

トンネル掘削発破で発生する弾性波の卓越周波数について

安藤ハザマ 正会員 ○大沼 和弘
 // 正会員 中谷 匡志

1. はじめに

トンネル工事において、掘削を発破工法により行う場合、弾性波による振動が発生している。このような発破による振動は環境影響評価や振動抑制に活用することが行われることがあるが、岩盤評価に用いられる例は少ない。一方、内山ら¹⁾によれば、発破振動の周波数は30Hzから100Hzの範囲に入り、堅硬な岩盤ほど周波数は高く、軟らかい岩盤ほど周波数は低くなるとされる。このため、掘削発破で生じる弾性波の特性を把握することにより、岩盤を評価する可能性が考えられた。

「TFT 探査システム」は掘削発破で発生する弾性波を用いた坑内弾性波探査であり、トンネル掘削施工サイクルに影響を与えずに連続的に弾性波探査が実施することを可能にしている。本報告は、TFT 探査をほぼ全線において実施したトンネル工事²⁾において、記録された弾性波データに対してFFTによる周波数解析を行い、弾性波速度や支保パターンとの関係を検討し、岩盤評価に適用する可能性を検討した。

2. FFTによる周波数解析

TFT 探査で記録された波形データの例を図-1に示す。発破信号と弾性波信号の波形データは同一時間軸で出力されるため、発破信号と弾性波(P波)の到達時刻の差から初動到達時間を読み取ることができる。掘削発破で発生する弾性波については、P波がまず到達し、その後、S波が受振点に到達する。周波数解析においては、P波のみを抽出することは困難であることと考えられたことから、今回の検討では第1波および第2波の範囲に対し、FFTによる周波数解析(以降、FFT解析と呼ぶ)を実施した。FFT解析では、Hamming窓を設定し、最小データ数を16,384としてスペクトル分析を行い、スペクトル分布より卓越周波数(パワースペクトル)を求めた。ここで、TFTのサンプリング周波数は44.100kHzとしたため、スペクトル分解能は2.6917Hzである。FFT解析の例を図-2に示す。

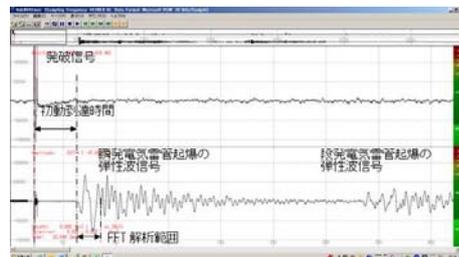


図-1 TFT 探査システムによる弾性波測定記録の例

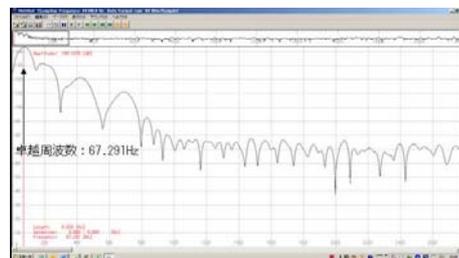


図-2 FFTによる周波数解析の例

トンネル距離程による卓越周波数の分布を図-3に示す。ここで、トンネル調査段階に地表から実施された屈折法弾性波探査結果とTFT探査により把握された坑内弾性波速度を併せて示す。

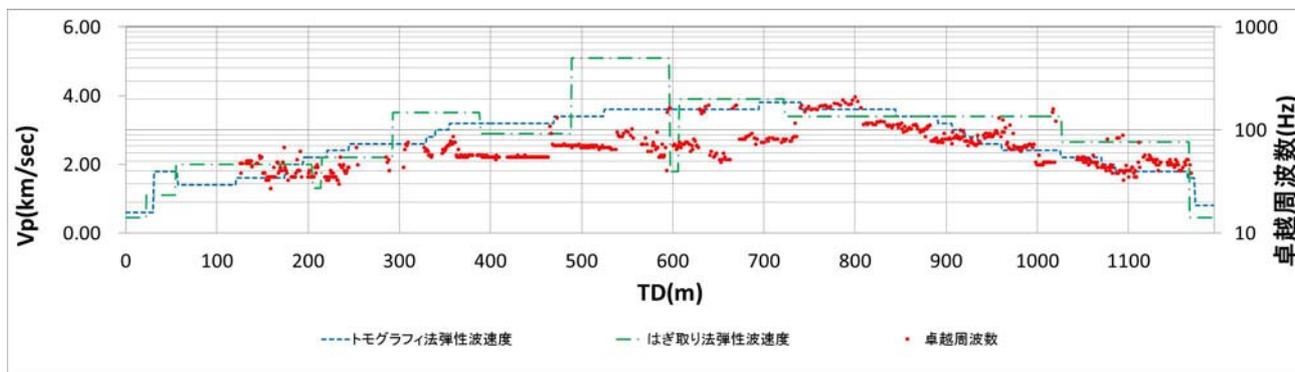


図-3 弾性波速度と卓越周波数の分布

キーワード トンネル, 掘削発破, 弾性波, 卓越周波数

連絡先 〒980-8640 仙台市青葉区片平1-2-32 安藤ハザマ東北支店安全環境部 TEL 022-266-8112

3. 屈折法弾性波速度との関係

事前調査において、屈折法弾性波探査はトモグラフィ法およびハギトリ法による解析が行われており、FH+1.5D（本トンネルの場合、1.5D=1.5×10.54m=15.8m）において想定された値が予め把握されていた。これらの結果と発破地点ごとの卓越周波数との関係を図-4に示す。これを見ると、いずれの手法においても相関関係が認められ、寄与率はトモグラフィ法が高く（ $R^2=0.4267$ ）、ハギトリ法では低くなる（ $R^2=0.2398$ ）。ただし、トモグラフィ法の弾性波速度範囲は1.60～3.80km/secと分布範囲が狭く、探査法の特質である平均化が影響している可能性があり、これらの特徴に留意する必要がある。

4. 支保パターンとの関係

トンネル支保パターンについては、切羽観察により支保工の選定が行われ、当初設計から設計変更が実施されている。支保パターンの実績と卓越周波数の関係を図-5に示す。ここで、箱ひげ図は最大値、平均値+標準偏差、平均値、平均値-標準偏差、最小値を示し、確率密度曲線は平均値と標準偏差より作成した。

これらを見ると、各支保パターンで重なり合う部分があるものの、卓越周波数が60Hzとなる付近にD I-bとC II-bの境界、100Hz付近にC II-bとC Iの境界が認められる。特に、60Hz付近の境界は比較的明瞭であり、DI-bとC II-bとの支保パターンを区分できる可能性を示している。

5. まとめ

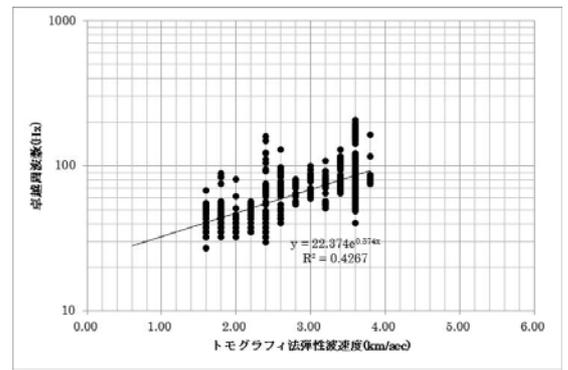
トンネル掘削発破を用いたTFT探査結果に対し、FFTによる周波数解析を実施し、発破による弾性波の卓越周波数を把握した。この卓越周波数と屈折法弾性波速度、支保パターンとの比較を行ったところ、次の事項が判明した。

- 屈折法弾性波探査との比較では、トモグラフィ法と比較的高い寄与率（ $R^2=0.4267$ ）が認められる。
- 卓越周波数は支保パターン毎に異なる分布を示し、特に、60Hz付近にD II-bとC II-bの境界が認められる。

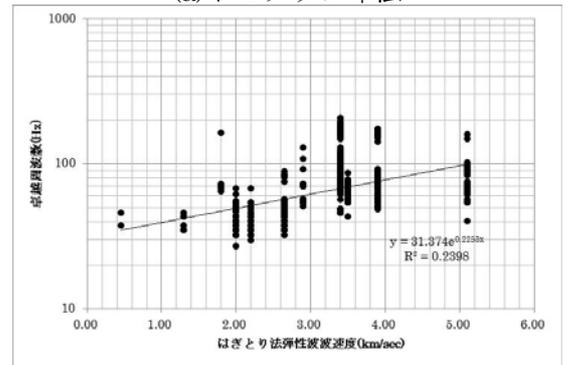
これらの結果から、発破で発生した弾性波の卓越周波数を把握することにより地山弾性波速度を推定できることが示すとともに、トンネル支保パターンの選定に活用できる可能性を示すものと考えられる。

参考文献

- 1) 内山成和・大山卓夫・金子忠夫(1979)発破振動の性状について、応用地質事務所年報, No.1, pp.55-74
- 2) 大沼和弘・中谷匡志・山本浩之・西川篤哉(2016), 掘削発破を用いた坑内弾性波探査によるトンネル掘削施工管理, 応用地質, Vol.56, No.6, pp.289-297

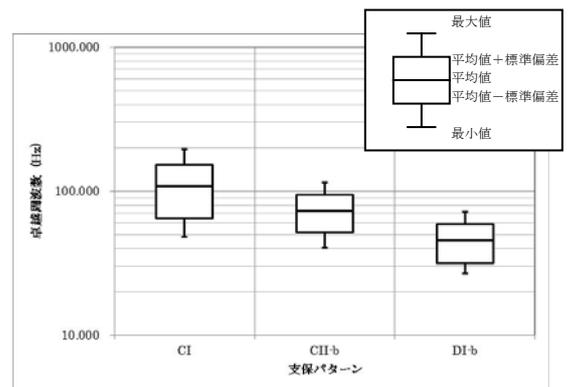


(a) トモグラフィ法

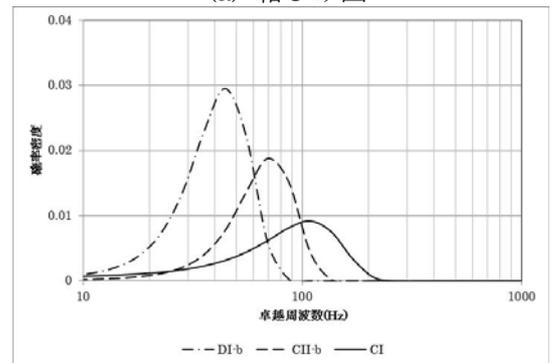


(b) ハギトリ法

図-4 卓越周波数と弾性波速度の関係



(a) 箱ひげ図



(b) 確率密度曲線

図-5 卓越周波数とトンネル支保パターンの関係