



簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの開発

Development of a Simplified Seismic Tomography Survey System

杉田 裕 真田 祐幸 相澤 隆生 伊東 俊一郎

Yutaka SUGITA, Hiroyuki SANADA, Takao AIZAWA and Shunichiro ITO

地層処分研究開発部門

幌延深地層研究ユニット

Horonobe Underground Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2012

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの開発

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

杉田 裕、真田 祐幸⁺、相澤 隆生^{*}、伊東 俊一郎^{*}

(2011 年 12 月 7 日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分のように、地下深部に坑道を掘削すると、掘削された坑道の周囲には掘削影響領域が発生することとなる。この掘削影響領域では、岩盤の強度と作用する地圧の関係から岩盤の破壊が生じたり、岩盤の破壊や地圧の変化によって透水性が変化したり、あるいは空洞に向けて水圧勾配が発生することによる地下水の流れにより不飽和領域が発生・拡大するなど、岩盤の色々な特性が変化することとなる。このような坑道周囲における特性の変化は、地層処分で評価する放射性核種の移行挙動にも影響すると考えられる。そのため、掘削影響領域における様々な特性を把握することが求められる。

坑道周囲の状況を調査する手法として、調査結果である物性値を画像化できる物理探査手法が有効な手段であり、弾性波トモグラフィ調査はその一つである。弾性波トモグラフィ調査は坑道全体を対象とする調査の場合、調査は大規模で調査時間も長くなる。そのため、これまで行われてきた弾性波トモグラフィ調査は、坑道の掘削前後の 2 回実施し、その変化を坑道掘削の影響と評価している例が多い。しかしながら、掘削影響領域の発生メカニズムやその後の経時変化を評価するためには、坑道掘削に連動した、より詳細な調査が不可欠となる。

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術開発として北海道幌延町で進めている幌延深地層研究計画では、坑道周囲に発生する掘削影響領域の発生メカニズムやその変化の解明・現象のモデル化が研究課題の一つとなっている。そのため、ここでは坑道の掘削に伴う坑道周囲における変化を捉えるために、坑道周囲の限られた領域に着目し、坑道の掘削の進捗に合わせて繰り返し弾性波トモグラフィ調査を行うこととした。この際、適用する弾性波トモグラフィ調査が、坑道の掘削工程に影響を及ぼさないように留意することとし、それを満足するために新たな簡易型弾性波トモグラフィ調査システムを開発した。

開発した簡易型弾性波トモグラフィ調査システムは、ボーリング孔の壁面打撃用のハンマーを組み込んだ起振源、ボーリング孔内埋設型の受振器から構成され、弾性波を発生させる起振のエネルギーにはメタン等の可燃性ガスの存在を考慮して圧縮空気を利用した。開発したシステムを水平坑道の掘削影響試験領域に適用し、坑道掘削時における調査領域における弾性波速度の変化を捉える事が出来、結果をトモグラフィ画像として処理した。この結果、掘削影響領域のモニタリング技術としての適用性を確認した。

幌延深地層研究センター（駐在）：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

＋ 東濃地科学研究ユニット

＊ サンコーコンサルタント株式会社

Development of a Simplified Seismic Tomography Survey System

Yutaka SUGITA, Hiroyuki SANADA⁺, Takao AIZAWA^{*} and Shunichiro ITO^{*}

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received December 7, 2011)

When a tunnel or gallery is excavated in deep underground such as for the geological isolation of high-level radioactive waste (HLW), an excavation disturbed zone (EDZ) will likely develop around the tunnel or gallery. In the EDZ, some characteristics of the rock mass will change. For example, the rock mass will be damaged to varying degrees depending on the relationship between strength of the rock and the effective *in situ* stresses. Consequently, permeability of the rock mass will change due to the development of damaged rock or with the re-distribution of stresses or both. And eventually, an unsaturated zone around the tunnel will develop and expand as water pressure decreases due to water flow toward and into the tunnel. Such changes in the characteristics of the rock mass will affect the results of the assessment of migration of radionuclides and will need to be taken into consideration in the safety assessment. Therefore, estimation of the various characteristics of an EDZ is required.

Seismic tomography is a geophysical exploration method that has the capability of imaging the conditions inside a rock mass based on the analysis of survey results and is an effective technique for investigation of changes to the rock mass around a tunnel. When a conventional seismic tomography survey at the tunnel scale of investigation is applied to characterizing an EDZ, the survey is done using a large-scale system that is costly, disrupts construction and very time consuming to implement. Realistically, surveying with this system is only done before and after tunnel excavation in order to determine changes in rock mass characteristics due to tunnel opening. However, repeat surveys in conjunction with tunnel opening are also required to track development of and variations in the EDZ with time.

The Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project being carried out by JAEA at Horonobe Town involves research and development on the geological disposal of HLW and includes important objectives such as understanding the mechanism at work in the development and evolution of an EDZ around tunnels and modeling of EDZ behaviour. Therefore, we focused on a specific part of a new tunnel to determine variations in the EDZ due to the tunnel opening and performed repeat seismic velocity surveys as excavation of the tunnel progressed. For this survey, we developed a simplified seismic velocity survey system that would not disturb construction and the time schedule for excavation of the tunnel.

The simplified seismic velocity survey system developed consists of a hammer to transfer seismic energy from one borehole to receivers installed and anchored in a separate borehole. The hammer is operated with compressed air, necessitated by the potential presence of flammable gas such as methane. The system developed was applied to the EDZ experiment in a horizontal tunnel. Changes in seismic velocity were monitored during excavation and the tomograms obtained are high quality. These results show that the system developed is applicable to monitoring the development and variation of the EDZ.

Keywords: Horonobe URL Project, Seismic Tomography Survey, EDZ, Monitoring, Simplified System

⁺ Tono Geoscientific Research Unit

^{*} Sunco Consultants Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 簡易型弾性波トモグラフィ調査システム	2
2.1 システムの概要	2
2.2 受振器	3
2.3 起振源	5
2.4 波形データ記録機	7
3. 原位置試験での掘削影響モニタリング技術適用性確認	10
3.1 掘削影響試験の概要	10
3.2 原位置適用試験	15
3.3 トモグラフィ解析	17
4. おわりに	24
謝辞	25
参考文献	25

CONTENTS

1 Introduction	1
2 Simplified seismic tomography survey system	2
2.1 Outline of system	2
2.2 Receiver	3
2.3 Oscillator	5
2.4 Wave data recorder	7
3 Applicability to monitoring of the EDZ in in-situ experiment	10
3.1 Outline of EDZ Experiment	10
3.2 Applying In-situ experiment	15
3.3 Tomography analysis	17
4 Conclusion	24
Acknowledgement	25
References	25

表 目 次

表-2.1	GS-20DH 素子の仕様一覧	3
表-2.2	波形データ記録機の仕様一覧	8
表-2.3	アンプの仕様一覧	9
表-3.1	トモグラフィ計測パスの距離一覧	19
表-3.2	坑道掘削時の弾性波トモグラフィ調査の実施スケジュール	20

図 目 次

図-2.1	簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの概要図	3
図-2.2	GS-20DH の概観	3
図-2.3	GS-20DH 周波数特性図	4
図-2.4	受振器ケース内部の写真	4
図-2.5	ジオフォンの設置方向	5
図-2.6	開発した発振器の概要	6
図-2.7	ボーリング孔径への追従機構	6
図-2.8	打撃エネルギーの伝播機構	7
図-2.9	板バネの効果	7
図-2.10	波形データ記録機	8
図-2.11	アンプ	9
図-3.1	140m 調査坑道における掘削影響試験関連の調査試験レイアウト	11
図-3.2	140m 調査坑道における掘削影響試験関連のボーリング孔配置（断面図）	12
図-3.3	140m 調査坑道における掘削影響試験のイメージ	12
図-3.4	140m 調査坑道の断面	13
図-3.5	調査坑道の掘削手順	14
図-3.6	坑道断面の比較	15
図-3.7	弾性波トモグラフィ調査レイアウト図	15
図-3.8	現場での弾性波トモグラフィ作業状況	16
図-3.9	弾性波トモグラフィ解析フロー	17
図-3.10	弾性波トモグラフィ計測パスと解析セルとの位置関係	18
図-3.11	初動走時およびオフセット距離分布図（全記録）	21
図-3.12	弾性波トモグラフィ解析結果図（初期モデルと解析モデル）	22
図-3.13	弾性波トモグラフィ解析結果図（速度変化率）	23

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構は、北海道天塩郡幌延町において新第三紀堆積岩を対象として幌延深地層研究計画と称する地下施設建設を伴う研究プロジェクトを進めている。この研究計画では、「深地層の科学的研究」と「地層処分研究開発」を、第1段階「地上からの調査研究段階」、第2段階「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階」、第3段階「地下施設での調査研究段階」の3段階で進めている¹⁾。

高レベル放射性廃棄物の地層処分のように、地下深部に坑道を掘削すると、掘削された坑道の周囲には掘削影響領域が発生することとなる。この掘削影響領域では、岩盤の強度と作用する地圧の関係から岩盤の破壊が生じたり、岩盤の破壊や地圧の変化によって透水性が変化したり、あるいは空洞に向けて水圧勾配が発生することによる地下水の流れにより不飽和領域が発生・拡大するなど、岩盤の色々な特性が変化することとなる。このような坑道周囲における特性の変化は、地層処分で評価する放射性核種の移行挙動にも影響すると考えられる。そのため、掘削影響領域における特性を把握することが求められる。

坑道周囲の状況を調査する手法として、医療のX線CTスキャンのように調査領域を取り囲むようにセンサーを配置して測定を行うことにより、岩盤の状況を画像化できる物理探査手法が有効な手段であり、弾性波トモグラフィ調査、比抵抗トモグラフィ調査、電磁波トモグラフィ調査等がある。弾性波トモグラフィ調査は、探査領域内を通過する弾性波動を複数計測することにより、弾性波速度分布を画像化するもので、岩盤中の亀裂の発生や含水比の変化等を弾性波速度の変化として捉えるものである²⁾。

弾性波トモグラフィ調査を含め、坑道規模で物理探査手法を行う場合、持ち込む調査機器は大きくなり、調査に要する時間もある程度長くなる。また、繰り返し調査を行うとなると、調査費用も高額となる。このため、これまでに行われてきているトモグラフィ調査では、坑道の掘削前後の2回に実施し、その変化を坑道掘削の影響として評価している。これは、立坑掘削と水平坑道掘削の両者に当てはまる³⁻⁵⁾。

幌延深地層研究計画では、坑道周囲に発生する掘削影響領域の発生メカニズムやその変化の解明・現象のモデル化が研究課題の一つとなっている。そのため、これまでの掘削前後2回の調査結果のみならず、より精緻な計測が求められる。それには、弾性波トモグラフィ調査などの調査を坑道掘削の進捗に合わせて繰り返し実施し、坑道掘削に伴う掘削影響領域の発生のメカニズム解明やその経時変化に関するデータを取得する必要がある。従来の調査手法では、坑道の掘削に合わせて調査を行うような機敏性は期待できない。また、繰り返し調査を行うことは調査費用も増すことになる。

そこで、弾性波トモグラフィ調査に着目し、簡易に弾性波トモグラフィ調査が可能となるような弾性波トモグラフィ調査システムを構築することとした。調査領域を坑道近傍に限定することで坑道規模の大きなスケールでの調査に比べて計測精度を高くする必要はあるが、小さいエネルギーで発せられる弾性波でも十分に調査が出来る可能性がある。特に、起振源については可燃性ガスを伴う幌延の地質環境条件を考慮したものとする必要がある。開発した簡易型弾性波トモグラフィ調査システムを原位置の掘削影響試験に適用し、掘削影響領域のモニタリング技術としての適用性について確認した⁶⁾。このような繰り返し調査を行う手法は、CO₂貯蔵の分野において、CO₂の岩盤への注入効果の確認と注入後の場の状況の変化のモニタリングとして利用されている^{7) 8)}。

2. 簡易型弾性波トモグラフィ調査システム

2. 1 システムの概要

簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの開発にあたって、はじめに設計思想を設定した。この設定において、幌延の地質環境条件の特徴や掘削工事工程への影響などを考慮した。設定した設計思想を以下に示す。

- ①ボーリング孔内には可燃性ガス（主にメタンガス）が存在することから、システムとして防爆の考え方により着火源となるものを除外すること。
- ②調査を繰り返し同じ場所で実施することから、起振時にボーリング孔を損傷しない方式であること。
- ③掘削工程に影響を与えないように、数時間で一回の調査が完了すること。基本的には掘削工事における作業員の交代時間である2時間以内に調査が終了することを想定する。
- ④4m 四方程度の調査領域に適用できる分解能を有すること。
- ⑤起振源は、所定の位置に設置後、繰り返し弾性波を発生できる構造とすること。
- ⑥起振源は、点震源として波を発生できること。
- ⑦受振器は、点受振と見なせること。

以上のような設計思想に基づき、主な基本仕様を下記のように設定した。

- ①起振源は、圧縮空気をエネルギー源とする方式とする。
- ②圧縮空気のエネルギーを利用して孔壁を打撃する方式とする。
- ③①②を満足する方法として、圧縮空気の伝達にエアノッカーを使用する。バルブ操作により瞬間的に圧縮空気を送り込むことでエアノッカーのセンターコアが飛び出し、減圧によりセンターコアが引っ込む。バルブ操作のみにより繰り返し打撃を可能とする。
- ④エアノッカーの孔軸方向の打撃エネルギーを孔壁のハンマー部分に伝える構造とする。
- ⑤ハンマー部分の孔壁への接触部分は点震源としての作用を確保するために極力小さくする。
- ⑥受振器は、防水処理を施した容器に設置し、所定の位置に固定（埋設）する。
- ⑦受振器の容器は、点受振と見なせるようにボーリング孔径程度の大きさとする。
- ⑧起振源は四角ロッドの先端部に装着することとする。四角ロッドに装着することにより、ボーリング孔内での起振源の方向のずれやボーリング孔内でのたわみによる挿入深度のずれを回避し、調査時には毎回同じ位置、同じ方向に起振源を配置できる構造とする。

このような基本仕様を満足する簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの概要図を図-2.1 に示す。コンプレッサーで発生させた低压の圧縮空気圧で起振源となるハンマー（発振子）を打撃する。ハンマーに取り付けたトリガー用のセンサーでトリガー信号を取り込み、データ記録機に収録する。発振された波は所定の位置に埋設した受振子で受振し、アンプを介してデータ記録装置に取り込む。

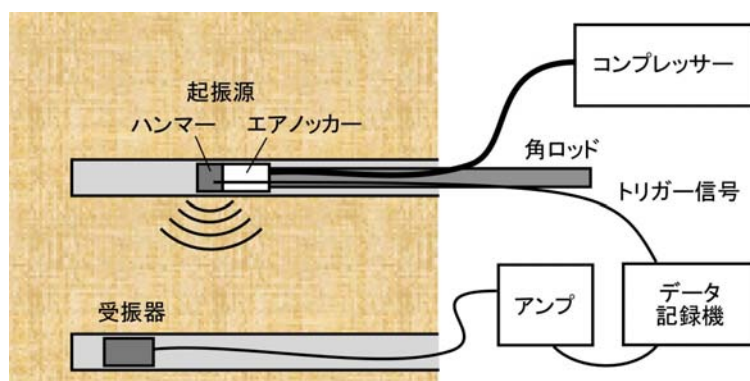


図-2.1 簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの概要図

2. 2 受振器

受振器には電源を必要としない可動コイル型のジオフォン素子（GS-20DH；図-2.2，表-2.1 参照）を用いることとした。ジオフォンを選定した理由の一つは，弾性波トモグラフィ調査中にボーリング孔が必ずしも水で満たされる状態にはならないことから，空気中においても受振器が岩盤に固着することで弾性波を受振できることである。ジオフォンの周波数特性としては，幌延の地質環境条件を考慮して 2kHz 程度の信号まで受振することを考慮し，40Hz のジオフォンを選定した。GS-20DH の周波数特性図を図-2.3 に示す。



図-2.2 GS-20DH の概観

表-2.1 GS-20DH 素子の仕様一覧

項目	特性
固有周波数	40 Hz $\pm 5\%$
センサー感度（600 Ω コイル）	0.90 V/in/sec (0.354 V/cm/sec) $\pm 10\%$
選択コイル抵抗	365 Ohms $\pm 5\%$
可動マス重量	7.1 g $\pm 10\%$
寸法	高さ3.35cm，直径2.69cm
重量	99g

ジオフォンは振動軸が存在するため、起振源となるハンマーで発振された弾性波の初動を精度よく捕捉するためには，1地点の受振器としてxyzの3成分の波を捉える事が必要となる。つま

り、一つの受振器に3つの成分に対応した3つのジオフォンを備える必要がある。そこで、受振器のカバーとなる樹脂製のケース（長さ115mm、幅46mm、高さ55mm）「タカチ GA12-7-6」（図-2.4 右を参照）を用意し、これを一つの受振器と見なすこととした。ボーリング孔径を86mmと想定すると、この大きさであれば、受振器はほぼ点受振と見なせるものと考えられる。

このケースの内部に孔軸方向をY成分、鉛直方向をZ成分としてXYZの直交する3成分となるように3つのジオフォン素子を納めた（図-2.4 中、図-2.5 を参照）。出力用の6芯のジオフォンコードのケースからの出力口は、スパイラル PG ネジケーブルグランド「タカチ PGS-7B」により防水を確保し、ジオフォンコードの折れ曲がり防止にも対応させた（図-2.4 中を参照）。ケース内の防水のために、電子回路ポッディング用の絶縁シリコン樹脂をケース内に充填した（図-2.4 左を参照）。この時、万一のケーブルとシリコン樹脂の境界を通じた水の侵入に備えてその距離を長く取るために、ジオフォンコードをケース内に2重巻きした後にシリコン樹脂を充填した。

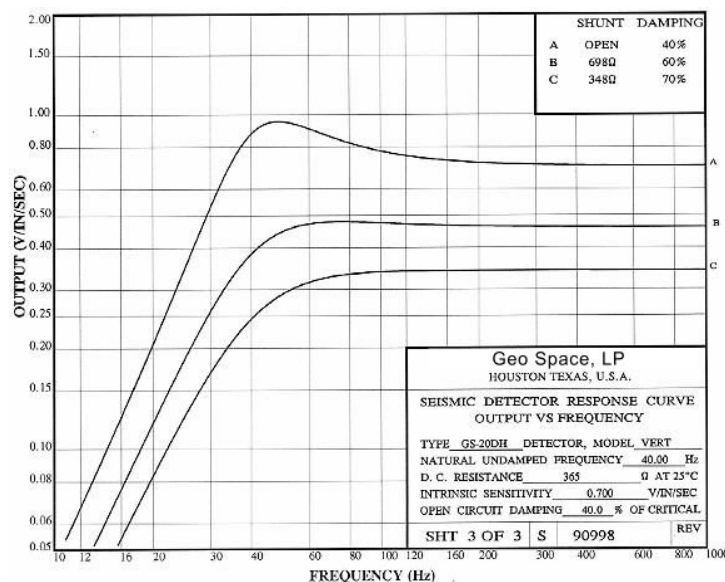
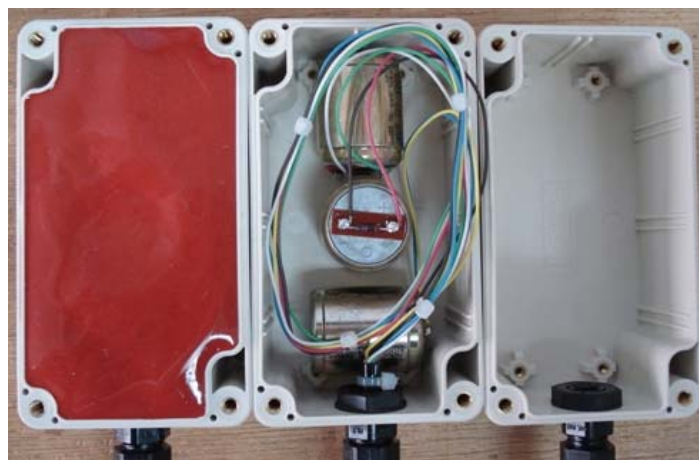


図-2.3 GS-20DH 周波数特性図



左：シリコン樹脂充填状態，中：ジオフォンの設置状況，右：受振器用ケース内

図-2.4 受振器ケース内部の写真

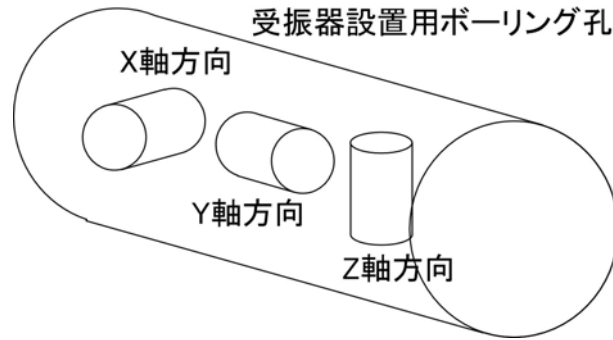


図-2.5 ジオフォンの設置方向

2. 3 起振源

起振源は、ボーリング孔径 86mm を想定してボーリング孔壁を破損することなく、なるべく大きなエネルギーで波を発生させる構造とした。ボーリング孔内は可燃性ガスが存在するため、打撃エネルギーの発生には圧縮空気の加減によりピストン運動を行うことができるエアノッカーを使用した。ボーリング孔壁に対してエアノッカーの打撃エネルギーを供給する場合、ボーリング孔壁を直接打撃する場合はエアノッカーのサイズやストロークが孔径によって極端に拘束される。しかしながら、孔軸方向のエネルギーを回転により孔壁に伝える機構を採用すれば、ボーリング孔軸方向のストロークを十分に確保しつつ孔壁を打撃することが出来るようになる。つまり、より大きな打撃エネルギーをボーリング孔内の所定の位置で発生させることが可能となる。

図-2.6 に開発した発振器の概要を示す。上の写真左側の青色の胴体部分がエアノッカーである。このエアノッカーで発せられる打撃エネルギーを回転コマ部分のカム機構により壁面に接触している加振ハンマーに伝える構造となっている。岩盤を打撃することになる加振ハンマー部分は長さ 3cm 程度の大きさであり、十分に点震源とみなすことが出来る。

まず、繰り返し波を発生させる機構について示す。図-2.6 に示すように、エアノッカーのピストンは、通常はエアノッカー内にあるコイルバネ A によりエアノッカー内に収まっている。所定の圧力の圧縮空気を送り込むと、空気圧によりピストンはコイルバネ A の押さえに打ち勝って回転コマを打撃するように勢いよく飛び出す。圧縮空気の供給をバルブ操作で停止すると、コイルバネ A の力によりピストンは元の位置に戻る。このように、圧縮空気の供給をバルブにより操作することで、繰り返し打撃が可能となる。

次に、加振ハンマーを確実にボーリング孔壁に接触させる機構について示す。図-2.7 はボーリング孔の大きさに応じて加振ハンマーが岩盤に常に接触する様子を示している。これは、コイルバネ B の作用によるもので、回転コマを介してコイルバネ B と加振ハンマーとが連動する（回転コマは回転軸 A、回転軸 B により加振ハンマーと連結している）ことで常にボーリング孔の孔径の変化に追従できる。

図-2.8 に、ボーリング孔軸の打撃エネルギーを孔壁に伝える機構を示す。同図の左側に示すように、エアノッカーのピストンは圧縮空気が送られると回転コマを打撃する。上述したように回転コマは回転軸 A、回転軸 B により加振ハンマーと連結していることから、回転コマにあたった打撃エネルギーは、方向を変えつつ加振ハンマーへ伝わる。そして、加振ハンマーがボーリング孔の孔壁（つまり、岩盤）を打撃する。加振ハンマーは、4 つ付属していることから、起振源から四方に波を発することとなる。

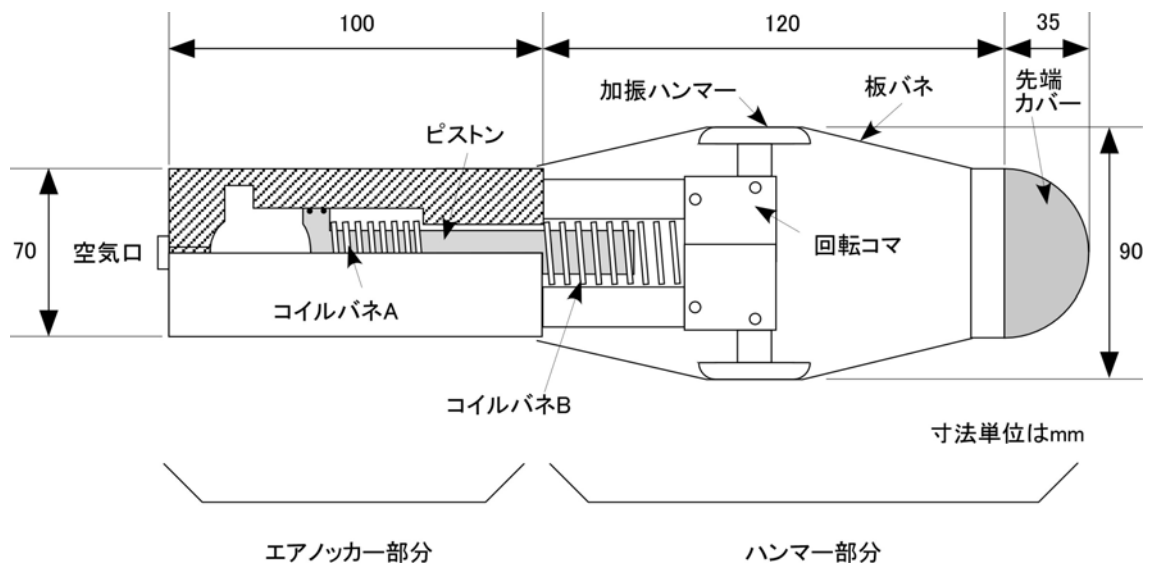


図-2.6 開発した発振器の概要
(上：起振源の外観，下：起振源の内部構造)

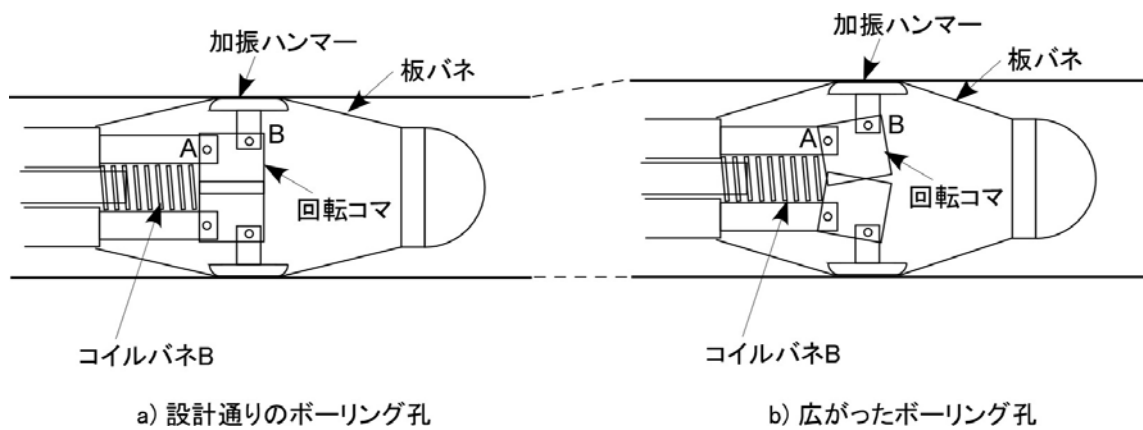


図-2.7 ボーリング孔径への追従機構

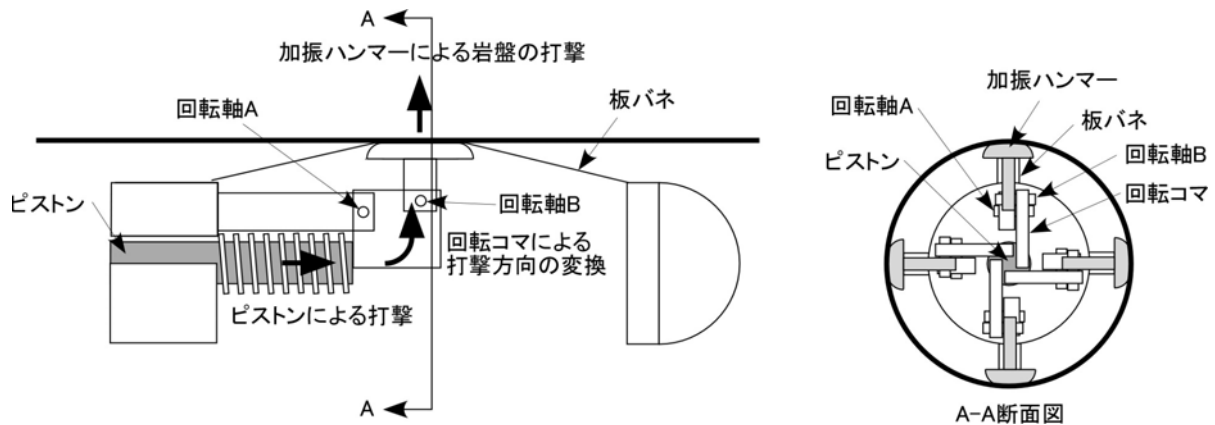


図-2.8 打撃エネルギーの伝播機構

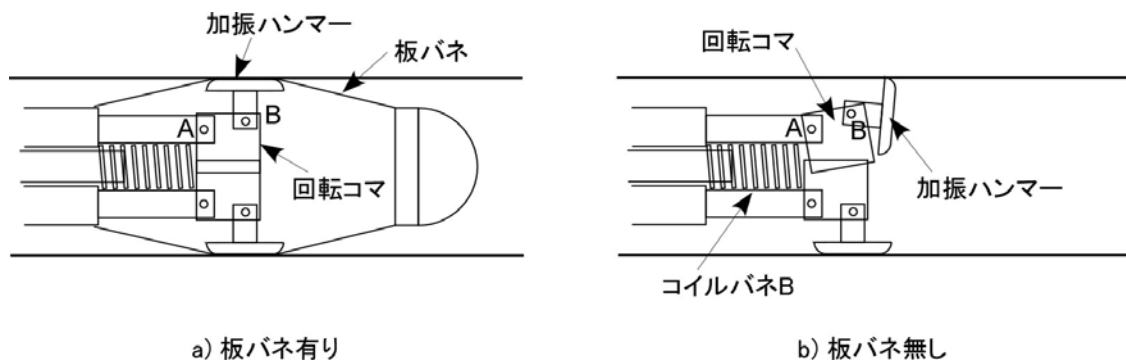


図-2.9 板バネの効果

図-2.9 に、板バネの効果を示す。加振ハンマーは回転コマの周りで自由に動くことが出来る。このため、このままの状態では起振源の挿入時や移動時に図-2.9 b)に示すように加振ハンマーが回転し、起振源のボーリング孔内での抑留や正常な打撃が出来ない状態になると考えられる。そこで、図-2.9 a)に示すように板バネをとりつけることにより、加振ハンマーの不必要な変形を抑制する。これにより、起振源のボーリング孔内への挿入や移動がスムーズになった。

2. 4 波形データ記録機

波形データ記録機は、隣り合う受振点間距離（例えば 4.25m と 4.05m の差 0.20m）を 2km/s の速度で弾性波が伝播すると、走時差は $100\mu\text{s}$ となるため、その 1/10～1/100 程度のサンプリング間隔でデータを記録できるシステムとする。そのため、サンプリング間隔が最小で $1\mu\text{s}$ 程度、6 チャンネル同時測定が必須となる。そこで、波形データ記録機として日置電気株式会社製のメモリーハイコーダ 8841（図-2.10）を用いた。波形データ記録機の仕様を表-2.2 に示す。ハンマーにより発生した波を受振器で効果的に受振するため、100 倍の増幅器を備えたアンプ（表-2.3、図-2.11）をデータ記録機の全段にセットした。

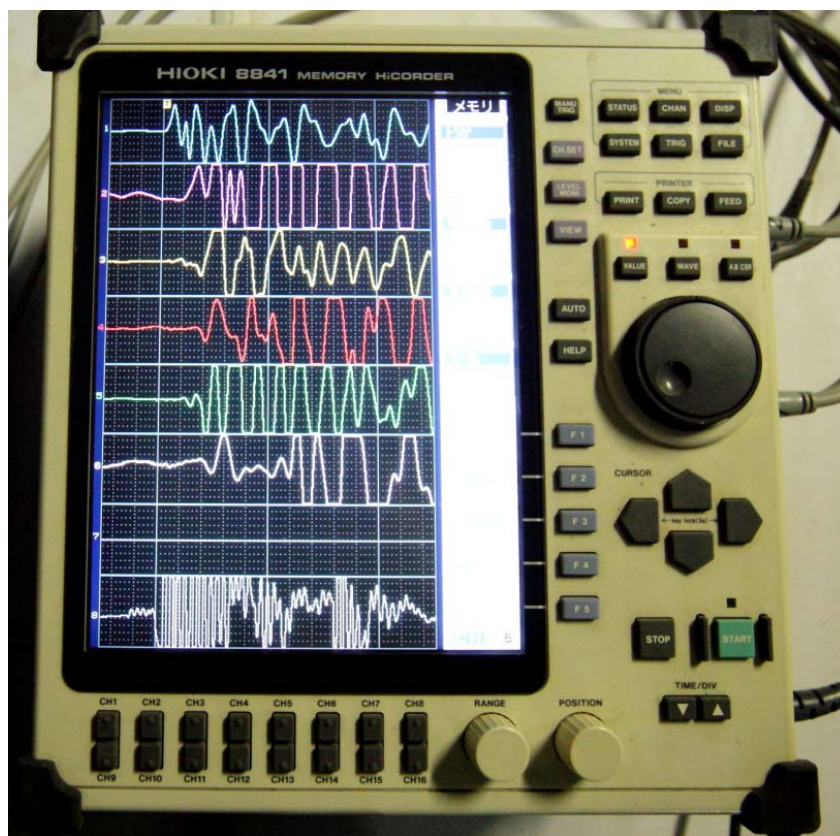


図-2.10 波形データ記録機

表-2.2 波形データ記録機の仕様一覧

機 器 名	仕 様
データ記録機 メモリーハイコーダ 日置電気(株)8841	チャンネル数：8ch ビット長 ：12Bit メモリー長 ：8M words サンプル間隔：1,2,5,10,20,50,100,200,500,μs・・・ ローパスフィルター ノッチフィルター カラー波形モニター チャンネルトリガー機能 電源 100V スタッキング機能 PC カードドライブ内蔵 プリンター内蔵

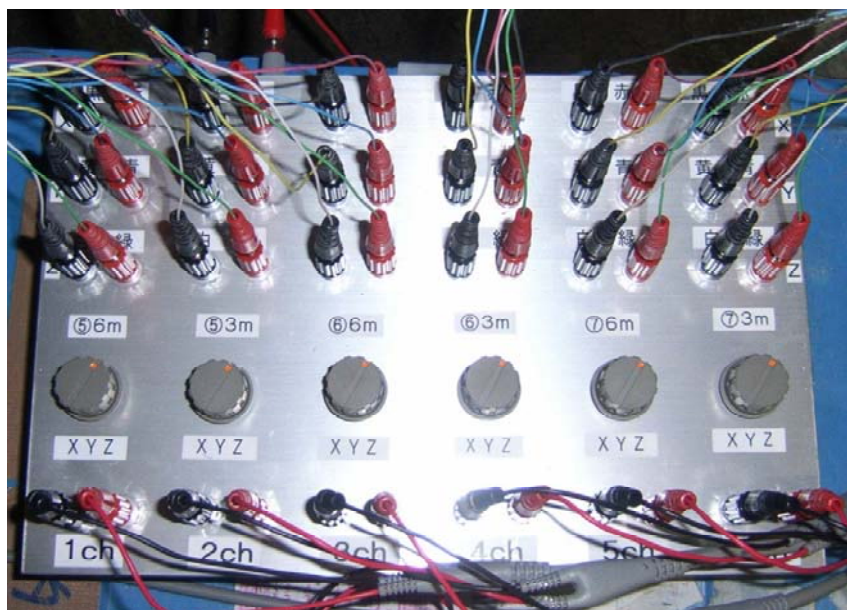


図-2.11 アンプ

表-2.3 アンプの仕様一覧

項 目	仕 様
入力形式	差動型
出力形式	差動型
入力抵抗	200k Ω
周波数範囲	DC－50Hz
アンプゲイン	110 / 200 （内部切替、110 に設定）
成分切換えスイッチ	3 成分 6ch 出力

3. 原位置試験での掘削影響モニタリング技術適用性確認

3. 1 掘削影響試験の概要

(1) 全体概要

深度 140m の調査坑道で対象とする掘削影響試験の全体像を図-3.1 に示す。同図は、掘削影響試験で実施する各調査試験のレイアウトを示した平面図である。調査試験項目は、力学関係が弾性波トモグラフィ調査、孔内載荷試験であり、水理関係は透水試験、間隙水圧計測、水分計測である。調査坑道の右側（東側）は、調査により地質環境を擾乱する調査試験を実施し、調査坑道の左側（西側）には、調査中も地質環境を擾乱しない調査試験を実施した。

弾性波トモグラフィ調査および孔内載荷試験における地質環境の擾乱とは、弾性波トモグラフィ調査で起振源となるボーリング孔や孔内載荷試験孔など、繰り返し試験を行うボーリング孔が、解放された状態で保持されていることであり、間隙水圧の低下を誘引すると考えられる。透水試験では、試験水を注水するため、場の間隙水圧を擾乱する。これに対して、計測機器を設置した後はボーリング孔が適切に埋設処置され、坑道の掘削以外の擾乱を伴わない調査試験を調査坑道の左側で実施した。

これに加えて、情報化施工の一環で実施している、日常管理計測（地質観察、内空変位、簡易原位置試験）、ステップ管理計測（鋼製支保工応力、吹付けコンクリート応力、ロックボルト軸力、地中変位）の計測結果を掘削影響試験の解釈に活用する。

ボーリング孔は、140m 東側第 2 ボーリング横坑からは、弾性波トモグラフィ調査用の 5 本のボーリング孔（長さ 6.5m）、孔内載荷試験用の 3 本のボーリング孔（長さ 9.0m）、透水試験用の 1 本のボーリング孔（長さ 13.5m）を配置した。140m 東側第 3 ボーリング横坑からは、間隙水圧計測用の 1 本のボーリング孔（長さ 18.1m）、水分計測用の 3 本のボーリング孔（10m を 2 本、3m を 1 本）を配置した。

①弾性波トモグラフィ調査

弾性波トモグラフィは、図-3.1 に示すように 140m 東側第 2 ボーリング横坑から調査坑道に平行に掘削された 5 本のボーリング孔を用いた。調査坑道の掘削 1～3 の右側に相当する部分に調査領域が一致する。発振・受振位置（それぞれ図中の記号□および■）を固定することにより、繰り返し行う弾性波調査では、毎回同じ弾性波計測パス（図中の線分）での弾性波の計測を可能にした。

②孔内載荷試験

孔内載荷試験は、図-3.1 中、緑色の○部分において行った。調査坑道の掘削壁面からの距離が 3 深度となるように、調査坑道に平行となる 3 本のボーリング孔を用いた。これらのボーリング孔の中で、測定区間中に亀裂の存在しない部分をそれぞれ 3 箇所選定し、合計 9 点で測定を行った。用いた試験装置が載荷盤を用いた KKT 方式のため、載荷方向による影響を把握するため、各地点で 3 方向を載荷方向とした。なお、弾性波トモグラフィ調査の断面と孔内載荷試験のボーリングを配置した断面は、水平レベルで 80cm の離間距離を確保した。

③透水試験

図-3.1 中、試験区間を青色で示したボーリング孔を用いた。ボーリング孔にはボーリング孔内を 5 区間に区切るためのパッカーシステムを設置した。図には、各試験区間をボーリング孔の孔口からの距離で示している。透水試験の区間は、掘削 6～10 の区間と重なる位置関係である。ま

た、140m ポンプ横坑を掘削すると、ポンプ横坑周辺にも同じように掘削影響領域が発生することとなるが、これについても調査対象とする。このとき、掘削 33 を中心としてポンプ横坑掘削に伴う岩盤内部の深度方向への影響について把握する。

④間隙水圧測定

図-3.1 中、試験区間を水色で示したボーリング孔を用いた。最深部（14.5-18.1m）の試験区間が長くなっているが、これは、この区間を区切るパッカーが確実に機能しなかったため、3.6m の区間を一つの区間とした。全ての区間に間隙水圧計を設置し、連続計測を行う。

⑤水分計計測

図-3.1 中、赤色の○部分において、水分計測を行う。10m のボーリング孔の先端部の 2 点（掘削 7 に相当する部分の岩盤内部）に水分計を設置した。この 2 点の水分計の連続計測を実施する。3m のボーリング孔の先端部には校正用の水分計を設置した。

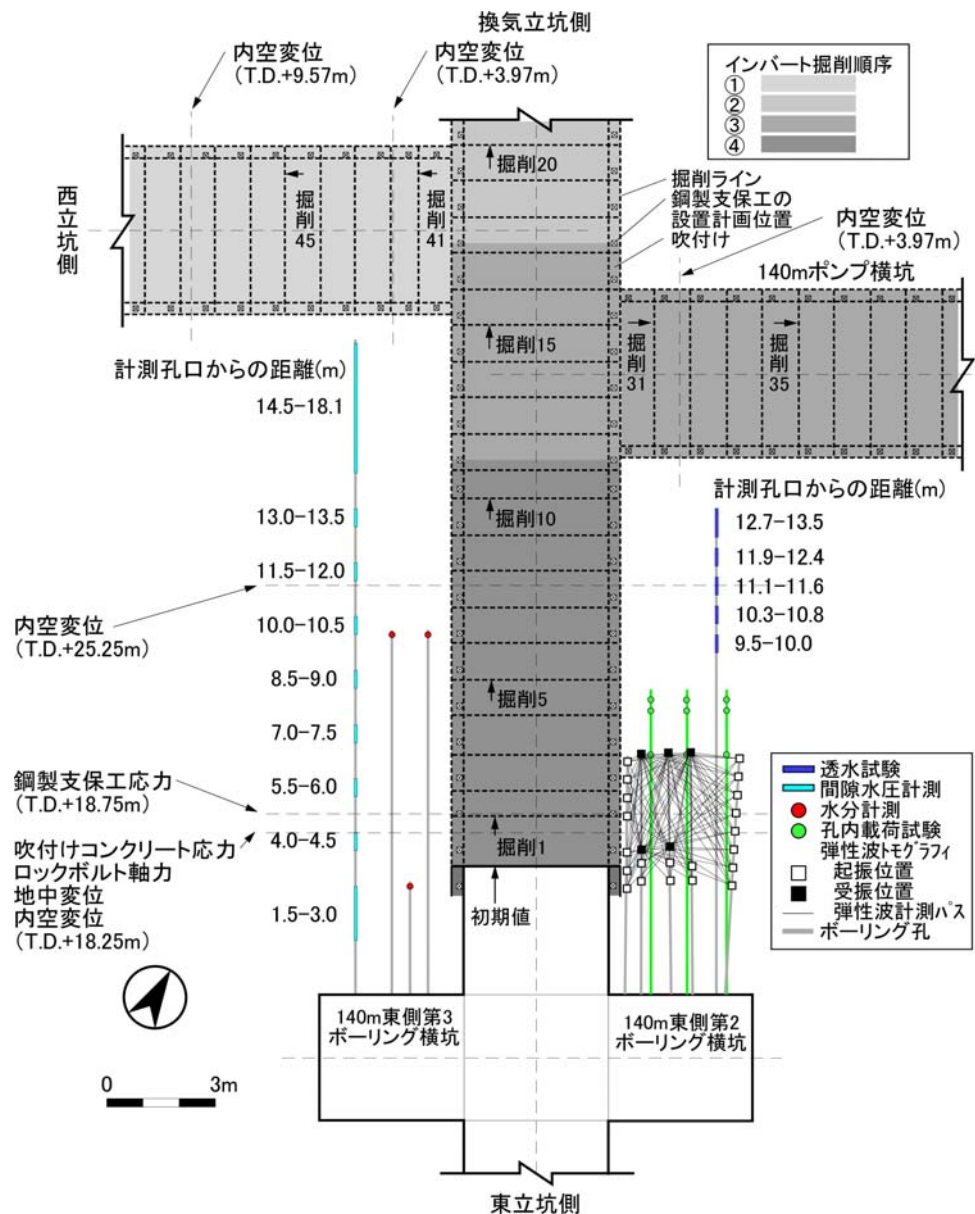


図-3.1 140m 調査坑道における掘削影響試験関連の調査試験レイアウト

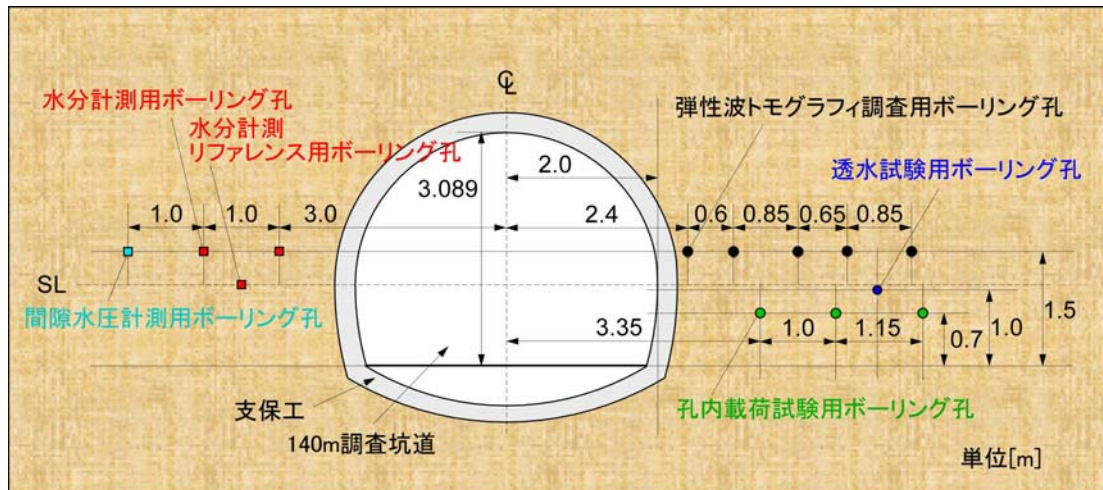


図-3.2 140m 調査坑道における掘削影響試験関連のボーリング孔配置（断面図）

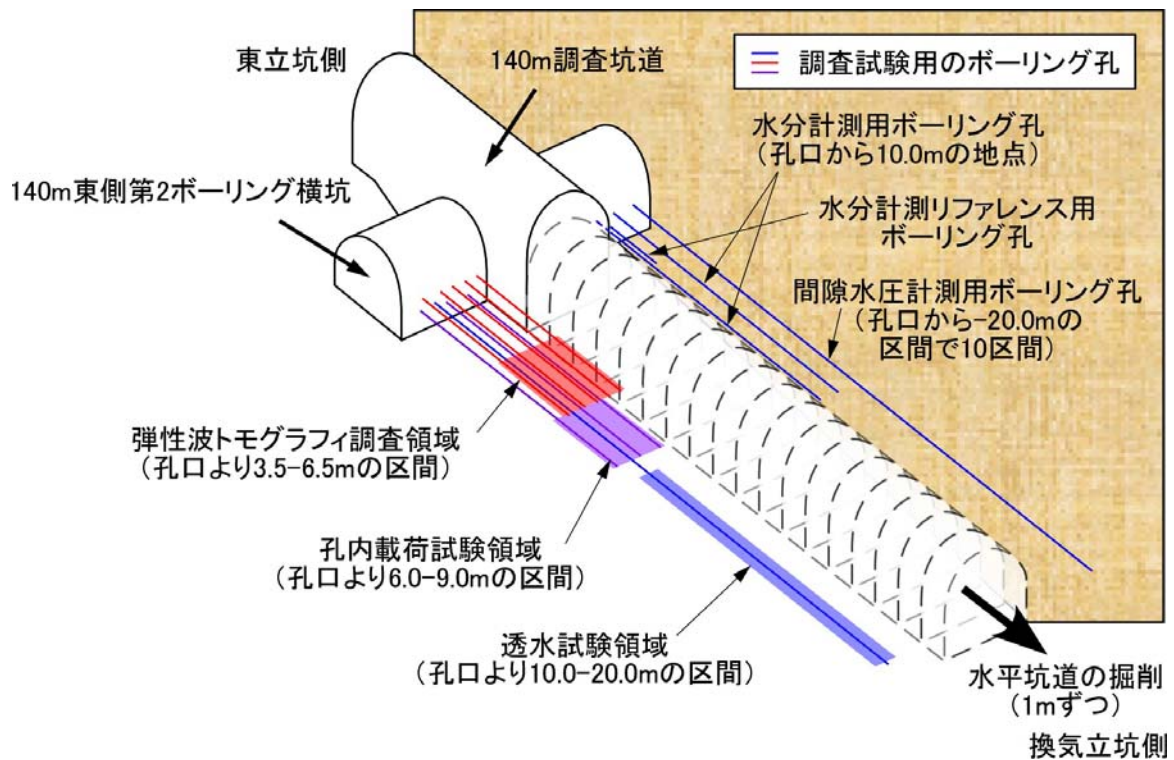


図-3.3 140m 調査坑道における掘削影響試験のイメージ

上述したボーリング孔配置の断面図を図-3.2 に示す。図は、掘削影響試験で対象とする調査坑道との位置関係を示している。図-3.3 は、弾性波トモグラフィ調査領域側を見た掘削影響試験のイメージ図である。140m 東側第 2 ボーリング横坑から掘削したボーリング孔の孔口から 3.5-6.5m が調査対象領域である。図-3.2 から明らかなように、弾性波トモグラフィ調査領域の断面が上側、孔内载荷試験領域の断面が下側になるように配置し、それぞれの調査用のボーリング孔が干渉しないようにした。

本論で対象とする簡易型弾性波トモグラフィ調査システムは、弾性波トモグラフィ調査で使用する。

(2) 坑道の断面形状

140m の調査坑道は、図-3.4 に示すように三芯円馬蹄形の断面形状である。平面図中の白抜きで示した部分は掘削影響試験を開始する前に既に掘削されていた部分であり、140m 東側第 2 ボーリング横坑および第 3 ボーリング横坑はあらかじめ計測機器類を設置するためのボーリング孔を掘削するために準備した坑道である。

掘削影響試験では、初期値を取得した後に図-3.4 の平面図で示した灰色部分を順次掘削した。掘削影響試験で調査対象とした坑道（140m 東側調査坑道の灰色部分、140m 換気側調査坑道、140m ポンプ横坑、140m 西側調査坑道）は、一般坑道部であり、施工完成時は図-3.4 a)で示した断面となる。この断面形状は、上記坑道では共通である。これに対して、平面図の白抜きの部分の拡幅坑道部となる B-B 断面は、坑道の配置の関係から断面形状が異なり、図-3.4 b)に示すように、一般坑道部よりも縦長の坑道断面となっている。これは、140m 東側第 2 ボーリング横坑と第 3 ボーリング横坑が 140m 東側調査坑道と十字交差となることから、ボーリング横坑を掘削しても交差部における 140m 東側調査坑道の天盤の安定性を確保するため、坑道天盤部の支保工を残せるようにしたためである。そのため、このような断面形状は、この部分のみである。このように断面形状は異なるが、図-3.3 で示すように路盤コンクリートが同じレベルになる断面である。

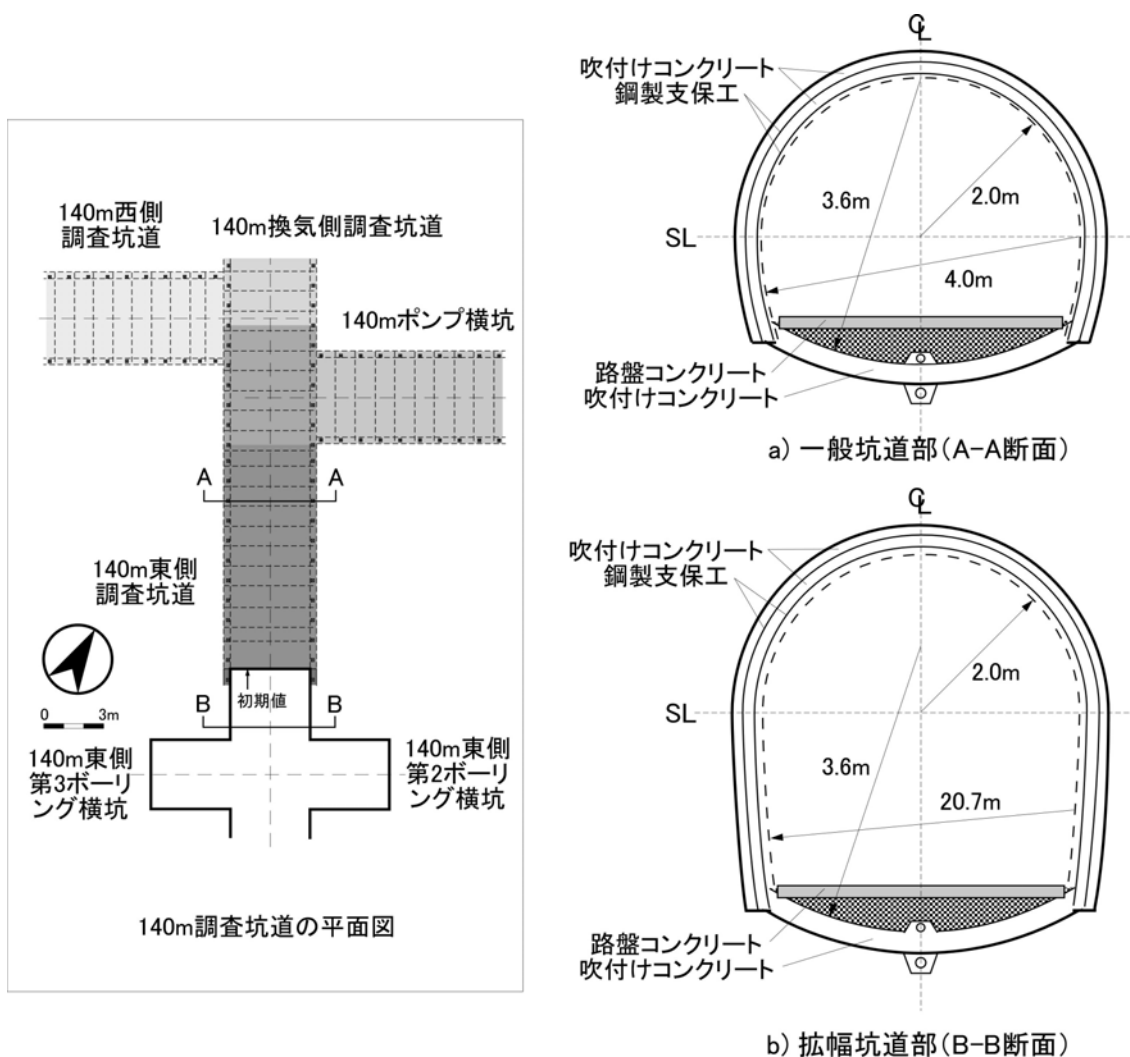


図-3.4 140m 調査坑道の断面

(3) 坑道の掘削手順

調査坑道の掘削手順を図-3.5 に示す。図の平面図に示すように、初期値のラインから調査坑道の掘削は1m ずつ進捗させた。まず、図-3.5 a)に示すように坑道の下部（インバート部分）を残してほぼ全面を掘削した。次に、吹付けコンクリートや鋼製支保工を設置し、坑道の上部を完成させた（図-3.5 b)）。調査坑道の掘削順序は、まず140m 東側調査坑道から140m 換気側調査坑道に向かって掘削し、次に、140m ポンプ横坑を掘削した。その後、140m 西側調査坑道を掘削した。

調査坑道の掘削は、上記順番で一通り調査坑道の上部の掘削を完了させた。次に、図-3.5 c)に示すようにインバート部分の掘削を行った。インバートの掘削は、平面図中のインバート掘削順序の配色のように、ある区間をまとめて、140m 西側調査坑道、140m 換気側調査坑道、140m 東側調査坑道（ポンプ横坑との接続部分）および140m ポンプ横坑、140m 東側調査坑道（残りの部分）の順序で掘削した。そして、その区間ごとにインバートとなる吹付けコンクリートを施工した。吹付けコンクリートの施工が完了した後、砕石を敷設して路盤コンクリートを打設した。

調査坑道上部分の掘削後およびインバート掘削後の一般坑道部と拡幅坑道部の断面の比較を図-3.6 に示す。図では、一般坑道部を実線で、拡幅坑道部を破線で示している。掘削断面積の比は、一般坑道部：拡幅坑道部 $\approx 3:4$ である。インバート掘削まで含めた総掘削断面積の比も約 $3:4$ で同じである。この掘削断面積の差は、坑道周囲の応力分布の不均一性の要因となり、掘削影響の発現に影響すると考えられるため、各計測の解釈において考慮が必要となる。

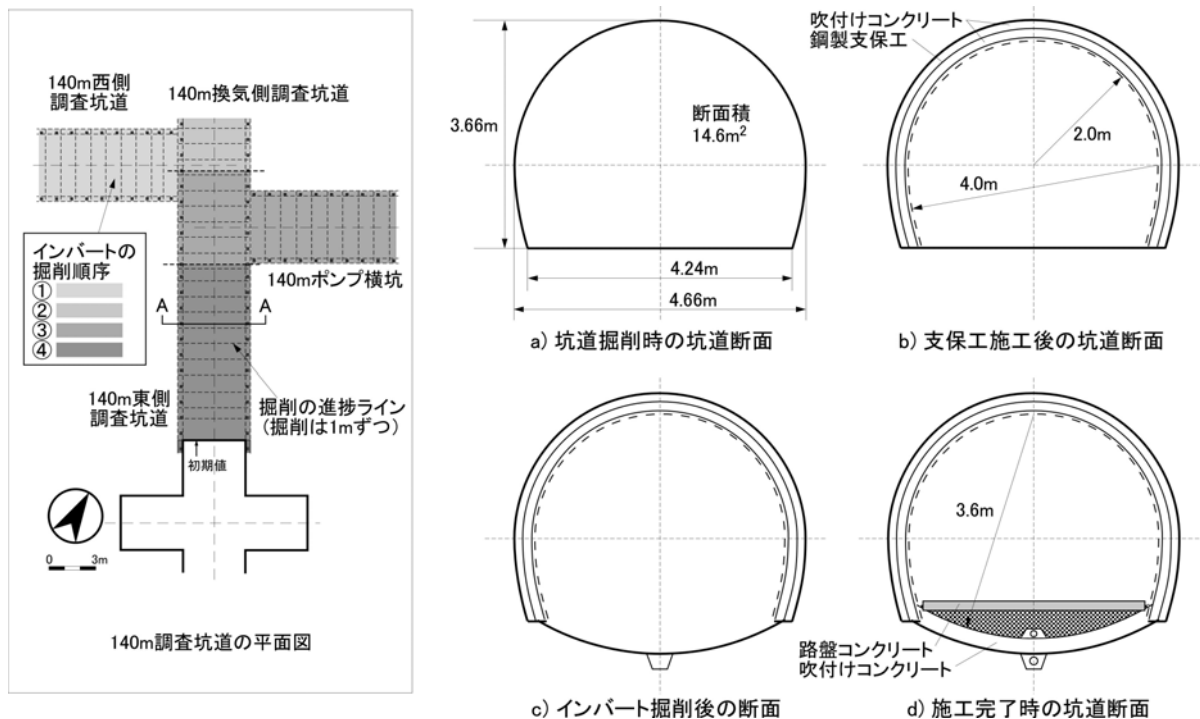


図-3.5 調査坑道の掘削手順

(一般坑道部 (A-A 断面の例))

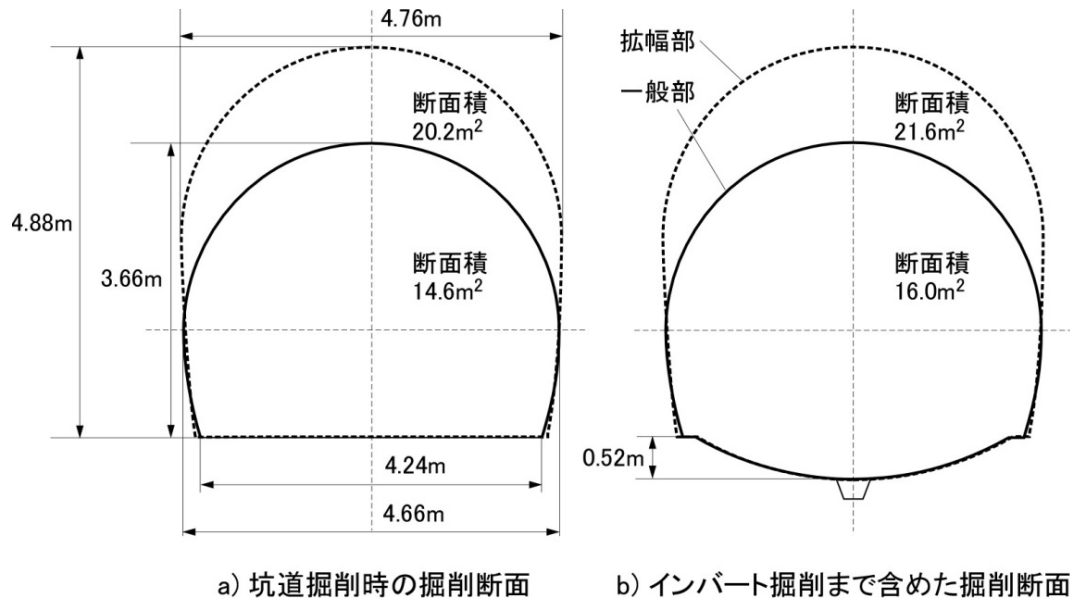
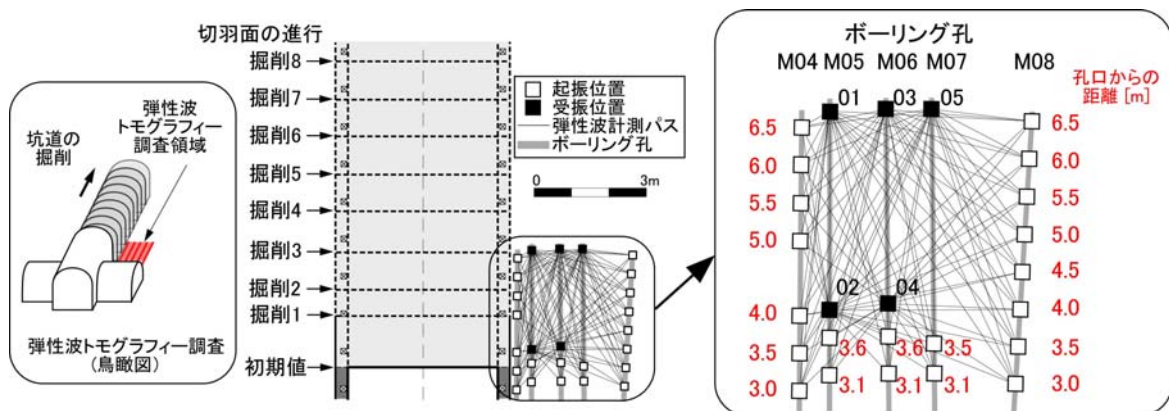


図-3.6 坑道断面の比較

3. 2 原位置適用試験

図-3.1 および 3.3 に示したように、弾性波トモグラフィ調査は水平坑道である調査坑道の側面に位置する水平断面で実施した。調査領域は、ほぼ $3.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ とした。弾性波トモグラフィ調査の該当部分を抜き出したものを図-3.7 に示す。調査対象となる調査坑道に平行してトモグラフィ調査用のボーリング孔を配置するため、調査坑道から左右に掘り込んだボーリング横坑のうち、右側の第 2 ボーリング横坑から 5 本のボーリング孔（図の左から 08-E-140-M04 孔, M05 孔, M06 孔, M07 孔, M08 孔）を掘削した。右側の拡大図に赤字で示した数字は、各ボーリング孔口からのボーリング孔沿いの距離を示し、これが起振場所となる。ボーリング孔 M04 孔は、掘削後の坑道壁面の極近傍になるように配置した。このボーリング孔は、起振専用とした。掘削によりボーリング孔を一部破壊したが、補修により調査には支障のない状態を保持出来た。ただし、4.5m の地点は補修区間となったため、起振点として使用できなくなった（図-3.7 の拡大図では起振位置 4.5 の部分に□マークがないのは、この理由による）。最も岩盤内部側に位置するボーリ



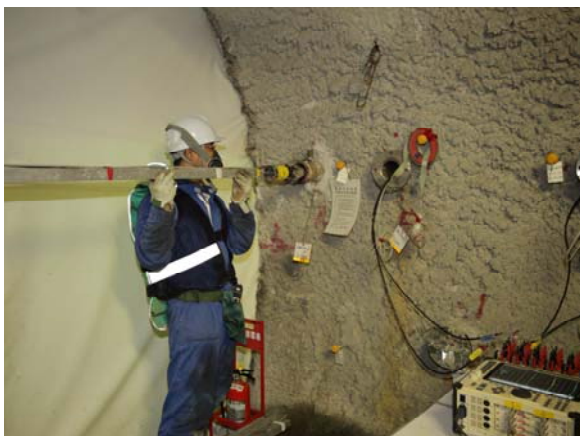
ング孔（M08 孔）も、起振専用とした。このボーリング孔では、起振位置 3.0 から 6.5 までの全ての点（50cm 間隔で 8 点）で起振を行った。坑道中央に位置する 3 本のボーリング孔（M05, M06, M07）は、ボーリング孔の最深部にあたる所定の位置（図中の受振位置 01, 03, 05）とその手前の所定の位置（図中の受振位置 02, 04）に受振器を設置した。これらのボーリング孔の手前は、起振位置（図中の起振位置 3.1, 3.5, 3.6）とした。

調査対象とする岩盤の物性の分布と起振位置・受振位置・弾性波計測パスの関係から、偏りのある配置では対象とする現象を画像として捉えられないことが指摘されている²⁹⁾。今回の調査の対象領域では、弾性波速度の変化は坑道壁面に平行に発現すると考えられる。予想される速度変化領域と起振位置・受振位置・弾性波計測パスの方向に偏りが無いことから、今回の配置で坑道壁面に平行に発現する速度変化を十分捉えることができると考えられる。

受振器間の空間部分（手前の受振器がない M07 孔についても該当部分は同様）については、数年にわたる調査期間中にボーリング孔が崩壊することを避けるため、発泡ウレタン（フォームライト HM-1700、混合比率は容積比で 1:1）を充填した。発泡ウレタンは孔の変形に追従する柔軟性を持ち、さらに発泡性のため発泡ウレタンを伝播する弾性波速度は岩盤に比して十分に遅いか、伝播する弾性波そのものを吸収することが考えられることから、それ自体が岩盤中を伝播する弾性波速度に影響を与えることはない。

弾性波トモグラフィ調査は、図-3.7 に示す全ての弾性波計測パスで弾性波を計測した。調査坑道の掘削前に実施した調査を初期値として、調査坑道の掘削による弾性波速度の変化の基準とした。調査坑道の掘削は 1m ずつ行われるため、図-3.7 に示すように掘削 1, 掘削 2・・・と掘削が 1m 進捗するごとに弾性波速度計測を繰り返した。1 回の計測では、起振点と受振点の全ての弾性波計測パスの組み合わせの弾性波を計測した。

起振源は、アルミ製の四角ロッドの先端に取り付けた加振ハンマー部分であり、アルミ製四角ロッド（所定の深度に到達するように 1 本 2m のロッドを必要本数継ぐ）を用いて所定の位置に設置した。図-3.8 に弾性波トモグラフィ調査の現場作業状況を示す。図中の(a)は、M04 孔において起振源を四角ロッドで挿入している状況である。坑道掘削時は、掘削に伴う粉じん等の作業環境悪化の影響を低減化するため、調査坑道とボーリング横坑との境界に防護用のシート（作業者の背後に見えるシート）を設置した。図中の(b)は、起振源より弾性波を発生させ、波形データ記録機でデータを計測している状況である。



(a) 起振源の設置



(b) 弾性波の起振および波形データの記録

図-3.8 現場での弾性波トモグラフィ作業状況

3. 3 トモグラフィ解析

計測した波形データに基づく弾性波トモグラフィ解析は、図-3.9 に示す解析フローチャートにある様に、初期モデル計算に BPT（Back Projection Technique, 逆投影法）¹⁰⁾を用い、逆解析には SIRT（Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, 同時反復法）¹¹⁾を適用した。また、波線は直線波線を仮定した。求められたセルの速度構造のコンター表示には、Golden Software の等高線・3次元表示ソフト Surfer8 を使用した。弾性波トモグラフィ計測パスと解析セルの位置関係を図-3.10 に示す。図中、解析メッシュ中の灰色で示したものが、一つのセルとなる。調査坑道掘削開始以後となる 2 回目以降の測定結果を基に、速度変化を求めるために、2 つの断面を直接的に対比するのではなく初期値データの解析結果をリファレンスモデルとして、その理論測定値を利用して時系列データを正規化し、変化後の値をインバージョンによって求める方法によった。

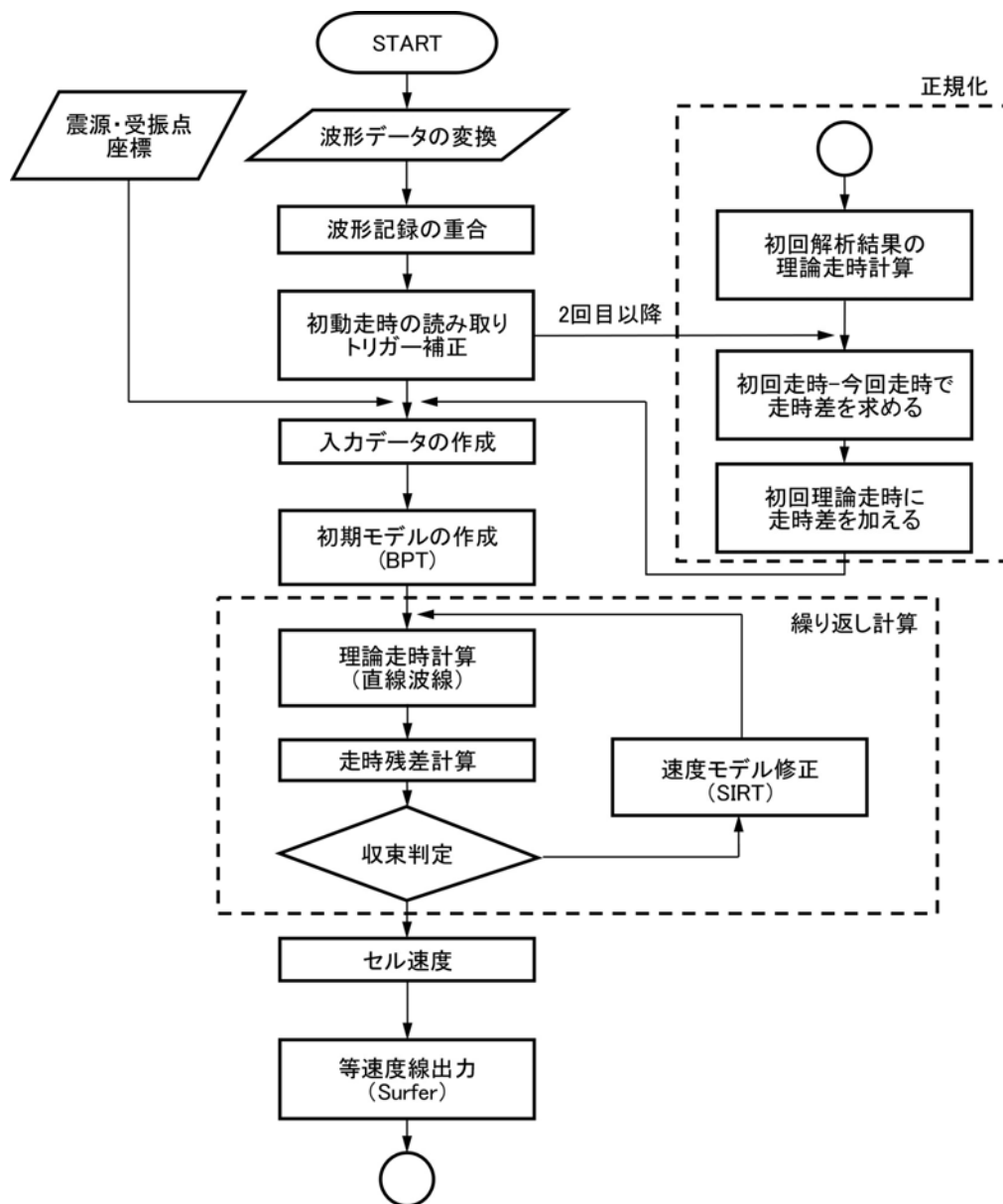


図-3.9 弾性波トモグラフィ解析フロー

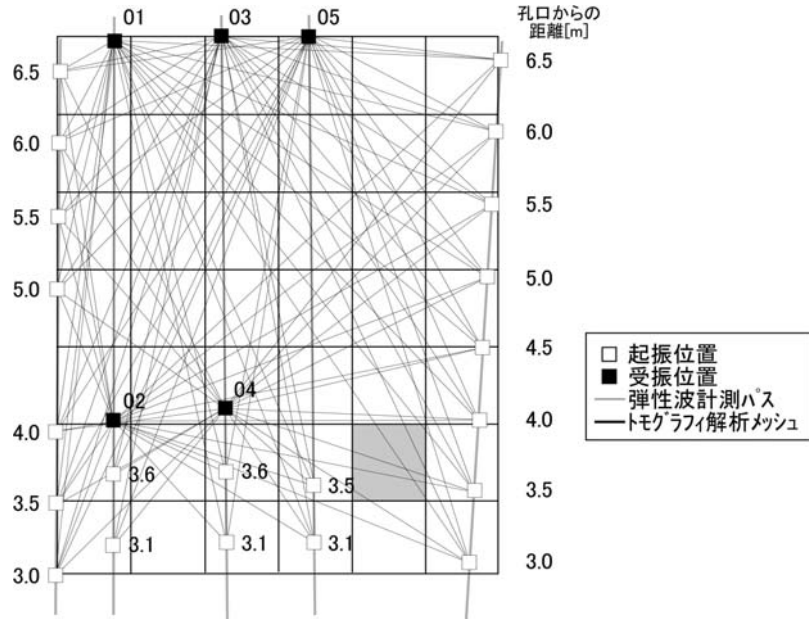


図-3.10 弾性波トモグラフィ計測パスと解析セルとの位置関係

BPT は、各走時に対して平均速度を求め、その走時が通過したセルの距離に応じて重み付けをして平均をとる方法である。

波線の速度を逆数の **Slowness** ; S で表すことができるため、 n 個目の走時の **Slowness** を S_n と表せる。 K 番目のセルを通過する全ての波線の長さを l_{nK} と表すと、 i 番目のセルの平均的な **Slowness** ; S_i は、次式で求められる。

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^N l_{iK} \cdot S_i}{\sum_{i=1}^N l_{iK}} = \frac{l_{1K} \cdot S_1 + l_{2K} \cdot S_2 + \cdots + l_{NK} \cdot S_N}{l_{1K} + l_{2K} + \cdots + l_{NK}} \quad (3.1)$$

計算方法を以下に述べる。

- ・ 各振源～受振点のペアについて、平均 **Slowness** を計算する。
- ・ 各格子点の **Slowness** の値 S_K を計算する

SIRT は、初期モデルを与えて走時を計算し、観測された走時との差（走時残差）を各セルに対して通過距離に応じて振り分け、その平均 **Slowness** を用いて初期モデルを修正する方法である。

n 個目の走時の **Slowness** の修正項を ΔS_n とし、 K 番目のセルに対して振り分けられた走時残差を t_{nK} と表すと、 i 番目のセルの **Slowness** 修正項は次式で求められる。

$$\Delta S_K = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_{iK}}{\sum_{i=1}^N l_{iK}} = \frac{\Delta t_{1K} + \Delta t_{2K} + \cdots + \Delta t_{NK}}{l_{1K} + l_{2K} + \cdots + l_{NK}} \quad (3.2)$$

計算方法を以下に述べる。

- ・初期の速度モデルを与える。

ここで、 T_{oi} は観測走時、 $T_{ci}^{(I-1)}$ は $I-1$ 回目の繰り返し計算後の波線 i に対する理論走時であり、 $\angle T_i^{(I-1)}$ はその走時差を示す。 N は全波線数である。

- ・各格子点の $\angle T_i^{(I-1)}$ を求める。

$$\angle T_i^{(I-1)} = T_{oi} - T_{ci}^{(I-1)} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3.3)$$

- ・ $\angle T_i^{(I-1)}$ を波線が通過する各格子に振り分ける。

$$\angle t_{iK} = \angle T_i^{(I-1)} \cdot l_{ik} / L_i \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3.4)$$

L_i は震源と受振点の距離、 $\angle t_{iK}$ は各格子に振り分けられた走時差である。

- ・ Slowness の補正

- ・ I 回目繰り返し計算の Slowness 値 $S_K^{(I)}$ を求める。

$$S_K^{(I)} = S_K^{(I-1)} + \angle S_K \quad (3.5)$$

(1) 起振位置および受振位置の同定

ボーリング孔（M04 孔～M08 孔）の孔口座標と孔曲がり測量から、起振位置座標および受振

表-3.1 トモグラフィ計測パスの距離一覧

単位 [m]

起振位置	受振位置				
	01	02	03	04	05
M04-6.5	0.44	2.44	1.16	2.61	1.76
M04-6.0	0.82	1.95	1.36	2.18	1.90
M04-5.5	1.28	1.47	1.69	1.78	2.15
M04-5.0	1.76	0.99	2.09	1.44	2.47
M04-4.0	2.75	0.42	2.98	1.20	3.26
M04-3.5	3.24	0.72	3.45	1.37	3.70
M04-3.0	3.74	1.16	3.92	1.67	4.14
M08-6.5	2.71	3.68	1.97	3.09	1.36
M08-6.0	2.75	3.34	2.04	2.69	1.48
M08-5.5	2.88	3.04	2.23	2.34	1.73
M08-5.0	3.09	2.80	2.50	2.05	2.08
M08-4.5	3.35	2.63	2.84	1.85	2.49
M08-4.0	3.67	2.55	3.22	1.77	2.92
M08-3.5	4.02	2.57	3.63	1.83	3.37
M08-3.0	4.41	2.68	4.06	2.02	3.83
M05-3.6	3.01	0.38	3.13	0.91	3.33
M05-3.1	3.51	0.88	3.62	1.24	3.79
M06-3.6	3.10	0.87	3.02	0.44	3.07
M06-3.1	3.58	1.17	3.52	0.94	3.56
M07-3.5	3.39	1.47	3.18	0.82	3.11
M07-3.1	3.75	1.64	3.57	1.12	3.51

位置座標を定めた。図-3.1 に示した弾性波トモグラフィ調査領域と同じ位置に配置される地中変位計や内空変位の計測結果から、坑道掘削中・後の岩盤の変位を推測し、変位の状況に応じて起振および受振の位置座標を補正できるが、今回の調査期間中において補正が必要となるような有意な変位は計測されなかったことから、起振位置と受振位置は調査を通じて固定とした（図-3.10 参照）。設定したトモグラフィ計測パスの距離の一覧を表-3.1 に示す。最も計測パスが短いのは、M05-3.6 の起振位置と受振位置 02 の間隔で 0.38m、最も長いのは起振位置 M08-3.0 と受振位置 01 の 4.41m である。

(2)弾性波トモグラフィ調査の実施

弾性波トモグラフィ調査の実施スケジュールを表-3.2 に示す。掘削前の計測を初期値とし、最初の掘削となる掘削 1 から掘削 7 までは 1 回の坑道掘削毎に調査を行った。2009（平成 21 年）年 4 月 10 日に掘削 3 と掘削 4 での弾性波トモグラフィ調査を行っているが、これは、1 日に 2 回の掘削を行ったことを示している。掘削 8 と掘削 10 については、調査領域と掘削切羽の距離が離れることから、調査の実施間隔を空けた。弾性波トモグラフィ調査そのものは、掘削中の調査に引き続き、経時変化を捉えるための調査も行うが、ここでは、弾性波速度に関してより変化が大きく出ると考えられる掘削中の変化の把握に対する適用性の確認を「原位置適用試験の範囲」と位置付けた。

弾性波の計測の結果、指向性のあるジオフォンでは Z 軸のデータは、X 軸のデータや Y 軸のデータと比較すると波形データが不明瞭であったことから、トモグラフィ解析に使用する波形は、X 軸と Y 軸の波形データを使用することとした。

また、波形データの処理において S/N 比の向上を図るため、8 回程度の波を記録した。

表-3.2 坑道掘削時の弾性波トモグラフィ調査の実施スケジュール

日付	調査坑道の掘削
2009/4/7	掘削 1
2009/4/8	掘削 2
2009/4/10	掘削 3
2009/4/10	掘削 4
2009/4/12	掘削 5
2009/4/13	掘削 6
2009/4/15	掘削 7
2009/4/17	掘削 9
2009/4/21	掘削 11

(3)初動の読取りおよび平均速度分布

波形記録の P 波初動の読取りでは発震位置－受振位置の幾何学的配置により、初動付近の極性および振幅が大きく変化する。そこで、各波形の記録は X 軸のジオフォンで計測した波形データ（X 成分）と Y 軸のジオフォンで計測した波形データ（Y 成分）を重ねて表示し、初動の読取りを行なった。初動走時と発震位置－受振位置のオフセット距離の分布図を図-3.11 に示す。原点からの傾きが平均速度を示しており、極端に平均速度が速いデータは測定誤差が大きいと判断し、

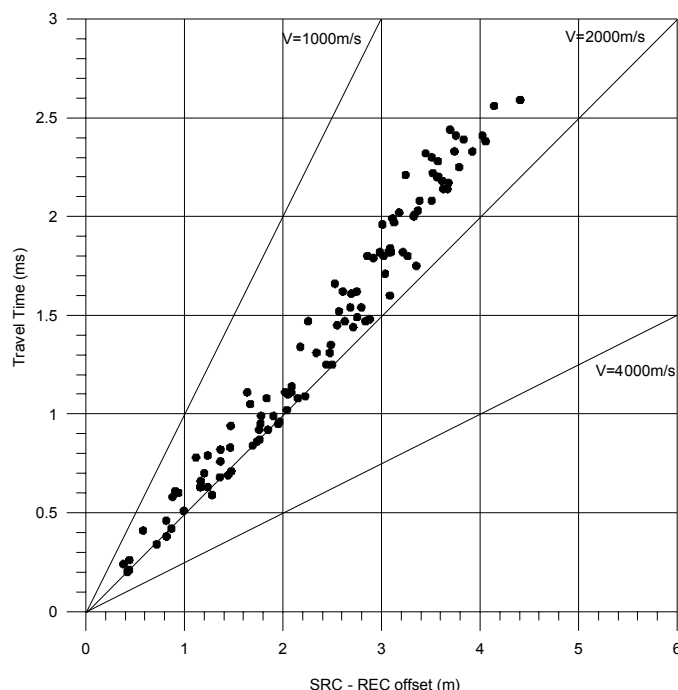


図-3.11 初動走時およびオフセット距離分布図（全記録）

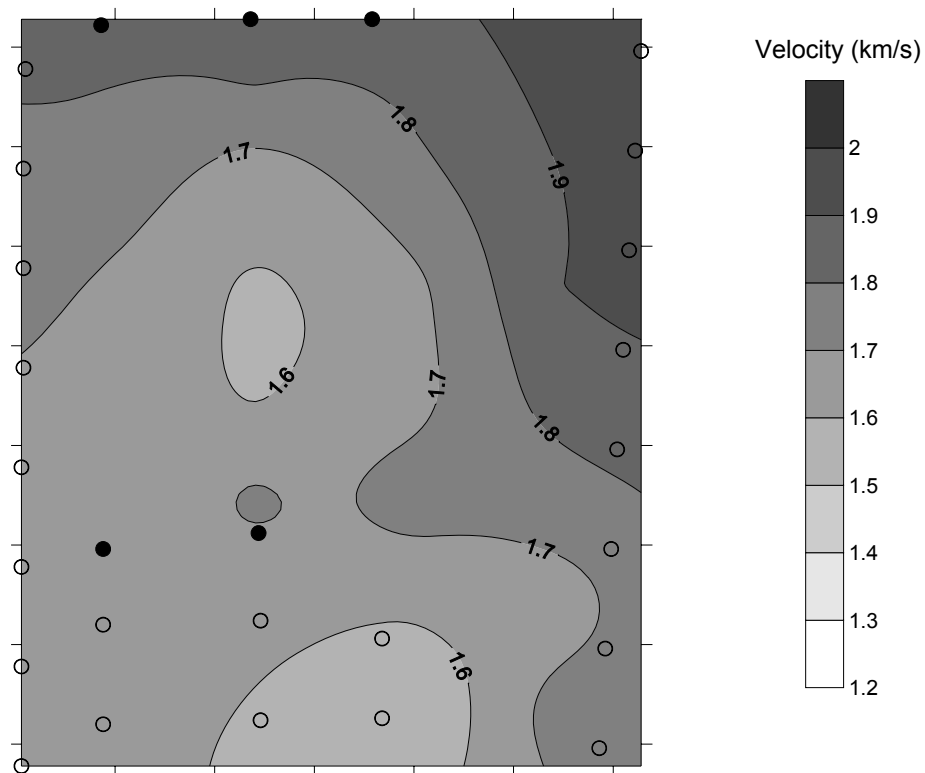
トリガー時間、P 波初動の読み直しなどを再確認した。またトリガー波形の初動を読み取り走時に対してトリガー時間補正も行なった。

(4) トモグラフィ解析

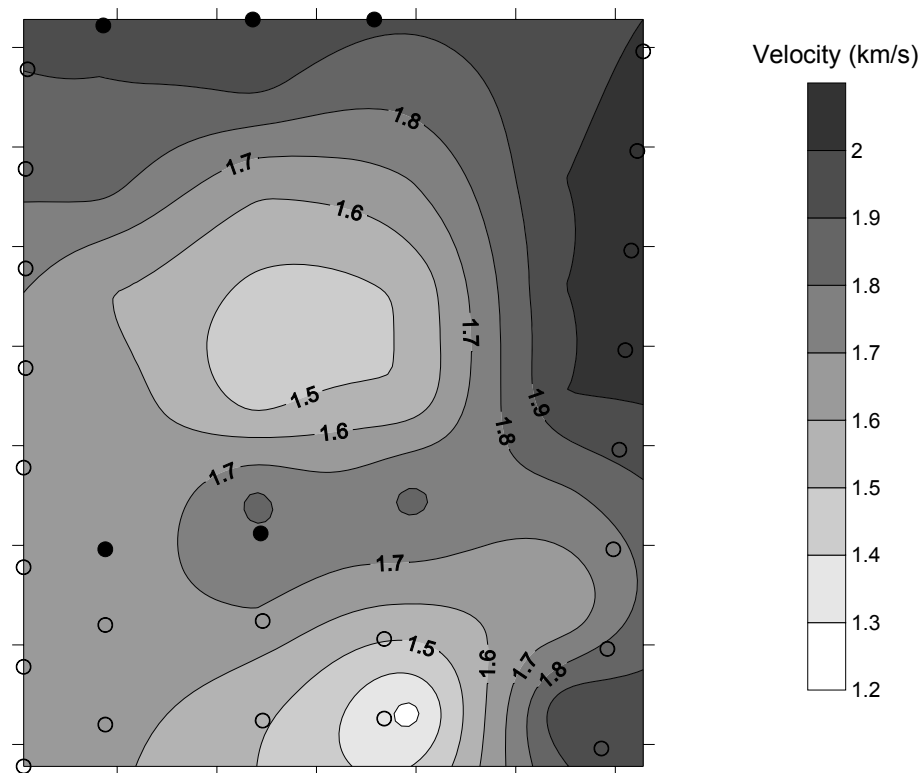
走時データおよび測量結果から弾性波トモグラフィ解析を行なった。解析手法には BPT を初期モデルとして、SIRT によるインバージョン計算を適用した。解析メッシュは解析領域および波線経路を考慮し、およそ 50cm 程度とした。BPT 初期モデルおよび SIRT 解析結果を図-3.12 に示す。図には、起振および受振器の位置をそれぞれ○および●で示した。

坑道の掘削に伴う掘削影響領域における岩盤の特性の変化をモニタリングするためには、その変化をより捉え易くする必要があるが、このようなトモグラフィ技術を岩盤内の挙動のモニタリングに適用した事例として、初期状態の測定走時データからの変化量を求め初期状態の理論走時に測定走時の変化量を加えたものにより計算する方法の有効性が示されている⁷⁾。そこで、掘削影響領域のモニタリング技術としての適用性の確認においても、坑道掘削前の状態を初期値として弾性波速度分布の変化率で整理することとした。図-3.13 は、坑道の掘削に伴う変化率を示したものである。

調査坑道と第 2 ボーリング横坑が交差する部分では応力状態は複雑となるため、速度変化率のコンターでも複雑な挙動を示した。そこで、図中の太赤枠点線（コンター作図領域）で囲んだ部分に限定してコンターを示した。この結果、坑道を掘削することにより坑道壁面近傍に弾性波速度が低下する領域が発現する挙動を捉えることが出来た。また、その弾性波速度が低下する領域は掘削の進行とともに拡大する挙動を捉えることが出来た。坑道壁面側のボーリング孔は坑道壁面の極近傍に設置されていることを考慮すると、弾性波速度の低下する領域は、坑道壁面から 50cm から 100cm 程度であるといえる。



BPT Initial Model



Result Model (SIRT)

図-3.12 弾性波トモグラフィ解析結果図（初期モデルと解析モデル）

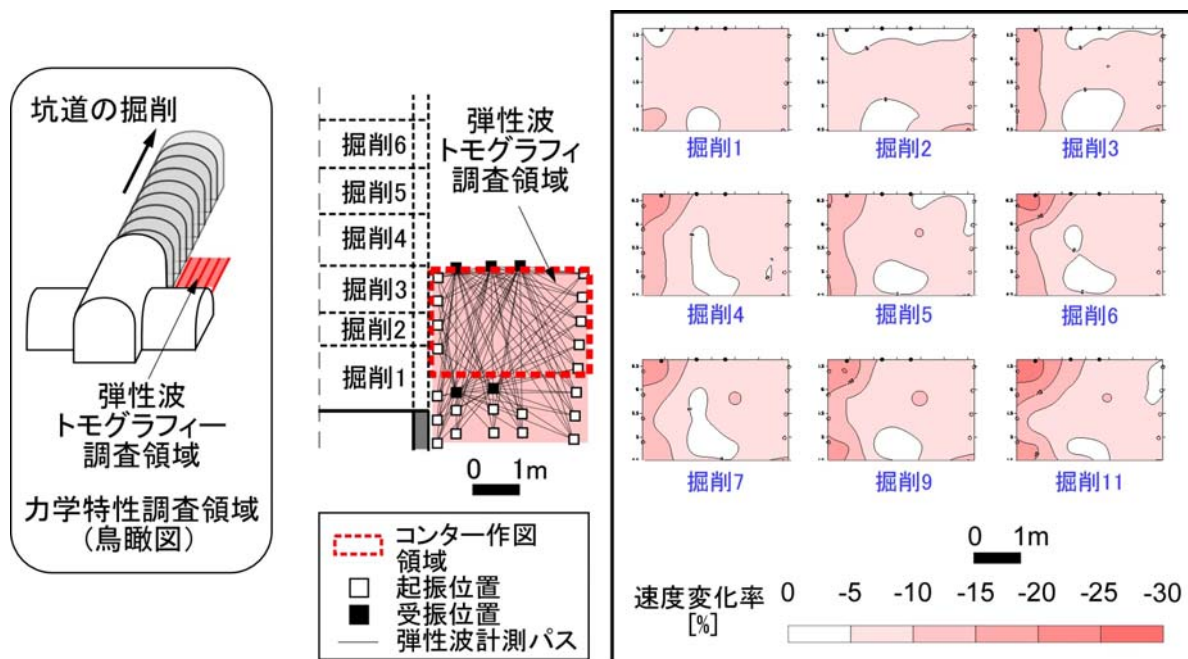


図-3.13 弾性波トモグラフィ解析結果図（速度変化率）

4. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分のように、地下深部に坑道を掘削する場合、坑道の周囲には掘削影響領域が発生する。掘削影響領域は、掘削損傷領域、応力再配分領域および不飽和領域に分類でき、それぞれの領域では岩盤特性が初期状態に比べて低下する。また、これらの領域の岩盤特性の変化は、坑道掘削後の経過時間と共に変化することとなる。

掘削影響領域の特性は、地層処分における安全評価に必要となる特性と密接な関係があることから、これらの特性の発生メカニズムやその経時変化の把握が重要となる。

今回開発した簡易型の弾性波トモグラフィ調査システムは、このような掘削影響領域において時間経過に伴う岩盤内の変化を把握するシステムとして有用なものであり、弾性波の速度変化として掘削影響領域内の亀裂の発生や含水比の変化等を弾性波速度変化として捉えるものである。

開発したシステムを幌延深地層研究センターの深度 140m 調査坑道の掘削影響試験に適用し、その有用性を確認した。初期値の計測から始め、1 回の掘削ごとに繰り返し弾性波トモグラフィ調査を実施した。掘削 11 まで繰り返し弾性波トモグラフィ調査を行うことが出来、結果を初期値からの速度変化率のコンター図として示すことが出来た。その結果、坑道掘削に伴う速度低下領域の発現やその拡大現象を捉えることが出来ることを確認した。

謝辞

本システムの構築にあたり、元 技術開発協力員の中村隆浩氏（現 戸田建設）には原位置でのデータ取得において、また、サンコーコンサルタントの葛民氏には、現場での作業において、それぞれ多大なご協力をいただいた。さらに、試験の基本計画の検討において、東京大学 工学系研究科 システム創成学の久保誠介教授、福井勝則准教授に貴重なご意見をいただいた。

掘削影響試験の一要素として実施した弾性波トモグラフィ調査用の 5 本のボーリング孔および孔内載荷試験用の 3 本のボーリング孔は、共同研究実施者である財団法人電力中央研究所の協力により掘削したものである。

ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構，深地層研究所（仮称）計画，JNC TN1410 98-002, 1998.
- 2) 物理探査学会：新版物理探査適用の手引き－土木物理探査マニュアル 2008－, 2008.
- 3) Sugihara, K. et al., Preliminary results of a study on the responses of sedimentary rocks to shaft excavation, *Engineering Geology*, Vol. 35, 1993, pp. 223-228.
- 4) 杉原弘造ほか，堆積軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検討，資源と素材，vol. 116, 2000, pp. 821-830.
- 5) Sato, T. et al., In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, *Engineering Geology*, Vol. 56, 2000, pp. 97-108.
- 6) Sugita, Y. et al., Seismic tomography investigation in 140m Gallery in the Horonobe URL project, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 1265, 2010, AA06-03.
- 7) 斎藤秀樹ほか，長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素注入実験の坑井間弾性波トモグラフィによるモニタリング，*Journal of MMIJ*, Vol.124, 2008, pp. 78-86.
- 8) 東宏幸ほか，繰返し弾性波トモグラフィによる地中貯留二酸化炭素分布の可視化，地盤工学会誌，57-5 (616) , 2009, pp. 4-7.
- 9) 山田雅行ほか，坑井間弾性波トモグラフィの問題点について－傾斜層の検出能力－，材料，Vol.41, No.463, 1992, pp. 430-436.
- 10) Bregman, N. D. et al., Crosshole Seismic Tomography, *Geophysics*, Vol. 54, No. 2, 1989, pp. 200-215.
- 11) Chen, S. T. et al., Subsurface imaging using reserved vertical seismic profiling and crosshole tomographic methods, *Geophysics*, Vol. 55, No. 11, 1990, pp. 1478-1487.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g) 単位シーベルト (PV.2002,20,705) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	セ	c
10 ¹⁸	エ	E	10 ⁻³	ミ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピ	p
10 ⁶	メ	M	10 ⁻¹⁵	フェ	f
10 ³	キ	k	10 ⁻¹⁸	ア	a
10 ²	ヘ	h	10 ⁻²¹	ゼ	z
10 ¹	デ	da	10 ⁻²⁴	ヨ	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベール	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

