

# 論文 歪モニタリング用光ファイバセンサの測定長特性に関する研究

石井豪\*1・呉智深\*2・堀内辰夫\*3

**要旨:** 本研究は光ファイバセンサが実際の歪をどのように検出するのか(歪分布の検出特性)を解明することを目的としたものである。その中で、光ファイバの測定長と検出する歪の関係に着目した実験を行ったところ、現在測定器の距離分解能については最短で 1m であることに對して、1m よりも短い場合は長さ歪の値がほぼ比例関係にあることが明らかになった。また、同位置に接着した歪ゲージとの比較を行ったところ、接着長が 1m よりも長い場合は歪ゲージとほぼ等しい値をとるが、1m よりも極端に短い場合は大きな差異と不安定性が見られた。

**キーワード:** 光ファイバ, BOTDR, 分解能, 歪, 全面接着, 定点接着

## 1. はじめに

近年、遠隔で線状の歪を連続的に測定できる光ファイバセンサ技術が注目されており、これは土木構造物モニタリングの実現に対して革新的な技術であり、実現性の高いものであると期待されている。しかし、光ファイバセンサ技術の応用可能性は未知な部分が多い。データの蓄積は極めて不十分であり、原理の究明はほとんどされていない状態である。そこで、本研究は光ファイバセンサのひずみ検出特性に影響を与える測定長の問題を解明することを目的として、光ファイバの測定長の違いによる光ファイバセンサの検出する歪の関係を調べるための簡単な実験、及び実際にコンクリート供試体へ光ファイバを接着し、接着部分の測定長と接着方法のそれぞれ異なる光ファイバの検出歪を歪ゲージの計測値と比較する実験を行った。

## 2. 測定装置について

光ファイバによる歪測定には歪損失アナライザ(以下 BOTDR)を用いた。現在、光ファイバ内に送り込んだ光パルスの散乱光をもとに様々な物理量を測定することができることが知られており、

BOTDR は後方ブリルアン散乱光の周波数シフト量を検出し、歪を測定するものである。また、ある測定点の歪は、その測定点から 1m 分のパルスをもとに算出される。この 1m を分解能という。

## 2. 測定長の変化による歪測定実験

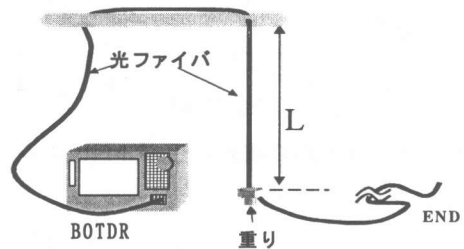


図-1 測定長の変化による歪測定実験

光ファイバの測定長と歪検出値の関係を調べるための基本的な実験を行った。光ファイバ単体の一端を固定し、他端に重りを加え、均一な歪を発生させた。重りの位置を変化させることで測定長を変化させ、光ファイバの歪を測定した。

1本の光ファイバによって、測定長Lを直列的に0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5(単位はm)の7種類を設定し、7種類を同時に測定した。測

\*1 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻 (正会員)

\*2 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博 (正会員)

\*3 NTTインフラネット(株) 東京支店長

定回数は10回である(図-1)。

その結果を以下に示す。図-2の実験値は測定回数10回分の平均値である。また、測定長が1m以上の場合、理論値は測定長1m以上の検出値(ここでは1.5mの検出値)を用い、測定長が1m以下の場合は、測定長と検出される歪の値が比例関係にあるという予測のもとに、測定長1m以上の検出値(ここでは1.5mの検出値)に1m÷各測定長を乗じたものを用いた。

また、図-3は図-2の検出値を次に示す式(1)を用いて1m分の歪に換算したものである。ここで、Aは検出値であり、Bは1m分の歪に換算した値、Cは測定長(m)である。

$$B=A \times 1/C \quad (1)$$

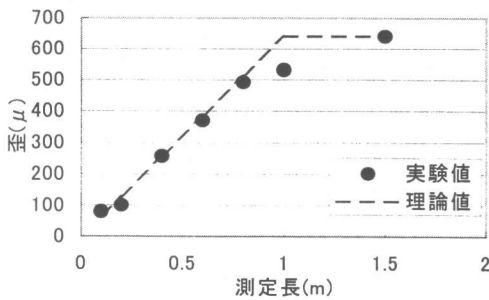


図-2 光ファイバの測定長と歪検出値の関係

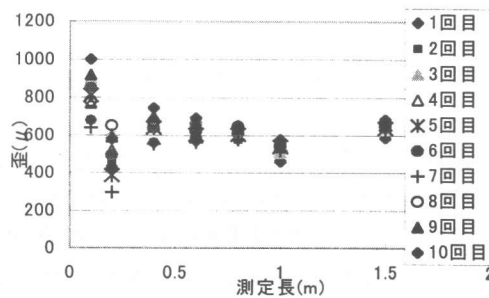


図-3 光ファイバの測定長と歪検出値の関係

図-2及び図-3から光ファイバの検出する歪の値は、1m以下の場合、測定長に比例することが確認できる。また、測定長が1m以上の場合、検出値がそのまま測定値となることが確認できる。これは、測定長が1mより長い場合、測定長の中

に分解能1mを含むためである。つまり、歪分布が均一で、測定長が1mより長い場合、測定値は測定長に関係なく等しくなる。しかし、例外として1mの場合のみ過小評価されているが、以下の2つの原因が考えられる。

まず1点目は、測定点は光ファイバの長さ方向に0.1m間隔でサンプリングされるが、あるサンプリング点の位置が歪測定区間の始点と一致しないことが考えられる。そして2点目は、そのサンプリング点の間隔にずれが生じることである。これは、プリルアン後方散乱光の受信時間のずれによるとも言われているが、この原因に関しては不明な点が多数存在する。

これら2点の原因から、自由部分の無歪状態の散乱光パルスを情報として含んでしまう(図-4)ため、測定長が設定よりも短くなってしまいにより、歪検出値が過小評価されてしまう。つまり、測定長1mの光ファイバが、実は0.9mから1mの測定長のものとして認識されているものと考えることができる。

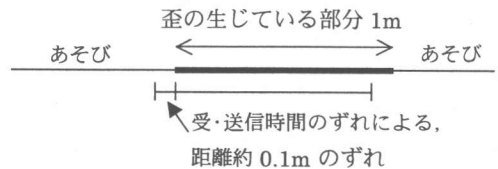


図-4 光ファイバ長と歪誤差の関係

また、測定長が1m以下の場合、短いほど測定値のばらつきが大きくなっている(図-3)。ただし、歪の値は1m分に換算したものである。このばらつきの原因は次のように推定される。

まず、光ファイバの検出値を1m分に換算する際に、誤差を大きくしてしまうことが考えられる。具体的には、測定長0.1mの検出値がa、誤差がbであるとき、式(1)を用いて1m分に換算すると、

$$(a+b) \times 1/0.1 = 10a + 10b \quad (2)$$

となる。式(2)から、検出値の誤差bを含んだままの状態でも10倍してしまうことにより、測定値の誤差が10bとなる。また、測定長が1mより短くなるにつれ、分解能1mの中に歪の生じている部分

の割合が少なくなる。そのため、BOTDR 内で処理される後方ブリルアン散乱光シフト量算定のために用いられる近似曲線の精度が悪くなると考えられる。このことに関しては不明な部分が多く、今後解明しなければならない問題である。

#### 4. 歪分布の検出特性に関する実験

光ファイバセンサによって検出される歪は、分解能 1m 分の平均値をとると言われているが、不明な部分が多い状態である。そこで、実際にコンクリート円柱供試体に光ファイバを接着し、光ファイバセンサによって測定される圧縮歪と引張り歪の測定値と歪ゲージの計測値を比較し、光ファイバセンサの歪分布の検出特性を調べることを目的とした実験を行った。

##### 4.1 実験概要

円柱供試体に、光ファイバの接着部分の測定長（以下接着長とする）を変化させて接着し、万能試験機によって供試体を圧縮することにより発生する引張り歪と圧縮歪を測定した（図-5）。

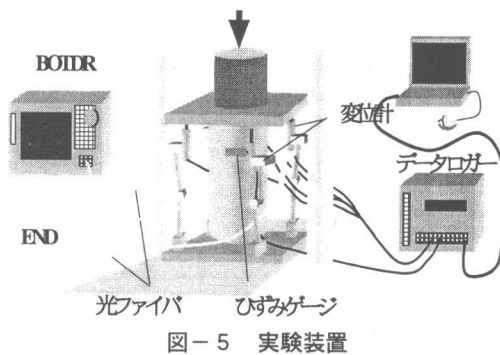


図-5 実験装置

光ファイバを円周方向に接着した供試体を引張り歪測定用に、軸方向に接着した供試体を圧縮歪測定用に使用し、光ファイバの測定値と歪ゲージの計測値の比較、接着長の異なる光ファイバの測定値の比較、接着方法の異なる光ファイバの測定長の比較を行った（図-6）。接着時の光ファイバと歪ゲージの間隔は 5mm とし、エポキシ樹脂接着剤で接着した（図-7）。

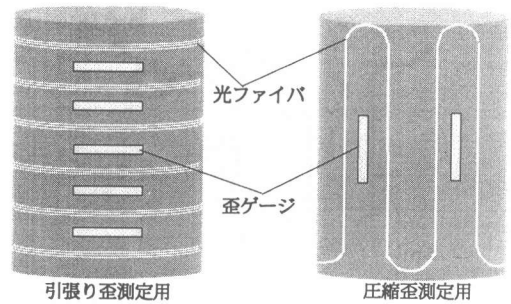


図-6 実験用円柱供試体

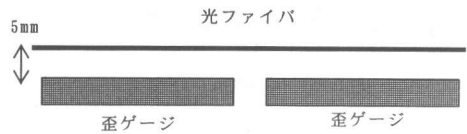


図-7 歪ゲージと光ファイバの間隔

##### 4.2 実験結果

###### (1) 圧縮歪について

円柱供試体に、光ファイバ及び歪ゲージを軸方向に接着し、圧縮することによって、圧縮歪を測定した。光ファイバの接着方法は全接着長の接着（全面接着）のみの設定である。光ファイバの接着長は、分解能 1m を確保させるために 1.5m を設定した。また、1m 未満として 0.05m, 0.1m, 0.15m, 0.2m, 0.3m を設定した。ここで、1m 未満の場合は、あそびの（接着されていない）部分を含めて分解能 1m を確保している（図-9）。

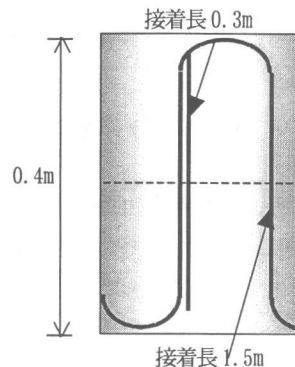


図-8 圧縮歪測定用円柱供試体

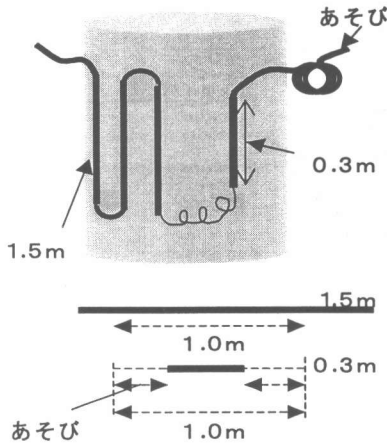


図-9 分解能と接着長

以下に、1m 以上の場合と 1m 未満の場合の代表として、接着長 1.5m 及び 0.3m の光ファイバによる圧縮歪の検出結果のグラフを示す。

ただし、接着長 1.5m の圧縮歪の値は、接着長 1.5m に対し圧縮される部分の長さが 1.2m であることを考慮して、検出値を 1.5/1.2 倍したものである (図-10)。

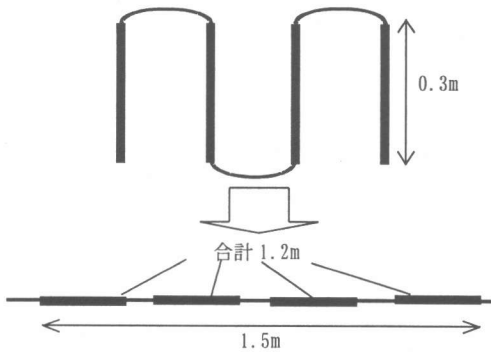


図-10 接着長 1.5m 部分の圧縮歪

また、接着長 0.3m の場合、圧縮歪のデータは検出値を 1/0.3 倍したものである。比較する歪ゲージの値は、光ファイバに対応した歪ゲージの平均値である。

例えば接着長 0.3m の光ファイバの場合、図-11 のように光ファイバと同位置に平行に 4 枚の歪ゲージを接着し、それらの計測値の平均値と光フ

アイバ測定値を比較した。

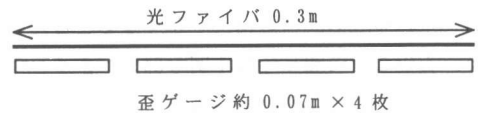


図-11 歪ゲージ

1.5m の接着長の場合、光ファイバの歪値と歪ゲージの歪値はほぼ一致した (図-12)。しかし、0.15m、0.3m の場合は大きな差異が見られるものがあった (図-13、14)。

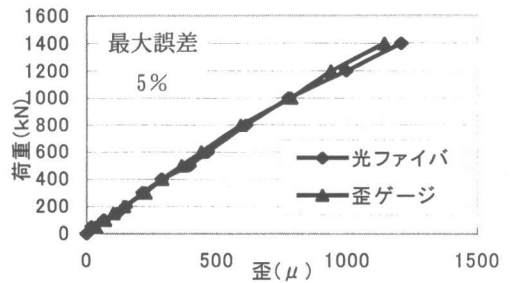


図-12 接着長 1.5m 部分の圧縮歪

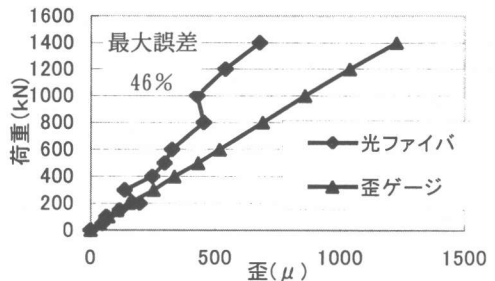


図-13 接着長 0.3m 部分の圧縮歪

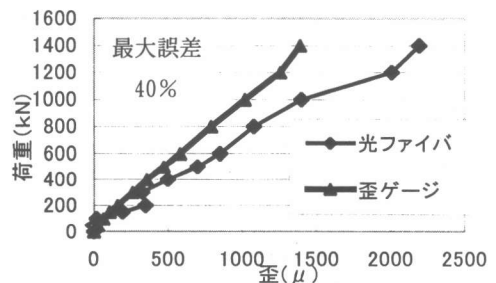


図-14 接着長 0.15m 部分の圧縮歪

光ファイバの接着長が1m未満の場合に誤差が大きくなる原因としては、前述した測定長の変化による歪測定実験と同様のことが挙げられる。つまり、分解能1mの中に含まれる無歪部分の情報が光ファイバの歪検出値に影響しており、検出値を1mに換算し測定値とする際に、その無歪部分の影響ならびに検出値の誤差を大きくしてしまうことが考えられる。ただし、誤差の生じる原因を含め、光ファイバセンサの歪検出の原理は不明な部分であり、今後解明されなければならない問題である。

## (2) 引張り歪について

円柱供試体に、光ファイバを円周方向に巻きつけるように接着し、円柱供試体を圧縮し、円周方向の引張り歪を測定した。

光ファイバの接着方法は、接着長の両端のみの接着(定点接着)と全面接着の2種類の設定である。

ここでは、歪ゲージの値を平均したものだけでなく、約円周1周分の長さに対応するように歪ゲージを直列接続にしたものを比較用に使用した。ここでは、円周歪として表示した(図-15)。

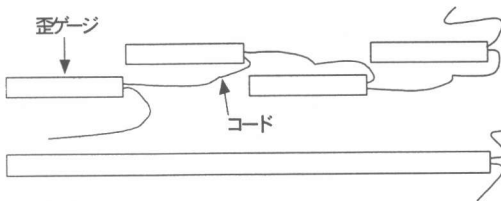


図-15 円周歪

次に、接着長1.5m及び0.5mの光ファイバによる引張り歪の検出結果を示す。歪ゲージとの比較方法は圧縮歪測定と同様に行った。

接着長が1.5mの場合、光ファイバと歪ゲージの歪測定値はほぼ一致した(図-17, 18)。しかし0.5mの場合は大きな差異が見られた。このことに関しては、圧縮歪の実験と同様の原因が考えられる。また、全面・定点接着のどちらでも荷重増加に伴い、歪の値が増減を繰り返すことが目立つ(図-19, 20の○で示した部分)。これについ

ては、BOTDR 自体が歪の検出に関して不安定性を持っていることが考えられる。そして、不安定な歪の値を1m分に換算する際、そのデータの不安定性を大きくしてしまうことが考えられる。ここで、グラフ内の最大誤差は歪ゲージと比較したものである。

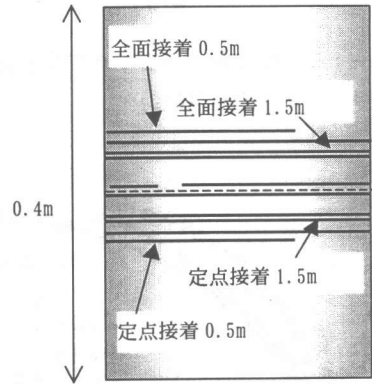


図-16 引張り歪測定用円柱供試体

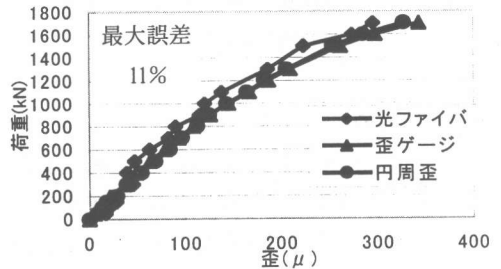


図-17 接着長1.5m部分の引張り歪 (全面接着)

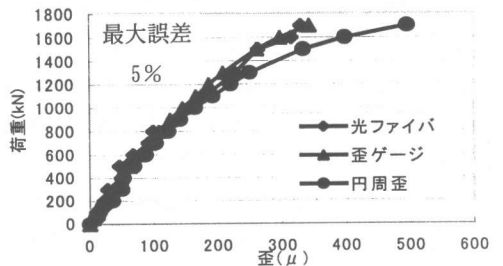


図-18 接着長1.5m部分の引張り歪 (定点接着)

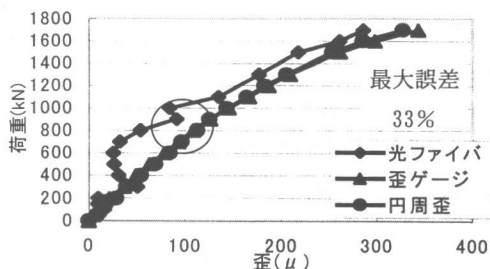


図-19 接着長 0.5m 部分の引張り歪  
(全面接着)

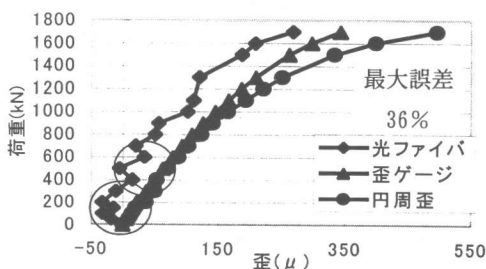


図-20 接着長 0.5m 部分の引張り歪  
(定点接着)

## 5. まとめ

(1) 光ファイバを供試体に接着しない均一な歪分布において、1m 以下の極端に短い場合を除くと、光ファイバの歪検出値は測定長に比例することが確認された。

また、1m の場合には歪検出値を過小評価していることが確認された。

(2) コンクリートに接着した場合について、接着長を 1m 以上に限ると、実際の構造物の測定に用いることができるといえる。

しかし、光ファイバの接着長が、1m 未満の場合、実際の構造物ではうまく測定できない場合があることが確認された。

(3) 光ファイバの測定長が 1m 未満の場合には、検出値を 1m 分に換算する際に、誤差を大きくしてしまい、測定値のばらつきが大きくなることが確認された。

## 参考文献

- 1) 呉, 高橋ほか: 光ファイバセンサによるコンクリート曲げ部材のひび割れモニタリングに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 409-44, 2000
- 2) 呉, 石井ほか: 光ファイバセンサのコンクリート引張りひずみの測定特性に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 (Hybrid CD-ROM), V-464, 2000
- 3) 呉, 高橋ほか: 光ファイバセンサによる FRP 板 - コンクリート接着界面の界面剥離モニタリングに関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 (Hybrid CD-ROM), V-463, 2000