

## ブリルアン散乱光を利用した光ファイバセンサのひずみ分布測定性能に関する検討

芝浦工業大学大学院 学生会員 中島 道浩  
芝浦工業大学 正会員 勝木 太

### 1. はじめに

昨年までに我々は、光ファイバを PC 鋼より線に全面接着することで、曲げひび割れのようにある程度コンクリートに分散して発生するものについては、光ファイバによって計測されるひずみ量から補強材の増加応力を求め 1m 区間に発生する平均曲げひび割れ幅をモニタリングできることを明らかにした<sup>1)</sup>。しかし、温度応力や乾燥収縮によって生じる局所ひび割れについては、測定に使用する BOTDR（ブリルアン散乱光応用センサ）が距離分解能 1m 区間に発生したひずみを平均化処理してしまうため、局所ひび割れに伴う補強材のひずみ増加を検出することができず、BOTDR では評価することができない。

一般に測定対象物の局所的なひずみ増加を BOTDR で計測する場合、光ファイバを測定対象物に全面接着するのではなく、固定治具などを利用して、光ファイバにある区間の非接着部分を設け、測定対象物に発生する局所ひずみを非接着部分のひずみ増加として評価する。したがって、補強材に非接着部分が設けられるような取り付け方法を考案すれば補強材に発生する局所的なひずみ増加を評価できる可能性がある。一方、BOTDR の最小距離分解能が 1m であることから、1m 以上の非接着区間を連続的に設ければ、1m 区間毎に発生するひずみを正確に計測することができる。しかし、1m 区間に何本ものひび割れが発生してしまうと、1m 区間のひずみは増大するが、局所ひび割れ幅を過小評価してしまう危険性がある。

そこで本研究では、1m 以下の非接着区間の光ファイバに連続的なひずみを発生させることのできる模型を用いて、非接着区間のひずみを正確に評価する方法を検討した。また、測定に使用する BOTDR を扱うには測定原理に関する深い知識が必要であるとともに、環境条件や BOTDR の設定条件によってひずみ測定誤差が異なるため、これら諸問題を究明することも併せて行った。

### 2. ブリルアン散乱光応用センサ (BOTDR) の測定原理

光ファイバの片端からパルス光を入射すると、後方散乱光の一種であるブリルアン散乱光が周波数を若干シフトさせ戻ってくる。このブリルアン散乱光はひずみや温度に比例し周波数をシフトさせる特性を持っている。この特性を利用し、光ファイバの長手方向のひずみ分布を測定する。また、ひずみの発生位置はパルス光を入射してからブリルアン散乱光が戻ってくるまでの時間差から距離を測定する。なお、BOTDR では光ファイバの長手方向に発生するひずみを距離分解能 1m の平均ひずみとして検出する。

### 3. 実験概要

実験 1: 測定長を 1.0m 以上とし荷重を変えることで、荷重とひずみの関係から係数（ひずみ定数）を設定し、この定数より導き出せるひずみを理論ひずみとする。

実験 2: 図 1 に示すような実験装置 [ 測定長 1.6m、折り返し区間 30cm(折り返しにより乱反射を起こさないように R=15cm の半円とし、その区間のひずみを 0% とした) ] で、荷重間隔を非接着部とみなし、荷重間隔を 20cm、40cm、80cm に変化させる。それぞれの荷重間隔をサンプリング間隔（ズーム）5cm、10cm、20cm を用いて各 3 回ずつ計測し、平均する。それらのデータより各荷重間隔における実際に発生しているひずみが算出できる補正式を導き出し、荷重間隔ごとに評価を行う。

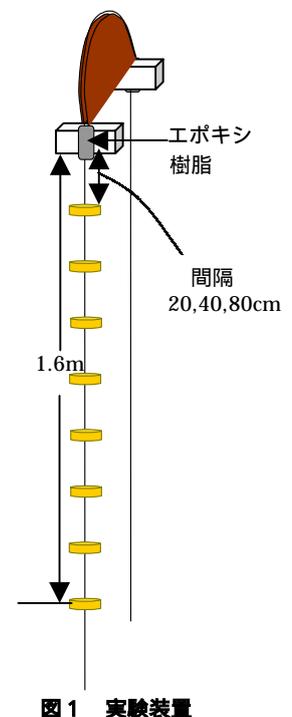


図1 実験装置

キーワード：光ファイバ BOTDR ブリルアン散乱光 ひずみ

連絡先：〒108-8548 港区芝浦 3-9-14 芝浦工業大学工学部土木工学科 Tel 03-5476-3050 FAX 03-5476-3166

### 4. 実験結果および考察

実験 1：実験結果（図 2）より  $K = 0.00072$ （%/g）となる。

実験 2：理論より考えられた次式の補正を行い、結果を図 3 ~ 5 に示す。

$$a_p = X_p \times S - \sum_{n=p-s}^{p-1} a_n$$

\* P=0 以前の a は全て 0 とする。  
\* 間隔ごとに a を平均しながら補正を行っていく。

X = BOTDR 計測値(%)      a=ひずみ補正值(%)

S = 100/サンプル間隔 (cm)      P = ひずみ発生地点からの測点数

図 3 に荷重間隔 80cm、サンプリング間隔 20cm で計測した結果を示すが、荷重間隔 80cm の場合はサンプリング間隔に関係なく、どの補正值も理論ひずみと比較して最大でも誤差 0.03% 以内に補正できる。次に荷重間隔 40cm の場合は、サンプリング間隔 10cm の場合には（図 4）、最大の誤差で 0.05% 以内に補正できるが、他のサンプリング間隔ではあまり精度がよくない結果となる。荷重間隔 20cm の場合、サンプリング間隔 10cm（図 5）で補正すると、グラフの形が追従できる程度でひずみの精度はあまりよくない。しかし、ひずみをひび割れ幅に換算するとどの荷重間隔において最大でも 0.2mm となる。誤差が生じる理由としては、( )BOTDR によるブリルアンスペクトラムの近似方法が、現在のアルゴリズムでは、距離分解能 1m 区間にいくつかのひずみが発生すると誤差を生じることや、サンプリング間隔を短くすると測定に時間がかかり測定中に同じ状態（温度・荷重）を保てていなかった可能性があるためだと思われる。( )間隔ごとに荷重を区切っても、距離分解能 1m のため次の区間に計算上、誤差が影響してしまう。( )補正式においてその計測ひずみをサンプリング間隔に応じて積算するとその計測ひずみに含まれる( )のような誤差が大きくなってしまう。しかし、これらの問題は 3 回計測の平均と荷重間隔ごとの平均化やドリフト（計測ひずみが何らかの影響で大きな誤差を生じること）データの削除により荷重間隔 40cm までは、計測ひずみの誤差をある程度は小さくすることができ、補正により連続ひずみを部分ごとに評価できることがわかった。

### 5. まとめ

ひずみ（荷重）を区間ごとに区切ることによって、連続的にひずみが発生していても補正式を用いることにより実際に区間に発生しているひずみに評価することがおよそ可能となった。しかし、局所ひび割れを評価する上では、荷重間隔 20cm の精度をよくする必要がある。荷重間隔 20cm・40cm においては、温度変化や BOTDR の測定などによる各種測定誤差の影響を小さくすることや、計測回数を増やすこと、精度を落とさず計測時間を短くできる BOTDR の設定を見つけることにより、計測ひずみの精度が上がりさらに精度よく補正できると思われる。また、実際の梁の局所ひび割れに対応可能か今後検討する必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) 松崎謙太郎ほか：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集、Vol23、No.1、2001
- 2) 大崎光洋ほか：光ファイバ部分固着による BOTDR ひずみ分布測定の空間分解能向上、TECHNICAL REPORT OF IEICE.OFT、2001-6(2001-5)

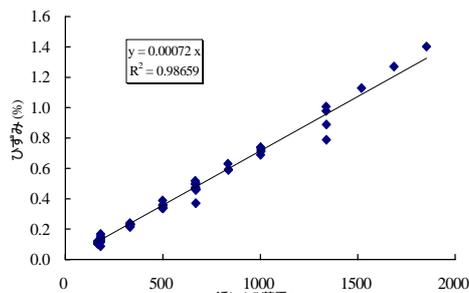


図 2 ひずみ定数

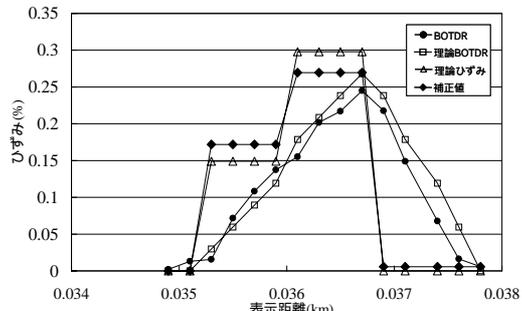


図 3 荷重間隔 80cm（サンプリング間隔 20cm）

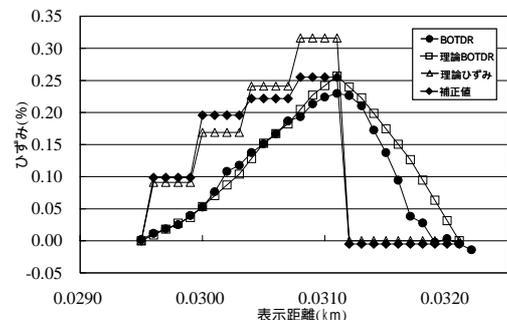


図 4 荷重間隔 40cm（サンプリング間隔 10cm）

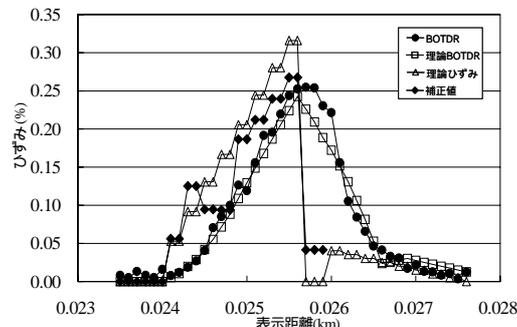


図 5 荷重間隔 20cm（サンプリング間隔 10cm）