

### 掘削発破を震源とする弾性波探査用信号の特性

日本工機(株) 正会員 ○村田 健司 川野 誠 鈴木慶正  
鹿島建設(株) 正会員 山本 拓治 宮嶋保幸 栗原 啓丞 松下智昭

#### 1. はじめに

多くのトンネル掘削発破では、段発電気雷管を用いた発破工法が用いられている。芯抜き部を瞬発電気雷管を用いて一番最初に起爆し、その後払い部から最外周部に向けて順次段発電気雷管で起爆して、内側から外へと順に破砕する掘削発破を行う。

筆者らはこの掘削発破による振動を起振源とした弾性波探査を容易に実施するために、トンネル掘削発破の発破電流からの弾性波探査用信号検出装置(ショットマーク)の開発を行い、瞬発電気雷管により起爆される爆薬に起因する発破振動を用いる方法を提案してきた。<sup>1, 2)</sup>

なぜならば、これまで爆薬を人工震源として利用する場合には、ショットマークが得られる瞬発電気雷管1本のみ用の特殊発破器を使用する単独発破を実施するか、センサー系を用いる以下のような方法でショットマークを計測しているからである<sup>3)</sup>。

- 1) 爆薬の周囲にあらかじめ電線を巻きつけ、爆薬の爆発によって電線が断線するのを検知する方法。
- 2) 爆薬の内部にイオンギャップ(電氣的に絶縁された1組の電線)を挿入し、爆薬の爆轟によってイオンギャップが電氣的に導通状態になるのを計測する方法。
- 3) 爆薬に光ファイバーの片端を挿入し、もう片端には光検知回路に接続し、爆薬の爆発による発光を検知する方法。

これらの方法では、爆薬を装填する孔に、消耗品センサーとなる電線や光ファイバーを一緒に装填して信号を検知し、更に弾性波探査用のショットマークに変換する装置が必要となる。そのため、準備手順も複雑で実際の掘削発破の工程の中に弾性波探査を組み込むのは困難である。

本報告では、信号検出装置の原理及び装置の概要及び生成させるショットマーク発生装置の意味とその電氣的な詳細と、弾性波探査用信号の持つべき特性について詳しく述べる。

#### 2. 弾性波探査用信号検出装置の開発

発破電流の通電を電氣的に非接触な状態で検知する方法と、検知した磁場信号から弾性波探査装置に適した信号への演算し変換する方法について検討した。その上で、図1のシステム構想図に示すように、トンネル発破掘削工程を変更せずに、トンネル掘削発破を人工震動発生源とするための具体的方法について検討を行った。

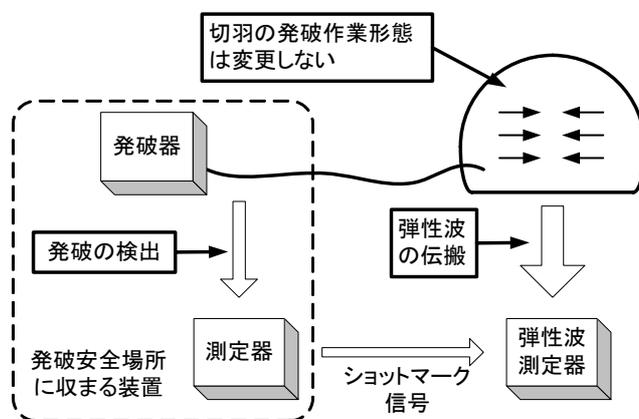


図1 システムの構想図

図2に装置の構成と波形概念図を示す。磁気センサーは発破電流に対応した約数msの信号を検知し、更に弾性波測定器に適した長いパルス波形に変換する。

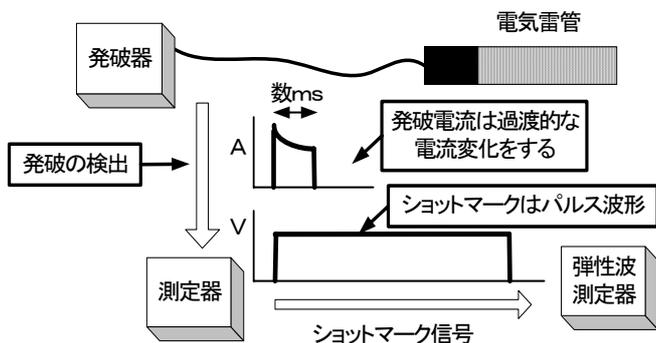


図2 装置の構成と波形概念図

測定器は、発破器から発破母線を経て電気雷管へ通電される発破電流を非接触で磁氣的に検知する検出部と弾性波測定系に適した信号に変換する演算回路部

キーワード 発破掘削振動, 弾性波トモグラフィ, 山岳トンネル, 切羽前方探査, ショットマーク  
連絡先 〒961-8686 福島県西白河郡西郷村長坂土生 2-1 日本工機(株) 研究開発部 TEL0248-22-3802

に分けて構成される。

発破電流はピーク電流が数A以上と大きいですが、継続時間は数百 $\mu$ S～数msと非常に短いため、単純に電圧信号に変換しただけでは、周波数帯域が数百Hz以下と低周波側に卓越した周波数特性を有する弾性波測定系では、応答速度・サンプリング速度が不足し計測できない。

他方、弾性波探査におけるショットマークの立ち上がり部の時間精度は、0.1ms以下の時間精度で発破による振動の発生に同期することが要求される。

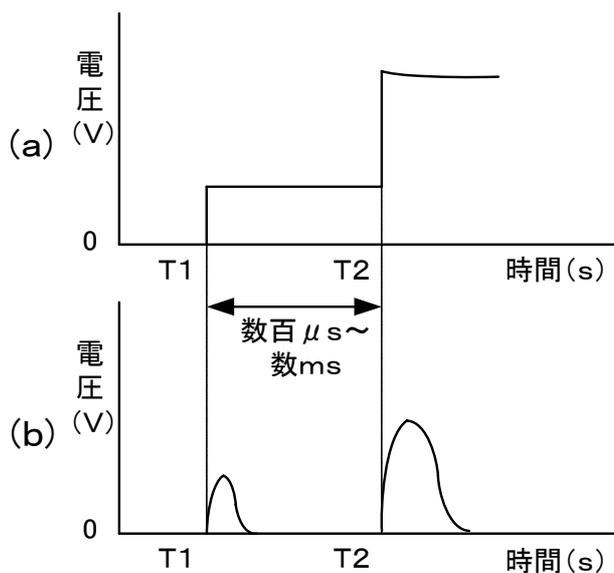


図3 発破器端子電圧変化とセンサー出力の詳細

数百 $\mu$ s～数ms発破電流の動的な時間変化を更に詳しく検討するために、図3(a)に発破器側から見た端子電圧の時間化の詳細を示す。発破器の起爆スイッチが押された瞬間(T1)は過渡的に電流が増えるが電気雷管という電氣的負荷があるので、分圧効果により端子間電圧は低く抑えられる。その後、発破電流により電気雷管の電橋線が1つでも断線すると(T2)に示すように負荷電流が過渡的に減って端子電圧は急増する。

発破電流を監視する磁気センサーには、電流を微分した電圧を出力するものを併用すると(b)のような電圧変化を出力する。電流に比例した電圧を出力する磁気センサーと電流微分型の電圧を出力する磁気センサーを使い分けることで、発破電流の流れ始めの瞬間、発破電流の大きさ、実際に電気雷管の電橋線が発火して電気雷管が起爆して断線した瞬間の3つを捉えることが可能となる。

実際、瞬発電気雷管を用いた起爆試験では、電気雷管の添装薬の起爆、すなわち親ダイとしての起爆は図3中(T2)の時刻となる。電流の流れ始め(T1)と断線(T2)の時間間隔は、おおむね発破電流の大きさに反比例し、数百 $\mu$ s～数msまで異なる。<sup>3)</sup>

単純な分圧法や電流センサーによる計測波形をショットマークとした場合、最大(T1)と(T2)分の時間差を誤差として含んだりすることが考えられる。

さらに実際の通電波形は、このように理想的なものばかりではない。発破器のスイッチ部分のチャタリングによる電流の不安定な立ち上がりや、電橋線の断線後も電線どうしの接触による不完全な導通状態が発生したりするので、これらをも考慮した演算を行えるショットマークを発生させる装置が必要となる。

### 3. まとめ

従来の弾性波探査では、発破電流の通電開始から実際の起爆との時間遅れを解消するために、線爆発型の特殊な電気雷管か、消耗品センサーとなる電線や光ファイバーを必要としていた。

本研究では、電氣的に絶縁されているにもかかわらず掘削発破時の起爆信号を取得する弾性波探査用信号検出回路を開発し、安全かつ高精度に起爆時のショットマーク信号を発生する装置を開発した。

本装置は、実際の掘削発破工程にも影響を与えないので、作業工程中への弾性波探査の組み込みが可能であり、実際に発破工法で掘削を実施している多くのトンネルでの発破振動を利用したトンネルトモグラフィ探査を実施し、その実用性を検証した<sup>1, 2, 4)</sup>。

### 参考文献

- 1) 栗原啓丞ら：掘削発破振動を用いたトンネルトモグラフィ探査の現場適用実績，土木学会第68回年次学術講演会2013
- 2) 村田健司ら：掘削発破を震源とする弾性波探査用信号検出装置の開発，土木学会第68回年次学術講演会2013
- 3) 村田健司ら：特許第3653811号，平成17年3月11日登録
- 4) 宮嶋保幸ら：自動計測によるトンネルトモグラフィ探査を活用した掘削管理，土木学会第70回年次学術講演会2015 講演予定