

ゲル状充填材を用いた切羽前方孔間弾性波トモグラフィの試み

水谷 和彦*¹・赤木 英治*²・袋井 孝洋*³

CROSS-HOLE SEISMIC TOMOGRAPHY USING GELLED FILLER APPLIED

Kazuhiko MIZUTANI, Eiji AKAGI, Takahiro FUKUROI

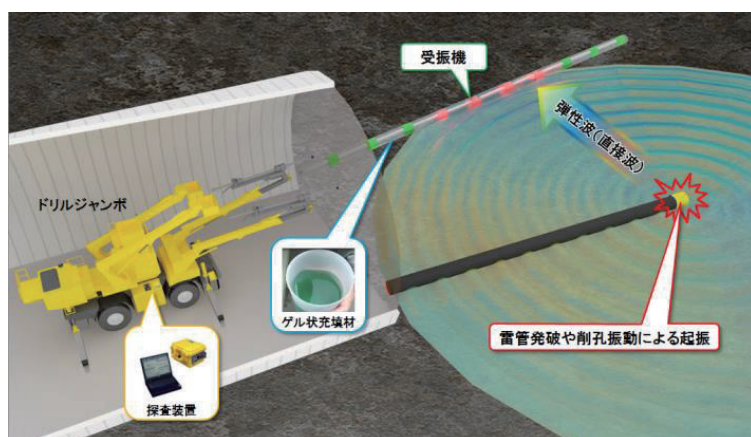


図-1 切羽前方クロスホール弾性波トモグラフィ概念図

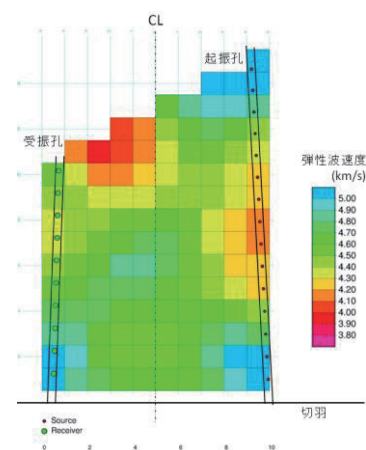


図-2 解析結果

研究の目的

山岳トンネルの施工条件は、土被りが大きく施工範囲が広域におよぶことから、設計段階では十分な精度の地質情報を得ることができない。よって、施工段階で切羽の地質状況に応じて修正設計を行いながら施工するのが一般的である。掘削前に地質状況を調査する方法として反射法による切羽前方の弾性波探査があるが、その結果は、実際の地質状況と異なる場合もあり、設計変更というよりも危険予知的な利用に留まっているのが現状である。そこで、事前設計が可能な、高精度切羽前方探査技術を開発することを目的とした。

技術の説明

本技術は、ドリルジャンボによる削孔検層孔へ孔間弾性波トモグラフィを適用することにより、ボーリング孔間の弾性波速度構造を測定する切羽前方探査技術である。水平ボーリング孔にゲル状充填材を充填することにより、孔壁保護と弾性波伝搬を行う点が本手法の特徴である。孔間距離が基本的に既知であり、直接波を利用した手法であることから、一般的な探査手法の反射法弾性波探査よりも高精度な結果を得ることができる。

主な結論

本論文では、室内模型試験および現場実証試験を実施することにより、本手法の成立性を確認した。探査結果は、掘削時の切羽状況とも整合が取れており、本手法の成立性を確認することができた。しかし、現場実証試験では受振孔の孔荒れにより、受振機を切羽奥 10m までしか挿入できなかった。その原因としては、削孔直後にゲル状充填材による保孔ができなかったことや、今回のゲル状充填材仕様では十分な保孔効果が得られなかったことが考えられる。また、孔奥と手前で、ゲル状充填材の充填不良を原因とした、弾性波の受振不良が生じた。その問題点を踏まえ、現在、削孔直後に保孔可能な充填システムの開発や、保孔効果の高いゲル状充填材仕様への改良を行っている。また、本手法を汎用的な切羽前方探査手法とするため、簡易に実施可能な測定・解析システムの構築も進めており、本手法の様な切羽前方探査技術の高精度化により、山岳トンネルの事前設計技術向上に繋げていきたいと考えている。

*1 本店 土木事業本部 土木技術部 施工技術グループ
*3 本店 土木事業本部 土木設計部

*2 関西支店 新田東佐味トンネル作業所

ゲル状充填材を用いた切羽前方孔間弾性波トモグラフィの試み

水谷和彦^{*1} 赤木英治^{*2}
袋井孝洋^{*3}

要 旨

山岳トンネルの施工条件は、土被りが大きく施工範囲が広域におよぶことから、設計段階では十分な精度の地質情報を得ることができない。よって、施工段階で切羽の地質状況に応じて修正設計を行いながら施工するのが一般的である。掘削前に地質状況を調査する方法として反射法による切羽前方の弾性波探査があるが、その結果は、実際の地質状況と異なる場合もあり、設計変更というよりも危険予知的な利用に留まっているのが現状である。本研究では、反射法の弱点を解決する手法として、直接波を用いた孔間弾性波トモグラフィに着目した。孔間弾性波トモグラフィは、孔間距離が基本的に既知であり、直接波を利用した手法であることから、探査原理的に反射法よりも高精度である。本手法の特徴は、水平ボーリング孔にゲル状充填材を充填することにより、孔壁保護と弾性波伝播を行う点である。本論文では、室内模型試験および現場実証試験を実施することにより、本手法の成立性を確認した。

キーワード 山岳トンネル／切羽前方探査／孔間弾性波トモグラフィ／直接波／ゲル状充填材

目 次

- | | |
|-------------------|-----------|
| 1. はじめに | 3. 現場実証試験 |
| 2. ゲル状充填材の充填性模型実験 | 4. おわりに |

CROSS-HOLE SEISMIC TOMOGRAPHY USING GELLED FILLER APPLIED

Kazuhiko MIZUTANI Eiji AKAGI
Takahiro FUKUROI

Synopsis:

The construction conditions of the mountain tunnel are large overburden and wide working area. So we can't get high precision geological information at the design stage. So it is usual to modify the design at the construction stage. Tunnel reflection survey is a method to investigate geological conditions before excavation. However, there are many cases of making mistakes. Therefore, it is danger prediction rather than design change. We focused on cross-hole seismic tomography in this study. Cross-hole seismic tomography is a method of knowing the distance between halls and using direct waves. Therefore, the principle of exploration of the Cross-hole seismic tomography is accurate than tunnel reflection survey. The feature of this method is protection of the hole and elastic wave propagation by gelled filler. This report confirmed the feasibility of this method by indoor model test and field demonstration test.

* 1 本店 土木事業本部 土木技術部 施工技術グループ * 2 関西支店 新田東佐味トンネル作業所
* 3 本店 土木事業本部 土木設計部

1. はじめに

1.1 背景

山岳トンネルにおける支保工の設計は、各発注者の施工実績に基づいて作成された地山分類に対する標準支保パターンを適用する、標準的支保パターンによる設計方法が一般的であり、地質調査＝トンネル支保工の設計と言っても過言ではない。

トンネルの地質調査は、トンネル坑口から数 100m の水平コアボーリングや地表からの数本の鉛直コアボーリング、それに併せてトンネルルート上で弾性波探査や電気探査等の物理探査を実施し、地質縦断図等を作成するのが一般的である。しかし、山岳トンネルは、都市トンネルや一般土木構造物に比べ、建設地点の土被りが大きいことや施工範囲が数キロと広範囲に渡ることから、施工範囲に比べてボーリングは疎になり、それを補完する為に物理探査を実施するが、土被りが大きいために精度は劣る。

この様に、山岳トンネルの地質調査精度には課題が多く、事前地質調査と施工時の地質状況の不一致を起因とした事前設計と実施設計の乖離により、工事費の増大や工期遅延といった問題が発生する場合が多い。よって、実際の地質状況はトンネル掘削時に確認し、支保工の修正設計を行いながら施工を進める方法がとられ、真の詳細設計は施工段階に委ねられていると言わざるを得ないのが現状である。

施工段階では、掘削時の切羽状況を観察して点数化し、その点数に応じて支保パターンを決定するのが一般的である。その観察内容としては、目視による地山安定状況やハンマー打撃による岩強度の判定、目視による割れ目頻度や状態、湧水量や湧水による劣化程度といった、定性的な内容が主である。この支保パターンの設計方法は、地質状況に応じて最適な設計ができるという利点はあるが、往々にして先の地質変化に対応できず、支保工の変状により縫返し等の手戻が発生する場合も少なくない。また、地山が良くなり、事前設計よりも軽い支保パターンで施工可能と判断できる場合でも、前方の地質が不良になるのではないかという疑念から、支保パターン変更には至らず、不経済な施工をしている場合も少なくない。地質変化が緩やかな地質構造においては、切羽観察に基づいた支保工設計でも対応可能であるが、地質層境や断層破碎帯の様な急激な地質変化に対しては、対応困難な設計方法である。

そこで、前方の地質変化に応じた最適な支保パターンの設計や事前補強・地下水位低下等といった事前対策を計画的に実施する為に、切羽前方の地質状況把握を目的とした、切羽前方探査を採用することが重要となる。

1.2 従来の切羽前方探査技術

現在、実用されている主要な切羽前方探査手法として

は、「道路トンネル観察・計測指針 平成 21 年改訂版 社団法人 日本道路協会」¹⁾に示されており、手法としては大きく 2 つに分類される。1 つ目の分類としては、地質状況を直接的に把握可能なボーリングによる手法があり、具体的な方法としては、先進ボーリング、探りノミ、削孔検層法が挙げられる。2 つ目の分類としては、地質状況を間接的に把握可能な反射波を用いた弾性波探査手法があり、具体的な方法としては、トンネル HSP 法、TSP 法、反射トモグラフィが挙げられる。

(1) 先進ボーリング（コアボーリング）の特徴

先進ボーリングによる方法は、コアにより実際の地質状況を確認できることや、室内試験やボアホールに物理検層を併用する事により、定量的な物性値を把握可能であることから、最も信頼の高い方法である。一方、トンネル施工では使用しない専用機械や専門技術者が必要になると共に、調査により切羽を占用する期間は比較的長期間となる。トンネル施工において、切羽作業はクリティカル作業である事から、切羽の占有期間はトンネル施工の進捗と利益に大きく影響する。先進ボーリングの作業で時間を要する作業としては、コアを採取する作業であり、特に不良地山部で良質なコアを採取する際には細心の注意と時間を要する事になる。

(2) 先進ボーリング（ノンコアボーリング）の特徴

ノンコアボーリングによる手法は、コア採取は諦めて掘削効率を追求し、地質の判定は削孔スピードと削孔水の状態、スライム等の情報を総合的に判定して地山を評価する方法がある。この方法は、トンネル施工上で重要な地下水状況の把握や地下水位低下を行う事が併せてできる事から、コアは採取できないけれども有効な方法として採用されている。

(3) 探りノミおよび削孔検層の特徴

専用ボーリングマシンでなく、トンネル施工削岩機であるドリルジャンボにより行うノンコアボーリングを、探りノミという。探りノミに併せて、削孔時の削孔速度、フィード圧、回転圧、打撃圧といった削岩機より得られる機械データを削孔時に併せて取得し、それらデータより算出される削孔エネルギー（削孔に要したエネルギー値）を地山の硬軟の判断に使用する、削孔検層という方法もある。

ドリルジャンボによる削孔検層の可探深度は 30m 程度であり、1 週間に掘削する延長を $4\text{m/日} \times 6 \text{日} = 24\text{m}$ として週末に 1 回 30m の探査を行うとすると、6m のラップ長を確保できる方法である事や専用機械や専門技術者を必要とせず、トンネル作業員および現場職員でできる方法である事から、日常的に実施可能な前方探査手法になっている。ただし特殊地山の場合、従来のコアボーリング

の様な情報は不可欠であり、必要に応じて専用機によるコアボーリングも併せて実施しているのが現状である。

（４）反射法弾性波探査の特徴

これまで述べてきたボーリングによる前方探査は、直接的に地山を評価できる方法であるものの、情報は線的であり、幾らボーリング本数を増やしたとしても基本的には離散的な情報である。

そこで、ボーリング情報の補完や数 100m 先の大凡の前方地質を 3 次元的に把握する方法として、反射波を用いた弾性波探査手法がある。トンネル HSP 法は坑内で行う数回の発破起振により、切羽前方の不連続面からの跳ね返ってくる弾性波を坑内に設けた複数の受振機にて計測することにより、前方地質を予測する方法である。また、TSP 法は、坑内で行う複数回の発破により、切羽前方の不連続面から跳ね返ってくる弾性波を坑内に設けた数個（1～4 個）の受振機にて計測することにより、前方地質を予測する方法である。これら両者の違いとしては、起振点や受振点の配置が異なる点であり、探査原理に大きな違いはない。反射法による弾性波探査はトンネル坑内に起振源や受振源を比較的容易に設置できることから、探査に要する切羽占有時間が短く、トンネル施工に合った探査手法であり、多くの開発が報告されている^{2) 3) 4)}。これらは、起振源に工夫をしたものが多く、施工しながら施工機械等の振動を計測し、それを前方探査に利用する方法である。しかし、反射波を用いた弾性波探査の結果は、ボーリングデータ程の信頼性のあるデータは得られず、探査精度がその程度である主な原因として以下が考えられる⁵⁾。

- ・ トンネル横断方向に分布した不連続面は捉えられるが、トンネル縦断方向に分布する不連続面は反射波が返ってこないで捉えられない。
- ・ 反射波を利用するので不連続面までの距離と地山の弾性波速度がパラメータとなると共に、反射面が多くなればその分だけパラメータは増え、解が多くなり探査精度は落ちる。
- ・ 地質状況が徐々に変化する様な地質構造や脆弱地山の場合、反射波が跳ね返ってこないで、その様な地山は探査できない。
- ・ 反射面の深度が深くなればなる程、反射波のエネルギーは小さくなり、波形の読み取りが困難になるので、深度が深いほど探査精度は落ちる。

1.3 開発技術の概要

反射波を用いた弾性波探査は前節で述べたような問題点があり、本研究ではその様な問題を解決する一つ方法として、直接波を用いた弾性波探査手法「孔間弾性波トモグラフィ」に着目した⁶⁾。

弾性波トモグラフィは、医学分野で用いられている X 線 CT の手法を地盤や岩盤の弾性波探査に応用し、特にボーリング孔一孔間や地表一ボーリング孔間、調査横坑一坑間の詳細な弾性波速度分布を求めようとする探査手法で、調査対象領域を取り囲むように測定を行ない、対象領域を通過してきた直接波の到達時間を読み取り、領域内の速度分布を求める方法である。孔間弾性波トモグラフィの測定は、ボーリング孔内で機械的または発破などにより弾性波を発生させ、一方のボーリング孔で受振する（図-1）。受振機はボーリング孔内に吊るし柿状に設置し、孔内に水を溜める事により、地盤中を通ってきた弾性波を受振する。

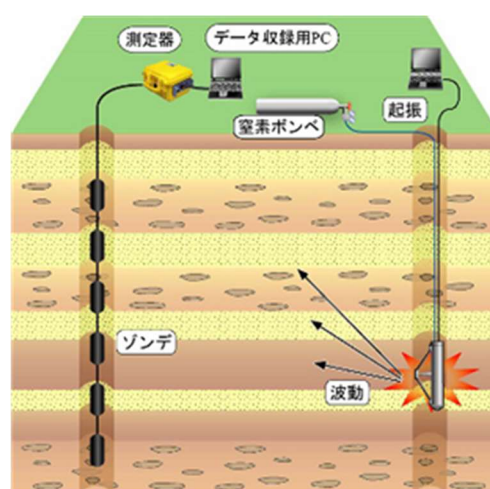


図-1 孔間弾性波トモグラフィ測定概念図
(日本地下探査HP より抜粋)

孔間弾性波トモグラフィは、孔間距離が基本的に既知であり、直接波を利用した手法であることから、探査原理的に反射法よりも高精度である。また、ドリルジャンボのボーリング孔に本手法を適用できれば、切羽前方を集中的に探査できる汎用的な手法になると考えた。しかし、本手法を適用するにあたり次の課題が考えられた。
①鉛直ボーリングの場合は振動を伝播させるために孔内に水を溜めるが、水平ボーリングの場合、孔内に水を溜めることが困難である。
②鉛直ボーリングに比べて水平ボーリングの孔壁は崩れやすく、起振機や受振機の挿入や回収が困難である。そこで、水平ボーリング孔に充填が容易で岩盤亀裂に浸透せず、かつ、振動を伝えることが可能な材料として、固体と液体の中間的な流動性をもつ、ゲル状充填材を一つの候補と考えた。また、このゲル状充填材には、ボーリング孔の保孔効果も期待した。これらの技術を組合せて開発したものが「トンネル切羽前方クロスホール弾性波トモグラフィ探査」である（図-2）。本手法の最大の特徴は、水平ボーリング孔にゲル状充填材を充填することにより、孔壁保護と弾性波伝播を行う点である（図-3）。

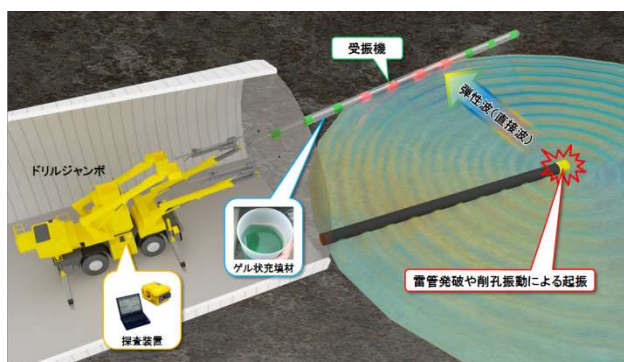
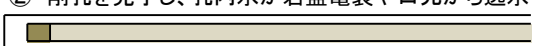
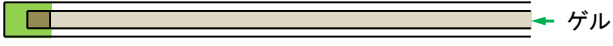
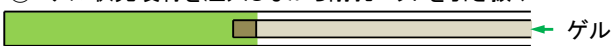


図-2 開発技術の概念図（鳥瞰図）

- ① 削孔ロッドを通じて供給される水により削孔

- ② 削孔を完了し、孔内水が岩盤亀裂や口元から逸水

- ③ 削孔ロッドを通じてゲル状充填材を供給

- ④ ゲル状充填材を注入しながら削孔ロッドを引き抜く

- ⑤ ゲル状充填材によるボーリング孔壁の保護

- ⑥ 受振機付きガイド管を挿入

- ⑦ 受振機付きガイド管を挿入し、ゲル状充填材を補足注入

- ⑧ 探査：起振機または受振機と地盤との振動を伝達

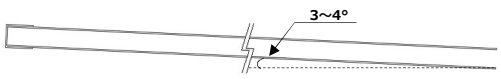
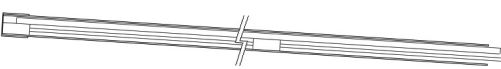
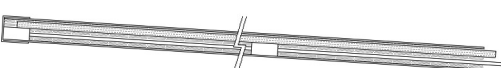
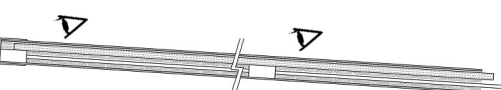

図-3 ゲル状充填剤の充填イメージ

2. ゲル状充填材の充填性模型実験

ゲル状充填材による充填性を確認することを目的に、模型試験を実施した。受振機を模擬した試験体をゲル状充填材注入管である塩化ビニル管に抱き合わせ、ボーリング孔を模擬した内径φ67mmの透明塩化ビニル管中に挿入し、ゲル状充填材を注入することにより、充填性の確認を行った（表-1）。

試験状況および目視観察結果を写真-1, 2 に示す。目視観察の結果、受振機の軸方向側に気泡が見られたものの、弾性波を感知する受振機の円周方向側はゲル状充填材が満たされていることから、振動伝播に問題ないと判断し、同仕様にて現場実証試験を実施することとした。

表-1 試験手順

No	試験手順内容
1	 ボーリング孔を模擬した透明塩化ビニル管を実際の削孔角度を考慮して3~4°上向き設置する。
2	 模擬ボーリング孔である透明塩化ビニル管内に模擬受振機付ゲル状充填材注入管を挿入する。
3	 注入管口元からゲル状充填材を注入し、注入管先端から充填され、口元に達した時点で注入を終了する。
4	 弾性波伝搬の妨げとなるようなエアだまりなどの空洞が模擬受振機周辺に無いか目視観察する。

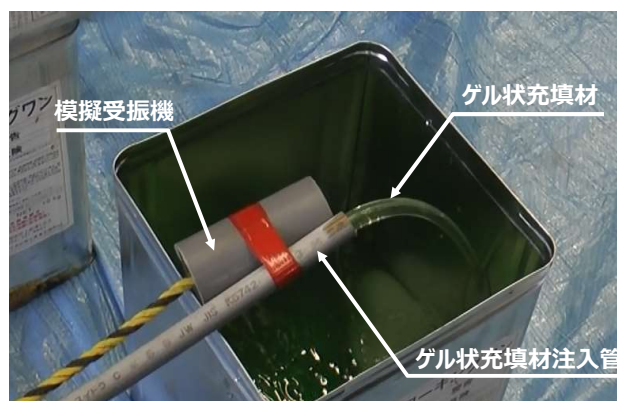


写真-1 注入管口元からのゲル状充填材吐出状況

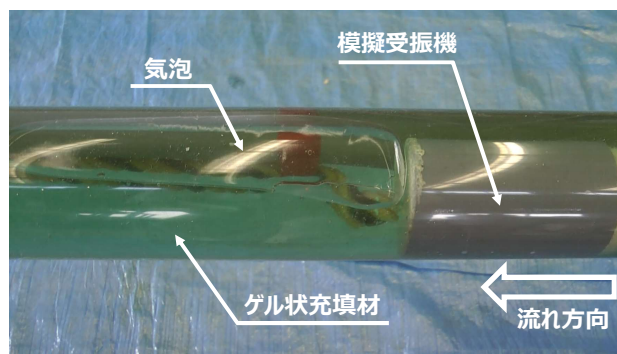


写真-2 模擬受振機周辺の目視観察結果

3. 現場実証試験

本手法の成立性確認のため、現場実証試験を実施した。

3.1 現場概要

現場実証試験は、宮崎県西臼杵郡日之影町の宮崎 218 号大平山トンネル東新設工事（発注者 国土交通省 九州地方整備局）にて行った。本工事は一般国道 218 号高千穂日之影道路の一環とし、大平山トンネル東工区の延長 $L=1,129\text{m}$ のトンネル掘削を行うものである（工期 2014.3～2017.3）。大平山トンネルは、秩父累帯と四万十類帯を境とする仏像構造線（図-4、図-5）を横断し、石灰岩は全体的に亀裂が発達した岩盤であり、断層破碎帯や亀裂帯の分布、空洞の存在が想定されており、地質変化の富んだ現場にて本探査技術の検証を行うこととした。

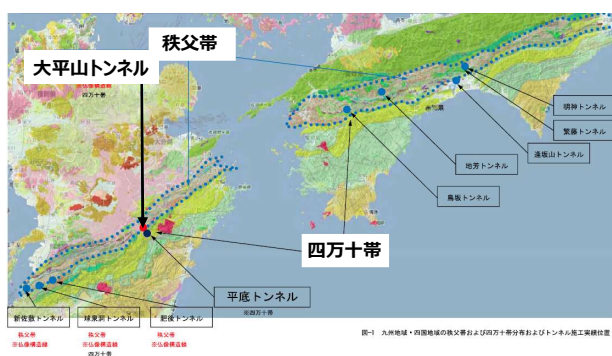


図-4 大平山トンネル周辺の地質平面図

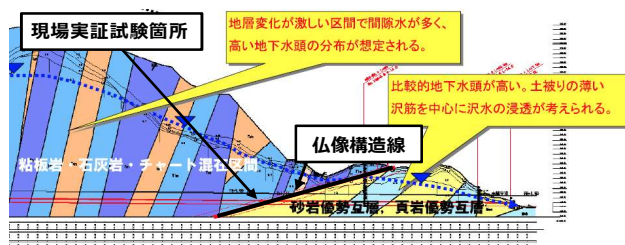


図-5 大平山トンネルの地質縦断面図

3.2 試験概要

試験は、ドリルジャンボによる切羽左右 2 本のボーリング孔（ $\phi 65\text{mm}$ ）を使用し、右孔を起振孔、左孔を受振孔として孔間を伝播する弾性波を測定した（写真-3）。



写真-3 現場実証試験状況

3.3 測定システム

測定システム模式図を図-6 に示す。

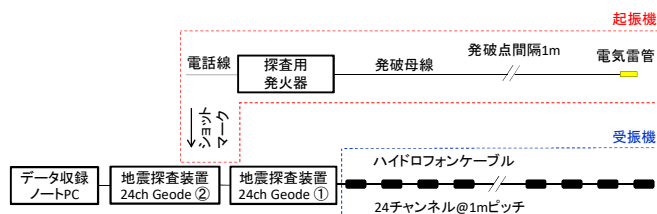


図-6 測定システム模式図

弾性波の受振にはハイドロフォンと呼ばれる水圧を感知するセンサを使用した。同時に多点の受振をすることが、測定効率およびデータ品質を上げるうえで有利な為、24 個のハイドロフォンが 1m 間隔に配置されたハイドロフォンケーブルを使用した。ハイドロフォンをゲル状充填材中に置くことで、地山を伝播してきた弾性波を感知可能とした。受振された信号は、探査装置で増幅・A/D 変換され、収録用 PC に時刻歴波形記録として保存した。A/D 変換の分解能は 24bit、サンプリング間隔を $20\mu\text{s}$ とした。2 台の弾性波探査装置とデータ収録用のノート PC は LAN ケーブルで接続することにより、同期して 48ch システムとして機能させた。

弾性波の起振は電気雷管の発破によって行った。発火器からは、発破回路への通電瞬間に分流信号が発生され、弾性波探査装置にショットマークとして伝送される。このショットマークの時間と弾性波の到達時間との時間差が、弾性波トモグラフィ解析の入力データとなる。

3.4 測定方法

今回の試験では、まず受振孔を削孔して、ゲル状充填材を注入したあと、受振機を挿入した。ボーリング孔壁崩壊により受振機を設置できる最大深度が 12.25m となったため、切羽からの深度 0.25m～12.25m の区間にハイドロフォン 13 点を設置した。

起振点は、深度 1m～15m の 15 点と、深度 30m で 1 点の、計 16 点とした（図-7）。

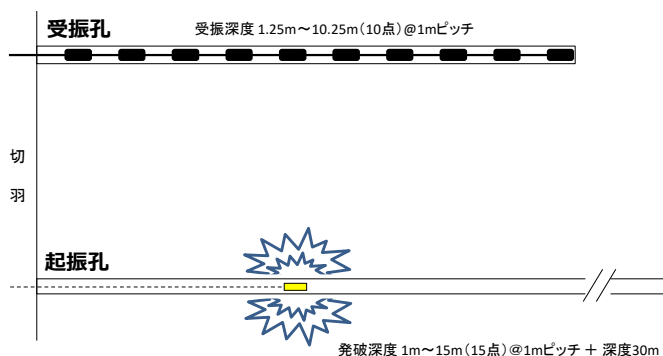


図-7 発破起振計測時の受振点配置模式図

3.5 測定結果

深度 0.25m, 11.25m, 12.25m の 3 点では、試験中いずれの信号も受振できなかった。この理由としては、ゲル状充填材の充填不足が考えられた。以降、受振機設置範囲は 1.25～10.25m の 10 点として説明する。

図-8 に発破起振による測定波形記録例を示す。起振孔の深度 9m で発破したときの波形記録で、ショットマークの時刻を時間 0 として表示している。波形記録中のマーカー（|）は、初動走時の読み取り例を示すもので、いずれの波形も明瞭な初動を示す良好なデータと判断できる。他の発破点のデータも、同様に概ね良好であった。

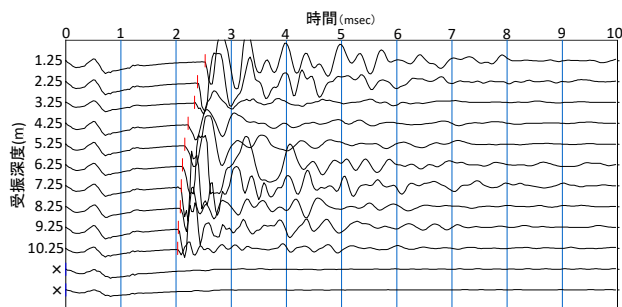


図-8 孔間弾性波測定波形記録例

3.6 解析方法

図-9 に孔間弾性波トモグラフィ解析のフローチャートを示す。

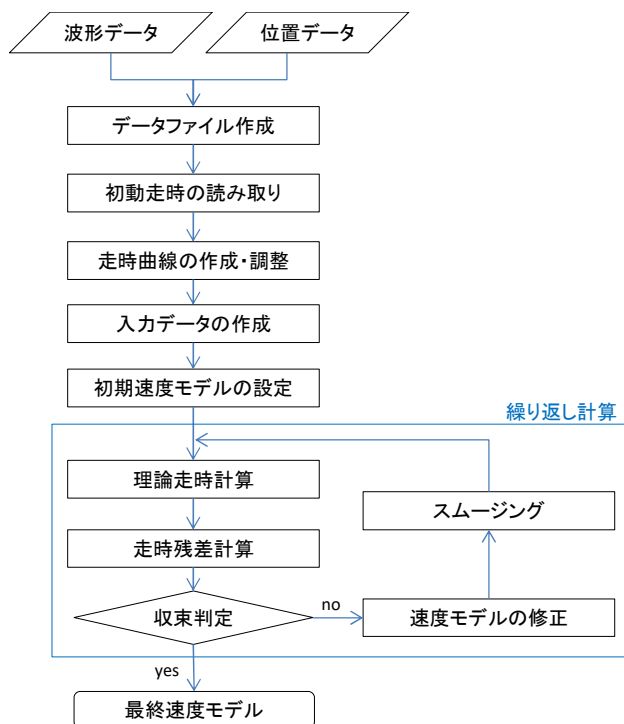


図-9 解析フロー

図-10 は、データを取得したすべての起振点受振点の組合せを直線で結んで示した観測パターン図である。図-11 には解析結果（最終速度分布図）を示す。

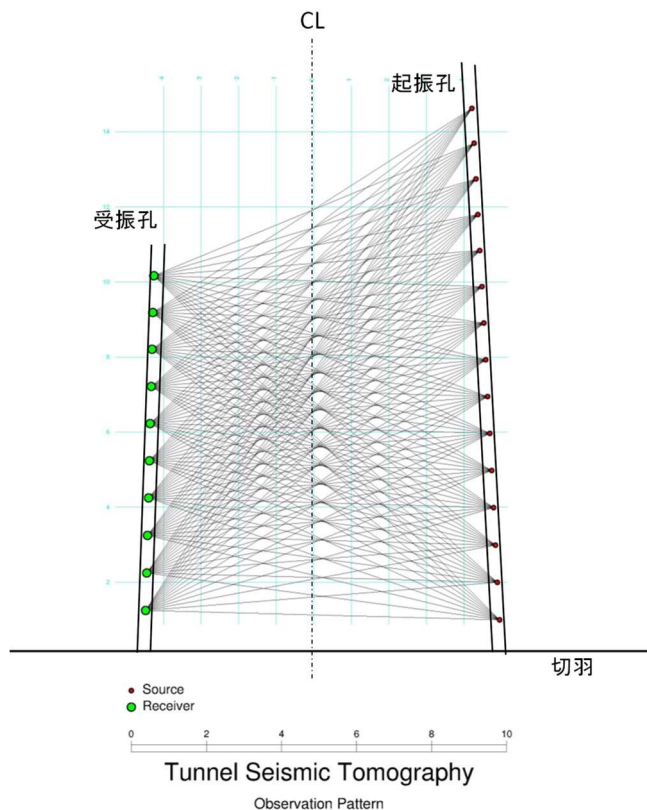


図-10 観測パターン図

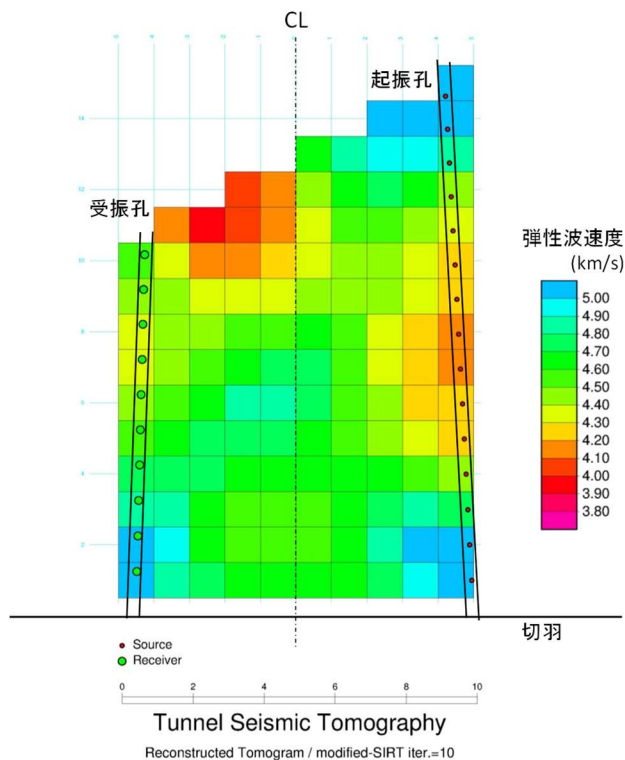


図-11 解析結果

4. おわりに

探查結果は、掘削時の切羽状況とも整合が取れており、本手法の成立性を確認することができた。しかし、現場実証試験では受振孔の孔荒れにより、受振機を切羽奥 10m までしか挿入できなかった。その原因としては、削孔直後にゲル状充填材による保孔ができなかったことや、今回のゲル状充填材仕様では十分な保孔効果が得られなかったことが考えられる。また、孔奥と手前で、ゲル状充填材の充填不良を原因とした、弾性波の受振不良が生じた。その問題点を踏まえ、現在、削孔直後に保孔可能な充填システムの開発や、保孔効果の高いゲル状充填材仕様への改良を行っている。また、本手法を汎用的な切羽前方探查手法とするため、簡易に実施可能な測定・解析システムの構築も進めており、本手法の様な切羽前方探查技術の高精度化により、山岳トンネルの事前設計技術向上に繋げていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 道路トンネル観察・計測指針，社団法人 日本道路協会，pp. 185-193，2009.
- 2) 山本ら：道路トンネルにおける掘削発破を利用した坑内弾性波探查の実証実験，土木学会年次学術講演会講演概要集，2016.
- 3) 浜田ら：油圧削岩機の削孔振動を用いたトモグラフィ解析によるトンネル切羽前方探查法の開発，土木学会年次学術講演会講演概要集，2016.
- 4) 若林ら：ブレイカー振動を利用したトンネル切羽前方探查手法の 3 次元化，土木学会年次学術講演会講演概要集，2016.
- 5) 物理探查適用の手引き（とくに土木分野への利用），物理探查学会物理探查容量作成委員会，pp. 226-236，2000.
- 6) 物理探查適用の手引き，物理探查学会標準化検討委員会，pp. 427-437，2008.