

掘削発破を用いた切羽評価システムの開発と適用事例

中谷 匡志¹・山本 浩之²・宇津木 慎司³・大沼 和弘⁴・鈴木 雅行⁵

¹正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20)
E-mail:nakaya.masashi@ad-hzm.co.jp

²正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20)
E-mail:yamamoto.hiroyuki@ad-hzm.co.jp

³正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20)
E-mail:utsuki.shinji@ad-hzm.co.jp

⁴正会員 安藤ハザマ 花洲山2号トンネル作業所 (〒989-6825 宮城県大崎市鳴子温泉上鳴子144)
E-mail:onuma.kazuhiro@ad-hzm.co.jp

⁵正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1-20)
E-mail:suzuki.masayuki@ad-hzm.co.jp

山岳トンネルの事前調査の一つとして、弾性波探査が地表から実施されるが、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、実施工においては、切羽観察により想定された設計支保パターンの妥当性を確認しながら掘削を進めていく方法がとられている。また、NATMにおける支保パターンの設計は、弾性波速度が大きな要素となっており、定量的な地山評価手法として簡易弾性波探査があるが、切羽において連続的に実施することは安全管理の面から困難となる。

そこで筆者らは、掘削発破により発生する弾性波を計測することで、安全に地質状況を評価できる、切羽評価システム「トンネル フェイステスター (TFT)」を開発した。本報告は、開発したシステム構成と、本システムを用いた検証実験について示すものである。

Key Words : seismic wave, excavation blasting, tunnel support patterns

1. はじめに

山岳トンネルの調査では、一般にボーリング調査や弾性波探査などが実施され、その結果に基づき設計における地山区分が行われる。しかしながら、このような地質調査は地表からの調査であることが多く、実施数量も限られる。このため、トンネル施工時に地質状況が事前に想定していた地山区分と相違が生ずることがあることから、トンネル掘削時には切羽観察を行い、事前の地山区分の妥当性を確認することが必要となる。

これらの調査のうち、弾性波速度については、トンネルの調査・計画時に、地表面で実施する屈折法弾性波探査により求められる¹⁾。しかし、掘削後にトンネル内で測定される弾性波速度は、事前に求められる弾性波速度分布と異なることが多い。このため、掘削後の坑壁における弾性波探査によるB計測²⁾や切羽における簡易弾性波測定により、トンネル坑内における弾性波速度を把握することがある。しかしながら、坑壁弾性波探査は専門

業者による測定が必要であり、探査時間も比較的長いことから、日常のトンネル施工管理に用いるのは困難な状況となっている。また、簡易弾性波測定³⁾は容易に測定ができるものの、切羽での測定は危険を伴うものであり、連続的に探査を実施することは困難である。このため、トンネルの施工管理に坑内の弾性波速度測定結果を利用するためには、要求される精度を簡便かつ安全に測定で

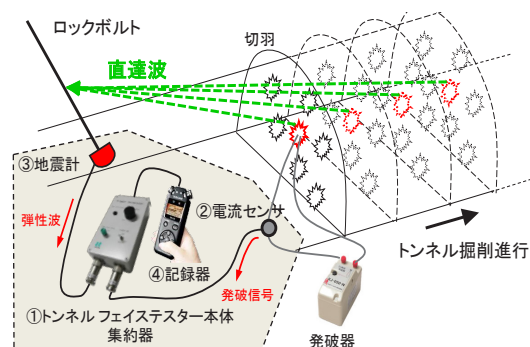


図-1 トンネルフェイステスター概念図

きる手法の開発が求められている。

そこで筆者らは、掘削発破を起振源とする弾性波を計測することで、安全で連続的に地質状況を評価できる、切羽評価システム「トンネルフェイステスター (TFT)」を開発した。本報告は、開発したシステム構成と、本システムを用いた検証実験について示すものである。

2. システムの構成

本システムは、日常の施工サイクルに坑内での弾性波探査を組み込むことを念頭に置き、トンネル施工に関わる者が操作しやすいシステムを目指して開発した。本システムは掘削発破を起振源とした弾性波探査システムで、切羽後方のトンネル坑壁に設置した地震計により、坑壁を伝搬する弾性波を計測するものである。

図-1 に示すように、本システムの構成はトンネルフェイステスター本体（集約器）①と周辺機器②～④から構成される。電流センサ②は非接触タイプのセンサとなっており、発破回路に接続することで、発破点火時の電流を発破信号として捉える。また、地震計③は地震探査で用いるもの（OYO製 GS-20DH, 固有周波数 28Hz）を使用し、坑壁に打設したロックボルト（ $L=3\sim 4\text{m}$ ）をウェーブガイドとして利用し、ロックボルト頭部に機械的に設置する。次に、発破信号と弾性波の波形データは、集約器①を介して、記録器④に記録する。図-2 に記録される波形例を示す。図-2 より、発破信号と波形データは同一時間軸で出力されるため、弾性波の初動到達時間を求めることができる。なお、初動到達時間を算出するためには、通常掘削発破で心抜きのために使用される、瞬発雷管を用いる必要がある。

図-3 に、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表すことができると考えられる。

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

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

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

地震計の位置が同一の場合、切羽進行区間の区間弾性

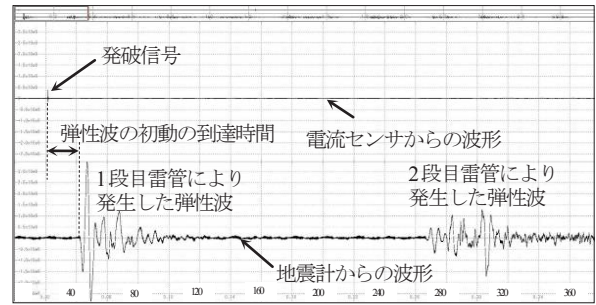


図-2 計測波形データ表示例

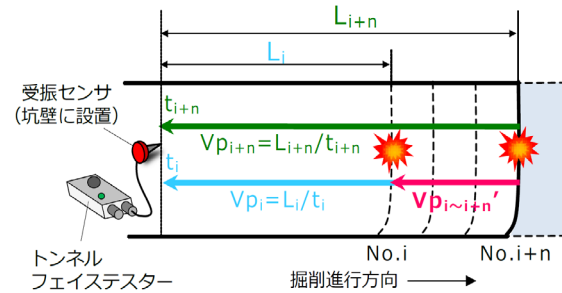


図-3 弾性波速度算出概念図

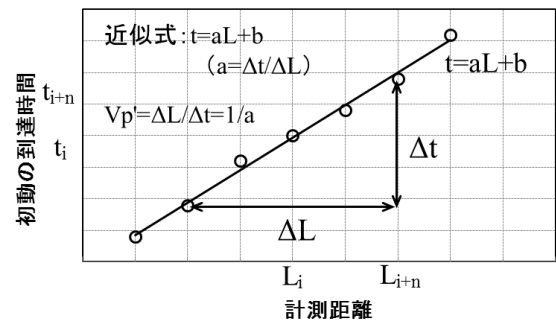


図-4 走時曲線

波速度 $V_{p'}$ は、図-4 に示すように、計測距離（切羽～地震計） L と弾性波の初動到達時間 t の関係（走時曲線）から求めることができる。走時曲線と区間弾性波速度を次式に示す。

$$t = aL + b \quad (3)$$

$$V_{p'} = dL/dt = 1/a \quad (4)$$

3. トンネル現場における検証実験

2つのトンネル現場において、本システムを用いて以下の検証実験1～3を行った。

検証実験1：本システムの計測精度の確認

検証実験2：進行区間の地質性状の評価手法の検討

検証実験3：計測対象とする速度領域の検討

以降、検証実験の具体的内容と結果を示す。

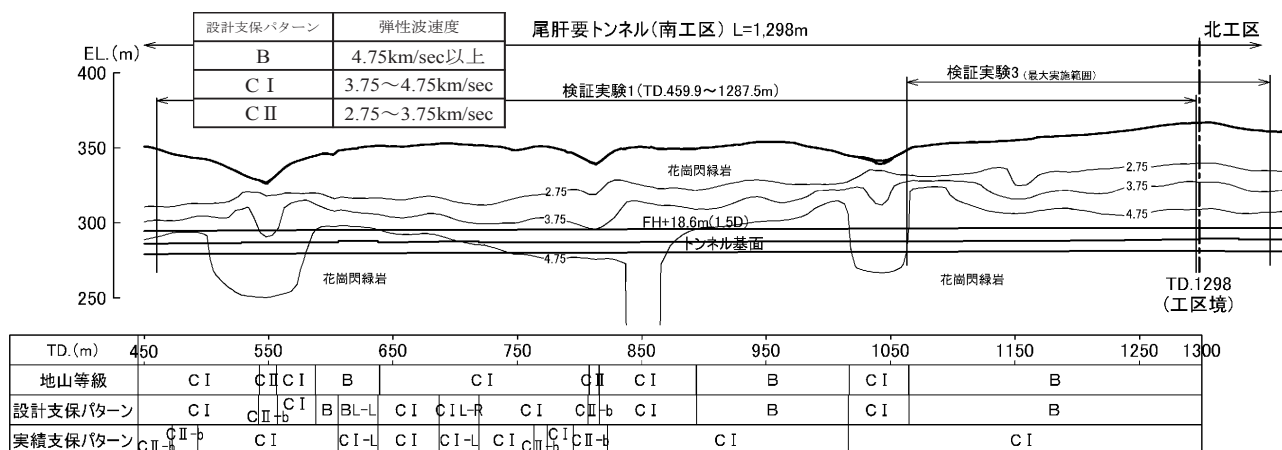


図-5 地質縦断面図（南工区）

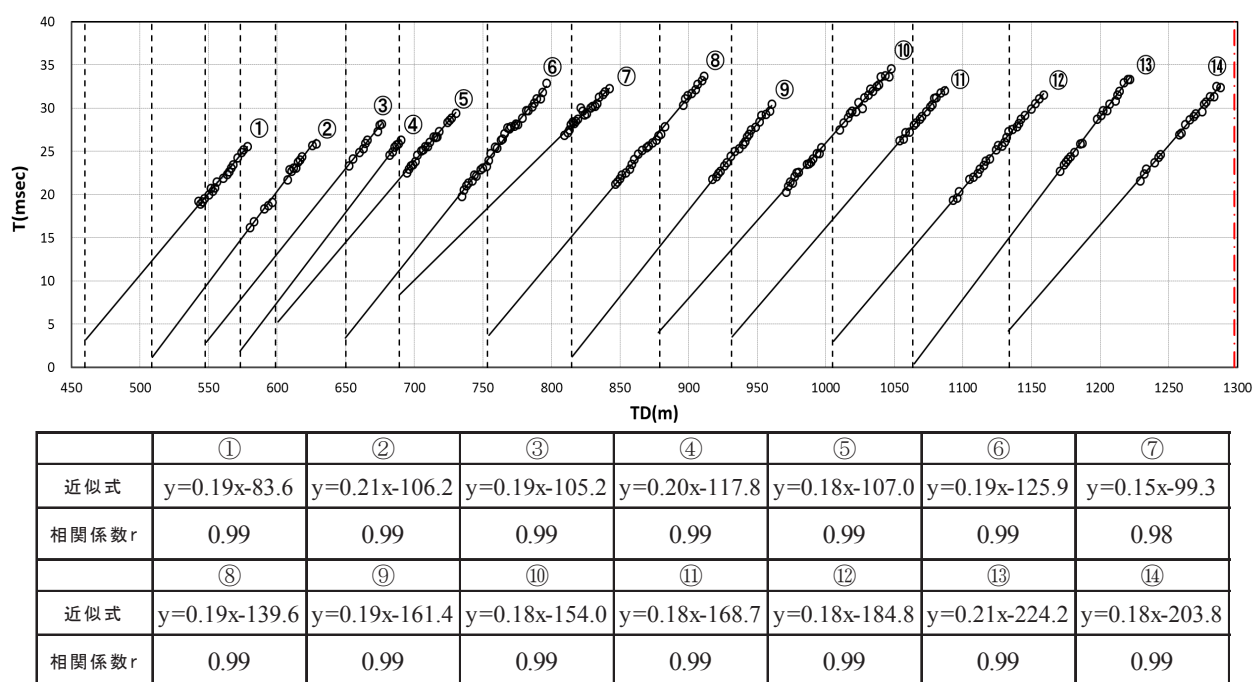


図-6 走時曲線

3.1 検証実験Ⅰ（本システムの計測精度の確認）

(1) 実験概要

東北地方整備局三陸国道事務所発注の尾肝要トンネル（ $L=2,736\text{m}$ 、内空断面 $=62.7\text{m}^2$ ）は、中生代白亜紀花崗岩類前期の比較的均質な地質で構成されている。図-5に検証実験を行った区間の地質縦断面図を設計・実績支保パターンを併せて示す。図-5より、計測区間の地山等級はB～CⅡであり、弾性波速度は $2.75\sim 4.75\text{km/sec}$ 以上が想定されていた。切羽から70～120m程度後方に地震計を設置し、発破で発生する弾性波を計測し、初動の到達時間を算出した。地震計は50m程度の切羽進行毎に、掘削方向に移設し計測を継続した。

(2) 計測結果

TD459.9～1287.5m 区間の掘削中に実施した 14 回の計測結果（走時曲線）を図-6 に示す。図-6 は、各計測に

おいて、切羽での発破により発生した弾性波が、地震計まで到達する時間をプロットしたものである。各計測時での地震計の設置位置は、図中に破線で示している。

これらの結果より、計測で得られた相関係数は $r=0.98\sim 0.99$ 程度を示し、精度良く探査が実施できているものと考えられる。

図-7 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 V_p を図中に示した。図-7 より、平均弾性波速度は $V_p = 4.32\sim 4.76\text{km/sec}$ 程度の結果が得られている。

ここで、探査区間の実績支保は、CⅡ-b と CⅠパターン（CⅡ-b： $2.75\sim 3.75\text{km/sec}$ 、CⅠ： $3.75\sim 4.75\text{km/sec}$ ）であり、平均弾性波速度は、実績支保に対応する範囲内の速度が得られている。このことから、地山状況にほぼ整合した結果が得られているものと考えられる。

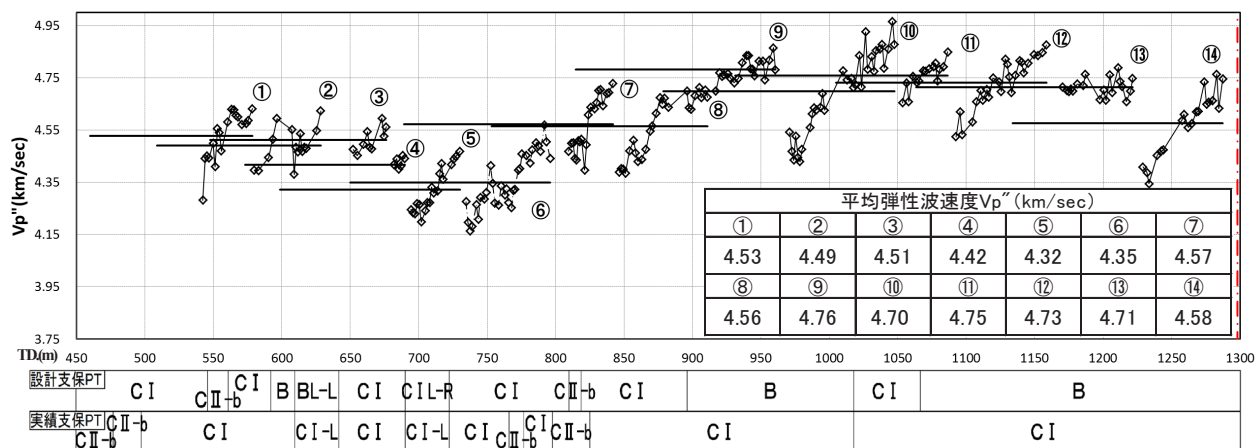


図-7 平均弾性波速度と設計・実績支保パターン

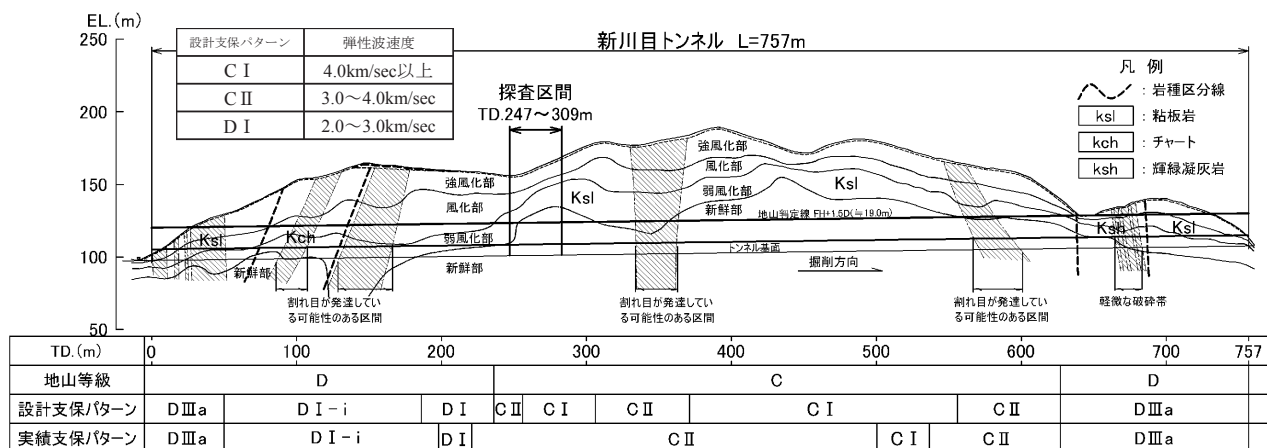


図-8 新川目トンネル地質縦断面図

(3) 考察

本システムを用いることにより、精度よく坑壁を伝播する弾性波速度を計測することが出来ることを確認した。しかし、平均弾性波速度は実績支保パターンから想定される弾性波速度の範囲内であるが、全体的にやや高めの値を示している。また、切羽の進行により計測距離が長くなるにしたがい、得られる速度は速くなる傾向を示した。さらに、地山等級が C I と C II が混在した区間で探査を行っていることも、計測結果に影響を与えているものと考えられる。このため、今後の課題として、同一の岩種及び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。

3.2 検証実験 2 (進行区間の地質性状の評価手法の検討)

(1) 実験概要

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) の地質は、中生代～古生代三畳紀～二畳紀粘板岩を主体とした堆積岩系から構成されている。本トンネルの地質縦断面図を図-8 に示す。図-

8 に示すように、TD.247～309m において、本システムを用いた弾性波探査の検証実験を実施した。

今回の検証実験は、TD.247～309m 区間の実績支保が C II パターン (3.0～4.0km/sec) の同一の地山区分で実施し、切羽進行区間の区間弾性波速度を算出することで、進行区間の地山性状を定量的に把握する手法を検討した。また、前章で課題とした、計測距離と得られる弾性波速度の関係を検証するため、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) で受振した。計測距離 (切羽～地震計) は、GEO-1 が 10～70m 程度、GEO-2 が 50～85m 程度とした。また、計測距離が比較的短くなることから、各発破の瞬発雷管の位置を測量し、瞬発雷管～地震計区間の 3 次元的に最短距離となる伝播距離を考慮した。

(2) 計測結果

図-9 に計測結果 (走時曲線) を示す。図-9 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ものと考えられる。また、3 次元的な伝播距離により整理した結果を図-10 に示す。

図-10 より、GEO-1 で得られた結果において、計測距

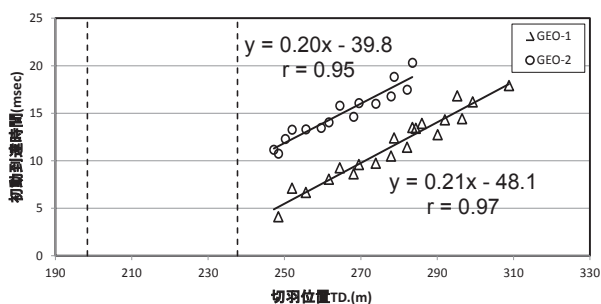


図-9 計測結果（走時曲線）

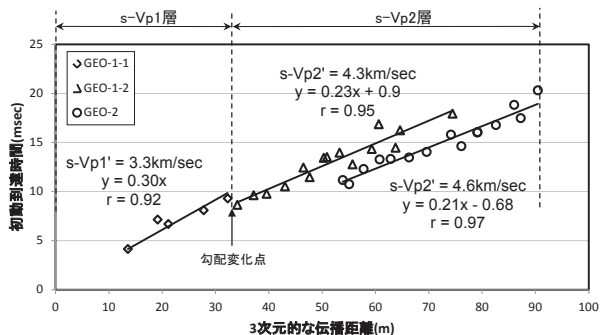


図-10 走時曲線（計測距離による整理）

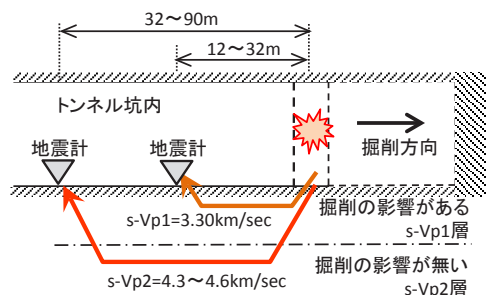


図-11 伝播経路概念図

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。なお、(4)式から求めた区間弾性波速度 Vp' は、計測距離が12~32mでは3.3km/sec、32~90mでは4.3~4.6km/secを示した。

(3) 考察

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と、掘削が地山へ与える影響を考慮すると、計測距離により、トンネル掘削の影響を受けた速度領域（s-Vp1層）と、掘削の影響がない速度領域（s-Vp2層）を伝搬した弾性波を捉えているものと考えられる。図-11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。

ここで探査区間は、図-8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、トンネル掘削の影響を受けた速度領域（s-Vp1層）3.3km/secと整合した結果が得られている。また、事前調査として実施された弾性波探査の結果は、地山の弾性

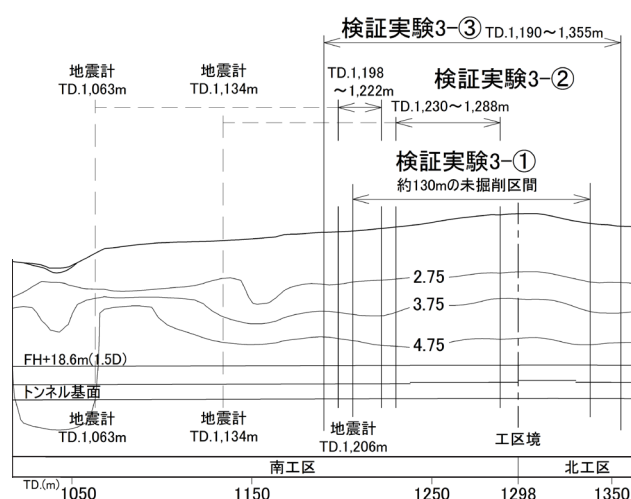


図-12 検証実験実施位置図

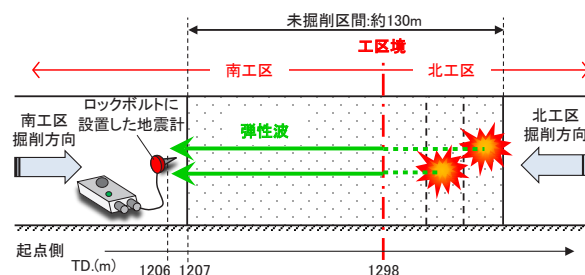


図-13 未掘削地山の弾性波速度計測概念図

波速度は4.0~5.0km/secと想定されており、掘削の影響がない速度領域の弾性波速度（s-Vp2層）4.3~4.6km/secと同程度の結果が示されているものと考えられる。

3.3 検証実験3（計測対象とする速度領域の検討）

(1) 実験概要

3-1節で述べた検証実験1を実施した尾肝要トンネルは、起点側坑口よりTD.1,298mを工区境とする両押し掘削施工によるトンネル工事である（図-5参照）。

そこで図-12に示すように、130m程度の未掘削区間の範囲を対象に、本システムを用いて以下に示す検証実験を実施した。

- 検証実験 3-①：北工区の発破による、未掘削地山の弾性波速度測定
- 検証実験 3-②：南工区の掘削進行毎に、進行区間の弾性波速度測定
- 検証実験 3-③：掘削後の坑壁表面付近の弾性波速度測定

(2) 計測結果

①北工区の発破による、未掘削地山の弾性波速度測定

本システムを用いて、未掘削地山の弾性波速度を計測した。計測概念図を図-13に示す。図-13より、北工区の掘削発破により発生する弾性波を、南工区の切羽直近のロックボルト（TD.1,206m）に設置した地震計で計

測した。具体的には、2 台のシステムに、同時に擬似の発破信号を記録することで、時刻の同期を図った上で、1 台目は北工区の掘削発破による発破信号を、2 台目は南工区に設置した地震計で弾性波データを記録した。

初動到達時間から(1)式を用いて、弾性波速度を算出した。なお、伝播経路については、計測区間が比較的長距離であるため、起振源と地震計は同一直線上とした。

計測は 2 回の発破で行い、測定結果は 1 回目が $V_p=5.34\text{km/sec}$ 、2 回目が $V_p=5.18\text{km/sec}$ となり、平均値は $V_p=5.26\text{km/sec}$ となった。当該区間の地山等級は B (4.75km/sec 以上) とされていることから、トンネル掘削の影響がない速度領域 ($\alpha\text{-Vp3}$ 層) を伝播したものと考えられる。

②南工区の掘削進行毎に、進行区間の弾性波速度測定

本システムを用いた、切羽進行区間の弾性波速度を把握する手法を検討するために、検証実験を実施した。計測範囲は、TD.1,198～1,222m と TD.1,230～1,288m の地質性状が均質で安定した 2 区間とし、地震計の位置はそれぞれ、TD.1,063m と TD.1,134m とした。なお、計測中は地震計は移設せず連続的に計測を行った。

図-14 に計測結果（走時曲線）を示す。図-14 に示す

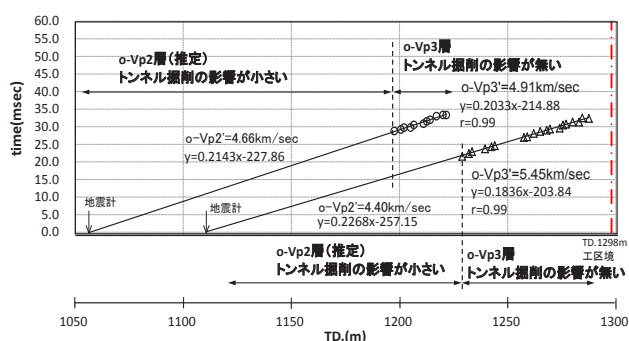


図-14 計測結果（走時曲線）

ように、相関係数は 2 区間とも、 $r=0.99$ 程度を示しており、精度よく計測ができていると考えられる。また、(4)式より区間弾性波速度は $4.91\sim 5.45\text{km/sec}$ となる。

ここで、今回の計測では計測距離が 100m 以上と比較的長距離であるため、計測距離と速度領域の関係 (3-1～2 節参照) と前項での結果を考慮すると、今回の計測では、トンネル掘削の影響が無い速度領域 ($\alpha\text{-Vp3}$ 層) を捉えていると考えられる。

また図-14 に示す走時曲線から、トンネル掘削の影響が小さい速度領域 ($\alpha\text{-Vp2}$ 層) を推定すると、 $4.40\sim 4.66\text{km/sec}$ 以下になると考えられる。なお、当該区間の実績支保は CI パターン ($3.75\sim 4.75\text{km/sec}$) であり、 $\alpha\text{-Vp2}$ 層と同程度の結果が得られていると考えられる。

③掘削後の坑壁表面付近の弾性波速度測定

当該区間の掘削後に、坑壁表面近傍の弾性波速度を把握するために、ハンマー打撃を起振源として、本システムを用いた検証実験を行った。計測範囲は TD.1,190～1,355m (工区境を含む) とした。

具体的には、図-15 に示すように、ハンマーによる坑壁への打撃により発生する弾性波を、坑壁に設置した地震計で計測した。計測中は地震計は移設せず、15m 程度の区間における弾性波の波形データを 1.5m 毎に記録器に記録し、初動到達時間を計測した。また、起振エネル

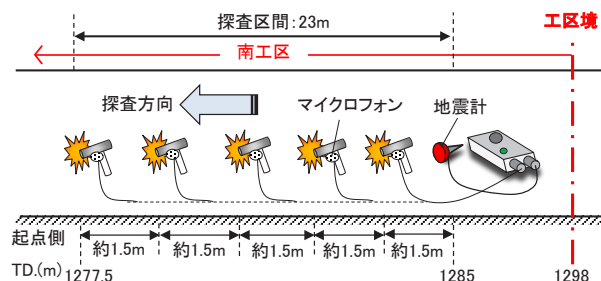


図-15 計測概念図

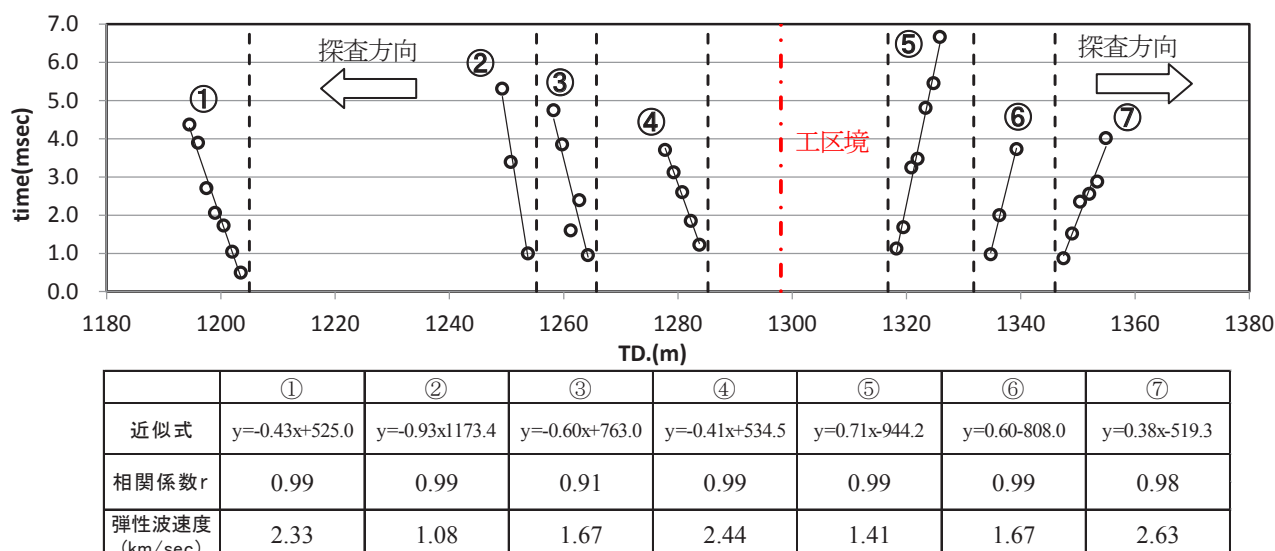


図-16 計測結果（走時曲線）

表-1 計測結果から想定される速度領域

速度領域	弾性波速度 (km/sec)	計測距離	摘要
o-Vp1層 掘削の影響が 大きい	1.10～2.60	～15m程度	計測③
o-Vp2層 掘削の影響が 小さい	4.40～4.66以下	～100m程度	計測② からの推定
o-Vp3層 掘削の影響が 無い	4.91～5.45	100～160m程度	計測① 計測②

ギーが小さいため、およそ 10m 以上の距離では、スタッキングすることにより、初動到達時間を求めた。ハンマー打撃による起振のトリガーについては、ハンマーに固定した小型のマイクロフォンを用いて行った。

図-16 に 7 回の探査結果（走時曲線）を示す。図-16 より、相関係数は $r=0.91\sim0.99$ 程度を示しており、概ね精度良く探査が行えていると考えられる。また、(4)式から求められた弾性波速度は、 $1.10\sim2.60\text{km/sec}$ 程度を示しており、トンネル掘削の影響が大きい速度領域（o-Vp1 層）を捉えていると考えられる。

(3) 考察

本システムを用いることで、同一区間における掘削前、掘削中、掘削後の坑壁を伝播する弾性波速度を計測した。表-1 に想定される速度領域区分を示す。掘削前と掘削進行毎に計測した結果は、ほぼ整合していると考えられるが、計測距離が長距離であったため、どちらも、トンネル掘削の影響が無い速度領域（o-Vp3 層）を捉えていると考えられる。また、トンネル掘削の影響が小さい速度領域（o-Vp2 層）を想定すると、実績支保に対応する弾性波速度とほぼ整合していると考えられる。また、掘削後に実施した計測では、掘削の影響が大きい速度領域（o-Vp1 層）を示しているものと考えられる。これらの結果より、今後は計測距離と得られる弾性波速度の関係について検証を行うことが必要であるものと考ええる。

4. まとめ

掘削発破を起振源として発生する弾性波を安全に計測することができるシステムを開発した。

本システムを用いた計測精度の検証実験では、相関係数は $r=0.96$ 程度を示し、高精度で探査が可能であることが確認できた（検証実験1）。また、計測距離により捉えることができる速度領域は異なると考えられ、今回の検証実験では、30m程度までであれば、実績支保と整合した弾性波速度領域を捉えることができるものと考えられる（検証実験2）。

さらに、両押し掘削施工のトンネルを利用して、同一区間における、本システムを用いて掘削前、掘削中と掘削後での弾性波探査を実施し、さらに速度領域を細分化できる可能性を示した（検証実験3）。

今後は、合理的な支保パターンの選定に有用な計測手法を確立するとともに、様々な岩種や地質構造を持つ現場での検証実験を行い、探査精度の検討を進めていく予定である。

謝辞： 検証実験を行うにあたり、快く現場をご提供いただきました東北地方整備局三陸国道事務所、東北地方整備局岩手河川国道事務所には心より御礼を申し上げます。

参考文献

- 1)物理探査学会：物理探査適用の手引き，p.20，2008.
- 2)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，p.40，2003.
- 3)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.

(2013.9.2 受付)

DEVELOPMENT AND ILLUSTRATION OF SYSTEM WHICH EVALUATING GEOLOGICAL CONDITION AROUND TUNNEL CUTTING FACE BY THE EXCAVATION BLASTING.

Masashi NAKAYA, Hiroyuki YAMAMOTO, Shinji UTSUKI,
Kazuhiro ONUMA, Masayuki SUZUKI

In Japan, the seismic wave exploration is one of preliminary survey of NATM, and its accuracy decreases as depth of overburden increase. Further, seismic wave speed is a major factor of designing tunnel support patterns. Whenever cutting face is progress, geological condition is evaluated by visual observation. Therefore, a rational evaluateing technique is required strongly.

“Tunnel Face Tester(TFT)” is developed which aim to rationally evaluating geological condition around cuuting face. This new system can be controlled at remote distance from the blasting point and generate substantial seismic wave leading to safe and reliable measuring of the seismic wave speed.

In this article, structure of this system and the measuring example are described as follows.

