

環境に優しい制御発破方法の確立と新しい振動予測手法の提案

Environmentally Low Impact Blasting and New Vibration Prediction Method

犬塚 隆明 岩野 圭太 手塚 康成¹⁾

要 約

発破工法は早く経済的な掘削工法であるが、発破により生じる振動・騒音が周辺環境に及ぼす影響が大きく、住宅街や構造物が近接している場合のトンネル発破の事例は非常に少ない。新たに導入した電子雷管 eDev II は、起爆秒時精度が高く、発破順序を任意に設定できる特長がある。著者らは本雷管を用いたトンネル試験発破を実施し、起爆秒時差の設定による振動、低周波音の低減効果を確認し、そのメカニズムについて知見やノウハウを得ており、以降数多くのトンネル現場に活用し、周辺環境に影響の小さい発破を展開している。また、この高精度電子雷管を用いた新しい振動予測手法(MSW)を開発し、現場適用を通じて、市街地等の厳しい条件下の発破に対し、有効な振動予測となり得ることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 高精度電子雷管 eDev II の特徴
- III. 現場適用事例
- IV. 新しい振動予測手法(MSW)
- V. おわりに

I. はじめに

山岳トンネルにおいて、中硬岩地山における一般的な掘削工法として爆薬などを使用する発破掘削工法が挙げられる。発破掘削は他工法と比べ、非常に安価で早く掘削できる。しかし、構造物が近接する場合、発破によって生じる振動や騒音により構造物や住民へ及ぼす影響が大きい。そのため、発破掘削を進める上で、発破による負荷を低減することが極めて需要である。

電気雷管では、雷管の起爆秒時差の誤差が非常に大きいため、結果にバラつきが生じやすく、再現性が低かった。そのため、現状では、発破振動や騒音を抑える有効な手段が確立されていない。

一方で、新しい電子雷管 eDev II の適用により、起爆秒時差を高精度にコントロールできるようになった。そこで、eDev II を使用した一連の試験発破を実施し、発破による距離と振動の関係や振動周波数特性、低周波音の低減等について検討を行った。その結果より得られた知見をもとに、トンネルと構造物が近接する環境の下で、制御発破を実施した事例について紹介する。また、最後に eDev II の使用を前提とした新しい振動予測手法について述べる。

II. 高精度電子雷管 eDev II の特徴

高精度電子雷管 eDev II の模式図を Fig.1 に示し、特徴を以下にまとめる。

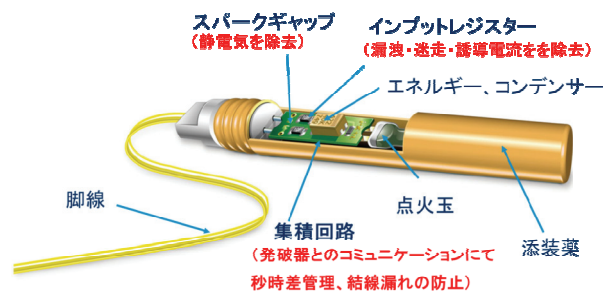


Fig.1 高精度電子雷管 eDev II の模式図
(Electronic Detonator(eDev II))

a. 起爆秒時差精度

起爆秒時差の設定を 1ms(1/1000 秒)刻みの間隔で個々の雷管に任意に設定でき、最大 500 発、最長 20s までの範囲で自由に設定可能である。また、設定した起爆秒時差に対する精度は設定秒時±0.01%以内と非常に高精度である。

b. 作業性の良さ

専用のスキャナを使用し、切羽にて任意の秒時差、発破順序を設定・変更することが可能である。(Photo 1)

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード: トンネル発破, 電子雷管, 秒時差, 周波数特性, 騒音レベル, 低周波音レベル, 制御発破, 振動予測

Keywords: tunnel blasting, electronic detonator, delay time, dominant frequency, noise level, low frequency sound level, control blasting, vibration prediction

切羽で任意の秒時設定が可能であるため、工場出荷時の雷管は1種類のみで、在庫管理の負担が軽減される。

c. 安全性の確保

雷管脚線末端にプラスチック製コネクタがついており (Photo 2), 容易に結線が可能で、結線漏れのリスクを軽減できる。また、専用発破器からの特殊電気信号のみによって起爆するため、迷走電流、静電気等による誤爆が無く安全である。



Photo 1 切羽における秒時差設定状況 (Delay Time Setting with Scanner)



Photo 2 高精度電子雷管 eDev II と含水爆薬 (eDev II and Cartridge Type Explosives)

地点までの地質状況は、極めて堅硬な花崗岩帯であった。

試験発破は、eDev II の起爆秒時差を 5ms(1ms=1/1000 秒), 10ms, 15ms の 3 パターンで変更し、複数回実施した。計測点は、トンネルの直上に 1 点, トンネル進行方向左前方に 1 点の計 2 点設置し、振動速度 kine(cm/s)の計測を行った²⁾。

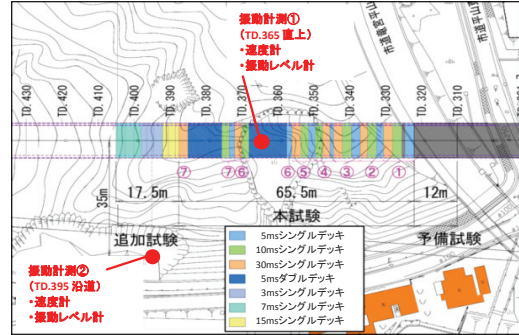


Fig.2 発破試験区間と振動計測位置(平面図) (Plan View of Test Area and Monitoring Point)

(b)試験結果および検討

実施した試験結果から発破振動特性について検討した結果を述べる。孔数約 100 孔, 平均薬量 0.8kg/孔で概ね同一条件で発破した各秒時差 5ms/10ms/30ms の代表的な振動速度の時間波形と周波数スペクトルを Fig.3 に示す。Fig.3 より振動特性について、次のことが言える。①発破継続時間は、(秒時差)×(孔数)どおりに終了している。②秒時差 5ms では、非常に小さい秒時差にも関わらず、孔同士の起爆の重なりによる振動速度の顕著な増加は見られない。③振動波形の卓越周波数は、秒時差の逆数の倍数(1000ms/30ms=33Hz×n)にピークが立っており、秒時差を短縮するごとに卓越周波数が高周波側へシフトしている。以上のことは、eDev II の設定秒時に対して高精度な起爆、つまり 1 孔 1 斉発に起因するものである。

III. 現場適用事例

1. 試験発破

(1) 発破振動に関する試験発破

(a)試験発破実施要領

試験発破区間を Fig.2 に示す。試験発破区間および切羽から計測

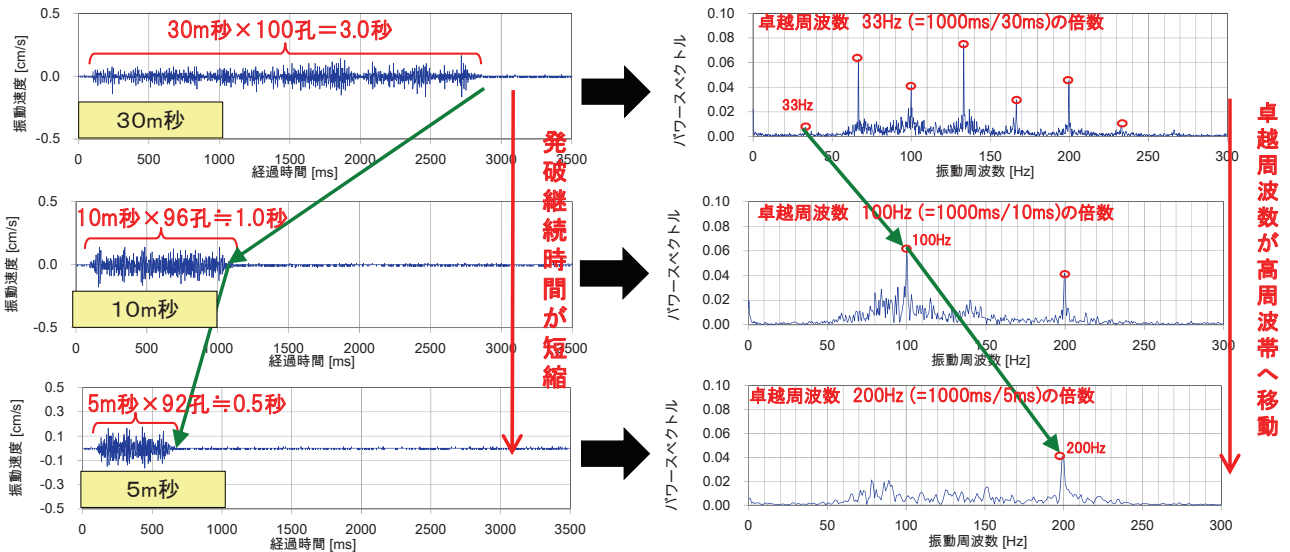


Fig.3 設定秒時差毎の振動速度の時間波形(左)と周波数特性(右) (Vibration Waveform(left) and Frequency Spectrum(right) For Each Delay Time Setting)

次に離隔距離と振動速度の関係について検討した。一般的に用いられている振動予測式②を式(1)に示す。

$$V=K \cdot W^{(m)} / R^{(n)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで V; 振動速度(kine) , K; 発破係数(K 値)
W; 斉発薬量(kg) , R; 離隔距離(m)

また, m は通常 0.5~1.0 の範囲, n は 2.0 前後の値を取ることが火薬メーカーから提唱されている⁴⁾。Fig.4, Fig.5 の図中の赤ラインは, m=0.75, n=2.0 で固定し, 各プロットに対する最小二乗法で最適な K 値を求めたものである。黒ラインについては, 今回の試験発破では, 全ての発破で 1 孔 1 斉発であり, 斉発薬量はほぼ一定であることから, m=0.75 は固定する一方で, K 値および距離の指数 n を変数として重回帰を行ったものである。沿道については, 赤ラインと黒ラインが重なるようにほぼ一致し, 重回帰分析から求められる距離の指数 n も n=2.0 前後が得られており, これまで提唱されてきた振動予測式に合致している。一方, 直上については, 赤ラインはプロットから大きく外れており, 重回帰による距離の指数 n は n=1.0 前後を示している。

直上では, トンネル幅(約 11m)と最小土被り(10m 程度)がほぼ同じであるほど近接しており, 切羽からの離隔距離が大きい計測点のように切羽の発破を点震源と扱える振動伝達モードとは異なり, 直上の計測点からみるとトンネル幅(約 11m)にわたって広角度から発破振動が到達することになる。このような振動伝達モードの違いが, 距離の指数 n が n=1.0 前後を示したことに影響を与えたと考えられるが, 今後さらに検討を進めていく予定である。

振動予測式の K 値について Table 1 に整理した。従来の振動予測式(m=0.45, n=2.0 で固定: Fig.5 の赤ライン)では, 各計測点においてバラつきが非常に小さく, 再現性が高いため, 次発破以降の振動予測の適用に有効な K 値であることが分かる。

Table 1 計測結果より算出した K 値 (Estimated K-value)

計測点	設定秒時差ごとのK値			
	5ms	10ms	30ms	平均
直上	219.7	267.4	221.3	240.8
沿道	1494.9	1287.3	1379.1	1373.3

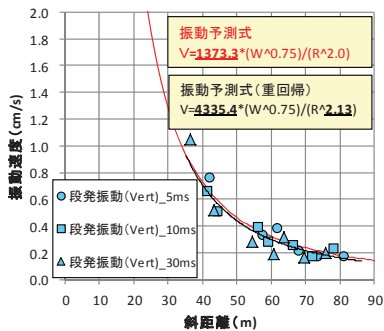


Fig.4 振動速度と距離のプロット (沿道) (Peak Particle Velocity-Distance Plot (point ②))

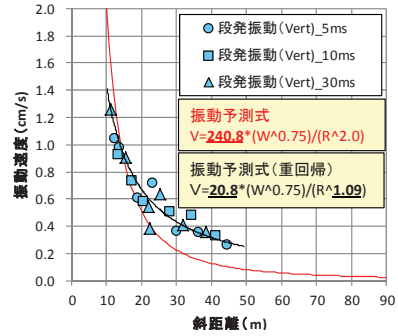


Fig.5 振動速度と距離のプロット (直上) (Peak Particle Velocity-Distance Plot (point ①))

(2) 騒音・低周波音に関する試験発破

(a)試験発破概要

本トンネルでは, 坑口付近に集落があり, 坑口と隣接民家との最小離隔が上り線で 70m 程度, 下り線で 130m 程度と近接している。

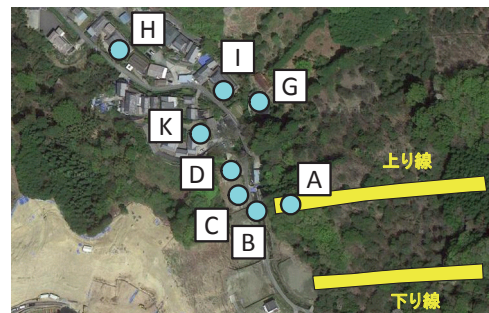


Fig.6 坑口と周辺家屋の位置関係(箕面トンネル) (Tunnel Portal and Residential Houses)

下り線で行った試験発破は, 切羽がトンネル坑口から 125m 掘削した地点である。切羽から民家までの直線距離は 200m 以上のため, 振動の影響はそれほど懸念されなかったが, 坑口が音源となる騒音・低周波音については, 検討が必要であった。試験では eDev II の秒時差を 7ms, 17ms, 30ms としてそれぞれ実施している。Fig.7 および Fig.8 にトンネル坑口からの距離 (坑外距離) と騒音・低周波音レベルの関係と騒音・低周波音の評価で一般的に用いられている船津の式⁴⁾をもとに測定結果から算出した予測式の結果を示す。騒音レベルについては, 秒時差の変更によって, 明確な差は見られず, 3 回とも同様の結果になった。一方で, 低周波音レベルについては, 秒時差により明らかな差異がみられ, 17ms に設定した場合が最も低くなるのが分かった⁵⁾。

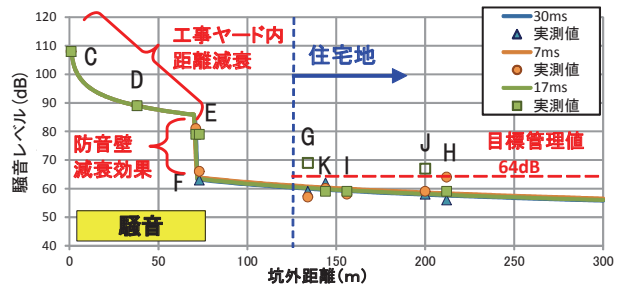


Fig.7 坑外距離と騒音レベルの関係 (Noise Level-Distance Plot)

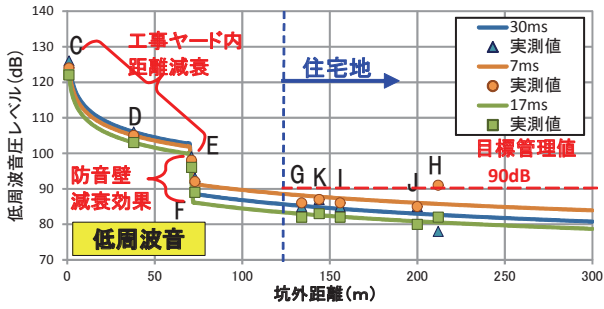


Fig.8 坑外距離と低周波音レベルの関係

(Relationship between Low Frequency Sound Level and Distance Plot)

このように、秒時差によって低周波音レベルに差異が生じる要因を分析するため、電気雷管と eDev II の発破について、前述の試験と同様な試験発破を実施した。秒時差 17ms 秒に設定した eDev II は従来の電気雷管に比べて住宅地で低周波音レベルが 4~5dB 低下している。また、Fig.9 に示すようにトンネル坑内の発破音源に近い位置での騒音を周波数分析した結果、eDev II の発破は低周波成分が 5dB 程度下がり、逆に高周波成分が 5dB 程度増加している。一方で、Fig.10 で示すように、坑内音源と住宅地の音圧レベル差を比べた場合、eDev II による発破で低減効果が認められる低周波音の帯域は、防音扉や防音壁の減衰効果が得られにくい周波数帯であることが分かった。このような検討より、ある特定の秒時差に設定した eDev II の発破は従来の雷管による発破と比較して住宅地の低周波音レベルを低減させる効果が認められた。

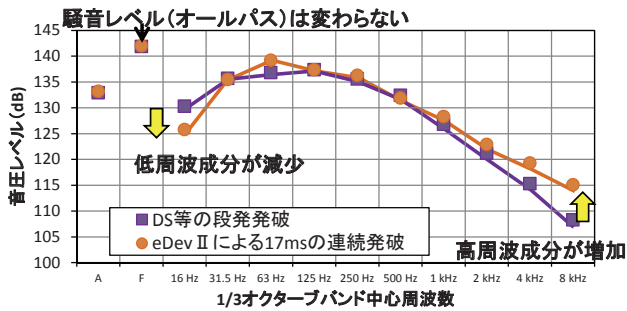


Fig.9 坑内測定点における音圧レベルの周波数解析

(Frequency Analysis of Sound Pressure Level in the Tunnel)

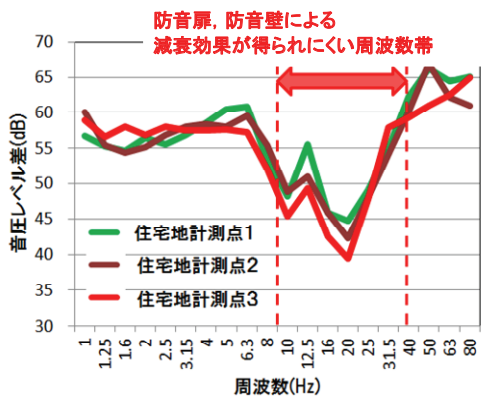


Fig.10 周波数別の坑内音源と住宅地音圧レベル差

(Difference of Sound Pressure Level between Tunnel inside and Resident Area)

2. トンネル現場への適用

ここでは、前述の eDev II 試験発破より得られた知見をもとに、トンネル現場に近接する構造物に対して、制御発破を実施した事例について述べる。

(1) 現場概要

新区界トンネルでは、トンネルに並行して鉄道が走り、トンネルとの離隔距離は最短で約 57m であった。また、トンネル直上には切土法面があったため、通常の発破掘削は困難であり、eDev II を適用した制御発破を実施した⁶⁾。

(2) 発破諸元

Table 2 に発破地点 1 回目(TD17.5)および 2 回目(TD21.5)の発破諸元を示す。発破振動の卓越周波数と地盤の固有振動数の共振を防ぎ、発破振動継続時間を短縮するため、起爆秒時差は 17ms を選択した。また、振動の計測地点と切羽の関係を図.11 に示す。

Table 2 発破諸元 (Blasting Condition)

発破回数	発破地点	斉発薬量	秒時差	孔数	発破継続時間
1回目	TD17.5	0.6kg/孔	17ms	21孔	357ms
2回目	TD21.5	0.6kg/孔	17ms	42孔	714ms

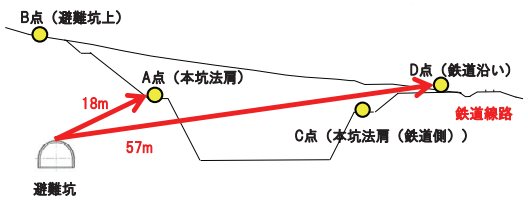


Fig.11 トンネルと計測地点の位置関係(横断面図)

(Cross Sectional View of Tunnel and Monitoring Points)

(3) 結果および評価

本件の検討対象は構造物であるため、鉛直成分と水平 2 成分の 3 成分合成の振動値で検討した。実測値と式(1)によって予測される離隔距離と振動値の関係を Fig.12 に示す。両発破とも計測結果にバラつきはなく、各発破の発破係数 K を算出すると 1 回目が K=942, 2 回目が K=928 となり、非常に再現性の高い発破が実現できている。

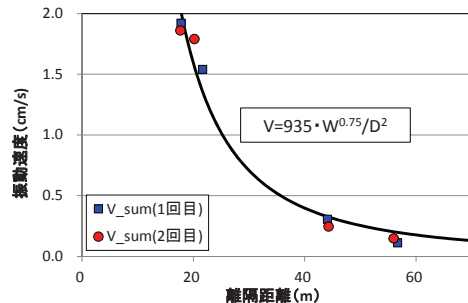


Fig.12 振動速度と離隔距離の関係

(Relationship between Peak Particle Velocity and Distance Plot)

切土法面に設置した計測点 A、鉄道路線沿いに設置した計測点 D で計測した振動波形を周波数解析した結果、設定した秒時差 17ms

の逆数である 59Hz(=1000ms/17ms)の倍数付近に卓越し(Fig.13), 地盤と共振することはなかった。また, 計測点 A では 2 回の発破とも 3 成分合成の振動速度で 1.9kine であったが, 卓越周波数が 59Hz と地震に比べて高く, 震度に換算すると深度 0 に収まった(Fig.14)。実際に, 切土法面を覆うブルーシート上に積もった雪が発破振動で滑り落ちることはなかった。

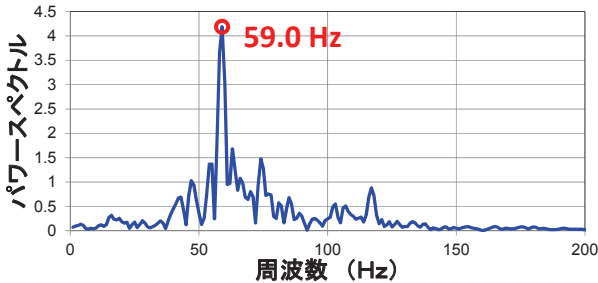


Fig.13 振動波形の周波数(計測点 A)
(Frequency Spectrum (point of A))

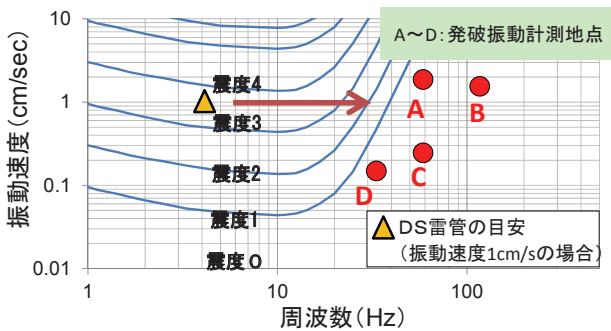


Fig.14 発破振動の震度への換算
(Seismic Intensity Indication)

鉄道線路への影響を検討するため, 計測点 D の電車通過時の振動と発破振動を比較した。測定した電車振動と発破振動を Fig.15, Fig.16 に示す。電車通過時の振動継続時間 2.5s に比べ, 振動時間が短縮されており, 振動速度も電車通過時の振動より小さい。

以上のことから, 鉄道線路に対して影響の極めて小さい制御発破を実施することができたと言える。

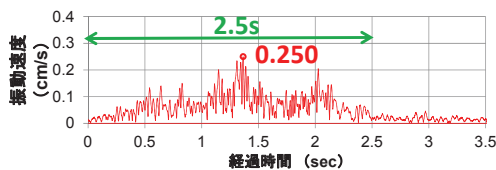


Fig.15 電車振動通過時の振動波形
(Vibration Waveform due to Train Crossing nearby)

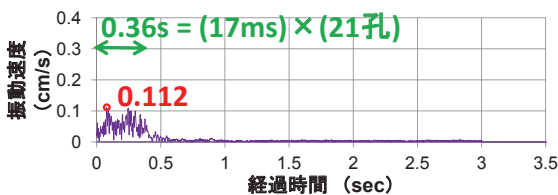


Fig.16 発破の振動波形
(Vibration Waveform due to Blasting)

IV. 新しい振動予測手法 (MSW)

孔の発破順序と秒時差設定を任意に設定できる eDev II による制御発破を前提として新しい振動予測評価手法の開発・適用を進めている。この手法は MSW(=Multi Seed Waveform)と呼ばれており, Fig.17, Fig.18 にその概念図を示す。現場で予め収録した 1 孔のみ単独で起爆した基本波形(単発波形=Seedwave)をベースに, 対象とする予測地点の発破振動波形を単発波形の重ね合わせで評価するものであり, 対象地盤をモデル化し発破振動の伝播を数値解析的に解く方法と全く異なる概念である。現地で予め予測解析に必要な基本波形を収録し, 傾向を評価することでより現実に近い振動波形を予測する点が特徴的である。

この手法を適用することにより, より重要な構造物へ近接する前に, 発破パターンをシミュレートし, 振動を抑制する最適な発破条件を設定することができる。

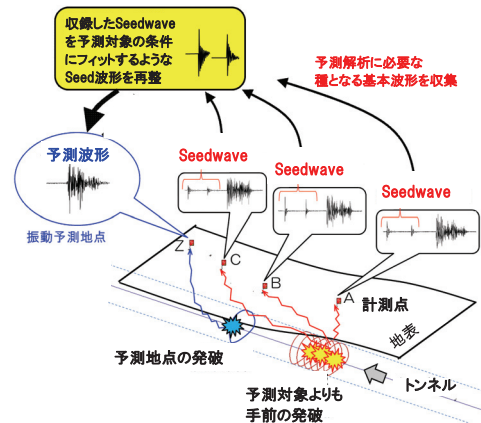


Fig.17 振動予測の概念図
(Concept of MSW)

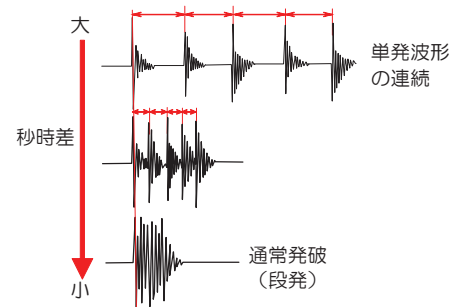


Fig.18 単発波形の重ねあわせの概念図
(Concept of Superposition of Single Wave)

事前に現地で取得した基本波形を用い, 以降の発破を予測した結果を実測と対比して Fig.19, Fig.20 に示す。振動波形・周波数特性ともに実測と予測は概ね良く一致していると思われる。現時点では, まだ試験解析として, 解析の一例を示したに過ぎないが, 今後, MSW による波形予測の精度向上に何が寄与するかについて検証を進めて行く予定である。

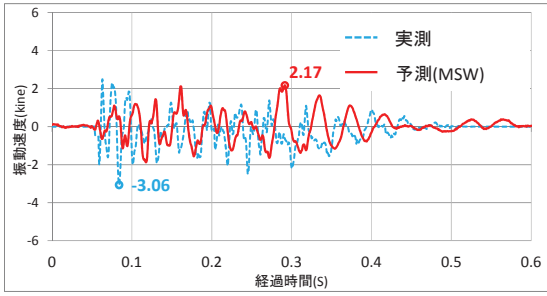


Fig.19 実測と予測の振動波形の比較

(Comparison of Waveform between Measured and Prediction)

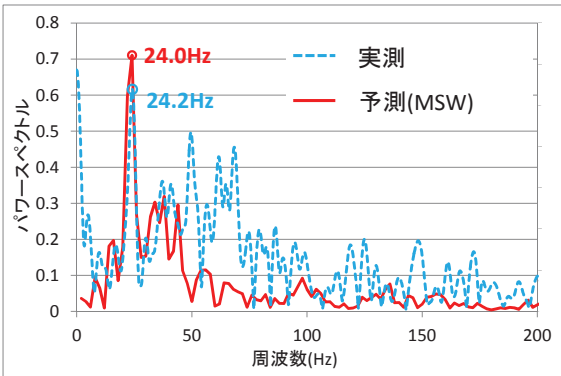


Fig.20 実測と予測の周波数の比較

(Comparison of Frequency Spectrum between Measured and Prediction Values)

V. おわりに

秒時差を高精度にコントロールできる eDev II の発破は、発破継続時間の短縮や短い秒時差設定によって振動周波数を高い周波数帯

で卓越させることで、体感への負担が軽減される。加えて、秒時差の差異によって低周波音レベルの周波数分布が異なり、防音設備の能力を最大限活かす周波数域に低周波音レベルの周波数分布を卓越させることで、低周波音レベルを低減した発破が可能となる。上述の知見を活かし、人や建物に優しい発破を展開していきたい。

また、単発波形の重ね合わせによる任意の地点での振動波形、および振動周波数といった振動の形態を予測する新しい振動予測手法 (MSW) を開発した。今後もトンネル現場への実用化を目指し、取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) eDevTM II Technical Data Sheet ; オリカ社
- 2) 岩野圭太, 越川俊幸, 栗木欣也, 落河崇征, 福井勝則 ; 高精度電子雷管を用いた住宅直下における環境負荷低減発破, トンネル工学報告集, 第 24 巻, 2014, I-35.
- 3) 例えば, あんな発破こんな発破, 火薬工業会, 2002, p3.
- 4) 例えば, 発破振動の周辺への影響と対策, 鹿島出版会, 1984, pp.14-28.
- 5) 北村義宜, 手塚康成, 岩野圭太, 佐野雄紀, 田中満 : 高性能自在制御発破工法による住宅地の環境影響低減に関する考察, トンネル工学報告集, 第 24 巻, 2014, I-36.
- 6) 西川幸一, 栗山和之, 手塚康成, 岩野圭太, 犬塚隆明, 川野広道, 安藤宏 ; 高精度電子雷管を用いたトンネル制御発破による近接鉄道に対する影響検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2014, 投稿中.
- 7) 犬塚隆明, 岩野圭太, 栗木欣也, 落河崇征, 福井勝則 ; 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, 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2015.

Environmentally Low Impact Blasting and New Vibration Prediction Method

Takaaki Inuzuka, Keita Iwano and Yasunari Tezuka¹⁾

Reducing the environmental impact due to the tunnel blasting is quite important. It's been very difficult to control both blasting vibration and noise due to its poor delay time setting potential of conventional electric detonator. Here, in this paper, the authors applied a new electronic detonator; eDev II to the tunnel sites, and made a series of blasting tests with this detonator. Throughout the blasting tests, a lot of data and know-how to control both vibration and noise were obtained. And the authors also introduced new vibration prediction method (MSW: Multi Seed Waveform) to the tunnel sites and tried to compare real waveform with prediction.