

振動制御発破の新たな試み —電子雷管の起爆秒時設定手法確立に向けた試験発破— A new trial of vibration control blasting —Experiment blast toward establishment of detonation time setting method using electronic detonator—

宮園 渉* 田中 義晴**
Wataru Miyazono Yoshiharu Tanaka
高村 浩彰***
Hiroaki Takamura

要 約

八丁峠トンネルは、全延長L=1,075 mのうち、鋼製支保工が無い支保パターンが85%を占めるほど硬質な岩盤であった。1回の発破で使用する火薬量も多く、騒音、低周波音、振動の苦情が発生した。苦情に対する対策は、緊急を要したため防音扉の増強等で解決したが、発生源を抑制する技術開発が必要と考え、振動低減に着目した試験発破を実施した。

本報では、起爆秒時間隔を現場において任意に設定できる電子雷管を利用して、低減効果を最大限発揮できる起爆時間設定手法の確立を目的とした試験発破の結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 試験発破
- § 4. 電子雷管を使用した制御発破の利用方法
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

NATM トンネル工事における発破掘削は、1日に数回、数秒間の瞬間的な騒音、低周波音、振動であるものの、周辺民家に与える影響が大きいため、対策工が用いられる場合¹⁾が多い。

発破振動の問題では、起爆方式を変更する制御発破で対策するが、とくに電子雷管を用いることで高い低減効果発揮を発揮できることが知られている²⁾。すなわち、通常、電気雷管を用いた10段程度の起爆を、起爆秒時間隔の精度に優れた電子雷管にて起爆させる場合には、1孔1段の起爆が実施できるため斉発薬量を低減することで地盤振動の影響を抑えることができる。また、電子雷管

* 九州（支）八丁峠トンネル（出）（現：内大臣トンネル（出））

** 九州支社 八丁峠トンネル（出）（現：土木計画部）

*** 技術研究所地域環境グループ

は近年、起爆秒時間隔を現場において設定、変更できるものが開発³⁾されており、発破の継続時間なども現場条件に合わせて容易に変更できるようになった。

本報告では、現場で起爆秒時間隔を変更できる電子雷管の効果を検証する試験発破を実施し、得られた成果から上述した制御発破の利用法について考察した。

§ 2. 工事概要

2-1 トンネル概要

当工事は、福岡県の嘉麻市と朝倉市の間に位置する八丁峠を貫く全長L=3,791 mの一般国道トンネルにおいて、工事が完了している嘉麻側のL=2,716 mに向かって朝倉側からL=1,075 mを構築する工事である（図-1 参照）。

工 事 名：福岡 322 号 八丁峠道路トンネル（朝倉側）
新設工事

発 注 者：国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所
工事場所：福岡県朝倉市秋月野鳥

工 期：平成 27 年 1 月 29 日～平成 29 年 8 月 31 日
諸 元：トンネル延長 L=1,075 m

掘削断面積 62～79 m²

掘削方式 発破

ズリ運搬方式 タイヤおよびベルトコンベア

2-2 地形・地質概要

本トンネルが通過する八丁峠は、古処山 (EL.859 m) の西側に位置しており、峠付近は南北方向に谷が発達し、北側 (起点・嘉麻側) には千手川が、南側 (終点・朝倉側) には野鳥川がそれぞれ流下している。トンネル通過付近に活断層はなく、地滑り性の堆積物や滑落崖等の地滑り地の地形的特徴も確認されていない。



図-1 トンネル位置図

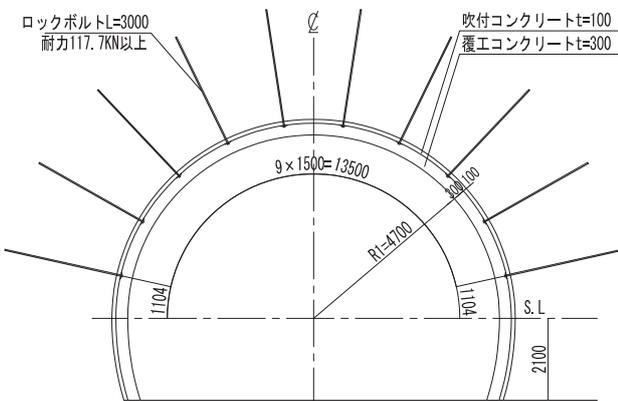


図-2 トンネル標準断面

図-2 にトンネル標準断面図を、図-3 にトンネル地質縦断面図を示す。地山は、中生代白亜紀朝倉花崗閃緑岩を基盤岩とし、硬質で良好な塊状岩盤が広く分布している。終点 (朝倉) 側坑口付近は、風化した花崗岩 (D, CL 級) が分布し脆弱であった。その他一般部は、新鮮で硬質な花崗岩 (一軸圧縮強度: 80 N/mm² 以上, CM~CH 級) であったが、茶褐色に変色した割れ目が発達した区間も存在した。写真-1 に示すような鋼製支保工が無い CII-a または CI パターンが全体の約 85% を占めるほど硬質な岩盤であった。今回試験発破を行った切羽も割れ目が少なく閉じていた。

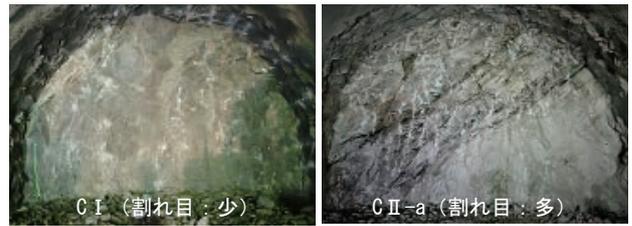


写真-1 切羽写真

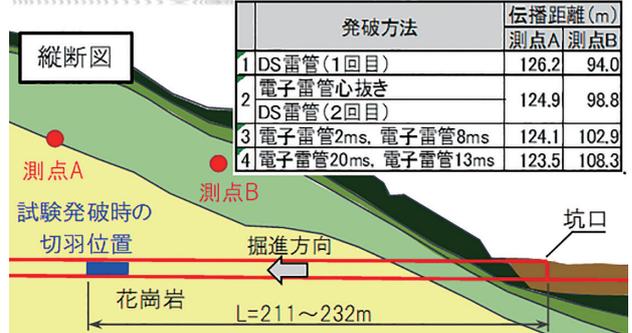
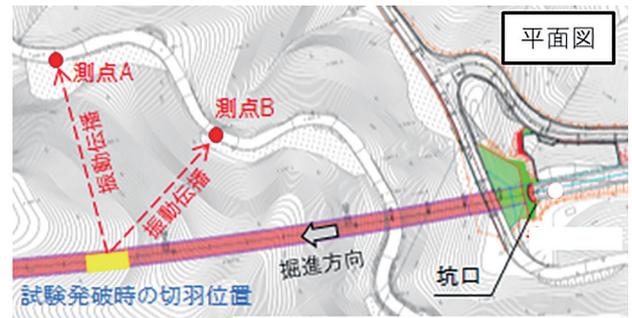


図-4 測定位置図

発破方法	伝播距離 (m)	
	測点A	測点B
1 DS雷管 (1回目)	126.2	94.0
2 電子雷管心抜き	124.9	98.8
3 DS雷管 (2回目)	124.1	102.9
4 電子雷管2ms, 電子雷管8ms	123.5	108.3

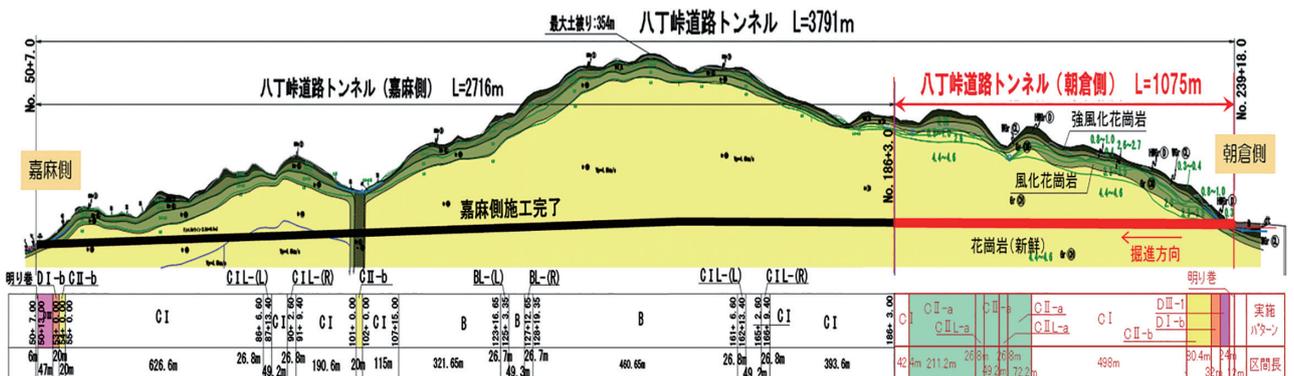
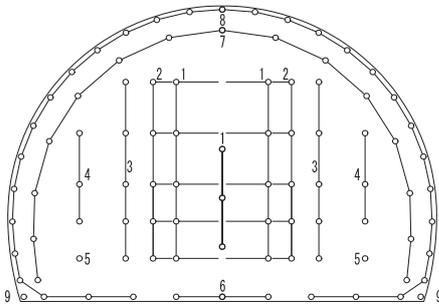


図-3 地質縦断面図

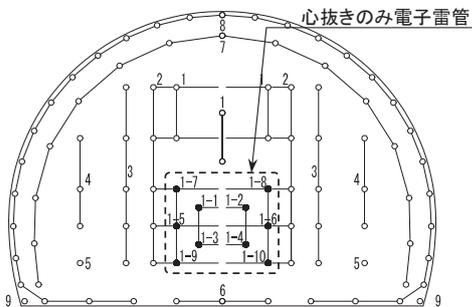
§3. 試験発破

3-1 測定条件

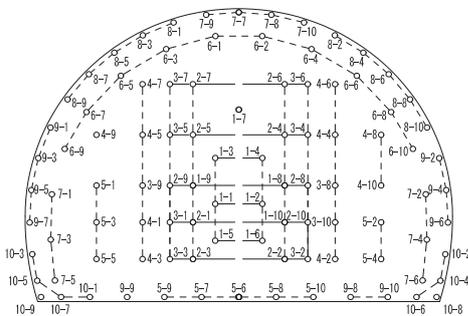
振動測定は、図-4に示す2箇所で行った。試験発破は、通常の発破（DS電気雷管）、単発起爆波形測定のための発破、ならびに1孔1段の制御発破（電子雷管）を図-5ならびに表-1で示すパターンで実施した。



(a) 標準 DS 雷管 9段



(b) 心抜き単発波形測定時 電子雷管10段+DS9段



(c) 電子雷管による1孔1段
図-5 発破パターン図

表-1 雷管種類と薬量の関係

標準 DS 電気雷管			電子雷管									
			心抜き (300ms)		32ms 間隔		8ms 間隔		20ms 間隔		13ms 間隔	
段数	孔数	装薬量 (kg)	孔数	装薬量 (kg)	孔数	装薬量 (kg)	孔数	装薬量 (kg)	孔数	装薬量 (kg)	孔数	装薬量 (kg)
DS1	13	13.0	① 4	2.4	10	8.8	9	8.4	10	8.8	9	7.8
DS2	10	10.0	② 6	6.0	10	12.0	10	10.4	10	10.0	10	10.0
DS3	10	10.0	③ 3		10	10.0	10	10.0	10	10.0	10	10.0
DS4	7	5.6	④ 4		10	10.0	10	10.0	9	9.0	10	10.0
DS5	1	0.8	⑤ 1		10	10.0	10	10.0	10	10.0	10	10.0
DS6	4	3.2	⑥ 4		10	10.0	10	10.0	10	10.0	10	10.0
DS7	17	13.6	⑦ 7		10	10.0	10	10.0	10	10.0	10	10.0
DS8	31	29.8	⑧ 11		10	10.0	10	10.0	10	8.6	10	9.8
DS9	2	2.0	⑨ 2		10	10.0	10	10.0	10	10.0	10	10.0
			⑩ 10		10	10.0	10	10.0	10	10.0	10	10.0
合計	95	88.0	10	8.4	100	100.8	99	98.8	99	96.4	99	97.6

3-2 単発発破の試験結果

300 ms の秒時間隔で補助心抜き4段 (0.6 kg/孔) および心抜き6段 (1.0 kg/孔) を実施した単発波形の結果について、測点 A, B の振動速度波形を図-6に示す。

起爆した10段の中で速度振幅の大きい5段目と7段目の詳細波形と周波数特性を図-7に示す。速度振幅は大きく変化するものの、同一測点の波形形状は酷似しており、周波数特性も同様な傾向を示している。これより、岩盤の硬さや亀裂、自由面までの距離 (最小抵抗線) を含む岩盤の状態によって、各段の変位速度は大きく変化するものの、測定点ならびに伝播経路が同じであれば波形形状の再現性は非常に高いことを確認した。

3-3 単発発破の測定結果を利用した予測方法

連続した全断面の発破にともなう振動予測は、計測した単発発破の振動波形を任意の秒時間隔で、発破する段数分重ね合わせることで算出するものであり、以下に詳細を説明する。

図-8に測点 A の5段目波形を20 ms の秒時間隔で100段発破する予測結果を示す。図-8 (a) は計測した速度波形を20 ms 遅延させながら100段 (回) 重ねた時刻歴特性を、(b) は速度 (a) を時間微分することで加速度に変換し、JIS⁴⁾ に則って感覚補正を加えた振動レベルの予測結果を、(c) に加速度波形の周波数分析結果を示している。なお、本試験発破では振動速度を計測したが、振動加速度を計測しても同様の結果となる。

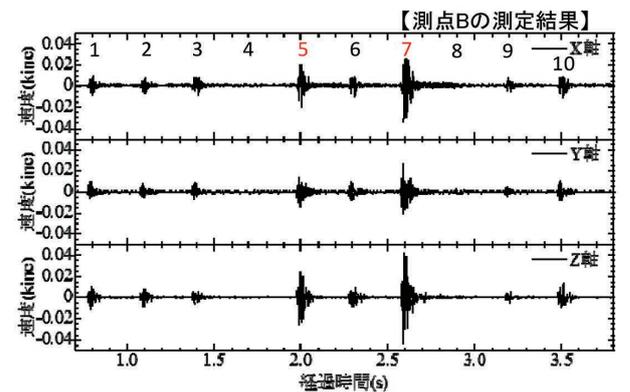
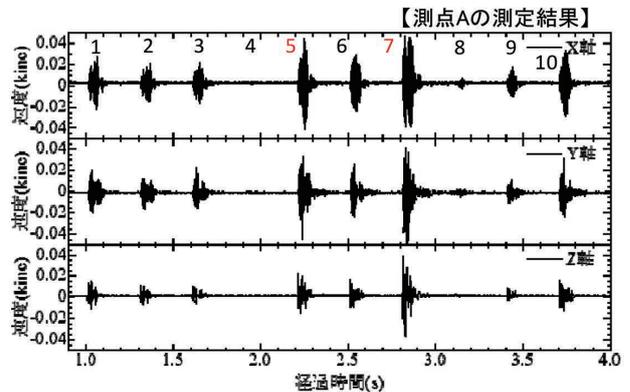
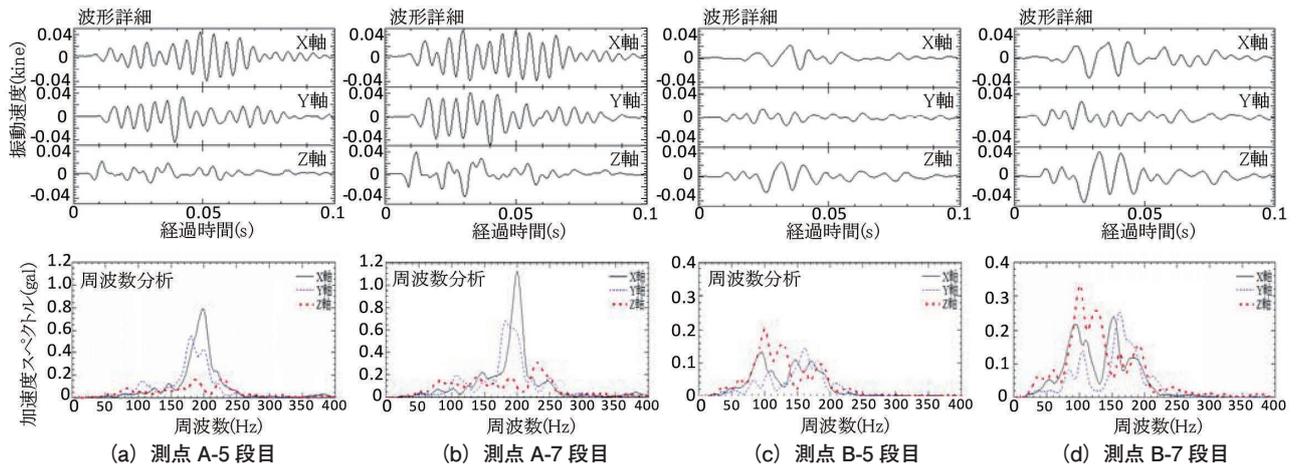
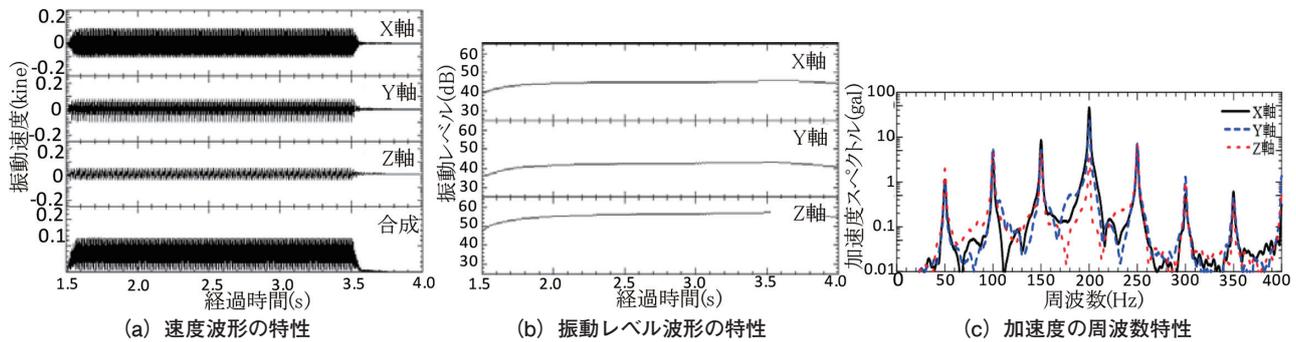


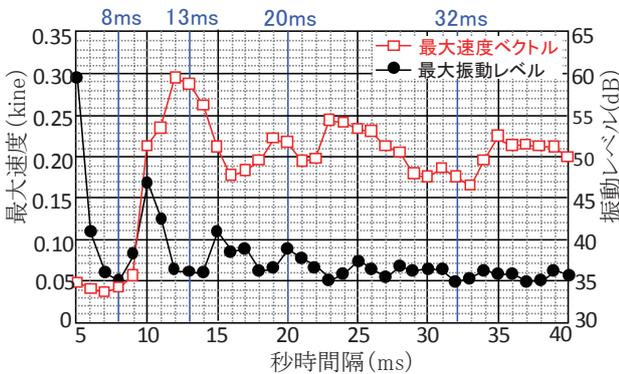
図-6 心抜き10段の単発起爆波形時系列



図一七 単発起爆波形の波形形状および周波数特性



図一八 測点 A-5 段目波形の 20 ms 間隔重ね合わせ結果



図一九 測点 A-5 段目波形による予測結果

単発発破の周波数特性を(図一七(a))と同じ波形を重ね合わせた予測結果を(図一八(c))と比較すると、単発発破の卓越周波数である 200 Hz 以外に、予測結果では 50 Hz 間隔で卓越する周波数が発生している。20 ms の起爆間隔は、等間隔で 1 秒間に 50 回起爆することになり任意の波形を等間隔で重ね合わせると、秒時間隔に起因する 50 Hz の n 倍の周波数 (50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, …) が卓越する結果となっている。

予測結果における合成ベクトル量とした速度の最大値と、鉛直方向の振動レベルの最大値を取り出し、各秒時間隔で重ね合わせて予測整理した結果を(図一九)に示す。

図一九より、秒時間隔を変えることによって最大速度ならびに振動レベルが大きく変動することがわかる。また、振動レベルは、人の感じかたを考慮する目的で周波

数特性を補正(感覚補正)するため、最大速度と振動レベルの大小関係が異なることも読み取れる。

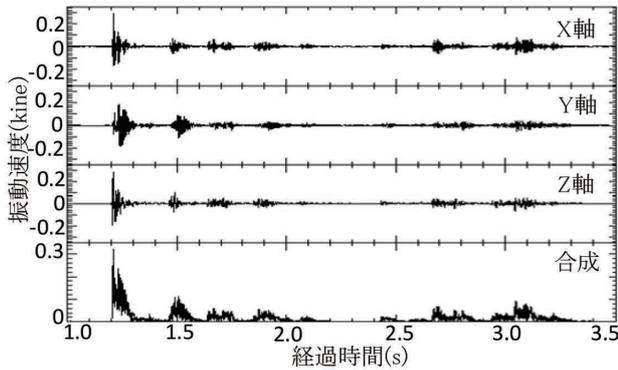
この予測方法における問題点は、実際の発破では岩盤の影響などで発破孔ごとに振動振幅が異なること、切羽から保全対象までの離隔距離(伝搬距離)が発破孔の位置によって最大 10 m 程度(トンネルの幅)異なることに起因する位相差(伝達時間の相違)である。これらの予測誤差については、測定結果の節で述べる。

試験発破では、(図一九)の結果から従来型の電子雷管の秒時間隔付近(30 ms)で最大速度が小さくなる 32 ms、秒時間隔が短く最大速度が小さくなる 8 ms、ならびに振動レベルが大きくなる 13 ms と小さくなると予測された 20 ms について検証することにした。

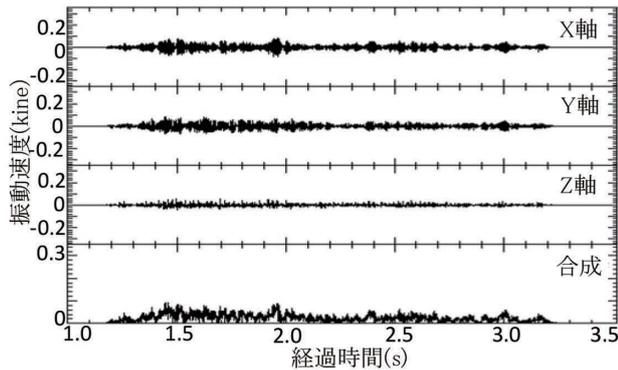
3-4 試験発破の結果

測点 A で計測した速度波形を(図一十)に、加速度に変換し周波数分析した結果を(図一十一)に示す。図では、上段に DS 雷管 9 段 2 回目の結果、下段に電子雷管 20 ms 間隔の結果を併記した。さらに 3-3 節の秒時間隔ごとの予測結果(図一九)に DS 雷管と試験発破で実施した電子雷管の測定結果をプロットしたものを(図一十二)に示す。

図一十より、特に心抜き振動速度が大きい DS 雷管の発破に比べ、1 孔 1 段の電子雷管による発破は、補助心抜きによって最小抵抗線長を小さくしたことによる効果を含め、振動を大きく低減できることが読み取れる。

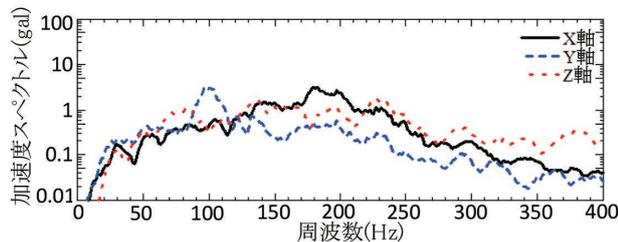


(a) DS 雷管 9 段の測点 A における速度時系列

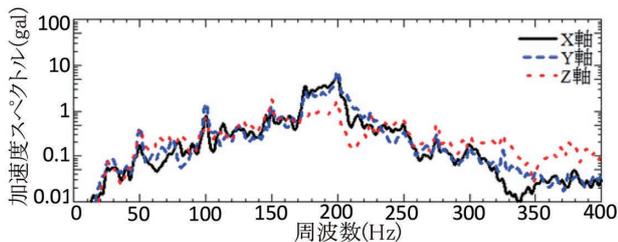


(b) 電子雷管 20 ms 間隔の測点 A における速度時系列

図一10 振動波形時系列



(a) DS 雷管 9 段の測点 A における周波数特性

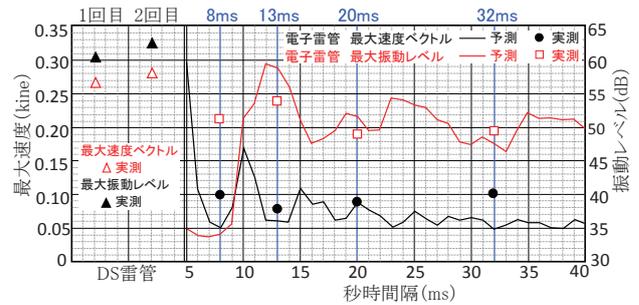


(b) 電子雷管 20 ms 間隔の測点 A における周波数特性

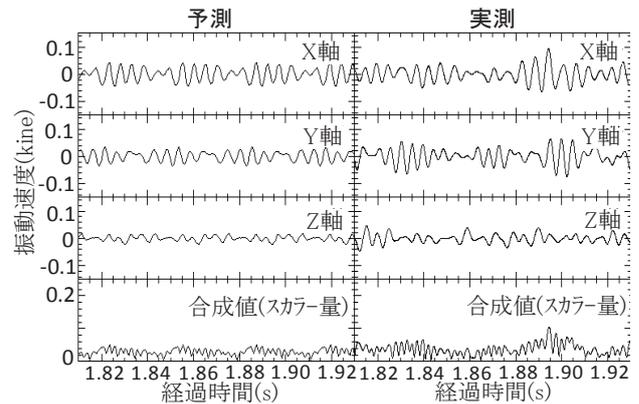
図一11 周波数特性

図一11の周波数特性から、予測補法で述べたように秒時間隔 20 ms に起因する 50 Hz の n 倍 (50, 100 Hz, 150 Hz, ...) にも発生していることが読み取れる。また、人体に感じやすく振動レベルへの影響が大きい 50 Hz 以下の成分が DS 雷管に比べ低減していることもわかる。

さらに、図一12 から、予測誤差はあるものの、電子雷管の秒時間隔によって最大速度で倍程度、振動レベルで 5 dB 程度変化することが読み取れる。これより、現場条件にあわせて起爆秒時間隔を設定することが有効であることを確認した。



図一12 測点 A-5 における 5 段階目波形の予測と実測の比較



図一13 電子雷管 32 ms 間隔起爆の予測と実測の比較

ここで、予測誤差は、前述したように発破孔ごとの振動振幅の相違ならびに切羽から保全対象までの離隔距離 (伝播距離) が発破孔ごとに異なることから発生する位相差 (伝達時間の相違) に起因すると考えられる。測点 A は、切羽のほぼ真横に位置するため、伝播距離はトンネルの幅に相当する 10 m 程度の差がある。弾性波速度を 3.0 km/s と仮定すると、10 m の距離差では伝播時間が 3 ms (0.003 s) 程度ずれることになる。したがって、払い発破では発破孔の位置によって 1 ms~3 ms 程度の位相差が常時発生し、伝播距離の相違に依存する予測誤差は、起爆秒時間隔を短く設定する場合に特に大きくなることになる。図一13に位相差の影響を確認するため、32 ms 間隔で起爆した場合の速度波形に関する予測結果と測定結果の約 4 段分 (120 ms) の詳細波形を示す。これより、波形性状は似ているものの、波形が重なり合う間隔が異なること、振動振幅にばらつきがあることが予測誤差に繋がっていることが確認できる。

§ 4. 電子雷管を利用した制御発破の利用方法

制御発破の秒時間隔を、保全対象の地盤特性等に合わせて、最適に予測するには、まず、保全目的と保全対象または伝播経路の卓越周波数を把握する必要がある。すなわち、保全目的とは、保全対象が構造物の場合は速度で、住民の場合は振動レベルで管理する必要があり、低減効果を最大限発揮させる設定方法が異なることを意味している。また、単発起爆にともなう振動波形の再現性が高いことから、振動波形が重ね合わせる際に逆位相と

なるように、起爆秒時間隔を設定できれば、速度など物理量を低減することが可能となる。逆位相となる起爆秒時間隔を把握するためには、振動の卓越周波数が既知となっていなければならない。ただし、振動レベルによる管理が求められる場合は、加速度をdBに変換する際に、時定数ならびに感覚補正フィルターによる特性変化があるため、物理量どおりの効果にならないことに留意しなければならない。

4-1 卓越周波数の確認方法

(1) 単発起爆による卓越周波数把握

今回と同様に心抜きだけ、または下半だけの4孔～10孔程度を、300 ms以上の間隔を空けて1孔1段で試験的に起爆する。6孔程度あれば、振動振幅のばらつきを考慮して、予測解析などを詳細検討し利用可能な単発波形を測定できる。

(2) 連続発破による卓越周波数把握

複数の秒時間隔における連続発破を300～1000 ms以上の休止を挟んで連続して実施することで卓越周波数を把握する。例えば、4 ms 間隔 25 段 + 休止 + 9 ms 間隔 25 段 + 休止 + 15 ms 間隔 25 段 + 休止 + 29 ms 間隔 25 段などの連続発破を実施する。秒時間隔に起因する卓越周波数はわかっているので、すべての秒時間隔ごとの周波数分析で卓越する周波数を把握することができる。

4-2 秒時間隔設定における留意事項

最適な秒時間隔を設定するためには、保全対象または伝播経路における卓越周波数に対して、逆位相となる起爆秒時間隔で起爆することが基本となる。すなわち、図-14に示すように、振動波形の1/2波長間隔で同じ波形を重ねれば、振幅を小さくすることができる。逆位相となる間隔は、1/2波長だけでなく3/2波長、5/2波長・・・でも同意であり、この間隔は、卓越周波数の $2/n$ ($n=1,3,5$)倍の関係となる秒時間隔で重ねることを意味している。

ただし、払い発破では、秒時間隔が短くなると発破孔の位置によって伝播距離が数m程度変化するため、逆位相とならずに低減効果が小さくなることも考えられる。したがって、可能な限り起爆秒時間隔を開けて設定することが望ましい。

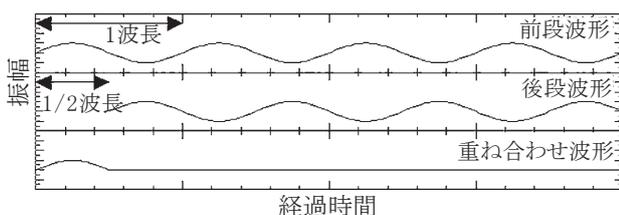


図-14 逆位相となる間隔の概念図

4-3 保全目的に併せた秒時間隔設定の基本

(1) 最大速度の場合

保全対象または伝播経路における卓越周波数よりも低周波数側となる秒時間隔（卓越周波数の2/3倍、2/5倍）で発破することを基本とする。これにより、発破孔と保全対象までの伝播距離の相違にともなう位相ずれによって逆位相とならない振動波形の重なりを少なくすることで最大振幅の増大を抑える。

(2) 最大振動レベルの場合

人が振動を感じにくい高周波数側に振動の卓越周波数をずらすために、保全対象または伝播経路における卓越周波数の2倍周波数が卓越する短い秒時間隔で発破することを基本とする。

4-4 最適な制御発破の適用範囲

最適な秒時間隔を設定するためには、保全対象と伝播経路に依存する振動波形の卓越周波数が重要である。しかし、切羽の進行によって、保全対象までの伝播経路が変化するため、振動波形の卓越周波数が変化することが想定される。卓越周波数が変化すれば、最適な制御発破が実施できていないこととなるが、この場合は、秒時間隔に起因する卓越周波数は把握できているので、伝播経路での卓越周波数変化を確認することで、(例えば10 Hz変化したら秒時設定を変更する対策を行うことで)最適な発破を継続して実施することが可能になる。

§5. おわりに

試験発破の結果から、電子雷管の起爆秒時間隔を現場条件にあわせて設定することで、より効果的に振動を低減することが可能であることを示した。さらに、振動低減効果を発揮するためには、保全対象ならびに伝播経路での卓越周波数を把握することが重要であり、把握方法を検討するとともに、起爆秒時間隔の決定方法および最適な制御発破の継続方法について考察した。

参考文献

- 1) 日本火薬工業会：あんな発破 こんな発破 発破事例集，2002. 3, p.80.
- 2) 田中義晴，寺本勝三，一條俊之，佐藤喬一，山本雅昭，愛甲研一：EDDを用いた心抜き発破実験に関する考察，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1992. 2, pp. 390～pp. 394.
- 3) 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，第24巻，I-35，2014. 12.
- 4) 日本工業規格：JIS-C-1517：2014 振動レベル計—取引又は証明用，2014.