変形を求める。出現する干渉縞の一例を写真-1に示す。この場合、実際の変形は干渉縞に垂直な方向となるが、変位の正負を判別することはできない。

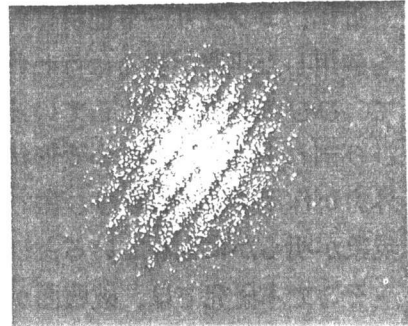


写真-1 干渉縞の出現例

コンクリートの表面微小変形量は、得られた干渉縞から次式で求められる。[3]

$$a_T = \frac{n \lambda f}{m d} \quad (1)$$

ただし、結像面に出現する干渉縞の縞本数を  $n$ 、レーザー光線の波長を  $\lambda$ 、レンズの焦点距離を  $f$ 、結像倍率を  $m$ 、干渉縞が出現する結像の大きさを  $d$  とする。レーザー光線をあてる点を変えることにより、任意の位置でのコンクリート表面の微小変形状態を得ることが可能である。ただし、本測定法を用いる場合、結像の大きさに関係するカメラの絞り  $F$  およびレンズの結像倍率  $m$  の値により、測定可能な変位量の大きさ、領域の大きさおよび測定精度が決まる。本研究では、ひび割れ先端近傍のコンクリート表面の微小変形の状態を把握することを目的とするが、微小変形が生じている領域が明らかにされていないことから、測定可能な領域が広範囲となるように、絞り  $F=5.6$  および結像倍率  $m=1/6$  の値を採用した。この場合、測定可能な領域は  $18 \times 13.5 \text{ cm}$  となり、測定可能な最小変形量は理論上  $25 \mu\text{m}$  程度となる。

## 2. 2 精度試験の概略

レーザースペックル法をコンクリート表面の微小変形測定に用いた研究は少なく、また測定精度は測定方法の違いにより異なることが明らかにされている。[1] [3] そこで、曲げ試験を行う際に用いる光学機器の設定で精度試験を行った。試験はコンクリート表面の微小変形の代わりにコンクリート供試体を微小移動させ、この時の供試体全体の移動量をレーザースペックル法および電気抵抗式変位計で測定して比較することで行った。

## 2. 3 精度試験結果と考察

精度試験の結果を図-2に示す。図の縦軸はレーザースペックル法によって得られた縞本数、横軸は変位計から得られたコンクリート供試体の移動量を示す。干渉縞の本数は、結像の大きさと結像内の干渉縞の幅とを考慮して、測定者の目視により 0.2本まで読み取った。図中の

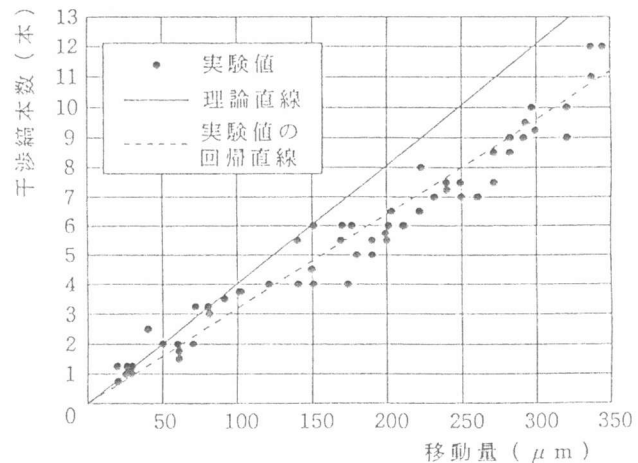


図-2 精度試験結果

直線のうち、実線で表されたものは理論上の縞本数と移動量の関係を示したものであり、縞本数を  $n$  本、コンクリート供試体の移動量を  $a_T \mu\text{m}$  とすると、 $a_T = \alpha n$  と表せる。 $\alpha$  は用いる試験装置および光学機器の設定等で決まる定数である。本試験で用いた試験装置および光学機器等の設定を用いた場合、 $\alpha = 24.8$  となる。この  $\alpha$  の値は縞感度と呼ばれており、出現する干渉縞 1 本あたりの移動量に相当する。破線で表したものはレーザースペックル法により得られた精度試験データの回帰直線である。試験結果から得られた縞感度の値を  $\beta$  とすると、 $\beta = 31.3$  となる。試験結果には、撮影中の僅かな振動による値のばらつきが見られるが、精度試験データの回帰直線の相関係数は 0.91 であり、微小変位領域の大きさを測定するうえでは問題ないと言えよう。本研究で用いた測定方法での測定精度は、縞本数 1 本に対する変位量がほぼ  $30 \mu\text{m}$  程度であり、実際には結像面に出現した縞本数を結像の大きさと干渉縞の幅との比較から 0.2 本程度まで読みとることが可能であることから約  $6 \mu\text{m}$  となる。

### 3. ひび割れ進展領域での微小変形の測定

#### 3. 1 実験の概要

表-1 に供試体の種類を示す。細骨材には、佐原産の山砂と上の原産の川砂を 3 対 7 の割合（粗粒率：2.78）で混合して用いた。粗骨材には、最大寸法 20mm の八王子産（硬質砂岩）の碎石を用いた。繊維混入量による影響を比較するために、繊維の混入量を体積比で 0、1、2%、コンクリート強度による影響を比較するために、圧縮強度を 30、60MPa とした。供試体は、「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）」に基づき、公称直径 0.6mm、長さ 30mm のアスペクト比 50 のストレート型鋼繊維を用いて作製した。[4] また、レーザースペックル法の測定可能な領域内にひび割れが進展するように、ひび割れ発生箇所を特定する必要から、供試体のスパン中央下部に厚さ 0.5mm、深さ 1cm の切欠きを設けた。標準水中養生後、材齢 28 日で載荷スパン 45cm の 3 等分点載荷の曲げ試験における微小変形領域の把握およびひび割れ進展状態の観察を行った。図-3 に曲げ破壊試験の概略を示す。試験は図に示すように、供試体の側方に電気抵抗式変位計を設置し、側方移動のないことを確認しながら、 $\pi$  型変位計（測定精度は  $1 \mu\text{m}$  である）による開口部の変位制御で行った。レーザースペックル法による撮影は曲げ破壊時の微小変形状態を把握する目的から、最大荷重に達するまでを対象に開口変位の値が 1mm となるまでを、開口変位の増分が  $30 \sim 40 \mu\text{m}$ （干渉縞 1 本に相当する）となる毎に段階的に行った。スペックルグラムの解像は、ひび割れ先端を座標原点にとり、スペックルグラムの観測面上をレーザー光線で 1mm 間隔（供試体表面上で約 5mm に相当）で走査して行い、各位置での干渉縞の本数および傾きを求めた。

表-1 コンクリートの配合と試験結果

シリーズ名	目標 圧縮強度 (MP)	繊維 混入率 (%)	水セメント 比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )										試験結果		
					水	セメント	細骨材		粗骨材		繊維 スフェル	混和剤		スパン (cm)	空気量 (%)	曲げ破壊 強度(kN)	
							細目	粗目	大	小		高性能AE減水剤	AE助剤				
3S0	30	0	65	47	165	254	257	600	493	493	—	* 2.540	5.08	9.0	5.8	16.48	
6S0	60	0	40	42	165	413	213	498	500	500	—	* 4.543	8.26	7.7	5.1	22.06	
3S1	30	1	65	59	190	292	301	703	356	356	78.5	2.920	1.752	7.5	4.1	24.03	
3S2	30	2	65	72	207	318	348	811	231	231	157	5.088	1.272	9.2	4.3	32.85	
6S1	60	1	40	54	178	445	260	608	377	377	78.5	6.586	3.115	5.5	6.0	28.93	

高性能AE減水剤はボゾリスSP-8N（表示は原液）を使用した。  
ただし、\*はAE減水剤ボゾリスNo.70（表示は原液）を使用した。  
AE助剤はボゾリスNo.303（表示は100倍溶液）を使用した。

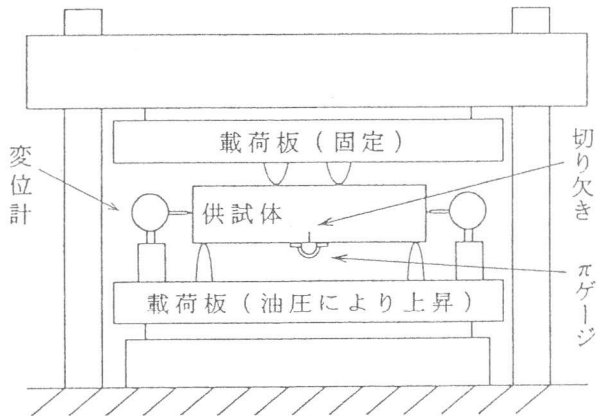


図-3 曲げ破壊試験の概略

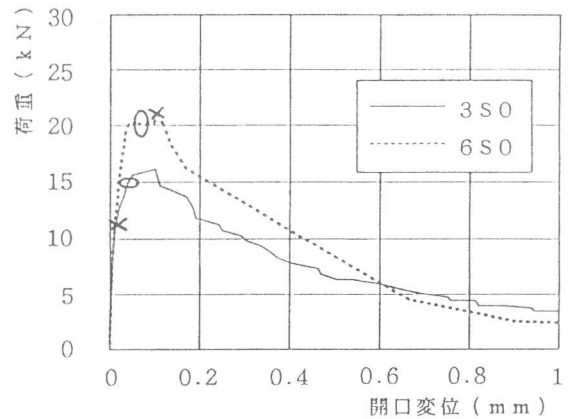


図-4 荷重-開口変位曲線(1)

### 3.2 実験結果と考察

#### (1) 荷重-開口変位

図-4、図-5に各供試体での荷重-開口変位曲線を示す。図中の×印は目視によるひび割れ発生時を、○で囲んだ範囲はレーザースペックル法での撮影を基に、干渉縞の解像を行った区間を示す。圧縮強度が30MPaの場合は載荷荷重12~17kN程度で、60MPaの場合は載荷荷重21~25kN程度で目視によるひび割れの発生が確認された。ひび割れ発生荷重は、コンクリート強度が大きくなるにしたがって、大きくなる傾向が見られるが、繊維混入量による違いは見られない。繊維を混入した場合は、無混入の場合と比較して、荷重-開口変位曲線に振動が見られ、2%混入した場合は特にこの傾向が顕著に現れた。各供試体での破壊に至るまでのひび割れの進展は、繊維無混入の供試体では、コンクリート表面に、切欠きから垂直に貫通ひび割れが発生するのに対して、繊維を混入した供試体では、破壊に至る原因となる貫通ひび割れも一定方向には進まず、また、貫通ひび割れの周囲には枝分かれしたひび割れが発生していることが確認された。

#### (2) 微小変形領域の大きさや形状

図-6~図-11にレーザースペックル法によりコンクリート表面の微小変形が確認された領域、任意の箇所における変形方向、変形量および載荷荷重の変化を示す。破線で示す格子の間隔は1cmである。

図中の実線で囲んだ領域内で干渉縞の出現が確認され、この領域外では干渉縞が確認されないことから、この領域内でコンクリート表面に微小変形が生じていると考えられる。すなわち、実線で囲んだ領域が微小変形領域と考えられる。なお、切り欠き先端からひび割れが発生した場合、ひび割れの幅は約30 $\mu$ m程度となり、ひび割れを挟んで撮影範囲全てに干渉縞が見られ、範囲を確認することができなかったことから、図にはひび割れの先端からの微小変形領域を示すこととした。干渉縞のモデルの下に示す数値は、干渉縞の本数から得た各点での変形量を精度試験結果により補正した値である。今回の光学機器の設定では、干渉縞本数1本に対する微小変形量が約

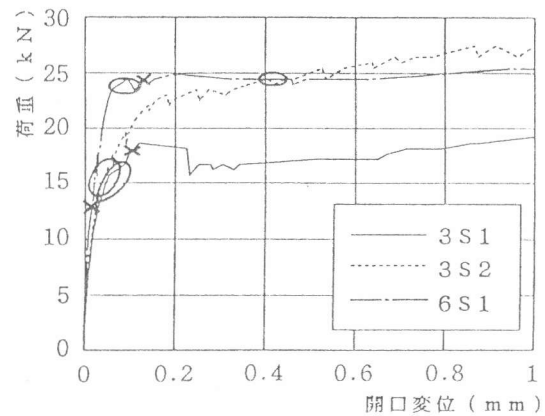


図-5 荷重-開口変位曲線(2)

30  $\mu\text{m}$ 程度であり、測定者の目視を基に約15  $\mu\text{m}$ 程度の変形量までを読み取っていることから、実際の微小変形領域は実線で示す範囲より若干大きいと言えよう。また、微小変形領域内では、ひび割れ先端に近づくにしたがって、干渉縞の太さが細くなることから、変形が大きくなる現象が確認された。

図-6と図-7に示す繊維無混入の場合の微小変形領域については、3S0の領域に比べて6S0の領域の方がやや大きい結果が得られた。これは図-4に示すようにコンクリートの強度の違いにより、ひび割れの発生時期が異なったことが原因と考えられる。繊維を混入した図-8および図-9の場合は、微小変形領域がひび割れの進展方向と垂直に広がることにより、微小変形領域の大きさが図-6および図-7に示す無混入のシリーズに比べてやや大きくなり、微小変形領域自体の形状も無混入のものに比べて複雑になる結果が得られた。繊維を混入したシリーズで

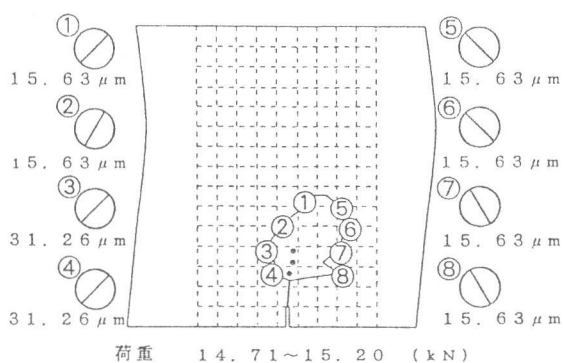


図-6 微小変形領域 (3S0)

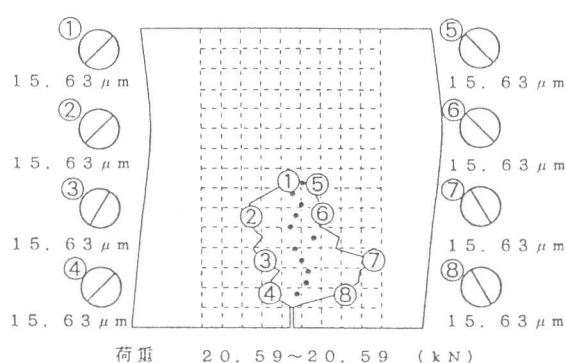


図-7 微小変形領域 (6S0)

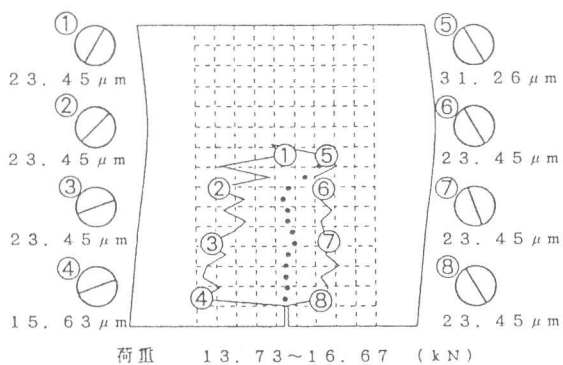


図-8 微小変形領域 (3S1)

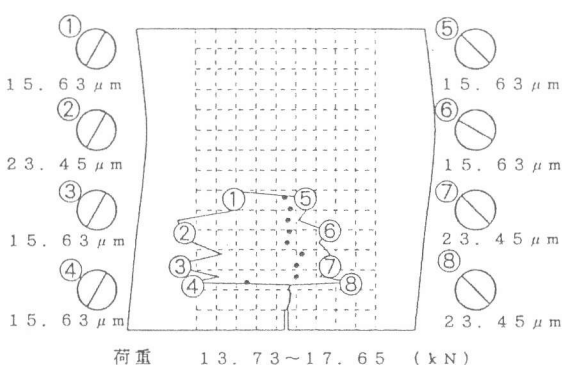


図-9 微小変形領域 (3S2)

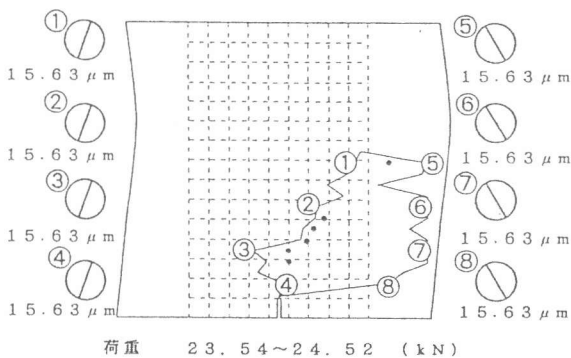


図-10 微小変形領域 (6S1①)

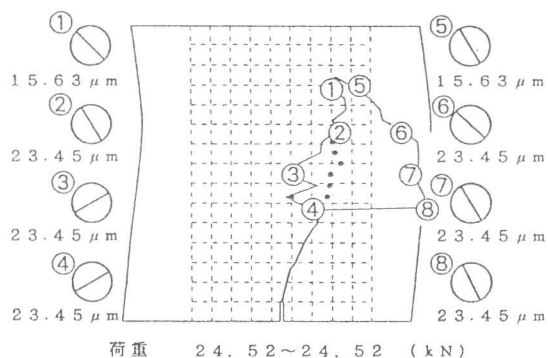


図-11 微小変形領域 (6S1②)

比較を行うと、微小変形領域は繊維の混入率が増加することにより、ひび割れ進展方向への広がりがおさえられ、逆にひび割れ進展方向と垂直な方向にやや広がる傾向があり、ひび割れ先端に存在する微小変形領域の大きさに、繊維の混入量が大きな影響を与えることが視覚的に明らかとなった。今回の実験結果では、ひび割れが進展するまでの微小変形領域の大きさは、コンクリートの圧縮強度が30MPa程度の繊維無混入の場合40×40mm程度であり、同程度の強度で鋼繊維混入率1%の場合は50×80mm程度となった。

### (3)ひび割れの進展

図-6～図-11の微小変形領域内で、干渉縞の傾きが大きく変化した位置を・点で示す。スペックルグラムの撮影後ひび割れは、ほぼこの点を結んだ方向に進展した。特に、図-10と図-11に示す6S1シリーズの撮影では、開口変位が0.1mm以上となり、載荷荷重の増加がほとんどない状態でひび割れが発生、進展する様子が得られた。図-10に示す微小変形領域での干渉縞の変化する点に沿ってひび割れが進展した後、図-11に示されるように新たな微小変形領域が出現している。干渉縞の傾きが変化する位置は、コンクリートに微小ひび割れが集中した箇所と考えられ、この点を結んだ線はひび割れの進展する方向を表すと考えられる。したがって、任意の荷重段階での微小変形領域内での干渉縞の傾きが変化する位置を基に、最終的にひび割れが進展する経路を把握することが可能であると言えよう。レーザースペックル法による測定結果から、二次元的な微小変形領域を15 $\mu$ m程度の精度で測定することが可能であり、得られた微小変形領域は破壊進行領域を含む領域を表していると考えられることから、レーザースペックル法を適用することでひび割れ先端部での破壊進行領域を視覚的に明らかにできる見通しが得られた。

## 4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

(1) レーザースペックル法によるコンクリート表面の微小変形測定において、カメラの絞りF=5.6、結像倍率m=1/6の設定の場合、約15 $\mu$ m程度の精度で18×15cmの領域の微小変形を把握することが可能となり、ひび割れ先端近傍における破壊進行領域を視覚的に把握できる見通しが得られた。

(2) 微小変形領域内の変形量は、ひび割れ先端に近いほど微増することが明らかとなった。鋼繊維補強コンクリートの場合、繊維を混入することにより領域の形状が複雑になり、繊維の混入率が増加するにしたがって、ひび割れ進展方向への広がりが抑えられ、逆に垂直方向に広がることが明らかとなった。

(3) 今回実験結果では、ひび割れが進展する直前の微小変形領域の大きさは、コンクリートの圧縮強度が30MPa程度の繊維無混入の場合は40×40mm程度となり、同程度の強度で鋼繊維混入率1%の場合は50×80mm程度となった。微小変形領域内での干渉縞の傾きが変化する位置、すなわち干渉縞の傾きが変化する位置を結んだ方向にその後のひび割れ進展が確認された。

## 参考文献

- 1) 堀井秀之、一宮利通：レーザースペックル法によるフラクチャープロセスゾーンの計測、構造工学論文集 Vol.36A、1990年、PP.335～342
- 2) 六郷恵哲、内田裕市、加藤英徳、小柳洽：鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線、土木学会論文集No.460/V-18、1993年、PP.57～64
- 3) 山口一郎他：スペックル法の原理、第一回手法別講習会「スペックル法」、可視化情報学会、1990年
- 4) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)