

博士論文

トンネル発破における振動特性評価と
最適発破条件の検討

岩野圭太

論文要旨

論文題目 トンネル発破における振動特性評価と最適発破条件の検討

Study of blast vibration properties and optimum blasting conditions in tunnel excavation

氏名 岩野圭太

Blasting, generally, has a great advantage as a rapid and economical tunnel excavation method. However, it is quite rare to apply it to the regions close to the residential houses and important structures due to the apprehension of environmental impact such as vibration and noise. Even in the case that blasting is the most appropriate method due to the hard rock, the alternative method which is less efficient tends to be selected if the tunnel runs under the residential area.

Now, the blasting technology has drastically grown up particularly in oversea mines, and cutting-edge technology such as the computer jumbo and electronic detonator are introduced in domestic tunnel market. Especially, an advanced electronic detonator, which has accurate delay time and allows to set any delay time as users want, can make it possible to completely separate the ignitions implemented by each hole. Therefore, it has a possibility to control the blasting vibration quite actively and then drastically change the current blasting method which is far from control blasting due to the scattered delay time of conventional electric detonators.

In this paper, a series of blasting test with the advanced detonator are carried out in Aneigawa tunnel and a lot of blasting waveforms are recorded. Then, based on many fundamental waveforms which come from single holes, a whole waveform which is called a production waveform is reproduced by overlapping these single waveforms. This paper also has its purpose of studying the optimum blasting condition to mitigate the vibration amplitude from the point of view of the delay time and waveform superposition.

This paper is composed of 6 chapters.

The first chapter is mentioned for introduction, and then in the second chapter, the past studies related to blasting are summarized. The many theoretical researches such as detonation theory and blast theory had been done and also, as to the vibration, the study

such as numerical modeling of blasting source and wave attenuation properties had been proceeded.

However, these theoretical studies had rarely been practically applied to actual tunnel site, because theoretical understanding of blasting requires some sort of hypothesis due to the ultimate blasting phenomena such as extremely high temperature and pressure. Hence, theoretical understanding is difficult to be applied to practical blasting.

Whereas, the study of practical understanding of the blasting phenomena had been implemented. Especially, the study of so called vibration-prediction-equation had been enthusiastically conducted by many researchers. These study results were often applied to the tunnel site, but past study about the equation tended to be based on the usage of conventional electric detonators which originally have scattered delay time; therefore, the study hadn't always given accurate prediction.

As mentioned above, as the electronic detonator had been developed, the study for vibration prediction by overlapping the single waves had been carried out. However, so far, current studies about it were based on either laboratory test or oversea mine, and there were no such studies as blasting waveform reproduction and vibration prediction recorded in the tunnel under construction.

In the third chapter, at first, a series of tunnel blasting test in which the author engaged as a tunnel staff are overviewed, and then, waveform analyses about blasting by the advanced electronic detonators are summarized. These fundamental analyses are quite essential because the electronic detonator had not been applied before in the domestic tunnel and even more, an analysis of such a long term blasting test with the advanced detonator in under-construction tunnel had not been done before ever in the world. The blasting test lasted for about a month and covered with about 100 m range. The delay time is changed for each blasting and waveforms are recorded. The first three holes among around 100 holes in one blasting have longer delay time than other rest holes in order to record complete single waveforms. The two vibration monitoring points are installed on the surface and one of them is positioned on only 10 m distance of the tunnel.

The zoomed up waveform of blasting by the electronic detonator is found to have sharp peaks with exactly each delay time, and frequency spectrum of the waveform also has sharp peaks at the inverse of delay time. These results verify the extremely high accurate delay time of the electronic detonator.

As to the single waveforms, the shape of them is found to be quite similar when they are overlaid, and that similarity gives the good evidence for the procedure of waveform reproduction conducted in the next chapter. From the vibration data recorded at the close monitoring point on the surface gives the conclusion that the peak particle velocity (PPV) of the waveform is in inverse proportion to the distance; that fact is quite different from past understandings that were based on the vibration data taken far distance from blasting.

In the fourth chapter, followed by the result and analysis of the blasting test mentioned in the previous chapter, the method to reproduce the waveform by single wave superposition is studied. Just only repetition of single waves never gives good reproduction of a production wave because of lack of consideration in amplitude dispersion of each single wave. The amplitude dispersion of single waves included a lot of factors such as charge weight, drill alignment, geological inhomogeneity, etc. and no numerical model can take in all such variables properly. Therefore, amplitude dispersion of single waveforms is statistically considered, and then is found to follow the Weibull distribution. Weibull distribution is described by two parameters; these parameters obtained from real waveforms give the possibility to reproduce the waveform properly.

Based on the statistical analysis mentioned above, the fundamental procedure of waveform reproduction is established. It consists of three parts: (1) preparation of single waves, (2) preparation of hole number of seed waves which is arranged their amplitude followed by Weibull distribution, and (3) superposition of seed waves with designed delay time. The simulated waveform followed by the fundamental procedure looks good similarity with the real production wave in the view of the dispersion of amplitude. Then, after the simulation of this fundamental procedure is retried for 100 times, the statistical analysis reveals that the real production data is properly interposed between the maximum and minimum cases of the simulation, which shows the validity of the simulation by this fundamental procedure.

Furthermore, in order to improve the certainty of the production wave simulation in case of more strict condition such that delay time is too small, some processes are added to the fundamental procedure. Among the fundamental procedures (1) to (3), following processes are added. A: estimation of the relation between propagation distance and Weibull parameters, B: adjustment of the amplitude in the hole of invert, C: adjustment of wave travel time in accordance to the distance between the hole and monitoring point. Considering these extra processes into the simulation, the statistical evaluation of the detailed simulation

clarifies validity even in more strict condition such that delay time is only 5 ms.

In the fifth chapter, referring to the waveform reproduction procedure mentioned in the previous chapter, optimum blasting condition is considered to mitigate the vibration for either by the advanced electronic detonator or conventional electric detonator.

In the case of the advanced electronic detonator, the wave reproduction procedure is simulated for different delay time, such as 2 ms, 3 ms, up to 40 ms. The simulation in each delay time is calculated in 100 times. According to the results of numerical simulation, the relation between delay time and PPV is analyzed, and the optimum delay time that gives minimum vibration can be determined.

The procedure is found to be quite useful for determining the optimum delay time; however it takes a lot of time and effort and is not suit for current tunnel excavation routine in which 3 or 4 blasting are implemented per day. Therefore, more simple solution is pursued. Optimum delay time for vibration mitigation means that the adjacent single waves are mostly canceled out each other, and the fact shows that optimum delay time seems to be determined by the shape of a single wave. In the next step, the two different methods for analysis of a single wave, autocorrelation and frequency spectrum, are studied.

The comparison of the results between these two methods and waveform reproduction is carried out. Having 1 to 3 ms difference between them, these two simple methods are able to give approximate optimum delay time. Therefore, one of the simple methods, autocorrelation, is applied to the tunnel site and then an enough achievement of vibration mitigation can be confirmed.

In the case of the conventional electric detonator, the waveform reproduction procedure is modified to be able to treat the delay time dispersion that the electric detonator originally has. The conventional electric detonator tends to have its PPV in first stage among 15 delay time stages, because it is only the delay time stage that has no delay powder in it and can ignite exactly in same time. Therefore, the first consideration refers to the difference of PPV in the cases between with and without the first delay time stage. Then, the next consideration is about the effective number of ignition holes. Due to the delay time dispersion of the conventional detonator, the number of holes that is equivalent to the simultaneous ignition needs to be calculated and the corresponding statistical study clarifies its concept.

The sixth chapter is conclusion. In this study, based on a series of blasting test implemented at the actual tunnel site, at first blasting vibration with the advanced electronic detonator

has been discussed. Next, the waveform reproduction procedure has been established and then, study of optimum delay time to mitigate the vibration has been implemented. This study especially deals with actual vibration data while tunnel excavation and the method for optimum condition also considers the on-site tunnel excavation routine. Therefore, this study is sure to be widely applied to the tunnel site with concern of blasting vibration.

Also, conventional blasting being lack of care for environmental impact, the conclusion of this study would be alternative choice to mitigate the vibration and would drastically change the conventional blasting vibration approach and then leads to the new blasting that can actively control the environmental impact.

トンネル発破における振動特性評価と最適発破条件の検討

目 次

第1章 序 論

- 1.1 研究の背景 1-1
- 1.2 本研究の概要 1-2

第2章 過去の研究

- 2.1 発破の歴史 2-1
- 2.2 発破理論と岩盤破壊メカニズム 2-2
 - 2.2.1 爆轟理論 2-2
 - 2.2.2 発破理論 2-3
- 2.3 発破振動の発生・伝播に関する研究 2-4
- 2.4 発破振動の評価に関する研究 2-6
 - 2.4.1 発破振動の評価指標 2-6
 - 2.4.2 発破振動の管理基準 2-7
 - (1) 構造物に対する振動管理値 2-8
 - (2) 人に対する振動管理値 2-8
- 2.5 発破振動の予測に関する研究 2-9
- 2.6 トンネル発破の現状 2-12

第3章 発破振動の特性評価

- 3.1 現場試験の概要 3-1

3. 1. 1	現場概要(安永川トンネル).....	3-1
3. 1. 2	高精度電子雷管の概要.....	3-2
3. 1. 3	現場試験の概要.....	3-3
	(1)目的.....	3-3
	(2)発破試験区間.....	3-3
	(3)発破試験区間の地質.....	3-3
	(4)発破試験の諸元.....	3-4
	(5)発破パターン.....	3-5
	(6)発破振動の計測方法.....	3-5
3. 2	試験結果の概要.....	3-5
3. 2. 1	段発発破.....	3-5
	(1)電子雷管による起爆秒時差と振動波形、周波数の関係.....	3-5
	(2)伝播距離と振動速度の関係(振動予測式).....	3-6
	(3)伝播距離と振動速度波形の卓越周波数の関係.....	3-8
3. 2. 2	単発発破.....	3-9
	(1)伝播距離と振動速度の関係.....	3-9
	(2)伝播距離と振動速度の卓越周波数の関係.....	3-10
	(3)単発発破の振動速度波形.....	3-11
3. 2. 3	振動速度と振動レベル.....	3-12
3. 3	3章のまとめ.....	3-13

第4章 波形の重ね合わせ法による振動速度波形の再現法の検討

4. 1	単発発破の振動速度波形の特徴.....	4-1
4. 1. 1	段発波形の区間ピークの累積確率と切羽位置の関係.....	4-1

4. 1. 2	単発波形の区間ピークの統計分析	4-2
4. 2	基本的な重ね合わせ法による段発波形の再現	4-3
4. 2. 1	段発波形の再現の基本フロー	4-3
4. 2. 2	重ね合わせの各ステップと段発波形再現の結果	4-5
4. 3	より詳細な検討に基づく段発波形の再現	4-5
4. 3. 1	詳細な検討を加えた段発波形の再現の全体フロー	4-5
4. 3. 2	重ね合わせの各ステップの整理と段発波形再現の結果	4-12
4. 3. 3	再現計算の試行回数の検討	4-14
4. 4	4章のまとめ	4-14

第5章 振動低減のための最適発破条件の検討

5. 1	高精度電子雷管による最適発破条件の検討	5-1
5. 1. 1	重ね合わせ法による最適発破条件の検討	5-1
5. 1. 2	簡易な方法による最適発破条件の検討	5-3
	(1)自己相関係数による評価	5-3
	(2)周波数解析による評価	5-4
5. 1. 3	簡易な方法の現場適用事例	5-6
	(1)現場の概要	5-6
	(2)発破の条件	5-7
	(3)発破振動低減の対策	5-8
5. 2	従来の雷管(電気雷管)における最適発破条件の検討	5-11
5. 2. 1	電気雷管の起爆秒時と振動	5-11
5. 2. 2	電気雷管における段発波形のシミュレーションとその評価	5-12
5. 2. 3	電気雷管の起爆秒時のばらつきと振動の関係	5-15

5.3 最適発破条件の検討の適用範囲の考察	5-16
(1)Aトンネル	5-17
(2)Bトンネル	5-17
5.4 5章のまとめ	5-19

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ	6-1
6.2 今後の研究の展望	6-4

参考文献

謝辞

第 1 章

序 論

1.1. 研究の背景

発破は、対象物を火薬の爆発に伴うエネルギーを利用し、安全かつ短時間、低コストで破壊対象物以外へできる限り影響を与えずに対象物のみを破壊することを目的としている。当初、火薬による破壊を利用するのは軍事目的が主であったが、採鉱、土木作業へ用途を広げ、海外では大型建造物の解体のための大規模破壊、国内でも鉄筋コンクリート構造物解体のため、部分的な小規模破壊（柳田ら,2014）などにも適用されている。さらに近年では、医療分野で結石など人体内にてごく小規模の発破で破砕する技術への展開も見られている。

山岳トンネル掘削では、掘削方式として大別すると発破掘削と機械掘削があり、主に地山条件により硬岩から中硬岩にかけては発破掘削、それよりも軟弱な地山では機械掘削としての棲み分けがなされている。山岳トンネルにおける発破掘削は、機械掘削に比べ経済的であり高い掘進速度が期待できるという大きな特長があるものの、発破による振動・騒音が周辺環境に及ぼす負荷が大きい。そのため特に住宅や重要構造物が近接している場合、地山が硬岩であっても、あえて掘削効率の低い割岩工法を選定するなど、発破掘削の実例は少ないのが現状である。

そのような状況のなか、発破方法を高度化する工夫は進められ、振動や騒音の低減や、設計通りの形状に発破することを目的とした制御発破と呼ばれる方法が試みられてきた（たとえば、中川ら,1986）。制御発破では、孔数を増やすことで孔ごとの薬量の低減を図ることや、穿孔径に対し細い爆薬（スムーズブラッシング爆薬）を用いて爆薬の威力を意図的に低減することなどが行われている。但し、この制御発破の効果をより高めるための十分な穿孔精度や、起爆秒時精度がこの当時なかったため、これまで発破を計画的に制御する段階まで至っていない。

一方、海外では鉱山を中心に新しい発破技術の開発が進み、構造物の近接発破の事例も増えてきており（たとえば、Rulin Yang ら,2011）、制御発破の考え方を導入しながら、穿孔精度を高めるためのコンピュータジャンボの導入、起爆秒時精度を高めるための高精度電子雷管の導入を進め、施工者が発破を制御しようとする試みが進められている。

特に発破振動の低減として、計測される振動値の観点では、同時に起爆する爆薬量（斉発薬量）と振動伝播距離が重要な要素となるが、実際に人が体感する振動は振動継続時間など

他の要素も密接に関連すると考えられる。高精度電子雷管は、任意の起爆秒時差を高精度で設定できるため、各発破孔からの振動波形を完全分離して起爆することで振動値自体の低減を図るだけでなく、振動継続時間の制御により人の振動体感も積極的に抑制できる可能性が高い。

これまでの我が国における発破振動の低減や予測に関して、実際のトンネル現場では振動速度と斉発薬量および K 値にて構成される振動予測式を用いて実際に測定された振動値との関係を検討する受け身的な評価が最も多く適用されている(土木工学社,2007)。一方、発破振動の予測精度を積極的に向上させるため、各孔からの起爆による振動波形を雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した確率論的な考えの導入(たとえば、宮地ら,1993)や、波形の重ね合わせによる振動制御に関する研究(たとえば、和田ら,1994)も進められているが、これらの研究当時は、実際に起爆秒時を設計通りに制御できる雷管が存在しなかったため、机上計算による検討や、条件を整えた現場試験による検討にとどまっていた。

そこで本研究では、任意の起爆秒時差の設定が可能な高精度電子雷管をわが国で初めて本格的に適用したトンネル現場において、1カ月にわたり継続的に発破試験を実施した。更にそこで発破振動の波形データを数多く収録し、その波形データに基づいて起爆条件と振動波形の観点から発破振動の低減について検討することを主目的とした。

まず、高精度電子雷管による発破振動の特徴をトンネル切羽進捗に伴う傾向として整理したのち、1つの孔から発せられた振動波形(単発波形)に着目し、それらの重ね合わせ法による発破全体の振動波形(段発波形)を再現する方法を検討した。さらに、雷管の種類によらず様々な起爆条件の下で再現した段発波形に基づいて、発破振動の低減のための方策やそのための最適な起爆条件について検討を図ることとした。

1.2. 本研究の概要

本論文は、高精度電子雷管を初めて本格的に適用した安永川トンネルにおける発破試験による発破振動データに基づき、その振動波形の再現法やそれに伴う振動低減の検討についての一連の研究成果を取りまとめたものであり、序論、結論を含む6章で構成されている。各章の構成は以下のとおりである。

1章は、序論であり、研究の背景や目的を示すとともに、これまでの既往の研究に残った課題を整理し、本研究を行った意義を述べる。

2章では、まずこれまでの発破に関する歴史を整理した後、発破に関する理論やメカニズ

ムについて述べる。その後、本研究に関連する発破振動の発生・伝播、振動の評価、振動予測に関するこれまでの研究を整理する。さらに最後に現状、国内の山岳トンネル現場で行われている発破の現状を実際のデータも踏まえて整理する。

3章では、本研究の核となる4章や5章における振動波形の検討の基礎となる波形データを整理する。まず高精度電子雷管をわが国で初めて本格的に適用し、著者も従事したトンネル現場の概要をまず述べた後、さらに本トンネルで行った発破試験の条件など概要を整理する。その後、この一連の発破試験の結果を、従来の評価法（振動予測式）で整理するなどトンネル切羽進捗に伴う振動の傾向をマクロ的な視点で整理したのち、1孔から発せられた振動波形（単発波形）や全体の振動波形（段発波形）に着目し、振動波形と伝播距離の関係などその特徴を整理する。

4章では、3章にて得られた単発波形と段発波形の特徴から、単発波形の重ね合わせによる段発波形の再現方法を検討した。各孔から発せられる単発波形の振幅が特定の統計分布に従っていることに着目し、単発波形の重ね合わせを行い、実測の段発波形の再現ができることを示す。更に、精度の高い段発波形の再現を行うため、伝播距離の違いなどの影響を考慮した再現法を確立する。

5章では、4章で検討した単発波形の重ね合わせによる段発波形の再現法に基づき、任意の条件における発破振動のシミュレーションを行い、振動低減の方策を検討する。まず、電子雷管を用いた場合の発破振動について重ね合わせ法により算出し、最も振動速度が小さくなる最適な起爆秒時差を求める。さらに、重ね合わせ法により求めた最適な起爆秒時差を正として、簡易に最適秒時差を求める方法を検討し、概ね最適秒時差を求めることができるかを検証する。さらに、この簡易な最適秒時差を求める方法を実際のトンネル現場で適用し、振動速度を低減できることを示す。

続いて、電気雷管を適用したと仮定した場合の電子雷管の場合に対する比較を行い、電気雷管の使用段数の違いによる発破振動の変動を示す。また電気雷管の起爆秒時のばらつきの違いと発破振動の関係についても検討した。

最後に6章は、本研究の結論として上記の各章で得られた研究成果をまとめる。

第 2 章 過去の研究

2.1. 発破の歴史（共立出版,2001a, 日本火薬工業会,2015a, 山海堂,2015）

火薬は、中国の唐の時代に用いられたのが最古と言われており、日本では、歴史的にも有名なポルトガル人による種子島への鉄砲伝来とともに黒色火薬が広まったことが最初とされる。古くから火薬類の利用は世界的にみても軍事目的が中心であった。17 世紀ころから、ようやく穿孔技術の進展に伴い、採鉱などに使われるようになるが、このころの火薬は依然として黒色火薬が用いられている。19 世紀に入ると産業の進展に伴い採鉱・土木工事が増え、発破技術も大いに発展した。その発展を飛躍的に推し進めた最大の要因は、スウェーデン人アルフレッドノーベルによる、ダイナマイトおよび雷管の発明である。日本においても 1860 年代に別子鉱山や生野鉱山で発破採鉱が始まっており、1880 年代に別子鉱山、足尾鉱山等でダイナマイトが使用され始めている。

その後、1950 年代に入ると低コストで安全性が高いその特徴から硝安油剤爆薬（通称アンホ爆薬）が登場し、日本でも 1964 年に市販が開始された。この硝安油剤爆薬は硝酸アンモニウムのプリル（顆粒）に油を噴霧して製造され、安価であるため現在でも適用されている（カヤクジャパン, 2017a）。ただし、硝安油剤爆薬は後ガスが悪いうえ、耐水性がないため、湧水が多いトンネル現場などで見られるいわゆる水孔に適用できない。そのため、硝安油剤爆薬とほぼ同時期に、耐水性の高い含水爆薬が開発されており、日本では 1980 年代に市販が開始されている（ジャペックス, 2016）。含水爆薬は、硝酸油剤爆薬の欠点を補う形で、広く普及したが、日本では紙筒状またはプリル状の含水爆薬（カヤクジャパン, 2017b）の適用に留まっているのに対し、海外では 1970 年代に乳化剤を混合しエマルジョン化した含水爆薬（エマルジョン爆薬）が開発され、海外では現在主流となっている（オリカ, 2009）。このエマルジョン爆薬は、安全性が高く爆薬威力の調整ができることから、現場で 2 液を混合して爆薬とする現地混合（サイトミキシング）が行われるが、日本では、現行法上、アンホ爆薬以外のサイトミキシングが認められていないため、エマルジョン爆薬は普及していない。

火薬・爆薬以外の発破技術では、20 世紀に入りビットやロッドの改良、動力装置の開発といった穿孔技術における著しい進展が見られ、発破技術の発展を後押しした。20 世紀に入るまでに空圧式のトップハンマ方式（孔外で打撃する機構）が開発され、その後 1970 年

代には、空圧式から油圧式への転換によりその削岩能力が飛躍的に向上した。また、採鉱での火薬類の使用に伴う爆発事故の多発を受け、20世紀に入り段発の電気雷管が開発され、それまでの導火線発破による不確実性に起因した退避遅れによる事故が減少した。電気雷管は、取り扱いがしやすく安価なため、現在でも最も多く使われている（カヤクジャパン,2017c）。一方で、電気雷管の欠点として迷走電流や静電気などによる暴発の危険が残るため、1970年代後半に、非電気式雷管として、チューブ内面に爆薬を塗布し、爆轟波が管内を伝播することで起爆する導火管付雷管が開発された。この導火管付雷管は、現在でもアンホ爆薬や粒状体含水爆薬を適用する現場では、装填時の孔壁と装填ホース間に発生する静電気による誤爆を防ぐ目的で適用されている（カヤクジャパン,2017d）。1990年代に入ると、より精度の高い発破をめざし、国内でもICを組み込んだ電子雷管の市販が開始された（山本,1999）（カヤクジャパン,2018a）。2000年代になると、ユーザーが任意に起爆秒時設定可能となる電子雷管（後述）が海外で開発された（オリカ,2016a）。日本でも2013年に振動低減対策としてトンネル現場で初適用された（岩野ら,2014a）。

2010年代に入ると、トンネル掘削作業の中で、装填・結線作業が最も作業員が切羽に近づく危険な作業であることから、発破装填の自動化の開発が急速に進み、2017年には、結線作業をなくす無線雷管が海外で開発され、豪州の鉱山などではすでに実用化されている（オリカ,2016b）。また自動装填機も現在開発が進められており、安全で高精度に設計された状況下で発破作業が行われると考えられる日が来ることも遠くないと考えられる。

2.2. 発破理論と岩盤破壊メカニズム(共立出版,2001b, 日本火薬工業会,2015b)

2.2.1. 爆轟理論

爆轟とは、爆薬の起爆により立ち上がり極めて急峻で高速に伝播する波（衝撃波）により励起された燃焼波が、更に爆薬中を超音速で伝播する現象とされている。爆轟理論は、爆発の初期段階の現象を流体力学や化学反応に基づいて説明する理論であるが、爆薬内を伝播する爆轟は爆轟波背後の圧力が極めて高圧に及ぶものと考えられ、理想気体とは到底みなせない。また高圧・高温下の状態式の決定に必要なすべての物性を直接求めることは容易でない。爆轟を理解する最も基本的な考えとして、質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則をベースとしたChapman-Jouget理論があるが、そこから爆轟波の状態を求める際にもいくつかの仮定（仮説）に基づいた上で爆轟特性値を求めている。爆轟速度や爆轟圧などの爆轟特性値については直接計測しようとする試みがなされているが、この爆薬中を伝

播する爆轟速度、いわゆる爆速は爆薬によって異なるが、2,000～8,000m/sにも達する。

この爆轟の岩盤への作用を制御する方法が制御発破の1つであるスムーズブラスティングである。このスムーズブラスティングの目的は、掘削面を平滑に仕上げ、地山損傷を最小限にすることである。この場合、爆薬は孔径に対し、細い薬径の爆薬が使用され、これにより孔内壁と爆薬との間に空気層を設けることで、爆薬の起爆時の衝撃波や爆轟波によって生じる圧力が孔内壁に伝わる際にクッションとなって低減することを想定している。しかしながら、極めて平滑な孔壁である場合などで、先行発生した衝撃波が爆薬の爆轟速度を超え、未反応な正常な爆薬を圧縮（死圧という）させることで、爆轟伝播を中断させてしまう（チャンネル効果という）ことがある。このチャンネル効果を防ぐために、死圧を受けにくく爆轟伝播性の高い爆薬に変更する、孔内空隙に先行衝撃波の進行を阻止する介在物を挿入するなどの対策がなされる場合がある。一般に、欧州などに比べ、岩盤に割れ目が多く、硬い岩盤の割合が高くない日本では、孔壁もそれほど平滑でないため、チャンネル効果による発破失敗の報告例は多くないと思われる。

2.2.2. 発破理論(共立出版,2001c)

発破理論は、数学的に現象を解明しようと試みる爆轟理論と異なり、実験や経験則などに基づき実務として発破現象を捉えようとするものである。そのため、発破事象を説明する説や考え方は非常に多い (Atlas Power Co,1987)。

その中でも、現在でも実務として最もよく知られたものがハウザーの式 (共立出版,2001d) である。これは、以下に示す非常に簡単な式で理解も容易である。

$$L = C \cdot W^3 \quad (2-1)$$

ここで、 L : 装薬量 (kg), W : 抵抗線 (m), C : 比例定数である。これは、図 2-1 に示すように 1 自由面の岩盤の深さ W (m) に L (kg) の爆薬を起爆した後にできる漏斗状 (円錐形) の破碎形状と薬量の関係を示したものである。ここで、標準装薬であれば、円錐の半径である r は、 $r = W$ であることから、円錐の体積 V は、 $V = 1/3 \pi r^2 W \cong W^3$ となる。したがって、(2-1) 式は、標準装薬であれば以下ようになる。

$$L = C \cdot V \quad (2-2)$$

ここで、 V : 漏斗状形状の体積である。また、この比例定数 C は単位体積当たりの岩石を起砕するのに必要な装薬量 (原単位) を算定するのに必要な係数で、発破係数と呼ばれている。さらにこの発破係数 C は爆薬の威力のほか、岩盤の発破への抵抗性や填塞状況などによ

り変化するものと考えられ、以下のようなさまざまな要因の積で表されており、現在でも国内の火薬メーカーによる発破パターン設計の基本的な考え方の1つとなっている（黒川,1986）。

$$C = e \cdot g \cdot d \cdot l \cdot f(w) \quad (2-3)$$

ここで、 e ：爆薬の威力係数、 g ：岩石の抗力係数、 d ：填塞係数、 l ：装薬係数、 $f(w)$ ：破壊度係数である。

発破現象は、使用する爆薬の特性、岩質、装薬方法、隣孔との配置間隔、起爆秒時など実に複雑な要因が絡み合っている上、発破は時間的にも空間的にも著しく動的に変化する現象である。従って、発破理論は、発破現象の全体像を統一した考え方で説明することは難しく、発破の要因や現象の一側面を重視して説明することになる。実際に発破現象の時間的経緯は、爆薬の爆轟、衝撃波の伝播、ガス圧の膨張、岩石の破碎と段階的に分けることができ、それぞれで異なった現象と捉えることができる。

例えば Daw 兄弟ら（Daw A.W.ら,1909）は、氷を例に、爆薬の爆発による力で岩石はせん断破壊により破壊されると説明している。この考え方を展開した結果、(2-1)式に示すハウザーと同じ関係が得られている。また、日野（Hino,1954）は衝撃破壊理論を提唱している。これは、岩盤内に投入される衝撃波は、圧縮波として伝播するが、自由面に到達すると逆向きの引張波となる効果（ホプキンソン効果）により、剥離破壊されるとしたものである。これは通称ショック波理論と呼ばれている。村田（村田ら,1954）は、引張主応力破壊理論を提唱している。この理論では、岩盤に伝達するエネルギーのほとんどは衝撃波ではなく、そのあとに続くガス圧の作用が主であるとの考えから、ガス圧により孔壁に一樣に作用する圧縮応力と直交方向の引張応力により岩盤が破壊するとした。また、伊藤・佐々（伊藤ら,1962）は、弾性波動論による解析から、岩盤内の各点の応力状態を静的応力として検討している。他にも発破事象を説明するため発破の他の作用や要因を挙げたり、その複数の事象を組み合わせたなど様々な考え方がある。いずれにしても、これらの説はいずれも発破の要因や現象の一側面に着目して論拠しており、正しく事象の一面を捉え、的を射えていると言える。

2.3. 発破振動の発生・伝播に関する研究

発破では、爆薬が岩盤内で爆発し、非常に高い衝撃圧やその後のガス圧が孔内に作用し、その圧力波が岩盤内に投射され、岩盤を破壊する。その際、岩盤内の応力は破壊や伝播によ

り減衰し、やがて岩盤を破壊できなくなり、弾性波として伝播する。これがいわゆる発破振動となる。

この発破振動の発生機構に関する研究は、1940年から1960年にかけて、弾性波動論を応用する形で研究がすすめられた。Sharpe (Sharpe J.A.,1942) や Duvall (Duvall W.L.,1953) は、発破震源を球近似し、さらにこの球震源が無限弾性波体中に存在すると仮定して、変位ポテンシャル関数を求めている。この問題の変位ポテンシャル関数の一般解は (伊藤ら,1966) によって与えられている。さらに平田ら (平田ら,1992) は、トンネル掘進発破にこの一般解を展開することで、震源で発生する震源スペクトル $S(\omega)$ を次のように提案した。

$$S(\omega) = \frac{1.4S_t D \omega / \rho C_p}{\sqrt{(4C_s^2/D^2 - \omega^2)^2 + (4C_s^2 \omega / DC_p)^2}} \quad (2-4)$$

ここで、 C_p 、 C_s は岩盤中のP波速度およびS波速度、 ρ は岩盤の密度、 D は抵抗線長さ、 S_t は岩盤の引張強度、 ω は角速度である。また、無限弾性波体の球震源だけでなく、震源を円筒近似したモデルについても Starfield (Starfield A.M.ら,1968) や Abo-zena (Abo-zena A.H.,1977) によって一般解が与えられている。さらに、発破振動の発生機構に関する実験的研究としては、Kisslinger ら (Kisslinger C.ら,1963) が160回の発破試験を行っており、堅固な媒体よりも軟弱な媒体の方が発破振動は大きくなること、堅固な媒体ほど、高い周波数の振動が観測されることなどを示している。

発破振動の伝播特性に関する研究は、Born (Born W.T.,1941) や山口・奥村 (山口ら,1972) をはじめとし、減衰定数、 Q 値、対数減衰率などの減衰特性と周波数との関係を明らかにしようとするものが多い。ここで Q 値は1周期の間に系に蓄えられるエネルギーを消費するエネルギーで割ったものであり、この値が大きいほど減衰が小さいことを示し、減衰定数や対数減衰率と密接に関連したパラメータである。この発破振動の減衰特性を示す Q 値は、これまでの様々な実験を通じて地盤工学で問題となる周波数帯域において一定となることが示されており、この周波数に独立で一定の値をとる事象は Constant Q として CQ 理論と呼ばれている。Gladwin ら (Gladwin M.T.ら,1974) がこの CQ 理論に基づき振動波形の初動のライズタイム τ_R と伝播時間 t との間に

$$\tau_R = a + (b/Q)t \quad (2-5)$$

(ただし a 、 b は定数) となること (ライズタイム則) を示しており、さらに Kjartansson (Kjartansson E.,1979) が CQ 理論に基づいて Q 値評価法を提案している。また金子ら

(金子ら,1989) が(2-5)式を発展させ、震源近傍の非線形性を考慮した評価式を提案している。さらに以上の議論を踏まえ、平田ら (平田ら,1992) は、震源から観測地点までの振動伝播特性を示す $D(\omega)$ として以下の式を提案している。

$$D(\omega) = \frac{1}{r^n} \exp\left(-\frac{\omega r}{2V_p Q}\right) \quad (2-6)$$

ここで、 r : 振動伝播距離、 ω : 角速度、 V_p : 縦波伝播速度、 n : 幾何学的距離拡散指数であり、3次元無限媒体内の実体波は1、半無限媒体の実体波は2、表面波の場合は1/2となる。これによれば、周波数が高いほど、 Q 値が小さいほど、減衰が大きいことを示している。つまり震源において同一のパワーを有する振動であっても、構成される周波数が低いほどと遠方まで伝播しやすいことが分かる。

さらに、平田ら (平田ら,1992) は、(2-4)式で示される震源の特性を示す震源スペクトル $S(\omega)$ 、(2-6)式で示される震源から観測地点までの振動伝播特性を示す $D(\omega)$ 、観測点周囲の局所的構造特性を示す $A(\omega)$ を合わせて、振動スペクトル $F(\omega)$ を以下の式

$$F(\omega) = S(\omega) \cdot D(\omega) \cdot A(\omega) \quad (2-7)$$

のように表現し、振動スペクトルによる振動レベルの推定に展開している。さらに山本 (山本ら,1998a) (山本ら,1998b) は、この平田の提案式を受け、単発波形が変化する要因の理論的な考察や、爆薬種類や発破規模が振動スペクトルに及ぼす影響の検討を行っている。

2.4. 発破振動の評価に関する研究

2.4.1. 発破振動の評価指標

1970年代までは、振動を評価する指標として、構造物に与える影響の評価に最も適切であるとの観点から振動速度 (cm/s) が用いられてきた。一方で、1977年の振動規制法施行以降は、住宅地近傍での工事の機会も増加していることから、構造物への実質的な被害よりも、住民が振動に対して感じる不快感という公害の立場から、人体感覚を加味した指標である振動レベル (dB) により管理することが多くなってきている。

振動レベル (dB) は、計測された振動加速度に人体が振動を受けるときの感覚に基づく補正をしたのち、基準加速度でレベル化して求めた値である。一方、人体感覚に基づく補正を行う以前の物理量としての振動加速度に対し、基準加速度でレベル化したものを振動加速度レベル (dB) といい、以下の式で示される (産業環境管理協会,2010a)。

$$VAL = 20 \cdot \log_{10}(A_n/A_0) \quad (2-8)$$

ここで、 A_0 は、基準の振動加速度であり、 $A_0=10^{-5}(m/s^2)$ であり、 A_n は振動加速度実効値である。この A_n に次式のように周波数によって異なる補正值 C_n (図2-2)(国松ら,1988)を加味することで身体感覚に基づく補正後の振動加速度 A を求める。

$$A = [\sum A_n^2 \cdot 10^{C_n/10}]^{1/2} \quad (2-9)$$

この補正後の振動加速度 A を用いることで振動レベル (dB) が次式で得られる (産業環境管理協会,2010b)。

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(A/A_0) \quad (2-10)$$

また、この振動レベルと振動速度の関係を求める研究も盛んに進められている。振動が周波数 8Hz 以上の単一正弦振動であれば理論上以下の関係式となる (国松ら,1988)。

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(V) + 91 \quad (2-11)$$

これに対し、発破振動は 80Hz 以上の高い周波数を含み、一過性の振動継続時間の短い一過性の振動であるため、(2-11)式は過大な評価を与えることになる。そこで(2-11)式の定数項を n とおいた式

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(V) + n \quad (2-12)$$

として、観測された振動速度と振動レベルの回帰分析によって n の値を求める試みが行われている。表2-1(日本火薬工業会,2002a)に清水(清水ら,1984)、北村(北村,1985)など様々な提案式を示したが、 n は 83 前後の値をとることが多いようである。

また国松ら(国松ら,1988)は、人体感覚補正された加速度波形と実際の速度波形との差や、振動継続時間の評価を定量的に行い、次式を用いて単発発破の振動速度波形から振動レベルを計算できるとした。ただし、 T_d は振動継続時間である。

$$VL = 20 \log_{10} V + 10 \log_{10} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_d}{0.63}\right) \right\} + 85 \quad (2-13)$$

起爆秒時差がデシセカンドオーダーで設定された DS 電気雷管を使った段発発破など、起爆秒時間隔が振動継続時間よりも長く、各段の振動速度波形が分離できる場合でも、(2-13)式によって振動レベルが精度良く求まることが示されている(国松ら,1989)。しかし起爆秒時差がミリセカンドオーダーで設定された MS 電気雷管を用いた発破など、起爆秒時間隔が振動継続時間よりも短く、前段の振動が減衰する前に次段の振動が発生するような場合には、(2-13)式から求まる振動レベルは過大な値をとると報告されている(国松ら,1991)。

2.4.2. 発破振動の管理基準

振動規制法では、バックホウなど指定された特定建設作業においては敷地境界で 75dB と定められているが、発破はこの特定建設作業には含まれていないため、法的には規制がない。そのため表 2-2 に示す火薬学会より提言されている発破振動の管理値（提言値）（日本火薬工業会,2002b）を参考にし、工事の発注者と施工者、住民の間で取り決めがなされることが多い。

(1) 構造物に対する振動管理値

過去の構造物に対して設定されたトンネル発破の振動管理値の事例（たとえば 岡村ら,1995）を表 2-3 に示す。対象となるものは既設トンネルである場合が多く、管理値としては概ね 2.0~3.0 cm/s としている場合が多い。これは前述の表 2-2 に示した火薬学会の提言値と比べても妥当である。

また、構造物のうち、とくにコンクリート構造物については、コンクリート強度特性（引張強度、弾性係数）から適当な安全率を考慮して理論的に管理値を求めることもある。一般に、弾性波の伝播によって媒質内に発生する応力は以下のように示される（雑喉,1984）。

$$\sigma = \rho CV \quad (2-14)$$

ここで σ :媒質の応力 (MPa), ρ :媒質の密度 (kg/m^3), C :材料の弾性波速度 (m/s), V :発生する振動速度 (m/s) である。ここから、引張破壊となる応力が生じる振動速度を逆算することで、限界振動速度を求めている。例えば、コンクリートの引張強度を $\sigma=2.0$ MPa, 密度を $\rho=2,500$ kg/m^3 , 弾性波速度を $C=3,000$ m/s とすれば(2-14)式を変形して

$$V = \frac{\sigma}{\rho \cdot C} = \frac{2.0 \times 10^6}{2,500 \times 3,000} = 0.27 \text{ m/s} \quad (2-15)$$

となる。これに対し、安全率を 10 程度見込むと、振動管理値は 2.5~3.0 cm/s となり、表 2-3 で示した過去の発破の振動管理値は妥当であると言える。

(2) 人に対する振動管理値

過去の人・民家に対して設定されたトンネル発破の振動管理値の事例（たとえば 吉岡ら,1990）を表 2-4 に示す。0.1 cm/s を下回るような極めて厳しい管理値も見受けられるが、管理値としては概ね 0.1~0.3 cm/s としている場合が多いようである。これは、前述の表 2-3 に示した火薬学会の提言値と比べても妥当である。

図 2-3 には、気象庁 HP（周期および加速度と震度の関係）を修正し、周波数および振動速度と震度の関係を示した。さらに同図には、一般的な発破振動として周波数 50~200Hz

とし、振動速度を 0.3cm/s 以下とする領域を示したが、この領域は震度 0 の領域であり、振動管理値として妥当であると考えられる。

2.5. 発破振動の予測に関する研究

これまでの発破振動の予測に関する研究では、実際のトンネル発破現場においては振動速度と斉発薬量および K 値と呼ばれる定数にて構成されるいわゆる振動予測式を用いた評価が最も多く適用されている（土木工学社,2007）。

$$V = K \frac{W^m}{D^n} \quad (2-16)$$

ここで V：最大振動速度（PPV: Peak Particle Velocity）（cm/s），K：発破方法や岩盤の特性などによって変化する係数、いわゆる K 値，W：斉発薬量（kg），D：伝播距離（m）である。この（2-16）式中の m ， n については、表 2-5 に示すように、国内の各火薬メーカーから、 m は $2/3$ または $3/4$ ， n は 1.5 または 2.0 とすることが提唱されている（日本火薬工業会,2002a）。K 値については、同じく表 2-5 に示すように、装薬の仕方の違いのためベンチ発破かトンネル発破か、またはトンネル発破における切羽の部位（芯抜き、払いなど）ごとに提唱されている。しかしながら例えばトンネル発破の芯抜きが $K=450\sim 900$ と提唱されているように、同じ発破の仕方や切羽の部位でも K 値に 2 倍以上の違いがあるなど非常にばらつきが多い。したがって、発破振動の検討が必要なトンネル現場では発破を開始するにあたり、現地にて小規模の薬量や孔数の発破試験を予め行い、その結果から地盤や適用する爆薬によって決まる K 値を求め、発破パターンの設計を見直した後、本発破へと移行することが多い。

また、振動予測式について、海外では、（2-16）式を用いず、例えば Duvall&Petkof（Duvall.W.I.ら,1959）は（2-17）式、Langefors&Kihlstrom（Langefors U.ら,1963）は（2-18）式、Ambraseys & Hndron（Ambraseys N.R.ら,1968）は（2-19）式を提案している。

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-n} \quad (2-17)$$

$$V = K \left(\frac{D^{2/3}}{W} \right)^{-n} \quad (2-18)$$

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-n} \quad (2-19)$$

Dowding (Dowding C.H.,1985) によれば(2-17)式がよく用いられるようである。ここで(2-17)式の D/\sqrt{W} は、伝播距離 D を斉発薬量 W の平方根で割っており、換算距離 (SD : Scaled Distance) と呼ばれている。

国内で提唱されている振動予測式(2-16)式と(2-17)~(2-19)式は、一見異なるように見えるが、例えば(2-17)式において $n=3/2$ とおけば

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-3/2} = K \frac{W^{3/4}}{D^{3/2}} \quad (2-20)$$

となり、表 2-5 における日本油脂の提案式と同じになる。また(2-19)式において $n=2$ とおけば

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2} = K \frac{W^{3/2}}{D^2} \quad (2-21)$$

となり、表 2-5 における旭化成の提案式と同じになる。

一方、振動予測式(2-16)式の K 値の予測精度を向上させる研究として、吉岡ら (吉岡ら,1989) は、同じトンネル発破であっても、芯抜きと払いで異なる K 値をもつ矛盾点から、斉発薬量は孔あたりの薬量を基本とし、さらに電気雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した確率論的な考え方を取り入れている。

また、宮地ら (宮地ら,1993) は、振動予測式における斉発薬量 W について、電気雷管の起爆秒時のばらつきが考慮されていないことから、発破時の電気雷管の段とその孔数に着目して、振動予測式を書き換えた。そのなかで、同一段の複数孔の起爆により発生する振動のうち、何孔分の同時起爆による振動と等しくなるかを意味する重畳孔数の考え方を導入している。橋爪ら (橋爪ら,1996)、塩月ら (塩月ら,1996) も同様に重畳孔数に基づく発破振動の予測検討を進めている。

さらに、最大振動速度の値そのものではなく、観測される振動速度波形に着目して振動予測をする研究も進められている。名和・誉田 (名和ら,1962) は、複数の波を重ね合わせる際に発生する相互作用に関してそれまでの研究を分類・整理し、これらの理論化を試みている。これによると既存の研究は、相互作用がない場合 (分割説)、相互作用が線形の場合 (干渉説)、相互作用が非線形の場合 (反結合説) の 3 つに分類されるとしている。

また、平田 (平田ら,1992) や国松 (国松ら,1997a) は、発破の振動波形のスペクトルに着目した。平田 (平田ら,1992) は簡単な数理モデルにより、発破振動のスペクトルを予測する方法について考察しており、国松 (国松ら,1997a) も地盤工学の分野で行われている方

法を参考に、震源特性と水平多層構造を仮定した伝達特性を用いて、逆フーリエ変換から地表面で観測される振動波形を予測する方法を試みている。

さらに、段発発破の振動速度波形（以降、段発波形）の振動を予測する方法として、具体的に波形の重ね合わせによる研究も行われている。Hinzen (Hinzen K.G.ら,1988) は、室内試験で計測した単発波形を、起爆秒時差を表現するインパルス応答とコンボリューションすることで、段発波形の計算を行った。また和田ら (和田ら,1994) は、実際にコンクリートブロックに穿孔、起爆して収録された振動波形から、単発波形の重ね合わせ時の干渉や最適な起爆秒時差について実験的に検証している。野田ら (野田ら,1998) は逆に、段発波形からデコンボリューションにより単発波形の予測を試みている。Blair (Blair D.P.ら,1999) は、起爆秒時差や雷管が持つ起爆秒時のばらつき、起爆の順序などを考慮して、Monte Carlo法により単発波形の重ね合わせを行い、露天掘り鉱山における段発振動を予測した。その結果、大規模に行われる鉱山の発破では、すでに起爆されたエリアが、後続の起爆による振動伝播経路上にある場合、その影響 (Screen effect) を無視できないとし、起爆順や振動伝播方向を考慮する必要性を示した。Aldas&Ecevitoglu (Aladas G.G.U.ら,2008) は、Blairの研究をさらに進め、鉱山の発破を対象として、発破振動の伝播に LTI (Linear Time-Invariant) が成り立つとして、単発発破を収録し、線形に重ねることで段発波形の再現を試みている。

更に、Rulin (Rulin Yang ら,2010) は、これまでの発破振動波形の重ね合わせ法を更に前に進めている。1回の発破による単発波形を、伝播距離の異なる複数の計測点で収録することにより、波形振幅と伝播距離の関係を得るだけでなく、伝播距離に従って減衰により変化する単発波形の形状も考慮に入れた段発波形の予測を行っている。これは MSW (Multi Seed Waveform) と呼ばれており、図 2-4 にその概念図を示すように複数の計測点で収録した単発波形 (ここでは Seed wave と呼ばれる) に基づいて検討することから、計測点でない任意の位置での段発波形を予測することができることになる。

このように、発破振動の予測に関する研究は、単に最大振動速度をプロットするだけでなく、計算機や収録装置の技術的向上も後押しとなって、振動速度波形を再現し、予測精度を向上させる研究が進められている。一方で、現状、発破を行うトンネル現場の多くは依然として、(2-16)式で示した振動速度式により評価する現場が多い。これは、トンネル現場での発破は、1日に3~4回実施されるなど施工サイクルが短いため、そのサイクルにあった迅速な評価が求められていることを示している。今後の研究においても、予測精度の

向上だけでなく、現場のニーズに即した迅速な評価が求められると考えられる。

2.7. トンネル発破の現状

トンネル発破は、通常図 2-5 に示すトンネルジャンボと呼ばれる特殊機械で、切羽に穿孔した後、雷管・爆薬を装填し、設定した孔順に従い起爆する。

トンネルジャンボは、これまでマニュアルで穿孔作業が行われ、発破孔のパターンの決定や穿孔精度は、トンネル専門の作業員（坑夫）が長年培ってきた経験と技量に頼るところが大きかったが、近年、海外製を中心に、操作室の画面で孔位置を誘導するガイダンス機能や、予め設定した発破孔のパターンを自動で穿孔するフルオート穿孔機能が付いた、いわゆるコンピュータジャンボの導入が盛んに進められており、坑夫の技量と経験に依らず、常に高い穿孔精度を保持できるようになってきている（川野ら,2017）。

爆薬は、表 2-6 に示すように、ANFO（アンホ：硝安油剤爆薬）（カヤクジャパン,2017a）または含水爆薬（ジャペックス,2016）が主流で適用されている。ANFO 爆薬は、安価だが、耐水性がなく、後ガスが悪い欠点を有している。一方、含水爆薬は、ANFO 爆薬に比べて、爆速が高く威力が大きいほか、耐水性や後ガスも ANFO に比べ優れているため、近年非常によく使われている。含水爆薬には紙巻（筒状）と粒状（カヤクジャパン,2017b）があるが、紙巻の場合、爆薬径に対する穿孔径の比であるデカップリング比が大きくなるため、起爆の際、筒状爆薬の周辺にエアクッションが生じ、岩盤に対する爆薬の威力が弱まる。一方、ANFO 爆薬や粒状の含水爆薬は、穿孔径いっばいに密装填が可能のため、爆薬の威力が岩盤に伝わりやすい利点がある。

また、国内では ANFO 爆薬以外の現地混合（サイトミキシング）が認められていないため、現状はまだ適用できないが、海外では、図 2-6 に示すマヨネーズ状のバルクエマルジョン爆薬（オリカ, 2009）が主流となっている。バルクエマルジョンは 2 液混合により爆薬となるため、孔毎に配合を調節することで爆速の調整や、孔内の装填量を変更によるデカップリング比の調整ができることから、今後、前述のコンピュータジャンボと共に用いることで、穿孔と装薬を合わせた発破設計が可能となると期待される。

雷管は、図 2-7 に示す、電気雷管（カヤクジャパン,2017c）、電子雷管（オリカ,2016a）、非電気式雷管（導火管付雷管）（カヤクジャパン,2017d）の 3 種類がトンネル発破に用いられている。これら 3 種類の雷管の構造を図 2-8 に、また、これら雷管の起爆秒時差の設定を表 2-7 に示す。最も使われているのは、最も安価な電気雷管である。振動・騒音対策が

求められる制御発破区間では、斉発薬量を低減する目的で段数を増やすため、電子雷管や非電気式雷管（導火管付雷管）が用いられる事例が増えている（岩野ら,2014a）。電子雷管は、他にトンネル外周の余掘りを低減し、穿孔通りに発破するスムーズブラस्टィングに使われる場合もある。また非電気式雷管（導火管付雷管）は、静電気による誤爆の恐れがないことから、ホースで装填する際の孔内の静電気の発生が懸念される前述のアンホや粒状爆薬の場合に適用される。

トンネル発破を過／弱装薬等にならず、対象とする岩盤に適した条件で発破するためには、爆薬量と孔数の適切な設定が重要である。このうち爆薬量は、単位岩盤体積に対する薬量、いわゆる原単位がその指標となる。図 2-9(a),(b)には、原単位とトンネル断面積の関係について、著者がこれまでに収集した国内外の文献等（たとえば 工業火薬協会,1989, ノルフェー工科大プロジェクトリポート,1995, ジオフロンテ研究会,2014）に記載されていた原単位—トンネル断面積の関係曲線を示した。また同図には、これらの各曲線に基づいて、原単位—トンネル断面積の適当な領域を黄色のハッチングで示した。さらに、著者が収集した実際のトンネル現場の原単位の実績を、図 2-9(a)には岩盤等級別、図 2-9(b)には爆薬種類別にそれぞれプロットした。これによると、トンネルの断面積が 30m²以下のトンネル（避難坑など）では、切羽（自由面）が小さくなることから、原単位は急激に上昇する。一方、一般のトンネルで断面積 70m²以上となると、原単位は、トンネル断面積に依存しない。また、図 2-9(a)の岩盤等級別でみると、岩盤等級 B または CI では、原単位 1.0~1.5kg/m³と、適切な領域とした黄色のハッチングを超えているのに対し、岩盤等級 CII や DI は、原単位 0.5 kg/m³以下と二極化している。さらにまた、図 2-9(b)の爆薬種類別でみると、その二極化は鮮明であり、ANFO や粒状含水など、装填ホースにより半自動で密装填できる場合は、原単位が 1.0 を超える一方で、紙巻含水の場合は、原単位 0.5 以下が主流となる。以上、図 2-9(a),(b)のプロットから推察すると、各現場では、岩盤等級 B または CI では、より長孔発破となる傾向が強く、装填時間が早い粒状の爆薬（ANFO や粒状含水）を使用する傾向があるため、坑夫が装薬に負担がかからず、やや過装薬気味に装填していることが分かる。一方、岩盤等級が CII や DI など低くなると、紙巻含水を使う現場が多いため、坑夫にかかる装薬の負担が大きくなり、弱装薬気味になることが分かる。

次に、図 2-10(a)~(c)には、穿孔数とトンネル断面積の関係について、著者がこれまでに収集した国内外の発破に関する文献等（たとえば 工業火薬協会,1989, ノルフェー工科大プロジェクトリポート,1995, ジオフロンテ研究会,2014）に記載されていた穿孔数—トン

ネル断面積の関係曲線を示した。また同図には、これらの各曲線に基づいて、穿孔数—トンネル断面積の適切な領域を黄色のハッチングで示した。さらに、著者が収集した実際のトンネル現場の実績を、図 2-10(a)は硬岩、図 2-10(b)は中硬岩、図 2-10(c)は軟岩、でそれぞれプロットした。

これによると、図 2-10(a), (b)の硬岩、中硬岩の場合は、適切な領域とした黄色のハッチングを下回る穿孔数であることが分かる。これは、岩盤が硬くなるとどうしても穿孔速度が低下し、穿孔時間がかかるため、坑夫は穿孔数を減らす傾向であり、その分、前の図 2-9(a)で示したように硬岩、中硬岩の場合（岩盤等級 B, CI, 一部の CII）は、過装薬気味に装薬することで帳尻を合わせた発破を行っていることが分かる。

このように岩盤に適した条件で発破するために重要なパラメータである原単位と穿孔数については、発破に関する文献と、実際のトンネル現場の実績には乖離が見られることは興味深い。おそらく発破工学、岩盤工学的に検討すると発破に関する文献で示した原単位と穿孔数が正しいと思われるが、実際のトンネル現場ではできるだけ早く効率的に掘りたいという実利が優先されたものと考えられる。

表2-1 振動速度と振動レベルの関係（日本火薬工業会, 2002a）

提案者	関係式
佐々	$VL = 20\log V + 91 - (5\sim 15)$
清水	$VL = 20\log V + (81\sim 84)$
北村	$VL = 20\log V + 84$
国松	$VL = VL_S + 8\log(1400/T_t)$ $VL_S = 20\log V + 85 + 10\log(1 - e^{-T_d/\tau})$ VL_S : 単発発破の振動レベル T_t : 秒時差 (ms) 明かり発破: 0.3秒 トンネル発破: 0.15秒 τ : 時定数 (0.63)

表2-2 火薬学会が提言する発破振動の管理値(日本火薬工業会, 2002b)

対象 / 周波数		振動(周波数帯ごと)		
		10Hz未満	10~50Hz	50Hz以上
人 (dB)	昼間	73 (暗振動+30)	79 (暗振動+30)	85 (暗振動+30)
	夜間	58 (暗振動+20)	64 (暗振動+30)	70 (暗振動+30)
構造物 (cm/s)	強度の明確な構造物	1.25	2.5	5.0
	一般構造物(民家)	0.50	1.0	2.0
	重要な構造物	0.25	0.5	1.0

※人を対象とした振動レベルは表中のいずれか小さい方の値を提言値とする

※周波数分析のできない場合は、10Hz未満の値を適用する

表 2-3 過去の構造物に対する振動管理値の例

No.	トンネル名	対象物	規制値
1	中央本線新深沢第二トンネル	既設トンネル覆工、離れ5~20m、	3.0cm/s
2	宮福線トンネル	地滑り土塊	1.0cm/s
3	北陸自動車道岩木トンネル	避難連絡坑の施工	8.0cm/s
4	山陽自動車道欽明路トンネル	既設道路トンネルの上方5 および11m	5.0cm/s
5	山陰本線第1号保津トンネル	老朽化した既設構造物最小離れ19m	2.0cm/s
6	本州~四国間地中洞道工事児島トンネル	既設トンネル	4.0cm/s
7	山陽本線頼兼トンネル	新幹線トンネルとの離れ約23m	2.0cm/s
8	四国横断自動車道平山トンネル	既設水路トンネル	2.6cm/s
9	山陰本線夜久野トンネル	既設トンネル	5.0cm/s
10	第2新神戸トンネル	既設トンネルとの離れ27m	2.0cm/s
11	土讃線大豊トンネル	トンネル直上の転石	3.0cm/s
12	福知山線新奥野々トンネル	既設トンネルとの30m	5.0cm/s
13	一般国道157号6号トンネル(深瀬隧道)	既設導水路トンネルと離れ11.5m	3.0cm/s
14	神戸市横尾団地汚水連絡トンネル	既設トンネルとの離れ10~22m	2.0cm/s
15	北陸本線赤倉トンネル、上越新幹線六日町トンネル	既設トンネル(工事中)と離れ 0.895m	2.5cm/s
16	神戸市道新神戸トンネル(第2六甲山トンネル)	既設送水トンネル(離れ24.5 および17.7m)	2.5cm/s
17	大田川城山トンネル	既設取水トンネルと最小離れ70cmで交差	2.5cm/s
18	山陽新幹線己斐トンネル	既設トンネル	2.5cm/s
19	神戸市高速鉄道第2横尾トンネル	既設送水トンネル(離れ22m)	1.0cm/s

表 2-4 過去の人に対する振動管理値の例

No.	トンネル名	対象物	規制値
1	山陽自動車道入野トンネル	製薬会社離れ17m	0.50cm/s
2	リニア実験線初狩トンネル	民家(離れ130m)	0.03cm/s
3	川平有料道路建設工事昭和トンネル	民家	0.16cm/s
4	宮福線トンネル	民家	0.30cm/s
5	下津井瀬戸大橋急傾斜断面トンネル	民家	0.05cm/s
6	山陽新幹線武田山トンネル	住宅地の下20~70m	0.10cm/s
7	山陽自動車道武田山トンネル	住宅地の下20~70m	0.10cm/s
8	八幡川中小河川改修(トンネル放水路)工事	家屋、学校、配水池	0.20cm/s
9	本四間地中洞道工事児島トンネル	民家	0.02cm/s
10	本四備讃線下村トンネル	民家	0.20cm/s
11	北神急行電鉄北神トンネル	トンネル直上団地(離れ150-190m)	0.03cm/s
12	南海電鉄高野線第1出合トンネル	家屋	1.00cm/s
13	山陽新幹線己斐トンネル	住宅地の下20~70m	1.00cm/s
14	神戸市高速鉄道第2横尾トンネル	団地(離れ70-100m)	1.00cm/s
15	伊集院市大規模団地取付け道路トンネル	住居、墓地、神社(離れ20m)	0.50cm/s
16	静浦1号トンネル	民家	0.20cm/s
17	箕面トンネル(西工事)	民家	0.03cm/s

表 2-5 振動予測式とK 値（日本火薬工業会，2002a）

提案	m の値	n の値	区分		K の値
日本化薬	3/4	2	トンネル 発破	芯抜き	450~900
				払い	200~500
				踏前	300~700
			すかし発破		200~500
			大口径ベンチ発破		100~300
			盤下げ、ゆるめ発破		300~2000
旭化成	2/3	2	トンネル 発破	芯抜き	500~1000
				払い	200~500
			明かり発破		200~500
日本油脂	3/4	1.5	トンネル発破		80±40
			大口径ベンチ発破		20±10
			小口径ベンチ発破		50±30
			明かり発破		50±30

表 2-6 わが国のトンネル発破で使用されている爆薬



爆薬	ANFO	含水爆薬(紙巻)	含水爆薬(粒状)
使用雷管	導火管付雷管	任意	導火管付雷管
装填方法	圧縮空気による機械装填	手による装填が一般的	圧縮空気による機械装填
写真			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・硝安油剤爆薬 ・安価 ・耐水性なし ・後ガスが悪い ・装填の都合上、導火管付雷管を使用 ・機械装填のため、装填時間を短縮できる。また、密装填が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐水性あり ・後ガス良好 ・手で装填が一般的であり、密装填は難しい 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐水性あり ・後ガス良好 ・装填の都合上、導火管付雷管を使用 ・機械装填のため、装填時間を短縮できる。また、密装填が可能

表 2-7 わが国のトンネル発破で使用されている雷管の起爆秒時設定

段数	電気雷管		非電気式雷管			電子雷管
	MS雷管 (ms)	DS雷管 (ms)	ジャベックス HiNEL (ms)	カヤクジャパン i-det (ms)	オリカジャパン EXEL (ms)	
1	0	0	100	100	25	<p>カヤクジャパン 商品名: EDD ・秒時間隔 1ms間隔で任意設定 (標準30ms) ・最大196段 ・最大継続時間8.196秒</p> <p>オリカジャパン 商品名: eDevII ・秒時間隔 1ms間隔で任意設定 (切羽で設定) ・最大500段 ・最大継続時間20秒</p>
2	25	250	200	200	100	
3	50	500	300	300	200	
4	75	750	400	400	300	
5	100	1000	500	500	400	
6	130	1250	600	600	500	
7	160	1500	700	700	600	
8	200	1750	800	800	700	
9	250	2000	900	900	800	
10	300	2300	1000	1000	900	
11	350	2700	1200	1200	1000	
12	400	3100	1400	1400	1110	
13	450	3500	1600	1600	1235	
14	510	4000	1800	1800	1400	
15	570	4500	2000	2000	1600	
16	640	5100	2500	2500	1800	
17	710	5700	3000	3000	2075	
18	800	6300	3500	3500	2500	
19	890	6900	4000	4000	3000	
20	980	7500	4500	4500	3500	
21			5000	5000	4000	
22			5500	5500	4500	
23			6000	6000	5000	
24			6500	6500	5500	
25			7000	7000	6000	
26				7500		
27				8000		
28				8500		
29				9000		
備考	16-20段は特注 オリカジャパンのMS/DS雷管の 起爆秒時差は若干異なる		コネクター一秒時: 0ms、17ms、25ms、42ms 長い秒時はメーカーごとに異なる			

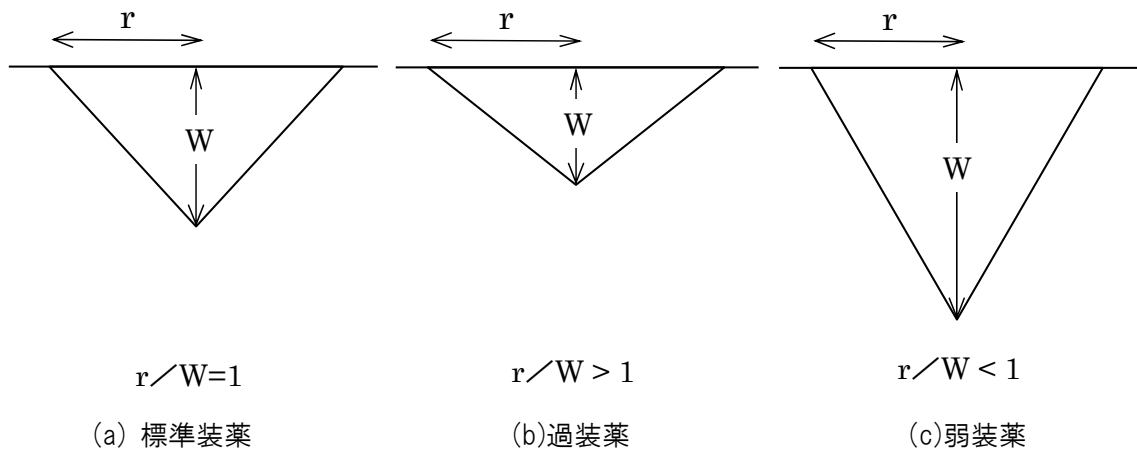


図2-1 装薬量と漏斗孔形状の関係

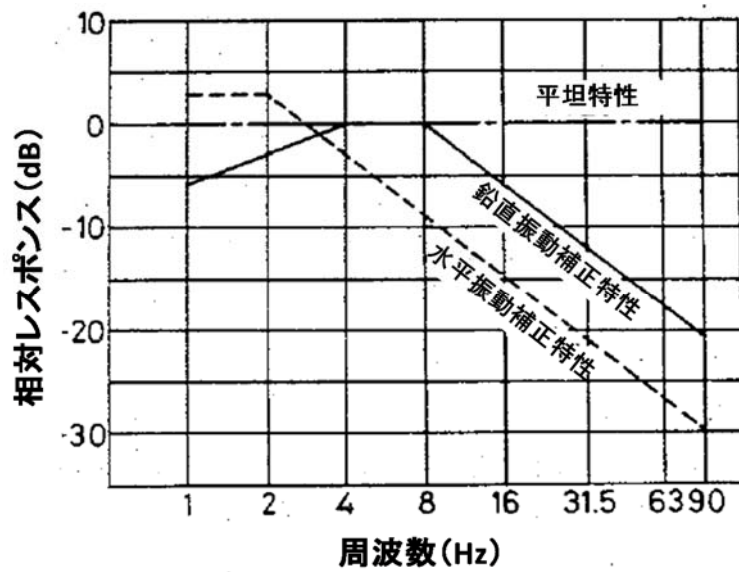


図2-2 振動感覚補正特性 (国松ら, 1988)

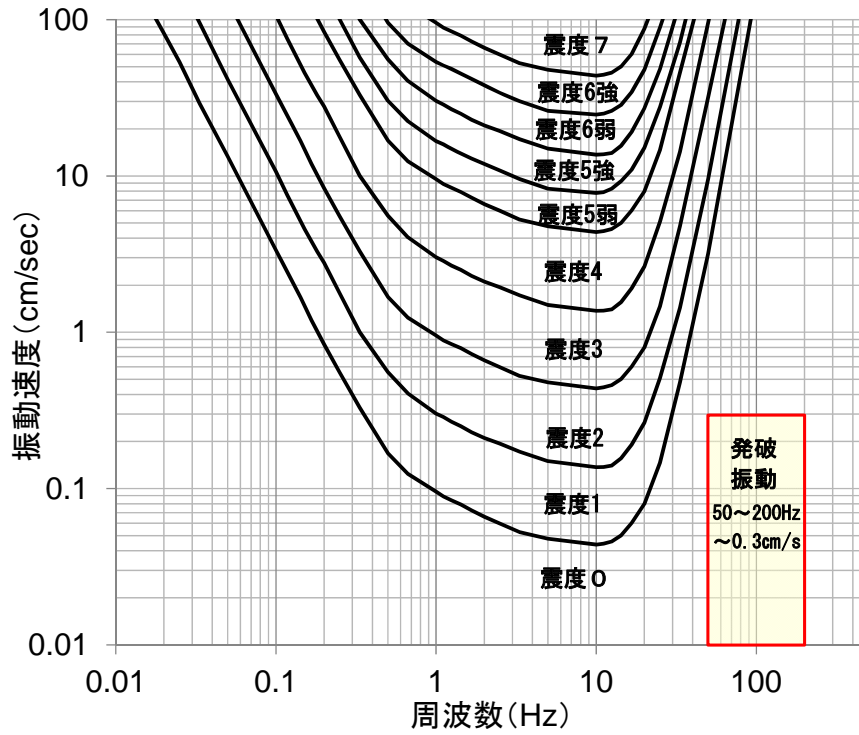


図2-3 周波数および振動速度と震度の関係
(気象庁 HP を修正)

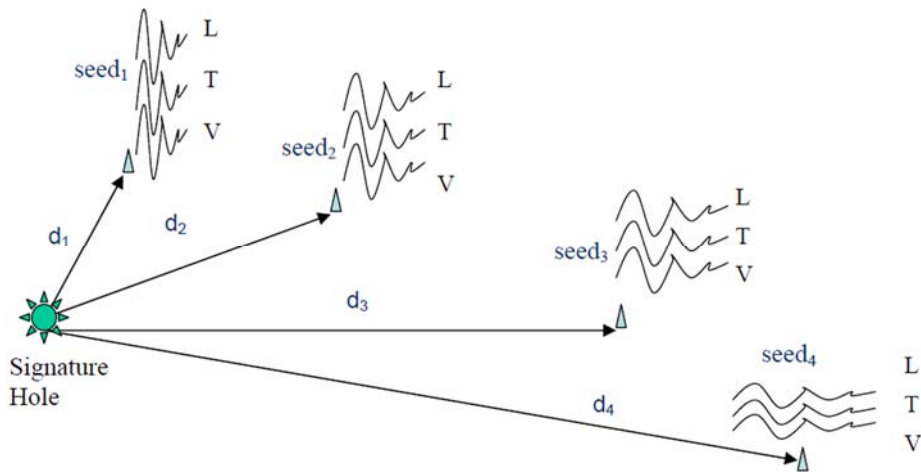


図2-4 MSW (Multi Seed Waveform)における単発波形収録の模式図 (Ruilin Yang ら, 2010)



図2-5 トンネルジャンボ



図2-6 バルクエマルジョン爆薬

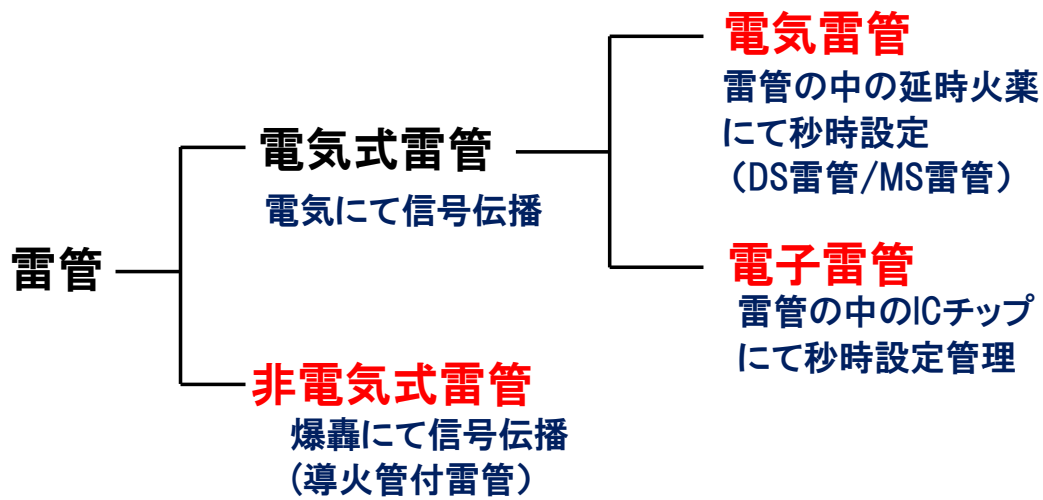


図2-7 わが国のトンネル発破で使用されている雷管の分類

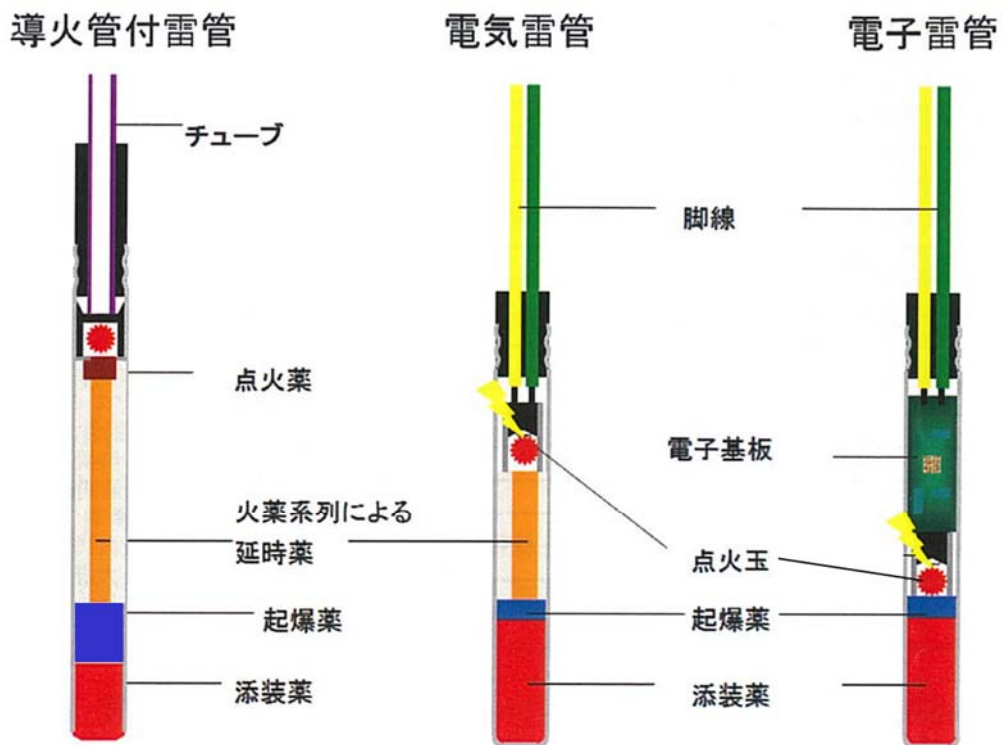
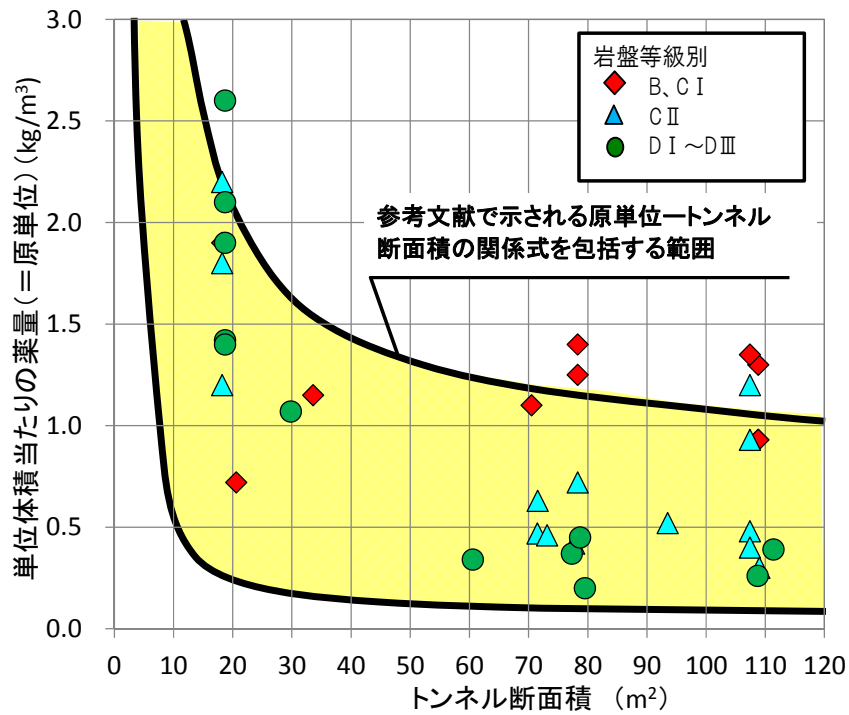
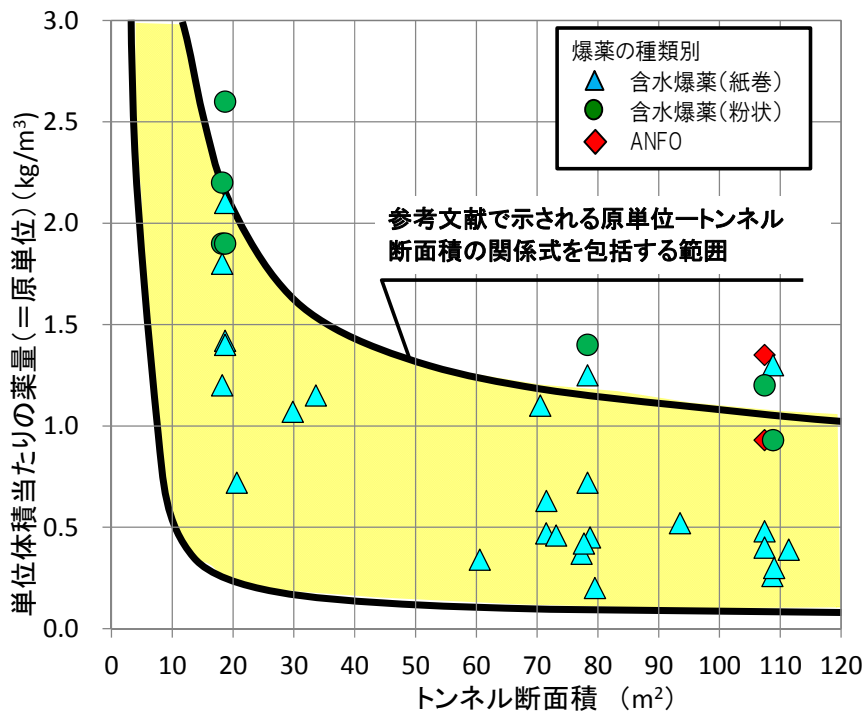


図2-8 各雷管の内部構造

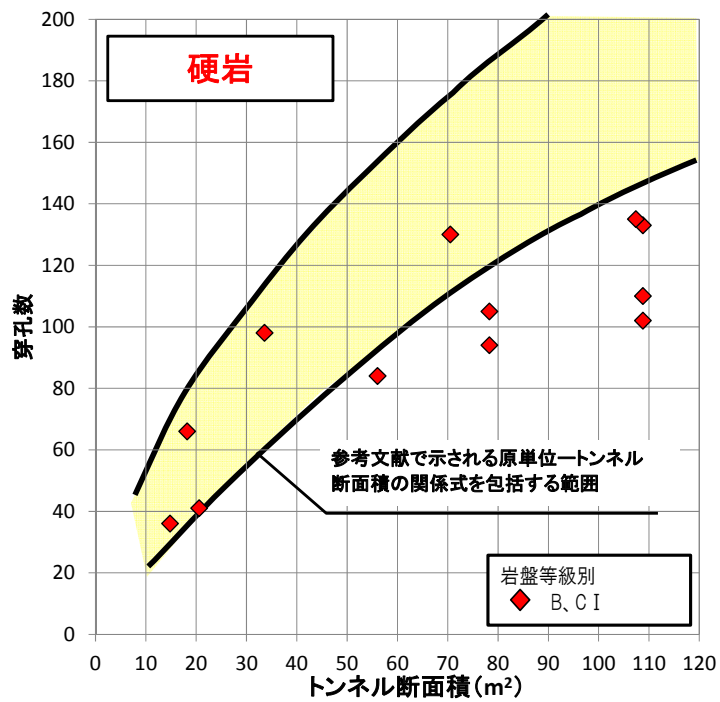


(a) 岩盤等級別

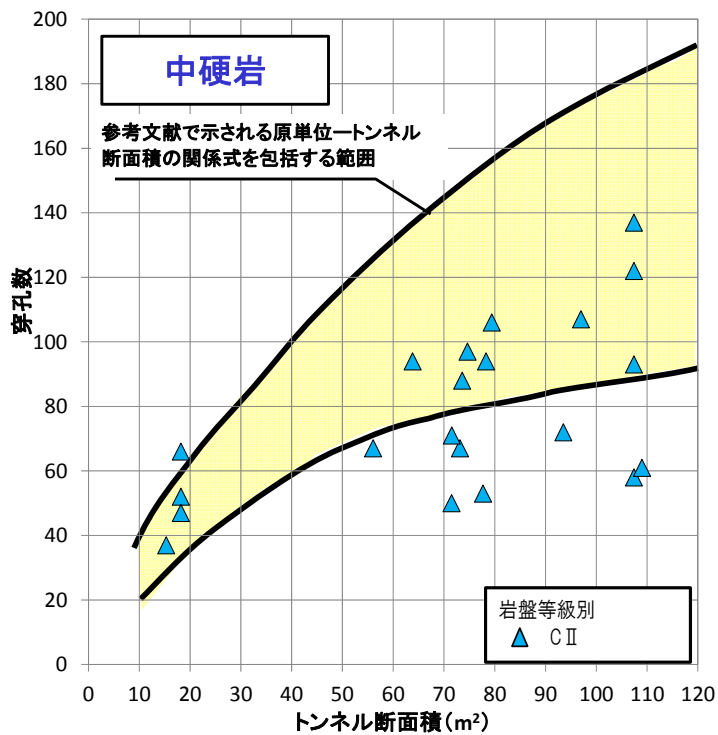


(b) 爆薬種類別

図2-9 トンネル断面積と原単位の関係

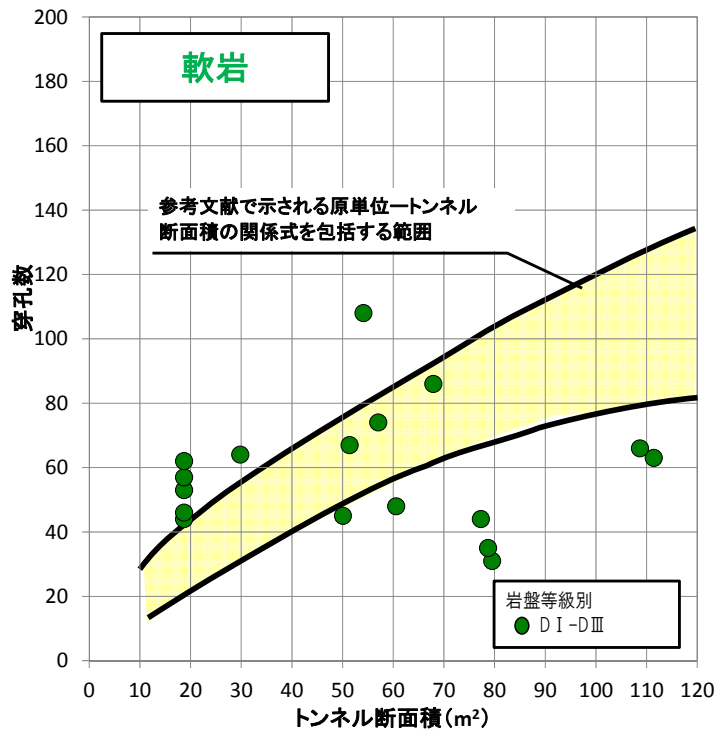


(a) 硬岩



(b) 中硬岩

図2-10 トンネル断面積と穿孔数の関係



(c) 軟岩

図2-10 トンネル断面積と穿孔数の関係

第 3 章 発破振動の特性評価

3.1. 現場試験の概要

3.1.1. 現場概要(安永川トンネル)(豊田市河川課,2015a ,2015b, 2015c)

本研究の一連の発破試験を行った安永川トンネルは、自動車の街として有名な愛知県豊田市中心域の内水氾濫防止を目的として建設された全長 1860m の水路トンネルである(図 3-1)。もともと安永川トンネルは江戸時代の安永年間(1777 年頃)に流域の雨水を矢作川へ排水するために造られたのがその名の由来である。戦後、同市にて自動車産業が急激な発展を遂げるに従い、一級河川矢作川流域のなかで、堤防高よりも低いなべ底地形をなしている地帯に中心市街地が拡大していった(図 3-2)。その後、昭和 47 年や平成 12 年の豪雨災害を受け、断面積が 10m²(高さ 3m×幅 3m)程度で 2 年に 1 回程度降る雨水の排水能力しかなかった当時の安永川トンネルを 10 年に 1 回程度降る雨水(時間雨量 63 mm)にも対応できる大断面トンネルへ改修することになった。同トンネルは、平成 22 年 9 月から平成 27 年 2 月の期間で施工されており、(トンネルの一部工事は平成 20 年より開始)(図 3-3, 3-4)。筆者も同トンネルにおいて平成 23 年 10 月から平成 25 年 10 月の 2 年間、同トンネルに赴任し、トンネル工事を担当した。

本トンネル工事では、①トンネル全線にわたり、最大でも 30m 程度の小土被り区間であること(図 3-5)、②トンネル周辺には民家が密集し、病院や小学校も隣接していること、③地質は一部を除きほぼ全線で非常に硬質な花崗岩(領家花崗岩帯)であること、という大きく 3 つの特徴を有しているため、特に周辺への環境負荷を最小限にする掘削工法が求められた。そのため、図 3-6 に示すように安永川トンネルの扁平型断面(掘削断面積約 70m²)のうち、まず直径 6.82m の TBM(Tunnel Boring Machine)による先行導坑(越川ら,2014)(図 3-7)を掘削後、拡幅掘削として当初、機械掘削(岩野ら,2013)が計画されていた(図 3-8)。しかしながら、図 3-9 に示すように TBM 先進導坑掘削において平均一軸圧縮強度が 120~130MPa と当初想定以上の硬岩であったこと、および施工開始後に火薬消費許可を受領できたことを受けて、掘削速度や施工方法の違いによる振動の大きさやその暴露時間を慎重に検討した結果、トンネル拡幅には、振動時間が極めて短く、切羽進行速度が速い発破掘削が機械掘削に比べ周辺の住環境への負荷が小さくなると判断した。

しかしながら、発破掘削において、夜間掘削停止などの施工時間制限にて住民の負担を軽減する対策を採用したが、図 3-10 に示すように、これまでの国内の工事事例においてもこれほど住宅と近接した発破事例はほとんどないことから、より住民の理解を得られるよう、更に低振動で体感の小さい発破工法が求められた。

3.1.2. 高精度電子雷管の概要

発破振動の低減には一般的に斉発薬量（単孔または複数孔で同じ起爆秒時で起爆する爆薬量）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の起爆秒時を制御する技術が必須となる。我が国の国内のトンネル発破では、粒状爆薬を専用ホースにて装填する際の静電気の帯電対策として非電気式の導火管付雷管が用いられる場合も散見されるものの、依然として紙巻のカートリッジタイプの含水爆薬と DS（デシセカンド）や MS（ミリセカンド）の電気雷管の組み合わせを用いる場合が多い。

これら電気雷管は、価格面で優位である一方で、雷管内の延時薬により起爆秒時を調整しているため、起爆秒時のばらつき（変動係数）は各設定の起爆秒時（段とよばれる）により違いはあるものの、総じて設定起爆秒時に対する実際起爆秒時の変動係数が 2.0%程度にも達し秒時精度が低いため、発破振動のばらつきを制御することが難しい。また、電気雷管は、段数が通常は 15 段（特注により 20 段）までしかないので、通常 100 孔前後のトンネル発破では、複数孔に同じ段の電気雷管を使用することになる。そのため斉発薬量を下げることができず、振動抑制が困難であった。このため電気雷管を用いた発破では、観測される振動値は発破ごとに再現性が低く、場当たりのとなり、住民の発破への理解も得られにくかった。そこで、発破振動をコントロールすることを目的に、高い起爆秒時精度を持ち、海外で多くの実績（Ruilin Yang ら,2011）があるオリカ社の高精度電子雷管（製品名：eDevII（オリカ,2016a））を安永川トンネルの拡幅掘削にわが国で初めて導入した（図 3-11）。この電子雷管は、従来の国内製造メーカーの雷管に比べ以下のような特長を有している。

- ・起爆秒時は内蔵の IC チップで制御されており、起爆秒時の誤差は設定起爆秒時の 0.01% 以下と極めて高い秒時精度を有する。
- ・起爆秒時は、1ms 刻みで設定でき、最大 500 段（孔）、最長 20 秒まで任意の設定が可能である。
- ・現場納入時は起爆秒時の設定がされていない単一製品であり、切羽にて専用スキャナ（図 3-12）を通じて任意の起爆秒時差、起爆順序を設定可能である（図 3-13）。

- ・雷管脚線の末端にプラスチックコネクタが付いており、補助脚線にコネクタを挟むことで簡単に結線ができるため、作業員が切羽に留まる結線作業の時間短縮による安全性向上と結線漏れリスクの低減を図ることができる（図 3-14）。
- ・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。

以上の特長のため、設計の起爆秒時に従った発破が可能になり、発破振動値のばらつきが小さく、再現性が高い発破が期待される。また、通常断面（穿孔数は 100 孔程度）のトンネルの場合、全ての孔に異なる起爆秒時を設定できるため、各孔への装薬量がそのまま斉発薬量となる 1 孔 1 斉発の発破が実現でき、大幅な振動値の低減が期待できる。

3.1.3. 現場試験の概要

(1) 目的

安永川トンネルでは、国内で初めて高精度電子雷管（eDevII）を適用したことを受け、高精度に起爆秒時差をコントロールした場合の振動速度や周波数などの発破振動特性を把握すること、および発破試験以降に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を得ることを目的として、2013 年 9 月から 10 月にかけての 1 か月にわたり発破試験を行った（岩野ら,2014a）（犬塚ら,2014）（岩野ら,2014b）。

(2) 発破試験区間

発破試験は、図 3-15 に示すように直上の旧採石場を中心とする約 100m のトンネル区間において実施した。まず、TD310.0m~320.0m では、1 発破進行長 2.0m を満足する装薬量の決定や、地表の振動計測装置の設置状況の確認を目的とした予備試験を 5 回実施した。次に、TD322.0m~TD387.5m の約 65m 区間を本試験として、27 回の発破を行った。また、最後に本試験のあとの TD387.5~405.0m では、起爆秒時間隔を変えた追加試験を 9 回行った。

(3) 発破試験区間の地質

TBM 導坑壁面の観察記録によると、発破試験が行われた TD310.0~405.0m では、ところどころ割れ目が見られるものの硬質な花崗岩が連続していた。西尾（西尾ら,2015）は、TBM の掘削データからトンネル全区間での岩盤強度を推定しているが、このうち、TD310.0m~405.0m の推定結果を図 3-16 に示す。図 3-16 には、TD378.0m で採取した岩石コアで行われた力学試験（一軸圧縮試験）の結果も併せて示した。この図より、

TD350~360mでは、他と比べて岩石強度がやや大きくなっていると考えられる。

(4)発破試験の諸元

発破諸元を表 3-1 に示す。TD322.0m~TD387.5m の約 65m 区間で行った 27 回の本試験のうち、21 回は、シングルデッキと呼ばれる 1 つの孔に起爆雷管を 1 つ配置する通常行われる方法で発破を行ったが、その他の 6 回については、ダブルデッキと呼ばれる 1 孔に 2 つの起爆雷管を孔奥と手前に配置する方法を用いた。図 3-17 に、シングルデッキとダブルデッキの概念図を示すが、ダブルデッキは、1 起爆当たりの装薬量（斉発薬量）を小さく維持したまま、進行長を長くする特殊な装填方法であり、振動を抑えつつも、発破回数を限定しながら進行を確保することで、近隣住民への負担を小さくする方法として、発破試験区間以降の住宅地近傍などでの適用を念頭に実施した。この時、ダブルデッキにおける同孔内の起爆で殉爆（ほかの爆薬の爆発に感応して爆発する現象）や、死圧（ほかの爆薬の爆発による急激な高圧力で爆発しなくなる現象）を防ぐために、中間込め物は、通常の粘土アンコではなく、砕石を使用した。

全ての発破において平均 100 孔程度のミニベンチ付全断面発破であり、一部のダブルデッキ発破の場合を除き、1 回の発破進行長 2.0m とした。装薬する爆薬は、1 本 200g で紙筒状の含水爆薬（カヤクジャパン社製アルテックス）（カヤクジャパン,2018b）を用いた。この爆薬は薬径 30mm，薬長 253mm，爆速は 5800~6000m/s である。また、進行長 2.0m の通常発破では、孔毎の装薬量を揃えるように努め、各孔には平均の孔装薬量が約 0.8 kg/孔となるようにした。

また、本試験（TD322.0m~TD387.5m）における起爆秒時差は、5ms，10ms，30ms の 3 種類を設定し、各起爆秒時差でそれぞれ 7 発破ずつ合計 21 発破実施した。各 7 発破を行った切羽位置は、図 3-15 にも示したように、各起爆秒時差で発破位置の偏りが無いように、順番に起爆秒時差を変えながら発破を実施した。各発破では、図 3-18 に代表的な振動速度波形を示すように、各発破の最初の起爆 3 孔は起爆秒時差を 500ms と長く設定することで、各孔からの発破振動が重ならない単発波形を収録し、後続する所定の起爆秒時差の段発波形と区別した。本試験のうち、9/30AM~10/2AM の 3 回と 10/7AM~10/9AM の 3 回の合計 6 回は、ダブルデッキにて発破を行い、起爆秒時差は 5ms に統一し、装薬量は 0.8kg/孔で 4 回、0.4kg/孔で 2 回実施した。

最後の追加試験（TD387.5~405.0m）では、本試験とは異なる起爆秒時差として 3ms，7ms，15ms の 3 種類を各 3 回行った。

図 3-19 (a)~(d)に発破試験に関連する施工ステップの状況写真を示す。

(5) 発破パターン

安永川トンネルの発破では、図 3-20 に代表的な発破パターンを示すように、直径 6.82m の TBM 導坑の周りに 100 孔程度を穿孔した。設計の孔間隔は、周方向が 0.8~0.9m、半径方向が 0.6~0.8m としているが、切羽の岩盤条件に応じ、現場作業員の経験に基づく判断で穿孔しており、実際の穿孔位置や穿孔数は設計と異なる。また、安永川トンネルの発破では、TBM 先進後の拡幅掘削であり、芯抜き部がないため、発破振動の面で有利に働く。また、高精度電子雷管による 1 孔 1 斉発ができるため、発破振動に大きく寄与する斉発薬量は最小単位となる孔装薬量と同じとなる。その起爆順は図 3-20 に示すように、切羽の上から下に向かいブロックごとに起爆する特徴のある起爆順である。

(6) 発破振動の計測方法

発破振動の計測は、計測点として地上の 2 点に 3 成分振動速度計を配置した。2 点は、トンネル直上 (TD365m, 以下, 計測点 A) およびトンネル進行方向左側の自転車道沿線 (TD395m, 以下, 計測点 B) とし、図 3-15 にその位置を記載した。計測点 A (図 3-21) は、土被り 10m 程度で、かつて採石場として利用されていたため、地表まで花崗岩で覆われている。

一方、計測点 B (図 3-22) もかつての採石場の跡であるが、少なくとも確認できた地表から 50 cm 程度までは表土に覆われている。配置した振動速度の計測器 (図 3-23) は表 3-3 に示す諸元の 3 成分振動速度計 (Instantel 社製, Minimate Plus) (Instantel Inc. 2013) とした。ただし、住宅地直下のトンネルにおける発破振動であり、人の体感は鉛直成分が最も敏感である (産業環境管理協会, 2010c) ことから、本研究では、鉛直成分 (鉛直下向きが振動速度プラス方向) を中心に検討することとした。

3.2. 試験結果の概要

3.2.1. 段発発破

(1) 電子雷管による起爆秒時差と振動波形, 周波数の関係

1 回の発破のうち、最初の 3 孔の単発発破の分を除いた段発発破について、それぞれ 5ms, 10ms, 30ms の代表的な振動速度波形と周波数スペクトルを図 3-24 に示した。表 3-4 には、図 3-24 に示した代表的な発破の条件を示しているが、平均薬量や孔数はともにほぼ同じである。

今回、適用した高精度電子雷管は、起爆秒時を1孔1斉発で設定できるだけでなく、従来の電子雷管と異なり、起爆秒時が工場出荷時に事前設定されておらず、切羽にて任意の起爆秒時を設定できる特長を有している。従って、装薬後に各孔の起爆秒時を設定できるため、起爆秒時が飛び飛びの値になることはない。そのため、図3-24の発破継続時間（振動速度波形の継続時間）は、概ね（設定起爆秒時差）×（孔数）となっている。また、その周波数スペクトルは、設定した起爆秒時差（5ms, 10ms, 30ms）の逆数（例えば起爆秒時差30msの場合、 $1s \div 30ms = 33.3Hz$ ）にピークが現われており、高精度電子雷管により、起爆秒時差が制御されていることがわかる。

(2) 伝播距離と振動速度の関係(振動予測式)

図3-25(a), (b)に、計測点A, Bそれぞれにて観測された段発発破の最大振動速度と切羽TDの関係を示す。いずれの計測点においても、切羽が計測点設置位置のTDに近づくと最大振動速度が増加する関係が見られる。トンネル直上の観測点Aでは、観測点Aの直下を中心として、その前後の最大振動速度の分布が対称となっているが、観測点Bでは、観測点の位置を通過後は、通過前に比べ最大振動速度の低下割合が大きいように見える。これは図3-5の縦断図に示すように、発破試験区間の先方には地盤改良区間もあったこともあり、観測点B(TD395m)より先方は、発破試験区間全体を占めている硬質な花崗岩に対し、地質が異なったこともその要因の1つと考えられる。

次に、同じく図3-25(a), (b)にて最大深度速度の各成分（鉛直・進行・横断）と切羽TDの関係について見てみる。計測点Aはトンネル直上に配置しており、切羽位置と計測点Aを結ぶベクトルの方向は切羽TDが計測点Aに近づくとつれ順次変わっていくため、例えば切羽位置が計測点Aから遠い位置の場合は水平成分（進行・横断）が卓越し、切羽位置が計測点Aの直下に近づくとつれ鉛直成分が卓越するなどの傾向がみられると想定された。しかし図3-25(a)を見る限り、切羽TDと各成分（鉛直・進行・横断）の卓越性には特徴的な相関は見られない。これは振動波形が切羽から計測点Aに向かうベクトルの直接波（実体波）だけで決定されず、実体波や表面波など複雑な伝播経路を経た波形も複合された波形であることが原因と考えられる。

次に、図3-26に、計測点A, Bそれぞれの最大振動速度と斜距離の関係を、成分（鉛直・進行・横断）ごとに整理した。いずれの計測点の成分も斜距離が小さいほど最大振動速度が大きくなる傾向は同様であるが、計測点A, Bともに、べき関数にて近似した場合、鉛

直成分が最も決定係数が大きく、ばらつきが小さいことがわかる。

さらに最大振動速度と斜距離の関係をより詳細に検討するため、人の体感は鉛直成分が最も敏感である鉛直成分に限定し、最大振動速度と斜距離の関係を起爆秒時差ごとに分類して図 3-27 (a), (b)に示した。

切羽位置と計測点までの斜距離を振動が伝播する最短距離としてこれを伝播距離とすると、これまで伝播距離と振動速度の関係は、(3-1)式で示すいわゆる振動予測式が最もよく用いられている（土木工学社, 2007）。

$$V = K \frac{W^m}{D^n} \quad (3-1)$$

ここで V : 最大振動速度 (PPV: Peak Particle Velocity) (cm/s) , K : 発破方法や岩盤の特性などによって変化する係数, いわゆる K 値, W : 斉発薬量 (kg) , D : 伝播距離 (m)。また式中の m は 0.5~1.0 の範囲, n は 2.0 とすることが国内火薬メーカーから提唱されている（日本火薬工業会, 2002a）。図 3-27 (a), (b)には, 提唱されているうちの 1 つである m=0.75, n=2.0 に固定した振動予測式を赤線で示した。この場合, K 値は, トンネル直上の計測点 A では, 全発破では K 値=241 (起爆秒時差ごと (5ms, 10ms, 30ms) の整理では, K 値=220~257) であったのに対し, トンネルから最短でも 35m の離れとなる計測点 B では, K 値=1373 (起爆秒時差ごとの整理では, K 値=1287~1495) となった。この振動予測式 (赤線) では, 少なくとも伝播距離が比較的小さい地点にデータが集中している計測点 A においては, 振動予測式ラインとプロットが合致しておらず予測式として適しているとは言えないと思われたため, 同図に振動予測式を 1 つ追加した。いずれの発破も斉発薬量をほぼ 0.8 kg/孔でほぼ一定であることから, m=0.75 を固定する一方で, n については K 値とともに未知数として重回帰にて求めた振動予測式を黒線で示した。この場合, K 値は計測点 A で K 値=21 ((起爆秒時差ごとの整理では, K 値=16~25), 一方, 計測点 B では K 値=4335 ((起爆秒時差ごとの整理では, K 値=774~6441) と大きく差異が生じた。しかし, 振動予測式ラインとプロットは, m=0.75, n=2.0 を固定した振動予測式 (赤線) に比べると特に伝播距離が小さい計測点 A では, 伝播距離の指数 n も未知数として求めた振動予測式 (黒線) のほうがより合致していることが分かる。

K 値については, 上記のように同じ発破によっても計測点が異なるとは大きな違いを生じているが, もともと K 値とは切羽-計測点間の振動伝播特性や, 起爆条件 (起爆秒時の精度等), 計測点の振動速度計の固定条件など各現場の発破条件の違いを全て包含した定数

であると考えられることから、同じ発破であっても、計測点によって K 値が大きく変動するのはごく当然であると考えられる。発破試験を実施していないトンネル現場で、文献等で提唱される芯抜き孔や一般孔などの孔位置ごとの代表的な K 値や、他現場で求められた K 値を参考にして、K 値を推定して振動を予測することの意義は小さいと考えられる。

振動予測式の指数 n については、伝播距離の指数 n を未知数として求めた振動予測式（黒線）において、 n は、計測点 B では $n=2.13$ （（起爆秒時差ごとの整理では、 $n=1.87\sim 2.37$ ）と距離の約 2 乗に反比例しており、国内メーカ提唱の値 $n=2$ にほぼ一致したのに対し、トンネル直上の計測点 A では $n=1.09$ （（起爆秒時差ごとの整理では、 $n=1.03\sim 1.13$ ）と、距離の約 1 乗に反比例する結果となった。地盤中を伝播する際に、エネルギーが失われていく内部減衰項を無視し、幾何減衰のみを考慮した場合、理論的な波の伝播は図 3-28 に示すように実体波は距離 D に対し、弾性体の媒体中は $1/D$ 、半無限弾性体の表面付近では $1/D^2$ に比例して減衰していく（産業環境管理協会, 2010d）。従来の発破では伝播距離が最短でも 50m、一般に 100m を超える場合がほとんどであるのに対し、今回の点 A のような最小伝播距離が 10m 程度の近接地点での計測事例がほとんど報告されていない。伝播距離がある程度長い場合には、主に発破振動は地表面を伝わるため、伝播距離 D の指数である n は、概ね 2.0 で固定しても差し支えない条件であったと考えられるが、計測点 A では直接、地中を伝播した経路が卓越し、 n が 1.0 に近い値となったと考えられる。

(3) 伝播距離と振動速度波形の卓越周波数の関係

今回適用した電子雷管により、高精度に起爆秒時差を制御できているため、振動速度波形の卓越周波数は、設定した起爆秒時差 (5ms, 10ms, 30ms) の逆数 (それぞれ 200Hz, 100Hz, 33.3Hz) の整数倍あるいは 1/整数倍になることが予想された。図 3-29 に、斜距離と振動速度波形の卓越周波数の関係を設定した起爆秒時差ごとに分類して示す。起爆秒時差が 10ms, 30ms の場合では、ほとんどの発破で起爆秒時差の逆数の整数倍に相当する周波数が卓越周波数になっている。実際に、図 3-30 に、起爆秒時差 30ms の場合の段発発破の振動波形を拡大したものを示すが、ほぼ 30ms ごとに各孔から順に発せられたと想定される波形のピークが得られており、精度よく起爆が行われたと考えられる。

一方、図 3-29 において起爆秒時差が 5ms の場合は 5ms の逆数に相当する 200Hz あるいはその 1/整数倍 (例えば 100Hz や 50Hz) の卓越周波数となっているケースが約半数に留まっている。

5ms の場合に起爆秒時差の逆数の卓越周波数が約半数に留まっている理由としては、起爆秒時差が 5ms と短いため、各孔からの振動速度波形が収束しないうちに次孔の発破が行われ、波形同士が重なりやすく、各孔からの振動速度波形が明確に区分しにくい状態であったことや、切羽から計測点までの間の地山が 200Hz の周波数の振動に追随できなかったことなどが考えられる。実際に、卓越周波数が起爆秒時差の逆数の整数倍または 1/整数倍 (200Hz, 100Hz, 50Hz) とならなかったケースは、図 3-31 に示すように、その卓越周波数は単発発破で得られた卓越周波数と近い値を示しており、地山の固有周波数が卓越周波数になっていることがわかる。

3.2.2. 単発発破

(1) 伝播距離と振動速度の関係

図 3-32 に単発発破の各成分 (鉛直, 進行, 横断) と切羽 TD の関係を示す。単発発破は、各発破で最初の 3 孔分の起爆秒時差を長くすることでその振動速度波形を収録しているが、発破によっては、2 孔目, 3 孔目の振動速度波形の振幅が 1 孔目に比べかなり小さくなっている場合がある。そのため、図 3-32 には、同条件とするため各発破の 1 孔目のみをプロットしている。なお、2 孔目, 3 孔目の単発発破の振動速度波形の振幅が小さくなる場合がある理由は、図 3-20 に示すように最初の 3 孔は、TBM 先進導坑の天端付近に配置しているため、前孔 (1 孔目) の起爆により周囲の岩盤が既に破壊・落下し、2 孔目, 3 孔目は空中で起爆したためであると考えられる。

図 3-32 を見ると、計測点 A, B とともに、切羽が計測点設置位置の TD に近づくと最大振動速度が増加する関係が見られるが、図 3-25 に示した段発発破の場合に比べるとそのばらつきは大きい。また計測点 A, B とともに、段発発破の場合と同様に、3 成分 (鉛直, 進行, 横断) の最大振動速度の傾向の明確な差異は見られなかった。

図 3-33 に単発発破の最大振動速度と斜距離の関係を示した。また、同図に段発発破の最大振動速度も重ねて示した。これにより以下の点が言える。

①単発発破の孔薬量が発破によって 0.4 kg/孔, 0.6 kg/孔, 0.8 kg/孔と異なっているが、その孔薬量による振動速度の差異は明確には見られない。これは、孔薬量の差異よりも、各単発発破孔周辺の地山の硬さや風化状況、割目状況など地山状態や、装填時の詰め物などの条件の方が最大振動速度の大きさに与える影響が大きいためであると考えられる。

②計測点 A, B とともに、段発発破の最大振動速度は、単発発破の最大振動速度のプロットの

上端の包絡ラインにはほぼ一致している。この理由は、段発発破の場合は 100 孔程度ある各孔からの最大振動速度（約 100 個の最大振動速度）のうちの最大値を選択するのに対し、単発発破の場合は 1 孔目の振動速度の最大振幅をプロットするため、たまたま 1 孔目の位置の地質が良くない場合などの偶発的な条件がそのまま結果に反映されるためであると考えられる。

(2) 伝播距離と振動速度の卓越周波数の関係

図 3-34 に単発発破の振動速度波形の卓越周波数と斜距離の関係を示した。同図から、以下の 4 点のことが言える。

- ①計測点 A, B とともに、3 成分の間で卓越周波数に大きな違いは見られない。
- ②計測点 A, B とともに卓越周波数は 200Hz を超えるケースは見られない。
- ③卓越周波数は、計測点 A に比べ計測点 B の方が、ばらつきが小さい。
- ④計測点 A について、発破する切羽 TD が計測点 A を過ぎると、卓越周波数が低下する。

①について 3 成分の間で卓越周波数に大きな差異が見られないのは、3.2.1(2)の段発波形の場合でも示したように、単発波形も切羽から計測点に向かうベクトルの直接波（実体波）だけで決定されず、複数の成分が複合された波形であることが原因と考えられる。

②について、卓越周波数が 200Hz を超えないのは、3.2.1(3)で述べたように振動伝播の媒体である地山が 200Hz 以上の周波数の振動に追従できなかったためと考えられる。特に計測点 B が計測点 A に比べ全体的に卓越周波数が小さいのは、計測点 B は地表に表土が 50cm 以上覆われているなど、計測点 A よりも軟いためであると考えられる。また同様の理由で③についても、計測点 A では追従できる 200Hz 以下程度の周波数成分が計測点 B は軟い地盤のためその振動に追従できず、結果としてばらつきが小さく見えたものと考えられる。逆に言えば図 3-34(b)から、計測点 B は 120~130Hz 程度が振動として追従できる限度であると考えられる。また④について、切羽 TD が計測点 A を過ぎるとそれまでの 100-130Hz から 40-50Hz と低くなる。切羽 TD に従い卓越周波数に変化していくのは、トンネルの各発破地点と地表の計測点との間の伝播距離、伝播経路の地質や地表形状の変化が起因していると考えられる。その場合、震源から近傍では高周波成分が卓越し、遠距離になるほど、低周波成分が残存すると想定されたが、全くその逆の傾向であった。図 3-35 に遠方（TD328.0）と近傍（TD370.0）の単発波形を示したが、確かに近傍の方が、同じ時間あたりの波数が少なく、卓越周波数が低いことがわかる。

(3) 単発発破の振動速度波形

図 3-35 に示した単発波形を見ると、特に近傍 (TD370.0) の単発波形は、複数の成分の波形が重なって 1 つの単発波形を形成しているように見える。孔内で起爆し、周囲に伝播する単発波形は、下記に示す複数の要因により、震源からの P 波、S 波の直接波にその反射波や表面波も複雑に混在し 1 つの単発波形を形成しているものと考えられる。

①各成分の卓越性の観点から検討する。3.2.1(2)の段発波形の場合でも述べたように、単純に単発波形が P 波や S 波の直接波のみで構成されると仮定すると、切羽が計測点 A から遠く離れた場合は、振動波形が計測点 A に対し水平に対し浅い角度で伝播するため水平成分が卓越し、計測点 A の直下に近づくにつれ、鉛直成分が増す傾向がみられると考えられる。しかしながら図 3-32 の各成分の単発波形の最大振動速度ではその傾向が明確でなくそのような単純な成分の構成でないことが考えられる。

②各成分の伝播速度や伝播時間の観点から検討する。P 波速度は図 3-36 に示すように同じく安永川トンネルの坑内において行った弾性波速度試験によると、P 波速度はおよそ 5000m/s であることが分かっている。弾性波である場合、P 波速度 V_p 、S 波速度 V_s の比はポアソン比 ν により(3-2)式で示される。

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (3-2)$$

従って、ポアソン比により異なるものの(3-2)式よりおおよそ $V_s/V_p = 0.5 \sim 0.6$ となるため、ここで S 波を 2500m/s 程度と仮定すると、切羽 TD が計測点 A 直下の場合では、伝播距離が 10m であるため、P 波と S 波の直接波の計測点 A への到達時間差は、2ms 程度しかないことが分かる。図 3-35 に示した単発波形を見ると、30~40ms の振動継続時間であるため、この単発波形には、P 波と S 波の直接波が混在していることが分かる。さらに到達時間から考えると P 波や S 波の反射波および表面波も複雑に混合されていると考えられ、明確に分離することは難しいと考えられる。

図 3-37 には TD328.0, TD353.5, TD370.0 のそれぞれの発破における 3 つの単発発破の振動速度波形を重ね合わせたものを示す。いずれにおいても、3 つの単発発破の振動速度波形は非常によく一致していると言える。前述したように、前孔 (1 孔目) の起爆により、2 孔目、3 孔目は空中で起爆し、2 孔目、3 孔目の振動速度波形が小さい場合は同様の傾向は言えないが、2 孔目、3 孔目の振動速度波形の振幅が 1 孔目と同等の場合、3 つの単発発

破の振動速度波形が非常によく一致している場合がほとんどであった。これは起爆孔の条件（地山状態、装填状態）や、振動伝播経路が同じ場合は、ほぼ同じ振動速度波形が得られ、再現性が高いことを示している。特に今回は図 3-20 に単発孔の配置を示したように単発用の 3 孔は隣接し、地山条件がほぼ同じであるとみなせることからより一層、単発波形の形状が類似していることも考えられるが、同一切羽の発破で、その切羽面内の地山条件がほぼ均質とみなせる場合には、単発発破の振動速度波形を取得すれば、波形の形状自体はその同じ発破の代表データとして取り扱うことができると考えられる。

単発発破の振動速度波形の振幅のばらつきを検討するため、図 3-38 に起爆秒時差 30ms の場合の段発発破の振動速度波形を 30ms ごとに区切った区間の最大値のプロットを示した。図 3-37 で示した単発発破の振動速度波形では、起爆後 30ms 以降、振動が収束に向かっていていると考えられるため、起爆秒時差 30ms の段発発破の振動速度波形の 30ms ごとの区間の最大値は、各孔からの単発発破の振動速度波形の最大値と見なせると考えられる。

図 3-38 では、TD328.0、TD335.0、TD345.5、TD385.0 の 4 発破について、それぞれ計測点 A、計測点 B の結果を重ねて示しているが、TD385.0 を除く 3 発破について、計測点 A、計測点 B の振動速度の最大値プロットがシンクロしている。つまり、この 3 発破については、各孔からの振動速度の最大値のばらつきは、振動伝播経路の違い（計測点 A、計測点 B）の要因よりも、起爆孔の条件（地山状態、装填状態）の要因の方が大きいことがわかる。一方、TD385.0 が、他発破と異なり両計測点のプロットがシンクロしているとはいえない状況となっているのは、TD385.0 付近は、特に計測点 B の振動伝播経路の地盤状況がこれまでの発破位置と比べ異なっていたためであると考えられる。

3.2.3. 振動速度と振動レベル

今回の発破試験では、計測点 A、B それぞれにおいて、振動速度波形だけでなく、振動レベルの計測も行った。図 3-39 には計測点 A、B それぞれの振動速度と振動レベルのプロットを示した。この時、両者の関係を以下の式で近似した。

$$VL = 20 \log(PPV) + \alpha \quad (3-3)$$

このとき、VL：振動レベル、PPV：振動速度、 α ：定数である。この場合、定数 α は計測点 A で $\alpha=77.5$ 、計測点 B で $\alpha=75.7$ となった。

これまでの研究で研究者によって若干異なるが、定数は 83~84 としている場合が多い（日本火薬工業会、2002a）。国松（国松ら、1989）によると、振動継続時間を無限大とした場合

$\alpha=91$ だが、実際の発破振動の振動継続時間を基に補正を加え、 $\alpha=91$ から $5\sim 10\text{dB}$ 減じた $\alpha=81\sim 86$ となるとしている。今回の発破試験で得られた定数は、これまでの研究に比べ、 $6\sim 7\text{dB}$ 小さい。もともと(3-3)式では、これらは電気雷管 (DS 雷管) による発破に基づいた換算をしているが、今回、定数 α がこれまでの研究よりも $6\sim 7\text{dB}$ 小さくなったのは、高精度電子雷管により、振動継続時間が短縮されたことが起因していると考えられる。図 3-40 に示したように、振動継続時間が短くなると、人は振動を小さく感じるようになってくる (産業環境管理協会, 2010c)。従って、発破振動を一瞬というほどの短時間で完了させることは、人感補正がなされている振動レベルが小さくなるため、住宅の近接発破などにおいて有効であることが示された。

3.3. 3章のまとめ

本章では、実際に著者が現場担当者として従事したトンネル現場にて行った発破試験の概要を述べたのち、高精度電子雷管を用いた発破試験を本格的に行った事例が国内外を含めこれまでみられなかったことから、まず高精度電子雷管による発破の特徴の整理し、さらに収録した振動データについて最大振動速度や振動速度波形の分析を行った。発破試験は 1 カ月にわたり、約 100m 区間に対し起爆秒時差を変えて発破のデータ収録を行った。また各々の発破の起爆孔の最初の 3 孔は起爆秒時差を大きく空け、完全な形の単発波形を収録した。また発破振動の収録地点の 1 つはトンネル直上 10m 程度と従来にないほど近距離に配置した。

高精度電子雷管による発破の振動速度波形は、拡大した波形が正確に設定した起爆秒時ごとにピークが出現し、その周波数スペクトルでは起爆秒時差の逆数で正確に周波数ピークが現われるなど、精度の高い起爆秒時の制御がなされていることを明らかにした。また近距離に配置した振動収録地点では、従来の振動予測式の提唱と異なり、最大振動速度が伝播距離 D の 1 乗に反比例する結果が得られており、過去にこれほど近距離での発破振動データを整理した事例はほとんどなく、貴重なデータであると言える。また単発波形については、同じ切羽の発破で得られる複数の単発波形の形状の再現性が高く、次章以降の振動速度波形の再現法の検討に資する条件が整っていることを確認した。

表3-1 試験発破の諸元

	実施位置	実施内容
予備試験	TD310.0 m ～ TD322.0 m	【シングルデッキ】 5発破 発破条件を固定 <進行長> 2.0 mに固定 <装薬量> 0.8 kg/孔にできる限り固定 <孔数> 平均100孔程度 <穿孔径> 45 mm <起爆秒時差> 5 ms に固定
本試験	TD322.0 m ～ TD387.5 m	【シングルデッキ】 21発破 起爆秒時差を変更 <起爆秒時差> 発破ごとに5 ms/10 ms/30 msにそれぞれ7発破 (3つの秒時差×7発破 = 合計21発破)
		【ダブルデッキ】 6発破 ダブルデッキを適用 <進行長> 4.0 m(1孔装薬量 0.8 kg+0.8 kg) 4発破 2.0 m(1孔装薬量 0.4 kg+0.4 kg) 2発破 <起爆秒時差> 5 ms に固定
追加試験	TD387.5 m ～ TD405.0 m	【シングルデッキ】 6発破 起爆秒時差を変更 <起爆秒時差> 発破ごとに3 ms/7 ms/15 msにそれぞれ3発破 (3つの秒時差×3発破 = 合計9発破)

表3-2 各発破試験の諸元

日時		切羽TD (m)	斜距離 (m)		シングル デッキ(S) or ダブル デッキ(D)	秒時差 (ms)	孔数	単発発破 装薬量 (kg)	段発発破 装薬量 (kg/孔)
			計測点① (直上)	計測点② (沿線)					
9月17日	AM	322.0	44.40	81.14	S	5	102	0.40	0.73
9月18日	AM	325.5	41.00	78.00	S	10	96	0.40	0.74
9月18日	PM	328.0	38.59	75.78	S	30	77	0.60	0.72
9月19日	AM	330.5	36.18	73.57	S	5	100	0.80	0.78
9月19日	PM	332.5	34.26	71.82	S	10	96	0.40	0.76
9月20日	AM	335.0	31.88	69.66	S	30	92	0.60	0.77
9月23日	AM	337.0	29.99	67.94	S	5	93	0.80	0.79
9月23日	PM	339.0	28.12	66.23	S	10	82	0.40	0.80
9月24日	AM	342.0	25.34	63.71	S	30	96	0.60	0.80
9月24日	PM	344.5	23.07	61.64	S	5	76	0.80	0.66
9月25日	AM	345.5	20.42	59.21	S	30	85	0.60	0.78
9月25日	PM	347.5	22.18	60.83	S	10	89	0.40	0.78
9月26日	AM	349.5	18.71	57.61	S	5	116	0.80	0.77
9月26日	PM	351.5	17.06	56.04	S	10	99	0.40	0.78
9月27日	AM	353.5	15.49	54.50	S	30	100	0.60	0.78
9月27日	PM	356.0	13.70	52.62	S	5	97	0.80	0.79
9月30日	AM	357.5	12.74	51.51	D	5	110	0.80	1.64
10月1日	AM	362.5	10.49	47.98	D	5	99	0.80	1.50
10月2日	AM	366.0	10.17	45.68	D	5	116	0.40	0.77
10月3日	AM	368.0	10.53	44.43	S	10	102	0.40	0.77
10月3日	PM	370.0	11.24	43.24	S	30	110	0.60	0.81
10月4日	AM	372.0	12.24	42.12	S	5	97	0.80	0.77
10月4日	PM	373.5	13.14	41.31	S	10	112	0.40	0.80
10月7日	AM	375.5	14.50	40.31	D	5	94	0.80	1.76
10月8日	AM	379.5	17.60	38.53	D	5	111	0.40	1.45
10月9日	AM	383.0	20.57	37.26	D	5	90	0.40	0.86
10月10日	AM	385.0	22.34	36.66	S	30	133	0.60	0.75
10月10日	PM	387.5	24.60	36.06	S	15	98	0.80	0.69
10月11日	AM	388.5	25.52	35.86	S	15	108	0.80	0.79
10月14日	AM	390.5	27.38	35.56	S	15	90	0.80	0.70
10月14日	PM	392.0	28.78	35.40	S	3	76	0.80	0.81
10月15日	AM	394.5	31.14	35.27	S	3	98	0.80	0.79
10月15日	PM	396.5	33.04	35.30	S	3	105	0.80	0.76
10月16日	AM	398.0	34.47	35.40	S	7	96	0.80	0.76
10月16日	PM	400.0	36.39	35.62	S	7	71	0.80	0.81
10月17日	AM	402.5	38.80	36.06	S	7	101	0.80	0.79

表3-3 振動速度計の諸元 (Instantel. Inc, 2013)

機器名	Minimate Plus
製造元	Instantel社
測定レンジ	25.4 cm/s
分解能	0.0127 cm/s
精度	±5 % or 0.05 cm/s in 4-125 Hz
周波数範囲	2-250 Hz
サンプリング周波数	1024 Hz

表3-4 設定起爆秒時差ごとの代表的な発破条件

起爆秒時差	発破位置	総薬量	孔数	平均薬量
5 ms	TD342.0 m	77.0 kg	96 孔	0.80 kg/孔
10 ms	TD332.5 m	73.4 kg	96 孔	0.76 kg/孔
30 ms	TD337.0 m	73.2 kg	93 孔	0.79 kg/孔



図3-1 安永川トンネル 航空写真 (豊田市河川課, 2015c)



図3-2 安永川トンネル流域の状況（豊田市河川課，2015a）



図3-3 安永川トンネル 秋葉側坑口(上流側)



図3-4 安永川トンネル 水源側坑口(下流側)

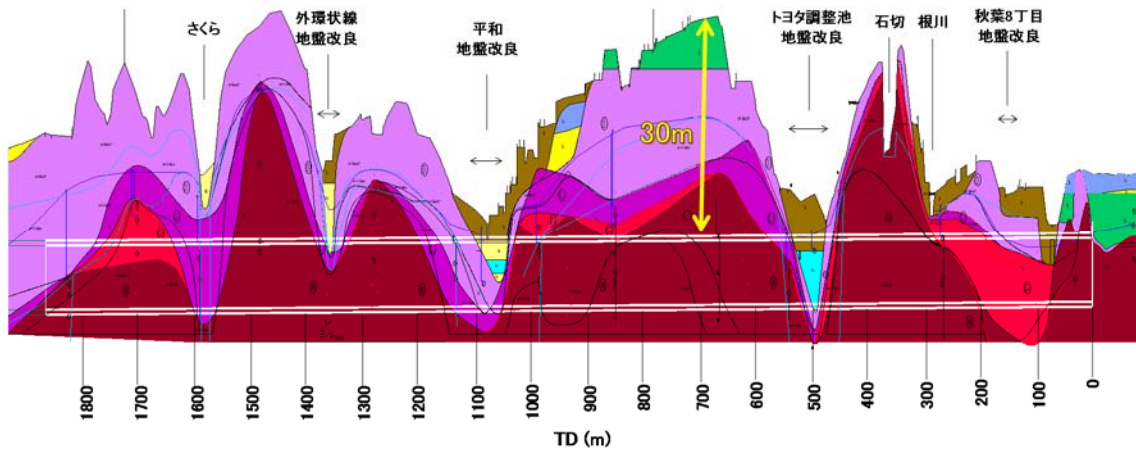


図3-5 安永川トンネル トンネル縦断図

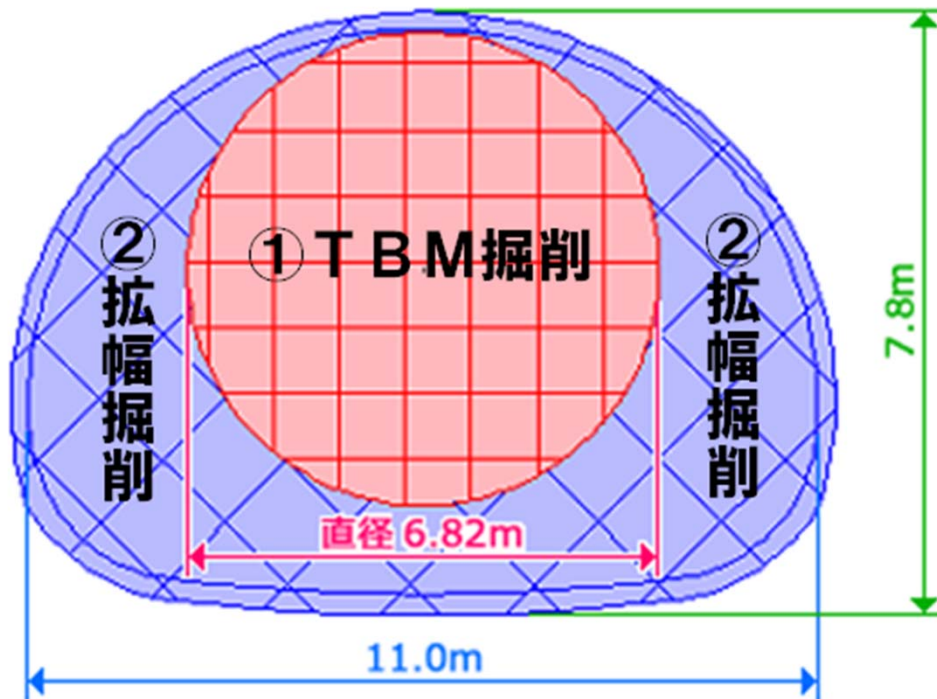


図3-6 安永川トンネル 施工断面



図3-7 先進導坑掘削に使用した TBM（川崎重工製）



図3-8 拡幅掘削として当初計画されていた自由断面掘削機MT720（サンドビック社製）

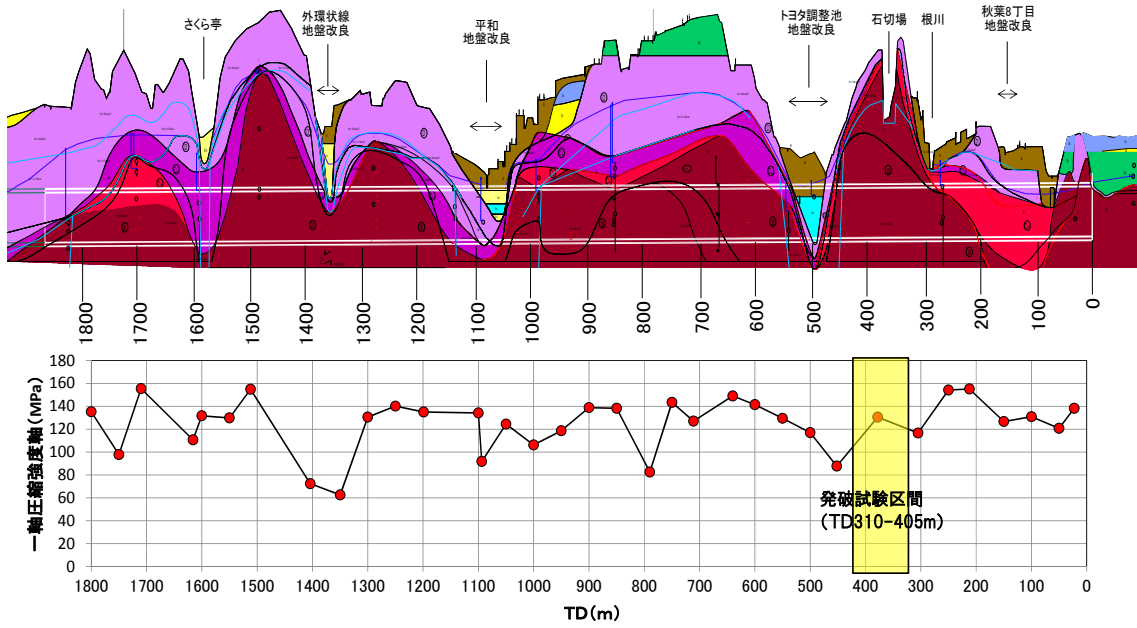


図3-9 安永川トンネル全線の一軸圧縮強度試験結果(TBM掘削時コア採取)

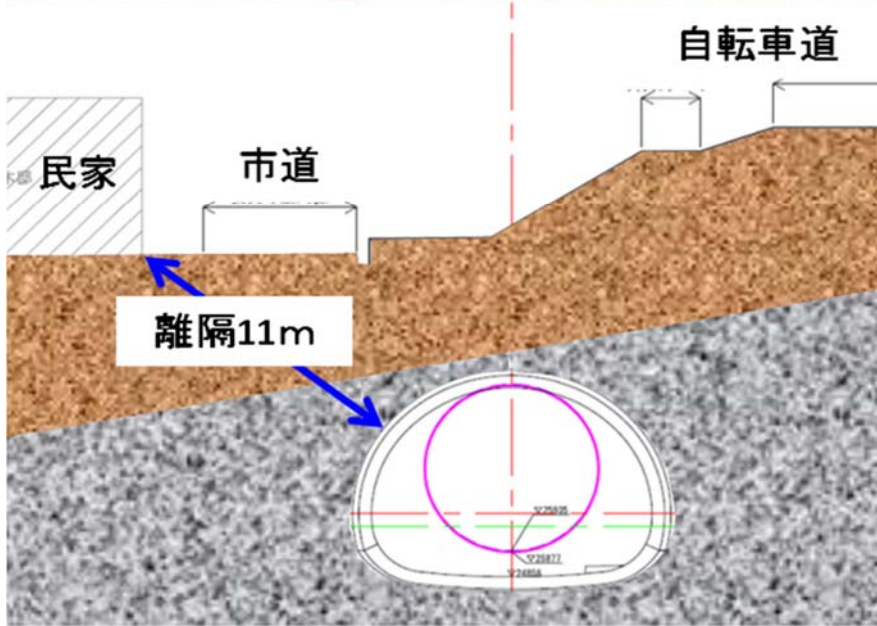


図3-10 安永川トンネル 住宅近接区間の例

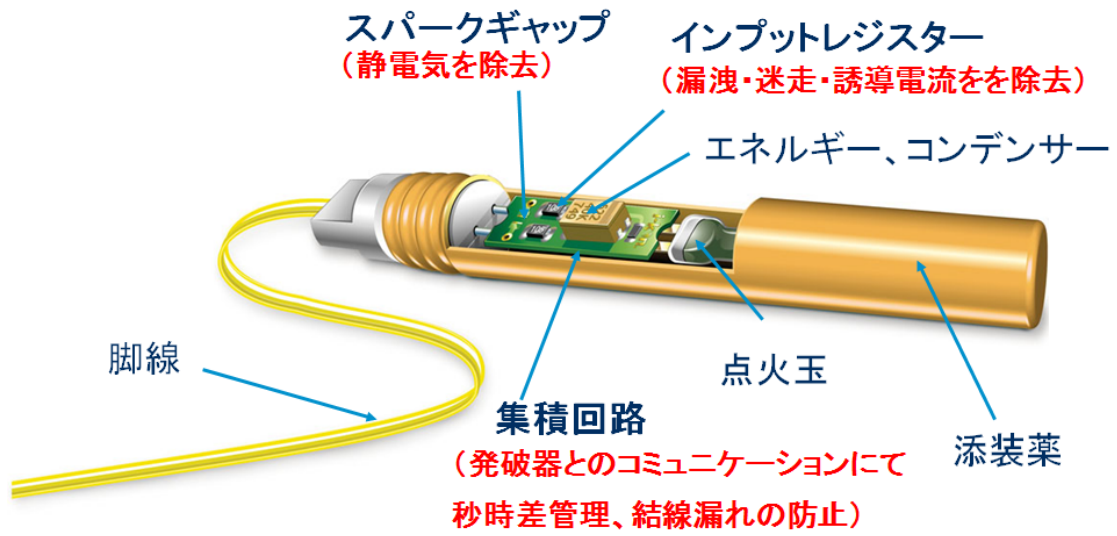


図3-11 高精度電子雷管 eDevII®の構造



図3-12 高精度電子雷管 eDevII® の専用発破器(左)とID バーコードスキャナ(右)

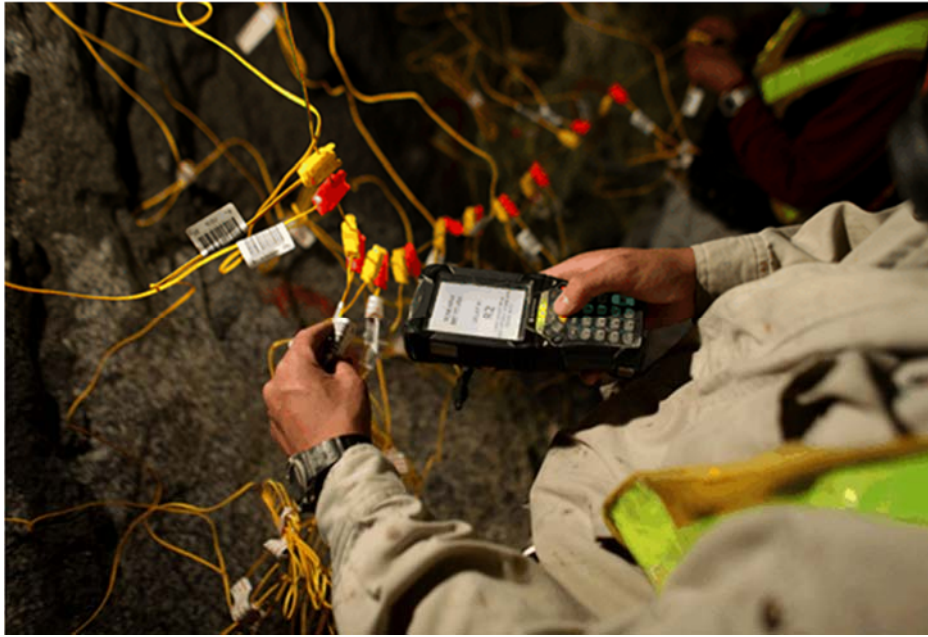


図3-13 高精度電子雷管 eDevll® の専用発破器(左)とID バーコードスキャナ(右)



図3-14 高精度電子雷管 eDevll®(左)と親ダイ(右)

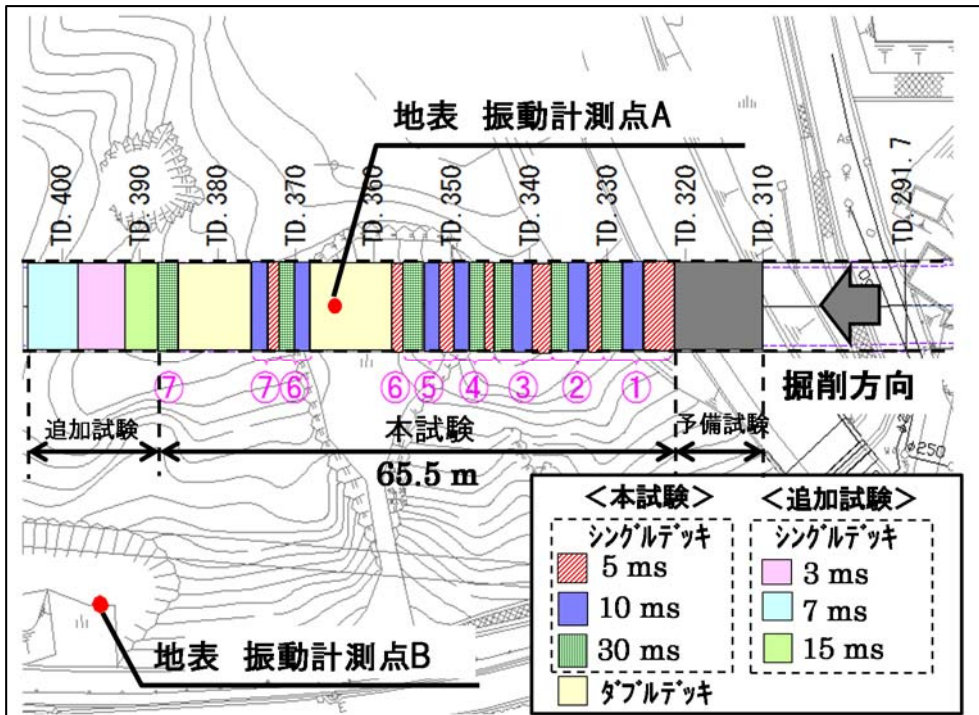


図3-15 (a) 発破試験区間 平面図

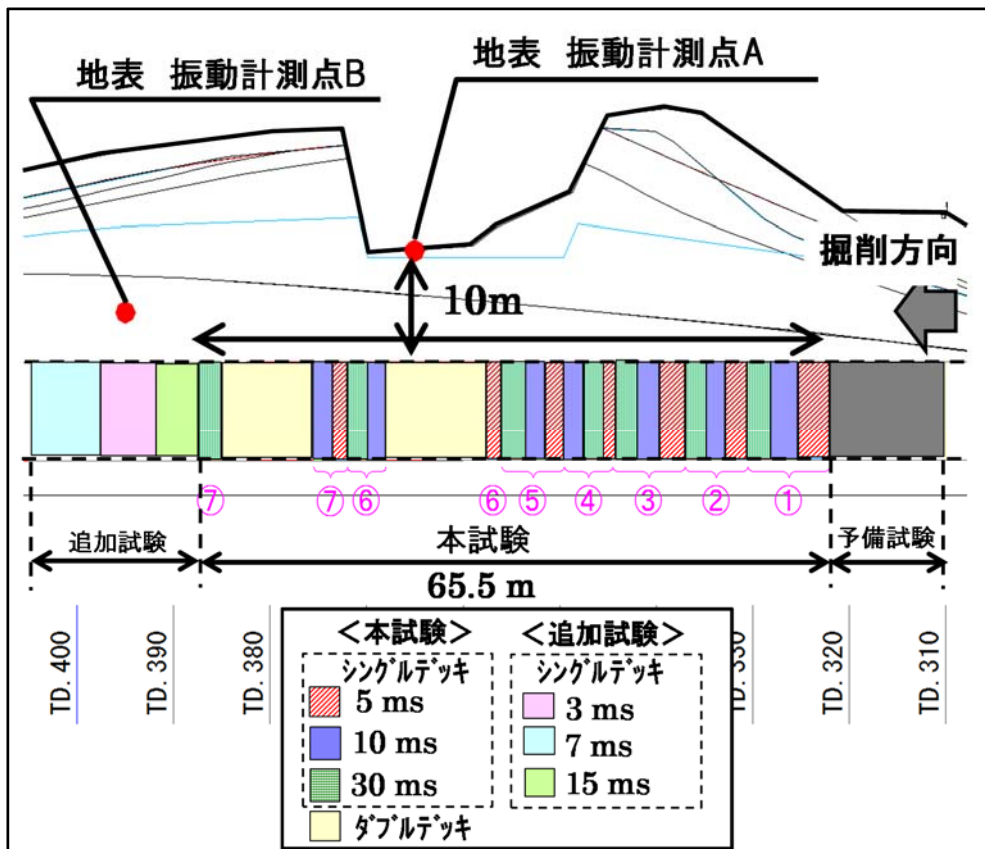


図3-15 (b) 発破試験区間 縦断図

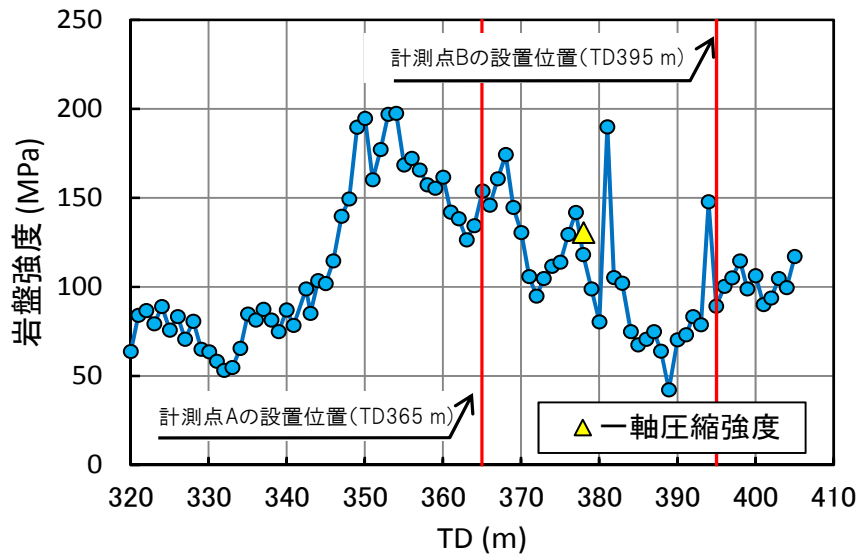


図3-16 TBMの推力から推定した発破試験区間の岩盤強度の推移

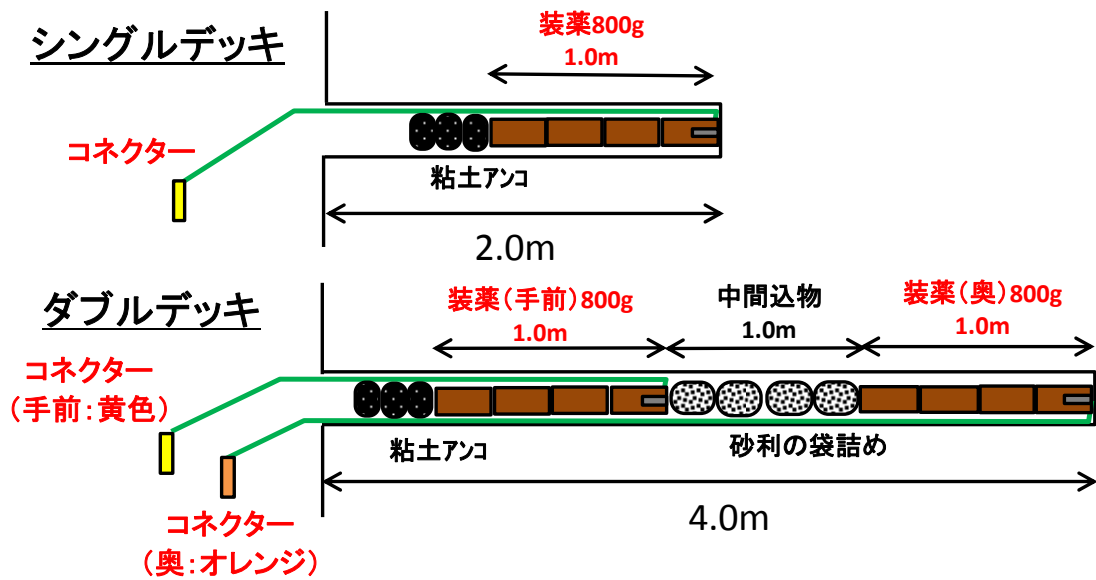


図3-17 シングルデッキとダブルデッキの概念図

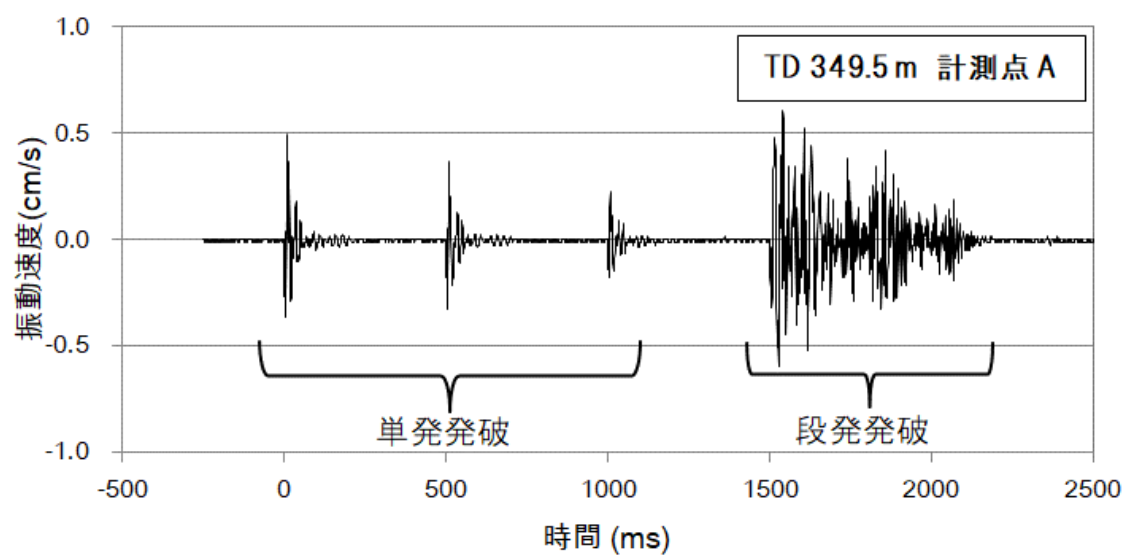


図3-18 代表的な振動速度波形



(a) ドリルジャンボ(穿孔機)による発破孔の穿孔状況



(b) 装薬状況

図3-19 発破作業の各ステップ状況



(c) 装薬・結線完了状況



(d) 発破完了状況

図3-19 発破作業の各ステップ状況

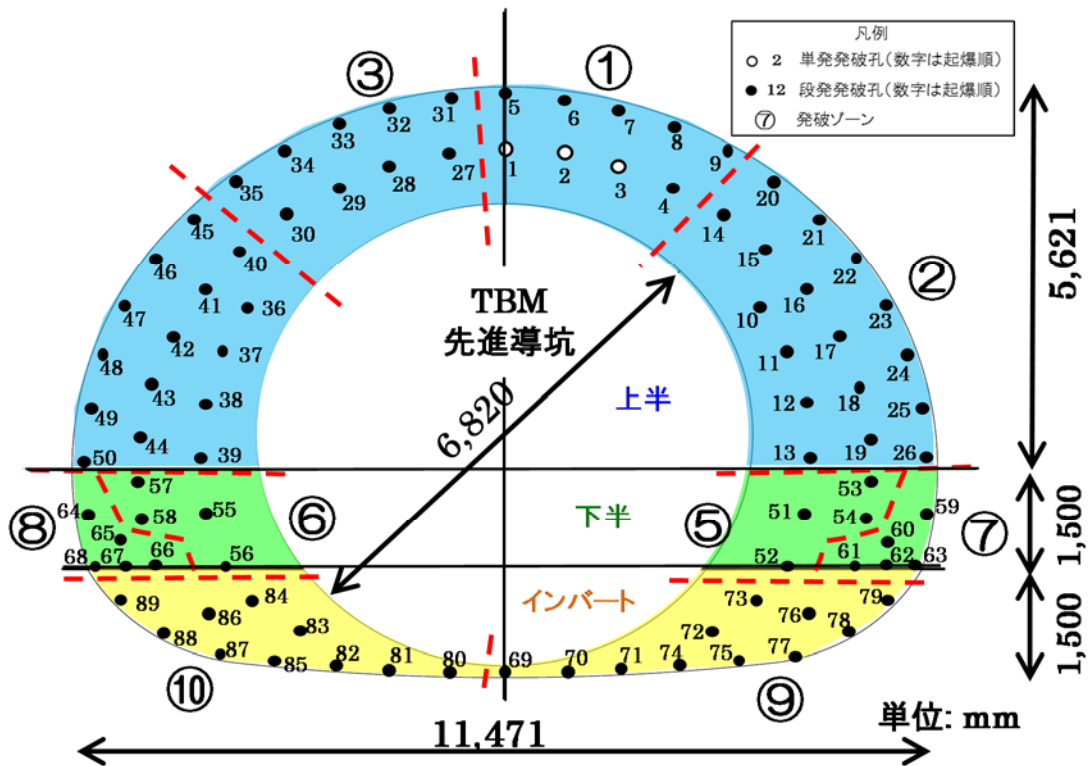


図3-20 高精度電子雷管を用いた代表的な1孔1斉発の発破パターン例
 ※図中の数字は起爆順を示す

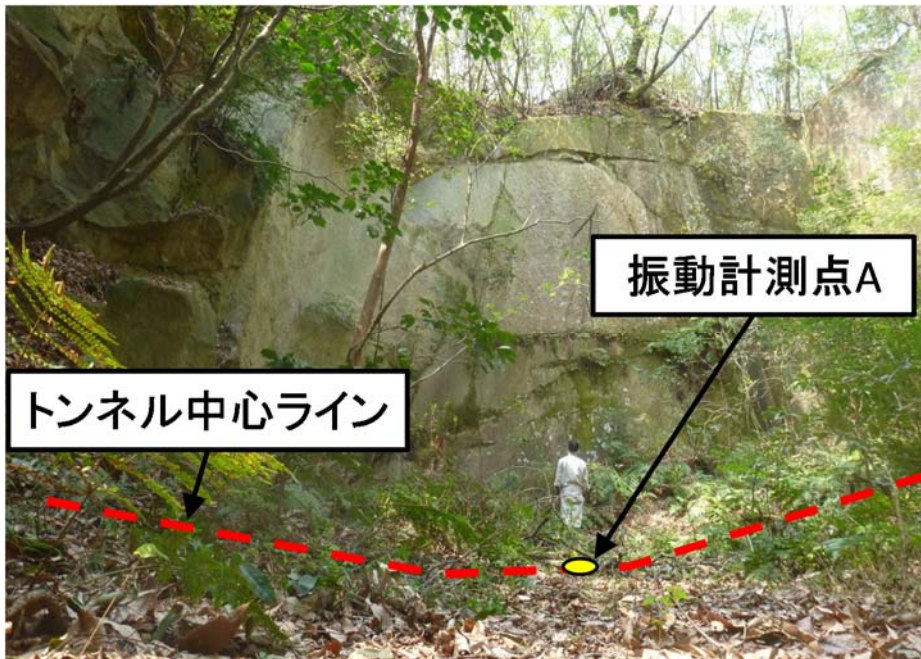


図3-21 振動計測点 A



図3-22 振動計測点 B



図3-23 3成分振動速度計(Instantel社製 Minimate Plus)

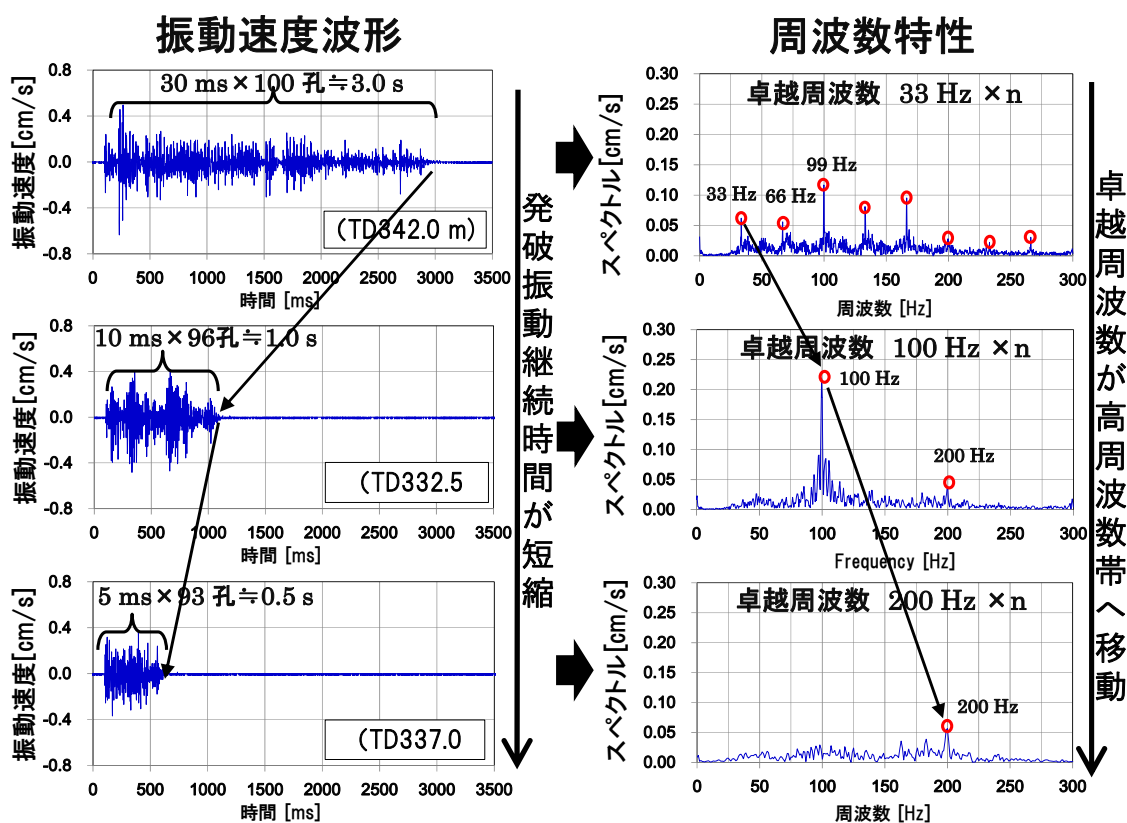
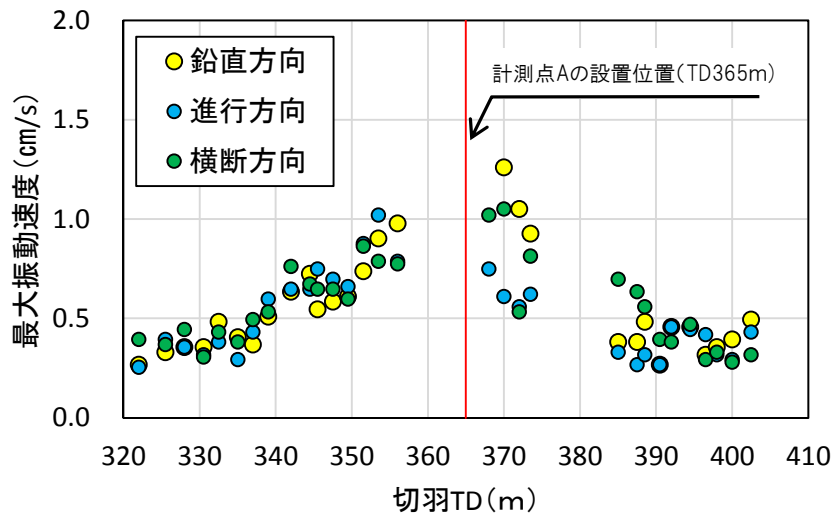
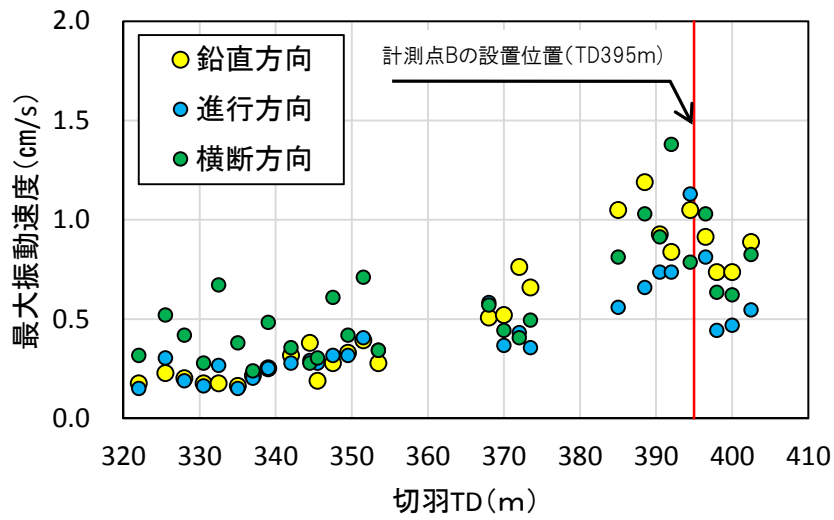


図3-24 設定起爆秒時差ごとの振動速度波形(左)と周波数特性(右)



(a) 計測点 A



(b) 計測点 B

図3-25 各計測点にて観測された段発発破の最大振動速度一切羽 TD プロット

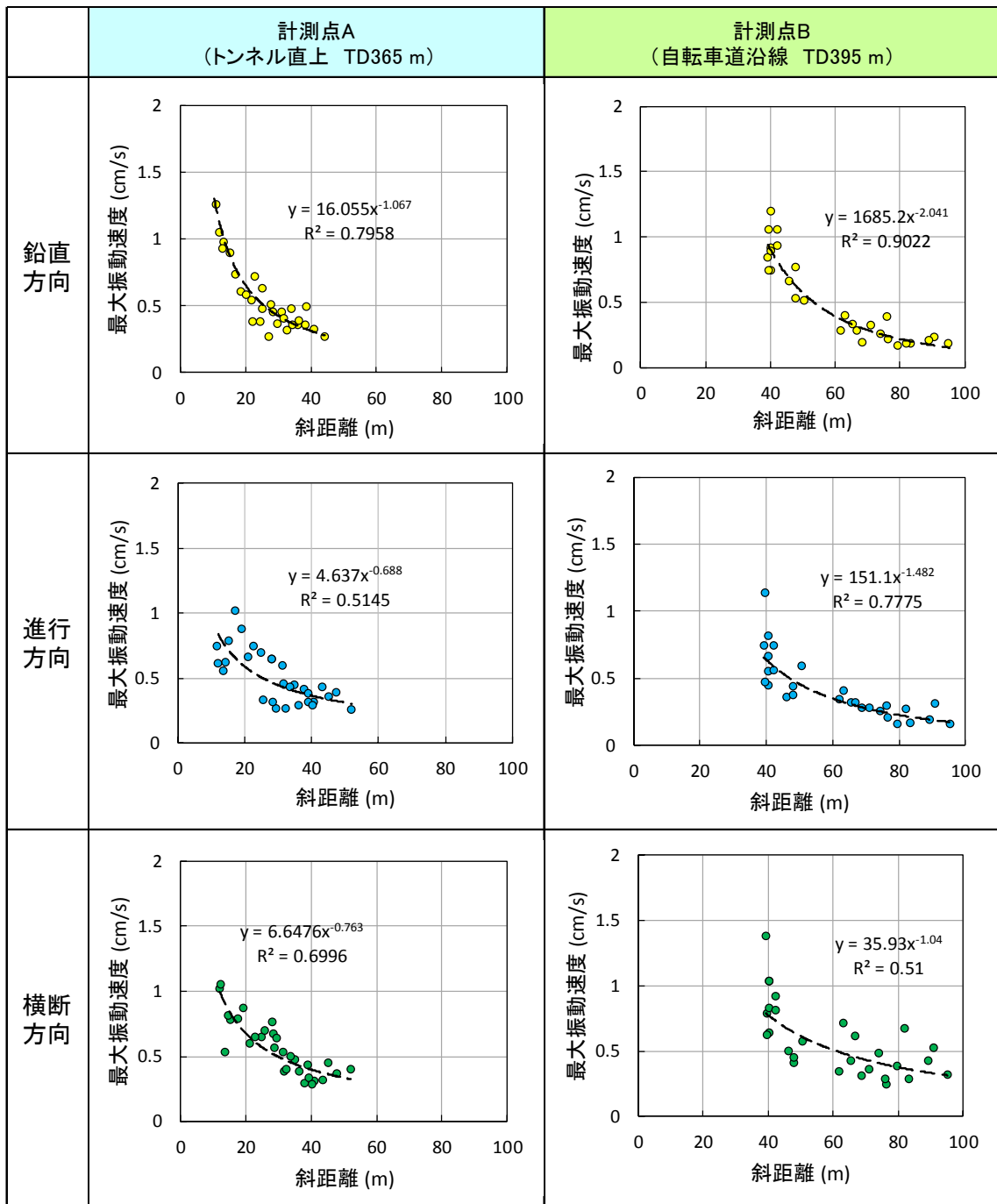
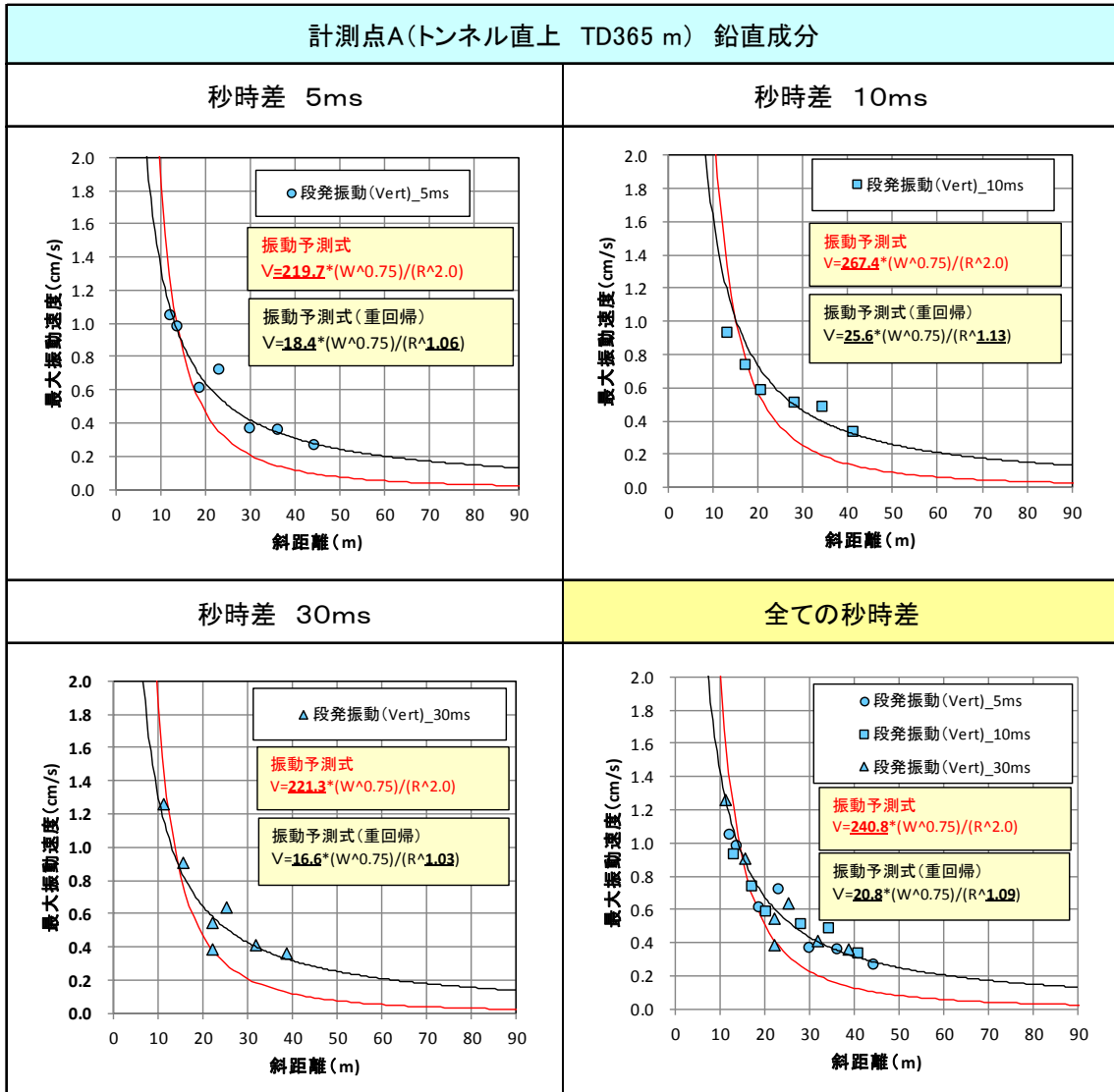
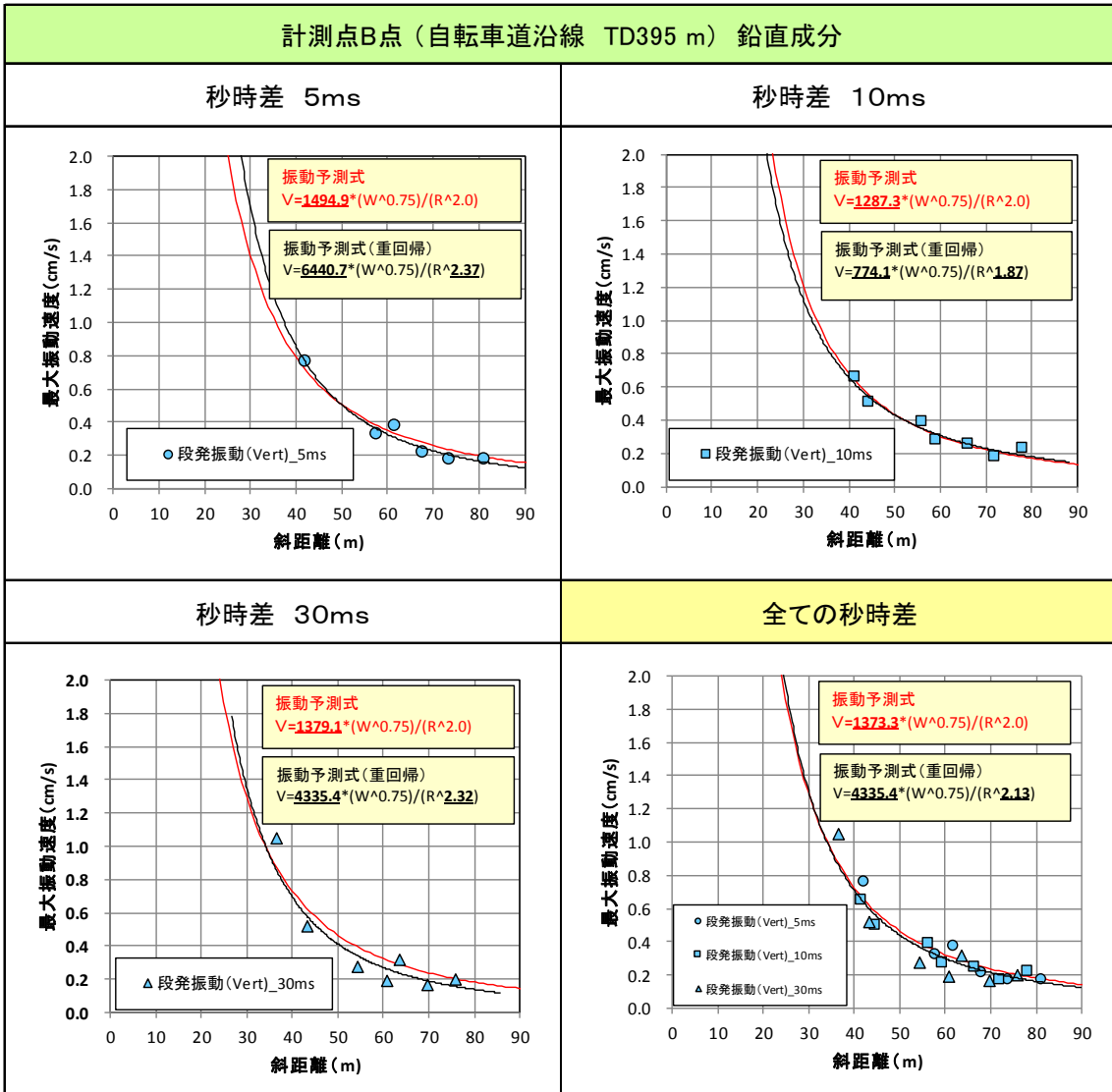


図3-26 各計測点にて観測された段発発破の各成分の最大振動速度と斜距離プロットの関係



(a) 計測点 A

図3-27 設定起爆秒時差ごとの段発発破の斜距離—最大振動速度プロット(鉛直成分)



(b) 計測点 B

図3-27 設定起爆秒時差ごとの段発発破の斜距離—最大振動速度プロット（鉛直成分）

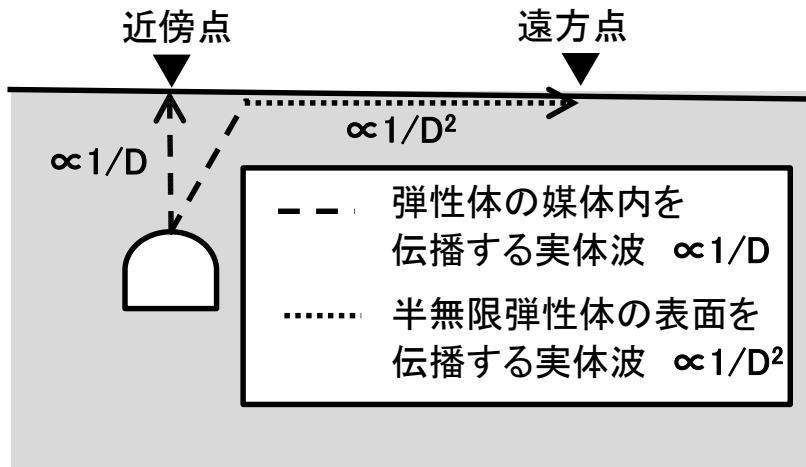


図3-28 弾性波の幾何減衰

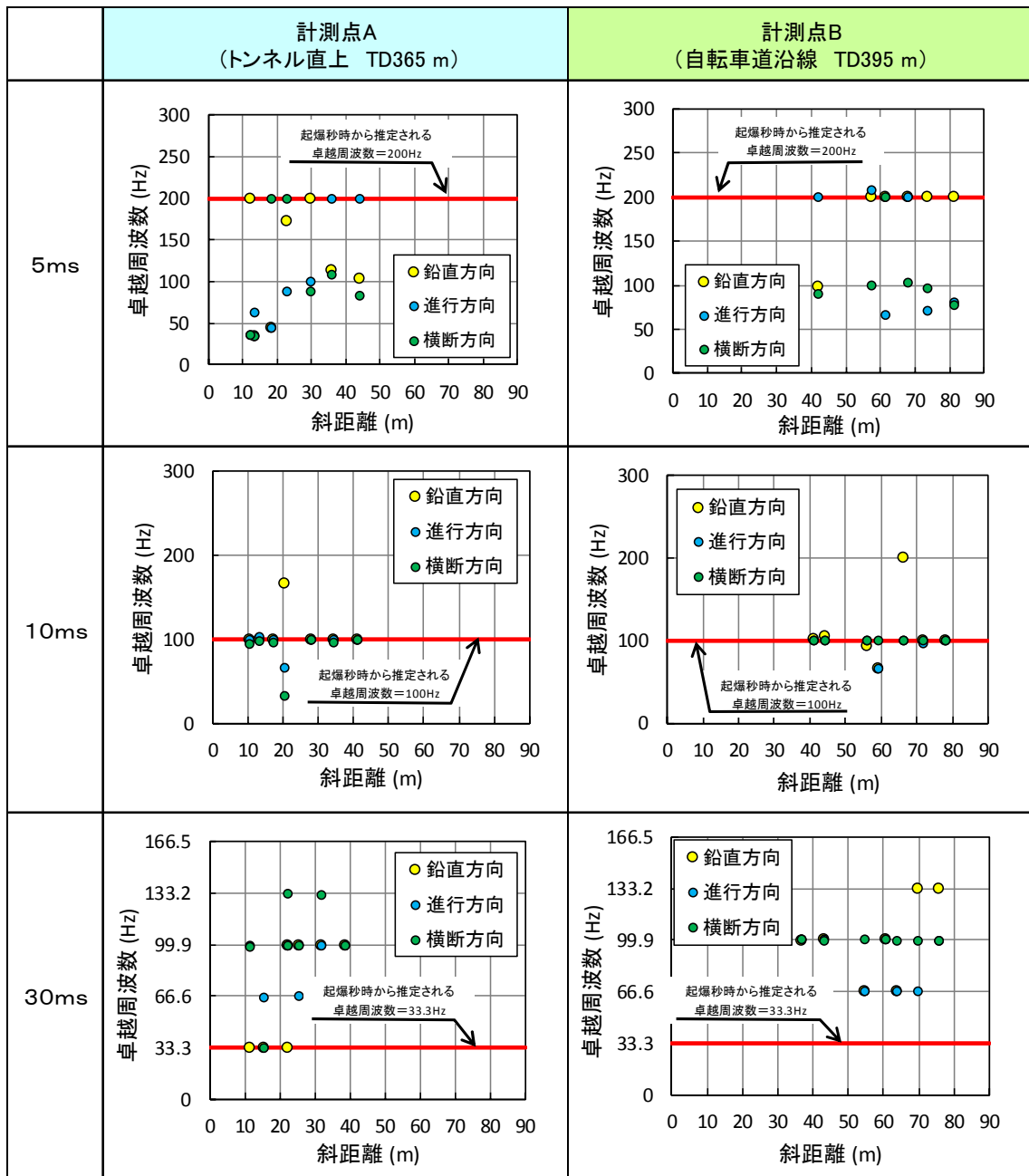


図3-29 設定起爆秒時差ごとの段発発破の斜距離—卓越周波数プロット

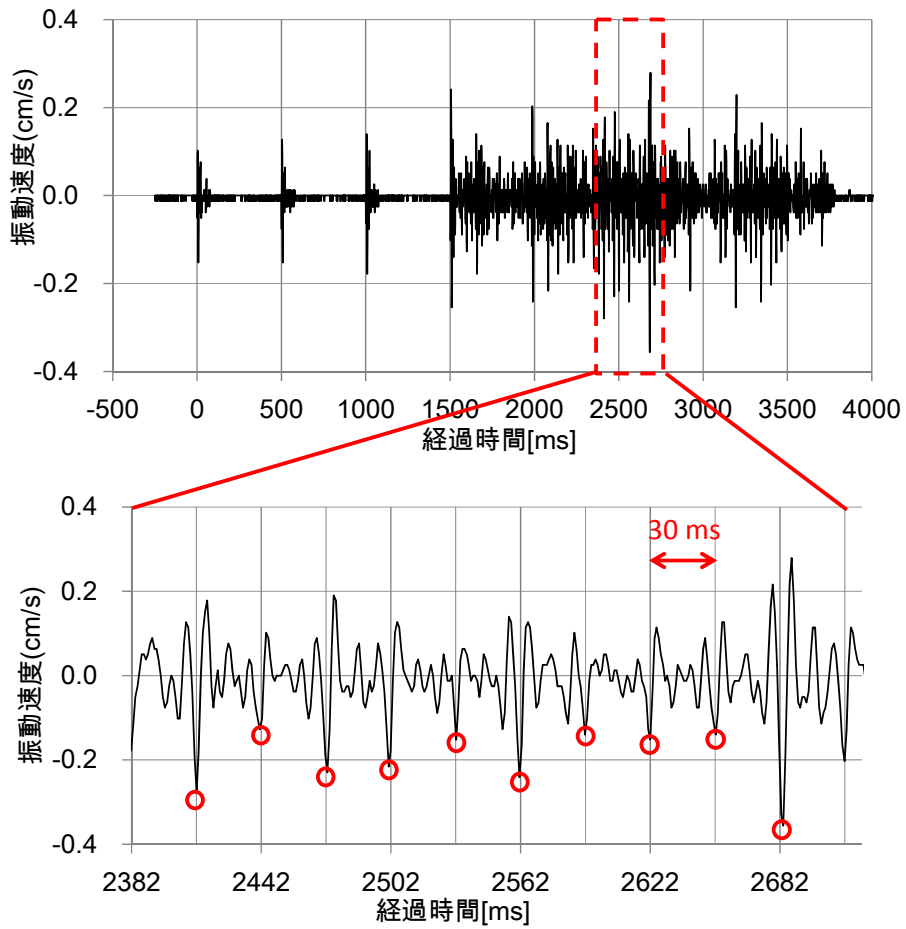


図3-30 起爆秒時差 30ms の場合の段発発破の振動速度波形とその拡大

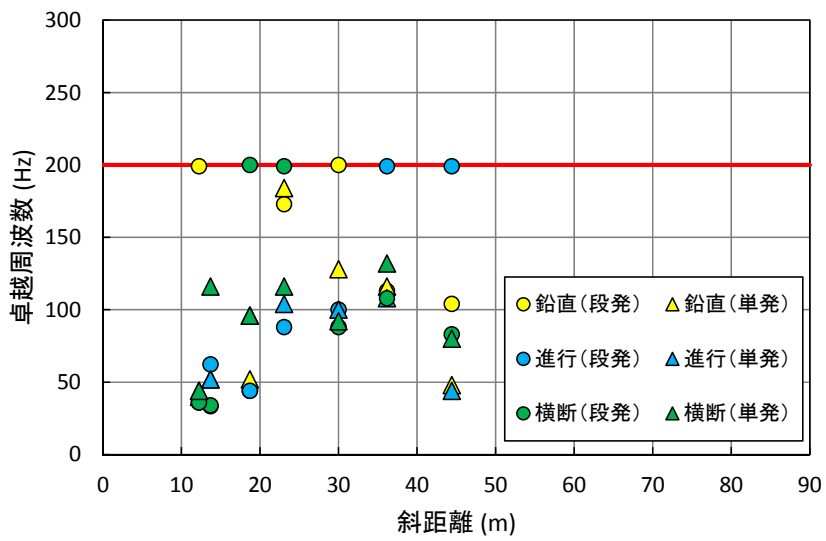
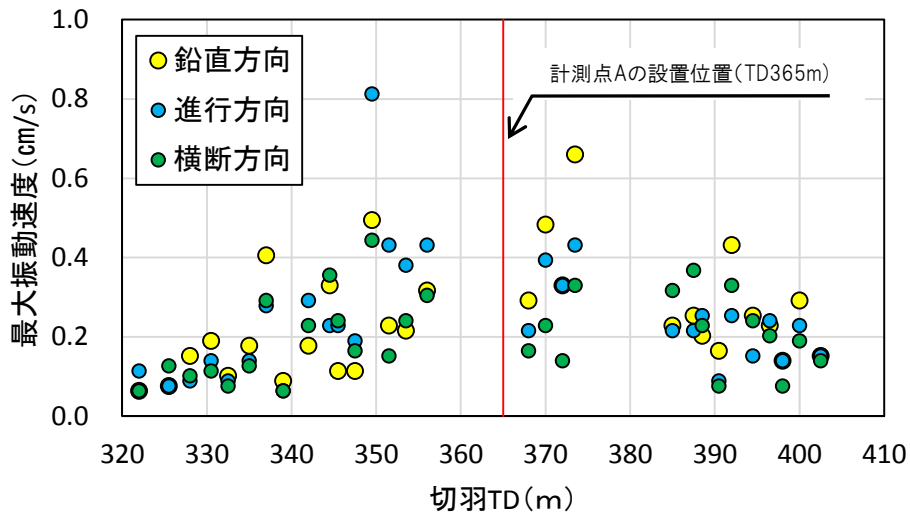
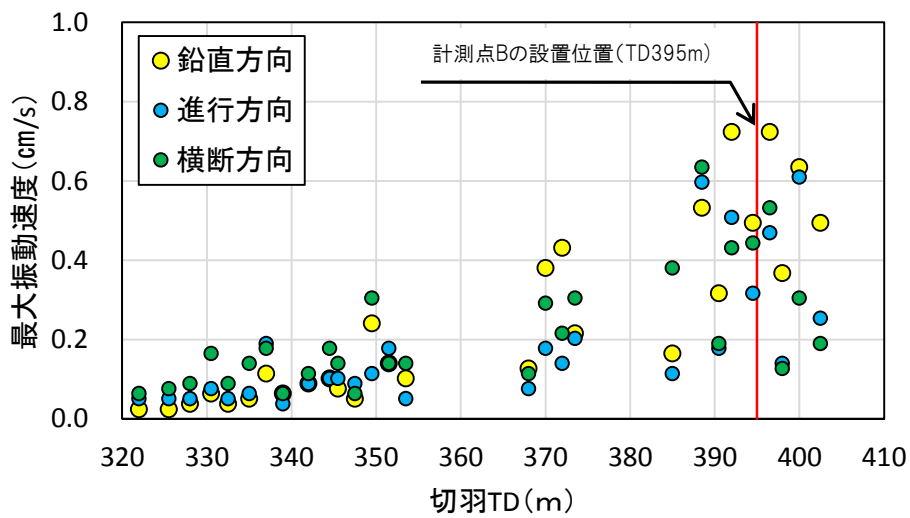


図3-31 起爆秒時差5ms の場合の段発発破と単発発破の振動速度波形の卓越周波数



(a) 計測点 A



(b) 計測点 B

図3-32 各計測点にて観測された単発発破の最大振動速度一切羽 TD プロット

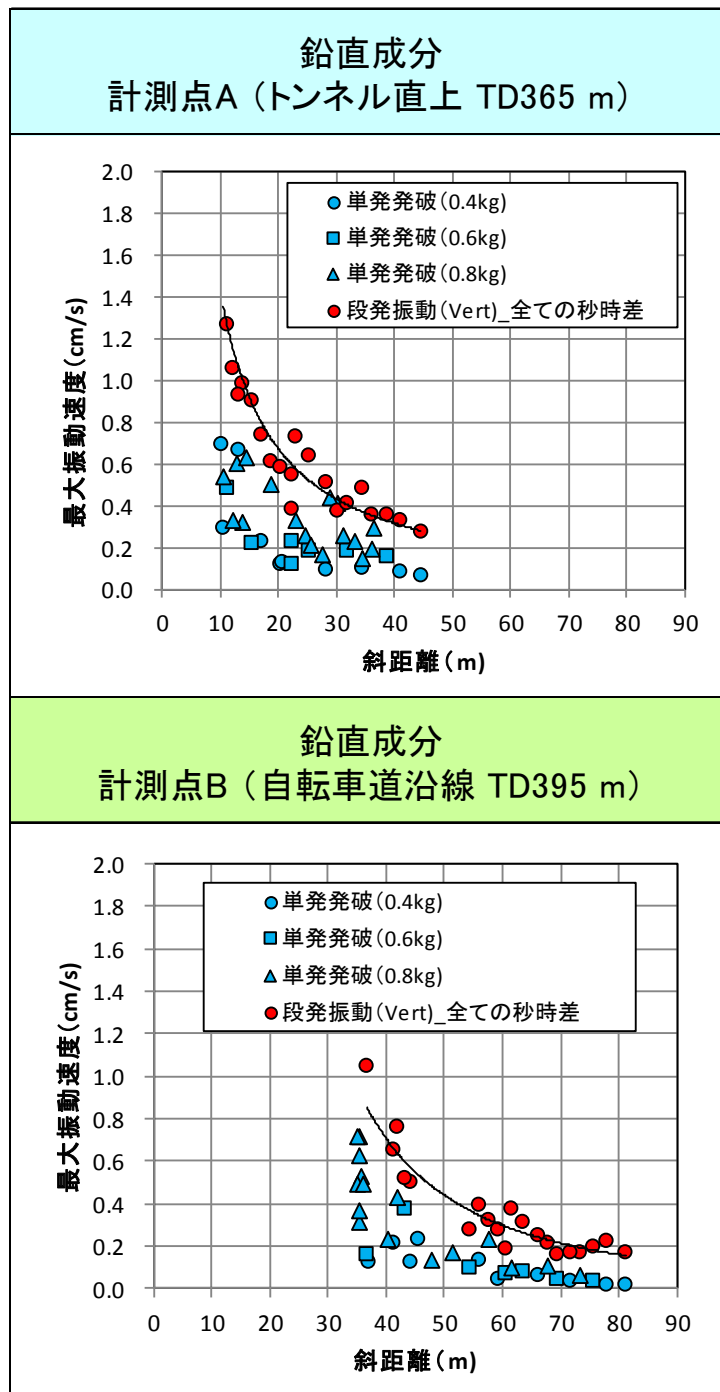
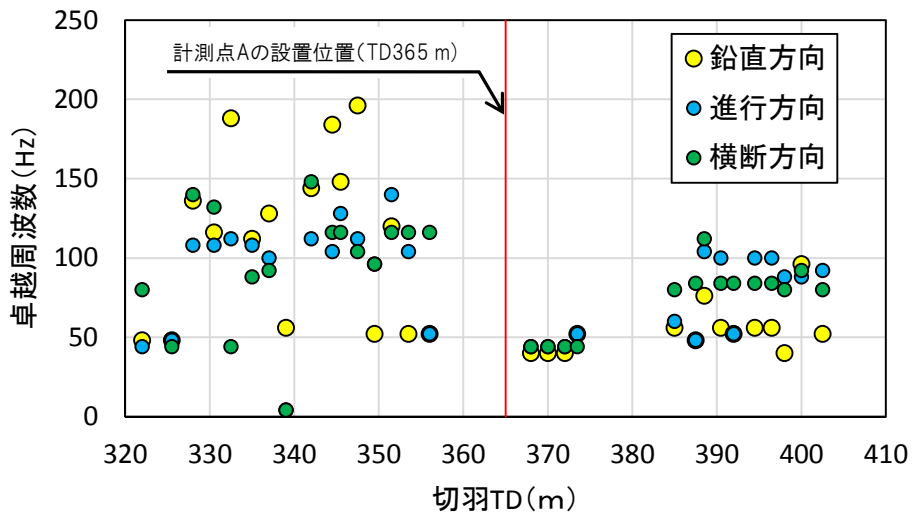
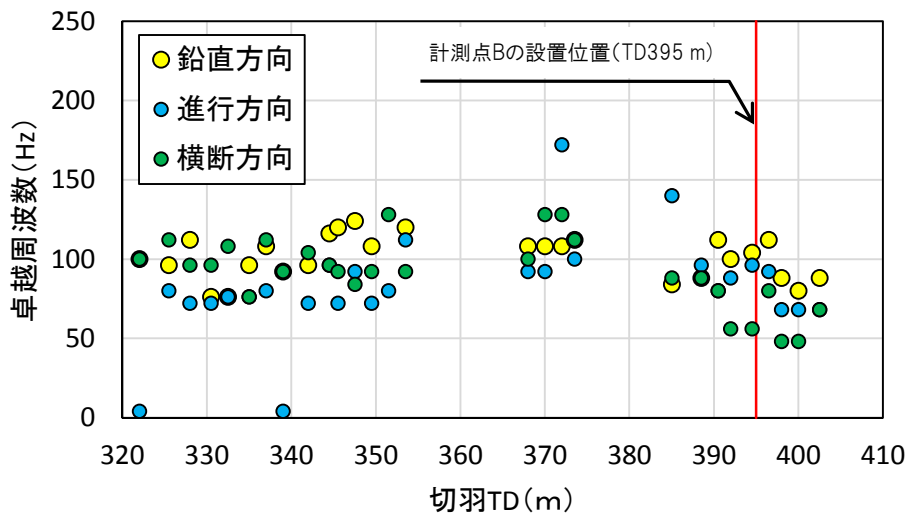


図3-33 設定起爆秒時差ごとの単発発破の斜距離—最大振動速度プロット (鉛直成分)

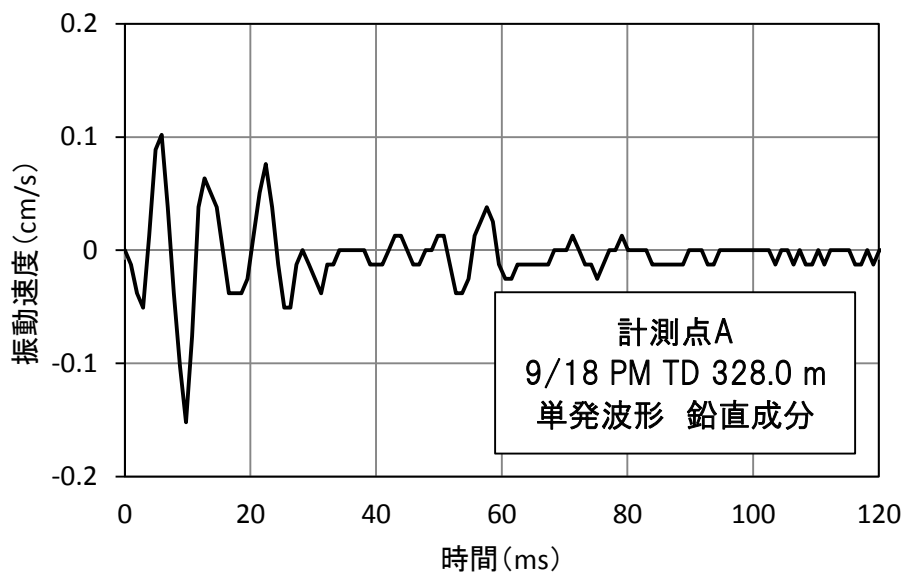


(a) 計測点 A

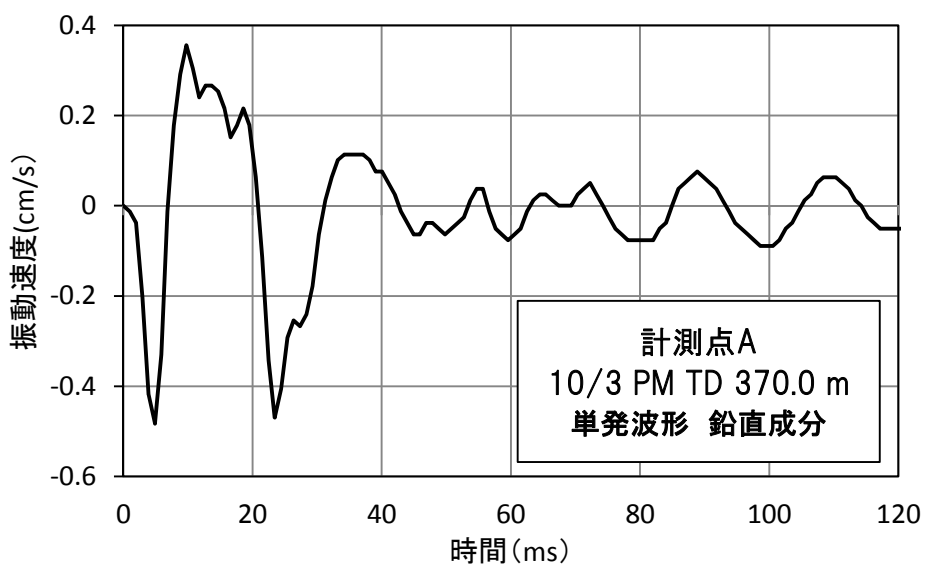


(b) 計測点 B

図3-34 各計測点にて観測された単発発破の卓越周波数一切羽 TD プロット

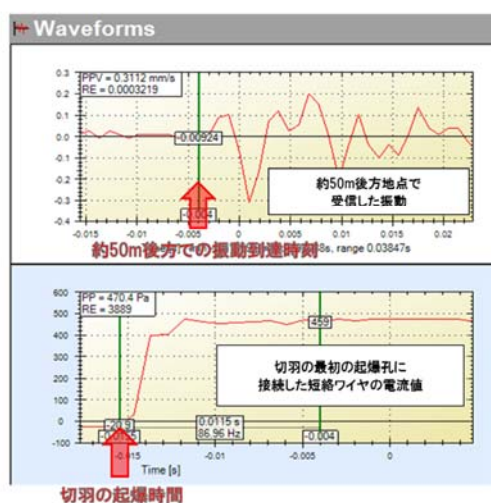
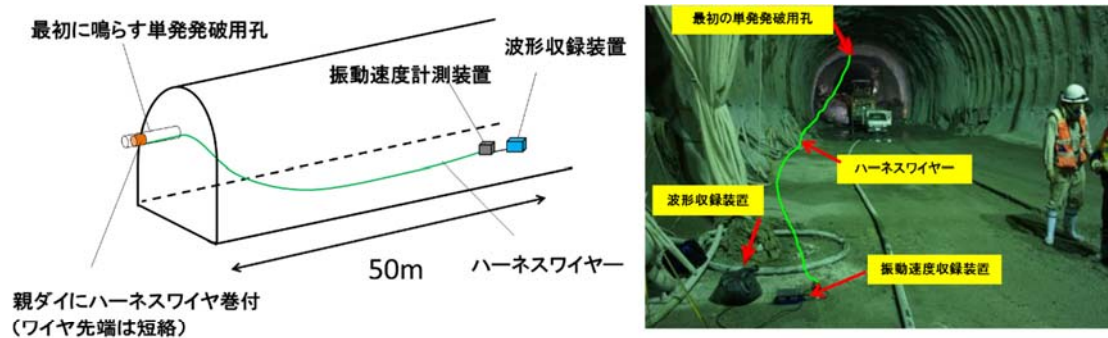


(a) 計測点遠方の単発波形例



(b) 計測点近傍の単発波形例

図3-35 計測点遠方と近傍の典型的な単発波形(鉛直成分)



	離隔距離 (m)	時間差 (s)	伝播速度 (m/s)
1回目	54.5	0.01152	4731
2回目	56.8	0.01077	5274
3回目	59.7	0.01168	5111
平均伝播速度			5039

図3-36 坑内における振動伝搬速度の計測とその結果

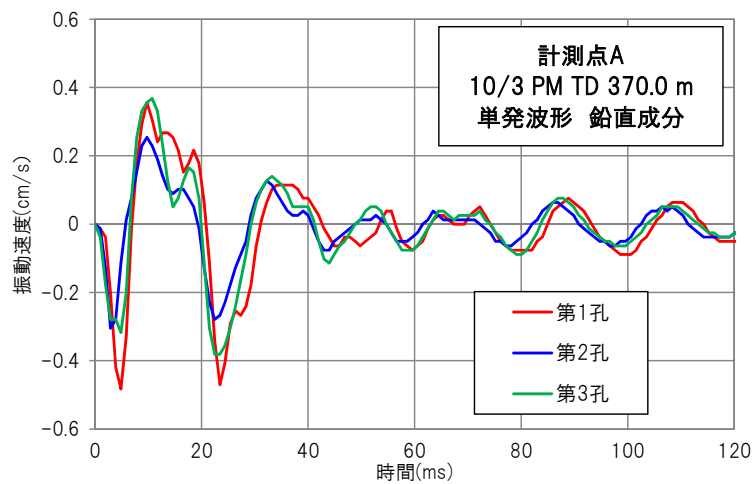
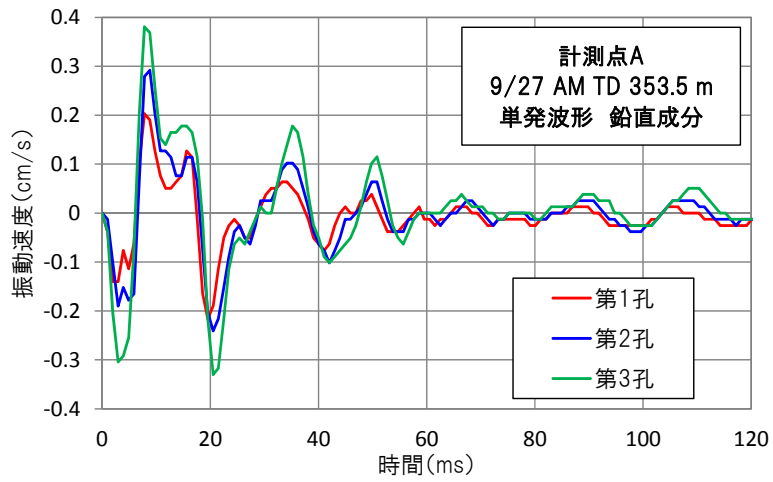
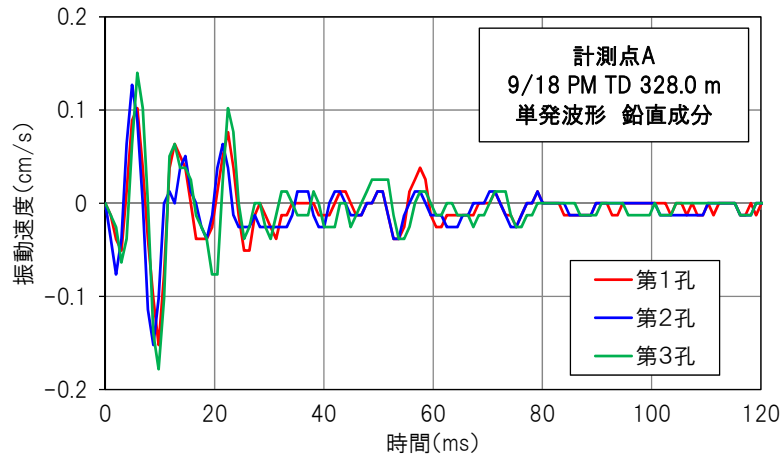
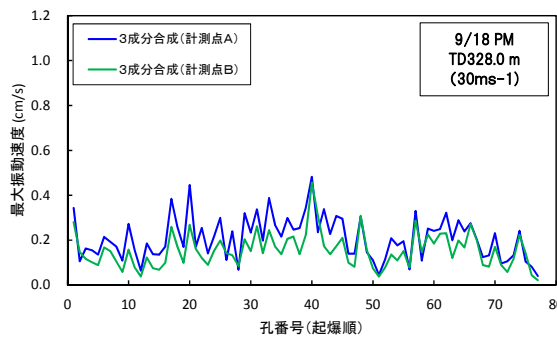
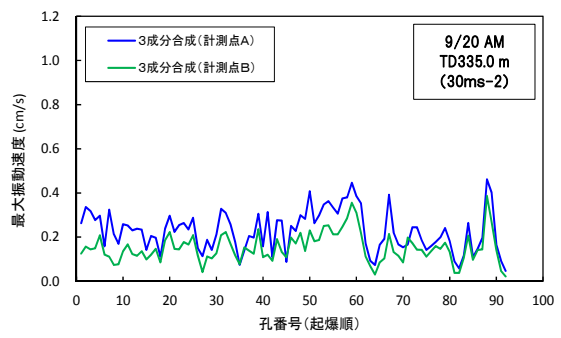


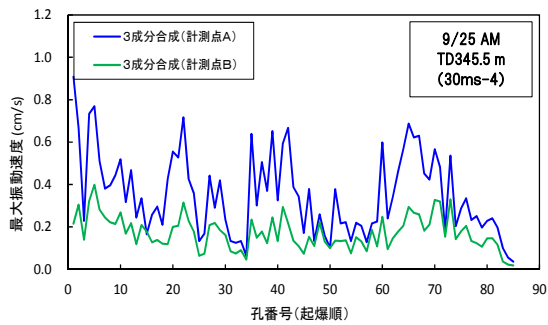
図3-37 同じ発破における3つの単発波形(鉛直成分)



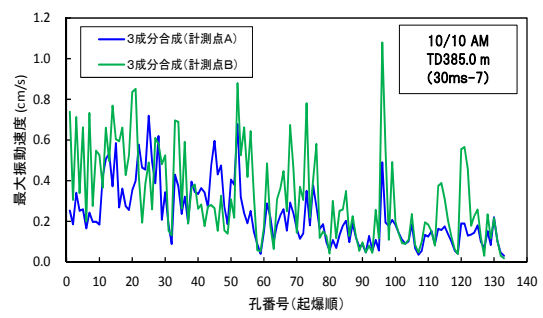
(a) 9/18 AM 発破(TD328.0m)



(b) 9/20 AM 発破(TD335.0m)

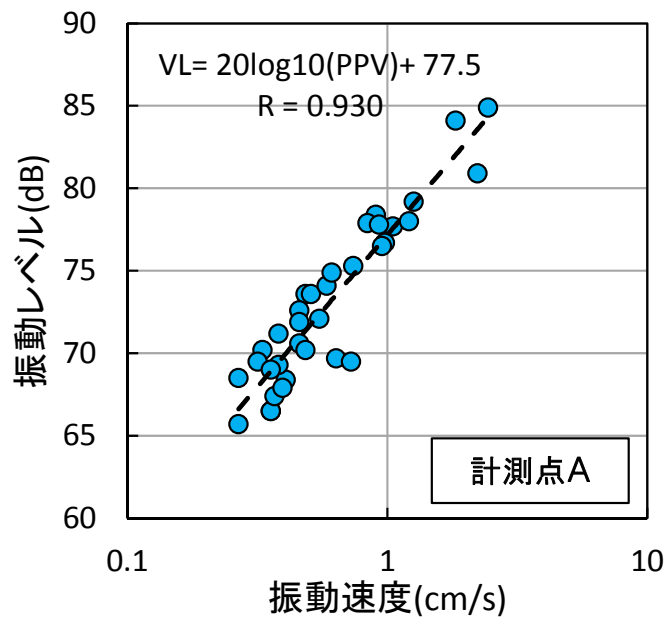


(c) 9/25 AM 発破(TD345.5m)

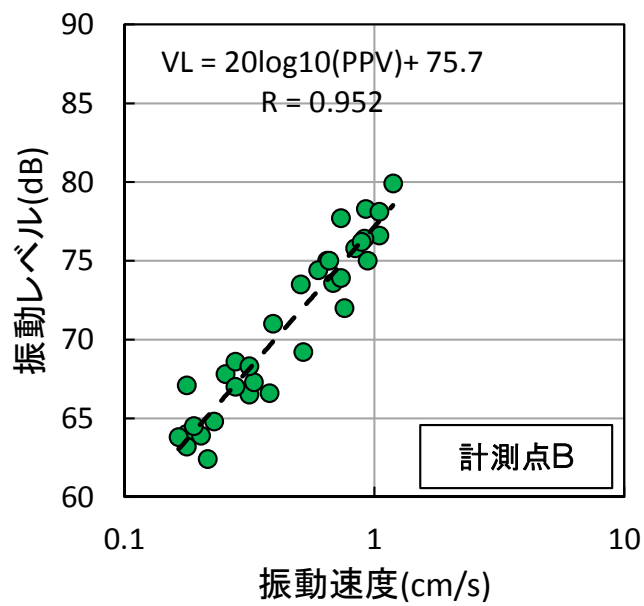


(d) 10/10 AM 発破(TD385.0m)

図3-38 段発発破の振動速度波形を30msごとに区切った区間の振動速度最大値プロット



(a) 計測点 A



(b) 計測点 B

図3-39 最大振動速度と振動レベルの関係

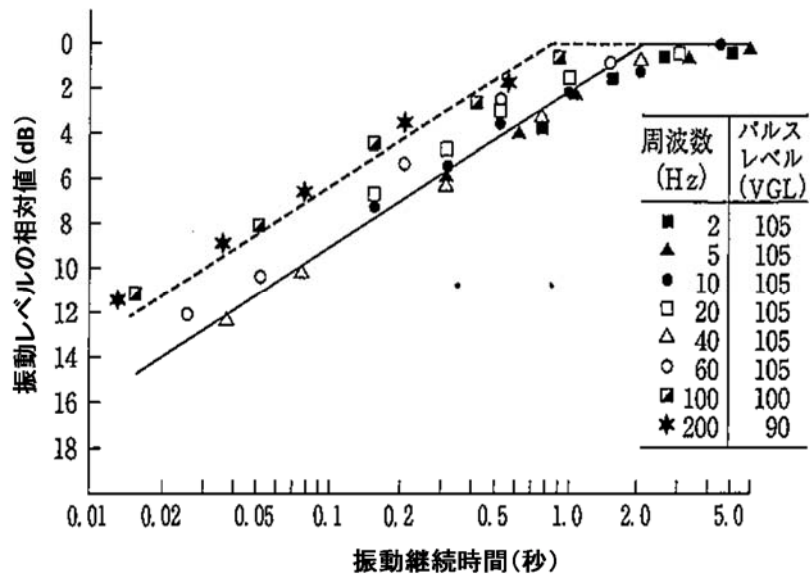


図3-40 振動継続時間と振動レベルの相対値 (産業環境管理協会, 2010c)

第 4 章

波形の重ね合わせ法による振動速度波形の再現法の検討

4.1. 単発発破の振動速度波形の特徴

4.1.1. 段発波形の区間ピークの累積確率と切羽位置の関係

図 4-1(a)に発破試験の中で最も長い起爆秒時設定である 30ms の場合 (9/18PM TD328.0m) の振動速度波形の一部拡大を示した。拡大した段発波形には、ほぼ設定した起爆秒時差である 30ms ごとにピークが現われている。一方、図 4-1(b) には、同発破で得られた単発波形の 1 つを単純に 30ms ごとに重ね合わせた波形を示す。両波形は、ピークを取る時刻など定性的な波形の変化の傾向は一致しているが、実際の段発波形の方が、振動速度の増減が著しく、各孔の雷管の起爆によって発生する振動速度波形のばらつきが大きいことが推察される。これは、図 3-38 に示した段発波形を 30ms ごとに区切った区間の最大値のプロットにばらつきがみられることと同様の傾向である。この各孔から発生した振動速度波形の振幅がばらつく要因としては、1) 孔あたりの装薬量、2) 孔の位置、3) 振動伝播距離や伝播経路、4) 孔周辺の岩盤状態、5) 起爆順序などが挙げられる。しかし、これら一つ一つの要因が各孔の振動速度波形の振幅にばらつきに与える影響を定量的に把握することは難しい。一方、段発波形を再現するためには、その元となる単発波形の振幅のばらつきの特徴を把握することが必要となる。そこで、実測の段発波形をもとに各孔から発生した振動速度波形の振幅のばらつきを統計的に取り扱い、検討することとした。まず、図 3-38 の場合と同様に今回の発破試験で最も長い起爆秒時差である 30ms の場合を考える。この起爆秒時差 30ms の場合が、次の孔の起爆までに振動が減衰する量が最も大きく、各孔からもたらされる単発波形の重なりが最も小さいと考えられる。そのため、段発波形を 30ms ごとに区切った区間の最大値 (以降、区間ピーク) は、単発波形の最大値を最も反映していると思われる。起爆秒時差 30ms の場合の 7 発破について、区間ピークを算定し、この累積確率を図 4-2(a)~(c) にプロットした。ここで図 4-2(a)~(c) は、計測点 A の場合のみを示している。

鉛直方向の結果を示した図 4-2(a)を見ると、9/18PM(30ms の 1 回目)から 9/27AM(30ms の 5 回目)にかけては切羽が計測点 A に近づいているため、累積確率のグラフが全体的に右に移動しており、振幅が全体的に大きくなっていることが分かる。計測点 A を通過した後の 10/3PM(30ms の 6 回目)の切羽位置も計測点 A のほぼ直下に位置しているため、同様の

傾向にある。しかし 10/10AM(30ms の 7 回目)の累積確率のグラフは左へ移り、計測点 A まで同程度の斜距離である 9/25AM(30ms の 4 回目)よりも振幅が小さくなっている。

10/10AM(30ms の 7 回目)は、表 3-2 や図 3-15 に示したように他の 6 回の起爆秒時差 30ms の場合と大きく異なった切羽位置にある。従って、計測点 A まで同程度の斜距離である 9/25AM(30ms の 4 回目)と 10/10AM(30ms の 7 回目)の区間ピークの累積確率の分布が異なるのは、切羽が計測点 A を通過した前後の 2 つの切羽位置で、振動の伝播経路が大きく変わったためであると推定される。

また、進行方向と横断方向の結果を示した図 4-2(b), (c)を見ると、概ね鉛直方向と同じ傾向を示しているが、10/3PM(30ms の 6 回目)の累積確率のグラフが 9/27AM(30ms の 5 回目)に比べ左に来ている点が異なっている。10/3PM(30ms の 6 回目)の切羽は計測点 A を通過したがまだ計測点 A の直下に近い位置にあったため、鉛直方向のグラフではそれ以前と変わらない傾向であったのに対し、進行方向と横断方向では、9/27AM(30ms の 5 回目)までと 10/3PM(30ms の 6 回目)からでは傾向が異なっている。したがって鉛直方向の振動に比べ、水平方向（進行方向と横断方向）の振動は計測点 A の通過前後での伝播経路の変化により鋭敏であると考えられる。

4.1.2. 単発波形の区間ピークの統計分析

図 4-3(a)~(g)には図 4-2(a)にて示した 30ms ごとの区間ピークの累積分布(鉛直方向)の 7 回分の発破を、ワイブル確率紙にて示したものを示す。図 4-3(a)~(g)を見ると、全 7 回ともワイブル確率紙上でデータが直線上にプロットされており、区間ピークがワイブル分布に従っていることがわかる。ワイブル分布とは、(4-1)式にて確率密度関数 $f(x)$ 、(4-2)式にて累積分布関数 $F(x)$ が示される確率分布である。

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right\} \quad (4-1)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right\} \quad (4-2)$$

ここで a は尺度パラメータ(scale parameter)、 b は形状パラメータ(shape parameter)と呼ばれるパラメータである（以降、ワイブルパラメータ a 、 b ）。ワイブル分布は製品寿命モデルなど信頼性工学でよく用いられる確率分布であり、尺度パラメータ a は寿命の大小（本研究では各孔から生じた振動波形の大きさ）を示し、形状パラメータ b は分布の形

(本研究では各孔から生じた振動波形の大きさのばらつき)を示す (Weyne nelson, 1988)。(4-2)式を変形すると, (4-3)式となる。

$$\log \left[\log \left\{ \frac{1}{1-F(x)} \right\} \right] = b \cdot \log(x) - b \cdot \log(a) \quad (4-3)$$

横軸に $\log(x)$, 縦軸に $\log \left[\log \left\{ \frac{1}{1-F(x)} \right\} \right]$ をとったものが図 4-3(a)~(g)の右側のグラフで示したワイブル確率紙である。

このように, ワイブル確率紙上で直線上にプロットさせることで, 前述にて列挙した各孔から発生した振動速度波形がばらつく要因(孔あたりの装薬量, 孔位置, 孔周辺の岩盤状態等)が段発発破の振動速度波形に複合的に与える影響をワイブルパラメータ a , b で表現できるものと考えられる。

4.2. 基本的な重ね合わせ法による段発波形の再現

4.2.1. 段発波形の再現の基本フロー

4.1の検討を踏まえ, 計測された単発波形と発破設計(孔数や起爆秒時差), ワイブルパラメータ a , b よりモンテカルロ法を用いて段発波形の再現を試みる。まず起爆秒時差 30ms の発破について, 基本ステップとして以下の3ステップの計算手順を行う。なお, 以降は簡単にするため, 振動速度波形は, 計測点 A にて収録された鉛直方向の成分に限って議論を進める。

①単発波形を準備

②振幅を調整し, 孔数分だけ元波形 (Seed wave) を準備

③孔数分の Seed wave を重ね合わせ

基本ステップの基本フローを図 4-4 に示した。

①単発波形の準備

まず, 各切羽位置にて収録した単発波形を準備する。安永川トンネルでの発破試験では, 1回の発破で単発波形を最大3孔分収録している。この3孔分の単発発破は, 図 4-5 に示すように, 例えば 9/24PM の場合, 3孔目の単発発破の振幅が1, 2孔目の1/10程度になっている。これは前述のように, 前孔の起爆により周囲の岩盤が破壊され, 後の孔は空中で起爆していることがその原因として考えられるが, このような3孔目の単発波形は, 重ね合わせの計算には不適であると考えられる。したがって, 1回の発破で得られた3孔分の単発

波形のうち、良好な結果を得られた 1~3 孔分のみを重ね合わせ計算用に使用した。

次に、選定した単発波形の一部には、波形収録時のノイズの影響と思われる振動中心の偏差が見られたため、その修正を行った。このような振動中心の偏差のある波形は、計測点から遠方の場合や、孔薬量が少ない場合、振動速度の振幅自体が小さいため相対的にその偏差が顕著になる。このように単発波形の振動中心に偏差があると、約 100 孔分重ね合わせた場合、その段発波形の振動中心も大きく偏差し、実際に観測される波形とは大きく異なる波形となってしまふ。このような振動中心の偏差は、実際の波形に極めて低い周波数のノイズ（直流成分または DC 成分）が乗っている考えることができる。この直流成分を除去するため、まず観測された単発波形 $f_1(t)$ のフーリエ変換

$$\mathcal{F}[f_1(t)] = F_1(\omega) \quad (4-4)$$

を行い、ここで $\omega = 0$ でのフーリエ変換を 0 としたものを $F_2(\omega)$ とし、この逆フーリエ変換

$$\mathcal{F}^{-1}[F_2(\omega)] = f_2(t) \quad (4-5)$$

を求めることにより、 $f_1(t)$ の直流成分を除いた。図 4-6 にこの手続きを行った単発波形（9/25PM 第 1 孔 鉛直方向）を示した。元の実波形について、振動が収束して以降の部分で振動中心が下側（負側）に偏差している傾向が顕著であるが、直流成分除去後の波形は、その偏差が改善されている。

②振幅を調整し、孔数分だけ元波形（Seed wave）を準備

続いて孔数分だけの重ね合わせする元となる波形（Seed wave）を作成する。Seed wave は、4.1 で示したように、段発波形の区間ピークのばらつきに従い、波形の振幅を伸縮させ、重ね合わせする発破に合わせて孔数分だけ用意する。

具体的には、(4-2)式の逆関数

$$x = a \left(\log \frac{1}{1-F(x)} \right)^{1/b} \quad (4-6)$$

を用いて、これから再現する予定の段発波形の区間ピークから算定したワイブルパラメータ a 、 b を持つワイブル乱数を孔数分だけ発生させる。孔数分だけ用意した単発波形を(4-6)式で求めたワイブル乱数となるようにその振幅を伸縮し、重ね合わせの元波形である Seed wave を作成する。このとき、①で準備した単発波形は発破によって 1~3 孔分用意されていることから、この 1~3 孔分からランダムに孔数分用意し、その振幅を伸縮して Seed wave とした。

③孔数分の Seed wave を重ね合わせ

孔数分用意した Seed wave を、再現する段発波形の起爆秒時差（ここでは 30ms）に従い線形に重ね合わせる。

4.2.2. 重ね合わせの各ステップと段発波形再現の結果

図 4-7 に以上の①～③の基本ステップを実施した段発波形の再現の一例（9/24AM TD342.0m）をその実測の段発波形と併せて示した。一見すると計算で得られた振動速度波形は平均的な振幅の大きさおよびそのばらつきの点で実測をよく反映しているように見える。そこでこの計算方法の妥当性を検証するため、再現計算で得られた段発波形について、実測と同じく 30ms ごとの区間ピークを取り、その累積分布を求めた。図 4-8(a), (b)にその結果を示す。なお、重ね合わせによる段発波形の再現計算は、1 回計算を行うごとに累積分布が得られるが、この累積分布は Seed wave を孔数分揃える際にワイブルパラメータ a , b に基づいた乱数を使っているため、計算の都度、その累積分布が異なる。そこでここでは、再現計算の計算回数を 100 回行い、得られた累積分布曲線のうち最大（赤線）、最小（青線）の場合を図 4-8(a), (b)に示した。ここで、再現計算 100 回のうちの累積分布の最大、最小のケースとは、再現計算で得られた累積分布から逆にワイブル分布のパラメータとして求めた尺度パラメータ a が 100 回の計算のうち最大または最小となったケースを示している。図 4-8(a), (b)には、再現計算の元になった実測の段発波形（9/24AM TD342.0m）の区間ピークの累積分布（灰色○）も併せて載せている。この結果から、両軸線形の場合（図 4-8(a)）、ワイブル確率紙の場合（図 4-8(b)）ともに、累積確率 0.95 程度までは実測値が再現計算の幅に収まっており、この再現計算の方法が妥当であることを示していると言える。しかしながら累積確率がほぼ 1.0、すなわち最大振動速度の場合については、実測と再現計算がずれている。これは孔毎に込め物の込め方にばらつきがある場合や孔周辺の岩盤状態が局所的に風化や亀裂が多い場合などいくつかの偶然が重なって起きた現象でないかと考えており、本手法を用いても最大振動速度を正確に再現することは容易でないと考えられる。

4.3. より詳細な検討に基づく段発波形の再現

4.3.1. 詳細な検討を加えた段発波形の再現の全体フロー

4.2 で述べた Seed wave の重ね合わせによる段発波形の再現の基本フローは、実際に収

録された起爆秒時差 30ms の段発波形自身を再現する方法として妥当であることを示した。しかしながら、本方法を今後の発破で切羽位置や起爆秒時差が変更された場合の振動予測として応用していくことを考えた場合、基本フローに従う再現方法では十分でないと考えられる。以下の課題をさらに考慮した詳細な段発波形の再現方法の検討が必要である。

- ・ 4.2 の基本フローでは、実測の段発波形の区間ピークの累積分布から求めたワイブルパラメータ a , b にて自身の段発波形の再現を行ったが、これでは発破振動の再現のみにとどまり、予測につながらない。
- ・ 4.2 の基本フローでは起爆秒時差が 30ms の場合を考慮したであったが、特に起爆秒時差 10ms, 5ms と起爆秒時差が短くなる場合、切羽の孔位置の違いによる伝播距離の違い（伝播時間のずれ）などが重ね合わせに影響することが考えられる。
- ・ 実際のトンネル発破では、全断面発破やベンチ発破など様々な方法がある。これが地表に伝播する振動に及ぼす影響がある。

以上の課題を考慮し、4.2 の基本フローの計算手順を基本とし、そこに以下の A, B, C の詳細検討を加えた全体フローとした。

- A) ワイブルパラメータ a , b と切羽位置（換算距離）の関係
- B) インバート部の孔からの振動
- C) 切羽面上の孔位置の違いによる伝播時間のずれ

図 4-9 には、図 4-4 の基本フローに上記 A, B, C の詳細検討を加えた全体フローを示した。図 4-9 中の①～③は、図 4-4 の基本フローで示した①～③である。

A) ワイブルパラメータ a , b の切羽位置（換算距離）の関係

4.2 の基本フローでは、実測した段発波形から求めたワイブルパラメータ a , b より自身の段発波形の再現を行ったため、それ以降の発破により得られる段発波形を予測することはできなかった。この段発波形の予測を行う場合、重ね合わせする Seed wave を発生させるための適切なワイブルパラメータ a , b を予測し、設定する必要がある。したがって、ワイブルパラメータ a , b が切羽位置によってどのように変化するかについて検討した。

ワイブルパラメータ a , b を求めるためには段発波形の区間ピークの累積分布から求めることになるが、今回の発破試験で観測された単発波形の多くは、図 4-5 や図 4-6 にその波形を示すように起爆から 30ms 程度を過ぎると収束していくことがわかる。従って、今回の発破試験で設定した起爆秒時差のうち、30ms の場合の段発波形は各孔からの単発波形の

重なり合いが弱く、区間ピークが単発発破の振幅のばらつきを最もよく表していると考えることができる。そこで、起爆秒時差 30ms の場合の段発波形に限定し、ワイブルパラメータ a 、 b と切羽位置の関係をプロットした。その結果を図 4-10 に示す。ここでは、起爆秒時差 30ms の 7 回分の発破のうち、7 回目である 10/10AM は他の 6 回と伝播経路が異なり、区間ピークの取る傾向が大きく異なるため、これを除外した 6 回分の結果をプロットしている。また、グラフの横軸は、換算距離（切羽—計測点の斜距離 (m) を孔あたりの装薬量 (kg) の平方根で除したもの）で示した。この換算距離は、2 章でも述べたように、Scale Distance (SD) と呼ばれているものであり、斉発薬量が異なる場合でも伝播距離との関係と同じ関数で示すことができるとして海外ではよく用いられている（たとえば Ruilin Yang, 2010）。図 4-10 より、ワイブルパラメータ a 、 b と換算距離の関係の回帰分析を行った結果、以下の式が得られた。

$$a = 2.598(SD)^{-0.758} \quad (R^2 = 0.955) \quad (4-7)$$

$$b = 1.240(SD)^{0.150} \quad (R^2 = 0.580) \quad (4-8)$$

また、図 4-11 にワイブルパラメータ a 、 b を 3 段階に変えた合計 9 ケースの振動速度波形の例を示した。尺度パラメータ a が大きいほど、波形の振幅が大きくなり、形状パラメータ b が大きいほど、同じ波形の中の振幅のばらつきが小さくなることがわかる。

図 4-10 より、換算距離が大きくなるにつれて、尺度パラメータ a は小さくなり、形状パラメータ b は大きくなっている。つまり、換算距離が大きくなるにつれて、波形の振幅が小さくなり、波形の振幅のばらつきは小さくなる。これは、計測結果や経験的事実と整合していると考えられ、この(4-7)式や(4-8)式に基づきワイブルパラメータ a 、 b を推定しても問題ないと考えられる。

以上から、段発波形を推定したい発破イベントについて、換算距離から(4-7)式や(4-8)式を用いることで Seed wave の振幅が従う確率分布を求めることとした。

B) インバート部の孔からの振動

今回の発破試験区間では、図 3-20 で示したトンネル断面のうちインバート部のみ切羽面から数 m 後方にて掘削する補助ベンチ付全断面工法を採用した。従って、インバート部の孔を震源とする振動速度波形は地表への伝播経路が上下半部と比べ異なる（長くなる）ことからインバート部に起因する振動速度波形の振幅は小さくなる傾向が想定される。表 4-1 には、起爆秒時差 5ms, 10ms, 30ms で行ったシングルデッキの発破（起爆秒時差 3 設

定×7発破=21発破)のうち、インバート部の設定孔数が確認できなかった10/10AMの発破を除く20発破について全孔数とインバート孔数を示した。各発破でばらつきはあるものの、全孔数の概ね2割程度はインバート孔であることが分かる。このうち、同じ起爆秒時差30msのうち、特にインバート孔がなかったケース(9/18PM)と、インバート孔の割合が比較的大きいケース(9/24AM)についてその段発波形を図4-12(a),(b)に示した。図4-12(b)の後半のインバート部は、前半の通常部(上下半部)に比べ、その振幅が小さくなっていることが分かる。実際に起爆秒時差30msの7発破のうち、インバート部がなかった9/18PMと、インバート孔数が確認できなかった10/10AMを除く、5発破について、通常部(上下半部)とインバート部の区間ピークの平均とその比を表4-2に示した。5発破全においてインバート部の振幅が小さくなっており、通常部(上下半部)の振幅の比の平均は、2.41倍であった。したがって段発波形を再現するための重ね合わせ計算では、インバート部の孔から発生する振動の振幅は通常部(上下半部)の1/2.41倍とする調整を行った。

C) 切羽面上の孔位置の違いによる伝播時間のずれ

各孔の単発波形の地表の計測点までの伝播距離は、厳密には切羽面上の孔の位置によって異なる。切羽上端の孔から発生した振動に比べ、下端の孔から発生した振動の方が地表の計測点までの斜距離が長くなり、伝播時間も長くなる。地表の計測点が切羽位置に比べ十分離れている場合は、切羽を1つの震源とみなせるため、この伝播時間の差異は無視できると考えられるが、今回のように特に計測点Aのようにトンネル断面の高さが約8mに対し最小土被り厚が約10mと伝播距離が切羽面の大きさを無視できないくらい近い場合や、伝播時間差が無視できないくらい起爆秒時差を短く設定した場合(例えば5msに設定した場合)などは、この孔位置の違いによる伝播時間のずれの影響が顕著になると考えられる。

従って、ここでは各孔から地表の計測点までの伝播時間の差を考慮し、Seed waveが計測点に到達する時刻を修正することとした。孔位置を考慮した伝播時間を計算するためには、各孔から地表の計測点までの距離が必要となる。しかし、今回の発破試験では切羽写真が不鮮明であり写真から孔位置の正確な再現が困難であること、発破設計図通りに穿孔されるとは限らないこと、さらには大まかには切羽面内の起爆順序は把握できても、各孔の正確な起爆順序は記録されていないことなどから、各孔から地表の計測点までの距離と弾性波速度から直接的に伝播時間の差異を調整することは困難であった。そこで、計測された段発波形から各孔から計測点までの伝播時間差を読み取り、そこから見かけの弾性波速度を

換算する方法を検討した。

具体的な検討には、起爆秒時差 30ms の段発波形を用いた。これは起爆秒時差 30ms の場合が各孔からの振動速度波形の重なり合いが最も小さいため、各孔と観測点までの伝播距離の違いによる到達時刻のずれがより明確に表れていると考えられるためである。

図 4-13 に示すように、段発発破を開始した時刻を 0ms とし、時刻 $30 \times (i - 1) \leq t < 30 \times i$ の区間を区間 i とする。単発波形のピーク時刻を（振動速度最大値を取る時刻）を $T_s(ms)$ とする。いま、 i 番目に起爆された孔から発生した Seed wave が計測点まで伝播する時間を考える。Seed wave は孔によって振幅は異なるものの、波形の形状は単発波形と同じであると仮定すると、もし切羽で振動を計測した場合、 i 番目に起爆された孔から発生した Seed wave が最大振幅を取る時刻は、同孔が起爆されてから $T_s(ms)$ であるから、段発発破を開始した時刻から計算すると $30 \times (i - 1) + T_s(ms)$ となる。

しかしながら実際の振動計測は切羽ではなく、地表の計測点で行われる。地表の計測点と、 i 番目に起爆された孔までの距離を $d_i(m)$ とすると、 i 番目に起爆された孔から発生した Seed wave が直上計測点まで伝播するのに要する時間は $d_i/V (ms)$ となる。ただし、 $V(km/s)$ は、岩盤中の弾性波速度である。従って、 i 番目に起爆された孔から発生した Seed wave が最大振幅を取る時刻 T_i は以下で示される。

$$T_i = 30 \times (i - 1) + T_s + d_i/V (ms) \quad (4-9)$$

従って、計測した単発波形と段発波形からそれぞれ T_i , T_s を読み取り、(4-9)式に代入することで、 i 番目に起爆された孔から発生した Seed wave が直上計測点まで伝播するのに要する時間（伝播時間） $\Delta t_i (= d_i/V)$ は、以下の式で表すことができる。

$$\Delta t_i = d_i/V = T_i - T_s - 30 \times (i - 1) \quad (4-10)$$

図 4-14 に起爆秒時差 30ms の 1 発破目である 9/18PM の発破の切羽写真（発破前）、図 4-15 に同じ 9/18PM の発破の起爆孔順と伝播時間 Δt_i を示す。図 4-14 に赤、青、黄色の○で囲まれた位置が孔位置であり、その横に書かれた数字が推定の起爆孔順を示す。尚、1～3 番で示した黄色丸は、単発発破を行った孔であるため、段発発破は 4 番以降の孔になる。切羽は、左右で 3 ブロックずつ（R1～R3, L1～L3）の合計 6 ブロックに分かれており、基本的に右側のブロック（右半）→左側のブロック（左半）、上部→下部の順に起爆される。すなわち 9/18PM の発破の場合、R1→L1→R2→L2→R3→L3 の順に起爆される。これは表 4-3 に示す電子雷管のバーコードスキャナにも起爆順ごとの孔の所属ブロック名および起爆秒時が記録されている。ただし同ブロック内（例えば R1）での起爆孔順は、この

バーコードスキャンのデータからは導けなかったため、筆者が発破試験の装薬時に立ち会っていた際の目視確認や“内から外へ、上から下へ”という起爆順序の原則に基づき推定したものである。この原則に従わない起爆順序では、抵抗線が大きくなり（荷が重くなり）、想定通り発破が起きないなどの不具合が生じるため、この原則に従ったブロック内の起爆孔順の推定は、実際の起爆順序に対してかなり確度が高いと考えられる。

図 4-15 を見ると、全体を通じて起爆が進んでいくにつれ伝播時間 Δt_i も長くなっていることが分かる。なお同図には、ブロックの境界も示しているが、同ブロック内においても起爆孔順が進むにつれて孔位置が下方に下がるため伝播時間 Δt_i も大きくなる傾向にある。またブロックが右半から左半に切り替わるとき（例えば R1 から L1）は、孔位置が上方に移るので伝播時間 Δt_i がやや小さくなる。

このように、起爆孔順と伝播時間 Δt_i には相関がみられることから、この相関が明確に捉えやすいと考えられる起爆秒時差 30ms の発破 6 回分（10/10AM（30ms-7）は傾向が異なるので対象から外す）について、各発破を右半と左半に区分して起爆孔順と伝播時間 Δt_i の関係を示したグラフを図 4-16 (a)~(f) に示した。どのグラフも右半、左半に分けているため、ばらつきはあるものの全体として起爆孔順が進むにつれ伝播時間 Δt_i が大きくなっていく。この起爆孔順に対する伝播時間 Δt_i の傾きは各発破で右半、左半でほぼ等しい傾向である。ただし、9/27AM（30ms-5）の起爆孔順 30 番以降は最大振幅を取る時刻 T_i の読み取りが難しく伝播時間 Δt_i のばらつきが大きくなった。

この起爆孔順と伝播時間 Δt_i がなす傾きをトレンドと呼ぶことにする。この時、起爆孔順が N 番目までであったとすればトレンド k は、次式で求められる。

$$k = \frac{\Delta t_N - \Delta t_1}{N - 1} \quad (4-11)$$

このトレンド k は、図 4-16 (a)~(f) の横軸を、起爆孔順から各孔と計測点までの斜距離に変換すると速さの逆数の次元をもつことになる。つまり、トレンド k は岩盤中の弾性波速度と関係があると考えられる。そこでこのトレンド k から計算される弾性波速度を見かけの弾性波速度と称し、以下の式で示すことができる

$$V = \frac{d_N - d_1}{\Delta t_N - \Delta t_1} \quad (4-12)$$

図 4-17 に 10/10AM（30ms-7）を除く起爆秒時差 30ms の 6 回の発破について、見かけの弾性波速度 V と換算距離の関係を示した。その関係式は以下で示される。

$$V = 12.41 \times (SD)^{-0.62} \quad (R^2 = 0.753) \quad (4-13)$$

この式から換算距離が大きいほど見かけの弾性波速度 V は小さくなっているが、今回、各発破でほぼ装薬量を一定としているため、この関係は、斜距離が大きいほど見かけの弾性波速度 V は小さくなっていることを示している。図 3-28 に振動の伝播経路の概念図を示したように、伝播距離が長くなるほど P 波が減衰し、S 波由来が主となると考えられるため、この結果と整合している。また、3.2.1(2) では、トンネル坑内の坑壁に沿った短い距離で計測した P 波速度は、5000m/s 程度であると見積もられたが、起爆秒時差 30ms の 6 回分の各切羽と計測点 A とを結ぶ伝播経路から求めた見かけの弾性波速度は、その半分程度の値となった。今回算出した見かけの弾性波速度は、振動速度波形のピーク時刻の遅れから求めたものであり、この見かけの弾性波速度は S 波速度の成分に近いものと考えることができる。

図 4-17 の見かけの弾性波速度 V と換算距離の関係から、今回の発破試験の任意の切羽の発破において各孔から地表の計測点までの伝播時間の差を考慮できる見通しが立った。一方で、図 4-16 (a)~(f) を見ると伝播時間 Δt_i は全体的な傾向としてトレンドに従っているものの、ばらつきも大きいことが分かる。これはブロック内ではとくに起爆順序が必ずしも切羽上方から下方となっていない場合もあることや、孔周辺の岩盤状況、込め物などの爆薬の装填状況の差異などによるものと考えられる。そこでこの起爆孔順と伝播時間 Δt_i のトレンドからの偏差を e_i とし、 e_i の統計的評価を行った。

図 4-18 に 10/10AM (30ms-7) を除く起爆秒時差 30ms の 6 回の発破について e_i の累積確率を正規確率紙にプロットした。6 回とも正規確率紙上で直線となっており、 e_i が正規分布に従うことが分かる。一方、この図 4-18 の結果から e_i の平均 μ および標準偏差 σ と換算距離との関係を求め、図 4-19 に示したが、平均 μ および標準偏差 σ の統計的な傾向は把握できなかった。そこで伝播時間 Δt_i は第一近似的にはトレンドに従うものと考え、平均は $\mu = 0$ とし、標準偏差について $\sigma = 0.8\text{ms}$ 前後の値をとるものが多かったので、 $\sigma = 0.8\text{ms}$ とした。

以上をまとめると、起爆孔順 i 番目の孔から発生した seed wave が計測点 A に到達するまでの伝播時間 Δt_i は、次式から求められる。ただし d_1 、 d_N は 1 番目の孔および N 番目の孔から計測点までの斜距離である。

$$\begin{aligned} \Delta t_i &= k \times (i-1) + e_i \\ &= \frac{\Delta t_N - \Delta t_1}{N-1} \times (i-1) + e_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{N-1} \cdot \frac{d_N - d_1}{V} \times (i-1) + e_i \\
&= \frac{1}{N-1} \cdot \frac{d_N - d_1}{12.41 \times (SD)^{-0.62}} \times (i-1) + e_i \quad (4-14)
\end{aligned}$$

ここで e_i は、平均0、標準偏差0.8の正規分布に従う乱数である。

4.3.2. 重ね合わせの各ステップの整理と段発波形再現の結果

以上、4.2の基本フローの計算手順に以下のA、B、Cの詳細検討を加えた全体フロー（図4-9）に従い、段発波形の再現を行った。

再度、この全体フローを整理すると次のようになる。

①単発波形の準備

単発波形として、計測した1～3回分の単発波形を用意する。これらの単発波形の振動中心の偏差を除くため、直流成分の除去を行う。次に、段発波形の再現を行う切羽位置に相当する換算距離（SD）に従い、(4-7)式、(4-8)式からワイブルパラメータ a 、 b を求める。

②振幅を調整し、孔数分だけ元波形（Seed wave）を準備

①で求めたワイブルパラメータ a 、 b に従い、重ね合わせする段発波形の孔数分だけ、ワイブル乱数を発生させる。またそのうちインバート孔数分は、振幅の調整（1/2.41倍）を行う。このワイブル乱数に従い、単発波形の振幅を伸縮させ、重ね合わせする段発波形の孔数分だけSeed waveを用意する。

③孔数分のSeed waveを重ね合わせ

切羽面上の孔位置と計測点までの距離に応じて(4-14)式に従い、孔数分の伝播時間 Δt_i を求める。設定した起爆秒時差と各孔の伝播時間 Δt_i から求まる各孔の起爆時刻を算出し、それに応じてSeed waveを重ね合わせする。

以上の全体フローに従って、発破試験で得られた段発波形の再現を行った。そこで得られた再現波形について図4-8と同様に、起爆秒時差（30ms、10ms、5ms）ごとに区切った区間ピークの累積分布を求め、図4-20（a）～（f）、図4-21（a）～（g）、図4-22（a）～（g）にそれぞれ示した。図4-20～図4-22はそれぞれ起爆秒時差30ms、10ms、5msの場合であり、図4-20の起爆秒時差30msの場合のみ、10/10AM（30ms-7）が他の6回とワイブルパラメータ a 、 b の傾向が異なるので対象から外し、全6回分としている。また

図 4-20～図 4-22 には発破試験で計測された段発波形の区間ピークの累積分布のプロット（灰色○）の他に、再現計算 100 回のうちの累積分布の最大（赤線）、最小（青線）の場合を示した。ここで、再現計算のうちの最大、最小の場合とは、再現計算で得られた累積分布から逆にワイブル分布のパラメータを求め直し、その尺度パラメータ a が最大、最小となった計算ケースを示している。

図 4-20～図 4-22 を見ると、概ね再現計算の範囲内（青線と赤線の間）に実測結果（灰色）が入っている。しかし例えば図 4-20 (c)や図 4-20 (f) , 図 4-21 (f)のように累積確率が 1 に近い数点、すなわち最大振動速度については、計算結果と計測結果が大きくずれる場合がある。これは、トンネル天端に近い（振動の伝播距離が短い）、孔周辺の岩盤状態が局所的に風化や亀裂が多かったなどでたまたま悪かったなど、いくつかの偶然が重なって起きた現象であると考えられる。このような累積確率が 1 に近い数点が極端に大きくなる現象は、再現計算の場合でも同様に見られており、この重ね合わせ方法を用いても、偶然性に大きく左右される最大振動速度を正確に予想することは容易でないことがわかる。

一方、最大振動速度以外については、再現計算にて段発波形の全体の傾向を概ねつかんでおり、今回の再現計算の手法の妥当性を示していると考えられる。

特に図 4-20 の起爆秒時差 30ms の場合は、図 4-10 に示したように自身（起爆秒時差 30ms）の段発波形の区間ピークの傾向からワイブルパラメータ a 、 b と換算距離の関係を求めていることもあり、実測に対する再現計算の精度が高い。一方、図 4-22 の起爆秒時差 5ms の場合は、全体的に実測に対し再現計算の方が、振幅がやや大きくなる傾向がみられる。起爆秒時差 5ms の場合について詳細に検討したところ、再現計算の段発波形の振動中心がずれている場合も見られ、単発波形の直流成分の除去が十分でなかったことは要因の 1 つと考えられる。また、起爆秒時差が 5ms と小さい場合は、各 Seed wave が収束する前に次々と Seed wave が重なるため、起爆秒時差が 30ms の場合に比べ、伝播時間 Δt_i の数 ms の違いが段発発破に及ぼす影響も大きい。特に伝播時間 Δt_i は偏差 e_i が正規乱数として組み入れられていることも、再現精度を上げることが容易でない要因の 1 つとなっていると考えられる。

但し、図 4-20～図 4-22 において全体的には再現計算にて段発波形の全体の傾向を概ねつかんでいると言える。

しかしながら、その中で特に図 4-21(b) (9/19 PM (10ms-2)) については、再現計算と実測の傾向が異なっている。そこでその原因を詳細に検討することとした。図 4-21 (b)で

は、再現計算から求まる区間ピークが実測に比べ大きく下回っている。図 4-21 (b)の 9/19 PM のグラフに、この 9/19 PM の前後で行われた発破である 9/18 PM, 9/19 AM, 9/20 AM, 9/23 AM の実測を重ね合わせたものを図 4-23 に示す。これを見ると、9/19 PM の再現計算は、9/19 PM の前後の発破の実測と比較すると妥当な結果であることが分かり、9/19 PM の実測の方がその前後の発破に比べ、著しく振幅が大きくなっていることが分かる。

さらに詳細に図 4-24 に 9/19 PM の実測の段発波形を示したが、特に時刻 200ms 前後や 600ms 前後で実測波形の振幅が再現計算よりもかなり大きくなっていることが分かる。この部分は図 4-24 にも示しているように、ブロック L1, L2, L3, 即ち切羽の左半分にある孔の起爆秒時に対応していることが分かる。したがって、9/19 PM の発破では、何らかの理由（局所的な軟弱部の存在等）により、切羽左半分にある孔から発生した振動が大きくなり、実測の段発波形の振幅が再現計算よりも大きくなったと考えられる。

4.3.3. 再現計算の試行回数の検討

これまで 4.2 および 4.3 にて示した段発波形の再現のための重ね合わせ計算は、その試行回数を 100 回として検討してきた。しかしながら、この試行回数 100 回による重ね合わせ計算が十分であるかを検討する必要がある。そこで、起爆秒時差 30ms の 6 回分 (10/10AM (30ms-7) を除く) について、試行回数を 1,000 回として同じ重ね合わせ計算を行い、試行回数 100 回に対し、区間ピークの累積分布を比較した。図 4-25 にその比較結果を示す。各発破において、累積分布の最大（赤線）、最小（青線）は、試行回数 100 回と 1,000 回でよく類似しており、大きな差異は見られないことが分かる。そこで、本研究では 4.2 および 4.3 にて示してきた重ね合わせの計算方法の中で、様々な乱数を適用することなどによる段発波形のばらつきの程度は、試行回数 100 回で十分評価できていると考えられる。

4.4. 4章のまとめ

本章では前章（3 章）の発破試験の実施及びその分析を受け、単発波形の重ね合わせによる全体の振動速度波形（段発波形）の再現法を検討した。1 つの単発波形をある起爆秒時差で単純に重ね合わせた波形は、実際の振動速度波形と比べ定性的な傾向は一致しているものの、実際の振動速度波形の振幅のばらつきは再現できない。この振幅のばらつきは、孔位置や、孔周辺の岩盤状態、振動伝播経路などの要因が影響するがこれらを個々に定量的に評価することは容易ではない。そこで実際の振動速度波形の振幅のばらつきを統計的に扱っ

た結果、各孔から発する振動の振幅のばらつきはワイブル分布に従うことを明らかにした。ワイブル分布は尺度と形状の 2 つパラメータによって決定されることから、逆に振動速度波形の振幅のばらつきをこの 2 つの定数によって統計的に表すことができる。

以上の検討を基に、段発波形の再現の基本フローを構築した。この基本フローは①単発波形の準備、②振幅を調整し孔数分だけ重ね合わせの元波形 (Seed wave) を準備、③孔数分の Seed wave を重ね合わせ の基本 3 ステップで構成される。この基本フローに従って再現した段発波形は、その平均的な振幅の大きさやばらつきの点で実測の段発波形をよく反映していた。更に再現計算で得られた段発波形を、実際の段発波形と同様に、振幅のばらつきを統計的に評価した結果、100 回試行した再現計算の最大と最小のケースの幅に、実測の波形の累積分布が収まる形となりこの再現法の妥当性を示した。さらにこの基本フローの精度を高め、起爆秒時差が小さい場合など、より厳しい条件でも成立することを目的に、基本フローに検討を追加した。具体的には、基本フロー①~③のステップの間に A.伝播距離とワイブル定数の関係の算定、B.トンネルのインバート部の振幅調整、C.切羽面上の各孔位置と地上計測点までの距離に応じた伝播時間の計算、を追加した。この詳細な検討を追加し、再現した振動速度波形の振幅のばらつきを統計的に評価した結果、起爆秒時差が 5ms の場合など、より厳しい条件においても再現計算の方法が妥当であることを示した。

表 4-1 インバート部の孔数

日時	全体孔数	インバート孔数
9/17 AM	102	23
9/18 AM	96	21
9/18 PM	77	0
9/19 AM	100	20
9/19 PM	96	22
9/20 AM	92	19
9/23 AM	93	16
9/23 PM	82	17
9/24 AM	96	29
9/24 PM	76	19
9/25 AM	89	9
9/25 PM	85	22
9/26 AM	116	35
9/26 PM	99	27
9/27 AM	100	14
9/27 PM	97	23
10/3 AM	102	32
10/3 PM	110	35
10/4 AM	97	31
10/4 PM	112	24

表 4-2 通常部分(上下半部)とインバート部の振幅の比較

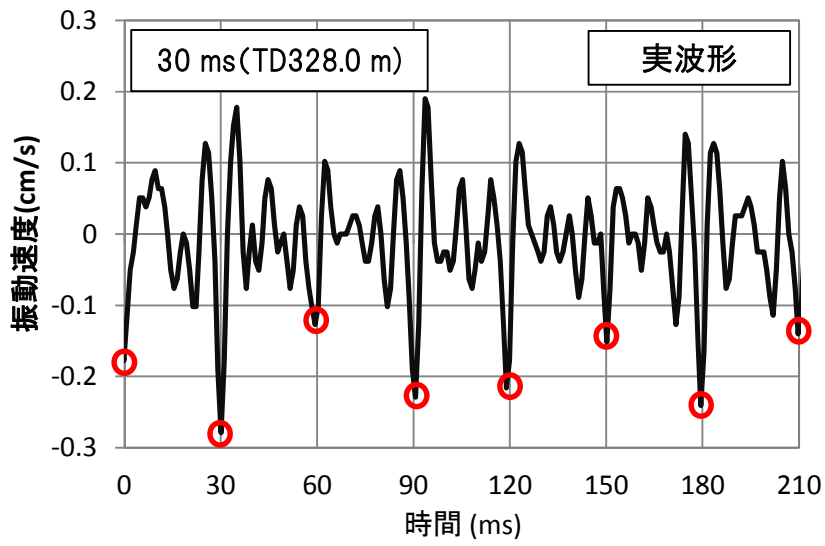
	通常	インバート	比
9/20 AM	0.140	0.102	1.37
9/24 AM	0.178	0.0889	2.00
9/25 AM	0.152	0.0508	2.99
9/27 AM	0.229	0.0635	3.61
10/3 PM	0.292	0.139	2.10

(単位: cm/s)

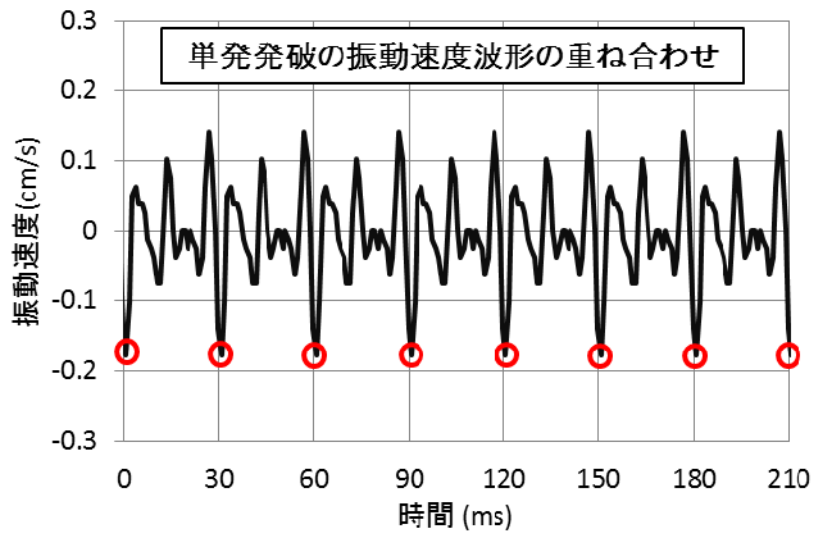
平均: 2.41

表 4-3 電子雷管 eDevll のバーコードスキャナに記録された起爆秒時リスト(9/18PM)

EDEV DETLIST 2013/SEP/18 14:42:00							
起爆順	雷管ID	ブロック名	起爆秒時	起爆順	雷管ID	ブロック名	起爆秒時
1	6501A754	D#:A1	DELAY: 0 MS	41	6501A634	D#:L1	DELAY: 2610 MS
2	6501A76C	D#:A1	DELAY: 500 MS	42	6501A63D	D#:L1	DELAY: 2640 MS
3	6501A6E0	D#:A1	DELAY: 1000 MS	43	6501A5F0	D#:L1	DELAY: 2670 MS
4	6501A783	D#:R1	DELAY: 1500 MS	44	6501A5F1	D#:L1	DELAY: 2700 MS
5	6501A75E	D#:R1	DELAY: 1530 MS	45	6501A5F4	D#:L1	DELAY: 2730 MS
6	6501A62B	D#:R1	DELAY: 1560 MS	46	6501A5EF	D#:L1	DELAY: 2760 MS
7	6501A6F9	D#:R1	DELAY: 1590 MS	47	6501A5E9	D#:L1	DELAY: 2790 MS
8	6501A74A	D#:R1	DELAY: 1620 MS	48	6501A5E5	D#:L1	DELAY: 2820 MS
9	6501A714	D#:R1	DELAY: 1650 MS	49	6501A6DF	D#:L1	DELAY: 2850 MS
10	6501A6DB	D#:R1	DELAY: 1680 MS	50	6501A736	D#:L1	DELAY: 2880 MS
11	6501A6E9	D#:R1	DELAY: 1710 MS	51	6501A727	D#:L1	DELAY: 2910 MS
12	6501A6E8	D#:R1	DELAY: 1740 MS	52	6501A6E4	D#:R2	DELAY: 2940 MS
13	6501A756	D#:R1	DELAY: 1770 MS	53	6501A74D	D#:R2	DELAY: 2970 MS
14	6501A722	D#:R1	DELAY: 1800 MS	54	6501A6F2	D#:R2	DELAY: 3000 MS
15	6501A5DA	D#:R1	DELAY: 1830 MS	55	6501A5DB	D#:R2	DELAY: 3030 MS
16	6501A755	D#:R1	DELAY: 1860 MS	56	6501A5DC	D#:R2	DELAY: 3060 MS
17	6501A76A	D#:R1	DELAY: 1890 MS	57	6501A628	D#:L2	DELAY: 3090 MS
18	6501A6DE	D#:R1	DELAY: 1920 MS	58	6501A6EE	D#:L2	DELAY: 3120 MS
19	6501A74B	D#:R1	DELAY: 1950 MS	59	6501A6D4	D#:L2	DELAY: 3150 MS
20	6501A758	D#:R1	DELAY: 1980 MS	60	6501A054	D#:L2	DELAY: 3180 MS
21	6501A749	D#:R1	DELAY: 2010 MS	61	6501A5D7	D#:L2	DELAY: 3210 MS
22	6501A6F1	D#:R1	DELAY: 2040 MS	62	6501A5E6	D#:L2	DELAY: 3240 MS
23	6501A75B	D#:R1	DELAY: 2070 MS	63	6501A5E3	D#:L2	DELAY: 3270 MS
24	6501A5DE	D#:R1	DELAY: 2100 MS	64	6501A5D3	D#:L2	DELAY: 3300 MS
25	6501A75F	D#:R1	DELAY: 2130 MS	65	6501A058	D#:L2	DELAY: 3330 MS
26	6501A6FA	D#:R1	DELAY: 2160 MS	66	6501A633	D#:L2	DELAY: 3360 MS
27	6501A75D	D#:R1	DELAY: 2190 MS	67	6501A63C	D#:L2	DELAY: 3390 MS
28	6501A781	D#:R1	DELAY: 2220 MS	68	6501A5E1	D#:L2	DELAY: 3420 MS
29	6501A786	D#:R1	DELAY: 2250 MS	69	6501A5E8	D#:L2	DELAY: 3450 MS
30	6501A787	D#:R1	DELAY: 2280 MS	70	6501A5D8	D#:L2	DELAY: 3480 MS
31	6501A6E7	D#:R1	DELAY: 2310 MS	71	6501A5D4	D#:R3	DELAY: 3510 MS
32	6501A757	D#:R1	DELAY: 2340 MS	72	6501A5EA	D#:R3	DELAY: 3540 MS
33	6501A5ED	D#:L1	DELAY: 2370 MS	73	6501A5DF	D#:R3	DELAY: 3570 MS
34	6501A5D5	D#:L1	DELAY: 2400 MS	74	6501A76D	D#:R3	DELAY: 3600 MS
35	6501A5E7	D#:L1	DELAY: 2430 MS	75	6501A5DD	D#:L3	DELAY: 3630 MS
36	6501A62C	D#:L1	DELAY: 2460 MS	76	6501A6F0	D#:L3	DELAY: 3660 MS
37	6501A052	D#:L1	DELAY: 2490 MS	77	6501A5D9	D#:L3	DELAY: 3690 MS
38	6501A5EB	D#:L1	DELAY: 2520 MS				
39	6501A62E	D#:L1	DELAY: 2550 MS				
40	6501A5EC	D#:L1	DELAY: 2580 MS				

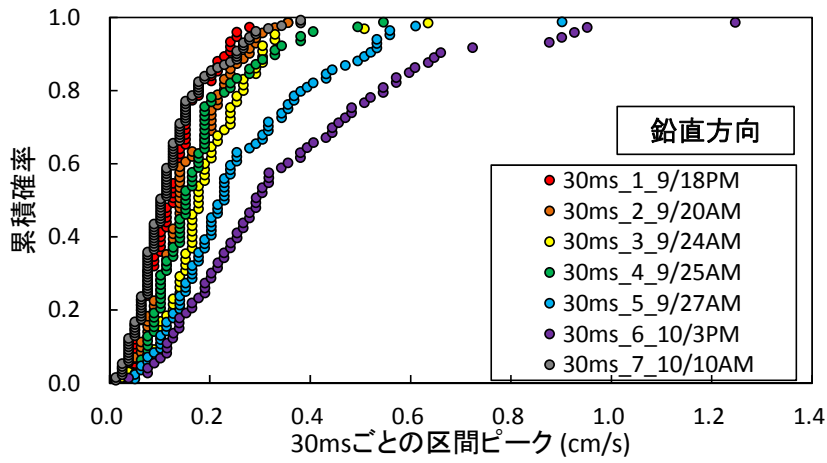


(a) 段発発破の実波形

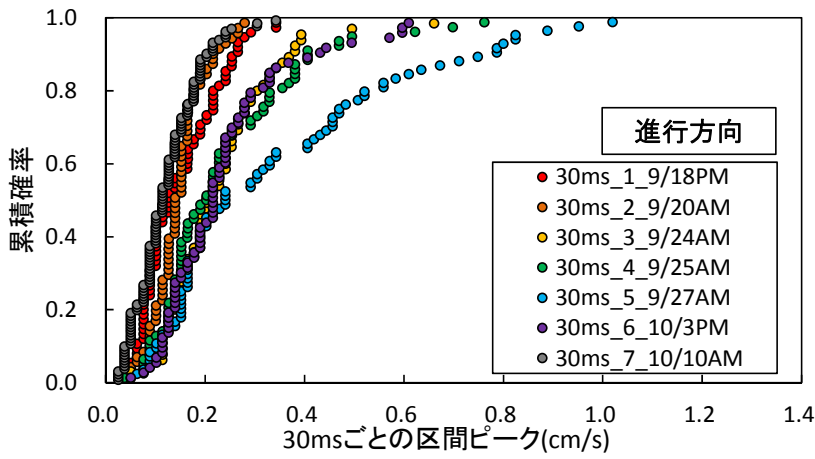


(b) 単発発破の振動速度波形の重ね合わせ

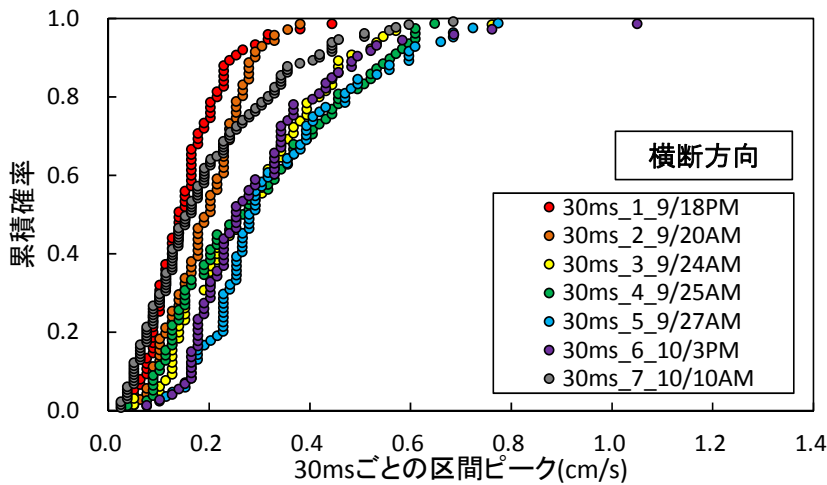
図4-1 段発発破の実波形と単発発破の重ね合わせの比較



(a) 鉛直方向

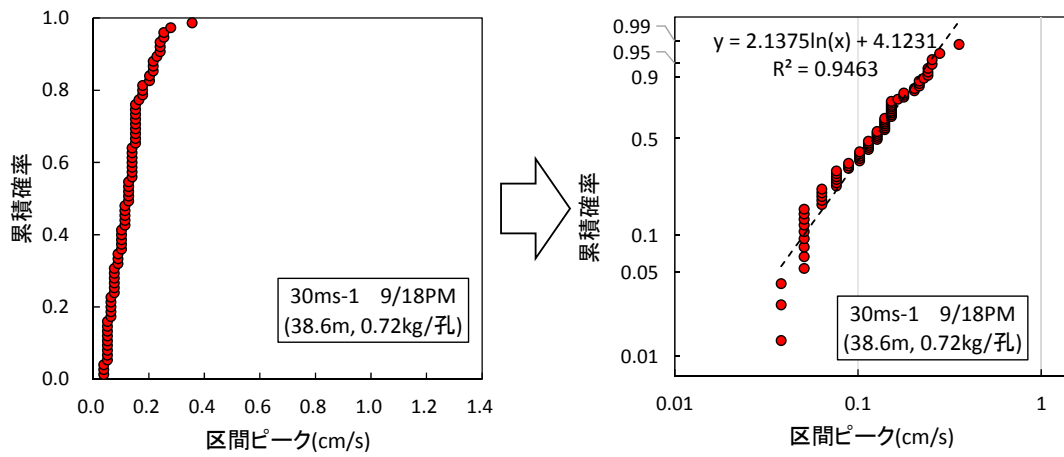


(b) 進行方向

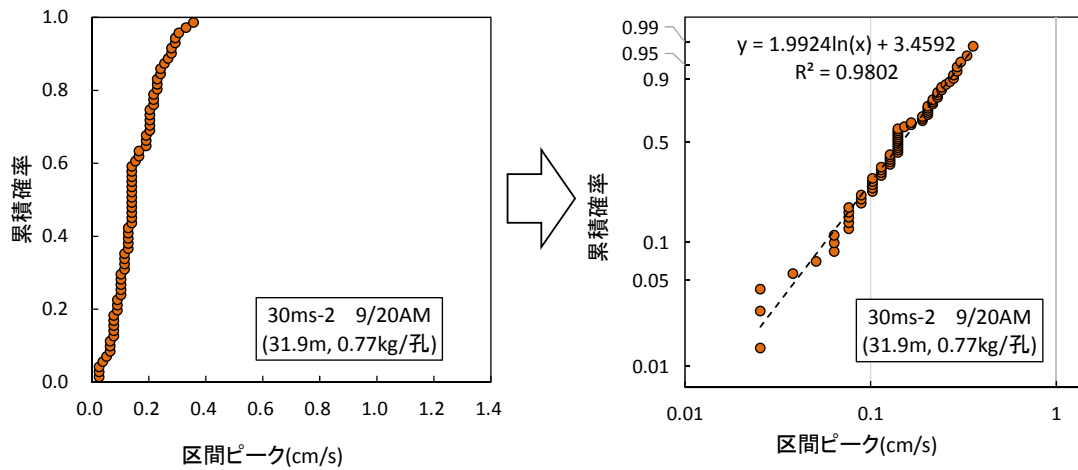


(c) 横断方向

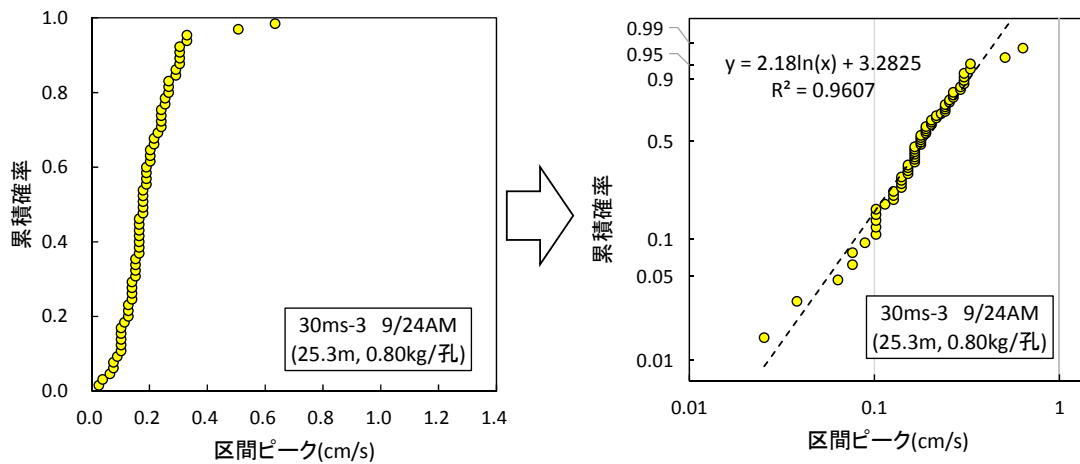
図4-2 段発発破の 30ms ごとの区間ピークの累積分布(計測点 A)



(a) 30ms-1 9/18 PM 鉛直成分

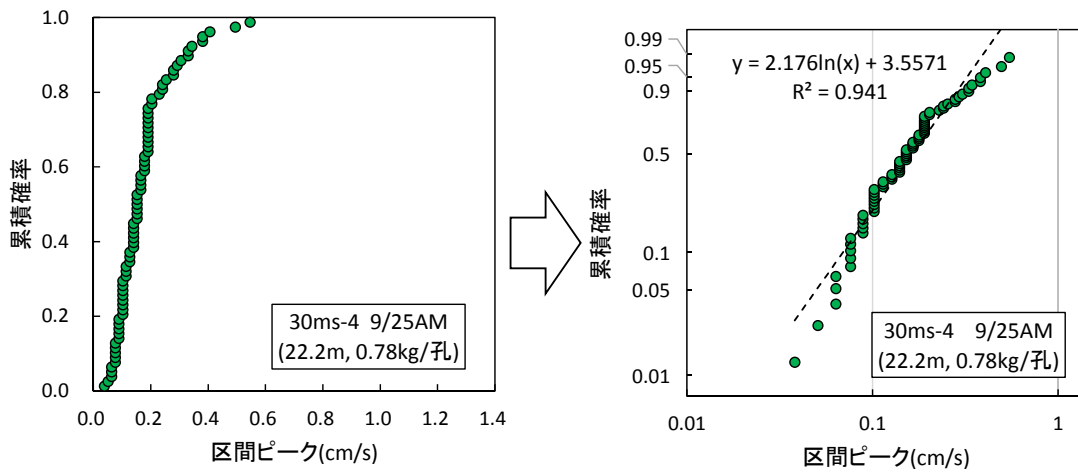


(b) 30ms-2 9/20 AM 鉛直成分

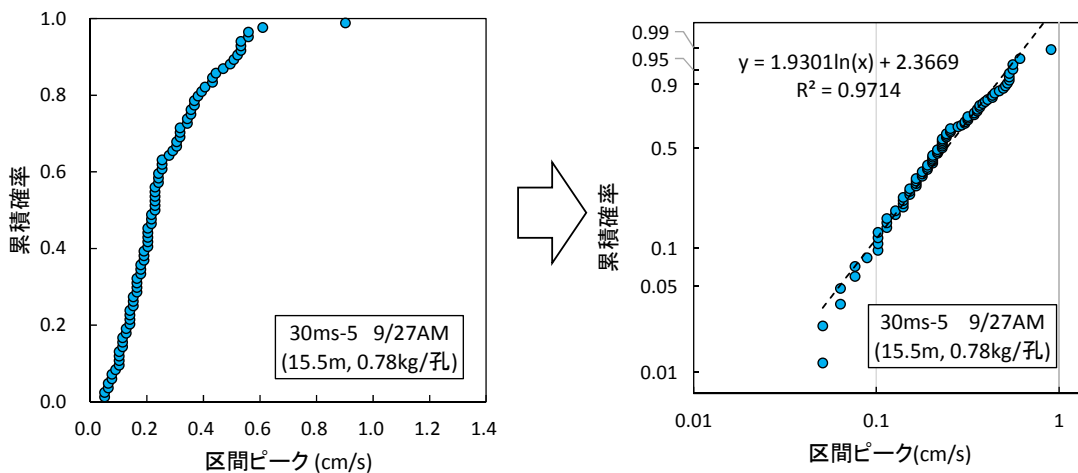


(c) 30ms-3 9/24 AM 鉛直成分

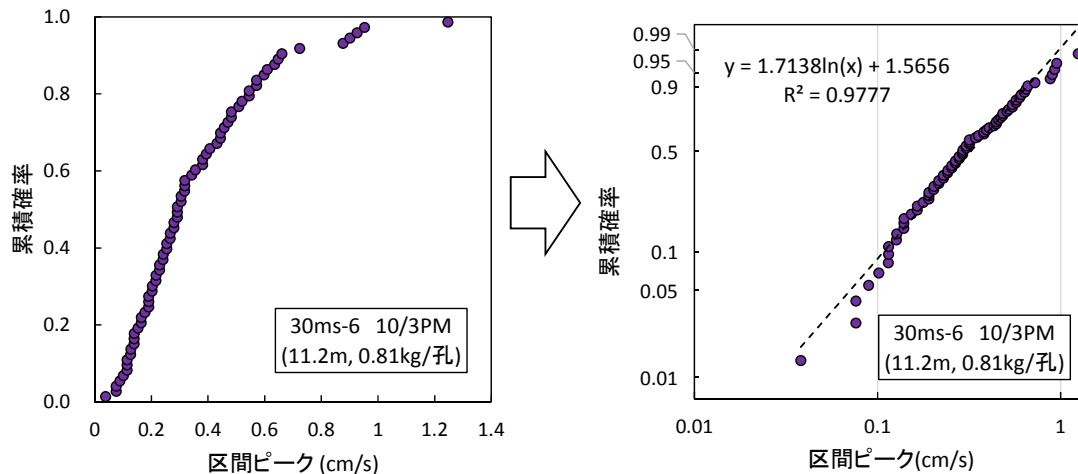
図4-3 起爆秒時差 30ms に設定した段発発破の区間ピーク(鉛直成分)の累積分布(左)とそのワイブル確率紙プロット(右)



(d) 30ms-4 9/25 AM 鉛直成分

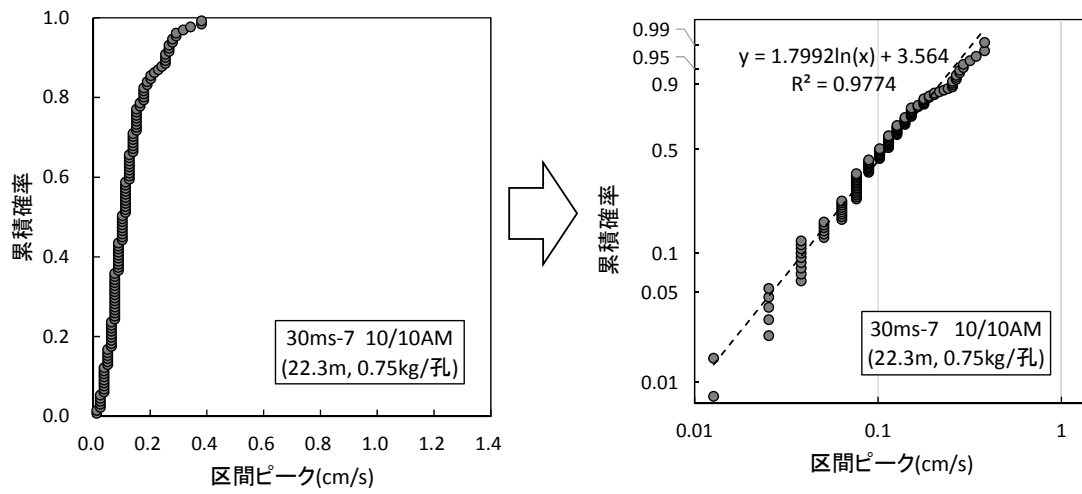


(e) 30ms-5 9/27 AM 鉛直成分



(f) 30ms-6 10/3 PM 鉛直成分

図4-3 起爆秒時差 30ms に設定した段発発破の区間ピーク(鉛直成分)の累積分布(左)とそのワイブル確率紙プロット(右)



(g) 30ms-7 10/10 AM 鉛直成分

図4-3 起爆秒時差 30ms に設定した段発発破の区間ピーク(鉛直成分)の累積分布(左)とそのワイブル確率紙プロット(右)

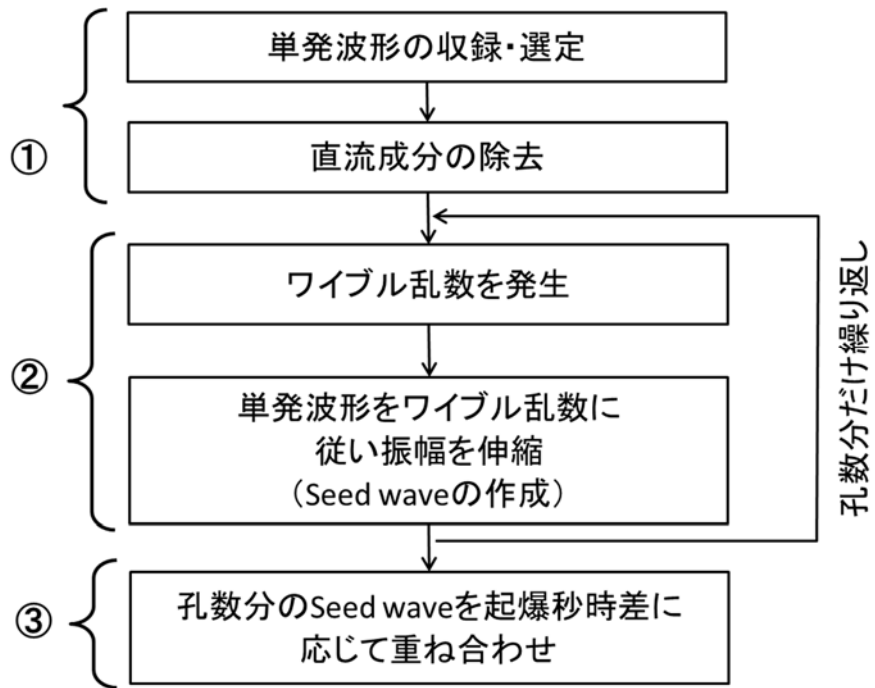


図4-4 単発波形の重ね合わせによる段発波形再現の基本フロー

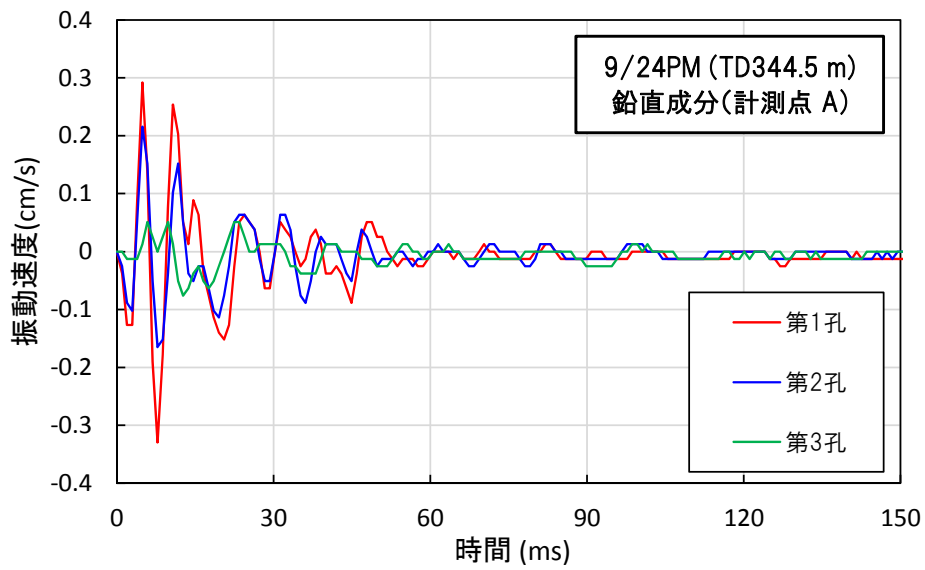


図4-5 後発の単発波形の振幅が著しく小さい例(9/24PM TD344.5m 鉛直成分)

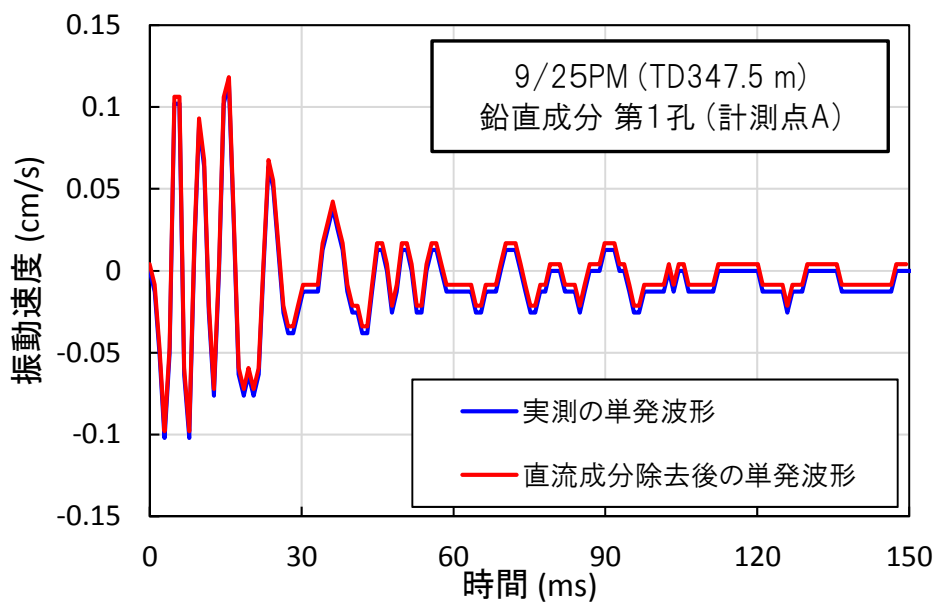
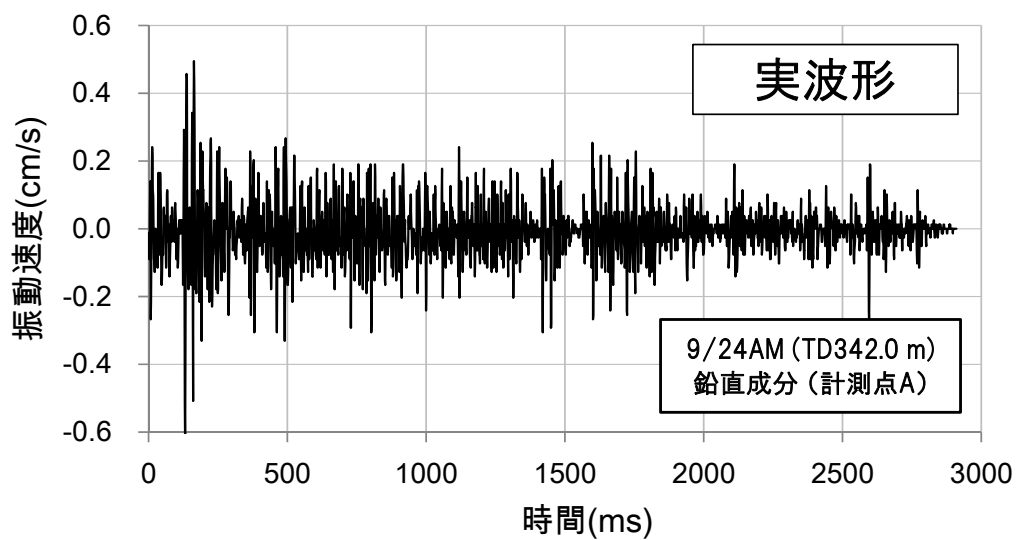
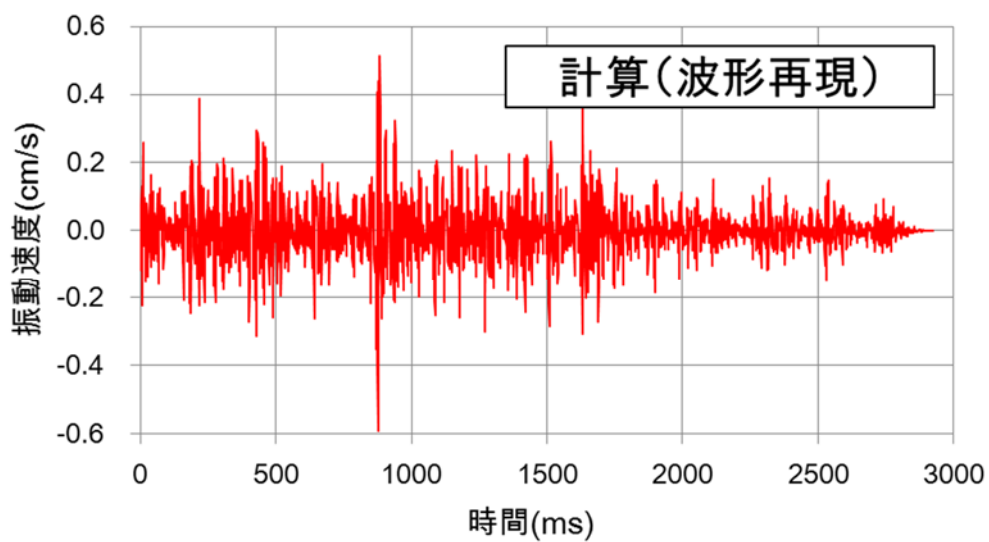


図4-6 直流成分(DS成分)の除去

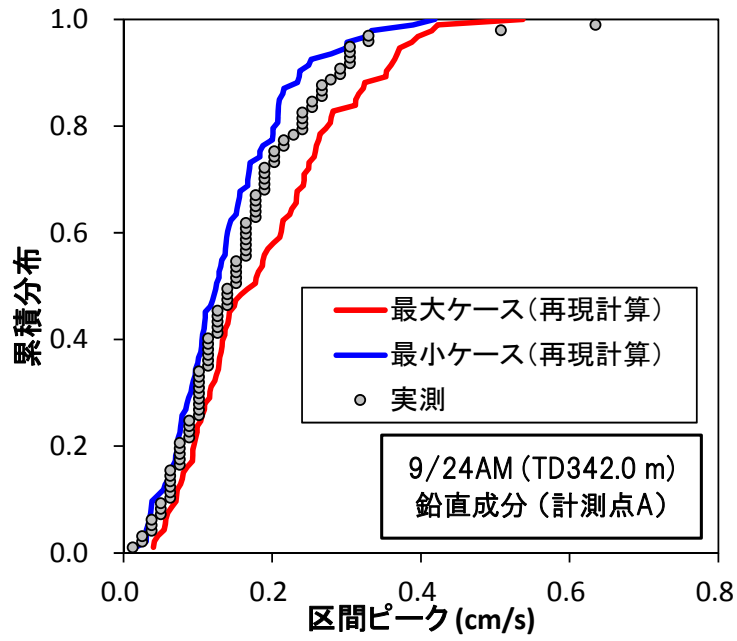


(a) 実測の段発波形(9/24AM TD342.0m 鉛直成分)

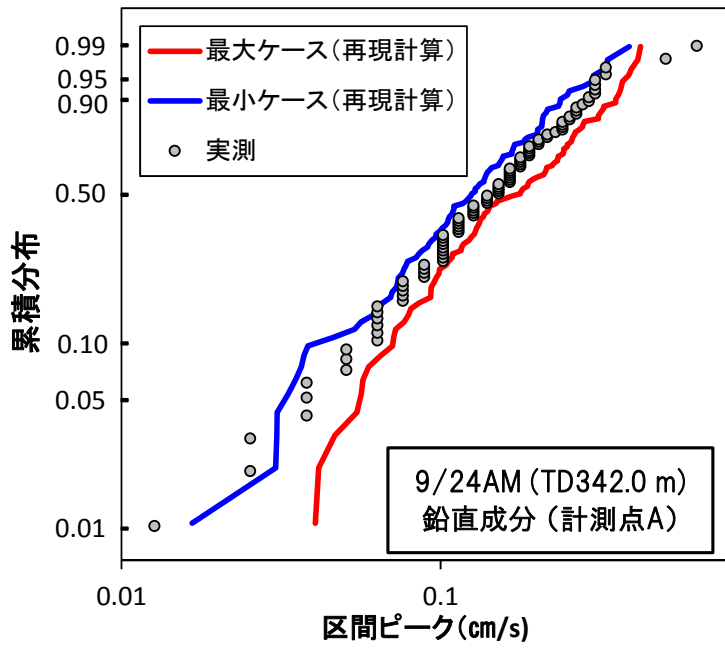


(b) 重ね合わせにより再現した段発波形の一例

図4-7 実測の段発波形(上)と重ね合わせにより再現した段発波形(下)



(a) 区間ピークの累積分布(両線形軸)



(b) 区間ピークの累積分布(ワイブル確率紙)

図4-8 実測と再現計算(最大/最小)の区間ピークの累積分布の比較

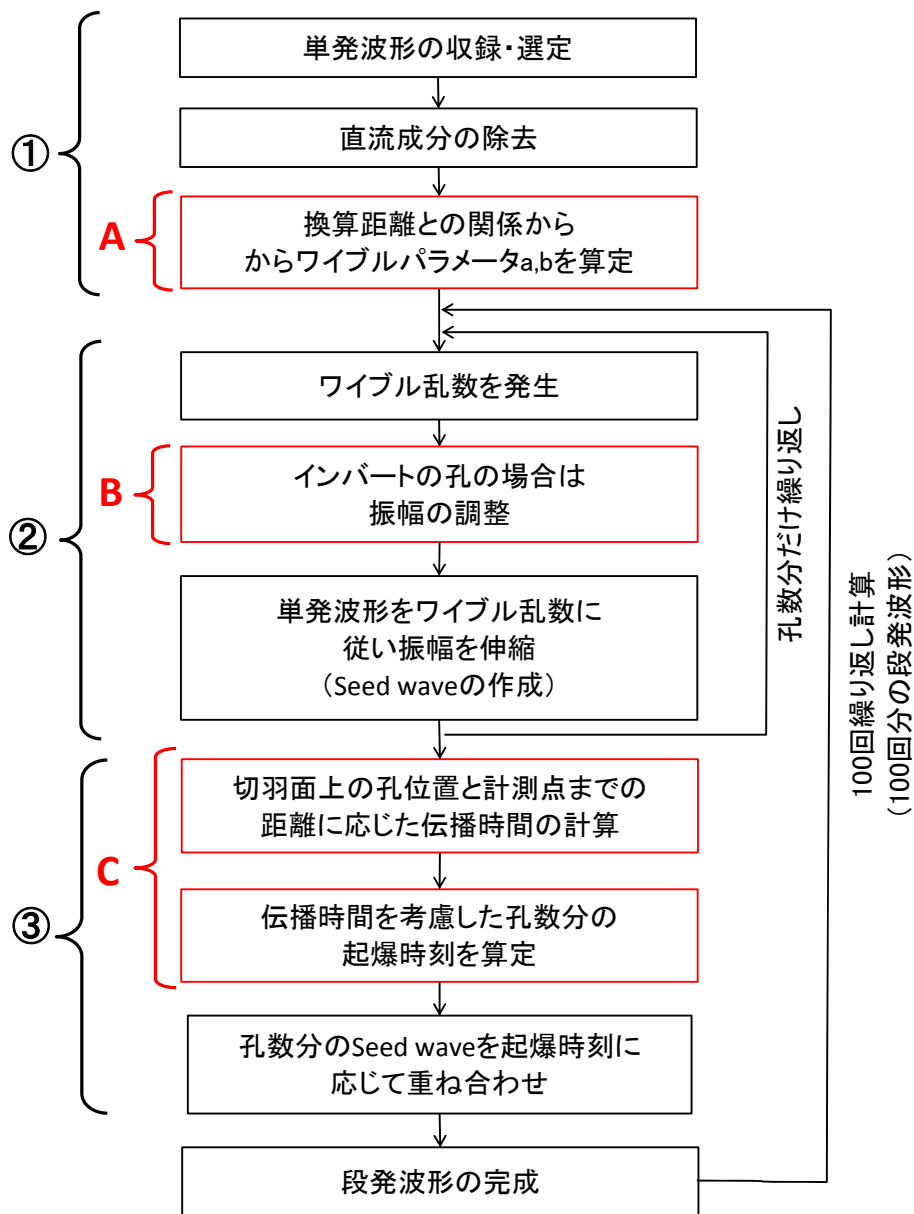
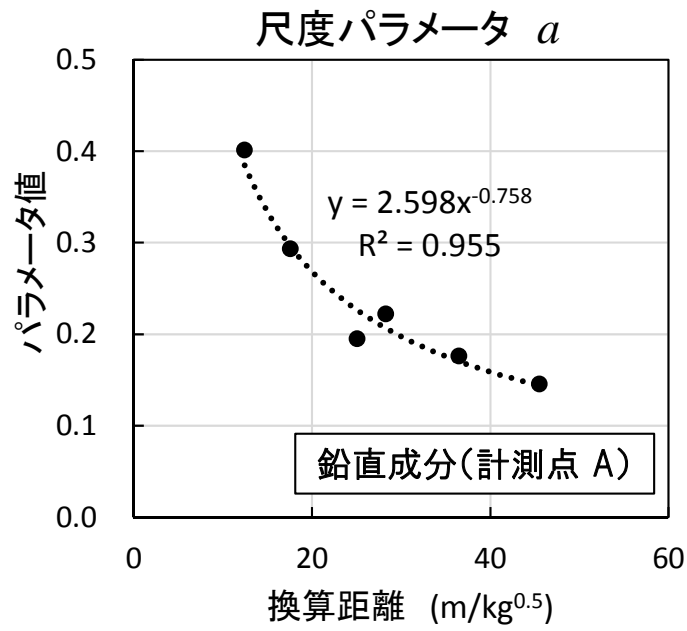
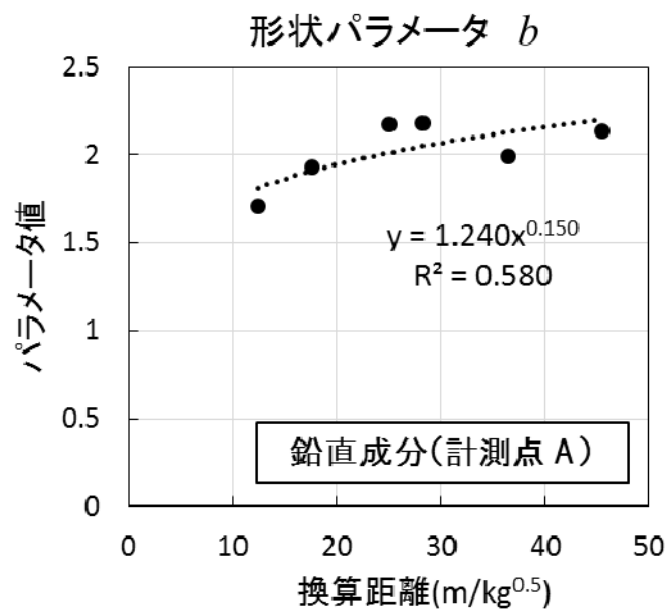


図4-9 基本フローに詳細検討を加えた段発波形再現の全体フロー



(a) 尺度パラメータ a



(b) 尺度パラメータ b

図4-10 ワイブルパラメータと換算距離の関係

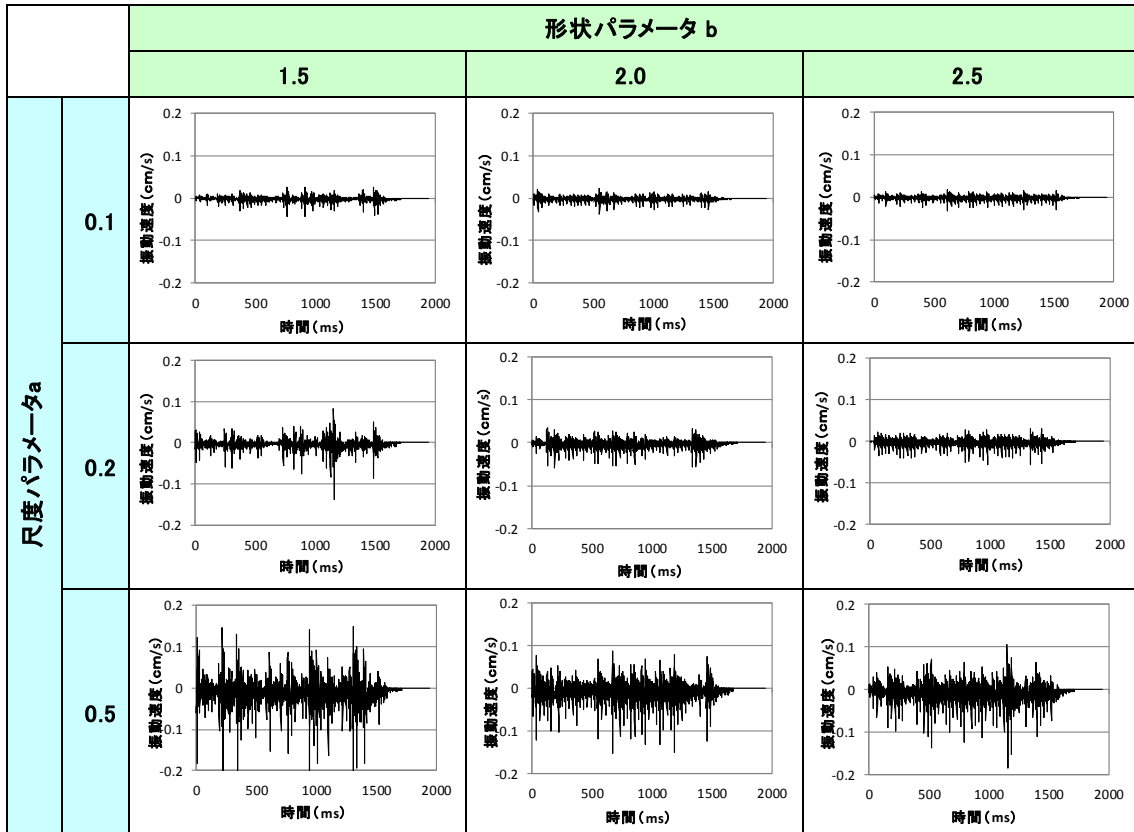
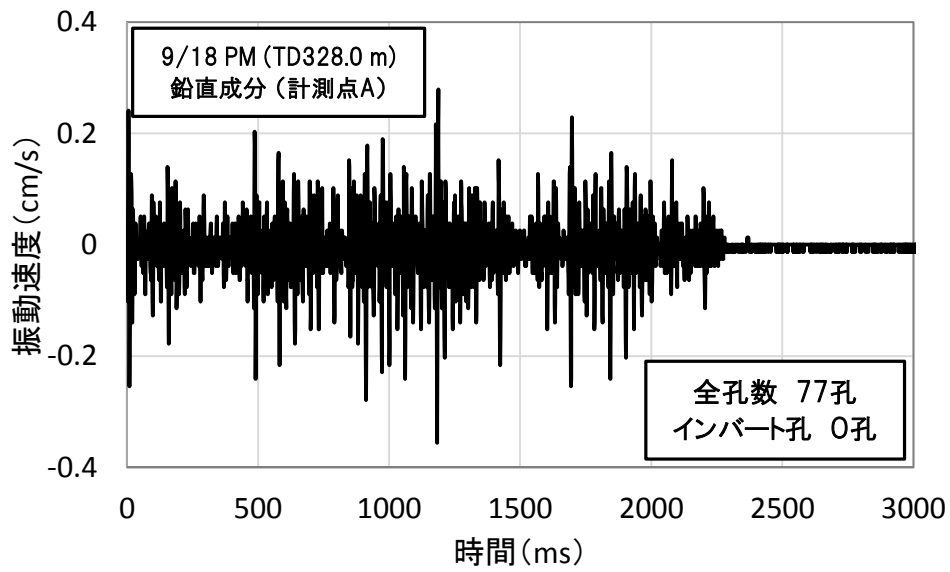
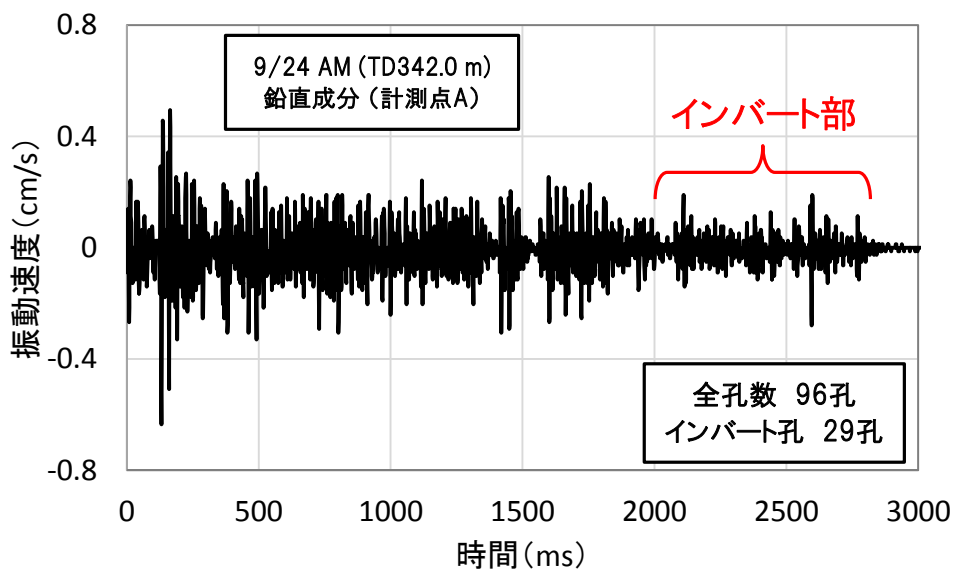


図4-11 ワイブルパラメータと代表的な振動速度波形の形状



(a) インバート孔が無い場合(9/18 PM TD328.0 m 鉛直成分)



(b) インバート孔が有る場合(9/24 AM TD342.0 m 鉛直成分)

図4-12 インバートの有無による振動速度波形の違い

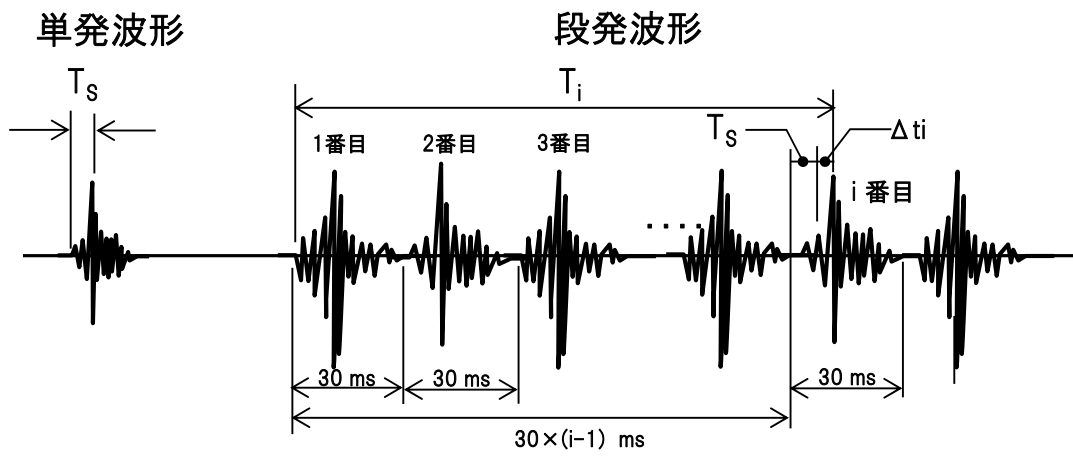


図4-13 段発波形内の振幅ピークの時間ずれから求める伝播時間 Δt_i の概念図

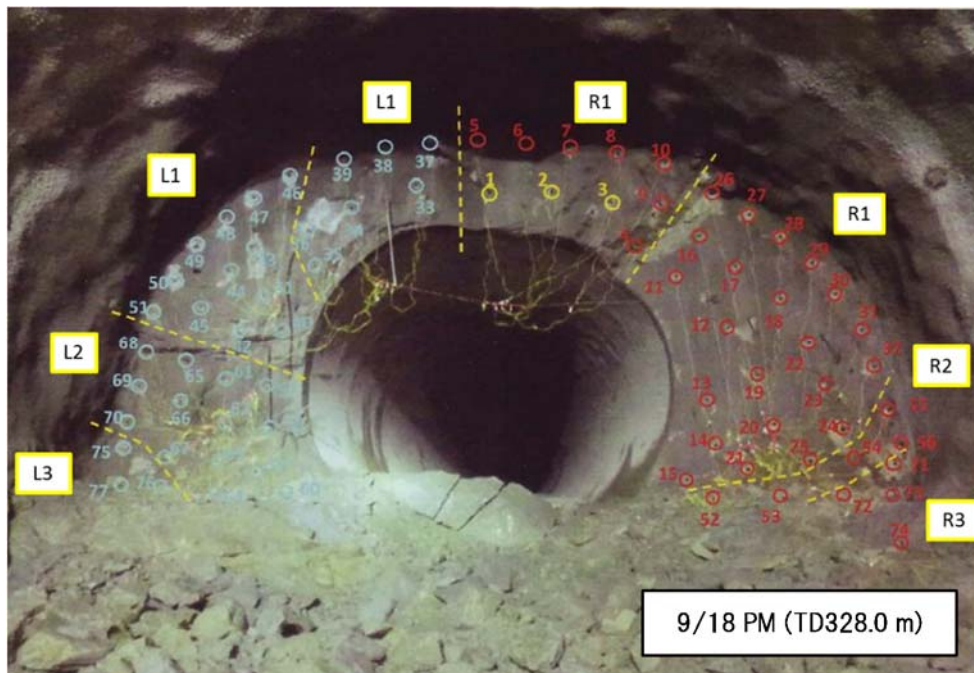


図4-14 発破孔の起爆順の例(9/18PM)

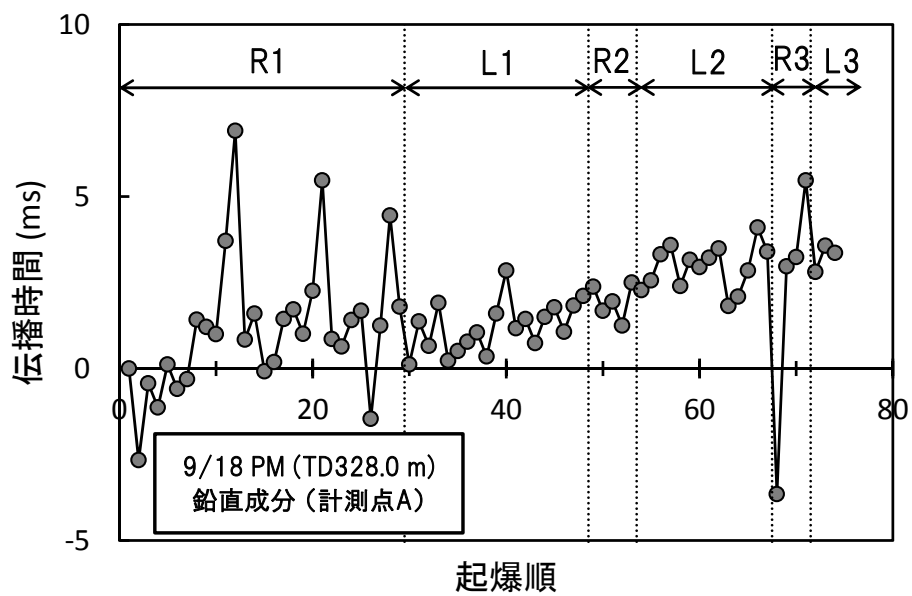
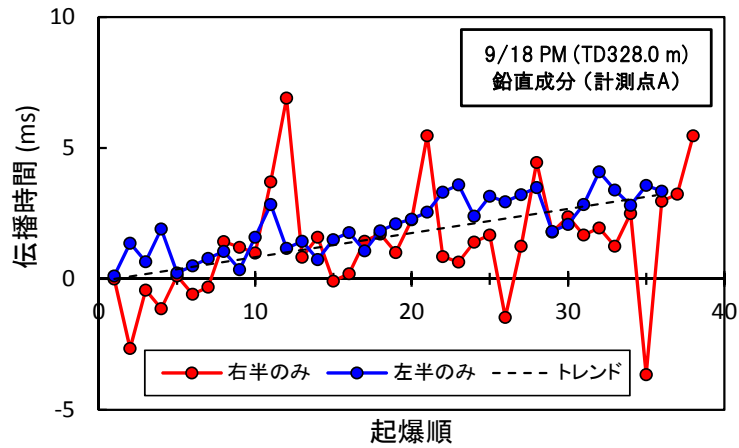
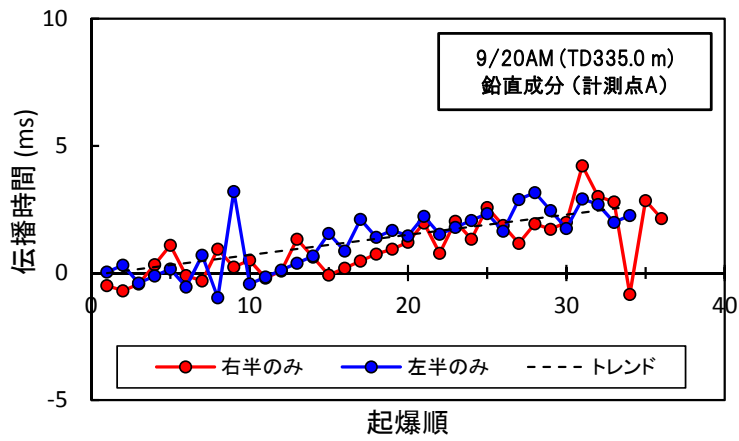


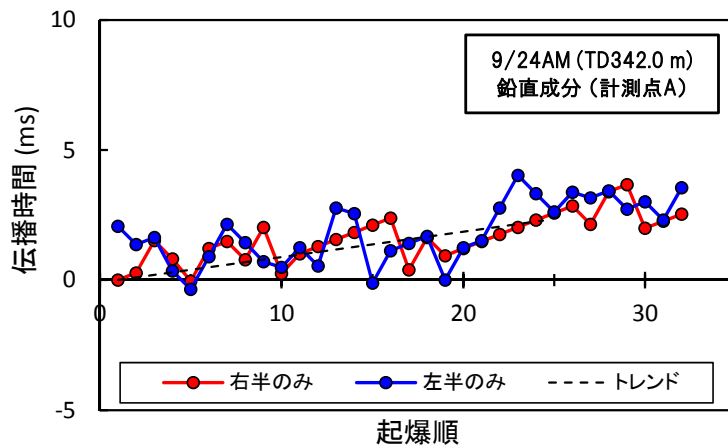
図4-15 起爆孔順と伝播時間の関係(9/18PM)



(a) 30ms-1 9/18 PM

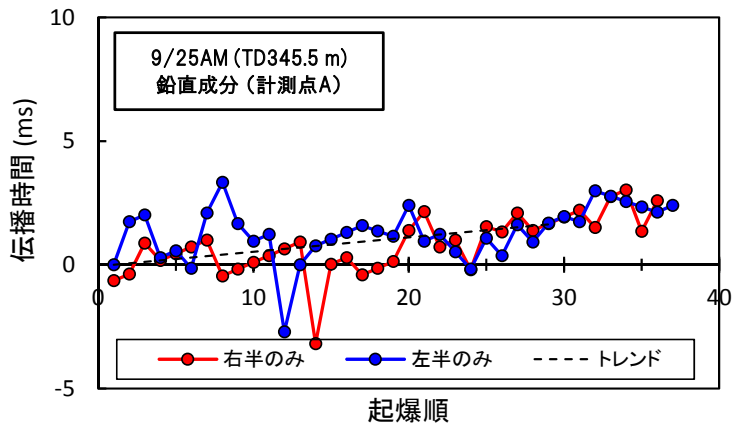


(b) 30ms-2 9/20 AM

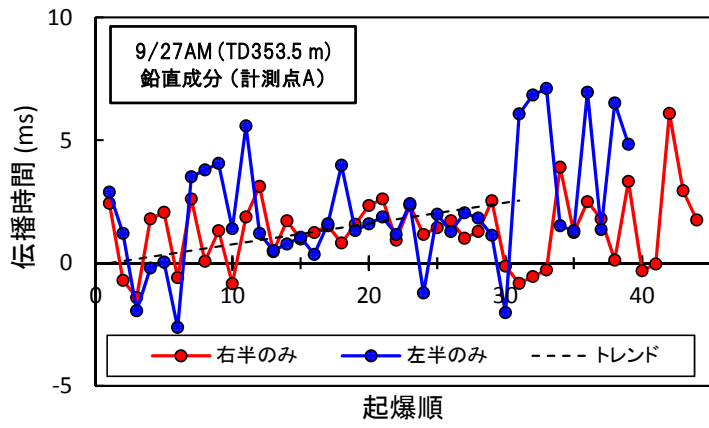


(c) 30ms-3 9/24 AM

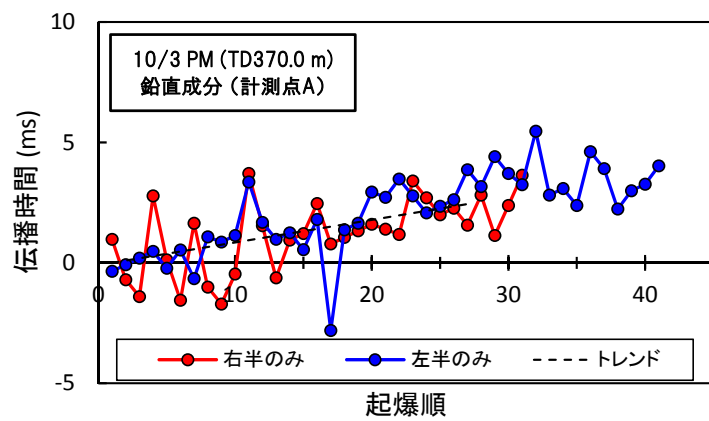
図4-16 断面を右半、左半に分けた起爆孔順と伝搬時間の関係



(d) 30ms-4 9/25 AM



(e) 30ms-5 9/27 AM



(f) 30ms-6 10/3 PM

図4-16 断面を右半、左半に分けた起爆孔順と伝搬時間の関係

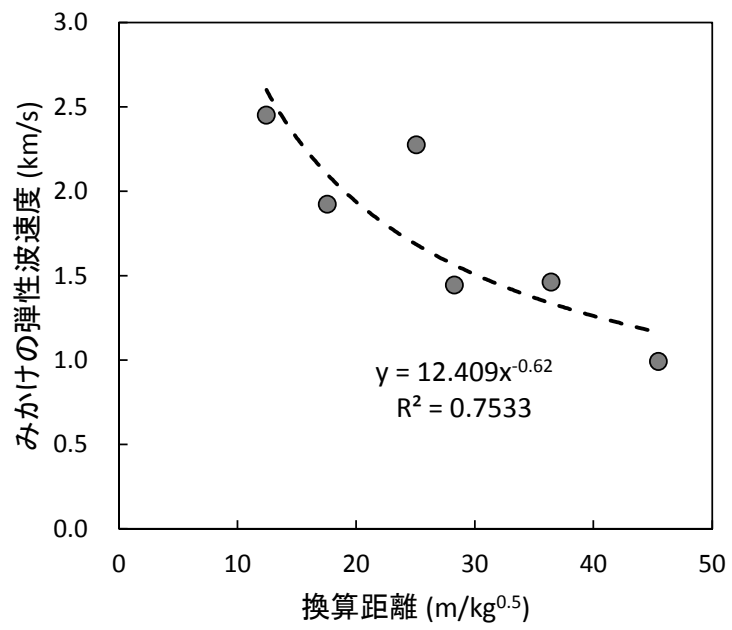
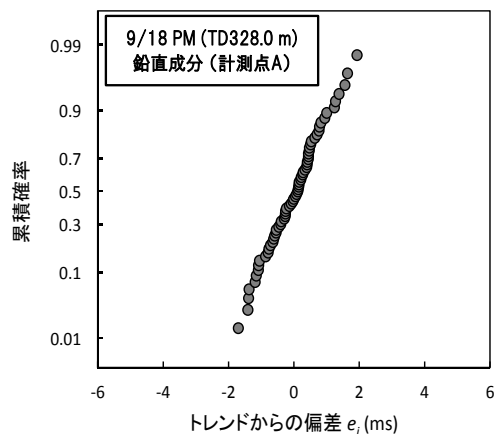
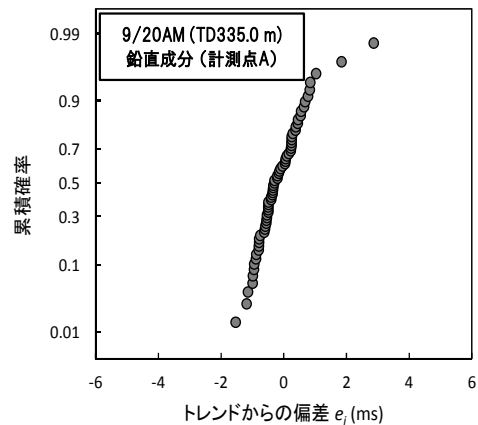


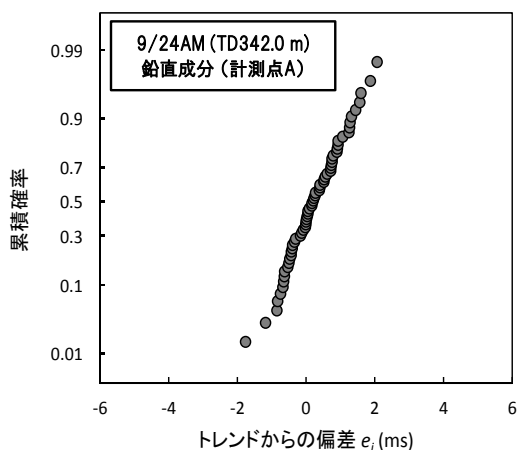
図4-17 換算距離と見かけの弾性波速度の関係



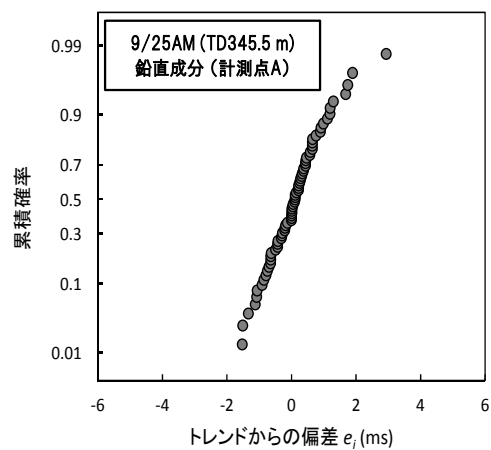
(a) 30ms-1 9/18 AM



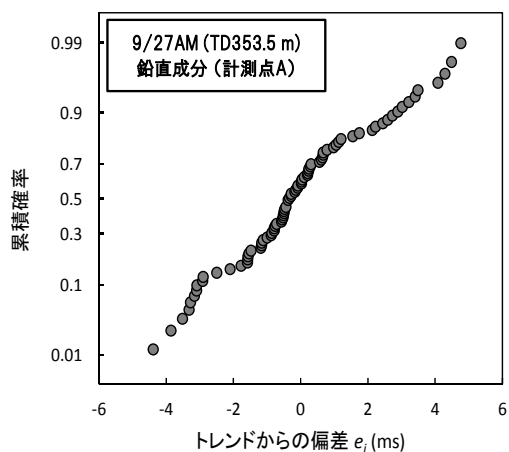
(b) 30ms-2 9/20 AM



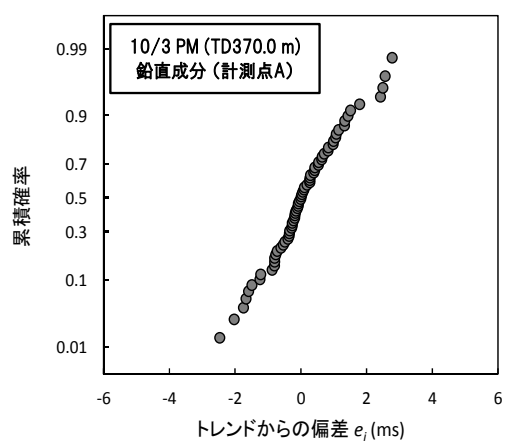
(c) 30ms-3 9/24 AM



(d) 30ms-4 9/25 AM

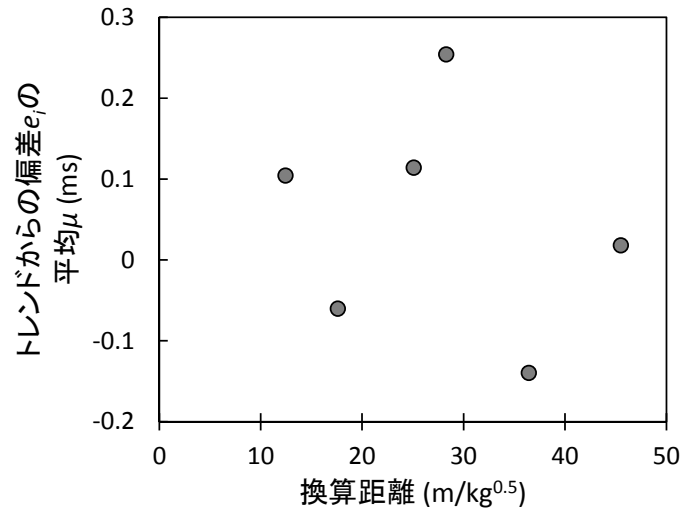


(e) 30ms-5 9/27 AM

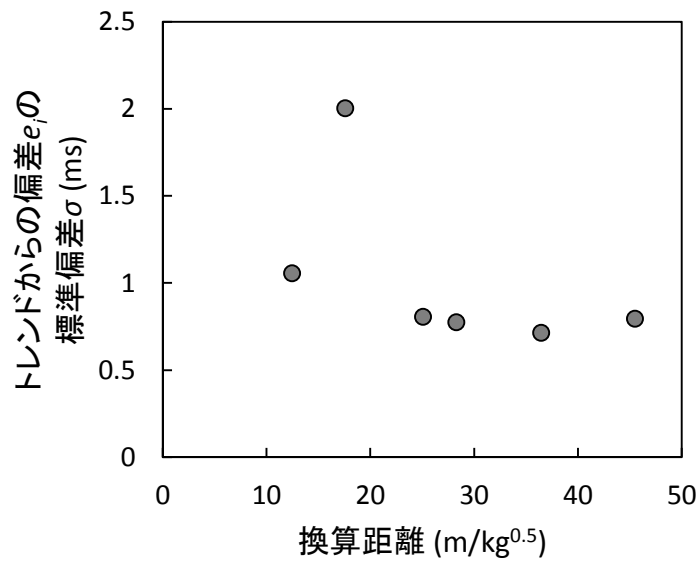


(f) 30ms-6 10/3 PM

図4-18 起爆孔順と伝搬時間のトレンドからの偏差 e_i の累積分布(正規確率紙)

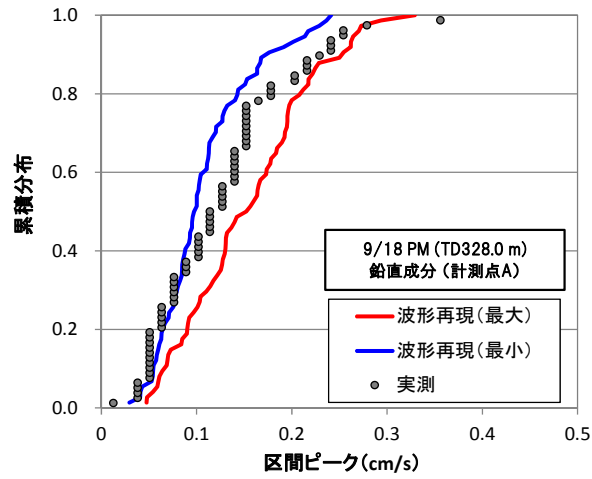


(a) 平均 μ

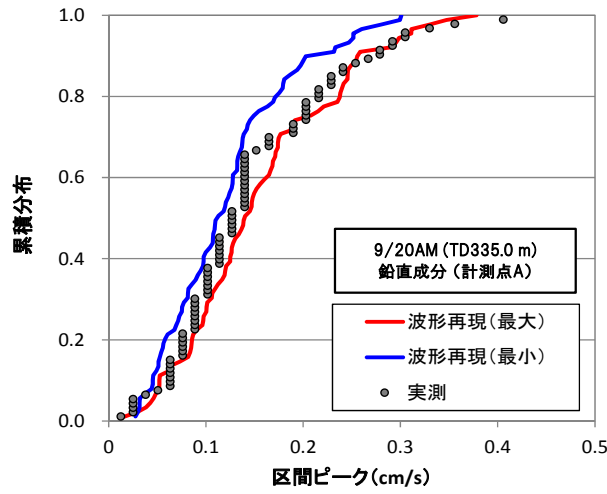


(b) 標準偏差 σ

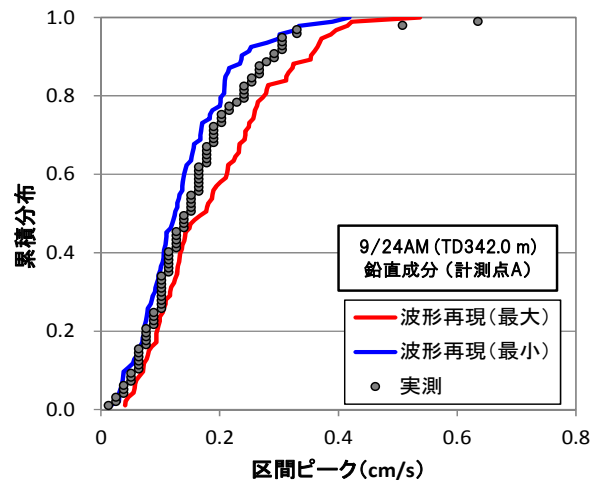
図4-19 トrendからの偏差 e_i の平均および標準偏差と換算距離の関係



(a) 30ms-1 9/18 AM

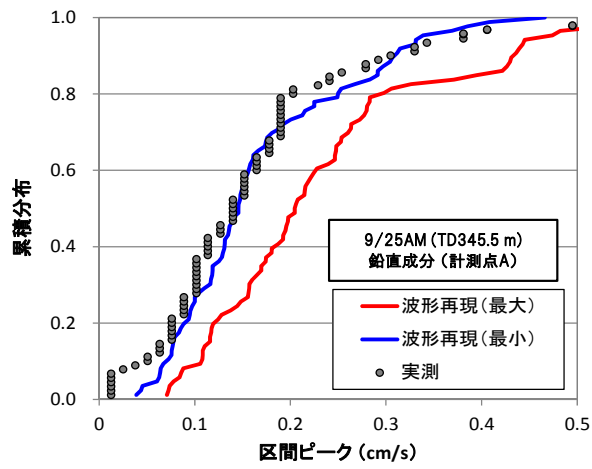


(b) 30ms-2 9/20 AM

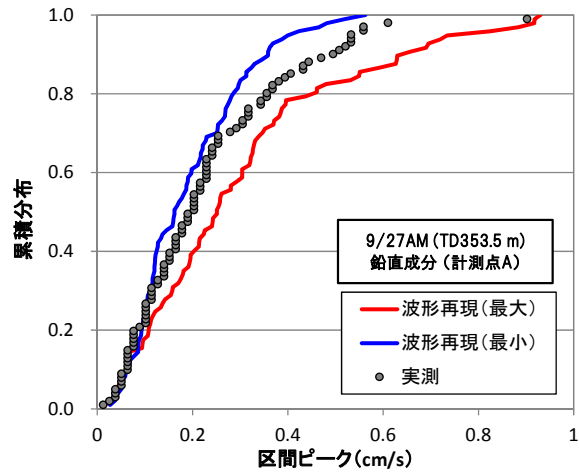


(c) 30ms-3 9/24 AM

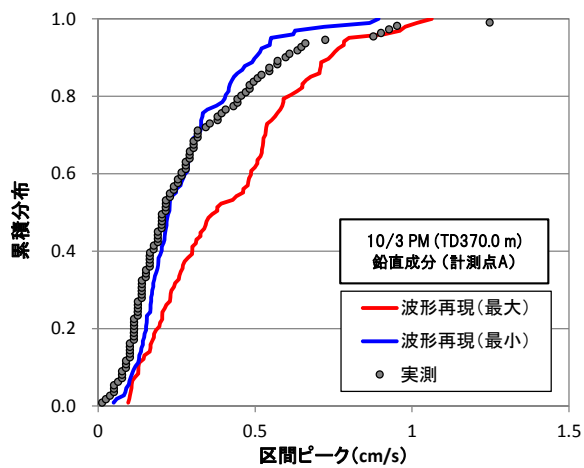
図4-20 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 30ms)



(d) 30ms-4 9/25 AM

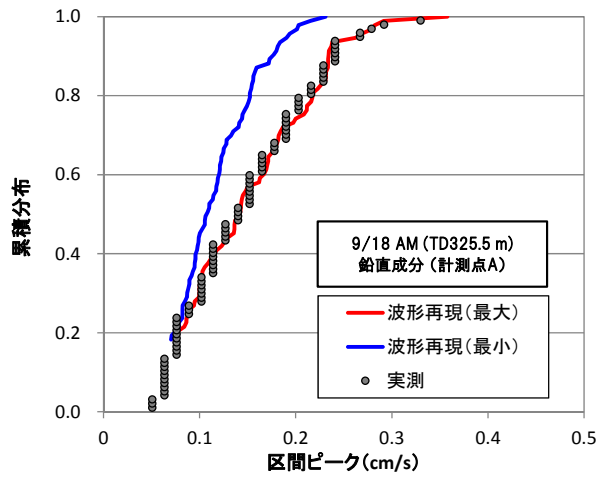


(e) 30ms-5 9/27 AM

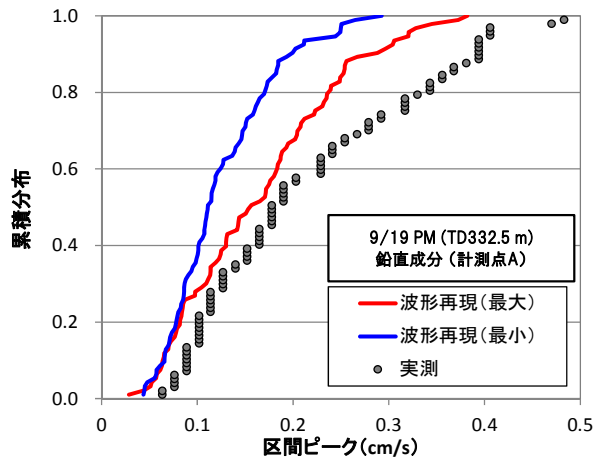


(f) 30ms-6 10/3 PM

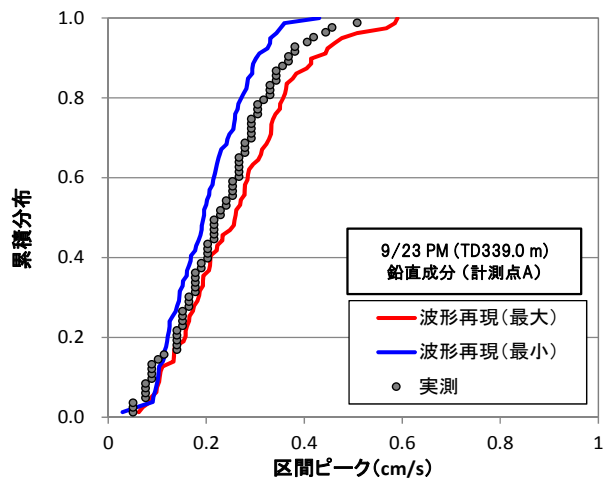
図4-20 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 30ms)



(a) 10ms-1 9/18 AM

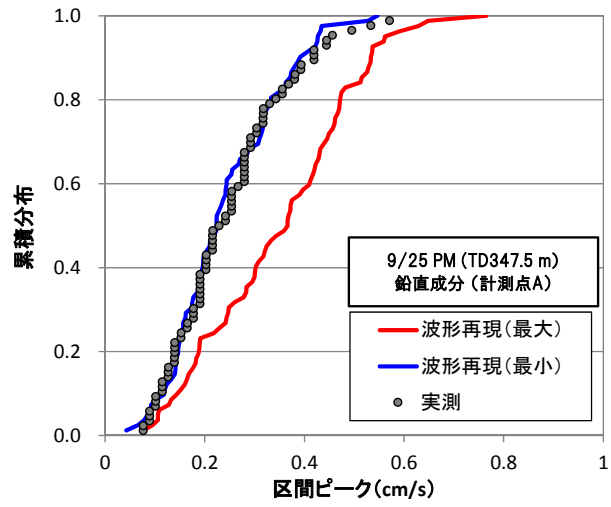


(b) 10ms-2 9/19 PM

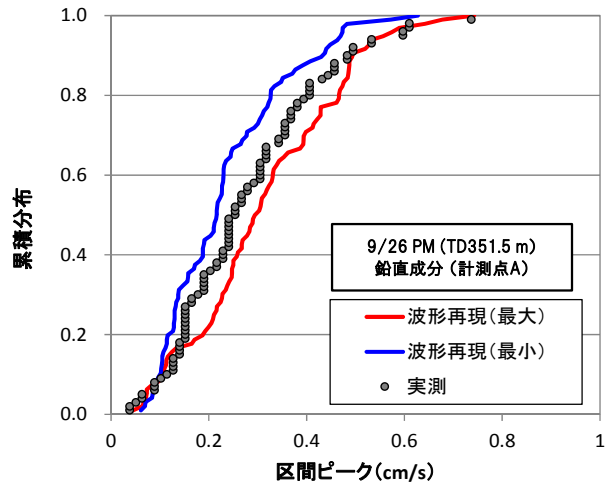


(c) 10ms-3 9/23 PM

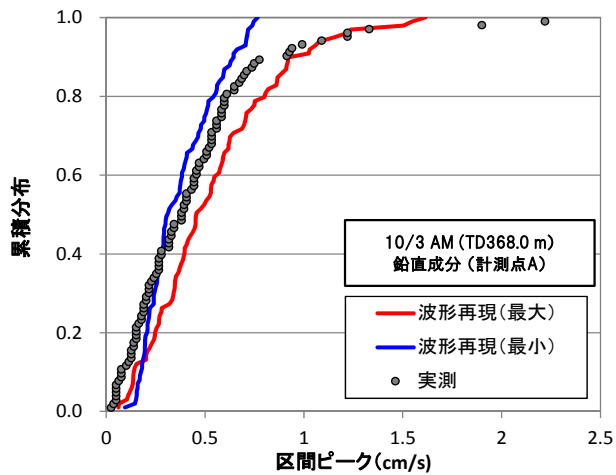
図4-21 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 10ms)



(d) 10ms-4 9/25 PM

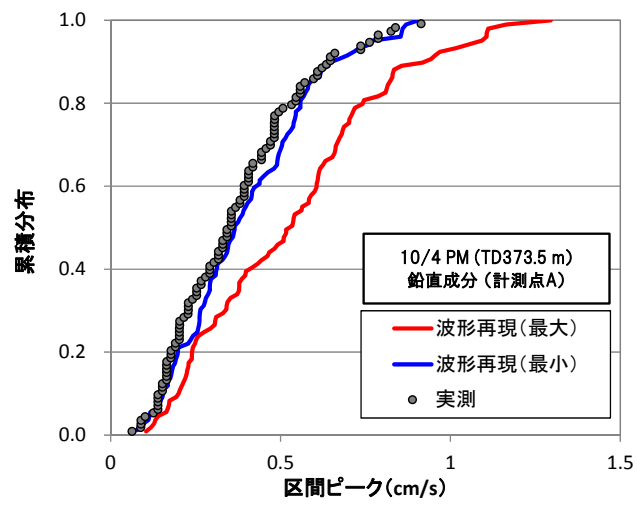


(e) 10ms-5 9/26 PM



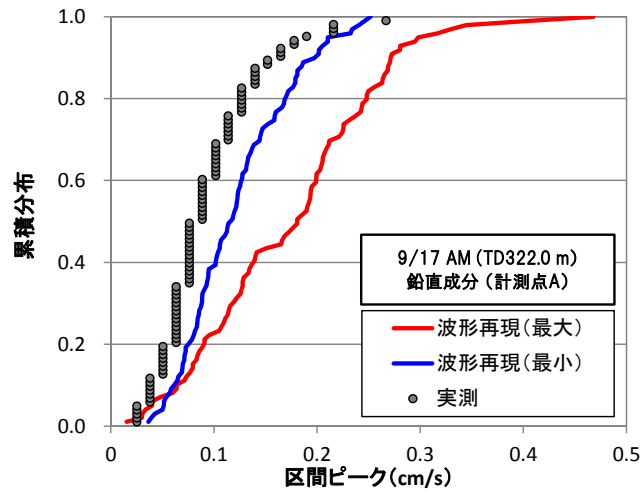
(f) 10ms-6 10/3 AM

図4-21 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 10ms)

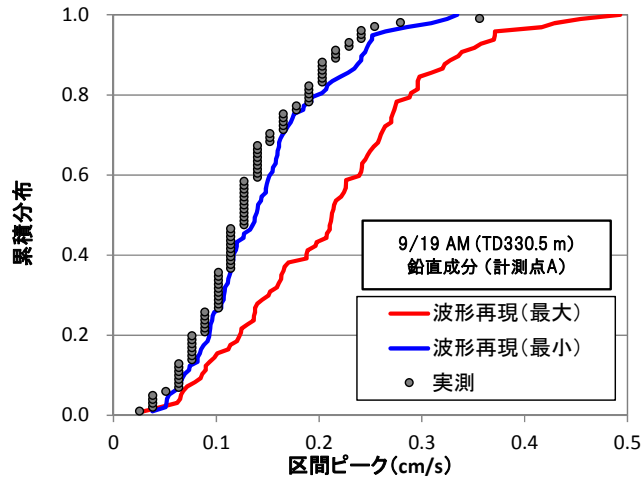


(g) 10ms-7 10/4 PM

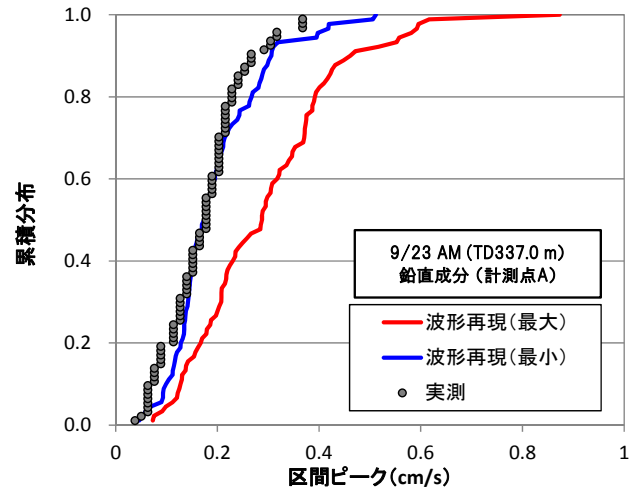
図4-21 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 10ms)



(a) 5ms-1 9/17 AM

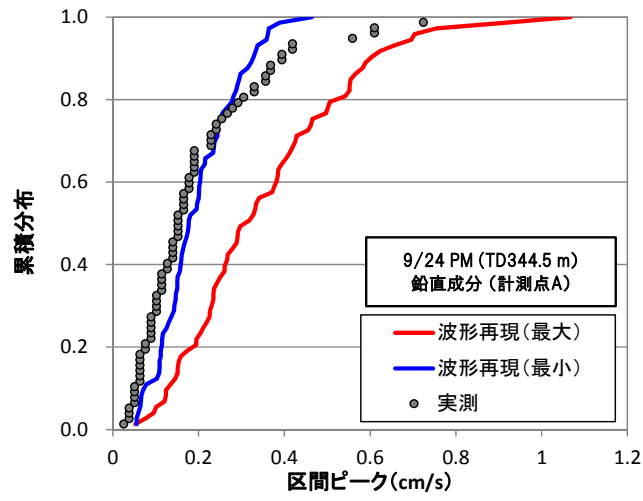


(b) 5ms-2 9/19 AM

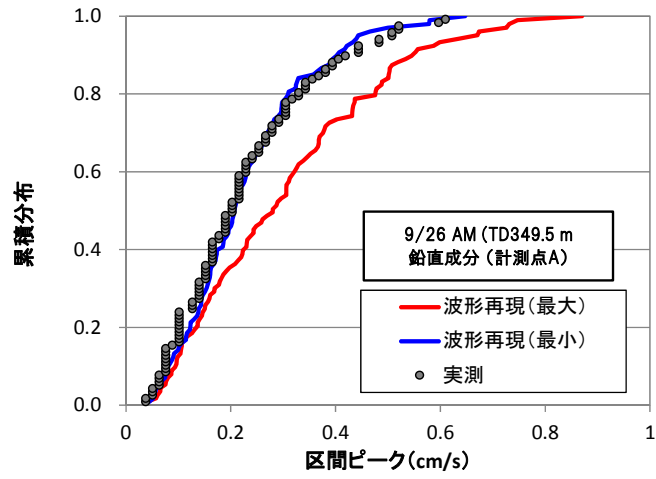


(c) 5ms-3 9/23 AM

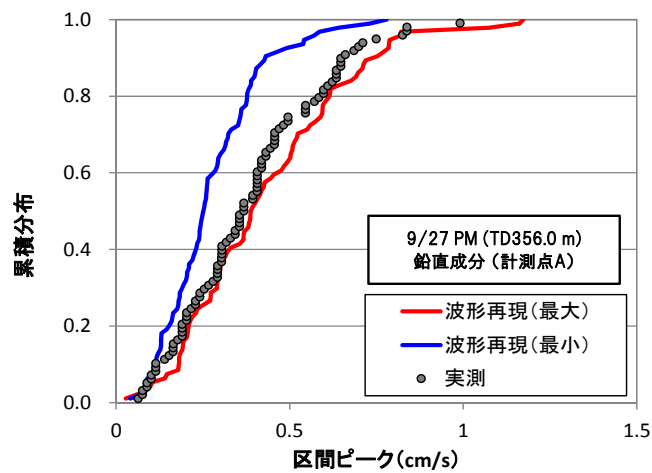
図4-22 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 5ms)



(d) 5ms-4 9/24 PM

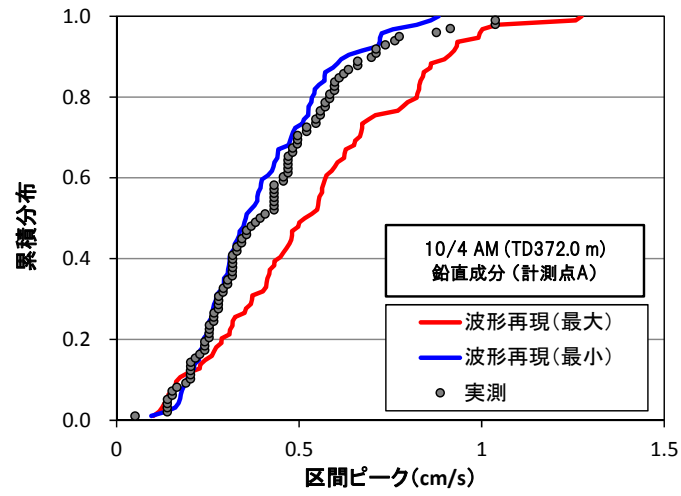


(e) 5ms-5 9/26 AM



(f) 5ms-6 9/27 PM

図4-22 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 5ms)



(g) 5ms-7 10/4 AM

図4-22 重ね合わせにより再現した段発波形の区間ピークの累積分布(起爆秒時差 5ms)

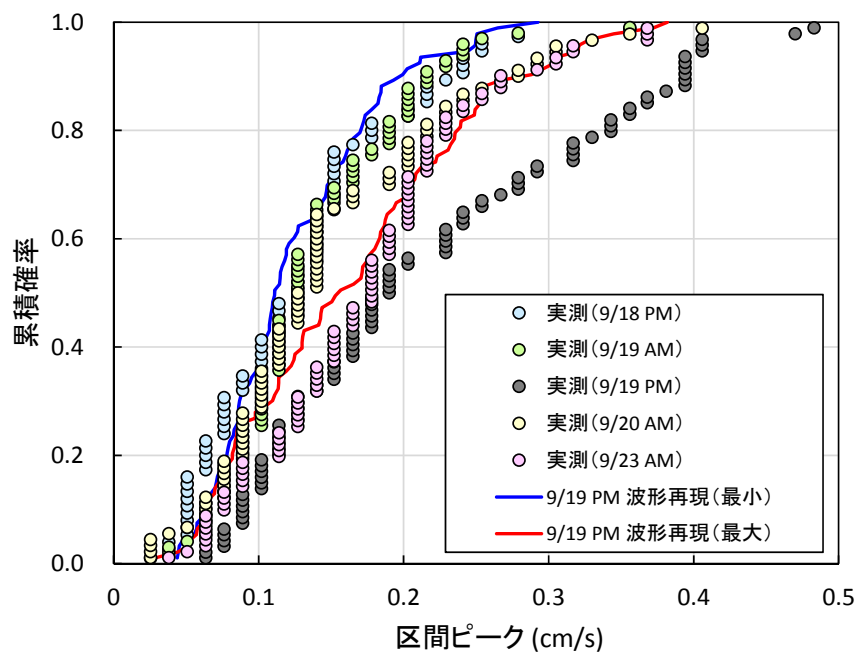


図4-23 段発波形の区間ピークの累積分布の比較
 (9/19PM の実測と波形再現の比較および 9/19PM 前後 2 回の実測)

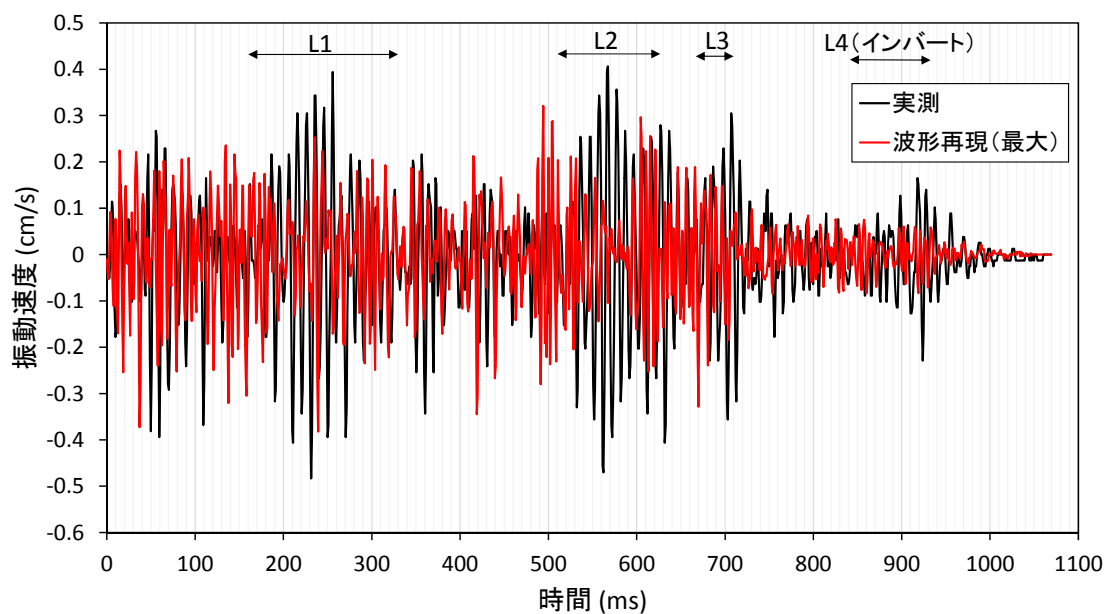
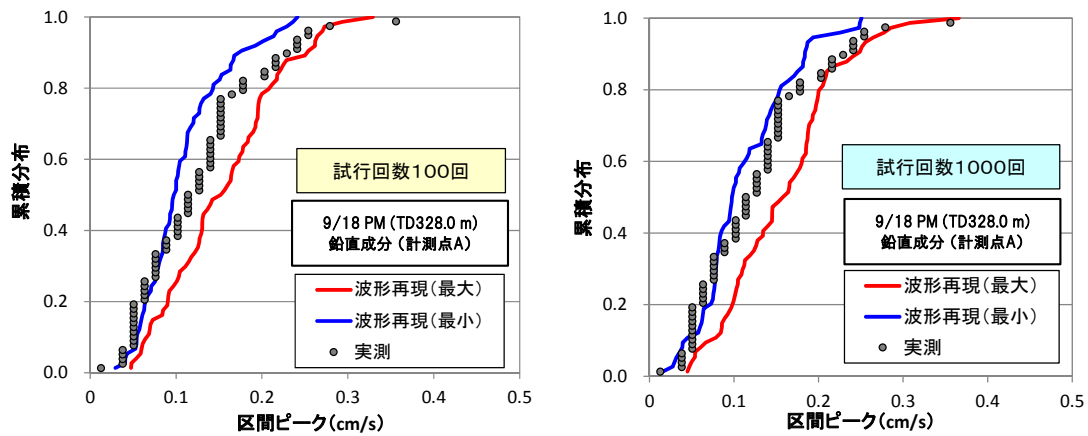
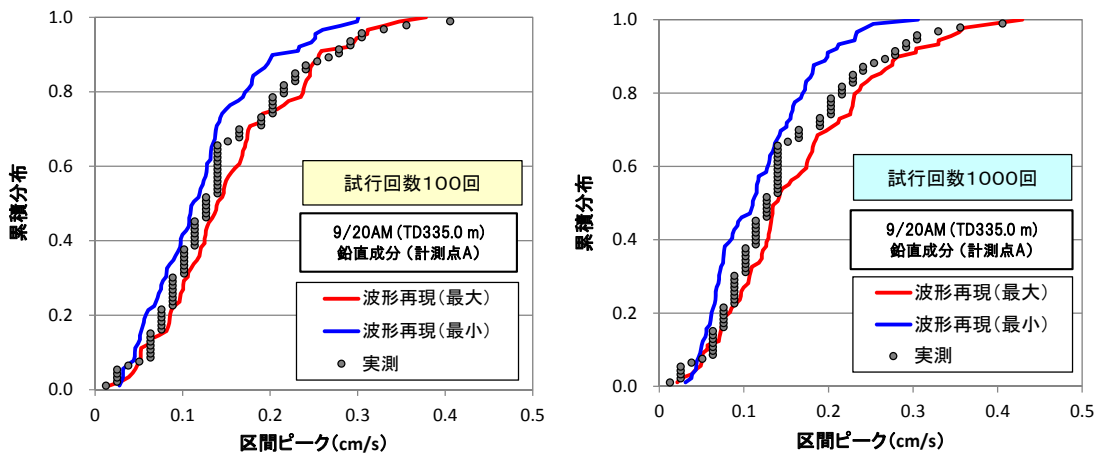


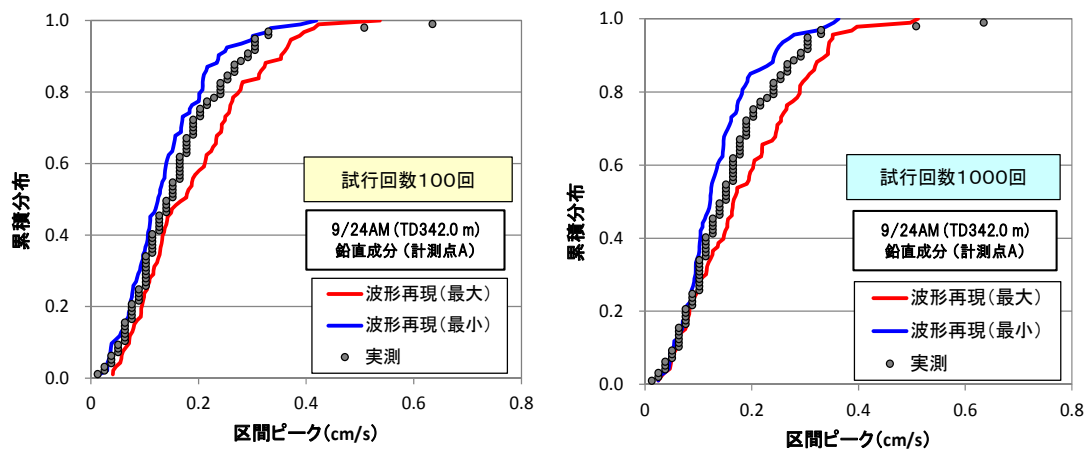
図4-24 9/19 PM の段発波形の実測と波形再現(最大時)の比較



(a) 30ms-1 9/18 PM

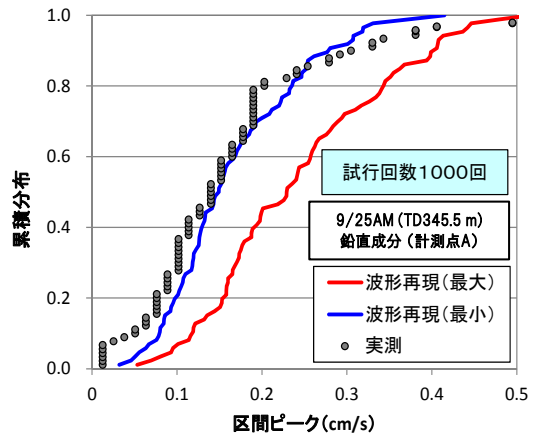
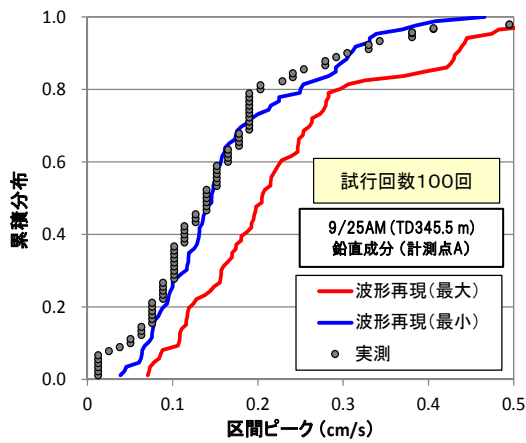


(b) 30ms-2 9/20 AM

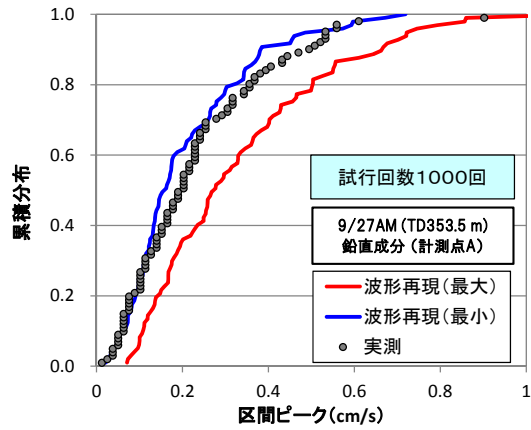
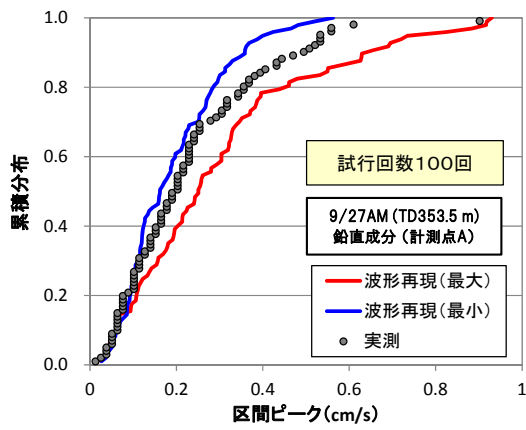


(c) 30ms-3 9/24 AM

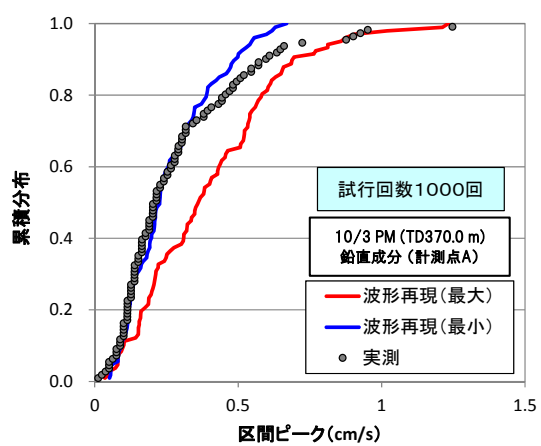
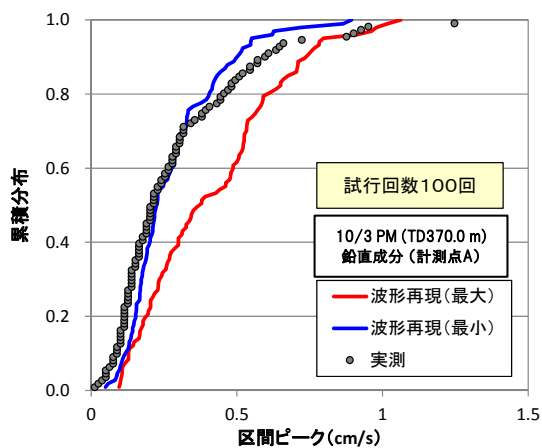
図4-25 試行回数の違いの比較(ピーク振幅の累積確率(起爆秒時差 30ms))



(d) 30ms-4 9/25 AM



(e) 30ms-5 9/27 AM



(f) 30ms-6 10/3 PM

図4-25 試行回数の違いの比較(ピーク振幅の累積確率(起爆秒時差 30ms))

第 5 章

振動低減のための最適発破条件の検討

4 章では、単発波形をもとに作成した Seed wave の重ね合わせによる段発波形の再現法について検討を進めた。そこで本章では、この重ね合わせ法をもとに振動低減を図る最適な起爆条件を検討する。起爆条件は、使用する雷管の種類により大きく左右される。そこで、ここでは 4 章の検討に続き、安永川トンネルで適用した高精度電子雷管の場合、および従来、山岳トンネルの発破に多用されている電気雷管の場合、それぞれに対し、最適な発破条件について検討することとした。

5.1. 高精度電子雷管による最適発破条件の検討

5.1.1. 重ね合わせ法による最適発破条件の検討

電子雷管を用いた発破について、4 章で示した Seed wave の重ね合わせによる段発波形の再現法を用い、最適発破条件についてのシミュレーションを行った。9/18PM の単発波形から求めた Seed wave の重ね合わせを起爆秒時差 3ms、および 30ms の場合でそれぞれ孔数 77 孔分を重ね合わせた。図 5-1 にそれぞれ段発波形のシミュレーションの一例を示す。波形の振動継続時間はほぼ孔数×起爆秒時差となるため、両波形を比較すると振動継続時間は起爆秒時差の比と同じくほぼ 1:10 となっているが、起爆秒時差 3ms の方が、Seed wave の重なり度合いが強い分、振幅が大きくなっている。

設定した起爆秒時差と重ね合わせ後の最大振動速度との関係をさらに多くの起爆秒時差のケースで求め、振動低減の観点で最適な発破条件を検討した。

前述の図 3-37 で示した単発波形を見ると、起爆後の時間が 30~40ms 経過すると減衰していることが分かる。そこで波形を重ね合わせるうえで最適な起爆秒時差は 40ms 以下の範囲にあると考え、起爆秒時差を最大 40ms から 35ms, 30ms, 25ms, 20ms, 19ms, 18ms, …, 3ms, 2ms まで全部で 23 種類設定し、それぞれの設定した起爆秒時差で試行回数 100 回ずつ重ね合わせを行った。重ね合わせする起爆秒時差のケースが多いことから、対象とする発破は、地表の計測点 A からの斜距離が同程度離れた 3 地点 (TD328.0m, 353.5m, 370.0m) を選定した。図 5-2 にその 3 点と地表の計測点 A との距離関係を示す。

図 5-3(a)~(f) に 3 地点の発破 (TD328.0m, 353.5m, 370.0m) で得られた最初の起爆 3 孔の単発波形およびそれぞれの発破での起爆秒時差 (23 種類) ごとの重ね合わせによ

る最大振動速度の分布を示す。起爆秒時差ごとの最大振動速度の分布では、設定した各起爆秒時差にて行った試行回数 100 回の重ね合わせで得られた 100 個の最大値のうち、最大の試行を 100%とし、順次 90%、50%、1%値をそれぞれ示したものである。

単発波形（図 5-3(a), (c), (e)）を見ると前述のとおり、いずれに発破においても 3 孔分の単発波形の形状は類似しており、同じ切羽面、伝播経路を巡る振動速度波形は再現性が高いことが分かる。また、起爆秒時差（23 種類）ごとの重ね合わせによる最大振動速度の分布（図 5-3(b), (d), (f)）を見ると、いずれの発破の場合も、起爆秒時差が 2~3ms と小さい場合には、単発波形の重なりが大きいため、最大振動速度の振幅が増大している。また、起爆秒時差が 5~20ms の範囲では、各発破によって最大振動速度の振幅の極大・極小となる起爆秒時差は異なっている。この違いは重ね合わせする単発波形の 0~20ms までの形状の差異に起因すると考えられる。更に起爆秒時差が 20ms より大きくなると、元の単発波形の 20ms 経過以降の減衰に従い、起爆秒時差が 2~3ms の場合の半分程度まで減少して、ほぼ一定に収まる傾向がみられる。

発破振動を低減するための最適な起爆秒時差を考えると、単発波形が減衰する時間に比べ長い起爆秒時（例えば 30ms 以上）とすることで各孔間の振動速度波形の重なり度合いが弱くなり、振動自体を低減することが可能であると考えられる。実際に、いずれの 3 地点（TD328.0m, 353.5m, 370.0m）の場合においても、起爆秒時差が 30ms 以降は、重ね合わせ後の段発波形の最大振動速度はほぼ一定となっている、つまり十分に単発波形が減衰しており、重ね合わせの影響が小さくなっているとみなせる。しかしながらこれは 100 孔を穿孔したトンネルでは単純に 3 秒以上の振動が継続し、長い振動継続時間は周辺住民に不快感を与えることになる。したがって、できるだけ短い秒時差の範囲内で、かつ最大振幅が極小を示す起爆秒時差を選択することが重要となる。つまり図 5-3(b), (d), (f)の場合であれば、起爆秒時差が 20ms 以内の範囲において最大振幅が極小となる起爆秒時差を選択することがよいと考えられる。具体的には最適な起爆秒時差は、図 5-3(b)の 9/18PM（TD328.0m）の場合で 5ms または 12ms 以降、図 5-3(d)の 9/27AM（TD353.5m）の場合で 11ms、図 5-3(f)の 10/3PM（TD370.0m）の場合で 13ms となる。表 5-1 には、起爆秒時差が 30ms 以降の重ね合わせの影響がほぼないとみなせる振動速度波形の振幅（＝基準となる振幅）に対する、振幅が極小を示す起爆秒時差の振幅（＝最適秒時差の振幅）の比を示した。9/18PM（TD328.0m）の場合は、1.19 倍とやや増幅されているものの、その他の 9/27AM（TD353.5m）、10/3PM（TD370.0m）の場合は、それぞれ 1.02 倍、0.99 倍

と、重ね合わせの影響がない基準となる振幅とほぼ同等の振幅であり、かつ振動継続時間が短くなるため、周辺住民への不快感を最小限に抑えることができると想定される。振幅が増幅されている 9/18PM (TD328.0m) の場合でも図 5-3(b)で分かるように、起爆秒時差を 12ms 以降とすれば、基準となる振幅とほぼ同等の振幅となることがわかる。

5.1.2. 簡易な方法による最適発破条件の検討

前述までに振動速度が極小となる最適な起爆秒時差は、単発波形の重ね合わせ法を様々な起爆秒時差で繰り返しシミュレーションすることにより評価できることを示した。一方で、実際のトンネルの発破は日に数回行われ、切羽位置もそれに応じて前進していくため、その都度、複数回（前述では 23 種類）の起爆秒時差の重ね合わせ法を実施し、最適な起爆秒時差を評価することは容易ではない。図 5-3(b), (d), (f)に示した重ね合わせの結果をそれぞれ比べると、最適な起爆秒時差は発破ごとに異なっており、この違いは主として重ね合わせる元となる単発波形（=Seed wave）に起因するものと考えられる。すなわち、装薬状況や振動が伝播する地盤状況といった因子を含んだ単発波形の特徴から、重ね合わせた後の最大振幅が最も小さくなる最適な起爆秒時差を求められる可能性がある。そこで、単発波形の特徴を評価する方法として、自己相関係数による評価および周波数解析による評価の 2 つの方法（国松ら,1997b）を検討することとした。

(1) 自己相関係数による評価

自己相関係数とはある信号とそれ自身の相互相関である。従って、単発波形の自己相関係数を求め、その最小となる秒時差が波形の重ね合わせが最も打ち消しあう最適な起爆秒時差となると考えられる。

図 5-4(a)~(c)に、図 5-2 に示した 3 地点の発破で得られた単発波形（図 5-3(a), (c), (e)）の自己相関係数を示した。それぞれの発破において最初の 3 孔から得られる 3 つの単発波形は類似していることから、いずれの発破の場合も 3 つの自己相関係数のグラフは類似している。また同図に各発破の 1 孔目の単発波形（図中の 1 波目）の自己相関係数が極小となる起爆秒時差（点線）、および起爆秒時差 0ms を除いて極大となる起爆秒時差（鎖線）を示した。自己相関係数から求められた最適な起爆秒時差はそれぞれ、(a) 9/18 PM : 3.9ms, (b) 9/27 AM : 11.7ms, (c) 10/3 PM : 12.7ms であった。この自己相関係数によって求められる最適または不適の起爆秒時差の確からしさを検証するため、図 5-5(a)~(c)に、

前述の重ね合わせによる最大振動速度の分布 (図 5-3(b), (d), (f)) に、自己相関係数で求めた最適・不適の起爆秒時差を重ねて示した。また、表 5-2 にその最適・不適の起爆秒時差を整理して示した。5.1.1 の重ね合わせ法により求められた最適な起爆秒時差と比較すると 1~3ms 程度のずれが見られるものの、重ね合わせ法で得られた最大振動速度の極大・極小をとる起爆秒時差と概ね一致している。この 1~3ms 程度のずれの原因については、自己相関係数の場合は 2 つの同じ単発波形の重ね合わせのみで求めているのに対し、5.1.1 の重ね合わせ法では単発波形は常に同じものではなく、3 孔分の単発波形をランダムに選択して重ね合わせしている点、また特に起爆秒時差が小さい場合、1 つの単発波形が収束する前に次孔の単発波形、さらにその次孔と 2 つ以上の単発波形が複雑に重なりあう点などが自己相関係数の場合と条件が異なるためであると考えられる。また、重ね合わせ法が 4 章で示したように各孔の伝播距離の違いに起因する伝播時間の差異を考慮するなど実際の発破を忠実にシミュレートしているが、自己相関係数は単に自身の波形との相互相関をとっていることに留まっていることも 1~3ms 程度のずれの原因の 1 つと考えられる。したがって、発破ごとに精度よく最適な起爆秒時差を求めるには、5.1.1 の重ね合わせ法を用いなければならないと考えられるが、自己相関係数による方法についても、数 ms の違いはあるものの振動を最小とする最適な起爆秒時差の概算を求めることができると言える。

(2) 周波数解析による評価

次に単発波形の周波数解析による最適な起爆秒時差の検討を行った。単発波形の周波数解析を行った結果、得られる周波数のピーク (f_0) は、その周波数成分が最も卓越していることを意味しているため、その卓越周波数と同期する周期 ($1/f_0$) は、共振しやすく最も不適な起爆秒時差であると考えられる。一方で、単発波形を単純な正弦関数と仮定すれば、共振を起こす周波数の周期の半周期 ($1/2f_0$) を起爆秒時差と設定すれば、最も振動を抑制できると考えた。図 5-6(a)~(c)には、図 5-2 に示した 3 地点の発破で得られた単発波形 (図 5-3(a), (c), (e)) の周波数解析の結果を示した。各図において、ピークの周波数に対応する周期 (赤字) とその半周期 (青字) を示した。ここで赤字で示したピーク周波数に対応する周期に相当する秒時差が振動低減の観点から最も不適な起爆秒時差、青字で示したピーク周波数に対する半周期に相当する秒時差が最適な起爆秒時差であると考えられる。具体的にみると、9/18PM の 1 波目のピーク周波数は 136Hz となっている。この場合、振動低減の観点から最も不適な起爆秒時差は $1/136.0 \times 1000 \approx 7.4\text{ms}$ であり、最適

な起爆秒時差はその半分の 3.7ms となる。同じ単発波形について 5.1.2(1)の自己相関係数から求めた最適な起爆秒時差は 3.91ms となっており、近い値が得られた。

図 5-7 には、発破試験の 21 発破のうち、うまく観測できなかった数ケースを除いた単発波形について、自己相関係数と周波数解析それぞれで求めた最適な起爆秒時差をプロットした。ばらつきは見られるものの近似直線の傾きはほぼ 1 であり、自己相関係数が概ね最適な起爆秒時差を求められていると仮定すれば、周波数解析についても同様に最適な起爆秒時差を概ね算定できる有効な方法の 1 つであると考えられる。

図 5-8 には、自己相関係数と周波数解析のそれぞれから求めた最適な起爆秒時差と斜距離（伝播距離）の関係を示した。伝播距離が大きくなるに従い、最適な起爆秒時差は短くなっており、特に伝播距離 20m あたりを境にして二値化しているようにも見える。図 5-9 に、今回の発破試験のうち、近距離（斜距離 11.2m）および遠距離（斜距離 38.6m）の場合の典型的な単発波形を、最大振幅が 1.0cm/s となるように正規化して示した。近距離の方が遠距離に比べ波数が少なく、その分だけ低い周波数の波形となっている。そのため結果として近距離から遠距離になるに従い、二値化するような形で最適な起爆秒時差は小さくなっていると考えられる。

ここで単発波形の形状と伝播距離の関係について考えてみることにする。一般的に地盤中を伝播する振動は、高周波成分ほど一定距離を進む間の振動回数が増えるため、伝播距離が長くなるに従い、高周波成分が減衰し、低周波成分が中心の波形となる傾向があるが、今回の振動速度波形はその逆の傾向となった。一方、3.2.1(2)でも述べたように、観測される単発波形は、切羽から地表の計測点に向かうベクトルの直接波（実体波）だけで決定されず、実体波や表面波など複雑な伝播経路を経た複数の成分が複合された波形であると考えられる。今回の場合では図 5-8 に示すように伝播距離が 15~20m を境にして、実体波や表面波など複数の成分の合成の形態が何らか変わったもの推察される。しかしながら、このような単発波形と伝播距離に関する事例がほとんどないことから、今後さらなる研究が必要であると考えられる。

本項 5.1.2 では、単発波形の特徴を評価し、振動を低減する最適な起爆秒時差を概算する方法として、自己相関による評価および周波数解析による評価の 2 つの方法を検討した。

最適な起爆秒時差を正確に求めるためには、5.1.1 に示す重ね合わせ法を用いなければならないことは前述のとおりであるが、日に数回行われるトンネル発破では、得られる単発波

形に対し自己相関係数や周波数解析による簡易な方法を適用し、図 5-8 に示すように振動の伝播距離と最適な起爆秒時差の傾向を掴むことにより、次の発破について最適な起爆秒時差を簡易に推定することも有効な方法であると考えられる。

5.1.3. 簡易な方法の現場適用事例

5.1.2 にて述べた最適な起爆秒時差を簡易に求める方法を、実際の発破トンネル現場に適用を図った。

(1) 現場の概要

簡易に最適な起爆秒時差を求める方法を適用したトンネル現場は、白井地区道路工事である。本道路工事は、震災復興のリーディングプロジェクトである三陸沿岸道路（三陸縦貫自動車道、三陸北縦貫道路、八戸・久慈自動車道、延長 359km）のうち、図 5-10 に示す野田久慈道路の一部となる野田村と普代村を結ぶ 2.058km のトンネルである。表 5-3 に白井トンネルの諸元を示す。トンネル区間を構成する地質は中生代後期白亜紀の花崗岩で占められている。この花崗岩は北上山地の北部一帯に広く分布する花崗岩帯の一部であり、トンネル区間は地質の変化や断層も確認されていない。

白井トンネルは、南側からのみ掘削を進めるいわゆる片押し掘削となっているが、坑口から TD1200m 以降のトンネル直上は、構造物（NTT 鉄塔）や多くの民家、水産加工場が存在し、トンネル掘削に起因する井戸水の枯渇、発破振動による周辺環境への影響が懸念されていた。そのため、図 5-11 に示すように当初設計ではトンネル縦断線形が 3%片勾配であったが、土被りを確保するため勾配を 1.675%に変更した。この結果、低土被り部に存在する民家との斜距離は 34.4m から 50m と大きくなった。しかしながら、設計変更後も事前の検討結果では制御発破が必要な結果となっている。

本トンネルでは、このほかに、施工や計測の効率性の向上のために、以下の 2 つ取り組みを行っている。

地山が良好な区間（CI パターン）において長孔発破による確実な工程確保のためコンピュータジャンボ（アトラスコプロ社製 XE4C）（Atlas Copco,2015）を導入している（図 5-12）。穿孔能力が高い穿孔ドリフタを搭載しているため、発破の穿孔時間を短縮できるほか、現場担当者が事前設計した発破パターン通りに正確に自動穿孔ができること、また穿孔データを収録できるため、地山の評価が可能となるなどの利点がある。

また地表の振動計測については、クラウド型遠隔振動計測システム（ニトロコンサルタン
ト社製 NCVIB）（森山ら,2017）を採用した。このシステムは、図 5-13 に示すように携帯
電話回線を使った地理 GIS と連動した発破振動の遠隔測定分析システムである。 배터리
駆動の計測器はオートトリガにより発破振動を計測し、自動的に WEB クラウドサーバへ
転送されるため、データ欠損は生じない。また現場担当者が都度計測器を回収する必要はな
い上、専門家が現場に常駐せずとも振動データを分析することができる。

（2）発破の条件

本トンネルの当初設計では、発破振動の管理値は、発破振動の中心周波数が 50Hz 以上で
あることから、表 5-4 に示すように、これまでの過去の事例で使われた振動管理値を参考
に対人は昼間 1.3cm/s（83dB または暗振動+30dB）、夜間 0.2cm/s（70dB または暗振動+
30dB）、対構造物は 2.0cm/s と設定された。また発破振動予測では、振動予測式（ $V = K \cdot W^n / D^m$ ）
を用いており、各火薬メーカーからの提案のうち、旭化成の式（ $n = 2/3$ 、 $m = 2$ ）
を採用している。K 値は同じく旭化成の提案から、芯抜き孔相当として $K=700$ を設定
した。図 5-14 には、 $K=700$ と仮定した場合の振動予測式に基づく斜距離 D と斉発薬量
W の関係を振動速度ごとにプロットした。これによれば、低土被り部の最小斜距離 50m に
おける対人（夜間）の振動管理値 0.2cm/s を満足する斉発薬量は約 0.6kg となり、通常の発
破に対し進行長や使用する雷管などに制約を受けることになる。

実際の発破施工においては、低土被り部（制御発破区間）からまだ十分に距離を置いた切
羽位置の時点で地表に振動遠隔測定分析システム（NCVIB）を配置し、実際に起爆条件や
地盤条件により決まる K 値を事前に検討した。図 5-15 に地上に配置した M1～M6 の 6
地点とトンネル線形の平面図を示す。十分距離を置いた切羽位置からの発破振動計測の結
果一覧を表 5-5 に示す。発破振動計測は 19 回実施しており、この間の計測は、振動の伝
播距離の都合上、M1～M4 の 4 地点で行っている。この時の雷管は DS 電気雷管である。
図 5-16 には、伝播距離と各計測点（M1～M4）の最大振動速度のプロットを示した。た
だし、グラフ横軸については、発破振動計測は 19 回の発破の斉発薬量が不揃いであること
から、斉発薬量の影響も加味した換算距離（単位： $m/kg^{1/3}$ ）としている。また同図（図 5-
16）には、併せて $K=1,000$ 、 $2,000$ 、 $3,000$ の場合の振動予測式のラインを示しているが、
測定された最大振動速度は $K=2,000$ や $3,000$ を超えるケースも多く見られている。図 5-
17 には同じく、横軸を換算距離とし、縦軸に K 値ととったプロットを示すが、当初設計の

K=700 を超えるケースが大多数であった。また換算距離が小さくなるほど、K 値は大きくなる傾向であるため、低土被り部の制御発破区間に近づくほど、当初設計で検討していた以上に厳しい制御発破を強いられることが予想された。

実際に、K 値=2,000 に設定見直し後の振動予測式に基づく斜距離 D と斉発薬量 W の関係を図 5-18 に示すが、対人の夜間 0.2cm/s (70dB または暗振動+30dB) では、低土被り部の最小斜距離 50m において、斉発薬量は 0.13kg となり、白井トンネルで使用している紙巻含水爆薬 (1 本 0.2kg) では不可となる。したがって、白井トンネルでは、周辺住民とのヒアリングなどコミュニケーションを重ねた結果、対人の昼間 1.3cm/s (83dB または暗振動+30dB) に対し、施工上の自主基準として 0.5cm/s と設定することとした。図 5-18 にも管理基準値 0.5cm/s の場合を示したが、低土被り部の最小斜距離 50m において、斉発薬量は約 0.49kg となる。したがって、親ダイ (0.2kg) +増しダイ (0.2kg) の合計 0.4kg の発破は可能となる。

(3) 発破振動低減の対策

白井トンネルの低土被り部の発破振動制御は、コンピュータジャンボや電子雷管、クラウド型遠隔振動計測システムなどの最新技術を導入したこともあり、図 5-19 に示すような発破で得られたデータを活用し、次発破の発破パターンや薬量など都度見直しを行う発破の情報化施工を進めた。

発破後、クラウド型遠隔振動計測システムにより即座に振動結果が得られることから、次発破の薬量の調整・見直しを行い、雷管を電子雷管に変更した後は、図 5-20 に示すように、最大振動速度となった発破孔の位置を特定し、その切羽部位の孔数を増やし、斉発薬量を減じるなどの対策を行った。

この低土被り部の発破振動制御の変遷を図 5-21 に示す。雷管は、①DS 雷管→②MS/DS 雷管併用→③電子雷管 の順で変更を行っている。①DS 雷管→②MS/DS 雷管併用の変更は、DS 雷管が 15 段であるのに対し、MS/DS 雷管併用は 23 段まで増やせるため、斉発薬量を減じる効果がある。また②MS/DS 雷管併用→③電子雷管の変更は、23 段から 1 孔 1 斉発 (孔薬量=斉発薬量) となり、更に斉発薬量が減じることができるとともに、起爆秒時精度が高いため、隣り合う孔の起爆秒時が重なることがないため、振動の再現性が高くなり、振動予測が容易となる効果がある。

図 5-21 を見ると TD1330m までの DS 雷管の期間は、MS/DS 雷管や電子雷管の発破試

験を除くと、1.0cm/s を大きく上回っており、施工管理値 0.5cm/s を遵守できていない。そこで、TD1330m より MS/DS 雷管併用に変更し、斉発薬量を抑えた。これにより管理基準値 0.5cm/s を下回ることができたが、TD1345m 付近にて、M5 地点の振動値が管理基準値 0.5cm/s を上回る傾向が見えたため、孔数を増やし装薬量を減らす、つまりさらに斉発薬量を減じる方策をとった。また、TD1345~1375m の区間は、それまでの通常断面（CI パターン）の区間から拡幅断面（CI-L パターン：1.5m ごとに鋼製支保工設置）の区間となったため、発破進行長が 1.5m に制限されていることもあり斉発薬量の低減が可能となった。

さらに、直上に民家が点在する区間に近づいてきたため、早めの対策として拡幅断面区間が終了する手前の TD1373m より電子雷管による 1 孔 1 斉発に変更した。これにより通常断面（CI パターン）に戻り、発破進行長が 2.5~3.0m となった後も地表（M5、M6）の振動は低いままに抑えられていることがわかる。

しかし、TD1415m を超えたあたりから、M5 地点の振動値が管理基準値 0.5cm/s を上回り始めた。そのため TD1425m から、1 発破進行長を抑え、斉発薬量（=孔薬量）を減じる対策をとった。その結果、TD1430m 手前で一旦、振動値は管理基準値 0.5cm/s を下回ることができている。

しかしながら、TD1430m を超えたあたりで、また振動値が増加に転じた。この時点で電子雷管による 1 孔 1 斉発を行い、発破進行長を限界に近いところまで抑えているため、これ以上の斉発薬量の低減策は不可能であった。

そこで、急遽、振動を抑制するための最適な起爆秒時差の検討を行うこととした。現場に依頼し、図 5-22 に示すように、最初の 4 孔の起爆秒時差を 250ms とすることで単発波形を 4 つ収録した。図 5-23(a),(b)には、その 4 つの単発波形を重ねて示した ((b)は振幅を正規化)。図 5-23(a),(b)を見ると、安永川トンネルの場合と同様に、いずれの単発波形もほぼ同じ波形形状であり、再現性が高いことがわかる。この白井トンネルでは、安永川トンネルのような TBM による導坑先行掘削ではなく、全断面発破を行っているため、4 つの単発波形は、最初に起爆する孔として切羽中央の広い部分を占める V 字型に穿孔した芯抜き孔にて収録している。具体的には図 5-20 で示した穿孔位置における C1~C4 孔であり、例えば C1 の左右 2 孔同時起爆にて 1 つの単発波形を収録しており、安永川トンネルの単発波形収録の 3 孔に比べ、切羽面の広い部分を使って単発波形を収録している。したがって、同一切羽面内で極端な地質のコントラストがなく均質な地質状態であると認められる白井トンネルの場合、切羽面内の孔位置が隣接孔でなくても単発波形はほぼ同じ波形形状が得ら

れることが分かった。

これらの4つの単発波形の自己相関係数を図5-24(a),(b)に示す。同図には、1波目の自己相関係数の極小値をとる秒時差も示している。最も小さい極小値が4.4ms、次の極小値が13.0msであることがわかる。また、図5-25には、4つの単発波形の周波数解析の結果を示した。1波目のピークとなる周波数は119.6Hzであった。つまり $1/119.6=8.4\text{ms}$ が最も重なり合いの強くなり振動低減には不適な起爆秒時差である。一方で $8.4/2=4.2\text{ms}$ が振動低減の面で最適な起爆秒時差であることがわかる。この場合も安永川トンネルの場合と同様に、最適な起爆秒時差は自己相関係数から求まる値(4.4ms)と周波数解析から求まる値(4.2ms)はほぼ同じとなることが分かった。

次にこの自己相関係数や周波数解析といった簡易な最適秒時差の算定方法を実際に白井トンネルで適用した前後の効果を検証した。この簡易な最適秒時差の算定方を適用する以前の発破では、起爆秒時差は振動を低減するための最適な起爆秒時差であるかどうかの検討はなされておらず、振動継続時間をできるだけ短くするため起爆秒時差もできる限り小さくする一方で、例えば50Hz、100Hz、200Hzでピークが立つなどピーク周波数が倍数を取りやすい傾向を避けるために、公倍数が少ない理由から7msを起爆秒時差として設定していた。一方、上記の簡易な最適秒時差の算定方法の適用後においては、求まった最適な起爆秒時差4.2~4.4msが、これまでの安永川トンネルの適用事例を念頭においても極めて短い起爆秒時差であることから、図5-24(a),(b)の自己相関係数の2番目の極小値をとる13.0msを採用することとした。図5-24(a),(b)の自己相関係数の結果から、それまでに設定していた起爆秒時差7msは、波形の重ね合わせの面で不利な起爆秒時差となっていることから13.0msでも十分な振動低減効果が期待できるものと判断した。

表5-6に示すように、単発波形を取得して簡易な最適秒時差の適用の検討を行った発破が②2017/12/21 16:50の発破であったことから、その適用前の発破として直前の①2017/12/20 1:51の発破、適用後の発破として直後の③2017/12/21 1:50の発破を比較した。図5-26(a),(b)にM5地点、図5-27(a),(b)にM6地点の振動速度波形をそれぞれ示す。いずれの地点においても、起爆秒時差を7msから13msに変更したことで明らかに振動速度が低減していることがわかる。表5-6には計測を行っていないM4、M7を除くM1~M9の7地点の最大振動速度を示した。また図5-28には、①2017/12/20 1:51と③2017/12/21 1:50および②2017/12/21 16:50と③2017/12/21 1:50の振動低減率をグラフ化して示した。その結果、①2017/12/20 1:51と③2017/12/21 1:50の比較では、M5地点で38%、

M6 地点で 21%の振動低減効果があったほか、全 7 地点で明確な振動低減が見られた。さらに、②2017/12/21 16:50 と③2017/12/21 1:50 の比較においても、計測失敗した M8 を除く 6 地点で明確な振動低減効果が見られた。特に②と③の比較では、概算の斉発薬量 (= 総薬量/孔数) は、②の発破の方が小さいにもかかわらず、③の発破の方が明確に振動低減しており、これは単発波形の重ね合わせの起爆秒時差を最適化したことによる効果であると思われる。

5.2. 従来の雷管(電気雷管)における最適発破条件の検討

5.2.1. 電気雷管の起爆秒時と振動

山岳トンネルの発破では住宅が近接し振動対策が求められるなど特に厳しい周辺環境である場合を除き、依然として電気雷管(カヤクジャパン,2017c)を用いることが主流である。電気雷管にはデシセカンドレベルで起爆秒時差が設定されている DS 雷管と、ミリセカンドレベルの MS 雷管があるが、DS 雷管がより多くの現場で使われている。

電気雷管は図 5-29 にその構造を示すように、内部に IC 基盤が組み込まれ起爆秒時を制御する電子雷管と異なり、起爆秒時を筐体内部の延時薬で調整している。起爆秒時について電子雷管との大きな違いは、①起爆秒時の段数が制限されていること、②起爆秒時が長いこと、③個体により起爆秒時のばらつきが大きいことが挙げられる。①起爆秒時の段数制限については、表 5-7 に国内で取り扱いが可能な電気雷管(DS 雷管)の設定されている段と起爆秒時を示したが、各社とも最大 20 段までである。また各社とも 16~20 段は受注生産となるため、実質は現場では 1~15 段を使用している。通常の 60-70m²サイズの道路トンネルの場合、1 回の発破で 100 孔前後を穿孔・起爆する。従って電気雷管の場合、同段の雷管を複数孔で使用することになり、斉発薬量(同時に起爆する孔の薬量の総量)は大きくなるため振動低減の面で不利となる。②起爆秒時については、同じく表 5-7 より、15 段で 3.5~4.5 秒、20 段で 6.0~7.5 秒と長い間振動が継続することになる。①で示した段数制限があることから、通常サイズのトンネル断面では、エリアやブロック単位で起爆順を設定したり、斉発薬量を低減する必要性から、後段(15 段または 20 段)まで使用する場合が多い。従って、振動継続時間は 15 段まで使用の場合で 4~5 秒となる。これは前述の図 3-39 で示したように、人は振動継続時間が短くなると振動を小さく感じるという傾向から見ても振動低減の面で不利となる。③起爆秒時のばらつきについては、吉岡ら(吉岡ら,1989)より求められた DS 雷管の各段の起爆秒時のばらつき(標準偏差)を表 5-8 および図 5-30

に示したが、延時薬がなく瞬発である 1 段を除き、明らかなばらつき（標準偏差）を有しており、後段になるに従いさらにそのばらつきは大きくなる傾向がみられる。一方、起爆順の設計上、後段が前段より先に起爆することは岩盤の起砕の失敗につながることから、後段になるに従い、設定した起爆秒時（ばらつく起爆秒時の中心）は、前後の段との起爆秒時の差を大きくする必要がある。図 5-30 に示すように、前後の段と確率分布が概ね重ならないように各段の起爆秒時が設定されていることが分かる。

5.2.2. 電気雷管における段発波形のシミュレーションとその評価

ここでは 4 章で検討した Seed wave の重ね合わせによる段発波形の再現法を電気雷管による発破にも適用し、電気雷管による発破の振動速度波形をシミュレートし、振動低減の方策を検討する。この時、4 章で検討した方法に加え、電気雷管の起爆秒時のばらつきを考慮する必要がある。

過去の研究（吉岡ら,1989）（宮地ら,1993）（橋爪ら,1996）（塩月ら,1996）において電気雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した振動速度波形の重ね合わせに関する検討がなされている。しかし、これらの検討は重ね合わせの元となる単発波形を発破条件によらず常に一定とする、あるいは伝播距離と振幅の関係を考慮していないなど、発破ごとに条件が変化する実際のトンネル現場を十分に想定していない場合が多かった。したがって、ここでは電気雷管を用いた発破について、条件が都度変化する実際のトンネル現場の発破を想定し、4 章で検討した重ね合わせを適用した。

まず、3 章で示した安永川トンネルの発破試験の起爆秒時差の全 21 回の発破（起爆秒時差 5ms, 10ms, 30ms×各 7 回）について、電気雷管（DS 雷管）で行ったと仮定し、経験則に基づき各段の装薬孔数を配分して発破条件を設定した。このとき表 5-9 および表 5-10 に示すように、全段（1 段～15 段）を使用する場合（ケース A）および、1 段（瞬発）を除き、2～15 段を用いた場合（ケース B）を想定し、それぞれ各段の装薬孔数を配分した。

安永川トンネルの発破では各発破の穿孔数は 100 孔前後であるが、ケース A、ケース B ともに最大 15 段まで使用し、実際のトンネル発破の起爆手順を想定して配分しており、各発破において同段に投入する孔数の最大は 9～13 孔となった。図 5-31 には孔数 89 孔で全段を使用する場合（ケース A）の各段の配孔パターン例を示した。

全 21 回の発破のそれぞれケース A、ケース B の段発波形のシミュレーションは、その基本は 4 章で検討した重ね合わせのフロー（図 4-9）に従うが、起爆秒時については、DS 電

気雷管の各段が持つばらつき（表 5-8）に従い正規乱数を用いてばらつきを持たせ、Seed wave の重ね合わせを行った。図 5-32 (a), (b)にそれぞれ 9/23PM の発破を DS 雷管で発破すると想定したケース A, ケース B の段発波形のシミュレーションの一例を示す。それぞれの波形には、各段の位置を示している。DS 電気雷管は段間の秒時差が最低 250ms 以上空いているため、各段の位置が明確に区分されているものの、同段内で見ると、起爆秒時のばらつきのため、波形が分散されている。特に図 5-32 (a), (b)の 5 段は、ケース A で 8 孔、ケース B で 9 孔配分されているが、その両ケースの 5 段の振幅の大きさはケース A で 0.21cm/s, ケース B で 0.93cm/s と全く異なっており、起爆秒時のばらつきが振幅に大きく影響していることが分かる。これが DS 電気雷管を実際のトンネル現場で適用した際の最大振動速度の再現性の低さ（予測の難しさ）の原因の 1 つである。

また、ケース A は起爆秒時のばらつきがない 1 段（瞬発）の Seed wave の重なり度合いが強く、最大振幅が 1 段でほぼ決定されることが分かる。一方で、11 段以降のインバート部は、起爆秒時のばらつきが大きい上にインバート部の振幅の調整（1/2.41 倍）のため、その振幅は上下半部に比べ、非常に小さくなっている。

次に全 21 回の発破条件の各ケース A, ケース B, つまり 21 発破×2 配孔=42 条件について、それぞれ 100 回の重ね合わせの試行を行った。1 回の試行の重ね合わせで得られた段発波形の最大振動速度を 100 個分まとめ、累積分布として整理した。図 5-33 には 9/23PM の Seed wave を基にした重ね合わせの最大振動速度 100 個分の累積分布を示した。（ケース A=赤線、ケース B=青線）。また同図には、同じ 9/23 PM の Seed wave を基にし、電子雷管による 1 孔 1 斉発の発破で起爆秒時差を 30ms とし、重ね合わせを 100 回試行した結果（黒線）も示している。電子雷管の起爆秒時差 30ms の重ね合わせを用いた理由は、単発波形が確実に分離され、重なり合う影響が十分小さいと考えられるためである。重ね合わせする元となる Seed wave 自体の振幅のばらつきは、4 章にて前述したようにワイブルパラメータ a により決定されるが、これは孔周辺の岩盤状態や装填・込め物の状態などに起因すると考えられる。したがって、Seed wave 自体の振幅のばらつきは電気雷管と電子雷管といった雷管の違いによらず同程度含んでいるものと考えられる。したがって図 5-33 の 3 つのケースの累積分布の違いは電気雷管と電子雷管の起爆秒時のばらつきの影響のみを比較できるものと考えられる。同図には、100 回の試行の平均値も併せて示した。電子雷管による 1 孔 1 斉発の場合（平均値=0.39cm/s）と比べるとケース A は 2.3 倍（=0.90/0.39）、ケース B は 1.5 倍（=0.58/0.39）であり、1 段を使用しているケース A の方が重ね合わ

せ後の段発波形の最大振幅が大きい結果となった。一方で、図 5-33 で示した 9/23 PM の場合、ケース A では瞬発である 1 段に 7 孔配置しているにもかかわらず、電子雷管のケースに対し、2.3 倍、つまり重畳孔数が 2.3 孔に留まっていることが分かった。これは図 5-34 を用いて以下のように説明することができる。

4 章 で示した通り、発破の各孔からもたらされる振動速度の振幅（区間ピーク）はワイブル分布に従っている。図 5-34 に示すように、電子雷管の場合は 1 孔 1 斉発であるため、重ね合わせ後の段発波形の最大振幅は、起爆させた孔数分だけ発生させた Seed wave の振幅のうちの最大値=0.48cm/s を示すのに対し、電気雷管の場合の 1 段 7 孔は、ワイブル分布上の任意の 7 点の振幅の和になる。例えば、任意の 7 点の平均値がワイブル分布の中央値 0.16cm/s をとると仮定すると $0.16\text{cm/s} \times 7 = 1.12\text{cm/s}$ となり、重畳孔数は $1.12 \div 0.48 = 2.33$ 孔となる。また具体的に電気雷管の 1 段 7 孔がランダムに選択された場合を想定して、7 孔の振幅和を繰り返し計算し、重畳孔数の分布を図 5-35 に示した。重畳孔数の平均値は 2.39 孔となり、今回の重ね合わせの結果（図 5-33）より得られた重畳孔数 2.3 孔と同等の値となった。

次に、全 21 回の発破は切羽位置から地表計測点までの斜距離がそれぞれ異なることから、斜距離に対する電気雷管（ケース A およびケース B）および電子雷管（起爆秒時差 30ms）を比較することとした。全 21 回の発破について段発波形の重ね合わせのシミュレーションの最大振幅と斜距離の関係を図 5-36 に示した。この時、1 発破について段発波形の重ね合わせのシミュレーションを 100 回試行していることから、その 100 個の最大振幅の平均値をその発破の代表値として示している。図 5-36 の結果から 1 段によって最大振幅が決定されるケース A に比べ、起爆秒時のばらつきを持つ 2 段以降のみを用いたケース B の方が、最大振幅が小さいだけでなく、そのばらつきも小さくなり、振動速度を予想する上で再現性が高いことが分かった。

図 5-37 には、図 5-36 のプロットから、横軸に電子雷管のケース（起爆秒時差 30ms）、縦軸に電気雷管のケース（ケース A およびケース B）をとり、同じ発破位置における電子雷管に対する電気雷管の最大振幅の比をプロットした。発破試験を行った 21 回分のトンネル発破では、発破ごとに、地質や伝播距離、重ね合わせの元になる Seed wave の形状だけでなく、電気雷管の各段の装薬孔数の設定（表 5-9 および表 5-10）も異なるにもかかわらず、ケース A、ケース B ともに電子雷管（起爆秒時差 30ms）に対し、ほぼ直線的に比例関係が見られた。その比はケース A の場合、電子雷管に対し約 2.6 倍となるのに対し、ケ

ース B では約 1.5 倍まで振動が抑制されることが分かった。このように起爆秒時差のばらつきを持つ電気雷管についても単発発破から求めた Seed wave の重ね合わせ法を行うことにより、解析上の検討ではあるものの、実際のトンネル現場において都度変化する発破条件に対応して、段発発破の振動の増幅程度や重畳孔数を評価できることが分かる。

5.2.3. 電気雷管の起爆秒時のばらつきと振動の関係

5.2.2 において、電気雷管の 1 段を使用しない場合（ケース B）は、全段使用する場合（ケース A）に比べ、0.6 倍（=1.5 倍/2.6 倍）まで振動を低減できることが分かった。つまり、瞬発である 1 段を使用しない場合は、2 段目以降の起爆秒時がもつばらつきにより、同じ段の複数の孔から起爆された波形の重なり合いは弱まり、重畳孔数が小さくなる。そこで、さらにその各段が起爆秒時のばらつきがもたらす振動低減の効果を検討するため、電気雷管の瞬発である 1 段を除く 2~15 段のみを使うことを前提として、その条件下で起爆秒時のばらつきを意図的に変えた場合の最大振幅を検討した。実際には、工場生産される電気雷管の起爆秒時のばらつきを調整することは困難であると考えられる。しかしながら図 5-38（吉岡ら,1989）に示すように、電気雷管の起爆秒時のばらつき（標準偏差）を工場測定と現場測定で比べると、特に後段になるに従い、現場測定した電気雷管の起爆秒時のばらつきが明らかに大きくなっている。これは起爆秒時のばらつきが生産後の経過時間や温度湿度などの保管状況により変化するためであると考えられる。そこで、起爆秒時のばらつきと振動の関係について、定量的な評価を試みることにした。

電気雷管の各段の起爆秒時のばらつきを現在のばらつきの標準偏差に対し、0.5 倍、1.5 倍、2.0 倍となる場合を想定した。その起爆秒時の発生確率分布を図 5-39 に示す。ばらつき 2.0 倍では、後段になるほど、前後段と起爆秒時の発生確率分布が重なっていることが分かる。これは、後段になるほど、想定した段の起爆順とは異なる順序で起爆する可能性があり、発破設計上、問題となる。したがって実際の発破を想定するとこれ以上ばらつきを大きくすることはできないことになる。

同様に各起爆秒時のばらつきを加味し、4 章と同様に Seed wave の重ね合わせによる段発波形のシミュレートを行った。表 5-10 に示した配孔条件の 21 回分の発破について、それぞれ起爆秒時のばらつき（0.5 倍、1.0 倍（標準）、1.5 倍、2.0 倍）で段発波形のシミュレーションを行った。各ケースで試行回数は 100 回とした。図 5-40 に 9/25PM の Seed wave の重ね合わせの段発波形の一例として試行 100 回のうち、振幅が最大・最小のケースを示

す。起爆秒時のばらつきが 0.5 倍→1.0 倍→1.5 倍→2.0 倍となるに従い、Seed wave の重なり具合が小さくなるため、振動速度の振幅も小さくなるが、一方、ばらつきが大きくなるため、起爆秒時の制御ができていないことが分かる。

図 5-41 には、図 5-37 と同様に、起爆秒時差 30ms の電子雷管のケースを基準として、電気雷管の各起爆秒時のばらつき (0.5 倍, 1.0 倍 (標準), 1.5 倍, 2.0 倍) のケースの最大振動速度の比をプロットした。図 5-40 に示したのと同様に、起爆秒時のばらつきが 0.5 倍→1.0 倍→1.5 倍→2.0 倍となるに従い、振動速度の振幅は小さくなっているがその差異は、図 5-37 で示したケース A (1~15 段) とケース B (2~15 段) ほどではない。

また、図 5-41 にプロットした各起爆秒時のばらつきケースについて、ばらつきの標準偏差の比 ((0.5 倍, 1.0 倍, 1.5 倍, 2.0 倍) と最大振動速度の比 (=図 5-41 の近似直線式の係数) の関係を図 5-42 にプロットした。これにより、起爆秒時のばらつきが 1.0 倍から 2.0 倍と変更しても振動速度の振幅は 1.53 倍から 1.36 倍と大幅な低減効果は見込めないことが分かった。前述のようにこれ以上、起爆秒時差のばらつきを大きくするためには、各段の中心起爆秒時 (各段のばらついている起爆秒時の平均値) の間隔を大きくしなければならず、その場合、振動の値そのものの低減効果よりも振動継続時間が長くなる逆効果の方が大きくなると考えられるため、現実的な対策ではない。

以上の解析的検討から、電気雷管を用いた発破の場合、5.2.2 で述べたように瞬発の 1 段を用いない、あるいは用いる場合でも 1 段雷管の使用する孔数を少なくすることは振動低減に大きく寄与するものの、2 段以降の雷管については、起爆秒時が図 5-30 に示すような現状使用されている電気雷管が持っている程度のばらつきであれば、同段の各孔からの単発波形が分散されることによる振動低減効果に大差がないことが分かった。

5.3. 最適発破条件の検討の適用範囲の考察

以上、5.1 にて電子雷管による最適発破条件の検討、5.2 にて電気雷管による最適発破条件の検討をそれぞれ行ってきた。このうち、5.1 にて電子雷管による最適発破条件の検討では、特に 5.1.1 にて重ね合わせ法による検討、5.1.2 にて自己相関係数や周波数解析による簡易な方法による検討をそれぞれ行った。本研究ではこれらの手法を安永川トンネルと白井トンネルに適用したが、ここではこれらの手法が適用できる範囲について考察を加える。

安永川トンネルおよび白井トンネルに共通する条件は、いずれも硬岩である花崗岩が地表まで覆っている点である。逆に言えばそのような地盤条件であったため、振動がそれほど

減衰することなく地表まで伝播し、環境負荷として発破振動が問題となったと言える。一方、発破掘削の際の環境負荷の低減としてこの高精度電子雷管を適用した他のトンネル現場（Aトンネル（関西地区）およびBトンネル（九州地区））について、本研究で示した最適発破条件を求める手法の適用性について検討することとした。

(1) Aトンネル

Aトンネルは断面積約80m²、全長約5kmの2車線双設道路トンネルのうち、西側約3kmの工事である。住宅が坑口付近に密集していたことから、発破による環境負荷として振動よりも坑口を音源とした騒音、特に低周波音が問題であった。したがって発破振動低減に関する本研究の成果は適用していない。振動については、坑口付近のみ発破振動の計測は行っていたが、最大振動速度は人間が感知しないほど著しく小さく、当初予想の通り、問題にはならなかったが、その振動波形を分析してみると、坑口付近の半径100mほどの狭いエリアに点在した複数の振動計測点のうち、振動波形の継続時間が他と大きく異なる計測点が見られる場合があった。この場合の振動波形は、高精度電子雷管により制御した起爆時間（＝秒時差×孔数）以上に長い振動継続時間が観測されており、その特定の計測地点にて振動が共振していることが予想された。そのような場所は擁壁などで区画された畑や住宅前のコンクリート床板などであった。従って、観測地点の地表の構造物による地質条件の違い、擁壁などの地形条件の違いがある場合、振動波形の形状が大きく変わる可能性があると言える。本研究で行った最適発破条件の検討法では、単発波形に基づき最適な起爆秒時差を求めるが、これは地表の対象とするある一定範囲が地盤条件的にある程度均質であることを前提条件とした方法である。したがって、このAトンネルのように狭い範囲で地形や地質条件に伴う振動速度計の設置条件が大きく変化する場合、ある1点での単発波形での最適秒時差が近くの他の場所では不適となる可能性もあり最適発破条件の検討では、この点に配慮する必要がある。

(2) Bトンネル

Bトンネルは、断面積約70m²、全長約7kmの新幹線トンネルのうち、西側約3.5kmの工事である。このうち、東工区との工区境付近では、土被り厚（トンネル天端と地表までの地盤厚さ）は80m以上あり、振動が問題になることはない想定されたが、地表に住宅が密集していたため、高精度電子雷管を用いた斉発薬量の低減による振動低減と発破振動の計測を継続した。また予期せぬ発破振動の増大が認められることを懸念し、本研究の成果の

1つである簡易な方法による最適発破条件の検討のため、単発波形の取得を行った。単発波形を取得するための秒時差は安永川トンネルでは500ms、白井トンネルでは250msとしたが、両トンネルでの単発波形の減衰の実績を考慮し、Bトンネルは250msに設定した。しかしながら、得られた単発波形は250msでは収束しきらず、単発用の3孔からの単発波形は重なり合う結果となった。これは秒時差を100ms空けると十分に収束していた安永川トンネルや白井トンネルでの単発波形と大きく性格の異なるものであった。

このBトンネルの地質は安山岩質凝灰岩であり、安永川トンネルや白井トンネルに比べると一軸圧縮強度は低く、また地表は表土が厚く覆われている特徴がある。したがって、単発波形のうち高周波成分は減衰し相対的に低周波成分が卓越しやすいこと、および計測地点の地盤の比較的低い固有周波数に対する共振により、低周波成分中心となった単発波形の振動継続時間が長くなったものと想定される。

このような地盤条件においても重ね合わせ法や自己相関係数などの簡易な方法で最適発破条件を求めることが可能であると思われるが、単発波形の高周波成分が減衰し、特定周波数帯の卓越性が失われる（周波数の局在性が低くなる）ことは、最適発破条件による振動低減の効果が相対的に小さくなると考えられる。また、単発波形の振動継続時間が極端に長い場合、単発波形同士の重ね合わせの際に、ある孔から発せられた1つの単発波形に対し、重なり合う単発波形が2つ以上の複数となる。したがって、自己相関係数による隣接する単発波形同士の関係に基づいた最適な秒時差の設定は、3波目以降の単発波形の重なり合いの影響を考慮していないため、振動の低減効果は、安永川トンネルや白井トンネルのようなケースと比べ、振動低減効果は明瞭でなくなる可能性がある。

一方、地表の地盤条件によっては、地盤が持つ固有周波数の成分の共振により卓越したり、盆地地形では、ある特定の周波数のみ卓越する場合は考えられる。このような地表の地質・地形条件に特有な卓越周波数が現れた場合、周波数の局在性が高くなるため、重ね合わせ法や自己相関係数などの簡易な方法による最適発破条件の振動低減効果が期待できる。

以上のことから、重ね合わせ法や自己相関係数や周波数解析による簡易な方法による最適発破条件の検討により、振動が低減する十分な効果が期待できるのは以下のような条件であると考えられる。

- ①地表の振動観測点の一带は、地質的にも地形的にも概ね一定（均質）であるとみなせること。そうでない場合、ある1点での単発波形に基づく最適起爆秒時差が、近くの他の場

所で不適となる可能性もあり、複数点での総和的な最適条件を求める必要がある。

また、トンネル特有の条件として掘削に伴うトンネル内の発破位置の進行や地表の振動計測点の移動につれて、単発波形の形状が変わることが予想されるため、都度、単発波形の収録および自己相関係数による最適秒時差の変化を捉えていくことが必要である。

- ②伝播経路は、地表まで硬岩であることが望ましい。表土が軟らかい場合でも、最適発破条件の検討は適用できるが、単発波形の高周波成分が減衰し、特定周波数帯の卓越性が失われること、および単発波形の振動継続時間が長くなることが考えられるため、振動低減効果は明瞭でなくなる可能性がある。一方、地表の不均質な地質・地形条件により特有な卓越周波数が現れる場合、周波数の局在性が高くなることが想定され、重ね合わせ法や自己相関係数などの簡易な方法で最適発破条件を検討することによる振動低減効果が期待できる。

5.4. 5章のまとめ

本章では、前章の振動速度波形の再現法に基づき、高精度電子雷管および従来の電気雷管のそれぞれの発破について、振動を低減する最適な起爆条件を検討した。

高精度電子雷管による発破では、前章の振動速度波形の再現法を、その起爆秒時差を 2ms, 3ms・・40ms まで複数設定し、それぞれ試行 100 回で重ね合わせを行った。その結果、起爆秒時差と振動速度波形の振幅の極小・極大の関係が示され、振動を低減する最適な起爆秒時差を求めることができた。一方で、この方法は検討に手間を要するため、日に数回行われる実施のトンネルでの発破での対応が容易でない。従って、より簡易な評価方法を模索した。振幅極小となる起爆秒時差は、重ね合わせる単発波形同士が最も打ち消し合う状態であるが、これは単発波形の形状に起因していると考えた。そこで単発波形の形状に対し、自己相関係数および周波数解析による評価の 2 つを検討した。この 2 つの簡易な方法で求めた最適な起爆秒時差と、前述の複数の起爆秒時差ごとの重ね合わせ法による最適な起爆秒時差を比較した結果、1~3ms 程度のずれが見られるものの、ほぼ同様の結果が得られ、簡易な方法によっておおよその最適な起爆秒時差を算定できることが分かった。また、この自己相関係数による方法を実際のトンネル現場の制御発破区間に適用した結果、電子雷管の適用や薬量低減などの対策済の発破に対し、更に 2~3 割の振動低減効果が確認できた。

続いて、振動速度波形の再現法を電気雷管による発破に適用した。電気雷管は起爆秒時を筐体内部の延時薬で調整するため、4 章で確立した振動速度波形の再現法に、電気雷管の起

爆秒時のばらつきを追加した。電気雷管では、瞬発である 1 段が最大振動速度を決定することがほとんどであるため、振動速度波形の再現法を行ってこの 1 段の使用・不使用と最大振動速度の違いを検証した。さらに起爆秒時のばらつきを有する電気雷管の発破が、何孔の同時起爆と同等となるか（重畳孔数）について検討し、その重畳孔数が得られる原因をその統計的な検討により推定した。また同じく、振動速度波形の再現法に基づき、起爆秒時のばらつきの違いと最大振動速度の関係を明らかにした。その結果、瞬発である 1 段の使用・不使用は振動低減に大きく影響するものの、起爆秒時のばらつきの違いは振動低減に大きな影響を与えないことが分かった。

表 5-1 単発波形の重ね合わせで得られた最適秒時差の振幅と基準振幅との比

対称発破	重ね合わせで極小となった起爆秒時差とその振幅 (=最適秒時差の振幅)		単発波形の重ね合わせの影響が小さくなった時(30ms以降)の段発波形の振幅 (=基準となる振幅)				(A)/(B)
	秒時差	振幅(A) (cm/s)	30ms	35ms	40ms	30~40msの 平均振幅(B) (cm/s)	
9/18PM TD328.0 m	5 ms	0.48	0.40	0.41	0.38	0.40	1.19 倍
9/27AM TD353.5 m	11ms	0.98	0.98	0.93	0.96	0.96	1.02 倍
10/3PM TD370.0 m	13 ms	1.31	1.27	1.34	1.34	1.31	0.99 倍

表 5-2 各方法による最適または不適な起爆秒時差

対称発破	最適な起爆秒時差			不適な起爆秒時差		
	重ね合わせ法	自己相関係数	周波数解析	重ね合わせ法	自己相関係数	周波数解析
9/18PM TD328.0 m	5 ms	3.9 ms	4.5 ms	7 ms	7.8 ms	8.9 ms
9/27AM TD353.5 m	11 ms	11.7 ms	8.9 ms	19 ms	20.5 ms	17.9 ms
10/3PM TD370.0 m	13 ms	12.7 ms	12.5 ms	18 ms	21.5 ms	25.0 ms

※自己相関係数・周波数解析 については1孔目の単発波形の解析結果を示す

表 5-3 白井トンネルの諸元

工事名	国道45号 白井地区道路トンネル
工事場所	岩手県下閉伊郡普代村～野田村
工期	2014年12月～2019年3月
トンネル延長	2,058m
掘削断面積	108m ² (通常断面部)

表 5-4 発破振動の提言値

対象		項目	振動(周波数)		
			10Hz未満	10～50Hz	50Hz以上
人 (dB)	昼間	73 暗振動+30	64 暗振動+30	83 (1.3 cm/s) 暗振動+30	
	夜間	58 暗振動+20	64 暗振動+20	70 (0.2 cm/s) 暗振動+20	
構造物 (cm/s)	強度の明確な構造物	1.25	2.5	5.0	
	一般構造物(民家)	0.50	1.0	2.0	
	重要な構造物	0.25	0.5	1.0	

表 5-5 発破制御区間の手前における発破振動計測結果

No	発破日時	斉発 薬量 (kg)	M 1			M 2			M 3			M 4		
			斜距離 (m)	振動 速度 (cm/s)	K値	斜距離 (m)	振動 速度 (cm/s)	K値	斜距離 (m)	振動 速度 (cm/s)	K値	斜距離 (m)	振動 速度 (cm/s)	K値
1	2017/11/7 20:30	18.0	113	1.04	1933	136	0.95	2564	170	0.38	1599			
2	2017/11/8 19:05	16.0	112	0.75	1488	134	0.77	2166	168	0.26	1169			
3	2017/11/9 2:30	9.6	110	0.13	340	132	0.11	436	165	0.07	413			
4	2017/11/9 13:45	8.9	108	0.21	580	129	0.18	708	162	0.09	567			
5	2017/11/10 19:20	4.0	103	0.36	1512	122	0.29	1728	155	0.13	1252	156	0.11	1028
6	2017/11/11 7:40	4.6	101	0.17	609	120	0.20	1009	152	0.07	556	155	0.08	712
7	2017/11/11 12:40	9.6	101	0.91	2048	119	0.90	2834	150	0.34	1684	155	0.32	1718
8	2017/11/13 7:50	3.2	100	0.25	1154	117	0.21	1313	149	0.08	828	155	0.06	668
9	2017/11/13 16:20	4.7	100	0.24	871	117	0.30	1472	148	0.12	911	154	0.08	680
10	2017/11/13 22:05	10.6	98	1.32	2632	115	1.26	3460	146	0.48	2138	154	0.40	1955
11	2017/11/14 9:25	9.0	97	0.28	610	113	0.24	716	144	0.09	437	154	0.10	547
12	2017/11/14 20:50	12.0	97	0.76	1362	112	0.72	1718	143	0.28	1081	154	0.19	860
13	2017/11/15 20:45	11.7	95	1.48	2587	109	1.48	3406	140	0.56	2126	153	0.35	1587
14	2017/11/16 4:20	5.2	94	0.53	1561	108	0.50	1963	138	0.16	1047	153	0.14	1091
15	2017/11/16 9:40	15.4	94	1.21	1730	107	1.18	2185	137	0.42	1278	153	0.26	977
16	2017/11/17 1:40	8.7	92	0.36	721	105	0.36	947	134	0.13	555	154	0.07	383
17	2017/11/17 8:00	18.0	92	2.16	2662	104	2.58	4063	133	1.07	2756	153	0.40	1353
18	2017/11/17 16:05	18.0	91	2.29	2761	102	2.67	4044	131	0.98	2456	153	0.41	1408
19	2017/11/17 22:15	18.0	90	2.71	3196	101	3.19	4738	129	1.26	3053	153	0.43	1455

表 5-6 自己相関係数の検討前後の振動速度の比較

発破No	発破日時	起爆秒時差	総薬量 (kg)	孔数	概算の 斉発薬量 (=総薬量/孔数)	最大振動速度 (cm/s)						
						M1	M2	M3	M5	M6	M8	M9
①	2017/12/20 1:51	7ms	59.2	111	0.53	0.168	0.168	0.252	0.598	0.224	0.069	0.319
②	2017/12/20 16:15	単発波形 + 7ms	35.0	100	0.35	0.105	0.189	0.280	0.554	0.226	計測 失敗	0.197
③	2017/12/21 1:50	13ms	48.8	124	0.39	0.080	0.136	0.202	0.370	0.176	0.063	0.188
発破①に対する発破③の振動低減率 (③/①)						52%	19%	20%	38%	21%	9%	41%
発破②に対する発破③の振動低減率 (③/②)						24%	28%	28%	33%	22%		5%

表 5-7 国内で販売されている電気雷管(DS)の設定起爆秒時

	DS電気雷管の設定起爆秒時(秒)		
	カヤクジャパン	ジャペックス	オリカ
1段	0.00	0.00	0.40
2段	0.25	0.25	0.50
3段	0.50	0.50	0.60
4段	0.75	0.75	0.70
5段	1.00	1.00	0.80
6段	1.25	1.25	0.90
7段	1.50	1.50	1.00
8段	1.75	1.75	1.20
9段	2.00	2.00	1.40
10段	2.30	2.30	1.60
11段	2.70	2.70	1.80
12段	3.10	3.10	2.00
13段	3.50	3.50	2.50
14段	4.00	4.00	3.00
15段	4.50	4.50	3.50
16段	5.10	5.10	4.00
17段	5.70	5.70	4.50
18段	6.30	6.30	5.00
19段	6.90	6.90	5.50
20段	7.50	7.50	6.00

表 5-8 電気雷管の各段の起爆秒時のばらつき

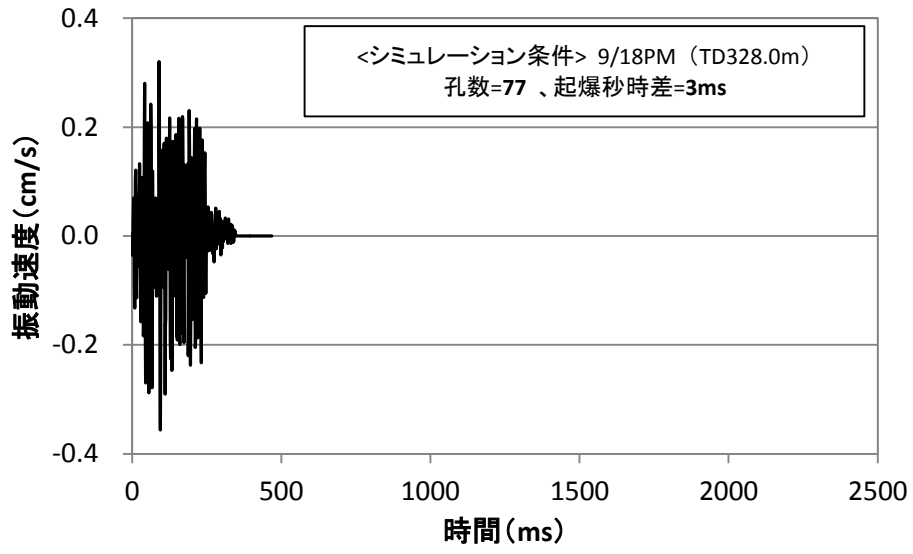
	起爆秒時 (ms)	標準偏差 (ms)
1段	0	0
2段	250	12
3段	500	16
4段	750	31
5段	1,000	28
6段	1,250	16
7段	1,500	30
8段	1,750	30
9段	2,000	34
10段	2,300	49
11段	2,700	70
12段	3,100	68
13段	3,500	55
14段	4,000	88
15段	4,500	120

表 5-9 電気雷管の全段使用(1~15 段)を想定した場合(ケース A)の各段の配孔

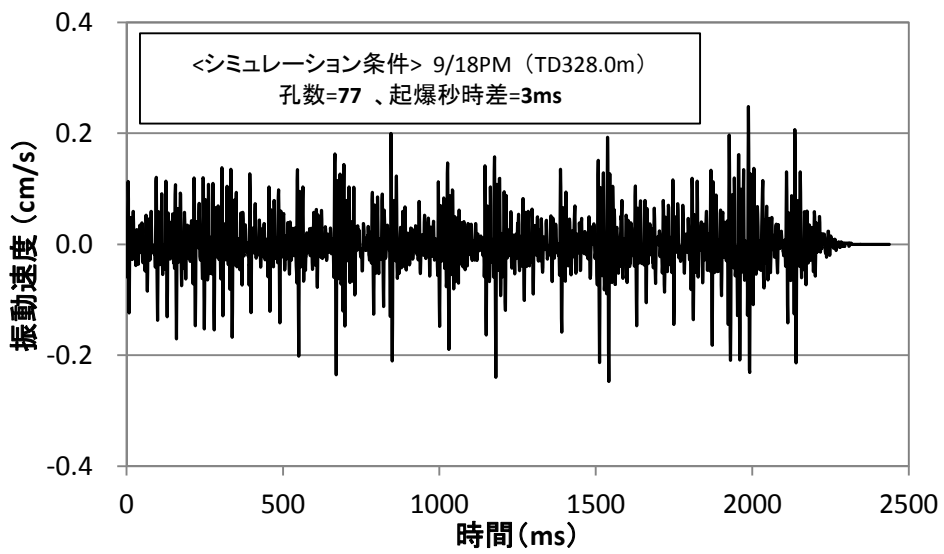
		発破仕様						段ごとの孔数 (DS電気雷管)														
日時	切羽TD (m)	シングル デッキ(S) or ダブル デッキ(D)	秒時差 (ms)	孔数	うち 上下半孔	うち インバート孔	上下半										インバート					
							1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段	8段	9段	10段	11段	12段	13段	14段	15段	
9月17日	AM	322.0	S	5	102	79	23	8	8	9	9	10	9	9	9	6	2	6	6	5	4	2
9月18日	AM	325.5	S	10	96	75	21	8	8	8	8	10	9	8	8	6	2	6	6	5	2	2
9月18日	PM	328.0	S	30	77	77	0	8	8	8	8	10	9	9	9	6	2	0	0	0	0	0
9月19日	AM	330.5	S	5	100	80	20	8	8	8	8	10	10	10	10	6	2	5	5	4	4	2
9月19日	PM	332.5	S	10	96	74	22	8	8	8	8	9	9	8	8	6	2	6	6	6	2	2
9月20日	AM	335.0	S	30	92	73	19	8	8	8	8	9	8	8	8	6	2	5	5	5	2	2
9月23日	AM	337.0	S	5	93	77	16	8	8	8	8	10	9	9	9	6	2	4	4	4	2	2
9月23日	PM	339.0	S	10	82	65	17	7	7	7	7	8	7	7	7	6	2	5	4	4	2	2
9月24日	AM	342.0	S	30	96	67	29	7	7	7	8	8	8	7	7	6	2	8	8	7	4	2
9月24日	PM	344.5	S	5	76	57	19	6	6	6	6	7	6	6	6	6	2	5	5	5	2	2
9月25日	AM	345.5	S	30	85	63	22	6	6	7	7	8	7	7	7	6	2	6	6	6	2	2
9月25日	PM	347.5	S	10	89	80	9	8	8	8	8	10	10	10	10	6	2	4	3	2	0	0
9月26日	AM	349.5	S	5	116	81	35	8	8	8	8	11	10	10	10	6	2	10	10	9	4	2
9月26日	PM	351.5	S	10	99	72	27	7	7	8	8	9	9	8	8	6	2	7	7	7	4	2
9月27日	AM	353.5	S	30	100	86	14	8	8	10	10	11	11	10	10	6	2	4	3	3	2	2
9月27日	PM	356.0	S	5	97	74	23	8	8	8	8	9	9	8	8	6	2	6	6	5	4	2
10月3日	AM	368.0	S	10	102	70	32	7	7	8	8	8	8	8	8	6	2	9	9	8	4	2
10月3日	PM	370.0	S	30	110	75	35	8	8	8	9	9	9	8	8	6	2	10	10	9	4	2
10月4日	AM	372.0	S	5	97	66	31	7	7	7	7	8	8	7	7	6	2	9	9	7	4	2
10月4日	PM	373.5	S	10	112	88	24	8	8	10	10	12	12	10	10	6	2	7	7	6	2	2
10月10日	AM	385.0	S	30	133	133	0	8	8	9	9	10	10	12	12	10	9	9	9	8	8	2

表 5-10 電気雷管を1段除く 2~15 段 を想定した場合(ケース B)の各段の配孔

発破仕様								段ごとの孔数 (DS電気雷管)														
日時	切羽TD (m)	シングル デッキ(S) or ダブル デッキ(D)	秒時差 (ms)	孔数	うち 上下半孔	うち インバート孔	上下半										インバート					
							1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段	8段	9段	10段	11段	12段	13段	14段	15段	
9月17日	AM	322.0	S	5	102	79	23	/	8	10	10	12	12	10	9	6	2	6	6	5	4	2
9月18日	AM	325.5	S	10	96	75	21	/	8	9	9	12	10	10	9	6	2	6	6	5	2	2
9月18日	PM	328.0	S	30	77	77	0	/	8	9	9	12	12	10	9	6	2	0	0	0	0	0
9月19日	AM	330.5	S	5	100	80	20	/	8	10	10	12	12	10	10	6	2	5	5	4	4	2
9月19日	PM	332.5	S	10	96	74	22	/	8	9	9	11	11	10	8	6	2	6	6	6	2	2
9月20日	AM	335.0	S	30	92	73	19	/	8	9	9	11	11	9	8	6	2	5	5	5	2	2
9月23日	AM	337.0	S	5	93	77	16	/	8	10	10	11	11	10	9	6	2	4	4	4	2	2
9月23日	PM	339.0	S	10	82	65	17	/	8	8	9	9	8	8	7	6	2	5	4	4	2	2
9月24日	AM	342.0	S	30	96	67	29	/	7	7	9	10	10	9	7	6	2	8	8	7	4	2
9月24日	PM	344.5	S	5	76	57	19	/	6	7	7	8	8	7	6	6	2	5	5	5	2	2
9月25日	AM	345.5	S	30	85	63	22	/	6	8	8	9	9	8	7	6	2	6	6	6	2	2
9月25日	PM	347.5	S	10	89	80	9	/	8	10	10	12	12	10	10	6	2	4	3	2	0	0
9月26日	AM	349.5	S	5	116	81	35	/	8	11	11	12	12	10	9	6	2	10	10	9	4	2
9月26日	PM	351.5	S	10	99	72	27	/	8	9	9	10	10	9	9	6	2	7	7	7	4	2
9月27日	AM	353.5	S	30	100	86	14	/	8	11	11	13	13	12	10	6	2	4	3	3	2	2
9月27日	PM	356.0	S	5	97	74	23	/	8	10	10	12	10	8	8	6	2	6	6	5	4	2
10月3日	AM	368.0	S	10	102	70	32	/	7	9	9	10	10	9	8	6	2	9	9	8	4	2
10月3日	PM	370.0	S	30	110	75	35	/	8	10	10	11	11	9	8	6	2	10	10	9	4	2
10月4日	AM	372.0	S	5	97	66	31	/	8	8	8	10	10	7	7	6	2	9	9	7	4	2
10月4日	PM	373.5	S	10	112	88	24	/	8	12	12	13	13	12	10	6	2	7	7	6	2	2
10月10日	AM	385.0	S	30	133	133	0	/	8	9	9	11	11	13	13	11	10	10	10	8	8	2



(a) 起爆秒時差 3ms



(b) 起爆秒時差 30ms

図 5-1 電子雷管を想定した段発波形のシミュレーション例

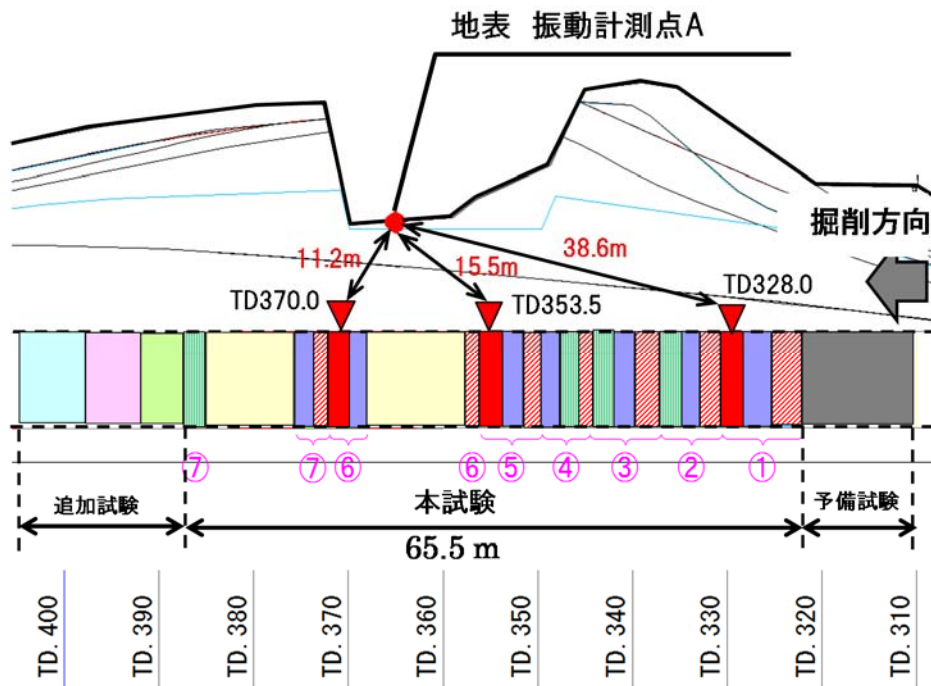
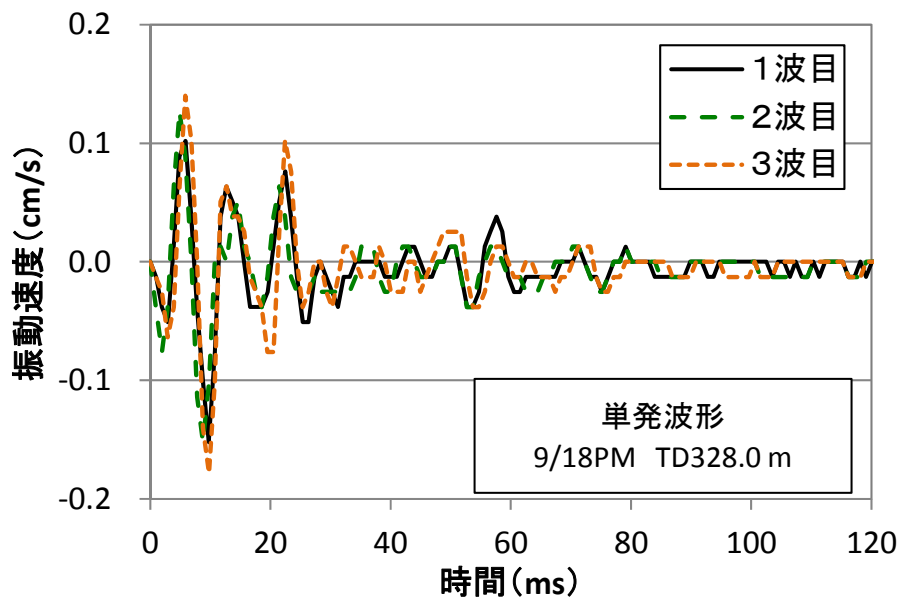
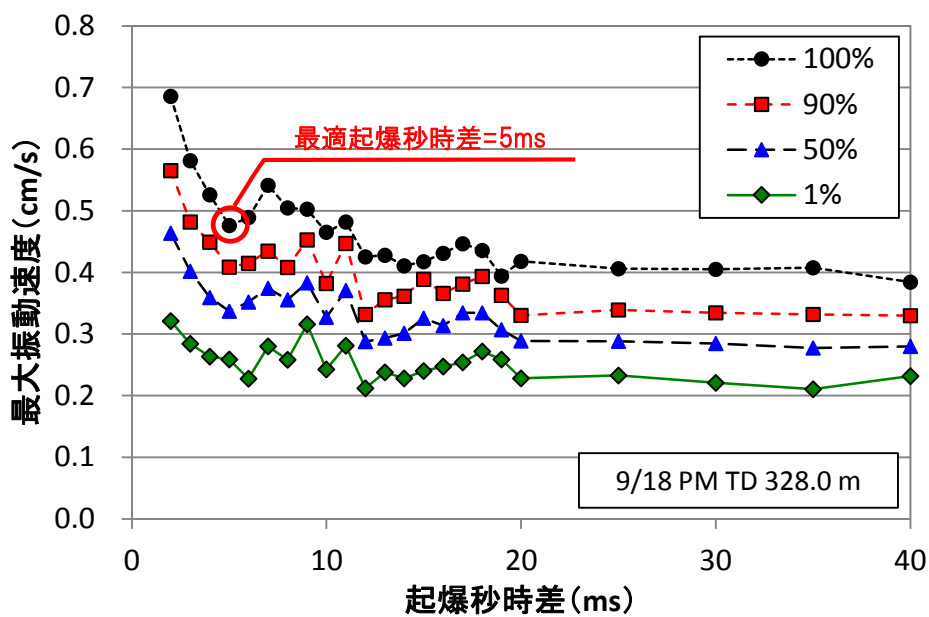


図 5-2 各起爆秒時差の波形の重ね合わせを行う対象の発破位置と計測点 A の距離関係

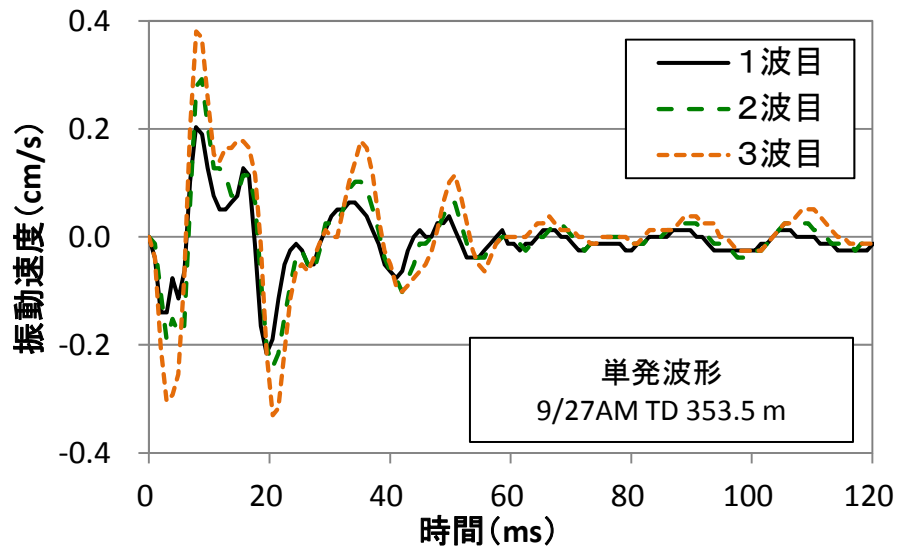


(a) 単発波形 9/18PM (TD328.0m)

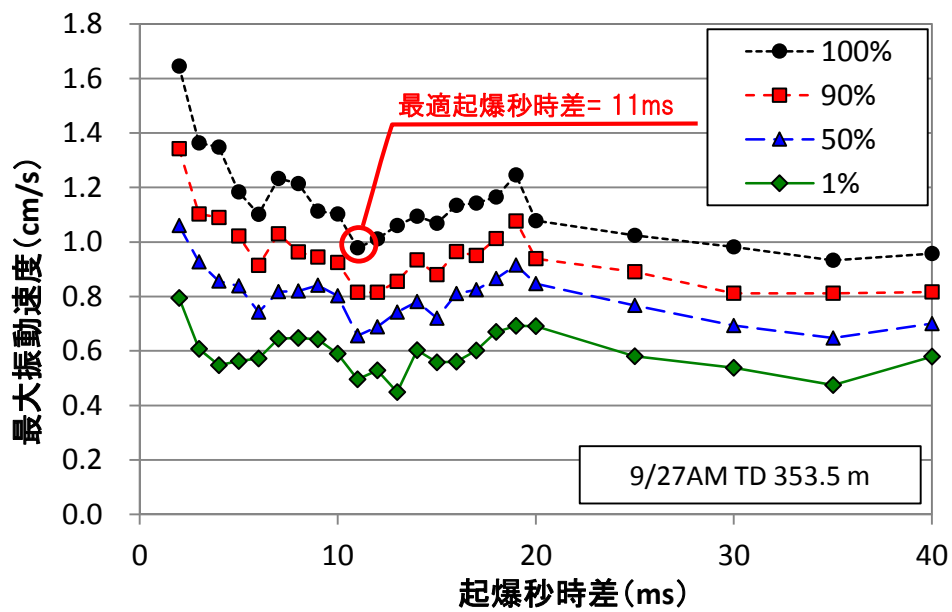


(b) 起爆秒時差ごとの最大振動速度 9/18PM (TD328.0m)

図 5-3 3 発破における単発波形および重ね合わせによる起爆秒時ごとの最大振動速度

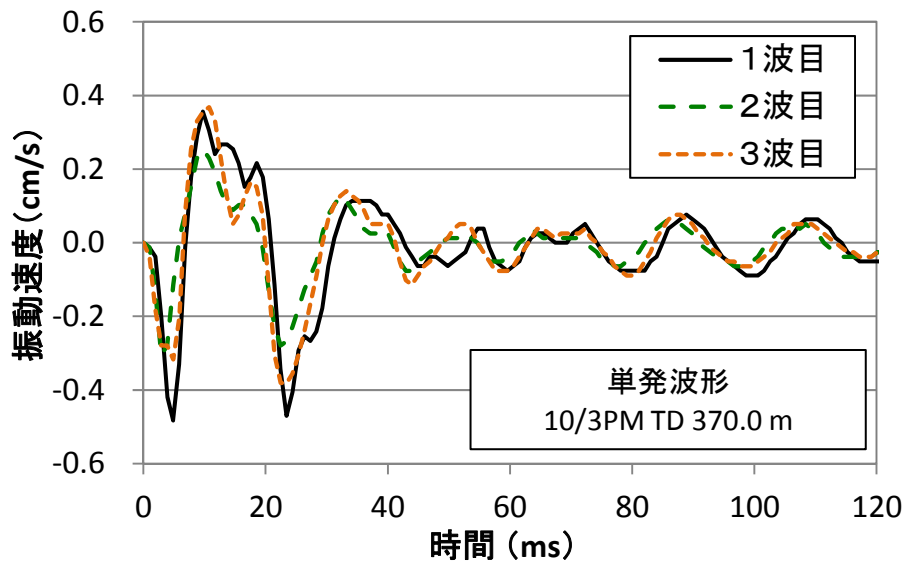


(c) 単発波形 9/27AM (TD353.5m)

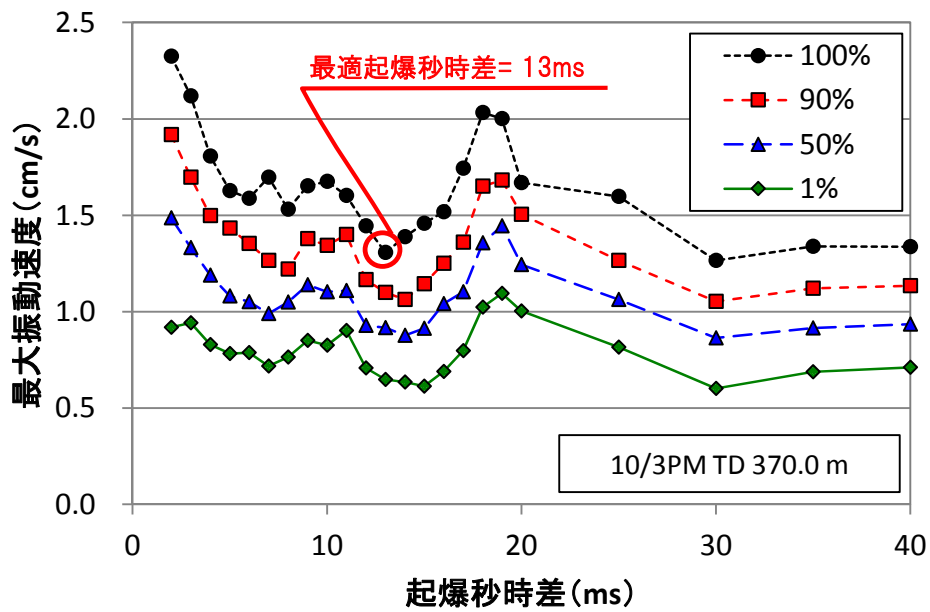


(d) 起爆秒時差ごとの最大振動速度 9/27AM (TD353.5m)

図 5-3 3 発破における単発波形および重ね合わせによる起爆秒時ごとの最大振動速度

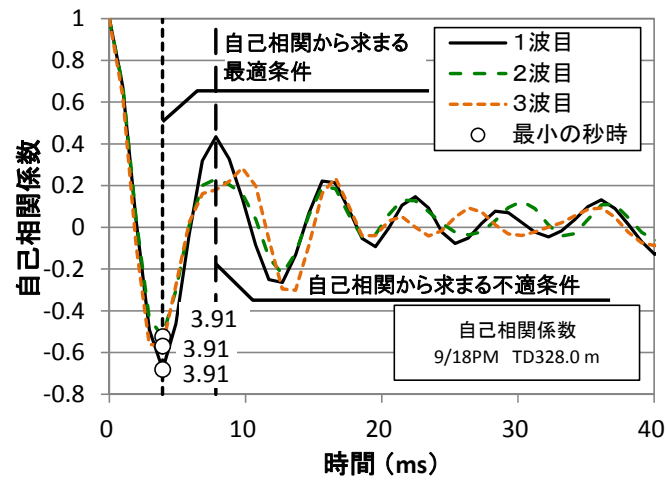


(e) 単発波形 10/27AM (TD353.5m)

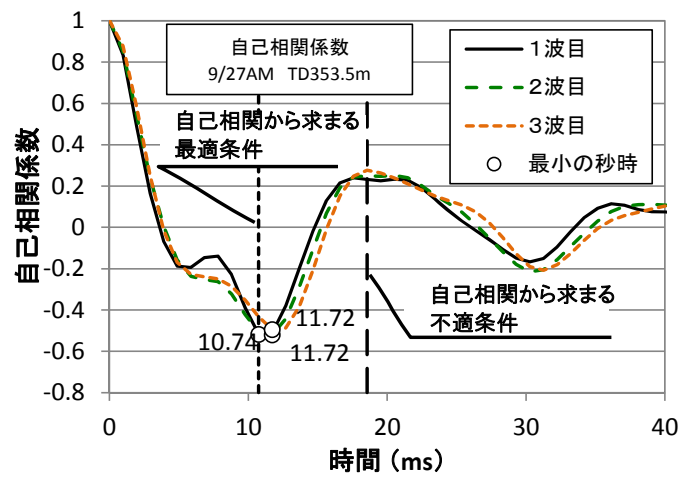


(f) 起爆秒時差ごとの最大振動速度 10/3PM (TD370.0m)

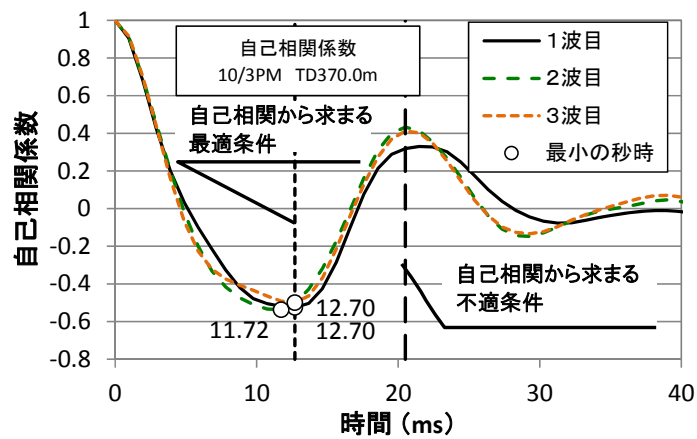
図 5-3 3 発破における単発波形および重ね合わせによる起爆秒時ごとの最大振動速度



(a) 9/18PM (TD328.0m)

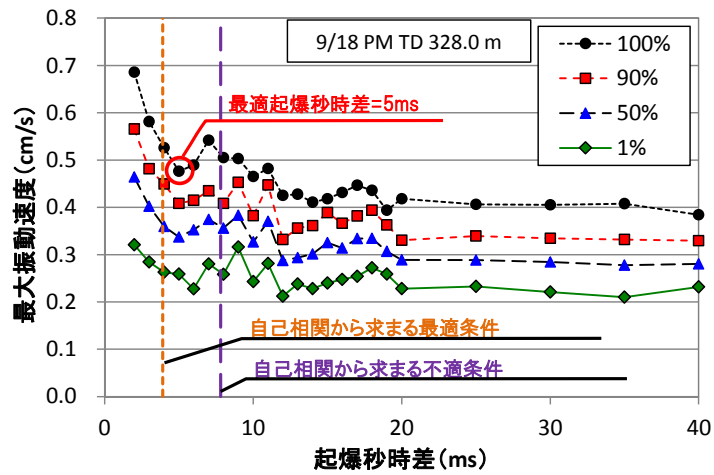


(b) 9/27AM (TD353.5m)

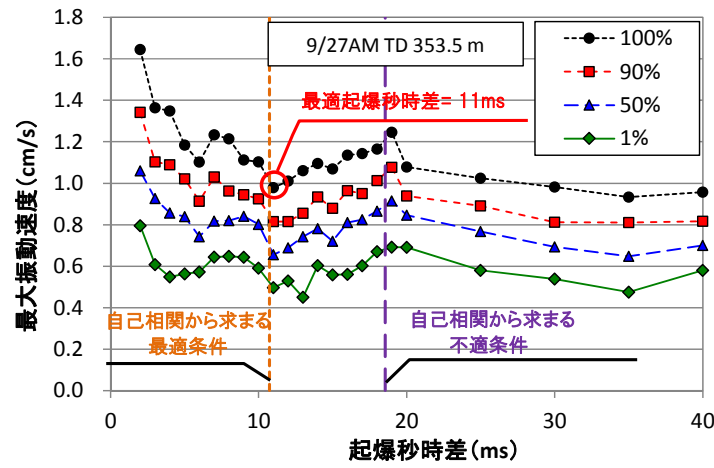


(c) 10/3PM (TD370.0m)

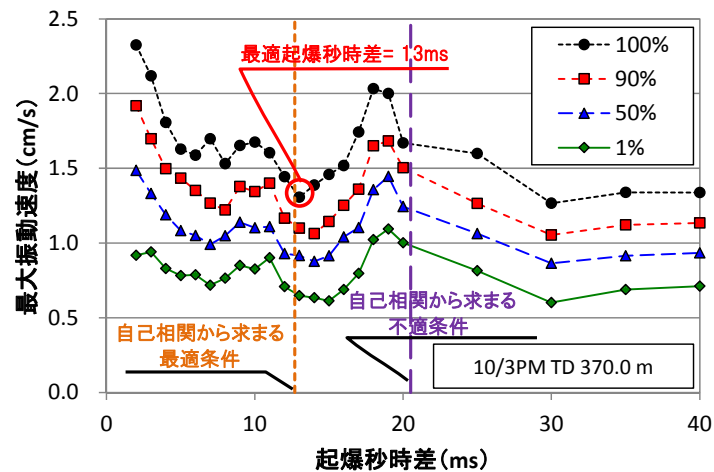
図 5-4 3 発破で得られた単発波形の自己相関係数



(a) 9/18PM (TD328.0m)

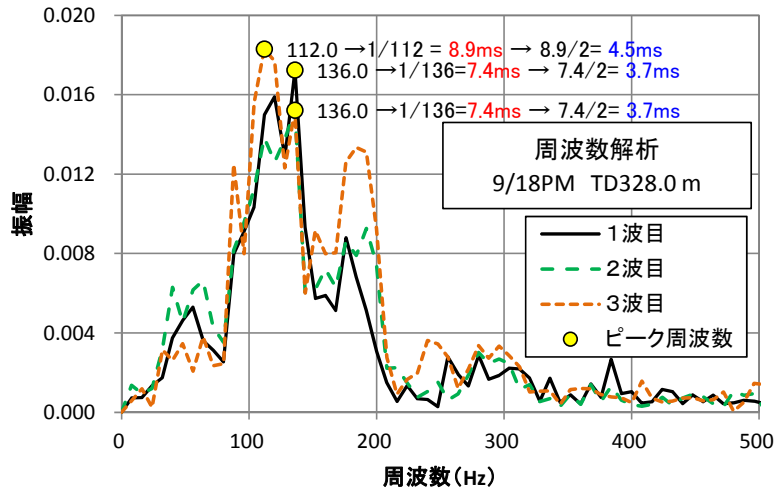


(b) 9/27AM (TD353.5m)

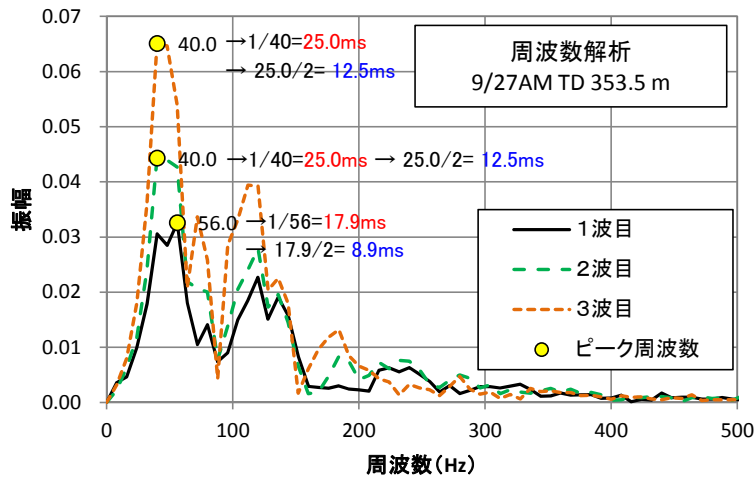


(c) 10/3PM (TD370.0m)

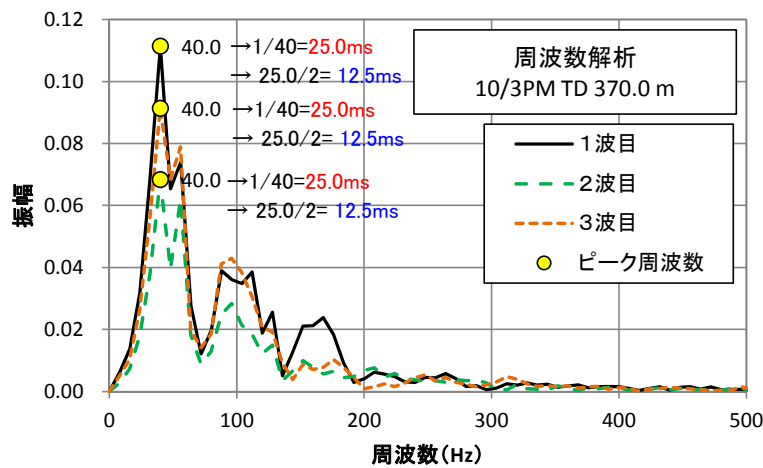
図 5-5 重ね合わせによる最大振動速度と自己相関係数による最適起爆秒時



(a) 9/18PM (TD328.0m)



(b) 9/27AM (TD353.5m)



(c) 10/3PM (TD370.0m)

図 5-6 3 発破で得られた単発波形の周波数解析

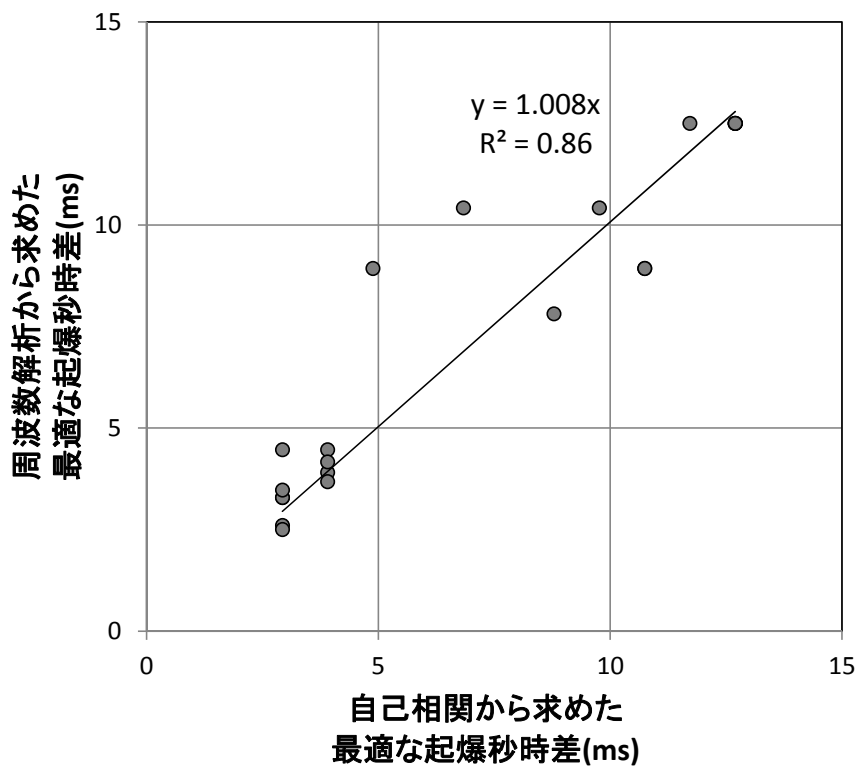


図 5-7 自己相関係数・周波数解析それぞれから求めた最適な起爆秒時差のプロット

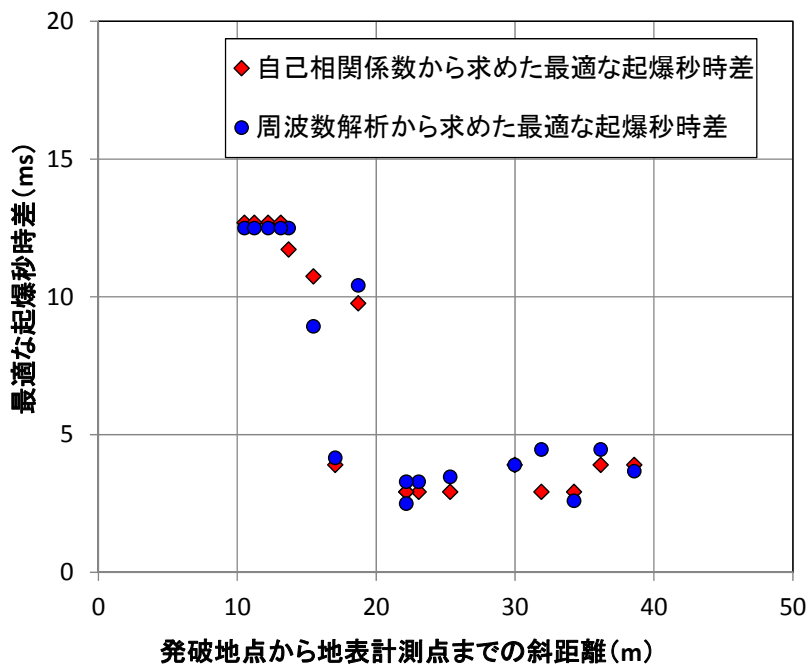


図 5-8 自己相関係数・周波数解析から求めた最適な起爆秒時差と斜距離の関係

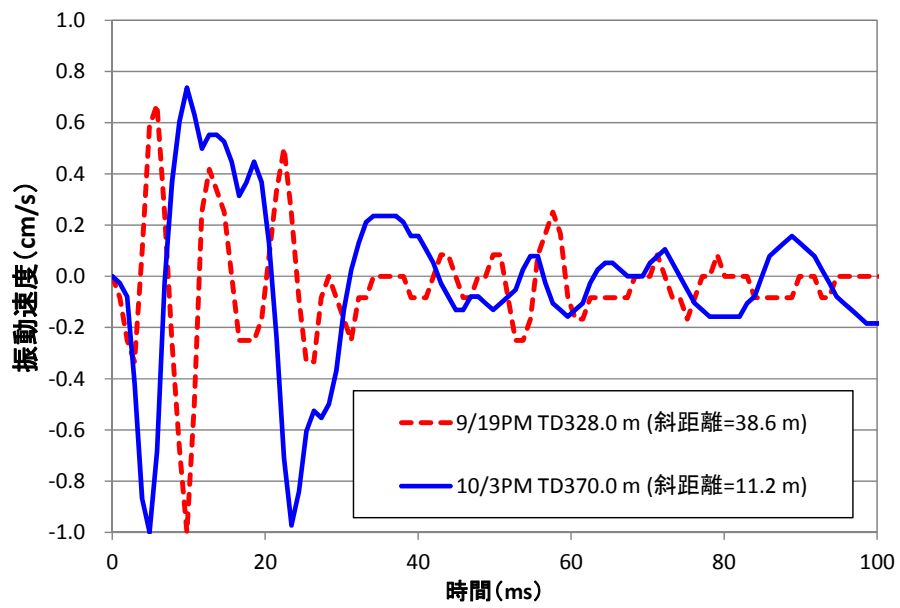


図 5-9 遠距離・近距離の代表的な単発波形(正規化)



図 5-10 白井トンネルの位置

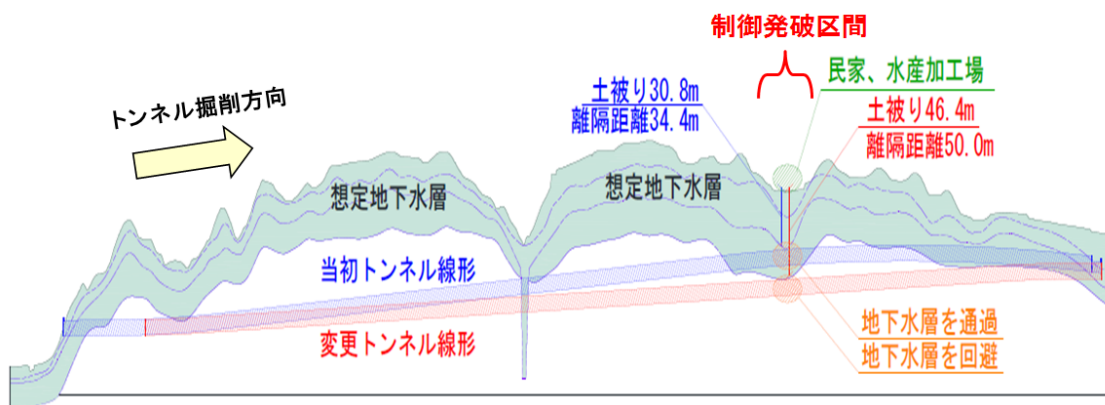


図 5-11 白井トンネルの縦断面図



図 5-12 白井トンネルで適用したコンピュータジャンボ
 (アラスコプロコ社製 XE40)

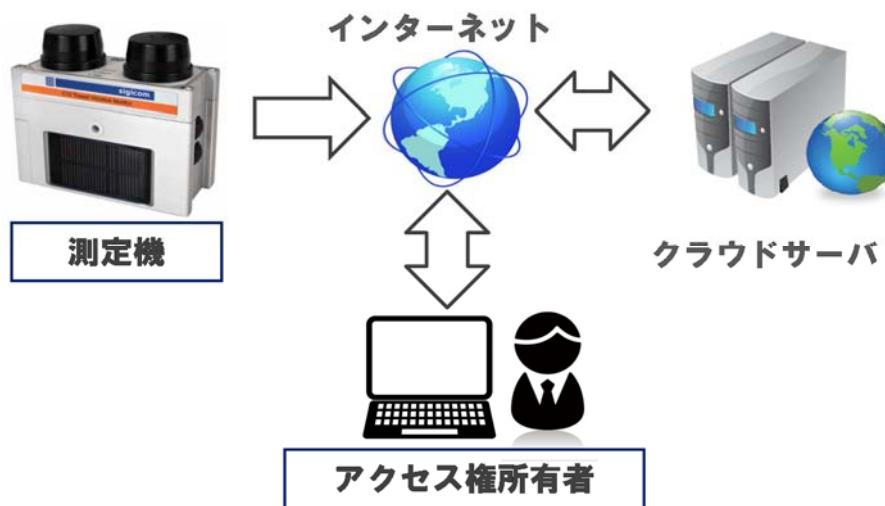


図 5-13 白井トンネルで適用したクラウド型振動計測システム
 (ニトロコンサルタント社製 NCVIB)

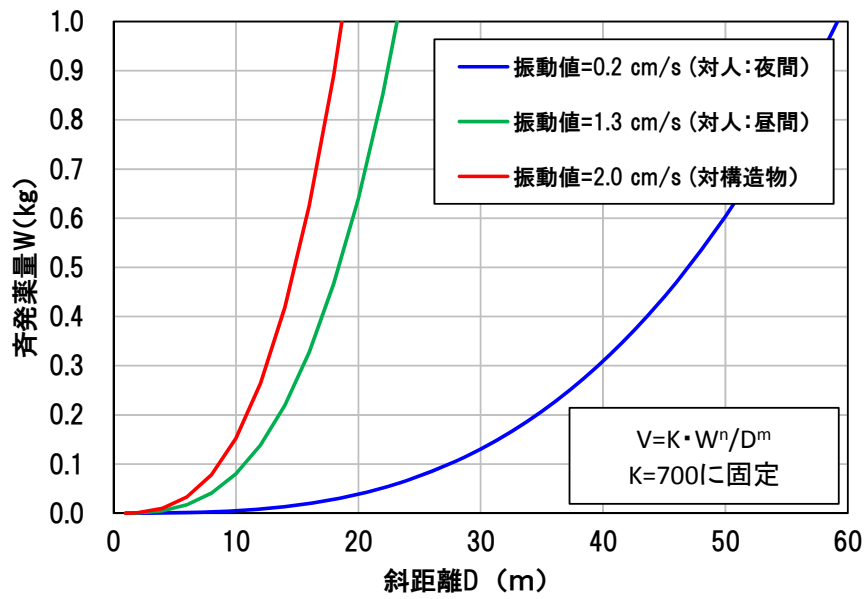


図 5-14 当初設計の振動管理値を満足する斜距離 D と斉発薬量 W の関係



図 5-15 発破振動の計測点(M1～M6)

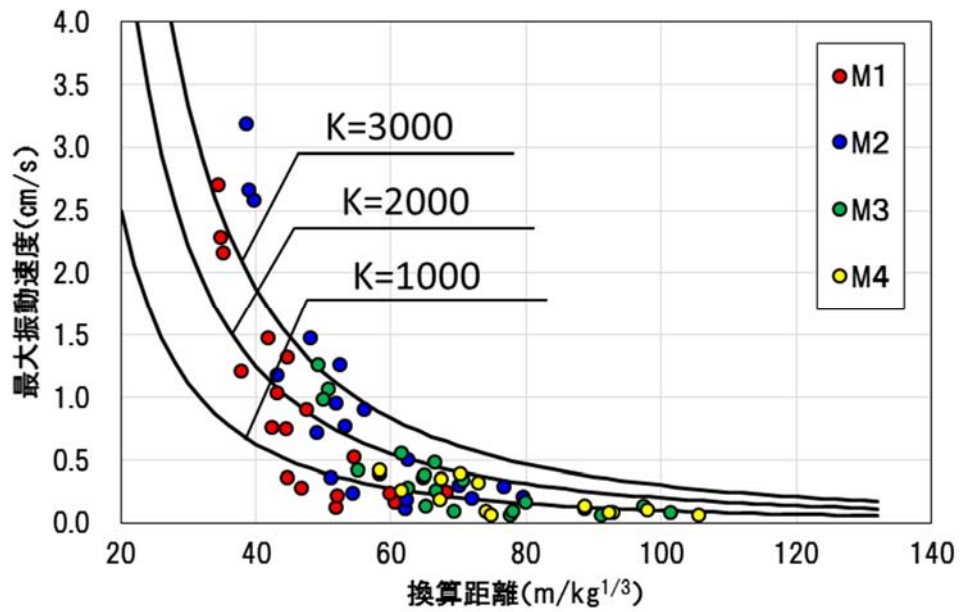


図 5-16 制御発破区間の手前における換算距離と最大振動速度の関係

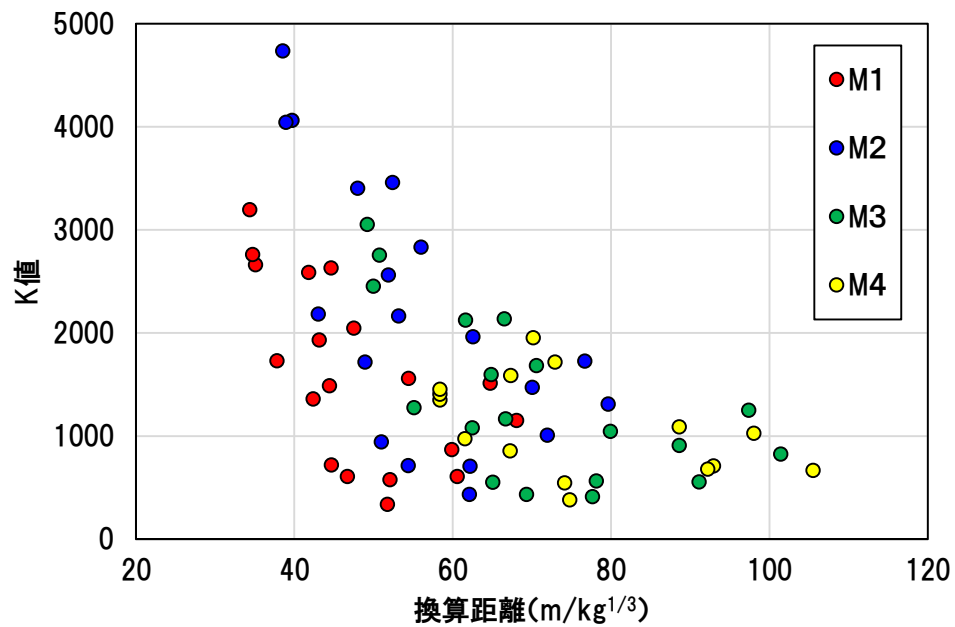


図 5-17 制御発破区間の手前における K 値の分布

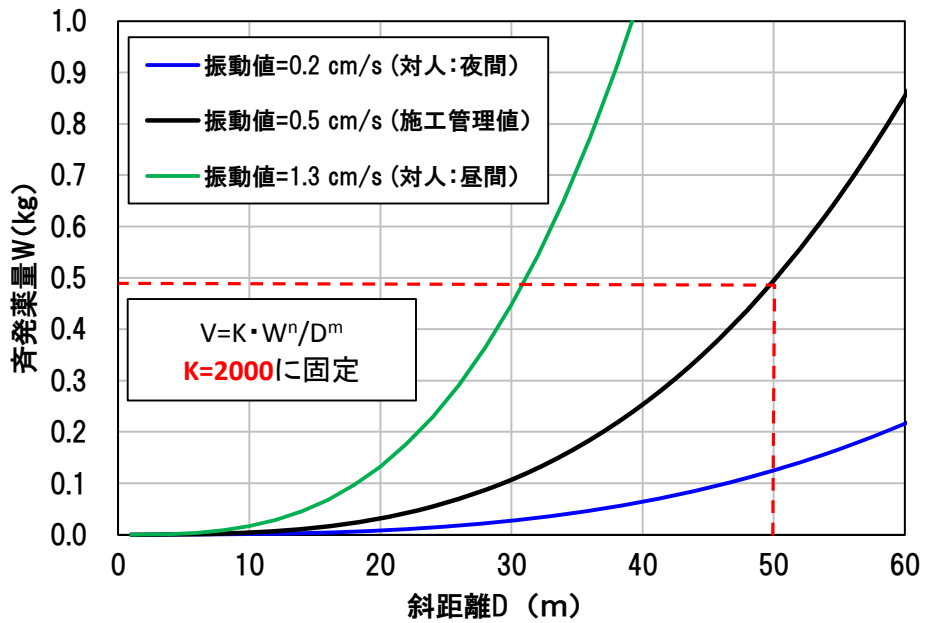


図 5-18 K 値見直し後の振動管理値を満足する斜距離 D と斉発薬量 W の関係

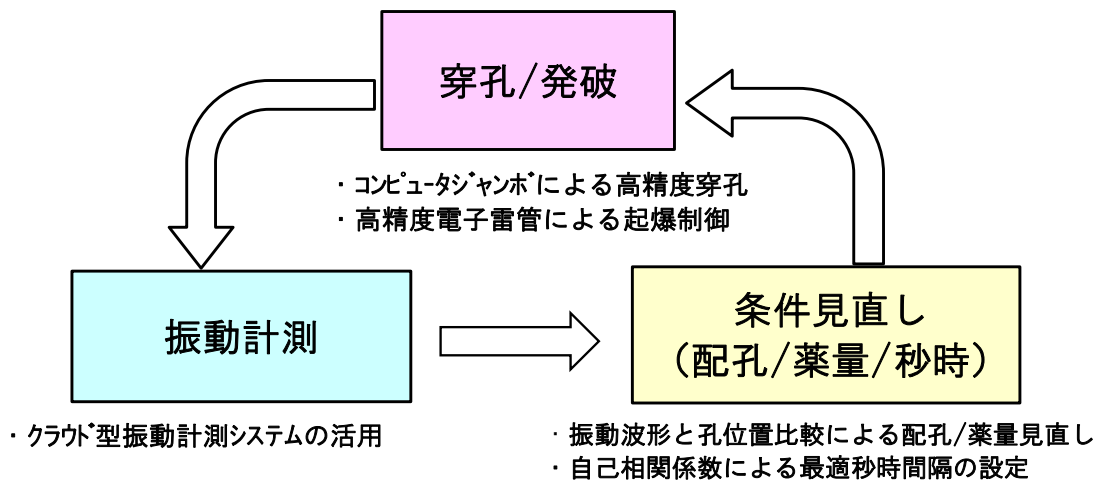


図 5-19 白井トンネルでの発破振動低減のためのフィードバックサイクル

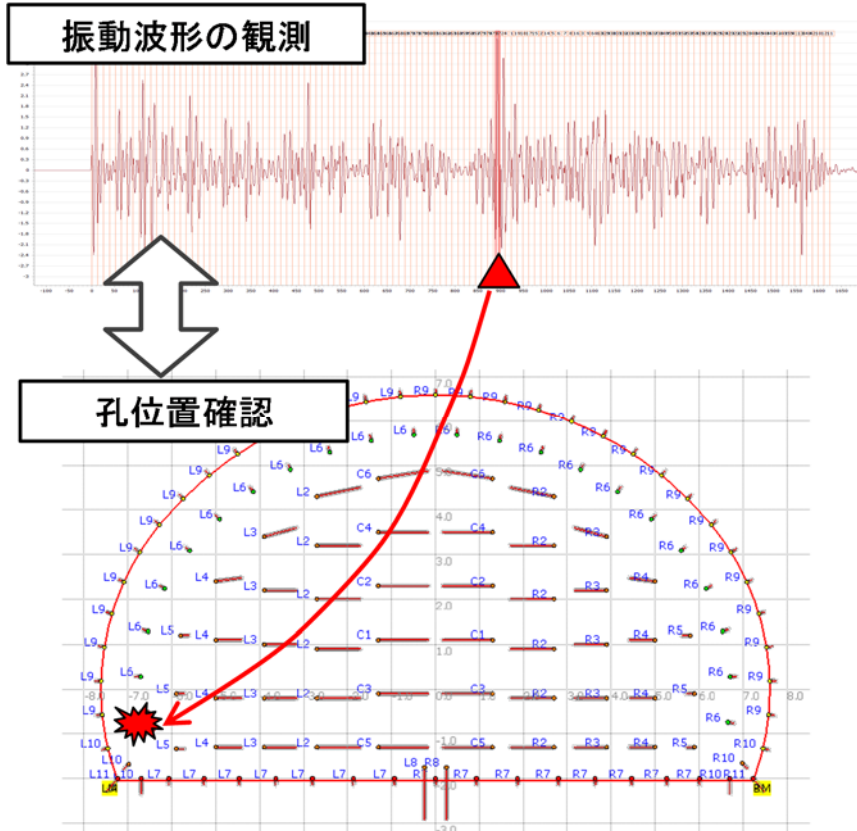


図 5-20 発破の振動速度波形と穿孔位置の比較による孔位置／孔薬量の見直し

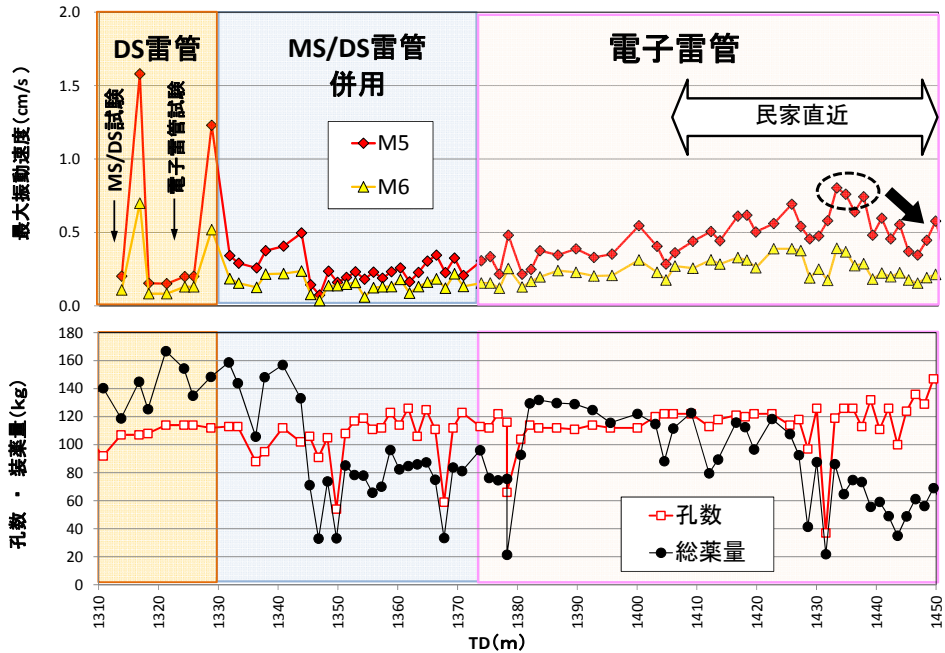


図 5-21 白井トンネルの低土被り部(制御発破区間)の発破条件と振動速度の推移

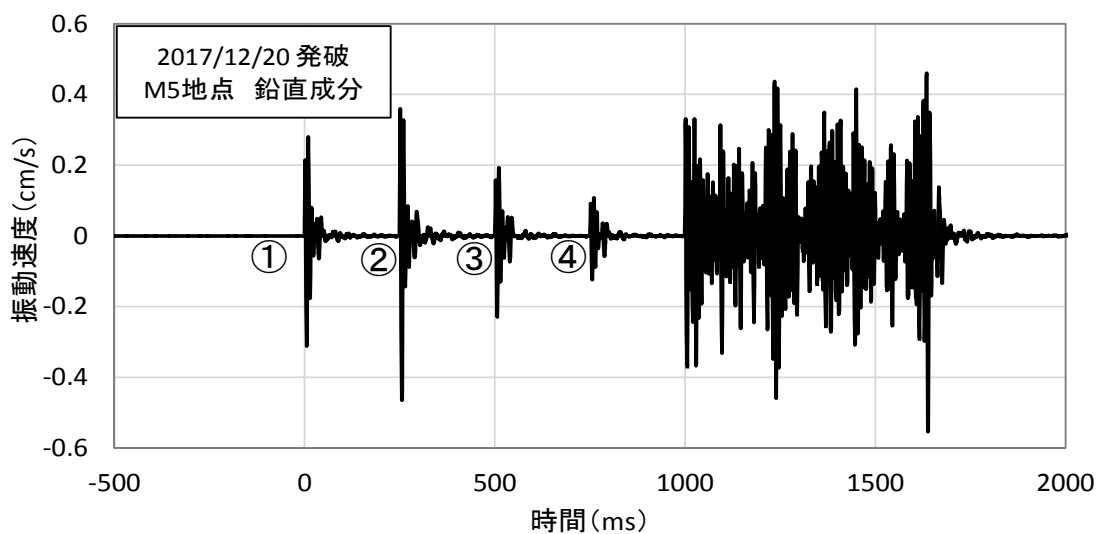
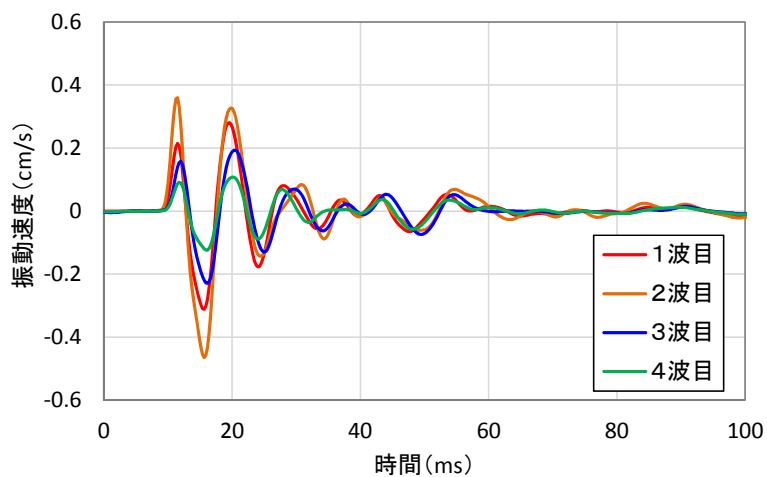
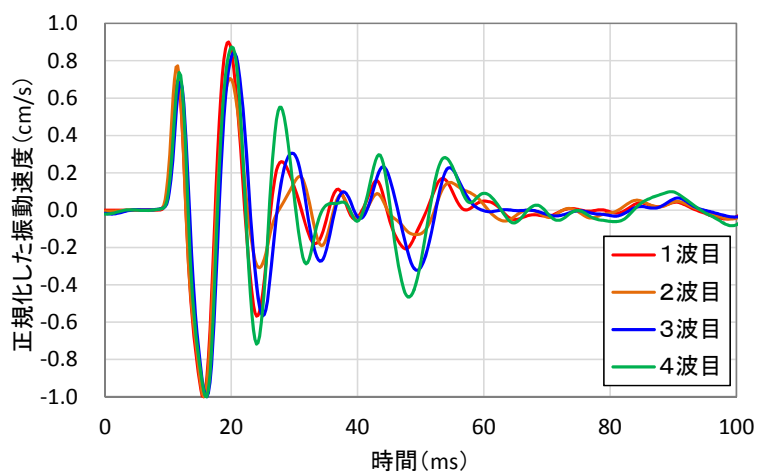


図 5-22 単発波形を取得した際の振動速度波形(12/20 M5 地点)

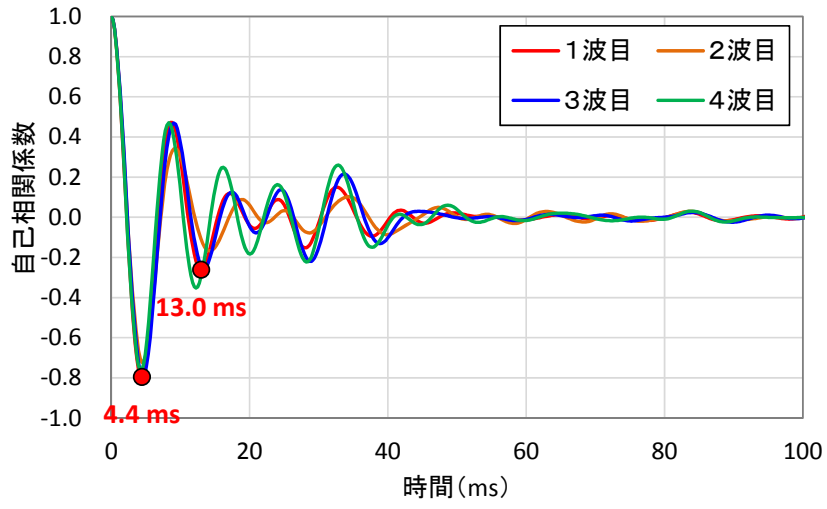


(a) 元波形

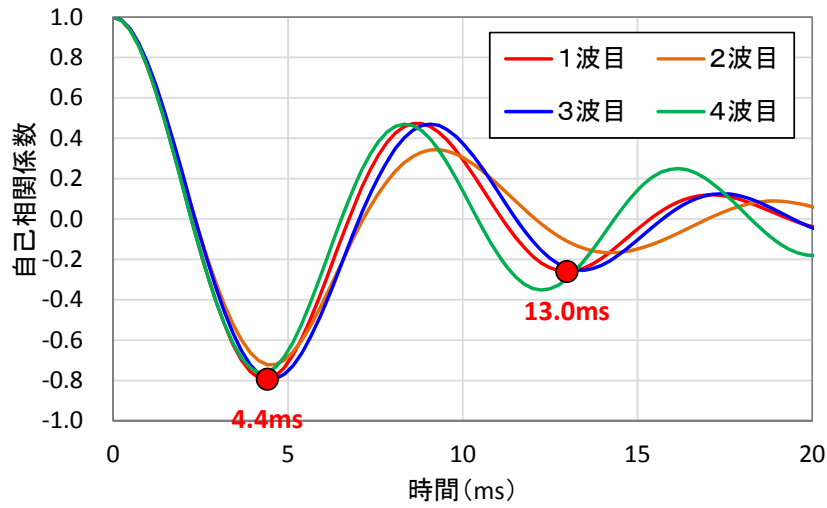


(b) 振幅を正規化した波形

図 5-23 4つの単発波形



(a) 全体表示



(b) 横軸を 0~20ms に拡大

図 5-24 4つの単発波形の自己相関係数

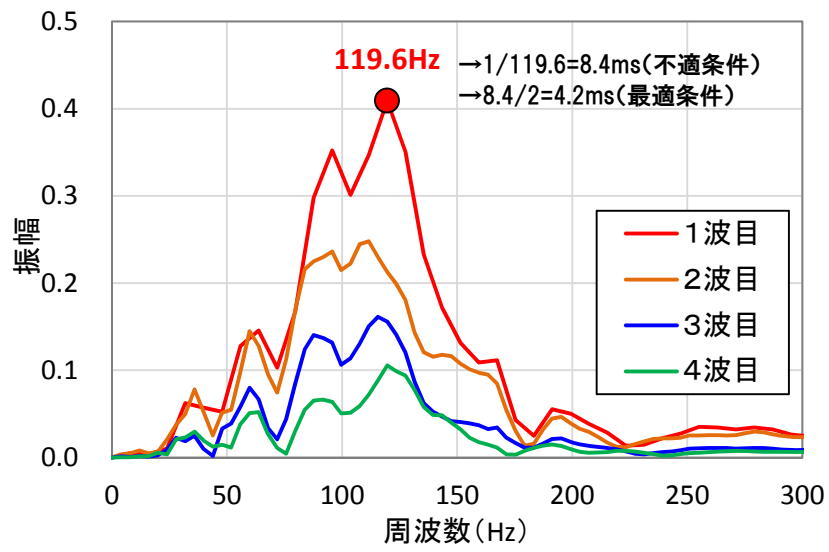
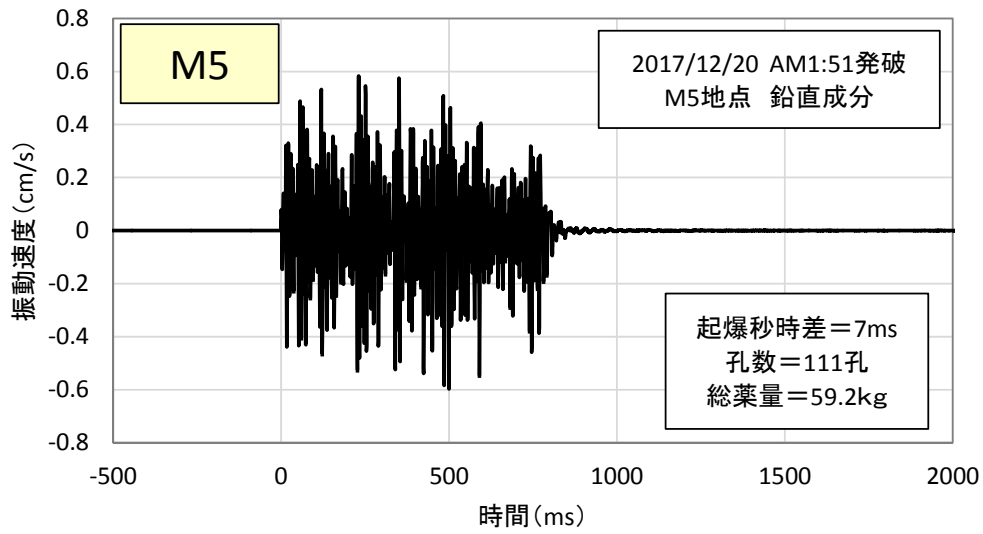
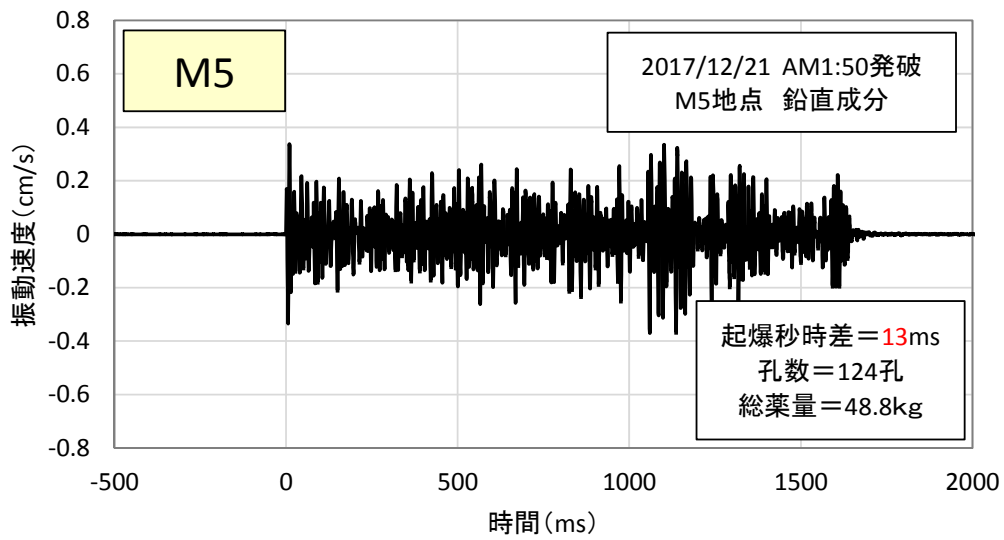


図 5-25 4つの単発波形の周波数分析

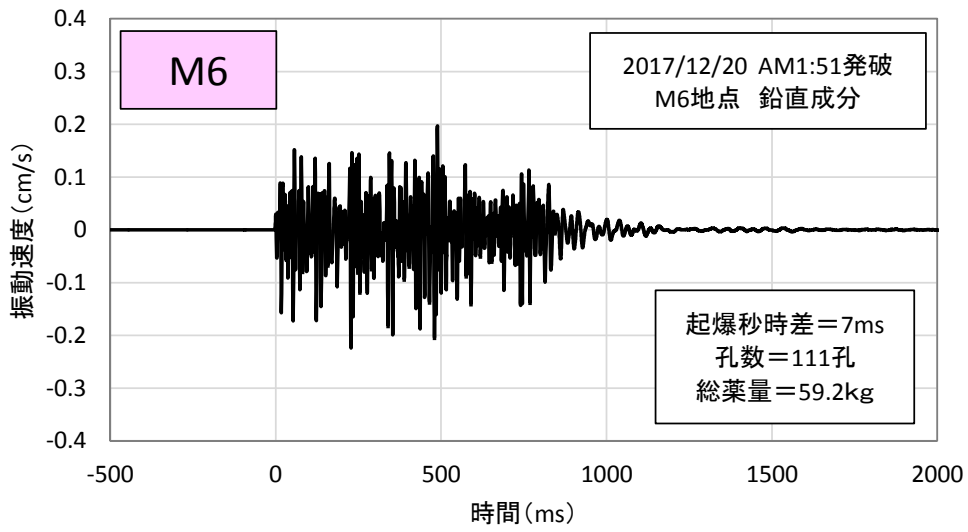


(a) 最適な起爆秒時差の検討前(起爆秒時差 7ms)

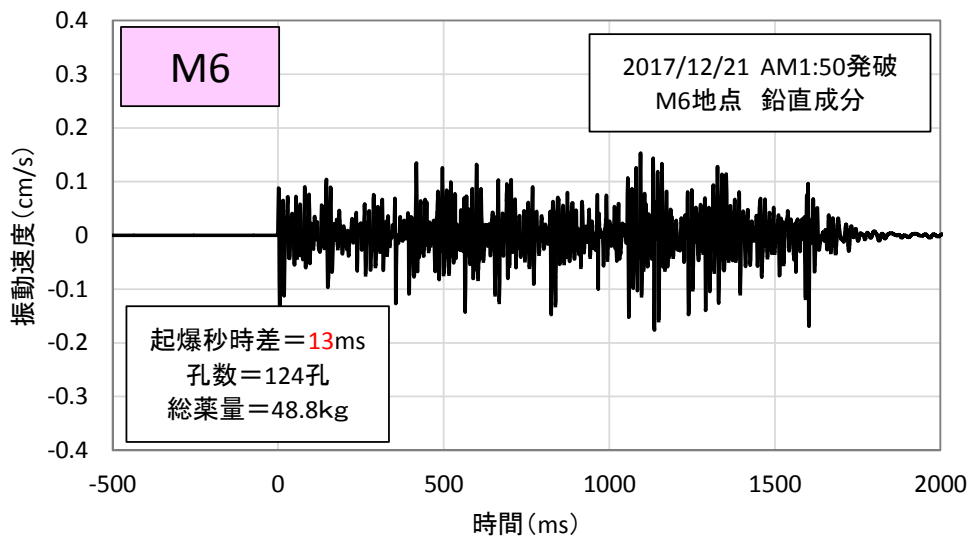


(b) 最適な起爆秒時差の検討後(起爆秒時差 13ms)

図 5-26 最適な起爆秒時差の検討前後の振動速度波形(M5 地点)



(a) 最適な起爆秒時差の検討前(起爆秒時差 7ms)



(b) 最適な起爆秒時差の検討後(起爆秒時差 13ms)

図 5-27 最適な起爆秒時差の検討前後の振動速度波形(M6 地点)

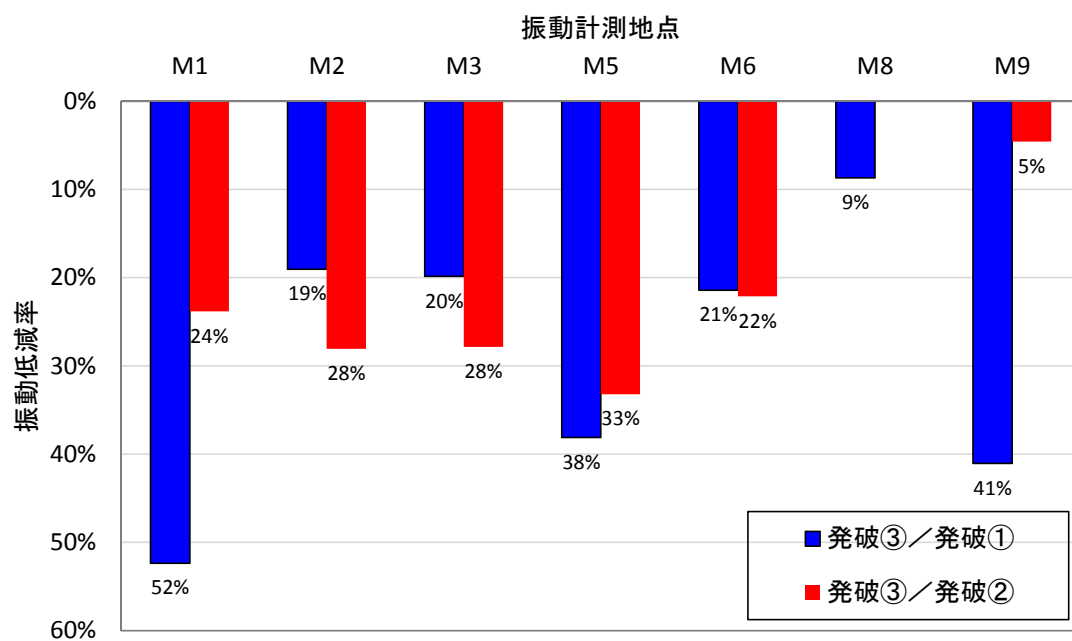


図 5-28 最適な起爆秒時差の検討前後の振動速度の低減率

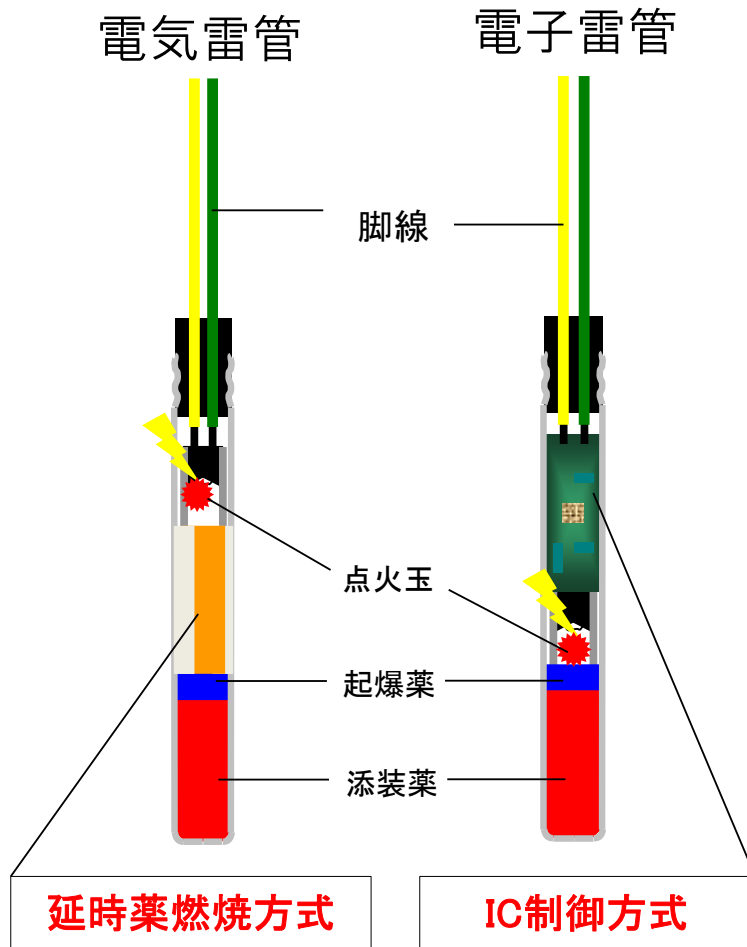


図 5-29 電気雷管と電子雷管の構造

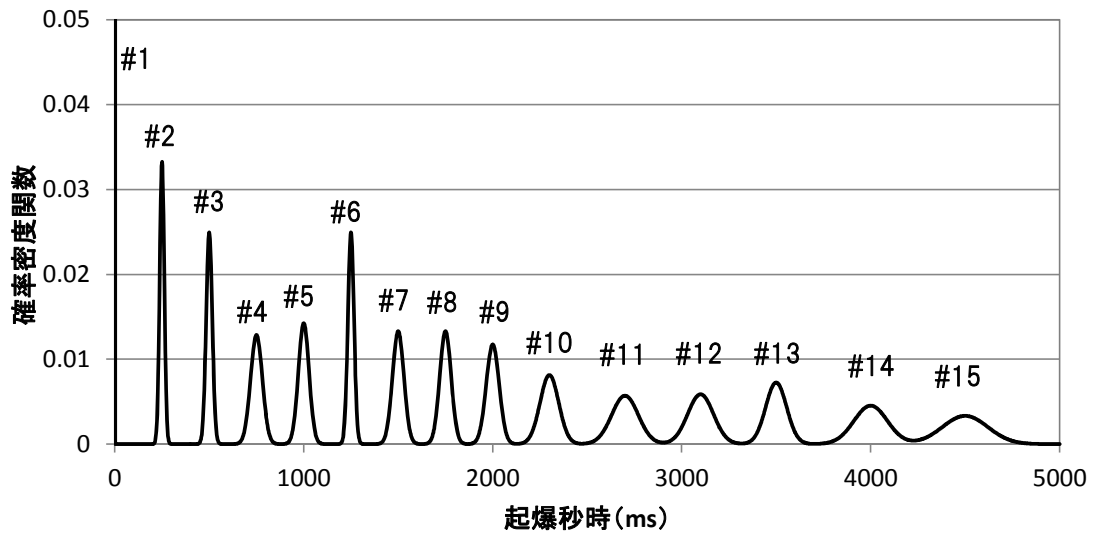


図 5-30 電気雷管の起爆秒時の確率分布

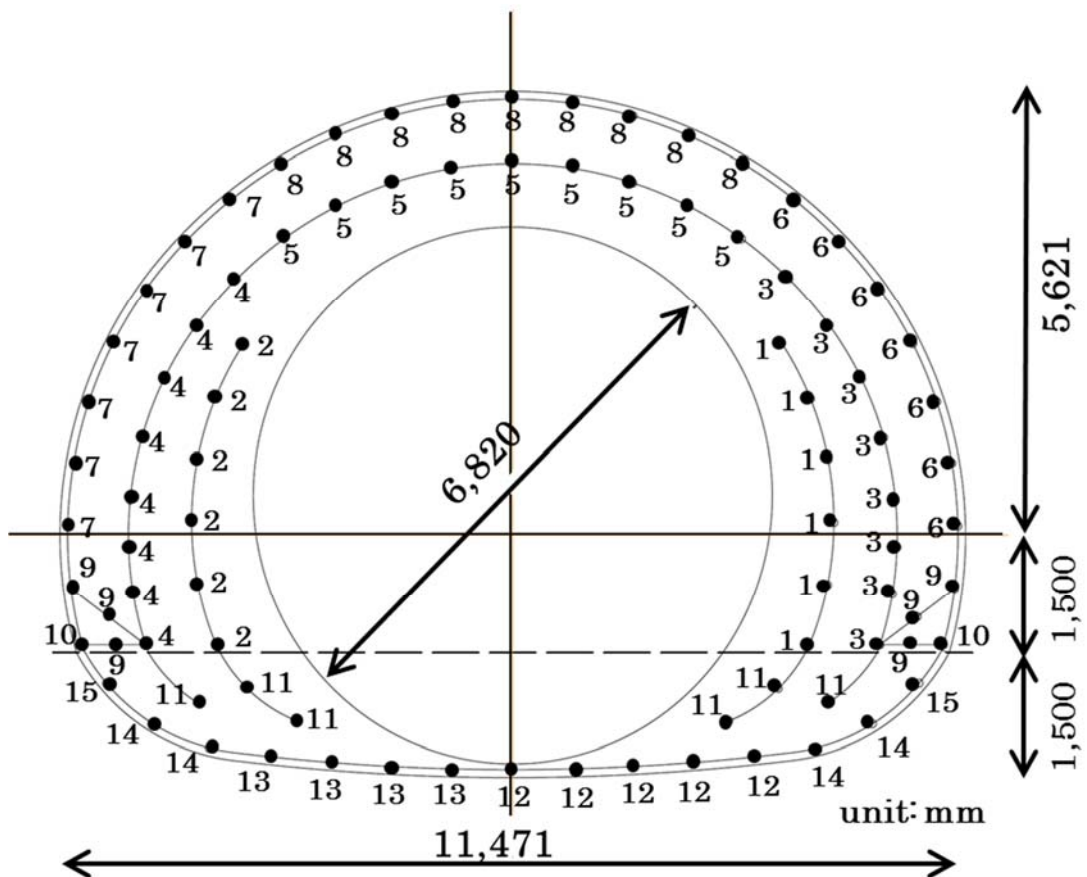
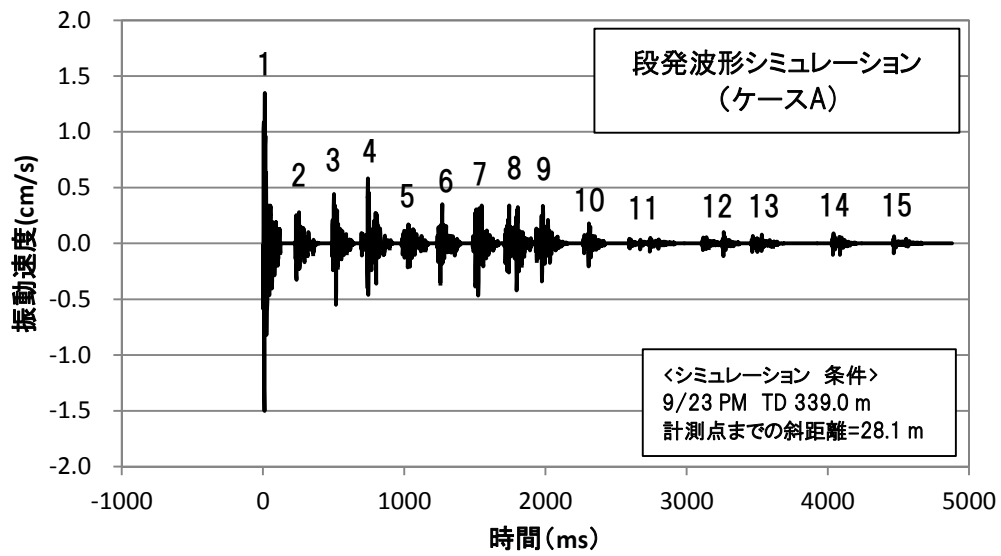
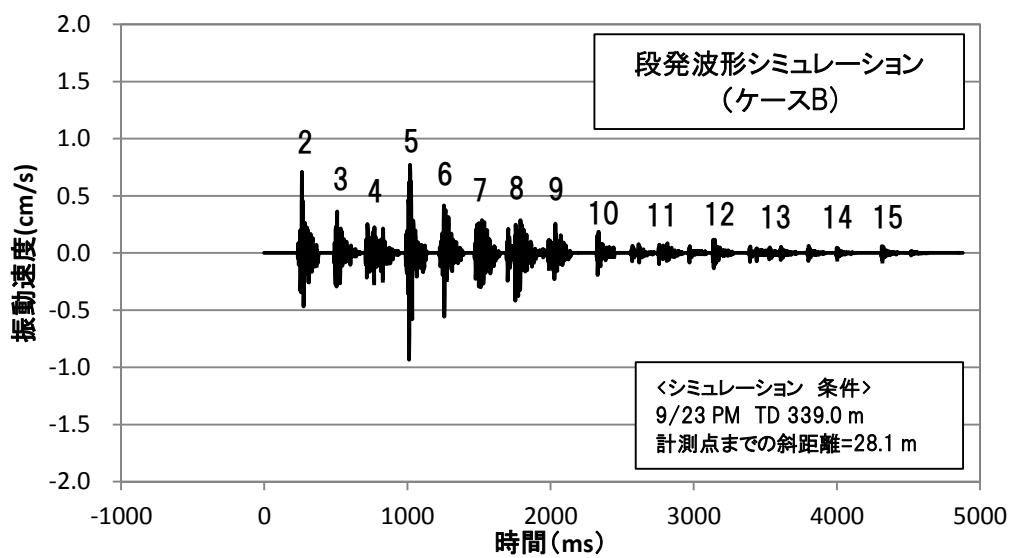


図 5-31 電気雷管を想定した各段の配孔例

※図中の数字は電気雷管の段数を示す



(a) ケース A (1~15 段使用)



(b) ケース B (2~15 段使用)

図 5-32 DS 電気雷管の場合の段発波形のシミュレーション例
(ケース A、ケース B)

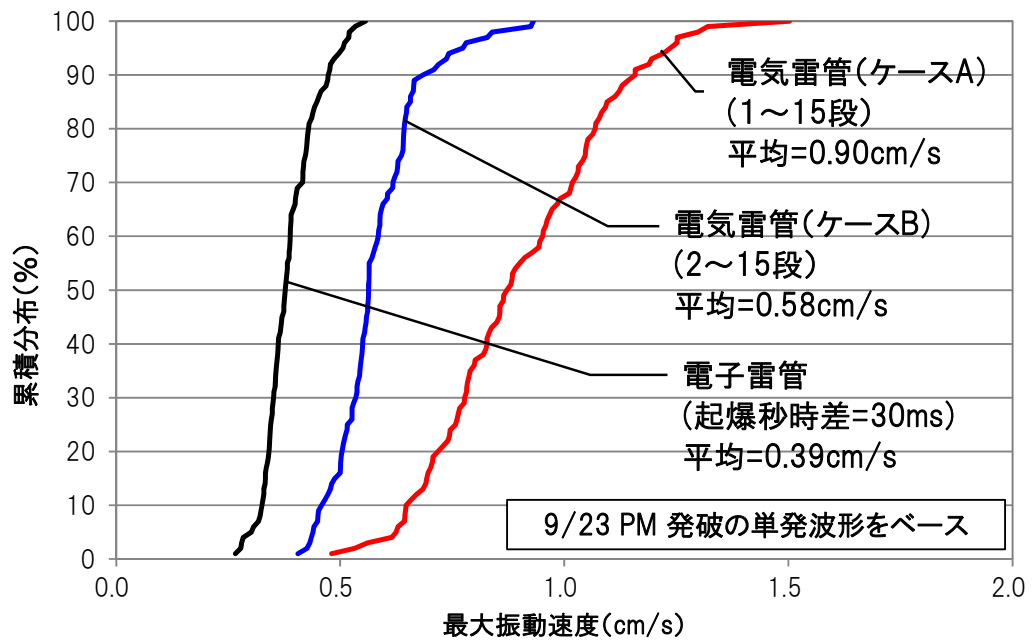


図 5-33 段発波形のシミュレーションにおける最大振動速度の累積分布(試行回数 各 100 回)

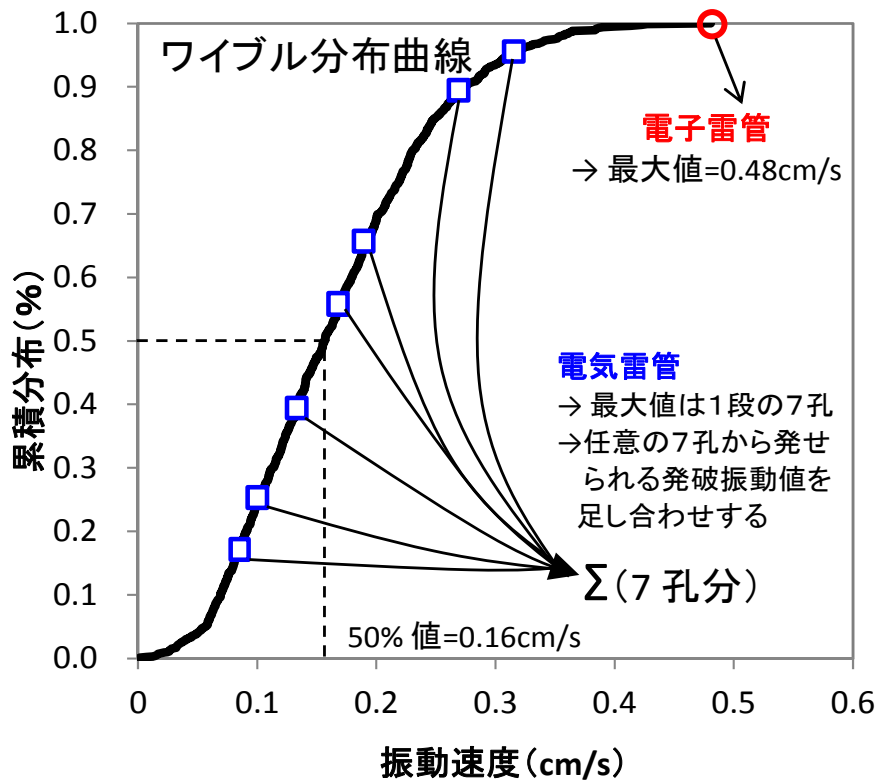


図 5-34 区間ピークのワイブル分布および電子雷管・電気雷管の場合の最大振動速度の概念

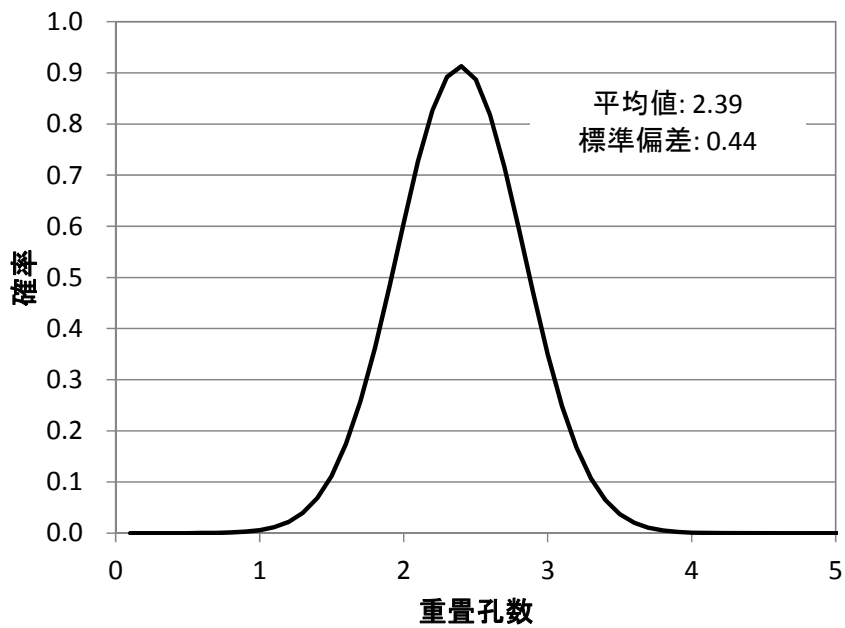


図 5-35 重量孔数の確率分布

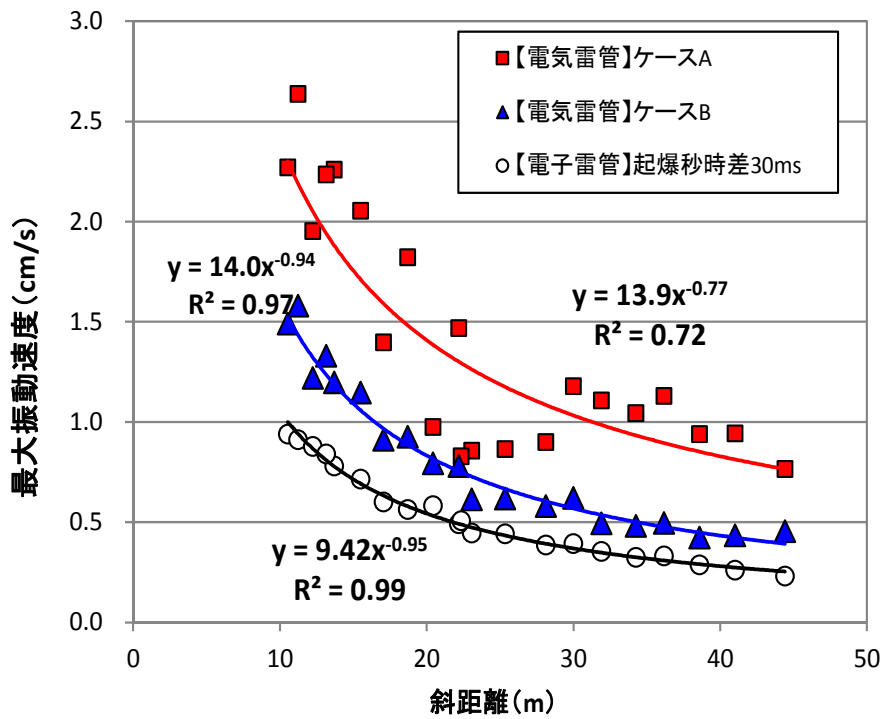


図 5-36 異なる雷管による斜距離—最大振動速度プロット

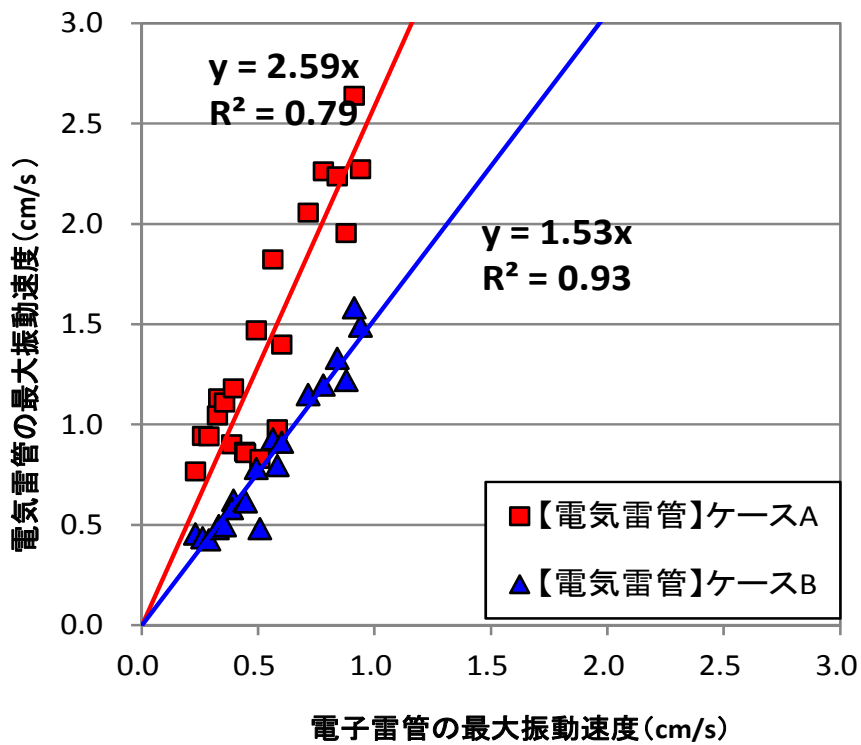


図 5-37 電子雷管に対する電気雷管(ケース A、ケース B)の最大振動速度の比較

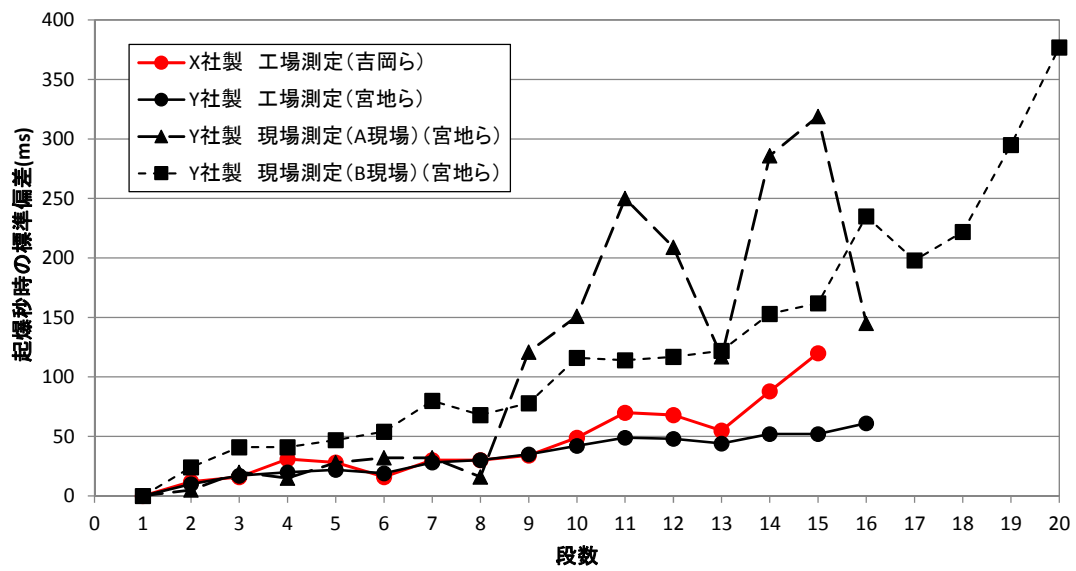
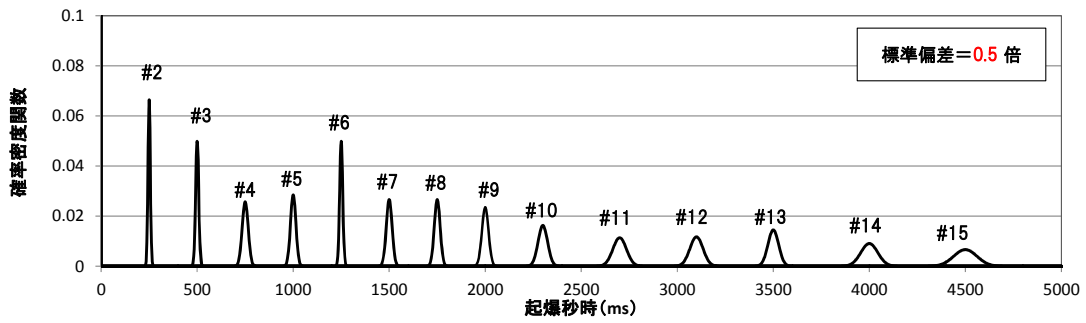
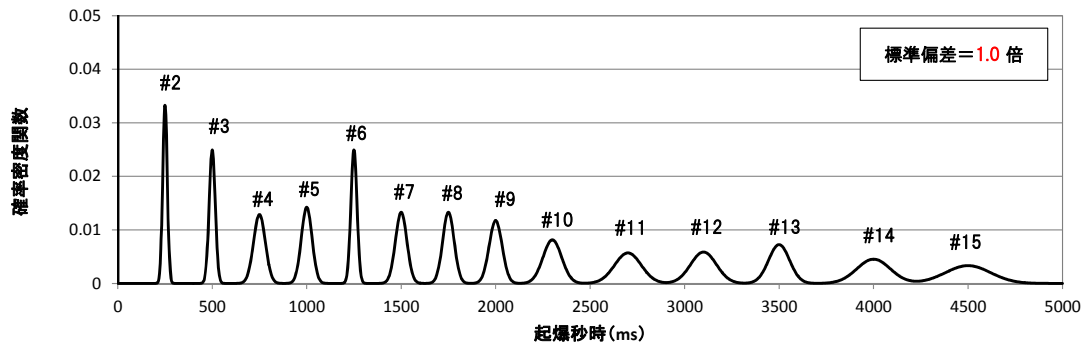


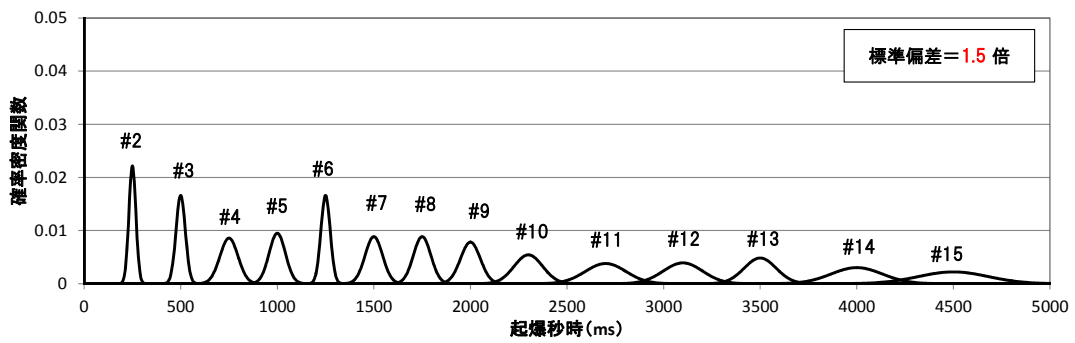
図 5-38 電子雷管の段ごとの起爆秒時の標準偏差(工場測定および現場測定)



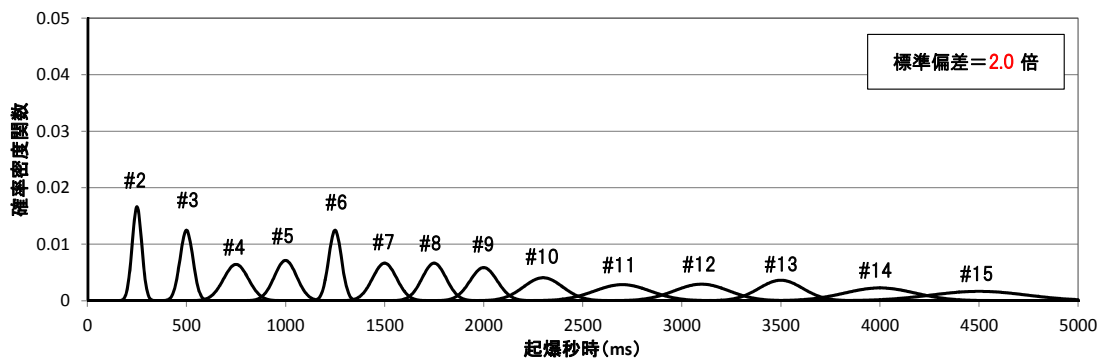
(a) 起爆秒時差の標準偏差 0.5 倍



(b) 起爆秒時差の標準偏差 1.0 倍

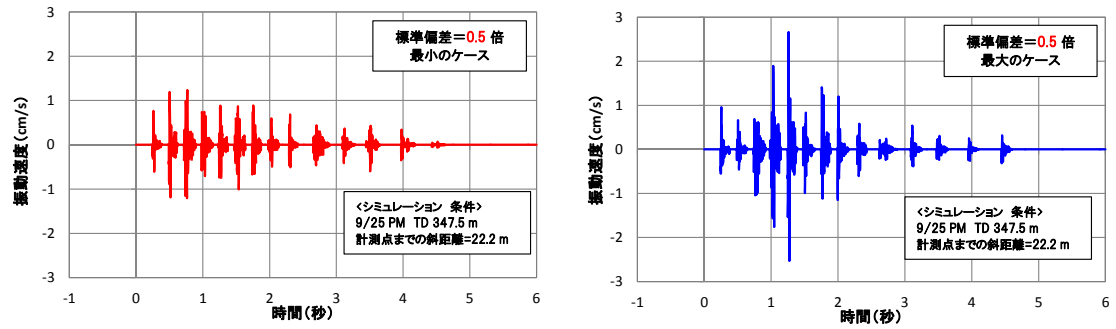


(c) 起爆秒時差の標準偏差 1.5 倍

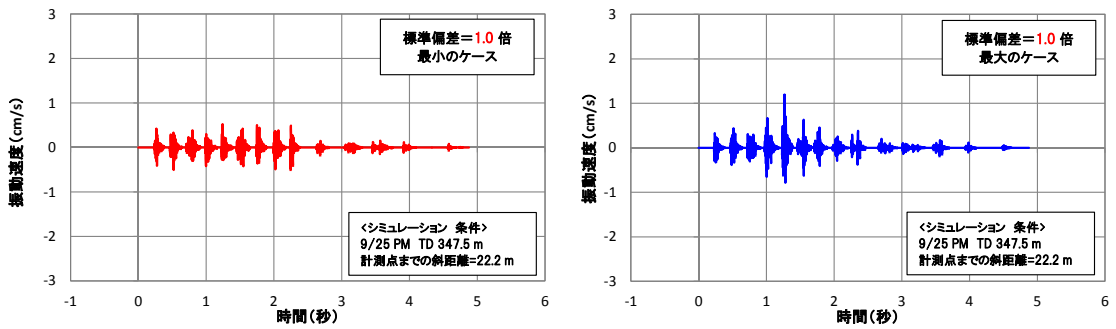


(d) 起爆秒時差の標準偏差 2.0 倍

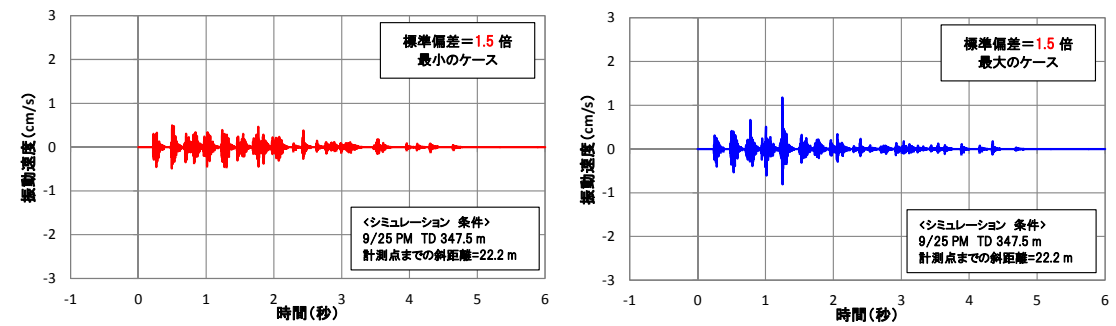
図 5-39 電気雷管の起爆秒時の標準偏差



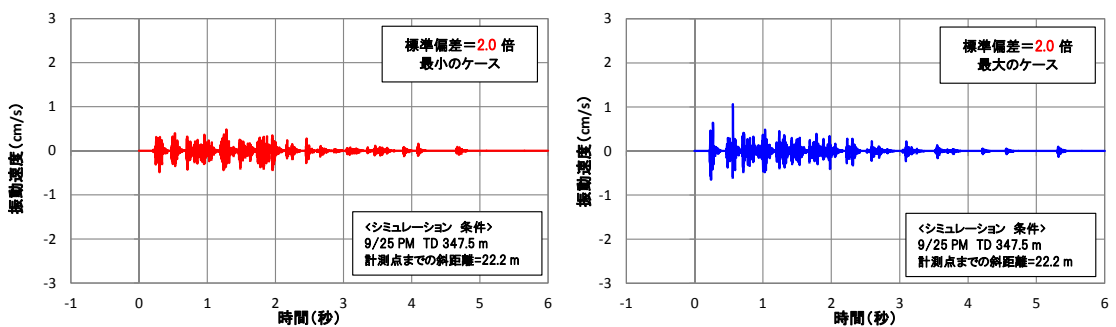
(a) 起爆秒時差の標準偏差 0.5 倍



(b) 起爆秒時差の標準偏差 1.0 倍



(c) 起爆秒時差の標準偏差 1.5 倍



(d) 起爆秒時差の標準偏差 2.0 倍

図 5-40 電気雷管の起爆秒時の標準偏差を変えた場合の代表的な段発波形

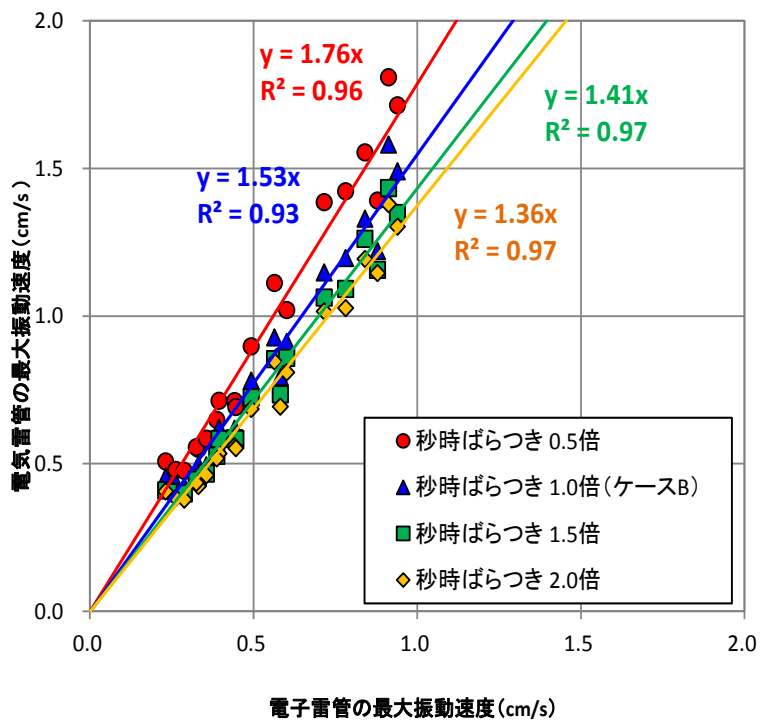


図 5-41 電気雷管の起爆秒時の標準偏差を変えた場合の代表的な段発波形

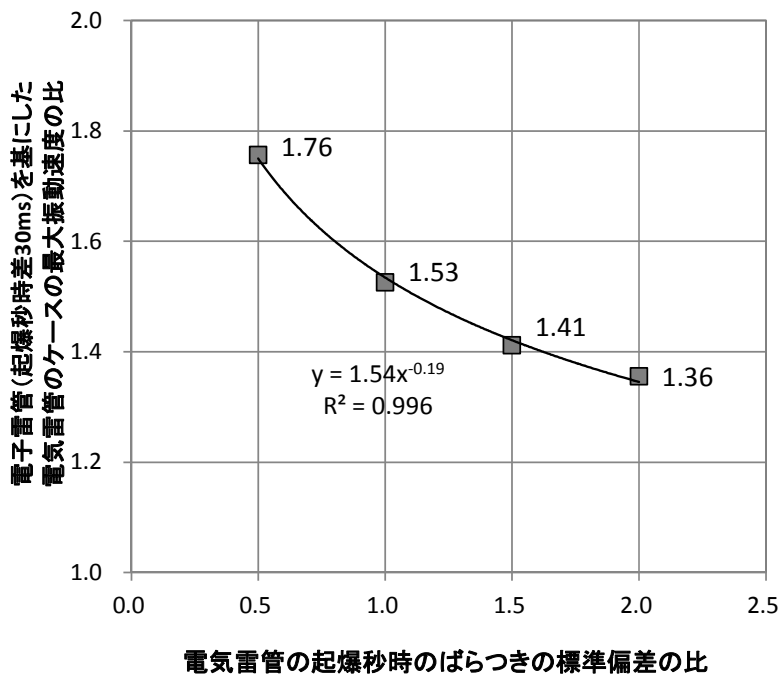


図 5-42 電気雷管の起爆秒時のばらつきと最大深度速度の比

第 6 章

結 論

6.1. 本研究のまとめ

山岳トンネルにおける発破掘削は、他の掘削方法に比べ経済的で高い掘進速度が期待できるものの、発破による振動・騒音が周辺環境に及ぼす負荷が大きいため、特に住宅が近接している場合では、地山が硬岩であってもあえて掘削効率の低い別工法を選定するなど、厳しい周辺環境下での発破掘削の実例は少ないのが現状である。

近年、海外鉱山を中心に新しい発破技術の開発が進み、穿孔精度の高いコンピュータジャンボや起爆秒時精度の高い電子雷管の導入が進められている。特に高精度電子雷管は、任意の起爆秒時を高精度で設定できるため、各発破孔から発する振動波形を完全分離して起爆することで振動値の低減を積極的に制御できる可能性が高い。これは現状よく用いられている電気雷管がその起爆秒時のばらつきのため、設計通りに起爆できず、振動制御とは到底言えない現状の発破を大きく変える可能性がある。そこで本研究では、高精度電子雷管を適用したトンネル現場において発破試験を実施し、数多くの発破振動データを収録し、振動波形の分析や単発の振動波形の重ね合わせによる全体の振動波形の再現法および起爆秒時差や振動波形の観点からの発破振動の低減について検討することを主目的とした。

本研究論文は 6 章の構成からなる。

1 章では序論として、本研究の背景や研究概要を述べたあと、2 章ではこれまでの発破に関する研究を整理した。発破に関して古くから爆轟理論や発破理論の研究が進められたほか、本研究に関連する発破振動に関しては、例えば発破震源の変位ポテンシャルを求める振動発生に関する研究や、減衰特性と周波数の関係など伝播特性に関する研究などが行われている。しかしながら、これらは実際に発破を行うトンネル現場で振動の推定など実用的に用いられているものはほとんどないのが実情である。これは高温・高圧かつ極めて短時間で作用する発破現象をある条件や仮定に則って説明しているため、実務としての発破を数学的な展開や理論で説明することが非常に難しいことを示している。一方、実務としての発破現象を捉える研究として、爆薬の薬量および伝播距離と最大振動速度の関係を経験的に示すいわゆる振動予測式の研究も盛んに行われている。ただし、従来の研究では岩盤の不均質性も含めた発破自体のばらつきだけでなく、従来の起爆秒時にばらつきを有する電気雷管による発破を想定するため、非常にばらつきの大きい発破の振動の予測精度を少しでも高め

る目的の研究が多かった。近年では前述の高精度電子雷管の出現により、起爆秒時のばらつきのない条件の下で各孔から個別に発する波形（単発波形）を用いた Monte Carlo 法により振動の予測精度を高める研究がなされている。ただし、これらの研究は室内試験に基づく机上の検討や海外の鉱山を対象としたものが中心で、本研究のようなトンネル現場での実施工による数多くの発破データに基づく振動波形の分析や波形の再現、予測に関する研究はみられなかった。

3章では、実際に著者が現場担当者として従事したトンネル現場にて行った発破試験の概要を述べたのち、高精度電子雷管を本格的に用いた発破試験の事例が国内外を含めこれまでみられなかったことから、高精度電子雷管による発破の基本的な特徴の整理や、収録した振動データについて最大振動速度や振動速度波形の分析を行った。発破試験は1カ月にわたり、約100m区間に対し起爆秒時差を変えて発破データの収録を行った。また各々の発破の起爆孔の最初の3孔は起爆秒時差を大きく空け、完全な形の単発波形を収録した。また発破振動の収録地点の1つはトンネル直上10m程度と従来にないほど近距離に配置した。

高精度電子雷管による発破の振動速度波形は、その拡大した波形を見ると正確に設定した起爆秒時ごとにピークが出現しており、さらにその周波数スペクトルでは起爆秒時差の逆数で正確に周波数ピークが現われるなど、精度の高い起爆秒時の制御がなされていることを確認した。また同じ切羽の発破で得られる複数の単発波形の形状の再現性が高く、次章以降の振動速度波形の再現法の検討に資する条件が整っていることを明らかにした。また近距離に配置した振動収録地点では、従来の振動予測式の提唱と異なり、最大振動速度が伝播距離 D に反比例する結果が得られた。過去にこれほど近距離での発破振動データを整理した事例はほとんどなく、貴重なデータであると言える。

続く4章では前章の発破試験の実施及びその分析を受け、単発波形の重ね合わせによる全体の振動速度波形（段発波形）の再現法を検討した。1つの単発波形をある起爆秒時差で単純に重ね合わせた波形は、実際の振動速度波形と比べ定性的な傾向は一致しているものの、実際の振動速度波形の振幅のばらつきは再現できない。この振幅のばらつきは、孔位置や、孔周辺の岩盤状態、振動伝播経路などの要因が影響するがこれらを個々に定量的に評価することは容易ではない。そこで実際の振動速度波形の振幅のばらつきを統計的に扱った結果、各孔から発する振動の振幅のばらつきはワイブル分布に従うことを明らかにした。ワイブル分布は尺度と形状の2つパラメータによって決定されることから、振動速度波形の振幅のばらつきをこの2つの定数によって統計的に表すことができる。

以上の検討を基に、段発波形の再現の基本フローを構築した。この基本フローは①単発波形の準備、②振幅を調整し孔数分だけ重ね合わせの元波形 (Seed wave) を準備、③孔数分の Seed wave を重ね合わせ の基本 3 ステップで構成される。この基本フローに従って再現した段発波形は、その平均的な振幅の大きさやばらつきの点で実測の段発波形をよく反映していた。更に再現計算で得られた段発波形を、実際の段発波形同様に、振幅のばらつきを統計的に評価した結果、100 回試行した再現計算の振幅の最大と最小のケースの幅に、実測の波形の累積分布が収まる形となりこの再現法の妥当性を示した。さらにこの基本フローの精度を高め、起爆秒時差が小さい場合など、より厳しい条件でも成立することを目的に、基本フローに追加検討した。具体的には、基本フロー①~③のステップの間に A.伝播距離とワイブル定数の関係の算定、B.トンネルのインバート部の振幅調整、C.切羽面上の各孔位置と地上計測点までの距離に応じた伝播時間の計算、を追加した。この詳細な検討を追加し、再現した振動速度波形の振幅のばらつきを統計的に評価した結果、起爆秒時差が 5ms の場合など、より厳しい条件においても再現計算の方法が妥当であることを示した。

5 章では、前章の振動速度波形の再現法に基づき、高精度電子雷管および従来の電気雷管のそれぞれの発破について、振動を低減する最適な起爆条件を検討した。

高精度電子雷管による発破では、前章の振動速度波形の再現法を、その起爆秒時差を 2ms, 3ms・・・40ms まで複数設定し、それぞれ試行 100 回で重ね合わせを行った。その結果、起爆秒時差と振動速度波形の振幅の極小・極大の関係が示され、振動を低減する最適な起爆秒時差を求めることができた。一方で、この方法は、検討に手間を要するため、日に数回行われる実施のトンネルでの発破での対応が容易でない。従って、より簡易な評価方法を模索した。振幅極小となる起爆秒時差は、重ね合わせる単発波形同士が最も打ち消し合う状態であるが、これは単発波形の形状に起因すると考えた。そこで単発波形の形状に対し、自己相関係数および周波数解析による評価の 2 つを検討した。この 2 つの簡易な方法で求めた最適な起爆秒時差と、前述の複数の起爆秒時差ごとの重ね合わせ法による最適な起爆秒時差を比較した結果、1~3ms 程度のずれが見られるものの、ほぼ同様の結果が得られ、簡易な方法によっておおよその最適な起爆秒時差を算定できることが分かった。また、この自己相関係数による方法を実際のトンネル現場の制御発破区間に適用した結果、電子雷管の適用や薬量低減などの対策済の発破に対し、更に 2~3 割の振動低減効果を確認した。

続いて、振動速度波形の再現法を電気雷管による発破に適用した。電気雷管は起爆秒時を筐体内部の延時薬で調整するため、4 章で確立した振動速度波形の再現法に、電気雷管の起

爆秒時のばらつきを追加した。電気雷管では、瞬発である 1 段が最大振動速度を決定することがほとんどであるため、振動速度波形の再現法を行ってこの 1 段の使用・不使用と最大振動速度の違いを検証した。さらに起爆秒時のばらつきを有する電気雷管の発破が、何孔の同時起爆と同等となるか（重畳孔数）について検討し、その重畳孔数が得られる原因をその統計的な検討により推定した。また振動速度波形の再現法に基づき、起爆秒時のばらつきの違いと最大振動速度の関係を明らかにした。その結果、瞬発である 1 段の使用・不使用は振動低減に大きく影響するものの、起爆秒時のばらつきの違いは振動低減に大きな影響を与えないことが分かった。

本研究では実際のトンネル現場にて継続的に発破試験を実施し、電子雷管による発破振動の特徴の整理と共に、収録した振動データに基づく発破振動波形の再現法を確立し、起爆秒時と振動波形の観点から振動低減について検討を行った。特に実際の掘削施工としての一連の発破で得られた振動データに基づき検討がなされており、本研究で確立した振動波形の再現法や振動の予測、低減法は、即座に実適用できるものであり、トンネル現場での発破振動の新たな低減方法として有効な提案ができたと考えている。

6.2 今後の研究の展望

山岳トンネルにおける発破は、振動や騒音などが住宅や重要構造物へ与える環境負荷への対応ができず、適用を断念し、割岩工法や非火薬破碎などよりコスト高で時間のかかる工法を選定せざるを得なかった。これは従来、有効な発破振動対策として振動の増加に対して薬量を削減するという受動的な手段のみであったことが原因であった。しかしながら、今回の高精度電子雷管を適用した安永川トンネルの実例および本研究における振動速度波形の再現や予測、最適な起爆秒時差の設定法などを通じて、厳しい施工条件下においても、積極的に発破振動を管理、制御できる可能性が見いだせたと考えている。

但し、トンネル発破は日に 3～4 回発破する施工サイクルであることから、積極的かつ能動的に発破振動をコントロールするためには、できるだけ短時間での発破振動データの把握と分析が求められる。そのような観点から本研究 5 章の白井トンネルの適用事例で示したクラウド型遠隔振動計測システム（NCVIB）のような計測手法は、現場職員の負担が少なく、発破直後のほぼリアルタイムに振動速度波形を取得することができ、非常に有用であった。さらに同じく 5 章で示した簡易な最適秒時差の設定方法としての単発波形の自己相関係数は、短時間に容易に算出できることからトンネル施工サイクルの合間でも十分に活

用でき、積極的に発破振動を管理できるツールであると考え。現在、この自己相関係数による評価方法自体を、NCVIB 自体に組み込むことを検討している。それにより発破後、クラウドを通じて本社や技術研究所などに自己相関係数の算定を依頼することなく、現場社員が負担なく最適な起爆秒時差を判断できるようになり、積極的な発破振動の管理につながるものと思われる。

また、これまでの山岳トンネルにおける穿孔や装薬といった発破作業については、坑夫が持つ長年の経験と勘に頼る部分が多く、発破の施工技術の向上は見られなかった。最近のコンピュータジャンボによる設計パターン通りで高精度に穿孔する技術は、孔位置や穿孔角度、穿孔長のムラに起因する発破振動のばらつきを抑えるだけでなく、外周孔の穿孔条件管理による余堀りの低減など、生産性の向上の実例が既に報告され始めている。さらに、発破設計の観点で言えば、穿孔精度だけでなく、薬量管理も重要である。海外では既に主流であるがまだ日本国内には流通していないバルクエマルジョンは、危険物扱いである 2 液を切羽の孔内手前で混合して初めて爆薬となる方式のため安全性が高いだけでなく、爆薬威力の調整や孔内量の調整を容易に設定できる。そのため、振動低減の観点からの薬量の調整が可能となるため、ジャンボによる高精度な穿孔技術と併せ、将来には岩盤条件に応じた適切な発破設計が可能になると考える。そのためにも早期にバルクエマルジョンが国内法の承認を得られることを期待される。

以上の発破振動のリアルタイムな計測・分析技術や発破施工技術の向上は、発破を積極的に管理することにつながるだけでなく、最適な起爆秒時や地山強度、穿孔配置や薬量設定といった発破設計パターン等に関する非常に多くのデジタルデータが蓄積されることになる。そのような非常に多数のデータの分析を行うことで、地山条件に合わせた継続的な発破の最適な管理ができる日もそれほど遠くないと考える。

参 考 文 献

Abo-zena A. H., 1977 : Abo-zena A. H.: Radiation from a finite cylindrical explosive source, Geophysics, Vol.42, No.7, pp.1384-1393 (1977)

Aldas G. G. U.ら, 2008 : Aldas G. G. U. and Ecevitoglu B.: Waveform analysis in mitigation of blast-induced vibrations, Journal of Applied Geophysics, Vol.66, pp.25-30 (2008)

Ambraseys N. R.ら, 1968 : Ambraseys N. R. and Hendron A. J.: Dynamic behavior of rock masses rock mechanics in engineering practice, Wiley, London (1968)

Atlas Powder Co, 1987 : Explosives and Rock Blasting, p.178 (1987)

Blair D. P., 1999 : Blair D. P.: Statistical models for ground vibration and airblast, Flagblast, Vol. 3, No. 4, pp.335-364 (1999)

Born W. T., 1941 : Born W. T.: The attenuation constant of earth materials, Geophysics, Vol.6, pp.132-148 (1941)

Daw A. W., 1909 : Daw A. W., Daw Z. W. : Blasting of Rock, 2nd edition, E & F. N. Spon (1909)

Dowding C. H., 1985 : Dowding C. H.: Blast vibration monitoring and control, Prentice Hall. (1985) (ダウディン C. H., 佐々宏一・中川浩二・三浦房紀・井清武弘・国松直 (訳) (1995) : 発破振動の測定と対策, 山海堂, pp.7-44, pp.241-249)

Duvall W. I., 1953 : Duvall W. I.: Strain-wave shapes in rock near explosions, Geophysics, Vol. 18, No.2, pp.310-323 (1953)

Duvall W. I. 他, 1959 : Duvall W. I. and Petkof B.: Spherical propagation of explosion generated strain pulse in rock, USBM Report of Investigation, p.5483 (1959)

Gladwin M. T. 他, 1974 : Gladwin M. T. and Stacey F. D.: An elastic degradation of acoustic pulses in rock, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.8, pp.332-336 (1974)

Hino, 1954 : Kumao Hino : Theory of Blasting with Concentrated Charge, 工業火薬協会誌, Vol.15, No.4, p.233 (1954)

Hinzen K. G., 1988 : Hinzen K. G.: Modelling of blast vibrations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.6, pp.439-445 (1988)

Kisslinger C. 他, 1963 : Kisslinger C. , Mateker E. J. and McEvelly T. V.: Seismic waves generated by chemical explosions, AF Cambridge. Research. Laboratory., Bedford, Massachusetts, Report No. AFCRL-63-701, Final Report. July (1963)

Kjartansson E., 1979 : Kjartansson E.: Constant Q wave propagation and attenuation, Journal of Geophysical Research, Vol.84, No.B9, pp.4737-4748 (1979)

Langefors U. 他, 1963 : Langefors U. and Kihlstrom B.: The modern technique of rock blasting, Wiley, New York (1963)

Sharpe J. A., 1942: Sharpe J. A.: The production of elastic waves by explosion pressures. I. Theory and empirical field observations, Geophysics, Vol.7, pp.144-154 (1942)

Starfield A. M. 他, 1968 : Starfield A. M. and Pugliese J. M.: Compression wave generated in rock by cylindrical explosive charges. A comparison between a computer model and field measurements, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,

Vol.5, pp.65-77 (1968)

Rulin Yang ら, 2010 : Rulin Yang, D. Scott Scovira : A model for near and farfield blast vibration based on multiple seed waveforms and transfer functions, International Journal of Blasting and Fragmentation, Vol.4, issue2, pp.91-116 (2010)

Rulin Yang ら, 2011 : Ruilin Yang, Dave B. Kay: Multiple seed blast vibration modelling for tunnel blasting in urban environments, International Journal. of Blasting and Fragmentation, Vol.5, No.2, pp.109-122 (2011)

Weyne nelson, 1988 : Weyne nelson: 寿命データの解析, (日科技連出版社), pp.34-37 (1988)

伊藤ら, 1962 : 伊藤一郎, 佐々宏一 : 応力波の反射により自由面に発生する動的応力について, 日本鉱業会誌, Vol.78, No.886, pp.303-310 (1962)

伊藤ら, 1966 : 伊藤一郎, 佐々宏一 : 爆破に伴う岩盤内応力に及ぼすポアソン比の影響, 水曜会誌, Vol.16, No.2, pp.75-77 (1966)

犬塚ら, 2015 : 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, I-6 (2015)

岩野ら, 2013 : 岩野圭太, 越川俊幸, 末吉功一, 堀部貴宏 ; 超硬岩自由断面掘削機の現場適用, 資源・素材 2013 (春季大会) , Vol.2505, pp.258-259 (2013)

岩野ら, 2014a : 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地直下における環境負荷低減発破, トンネル工学報告集, Vol.24, I-35 (2014)

岩野ら, 2014b : 岩野圭太, 越川俊幸, 末吉功一, 手塚康成, 小淵考晃, 犬塚隆明, 栗木欣也, 落河崇征, 福井勝則, 永江純一 ; 高精度秒時電子雷管を用いた環境負荷低減発破, 資源・

素材講演集, Vol.1, No.2 (2014)

岡村ら, 1995 : 岡村永造, 根征喜, 河野興 : 近接するトンネル間を制御発破で掘る 中央本線新深沢第二トンネル, トンネルと地下 (1995年12月号), pp.7-17 (1995)

金子ら, 1989 : 金子勝比古, 中村直昭, 平田篤夫, 大見美智人 : 伝播波形初動形状によるQ値評価法 (I) -理論的考察-, 物理探査, Vol. 42, No.4, pp.235-244 (1989)

川野ら, 2017 : 川野広道, 栗山和之 : 4 ブームフルオートコンピュータジャンボの ICT 活用事例, 火薬と保安, Vol.154, pp.39-46 (2017)

北村, 1985 : 北村泰寿 : 発破振動における振動速度と振動レベルの対応について, 土木学会論文集, Vol. 362, I-4 (ノート), pp.481-484 (1985)

共立出版, 2001a : 共立出版, 現場技術者のための発破工学ハンドブック, pp.1-14 (2001)

共立出版, 2001b : 現場技術者のための発破工学ハンドブック, pp.38-60 (2001)

共立出版, 2001c : 現場技術者のための発破工学ハンドブック, pp.113-124 (2001)

共立出版, 2001d : 共立出版;現場技術者のための発破工学ハンドブック, pp.116-119 (2001)

国松ら, 1988 : 国松直, 三浦房紀, 今村威, 中川浩二 : 速度波形を用いた振動レベルの推定, 土木学会論文集, Vol.391, VI-8, pp.134-141 (1988)

国松ら, 1989 : 国松直, 三浦房紀, 今村威, 中川浩二 : 段発発破振動速度波形からの振動レベルの算出, 土木学会論文集, Vol.403, VI-10 (ノート), pp.265-268 (1989)

国松ら, 1991 : 国松直, 三浦房紀, 今村威, 中川浩二 : 段発発破に起因する振動に対する振動レベルの予測, 工業火薬, Vol.52, No. 1, pp.25-34 (1991)

国松ら, 1997a : 国松直, Farsangi M. A. E., Durucan S., Johnston G., 井清武弘 : SH 波重複反射法による地層構造を考慮した発破振動の予測手法, 資源と素材, Vol.113, No.2, pp.95-99 (1997)

国松ら, 1997b : 国松直, 井清武弘, M.Ali E. Farsangi : 起爆秒時制御に基づく発破振動制御法の評価, 資源と素材, Vol.113, pp.100-106 (1997)

黒川ら, 1986 : 黒川孝一, 中野雅司, 植田武雄, 酒井洋 : 発破パターンのコンピュータ化, 日本鉱業会秋季大会資料, p.3 (1986)

工業火薬協会, 1989 : 工業火薬協会 : 新・発破ハンドブック (1989)

越川ら, 2014 : 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, pp.27-28 (2014)

雑喉, 1984 : 雑喉謙 : 発破振動の周辺への影響と対策, 鹿島出版会, pp.8-9 (1984)

山海堂, 1988 : 山海堂 ; 新・発破ハンドブック (社 工業火薬協会編), pp.1-16, (1988)

産業環境管理協会, 2010a : 産業環境管理協会 : 新・公害防止の技術と法規 2010 騒音・振動編, p.205 (2010)

産業環境管理協会, 2010b : 産業環境管理協会 : 新・公害防止の技術と法規 2010 騒音・振動編, p.206 (2010)

産業環境管理協会, 2010c : 産業環境管理協会 : 新・公害防止の技術と法規 2010 騒音・振動編, p.181 (2010)

産業環境管理協会, 2010d : 産業環境管理協会: 新・公害防止の技術と法規 2010 騒音・振動編, p.220 (2010)

ジオフロンテ研究会, 2014 : ジオフロンテ研究会発破技術 WG : 山岳トンネル発破の勘どころ, (2014)

塩月ら, 1996 : 塩月隆久, 橋爪正博, 古川浩平, 中川浩二 : 発破振動のばらつきの要因分析とこれを考慮した重畳シミュレーションによる振動評価, 土木学会論文集, No.534, VI-30, pp.185-200 (1996)

清水ら, 1984 : 清水則一, 北村泰寿, 桜井春輔 : トンネル発破による地表面および家屋の振動測定, 建設工学研究所報告, Vol.25, pp.139-153, (1984)

土木工学社, 2007 : 土木工学社「発破技術の現状」連載講座小委員会 : 発破技術の現状 (7) 発破と環境問題 (1), トンネルと地下 (2007年5月号), pp.55-62 (2007)

中川ら, 1986 : 中川浩二, 古川浩平, 鈴木宏平, 吉見憲一 ; 削孔ロボットを用いた硬岩トンネルのスムーズブラスティングに関する研究, 土木学会論文集, No.367, VI-4, pp.52-61, (1986)

名和ら, 1962 : 名和小太郎, 菅田博 : MS 遅延発破による地震動 (I), 工業火薬協会誌, Vol.23, No.2, pp.61-70 (1962)

西尾, 2015 : 西尾悠吾; 全断面トンネル掘進機の掘削データ分析, 東京大学卒業論文, (2015)

日本火薬工業会, 2002a : 日本火薬工業会 : あんな発破こんな発破 発破事例集, p.3 (2002)

日本火薬工業会, 2002b : 日本火薬工業会 : あんな発破こんな発破 発破事例集, p.7 (2002)

日本火薬工業会, 2015a : 日本火薬工業会史料編集部, 一般火薬学 (新改訂第2版), pp.271-

277, (2015)

日本火薬工業会, 2015b : 日本火薬工業会史料編集部 ; 一般火薬学 (新改訂第 2 版) , pp.1-3, (2015)

野田ら, 1998 : 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 98(秋季大会) , pp.171-120 (1998)

ノルウェー工科大プロジェクトレポート, 1995 : ノルウェー工科大プロジェクトレポート : Tunneling Blast Design_2A-95 (1995)

橋爪ら, 1996 : 橋爪正博, 塩月隆久, 古川浩平, 中川浩二 : 住民感覚に及ぼす発破振動影響の評価尺度に関する研究, 土木学会論文集, No.553, VI-33, pp.171-185 (1996)

平田ら, 1992a : 平田篤夫, 石山宏二, 金子勝比古 : 掘進発破振動のスペクトル特性, 資源・素材学会誌, Vol. 108, No. 3 (1992)

宮地ら, 1993 : 宮地明彦, 古川浩平, 吉川和行, 中川浩二 : 重畳孔数の考え方に基づくトンネル掘進発破振動の評価について, 土木学会論文集, No.480, VI -21, pp.53-62 (1993)

村田ら, 1954 : 村田勉, 田中一三 : 岩石発破に関する力学的研究 第 1 報:岩石を非圧縮性とした場合, 工業火薬協会誌, Vol.15, No.4, p.294 (1954)

森山ら, 1997 : 森山孔弘, 塩屋真吾 : 遠隔自動環境計測システム (NCVIB) のご紹介, 骨材資源, Vol.48, No.192, pp.218-221 (2017)

柳田ら, 2014 : 柳田克己, 中村隆寛, 緒方雄二 ; マイクロブラスティングによる地下解体工法, 火薬と保安, Vol.46, pp.6-11 (2014)

山口ら, 1972 : 山口梅太郎, 奥村 誠 ; 岩石中を伝ばする音並みの減衰定数の測定, 材料,

Vol.21, No.228, pp.869-875 (1972)

山本ら, 1998a : 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 1 報), 火薬学会誌, Vol.59, No.5, pp.221-229 (1998)

山本ら, 1998b : 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, Vol.59, No.5, pp.231-240 (1998)

山本, 1999 : 山本雅昭 : 電子遅延式雷管を用いた制御発破工法に関する研究, 北海道大学博士論文, (1999)

吉岡ら, 1989 : 吉岡幸雄, 宮地明彦, 古川浩平, 中川浩二 : 確率論手法に基づく発破振動管理手法に関する一考察, 土木学会論文集, Vol. 403, VI-10 (報告) , pp.199-208 (1989)

吉岡ら, 1990 : 吉岡幸雄, 佐々木芳文, 岡田泰徳 : 住宅地下におけるトンネル硬岩掘削, 土と基礎, Vol.38, No.3 (1990)

和田ら, 1994 : 和田有司, 馬貴臣, 中嶋敏秀, 昔哲基, 緒方雄二, 勝山邦久, 三宅淳巳, 小川輝繁 : 発破振動低減手法に関する研究, 火薬学会誌, Vol.55, No.4 (1994)

Atlas Copco, 2015 : Epiroc Japan : Boomer XE/WE パンフレット

Instantel Inc., 2013 : Instantel Inc.: Minimate Plus Specifications (2013)

オリカ, 2009 : Civic Drive System Technical Data Sheet, オリカ

オリカ, 2016a : eDevII Electronic Tunnel Blasting System Technical Data Sheet, オリカ

オリカ, 2016b : Wireless Blasting Solutions Webgen100 パンフレット, オリカ

カヤクジャパン, 2017a : ANFO (硝酸油剤爆薬) カタログシート, カヤクジャパン

カヤクジャパン, 2017b : ランデックス (含水爆薬) カタログシート, カヤクジャパン

カヤクジャパン, 2017c : 電気雷管カタログシート, カヤクジャパン

カヤクジャパン, 2017d : アイデット (導火管付雷管) カタログシート, カヤクジャパン

カヤクジャパン, 2018a : EDD (電子遅延式電気雷管) カタログシート, カヤクジャパン

カヤクジャパン, 2018b : アルテックス (含水爆薬) カタログシート, カヤクジャパン

ジャペックス, 2016 : ハイジェックス (含水爆薬) カタログシート, ジャペックス

豊田市河川課, 2015a : 豊田市河川課 : 安永川の位置・歴史

豊田市河川課, 2015b : 豊田市河川課 : 安永川流域の災害・特徴

豊田市河川課, 2015c : 豊田市河川課 : 「平成の大改修」事業内容

謝 辞

本研究を遂行し、博士論文を執筆するにあたり、極めて多くの方々のご支援とご指導を賜りました。特にそしてまずはじめに、東京大学工学系研究科システム創成学専攻の福井勝則教授、同専攻の羽柴公博准教授には、大変お世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。本研究の立ち上げ時点から研究内容や研究全体の方向性の助言を賜り、温かく励まして頂きました。特にトンネルを施工する建設会社の立場にありがちな多くのデータ数に頼った大局的な観点に頼るだけでなく、より本質を捉えた見方に研究を進める考え方を気づかせて頂き、今後、私がさらに研究を取り組んでいくうえでの糧となりました。

また一級河川安永川トンネル工事の越川俊幸所長（当時）には、それまで現場未経験の自分を現場に受け入れて頂いた上に、TBM 施工後の上流からの拡幅掘削においてその施工担当という重役を担わせて頂いたこと、更に、実際の施工に並行してこれまでにない大がかりな発破試験の遂行を承認頂きましたこと深く感謝いたします。同工事の末吉功一副所長（当時）には、現場経験の乏しい自分に、何度も相談に乗って頂き、施工や試験のポイントを教えて頂きました。同工事の堀部貴宏機電課長（当時）や小林直広工事係（当時）のほか同工事の社員の方々には、現場におけるいくつかの難題を一緒に解決して頂き、発破試験の遂行にもご協力いただきました。ここに深く感謝いたします。とりわけ堀江泰紘氏には、安永川トンネルの上流・下流からの計 1000 回を超える発破に対し、地上の複数の地点での振動計測を行って頂き、その献身性には頭が下がる思いです。

今回の研究の基本となる発破試験は 2013 年 9 月から開始いたしましたが、その発破試験を行うきっかけとなったのが、高精度電子雷管の導入です。その導入には、オリカジャパンの安藤宏社長（当時）、森山孔弘氏のご協力無くしては不可能だったと考えます。改めて深く感謝いたします。更に発破試験では、Gab Soo, Kim 氏、Johann Fritz 氏に協力頂いたほか、試験後においても発破に関する世界の研究動向などについて Francois Holowenczak 氏や Ruilin Yang 氏など多くの専門家に教示頂きました。

鹿島建設内では、安永川トンネルの発破を本社、技術研究所としての研究事案として立ち上げ、試験計画の立案や試験の協力体制を整えて頂いた手塚康成次長（当時）、小淵考晃上席研究員（当時）には大変お世話になりました。さらに、実際の試験データの収録・整理では、中嶋誠門研究員（当時）や小泉悠研究員（当時）らにもご協力いただきました。

また異動にて安永川トンネルから技術研究所に戻った後、技術研究所の犬塚隆明研究員

(当時)には、安永川トンネルに続くそのほかのトンネル現場での高精度電子雷管を適用した発破試験のデータ収集・整理に協力を頂きました。また本研究の研究成果の一部を適用した白井トンネルでは、土岐浩之次長、佐々木栄治工事課長には、検討に必要な振動データの取得などで多大なご支援・ご協力を頂き、深く感謝いたします。

また具体的に本研究を進め、展開していくにあたり、東京大学工学系研究科システム創成学専攻の修士学生であった永江純一氏には、発破振動のデータ整理や検討に専心頂きました。その検討の経過や結果には私自身も気づかされることが多く、本研究を進める大きな推進力となり、感謝の念に堪えません。

このように本研究を形にすることができましたのはひとえに上記に示した非常に数多くの方々のご指導、ご協力に負うところが多く、ここに改めて深い感謝を表明いたします。

最後に、実家が近かった安永川トンネルに配属している間、特に温かく見守ってくれた両親、および研究を始めて5年以上の間、本研究に多くの時間を忙中してきた中で辛抱強く支援してくれた妻と2人の娘に深い感謝の意を表して私の謝辞と致します。