

## 論文 コンクリート構造物の維持管理への光ファイバの新たな応用方法

濱田 秀則<sup>\*1</sup>・山路 徹<sup>\*2</sup>・小牟禮 建一<sup>\*3</sup>・早川 健司<sup>\*4</sup>

**要旨**：光ファイバをコンクリート構造物のモニタリングに適用する試みは数多くなされている。しかし、光ファイバの利用方法には、まだまだ考案の余地が残されていると考えられる。これまで筆者らは、光ファイバの変形・破断に伴う通過光の減少・遮断を情報とするための検討を続けてきた。本研究においては、コンクリートのひび割れの進展を光ファイバの変形・破断として検知する新しい方法を考案し、その性能を確認した。その結果、光ファイバをひび割れとほぼ平行に装着することにより、0.6~0.8mm程度のひび割れの進展現象を光ファイバの破断と関係づけることができた。

**キーワード**：維持管理, 光ファイバ, モニタリング, コンクリートのひび割れ

## 1. 序論

劣化が進行しているコンクリート構造物が増加しつつあり、これらの維持管理が土木技術、コンクリート技術の中にあって重要な地位を占めるようになってきた。また、構造物の維持管理の中で、積極的に構造物のモニタリングを行い、事前の事故防止、点検の合理化を進めていこうという考え方もあり、構造物のモニタリングを実施するためのセンシング材料として、光ファイバを適用することが多方面で検討されている。筆者らもこれまで、光ファイバをモニタリング材料として使用するための検討を続けてきた<sup>1)~8)</sup>。

筆者らは主に、光ファイバの変形・破断を情報として利用することを考えてきた。そのためには、コンクリートの物理的な変状を光ファイバの物理的な変状と関連付けるために、光ファイバをコンクリートと一体化させることが必要である。しかし、この点に関する技術開発は必ずしも十分とは言いがたい。コンクリートのひび割れ幅は、0.1~0.5mm程度で耐久性上問題とな

ることから、この程度のひび割れ幅を検知できることが、センサには求められる。しかし、既往の検討では、光ファイバを用いたひび割れの検知能力は1.0mm程度が限界であった。

本研究においては、光ファイバをひび割れとほぼ平行に装着するという新しい方法を考案し、その方法の効果を実験的に確認した。本文においては、実験の概要、実験の結果を取りまとめ、新しい光ファイバの応用方法の効果を考察するものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 モルタル供試体

本研究ではモルタル供試体5体を用いて実験を行った。供試体の形状・寸法は100×100×400mmの角柱型供試体であり、軸方向の補強材としてアラミド繊維ロッドが供試体断面の中央部に1本埋設されている。使用したアラミド繊維補強筋の物性を表-1に示す。

モルタルに使用した材料は、セメントがホワ

\*1 港湾空港技術研究所 材料研究室 室長 工博 (正会員)

\*2 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官 工修 (正会員)

\*3 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (正会員)

\*4 東急建設技術研究所 材料研究室 研究員 工修 (正会員)

表-1 アラミド繊維補強筋の物性

項目	単位	規格値	測定値平均
外径	(mm)	8.6±0.4	8.52
単位質量	(g/m)	64.0±3.5	63.8
保証耐力	(kN)	81.4以上	90.6
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	-	1.31

表-2 モルタルの配合

W/C	フロー値(mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			SP (C×%)
		水	セメント	細骨材	
0.4	252	266	666	1163	0.6

イトセメント（密度：3.05g/cm<sup>3</sup>），細骨材が山砂と砕砂の混合砂（表乾密度：2.62g/cm<sup>3</sup>，吸水率：1.61%，F.M.：2.63）である。モルタルの配合を表-2に示す。表に示すとおり，水セメント比が40%であり，練りあがり後のフロー値が252mmであった。

### 2.2 曲げ荷荷の方法

供試体の曲げ荷荷方法を図-1に示す。一点集中荷荷とし，支点間距離は300mmとした。

まず，光ファイバを取り付けない状態で，ひび割れの発生まで供試体に荷荷を行い，ひび割れ発生を確認した後，直ちに除荷した。その後，光ファイバの固定治具をひび割れと平行に供試体下面に設置し，ひび割れモニタリングのための荷荷を行うというプロセスを採った。

荷荷速度の厳密なコントロールは行っていないが，概ね0.5N/分程度で荷荷した。また，荷荷時のコンクリートの変形計測として，πゲージを供試体の両側面に設置し，引張側ひずみ（ひび割れ幅）の計測を実施した（図-1）。

### 2.3 光ファイバ利用の概念

本研究で採用した光ファイバ利用方法の概念を図-2に示す。既往の研究では，光ファイバをひび割れに対してほぼ直角方向に設置し，光ファイバが検知するひずみ，および光ファイバの破断によってひび割れを検知するシステムを採用してきたが，本研究においては，図-2に示すように，ひび割れに対してほぼ平行に光ファイバを装着し，ひび割れの開きを，せん断力

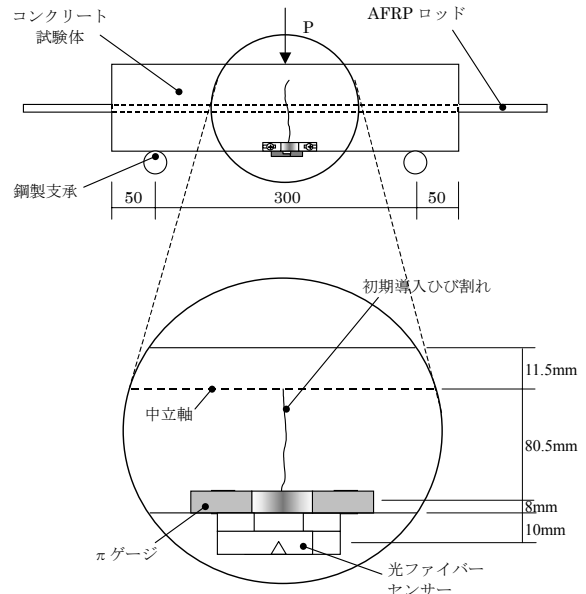


図-1 供試体の曲げ荷荷方法

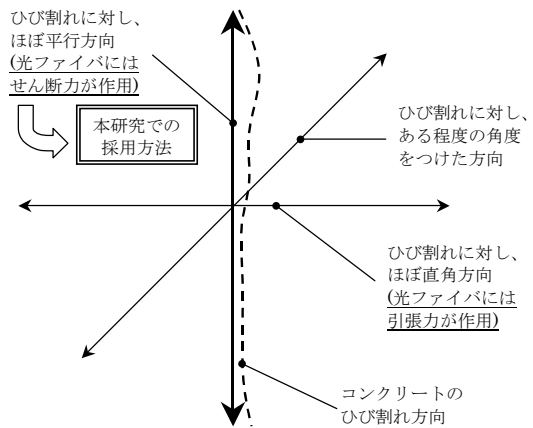


図-2 光ファイバ利用方法の概念

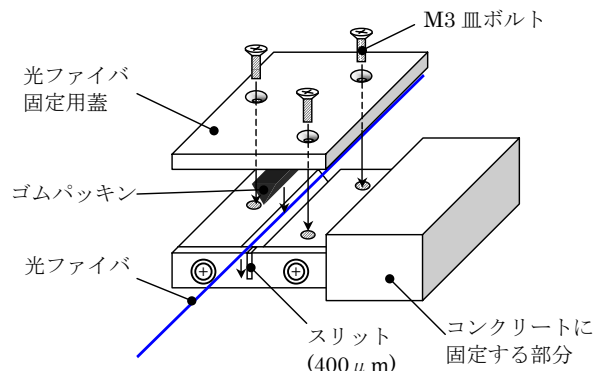


図-3 作成した光ファイバ固定用治具

に相当する外力で光ファイバに伝達する手法を採用した。本研究では，このようなメカニズムによって，ひび割れの進展に対して光ファイバ

が効果的に作用するよう、新たに独自の光ファイバ固定用治具を作成した。その概要を図-3に示す。光ファイバ固定用治具には、図-3に示すように  $400\mu\text{m}$  のスリットを設けてあり、ここに光ファイバ（外径  $250\mu\text{m}$ ）を通した後、ゴムパッキンと金属製の蓋で固定する。また、この治具の組み合わせで構成する光ファイバセンサの基本的構造を図-4に示す。同図に示すように、光ファイバはコンクリートのひび割れの方角に対してほぼ平行に設置する。光ファイバ固定用治具は2つ用意し、各々をひび割れを跨ぐ両側に固定し、1本の光ファイバをこの両方の治具に固定する。ひび割れが開くと2つの治具はほぼ反対方向に移動し、これにより、光ファイバにはせん断力に相当する外力が作用する。光ファイバは、純引張力に対して極めて高い強度を発揮するが、曲げやせん断外力に対する強度は極端に低いという特徴を有している。したがって、本研究で用いたセンシングシステムにおいては、わずかなひび割れ幅の変動により作用するせん断力によって光ファイバが破断に至り、このときに生じる光強度の低減をモニタリングすることによって、ひび割れの進展が把握できるものである。なお、本実験では、光ファイバセンサを載荷時の供試体底面部に装着した。

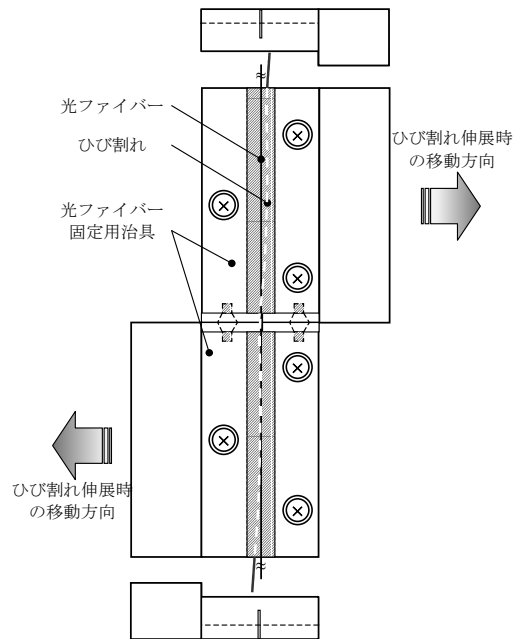


図-4 光ファイバセンサの構造

## 2.2 光学的計測システム

本研究で用いた光学的計測システムを図-5に示す。光源としては He-Ne レーザーを用い、光ファイバを通過した光の受光装置としてフォトダイオードを用いた。光ファイバと機器の接続は専用のカプラを用いたが、光ファイバの所定長さへの切断などの基本的作業は手作業で行った。

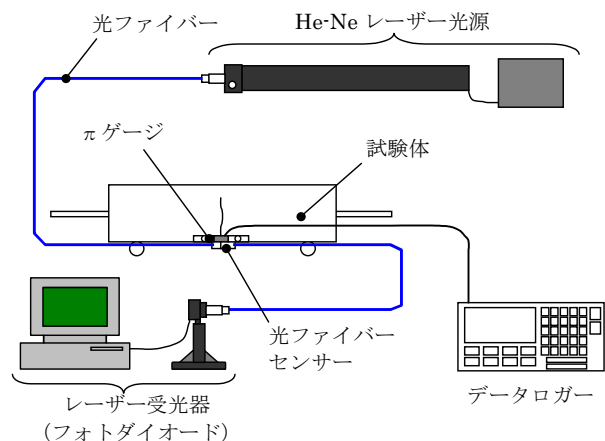


図-5 本研究で用いた光学的計測システム

## 3. 実験結果

### 3.1 $\pi$ ゲージによるひび割れ幅計測値の補正

図-1に示すとおり、光ファイバは曲げ載荷時の底面に装着し、 $\pi$ ゲージは側面に装着した。このとき、 $\pi$ ゲージの計測レベルは供試体の底面から  $8\text{mm}$  上方の位置となる。また、光ファイ

バ固定治具の形状と寸法から、光ファイバは供試体底面から  $10\text{mm}$  下方の位置にある。したがって、供試体を曲げ載荷する場合、光ファイバセンサ、 $\pi$ ゲージで計測されるひび割れ幅は、それぞれが設置されたレベルによって異なる。

これに対する補正を行うため、まず予備実験として曲げ載荷時の底面に装着した  $\pi$ ゲージの値と側面（最下部）に装着した  $\pi$ ゲージの値を比較するための載荷試験を行った。このとき、底面側の  $\pi$ ゲージの設置レベルは光ファイバとほぼ同じ供試体底面から  $10\text{mm}$  の位置である。実験の結果を図-6に示す。同図より、両者の値は明確な線形関係にある。さらに、底面側の

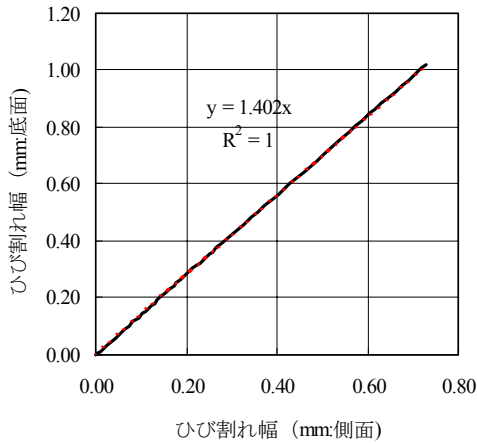


図-6 側面および底面に設置した  
ゲージ測定値の関係

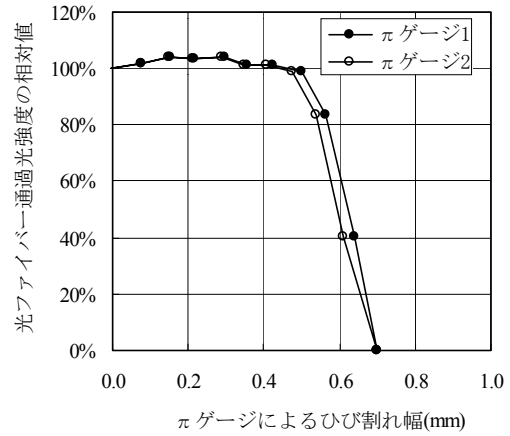


図-7 供試体No.1 の試験結果

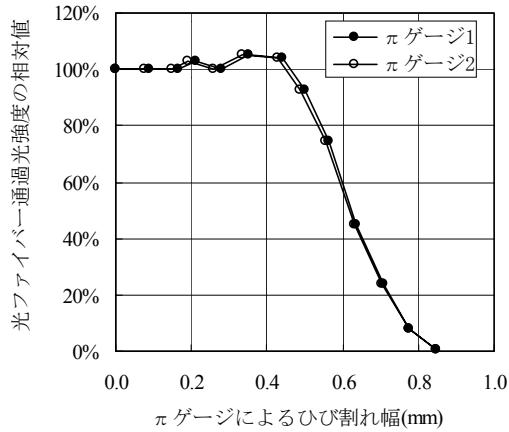


図-8 供試体No.2 の試験結果

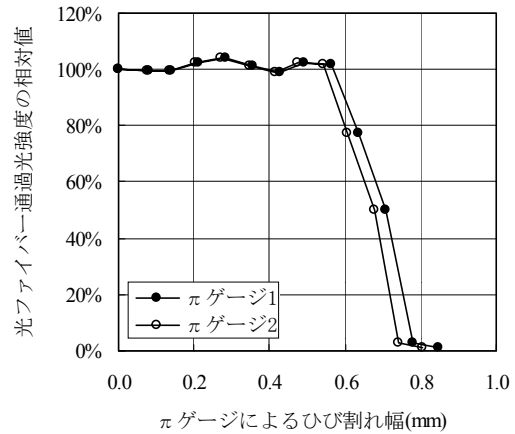


図-9 供試体No.3 の試験結果

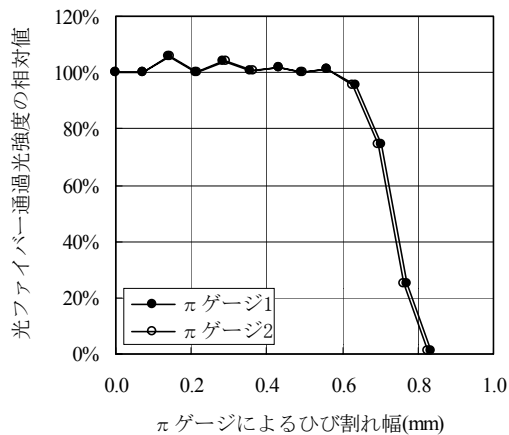


図-10 供試体No.4 の試験結果

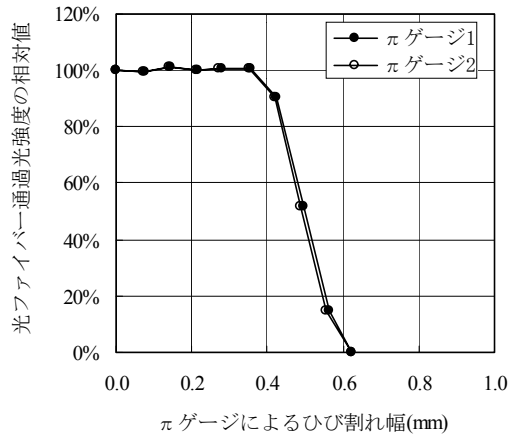


図-11 供試体No.5 の試験結果

$\pi$ ゲージの値は側面側の値と比較して約 1.4 倍となっている。したがって、供試体側面に設置した  $\pi$ ゲージによるひび割れ幅の計測結果を光ファイバ位置での値に変換するための補正係数を 1.4 とした。

### 3.2 ひび割れ幅の進展と光ファイバ挙動の関係

図-7～図-11 に、補正されたひび割れ幅と光ファイバ通過光強度（相対値）の関係を示す。また、表-3 にこれらの図より読み取った「光ファイバの光強度が低下を開始した時のひび割

れ幅」と「光ファイバが破断に至った時のひび割れ幅」を総括したものを示す。5体の供試体間で試験結果に大きな変動は見られず、この一連の载荷試験は比較的再現性のよい結果を示している。これより、本システムがコンクリートのひび割れセンシングシステムとして機能する可能性を有すると判断した。

5体の载荷試験から得られた結果によると、光ファイバの光強度が低下を開始した時のひび割れ幅は、0.42~0.63mmの範囲にあり、平均値は0.52mmである。また、光ファイバが破断に至った時のひび割れ幅は、0.62~0.83mmの範囲にあり、平均値は0.73mmである。

光ファイバを通過する光強度の推移の特徴は、ひび割れ幅がある値に達するまではほとんど低下の傾向を示さず、低下を開始すると、ほぼ一次的に低下していくという点である。この傾向は5体いずれの供試体においても共通である。

既往の方法では、ひび割れ幅が1.0mm以下ではセンサに十分な感度を持たせることは難しかったが、本研究で用いた方法では、0.5mm程度で感知した。また、最大でも0.9mmまでには光ファイバは破断に至ったことから、センサとしての検知能力はほぼ評価できるレベルであると言える。したがって、さらにセンサの構造に工夫を加えることにより、感度を向上させることは可能であると考えられる。

### 3.3 光ファイバセンサの機能向上の方向性

ここで、本光ファイバセンサの機能向上の方向性について考察を加える。

図-12に、本システムにおけるセンサの挙動と、単純化した光強度-ひび割れ幅関係を示す。光ファイバ固定治具のスリット幅は0.4mm、光ファイバの径は0.25mmであるから、理論的には、ひび割れ幅が0.15mmとなったときに光ファイバが固定治具と接触し、せん断力が作用し始める。さらに0.25mmひび割れが進展し、0.4mmとなったときに破断に至る。このとき、光ファイバが治具に接触するまでは治具のスリット幅に、また、接触から破断までは光ファイバの径にほ

表-3 光ファイバの強度低下開始時および破断時のひび割れ幅

No.	光ファイバの光強度が低下を開始した時のひび割れ幅	光ファイバが破断に至った時のひび割れ幅
No.1	0.49mm	0.70mm
No.2	0.49mm	0.85mm
No.3	0.55mm	0.76mm
No.4	0.63mm	0.83mm
No.5	0.42mm	0.62mm
範囲	0.42~0.63mm	0.62~0.83mm
平均値	0.52mm	0.73mm

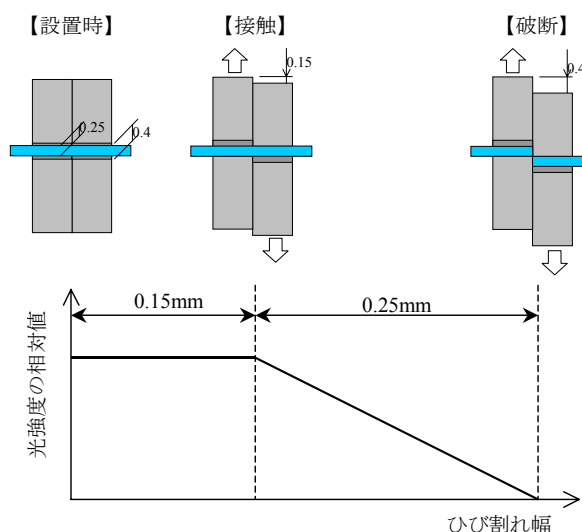


図-12 光強度-ひび割れ幅関係における理論的な光ファイバの破断メカニズム

表-4 光強度の直線的低減域の傾き

試験体No.	直線的低減域の傾き ( $\times 10^{-2}\% \cdot \text{mm}^{-1}$ )	
	$\pi$ ゲージ 1	$\pi$ ゲージ 2
No.1	-5.1	-6.1
No.2	-3.4	-3.5
No.3	-5.6	-5.2
No.4	-5.2	-5.2
No.5	-5.7	-5.5
平均	-5.0	

ぼ依存する。このように、理論的には光ファイバの通過光の強度が低下を開始する時のひび割れ幅は0.15mm程度であるが、今回の実験では0.42mm~0.63mmとなった。このことは、いずれの試験体も治具の設置を手作業で行ったことから、2つの治具が図-12に示すような完全な擦り合わせにならず、若干のズレが生じたことが

原因と考えられる。この点に関しては、今後の改良が可能である。

一方、光ファイバにせん断力が作用すると同時に光強度が一次的に低下するが、通過光強度の相対値とひび割れ幅との線形部分が示す傾きは、理論上「 $-100\% / 0.25\text{mm} = -4.0 \times 10^2 (\% \cdot \text{mm}^{-1})$ 」となる。これに対し、実験データより求めた傾きを表-4に示す。実際の線形部分の傾きは、平均で $-5.0 \times 10^2 (\% \cdot \text{mm}^{-1})$ となっており、理論値よりも若干大きいものの、ほぼ等しいと判断される。これより、光ファイバと光ファイバ固定用治具の接触後は、光ファイバセンサはほぼ効率良く機能していると思われる。

以上の考察より、スリット幅の改善および光ファイバと治具の固定方法などの改善を行うことで、光ファイバセンサの機能向上を図ることが可能であると考えられる。

#### 4. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 本研究において示した、コンクリートのひび割れ方向とほぼ平行に光ファイバを装着する方法は、光ファイバによるセンシングを行う上で有効である。
- (2) 5体の供試体の載荷試験結果が大きく変動しないことより、今回の試験結果は比較的よい再現性を有しているものと思われる。
- (3) コンクリートのひび割れを対象としてセンシングを行う際の最大感度は約 0.5mm 程度であり、実用に供する可能性を有する値である。さらに今後、機能を向上させることは可能である。
- (4) 今回考案した方法は、光ファイバ自体に特段の細工を要しないことから、1本の光ファイバ全体をセンサとして利用できるという長所を有している。

#### 参考文献

- 1) 濱田秀則・伊藤正憲・山路徹・山下裕康：光ファイバを用いたコンクリートのモニタリ

ングに関する基礎的検討（その1），第42回日本学術会議材料研究連合会前刷集，pp.160-161，平成10年9月

- 2) 伊藤正憲・濱田秀則・山路徹・山下裕康：光ファイバを用いたコンクリートのモニタリングに関する基礎的検討（その2），第42回日本学術会議材料研究連合会前刷集，pp.162-163，平成10年9月
- 3) 山路徹・伊藤正憲・濱田秀則・山下裕康：コンクリート構造物のモニタリングのための新型光ファイバセンサの開発，コンクリートのリハビリテーションに関するシンポジウム論文集，pp.61～66，1998.10
- 4) 濱田秀則・山路徹・早川健司・山下裕康：樹脂によるコンクリート表面への光ファイバの貼付方法に関する基礎実験，第43回日本学術会議材料研究連合会講演論文集，pp.269-270，平成11年10月
- 5) 山路徹・濱田秀則・早川健司・山下裕康：ループを有する光ファイバを用いたコンクリート構造物のモニタリングに関する基礎実験，第43回日本学術会議材料研究連合会講演論文集，pp.271-272，平成11年10月
- 6) 早川健司，濱田秀則，渡邊弘子，伊藤誠：コンクリート中に埋設した光ファイバの挙動に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文集，第1巻，pp199～204，2001
- 7) 早川健司・濱田秀則・山路徹・伊藤正憲：光ファイバによるコンクリートの劣化モニタリングに関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文集，第2巻，pp135～140，2002
- 8) 山路徹・濱田秀則・藤田勇・横田弘：港湾・海岸構造物の変状モニタリングにおける光ファイバの適用性の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文集，第2巻，pp141～146，2002