

コンクリートひび割れ同定のための分布型光ファイバセンサ実装方法の研究

鹿島建設(株) 正会員 ○今井 道男, 三浦 悟
住友大阪セメント(株) 牟禮 勝仁

1. はじめに

構造物の継続使用安全性を確認するための手段として、構造ヘルスモニタリングに関する研究が盛んである。なかでも分布型光ファイバセンサは、光ファイバ自体がセンサ機能を有するため、ひび割れや剥離など事前に発生箇所を特定できないような事象を検知できる稀有な手段である。筆者らはBOCDA方式と呼ばれる分布型光ファイバセンサにより、コンクリートに発生する目視レベル以下の微小ひび割れの発生が検知できることを確認した¹⁾。本稿では、ひび割れ幅を同定するためのモデル解析を行い、実験による検証を行ったので報告する。

2. ひずみ分布モデル

光ファイバ内で生じるブリルアン散乱光は、入射光と後方散乱光との周波数差がひずみ量に依存することが知られている。BOCDA方式は、この散乱光を利用した技術であり、任意の位置のひずみを数 cm レベルの高い空間分解能で計測できる。しかし、計測されたひずみ分布結果から、ひび割れ幅を定量的に評価するためには、以下にしたがい、構造物自体のひずみと計測結果の関係性を考慮する必要がある。

まず、構造物と光ファイバのあいだに介在する材料による緩衝効果を考慮する。構造物自体のひずみ (ε_z^c) が、光ファイバに伝達する際に、そのあいだの被覆や接着剤などによって両者のひずみに乖離が生じる。光ファイバに伝達されるひずみ (ε_z^f) は、下式の微分方程式であらわされる。ここで、 n はせん断遅れ定数と呼ばれ、下式同様に構成要素の半径 (R, r_f) と弾性率 (E_c, E_f) に依存する。構造物にひび割れが発生し、ひび割れ幅が大きくなった場合における、光ファイバに伝達されるひずみ分布の一例を図1に示す。本稿では、実験などをもとに、光ファイバと被覆のあいだに剥離が生じると仮定した。

$$\varepsilon_z^c(R, z) + \left(\frac{R^2 - r_f^2}{n^2} \frac{E_c}{E_f} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varepsilon_z^c(R, z) = \varepsilon_z^f(z) - \left(\frac{r_f^2}{n^2} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varepsilon_z^f(z) \quad (1)$$

つぎに、センサの空間分解能が有限であることによる信号の鈍化を考慮する。任意の空間分解能をもったセンサで得られるひずみ分布 (ε_z^m) の一例を図2に示す。ここでは、光ファイバセンサの信号感度が、下式で示されるように、その空間分解能 (Δz) の半分の標準偏差とする正規分布であると仮定した。

$$\varepsilon_z^m(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_z^f(l) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\Delta z/2)} \exp\left(-\frac{(l-z)^2}{2(\Delta z/2)^2}\right) dl \quad (2)$$

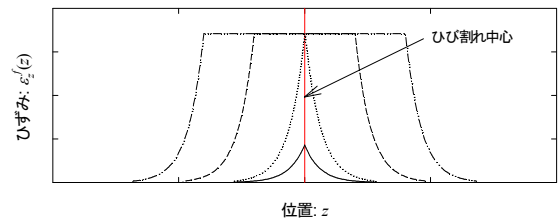


図1 光ファイバに生じるひずみ分布解析結果

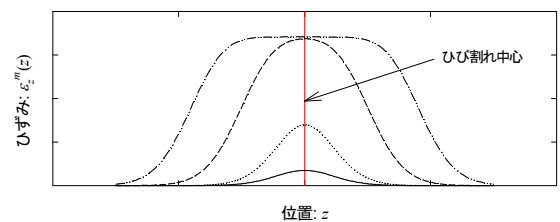


図2 空間分解能を考慮したひずみ分布解析結果

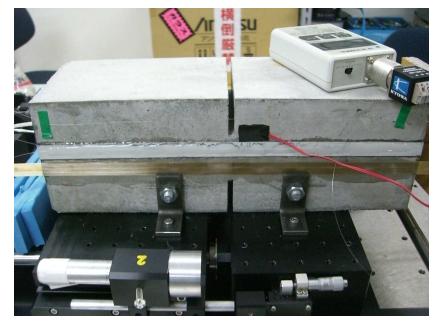


図3 ひび割れ同定実験の状況

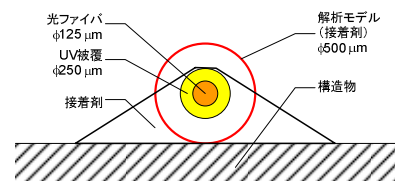


図4 接着剤による光ファイバ実装 A

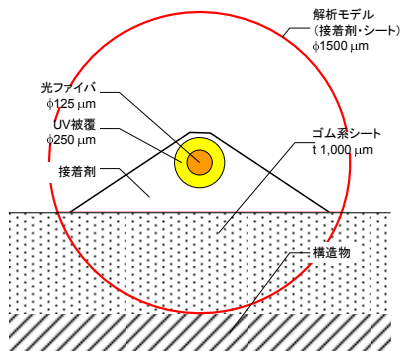


図5 シート併用による光ファイバ実装 B

キーワード モニタリング, 光ファイバセンサ, ひび割れ, コンクリート

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL042-489-7923

3. 検証実験

前項で示したモデルの検証のために、図3に示す小型のコンクリート試験体を用いた実験を行った。試験体には、UV被覆光ファイバを接着剤で試験体表面に直接貼付したもの（実装A）、UV被覆光ファイバを接着剤でゴム系シートを介して試験体表面に貼付したもの（実装B）、の二通りで実装した。それぞれの実際の形状と解析モデルの断面図を図4、図5に示す。試験体は装置に固定し、徐々に引張を与えてひび割れを発生させた。ひび割れ幅を増加させながら、BOCDA方式でひずみ分布を計測し、また参照用にマイクروسコープでひび割れ幅を計測した。このときのBOCDA方式の計測設定は、空間分解能が約38mm、計測間隔が約10mmであった。

実装A、Bの場合における、光ファイバセンサによるひずみ分布計測結果と、前章で述べたモデル解析結果を、それぞれ図6と図7に示す。横軸原点がひび割れ中心に相当する。ひび割れによるひずみが、接着剤などを通じて伝播していく様子の違いがみてとれる。ひび割れ幅が大きくなると、光ファイバ被覆界面に剥離が生じ、ひずみが一定を示す範囲が拡大していく。実装A、Bともに計測結果と解析モデルが良く一致しているが、大ひび割れ発生時、実装Aにおける0～70mm範囲で計測結果との差が大きい。これは、試験体を光ファイバと完全に並行に引張ることができなかったために、曲げによる余分なひずみが付与されたためと推測される。

つぎに、それぞれの実装条件における、ひび割れ幅とひび割れ中央部のひずみの変化をそれぞれ図8と図9に示す。厚さのあるゴム系シートを挟むことによって、実装Bのひずみ感度がAに比べて鈍化していることがわかる。実装Aにおける比較的大きなひび割れ発生時の、計測結果とモデル解析の差は、前述と同じ理由によるものと考えられる。本結果と、BOCDA方式のひずみ計測精度 (100×10^{-6}) を鑑みれば、実装Aで約10 μm 幅、実装Bで約20 μm 幅以上のひび割れが検知できることとなる。これは、既往の試験結果¹⁾とも良く一致する。

4. まとめ

分布型光ファイバセンサは、光ファイバ自体がセンサ機能を有するため、今までにない新しいモニタリング対象への適用が可能である。一方で、BOCDA方式のように高い空間分解能を有する場合、従来まで問題視されなかったひずみの鈍化に関する課題が顕在化する。本研究では、コンクリートのひび割れに着目し、ひび割れが発生した場合に計測されるひび割れ分布をモデル解析し、実験的に検証した。これらは、実装方法によって感度調整が可能であることを示し、対象に応じた実装方法の決定に寄与するものである。

本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた東京大学大学院保立教授に謝意を表す。本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（課題番号 21681023）で行なわれたものである。

参考文献

- 1) 中野龍児ほか、BOCDA方式光ファイバセンサによるコンクリートのひび割れ検知、土木学会第63回年次学術講演会、6-059

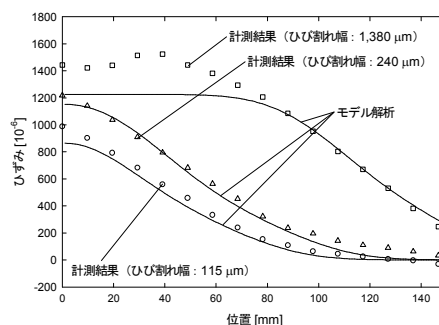


図6 ひずみ分布 (実装 A)

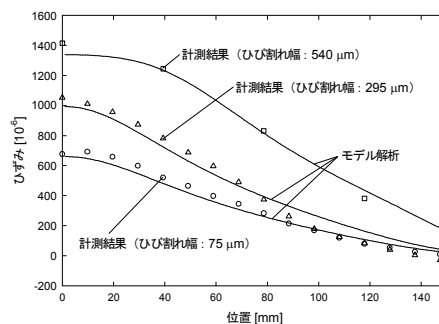


図7 ひずみ分布 (実装 B)

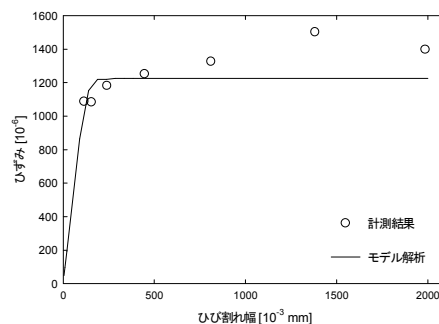


図8 ひび割れ位置のひずみ変化 (実装 A)

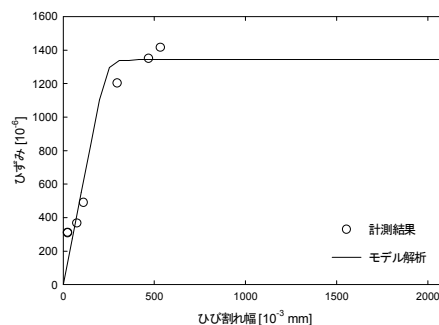


図9 ひび割れ位置のひずみ変化 (実装 B)