

論文の内容の要旨

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

氏名 岩野圭太

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に地山が硬岩であっても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では、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、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、実務として発破現象を捉える方法論として、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のみならず、従来の電気雷管による発破を想定するため、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、高精度電子雷管による発破の特徴の整理、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、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、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。また電気雷管による発破振動の低減を模索するため、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。

6 章は結論である。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を扱っており、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とする。従来の発破は振動などの環境負荷の低減の対応が十分でなく適用を断念する場面が多かっただけに、高精度電子雷管の適用および振動波形の再現や波形分析に基づく振動低減の効果確認は、従来の受け身な振動対策から積極的かつ能動的に振動を制御・管理につながるものとする。