

高精度電子雷管を用いた発破の振動特性と 振動波形予測手法の適用

犬塚 隆明^{1*}・岩野 圭太¹・栗木欣也²・落河崇征²・福井勝則³

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²豊田市役所 建設部河川課 (〒471-8501 愛知県豊田市西町3-60)

³東京大学 工学系研究科システム創成学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

*E-mail: inuzukat@kajima.com

トンネルの発破振動による環境負荷の低減は、発破掘削を進めていく上で極めて重要である。安永川トンネルでは、岩盤が堅硬な花崗岩のため住宅密集地の直下にも拘らず発破掘削が必須となり、体感の小さい発破が求められた。そのため秒時差を高精度にコントロールできる電子雷管 (eDev II) を国内で初めて適用し、発破試験にて蓄積したノウハウ・知見を活かしつつ振動体感を低減し、トンネル発破掘削を完了した。また、高精度電子雷管の適用を前提とした新しい発破振動の予測手法 (MSW) を導入し、同現場に試験的に適用し、任意の地点における振動波形・周波数特性の予測および実測との比較を実施した。

Key Words : *electronic detonator, delay time, tunnel blasting, vibration prediction*

1. はじめに

発破掘削は、他掘削工法と比較し、安く早く掘削できる大きな特長があるが、振動・騒音が住民や構造物に与える環境負荷が大きいため、住宅や構造物が近接している場合の発破掘削の実例が少ないのが現状である。しかしながら、海外では新しい発破技術の開発が進み、構造物の近接発破の事例が増えており、我が国でも近年、導入が進み、これまで実績のない近接発破を安全に、かつ小さい環境負荷で実施できる可能性が見出されている。

ここでは、新しい電子雷管を採用し、発破試験を通じて振動特性の分析・評価を行ったのち、住宅密集地を含むほぼ全線において発破掘削を採用し無事掘削を完了した事例を述べる。また、この高精度の電子雷管を前提とした発破振動の予測評価手法 (MSW) を導入し、現場へ適用した結果について報告する。

2. 高精度電子雷管を用いた発破掘削

(1) 高精度電子雷管 (eDev II) を適用した現場概要

安永川トンネルは自動車の街で有名な豊田市の中心域 (低地部) の内水氾濫防止のための水路トンネルである (写真-1)。本工事では、①トンネル全線にわたり小土被り、②トンネル沿いに民家、病院、小学校が近接、

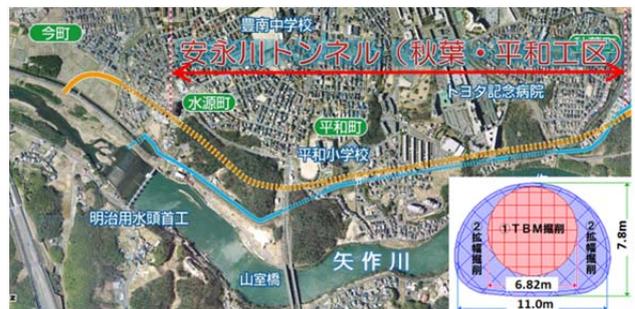


写真-1 安永川トンネル

③地質は一部を除きほぼ全線で非常に硬質な花崗岩 という特徴を有しており、TBM先進導坑掘削¹⁾を採用するなど、掘削工事による振動や騒音などの住環境への負荷を最小限に低減するよう努めている。

TBM先進導坑掘削以降の拡幅掘削の当初案は、火薬消費許可を受けておらず割岩機械掘削であった。しかしながら施工開始後、火薬消費許可を受領できたこと、および掘削速度や施工方法の違いによる振動・騒音の大きさやその暴露時間を慎重に検討した結果、振動時間が極めて短く、切羽進行速度が速い発破掘削が他工法に比べ、住環境への負荷は小さくなると判断した。時間制限を設けた発破など、住民負担を軽減する方法を採用したが、さらに住民の理解を得られるよう、より低振動で体感の小さい発破工法が求められた。

(2) 高精度秒時電子雷管 (eDev II)

発破振動低減には斉発薬量（同時に発破する爆薬量）の低減が非常に効果的であるが、そのためには、正確に発破秒時をコントロールする技術が必須となる。したがって、本工事では、国内メーカー製雷管の使用の変遷を経た後、海外で多数の実績²⁾のあるオリカ社の高精度秒時電子雷管（製品名：eDev II）³⁾（図-1）を採用した。

- ①起爆秒時設定は1ms 刻みで可能であり、最大500発、最長20sまでの範囲で自由に設定することができるため、通常のトンネルでは、1孔1斉発が可能。
- ②起爆秒時精度が高く、設定秒時差の±0.01%の精度。
- ③専用スキャナを通じて切羽にて任意の秒時差、発破順序を決定する。そのため雷管本体は単一製品となる。
- ④脚線端末にプラスチック製コネクタ（写真-2）がついており、結線が簡単で、結線漏れリスクを軽減。
- ⑤専用発破器からの特殊電気信号のみで起爆となるため、迷走電流、静電気等による誤爆がなく安全。

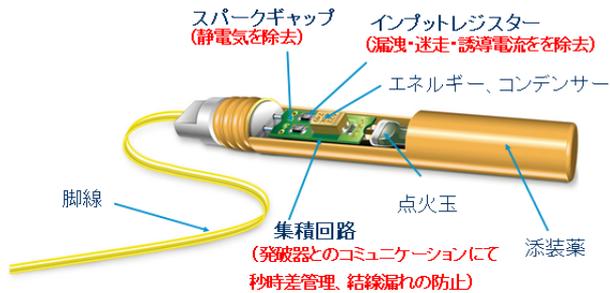


図-1 高精度電子雷管 (eDev II)



写真-2 親ダイ（高精度電子雷管 (eDev II)）

3. 発破試験

(1) 試験概要

高精度秒時電子雷管(eDev II)により高精度に秒時差設定をした場合の距離と振動速度、周波数の関係など発破振動特性を把握すること、また今後予定されている住宅密集地における発破計画に向けた基礎資料とすることを目的として、一連の発破試験を行った。試験内容を表-1に示す。図-2には代表的な発破パターンを示す。安永川トンネルでは、TBM導坑先進工法が採用されており、切羽に直径6.82mの導坑があるため、芯抜きが無い分、

発破振動は有利である。発破試験区間の平面図を図-3に示すが、TD300-400に続く一帯は、かつて採石場として使われており、一軸圧縮強度が120~130MPaと極めて堅硬な花崗岩帯である。地上の振動計測点として、かつて採石場であったトンネル直上の計測点（TD365、以降“直上”）およびトンネル進行方向左側の自転車道沿いの計測点（TD395、以降“沿道”）の2点を設置した。また実際の発破では、図-4に示すように、各発破において、最初の3孔程度は、秒時差を大きく空けた単発発破とし、それ以降の設定秒時差に従って発破する段発発破と区別した。

表-1 発破試験の実施内容

試験区分	実施位置	実施内容
本発破	TD322.0~TD387.5	【シングルデッキ】 ■進行長2.0m、装薬量0.8kg/孔に固定 ■秒時差を5ms/10ms/30msにそれぞれ設定し、発破（各秒時差7回ずつ 合計21回） 【ダブルデッキ】 ■進行長4.0m、1孔装薬量0.8kg+0.8kg 4回 ■進行長2.0m、1孔装薬量0.4kg+0.4kg 2回 ■秒時差5msに固定
追加発破	TD387.5~TD405.0	【シングルデッキ】 ■本試験と同じ条件で、秒時差のみ再設定 ■秒時差を3ms/7ms/15msにそれぞれ設定し、発破（各秒時差3回ずつ 合計9回）

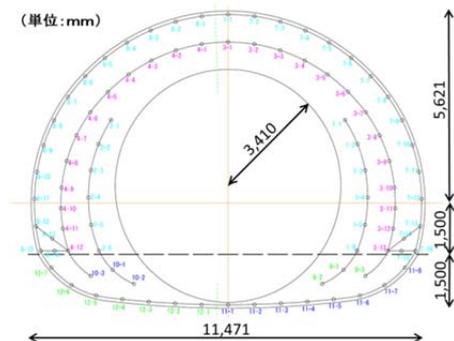


図-2 代表的な発破パターン

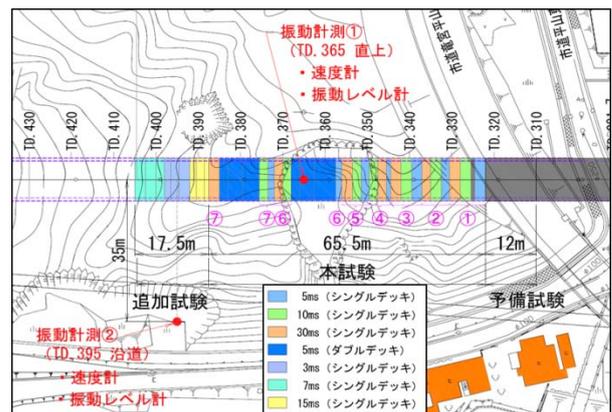


図-3 発破試験区間と振動計測位置（平面図）

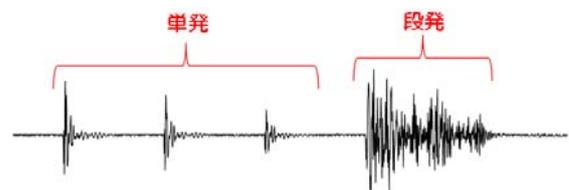


図-4 単発波と段発波

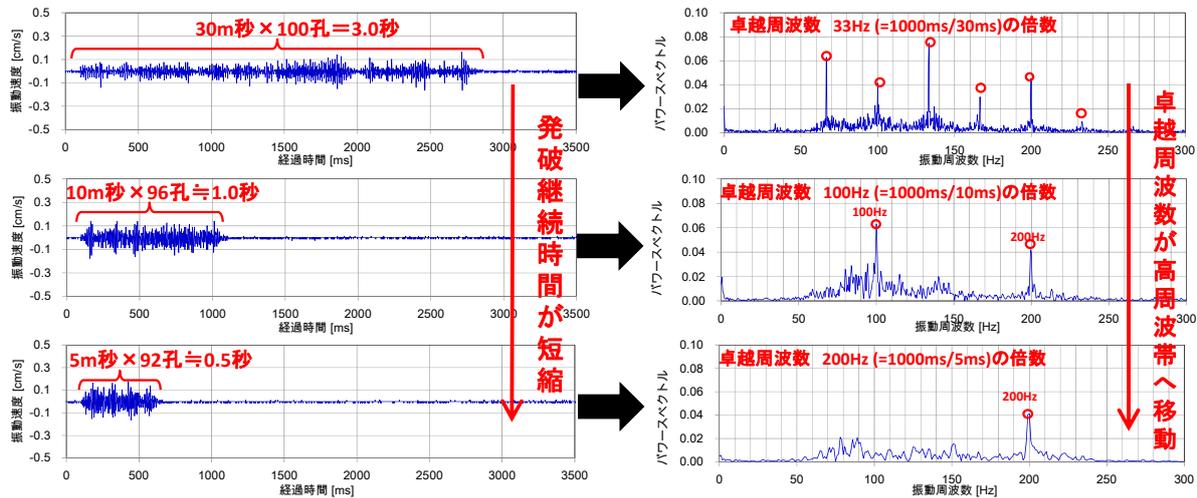


図-5 設定秒時差毎の振動速度の時間波形（左）と周波数特性（右）

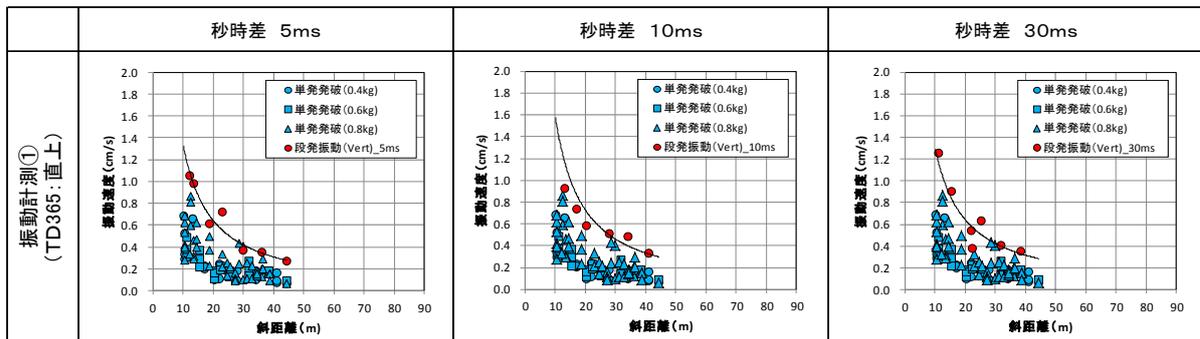


図-6 設定秒時差毎の単発波と段発波の距離—振動速度プロット

(2) 試験の結果および評価

a) 秒時差の違いによる振動波形，周波数スペクトル

最初の単発を除いた段発について，それぞれ秒時差 5ms/10ms/30msの代表的な時間波形と周波数スペクトルを図-5に示した．それぞれの秒時差設定で，孔数約100孔，平均薬量約0.8kg/孔でほぼ同じ条件で発破が行われている．全孔にて1孔1斉発で高精度に各秒時差が設定されているため，発破継続時間がおよそ（設定秒時差）×（孔数）となっている．またその周波数スペクトルは，設定秒時差の逆数（秒時差30msの場合： $1s \div 30ms = 33.3Hz$ ）にピークが表れており，eDev IIによって高精度に発破がコントロールされていることが分かる．

b) 単発波と段発波

図-6に単発波，段発波それぞれの振動速度ピークのプロットを示した．これにより以下の点が言える．

- ①単発波に比べ，段発波の振動速度は，単発波のプロットの上端の包絡ラインにほぼ一致しており，これは秒時差（5ms，10ms，30ms）の違いでも傾向に差は見られない．
- ②段発波で5msが，設定した秒時差の中で最も小さいため，波形の重なりという観点で振動速度の増加がみられると予想されたが，秒時差（5ms，10ms，30ms）の違いでも段発波の振動速度の大きさに傾向は見られない．

①および②の結果，5msの場合でも，波形の重なりが30msの場合と同程度に抑えられている．一方で，秒時差が5msの場合，孔数が同じ条件の発破では，単純に秒時差30msに比べ，発破継続時間が1/6に短縮されることになり，人の振動体感の差は非常に顕著である．このため，安永川トンネルでは，発破試験以降において，秒時差5msを基本とした結果，同トンネルでは住民の方々の振動体感を著しく軽減でき，住宅密集地を含めた発破工法を継続して進め，無事掘削を完了できている．

4. 発破振動の予測評価手法（MSW）

(1) これまでの発破振動予測の研究

発破振動の研究はこれまでも進められており，例えば平田ほか⁴⁾は発破源を球振動源モデルとし，スペクトル乗積法による振動波形の予測理論を提案している．また山本ほか⁵⁾は，同じくスペクトルによる推定法をベンチ発破や盤下げ発破に試験的に適用している．また野田ほか⁶⁾は，IC雷管を用い，段発発破の波形から単発の波形をデコンボリューションにて推定する手法を提案している．ただし，これらの研究はいずれも予測手法の提案，試験的な検証の域に留まっており，実際のトンネル現場

等での振動予測に運用されるまでには至っていない。実際の現場における発破振動の予測は、以下で示される距離と振動速度の関係（振動予測式）⁷⁾が長い間用いられているのが現状である。

$$V = K \frac{W^m}{R^n} \quad (1)$$

ここで V；振動速度 (cm/s)，K；K値，W；斉発薬量 (kg)，R；斜距離 (m) である。また，mは通常0.5～1.0の範囲，nは2.0前後の値をとることが火薬メーカーから提唱されている⁸⁾。

実際に計測される振動速度は、種々の要因でばらつくため、これが予測手法に起因するものか、発破条件に起因するものか判断することは非常に困難である。また、このことが長年の間、発破振動予測が進展していない一因であると考えられる。一方で、安永川トンネルで適用した eDev II の場合、発破秒時に起因するばらつきを排除することができ、また、1孔1斉発が可能のため単発波形の重なりによる段発波形のモデル化が容易であり、高度な実測の波形予測の可能性がある。

(1) 発破振動予測評価手法 (MSW) とは

高精度電子雷管を前提とした新たな振動予測評価手法 (MSW: Multi Seed Waveforms)⁹⁾は、より実際に近い振動波形の予測を行うため現場で収録した実際の単発波形を最大限生かし、さらに図-7 のようにその単発波形の重ね合わせとして段発波形の発破振動を予測評価する手法である。他に単発波形の重ね合わせによる発破振動の予測としてモンテカルロ法¹⁰⁾が挙げられるが、表-2 に示すように、MSW法は、現地で実測に取得した単発波形に基づいて、任意の地点における発破振動波形を予測できる点が最大の特徴である。

実測の単発波形から任意の地点の単発波形のモデル化する際、図-8のように波形の振幅と波形の形状をそれぞれ推定することが重要となる。振幅については、図-9のように複数の単発波形データに対し、いわゆる距離と振動速度の関係 (Regression Curve) を求め、任意の地点での振幅を推定する。この時、MSWでは、横軸を距離ではなく、距離を斉発薬量の0.5乗で正規化したSD(Scale Distance)を用いており、発破振動式としては以下の式を採用している。

$$V = \alpha \left[\frac{R}{\sqrt{W}} \right]^{-\beta} = \alpha \cdot (SD)^{-\beta} \quad (2)$$

ここで、 α 、 β は定数である。式(1)と比較し、発破振動式としての意味合いは同じであるが、距離と斉発薬量の関係をSDとして固定することで、式を決定するパラメータが1つ減ることになる。また、波形については、Kjartansson のQ理論¹¹⁾による減衰評価方法がこれまでも数多く適用されているが、MSWの場合、近距離遠距離も

含めた任意の地点での波形の変化(減衰)を求める必要があり、Q値を固定することは適さないと判断した。従って、図-10 のように、既知の計測点の複数の波形に基づく内挿にて推定している。

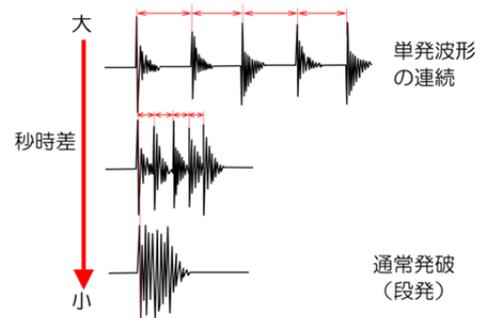


図-7 単発波形の重ね合わせ

表-2 モンテカルロ法とMSW法

モンテカルロ法	MSW法
<ul style="list-style-type: none"> ・1回分の単発波形を取得した後、“乱数”にて疑似単発波形を複数作成。 ・疑似単発波形の重ね合わせにより段発波形を予測。 ・単発波形の計測点以外の任意の点での波形予測は困難。 	<ul style="list-style-type: none"> ・現地の複数地点にて単発波形を取得。 ・任意の地点について、複数の単発波形から、その振幅と波形形状(減衰)を推定し、発破波形を予測。 ・任意の予測した単発波形を重ね合わせ。

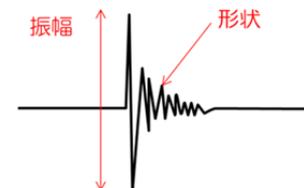


図-8 単発波形を決める要素

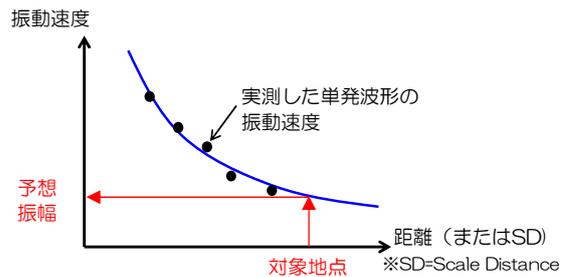


図-9 距離と振動速度の関係 (単発波形) から任意の地点の振幅を予測する方法

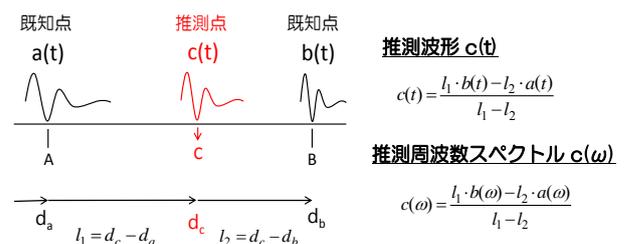


図-10 計測した単発波形から任意の地点の波形を予測する方法

(2) 現場への試験適用

a) 発破振動の計測概要

この新たな振動予測評価手法 (MSW法) をトンネル現場に適用し、発破振動の予測と実測の比較を行った。

MSWを適用した現場は安永川トンネルであり、発破区間 (TD775-789) は近くに総合病院も存在する住宅密集地である (図-11, 写真-3)。地上に振動計測点として固定点 (A, B, C, D, G, H点) および切羽の進行に合わせる移動点 (Z点) の合計7点設置した (図-12)。この区間で発破を6回実施し、1回の発破で秒時差を200msと十分に離れた単発波用の孔を2孔用意した (写真-4)。それ以降の段発発破の孔間秒時差は一律5msとしている。

b) 試験結果例

図-13に地上計測点で計測した発破波形の一例を示す。この最初の2回の単発波形を段発波形の推測をするため

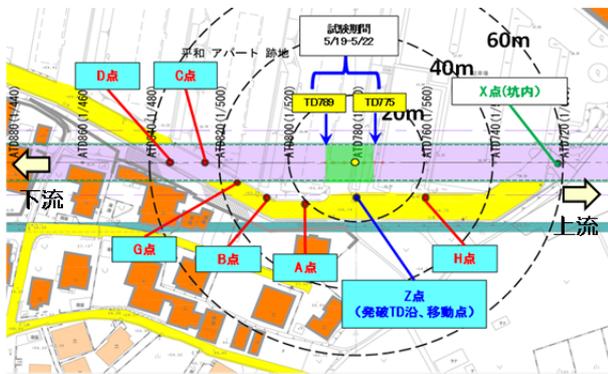


図-11 トンネル線形と地上の振動計測点



写真-3 地上の振動計測点

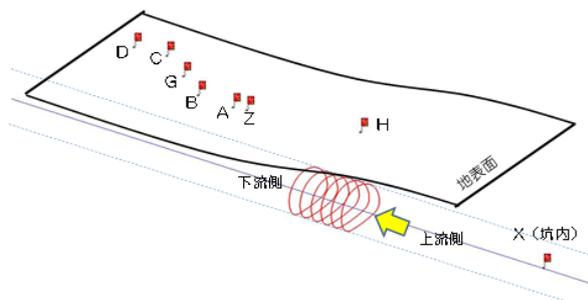


図-12 地上の振動計測点とトンネル発破区間の位置関係



写真-4 切羽における単発孔の位置

の元波形 (Seed Wave) とする。また図-14には、6回分の発破で地上の各計測位置で収録した単発波形 (Seed Wave) について斉発薬量の0.5乗で正規化した距離 (Scale Distance) と振動速度との関係 (Regression Curve) を示す。これらデータに基づいて、MSWの試解析を行った。解析では、実際のトンネル掘削における波形予測の運用を考慮し、1~5回までの発破で収録した単発波形 (Seed Wave) に基き、6回目の発破 (段発波形) の推定を行った。図-15および図-16にその実測と予測の比較として計測点C (発破切羽からの距離約41m) と計測点D (発破切羽からの距離約49m) の鉛直成分波形と周波数特性を示す。波形、周波数特性ともに実測と予測は概ねよい一致をしていると思われる。現時点ではまだ試解析として、解析の一例を示したに過ぎないが、今後、Seed Waveである単発発破の選択 (絞込み) によるMSWの予測波形の違いや、安永川トンネル特有のTBM導坑の大きな芯抜きによる実測の振動振幅の減少効果など詳細に検討し、MSWによる波形予測の向上に何が寄与するかを検証を進めていく予定である。

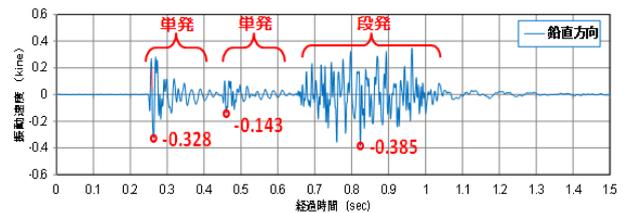


図-13 地上で計測した単発波 (Seed Wave) と段発波

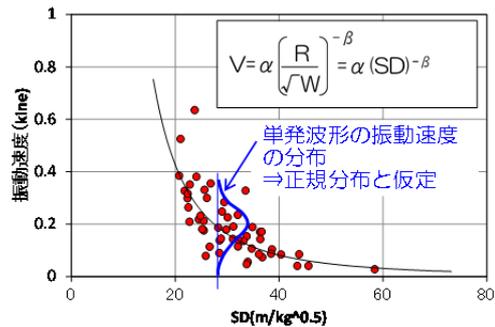


図-14 地上で計測した単発波 (Seed Wave) のRegression Curve

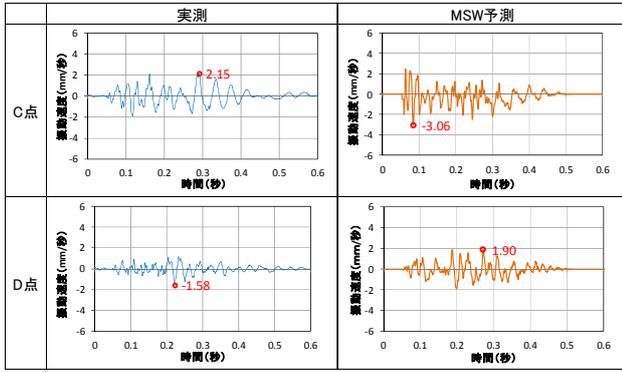


図-15 計測点C, D点における段発波の振動波形 (鉛直成分) の実測 (左) とMSWの予測 (右)

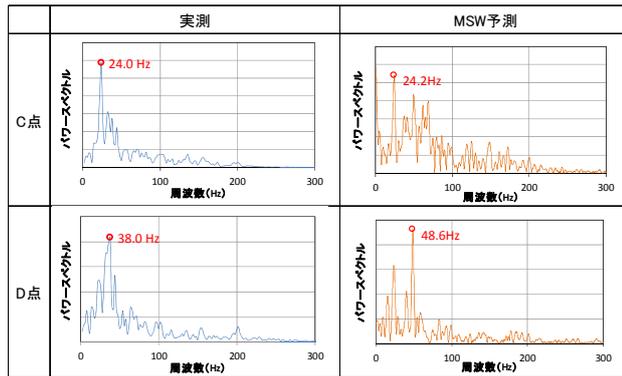


図-16 計測点C, D点における段発波の周波数特性の実測 (左) とMSWの予測波形 (右)

5. おわりに

新しい電子雷管 (eDev II) を国内で初めて本格的にトンネルで適用し、発破試験を通じて様々な知見を得ることができた。さらに発破をコントロールし、これまでになく住環境に近い条件においても発破掘削を継続し、無事掘削完了することができている。

VIBRATION PROPERTY TEST WITH HIGHLY ACCURATE ELECTRONIC DETONATOR AND TRIAL OF NEW VIBRATION PREDICTION METHOD

Takaaki INUZUKA, Keita IWANO, Kinya KURIKI,
Takamasa OCHIKAWA, Katsunori FUKUI

Reducing the environmental impact caused by tunnel blasting is quite important. Aneigawa tunnel, which runs under the residential area with its geological condition of quite hard granite, was required to make a low vibration impact. New blasting detonator; eDevII, resolved the problems with highly accurate delay time control. Authors made a series of blasting test with this detonator and had a lot of know-how to control blasting vibration. And they also introduced new vibration prediction method (MSW; Multi Seed Waveform) to this tunnel and tried to compare real waveforms with predictions.

またこの電子雷管の適用を前提とした新たな発破振動予測手法 (MSW) を導入し、任意の地点での振動波形や周波数特性の予測の可能性を見出すことができた。今後も引き続き、トンネル現場に適用し、ノウハウの蓄積、精度向上を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 越川俊幸, 末吉功一, 堀部貴宏, 山本拓治, 岩野圭太, 小泉悠, 佐藤一成, 落河崇征, 山下浩一, 福井勝則: 小土被り花崗岩を貫く安永川トンネルの TBM のカット摩耗実績, 土木学会第 69 回年次学術講演会, VI-014, pp27-28, 2014.
- 2) John Wall; Perimeter control utilising electronic detonators, International Society of Explosives Engineers (ISEE), 2012
- 3) eDevTM II Technical Data Sheet ; オリカ社
- 4) 平田篤夫, 山本雅昭, 稲葉力, 金子勝比古: トンネル掘削発破によって励起される振動の振動レベル予測法, 火薬学会誌, 58 巻, 4 号, pp.176-183, 1997.
- 5) 山本雅昭, 野田英宏, 金子勝比古: 波動干渉を利用した発破振動の制御方法に関する一考察 (第 2 報), 火薬学会誌, 58 巻, 5 号, pp.231-240, 1998.
- 6) 野田英宏, 山本雅昭, 須田博幸, 栗田猛志: 段発発破振動からの予測単発波形を用いた振動軽減手法の開発, 資源・素材 (秋季大会), pp117-120, 1998
- 7) 例えば, 発破振動の周辺への影響と対策, 鹿島出版会, pp14-28.
- 8) 例えば, あんな発破こんな発破, 火薬工業会, p3.
- 9) Yang R., & Scovira D.S.: A model for near and far-field blast vibration based on multiple seed waveforms and transfer functions, *Blasting and Fragmentation*, 4(2), pp91-116, 2010.
- 10) Blair, D.P.: Blast vibration control in the presence of delay scatter and random fluctuations between blastholes, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 17, pp95-118, 1993
- 11) Blair, D.P.: Blast vibration control in the presence of delay scatter and random fluctuations between blastholes, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 17, pp95-118, 1993.