

螺旋状の形状を持つ光ファイバの入射弾性波に対する応答

三ヶ田 均*・武川順一**1・亀井志織***

1. 研究の目的

近年、ジオフォンなどのセンサの設置によるある点における測定をアレーとして取得する方法ではなく、新たなデータ取得技術として光ファイバを用いる分散型光ファイバセンシング (Distributed Fiber-Optic Sensing: DFOS) あるいは DxS (Distributed x Sensing: DxS) と呼ばれるデータの取得方法に注目が集まっている。予てより DTS (Distributed Temperature Sensing) による分散型温度測定が実用化されていた (Hartog, 2017) が、この 20 年ほどの間に地震波を検知するジオフォンの代わりに分散型音響センシング (Distributed Acoustic Sensing: DAS) を用い、これまでの地震探査に比較し極めて安価にデータを取得する試みが注目を集めている。DAS とは地中に埋設された光ファイバに送られたパルス波のレイリー後方散乱を用いる OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) を用い、光ファイバ内に発生した歪を検出する技術であり、信号伝達を担う光ファイバそのもののセンサとして機能する。本研究では、この技術の高度化を果たすため、平均化範囲内での入射する地震波の到着時間差すなわち位相差を考慮し、歪テンソルを推定する方法を新たに考案した。地中を伝播する地震波が光ファイバ上の各点に到達する時間差を考慮した平均化式を構築した。平均化範囲、地震波の入射角、物性コントラストを変えて歪テンソルを推定し、提案手法の妥当性を検証した。

2. 研究の方法

螺旋状もしくは直線状の光ファイバを内部に有するケーブルを地中に敷設する状況を考える。地中を伝播する地震波がケーブルに入射するとき、ケーブルを伝わる波と散乱波が新たに生じる。ポアホールに地震波が入射した際の波動伝播については Schoenberg (1986) らによって議論がなされており、今回はその内部の流体を固体に置き換えて議論を行う。

光ファイバの長軸方向に歪の平均化を行う範囲が m 個のゲージ長によって区切られているとする。このとき、まずゲージ長内で平均化された歪が元データとして計測され、その後平均化範囲内の各セグメントで得られた歪を用いて、歪 6 成分が推定される。光ファイバに沿った距離を l 、 j 番目のセグメントにおける平均化された歪データ \tilde{d}_j は各点における歪データ d に以下のような処理を施して得られる (j は 1 から m までの整数)。

$$\tilde{d}_j = \frac{1}{l_{2,j} - l_{1,j}} \int_{l_{1,j}}^{l_{2,j}} d(l) dl$$

このとき、DAS は光ファイバの軸方向歪のみを完治するため、ある方位角 θ における歪 $\varepsilon_f(\theta)$ は、歪 6 成分を用い次式で示される。

$$\varepsilon_f(\theta) = \begin{pmatrix} b_x^2 & b_y^2 & b_z^2 & 2b_x b_y & 2b_y b_z & 2b_z b_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{pmatrix}$$

但し、

$$\mathbf{b}(\theta) = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \varphi \sin \theta \\ \cos \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$$

である。但し φ は、ファイバの円筒表面上のピッチ角である。

*京都大学大学・教授, **同・准教授, ***同・教務補佐

これを用い、6箇所以上で $\varepsilon_f(\theta)$ を推定すれば、歪の6成分を推定することが可能となる。また、地震波の入射方向を加味すると、 $\varepsilon_f(\theta)$ における到着時間差を処理に取り込むことが可能となる。地震波を正弦波と仮定しモデル計算を行った結果、図1に見られるように、複数の m に対する歪が推定される。 M が異なることで、空間上の歪を計測する位置も異なるため、これを補正すると図2のようになる。

DASの計測では複数の m に対して得られた歪分布をそのまま平均化する処理が行われるため、位相を補正することなく計測結果を求めてしまうと、受振した地震波の周波数が低周波側にシフトするだけでなく時間的な位相誤差が発生することとなる。

3. 得られた成果

本研究では、螺旋状・直線状の光ファイバを組み合わせたケーブルによる歪の計測結果から、地盤を伝播する地震波の歪テンソル6成分を推定することを試みた。地震波の到達時間差を考慮した歪平均化手法を新たに考案し、従来の手法との精度の比較をおこなった。P波、SV波、SH波のすべてにおいてより高い精度で歪6成分を推定できることが示され、この方法が有効であることが分かった。

4. 謝辞

本研究は、株式会社地球科学総合研究所から受託した。この実施にご尽力いただいた、浅川栄一氏、青木直史氏をはじめとする関係諸氏に厚くお礼申し上げる。

発表論文

Takekawa, J., Mikada, H., Xu, S., Uno, M., Kamei, S., Kishida, K., Azuma, D., Aoyanagi, M., Tanaka, N., and Ichikawa, H. (2022), A new DAS sensor prototype for multicomponent seismic data, "The Leading Edge, 41, 338-346. <https://doi.org/10.1190/tle41050338.1>

参考文献

Hartog, Arthur H. (2017). An introduction to distributed optical fibre sensors. Boca Raton. ISBN 978-1-138-08269-4.
 Schoenberg, M., 1986, Fluid and solid motion in the neighborhood of a fluid-filled borehole due to the passage of a low-frequency elastic plane wave, *Geophysics*, 51 (6), 1191-1205.

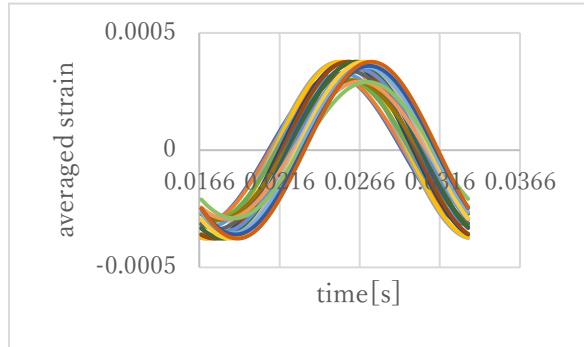


図1：異なる m に対する歪分布

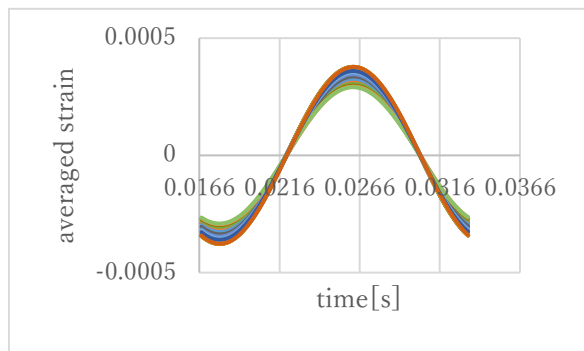


図2 到着時間差分を補正した歪分布