SDH-BOTDR 方式を用いた PE 管光ファイバセンサの地上曲げ実験

摂南大学　　正会員　○片桐　信
沖電気工業　　非会員　　村井　仁

１．はじめに

著者らは，高密度ポリエチレン管（以下「PE 管」）の外表面長手方向に光ファイバを実装した「PE 管光ファイバセンサ」[1]（**写真-1**）を用いた地盤変位計測法 [1),2)] について研究を進めてきた．これまでは FBG（Fiber Bragg Grating）[3)]方式を採用し，PE 管の円周方向左右に光ファイバを実装したセンサを試作し，これに埋設状態を模擬した状態で水平方向変位を与える実験装置を用いて，PE 管の検出曲げひずみ分布を積分することで，PE 管の水平方向変位分布を精度良く算定できることを実証してきた [2)]．しかし，FBG 方式では光ファイバに回折格子の加工を行った部分でしかひずみ計測ができず，その加工費用も高価であり長手方向への多点計測を行う事に実用上の課題があった．そこで，本研究では，近年開発された SDH-BOTDR（Self-delayed Heterodyne Brillouin Optical-fiber Time Domain Reflectometer）[4)]方式を用いた再実験を行い，変位計測の精度について検証したので報告する．

２．SDH-BOTDR 方式について

光ファイバ中で発生するブリルアン散乱光(BS 光)は，歪・温度変化に比例して周波数が変化する性質を有する．ブリルアン光時間領域反射測定(BOTDR)は，光ファイバの長手方向に沿って BS 光の周波数変化を測定するものであり，歪や温度の分布を測る有効な手法である．

一般的な BOTDR では，光ファイバにパルス光を入力し，反射光として BS 光が入射端に戻ってくる時間から反射(散乱)点の位置を特定し，周波数スペクトル解析により計測した BS 光周波数変化を歪や温度に換算する．しかしながら，BS 光は微弱であり，その周波数変化も非常に小さいため(～0.05 MHz/με)，高精度な分布測定には充分な平均化と精密な周波数解析が不可欠となる．このため，測定に数分の時間を要することもあり BOTDR の適用領域を制限する要因の一つとなっている．本検討では，より高速な測定を可能にする自己遅延ヘテロダイン(Self-delayed heterodyne：SDH)BOTDR 方式 [4)]を適用した．SDH-BOTDR 方式は，周波数変化に伴う BS 光の位相変化を自己遅延ヘテロダイン法により検出し，その時間微分から自然 BS 光の周波数変化を算出する．一般的な BOTDR に比べ，周波数解析に必要な周波数掃引プロセスを省くことができ，同等の測定精度（歪測定精度±20με）における計測時間を大幅に短縮することが可能である(＜10 秒)．装置構成を**図-1** に示す．

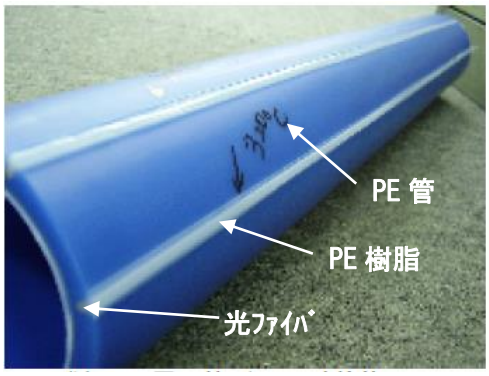

写真-1　PE 管光ファイバセンサ

３．実験方法

実験装置の概要を**写真-2** に示す．円周方向左右の長手方向に光ファイバを実装した PE 管を摩擦の少ない台座上に水平に設置する．PE 管の両端は，治具で固定支持されている．管は，埋設状態を模擬するために固定台と可動台にそれぞれ地盤ばね [5)]を想定した鋼製ばねにより接続されている．この状態で中央の可動台に油圧ジャッキで水平方向変位を与える事で，段差状の地盤変位を受ける状態を再現する．

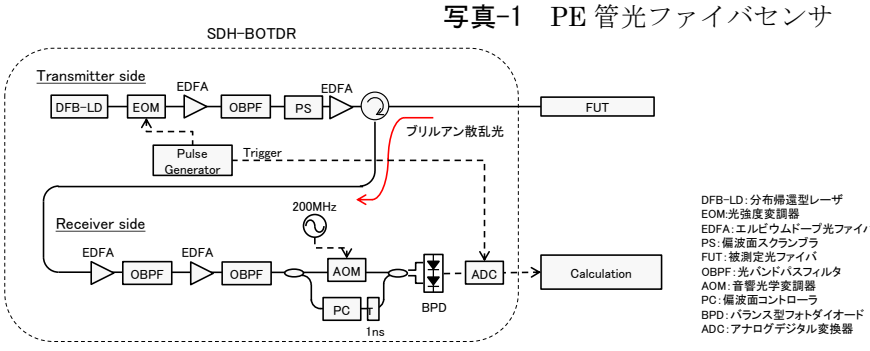

図-1　SDH-BOTDR の装置構成

キーワード：SDH-BOTDR，光ファイバセンサ，地盤変形，モニタリング，PE 管
連絡先：〒572-8508 寝屋川市池田中町 17 番 8 号，摂南大学理工学部都市環境工学科，shin-k@civ.setsunan.ac.jp

実験は，この段差変位実験（実験-1）と鋼製ばねとの連結を外し，管の中央に集中変位を与える実験（実験-2）の 2 種類を行った．管には，光ファイバに沿ってひずみゲージを貼付し，ファイバからの検出ひずみとの比較を行った．また，**写真-2** に記すように水平方向変位を合計 9 台のワイヤー式変位計により計測している．

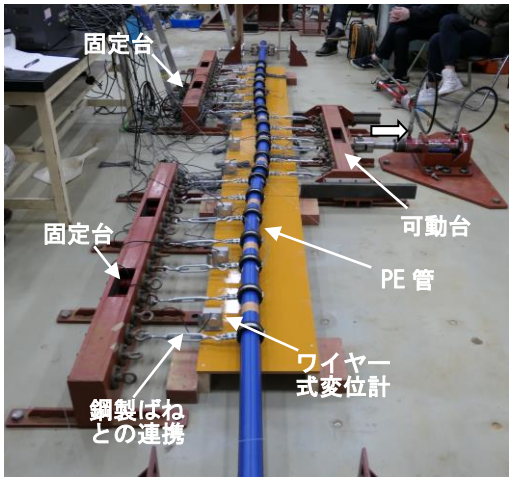

写真-2 実験状況全景

4．実験結果

SDH-BOTDR により計測された曲げひずみを PE 管長手方向に積分（中心差分を応用）することで算出した水平方向変位量（積分値）と，ワイヤー式変位計で計測した変位量の比較を行った．

埋設状態を模擬して，段差状の変位を与えた実験-1 の場合の変位分布比較を**図-2** に示す．ワイヤー式変位計による計測変位は，長手方向±0.5m 位置を境に段差状の変位に対応した計測値を示している．SDH-BOTDR ひずみ計測値から積分した変位分布は，ワイヤー式変位計の計測値の中間的な値を算出している．現状の SDH-BOTDR 方式の分解能は 1.0m である．データとして 80mm 毎の値を出力しているが，これは出力点を中心とした前後±0.5m 間の平均的ひずみに相当しており，本実験のように局所的に変位の変化点が現れるような現象には完全には追従出来ないと考えられる．しかしながら，図中の〇で記した箇所のようにマイナス方向への変位を算出している事から，変位分布の曲線形状より，ある程度段差状の地盤変位の発生を検知することが出来る可能性がある．

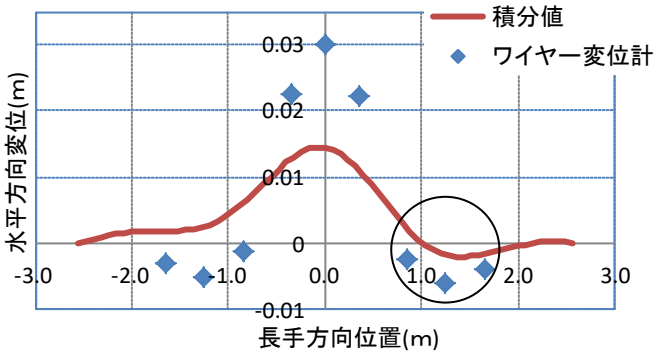

図-2 段差変位実験の水平変位分布（実験-1）

一方，**図-3** に示すように両端固定で中央に集中変位を与えた実験においては，ワイヤー式変位計と SDH-BOTDR 方式からの変位算出値は精度良く一致している．この傾向は，変位量が 6mm程度の段階から現れており，微小な変位量でも精度良く計測することが出来る性能を有していると考えられる．

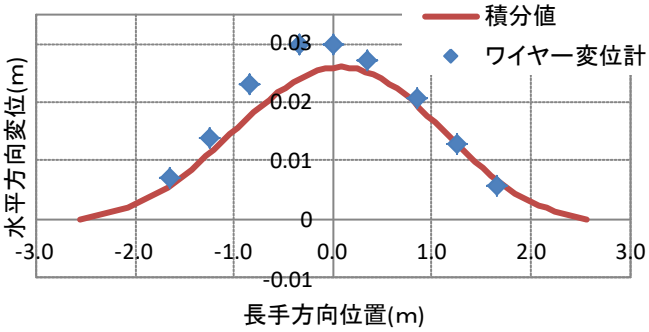

図-3 中央集中変位実験の水平変位分布（実験-2）

5．おわりに

今後は，本提案法を地盤変状量分布のリアルタイム・モニタリングに適用すべく，実用化を見据えた研究開発を推進する所存である．主な用途としては，①工事に伴い変化する地盤変位のモニタリング，②地震後の地盤永久変位分布の計測および③地盤災害の予兆を把握するための微小変位のモニタリングなどである．また，計測器の分解能が高くなれば，実験-1 のような段差状の地盤変位についても，その計測精度は向上するであろう．

参考文献

1) 中野雅弘，片桐　信，奥野正富：地盤変形観測のための PE 管光ファイバセンサの開発，土木情報利用技術論文集，vol.17，2008.11.

2) 片桐　信，山中広大：地盤永久変位を想定した PE 管光ファイバセンサの地上曲げ実験，摂南大学融合科学研究所論文集，第 1 巻，第 1 号，2015.10.

3) 日本ナショナルインスツルメンツ株式会社ホームページ：http://www.ni.com/white-paper/11821/ja/

4) 小泉他，電子情報通信学会総合大会，B-13-9，2016.

5) (社) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針