

高精度電子雷管を用いた住宅地直下における 環境負荷低減発破

岩野 圭太¹・越川 俊幸²・栗木 欣也³・落河 崇征³・福井 勝則⁴

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-36)

E-mail: iwanokeita@kajima.com

²正会員 鹿島・藤本建設共同企業体 安永川トンネルJV (〒471-0873 愛知県豊田市秋葉町6-46-1)

E-mail: koshikat@kajima.com

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

E-mail: kasen@city.toyota.aichi.jp

⁴正会員 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: fukui@sys.u-tokyo.ac.jp

トンネルの発破による住環境への負荷低減には、発破振動自体の低減や発破継続時間の短縮が極めて有効である。安永川トンネルでは、住宅密集地の直下であるものの、掘削岩盤が堅硬な花崗岩であり、発破掘削の採用したため、低振動で体感の小さい発破が求められた。従来技術では住環境への負荷が多であり、発破掘削の実施は困難であったが、起爆秒時差を高精度にコントロールできる新しい電子雷管 (eDev II) を適用することにより、人の体感や建物への負荷を低減でき、住民の理解を得てトンネル発破掘削を継続している。ここではその事例を紹介するとともに、この電子雷管による発破振動特性を把握する目的で一連の発破試験を行い、発破振動の周波数特性や距離と振動速度の関係など、これまでに得られた様々な知見について報告する。

Key Words : electronic detonator, delay time, tunnel blasting, vibration control

1. 高精度秒時電子雷管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¹⁾である(写真-1)。本工事では、図-1で示すように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、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²⁾を採用するなど、掘削工事による住環境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が、施工開始後、火薬消費許可を受領した経緯もあり、掘削速度や施工方法の違いによる周辺住環境への振動・騒音の大きさやその暴露時間を慎重に検討した結果、振動を与える時間が極めて短く、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、住民の負担を軽減する方法を採用したが、さらにより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。



写真-1 安永川トンネル上流坑口

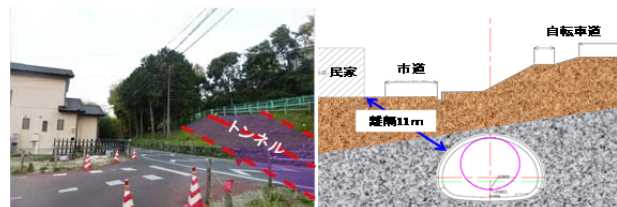


図-1 安永川トンネル住宅近接区間の例

2. 高精度秒時電子雷管 (eDev II) による発破

発破振動低減には斉発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技術が必須となる。したがって、本工事では、国内メーカ製品の変遷を経た後、海外では多数の実績⁹⁾があるオリカ社の高精度秒時電子雷管（製品名：eDev II）⁴⁾（図-2）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できる。
- ②起爆秒時精度が高く、設定秒時±0.01%の高精度である。（1sで0.1ms）
- ③雷管本体は単一製品であり、切羽にて専用スキャナ（写真-2、写真-3）を通じて、任意の秒時差、発破順序を決定することが可能である。
- ④雷管脚線端末にプラスチック製コネクタがついており（写真-4），簡単に結線ができ、結線漏れリスクを軽減できる。

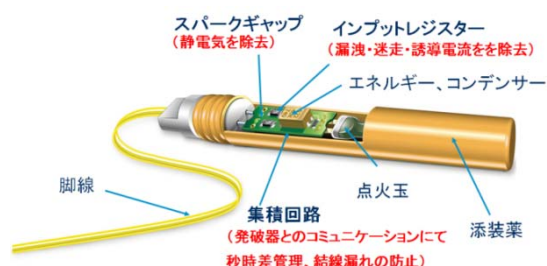


図-2 高精度電子雷管（eDev II）の構造



写真-2 周辺機器（左：発破器、右：スキャナ）



写真-3 切羽でのスキャン状況



写真-4 親ダイ（高精度電子雷管（eDev II））

減できる。

- ⑤専用発破器からの特殊電気信号だけで起爆するため、迷走電流、静電気等による誤爆がなく安全である。

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-3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、縦断面図を図-4および図-5に示すが、TD300-400の一带は、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。

表-1 試験発破の実施内容

試験区分	実施位置	実施内容
予備発破	TD310.0 ～ TD322.0	【シングルデッキ】 ■秒時差：5msに固定 ■進行長2.0mを基準とした適正装薬量を確認
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）

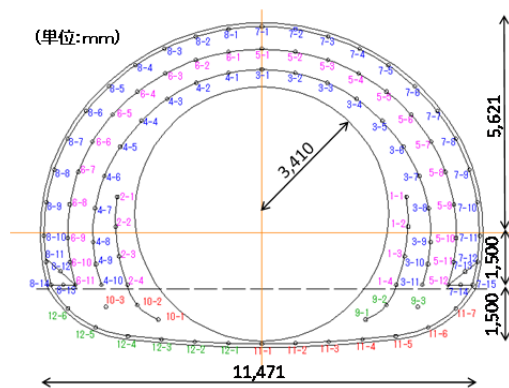


図-2 代表的な発破パターン

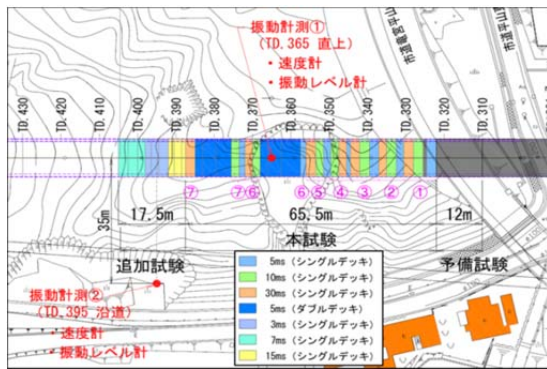


図-4 発破試験区間と振動計測位置（平面図）

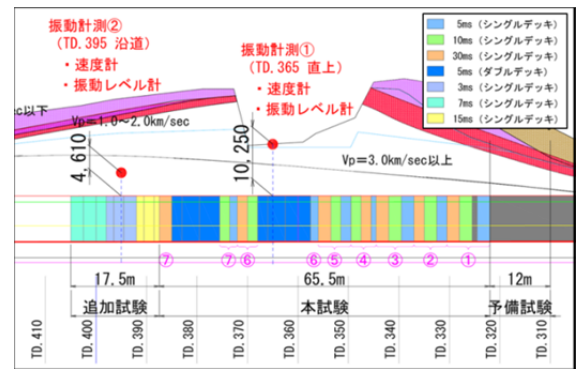


図-5 発破試験区間と振動計測位置（縦断面図）

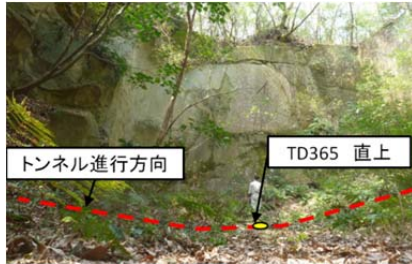


写真-5 振動計測点（直上：TD365）

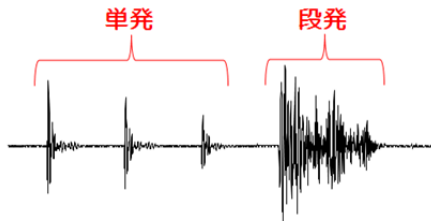


図-6 振動計測点（直上：TD365）

表-2 設定秒時差毎の代表的な発破条件

	総薬量	孔数	平均薬量
5ms	77.8kg	100孔	0.78kg/孔
10ms	73.4kg	96孔	0.76kg/孔
30ms	70.4kg	92孔	0.77kg/孔

また実際の発破では、図-6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破と区別した。

(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

最初の単発は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-7に示した。表-2にはそれぞれの代表的な秒時差設定の発破条件を示しているが、平均薬量、孔数はともにほぼ同じ条件で発破が行われている。すべての孔について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÷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) 距離と振動速度の関係（振動予測式）

図-8に地表の2点（直上、沿線）における、距離と振

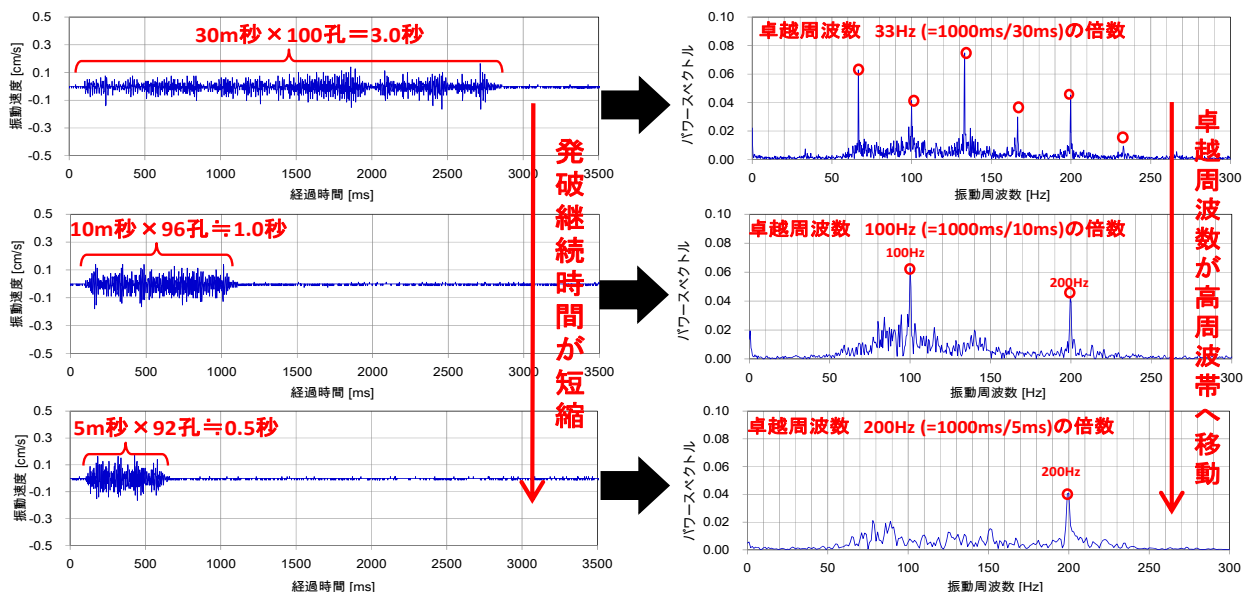


図-7 設定秒時差毎の振動速度の時間波形（左）と周波数特性（右）

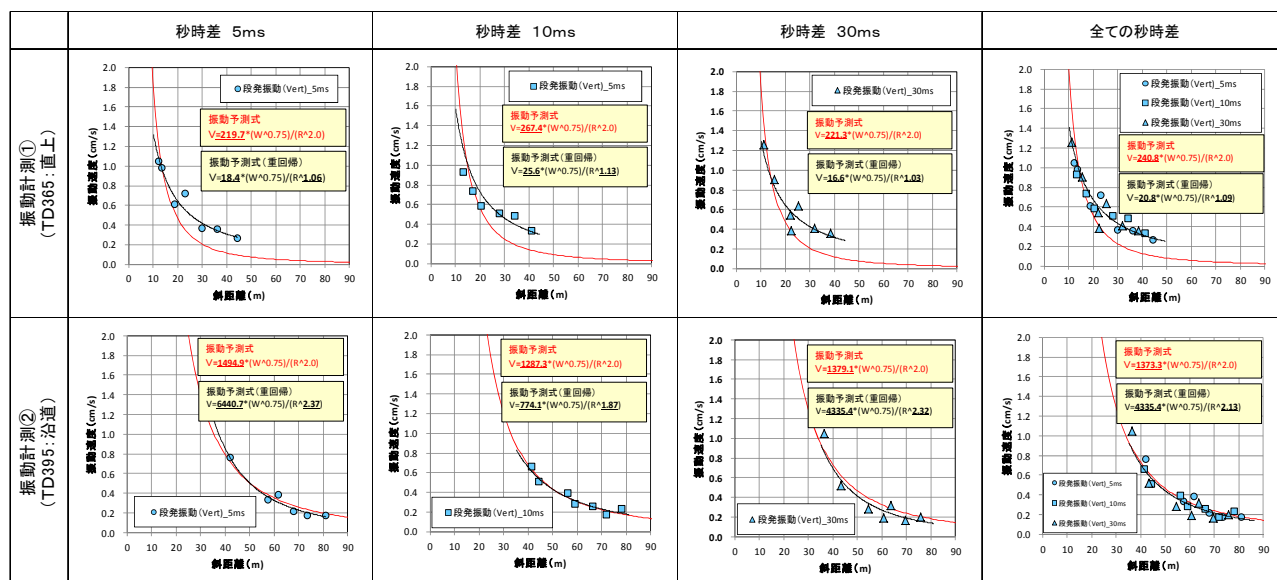


図-8 設定秒時差毎の距離と振動速度プロット

表-3 各推定方法によるK値

	推定方法	設定秒時差ごとの推定K値			
		5ms	10ms	30ms	全ての秒時差
直上 TD365	従来の振動予測式 ($m=0.75$, $n=2.0$ 固定)	219.7	267.4	221.3	240.8
沿道 TD395		1494.9	1287.3	1379.1	1373.3
直上 TD365	重回帰による振動予測式 ($m=0.75$ 固定, n は変数)	18.4	25.6	16.6	20.8
沿道 TD395		6440.7	774.1	4335.4	4335.4

動速度の関係をプロットした。これまで、距離と振動速度の関係は、いわゆる振動予測式が提唱されており⁹⁾、以下で示される。

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

ここで V ; 振動速度 (cm/s) , K ; K値,

W ; 斉発薬量 (kg) , R ; 斜距離 (m)

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⁹⁾。図-8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。一方、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0.8kg/孔であることから、 $m=0.75$ 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 (TD395) 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 (TD365) 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 (TD365) 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、切羽からの距離が離れた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、計測点 (直上) 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値について表-3に整理した。従来の振動予測式 ($m=0.75$, $n=2.0$ で固定 : 図-8の赤ライン) では、直上 (T365) において全ての秒時差設定データで $K=240$ となっており、これまで提案されているK値のうち、“払い” ($K=200 \sim 500$) に相当する値が得られている。一方で、沿道 (TD395) では $K=1373$ となり、非常に大きな値を示している。この直上 (T365) と沿道 (TD395) の違いは、各計測点のセンサー固定をした地盤の違いも影響しているものと思われる。また、重回帰による振動予測式については、 n を変数としているため、従来の振動予測式との単純比較はできないが、直上 (T365) は $K=20$ 程度と非常に小さく、沿道 (TD395) では $K=4335$ と非常に大きな値となっている。

K値とは、振動予測式の振動速度と薬量・斜距離との関係を示す係数であり、切羽—計測点間の振動伝搬特性や計測点のセンサー固定条件など、各現場の条件に多大に影響を受けるものと考えられ、過去に他現場で数多く求められたK値と比較・評価することの意義は小さいと考えられる。したがって、斉発薬量 W の指数 m や距離 R の指数 n を含めた重回帰的な検討を行い、現場ごとに具体的な発破振動データに合致している予測式を求めていくことが重要であると考えられる。いずれにしても、今回直上 (TD365) にて距離の指数 n は $n=1.0$ 前後を示すことが明らかになったなど、高精度にコントロールされた発破をこのような最短距離10m程度まで至近で実施した

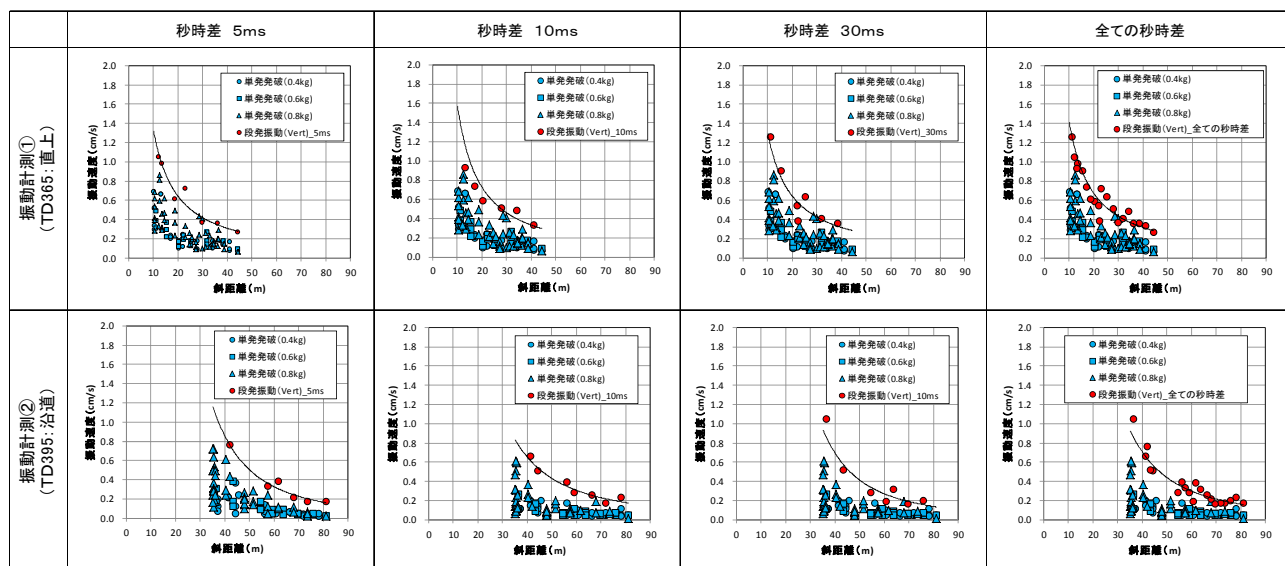


図-9 秒時差設定毎の単発波と段発波の距離一振動速度プロット

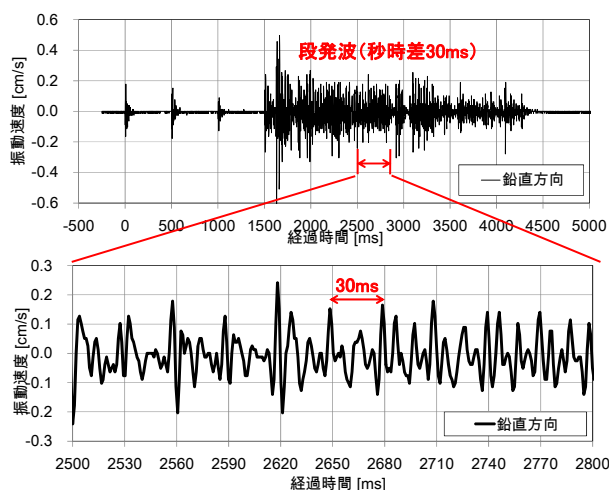


図-10 拡大した段発波形

例⁷⁾はこれまでほとんど報告されておらず、大変貴重なデータであると言える。

c) 単発波と段発波

図-9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。また、計測地点の差 (直上 (TD365) と沿道 (TD395)) でも傾向の違いはない。

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を基本とした発破を実施している。

d) 段発波の詳細検討

図-10に示すように段発波形を拡大すると、設定秒時 (図中では30ms) に応じたピークが確認されており、1孔1斉発の各波形のピークが重ならず高い精度で秒時管理ができていることが分かる。一方で、この各波形ピーク値のばらつきは各孔の抵抗線や岩盤状況の違いなど1孔1斉発の各孔発破の特徴が表れている。従って、設定した中で最も大きな秒時差で波形の分離が最も容易であると思われる30msの段発波形データ7回分について、振動波形を30ms毎に区切り、1区間に1孔の発破が含まれるようにし、その区間の振動速度の最大値をピックアップした。図-11に、7回の発破のうち最初の4回について示した。振動速度最大値については3成分の振動 (鉛直・水平2成分) の大きさ (ノルム) にて示している。これにより以下の点が言える。

①各発破の直上 (TD365) と沿線 (TD395) の30ms毎の振動速度最大値プロットは伝搬距離が遠い分、沿線 (TD395) の方が常に振動速度が小さい。

②直上 (TD365) と沿線 (TD395) とは、非常に良いシンクロを示している。つまり、計測地点が異なっても同様の振動速度傾向を捉えているため、この振動速度のばらつきは、計測地点側によるものではなく、切羽側 (孔薬量、抵抗線、切羽地質のばらつき) に起因していることが言える。

さらに図-12において、直上 (TD365) と沿道 (TD395) それぞれについて30ms毎の振動速度最大値のソートの累積分布を示す。これにより以下の点が言える。

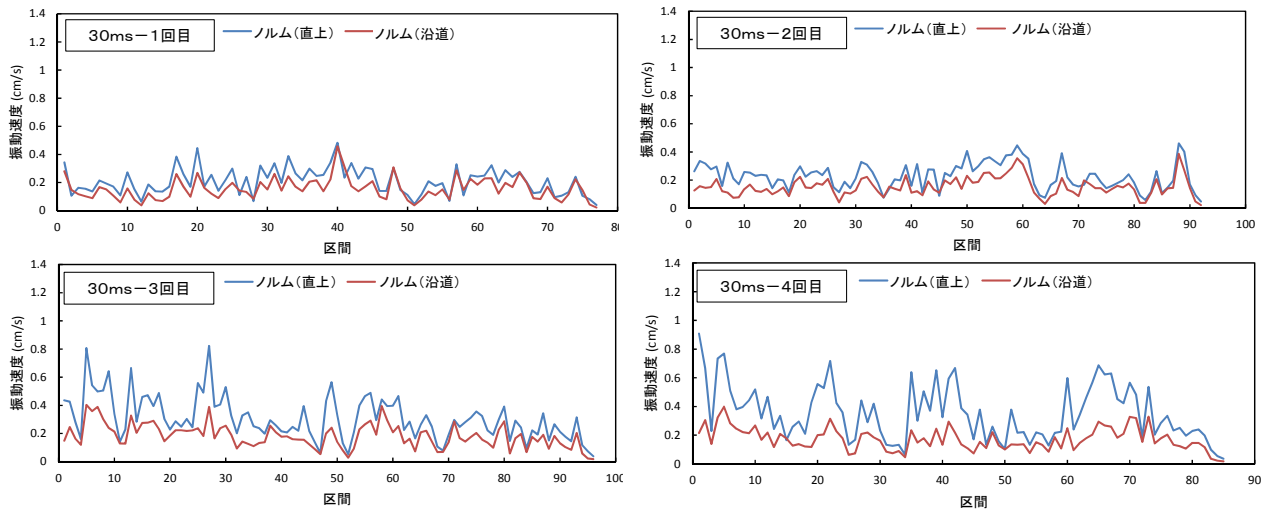


図-11 段発発破(設定秒時30ms)を30ms毎に区切った区間振動速度最大値(4発破分)

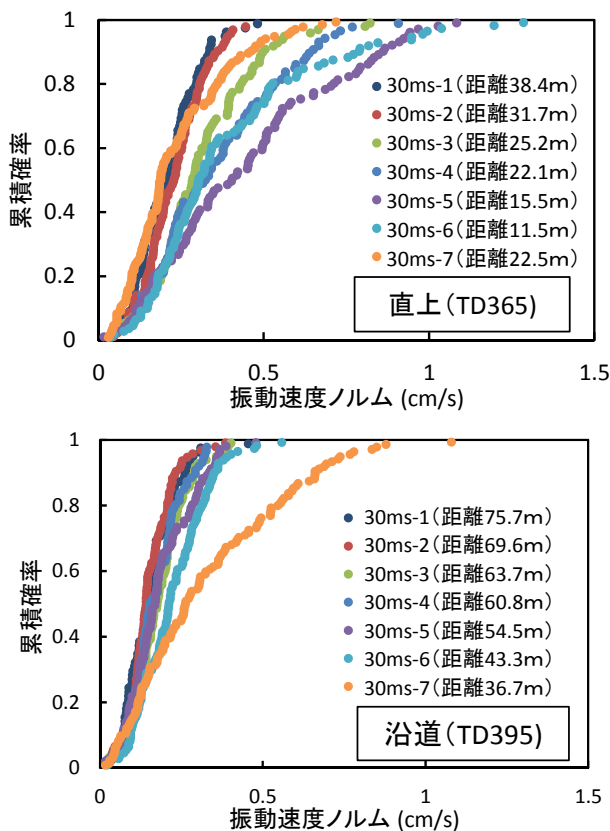


図-12 30ms毎の振動速度最大値の累積確率分布
(上段:直上, 下段:沿道)

①直上(TD365)では、切羽が近づく(30ms-1→30ms-6)につれて、累積確率の傾きが小さくなる(ばらつきが大きくなる)傾向を捉えている。通常、振動速度値のピークは、グラフ上の累積確率=1.0にて評価するが、このプロットより、1孔1斉発の各振動速度が、累積確率1.0の1点だけでなく、伝搬距離が近づくほど全体的(累積確率0~1.0)に大きくなっていく傾向が捉えられている。

②直上(TD365)の7回目(30ms-7)は、切羽(TD385)がすでに計測点(TD365)を通過しており、切羽からト

ンネル後方に伝搬される振動波形を捉えていることになる。このため、振動速度が小さくなっているが、切羽が計測点手前でほぼ同じ伝搬距離(約22m)である4回目(30ms-4)に比べても、振動速度がより小さい。

③沿道(TD395)についても、直上(TD365)ほど顕著ではないが、切羽が近づく(30ms-1→30ms-7)につれて、累積確率の傾きが小さくなる傾向を捉えている。7回目(30ms-7)だけが極端に振動速度が大きくなっているが、グラフ上の累積確率=1.0の点だけが大きくなっているわけではなく、直上(TD365)と同様に、累積確率全体(累積確率0~1.0)で振動速度が大きくなっている。これは、図-4の試験区間平面図で示すように、30ms-6→30ms-7で切羽位置が大きく離れており、伝搬経路が変わったことが原因と考えられる。

e) ダブルデッキ

ダブルデッキとは、1孔に奥/手前の2段装薬を行うことで、1孔1斉発と同薬量で発破振動を抑えつつ、1発破進行長を長くする発破である。図-13に通常の1孔1斉発(シングルデッキ)と1孔2段装薬(ダブルデッキ)の概念図を示した。ダブルデッキでは、同孔内での殉爆や死圧が懸念されるため、中間込物を通常の粘土アンコではなく砕石を適用することで、同一孔内前後の起爆の縁を切ることにした。図-14に示すように、ダブルデッキに

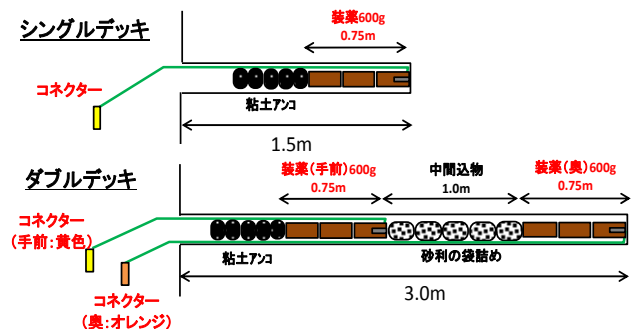


図-13 シングルデッキとダブルデッキの概念図

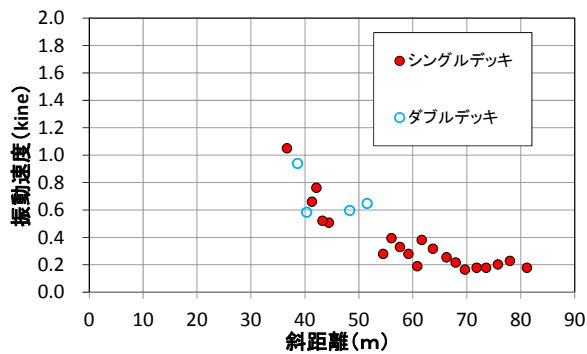


図-14 ダブルデッキの距離—振動速度プロット

においてもシングルデッキと同等の振動速度まで抑えられている。ダブルデッキは装填作業の手間がかかる方法ではあるものの、住宅直下等、発破の時間制限や回数制限が求められる区間では非常に有効な方法であることが確かめられた。

4. おわりに

安永川トンネルでは、従来の雷管による発破から、高精度秒時電子雷管（eDev II）に切り替えた結果、振動速度の低減、発破継続時間の短縮により、住民の方々の振動体感を著しく軽減できており、住宅密集地においても発破工法を継続して進めることができています。また、花崗岩区間で実施した一連の試験発破にて、秒時差毎の周波数特性や距離—振動速度の関係、単発波と段発波の振動速度の関係、段発波形の詳細検討、ダブルデッキの評

価等、多くの知見が得られた。このような知見は、eDev IIによる高精度なコントロールにより、発破秒時に起因する振動速度のばらつきを無視できるようになって初めて明らかになってきた傾向や知見であり、非常に貴重なデータであると言える。また、これまでにない住環境との近接条件下で継続的な発破工法が実施できていることは、現場と近隣住民の方々の緊密なコミュニケーションおよび近隣住民の多大なるご協力によるところが非常に大きいことも付記しておく。

参考文献

- 1) 豊田市一級河川安永川改修事業ホームページ
<http://www.city.toyota.aichi.jp/division/ah00/ah12/1228169.7146.html>
- 2) 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, 2014, 投稿中.
- 3) John Wall; Perimeter control utilising electronic detonators, International Society of Explosives Engineers(ISEE),2012
- 4) eDevTM II Technical Data Sheet ; オリカ社
- 5) 例えば, 発破振動の周辺への影響と対策, 鹿島出版会, pp14-28, 1984.
- 6) 例えば, あんな発破こんな発破, 火薬工業会, p3, 2002.
- 7) 東 世司美, 石村忍, 竹内郁男, 麻生敏美; 一孔一段多段発破で振動を軽減 愛知用水二期幹線水路 兼見 B サイホン工事, トンネルと地下, 第 31 巻 6 号, p p 35-40, 2000.6.

(2014. 9. 15 受付)

ENVIRONMENTALY LOW IMPACT BRASTING WITH HIGHLY ACCULATE ELECTRONIC DETONATOR

Keita IWANO, Toshiyuki KOSHIKAWA,
Kinya KURIKI, Takamasa OCHIKAWA, Katsunori FUKUI

Shortening tunnel blast duration with low vibration is quite effective to reduce environmental stress. Excavating Aneigawa tunnel, which runs under the residential area with small overburden but has its geological condition of quite hard granite, was required to select blasting method with low vibration impact. New blasting detonator; eDevII, resolved these problems with highly accurate delay time setting.

Authors made a series of blasting test with the parameter of delay time, and had a lot of outstanding results and know-how to control blasting vibration.