

地表に設置された光ファイバを用いた地下空洞探査試験(その2)

-2 次元計測された常時微動の活用-

ニューブレクス(株) 正会員 ○岸田 欣増, 非会員 東 大治, 正会員 山内 良昭, フェロー 三輪 滋
神戸大学 正会員 鉄田 泰子

1. はじめに

道路陥没や地盤内の空洞検知の手法として前報では反射法を試みたが、深度 10m 程度の比較的深い位置にある空洞の検出は困難であるとの結論に至った。ここでは、地表に 2 次元的に配置した光ファイバによる DAS 常時微動計測を利用した地下空洞探査の試みについて報告する。

2. 試験およびデータ処理の概要

試験配置は、前報(その1)の図-1に示した。地下トンネルは幅約 2m、高さ約 2m の馬蹄形断面で地表面下約 10m に位置している。地表にトンネルを横切るように 5 条、3 種類の光ファイバラインを敷設した。現場の右側方近傍に幹線道路があり、夜でもそこそこの交通量がある。使用した光ファイバ、DAS 計測装置および計測設定についても前報と同様である。

夜間に 9 時間にわたり DAS により常時微動を連続計測した。ひずみ計測用エンボスケーブルの Line 1 上の代表点での 30 秒間の微動信号の記録例を図-1に示した。30 秒間の時間窓に対し Welch 手法 (窓幅 4096 点, 重複 1024 点) により、周波数スペクトルを算出し、1723 本のデータについて平均をとった結果を図-2に示した。次に、各周波数における中央値との差を算出し、異常が顕著な Negative 成分を異常指標 (Anomaly Index) として各ラインの結果を図-3にまとめて示した。提案した異常指標の極小値を異常点とすれば、その点が各ラインに一カ所しかないことから、この位置が空洞を表していることが明らかである。異常指標を 2 次元に配列し、計測ライン間で補間した結果を図-4に示した。この結果から、地下空洞の位置を 2 次元的に検出できていることがわかる。

図-3において異常点近傍の波形の半値幅を用いて空洞の幅を定義したところ 3m となった。この値は実際の空洞の幅と DAS の分解能 1m の和に合致している。なお、空間分解能を変えて解析を行ったところ、DAS の分解能が 1m より長くなると上述の結果を得るのが困難になることがわかった。

図-5には Line 1 上の左端を参照点とした地震波相関図を、図-6には分散特性を示す。S 波速度 V_s は 228m/s と特定できた。さらに、空洞位置の共振周波数 f を推定したところ $f=6.1$ Hz であった。下式を用いて空洞の深さ H を推定すると $H=9.3$ m となり、真値とよく一致していることがわかった。

$$H \approx \frac{V_s}{4f} = \frac{228}{4 \times 6.1} = 9.3 \text{ m}$$

以上の解析法は著者らのオリジナルの手法であり、局所共振解析法と命名する。

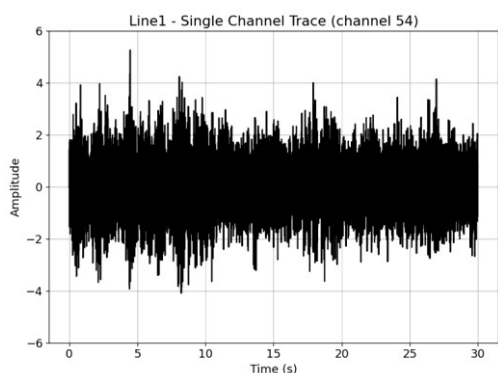


図-1 微動信号の時系列の例

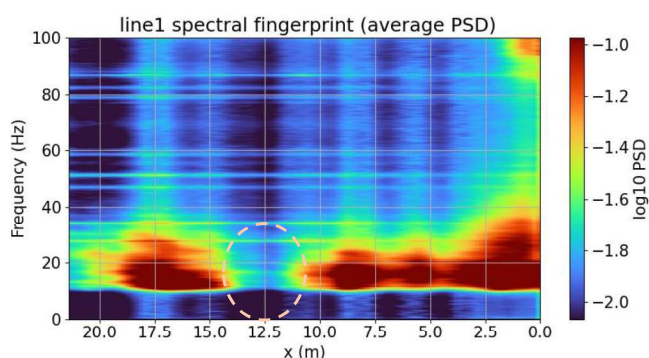


図-2 Line 1 における振動スペクトル

キーワード DAS, 地下空洞探査, 常時微動, 地震波干渉法
連絡先 〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1 丁目 1-24
ニューブレクス株式会社 TEL 078-335-3510

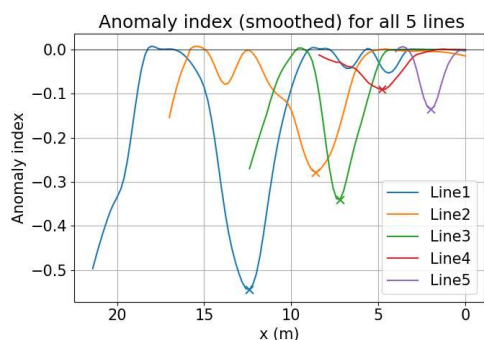


図-3 各計測ライン上の異常指標の分布

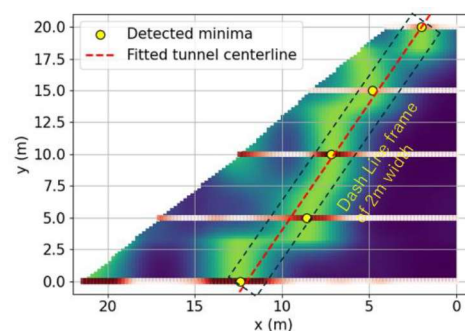


図-4 異常指標の2次元分布と空洞の関連

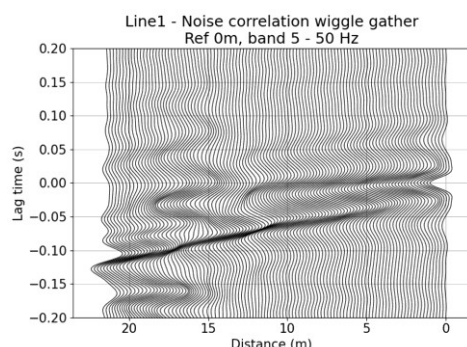


図-5 Line 1 左端を参照点とした地震波相関図

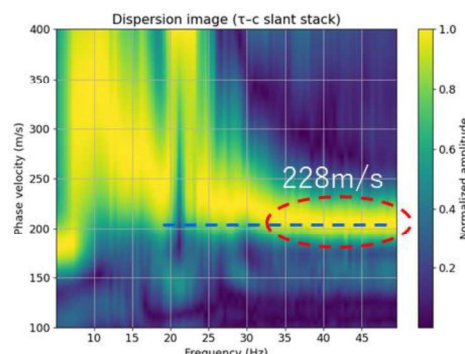


図-6 分布特性およびS波速度

図-7にはダークファイバによる計測(左), 隣り合う2ライン間(中央), および空間分解能 5m(右)の地震波相関図を示す。ダークファイバでの相関図にはカップリング効果によるノイズがあるものの、有効な信号が得られている(左図)。光ファイバと垂直方向の計測ライン間の相関も有効であることは、これまでの DAS 計測の定説の再考を促す結果となっている(中央図)。空間分解能が不足すると空洞位置に見られる信号が失われている(右図)。

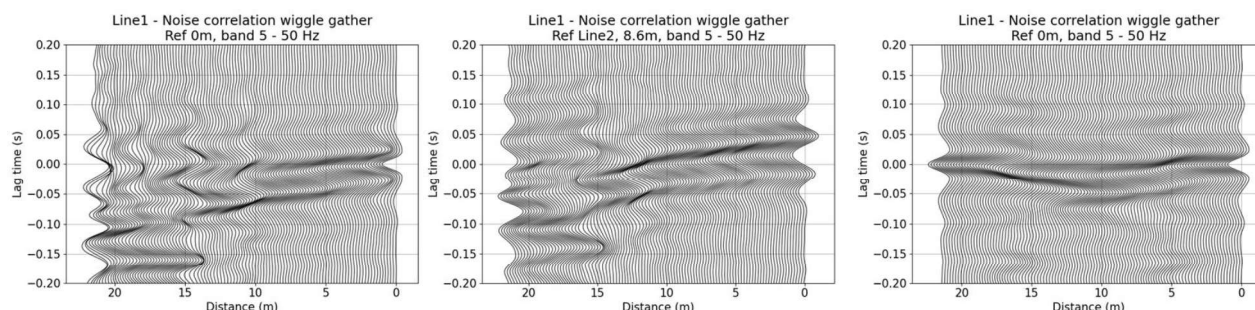


図-7 地震波相関法の解析例 左：ダークファイバ, 中：隣り合う2ライン間 右：空間分解能 5m (Line1)

3. まとめ

上述の結果を踏まえて以下の知見を得た。① 2次元配置された光ファイバにより微動信号を高品質で測定し、提案した手法により地下空洞を検知することに成功した。②幅 2m 程度の地下空洞を検知するためには、DAS 計測において 1m 以下の高空間分解能が必要である。③専用光ケーブル、光ファイバ芯線、およびダークファイバで計測信号の SN 比に差があるもののいずれのファイバでも有効な計測は可能であった。④特にファイバ芯線は廉価でかつ施工も容易であるために実用的な価値が高い。

地震波干渉法に基づく解析において、鮮やかな局所弾性波特性が観測された。今後は、逆解析を用いた新規解析手法の開発を目指す。

参考文献

1. Cheng, F., Ajo-Franklin, J. B., & Rodriguez Tribaldos, V. (2023). High-resolution near-surface imaging at the basin scale using dark fiber and distributed acoustic sensing: Toward side effect estimation in urban environments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2023JB026957.