

光ファイバーセンサーを用いた PC 構造物のひび割れ検知技術

今井 道男^{*1}・一宮 利通^{*2}・河野 哲也^{*3}・三浦 悟^{*4}

1. はじめに

近年、経済的・環境的負荷低減の観点からも、社会基盤構造物などの継続使用安全性を確認するための構造ヘルスマニタリング技術の開発が盛んである。構造ヘルスマニタリングは、人的な関与を極力避け、構造物に付与したセンシング機能による損傷劣化や構造変化の検出を通じて、その性能評価と予測を自動的かつ継続的に実現するもの、と広く認識されている。その中核を成すのは、ひずみや変位、加速度といった物理量変化を計測するためのさまざまなセンシング技術であり、目視を含めた従来までの非破壊検査技術に代わる技術が研究開発されている。なかでも、小型軽量で長寿命、長距離伝送可能などの特長をもつ光ファイバーひずみセンサーは、こうした構造ヘルスマニタリングに最適なセンサーの一つである。

一方、発展のめざましい高性能・高機能コンクリート構造物においては、その設計検証や性能維持、また継続的な研究開発のためにも、モニタリングの必要性が従来よりも高いといえる。たとえば、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)構造物については、使用性に関する照査において、発生応力度が設計ひび割れ発生強度を下回ることをとしている²⁾。そのため、ひび割れのモニタリングが重要な対象物の一つである。しかし、ひび割れ時に繊維が架橋することから、発生するひび割れは非常に微小なものであるため、高性能な検知技術が必要である。

筆者らは、BOCDA方式(ブリルアン光相関領域解析法)の光ファイバーひずみセンサーによって、UFC表面に発生する目視レベル以下の微小なひび割れが検知できることを確認した。さらに、実PC橋への適用を図ったので、報告する。

2. 光ファイバーセンサー

2.1 誘導ブリルアン散乱

光ファイバー内で生じるブリルアン散乱光は、入射光とのあいだの周波数差(ブリルアン周波数シフト)がひずみに依存することが知られている。たとえば、光ファイバーにパルス光を入射すれば、反射したブリルアン散乱光の帰還時間から位置を、散乱光の周波数からその位置のひずみを、それぞれ計測できる(図-1(a))。この方法はBOTDR方式(ブリルアン光時間領域反射法)と呼ばれ、

河川堤防や斜面などのモニタリングに幅広く活用されている³⁾。光ファイバーに沿った連続的なひずみ変化を分布的に計測できる稀有な手段であるが、その位置分解性能は入射するパルス幅に依存し、原理的限界は約1mである。その欠点を補うために、ブリルアン散乱を誘導する方法が研究されている。

誘導ブリルアン散乱によれば、二つの対向する光の周波数差がその位置のブリルアン周波数シフトに等しい場合に、低周波側の光が増幅される。もし、連続光とパルス光を対向させれば、パルス光の到達時間から位置を、二つの光の周波数差を掃引すれば最大受光時の周波数差からその位置のひずみを、それぞれ計測できる。この場合も、位置分解性能はパルス幅に依存するが、パルス形状の改良などによって、位置分解性能をサブメートル以下にすることも可能である。BOCDA方式も誘導ブリルアン散乱を利用した方式の一つである。しかし、周波数変調された二つの連続光を対向させることで、局所的にブリルアン散乱を誘導させる点が特徴的である(図-1(b))。

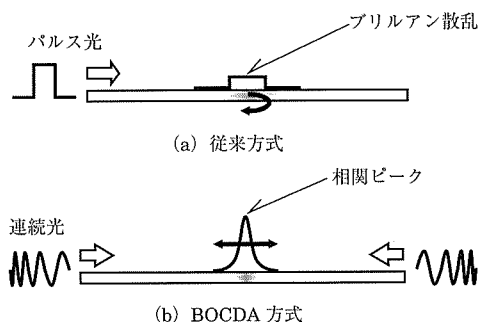


図-1 ブリルアン散乱の発生

2.2 BOCDA方式

BOCDA方式では、単側波帯振幅変調器(SSB)などによって変調されたあらかじめ周波数の異なる二つの光(プローブ光、ポンプ光)を対向させ、共通の光源の発振周波数を周波数変調することで、任意の位置に局所的な相関ピークを発生させる。相関ピークでは、つねに両者の周波数差は一定である。この状態で、光の周波数差を掃引すると、その差が相関ピーク位置のブリルアン周波数シフトと一致した場合にプローブ光が増幅され、最大の受光量を示す。これは、相関ピーク以外の位置では、両者の周波数差が一

^{*1} Michio IMAI : 鹿島建設(株) 技術研究所 先端・メカトロニクスグループ 主任研究員

^{*2} Toshimichi ICHINOMIYA : 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 上席研究員

^{*3} Tetsuya KONO : 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 主任研究員

^{*4} Satoru MIURA : 鹿島建設(株) 技術研究所 先端・メカトロニクスグループ グループ長

定ではないために誘導ブリルアン散乱現象が抑圧されるからである。このため、相関ピーク位置のひずみだけを選択的に計測できる。また、光源の発振周波数を変更すれば、相関ピークの位置を自在に移動することが可能となり、光ファイバーに沿って連続的なひずみ分布を計測できる。図-2に、本方式のシステム構成を示す^{4, 5)}。

ひび割れのように、発生箇所を事前に特定できないような計測対象については、ブリルアン散乱を利用したセンサーがきわめて有効である。また、BOCDA方式によれば、発信周波数によって数10mm程度の高い位置分解性能でひずみを計測できるため、微小なひび割れの検知可能性がある。

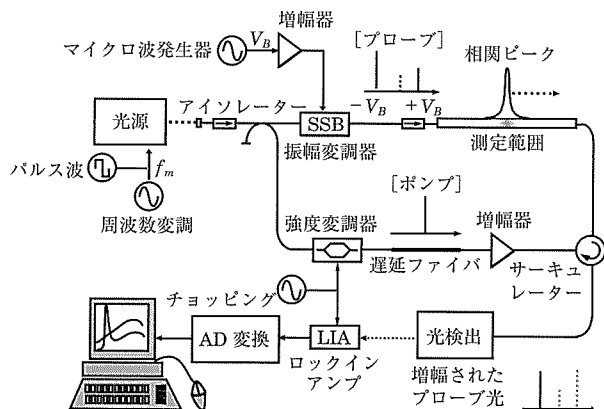


図-2 システム構成

3. ひび割れ幅の同定

3.1 光ファイバーひずみ計測結果への影響因子

光ファイバーセンサーによるひずみ計測結果は、対象物自体に生じているひずみと比べて鈍化したものとなる。このとき、対象物からの応力伝達効率が高いほど、ひび割れ部の光ファイバーに大きなひずみが生じる。その結果、光ファイバーを破断させてしまうおそれがあるため、いくらかの応力伝達の鈍化は必要である。これとは逆に、ひずみ計測結果から、対象物のひび割れ幅を推定するためには、両者の関係を把握する必要がある。ここでは、その影響因子を以下の二つに分けて考えた。

- ・ 緩衝材の影響：対象物表面とセンサー感知部（光ファイバー内コア部）のあいだには、光ファイバーの被覆材料や接着剤が媒介している。これらが緩衝材として機能していると考えられるため、有限要素法を用いてセンサー感知部に伝達されるひずみ分布 ($S_{fiber}(z)$) を解析する。
- ・ 位置分解性能の影響：かぎられた位置分解性能を有することにより、ひずみ計測結果の鈍化は避けられない。BOCDA方式が、位置分解性能の範囲内でガウス関数であらわされる信号感度分布をもつと仮定し、実際に得られるであろうひずみ分布 ($S_{meas}(z)$) を推定する。

3.2 緩衝材の影響

コンクリートのひび割れ発生部をモデル化した二次元有

限要素法モデルを図-3に示す。コンクリート要素と光ファイバー要素のあいだには、光ファイバー被覆と接着剤を模した緩衝材要素が配置されている。各物性値には、既往研究などの値を参照した⁶⁾。コンクリート左端部を境界条件として、光ファイバー左端部にひび割れ幅の半分の変位を与えることで、ひび割れ発生時のひずみ分布を解析した。

ひび割れ幅を変化させた場合の解析結果を、図-4に示す。今回の解析では、目視レベル以下程度のひび割れを対象としている。そのため、2~40μmまでのひび割れ幅で解析し、その範囲内で緩衝材ははく離を生じず、弾性域内と仮定した。光ファイバー上のひずみ分布は、ひび割れ中心を最大値とするピーク関数を示し、ひび割れ幅の増大に比例して、その最大値も増加している。

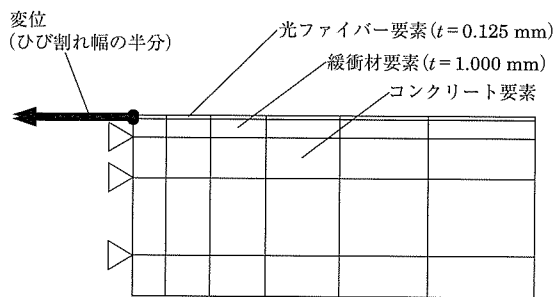


図-3 有限要素モデル（一部）

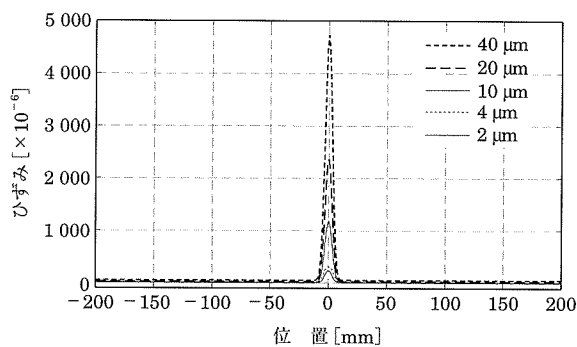


図-4 ひずみ分布

3.3 位置分解性能の影響

位置分解性能は、分布型ひずみセンサーの性能を規定する重要なパラメーターの一つであり、通常単位は長さであらわされる。位置分解性能が高い（狭い）センサーでは、ひずみ変化に対して、その位置をより詳細に同定できる。一方、位置分解性能が低い（広い）センサーでは、隣り合うひずみ変化を区別できない場合がある。BOCDA方式はその高い位置分解性能が特長であるものの、計測されるひずみは、その位置分解性能の範囲全体のひずみ変化から影響を受ける。その信号検知感度が汎用的なガウス関数で分布していると仮定すれば、得られるひずみ分布は、以下の式であらわすことができる。ここで、ガウス関数の標準偏差は、位置分解性能 (Δz) の半分と仮定した。

$$S_{meas.}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{fiber}(l) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\Delta z}{2}\right)} \exp\left[-\frac{(l-z)^2}{2\left(\frac{\Delta z}{2}\right)^2}\right] dl \quad (1)$$

(1) 式で得られたひずみ分布を、図 - 5 に示す。図 - 4 と同様に、ひび割れ中心を最大値としたピーク関数であるが、小さなひび割れの場合においても、その影響範囲は± 20 ~ 30 mm にわたる。現状の BOCDA 方式の精度を鑑みれば、10 ~ 20 μm 程度のひび割れであれば検知可能と考えられる。

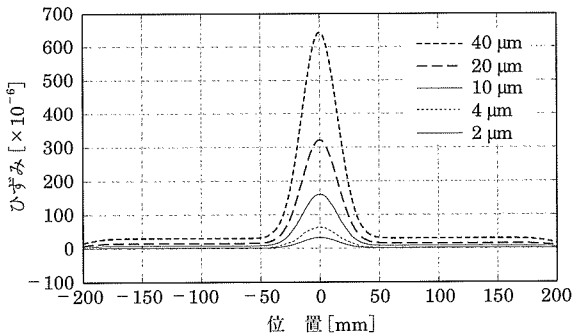


図 - 5 ひずみ分布

4. Aft 系 UFC 梁の曲げ試験

4.1 試験体の構成

BOCDA 方式による微小なひび割れ検知を目的に、超高強度繊維補強コンクリート PC 梁部材の 4 点曲げ試験を行った。図 - 6 に示すように、3 本の PC 鋼線によりプレストレスが導入された試験体を製作し、試験体下端面に光ファイバーをエポキシ樹脂により全面接着した。

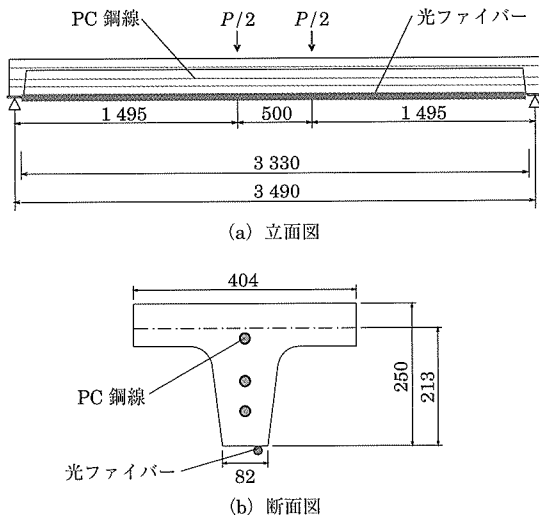


図 - 6 超高強度繊維補強コンクリート試験体

試験体は、エトリンガイト生成系超高強度繊維補強コンクリート (Aft 系 UFC) 製である。Aft 系 UFC は、エトリンガイトの生成とボズラン材の活性により緻密な硬化体となり、超高強度を達成している。また、長さの異なる 2 種類の鋼繊維の混入によって優れた流動性を保ちながら、高い引張強度と引張じん性を実現したものである⁷⁾。Aft 系 UFC の設計値を表 - 1 に示す。

試験状況を写真 - 1 に示す。載荷ステップごとに BOCDA 方式によって、試験体に沿ったひずみ分布を約 20 mm 間隔で計測した。このとき、本方式の位置分解性能は 29 mm である。

表 - 1 Aft 系 UFC 材料の設計値

圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]	ひび割れ発生強度 [N/mm ²]
180.0	8.8	4.6 × 10 ⁴	8.0

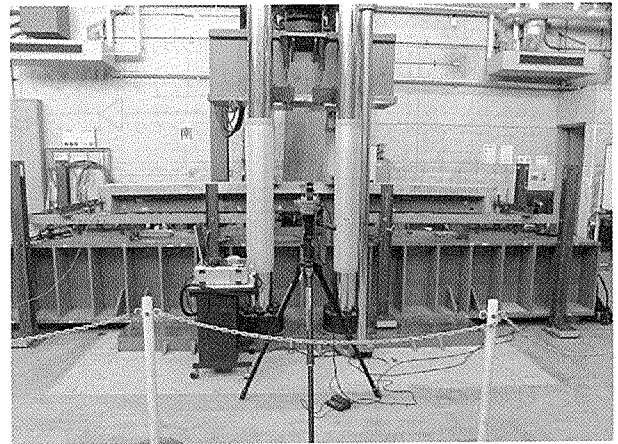


写真 - 1 試験状況

4.2 ひび割れモニタリング

計測されたひずみ分布の結果を、解析結果とともに図 - 7 に示す。横軸は試験体の中央を 0 m とした場合の位置を示し、縦軸は荷重 0 kN を基準とした場合の発生ひずみ量を示している。載荷荷重が増加するにつれて、ひずみの変化も大きくなり、解析とも良く一致している。荷重が 70 kN に達したとき、中央部に局所的なひずみ変化を 3 箇所確認した。このとき、顕微鏡による計測においても、当該位置に、10 μm 程度のひび割れ (写真 - 2) を 3 本確認した。この結果、BOCDA 方式光ファイバーひずみセンサーによって、目視レベル以下のひび割れが検知できることを確認した。

つぎに、(1) 式であらわされる曲線で計測結果を近似することで、ひび割れ幅を推定した。ひび割れ発生位置のひずみ分布の拡大図と近似曲線を併記して図 - 8 に示す。近似曲線によれば、荷重 70 kN において、3 箇所のひび割れ 1) 14 μm, 2) 15 μm, 3) 8 μm の発生が確認された (図 - 8 (a))。この結果は、顕微鏡による計測結果と良く一致した。しかし、荷重 75 kN においては、ひび割れ 2) においてずれが生じている (図 - 8 (b))。これは、近傍

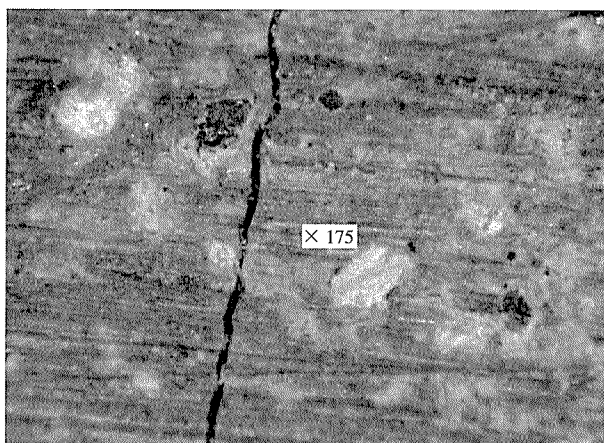
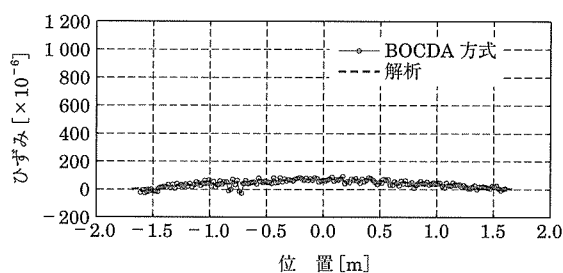
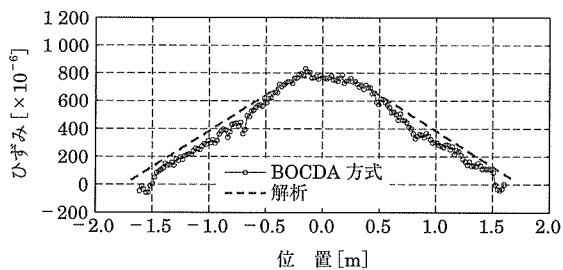


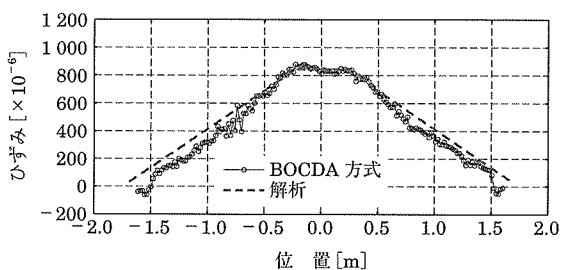
写真-2 ひび割れ拡大図



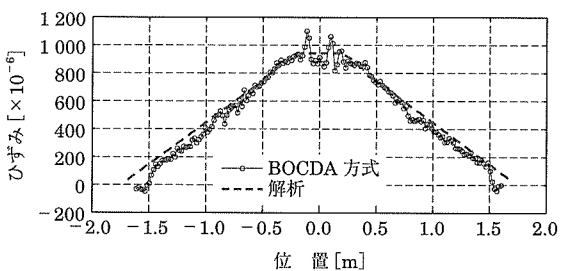
(a) 荷重 5 kN



(b) 荷重 60 kN

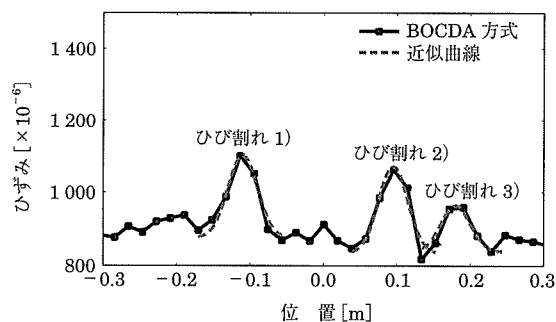


(c) 荷重 65 kN

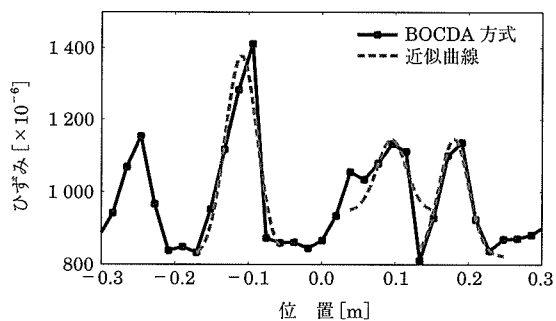


(d) 荷重 70 kN

図-7 ひずみ分布の計測結果



(a) 荷重 70 kN



(b) 荷重 75 kN

図-8 ひずみ分布の計測結果 (一部拡大)

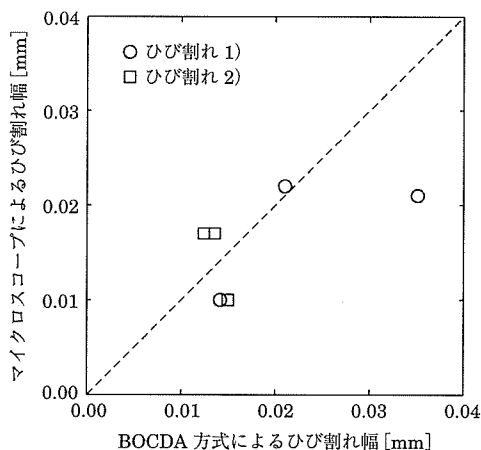


図-9 光ファイバセンサーによるひび割れ幅

に新たなひび割れが生じ、それを分離できなかったことが原因であると考えられる。

ひび割れ1)と2)の光ファイバセンサーによるひび割れ幅推定結果と、顕微鏡による目視結果を比較したものを図-9に示す。本実験の範囲内においては、前述のひび割れ幅推定モデルの一定の妥当性が確認された。

4.3 たわみの検討

ここでは、ひずみ分布計測結果を用いたたわみ量の考察を記す。BOCDA方式によるひずみ分布結果を利用して、梁の曲率から、試験体のたわみを計算した。そこから得られる支間中央部の変位量と、別途変位計で計測した結果を比較し、図-10に示す。荷重が増えるにつれて、両者の差が広がっているものの、傾向は良好に一致している。この

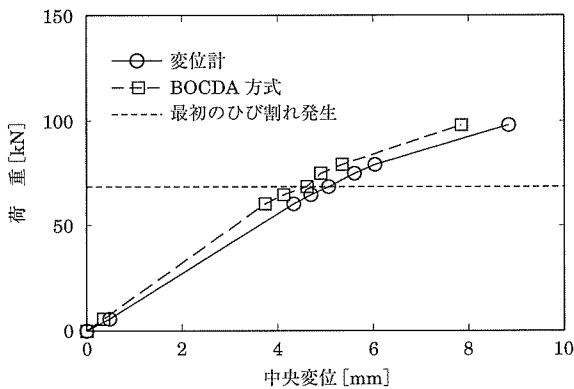


図 - 10 支間中央変位の結果比較

ことから、本方式の有効性が確認できた。変位計に比べて本方式の結果が総じて小さいが、これは両端の支点上まで光ファイバーが設置されていないこと、図心位置のずれ等が原因であると考えられる。

5. UFC 歩道橋への適用

5.1 概 要

BOCDA 方式によるひび割れ検知技術を、歩道橋へ適用した (写真 - 3)。本橋は橋長 30.5 m、有効幅員 3.5 m の 3

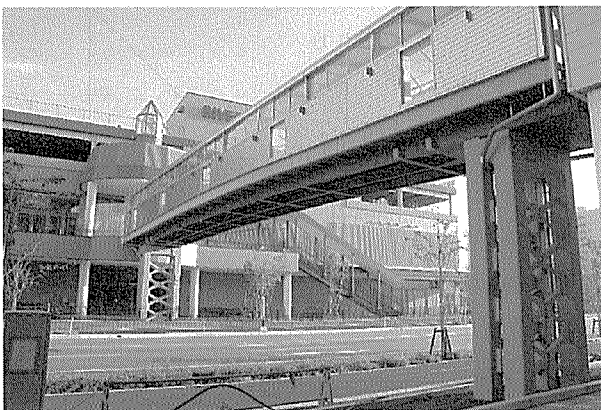


写真 - 3 ひび割れモニタリング中の歩道橋

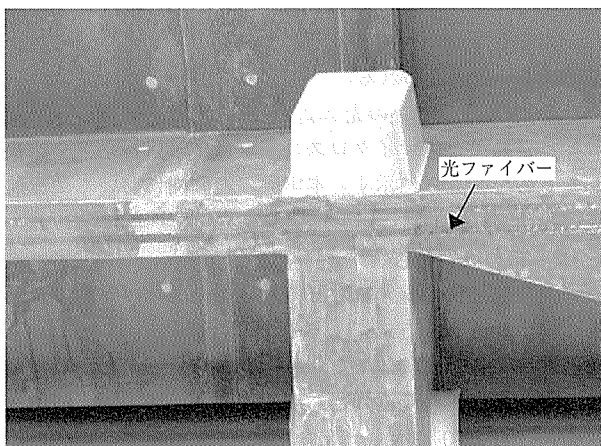


写真 - 4 桁下面に設置した光ファイバー

径間連続 PC ラーメン橋であり、上部工材料に Aft 系 UFC を使用した外ケーブル構造である。中央支間 (26.0 m 長) の桁下面に光ファイバーを全面接着し (写真 - 4)、定期的ひび割れモニタリングを実施している。

5.2 ひび割れモニタリング

2008 年 1 月と 9 月における BOCDA 方式による計測結果を図 - 11 に示す。横軸は位置を、縦軸はひずみと温度に依存する Brillouin 周波数シフトをあらわしている。それぞれの結果の場所ごとの変動は、主に光ファイバー設置時における初期ひずみのばらつきによるものである。1～9 月における差は、主に気温変動によるものである。実際に桁下部の表面温度には、 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ の違いがあった。気温の変動は、光ファイバー自体の物性を変化させ、ひずみ変動がない場合でも Brillouin 周波数シフトを変化させる ($1.25\text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$)。これに加えて、Aft 系 UFC の線膨張率を考慮すると、合わせて 44.3 MHz 分の Brillouin 周波数変化が、ひずみ以外を原因として生じているはずである。以上を考慮したうえで、二時点間で生じたひずみ分布を算出した結果を、図 - 12 に示す。図内には、(1) 式であらわされる $20\text{ }\mu\text{m}$ 幅のひび割れ分布を併記する。得られたひずみ分布には、これに該当するひずみ変化が見られないため、有意なひび割れは生じてないことが分かる。

一方で、Aft 系 UFC のクリープを考慮すれば、測定範囲の両端付近に $100\sim 200\times 10^{-6}$ の圧縮ひずみが期待されたが、計測結果はやや異なるものであった。本方式によ

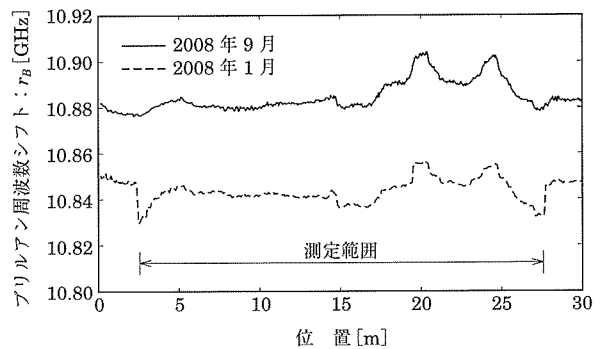


図 - 11 Brillouin 周波数シフト分布の変化

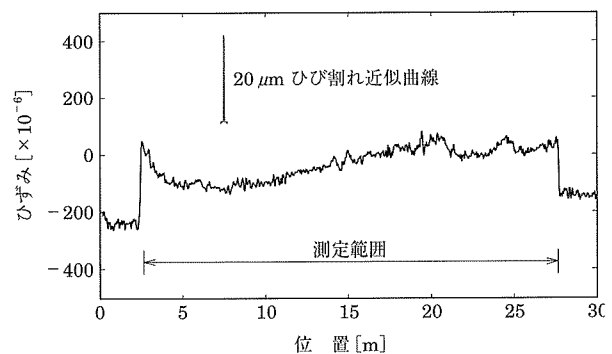


図 - 12 ひずみ分布の計測結果

ば、ひび割れのような比較的大きなひずみが局所的に生じている場合には検知可能であるが、クリープなどのように比較的小さなひずみが全体に生じている場合の定量的評価には、さらなる研究が必要である。

6. おわりに

BOCDA 方式の特徴である高い位置分解性能を活用し、目視レベル以下の 10 ~ 20 μm 程度のひび割れの発生が検知できることを確認し、実構造物においてもその有効性を確認した。

今後は、上述の歩道橋などにより、継続したモニタリングを通じたバックデータの蓄積を行う。また、解析などをもとにしたひび割れ幅の定量化方法の改善に努め、その経時変化などから剛性低下や余寿命把握といった健全性診断手法を検討したい。

謝 辞

本研究にあたり、有意義な議論をいただいた東京大学大学院保立教授に謝意を示します。また、本研究の遂行にあたり、住友大阪セメント牟禮主任研究員の助勢に謝意を示します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術，コンクリート技術シリーズ 76，2007
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 113，2004
- 3) 成瀬央，上原秀幹，出口大志，藤橋一彦，大西正敏：分布型光ファイバーひずみセンシングシステムの地下鉱山変状モニタリングへの適用，電子情報通信学会技術研究報告，光ファイバー応用技術，106 (497)，pp.71-76，2007
- 4) Hotate, K. and Hasegawa, T.: Measurement of Brillouin Gain Spectrum Distribution along an Optical Fiber Using a Correlation-Based Technique - Proposal, Experiment and Simulation -, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, E83-C (3), pp.405-412, 2000
- 5) 牟禮勝仁，今井道男，三浦悟：パルス相関を加えた BOCDA 歪み測定器の測定範囲の拡大，第 42 回光波センシング技術研究会講演会論文集，pp.129-135，2008
- 6) Niu, H. and Wu, Z.: Peeling-off criterion for FRP-strengthened R/C flexural members, Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 1, pp.571-578, 2001
- 7) 土木学会「超高強度繊維補強コンクリート『サクセム』の技術評価報告書」，技術推進ライブラリー No.3，2006

【2009 年 3 月 13 日受付】



新刊図書案内

高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準

平成 20 年 10 月

定 価 6,000 円 / 送料 600 円

会員 特 価 5,000 円 / 送料 600 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会