

山岳トンネルにおける掘削発破を利用した切羽評価システムの開発

安藤ハザマ 土木事業本部 正会員 ○中谷 匡志
正会員 山本 浩之
正会員 宇津木 慎司
東北支店 正会員 大沼 和弘
佐々木 照夫

1. はじめに

山岳トンネルにおける支保パターン設計は、事前調査において、地表面からの弾性波探査やボーリング調査等を実施し決定する方法が採られている。しかし弾性波探査については、土被りが厚い場合や複雑な地質構造の場合、探査精度が低下することが知られている。このため施工時には、切羽観察や計測などにより、設計支保パターンの妥当性を確認しながら掘削が進められている。

また、定量的な地質評価手法として、切羽において簡易弾性波測定器による探査¹⁾を実施することもあるが、切羽での作業は崩落などの危険を伴う可能性があることや施工を中断する必要がある、日常管理として行うことは極めて困難である。

そこで筆者らは、掘削用の発破を起振源として発生する弾性波（直達波）を安全に計測し、地山の地質状況を定量的に評価できる切羽評価システム「トンネル フェイステスター（図-1）」を開発した。本報告では、開発したシステムの構成と施工中のトンネル現場で実施した2つの計測事例について紹介する。

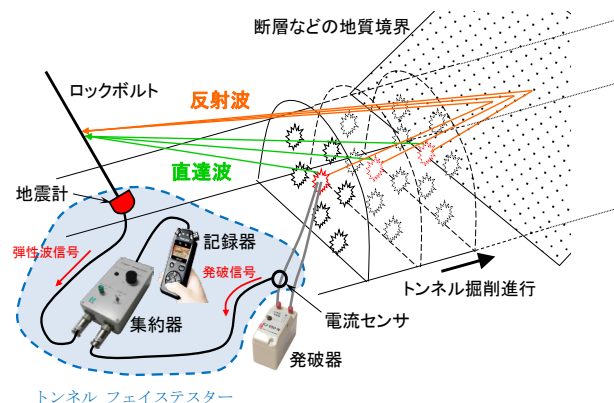


図-1 計測概念図

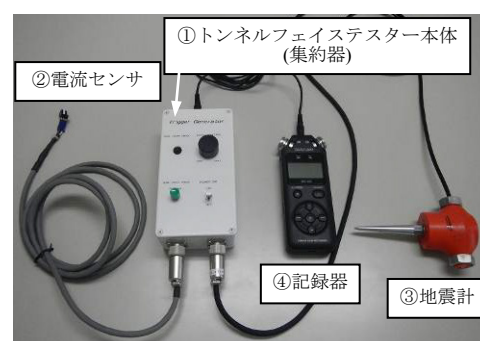


写真-1 トンネル フェイステスター 全体図

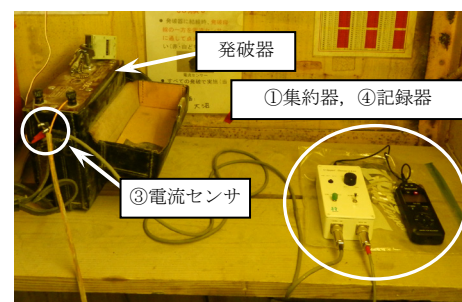


写真-2 システム設置状況（点火所内）

2. システムの構成

本システムの構成は、写真-1 に示すように「トンネル フェイステスター本体①」と「周辺機器②～④」から構成される。具体的には、図-1 に示すように、発破母線に取り付けた電流センサから得られる発破信号と坑壁のロックボルトに設置した地震計から得られる弾性波の波形データを、集約器を通じて記録器で同時収録するものである。トンネル坑内の点火所に設置したシステム状況を写真-2 に示す。

次に、図-2 に本システムを用いて計測した弾性波の波形データを示す。発破信号と弾性波の波形データは、同一時間軸で出力されるため、弾性波の初動の到達時間を計測することが可能である。図-3 に、坑内弾性波速度の計測概念図を示す。ここで、地震計と切羽間の距離： L_i 、弾性波の初動の到達時間： t_i から、切羽から地震計へ伝播する弾性波速度は次式のようにになる。

$$V_{p_i} = L_i / t_i \dots (1)$$

また、掘削進行に伴い同一直線上で前進する切羽位置からの弾性波を、地震計の位置を変えずに計測した場合、

キーワード：トンネル、掘削発破、弾性波、支保パターン
連絡先：〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1番20号 TEL:03-6234-3670 FAX:03-6234-3704

伝播経路は既計測区間と同一であると考えられる。その際の弾性波速度は、既計測区間と進行区間との合成であると考えられ、既計測区間より n 基掘削が進行した場合の区間弾性波速度 $V_{p'}$ は次式のように表すことができる。

$$V_{p_{i \sim i+n}}' = (L_{i+n} - L_i) / (t_{i+n} - t_i) \cdots (2)$$

地震計の位置が同一の場合、任意区間における区間弾性波速度 $V_{p'}$ は、切羽と地震計間の距離 L と弾性波の初動到達時間 t の関係を走時曲線から求めることができる。走時曲線および区間弾性波速度を次式に示す。

$$t=aL+b \cdots (3) \qquad V_{p'}=dL/dt=1/a \cdots (4)$$

3. 掘削中のトンネル現場での計測事例

3-1.システムの計測精度の検証実験

(1) 計測概要

東北地方整備局三陸国道事務所発注の尾肝要トンネル南工区 (L=1,298m) において、本システムを用いた連続的な計測を実施した。本トンネルの地質は、中生代白亜紀花崗岩類であり、比較的均質な地質で構成されている。表-1 に、尾肝要トンネルにおける設計支保パターンと弾性波速度との関係を示す。

今回計測した TD.649.9～1287.5m 区間における設計支保パターンは B ～CⅡパターンであり、表-1 より弾性波速度は 2.75～4.75km/sec 以上と想定されていた。また計測方法は、切羽から 70～120m 程度後方の坑壁に地震計を設置し、発破で発生する弾性

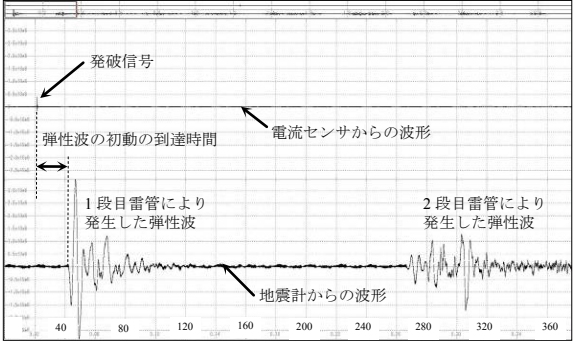


図-2 計測結果例（時間と振幅との関係）

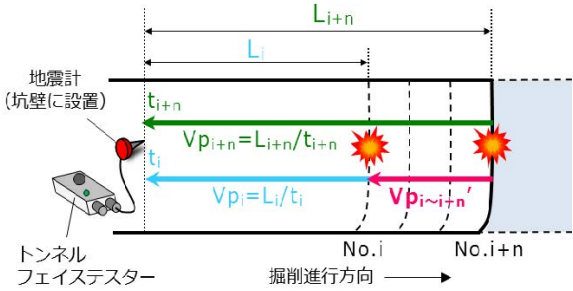


図-3 坑内弾性波速度の計測概念図

表-1 設計支保パターンと弾性波速度の関係 (尾肝要トンネル)

設計支保パターン	弾性波速度
B	4.75km/sec以上
CⅠ	3.75～4.75km/sec
CⅡ	2.75～3.75km/sec

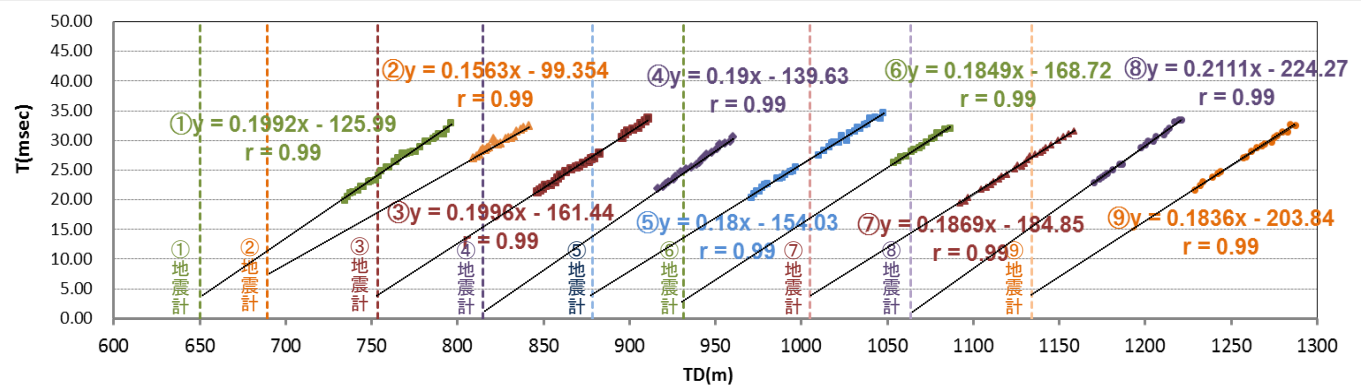


図-4 走時曲線

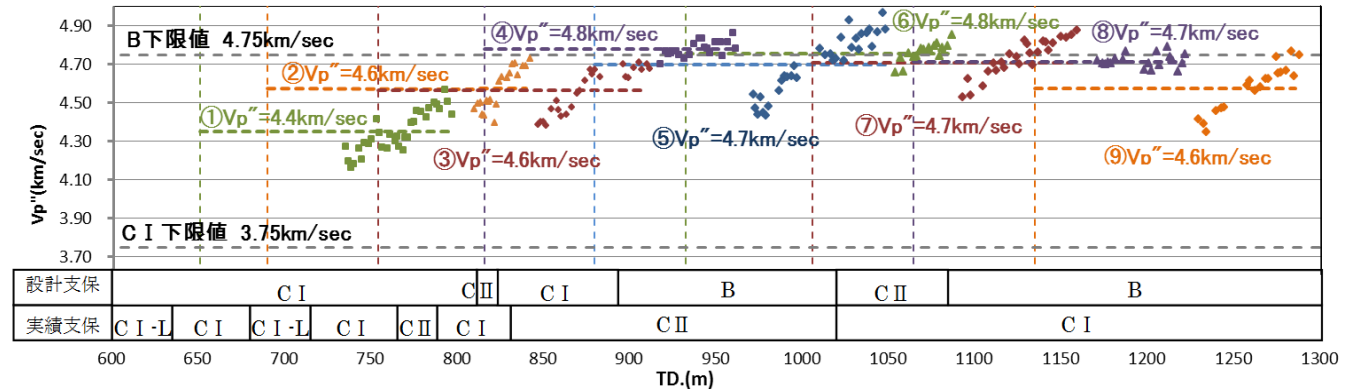


図-5 平均弾性波速度と設計・実績支保パターン

波の初動が地震計に到達する時間を計測した。なお、切羽が 50m 程度（発破回数 30 回程度）進行するごとに地震計を前方に盛り替え計測を継続した。

表-2 実績支保パターンと計測結果の比較

計測区間	実績支保パターン (弾性波速度 (km/sec))		平均弾性波速度 Vp" (km/sec)
	C II (2.75~3.75)	C I (3.75~4.75)	
①TD. 734.6~ 796.1	○	○	4.4
②TD. 809.3~ 842.0	○	○	4.6
③TD. 846.5~ 911.0	○		4.6
④TD. 917.0~ 960.5	○		4.8
⑤TD. 878.8~1047.5	○	○	4.7
⑥TD.1053.5~1086.5		○	4.8
⑦TD.1092.5~1158.5		○	4.7
⑧TD.1170.5~1221.5		○	4.7
⑨TD.1229.0~1287.5		○	4.6

(2) 計測結果

TD.649.9~1287.5m 区間の掘削中に実施した計測結果（全計測 9 回の走時曲線）を図-4 に示す。図-4 に示す走時曲線は、各計測において、発破により切羽で発生した弾性波が破線で示す位置に設置した地震計までの到達時間をプロットしたものである。

これらの結果より、全 9 回の計測で得られた相関係数はいずれも $r=0.99$ 程度を示しばらつきが小さいことから、精度良く探査が実施できているものと考えられる。

図-5 は、(1) 式を用いて、各計測において発破ごとに求めた弾性波速度をプロットしたもので、それぞれの平均弾性波速度 Vp" を図中に示した。図-5 より、平均弾性波速度は Vp" =4.4~4.8km/sec 程度の結果が得られている。

ここで表-2 に、実績支保パターンとその区間で得られた平均弾性波速度との関係を整理したものを示す。表-2 より、計測区間の実績支保パターンは、C I パターン主体 (3.75~4.75km/sec) であるのに対し、平均弾性波速度は概ね想定される範囲内の速度が得られており、地山状況を定量的に捉えることができているものと考えられる。ただし、表-2 の C II 区間 (③④) ではやや速い結果を示している。この原因としては、計測区間長が長く地震計を設置した位置が C I 地山内であり、良好な地山の影響を受けたためと考えられる。

(3) 考察

以上の結果より、本システムを用いることにより精度よく坑壁の弾性波探査が出来ていることが確認された。しかし、得られる平均弾性波速度は、実績支保パターンに対応する速度領域ではあるが、やや高めの結果となっており、計測距離などの検証が必要であると考えられる。具体的には、今回の探査では、C I ~C II 地山が混在した区間で探査を行っているため、その影響が計測結果に見受けられた。このため、今後の課題として、同一地山区分内での探査を実施し、得られる結果を検証する必要があるものとする。

3-2.実績支保パターンと坑壁弾性波速度との比較

(1) 計測概要

東北地方整備局岩手河川国道事務所発注の国道 106 号新川目トンネル (L=757m) において、前述の現場検証で課題とした計測区間長の検証を実施した。本トンネルの地質は、中生代~古生代三疊紀~二疊紀粘板岩を主体とした堆積岩系から構成されており、表-3 に、当該トンネルでの設計支保パターンと弾性波速度との関係を示す。

表-3 設計支保パターンと弾性波速度の関係 (新川目トンネル)

設計支保パターン	弾性波速度
C I	4.0km/sec以上
C II	3.0~4.0km/sec
D I	2.0~3.0km/sec

今回の探査は、TD.247~309m 区間の掘削中、原則として昼間施工時の 2 回の発破で実施した。計測概念図を図-6 に示す。

図-6 に示すように、探査は実績支保が C II パターンの同一地山区分で実施した。また、計測距離の検証のため、一度の発破で発生する弾性波を、異なる位置に設置した 2 つの地震計 (GEO-1, 2) で同時に受振した。探査開始時の計測距離は、GEO-1 で 10m, GEO-2 を 50m とし、発破毎の雷管の位置を測量し、弾性波の 3 次元的な伝播距離を考慮した。

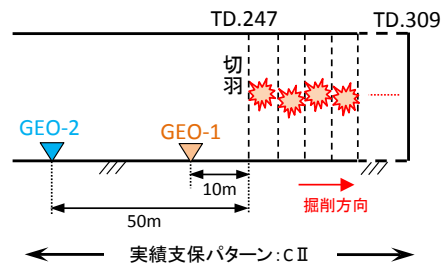


図-6 計測器設置概念図 (断面)

(2) 計測結果

走時曲線を図-7 に示す。図-7 より、GEO-1, 2 共に相関係数が $r=0.95$ 以上となっており、高精度で探査が出来ていると考えられる。また、3 次元的な伝播距離を計測距離として再整理した結果を図-8 に示す。

図-8 より, GEO-1 で得られた結果において, 計測距離が 32m 程度で勾配に変化点を確認された. この変化点に着目し, GEO-1 の結果を 2 つのグループ (GEO-1-1, GEO-1-2) に分けることにより, いずれも相関係数は $r=0.92$ 以上となり高い相関を示した. (4) 式から求めた区間弾性波速度 V_p' は, 計測距離が 12~32m では 3.3km/sec, 32~90m では 4.3~4.6km/sec を示す.

当区間の地山は, 掘削実績より CII パターンの均質な地山であったことから, 計測距離に応じて, トンネル掘削による影響を受けた地山 (第 1 速度層: V_{p1} 層) と, 掘削の影響がない地山 (第 2 速度層: V_{p2} 層) を伝搬した弾性波をそれぞれ捉えているものと考えられる. 図-9 に, 掘削の影響を考慮した推定される伝播経路の概念図を示す.

なお, 表-3 より想定される弾性波速度 3.0~4.0km/sec (実績支保: CII パターン) に対し, 切羽近傍の弾性波速度 (第 1 速度層: V_{p1} 層) 3.3km/sec と整合した結果が得られている.

また, トンネル掘削前に地表から実施した弾性波探査の結果は, 地山の弾性波速度は 4.0~5.0km/sec と想定されており, 掘削の影響がない地山の弾性波速度 (第 2 速度層: V_{p2} 層) 4.3~4.6km/sec と同程度の結果が示されている.

(3) 考察

以上の結果より, 本システムを用いることにより, 切羽近傍を主体とした 10~32m 程度の短い計測区間での探査を実施し, 精度良く探査できることが確認された. さらにデータを分析すると, トンネル掘削の影響がある地山 (第 1 速度層: V_{p1} 層) と, 掘削の影響がない地山 (第 2 速度層: V_{p2} 層) の弾性波速度が得られているものと考えられる. 今後は, はぎとり法などによる解析により, 掘削の影響範囲の算出等も可能になるものと考えられる.

4. まとめ

本システムを用いて, 掘削発破により発生した弾性波が坑壁を伝わる伝達時間を精度良く計測することが確認できた. また, 走時曲線の勾配から求められる区間弾性波速度は, 計測距離によりトンネル掘削による影響範囲を把握することが可能であるものと考えられる. 特に, 切羽から 30m 程度の近傍に地震計を設置し連続的に計測することで, 定量的に切羽近傍の弾性波速度を捉えることにより, 選定する支保パターンの妥当性の評価に有効となるものと考えられる.

今後は, 実証実験を重ね, データ収集・検証を行い, 探査精度の向上を図る必要があるものと考えられる.

参考文献 1) 池口正晃 真下英人 宮川順一: トンネル切羽における簡易弾性波の現場計測試験, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, III-B, 1996.9

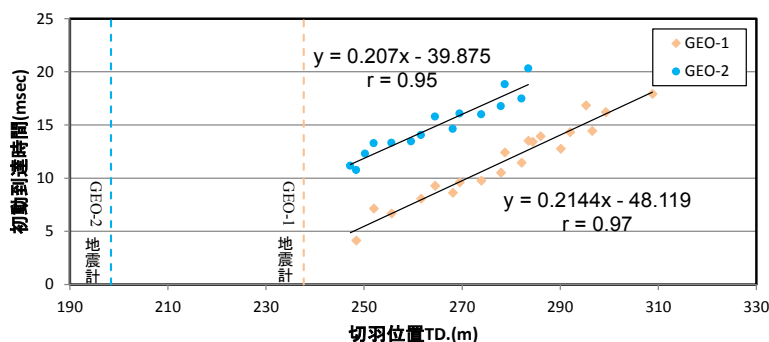


図-7 走時曲線 (切羽位置—初動到達時間)

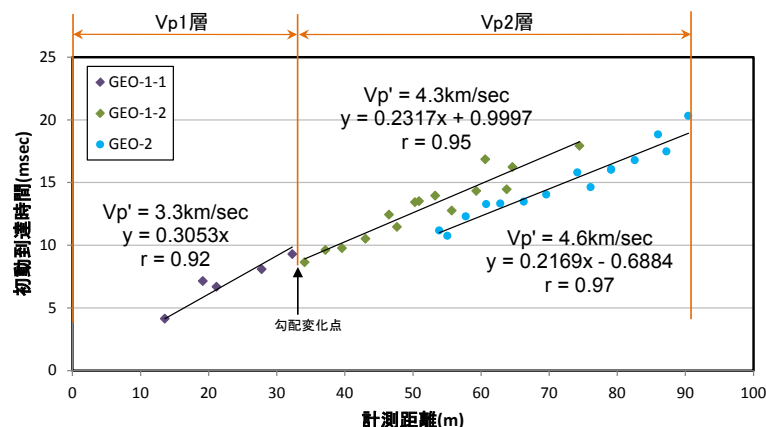


図-8 走時曲線 (計測距離—初動到達時間)

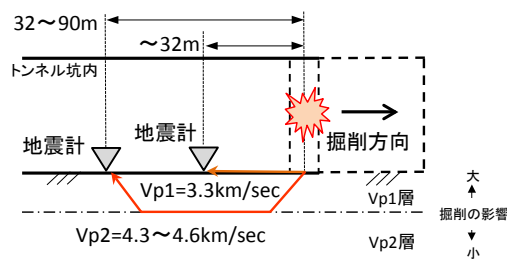


図-9 推定される伝播経路概念図