

(69) 光ファイバを活用したアスファルト舗装のモニタリングに関する基礎的研究

岩間 将彦¹・曾我 健一²

¹正会員 株式会社 NIPPO 総合技術部 技術研究所 (〒331-0052 埼玉県さいたま市西区三橋 6-70)
E-mail: iwama_masahiko@nippo-c.jp

²正会員 University of California-Berkeley Professor (447 Davis Hall, MC 1710 Berkeley, CA 94720)
E-mail: sogaa@berkeley.edu

橋梁やトンネルなどの構造物では、予防保全型管理を目的にセンサーによるモニタリングが維持管理方法として求められている。特に光ファイバによるセンシング技術は、計測距離と耐久性に優れるため、長期的な維持管理を必要とする構造物では、その用途が期待されている。

本研究では、大型構造物に比べて補修サイクルが短い道路用アスファルト舗装に着目し、室内試験から舗装の静的・動的ひずみ特性を評価した上で、光ファイバを活用した際のモニタリングの可能性を検討した。本論文では、それら検討結果から得られた知見について述べる。

Key Words: distributed fiber optic sensing, asphalt pavement, monitoring, strain measurement

1. はじめに

近年、橋梁やトンネルなどの大型構造物分野では、予防保全型管理を目的としたモニタリングや状態監視に向けたセンサーの活用が求められている¹⁾。センサーの中でも光ファイバを活用したセンシング技術は、計測距離が長く耐久性にも優れることから、長期的な維持管理を必要とする構造物では、その用途が期待されている。

そこで本研究では、長期的な維持管理を必要とし、且つ他の構造物に比べて補修サイクルが短い道路用アスファルト舗装に着目し、舗装の劣化予測や変状検知に向けて、室内で実施した静的載荷試験と動的載荷試験から光ファイバによるモニタリング技術の可能性を検討した。

本論文では、それら検討結果から得られた知見について述べる。

2. 光ファイバセンシング

(1) 計測原理

光ファイバセンシング技術は、温度、ひずみ、振動などの周囲環境の変化に対して光ファイバの感度を利用して計測を行っている²⁾。図-1に示すように、光をファイバに通過させる際に、大部分は通過する中で一部の光は散乱する。この散乱現象はガラス媒質の屈折率の不均一性と関連し、ファイバの温度、ひずみ、振動などに変化

があると光ファイバ中に進行するレーザ光信号の特性に変化がみられる。散乱光の種類にはRayleigh (レイリー)、Brillouin (ブリルアン)、Raman (ラマン) があり、その振幅と固有周波数からひずみや温度を計測する(図-2)。

(2) 計測システム

a) ブリルアン光時間領域分析

光ファイバによるひずみ計測方法として、ブリルアン光時間領域分析 (BOTDA) がある。BOTDA はブリルア

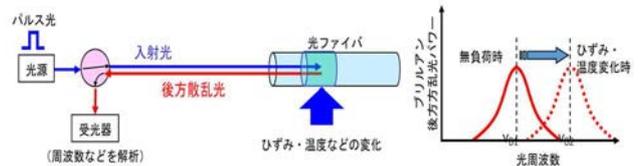


図-1 光ファイバセンシング技術の概要

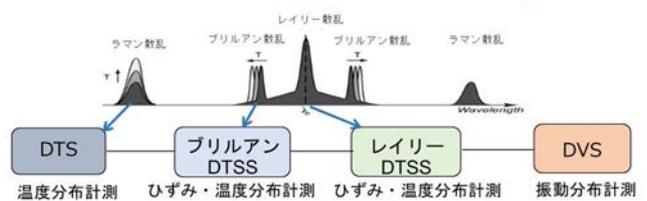


図-2 散乱光の種類と光ファイバ分布計測

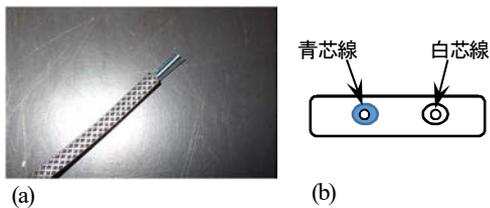


図-3 エンボス型光ファイバ (a) 写真概要, (b) ファイバ断面

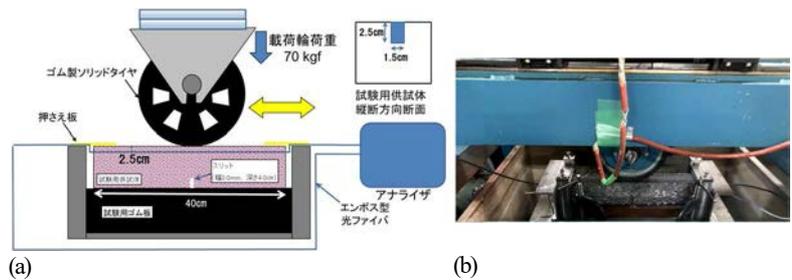


図-4 载荷試験の概要 (a) 試験装置横断面, (b) 载荷試験状況

表-1 载荷試験条件

供試体寸法	幅: 5cm, 厚さ: 8cm, 長さ: 40cm
ファイバ設置位置	供試体上面から深さ 2.5cm
擬似クラック設置箇所	従来供試体: 無し 擬似クラック供試体: 供試体下面中央部に幅 3.0 mm、深さ 4 cmのスリットを設置
輪荷重	70kgf
载荷条件	静的载荷試験: 10分間载荷した状態で計測 動的载荷試験: 走行速度42回/分の条件下で5分間走行
試験温度	20℃

表-2 载荷試験の計測条件

	静的载荷試験	動的载荷試験
機能	BOTDA	DVS
距離分解能	2 cm	5 cm
サンプリング間隔	1 cm	5 cm
加算回数	2 ¹⁵	5000
Pump Power	26 dBm	100 Hz
Probe Power	0 dBm	26 dBm
掃引範囲	10.62 GHz-10.97 GHz	19375 GHz

ン信号の増幅を活用し、外部励起信号による誘導ブリルアン散乱現象を利用する。検知したブリルアン散乱光の周波数変化は、温度やひずみに比例する。散乱光の発生箇所は入力時と散乱光の検知の時間差は比例するので、図-2のように時間と周波数の空間で散乱光の信号を解析することによって、光ファイバの全長に渡ってひずみ分布を得ることができる。本研究では、密粒度アスファルト舗装（以下、アスファルト舗装）の静的特性の把握を目的に、ニューブレクス社製 BOTDA を使用して静的载荷計測を行った。

b) 分布型振動センシング

分布型振動センシング（DVS）は、光ファイバ内で発生するレイリー分散光を活かして、対象物のひずみや温度の変化を捉える計測方法である。レイリー散乱光は、従来の光に比べて小さい波長を持つ微粒子との相互作用で生じる現象である。レイリー散乱光により生じる光の位相差や振幅の変化を微小なレベルで捉えることで、アスファルト舗装の変化が検知可能となる。本研究では、アスファルト舗装の動的特性の把握を目的に、DVS を使用して動的载荷計測を行った。

c) エンボス型光ファイバ

本研究では、舗装体内での光ファイバの保護を目的に、図-3に示すニューブレクス社製エンボス型光ファイバ³⁾を使用した。エンボス被覆は、供試体内での滑りを防ぐだけでなく、長期耐熱性を有する特徴がある。また、被覆の内部には、2本の光ファイバ（青芯線・白芯線）が備わっており、供試体外部で両芯線を融着し光源からの光をループすることで、一つの供試体から2点の計測が可能となる。本研究では、計測点の確保と固定を目的に、エンボス型光ファイバを供試体に敷設した上で、アスファルト舗装供試体に対して载荷実験を実施した。

3. 実験方法

(1) ホイールトラッキングによる輪荷重载荷試験

実験では、寸法で厚さ 80mm, 幅 50mm, 長さ 400mm のアスファルト舗装供試体を作製した上で、供試体を試験用ゴム板と金属製押さえ板により上下面に固定した。その後、アスファルト舗装の耐流動性評価で使用されているホイールトラッキング試験機⁴⁾に供試体を設置し、輪荷重を载荷して静的载荷試験と動的载荷試験を実施した。実験の载荷条件を表-1に示す。

本研究では、供試体下部に擬似クラックを設けた供試体（以下、擬似クラック供試体）とクラックの無い供試体（以下、従来供試体）を作製し、供用時の劣化に伴うクラックの有無を光ファイバによる計測から分析することとした。

(2) 光ファイバの設置

供試体へのファイバの設置に際しては、供試体に深さ 250 mm, 幅 150 mm の溝を設けた上で、長さ 3 m のエンボス型光ファイバを車輪走行方向に敷設した。敷設では、計測誤差が生じないように、ファイバの両端を緊張させた上で敷設し、アスファルト系材料で充填した。

4. 計測条件

計測では、重さ 70 kg の輪荷重を供試体に静置させた後に静的载荷試験と動的载荷試験を実施した。静的载荷試験では輪荷重を 10 分間静止させて計測を行い、動的载荷試験では輪荷重を 60 秒間走行させて供試体に生じる分布ひずみを計測した。実施した計測条件を表-2に示す。

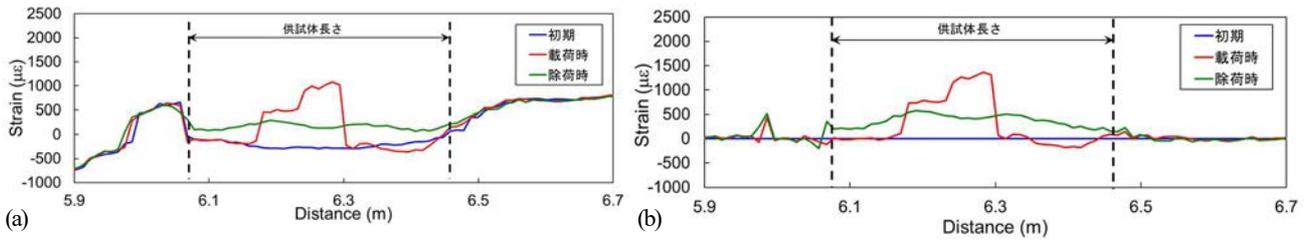


図-5 青芯線ファイバでのBOTDA計測結果 (a)計測値, (b)初期値を基本とした

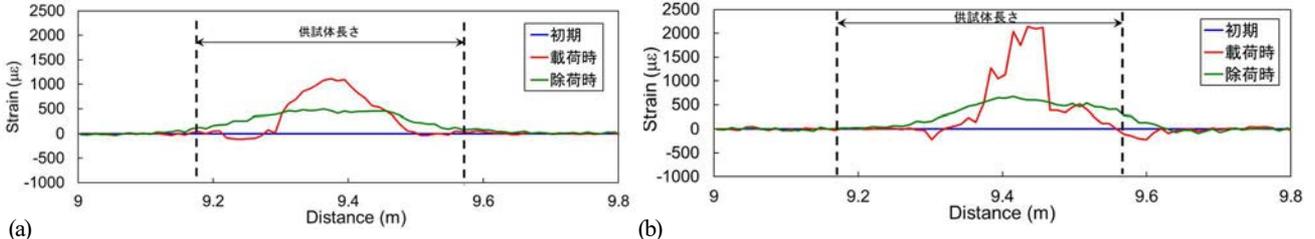


図-6 白芯線ファイバでのBOTDA計測結果 (初期値を基本に分析) (a)従来供試体, (b)擬似クラック供試体

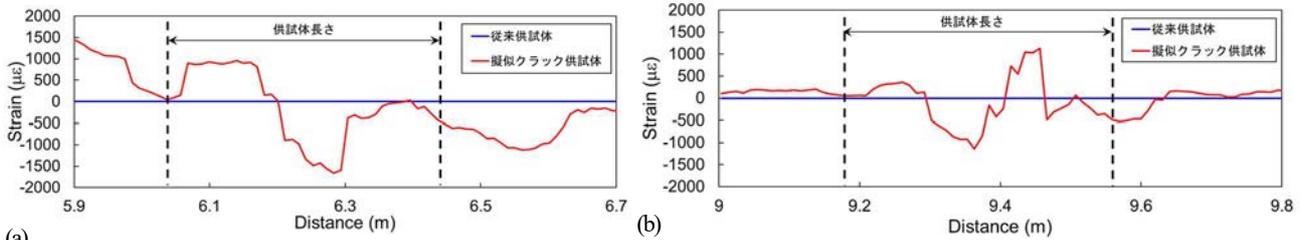


図-7 従来供試体と擬似クラック供試体の合成分析 (a)青芯線ファイバ, (b)白芯線ファイバ

5. 静的載荷試験によるBOTDA計測

(1) 従来供試体

アスファルト舗装供試体の荷重載荷時における縦断方向のひずみ分布特性を把握するため、BOTDAシステムにより静的載荷時のひずみ分布計測を実施した。

図-5(a)は、静的載荷前後のひずみ分布の計測結果である。試験では設置した青芯線のファイバから取得したひずみ分布を計測しており、アスファルト舗装の変形を捉えていることがわかる。特に荷重載荷時には、縦断方向に引張ひずみ(+)と圧縮ひずみ(-)が確認でき、光ファイバにより供試体の変形を捉えていることがわかる。また、荷重除荷時には、載荷前(初期)に比べてひずみが残っていることから、アスファルト舗装の残留ひずみを計測により捉えられていることも確認した。

図-5(b)は、載荷前の初期ひずみを基本とし計測を再整理した結果である。結果より、ファイバが供試体の変形を明確に示していることから、BOTDAにより載荷時のひずみ分布が計測できているといえる。

(2) 擬似クラック供試体

クラックの発生に伴うアスファルト舗装のひずみ分布を把握するため、擬似クラックを設けた供試体に対して静的載荷実験を実施した。

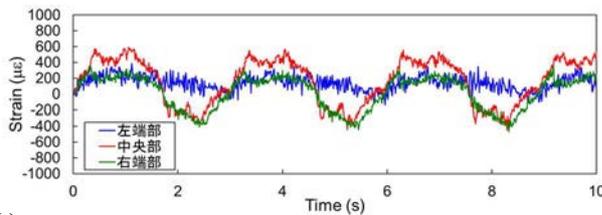
図-6は、擬似クラック供試体に対して実施した静的載荷試験の結果である。結果より、クラックの影響により、ひずみの分布形状が従来供試体に比べて変化してい

ることがわかる。従来供試体の最大引張ひずみが約 $1000\mu\epsilon$ で半楕円状に分布しているのに対して、擬似クラック供試体は最大引張ひずみが約 $2000\mu\epsilon$ となり、凸状に分布していることがわかる。このことは、実施した静的載荷に伴いクラック発生箇所上部に応力集中が発生し、ひずみが増加したものと推察される。この結果はアスファルト舗装のクラック発生が光ファイバで検知できることを示唆している。

(3) 従来供試体と擬似クラック供試体による合成分析

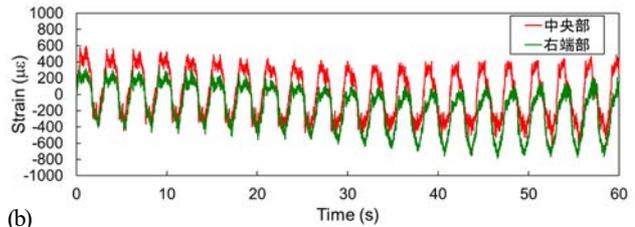
荷重載荷時のクラック発生前後ひずみ分布形状を検討するため、従来供試体と擬似クラック供試体の静的載荷試験結果を合成し、クラック発生に伴うひずみ分布の形状を分析した。検討結果を図-7に示す。

ここでは、従来供試体の載荷試験結果を基本とし、擬似クラックのひずみ分布を合成することで、クラック発生前後のひずみ分布を分析している。分析した結果より、青芯線と白芯線のひずみ分布形状が類似していることがわかる。青芯線では、左端部(引張ひずみ)から右端部(圧縮ひずみ)へとひずみ分布が生じているのに対して、白芯線では供試体の右端部(圧縮)から左端部(引張)へと分布が推移している。クラックの発生に伴い引張りひずみと圧縮ひずみが交互に分布していることから、クラック発生に伴い供試体内部で働く応力が変化しているといえる。このことから、光ファイバによるひずみ分布計測が、アスファルト舗装の擬似クラックによるひずみ分布の変化を詳細に捉えている。



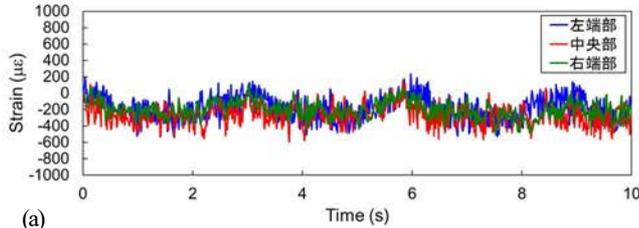
(a)

図-8 従来供試体の DVS 計測結果



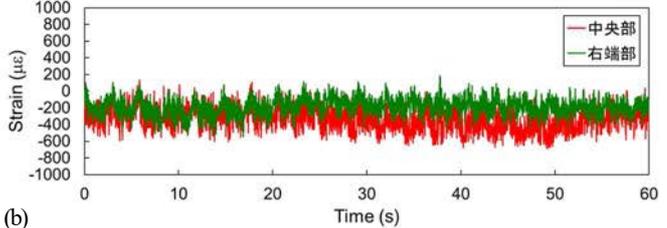
(b)

(a) 走行 10 秒後, (b) 走行 60 秒後



(a)

図-9 擬似クラック供試体の DVS 計測結果



(b)

(a) 走行 10 秒後, (b) 走行 60 秒後

6. 動的載荷試験による DVS 計測

(1) 従来供試体

本研究では、光ファイバでアスファルト舗装の動的特性を捉えるために、室内ホイールトラッキング試験を使用した動的載荷試験を実施した。

図-8(a)は、従来供試体に対して行ったファイバ青芯線での計測結果である。結果より、設置したファイバが供試体への動的載荷の様子を捉えていることがわかる。試験では供試体に輪荷重を載荷した後に車輪を前後に走行させており、走行に伴い供試体に引張ひずみと圧縮ひずみが繰り返し生じている様子が確認できる。供試体中央部のひずみが引張側で約 $600\mu\epsilon$ 、圧縮側で約 $400\mu\epsilon$ となり、左右端部では引張側で約 $200\mu\epsilon$ 、圧縮側で約 $400\mu\epsilon$ で推移している。

図-8(b)は、中央部と右端部に対して抽出した 60 秒間の計測結果である。結果より、走行輪荷重の経時変化に伴い、引張ひずみと圧縮ひずみが増加している様子がわかる。走行時間の経過と共に計測したひずみも変化しており、中央部と右端部の引張と圧縮のひずみ間隔も拡大している。このことはアスファルトが示す粘弾塑性特性に起因していると推察され、光ファイバがアスファルト舗装の挙動を詳細に捉えていることがわかる。

(2) 擬似クラック供試体

アスファルト舗装のクラック発生時の動的特性を捉えるため、光ファイバを設置した擬似クラック供試体に対して動的載荷試験を実施した。

図-9(a)は、擬似クラック供試体に対して行ったファイバ(青芯線)での計測結果である。結果より、従来供試体に比べて、擬似クラック供試体のひずみ分布が異なっている様子が確認できる。供試体から取得されたひずみは主に圧縮側で推移しており、輪荷重の走行に沿ってひずみが上下に変動している。この傾向は全箇所を確認で

きることから、擬似クラック供試体の特徴といえる。

図-9(b)は、中央部と右端部に対して抽出した 60 秒間の計測結果である。結果より、従来供試体と同様に、輪荷重の走行時間に伴いひずみが変動している様子がわかる。走行開始時は中央部と右端部でひずみが同様に変化しているのに対して、走行時間の経過に従い中央部と右端部とで計測したひずみ間隔が拡大している。特に中央部で圧縮ひずみが増加傾向にあることから、車輪走行時に擬似クラックに応力集中が生じて、ひずみが増加したものと推察する。

7. まとめ

本研究では、BOTDA と DVS システムを使用した上で、光ファイバによるアスファルト舗装のモニタリングの可能性を検討した。結果より、静的載荷試験と動的載荷試験で従来供試体と擬似クラック供試体のひずみ分布に差異があることを確認した。このため、光ファイバを活用することで、アスファルト舗装の供用時における変状等のモニタリングが期待できるといえる。今後は、屋外等で更なる検討を重ねて、光ファイバによるモニタリングの信頼性を向上させたい。

参考文献

- 1) 三木千壽, 古東佑一, 佐々木栄一, 齋藤一成, 石川祐治: 光ファイバセンサシステムを用いた都市高速道路橋の長期継続モニタリング, pp.416-428, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol.71, No.3, 2015.
- 2) Kechavarzi, C., Soga, K., Battista, N., Pelecanos, L., Elshafie, and Mair, R. :Distributed Fiber Optic Strain Sensing for Monitoring Civil Infrastructure, pp.11-30, 2016.
- 3) ニューブレクス:エンボス型センサケーブル
<<https://www.neubrex.jp/htm/products/pro-fiber.htm>>
(入手 2021.06.14).
- 4) 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, B003 ホイールトラッキング試験方法, pp.44-64, 2019.