論文 ブリルアン散乱光を用いたひずみ分布測定精度向上手法

鳥越 寿彦^{*1}・川野 勝^{*2}

要旨:光ファイバは,情報通信における伝送媒体として広く用いられているが,光ファイバ そのものにより構造物のひずみや温度を計測できるセンサとして利用する研究が盛んに行 われている。本研究では,縦断的に長いトンネル等気温変化のある場所やひずみ変化量が大 きい場所において,ひずみ測定精度を向上させる手法を提案した。また,都市トンネルにお けるモニタリング結果もここで報告する。

キーワード:ブリルアン散乱光,光ファイバ,ひずみ

1. はじめに

筆者らは,社会基盤構造物を始め,自然現象 である落石検知等の光ファイバセンシングによ る研究を行ってきた。その計測方法は,B-OTDR 法,FBG法,OTDR法等さまざまであり,それら は計測対象物の求める精度や計測時間により設 定してきた。しかしながら,高精度で短時間に 計測できるFBG法は,強固な筐体で構成したセ ンサ以外は計測センサ自体の取り扱いが困難で, その単価も高く,かつ,点計測しかできないと いった問題があった。また、OTDR法では,長 距離の連続した計測や定量的変位計測に不向き である。

そこで,トンネルのような縦断的に長い計測 を行うため,点計測のセンサではなく,面的な 計測が可能な B-OTDR 法に着目した。

B-OTDR 法は,光ファイバそのものが計測セ ンサとなるため,計測対象物に貼り巡らすこと により,面的な計測が実現できる。しかし,光 ファイバをコンクリート構造物に全面接着して ひび割れ検知を行った場合,接着部のごく一部 の光ファイバが,そのひび割れを吸収すること になるため,すぐに破断してしまう。そこで, 光ファイバを構造物に接着させることなく,あ る一定の区間が計測できる手法を考案した。¹⁾ しかし,距離分解能最小1mで高精度の計測を 行うためには,距離測定確度等を考慮した場合、 計測間隔は少なくとも3m必要である。この計測 間隔でトンネル二次覆エコンクリートの計測を 行った場合,±0.12mm(B-OTDR法の計測精度 ±40µ)のひび割れはすべて計測誤差として計 測されることになる。これに加えて,温度変化 による計測値のバラツキやひずみ変化量の大き さが計測精度に与える影響が大きいため,計測 誤差はさらに増加すると考える。本研究では, この計測誤差を極力低減し,安定した計測を行 う方法として,複数の張力を備えた温度補償部 を設ける方法を提案した。

また,今回開発した温度補償部を利用して都 市トンネル挙動計測モニタリングを行った。

2. 光ファイバセンシングの概要と特徴

2.1 B-OTDR の特徴

B-OTDR 法は,光ファイバの軸方向に発生し たひずみを連続に計測する技術であり,ひずみ の発生位置は,光パルス入射時間とブリルアン 散乱光受光時間から算出することができる。し たがって,計測対象箇所に光ファイバセンサを 設置することにより,構造物の連続したひずみ 分布を計測することができる。実験において設

*1 エヌ・ティ・ティ・インフラネット(株)関西支店 事業開発本部土木技術担当課長 (正会員) *2 エヌ・ティ・ティ・インフラネット(株)関西支店 事業開発本部開発企画担当課長 定した計測仕様を表 - 1 に示す。

| 距離レンジ | 1km |
|-----------|------------------|
| 読み取り分解能 | 0.0001 % (5cm) |
| 測定周波数幅 | 10.55 ~ 11.19GHz |
| 測定周波数掃引間隔 | 10MHz (65 回) |
| パルス幅 | 10ns |
| 距離分解能 | 1m |
| ひずみ測定精度 | ± 0.004% |

| 表 - 1 | B-OTDR 計測仕様 |
|-------|-------------|
|-------|-------------|

2.2 B-OTDR 法の測定原理

光ファイバに光パルスを入射するとブリルア ン散乱光が発生する。このブリルアン散乱光は, ある特定の周波数分布を有しており,光ファイ バの伸縮に比例して周波数分布がシフトする。 この周波数シフト量(f2-f1)を計測することによ り,光ファイバのひずみ量を計測することがで きる。ブリルアン散乱光の周波数分布を図-1 に示す。





図 - 2 ブリルアン散乱光波形データ

図 - 2は,ブリルアン散乱光の波形データを 示したものである。このデータは,測定周波数 幅を測定周波数掃引間隔ごとにパルス光の光周 波数を微小に変化させ,長さ方向に信号パワー を計測した結果である。距離Z1~Z2においてひ ずみが発生しており,その部分の周波数分布 がシフトしているのがわかる。このブリルアン 散乱光のシフト量がひずみとリニアな関係にあ ることからひずみを計測することができる。(図 - 3参照)²⁾



図-3 ブリルアン散乱光周波数とひずみ

2.3 光ファイバセンサの概要

実験に用いた光ファイバセンサは,4芯のテ ープ型光ファイバの両端に0.15mmのステンレ ス鋼2本のテンションメンバで構成されている。 通信用の光ファイバと違い,テンションメンバ に伝達された外力を光ファイバ心線に伝達する 計測専用センサケーブルである。このセンサを



図-4 光ファイバセンサ概要図

固定する冶具はワンタッチでセンサを挟み込み, 光ファイバ芯線に損失をほとんど与えることな く容易に指定の張力に固定することができる。 センサ設置後の張力調整量は 50mm である。(図 - 4参照)

3. 実験概要

B-OTDR 法は,計測時にひずみ表示再現性バ ラッキ(ドリフト)が発生するため,ある基準 点を設けて計測を行わなければならない。また, ブリルアン散乱光は,ひずみ変化だけでなく, 温度の変化によりシフトする傾向があるため, その影響を除外する方法として,基準点を設け る計測方法が用いられている。

筆者らも,計測場所の温度変化分布に対応し た基準点を設けて計測を行っているが,実現場 での計測結果に計測精度以上のバラツキが発生 することがあった。それらの多くは基準点とし て設定したポイント張力の違いが原因ではない かと想定された。そこで,本実験では無張力部 を含めた複数の基準部を設け,どの基準部を用 いれば計測精度が安定するかを確認することに



図 - 5 実験構成図

度補償部,そして可動可能な4種類の計測部か らなる。ケーブルドラムは,計測器のデッドゾ ーン(フレネル反射等)を抑制するために約 100m 設けた。下部側および上部側の端末部で, 光ファイバを再接続することにより1回の計測 で1往復半計測出来る構成とした。計測間隔は 3,000mm、可動部の伸縮量は±25mmであり,ダ イヤルゲージにて可動量を計測することにより, ひずみ換算し計測値との照合を行った。

表 - 2 に温度補償部および計測部の詳細構成

表-2 温度補償部と計測部の詳細構成

| | 初期張力(µ) | 可動範囲(µ) |
|------|---------|---------|
| 温度1 | 2,000 | 固定 |
| 温度 2 | 3,000 | 固定 |
| 温度3 | 3,800 | 固定 |
| 温度 4 | 4,400 | 固定 |
| 温度 5 | 5,300 | 固定 |
| А | 3,000 | 0~1,500 |
| В | 3,000 | 0~1,500 |
| С | 2,900 | 0~1,500 |
| D | 2,900 | 0~2,000 |

を示す。なお、A~D に異なる張力を段階的に発 生させ,ダイヤルゲージの数値が安定後,4回連 続計測を行った。

4. 実験結果

実験で設定した 5 点の温度補償部とケーブル ドラム部の中点,任意の無張力部から2 点の合 計8 点の基準点を用いて分析を行った。分析は, 光周波数変換および光パルス変換機器の安定性 を考慮して 2~4 回の 3 回分を用いて計測間隔の 中点から 3~7 点の平均値を取りその間隔の計測 値とした。なお、分析は無張力部と有張力部の2 ケースに分けて行った。

4.1 無張力部の分析結果

全計測数(126回)の約10%(12回)でドリ フトが発生した。図-6にドリフト発生時のグ

した。図 - 5 に実験構成図を示す。 実験構成は, B-OTDR 計測器から 5 種類の温

ラフを示す。この計測は可動部を変化させてい ない連続計測の結果であり,無張力部と有張力 部のドリフト量に開差があるのが確認できる。 その開差は有張力部 0.3% 部との比較で 0.02~0.03%であるが,有張力部 0.5%では 0.06% に拡大している。有張力部のひずみ量が大きく なると開差が拡大することになる。これにより、 無張力部を温度補償部に設定した場合,計測値 にドリフト誤差が発生する可能性が高いと考え られる。



図 - 6 ドリフト発生時の状況

4.2 有張力部の分析結果

計測値の評価を行うにあたり,計測区間の中 央部を含む3点,5点,7点のデータを用いて式 (1)により標準偏差を計算して最適点数の検討を 行った。その際、7点のデータで平均値を取った 場合,そのデータ内に距離測定確度誤差が含有 したものがあったため,5点の平均値を取るこ とが最適であると確認できた。

$$Sx = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (xi - \bar{x})^2}$$
(1)

ダイヤルゲージの計測結果を理論値として, 基準とする温度補償部ごとの計測値との開差を 表示したのが図 - 7 である。これによると,発 生するひずみ量の増加に伴い,理論値と近似す る温度補正部が順次高い張力にシフトしている 状況が確認できる。



次に,可動部Cを伸縮方向にランダムに各 63 回ずつ計測した結果から散布図を描き,温度補 償部ごとに近似式に表したものが図 - 8 である。 この結果,温度補償部種類ごとの決定係数はほ とんど1に近似して安定しているが,計測値が 大きくなるに従い,温度補償部の開差が約 300 µ程度発生している。したがって,計測精度を 向上させるためには、この開差を解消させるこ とが必要である。

図 - 7および図 - 8を統合して分析を行った



図-8 各温度補償部の近似式

結果,発生したひずみ量の近傍の温度補償部が 理論値に近似する。また,ある一定の温度補償 部で計測を行った場合,計測値の決定係数が1 に近似しているが,各温度補償部の開差が600 µぐらいから増加し,1,500µではそれが約300 µまで拡大する。現場計測においては,図-8 のような計測回数から分析することは困難であ り,3回程度の平均値となる。この場合,温度補 償部のデータは収束せず,ほぼ一定の間隔で拡 散する。計測回数3回の結果をグラフにしたの が図-9である。



他の可動部のデータも同様の傾向が確認できた。基準点(3,000µ)から伸縮を計測した場合, 増加方向は高いひずみ温度補償部に,減少方向 は低いひずみ温度補償部の値が理論値に近似す る。図 - 9のような両端部のバラツキ量は、可 動部 A~D で 100~200µの幅があり,これは初期 張力等センサ設置条件が関連していると想定さ れる。

5. トンネル二次覆工コンクリートによるモニタ リング

実験結果のモニタリングとして,都市トンネ ルの二次覆エコンクリートのひずみ計測を行っ た。³⁾モデルとなるトンネルは全長約 1,000m の 通信用トンネルである。このトンネルは,他企 業の近接工事により,トンネルの側方荷重が除 荷されて断面方向の変形を発生し,トンネル縦 断方向にひび割れが発生すると影響予測(トン ネル断面方向解析)されている。そこで,事前 にトンネル内を9ブロックに分けて気温変化を 計測した結果、気温差が約 7.22 であった。今 回,実験で使用したセンサケーブルは約 20µ/ の変動があるため、温度に対する補正が必要で ある。

5.1 温度補償部設置方法

影響解析の結果,このトンネルでの変状ひず み量は最大±1,000µであり,センサのほとんど (82%)が+3~400µの変動であるため,温度補 償部は2,000µと3,000µの2種類とし,計測箇 所の初期張力を2,000µとした。また,温度補償 部の精度向上を考慮して,2,000µ部を2スパン 設置し,その平均をとる計測システムを構築し た。図-10に温度補償部の写真を示す。



図 - 10 温度補償部

5.2 計測結果

気温変化による影響で約 150 µ,計測器の測定 精度が±40 µ であるため,最大約 200 µの計測誤 差が発生する可能性がある。また,実験で確認



した計測値のバラツキ 100~200 µ も考慮する必要がある。計測間隔は 3,000mm であるため,最

大 1.2mm 以下は誤差に含まれる可能性がある。 そこで,当初は 2,000 µ の温度補償部との比較を 基準とし,計測絶対値が 2,600 µ を超えた時点で 3,000 µ の基準値に変更する計測システムとした。 また,2,000 µ 温度補償部の整合性評価として, 両センサの差を取ることで確認した。不動点に おける約1年間の計測結果を図-11 に示す。





その結果,年間変位量±0.3mm で推移してい ることがわかる。それをひずみ量に換算すると, ±100µである。当初,想定していた発生する可 能性のある実ひずみ誤差は最大 400µであるた め,その75%が除去できたと考える。

また,1年間の誤差が明確になったため,こ のデータを用いて計測システムの再構築を行っ た。その結果を図 - 12 に示す。誤差は約 50 µ 程 度に軽減できた。

6.まとめ

- (1) 温度補償部は無張力部ではなく,有張力部に設定する必要がある。無張力部に設定した場合,ドリフトが発生しなければ問題はない。しかし,確率は低いがドリフトが発生した場合,計測対象箇所の張力の大きさに比例して誤差は拡大すると考える。
- (2) 有張力部の温度補償部は、計測対象箇所の 増減に比例した張力と比較することによ

り,理論値(真値)に近似すると考える。 また,一定の温度補償部とした場合は,計 測変化量の増減値に比例してその開差は 増減するが,その大きさ(範囲・幅)は, 光ファイバセンサの設置状況および初期 張力に左右されていると想定できる。

(3) より細かな精度で計測をする場合,過去の データ等を参考に計測値のバラツキをあ らかじめ想定しておくことにより,精度の 向上は期待できると考える。しかし,長期 間にわたる計測を実施する場合は,年間を 通じた計測を行い,その変動データから, 計測範囲の挙動分析を実施することによ り,より高い精度で構造物の挙動計測が可 能となる。

参考文献

- 1) 鳥越 寿彦,川野 勝:近接施工に伴う光フ ァイバセンサを用いたトンネル監視事例,国 交省管内技術研究発表会,2分の1冊,pp. 技術9-1-技術9-4,2003
- Torigoe.T , Kawano.M : Health monitoring technique of civil-engineering structures that used an optical fiber sensor and future directivity , Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure , Vol.1,pp.253-260 , 2003.11
- 3) 成瀬 央, 倉島 利雄, 増田 順一: 光ファ イバによる環境センシング, 電気学会全国大 会, S.12-4, pp.S12-9-S12-12, 1998