

学 位 論 文 題 名

電子遅延式雷管を用いた制御発破工法に関する研究

学位論文内容の要旨

発破は、最も効率的で経済的な岩盤掘削方法として広く用いられているが、発破振動等の公害の発生や機械掘削に比較して破壊精度が低いなどの問題も抱えている。特に、近年は、発破の大型化や周囲環境の変化に伴って発破振動や発破音が大きな社会問題となり、さらに、トンネルなどの地下構造物建設では、NATM 工法の採用や大幅なコスト縮減要求に伴い、計画通りの形状に掘削し、周囲岩盤を損傷しない発破技術が要求されている。すなわち、効率・経済性ととともに振動・騒音や破壊の制御機能を有する高度な制御発破技術が要求されている。

本研究では、上記の要求に応えうる新たな制御発破技術として、発破において発生する波動を相互に干渉させて破壊や振動を制御する技術を開発することを目的とした。特に、発破における波動干渉を実現させるための高精度起爆システム—電子遅延式雷管—を開発するとともに、爆源近傍における波動干渉による破壊制御効果と爆源遠方における波動干渉による振動制御効果を解明し、これらに基づいた高度な制御発破工法を提案した。本論文は序論・結論を含む7章より構成されている。各章の概要は以下のである。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を示すとともに、制御発破に関する既往の研究を展望し、従来技術の問題点を指摘した。

第2章では、発破において波動干渉を実現させるために要求される起爆時間精度とその実現の可能性について考察し、この要求を満足させる起爆システムとして、電子遅延式雷管を開発した。電子遅延式雷管は、遅延時間制御用のICタイマー・スイッチング素子、電気エネルギー蓄積コンデンサーおよび瞬発電気雷管などから構成される。また、性能試験により、電子遅延式雷管は、数秒までの遅延時間において起爆時間誤差の標準偏差 60 μ s の性能を有し、従来の延時薬燃燒式段発電気雷管に比較して起爆時間精度が格段に向上していることを示した。さらに、性能の安定性ととともに耐静電気性能などの安全性も実験的に確認している。

第3章および第4章では、電子遅延式雷管をスムーズプラスティングに適用し、発破孔周囲において応力波を相互に干渉させて岩盤の破壊を制御する方法について論じている。

第3章では、スムーズプラスティングにおける岩石破壊過程を数値解析し、起爆時間精度が掘削面形状や損傷圏寸法に及ぼす影響を明らかにした。まず、強度不均一性と亀裂進展を考慮した動的応力解析法を提案するとともに、そのスムーズプラスティングへの適用法について論じた。そして、解析結果をもとに、起爆時間誤差と岩石内の動的応力場および亀裂進展プロセスとの関係を具体的に明らかにした。特に、電子遅延式雷管の起爆時間精度では、隣接する装薬孔からの応力波が岩盤内で相互に干渉することにより、装薬孔間に引張応力場、岩盤奥部に圧縮応力場が形成されるため、装薬孔間を連結する亀裂が優先

的に伸長するとともに岩盤奥部への亀裂伸長が抑制され、この結果、掘削面の平滑性が向上するとともに岩盤の損傷が抑制されることを明らかにした。

第4章では、小断面および大断面の二つトンネルにおいて、電子遅延式雷管を用いたスムーズブラスティングの現場試験を実施し、その有効性を明らかにした。現場試験では、起爆に電子遅延式雷管と従来のDS段発電気雷管をそれぞれ用いてスムーズブラスティングを行うとともに、レーザー測量や弾性波探査などにより発破後の掘削面形状や岩盤の弾性波速度分布を計測し、電子遅延式雷管起爆はDS段発電気雷管起爆に比較して、掘削面の平滑性が向上し余堀り量が減少すること、岩盤の損傷が大幅に抑制されることなどを検証した。さらに、電子遅延式雷管を使用すると、従来法に比較して起爆コストは増大するが、上記の破壊制御効果を考慮すると、掘削コストはむしろ低減することを指摘した。

第5章および第6章では、電子遅延式雷管を振動制御発破に適用し、段発発破において各段の発破により発生する波動を相互に干渉させて発破振動を抑制する方法について論じている。

第5章では、波動干渉を利用した発破振動の制御工法に関して、制御工法の目指す適用範囲を定め、単発波形の変動要因、特性を理論的ならびに実験的に明らかにした。また、波動干渉に要求される電子遅延式雷管の起爆秒時精度についても考察した。まず、目指す適用範囲は、1孔1段の制御発破から、1孔薬量の削減に移行する段階であることを示した。また、球震源モデルを用いた理論計算と盤打ちおよびベンチ発破の現場実験により、発破設計において重要な因子となる、爆薬種類・装薬量などの発破諸元と発破振動波形との関係を具体的に明らかにした。とくに、単発発破の振動波形は、ある程度以上の距離では、主として地盤の波動減衰特性に依存し発破諸元にさほど依存しないことから、最適遅延時間を一度決定しておけば、その後、発破諸元が変更されても最適遅延時間を変更する必要のないこと、さらに、多孔斉発の場合の振動振幅は単発発破の振動振幅から換算できること、発破において波動干渉を安定的に行うためには、最適起爆時間間隔の10%以下の起爆時間精度を有する起爆システムが必要であることを明らかにした。

第6章では、波動干渉を利用した発破振動制御工法の概念と本工法の核となる単発波形の線形重ね合わせによる段発発破予測シミュレーションの精度を明らかにし、中規模ベンチ発破ならびに大規模ベンチ発破に適用してその実用性と有効性を明らかにした。まず、本工法の概念については、単発発破の振動波形から段発発破において振動を最小化する最適遅延時間を決定し、さらに、電子遅延式雷管により最適遅延時間に制御した段発発破を実現させるものであることを提示した。段発発破予測シミュレーションについては、完全線形重ね合わせを用いることにより、安全側での予測が可能であることを明らかにした。また、発破振動公害が問題となっている二カ所の採石場において、発破振動制御の現場試験を実施し、提案した振動制御発破工法の有効性を明らかにした。特に、電子遅延式雷管を用いて最適遅延時間に制御した段発発破では、従来のMS段発雷管を用いた段発発破に比較して、振動の変位速度振幅が5~8割に低減されることを明らかにした。この結果から、電子遅延式雷管を用いることにより、生産性と環境対策を両立させた発破が可能となることを指摘した。

第7章は結論であり、各章で得られた研究成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 勝比古

副 査 教 授 中 島 巖

副 査 教 授 樋 口 澄 志

副 査 教 授 石 島 洋 二

学 位 論 文 題 名

電子遅延式雷管を用いた制御発破工法に関する研究

発破は、最も効率的で経済的な岩盤掘削方法として広く用いられているが、発破振動等の公害の発生や機械掘削に比較して破壊精度が低いなどの問題も抱えている。特に、近年は、発破の大型化や周囲環境の変化に伴って発破振動や発破音が大きな社会問題となり、さらに、トンネルなどの地下構造物建設では、NATM工法の採用や大幅なコスト縮減要求に伴い、計画通りの形状に掘削し、周囲岩盤を損傷しない発破技術が要求されている。すなわち、効率・経済性ととも振動・騒音や破壊の制御をも考慮した高度な制御発破技術が要求されている。

本研究は、上記の要求に応えうる新たな制御発破技術として、発破において発生する波動を相互に干渉させて破壊や振動を制御する技術を開発することを目的としている。特に、発破における波動干渉を実現させるための高精度起爆ツールを開発し、これを用いた高度な制御発破工法を提案している。以下、本論文各章の成果を要約する。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を示すとともに、制御発破に関する既往の研究を展望し、従来技術の問題点を指摘している。

第2章では、発破において波動干渉を実現させるために要求される起爆時間精度とその実現の可能性について考察し、この要求を満足させる起爆ツールとして、ICタイマー、スイッチング素子およびエネルギー蓄積コンデンサーを内蔵させた電子遅延式雷管を開発している。また、性能試験により、電子遅延式雷管は、数秒までの遅延時間において起爆時間誤差の標準偏差60 μ sの性能を有し、従来の延時燃焼式段発電気雷管に比較して起爆時間精度が格段に向上していることを示している。さらに、性能の安定性ととも耐静電気性能などの安全性も実験的に確認している。

第3章および第4章では、電子遅延式雷管をスームプラスティングに適用し、発破孔周囲において応力波を相互に干渉させて岩盤の破壊を制御する方法について論じている。

第3章では、スームプラスティングにおける岩石破壊過程を数値解析し、起爆時間精度が掘削面

形状や損傷圏寸法に及ぼす影響を明らかにしている。まず、強度不均一性と亀裂進展を考慮した動的応力解析法を提案するとともに、そのスムーズプラスティングへの適用法について論じている。そして、解析結果をもとに、起爆時間誤差と岩石内の動的応力場および亀裂進展プロセスとの関係を具体的に明らかにしている。特に、電子遅延式雷管の起爆時間精度では、隣接する装薬孔からの応力波が岩盤内で相互に干渉することにより、装薬孔間を連結する亀裂が優先的に伸長するとともに岩盤奥部への亀裂伸長が抑制されることを明らかにしている。

第4章では、小断面および大断面の二つトンネルにおいて、電子遅延式雷管を用いたスムーズプラスティングの現場試験を実施し、その有効性を明らかにしている。特に、レーザー測量や弾性波探査などにより発破後の掘削面形状や岩盤の弾性波速度分布を計測し、電子遅延式雷管起爆は従来のDS段発電気雷管起爆に比較して、掘削面の平滑性が向上し余堀り量が減少すること、岩盤の損傷が大幅に抑制されること、などを検証している。この結果、電子遅延式雷管を使用すると、従来法に比較して掘削コストが低減されることも指摘している。

第5章および第6章では、電子遅延式雷管を振動制御発破に適用し、段発発破において各段の発破により発生する波動を相互に干渉させて発破振動を抑制する方法について論じている。

第5章では、波動干渉を利用した振動制御を実現させる上での基礎的課題について理論的・実験的検討を行っている。特に、球震源モデルを用いた理論計算と盤打ちおよびベンチ発破の現場実験により、発破設計において重要な因子となる、単発発破振動波形の特性と再現性、最適遅延時間と発破諸元との関係、多孔斉発発破と単発発破との関係、などを具体的に明らかにしている。

第6章では、波動干渉を利用した振動制御の原理と設計法を示すとともに、発破振動公害が問題となっている二カ所の採石場において、発破振動制御の現場試験を実施し、提案した振動制御発破工法の有効性を明らかにしている。特に、電子遅延式雷管を用いて最適遅延時間に制御した段発発破では、従来のMS段発電気雷管を用いた段発発破に比較して、振動の変位速度振幅が5～8割に低減されることを明らかにしている。また、提案する方法は発破音対策にも有効であることを示し、これらの結果、生産性と環境対策を両立させた発破が可能となることを指摘している。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、高精度な起爆時間制御機能を有する電子遅延式雷管を開発するとともに、波動干渉による破壊制御効果と振動制御効果を明らかにし、これにより高度な制御発破工法を実現させており、爆破工学ならびに岩盤工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。