

非火薬破砕剤を用いた坑内反射法弾性波探査 に関する一考察

アドザム アズマン¹・邊見 涼²・小島 英郷³・淡路 動太⁴

¹正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
E-mail: aladzam@shimz.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
E-mail: r_hemmi@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
E-mail: h.kojima@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
E-mail: awaji@shimz.co.jp

坑内反射法弾性波探査における起振源としての非火薬破砕剤の適用性について検証するために，含水爆薬と非火薬破砕剤を用いた探査結果の比較を行った．その結果，非火薬破砕剤を用いた場合でも，リスクレベルが高い断層や出現範囲の広い不連続面群 (>5m) の出現位置の予測精度は十分確保できていることが確認できた．ただし，非火薬破砕剤を用いた探査では，得られるエネルギーが低く，距離減衰のバラツキが大きいため，探査可能範囲は相対的に小さくなる傾向が認められた．

Key Words : Conventional tunneling, tunnel seismic prediction, non-explosive

1. はじめに

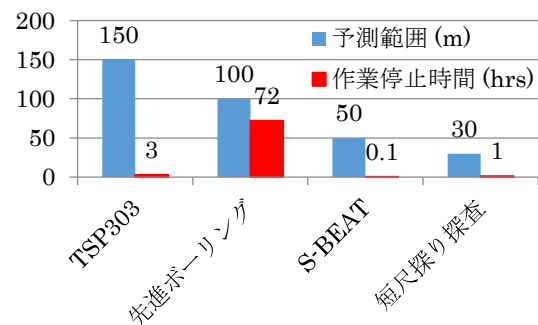
坑内反射法弾性波探査法の一つであるTSP303は，比較的短時間で広範囲の地質状況を三次元的に把握することができる手法である．TSP303は火薬による起振を前提とした手法であるが，実施現場の状況によっては，周辺環境への影響や保安上の問題で火薬を使用できないことがある．こうした状況下におけるTSP303の実施は，火薬の代わりにハンマー打撃や非火薬破砕剤などを用いて探査を行う方法が考えられる．本報告では，TSP303における起振源としての非火薬破砕剤の適用性を検証するために，火薬（含水爆薬）と非火薬破砕剤を用いた探査結果の比較を行い，両者の特徴について検証した．

2. 試験概要

(1) 坑内反射法弾性波探査TSP303

山岳トンネルにおける高速掘進達成のためには，前方地山における地質リスクの評価を速やかに実施することが重要である．一般的な切羽前方探査方法における予測

範囲と探査実施のための作業停止時間の関係を図-1に示す．この中でも，TSP303は比較的短い作業時間で切羽前方約150mの広い範囲を探査可能な方法である．TSP303は，切羽前方に急激な密度とVpが変化する箇所（断層破砕帯，不連続面が多い境界等）が存在すれば，その境界面を発破により発生させた地震波の反射面としてとらえることで，地質リスクが発生する可能性のある場所を予測する手法である．



※S-BEAT : Shimizu hydraulic-Breaker Exploration Ahead of Tunnel face (ブレイカー探査) ¹⁾

図-1 典型的な切羽前方探査方法の比較

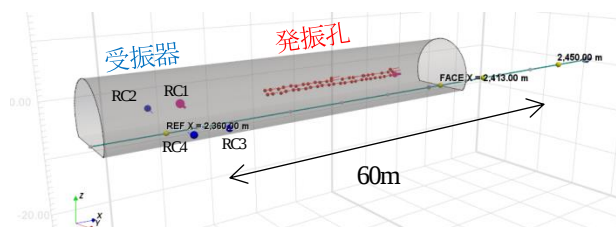


図-2 典型的なTSP測定レイアウト

TSP303は3成分の反射波データを用いて解析を行うため、地質の不連続面（地層境界、断層破碎帯等）の走向・傾斜を領域的に推定することが可能である²⁾。

図-2に典型的なTSP303の計測レイアウトを示す。切羽約60m手前で4本の受振器を設置し、24本の発振孔を切羽近傍からトンネル延長方向に一定ピッチで配置する。

計測される時間軸上の反射波を距離軸上の反射波にするためには、はじめに弾性波速度の仮定が必要で、初期モデルの弾性波速度としてP波、S波ともに直接波速度を採用し、計算過程の中で反射波をそれぞれ正しい位置に移動させる処理（時間マイグレーション）を行うことで、より正しい反射断面イメージ（速度分布）を作成していく。予測したVp速度分布に基づいて、特に切羽前方の密集した反射面とVpが急激に変化する箇所を地質リスクを持つ箇所として評価する。

本報告では、トンネル掘削中に生じ得る地質リスクを以下の3つのレベルに区分する。

- ・レベルⅠ：肌落ち等の切羽での不安定事象の発生
- ・レベルⅡ：支保パターン変更を伴う地質状況の変化
- ・レベルⅢ：補助工法等が必要な切羽状況の急変

リスク回避を目的とする前方探査としてのTSP303では、レベルⅢの地質リスクを見逃さないことが最低条件である。TSP303等の反射法弾性波探査では、切羽前方の広い範囲において、リスクが高くなる可能性のある境界面の存在を検知する1次スクリーニングとしての役割を担うことが期待される。したがって、TSP303の実施により、リスク発生の可能性のある反射面を早期に認識し、穿孔探査や先進ボーリング等のより詳細な地質性状を把握する探査の実施箇所を限定できることが期待される。

(2) 非火薬破碎剤

反射法弾性波探査は、実施現場の状況によって周辺環境への影響や火薬保安上の問題で爆薬を使用できないことがある。また、機械掘削方式（TBM、ロードヘッダー等）を採用する現場においてTSP303を実施する場合、火薬使用に関する各種の申請が必要なため、手続きが煩雑になる。こうした状況で、TSP303を実施するためには、起振源として火薬の代用となるものを採用する必要がある。例えば、TSP探査の起振源として、ハンマー打

表-1 含水爆薬と非火薬の比較

	使用温度 (°C)	仮比重	反応速度 (m/s)
含水爆薬	<60	1.15~1.23	5800~6000
非火薬破碎剤	-20~+60	1.25~1.45	100~300



カートリッジ（左からロックラック®1000、800、500、300、200、100）



点火具（段発）

図-3 上段：非火薬破碎剤，下段：点火具
（ロックラック：カヤク・ジャパン（株））

撃によるものや放電ショックによる探査方法³⁾が知られている。

本報告では、TSP探査の起振源としての非火薬破碎剤の適用性について試験を行う。非火薬破碎剤は、火薬と同様に点火具を用い、水蒸気圧により瞬時に破碎するものである。今回、試験に用いた非火薬破碎剤には、カヤク・ジャパン（株）のロックラック（図-3）である。ロックラックはテルミット反応による膨張圧を用いて岩盤の破碎を行い、以下に示す様々なメリットがある。

- ・起振エネルギーがハンマーやブレーカよりも高い
- ・火薬類取締法の適用を受けず、取扱いが容易
- ・発破工法と類次した作業手順による起爆

ただし、非火薬破碎剤は含水爆薬に比べて爆速（反応速度）が遅く（表-1）、得られる地震波の最大振幅も小さいため、反射法弾性波探査における適用性には不明な点が多い。そこで、本報告では起振源として火薬（含水爆薬）と非火薬破碎剤を用いたTSP探査を実施し、その探査精度および探査可能範囲について比較検討を行った。

3. 試験方法

今回の試験は異なる地山条件を持つトンネルAとトンネルBで実施した。それぞれのトンネルにおいて、同一切羽位置から火薬法（含水爆薬）と非火薬法（非火薬破砕剤）による起振を実施してデータを取得した。起振時のシステムセットアップには、瞬発雷管法とワイヤブレック法の2つがある。瞬発雷管法では、爆薬器による点火時にデータの記録が開始されるのに対し、ワイヤブレック法では、破砕剤に取り付けたワイヤが点火後の膨張によって、ワイヤ破断する瞬間をデータの記録開始点とする方法である。上述したように、非火薬破砕剤は含水爆薬に比較して反応速度が遅いので、その影響を把握することを目的に、非火薬法では瞬発雷管法とワイヤブレック法の両者のシステムセットアップ方法を実施した。

火薬法と非火薬法それぞれの試験結果の中から、受振した弾性波における初動の検知精度、周波数特性、直接波速度、SN比（信号対ノイズ比）、減衰特性に着目し、TSP303における反射面の検知精度、探査可能範囲に関する比較を行う。それぞれの起振方法で得られる地震波の検知精度は、地中を伝播する地震波の周波数（ f ）で評価を行う。波長（ λ ）、周波数（ f ）、速度（ V ）については式（1a）の関係がある⁴⁾。地震波の探査手法としての分解能（検知精度（ ϕ ））は式（1b）のように、波長の4分の1程度とされているので、波長2m程度の地震波では1m幅の不連続面の検出は期待できる。

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1a)$$

$$\phi = \frac{\lambda}{4} \quad (1b)$$

(1) 試験1

トンネルAでは地山等級CⅡ相当の新第三紀砂岩・泥岩が分布し、探査実施切羽から数十メートル先には事前地表踏査により大規模な断層破砕帯の存在が想定されていた。試験は図-2に示すTSP303の標準的な配置を用いて、

表-2 各試験の実施条件

試験番号	方法	システム・セットアップ	装薬量 (g)	地山
1a	火薬	瞬発雷管法	100	新第三紀砂岩・泥岩
1b	非火薬	ワイヤブレック法	300	
2a	火薬	瞬発雷管法	100	ジュラ紀玄武岩
2b	非火薬	+ ワイヤブレック法	200	

火薬および非火薬によるそれぞれの起振方法で同一切羽位置から2回実施した。火薬法では瞬発雷管法によるシステムセットアップを採用し、非火薬法ではワイヤブレック法を採用した（表-2）。

(2) 試験2

トンネルBでは、ジュラ紀の玄武岩類が分布する。部分的に変質を被り地山等級DⅠ相当であるが、大規模破砕帯などの顕著な地山状況の変化は、事前に想定されていなかった。試験は図-2に示すTSP303の標準的な配置を用いて、火薬および非火薬によるそれぞれの起振方法で同一切羽位置から2回実施した。火薬法では瞬発雷管法によるシステムセットアップを採用し、非火薬法では24孔の発振孔の3孔をワイヤブレック法、残り21本を瞬発雷管法でシステムセットアップを行った。

4. 地震波形特性に関する試験結果

(1) 初動波の到達時間の計測精度

a) 試験1の初動波到達時間

図-4に示すように、初動波到達時間（初動ピック）は火薬法に比べて非火薬法では相対的にバラツキが大きくなるが、両者の起振方法で得られた初動到達時間の勾配はほぼ同一である。したがって火薬法に比べて測定精度は劣るものの、直接波の速度計算については、非火薬法でも十分な精度で実施できていると考えられる。

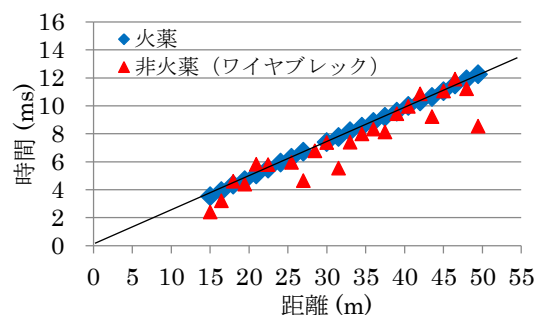


図-4 試験1の初動到達時間

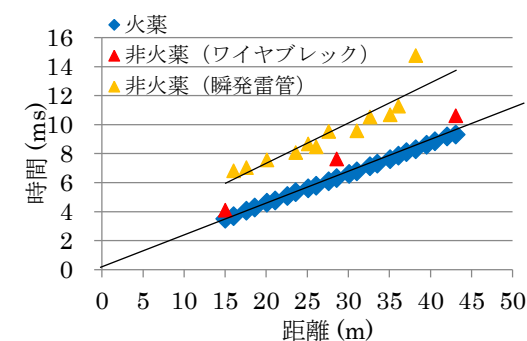


図-5 試験2の初動波到達時間

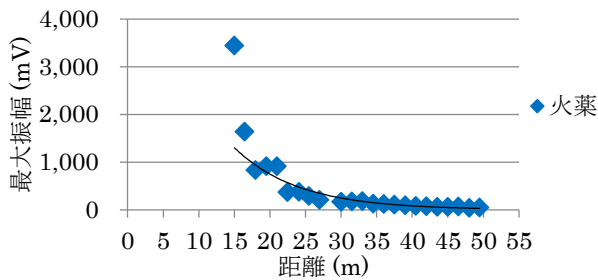


図-6 試験1a：火薬法の距離減衰特性

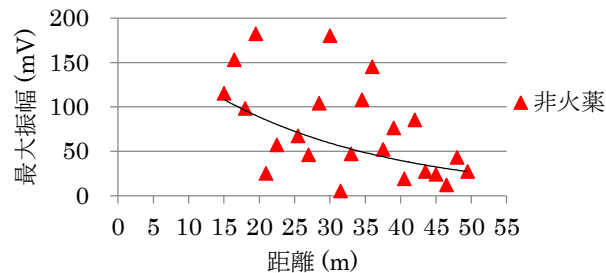


図-7 試験1b：非火薬法の距離減衰特性

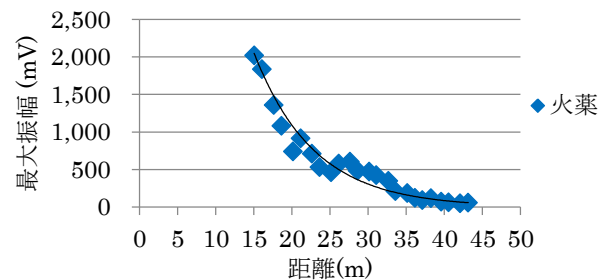


図-8 試験2a：火薬法の距離減衰特性

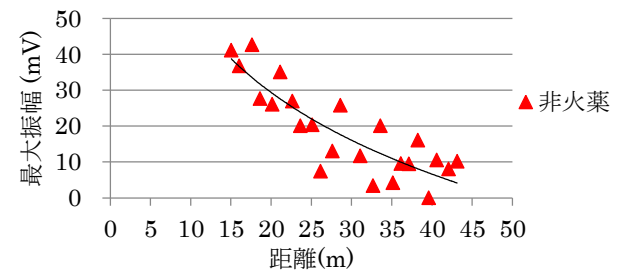


図-9 試験2b：非火薬法の距離減衰特性

b) 試験2 の初動波到達時間

図-5に示すように、初動波の到達時間（初動ピック）は火薬法に比べて非火薬法では相対的にバラツキが大きくなるが、両者の起振方法で得られた初動到達時間の勾配はほぼ同一である。ただし、非火薬法ではワイヤブレード法と瞬発雷管法を用いたシステムセットアップの違いで約3msの到達時間の遅延が認められた。ワイヤブレード法の初動到達時間の傾向は火薬の瞬発雷管法とほぼ同一の傾向を示すことから、非火薬破砕剤では、起爆から破砕剤の膨張までに約3msの遅延が生じていることを考慮して解析を進めることが必要であることが分かった。

(2) 距離減衰の特性の比較

a) 試験1の距離減衰特性

図-6に示すように、試験1では火薬法における地震波の距離減衰傾向はバラツキが少ない指数関数型を示し、最大振幅は概ね100mV以上で高いSN比を示す。

一方、非火薬法では図-7のように、距離減衰傾向にバラツキが大きく、最大振幅も低い傾向が認められ（＜200mV）、得られる地震波形のSN比が相対的に低い結果となった。

b) 試験2の距離減衰特性

図-8に示すように、試験2では火薬法における地震波の距離減衰傾向はバラツキの少なく、最大振幅も概ね100mV以上で高いSN比を示す。

一方、非火薬法では図-9のように、距離減衰は比較的良好だが、最大振幅が非常に低く（＜50mV）、SN比も相対的に低い傾向を示している。

表-3 直接波周波数の比較

直接波周波数 (Hz)						
試験番号	方法	RC1	RC2	RC3	RC4	平均
1a	火薬	1845	1701	1033	564	1286
1b	非火薬	592	511	538	333	494
2a	火薬	1484	1282	929	809	1126
2b	非火薬	495	267	176	182	280

表-4 分解能の比較

分解能 (m)						
試験番号	方法	RC1	RC2	RC3	RC4	平均
1a	火薬	0.5	0.6	0.9	1.7	0.9
1b	非火薬	1.8	2.0	1.9	2.9	2.2
2a	火薬	0.8	0.9	1.2	1.4	1.1
2b	非火薬	2.2	4.0	6.0	6.1	4.6

表-5 SN比の比較

SN比 (信号対ノイズの比)						
試験番号	方法	RC1	RC2	RC3	RC4	平均
1a	火薬	14.5	9.0	6.0	6.5	9.0
1b	非火薬	2.4	1.5	1.2	1.1	1.6
2a	火薬	12.5	10.5	5.5	3.5	8.0
2b	非火薬	1.2	1.1	1.0	0.7	1.0

(3) 地震波形特性の比較

a) 直接波周波数の比較

表-3に全4回の試験で得られた直接波周波数の値を示す。これによると、非火薬で得られた周波数は火薬法に比べて3~4倍小さくなる傾向が認められた（表-3）。

b) 分解能（検知精度）の比較

反射法弾性波探査における地震波の分解能（検知精度）は波長の1/4程度となる。表-4に各探査で得られた分解能を示す。これによれば、火薬法による分解能は概ね1m程度を示し、非火薬法では2~5mを示す結果となった。したがって、非火薬法では、火薬法に比べて2~5倍分解能が低く、数m以下の幅を持つ不連続面は検出できない可能性が高い。

c) SN比の比較

表-5に各探査で得られた地震波のSN比を示す。非火薬法におけるSN比は、火薬法の15~20%程度であり、反射面の検知精度で不利になる結果となった。

5. 切羽前方探査結果の比較

(1) 試験1の予測結果の比較

試験1における火薬法と非火薬法による切羽前方探査の結果を図-10、図-11に示す。図中のVp分布は、相対的に青がVpの高い箇所、赤がVpの低い箇所に相当している。火薬法（図-10）では予測距離100mの位置、非火薬法では予測距離95mの位置でVpが急激に落ち込む箇所が

認められた。両者においてほぼ同一位置で認められたこの顕著な反射面を断層境界に相当すると予測した。この位置は事前調査により想定されていた大規模破砕帯の位置より約20m手前であったが、実掘削時には、本探査で予測された位置で、リスクレベルⅢ（補助工法等の対策が必要なレベルの地質リスク）に相当する断層破砕帯が出現した。事前調査位置よりも早い出現であったが、TSP探査による破砕帯の検知により、追加調査の実施、支保パターンの変更と補助工法の計画を事前に実施することで遅滞なく施工を進めることができた。また、切羽で観察された断層破砕帯の走向は左から右への変化を示し、予測した境界面とほぼ同一の性状であり、火薬法および非火薬法の両方でレベルⅢの地質リスクを精度よく認識することができた。ただし、両者の探査結果において断層破砕帯の開始位置は十分な精度で予測できていたが、破砕帯の幅（実積約120m）、すなわち破砕帯がどこまで続くかについては把握することができなかった。

顕著な不連続面の境界位置（予測距離100m）における各発振孔の反射波の到達時間をピックアップしたものを図-10(b)、図-11(b)に示す。火薬法と非火薬法で探査結果を比較すると、想定される反射波の時間位置で、両者の反射波は概ね一致するが、火薬法の反射波がきれいに位

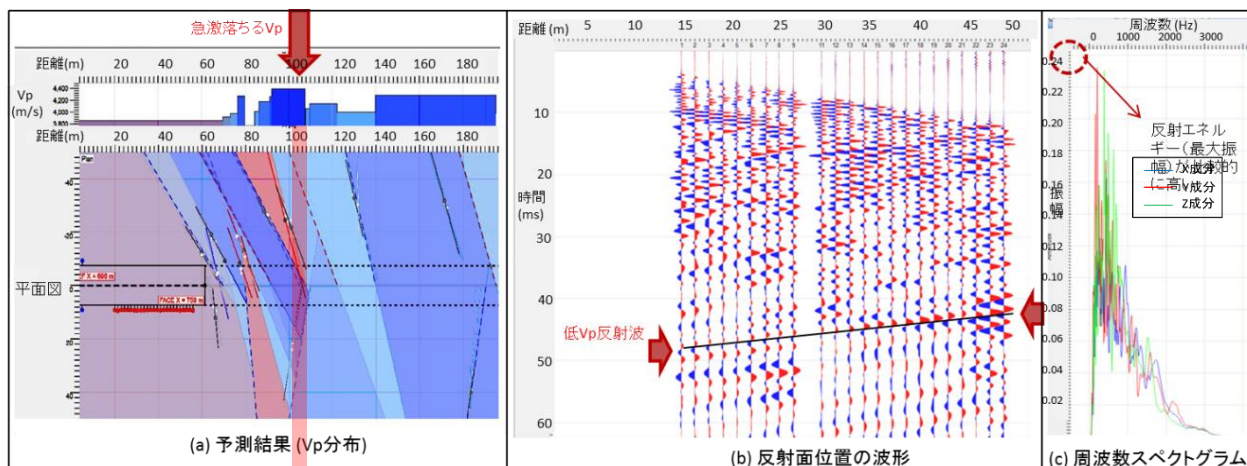


図-10 試験 1a（火薬）の予測結果と反射特定の波形

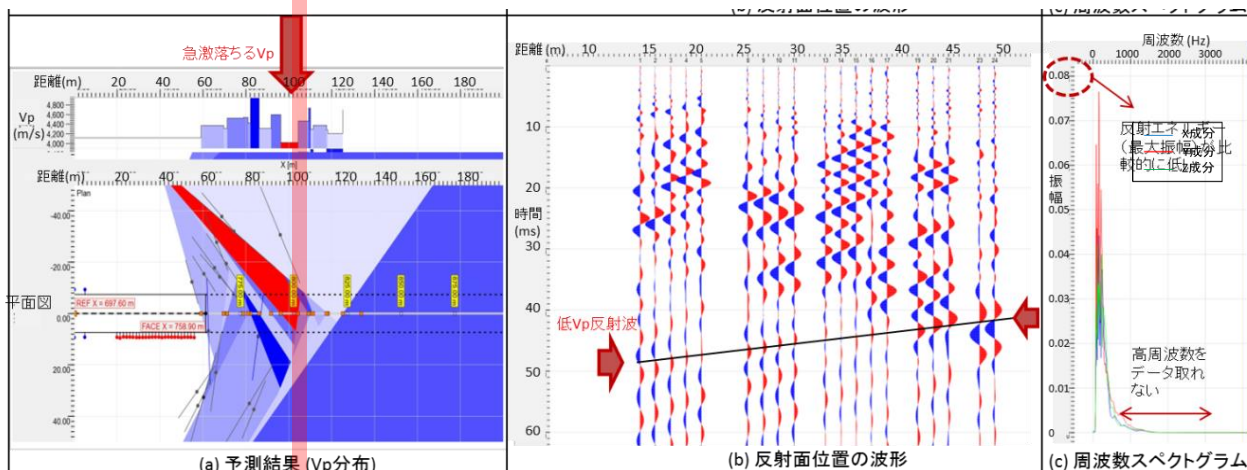


図-11 試験 1b（非火薬）の予測結果と反射特定の波形

置が揃っているのに対して、非火薬法ではバラツキが認められ、検知精度が相対的に劣ることが分かった。

各探査法で得られた周波数スペクトグラムを図-10(c)、図-11(c)に示す。もっとも発振孔に近い受振器(RC1)では、火薬法で取得された最大振幅(エネルギー)はほぼ100mV以上であり、周波数は2000Hzまで高いSN比で取得できており、十分な予測精度・範囲が得られた。これに対して、非火薬法では最大振幅は200mV以下で、周波数は500Hzまで、SN比も相対的に小さい。このように、非火薬法では火薬法に比べて得られる地震波特性の精度が低く、距離減衰のバラツキの影響も大きい。このため、火薬法による予測範囲が切羽から約150m(図-10(a))であるのに比べて、非火薬法の予測範囲は切羽から70~80m(図-11(a))程度であると判断された。

(2) 試験2の予測結果の比較

試験2における火薬法と非火薬法による切羽前方探査の結果を図-12、図-13に示す。事前調査においてリスクレベルの高い断層等は予想されていなかったが、探査距離100mにおいてVpが急激落ちる箇所が両者の探査で認

められた。合わせて実施された先進ボーリングの結果によれば、探査距離99~104mの位置でRQDが相対的に低く、亀裂の発達が著しい箇所が想定され、施工中の切羽の自立性(肌落ち等)に注意が必要であると判断された(地質リスクレベルI相当)。実掘削の結果は予測された位置で亀裂の密集や肌落ちが見られ、予測性状とほぼ同一の現象が認められた。

不連続面の境界位置(予測距離100m)における各発振孔の反射波の到達時間をピックアップしたものを図-12(b)、図-12(b)に示す。試験1と同様に両者において、反射波の位置は概ね一致しているが、非火薬法では火薬法に比べて反射波の到達時間にバラツキが認められる。

各探査法で得られた周波数スペクトグラムを図-12(c)、図-13(c)に示す。もっとも発振孔に近い受振器(RC1)では、火薬法で取得された最大振幅(エネルギー)がほぼ100mV以上、周波数が1500Hzまで高いSN比で地震波形を取得できており、十分な予測精度・範囲が得られた。これに対して、非火薬法の最大振幅が非常に低く(<50mV)、周波数も400Hzまでの取得であった。ただし、探査範囲全般で認められた反射面はリスクレベル1相当

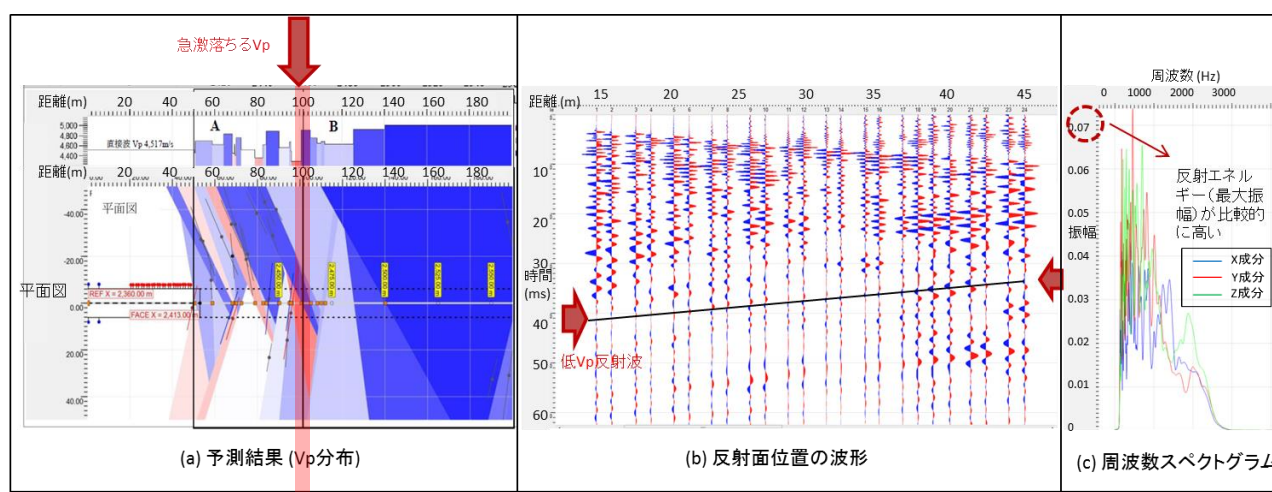


図-12 試験2a(火薬法)の予測結果と反射特定の波形

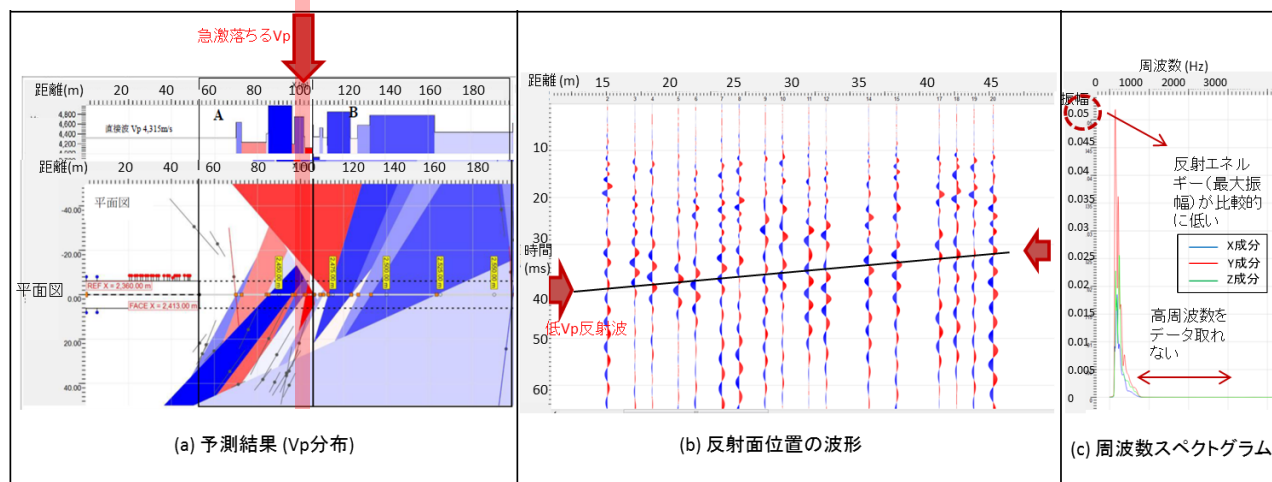


図-13 試験2b(非火薬法)の予測結果と反射特定の波形

の反射面のみで、顕著な反射面は認められなかった。このため、地震波の到達距離をある程度稼ぐことができたため、非火薬法の検知精度は相対的に低くなるが、探査範囲については火薬法と同様の150mまで探査可能な結果となった。

6. まとめ

TSP303における起振源としての非火薬破砕剤の適用性を検証するために、火薬（含水爆薬）と非火薬破砕剤を用いた探査結果の比較を行い、両者の特徴について以下の知見が得られた。

1. 非火薬破砕剤の反応速度が遅く、初動の到達時間については約3msの遅延を考慮する必要があるが、火薬法と非火薬法で同程度の直接波速度を同定できた。
2. 非火薬法により得られる地震波の特性は、距離減衰、周波数、分解能、SN比のいずれでも火薬法に比べてバラツキや精度の面で不利となる。
3. 火薬法と非火薬法の両方でリスクレベルⅢに相当する幅の広い断層破砕帯とリスクレベルⅠに相当する多亀裂帯を十分な精度で検知することができた。

4. 非火薬法は、得られるエネルギーが相対的に低く、バラツキが大きいと、顕著な反射面が認められる区間では、探査可能範囲は火薬法における約150mに対して70~80m程度に落ちる場合がある。

今後は、より探査に適した地震波特性が得られるように非火薬破砕剤の起爆方法を改善していき、火薬類が使えない現場においても、反射法弾性波探査を十分な精度で実施できるようにすることで、山岳トンネルにおける地質リスクの管理方法の向上に貢献していく予定である。

参考文献

- 1) 若林成樹，西琢郎，青野泰久，中谷篤史：ブレーカー振動を利用したトンネル切羽前方探査システム，清水建設研究所報告，2016。
- 2) 吉野隆之，山本松生，篠川俊夫，瀬谷正巳：3次元反射法弾性波探査による切羽前方探査，トンネル工学研究論文，2002。
- 3) 今井博，川上純，荒井浩成，井上鉄也，佐々木加津也：放電衝撃のトンネル前方反射法弾性波探査への実用実験，土木学会第53回年次講演会，1998。
- 4) 榊原淳一，山本督夫：高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発，土木学会論文集 C，97-106，2009。

(2018.8.10 受付)

CONSIDERATION FOR THE USAGE OF NON-EXPLOSIVE AS SEISMIC SOURCE FOR TUNNEL SEISMIC PREDICTION METHOD

Al Adzam Shah bin AZMAN, Ryo HEMMI, Hidesato KOJIMA and Dohta AWAJI

The applicability of non-explosive as seismic source for tunnel seismic prediction (TSP303) was analyzed by comparing both explosive and non-explosive method. As a result, non-explosive able to detect the boundaries of risk level 3 fault zone and highly jointed discontinuity that are more than 5m width with reasonable degree of accuracy. However, it should be noted that non-explosive has relatively low energy and scattered seismic attenuation which could effect the prediction range.