

トンネル掘削時の発破音と弾性波による切羽状況のリスク評価手法について

安藤ハザマ 正会員 ○大沼 和弘, 正会員 中谷 匡志

1. はじめに

山岳トンネル建設工事において、掘削作業中、切羽から肌落ちが発生することがある。このため、厚生労働者は「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン¹⁾」を示すとともに、トンネル工事の施工者は各種の災害防止対策を実施している。しかしながら、切羽からの肌落ち等による労働災害を撲滅するには至らず、労働者を肌落ちによる落石から防護する手法とともに、合理的に肌落ちなどの発生を予測する手法の開発が求められている。

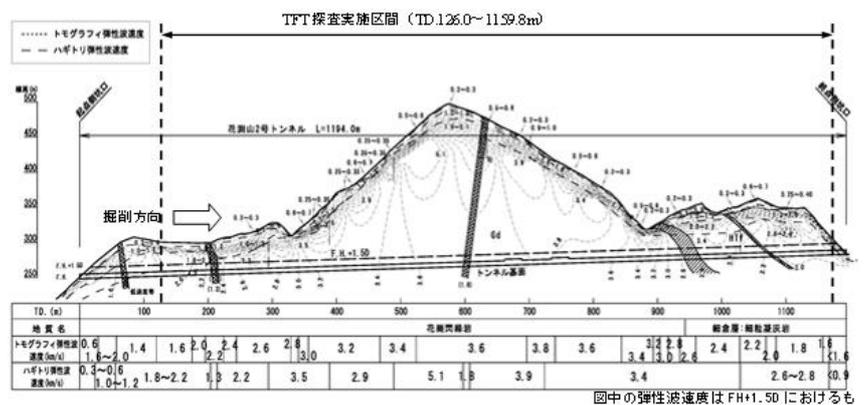
トンネルの発破音については、トンネル坑内作業員が異常と感じた場合、切羽の点検を強化するなどの対応を行ってきた。しかし、発破音については、騒音の観点からの研究は多数あるものの、発破音と切羽状況との関係を定量的な評価する研究はほとんど知られていない。

TFT 探査では、トンネル掘削発破で生じる弾性波を掘削の進行に伴って連続的に測定し、トンネル坑内の弾性波速度分布を把握するとともに、切羽前方の地質変化を予測する手法として開発された。TFT 探査は、本来、地山を伝播する弾性波を測定するものであるが、受振器をトンネル坑壁のロックボルト頭部に機械的に固定していることから、発破音も同時に測定できる。

今回、掘削が完了したトンネルにおける TFT 探査に対し、発破音と弾性波の周波数特性に着目した検討を行い、切羽状況の変化といったリスクを評価するための手法を検討したので、その結果を報告する。

2. 検討トンネルの概要

TFT 探査を実施したトンネルは、トンネル延長が 1,194m、内空断面積が 50.4m²の道路トンネルであり、主に発破により掘削が行われた。トンネル施工前に行われた地質調査から、トンネルを構成する地質は中生代白亜紀花崗閃緑岩を主体とし、終点側の一部に新生代新第三紀に形成された細倉層細粒凝灰岩が分布するものとされた。設計段階における地質縦断面図を図-1 に示す。

図-1 トンネル地質縦断面図²⁾ (当初想定に加筆)

3. 周波数特性の検討

TFT 探査において記録される波形データの例を図-2 に示す。ここで、横軸は時刻、縦軸は振幅を示し、サンプリング周波数を 44.1kHz、量子化ビット数を 24bit とし、原則として掘削発破の全数を記録している。測定結果では、発破点火後、地山を伝播した弾性波がまず記録され、その後坑内を伝播した発破音が記録されている。弾性波では比較的低周波成分が卓越するのに対し、発破音では高周波成分が卓越し、測定波形から明瞭に判別できる。今回の検討では、発破条件の差異を少なくすることを目的に、瞬発雷管で起爆した発破振動を対象に検討を行った。

次に、測定した発破音および弾性波については、FFT 解析を行い、それぞれのパワースペクトルを算出した。弾性波については MATLAB[®]、発破音については SP-WAVE を使用し、主なパラメータとして、解析窓データ数を 512 (窓時間: 11.6ms) とし、発破音について到達直後に解析窓を設定し、弾性波については解析窓を 32 データ (0.726ms) 毎に移動させた。また、弾性波のみ 0 挿入をおこなうことでデータ数を 1024 としたため、FFT 解析の周波数分解能は、発破音では 43.2Hz、弾性波では 21.5Hz とした。

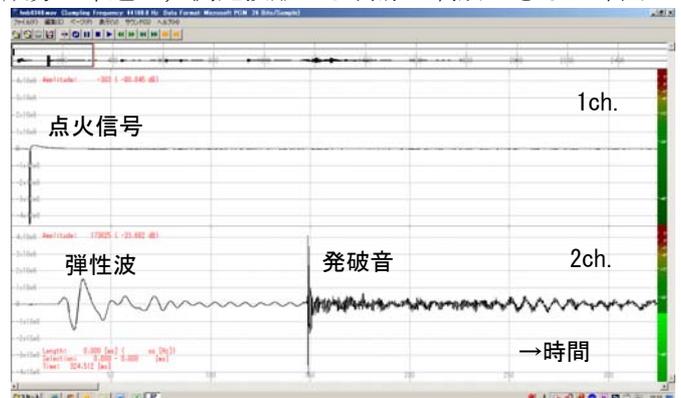


図-2 TFT 探査の測定波形の例

キーワード トンネル, 発破音, 弾性波, FFT 解析, リスク評価

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

4. 検討結果

掘削発破による発破音と弾性波について、各切羽の距離程を横軸、パワースペクトル周波数を縦軸として図-3に示す。ここで、点線は5切羽の移動平均値を示している。

a)および b)は、受振点の位置を移設することなく測定した結果を示す。a)では、切羽の進行に伴い、支保パターンはCII-bと変化がないが、切羽の地質が花崗閃緑岩から細粒凝灰岩に変化する区間を示す。b)では地質は花崗閃緑岩と同一であるが、支保パターンがCIからCII-b、さらにCIに変化する区間を示す。

a)では、花崗閃緑岩から細粒凝灰岩への地質変化に伴い、発破音のパワースペクトル周波数の上昇が認められるとともに、弾性波のパワースペクトル周波数の低下が認められる。特に、発破音での変化が顕著となっている。

一方、b)では、CI区間に比較してCII-b区間では発破音および弾性波ともにパワースペクトルの低下が認められる。また、CII-bからCIに変化するTD.604m以降の区間において発破音のパワースペクトル周波数が1,000Hz以上を示すものが多い。一方、弾性波のパワースペクトル周波数はTD.617m以降で66Hz以上を示すものが多くなるが、TD.604m付近の支保パターン変化点とは多少のずれが生じている。これは、弾性波がトンネル周辺地山を伝播していることの影響が考えられる。

さらに、c)では、地質が花崗閃緑岩、支保パターンがCII-bと同一であるが、受振点を移設した区間でのパワースペクトル周波数の変化を示す。ここで、受振点の移設点において発破音および弾性波のパワースペクトル周波数が変化していることが判る。特に、発破音の周波数変化が顕著であり、発破音をジオフォンで測定していることや受振点の坑内環境が影響していることが考えられる。

5. まとめ

TFT 探査の測定結果において、トンネル掘削発破で発生する発破音と弾性波に対してFFT解析を行い、パワースペクトル周波数の推移を検討した。この結果、受振点を移設せず、測定条件がほぼ同一のとき、発破音および弾性波のパワースペクトルの変化は切羽の地質変化とともに、支保パターンなど岩質の変化について把握が可能であることが判明した。一方、発破音と弾性波のパワースペクトル周波数は受振点の設置条件による影響を受け、特に発破音において、その影響が大きいこと判明した。

今後、TFT 探査における発破音の測定手法を改良するとともに、切羽における肌落ちに対する評価手法を開発することにより、これまで利用されてこなかった発破音から得られる情報を切羽の肌落ち予測といったトンネル施工時のリスク評価に活用することが可能と考えられる。

参考文獻

- 1) 厚生労働省労働基準局長, 基発 0118 第 1 号, 山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン, 2018, <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudouki-junkkyokuanzeneiseibu/0000149302.pdf>, 2019年2月26日閲覧
- 2) 中谷匡志他, トンネル掘削発破で発生する弾性波を用いた地山評価手法と切羽前方探査の検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), vol.72, No.2, 53-66, 2016

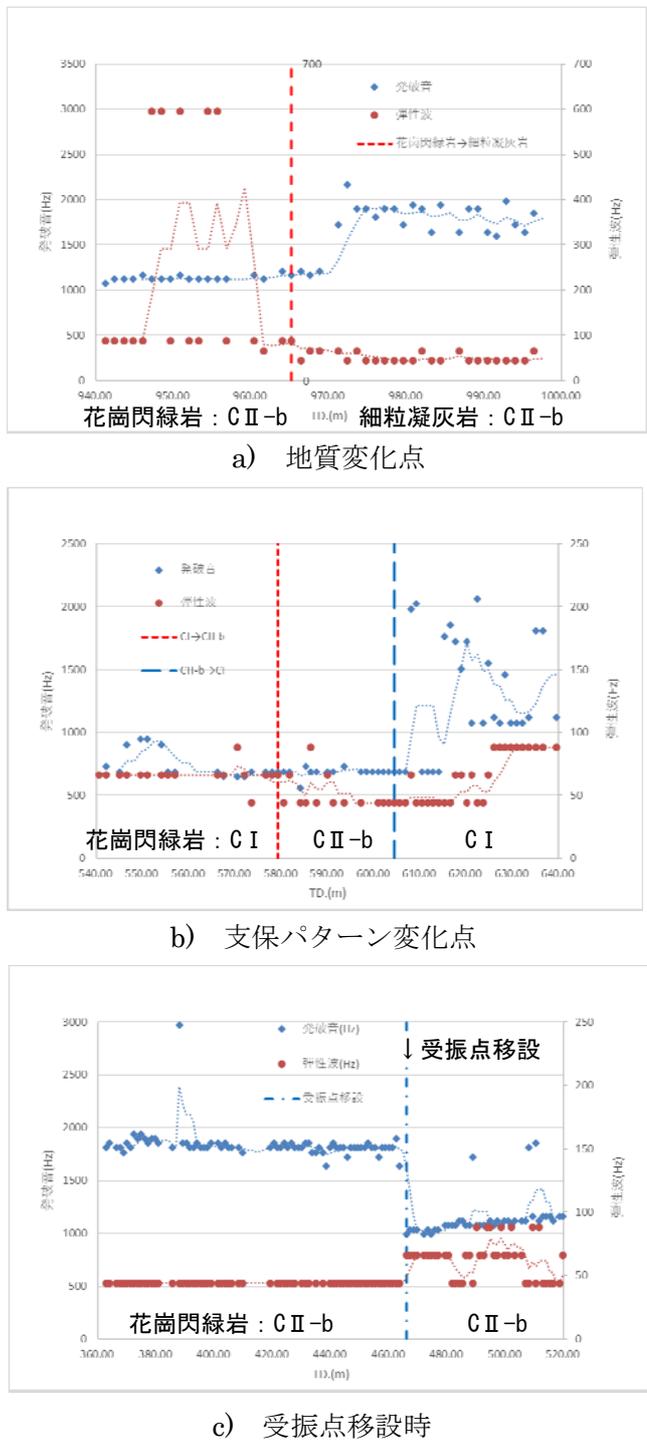


図-3 距離程別のパワースペクトル周波数

一方、発破音と弾性波のパワースペクトル周波数は受振点の設置条件による影響を受け、特に発破音において、その影響が大きいこと判明した。

今後、TFT 探査における発破音の測定手法を改良するとともに、切羽における肌落ちに対する評価手法を開発することにより、これまで利用されてこなかった発破音から得られる情報を切羽の肌落ち予測といったトンネル施工時のリスク評価に活用することが可能と考えられる。