工事振動を利用したトンネル切羽前方探査の適用可能性に関する実験的検討

Experimental Study on Geological Prediction Ahead of a Tunnel Face Using Construction-Induced Vibrations

程塚　保行*1，大田　有夏*1，仲　哲路*2，鎌田　修司*3
YASUYUKI HODOTSUKA, YUKA OTA, TETSUJI NAKA, SHUJI KAMATA

山岳トンネル工事の自動化・遠隔化に向けて，トンネル工事に伴う振動を利用した微動アレー探査による切羽前方探査の適用可能性を検討した。まず，堆積岩地山を対象とした三次元 FEM 動的解析を実施し，空間自己相関法および Neighborhood Algorithm（NA）法により切羽前方の S 波速度構造を推定した。その結果，推定結果は解析モデルの断層位置および S 波速度構造とおおむね一致し，本手法の理論的適用可能性が確認された。さらに，施工中のトンネルにおいてロックボルト打設時の削孔振動を遠隔計測し，同様の解析を行った結果，切羽前方約 10 m 先までの低速度領域を検出した。以上より，工事振動を利用した微動アレー探査は，トンネル切羽前方探査の遠隔化に有効な手法となる可能性が示された。

キーワード：トンネル切羽前方探査，微動アレー探査，FEM 解析，山岳トンネル

To support the automation and remote operation of mountain tunnel construction, this study investigated the applicability of microtremor array exploration using construction-induced vibrations for geological prediction ahead of a tunnel face. First, three-dimensional FEM dynamic analyses were conducted for a sedimentary rock mass, and the S-wave velocity structure ahead of the tunnel face was estimated using the spatial autocorrelation (SPAC) method and the Neighborhood Algorithm (NA). The estimated results were generally consistent with the fault location and S-wave velocity structure defined in the numerical model, confirming the theoretical applicability of the proposed method. Subsequently, field measurements were carried out during rock bolt installation in an operating tunnel. The analysis identified a low-velocity zone extending approximately 10 meters ahead of the tunnel face. These results demonstrate that microtremor array exploration using construction-induced vibrations has potential to serve as an effective method for the remote investigation of geological conditions ahead of a tunnel face.

Keywords: Prediction ahead of a tunnel face, Microtremor array survey, FEM analysis, Mountain tunnel

1. はじめに

山岳トンネルは，地山の工学的諸性質を類型化した地山分類に基づいて設計される。近年，山岳トンネル工事では，熟練技術者不足への対応を目的として施工の自動化が進められている。また，切羽の肌落ち災害を防止し作業員の安全性を向上させることを目的として，施工の遠隔化が推進されている。一方，既存の切羽前方探査技術には，多大な時間や費用を要するものや，切羽直下での作業を必要とするものが多く，安全性や施工性の面で課題がある。そのため，簡便かつ迅速に結果が得られる探査技術が求められている。

微動アレー探査法は，地表に複数の受振点を配置して常時微動を計測し，比較的簡易な解析を行うことで，深

*1 技術研究所技術開発推進部
*2 広島支店土木部俵山第 2 トンネル作業所
*3 土木事業本部土木技術部

度 100 m 以深を含む地山の硬軟に関する情報，すなわち弾性波 S 波速度を取得できる手法である。太田ほか(2024)[1]は，建設中の山岳トンネル坑道上に受振点を配置して微動アレー探査を実施し，空間自己相関法を用いた解析により地山の硬軟把握についておおむね良好な結果を得ている。この微動アレー探査法を水平方向の切羽前方探査に応用し，トンネル掘削工事の施工中に発生する工事振動を振動源として利用し，レーザードップラー振動計を用いて遠方から非接触で切羽の微振動を測定する技術として開発することができれば，切羽直下でのセンサーや計測機器類の設置が不要となる。これにより，現場の人員で安価かつ安全に切羽前方の地質状況の把握が可能となり，工事工程への影響が少ないトンネル切羽前方探査が期待できる。

本報では，山岳トンネルにおける微動アレー探査の基礎的検討として，施工中のトンネルを模擬した単純な解析モデルを用い，トンネル工事に伴う振動の三次元 FEM 動的解析 [2] を実施した。これにより，トンネル切羽における微動アレー探査の理論的適用可能性を検証した。さらに，切羽前方探査の遠隔化に資する基礎的実験として，トンネル工事に伴う振動を利用した切羽前方探査実験 [3] を実施し，その適用可能性について検討した。

2. 三次元動的解析による工事振動を利用した切羽前方探査の適用性検証

微動アレー探査法は，主に堆積層の S 波速度構造の推定を目的として適用されてきた実績を有する。そのため，本報では適用性検証の初期段階として，まず堆積岩地山を対象とした解析モデルを設定し，FEM による動的解析を実施した。FEM 解析に用いた解析モデルを**図-1** に，解析モデルの岩盤物性を**表-1** に示す。解析モデルは，砂岩の上層に泥岩が被覆し，トンネル切羽前方 15 m に鉛直な断層が分布する条件とした。解析領域は一辺 100 m の立方体とし，その中央部の**図-1** に示す Y=0～50 m の範囲に半径 5 m のトンネル部を設定した。入力した加振波形を**図-2** に示す。加振波形はロックボルトの打設時の削孔機械の回転打撃振動を模擬したランダム波形とし，削孔エネルギー300 MN/m²を基準として設定した。加振点および受振点の配置を**図-3** に示す。加振点は，ロックボルトの打設を模擬し，切羽から Y 方向へ -5 m の位置にあるトンネル側面上に 17° 間隔で 12 点配置した。受振点は，切羽中心に 1 点配置するとともに，中心点と加振点を結ぶ半径 4 m の切羽面上に 12 点配置した。加振方向はトンネル側面に直交する方向とし，切羽に向かって反時計回りの順に加振を与えた。切羽前方探査には，切羽面に垂直な Y 方向成分の速度振幅波形を用いた。受振波形を**図-4** に示す。加振が順に与えられ，それぞれの振動が伝播して重なり合うことにより，受振波形の振幅が時間の経過とともに増大する傾向が確認された。受振波形のパワースペクトルを**図-5** に示す。150～350 Hz の範囲でパワースペクトルの振幅が大きく，300 Hz 付近にスペクトルのピークが認められた。

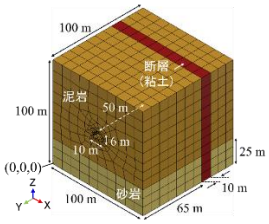


図-1 解析モデル

表-1 解析モデルの物性値

岩盤物性	単位	砂岩	泥岩	断層
P 波速度	m/s	2,290	1,740	1,720
S 波速度	m/s	1,330	650	342
飽和密度	kg/m³	2,310	1,710	1,800

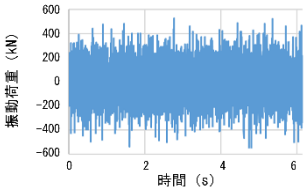


図-2 加振波形

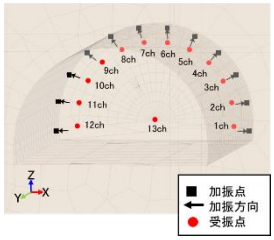


図-3 加振点および受振点

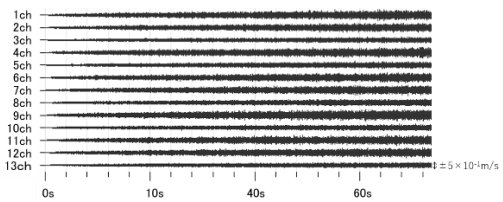


図-4 受振波形

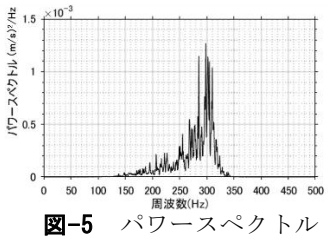


図-5 パワースペクトル

切羽前方探査のデータ処理には，微動アレー探査法の解析手法として一般的に用いられる空間自己相関法を適用した。この手法では，アレー中心点と各円周点間の複素コヒーレンス関数の実部を求め，その全周平均，すなわち方位平均値から空間自己相関係数を算出する。受振波形から得られた空間自己相関係数を**図-6** に示す。**図-5** においてパワースペクトルの振幅が大きかった 150～350 Hz の範囲では空間自己相関係数が小さく，空間自己相関法による解析に有効な周波数範囲は 5～100 Hz であった。この周波数範囲は，**図-5** においてパワースペクトルの値が小さい範囲に相当する。このことから，実際のトンネル現場に微動アレー探査を適用する場合においても，探査に有効な周波数帯域で微動データの S/N 比が低くなる可能性が示唆される。

次に，5～100 Hz の空間自己相関係数を用いて，逆解析により切羽前方の S 波速度構造を推定した。逆解析には NA 法[4]を用いた。NA 法は，広域的最適解を統計的に直接探索する手法の一つであり，ランダムに生成したパラメータから得られる解に基づいて，ミスフィットが最小となる近傍領域を探索することで，空間自己相関係数から S 波速度構造を直接推定できる手法である。切羽前方微動アレー探査の解析結果を**図-7** に示す。推定された断層位置および S 波速度は，FEM 解析で設定した解析モデルの条件とおおむね一致した。この結果より，微動を用いた切羽前方探査の理論的適用可能性が確認された。

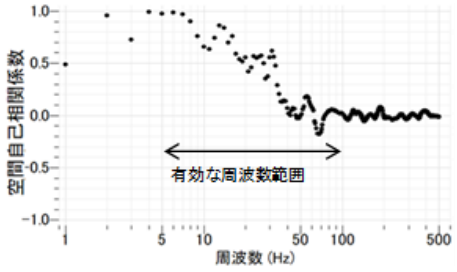


図-6　空間自己相関係数

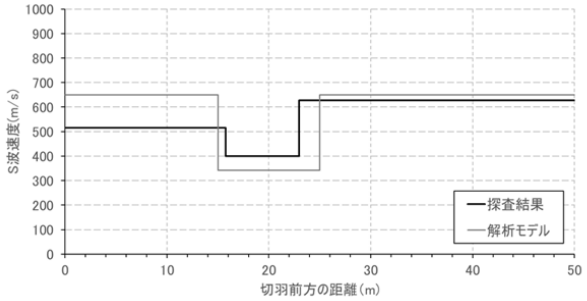


図-7　切羽前方微動アレー探査結果

3. 実トンネルにおける切羽前方探査実験[3]

実験は，**表-2** に示す令和 5 年度俵山・豊田道路第 2 トンネル工事（以下，第 2 トンネル）のトンネル坑内で実施した。第 2 トンネルは，**図-8** に示すように山口県下関市豊田八道から長門市俵山小原を結ぶ延長 13.9 km の俵山・豊田道路のうち，延長 1,267 m の道路トンネルである。本トンネルは，NATM 工法により施工される幅 15 m，高さ 8.5 m の大断面トンネルであり，地山の地質は関門層群凝灰岩からなる。トンネル位置における弾性波 P 波速度は 2.5～4.4 km/s である。切羽前方探査実験は，**図-9** に示すトンネル起点側坑口から 604 m 地点の切羽を対象として，ロックボルトの打設時間帯に実施した。

表-2　第 2 トンネルの工事概要

工事名	令和５年度俵山・豊田道路第２トンネル工事
工事場所	山口県長門市俵山地内
工期	自　令和６年２月１日 至　令和９年３月３１日
発注者	国土交通省　中国地方整備局　山陰西部国道事務所
施工者	アルソシア・岩田地崎特定建設工事共同体



図-8　第 2 トンネルの位置

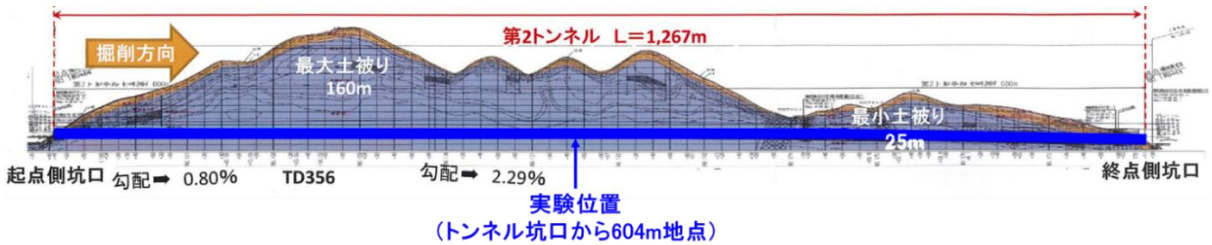


図-9　第 2 トンネルの地質縦断図

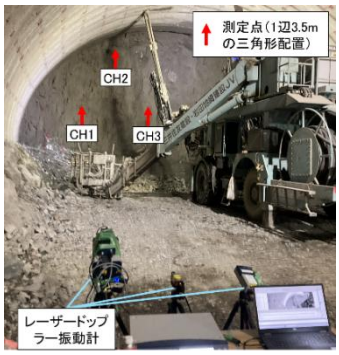


図-10　測定点配置および計測状況

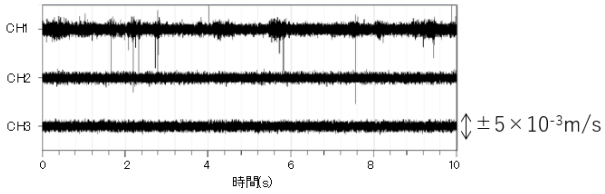


図-11　測定波形

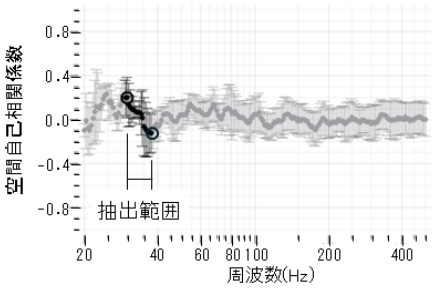


図-12　空間自己相関係数

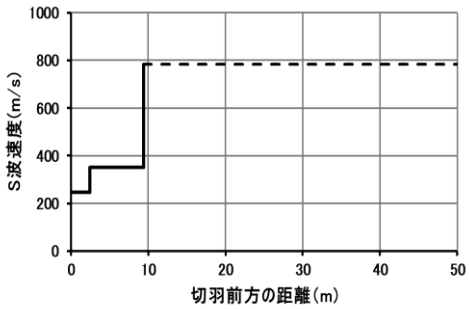


図-13　S 波速度構造の推定結果

振動の測定点は，**図-10** に示すように，切羽面上に 1 辺 3.5 m の正三角形となるよう配置した。切羽の振動測定には，非接触測定が可能なレーザードップラー振動計を 3 台用いた。

微動アレー探査のデータ処理には，FEM 解析と同様に空間自己相関法を適用した。**図-11** に測定波形を，**図-12** に空間自己相関係数を示す。得られた空間自己相関係数について，極大値から極小値へ最も大きく変化した 30～40 Hz の周波数範囲を抽出し，逆解析により切羽前方の S 波速度構造を推定した。**図-13** に推定した S 波速度構造を示す。推定結果では，切羽前方約 10 m までの範囲において，S 波速度が 350 m/s 程度の低速度領域が認められた。この低速度領域は，発破掘削に伴う地山のゆるみ領域を反映している可能性がある。一方，本実験では，切羽前方 10 m より遠方の S 波速度構造を推定することはできなかった。その要因として，得られた空間自己相関係数が±0.2 の範囲にとどまり，データの S/N 比が低かったことが挙げられる。また，微動アレー探査で得られる探査深度は一般に受振点間隔の 5 倍程度とされており，本実験における受振点間隔 3.5 m では，探査可能深度が限定されたことも一因と考えられる。Cho(2023)[5]は，岩盤や硬質地盤のサイトにおける微動アレー探査では，微動強度の弱さと地盤による波動の減衰に伴う S/N 比の低下が主要な課題となることを指摘している。また，微動強度が十分である場合であっても，地盤による減衰により，高周波数帯域の S/N 比が著しく低下する可能性があることに留意する必要があると述べている。本報においても同様の傾向が確認されたことから，今後の課題として，受振点間距離の拡大およびデータの S/N 比の向上が挙げられる。

4. まとめ

山岳トンネルにおける微動アレー探査の基礎的検討として，施工中のトンネルを模擬した三次元 FEM 動的解析および実トンネルでの振動測定を実施し，工事振動を利用した切羽前方探査の適用可能性を検討した。その結果，数値解析では，推定された断層位置および S 波速度構造が解析モデルとおおむね一致し，本手法の理論的適用可能性が確認された。また，実トンネルにおけるロックボルト打設時の振動を用いた解析では，切羽前方約 10 m までの範囲に岩盤のゆるみ領域と推察される低速度領域が検出された。以上より，工事振動を利用した微動アレー探査は，トンネル切羽前方探査への適用可能性を有することが示された。今後は，探査深度の向上および推定精度の改善を目的として，受振点間隔の拡大や測定データの S/N 比向上について検討する。

参考文献

1) 太田光，佐藤優剛，東宏幸，河田皓介，小田義也：和歌山県串本町の建設中の山岳トンネルにおける微動アレイ探査，第 150 回物理探査学会学術講演会論文集，Vol.150，No.3，pp.9-12，2024
2) 程塚保行，大田有夏：山岳トンネルにおける微動アレー探査に関する基礎的検討（その 2　切羽前方探査），令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会論文集，Vol.80，No.III-176，2025
3) 程塚保行，大田有夏，仲哲路，栗木浩一：工事振動を利用したトンネル切羽前方探査に関する基礎的実験，令和 8 年度土木学会全国大会第 81 回年次学術講演会論文集，Vol.81，No.III-292，2026
4) Wathelet, M., et al.: Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.5, pp.1787-1800, 2005
5) Cho I.: Spatial autocorrelation method for simple microtremor array survey at rock/stiff-soil sites, Geophysical journal international, Vol.233, No.2, pp.1296-1317, 2023