

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1092

December 2004

コンクリート構造物のモニタリングへの光ファイバの適用に関する基礎的研究

濱田 秀則

山路 徹

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

| | |
|---|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. はじめに | 5 |
| 2. 光ファイバを利用したモニタリング技術の現状および本研究の目標 | 5 |
| 2.1 技術の現状および本研究の目標 | 5 |
| 2.2 本研究で用いた光ファイバおよび周辺機器 | 7 |
| 3. 光ファイバの力学的特性 | 7 |
| 3.1 序節 | 7 |
| 3.2 光ファイバの基礎物性試験 | 8 |
| 3.3 光ファイバを埋め込んだコンクリート供試体の曲げ載荷試験 | 10 |
| 3.4 光ファイバの破断に関する解析 | 10 |
| 3.5 総括 | 12 |
| 4. 光ファイバの破断を利用する方法 | 13 |
| 4.1 序節 | 13 |
| 4.2 和紙を利用して貼り付ける方法 | 13 |
| 4.3 エポキシ樹脂で固定する方法 | 15 |
| 4.4 光ファイバを針金で引張する特殊な方法 | 16 |
| 4.5 ひび割れに平行に光ファイバを装着する方法 | 18 |
| 4.6 総括 | 22 |
| 5. 光ファイバの曲げ損失を利用する方法 | 22 |
| 5.1 序節 | 22 |
| 5.2 光ファイバをループ状にして利用する方法（その1） | 22 |
| 5.3 光ファイバをループ状にして利用する方法（その2） | 24 |
| 5.4 光ファイバに折り曲げ角度をつけてコンクリート表面に装着する方法 | 26 |
| 5.5 ヘテロコア型のセンサを利用する方法 | 27 |
| 5.6 特殊センサを利用する方法 | 29 |
| 5.7 総括 | 30 |
| 6. 光ファイバによるひずみ計測結果を利用する方法 | 30 |
| 6.1 序節 | 30 |
| 6.2 BOTDRの簡潔な説明 | 30 |
| 6.3 BOTDRの適用性を検討する実験 | 31 |
| 6.4 総括 | 32 |
| 7. 本研究の総括および今後の研究の方向 | 34 |
| 7.1 光ファイバ利用のグレード | 34 |
| 7.2 コンクリート変状のサイズとセンサの使い分け | 34 |
| 7.3 今後の研究の方向（モニタリングからフェールセーフへ） | 34 |

| | |
|-----------------------|----|
| 8. おわりに | 35 |
| 8.1 当初目標に対する達成度 | 35 |
| 8.2 本研究より得られた結論 | 35 |
| 参考文献 | 35 |
| 謝 辞 | 36 |

1. はじめに

社会基盤施設は、一般には50年以上にも及ぶ長期間の耐用年数を設定して建設が実施されている。近年の我が国における高齢化社会への移行状況を考えた場合、既存の施設に対してさらに長期の耐用年数が要求されることも十分に予想される。しかし、あらゆる構造物は供用の開始とともに徐々に劣化・老朽化が進行し、そのために構造物の信頼性も徐々に低下していく。

港湾・空港施設は、国内外の人的・物的交流を支え、国民生活を支える社会資本としてなくてはならないものである。その特性として、厳しい海洋環境下に位置するとともに、地震、台風などの自然災害を繰り返し受け、他の陸上構造物に比べて劣化しやすいという特徴がある。一方で、既存の施設の閉鎖などが生じた場合に我が国の経済が受ける影響は極めて大きい。したがって、劣化が軽微なうちに適切な補修対策を講じることは社会的・経済的に極めて重要であり、このことから構造物の挙動を的確にモニタリングし評価する技術に対する要請が近年一段と強まっている。

一方、ここ数年来「知能化材料」という概念が一般に普及しつつある。構造物の変状を破壊にいたる前に検知するための材料を意味する。このような構造物の知能化、迅速なモニタリングを実現することにより、地震などの突発的な荷重に対する破壊予知を可能にするとともに、メンテナンスの合理化さらには構造物の信頼性の向上を図ることが可能となる。加えて、早期の補修・補強が可

能となり、構造物のライフサイクルコストの低減にも資することになる。

本研究においては、センシング材料として高い可能性を有する光ファイバに着目し、コンクリート構造物のモニタリングに対して光ファイバを適用していく技術を開発することをその目的としている。まず初めに、光ファイバをモニタリングに用いるための技術の現状を整理し、以下に示すような研究の目標を定めた。すなわち、光ファイバの応用方法として、“破断”、“曲げ損失”および“後方散乱”に関する情報を有効に利用することを目的と定め、そのための実験的検討を実施した。

本文はそれらの一連の実験的検討を総括して報告するものである。

2. 光ファイバを利用したモニタリング技術の現状および本研究の目標

2.1 技術の現状および本研究の目標

ここ10年近くの間、構造物あるいは材料の「インテリジェント化」あるいは「知能化」がさかんに提唱されるようになった。「知能」というものは本来生命体だけに備わっているものであるが、人工頭脳、すなわちコンピュータを利用すればコンクリートのような無機材料にも「知能」に相当するものを付与することができると考えられるようになった。ごく最近、土木構造物に限らず、自動車、航空機、船舶などの分野において、材料の知能化に関する研究が活発化してきている[2.1]～[2.5]。そ

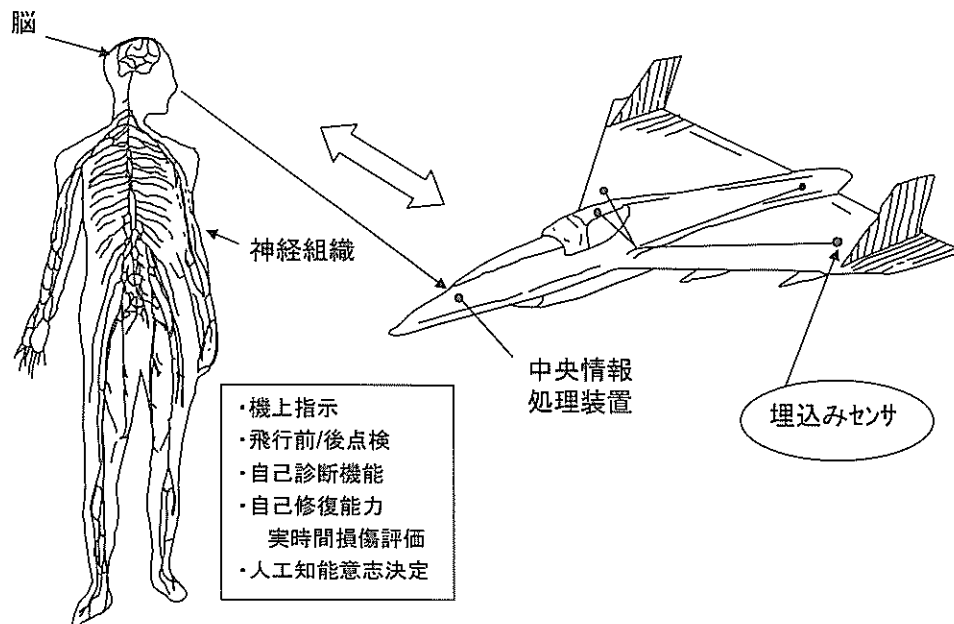


図-2.1 航空機の場合の知能化の概念[2.6]

表-2.1 光ファイバのセンサとしての利用方法 [2. 7]

| 名称 | 概略図 | 原理 |
|---------------|-----|---|
| 破断 | | 光ファイバの破断による透過光の消滅を利用 |
| 曲げ損失 | | 曲げ損失による光強度変化を測定 |
| 光干渉 | | センサファイバとリファレンスファイバを通過した光の干渉光強度の変化からひずみを測定 |
| Gap 光結合 | | Gap 両端の鏡面からの反射光の干渉により、gap 長の変化を測定 |
| Fibre grating | | コアに格子を加工したセンサファイバのひずみを、格子長変化による反射光の波長変化によって測定 |
| 後方散乱 | | 光ファイバのひずみに伴う光の後方散乱状態の変化を測定 |

これらの研究の大半は、異なる性質を有する2種以上の物質の界面における作用から生じる新しい特性を利用しようと試みるものである。構造物の知能化を実現するには構造物に装着されるセンサ（末梢神経に相当）と情報処理装置（脳に相当）が必要である。このセンサを構成する材料が一般的には知能化材料と言われているものである。参考として、航空機の場合の知能化の基本的概念を図-2.1 [2.6] に示す。

知能化材料（センシング材料）としていくつかの材料が適用可能であると考えられているが、中でも光ファイバに大きな期待が集中している。その理由は、光ファイバが他の材料には見られない種々の有利な特徴を有しているためである。本研究においても、光ファイバの有効利用をその目的として定めた。これまでに開発が進められている光ファイバの応用技術を大きく分類すると表-2.1 [2.7] のようになる。表-2.1に示されるとおり、種々の方法が考案されているが、この中で、本研究においては「破断」「曲げ損失」および「後方散乱」に着目して研究を進めることとした。

「破断」を情報とすることは、すなわち、適切な方法で光ファイバをコンクリートに装着し、コンクリートの変状を光ファイバの破断として検知する方法である。この場合、検出装置としてOTDRを用いることにより、破断箇

所の特定が可能となる。「曲げ損失」を情報とすることは、すなわち、適切な方法で光ファイバをコンクリートに装着し、コンクリートの変状を光ファイバの曲げ変形として検知する方法である。この場合も、検出装置としてOTDRを用いることにより、曲げ変形が生じた箇所の特定が可能となる。一方、「後方散乱」を情報とすることは、すなわち、光ファイバをコンクリートに装着し、コンクリートの変状を光ファイバのひずみとして検知する方法である。この場合は検出装置としてBOTDRを用いることにより、ひずみが発生している箇所を特定することが可能となる。

本研究全体のフローを図-2.2に示す。上述したとおり、本研究においては、光ファイバの利用方法として大きく「破断」「曲げ損失」および「後方散乱」を考えた。これらの三つの方法を実現するために、光ファイバの力学的性質を把握する基礎実験を行った。その概要と結果を3章にまとめる。光ファイバの破断を情報として利用するために実施した実験の概要と結果を4章にまとめる。光ファイバの曲げ損失を情報として利用するために実施した実験の概要と結果を5章にまとめる。光ファイバの後方散乱を情報として利用するために実施した実験の概要と結果を6章にまとめる。7章においては、本研究全体の結果を総括し、コンクリート構造物のモニタリングのあり方に関して総合的に考察すると同時に、今後の研究

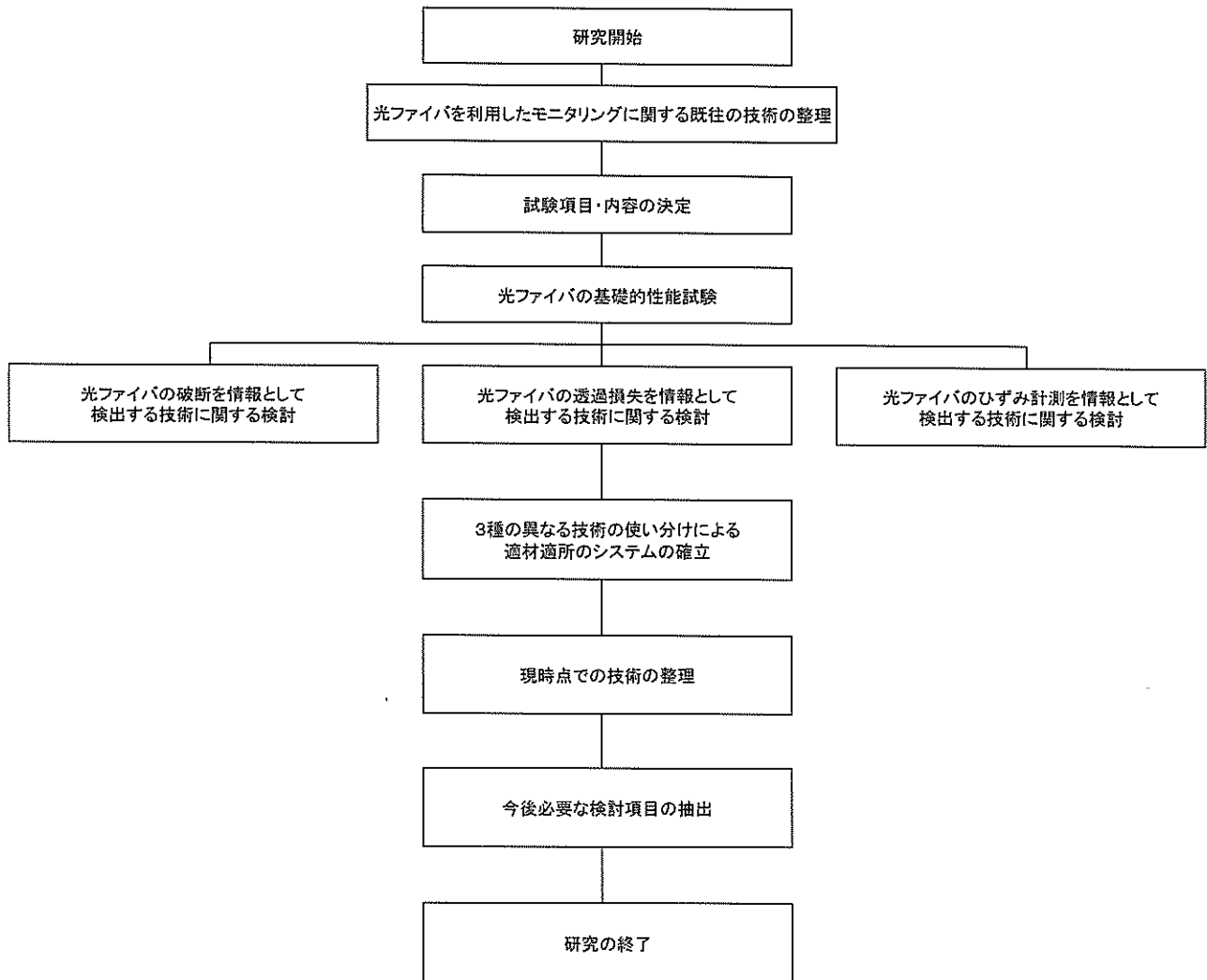


図-2.2 本研究の実施フロー

の方向について記述する。

2.2 本研究で用いた光ファイバおよび周辺機器

(1) 光ファイバ

本研究においては、シングルモードおよびマルチモードの光ファイバを使用した。シングルモードの光ファイバは、3M (スリーエム) 社製、対象波長630nm、コア径10 μ m、クラッド径125 μ m、コーティング径250 μ m、のものである。マルチモードの光ファイバは、住友電工社製、対象波長630nm、コア径60 μ m、クラッド径125 μ m、コーティング径250 μ m、のものである。

(2) 光源

光源として、He-Neレーザ光を使用した。本研究では、「Spindler & Hoyer」社製、波長633nm、ビーム径0.48mmのものを使用した。

(3) 受光機器

受光機器として、シリコン製のフォトダイオードを使用した。本研究においては、COHERENT社製、およびThorLabs社製の機器を使用した。

(4) OTDRおよびBOTDR

OTDRとして安藤電気社製のmini-OTDR AQ7220Cを、また、BOTDRとして同社製の光ファイバ歪/損失アナライザAQ8602を使用した。

3. 光ファイバの力学的特性 [3.1]

3.1 序節

本研究が目標とする技術は、コンクリート構造物の劣化の基本的挙動である「ひび割れの発生進展」, 「剥離・剥落の発生」を光ファイバを用いて検出する技術である。原理的には、コンクリートと光ファイバを一体化させ、コンクリート構造物の異状発生を光ファイバの透過光の変化、あるいは光

ファイバの破断による透過光の遮断などによって検知しようとするものである。このようなシステムを実現するためには、光ファイバとコンクリートとの一体化技術の確立が不可欠となる。

本節で述べる実験は、光ファイバとコンクリートの優れた一体化方法を考察するために、光ファイバの埋込みに用いる材料の物性、光ファイバの付着特性、および光ファイバの変形角度などの要因が、コンクリートのひび割れ検知の精度に及ぼす影響について検討を行うことを目的としている。

3.2 光ファイバの基礎物性試験

(1) 序

本節で述べる実験では、埋込み材料の物性と光ファイバの付着特性の関係、また、光ファイバの破断状況に及ぼすひび割れと光ファイバのなす角度の影響を把握すること、ならびに3.4で述べる解析において用いる基礎物性値の決定を目的としている。本実験においては、光ファイバを埋め込んだ試験片の引張試験を実施した。

(2) 試験片

本実験に使用した光ファイバはマルチモードであり、その寸法はコア直径が $60\mu\text{m}$ 、クラッド直径が $125\mu\text{m}$ 、被覆直径が $250\mu\text{m}$ である。実験にはコーティングを除去しない状態の光ファイバ素線を用いた。表-3.1 に光ファイバの埋込みに用いた材料の物性値を示す。表に示すとおり、埋込材料としては光ファイバとの付着特性が異なるエポキシ樹脂およびポリマーセメントモルタルの2種類を使用した。

表-3.1 埋込材料の種類および性質

| 種類 | 原材料および性質 |
|--------------|---|
| エポキシ樹脂 | 主剤：エポキシ樹脂 硬化剤：変性脂肪族ポリアミン |
| | 引張破断強さ：39.1MPa 引張破断伸び：1.98% |
| ポリマーセメントモルタル | アクリル系ポリマーエマルジョン使用 |
| | 圧縮強さ：30.9N/mm ² ヤング係数：23.1N/mm ² |

図-3.1 に、付着試験用および角度検討用の試験片の形状・寸法を示す。付着特性の検討に供した試験片の付着長は50~150mmの間で3水準に変化させたが、光ファイバの露出長さは50mmで一定とした。一方、破断に対する角度の影響を検討するための試験片は、埋込み材料をエポキシ樹脂とし、光ファイバの抜け出しを防ぐための定着部として、金属製円柱に光ファイバを巻き付けたも

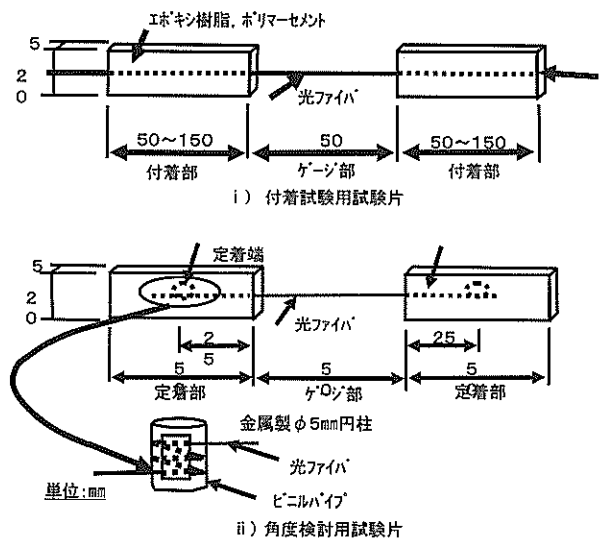


図-3.1 付着試験用および角度検討用の試験片の形状・寸法

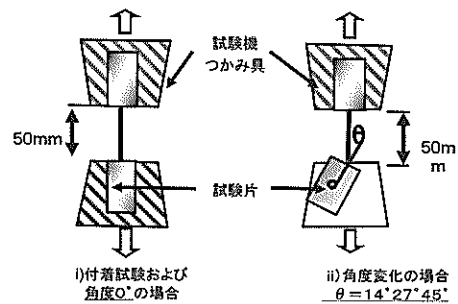


図-3.2 角度を付与した引張試験の方法

のをビニルパイプに装着し、そのビニルパイプをエポキシ樹脂内に埋め込み固定した。

(3) 引張試験の方法

引張試験は、変位制御が可能なインストロン型万能試験機を用いて実施した。荷重はすべての供試体において1mm/minの一定速度で行い、荷重-変位関係を測定した。試験機へのセットは、図-3.2に示すように行い、角度の付与は試験片を、14°、27°、45°と3種類の角度をつけて設置することにより行った。

(4) 試験結果および考察

a) 付着特性

図-3.3に、埋込材料としてエポキシ樹脂を用いた試験片の付着試験より得られた荷重-変位関係の一例を示す。付着長150mmの光ファイバは破断し、光ファイバの引張破断荷重は約50N(引張強度：約1000N/mm²)である

A Fundamental Study on Application of Optical Fiber for Health Monitoring of Concrete Structures

Hidenori HAMADA*
Toru YAMAJI**

Synopsis

In Japan, during recent several decades, great number of civil structures has been constructed. However, many aged structures have deteriorated up to present days. In some cases, there are structures seriously damaged by ASR (Alkali Silica Reaction) or chloride attack, etc. As Japan is geographically surrounded by sea with a long coastline, many reinforced concrete structures are directly exposed to seawater and are seriously damaged by chloride attack. Therefore, a health-monitoring technique of these deteriorated structures is needed to prevent sudden collapse and also to save human life in unexpected accidents.

The concept of smart structures is widely applied in car and airplane industries. Also, in civil engineering structures, a demand for the smart structure is gradually increasing. Originally, optical fiber was developed and widely used as a mass information carry medium. Recently, several research works have been carried out to apply optical fiber as a monitoring sensor for several types of materials, including steel, carbon fiber and concrete. One reason for these developments is that optical fiber has several advantages including non-conductivity, immunity to electromagnetic interference and low weight. In previous papers, high possibility for utilization of optical fiber as a monitoring sensor is suggested.

In this study, many types of optical fiber sensors attached on the concrete surface were developed. Through many kinds of tests of specimens, detailed data on optical performance of optical fiber were collected. Overall performance of the optical fiber sensor as a concrete performance monitor is discussed.

Key Words: deterioration, repair, monitoring, intelligent material, sensing, optical fiber, fail-safe

* Head of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Senior Researcher of Geotechnical and Structural Engineering Department

コンクリート構造物のモニタリングへの 光ファイバの適用に関する基礎的研究

濱田 秀則 *
山路 徹 **

要 旨

社会基盤施設は、一般には50年以上にも及ぶ長期間の耐用年数を設定して建設がなされる。近年の我が国における高齢化社会への移行状況を考えた場合、既存の施設に対してさらに長期の耐用年数が要求されることも十分に予想される。しかし、あらゆる構造物は供用の開始とともに徐々に劣化・老朽化が進行し、そのために構造物の信頼性も徐々にではあるが低下していく。劣化・老朽化が軽微なうちに適切な補修対策を講じることは社会的・経済的に極めて重要であり、このことから構造物の挙動を的確にモニタリングし評価する技術の開発に対する要請が近年一段と強まっている。

本研究においては、センシング材料として高い可能性を有する光ファイバに着目し、コンクリート構造物のモニタリングに対して光ファイバを適用していく技術を開発することを目的としている。光ファイバの応用方法として、“破断”、“曲げ損失”および“後方散乱”に関する情報を有効に利用するための実験的検討を実施した。本研究により以下に示すような結果を得ることができた。

- 1) 光ファイバの力学的特性に関して知見を得ることができた。
- 2) 光ファイバの破断を情報として利用する方法に関して、変状の動く方向と光ファイバのなす角度が重要となることを示し、光ファイバをひび割れとほぼ平行に貼付する方法を新たに提案できた。
- 3) 光ファイバの透過光損失を情報として利用する方法について、幾つかの適用可能な方法を示すことができた。
- 4) 光ファイバによるひずみ計測結果を情報として利用する方法について、光ファイバに予めプレテンションを与えておくことにより、精度のよい計測が可能となることを確認した。
- 5) 今後の研究の方向性について、“フェールセーフ”という考え方に沿った方向性も有力であることを示した。

キーワード：

劣化、補修、モニタリング、知能化材料、センシング、光ファイバ、フェールセーフ、

* 地盤・構造部 材料研究室 室長
** 地盤・構造部 主任研究官

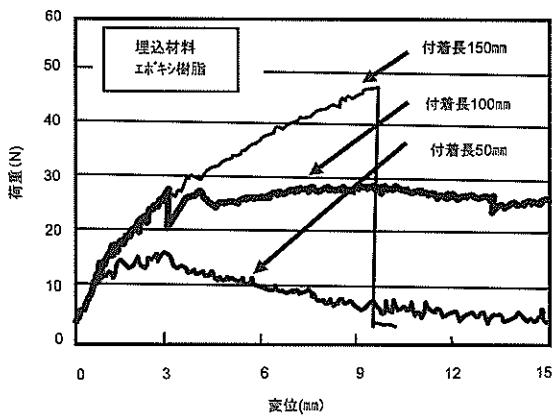


図-3.3 付着試験における荷重-変位関係の一例
埋込み材料：エポキシ樹脂

ことが確認された。なお、この値は文献[3.2]に示されている試験結果とほぼ一致している。一方、付着長が50mmおよび100mmの場合、荷重は変位とともに増加して最大荷重を示した後、減少もしくは一定値を示した。このように光ファイバが破断に至らないのは、光ファイバに作用した引張力が付着力より大きくなってすべりが生じたためである。なお、この場合のすべりは、光ファイバのコーティング表面とエポキシ樹脂の境界部で発生したのではなく、光ファイバを構成する光ファイバクラッドとコーティングの境界で発生した。

一方、ポリマーセメントに埋込んだ場合のすべりは、光ファイバコーティングとポリマーセメント間で生じた。付着応力の算出は、光ファイバの軸方向に付着力が一樣に作用、すなわち図-3.4に示すように軸応力が直線分布するものとして(3.1)式によって求めた。

$$\tau_a = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.1)$$

ここに、 τ_a ：付着応力、 D ：光ファイバの直径、 P ：荷重、 L ：付着長さ、である。

図-3.5に最大付着応力の測定結果を示す。エポキシ

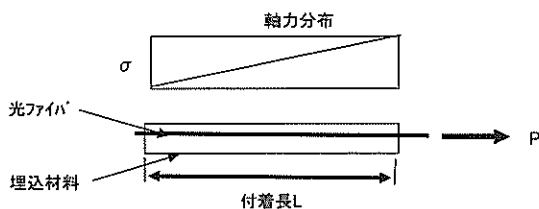


図-3.4 引張載荷時の光ファイバの軸力分布の仮定

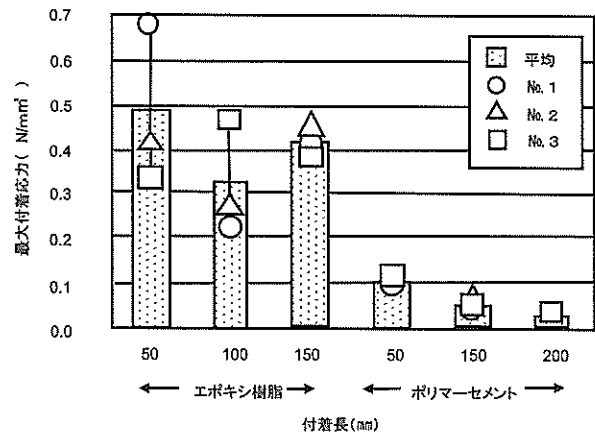


図-3.5 最大付着応力

樹脂に埋め込んだ場合の最大付着力、すなわち光ファイバクラッドとコーティング間の最大付着応力は、 $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ の範囲であった。この場合の付着面積は、光ファイバのクラッド直径 0.125 mm から求めた。

ポリマーセメントと光ファイバコーティング間の最大付着応力は、埋込長が長くなると小さくなる傾向を示した。これは、付着長を大きくしても最大荷重が大きくならなかったためであり、ポリマーセメントの場合の軸力分布は計算上仮定した直線分布と異なる可能性を示唆している。いずれにしても、ポリマーセメントと光ファイバの最大付着応力は、 $0.03 \sim 0.1 \text{ N/mm}^2$ の範囲であり、エポキシ樹脂に埋め込んだ場合よりもかなり小さな値を示した。なお、この場合の付着面積は、光ファイバコーティングを含む直径 0.25 mm から求めた。

b) 引張角度と光ファイバの破断強度

図-3.6はエポキシ樹脂に埋込み、引張角度を変化させた場合の引張試験結果を示している。ここで角度 0° は、付着試験の付着長 50 mm のデータである。引張角度 0°

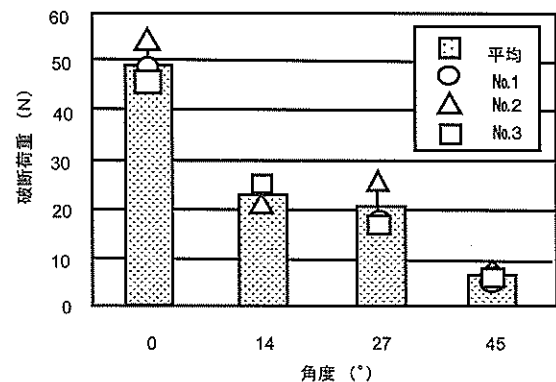


図-3.6 引張角度を変化させた場合の破断時荷重
—エポキシ樹脂に埋め込んだ場合—

の場合の引張破断荷重は約 50N であるのに対し、角度をつけた場合の引張破断荷重の平均は、14° で 23.6N、27° で 20.8N、45° で 6.5N と角度を大きくするにしたがって小さくなり、角度 45° の破断荷重は 0° の 13% 程度まで低下した。

3.3 光ファイバを埋め込んだコンクリート供試体の曲げ載荷試験

(1) 序

本節で述べる実験では、コンクリート表面に設けた V カット中に光ファイバを埋め込んだコンクリート供試体の曲げ載荷試験を行った。そして、光ファイバが破断に至るまでの、コンクリートの挙動とそれに付随する光ファイバの挙動を実験的に考察した。

(2) 供試体および実験方法

コンクリート供試体は、図-3.7 に示すように 100×100×400mm とし、側面に深さ 10mm の V カットを設けて光ファイバを埋込んだ。V カットは、試験体の軸方向に対して 0°、14°、27°、45° の 4 水準の角度をつけた。また、埋込材料は 3.2 において検討したエポキシ樹脂およびポリマーセメントモルタルとした。曲げ載荷は中央一点載荷とし、載荷時の荷重、中央点変位、ひび割れ幅、および光ファイバの透過光の強度を測定した。光学的な計測システムを図-3.8 に示す。本システムにおいては、光ファイバの破断を、透過光の遮断による光強度の急激な減少として検知することができる。

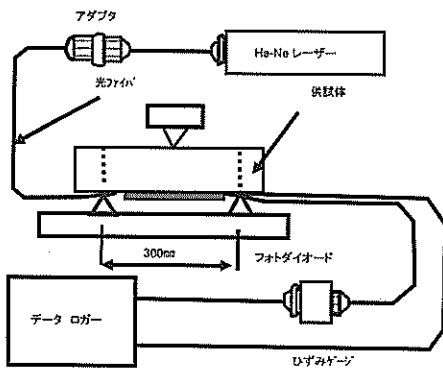
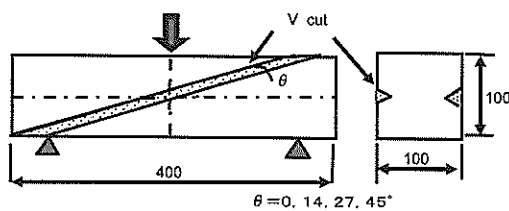


図-3.8 光学的計測システム

(3) 実験結果

表-3.2 に光ファイバが破断した時のコンクリートのひび割れ幅を示す。埋め込み材料としてエポキシ樹脂を使用した場合、角度 45° の場合は、ひび割れ幅 1.77mm で破断したが、その他の角度の場合はひび割れ幅が 4~5mm 程度に開くまで光ファイバの破断は生じなかった。一方、埋め込み材料としてポリマーセメントモルタルを用いた場合、角度 27° の場合はひび割れ幅 2.74mm で破断したが、角度 14° の場合は 6.05mm に開くまで破断は生じなかった。

光ファイバ破断時の状況は埋込材料の違いにより異なる傾向を示した。目視観察結果によると、ポリマーセメントモルタルを使用した場合は、モルタルと光ファイバコーティング間ですべりが生じたのに対し、エポキシ樹脂の場合は光ファイバクラッドとコーティング間ですべりが生じた。このようなすべり箇所の特徴は、3.2 節で示した引張試験の結果と同様である。

表-3.2 光ファイバ破断時のひび割れ幅

| 埋込み材料 | 角度 | ひび割れ幅 (mm) |
|--------------|-----|------------|
| エポキシ樹脂 | 0° | 5.50 |
| | 14° | 4.85 |
| | 27° | 5.85 |
| | 45° | 1.77 |
| ポリマーセメントモルタル | 0° | 3.65 |
| | 14° | 6.05 |
| | 27° | 2.74 |

3.4 光ファイバの破断に関する解析

(1) 序

光ファイバ自体は純引張に対して、破断ひずみ 5% 程度、破断荷重 50N 程度であることから、コンクリートと一体化させた時の光ファイバの破断状況は、光ファイバのひずみ分布等により決定される。そこで、ひび割れ近傍のひずみ分布を検討するために、3.3 節で示した実験結果を有限要素法による解析でシミュレートし、ひび割れの進展と光ファイバのひずみの関係を解析的に検討した。光ファイバのひずみ分布には、埋込み材料と光ファイバの付着特性が大きく影響することから、本解析においては付着特性を考慮できる解析モデルを用いた。

(2) 解析モデルと解析に使用した物性値

実験供試体のモデル化は 2 次元で行い、ひび割れはモデル中央に「discrete crack model」を採用することで表現した。埋込み材料がエポキシ樹脂の場合の付着は光ファイバのコーティングとクラッド間のみ、またポリマーセメントの場合の付着はポリマーセメントと光ファイバコーティング間のみを考慮した。なお、付着は、interface element を介してコンクリートと光ファイバ

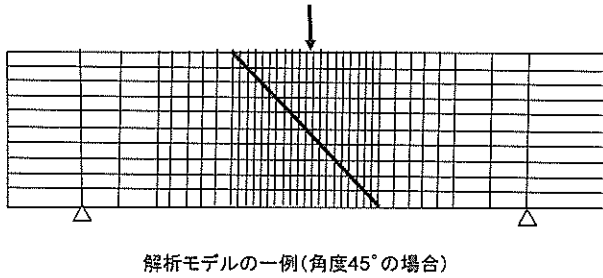


図-3.9 解析モデルの一例(角度45°の場合)

を結びつけることで表現した。図-3.9 にメッシュ分割図の一例を示す。図に示すように、解析には有限要素法を適用した。

表-3.3 に本解析で使用した各物性値を示す。光ファイバは弾性と仮定し、ヤング係数は文献[3.2]を参考にして定め、付着力は3.2節で示した実験結果の代表値を用いた。

表-3.3 解析に用いた物性値

| | | |
|--------|------------------------|----------------------------------|
| コンクリート | ヤング係数 | $2.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ |
| | ポアソン比 | 0.17 |
| | 引張強度 | 3.5 N/mm^2 |
| 光ファイバ | ヤング係数 | $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ |
| | ポアソン比 | 0.2 |
| 付着 | 付着強度(コーティングと光ファイバクラッド) | 0.55 N/mm^2 |
| | 付着強度(ポリマーセメントとコーティング) | 0.1 N/mm^2 |

(3) 解析結果および実験結果との比較

図-3.10 に、荷重-中央点変位の実験結果および解析結果を示す。解析結果の最大曲げ荷重は実験結果の95%程度の値を示しており、概ね実験を再現しているといえるが、中央点変位についてはかなり小さい値を示した。しかし、ピーク後の挙動が脆性的な挙動を示しているという点では実験結果を再現できている。今回の解析の主な着目点は、ひび割れの進展に伴って生じる光ファイバのひずみの進展にあるので、全体の挙動が実験結果を再現できていることから、本モデルは概ね妥当であると判断される。

図-3.11 に中央点変位と光ファイバ埋込位置のひび割れ幅の関係を示す。図中のプロットは実験における光ファイバ破断時の中央点変位とひび割れ幅である。中央点変位とひび割れ幅は光ファイバの埋込み角度には関係なく比例関係を示した。解析結果は、比較的实验結果と一致しており、解析は実験におけるひび割れの進展を概

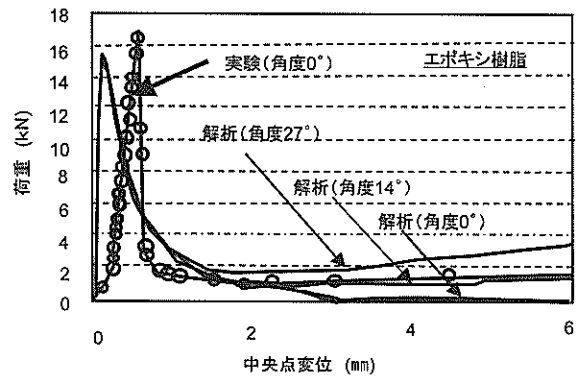


図-3.10 荷重-中央点変位の実験結果および解析結果

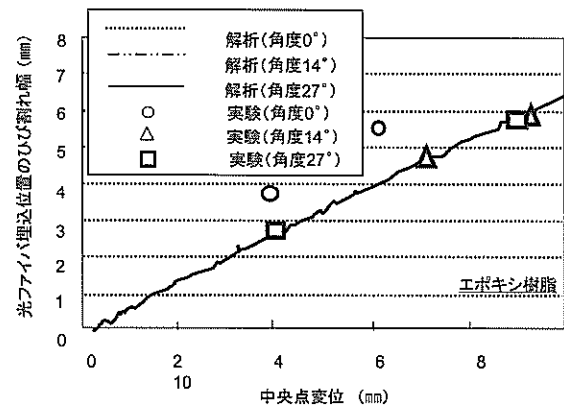


図-3.11 中央点変位とひび割れ幅の関係

ね再現できていると考えられる。

図-3.12 に光ファイバの位置と軸方向ひずみの関係の一例を示す。ひずみ分布は埋込材料の違いによって異なり、光ファイバとの付着力が大きいエポキシ樹脂の場合には、ひび割れ位置付近に集中しているのに対し、ポリマーセメントではひずみの影響範囲が広く、最大ひずみも小さくなった。また、ひび割れに対して角度が大きくなるほど、同じひび割れ幅に対して若干ひずみ分布が小さくなる傾向を示した。

図-3.13 にひび割れ幅とひび割れ位置の光ファイバひずみの関係を示す。光ファイバの破断は、最大値を示すひび割れ位置のひずみが破断ひずみに達した時点で発生する。ひび割れの進展に伴い、ひび割れ位置の引張ひずみは増加し、付着力の大きいエポキシ樹脂のほうがポリマーセメントより大きな引張ひずみが作用することが示されている。

表-3.4 に光ファイバ破断時のひび割れ幅を示す。解析における光ファイバの破断判定は、ひずみ分布から光ファイバの荷重分布を求め、光ファイバの基礎物性試験で

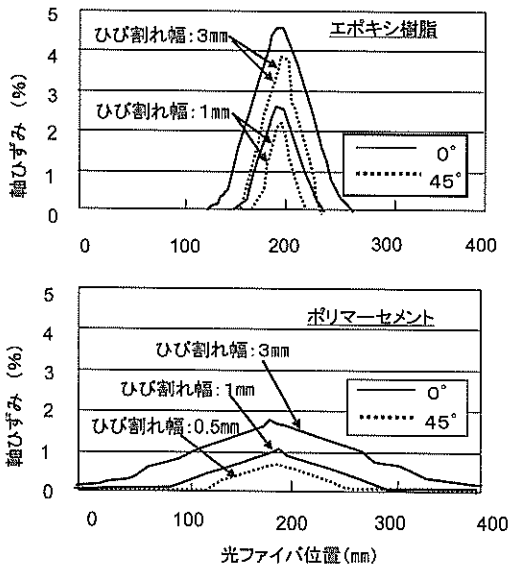


図-3.12 光ファイバの位置と軸方向ひずみの関係
(解析結果)

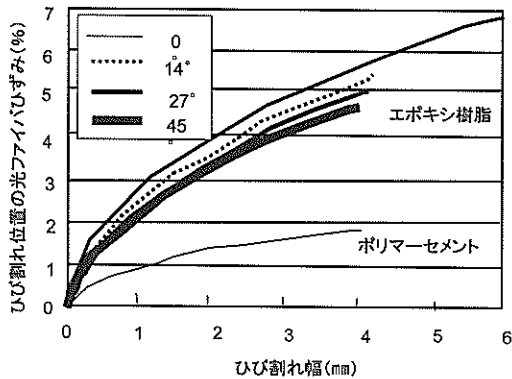


図-3.13 ひび割れ幅と光ファイバひずみの関係
(解析結果)

求めた各角度に対する破断荷重と比較することで求めた。解析結果では、埋込み材料がエポキシ樹脂の場合、埋込み角度が大きくなるほど、光ファイバ破断時のひび割れ幅は小さくなった。また、埋込み材料がポリマーセメントの場合、光ファイバは破断に至らないという結果になった。これは、ポリマーセメントと光ファイバのコーティングの付着力が小さく、コンクリートのひび割れによる変形を光ファイバまで伝達できていないためと考える。なお、実験において角度の影響が明瞭に表れなかったのは、供試体軸方向に対して必ずしも直角にひび割れが発生しなかったために、局所的にはひび割れの方向と光ファイバの軸方向のなす角度が当初想定した値とずれたことも一因である。

表-3.4 光ファイバ破断時のひび割れ幅

| 埋込材料 | 角度 | ひび割れ幅 (mm) | |
|----------|-----|------------|------|
| | | 実験 | 解析 |
| エポキシ樹脂 | 0° | 5.50 | 3.60 |
| | 14° | 4.85 | 0.98 |
| | 27° | 5.85 | 0.82 |
| | 45° | 1.77 | 0.20 |
| ポリマーセメント | 0° | 3.65 | 破断せず |
| | 14° | 6.05 | 破断せず |
| | 27° | 2.74 | 破断せず |
| | 45° | — | 1.00 |

3.5 総括

(1) ひび割れ検知への適用性

ひび割れの発生を光ファイバの破断によって検知しようとした場合、光ファイバとコンクリートの一体化に用いる埋込材料は付着特性に優れたエポキシ樹脂の方が有利であった。しかし、この場合にも、光ファイバコーティングとクラッド間ですべりが生じる結果となった。したがって、この部分の付着力を改善することができれば、本実験よりも小さいひび割れの発生が検知可能と考えられる。また、ひび割れに対して角度を付けることにより光ファイバの破断するひび割れ幅が小さくなることから、ひび割れの発生方向が予想できる場合、角度を付けて埋め込む方法は有効であるものと考えられる。

(2) まとめ

本節で述べた実験および解析の結果を総括すると以下のようなになる。

1) 光ファイバコーティングとエポキシ樹脂の付着は良好であるが、この場合のすべりは光ファイバクラッドとコーティング間で生じる結果となった。光ファイバをポリマーセメントに埋め込んだ場合は、光ファイバコーティングとポリマーセメントの間ですべりが生じ、その時の付着力は、エポキシ樹脂の場合よりかなり大きな値であった。

2) 光ファイバの破断荷重は、角度の影響を大きく受け、純引張で50N程度、角度を大きくするほど小さくなり、45°で約6.5Nであった。

3) 解析的検討により、ひび割れに対する光ファイバの軸方向ひずみ分布は、埋込材料との付着力の影響を大きく受け、付着が大きいほどひび割れ近傍にひずみが集中することがわかった。また、ひび割れに対して埋込角度をつけた場合のほうが、光ファイバに作用するひずみは若干小さくなるが、破断ひずみが小さくなるため、小さなひび割れで光ファイバが破断することが示された。

4. 光ファイバの破断を利用する方法

4.1 序節

表-2.1に示したとおり、光ファイバをモニタリングセンサとして利用する方法は一種類ではなく幾つかある。その中で最も簡便な方法は、光ファイバの破断を情報として用いる方法である。本節で述べる実験において、光ファイバの破断を情報として用いるための幾つかの方法を考案し、その効果を実験的に確認した。光ファイバの破断を情報としてモニタリングする方法としては、受光器として光パワーメータを用いる方法、もしくはOTDRを用いる方法の二つに分類される。OTDRを用いることによって、光ファイバの破断箇所を特定することができる。技術開発のポイントは、コンクリートの変状をどのように光ファイバの破断に結びつけるかであり、突き詰めれば、光ファイバとコンクリートをどのように一体化させるかが問題となる。本節において述べる実験では、そのための幾つかの方法を試み、その適否を考察した。

4.2 和紙を利用して貼り付ける方法[4.1][4.2]

(1) 序

本節で述べる実験においては、光ファイバをコンクリート表面に装着する一つの方法として、和紙を用いる方法を考案し、その装着性を検討した。次に、考案した方法を用いて光ファイバを貼付したコンクリート試験体の曲げ載荷試験を行い、コンクリートの変形に伴うファイバの光学的挙動を試験した。最後に、コンクリートの挙動とファイバの挙動の相関性について検討し、本法の適用の可能性について考察した。

(2) 実験の概要

a) 使用材料

コンクリート試験体の製作に用いた材料は、普通ポルトランドセメント、砕砂、砕石および水道水である。表-4.1にその配合を示す。コンクリートの材齢28日圧縮強度は、 $29\text{N}/\text{mm}^2$ である。

表-4.1 コンクリートの配合

| W/C (%) | s/a (%) | (kg/m ³) | | | | |
|---------|---------|----------------------|-----|-----|-----|-------|
| | | W | C | S | G | Ad |
| 55 | 48 | 155 | 282 | 897 | 997 | 0.705 |

b) 試験体の概要

試験体は100×100×400mmの角柱型無筋供試体である。載荷時の側面および底面に光ファイバを貼付した。表-4.2に供試体へのファイバの貼付方法の一覧を示す。光

ファイバは大きく、①コーティングあり、②コーティングなし、に分類される。ファイバの試験体軸方向に対する貼付角度を0°、27°、45°と3水準に変化させた。

表-4.2 試験体の種類

| 試験体番号 | 光ファイバの種類 | 貼付角度 |
|-------|----------|------|
| No. 1 | コーティングなし | 45° |
| No. 2 | コーティングなし | 27° |
| No. 3 | コーティングあり | |
| No. 4 | コーティングなし | 0° |
| No. 5 | コーティングあり | |

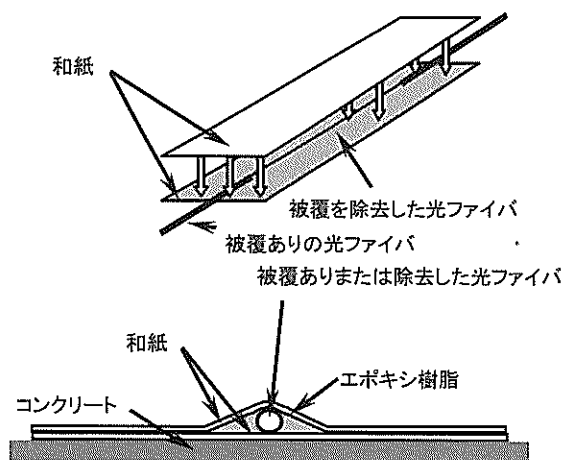


図-4.1 試験体へのファイバの貼付け方法

c) 試験体へのファイバの貼付方法

試験体へのファイバの貼付方法を図-4.1に示す。この方法は既存のペーパーゲージの貼付方法を応用したものである。すなわち、ファイバをまず、エポキシ樹脂を含浸させた和紙で固定し、十分乾燥した後にそれをコンクリート表面にエポキシ樹脂で固定した。

d) 載荷方法および光学システム

図-4.2に試験体の載荷方法および光学計測のシステムを示す。載荷は支点間距離が300mmの一点中央載荷とした。載荷装置はひずみ制御が可能なインストロンの装置を使用した。また、光源として、He-Neレーザーを使用した。発生光の波長は633nm、ビーム直径は0.45mmである。使用した光ファイバは、シングルモードであり、コアの直径が10μm、クラッドの直径が125μm、被覆後の直径が250μmである。ファイバの通過光をフォトダイオードで受光し、電圧信号に変換した後データの処理を行った。

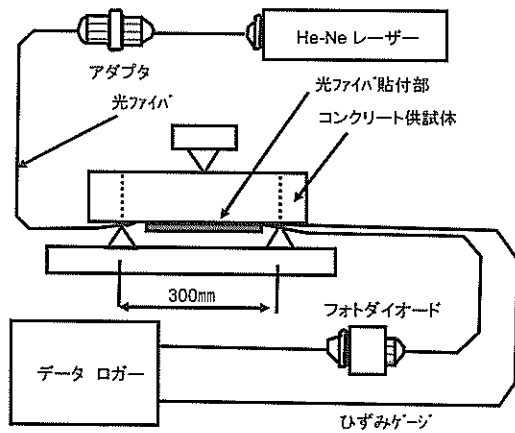


図-4.2 試験体の荷重方法および光学計測のシステム

(3) ファイバ装着方法の適否

ファイバの装着に使用した和紙は、コンクリートのひびわれに追従して破断した。コーティングを除去したファイバの場合はファイバ自体が破断したため、和紙内での滑りは生じなかった。一方、コーティングを残しているファイバの場合は、ファイバ自体が破断しなかったため、最終的には、和紙内での滑りが生じた。しかし、総じて、本方法によるコンクリートとファイバの一体化は保たれていた。

(4) 光ファイバの光学的挙動

図-4.3は試験体 No. 1 から No. 5 までの曲げ荷重試験の結果を示している。荷重時間と荷重および光ファイバを通過してきた光の強度をフォトダイオードで電圧に変換したときの値を示したものである。なお、荷重開始時に初期値0をセットした。なお、試験体 No. 5 の底面に貼り付けた光ファイバは荷重試験前に破断したため、計測できなかった。

a) コーティングを除去しない場合(試験体 No. 3, 5)

試験結果を図-4.3の第1図および第5図に示す。図よりわかるとおり、コンクリート試験体にクラックが発生した時にも角度0°(第5図)および27°(第3図)で貼り付けた光ファイバは破断せず、和紙内で光ファイバが滑り、コンクリートに発生するクラックを検知することができなかった。

b) コーティングを除去した場合(試験体 No. 1, 2, 4)

試験結果を図-4.3の第1, 第2および第4図に示す。図よりわかるとおり、光ファイバの貼付角度を45°(第1図)とした場合は、コンクリート試験体にクラックが発生すると同時に側面および底面の光ファイバが破断

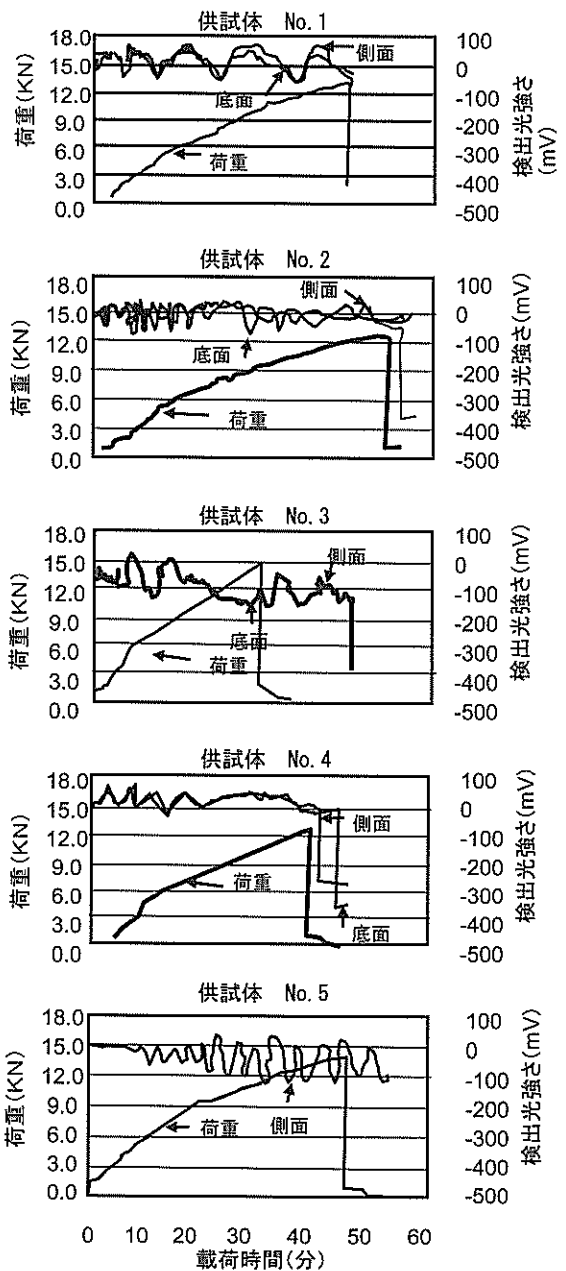


図-4.3 曲げ荷重に伴う光強度の推移

した。貼付角度を27°(第2図)とした場合にはクラック発生と同時に底面の光ファイバは破断しているが、側面の光ファイバは破断しなかった。また、貼付角度0°(第4図)の場合にはクラックが発生しても光ファイバは破断せず、ある程度クラックが進行してから破断した。

光ファイバのコーティングを除去してコンクリートのクラック検知のセンサとして使用する場合、想定されるクラックに対してある角度をもって貼り付け、破断させることが有効であると考えられる。この様にコーティングを除去した光ファイバを和紙を用いて張り付けたものをコンクリートのクラック検知のセンサとして用いる

ことは可能であると考えられるが、光ファイバを和紙に挟んで作成する際には、光ファイバ自体が破断しやすく、作業に高度な技能を要する。したがって、コーティングを除去せず、そのまま光ファイバセンサとして利用することが現実的である。しかし、光ファイバは非常に純引張強度が高いため、コーティングを残した状態で貼り付けても単純にはセンサとしては機能しないことがわかった。

(5) まとめ

本節で述べた実験では、光ファイバを貼付したコンクリート試験体の曲げ載荷試験を行い、コンクリートの変形に伴う光ファイバの光学的挙動について検討を実施した。その結果、コーティングを除去した光ファイバをコンクリートのクラック検知のセンサとして適用する場合には、発生するひび割れに対してある角度を有するように貼り付けることが有効であることがわかった。

4.3 エポキシ樹脂で固定する方法 [4.3]

(1) 序

本節で述べる実験では、樹脂により光ファイバをコンクリート表面に貼付する方法の適否を検討した。鉄筋コンクリート (RC) 試験体に光ファイバを貼付し、試験体の曲げ載荷試験を実施した。その実験結果に基づき、エポキシ樹脂による貼付方法の適否を考察した。

(2) 実験の概要

a) 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリート試験体の製作材料は、早強ポルトランドセメント、砕砂、砕石および水道水である。コンクリートの配合は、 $W/C=65\%$ 、 $s/a=48\%$ であり、コンクリートの28日圧縮強度は $25N/mm^2$ である。

b) 試験体の概要

試験体は $100 \times 150 \times 1000mm$ の角柱型RC試験体である。試験体の形状・寸法を図-4.4に示す。試験体自体はせん断破壊を想定して設計されていたため、アラミド繊維によるせん断補強を行い、破壊形式を曲げ破壊へと変更した。なお、本実験においては4体の試験体の曲げ載荷試

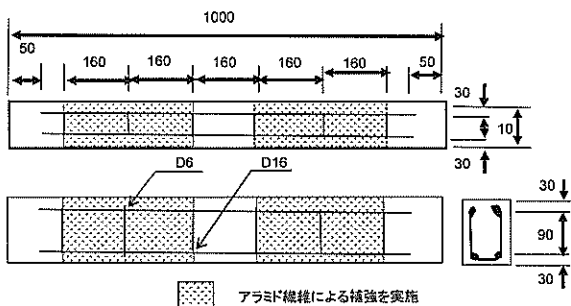


図-4.4 RC供試体の概要

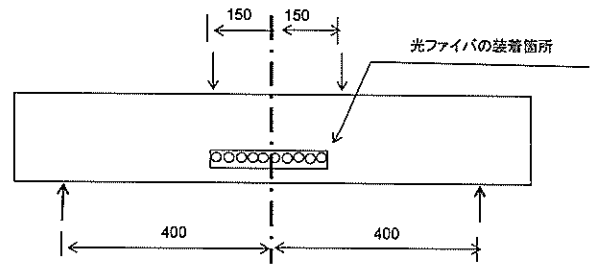


図-4.5 光ファイバセンサの装着箇所

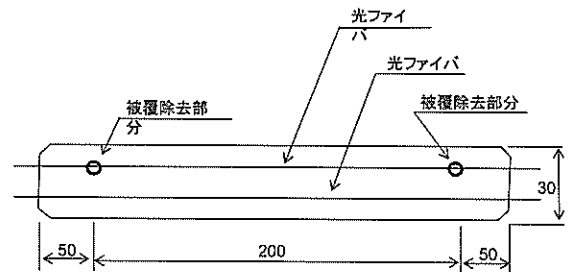


図-4.6 光ファイバセンサの構造

験を実施した。

図-4.5に示すように、光ファイバは試験体の側面中央部（載荷時の曲げ区間）のほぼ底面に近い場所に装着した。すなわち、載荷時に光ファイバとエポキシ樹脂はコンクリートと同等の曲げ荷重を受けるものである。

c) 光ファイバセンサの構造

エポキシ樹脂により固定した光ファイバセンサの構造を図-4.6に示す。図に示すように、2本の光ファイバを1体のエポキシ樹脂で固めた。2本のうち1本のファイバは、人為的に2カ所コーティングを除去している。その理由は、コーティングを除去することにより光ファイバが極めて脆くなる性質を利用して、センサの敏感性の向上を期待したものである。

d) 載荷方法および光学システム

図-4.5に試験体の載荷方法の概略を示しているが、支点間距離800mm、載荷点間距離300mmの、おおよその3等分点載荷である。なお、載荷中は光ファイバにレーザー光を送り、光ファイバを通過した光の強度の変化を連続的に計測した。光学的な計測システムは、図-4.2に示す方法と同様である。光源は波長633nmのHe-Neレーザーである。使用した光ファイバは、シングルモードであり、コア直径が $10 \mu m$ 、クラッド直径が $125 \mu m$ 、被覆直径が 250

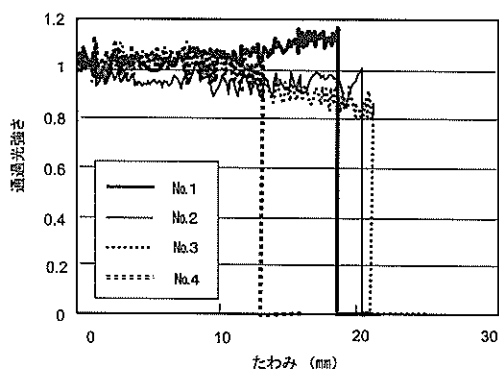


図-4.7 載荷時のたわみと透過光強さの関係

μm である。ファイバの通過光をフォトダイオードで受光し、電圧信号に変換した。

(3) 実験の結果

a) 載荷に伴う光強度の推移

図-4.7に載荷時に光ファイバを通過するレーザー光強度の推移を、試験体中央部のたわみ量とともに示す。図に示すように、すべての試験体において、載荷中の光強度の低下は認められず、ファイバの破断時に急激に光強度は低下している。すなわち、試験体の曲げ応力が増大した場合でもファイバ自体には大きな変形は生じていないものと考えられる。また、部分的にコーティングを除去したファイバでも、光強度の低下は認められず、こ

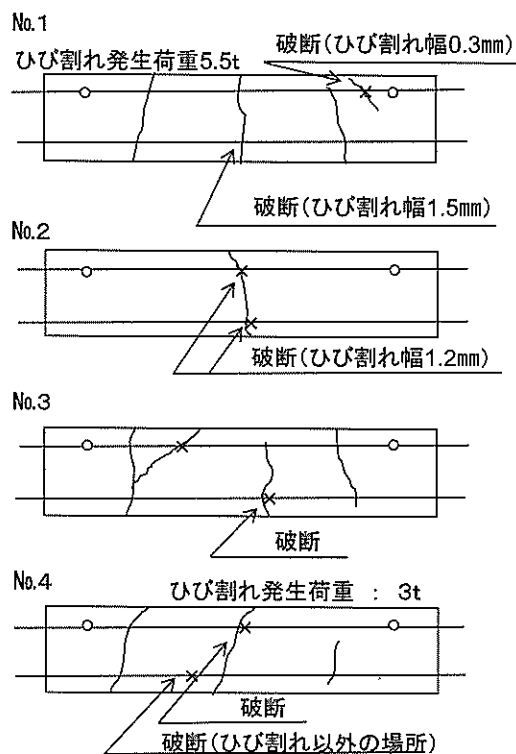


図-4.8 光ファイバセンサの破断時の状況

のことは、逆にとらえると、エポキシ樹脂によりコーティングの不完全な部分を十分保護していることになる。

b) ファイバの破断の状況

図-4.8にエポキシ樹脂上に発生したひびわれの状況とファイバの破断箇所を示す。各々のファイバの破断状況は一樣ではなく、それぞれ異なる状況を示した。ファイバに対して直角にひびわれが生じる場合は、ひびわれ幅が1mmを越えるまでファイバの破断は生じなかった。一方、ファイバに対してひびわれがある角度を持って生じる場合(No.1)は、比較的小さなひびわれ幅(0.3mm程度)でファイバは破断した。なお、センサの製作時に人為的にコーティングを除去した箇所での破断は皆無であった。

すべての試験体に共通する結果として、ひびわれ幅がかなり大きくなるまでファイバの破断は生じないためセンサとしての敏感性は劣るが、一体化の付着強度は十分であった。

(4) まとめ

光ファイバをコンクリート表面に装着する一つの方法として、エポキシ樹脂を用いる方法を試みた。一体化という点では良好な結果を得たが、センサの感度という点では満足できる結果を得ることはできなかった。

4.4 光ファイバを針金で引張る特殊な方法[4.4]

(1) はじめに

本節で述べる実験では、光ファイバを針金を用いて強制的に破断させる仕組みのセンサを試作した。そして、センサを装着したコンクリート供試体の曲げ載荷試験を行い、供試体の変形とファイバを通過してきた光強度の挙動の関係を検討した。本節では、試作を行ったセンサの概要と曲げ載荷試験結果について述べる。

(2) 実験概要

a) 光ファイバセンサ

図-4.9に光ファイバセンサの概要を示す。使用した光ファイバはマルチモードであり、コア径が $60\mu\text{m}$ 、クラッド径が $125\mu\text{m}$ 、コーティング径が $250\mu\text{m}$ のものである。光ファイバセンサは、固定部、光ファイバおよび

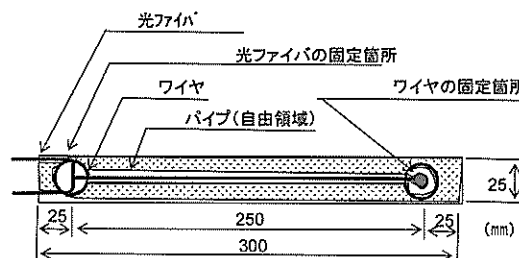


図-4.9 光ファイバセンサの構造

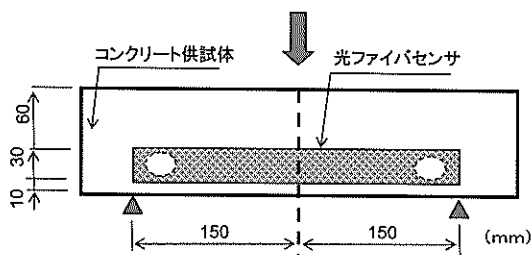


図-4.10 コンクリート供試体の概要

ワイヤによって構成されており、固定端間の基準長が250mm、全長が300mmである。センサの仕組みは、光ファイバおよびワイヤの固定点間の距離が広がるとワイヤが光ファイバを引張ることで、光ファイバに局部的な曲げを生じさせて破断させるのものである。すなわち、センサを装着したコンクリート部分にひび割れが生じると光ファイバが破断し、通過光の遮断によってひび割れ検知するという仕組みである。また今回試作したセンサは、1mm程度のひび割れを検知できる基本性能を有している。

b) 供試体

図-4.10に供試体の概要を示す。コンクリート供試体には10×10×40cmの無筋角柱供試体を用いた。コンクリートの使用材料は、普通ポルトランドセメント、陸砂、砕石および水道水であり、コンクリートの配合は、W/C=55%，s/a=44%，28日圧縮強度は42N/mm²である。

光ファイバセンサは、供試体の側面部にエポキシ樹脂で固定した。また、供試体は同じ種類のものを計5体(No.1～No.5)作製した。

c) 载荷方法および計測システム

载荷は支点間距離300mmの一点曲げ载荷とした。载荷中は光ファイバにレーザー光を入力し、その通過光をフォトダイオードによって電圧変換した光強度をサンプリング間隔20秒で連続的に計測した。また、载荷時には、コンクリートのたわみ、荷重、およびε型変位計によって光ファイバセンサ装着部のひび割れ幅の測定を行った。

(3) 実験結果

図-4.11、図-4.12に曲げ载荷試験結果の例として、供試体No.4およびNo.5の結果を示す。両図は、たわみと荷重の関係、たわみとひび割れ幅および光強度の関係を示している。供試体はたわみが0.42～0.57mmの時に曲げ強度が6.35～8.80N/mm²になり、ひび割れが発生した。初期のひび割れ幅は0.116～0.223mmであったが、このひび割れ発生前後では光強度は変化しなかった。すなわち、

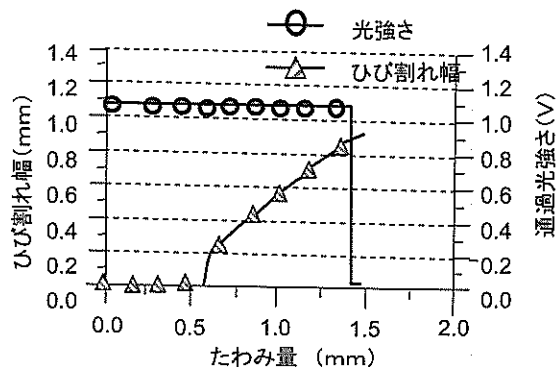
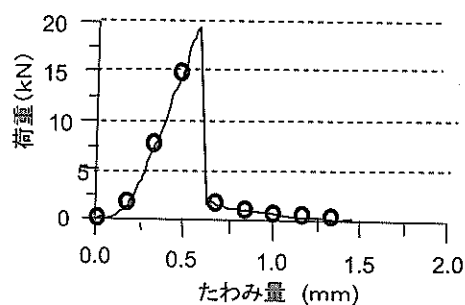


図-4.11 「たわみ-荷重」の関係および「たわみ-ひび割れ幅-透過光強度」の関係 (供試体 No. 4)

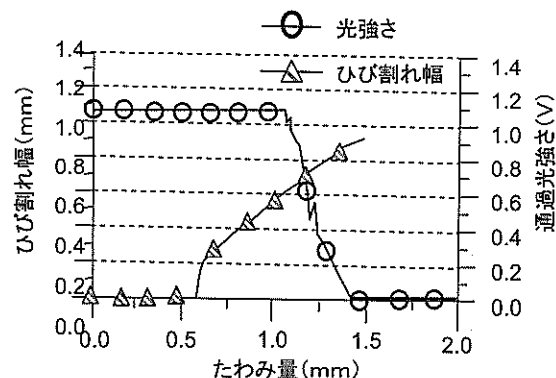
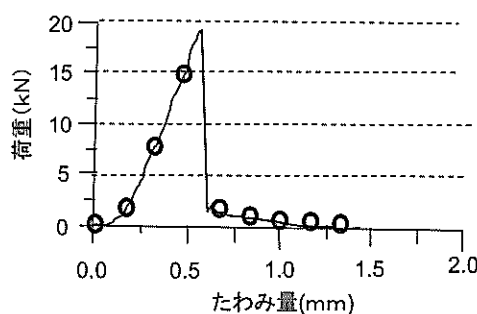


図-4.12 「たわみ-荷重」の関係および「たわみ-ひび割れ幅-透過光強度」の関係 (供試体 No. 5)

今回作製した光ファイバセンサは、0.2mm程度のひび割れに対しては十分に反応しなかった。

ひび割れ幅は荷荷の継続によって進行したが、ひび割れ幅0.6mm程度までは、すべての供試体で光強度の変化は測定されなかった。供試体No.4ではひび割れ幅が0.89mmを越えた時点で、光強度の低下、つまり破断に至った。供試体No.5はひび割れ幅0.6mm程度で光強度が徐々に低下を始め、ひび割れ幅0.91mmを越えた時点で光強度がほぼ0となり光ファイバが破断した。

表—4. 3に光ファイバが破断に至った時点でのひび割れ幅を示す。光ファイバの破断に至るまでの光強度の挙動に違いはあったものの、すべてのセンサ内の光ファイバは、ひび割れ幅0.6mm程度から光の漏れが観察された。これはひび割れ幅の進行によってワイヤが光ファイバを引張り、光ファイバに局所的な曲げが生じた部分で光が損失したためである。供試体No.1,3,4の光強度が変化しなかった理由は不明であるが、ひび割れ幅0.6mm程度から光損失する程度の変形が光ファイバに作用していたものと考えられる。そして光ファイバの破断に至ったひび割れ幅にややばらつきはあるものの、すべての光ファイバセンサは想定したひび割れ幅1.0mm前後で破断しており、ひび割れ検知センサとして機能することを確認できた。

表—4. 3 光ファイバ破断時のひび割れ幅

| 供試体番号 | 光強度が変化した時のひび割れ幅 (mm) | 光ファイバが破断した時のひび割れ幅 (mm) |
|-------|----------------------|------------------------|
| No.1 | --- | 1.51 |
| No.2 | 0.56 | 0.85 |
| No.3 | --- | 0.83 |
| No.4 | --- | 0.89 |
| No.5 | 0.61 | 0.91 |

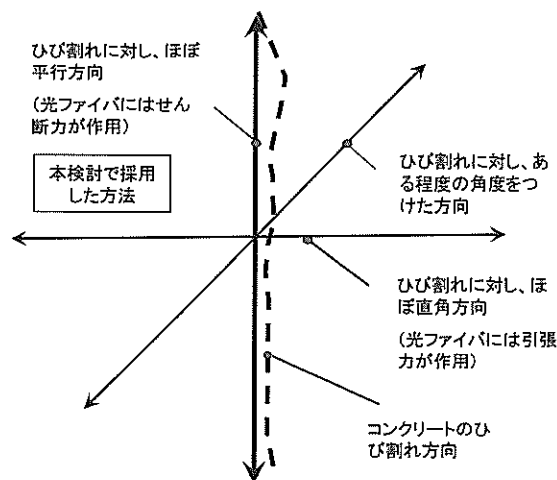
(4) まとめ

本節でまとめた実験では、光ファイバを用いたクラック検知センサを考案し、曲げ荷重試験によってその性能を確認した。試作したセンサは1mm程度のクラック幅で破断し、クラック検知センサとして機能する事を確認した。さらなるデータの蓄積および改良を加えることにより、コンクリートのモニタリング用としてのクラック検知センサとしての実用化は可能であると考えられる。

4.5 ひび割れに平行に光ファイバを装着する方法

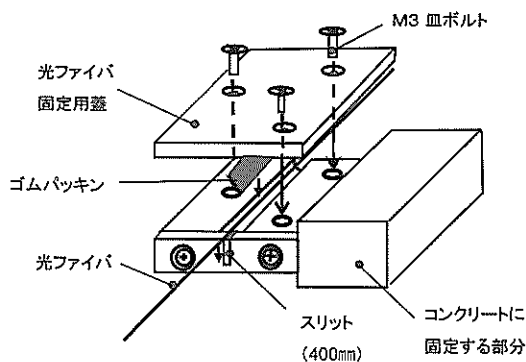
(1) 光ファイバ利用の考え方

本節で述べる検討においては、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。



図—4. 13 光ファイバ利用方法の概念

本研究で採用した光ファイバ利用方法の概念を図—4. 13に示す。前節までの実験では、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、本実験においては、図—4. 13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。本検討では、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—4. 14に示す。光ファイバ固定用治具には、図—4. 14に示すように400 μ mのスリットを設けてあり、ここに光ファイバ(外径250 μ 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. 15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向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



図—4. 14 作成した光ファイバ固定用治具

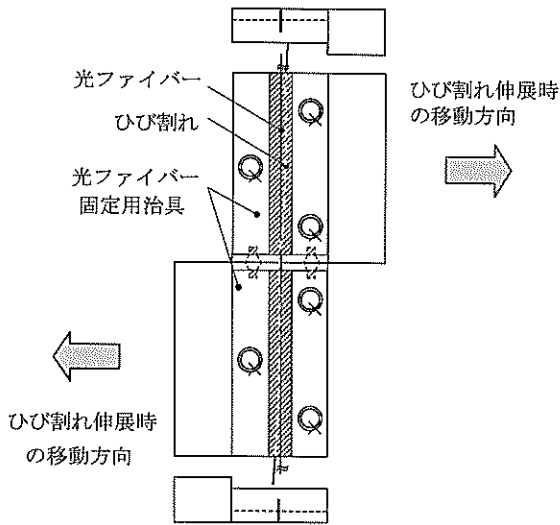


図-4.15 光ファイバセンサの構造

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。

(3) 実験の概要

a) モルタル供試体

本研究で用いたモルタル供試体の形状・寸法は 100×100×400mm の角柱型供試体である。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。なお、使用したアラミド繊維補強筋の物性を表-4.4に示す。

モルタルに使用した材料は、セメントがホワイトセメント(密度: 3.05g/cm³)、細骨材が山砂と砕砂の混

表-4.4 アラミド繊維補強筋の物性

| | 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 ³) | --- | 1.31 |

表-4.5 モルタルの配合

| 単位量 (kg/m ³) | | | SP (C×%) |
|--------------------------|------|------|----------|
| 水 | セメント | 細骨材 | |
| 266 | 666 | 1163 | 0.6 |

合砂(表乾密度: 2.62g/cm³、吸水率: 1.61%、F.M.: 2.63)である。モルタルの配合を表-4.5に示す。表に示すとおり、水セメント比が40%であり、フロー値は252mmであった。

本実験においては、合計5体の載荷試験を行った。

b) 曲げ載荷の方法

供試体の曲げ載荷方法を図-4.16に示す。一点集中載荷とし、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載荷を行い、ひび割れ発生位置を確認した後、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載荷を行った。

載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/分程度で載荷した。また、載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-4.16)。

c) 光学的計測システム

光源としてHe-Neレーザーを、また、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、光ファイバの切断などの基本的作業は手作業で行った。

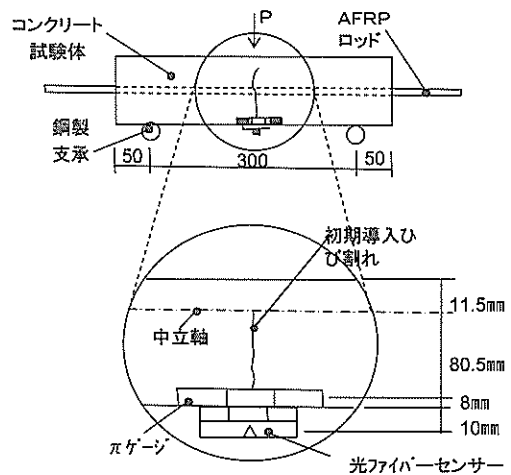


図-4.16 供試体の曲げ載荷方法

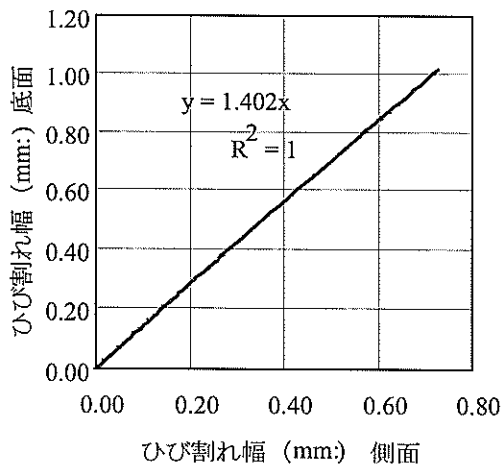


図-4.17 側面および底面に設置した
ゲージ測定値の関係

(4) 実験の結果

a) π ゲージによるひび割れ幅計測値の補正

図-4.16 に示すとおり、光ファイバは曲げ荷重時の底面に装着し、 π ゲージは側面に装着した。このとき、 π ゲージの計測レベルは供試体の底面から 8mm 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 10mm 下方の位置にある。したがって、供試体を曲げ荷重する場合、光ファイバセンサ、 π 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荷重時の底面に装着した π ゲージの値と側面（最下部）に装着した π ゲージの値を比較するための荷重試験を行った。このとき、底面側の π ゲージの設置レベルは光ファイバとほぼ同じで、供試体底面から 10mm の位置である。実験の結果を図-4.17 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 π 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 π 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。

b) ひび割れ幅の進展と光ファイバ挙動の関係

図-4.18～図-4.22 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-4.6 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、この一連の荷重試験は比較的再現性のよい結果を示している。

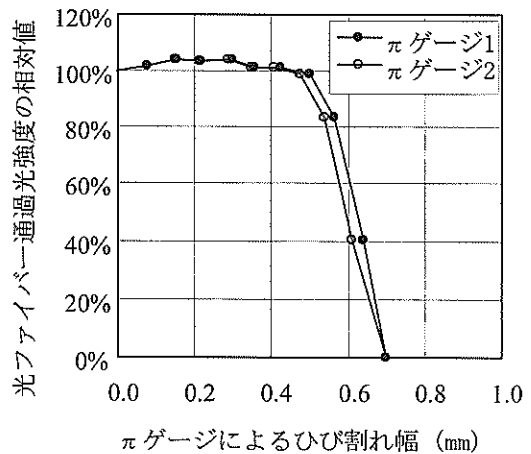


図-4.18 ひび割れ幅と透過光強度の関係
(供試体 No. 1)

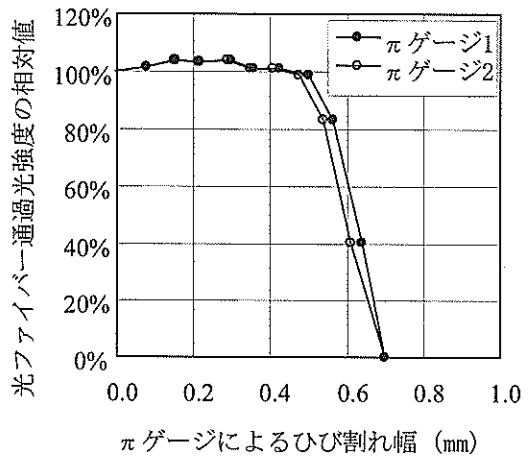


図-4.19 ひび割れ幅と透過光強度の関係
(供試体 No. 2)

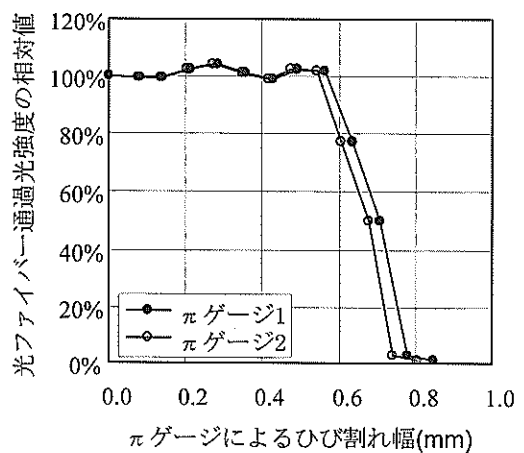


図-4.20 ひび割れ幅と透過光強度の関係
(供試体 No. 3)

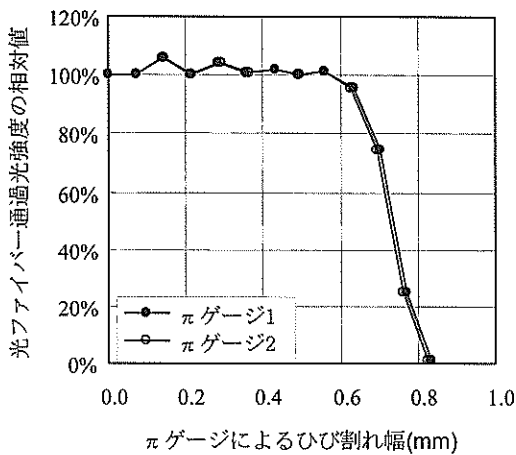


図-4.21 ひび割れ幅と透過光強度の関係
(供試体 No. 4)

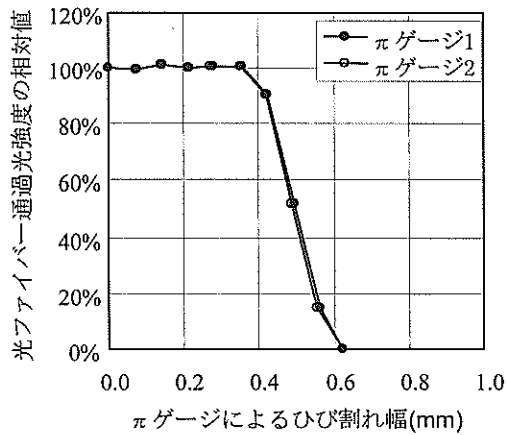


図-4.22 ひび割れ幅と透過光強度の関係
(供試体 No. 5)

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体の載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。

前節までに述べた実験では、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。

表-4.6 ひび割れ幅と光ファイバの挙動の関係

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

c) 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-4.23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

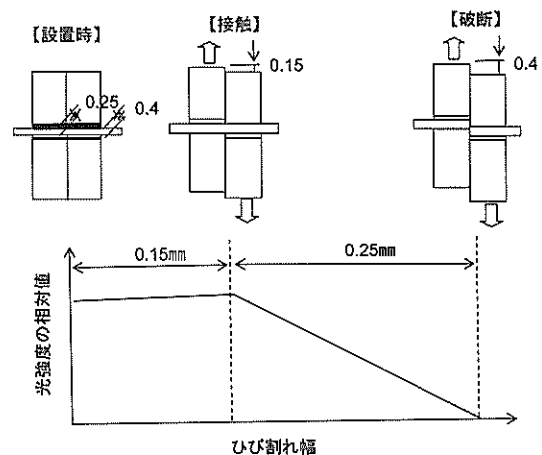


図-4.23 光強度-ひび割れ幅関係における理論的な光ファイバの破断メカニズム

の治具が図-4.23 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-4.7 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性能の向上を図ることが可能であると考えられる。

表-4.7 光強度の直線的低減域の傾き

| 供試体 No. | 直線的低減域の傾き ($\times 10^2\%/\text{mm}^{-1}$) | |
|---------|--|-----------------|
| | π ゲージ No. 1 | π ゲージ No. 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 | |

4.6 総括

一連の実験を通じて、光ファイバとコンクリートを一体化させ、コンクリートの変状を光ファイバの破断として検知する方法の開発を試みた。4.4節で述べたセンサを用いると変形量が1.0mm程度で破断を情報とすることができた。一方、光ファイバのコーティングを除去することができれば(4.2節)、コンクリート表面のひび割れ発生とほぼ同時にファイバを破断させることができた。しかし、コーティングの除去は実験室的には可能であったが、実構造物への適用は難しいものと思われる。光ファイバを素線のままでセンサとしての機能を持たせるためには、変状の動く方向と光ファイバのなす角度が重要となる。図-4.13に示したとおり、ひび割れ方向とファイバのなす方向が 90° (ほぼ直角) の場合は、変状の動きに対して光ファイバに純引張力が作用するため、ファイバの破断には至らない。一方、ひび割れ方向とファイバの方向がほぼ平行になると、光ファイバ

には純粋なせん断力が作用するので比較的少量の変動量でファイバは破断することになる。

以上、まとめたように、本研究では完成された形で光ファイバの破断型センサを提案するまでには至らなかったが、その基本構造を提示することはできた。

5. 光ファイバの曲げ損失を利用する方法

5.1 序節

本章では、モニタリングセンサとしての光ファイバ利用の基本的考え方として、光ファイバの曲げ損失特性(曲げなどが生じた部分で光が損失すること)を利用する方法を検討した[5.1]。

5.2 光ファイバをループ状にして利用する方法

(その1) [5.2]

(1) 序

本節で述べる実験に用いたセンサは図-5.1 のような考え方の下で開発したものである。光ファイバを一回転させたループ部分に引張力が作用するとループの半径が縮小し、ループ部分を透過する光の損失が次第に大きくなる。更に半径が縮小し、限界の半径より小さくなると光ファイバは破断するという性質を利用しようと試みるものである。図-5.2 にループ型光ファイバセンサの形状を示す。ループ部分の半径は $R=2.5\text{mm}$ であり、

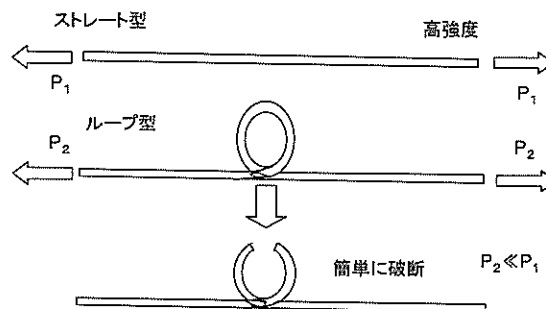


図-5.1 ループ型センサの基本的概念

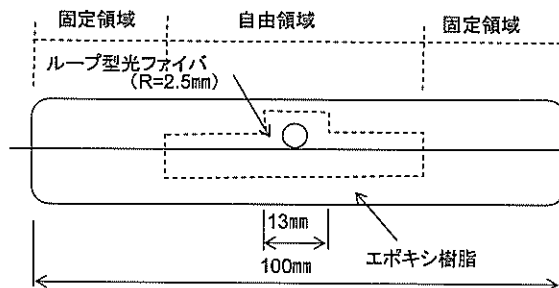


図-5.2 ループ型光ファイバセンサの構造

エポキシ樹脂で固定されていない領域（自由領域）に存在しているため半径が縮小可能となっている。一方、固定領域では光ファイバがエポキシ樹脂により固定されているため、引張力が作用した場合、光ファイバとエポキシ樹脂は一体となって変形することになる。このセンサはクラックが発生すると、変形に伴って発生した引張力が、固定領域の光ファイバから自由領域のループ部分に伝わり、半径が縮小し、最終的には破断に至るという挙動を想定している。

(2) 供試体

コンクリート供試体は100×100×400mmの角柱型無筋供試体であり、その製作に用いた材料は、普通ポルトランドセメント、砕砂、砕石および水道水である。表-5.1にその配合を示す。コンクリートの28日圧縮強度は、29N/mm²である。

表-5.1 コンクリートの配合

| W/C (%) | s/a (%) | W | C | S | G | Ad |
|---------|---------|----------------------|-----|-----|-----|-------|
| | | (kg/m ³) | | | | |
| 55 | 48 | 155 | 282 | 897 | 997 | 0.705 |

(3) 載荷方法および光学的挙動の測定システム

試験体の載荷方法および光ファイバの光学的挙動を測定するシステムは前節の図-4.2に示す方法と同様である。載荷は支点間距離を300mmとし、変位制御のもとで一点中央載荷で行った。コンクリートに発生するひずみおよびクラックはそれぞれひずみゲージおよびπ型ゲージにより測定した。光源としては、発生光の波長が633nmのHe-Neレーザーを使用した。光ファイバを通過した光はフォトダイオードで受光され、電圧信号に変換される。この電圧を「光電圧強度」とここでは呼ぶことにする。

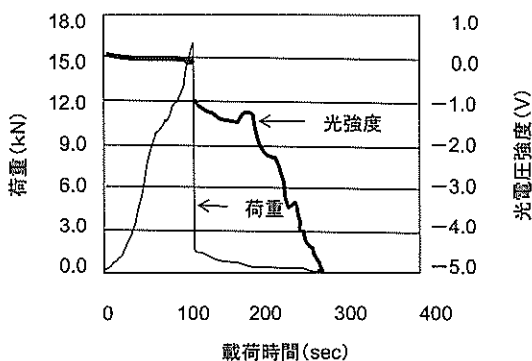


図-5.3 載荷に伴う光電圧強度の推移 (供試体 No. 1)

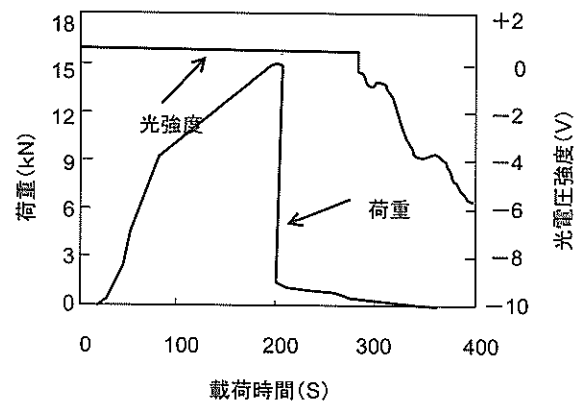


図-5.4 載荷に伴う光電圧強度の推移 (供試体 No. 2)

(4) ループ型光ファイバセンサの光学的特性

図-5.3は供試体 No. 1における曲げ載荷試験結果であり、載荷時間と載荷荷重および光電圧強度の関係を示している。クラック発生とほぼ同時に光電圧強度は約1V低下している。これは、初期クラック発生により、ループ部分の半径がわずかに縮小し、光ファイバ中の透過光が損失したためである。また、初期クラック発生後クラックが進行する過程で、光電圧強度が徐々に減少している。これはクラックの進展により、徐々にループ径が縮小し、透過光損失が増大したためである。以上の結果より、ループ型光ファイバセンサは初期ひび割れおよびその後のクラックの進展を検知する可能性を有することが示された。

(5) クラック幅と光電圧強度の関係

図-5.4は供試体 No. 2における曲げ載荷試験結果であり、載荷時間と載荷荷重および光電圧強度の関係を示している。図-5.3とは異なり、初期クラック発生時には光電圧強度の低下は認められない。これはクラック発生に伴い生じた引張力が、センサの固定領域からループ部分に確実に伝えられなかったため、半径が縮小せず、光電圧強度が低下しなかったものと考えられる。しかし、その後ひび割れが進展し始めると、No.1の場合と同様に徐々に光電圧強度が低下している。

図-5.5は、供試体 No. 2における載荷時間とひび割れ幅および光電圧強度の関係を示したものである。ひび割れ進行の遅い250秒程度までは光電圧強度の低下は認められないが、ひび割れの進行が進みはじめた280(s)頃からはひび割れの増大とともに、光電圧強度が低下し始めている。このようにひび割れ幅と光の低下の間には相関関係が認められる。そこで、光減衰率(L_d)とクラック幅の関係をプロットしたものが図-5.6である。ここで

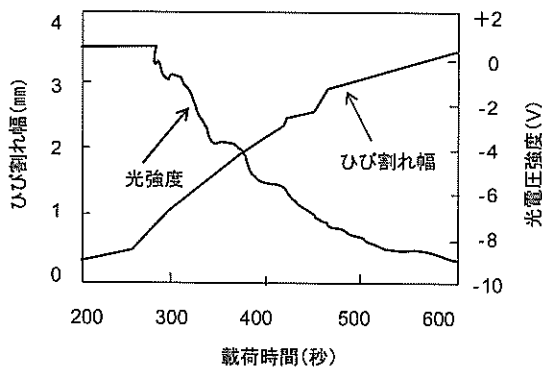


図-5.5 ひび割れ幅と光の減衰の関係
(供試体 No. 2)

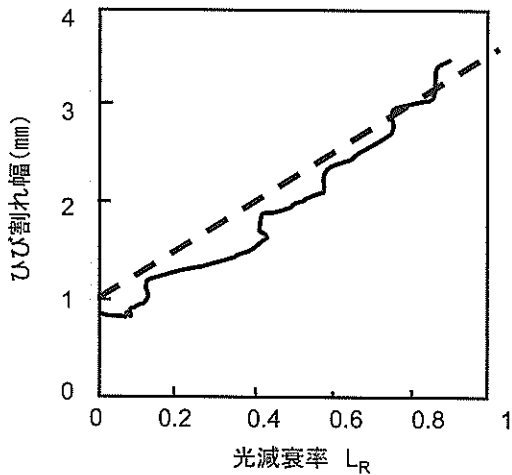


図-5.6 光減衰率とひび割れ幅の関係
(供試体 No. 2)

光減衰率の定義は(5.1)式による。

$$L_R = 1 - P_L / P_0 \quad (5.1)$$

ここで、 P_L : ある時点での光電圧強度、 P_0 : クラック発生直前の光電圧強度である。図-5.6 からわかるように、両者の関係は、センサが初期クラックを捉えていなかったため原点を通っていないが、クラックを検知し始めたあたりからはほぼ線形関係を示している。このことは光の減衰を測定することで、クラック幅を検知できる可能性があることを示している。

5.3 光ファイバをループ状にして利用する方法 (その2) [5.3]

(1) 序

本節で述べる実験では、前節で示したループ型光ファイバセンサに若干の改良を加え、鉄筋コンクリートの梁供試体に当該センサを貼り付け、曲げ载荷試験を行った。

(2) 実験概要

a) 使用した光ファイバおよびセンサの概要

使用した光ファイバは、シングルモードであり、コアの直径が $10\mu\text{m}$ 、クラッドの直径が $125\mu\text{m}$ 、コーティング直径が $250\mu\text{m}$ である。

本実験では、この光ファイバの透過光損失特性(局所的な曲げが生じた部分で光が損失すること)[5.1]を利用してコンクリート構造物に発生するクラックを検知しようと試みた。本実験においては、図-5.7 に示すような2つのタイプのセンサを作成した。タイプ1は、光ファイバがエポキシ樹脂により固定された固定領域と、固定されていない自由領域の2つの領域から成っている。そして自由領域の中で光ファイバにループを与えている。本センサ部分にクラックが発生し、光ファイバに引張力が作用すると、ループは縮小し、光ファイバを通過する光が減少すると想定している。タイプ2は、光ファイバが細管を通っている点において、構造がタイプ1と異なっている。この細管部分(自由領域)にクラックが発生した場合、固定領域とともに細管が引っ張られ、ループが縮小すると想定している。

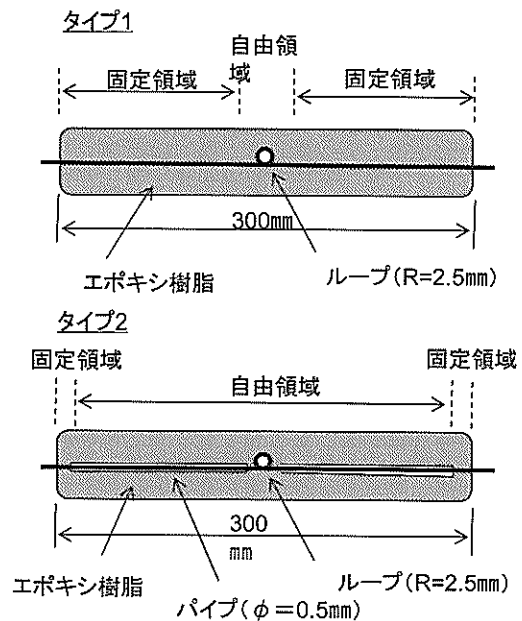


図-5.7 光ファイバセンサの構造

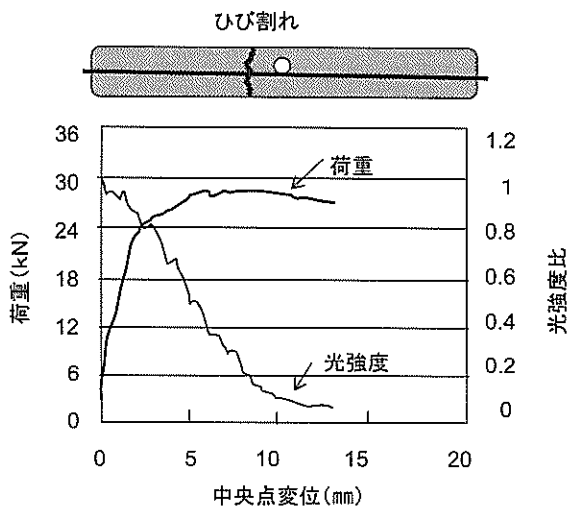


図-5.8 荷重時の中央点変位と光強度の関係
試験体：タイプ1
(ひび割れがループの近傍で発生した場合)

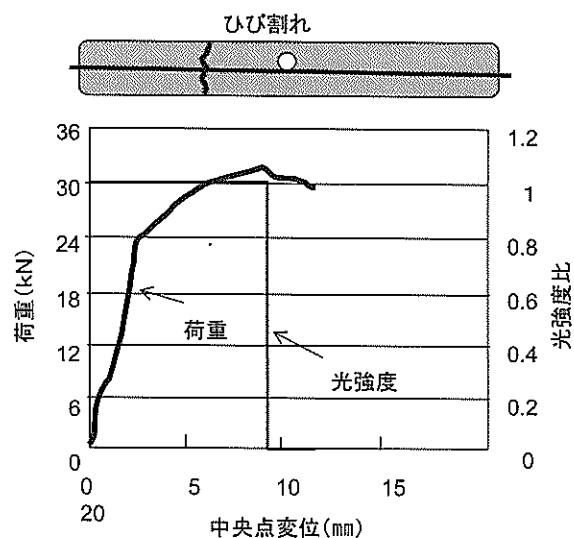


図-5.9 荷重時の中央点変位と光強度の関係
試験体：タイプ1
(ひび割れがループの近傍で発生しない場合)

b) 供試体

供試体は 100×150×1000mm の鉄筋コンクリート梁を用いた。その製作材料は、早強ポルトランドセメント、砕砂、砕石および水道水である。配合は W/C=65%、s/a=48% であり、28 日圧縮強度は 25N/mm² である。また、供試体内部には曲げ破壊が生じるように内部鉄筋が配置されており、供試体総数は 8 体である。

c) 荷重方法および光学的挙動の測定システム

供試体への曲げ荷重は支点間距離を 800mm、荷重点間距離を 300mm として行った。光学的挙動の計測システムは、光源として発生光の波長が 633nm の He-Ne レーザー、受光器がフォトダイオードであり、光信号を電圧信号に変換する。この電圧信号を「光強度」とここでは呼ぶことにする。

(3) 実験結果

a) タイプ1 センサにおける光学的挙動

図-5.8 および図-5.9 はタイプ1における曲げ荷重試験結果の一例であり、たわみと荷重および光強度比の関係を示したものである。ここでたわみは供試体中央部のものであり、光強度比とはある時点の光強度と初期の光強度の比を表している。図-5.8 はループの近傍でひび割れが進展した場合の結果である。センサは荷重が始まるとすぐに反応し始め、荷重の増大すなわちひび割れ幅の進展とともに光強度比は減少し続けている。すなわちひび割れ幅の進展を捉えているといえる。

一方、図-5.9 はループ近傍でクラックが進展しなかった場合の結果である。ループは荷重が進行しても縮小せず、たわみが 9mm に達した時、固定領域において光

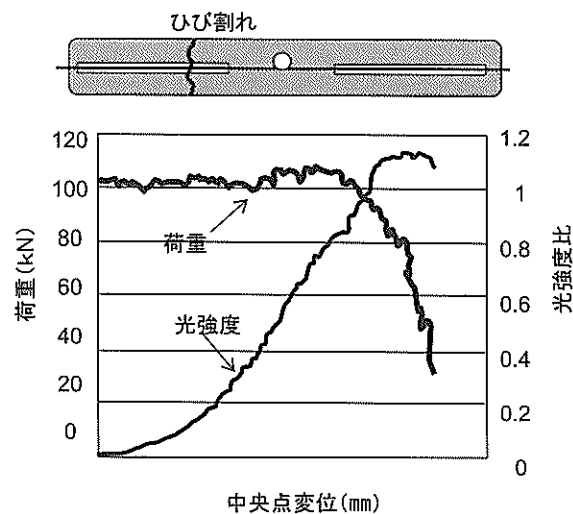


図-5.10 荷重時の中央点変位と光強度の関係
試験体：タイプ2
(ひび割れがループの近傍で発生しない場合)

ファイバが破断した。これより、ループ近傍でひび割れが進展しない場合は、タイプ1のセンサでひび割れの進展を捉えることは不可能であることが示された。

b) タイプ2 センサにおける光学的挙動

図-5.10 はタイプ2における曲げ荷重試験結果であり、たわみと荷重および光強度比の関係を示したものである。ひび割れはループから数 cm 離れた細管部分で進展し、変形が大きくなるまではループは縮小せず、センサとしての感度が鈍い結果となった。タイプ2において、

細管部分にクラックが発生すれば、固定領域とともに細管が引っ張られ、ループが縮小すると想定していた。しかしループ近傍にクラックが進展しない場合はセンサとしての感度が鈍いという図-5.9 に示す結果と類似のものとなった。

(4) まとめ

ループを有する光ファイバを鉄筋コンクリートのはり供試体に貼り付け、曲げ載荷試験を行った結果、ループを有する本センサのひび割れ検知能力は、ひび割れが発生する箇所に大きく依存することが確認された。現在のところ非常に狭い範囲のひび割れしか検出できないが、より広い対象範囲でのひび割れに反応するように改良を加えることが実用化のためには必要である。

5.4 光ファイバに折り曲げ角度をつけてコンクリート表面に装着する方法 [5.4]

(1) 序

本節で述べる実験は、光ファイバに曲げ角度をつけてコンクリートに装着し、コンクリートの異状を光ファイバの透過光の変化、および光ファイバの破断の発生として検知することを目的としている。なお、本実験においては、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) と呼ばれる光学的機器を用いた。本研究で用いた OTDR は、通信用光ファイバの敷設や保守に用いられているものであり、汎用性が高く比較的短時間で計測可能なことから簡便な計測システムの構築を可能とする。

(2) モニタリング方法の概要

図-5.11 に本実験において用いたシステムの概要を示す。表-5.2 に実験に用いた OTDR の仕様を示す。光ファイバに入射したパルス光は、ファイバを伝播中に、レーリ散乱、ラマン散乱、ブリルアン散乱などによって後

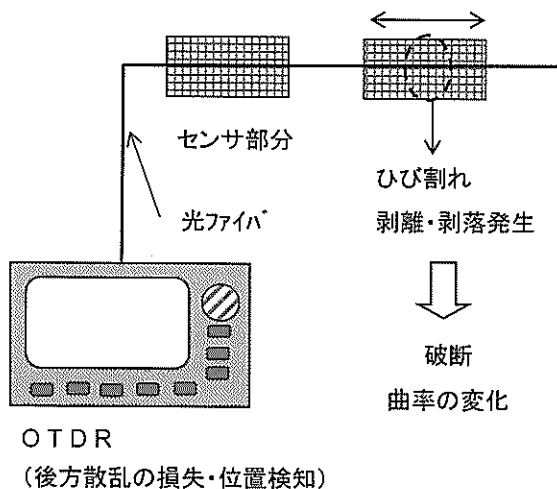


図-5.11 本実験で用いたシステムの概要

方散乱が生じる。これらの後方散乱のうち、OTDR はレーリ散乱を測定する。本実験では、伝送路である光ファイバ素線をそのまま用い、折り曲げ角度を付与することで局所的な曲げを与えて破断を生じさせる工夫を施している。このように、本システムでは、伝送路として用いる光ファイバにセンサ部分を設け、線上に位置するあるポイントにおけるひび割れ等の変状の発生、位置、進展を検知しようとするものである。

表-5.2 OTDR の仕様

| | |
|------------|----------------------------------|
| 距離レンジ (km) | 2 |
| 測定波長 (μm) | 1.31/1.55 |
| 測定ファイバ | SM (10/125 μm) |
| パルス幅 (sec) | 100n |
| 距離測定精度 | ±(5.0×10 ⁻⁵ ×測定距離)+1m |

(3) ひび割れの検知方法

図-5.12 は、100m の光ファイバを OTDR に接続し、後方散乱を測定した一例である。図より、光ファイバ端部 100m の位置の波形は非常に乱れていることが分かる。したがって、コンクリートの変状に伴って光ファイバにひずみが生じ最終的に破断すれば、その位置を特定することが可能となる。また、光ファイバが破断に至るまでの特性を把握しておくことにより、ひび割れ幅等の検知も可能と考えられる。

光ファイバ素線は純引張には強いが [5.5], 曲げやせん断に対しては脆い性質がある。そこで、光ファイバの破断をモニタリングの情報として利用する場合、角度をうまく付与する方法が有効となる場合がある。

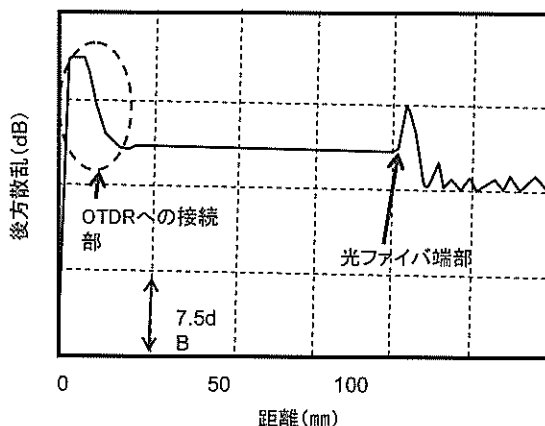


図-5.12 OTDR による測定例

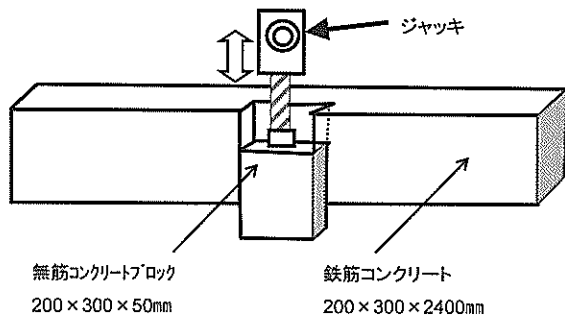


図-5.13 剥落模擬試験体の概要

(4) 剥離・剥落の検知方法

コンクリートの剥離・剥落検知方法に関して検討するため、図-5.13に示すような供試体中央部にかぶりコンクリートの剥落を模擬するためのコンクリートブロックを有する試験体を用いた実験を行った。剥落の模擬はコンクリートブロックをジャッキで移動させることで行った。なお、実験時は、変位計を用いて、コンクリートブロックの鉛直方向およびセンサ方向の移動距離も同時に測定した。

図-5.14にセンサの取り付け図を示す。本実験は、センサ取り付け方向と移動方向が直角であるため、コンクリートの変状がセンサに伝わりにくい方向となった。

(5) 実験結果

図-5.15に光ファイバに角度を付与する方法における取り付け角度と光ファイバ破断時の鉛直方向の移動距離、およびセンサ方向の移動距離の関係を示す。図中の0.5N、2.0Nは光ファイバ設置時にあらかじめ導入した引張荷重（一種のプレストレス）を示している。光ファイバが破断に至る鉛直変位は、光ファイバにプレテンションをかけることにより若干小さくなったが、全ケースで60~70mm程度であった。また、センサ方向の移動距離は、プレテンションをかけることにより小さくなり、取り付け角度の増大に伴っても小さくなる傾向を示した。

図-5.16に折り曲げ角度45°のセンサ方向の移動距離と後方散乱損失の関係を示す。後方散乱損失はセンサ方向の移動距離が1.8mm程度（鉛直方向の移動距離で40mm程度）になった時点で変化が認められた。このように、かぶりコンクリートが剥落した場合には、光ファイバの破断によって検知することが可能であることが確認された。しかし、今回の方法では後方散乱の損失が反応し始める変位が大きいので、剥落に至る前兆を検知することは、現状では難しい。より小さい変位を検知可能とするためには、光ファイバの固定端間隔を短くするなどの工夫が必要であるが、変位の発生位置が予測しにく

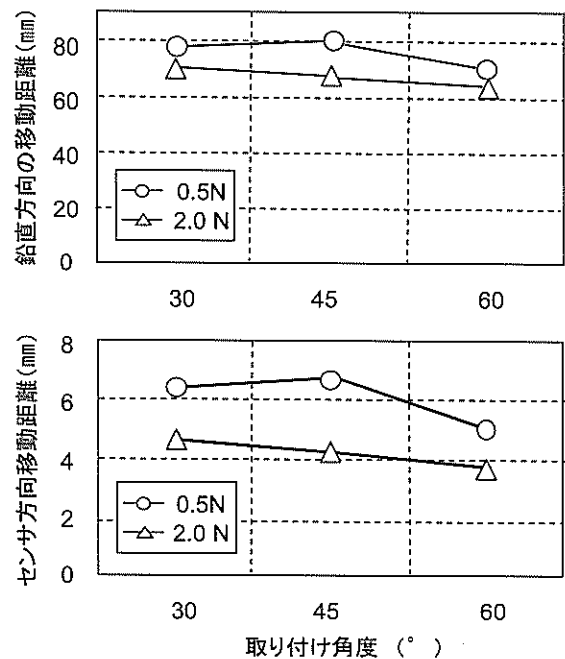


図-5.15 光ファイバの取り付け角度と破断時までの移動距離の関係

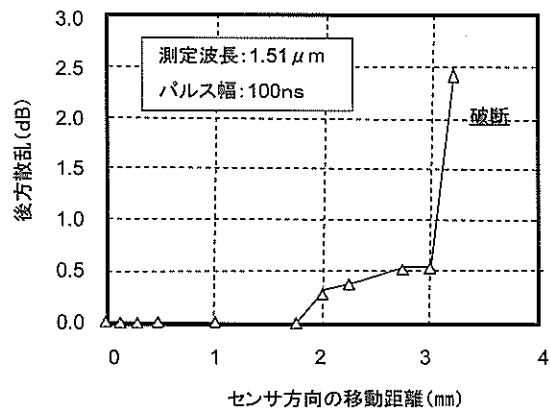


図-5.16 センサ方向の移動距離と後方散乱損失の関係 (取り付け角度45°の場合)

い場合は効率的なモニタリングは不可能である。

5.5 ヘテロコア型のセンサを利用する方法 [5.4]

(1) 本実験の対象としたモニタリング方法の概要

本節で述べる実験におけるモニタリングシステムの概要は図-5.11に示すものと同様である。本実験に用いたOTDRの仕様は表-5.2に示すものと同様である。本実験では、光ファイバの曲げに対するレイリー散乱の変化を

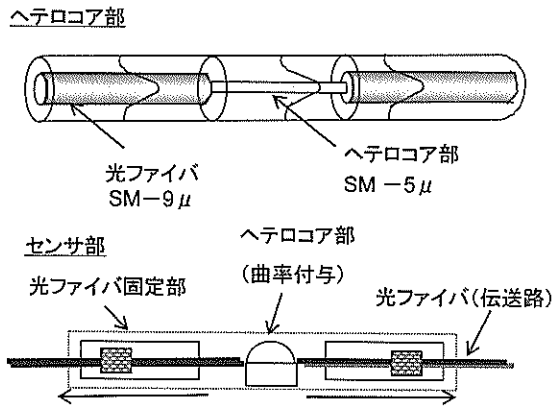


図-5.17 ヘテロコア型センサの概念

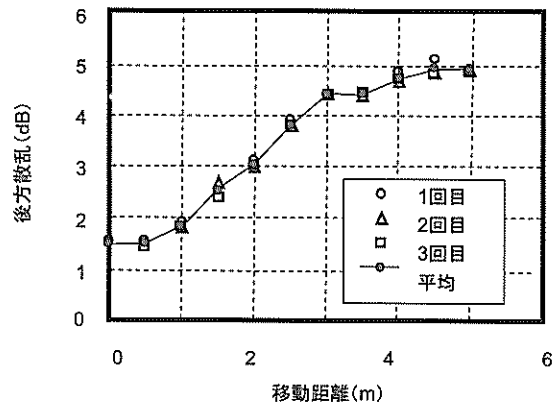


図-19 移動距離と後方散乱損失の関係

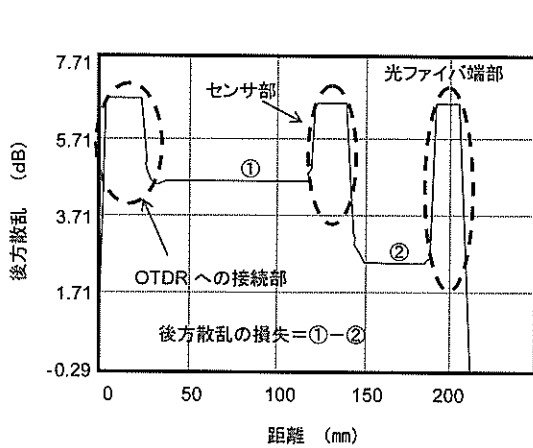


図-5.18 ヘテロコア型センサの測定波形の一例

大きくするために、伝送路（通常の光ファイバ素線）の一部にコア径の異なるヘテロコア部を設けたヘテロコア型センサ[5.6]の適用性を検討した。

(2) ひび割れの検知方法（ヘテロコア型センサ）

図-5.17 にヘテロコア型センサの概念図を示す。ヘテロコア型センサとは、曲げに対する後方散乱が大きくなるように、光ファイバの一部にコア径の異なるヘテロコア部を設けたものである。図-5.18 にヘテロコア型センサを用いた場合の OTDR の測定例を示す。今回使用したヘテロコア型センサは、ヘテロコア部にあらかじめ曲率を与えておき、光ファイバ固定間の移動に伴う曲率変化による後方散乱の損失(図中のセンサを挟む2点間の差)を測定することにより、固定間の移動距離を求めるものである。図-5.19 に移動距離と後方散乱の関係の一例を示す。図に示す関係をあらかじめ把握することにより、ひび割れ検知センサとして利用することが可能となる。ただし、この場合にもひび割れの発生方向と直角にセン

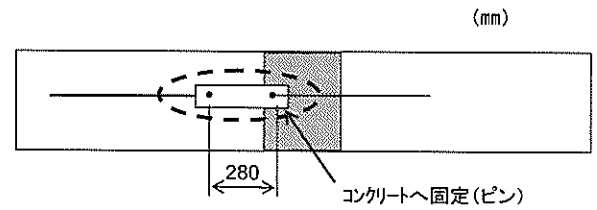


図-5.20 ヘテロコアセンサの配置位置

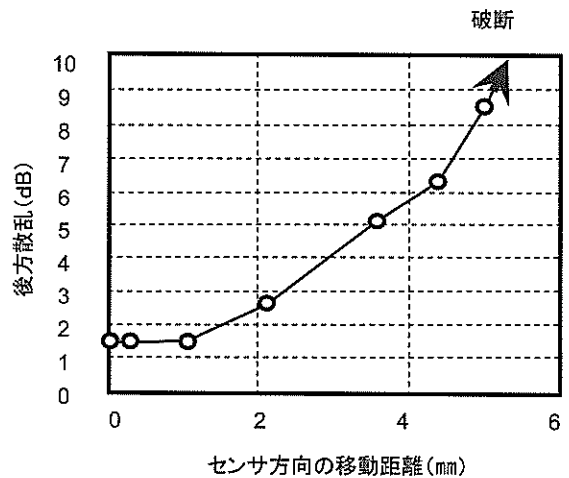


図-5.21 ヘテロコア型センサの後方散乱の損失

サを配置する必要がある。

(3) 剥離・剥落の検知方法

コンクリートの剥離・剥落検知方法としてのヘテロコア型センサの適用性を検討するため、既出の図-5.13 に示すコンクリートの剥落を模擬するためのコンクリートブロックを有する試験体を用いて実験を行った。剥落の模擬はコンクリートブロックをジャッキで移動させることで行った。なお、実験時においては、コンクリート

ブロックの鉛直方向およびセンサ方向の移動距離を同時に測定した。

図-5.20 にセンサの取り付け図を示す。本実験は、センサ取り付け方向と移動方向が直角であるため、コンクリートの変状がセンサに伝わりにくい方向であった。図-5.21 にヘテロコア型センサのセンサ方向の移動距離と後方散乱損失の関係を示す。この関係は、図-5.19 に示した関係と概ね同等の傾向を示しており、変位測定センサとして機能していることが示された。しかし、この場合にもセンサとして機能するのは、鉛直方向の移動距離で20mm程度からであった。この結果は、コンクリートの移動方向に対するセンサの取り付け方法が測定精度に大きな影響を及ぼすことを意味しており、測定精度を高めるための最適な取り付け方法を確立する必要がある。

5.6 特殊センサを利用する方法

(1) 序

本節で述べる実験は、コンクリート構造物におけるひび割れの発生・進展、あるいはコンクリート構造物に生じる比較的大きな変形（数mm程度）の進展などを検出するために工夫した特殊センサの性能を検討するものである。本センサは、図-5.22 に示すように、コンクリート表面の測定対象区間（数m程度、本研究では1m）に生じた変形を機械的に増

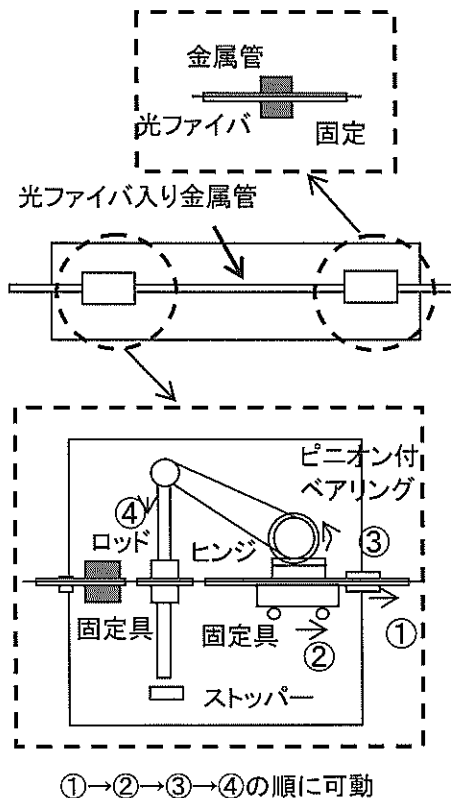


図-5.22 特殊センサの構造概要

幅させることにより、光ファイバに局所的な曲げ変形を生じさせ、その際に生じた光ファイバの透過光損失を前述のOTDR (Optical Time Domain Reflectometer) により測定するものである。なお、OTDRは透過光損失が発生した箇所を特定することが可能であるため、変形が生じた位置を特定することが可能となる。

本節で述べる実験では、上述の特殊センサの開発を行い、本センサの適用性の検討を行ったものである。

(2) 特殊センサの構造

図-5.22 にセンサの構造を示す。強制的（機械的）に光ファイバに局所的な曲げ（ $R < 10\text{mm}$ ）を発生させる構造とした。なお、使用している光ファイバはステンレス管の中を通す特殊なものである。

(3) 実験の概要

センサの精度を確認するため、コンクリートはり試験体にセンサを貼り付け、曲げ载荷試験を行った。表-5.3 に光ファイバセンサの目標検出感度および取り付け位置を示す。図-5.23 に光ファイバセンサ取り付け位置を示す。本センサは、対象とする2点間（間隔1m）に生じた変形をOTDRにより検知する。本センサにおける検出感度は取り付け間隔により変化するが、本実験においては、目標検出感度を取り付け間隔1mに対して1mm程度および0.5mm程度の2種類に設定した。No.1試験体に取りつけたセンサは、はりの2側面の中央部に配置した。この場合、センサの取り付けがはりの中立軸となり、载荷による変形が小さくなったことから、No.2供試体においては可能な限り引張側に設置した。なお、本センサの精度を確認するため、本センサを保護するための鋼製枠より上方に変位計を取り付け、光ファイバセンサの測定対象区間における変形量を測定した。

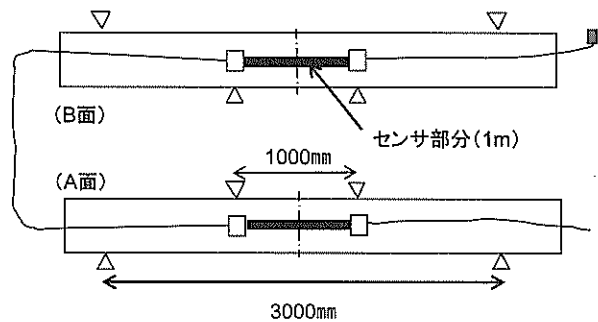


図-5.23 光ファイバセンサの取り付け位置

表-5.3 光ファイバセンサの目標検出感度および取り

| 付け位置 | | | 備考 |
|-----------|--------|-------|--------------------|
| 試験体 番号 | 目標検出感度 | | |
| | A面 | B面 | |
| No.1 | 0.5mm | 1.0mm | はり高さの中央 |
| No.2 | 1.0mm | 0.5mm | はり高さの中央から 30mm下 |

(4) 実験の結果

図-5.24 に No.1 試験体の変位と光損失量の関係を、また、表-5.4 に No.1 および No.2 の試験体において、センサの光損失が発生した時の変形量を示す。なお、計測の際は発光波長 1.31 μm および 1.55 μm の 2 種類を用いた。No.1 供試体において、センサの感度を 0.5mm と設定した場合、光損失が認められた変位は、発光波長 1.31 μm で 1.4mm、発光波長 1.55 μm で 1.2mm であった。一方、No.2 供試体において、センサの感度を 1.0mm と設定した場合、発光波長 1.31 μm では変形量 1.0mm から光損失が認められ、発光波長 1.55 μm では変形量 0.6mm~0.8mm で光損失が認められ、概ね目標検出感度に近い値で光損失が認められた。

以上の結果から、本センサは 1mm 程度の変形であれば検知可能であることが示された。しかしながら、本センサを直列につないで使用する場合には、光源に近い側のセンサに大きな光損失が発生したとき、それより先のセンサの光損失を検知しにくいということも確認された。したがって、本センサを使用して広い範囲にわたって連続的にモニタリングを行う場合には、光ファイバの両端から光損失を計測できるように光ファイバを配置しておく等の対策を行う必要があると考られる。

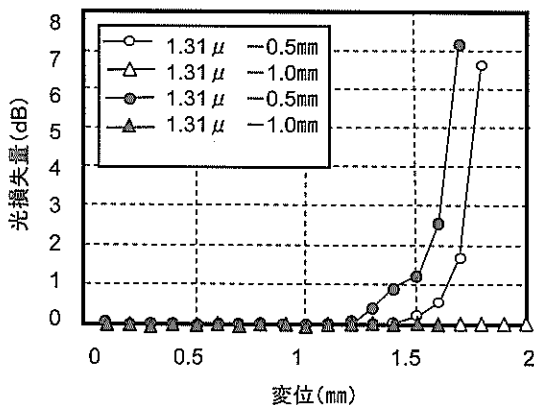


図-5.24 供試体の変位と光損失量の関係
(供試体 No. 1 の結果)

表-5.4 光損失が発生した変形量

| | | | 波長 (μm) | |
|-------|----|--------|----------------------|------|
| | | | 1.31 | 1.55 |
| No. 1 | A面 | 0.5 mm | 1.4 | 1.2 |
| | B面 | 1.0 mm | --- | --- |
| No. 2 | A面 | 1.0 mm | 1.0 | 0.8 |
| | B面 | 0.5 mm | 1.0 | 0.6 |

5.7 総括

本節で述べた実験は、光ファイバの変形に伴う光損失を情報とするための試みである。コンクリートの変形と光ファイバの変形をどのように関係づけるかが技術開発のポイントであった。5.5 で述べたヘテロコア型センサはすでに確立された方法であり、かなり完成度が高いと言える。しかし、ヘテロコア型センサの場合、直列利用の限界が約 5 個程度であり、長距離センシングという光ファイバの長所を十分に生かすことができない。5.6 で述べた特殊センサもさほど複雑な構造ではなく、十分に実用化の可能性があると言える。光ファイバの長距離センシングという利点を生かすことを最大の目標として試みたのが、5.4 に示す方法であるが、検知の精度を十分に得ることはできなかった。本節で述べた幾つかの方法は、いずれの方法も一長一短があり、適用対象に応じてさらに技術の改良を加えて用いていく必要がある。

6. 光ファイバによるひずみ計測結果を利用する方法 [6.1]

6.1 序節

本節で述べる実験では、長距離にわたる 1 本の光ファイバの部分的な変形 (ひずみ) を検知することのできる BOTDR (Brillouin Optical-Fiber Time Domain Reflectometer) [6.2] をコンクリートのモニタリングに適用する際の適用性を検討することを目的としている。

6.2 BOTDRの簡潔な説明

光ファイバ組織の屈折率は、ミクロな範囲で見ると大きくばらついているために、入射光の散乱光が発生する (図-6.1 参照)。この散乱光のうち、入射光とは逆方向に進む光が後方散乱光と呼ばれるものである。BOTDR は後方散乱光の中でひずみ量に比例して変化するブリルアン散乱光を利用するものである。ブリルアン散乱光の周波数は入射光の周波数からずれる (ブリルアン周波数シフト ν_B と呼ぶ) 性質があり、このブリルアン周波数の変化量がひずみ量と比例することを利用してひずみを検出する方法である。

この方法の大きな長所として、広い範囲の一部分で発生する変形 (ひずみ) を、1 本の光ファイバで測定することができるということが挙げられる。一方、短所とし

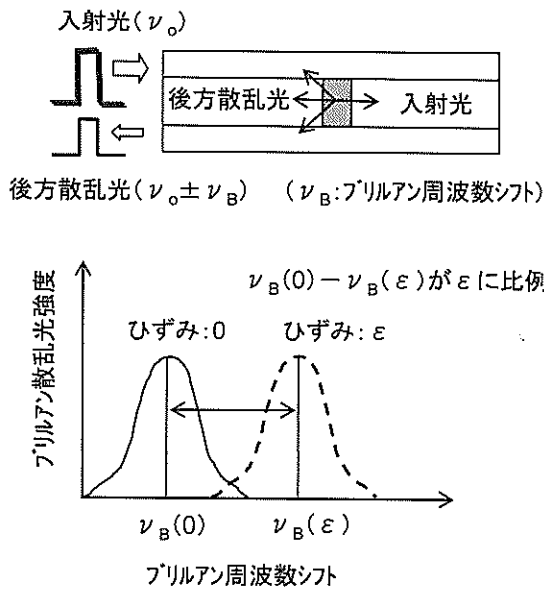


図-6.1 BOTDR を用いたひずみ測定の原理

ては、1) 測定原理上動的な変化を捉えられない、2) 測定されるひずみは単位長さあたりの歪みの平均値となり、極めて局所的な変形を捉えることはできない、といった点がある。1) に関しては、特に大きく問題となることはないが、2) に関しては、機器の有する測定精度でモニタリング可能な事象に対してのみ適用が可能となる。

6.3 BOTDRの適用性を検討する実験

(1) 実験概要

本実験では、鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験を行った。

本実験で用いた光ファイバの構造は、図-6.2 に示すように多層構造になっている。実際に光が通過するのは一番中心のコアの部分であり、BOTDR で測定されるのはこの部分の変形である。既往の研究[6.3]では光ファイバの素線をそのまま取り付けているが、より精度良く変形を計測するためには、光ファイバ中のコアの部分

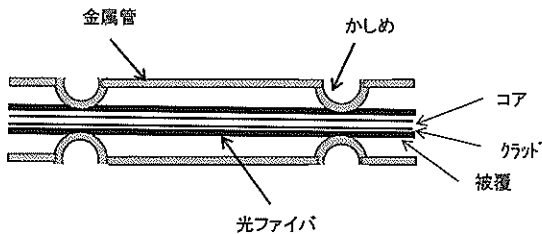


図-6.2 かしめを与えた光ファイバセンサの構造

一な緊張状態にしておく効果的である。そこで図-6.2 に示すように金属管中に光ファイバを通し、引張ひずみ(0.3%)を与えた状態で金属管を外から「かしめ」ることにより、光ファイバの素線にプレテンションを与えた。また、コンクリート表面に取りつける際においても、プレテンションを与えた状態で光ファイバを表面に固定し、さらにエポキシ樹脂で金属管およびコンクリート部分を接着した(図-6.3参照)。

図-6.3 に示すコンクリートはり(250×250×3500mm)に対して、三等分点載荷により曲げ載荷を行った。コンクリートのW/Cは55.5%であり、材齢7日での圧縮強度は26.4N/mm²であった。BOTDRによるひずみ測定の測定精度は±0.003%であり、距離分解能は1m、すなわち測定されるひずみは光ファイバ1mあたりにおける平均値に相当する。ひずみ測定用の光ファイバセンサはコンクリート表面の圧縮および引張鉄筋位置に取りつけた。「かしめ」は1m間隔で付与し、はりの中心にかしめの中点が位置するように設置した。なお、1回のひずみ測定には10数分かかるため、その際は載荷保持の状態とした。

また、BOTDRを用いて測定したひずみの精度を確認するため、コンクリート表面の水平変位(引張・圧縮)、コンクリート中の鉄筋ひずみ(引張側のみ)、コンクリートひずみ(圧縮側のみ)の測定を併せて行った。なお、

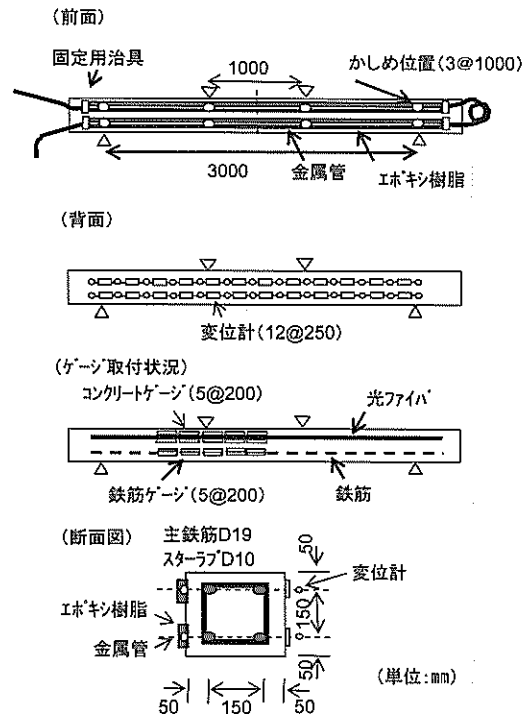


図-6.3 曲げ載荷試験方法の概要

水平変位の値は、光ファイバによる測定値との比較を行うため、変位計4個分の合計の変位を1000mmで除すことで1m当たりのひずみに変換した。この値を以下では「平均ひずみ」と呼ぶ。また、鉄筋ひずみは鉄筋上側と下側の2点で測定した。コンクリートひずみは光ファイバをはさんで上側・下側の2点で測定しており、比較の際はその平均値を用いた。

(2) 実験結果

図-6.4 に鉛直変位に対する荷重およびはり中央での引張ひずみの変化を示す。BOTDR による測定値は、鉄筋が降伏する(荷重 70kN 程度)頃までは、鉄筋ゲージによる測定値や平均ひずみの値と良く一致していた。降伏後はやや値が異なっているが、これは変形が局所的になったため、1m 平均でしか測定が行えない BOTDR では平均化されたひずみを測定した結果、誤差が大きくなったものと考えられる。

図-6.5 に鉛直変位に対する荷重およびはり中央での圧縮ひずみの変化を示す。引張ひずみの場合と同様に、BOTDR による測定値は鉄筋が降伏する(荷重 70kN 程度)頃までは鉄筋ゲージによる測定値や平均ひずみの値と良く一致していた。また、降伏後はやや値が異なる傾向と

なった。

図-6.6 に荷重毎の引張および圧縮ひずみの分布を示す。荷重 22.7kN および 49.9kN の時において、はり中央における鉄筋ひずみと BOTDR によるひずみの値は非常に良く一致していた。これは、中央部 1m の区間が等曲げ区間であり、鉄筋ひずみの分布が中央部において均一となっているためであると考えられる。一方、荷重 11.0kN および 69.8kN の時において、はり中央における鉄筋ひずみと BOTDR によるひずみの値はやや異なっている。これは、鉄筋ひずみの分布が不均一となっているためであると考えられる。しかし、全体としてひずみ分布の傾向はよく一致していた。

圧縮ひずみにおいては、各荷重段階においてはり中央部におけるコンクリートひずみの分布が比較的均一であり、その結果としてはり中央におけるコンクリートひずみと BOTDR によるひずみの値は良く一致していた。

本実験においては、金属管中に光ファイバを通しかしめにより光ファイバの素線にプレテンションを与えた工夫が、BOTDR によるひずみ計測結果に高い精度を付与することになったものと考えられる。

6.4 総括

曲げに伴うコンクリートの圧縮・引張変形に対して、BOTDR を用いる方法は良い精度でひずみを測定できることが確認された。港湾構造物を対象とした場合、栈橋上部工コンクリートにおけるはりやスラブのような曲げ部材における変形状況のモニタリングは可能であると考えられる。しかし、センサの取付方法を含めて、厳しい環境条件下での施工方法を確立することが課題である。また、センサの耐久性に関しては、かしめ用の金属管については高耐久性のものを使用すれば問題ないが、これをコンクリート表面に固定する場合に用いるエポキシ樹脂の耐久性について検討する必要がある。

また、その他の構造物を対象として考えた場合、広い範囲において、面的ではなく線的にモニタリングを行い、異状箇所を絞り込む必要性のある構造物が最適であると考えられる。該当するものとしては、地盤沈下に伴うコンクリート構造物の変形モニタリング等が考えられる。この例としては、人工島(空港)や、地下共同溝、舗装等

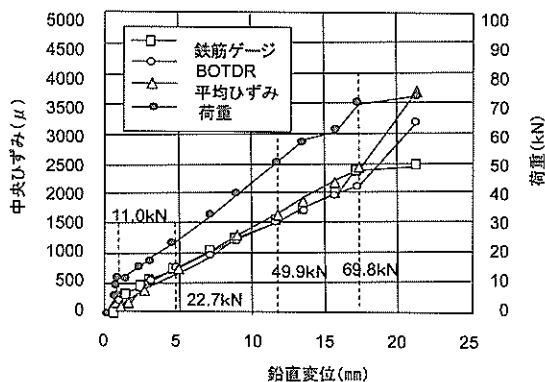


図-6.4 はり中央での引張ひずみの変化

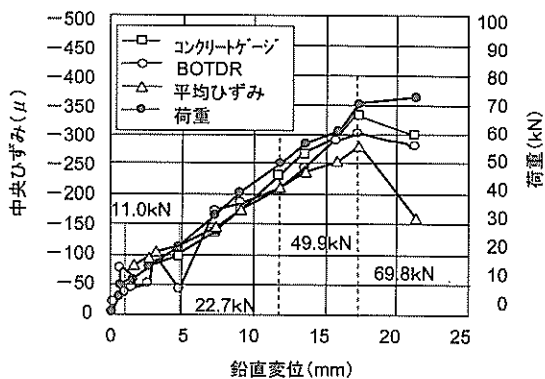
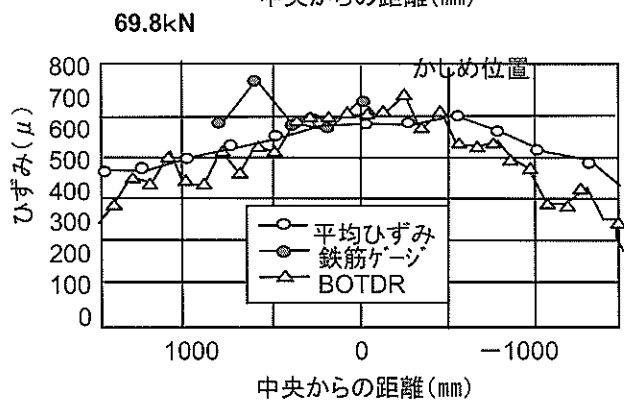
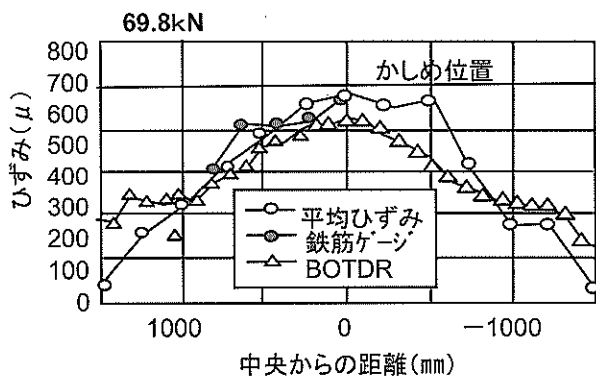
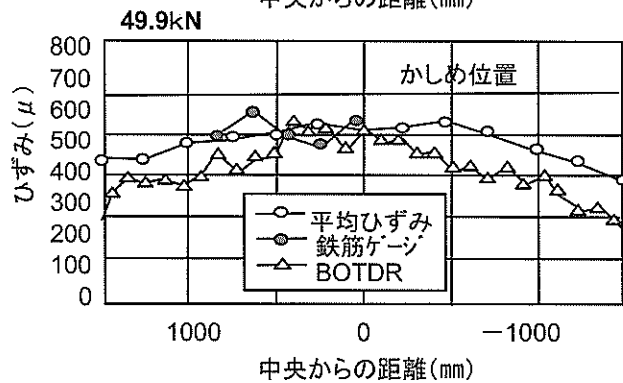
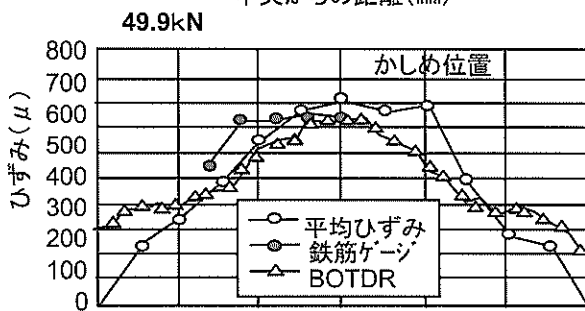
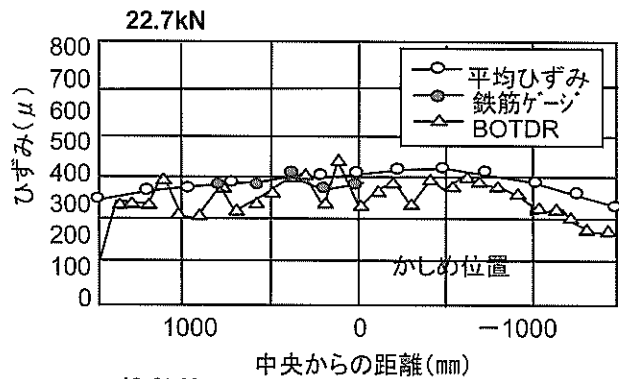
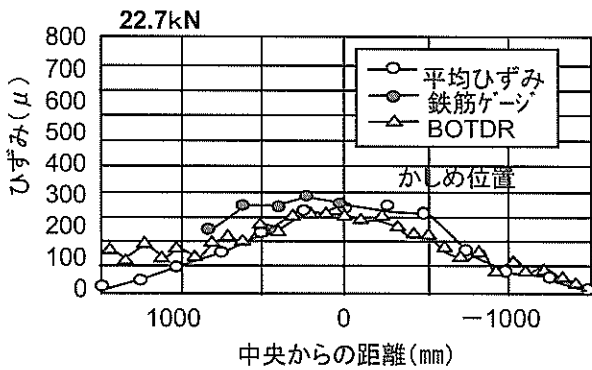
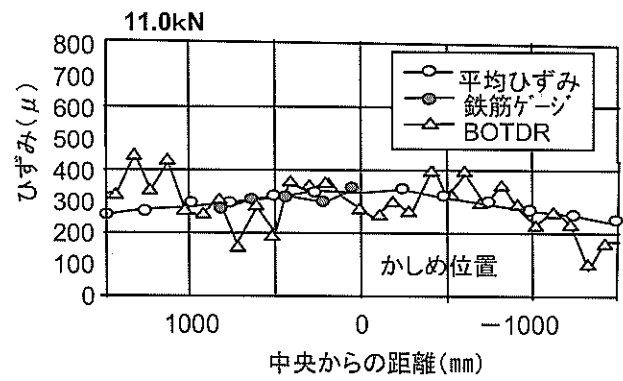
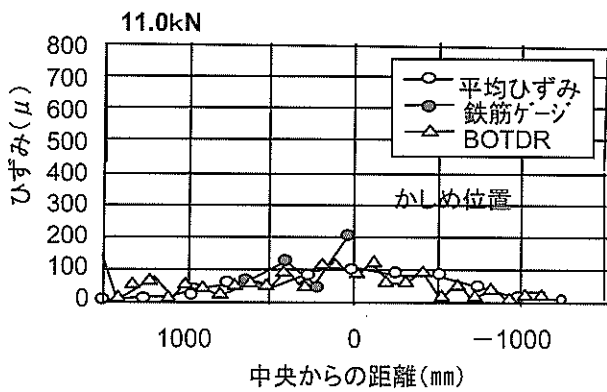


図-6.5 はり中央での圧縮ひずみの変化



(引張)

(圧縮)

図-6.6 各荷重時における引張ひずみおよび圧縮ひずみの分布状況

が考えられる。本技術を応用できる対象は多い。

7. 本研究の総括および今後の研究の方向

7.1 光ファイバ利用のグレード

6章までに光ファイバをモニタリングセンサ用材料として利用する3つの方法について、実験的検討の結果をまとめた。光学的技術のレベルをおおまかにグレード分けして示すと、表-7.1のようになる。光学的に最も高度な技術はBOTDRである。BOTDRよりは光学的技術としては簡易であるが、OTDRも優れた技術であり、光パワーメータを利用する方法は最も簡易な方法と位置づけられる。また、視点を変えると、BOTDRを利用する方法はひずみデータを継続的に収集することから「数値モニタリング」に分類される。一方、OTDRを利用する方法と光パワーメータを利用する方法は「ON-OFFモニタリング」に分類される。なお、広い範囲のある部分で生じた異状の場所を特定できるのはBOTDRとOTDRである。

BOTDRの技術を実用化するためには、ファイバをコンクリートと一体化すると同時にファイバを強化する技術が必要である。この技術はこれまでに他研究機関において幾つかの成果が挙げられている。逆に、OTDRや光パワーメータを用いる技術を実用化する方向はむしろファイバを弱くする方向である。本報告でまとめた実験は後者に比重が置かれている。両方法とも各々特徴があり、適材適所で適切に用いていく必要がある。

表-7.1 光学技術のグレード分け

| | 光学機器の種類 | モニタリングのコンセプト |
|-------|----------------|---------------|
| グレード1 | BOTDRを利用する方法 | 数値モニタリング |
| グレード2 | OTDRを利用する方法 | ON-OFFのモニタリング |
| グレード3 | 光パワーメータを利用する方法 | |

7.2 コンクリートの変状のサイズとセンサの使い分け

本報告の冒頭から繰り返し記してきたとおり、本研究はコンクリートの典型的な変状である、ひび割れ、剥離・剥落をうまく検知する技術の開発を目標とした。表-7.2にコンクリートの変状のサイズとセンシング技術の対応関係を示す。なお、この対応は筆者等の創作であり、確実にオーソライズされている訳ではない。コンクリートの変状のサイズが0.3mmよりも小さい場合はBOTDRを利用したひずみ計測が適しているものと思われる。変状のサイズが1.0mmよりも大きい場合は、破断型のセンサで検知

することができる。しかし、技術的に埋めることが難しいのが、中間的サイズの0.3~1.0mmであった。この領域のサイズの変状に対しては本研究の中で考案したセンサ（例えば、4.5節参照）が適用され得る。

表-7.2 コンクリートの変状のサイズと適用し得るセンサの種類

| コンクリートの変状のサイズ | 適用できるセンサの種類 |
|---------------|-----------------|
| ~ 0.3mm | BOTDRを利用したひずみ計測 |
| 0.3mm ~ 1.0mm | 本研究で開発したセンサ |
| 1.0mm ~ | 破断型センサ |

7.3 今後の研究の方向（モニタリングからフェールセーフへ）

本研究は、計画段階より一貫して“モニタリング技術”の確立を謳って実施してきた。図-7.1にモニタリングに関する二つの考え方を示す。一つは、モニタリングを実施する際に高価な機器類を用いる方法であり、この方法は比較的短期間の計測を実施することになる。もう一つは、モニタリングを実施する際は高価な機器を使用することなく長期間計測を継続する方法である。本研究では、後者に分類される技術を志向して実験を行ってきた。これまで、モニタリングという用語で両者の技術をまとめてきたが、後者はむしろ“フェールセーフ”という考え方[7.1]に近い。この場合、「安全」をモニタリングしていることになり、何らかの理由により「安全」が損なわれた時に、そのことを我々に知らせてくれることになる。本文で述べた研究は、この考え方に沿ったものであり、今後はこの方向の技術開発をさらに進めていきたいと考えている。

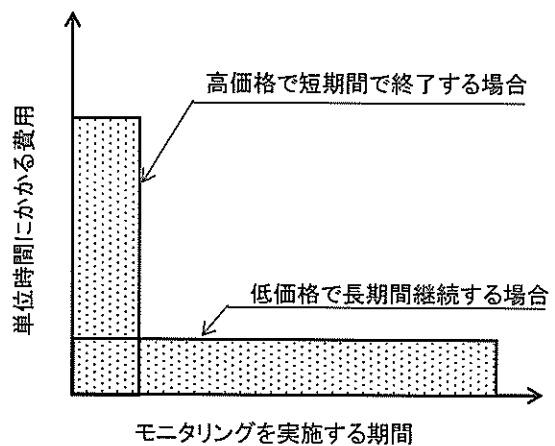


図-7.1 モニタリングに関する二つの考え方

8. おわりに

8.1 当初目標に対する達成度

本文で述べた一連の研究は、平成10年度より13年度にかけて実施した特別研究「知能化材料を用いたHQMS（ハイクオリティ・モニタリングシステム）の開発による港湾構造物の信頼性向上に関する研究」を起点として実施したものである。当初、目標とする研究項目を5項目掲げた。その項目を表-8.1に示す。また、同表に各項目に対する研究の分配率、および個々の項目ごとの達成率の目安を100%に対して示している。研究資源の70%を項目1「知能化材料を用いたセンシング材料の開発」に対して投じた。表中に示した達成度はあくまで筆者等の自己評価である。項目3および項目4については、概ね既存の技術で対応できていると考えている。一方、項目1と項目2は新たに技術開発が求められていることから、もう少しの努力が必要であると考えている。最終的目標である項目5「港湾構造物のモニタリングシステムの構築」の達成度は未だ70%と判断している。

本文を取りまとめる時点において、本研究は完全に終了している訳ではないことを明記する。

表-8.1 本研究の当初目標および達成度の自己評価

| 項目 | 分配率 | 技術としての完成度 |
|--------------------------------|-----|----------------------------|
| 1. 知能化材料を用いたセンシング技術の開発 | 70% | 85% : 概ね確立、さらなる改良が必要 |
| 2. センサの耐久性向上技術に関する検討 | 15% | 70% : さらなる耐久性試験が必要 |
| 3. コンピュータを用いた情報処理方法の検討 | 5% | 95% : 既存の技術の応用+軽微な技術開発、で対応 |
| 4. センサからコンピュータへの情報伝送システムに関する検討 | 5% | 95% : 既存の技術で十分対応可能 |
| 5. 港湾構造物のモニタリングシステムの構築 | 5% | 70% : 青写真は確立、現場試験などが今後必要 |

8.2 本研究より得られた結論

前節で示したとおり、研究は完結できている訳ではないが、本文で取りまとめた一連の研究より得られた結論を以下に総括する。

(1) 光ファイバの破断を情報として利用する方法について

1) ひび割れの発生を光ファイバの破断によって検知しようとした場合、光ファイバとコンクリートの一体化に用いる埋込材料は付着特性に優れた材料が有利である。

2) ひび割れに対して角度を付けて光ファイバを配置することにより光ファイバの破断するひび割れ幅が小さくなる。したがって、ひび割れの発生方向が予想できる場合、角度を付ける方法は有効である。

3) 光ファイバのコーティングを除去することができれば、コンクリート表面のひび割れ発生とほぼ同時にファイバを破断させることが可能となる。しかし、コーティングの除去は実験室的には可能であったが、実構造物への適用は難しい。

4) 光ファイバを素線のままでセンサとしての機能を持たせるためには、変状の動く方向と光ファイバのなす角度が重要となる。すなわち、光ファイバをひび割れとほぼ平行に貼付し、せん断力を作用させる方法は有効な方法である。

(2) 光ファイバの透過光損失を情報として利用する方法について

1) ヘテロコア型センサはすでに確立された方法であり、完成度は高い。しかし、直列利用の限界が約5個程度であり、長距離センシングという光ファイバの長所を十分に生かすことは難しい。

2) 特殊センサ(5.6節)も複雑な構造ではなく、十分に実用化の可能性を有する。

(3) 光ファイバによるひずみ計測結果を情報として利用する方法について

1) 曲げに伴うコンクリートの圧縮・引張変形に対して、BOTDRを用いる方法は良い精度で測定することができる。

2) 港湾構造物を対象とした場合、センサの取付方法など、厳しい環境条件下での施工方法を確立することが課題である。

3) BOTDRを利用する方法は、広い範囲において、面的ではなく線的にモニタリングを行い、異状箇所を絞り込む必要性のある構造物に適している。

参考文献

- [2.1] 福田武人・逢坂勝彦・北出真太郎, 光ファイバによる CFRP 積層板の内部ひずみの測定およびクラックの検出, 材料, 第42巻, 第474号, pp. 269~275, 1993.3
- [2.2] 北出真太郎・福田武人・逢坂勝彦, FRP 積層板の層間せん断強度に及ぼす埋め込み光ファイバの影響, 材料, 第43巻, 第486号, pp. 283~289, 1994.3
- [2.3] 北出真太郎・福田武人・逢坂勝彦, 光ファイバを用いた FRP 積層板の衝撃損傷検出試験, 材料, 第

- 4 4 卷, 第 5 0 4 号, pp. 1196~1200, 1995. 9
- [2. 4] L. Vulliet, N. Cassanova, D. Inaudi, A. Osa-Wyser and S. Vurpillot: Development and Laboratory tests of deformation fiber optic sensors for civil engineering applications, International Symposium on Lasers, Optics and Vision for Productivity in Manufacturing, Europto Series, Besancon, 10-14 June 1996
- [2. 5] D. Inaudi, N. Casanova, P. Kronenberg and S. Vurpillot: Railway bridge monitoring during construction and sliding, Smart Structures and Materials, San Diego February 1997
- [2. 6] 江川幸一: 知的 (スマート) 材料・構造, 日本機械学会誌, Vol. 99, No. 929
- [2. 7] 高橋淳: 光ファイバによる構造体の損傷モニタリング, 光センシング技術の最新資料集, オプトニクス社, pp. 402 - 406, 平成10年12月
- [3. 1] 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
- [3. 2] 高橋淳, 津田浩ほか: 光ファイバの基礎強度特性, 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演概要集 (II), pp. 98-99, 1998. 4
- [4. 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
- [4. 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
- [4. 3] 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
- [4. 4] 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
- [4. 5] 濱田秀則・山路徹・小牟禮建一・早川健司: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 26, No. 1, 2004
- [5. 1] 高橋 淳・野村正人・津田浩ほか: ループ型光ファイバセンサの基礎光学特性, 日本材料学会第 2 6 回FRPシンポジウム講演論文集, pp. 124~127, 1997. 3
- [5. 2] 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
- [5. 3] 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
- [5. 4] 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
- [5. 5] 高橋淳, 津田浩, 武田真一, 野村正人, 剣持潔, 福田博: 光ファイバの基礎強度特性, 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演概要集 (II), pp. 98-99, 1998. 4
- [5. 6] 渡辺一弘, 松原茂明, 久保田諱: OTDRを用いたヘテロコア型センサ, 自動計測学会論文集, Vol. 35, NO. 1, 1999
- [6. 1] 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
- [6. 2] 安藤電気(株): 光周波数変換技術とコヒーレント検波技術を用いた光ファイバ歪/損失測定器の開発, ANDO TECHNICAL JOURNAL, pp. 17-22, 1996. 10
- [6. 3] 例えば, 松崎謙太郎, 勝木太, 矢島哲司: 光ファイバを用いたコンクリート構造物のひずみ管理に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 637-642, 2001
- [7. 1] 例えば, 平野敏右編, 安全の目盛, コロナ社, 1991 年

謝 辞

本文で述べた一連の研究は, 平成10年度より13年度にかけて実施した特別研究「知能化材料を用いたHQMS (ハイクオリティ・モニタリングシステム) の開発による港湾構造物の信頼性

向上に関する研究」を起点として実施したものである。予算要求、研究の実施、結果の取りまとめに至る過程の中で本当に多くの方のお世話になりました。

井上興治元運輸省港湾技術研究所所長、稲富隆昌元運輸省港湾技術研究所構造部部长（故人）、福手勤元運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室室長、には予算申請の段階から貴重なご指導を賜りました。

運輸省港湾技術研究所時代の材料研究室研修生の早川健司氏、伊藤正憲氏（東急建設（株）技術研究所）には、実験のすべての段階でご協力いただきました。事実、本研究の一部は、お二人との連名で对外発表を行ってきています。早川氏、伊藤氏のご協力抜きには、本資料もあり得ません。改めてお二人のご協力に対して、感謝の意を表します。

渡邊弘子元材料研究室受託研究員、伊藤誠氏（東急建設技術研究所）、山下裕康氏（東京測器研究所）、三栖幸彦氏（元東京都立大学大学院博士課程）、小牟礼建一氏（ショーボンド建設株式会社・元材料研究室客員研究員）、渡辺一弘創価大学教授、桑原義男氏（インターアクション株式会社）高橋功氏（インターアクション株式会社）、山崎兼之氏（第一高周波工業株式会社）、検見崎千浩氏（第一高周波工業株式会社）、田畑和文氏（日鉄溶接工業株式会社）、浜辺忠氏（元安藤電気株式会社）、他多くの方々のご協力を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

港湾空港技術研究所資料 No. 1092

2004. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。