

分布型光ファイバ圧力センサの開発に向けた加圧試験による検討

鹿島建設(株) 正会員 ○平野裕之 藤原航太郎 今井道男
(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 川久保政洋 市川恭子 宇田俊秋

1. はじめに

地層処分施設の坑道の埋め戻し施工後に坑道と埋め戻し材の界面に隙間が発生する可能性がある。これに対し、埋め戻し材に含まれるベントナイトに期待される膨潤・閉塞の状況確認手段として、埋め戻し材の膨潤により生じた圧力とその分布状況を把握する技術の開発が進められている¹⁾。ひずみや温度の分布計測に適用されている分布型光ファイバセンサを、圧力計測にも活用できるかを確認するため、光ファイバに圧力を加えて計測値への影響を確認する加圧試験を実施し、解析の結果と比較して圧力計測のメカニズムの解明を試みた。

2. 加圧試験の目的（分布型光ファイバ圧力センサとその成立条件）

光ファイバを通過する光の散乱スペクトルが光ファイバのひずみや温度の影響で周波数シフトする特性を利用し、光ファイバそのものをひずみや温度のセンサとする分布型光ファイバセンサの活用が進んでいる²⁾。光ファイバ計測技術の向上により微小な周波数シフトの計測が可能となり、ひずみや温度だけでなく圧力の変化にも感度があるとの報告がされている³⁾。圧力検知のメカニズムとして、被覆材を介した石英ガラスの軸方向のひずみ変化（力学効果）や屈折率の変化（光学効果）などがその要因として検討されているが、その詳細は明確ではない。

光ファイバの圧力感度を利用して膨潤により生じた圧力を計測すると、ひずみや温度の成分も含まれてしまう。これらは、被覆条件の異なる2本の光ファイバを同一環境に敷設して同時に光ファイバ計測を行い、周波数シフトの差分を取ることで相殺できる可能性があり（図-1）、そのためには圧力による成分がひずみや温度と独立である必要がある。そこで、筆者らは、①被覆条件が異なる複数の光ファイバ試料を加圧して周波数シフトへの影響を確認する試験と、②光ファイバの圧力による変形（ひずみ）を再現する解析を行い、両者を比較してメカニズムの検討を行った。以下では主に①の結果について報告する。なお、本研究では、光ファイバにはシングルモード光ファイバを、光ファイバ計測にはレイリー散乱光を分析する Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry（TW-COTDR）方式を用いた。

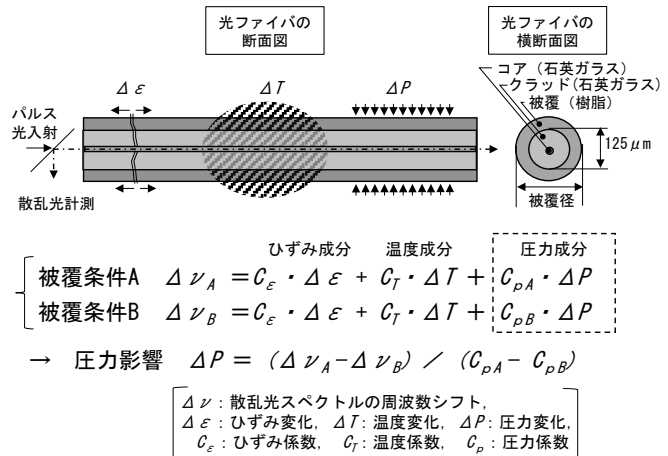


図-1 分布型光ファイバ圧力センサの考え方

3. 加圧試験の概要

加圧試験装置の概要を図-2に示す。内径110mm、高さ1,000mm、厚さ15mmの亚克力製の耐圧容器にシリンジポンプで精製水を送水し、流量制御により圧力を調整・保持した。光ファイバは耐圧容器上蓋の貫通孔を介して耐圧容器の底まで垂らし、貫通孔と光ファイバの隙間は接着剤で止水した。圧力に対する周波数シフトの応答を得るため、0.1MPa刻みで最大1.0MPaまで昇圧し、その後段階的に降圧させた。なお、水圧を調整した直後は、値が安定したことを確認してから計測を行った。試験装置は恒温槽内に設置し、温度を20±0.1℃に保った環境中で試験を行った。

加圧試験には、被覆条件が異なる4種類の光ファイバ（被覆径φ0.15mm、φ0.25mm、φ0.50mm、φ0.90mm；クラッド径0.125mm共通）を用いた。光ファイバ計測は5cmの空間分解能を有するが、耐圧容器中央位

キーワード 地層処分施設, 埋め戻し, 光ファイバ, 分布型圧力センサ

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-485-1111

置のデータで代表させて水圧との関係を確認した。

4. 結果と考察

水圧と周波数シフトの関係を図-3に示す。全ての光ファイバで周波数シフトが水圧に比例する傾向が確認された。また、被覆径が太い程、水圧に対する感度が高くなる傾向であった。最も水圧への感度が高かった被覆径 $\phi 0.90\text{mm}$ の圧力係数(図-1内の C_p に相当)は約 5.4GHz/MPa であった。

これらの結果は、水圧が被覆材を介して石英ガラスへ伝わる際に、被覆の条件によって石英ガラスへ伝わる力が異なることを示している。被覆径 $\phi 0.90\text{mm}$ と他の被覆径の結果が大きく異なった理由は、被覆材の厚さや材料物性の違いと考えられる。

水圧 0.1MPa における周波数シフトの試験値をひずみに換算した値は約 $-5\mu\epsilon$ であった。水圧による光ファイバのひずみをFEM解析で算出した結果⁴⁾は軸方向ひずみが支配的であったため(表-1)、水圧による周波数シフトは、軸ひずみ(力学効果)の寄与が最大の成分で、屈折率変化(光学効果)などによる影響は二次的な要因と考えられる。

5. まとめ

分布型光ファイバセンサによる圧力検知のメカニズムの解明を実験的に行った結果、水圧による周波数シフトへの影響は軸方向ひずみが支配的であることが確認された。また、圧力だけを変化させて周波数シフトが生じたことから圧力はひずみや温度と独立である。このことから、2本の光ファイバの差分をとって圧力成分を検知できることや分布型光ファイバ圧力センサ(図-1)の設計に資する知見を得ることができた。実際の埋め戻し材の膨潤により生じた圧力の計測では、今回の試験とは異なる圧力状態が予想されることから、引き続き実用化に向けた実験的、解析的な取組みを進めていくことが望まれる。

謝辞: 本報告は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業「令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業【JPJ007597】(地層処分施設閉鎖技術確証試験)」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書, 2022.
- 2) 保立ら: 光ファイバセンサ入門, 光防災センシング振興協会, 2021.
- 3) Luca Schenato, et al.: Distributed optical fiber pressure sensors, Optical. fiber technology., vol.58, 2020.
- 4) 藤原ら: 光ファイバによる圧力分布の計測技術の開発に向けた解析的検討, 土木学会第77回年次学術講演会, 2022(投稿中).

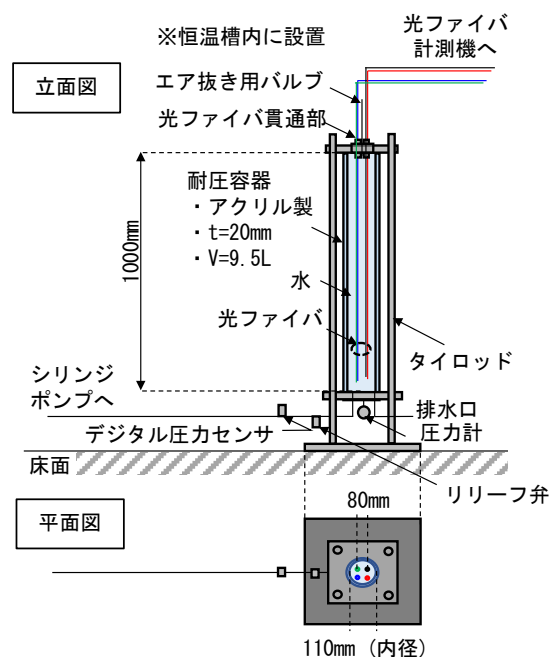


図-2 水圧式加圧試験の概要

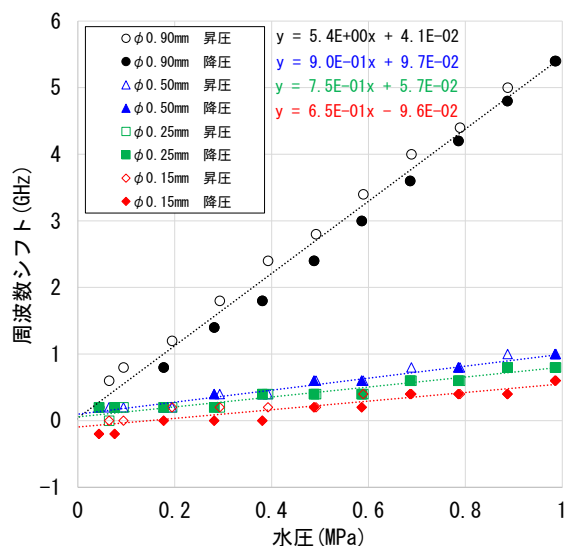


図-3 加圧試験結果

表-1 試験値と解析値の比較

ひずみ($\mu\epsilon$) の成分	光ファイバ被覆径 $\phi 0.90\text{mm}$, 水圧: 0.1MPa	
	実験値	解析値
軸方向 ϵ_{zg}	-5	-6.65
効果	力学・光学	力学のみ