

# 山岳トンネル単孔起爆における 振動・音圧の伝播波形特性

高村浩彰<sup>1\*</sup>・浜田元<sup>2</sup>・佐藤稔紀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-6407 東京都港区虎ノ門1-17-1)

<sup>2</sup>株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

<sup>3</sup>国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター  
(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)

\*E-mail: hiroaki\_takamura@nishimatsu.co.jp

山岳トンネルの段発発破において、電子雷管を用いて前後の段との起爆時間間隔を大きくすることで、他の段の影響が入らない単孔起爆の状態を作り、そのときの振動と音圧の波形を測定した。

振動波形の分析から、芯抜きの岩盤破碎のプロセスを推定した。また、2 箇所の測定点の速度振幅と卓越周波数の違いから、切羽と測定点の間に分布する岩盤の硬軟や減衰特性の違いを推定した。音圧波形の分析では、測定点における入射波と反射波を分離することにより切羽と防音扉の間の音圧伝播のプロセスを示した。また、前段との秒時差が小さな段では起爆時間のずれと音圧の低下が現れた。この原因として、前段との秒時差が小さかったため、坑内音圧が大気圧に平衡する前の起爆となり坑内に負圧が残っていたと指摘した。このように単孔起爆の音圧波形の分析から得られた知見は、制御発破の音圧低減効果の検討や騒音予測式の誤差の分析に有効に活用できると考えられる。

**Key Words :** Mountain Tunnel, single hole blasting, blasting sound, blasting vibration, measurement

## 1. はじめに

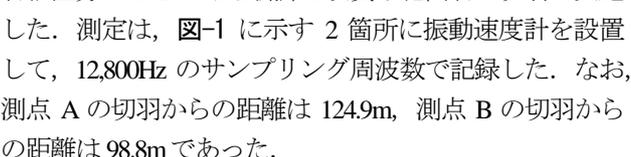
山岳トンネルの掘進発破では、振動や騒音が周囲に伝播し悪影響を及ぼす。そのため、最初に試験発破が行われその時の測定データを基に管理方法や低減対策が検討される。発破は、切羽全面に穿孔された多数の発破孔が数ミリ秒の非常に短い時間間隔(段)をつけて起爆される(段発発破)。しかし、段発発破の場合、測定された振動や音圧の波形には他の段から伝播した波が重なり、震源や伝播の特性を分析する波動としては好ましくない。そこで、起爆時間間隔を正確に設定できる電子雷管を用いて前後の段との時間間隔を大きくとり、見かけ上 1 段だけの起爆が行われた状況(単孔起爆)を作り、他の段の影響が入らない波動を 2 箇所のトンネルで測定した。

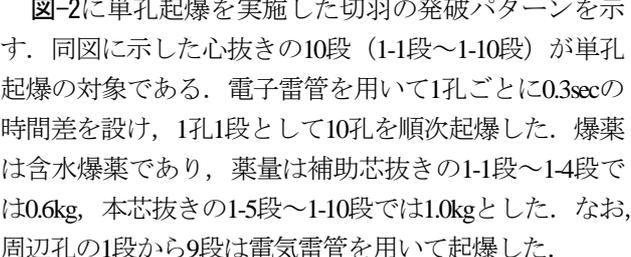
本稿では、このような単孔起爆状態における振動・音圧波形の伝播特性の分析から得られた知見を報告する。

## 2. 発破振動の測定と分析

### (1) 測定条件

単孔起爆は、一般国道トンネルの施工現場において、

岩級区分が C I である新鮮で硬質な花崗岩の切羽で実施した。測定は、に示す 2 箇所に振動速度計を設置して、12,800Hz のサンプリング周波数で記録した。なお、測定点 A の切羽からの距離は 124.9m、測定点 B の切羽からの距離は 98.8m であった。

に単孔起爆を実施した切羽の発破パターンを示す。同図に示した心抜きの 10 段 (1-1 段～1-10 段) が単孔起爆の対象である。電子雷管を用いて 1 孔ごとに 0.3sec の時間差を設け、1 孔 1 段として 10 孔を順次起爆した。爆薬は含水爆薬であり、薬量は補助芯抜きの 1-1 段～1-4 段では 0.6kg、本芯抜きの 1-5 段～1-10 段では 1.0kg とした。なお、周辺孔の 1 段から 9 段は電気雷管を用いて起爆した。

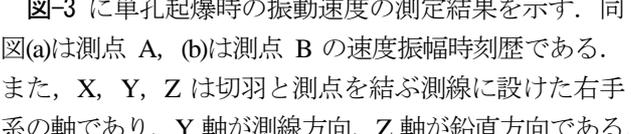
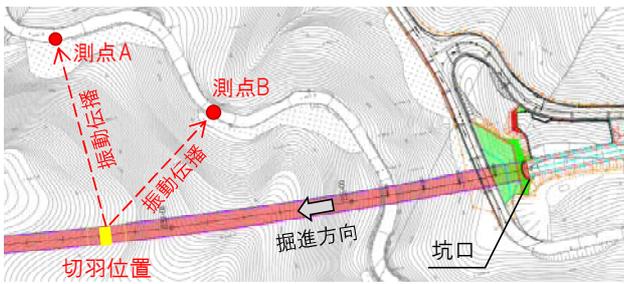
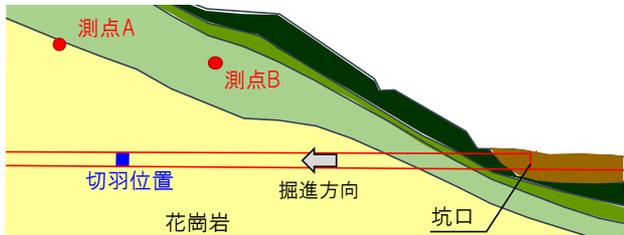
に単孔起爆時の振動速度の測定結果を示す。同図(a)は測定点 A、(b)は測定点 B の速度振幅時刻歴である。また、X、Y、Z は切羽と測定点を結ぶ測線に設けた右手系の軸であり、Y 軸が測線方向、Z 軸が鉛直方向である。

図-3 では、心抜きの 1-1 段～1-10 段の起爆が後続孔の振動と重ならず単独の振動として捉えられた。実現場の切羽の発破でも、心抜きに電子雷管を用いることにより単孔起爆の状態を実現できていることがわかる。なお、同図では、(a)、(b)ともに 4 段目 (1-4 段) の振動が記録さ



(a) 平面図



(b) 断面図

図-1 切羽と発破振動測定位置の関係

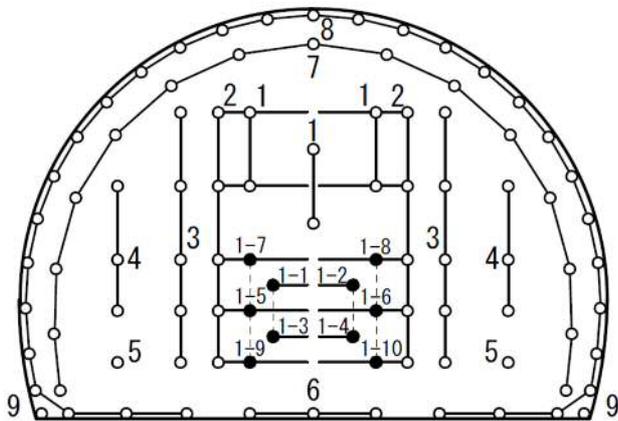
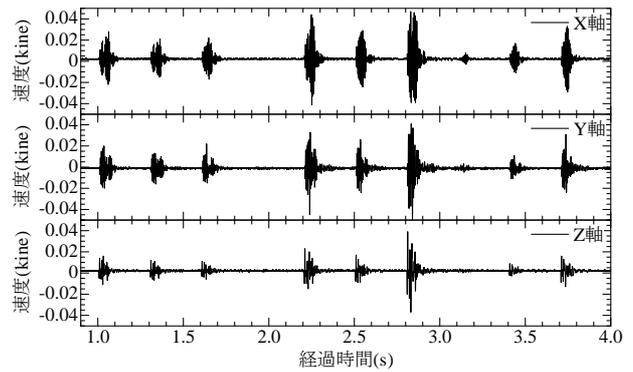


図-2 心抜き単発起爆測定時の発破パターン

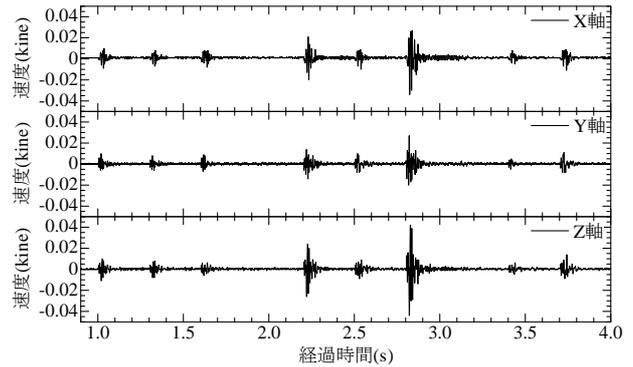
れていないが、前の段までのカットオフや4段目の鉄砲現象などが原因として考えられる。

## (2) 単孔起爆によって発生した地盤振動の特徴

装薬量が同じであった1-1段～1-3段の補助心抜きの速度振幅は測点A、測点Bのそれぞれにおいて似たような大きさであった。しかし、本心抜きの1-5段～1-10段の速度振幅は装薬量は同じであったが大きさは異なり1-7段と1-5段の起爆時に大きかった。この傾向は測点Aと測点Bで同じであった。1-4段起爆時の振動が捉えられていないことを考えると、補助心抜きによって形成された切羽中央下の開口部の形状が1-1段～1-4段を結ぶ長方形になっていなかった可能性がある。そのため、本心抜きの1-5段～1-10段と自由面すなわち補助心抜きによる切羽中央下の開口部までの距離（最小抵抗線）が装薬孔ごとに予定とは異なり、開口部外側の岩盤に作用した起振力も1-7段や1-5段で大きかったことが考えられる。



(a) 測点Aの測定結果



(b) 測点Bの測定結果

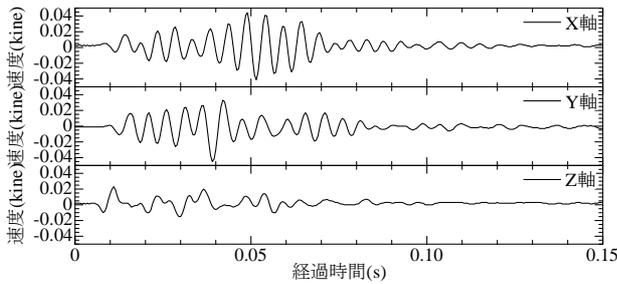
図-3 単孔起爆時の振動速度時刻歴（1-1段～1-10段）

また、2測点の速度振幅は切羽からの直線距離が短い測点B（98.8m）よりも距離が長い測点A（124.9m）の方が大きくなっていた。切羽から測点に至る振動伝播経路が直線ではなく測点Bの方が長かった可能性、あるいは両側点に至る伝播経路の途中に減衰が大きくなる軟質岩盤が測点Bに至る経路により多く分布していた可能性がある。

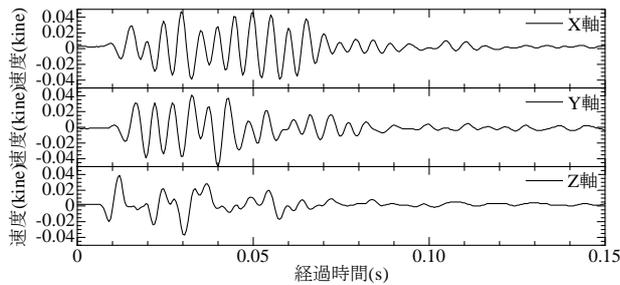
単孔起爆を行った10孔の中から速度振幅が大きかった1-5段と1-7段起爆時の詳細波形を図-4に、フーリエ振幅スペクトルを図-5に示す。

測点Aと測点Bを比較すると、1-5段と1-7段のいずれの起爆においても、X、Y、Zの3方向ともに測点Aの方が速度振幅と卓越周波数が大きかった。また、測点AではX方向、測点BではZ方向の振動が大きかった。切羽から測点Aに至る振動伝播経路に相対的に硬い岩盤が分布して減衰が小さく、速度振幅の大きな高周波振動が伝播したと考えられる。切羽の同一段の起爆であっても測点Aと測点Bに伝播した発破振動が異なっていた。切羽と測定点の間の地質構造、縦波伝播速度、減衰特性等が測点に生じる振動に影響している。切羽が順次に進行する山岳トンネル工事では、このような岩盤の振動伝播特性を知ることは難しい課題である。

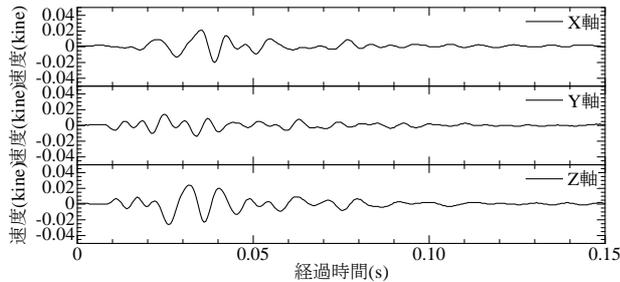
一方、測点Aと測点Bを個別に見ると、1-5段と1-7段のいずれの起爆においても、3方向ともに良く似た波



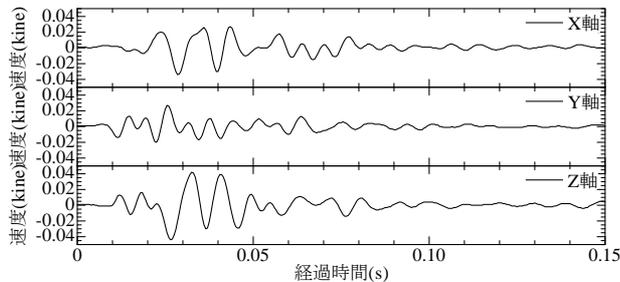
(a) 測点A 1-5段詳細波形



(b) 測点A 1-7段詳細波形



(c) 測点B 1-5段詳細波形



(d) 測点B 1-7段詳細波形

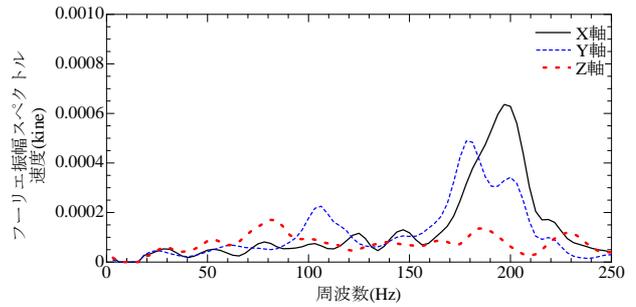
図-4 単孔起爆の詳細波形

形と卓越周波数が得られた。1-5 段と 1-7 段の起爆に際して、切羽では同じような破碎が行われたため、伝播経路が同じ測点においては、周波数特性を含めてよく似た波形性状が現れたと考えられる。

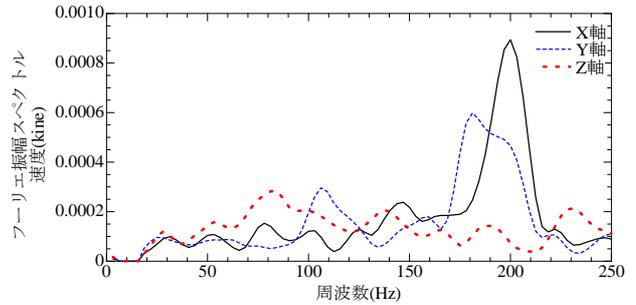
### 3. 発破の音圧の測定と分析

#### (1) 測定条件

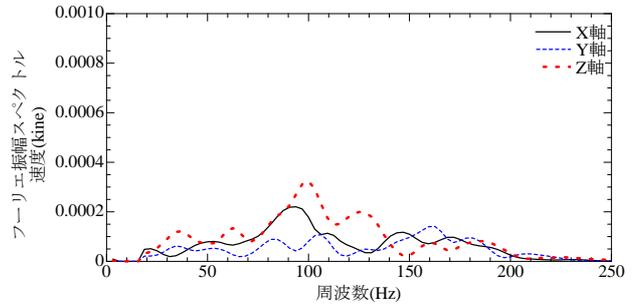
振動測定を行ったトンネルとは別の高規格道路のトン



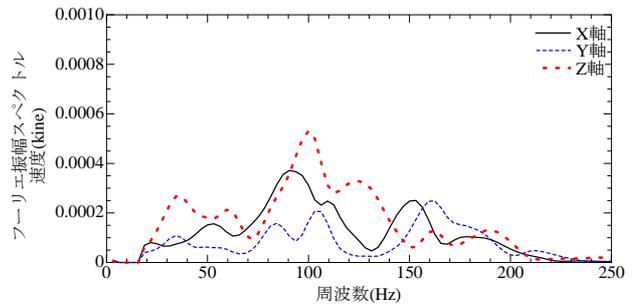
(a) 測点A 1-5段の周波数特性



(b) 測点A 1-7段の周波数特性



(c) 測点B 1-5段の周波数特性



(d) 測点B 1-7段の周波数特性

図-5 単孔起爆波形の周波数特性

ネル切羽においても、単孔起爆による音圧測定を行った。切羽は坑口から345.2mの位置にあり、岩盤は地山区分がCIIの亀裂が比較的多い花崗岩であった。また、発破音の対策として坑口に防音扉が1基設置されていた。

坑内の4箇所および坑外の3箇所の合計7箇所で音圧を測定した。測定器の配置を図-6に、測定器の仕様を表-1に示す。音圧計は、低周波音と可聴音の両方を同時測定できる広帯域の機種を用いた。ここで、坑外の2箇所の測点には騒音の低減が求められた構造物があった。

坑内の音圧には防音扉からの反射音圧の影響が加わる。この影響を分離するために坑内の4箇所で音圧を測定した<sup>3)</sup>。切羽から坑口に伝播する音圧と坑口の防音扉から反射する音圧の分離は、音圧計同士の離隔距離と位相の関係から分析する。そのため、表-2 に示す音圧計同士の離隔ごとに 0.9Hz~310Hz までの分析可能周波数範囲が決まり、この範囲内の周波数成分を対象として反射音圧を分離した。

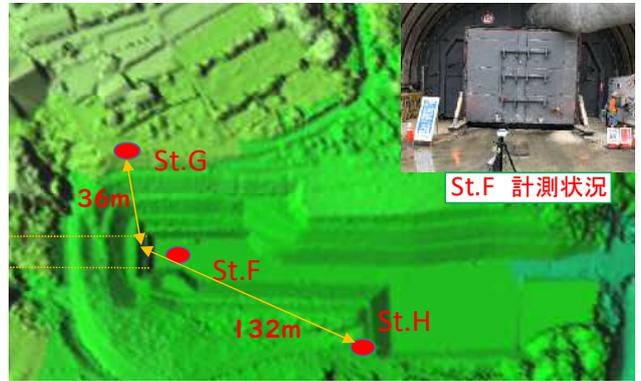
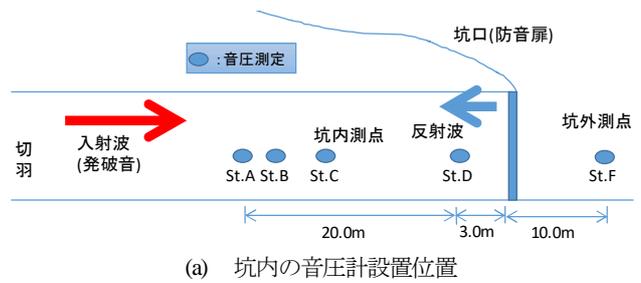
音圧測定を行った切羽では、電子雷管を用いて、1孔1段の全孔全段の起爆を行った。それらの内の5起爆分を対象に、前後の起爆秒時を1秒間空けた単孔起爆状態を作り音圧を測定した。図-7に切羽の発破パターンを示す。同図の星印を付けた装薬孔が単孔起爆の対象であり、補助心抜き1-1段(斉発量200g)、本心抜き1-5および1-6段(斉発量800g)ならびに払い孔2-7および2-8段(斉発量600g)の5孔である。残りの104段(装薬孔)については、15msの秒時差で1孔1段の起爆を行った。

(2) 単孔起爆によって発生した音圧の特徴

図-8 に音圧波形の測定結果を示す。同図では、上から順に St.A の測定波、St.D の測定波、St.A の入射波、St.A の反射波、St.F の測定波、St.G の測定波、St.H の測定波を経過時間で示した。経過時間については、坑内の St.A~D の4測点は時刻を同期させて測定した。しかし、坑外の St.F~G の3測点は起爆開始時刻だけを合わせて収録波形を並べた。また、St.A に関しては、坑内4測点の音圧波形を用いて最初に切羽から入射した波(入射波と呼ぶ)と防音扉から反射した波が切羽に戻って反射して再度に測点に入射した波(反射波と呼ぶ)を分離して上から3番目と4番目に示した。また、上から4番目までの坑内の測定結果には、計算上の起爆時刻を波形の下側に赤色の縦線で示した。すなわち、初段の起爆時刻を基準にして以降の全ての段の起爆秒時差をそれぞれ加算した時刻である。さらに、防音扉で反射した波が切羽に戻り再反射して St.A と St.D に到達する時刻を、伝播距離を音速で除して計算し波形の上側に青線で示した。

図-8 に示した 1-1 段~1-5 段の波形を St.A とこの測点から 20m 後方にあり防音扉に近い St.D とで比較してみる。St.D の波形の頭部には St.A にはない乱れが現れている。このことから、St.D の波形には防音扉から坑内方向に反射した波が重なっていることがわかる。また、St.A の 2.7 秒の入射波は 4.7 秒の防音扉で反射して再度切羽で反射した再反射波(再反射波と呼ぶ)に、6.1 秒の入射波は 8.2 秒の再反射波にそれぞれ対応するが、再反射波の音圧は入射波の 1/3 程度に小さくなっていった。

坑外の騒音を測定した St.G と St.H の音圧波形は坑内の測定波形に性状が良く似ていたが、防音扉後方 10m



(b) 坑外の音圧計設置位置

図-6 音圧計設置位置

表-1 計測器の仕様

機器名	仕様
大音圧低周波・騒音計	測定範囲 : 60~164 dB
	周波数特性 : 1~8000 Hz
精密騒音計 低周波音計	測定範囲 : 30~134 dB
	周波数特性 : 1~20000 Hz
記録計	周波数範囲 : DC~20000 Hz
	サングレ周波数 : 25, 600 Hz

表-2 坑内音圧計の離隔と分析周波数範囲一覧

測点-測点	離隔距離 $\Delta L$ (m)	分析最小周波数 $f_{min}$ (Hz)	分析最大周波数 $f_{max}$ (Hz)
St. A-St. B	$\Delta L_1$ 0.50	34.5	310.5
St. A-St. C	$\Delta L_2$ 3.50	4.9	44.4
St. A-St. D	$\Delta L_3$ 20.00	0.9	7.8
St. B-St. C	$\Delta L_4$ 3.00	5.8	51.8
St. B-St. D	$\Delta L_5$ 19.50	0.9	8.0
St. C-St. D	$\Delta L_6$ 16.50	1.0	9.4

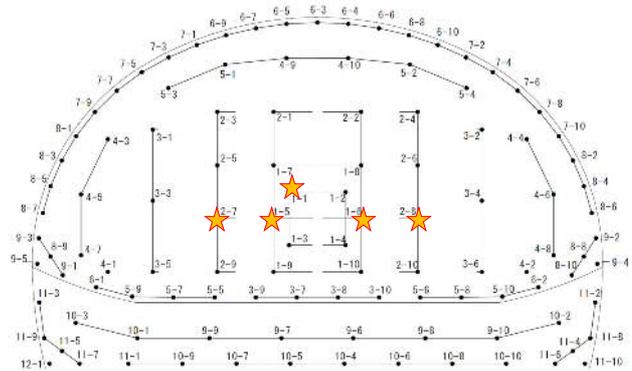


図-7 発破パターンおよび単孔起爆した装薬孔

位置の St.F の波形は坑内の波形と明らかに異なっていた。St.G および St.H の波形は防音扉と地山との隙間や風管の隙間からトンネル軸方向に漏れた空気の音圧変化を表している。これに対して、St.F の波形には防音扉の振動から誘起された音圧変化が主体に現れたと考えられる。すなわち、防音扉近傍の St.F では、発破騒音の震源となる防音扉の隙間からトンネル軸方向に漏れる空気の音圧変化を正しく測定できないことを示している。

単孔起爆を行った5回の段について、坑内4測点の測定波形から分離したSt.Aの入射波の詳細を図-9に示す。ここで、電子雷管の秒時差を加算した起爆時間を波形の下側に赤色の直線で示した。

同図から、1-5段と2-7段の音圧の立ち上がり時間が電子雷管の秒時差を加算した起爆時間とずれていることがわかる。単孔起爆では、前の段の起爆後に1秒間空けて起爆した。前述したように、防音扉で反射し切羽に戻った波が再度切羽で反射して入射波の1/3程度の音圧で再度測点に到達したと考えられる。1-5段には1-1段、2-7段には1-6段の反射波が影響した可能性がある。1-5段と1-6段、2-7段と2-8段ではそれぞれ装薬量が同じであるが最大音圧が異なった。起爆時に坑内では正圧が卓越

し、その後大気圧に戻るために一時的に負圧の状態が生じる。これらの段では、単孔起爆ではない15ミリ秒間隔の起爆によって坑内の正圧が卓越した後に単孔起爆が2回続いた。単孔起爆の1秒の休止時間の間に坑内の負圧状態が生じ、その時に起爆があると音圧が0 Paを交差する時間帯がずれ易くなり、正圧の立ち上がり勾配が緩く、最大音圧が小さくなったものと推察できる。

電子雷管の秒時差を加算した起爆時間と音圧の立ち上がりとの誤差の少ない1-1段、1-6段および2-8段を比較すると、装薬量と最大音圧との間に相関が認められること、波形性状もある程度似ていることがわかる。ただし、音圧が正圧から負圧に変化する手前付近の減衰のカーブに違いがあった。図-6内の右上写真に示したように、反射面となる防音扉は単純な平面ではなく、トンネル軸方向に一部が突出した複雑な3次元構造をしている。一方、坑内音圧を切羽から坑口への伝播（入射）と防音扉から切羽側への伝播（反射）に分離する手法が1次元理論に基づいていたため、分析誤差が発生したと考えられる。しかし、図-8に示したように、入射分離によって坑内音圧波形の特性が理解し易くなっており、誤差を有しているものの、音圧波形の分析に有効と考えられる。

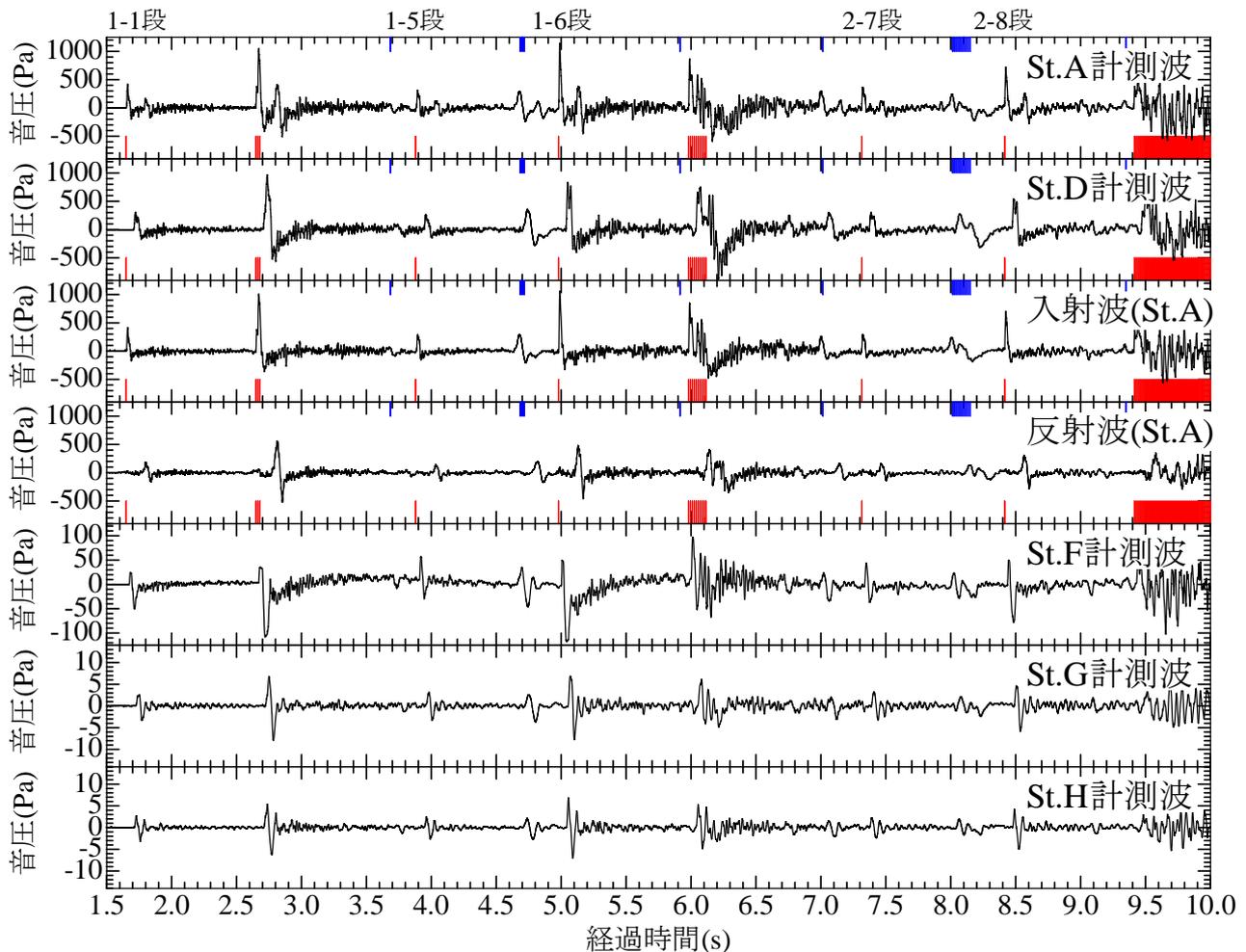


図-8 単孔起爆時の音圧波形測定結果

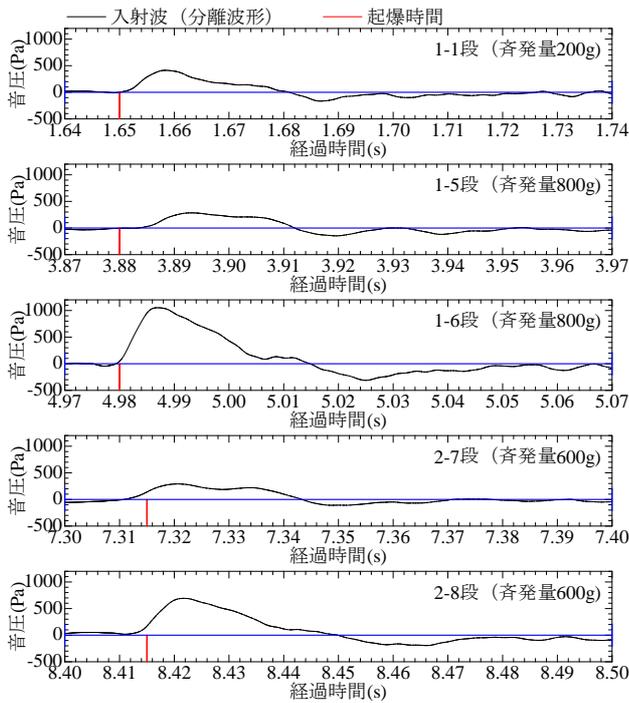


図-9 単孔起爆時のStAにおける入射波の詳細波形  
(入反射分離後の切羽からの入射音圧)

#### 4. おわりに

山岳トンネルの切羽の発破に際し、秒時間隔を正確に設定できる電子雷管を用いて前後の段の影響が及ばない単孔起爆の状態を設け、周囲岩盤の発破振動と坑内外の音圧をそれぞれ別のトンネルで測定した。

測定した振動波形の分析から、振動速度の大きかった段の周波数解析の結果も合わせると、2か所の測点の内切羽からの距離が大きな方の測点に速度振幅と卓越周波数の大きな振動が伝播した。切羽とこの測点の間の岩盤が相対的に堅硬で減衰が小さいことがわかった。これは、切羽における岩盤の破碎プロセスや振動伝播経路の岩盤

特性に関して有用な情報となる。

測定した音圧波形の分析から、坑内において、防音扉、次に切羽で反射し再度に測点に入射した音波を特定し、測点に再入射した波の音圧が最初に入射した波の1/3程度であることを見出した。また、単孔起爆を行った5つの段の入射波形を電子雷管の秒時から計算した起爆時間ごとに横並びに比較した。その結果、起爆時間と音圧の立上りにずれが無い起爆では、装薬量と最大音圧の間に相関が認められた。一方、起爆時間のずれが発生した起爆では、音圧の低下が現れた。この原因として、前段の起爆に依存して、坑内音圧が大気圧に平衡する前の起爆となり坑内に負圧が残っていたと指摘した。これらの知見は、制御発破の音圧低減効果の検討や騒音予測式の誤差の分析に有効に活用できると考えられる。

**謝辞：**本報告は、土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学に関する研究小委員会の発破ワーキングにおいて、測定結果をもとに議論した結果をまとめたものである。

#### 参考文献

- 1) 日本火薬工業会：あんな発破 こんな発破 発破事例集, p.80, 2002.3.
- 2) 高村浩彰, 中村聡磯：制御発破によるトンネル発破音対策, 騒音制御 Vol.41 No.6, pp.282-287, 2017.12
- 3) 高村浩彰, 田中義晴, 有満守昭, 中村聡磯：電子雷管を用いた制御発破の秒時間隔設定に関する考察, トンネルと地下, 第49巻7号, pp.549-558, 2018.7
- 4) 高村浩彰, 稲留康一, 平野享, 塚本耕治：トンネル坑内における発破音圧特性の測定・評価手法に関する検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.72, No.3, p.I\_28-I\_35, pp.85-93, 2016.11

## PROPAGATION WAVEFORM CHARACTERISTICS OF VIBRATION AND SOUND PRESSURE DUE TO SINGLE HOLE BLASTINGS IN NATM TUNNEL

Hiroaki TAKAMURA, Hajime HAMADA, Toshinori SATO

In the stage blasting of a mountain tunnel, the condition of single hole initiation in which the effect of other stage does not enter was made by increasing the interval of initiation time between front and rear stages using an electron detonator, and the waveform of vibration and sound pressure at that time was measured.

The knowledge obtained from the analysis of sound pressure waveform of single hole blasting is considered to be effective to be utilized for the examination of sound pressure reduction effect of controlled blasting and the analysis of error of noise prediction formula.