

学位論文題名

岩質材料の制御破碎とその設計法に関する研究

(Study on Controlled Fragmentation of Rock-like Material and Numerical Design Method)

学位論文内容の要旨

発破は、爆薬の爆発エネルギーを利用して、岩盤・コンクリート構造物を効率的に破碎する技術であり、鉱山開発や土木工事などの大規模な破碎・掘削が必要となる分野において、効率的かつ経済的な破碎法として広く用いられている。特に、近年はコスト削減と品質向上の要求が高まり、例えばトンネル発破では、これまで以上に精度良く設計掘削面を形成しつつ地山残存部への損傷を低減することが望まれている。すなわち、高度な破碎制御機能を有する発破技術が要求されているが、このためには発破における高速破壊現象の機構を解明し、それに基づいて制御破碎設計法を構築することが不可欠である。一方、発破では爆薬を使用するため、その適用には厳しい法規制が課され、さらに発破振動・発破音・発破低周波音等により使用が制限される場合があることも事実である。このような場合、割岩機や静的破碎剤等の代替手段が採用されるが、これらの破碎効率は発破のそれと比較して著しく低い。そこで、最近では、火薬類取締法によって制限されない非火薬類の爆燃を利用する、いわゆる非火薬破碎法が開発されてきている。しかしながら、それによる岩質材料の破碎機構は未解明であり、さらにその破碎設計法も確立されていないのが現状である。以上のように、爆轟・爆燃によらず、これらの高速燃焼反応現象を利用した破碎法における岩質材料の破壊プロセスは未だ未解明な点が多く、その結果、各々の工法における最適設計を考えることが極めて難しいというのが現状である。そこで、本研究では動的破壊プロセス解析に基づき、爆轟および爆燃を利用した岩質材料の高速破碎法における破壊プロセスを解明するとともにその設計法を提案することを目的とした。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を示している。また、岩質材料の動的破壊機構を考える上で重要である動的破壊の載荷速度依存性や岩質材料の動的破壊プロセス解析法、すなわち亀裂進展解析手法に関する既往の研究を展望している。

第2章では、本研究で用いた動的破壊プロセス解析法の概要を示し、破碎対象が不均一な岩質材料である場合の現象の非再現性を考慮するための方法について検討している。特に、本論文で研究対象とする発破等の高速破碎法では、実験による破壊機構の解明には限界があることから、数値解析によるアプローチが重要であること、さらに、数値解析では破碎対象である岩質材料の不均一性に起因した結果のばらつきを考慮することが重要であることを指摘した。そして、材料の不均一性を考慮して亀裂の生成・進展・連結のシミュレーションが可能な動的破壊プロセス解析法を用いて、強度空間分布の異なる複数のモデルに対する数値実験を実施し、それらの統計処理により破碎設計値を決

定する方法を提案した。

第3章では、トンネル最外周制御発破において空孔を配置させた発破法“ガイドホールプラスティング”を対象として、岩盤の破壊プロセスを解明するとともに破断面を平滑に制御する方法について検討を加えた。まず、発破孔からの応力波による隣接円形空孔における応力集中効果を定量的に分析し、空孔径の増大に伴って空孔周囲の引張応力集中は増大するが、その増大率はさほど大きくなことを示した。次に、ガイドホールプラスティングにおける破碎プロセスを解析し、発破孔からの応力波により空孔壁からプレクラックが発生・伸長すること、空孔径の増大に伴ってプレクラック長が長くなり、その結果として平滑な破断面が形成されやすくなることを示し、大口径ガイドホールの有効性を明らかにした。さらにガイドホールプラスティングの試験施工結果を分析し、現場の発破試験結果と数値解析結果がよく一致することを示し、本研究で提案する破壊プロセス解析及び設計法の妥当性を示した。これに引き続き、孔間距離や最小抵抗線が破断面形状特性に及ぼす影響を統計的に分析し、ガイドホールプラスティングの設計指針を示す。

第4章では、放電衝撃により非火薬類を爆燃させ、その圧力により岩質材料を破碎する方法“放電衝撃破碎法”を対象として、爆燃に起因する岩質材料の破壊プロセスとその設計法について検討を加えた。破壊プロセスは載荷特性により極めて大きな影響をうけることから、まず、放電衝撃破碎法で使用されている二トロメタンが装薬孔内で爆燃した場合のガス圧力の発現特性をモデル化する手法を提案する。次に、提案した圧力モデルを用いてコンクリートの破壊プロセス解析を実施し、放電衝撃破碎法における破碎プロセスとその特徴を明らかにした。また、コンクリート供試体を用いた実規模試験の結果と比較して、解析結果は実験で観察された破碎形態と良く一致することを示し、提案したモデル化手法の妥当性を明らかにした。さらに、孔間距離、最小抵抗線長等の破碎設計値と破断面平滑度との関係を定量的に分析し、放電衝撃破碎の最適設計指針を示す。

第5章は結論であり、本研究で得られた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 五十嵐 敏文
副査 教授 藤井 義明
副査 准教授 川崎 了
副査 准教授 児玉 淳一

学位論文題名

岩質材料の制御破碎とその設計法に関する研究

(Study on Controlled Fragmentation of Rock-like Material and Numerical Design Method)

発破は、爆薬の爆発エネルギーを利用して、岩盤・コンクリート構造物を効率的に破碎する技術であり、鉱山開発や土木工事などの大規模な破碎・掘削が必要となる分野において、効率的かつ経済的な破碎法として広く用いられている。特に、近年はコスト削減と品質向上の要求が高まり、例えばトンネル発破では、これまで以上に精度良く設計掘削面を形成しつつ地山残存部への損傷を低減することが望まれている。すなわち、高度な破碎制御機能を有する発破技術が要求されているが、このためには発破における高速破壊現象の機構を解明し、それに基づいて制御破碎設計法を構築することが不可欠である。一方、発破では爆薬を使用するため、その適用には厳しい法規制が課され、さらに発破振動・発破音・発破低周波音等により使用が制限される場合があることも事実である。このような場合、割岩機や静的破碎剤等の代替手段が採用されるが、これらの破碎効率は発破のそれと比較して著しく低い。そこで、最近では、火薬類取締法によって制限されない非火薬類の爆燃を利用する、いわゆる非火薬破碎法が開発されてきている。しかしながら、それによる岩質材料の破碎機構は未解明であり、さらにその破碎設計法も確立されていないのが現状である。以上のように、爆轟・爆燃によらず、これらの高速燃焼反応現象を利用した破碎法における岩質材料の破壊プロセスは未だ未解明な点が多く、その結果、各々の工法における最適設計を考えることが極めて難しいというのが現状である。そこで、本研究では動的破壊プロセス解析に基づき、爆轟および爆燃を利用した岩質材料の高速破碎法における破壊プロセスを解明するとともにその設計法を提案することを目的としている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を示している。また、岩質材料の動的破壊機構を考える上で重要である動的破壊の載荷速度依存性や岩質材料の動的破壊プロセス解析法、すなわち亀裂進展解析手法に関する既往の研究を展望している。

第2章では、本研究で用いた動的破壊プロセス解析法の概要を示し、破碎対象が不均一な岩質材料である場合の現象の非再現性を考慮するための方法について検討している。特に、本論文で研究対象とする発破等の高速破碎法では、実験による破壊機構の解明には限界があることから、数値解析によるアプローチが重要であること、さらに、数値解析では破碎対象である岩質材料の不均一性に起因

した結果のばらつきを考慮することが重要であることを指摘している。そして、材料の不均一性を考慮して亀裂の生成・進展・連結のシミュレーションが可能な動的破壊プロセス解析法を用いて、強度空間分布の異なる複数のモデルに対する数値実験を実施し、それらの統計処理により破碎設計値を決定する方法を提案している。

第3章では、トンネル最外周制御発破において空孔を配置させた発破法“ガイドホールプラスティング”を対象として、岩盤の破壊プロセスを解明するとともに破断面を平滑に制御する方法について検討を加えている。まず、発破孔からの応力波による隣接円形空孔における応力集中効果を定量的に分析し、空孔径の増大に伴って空孔周囲の引張応力集中は増大するが、その増大率はさほど大きくないことを示している。次に、ガイドホールプラスティングにおける破碎プロセスを解析し、発破孔からの応力波により空孔壁からプレクラックが発生・伸長すること、空孔径の増大に伴ってプレクラック長が長くなり、その結果として平滑な破断面が形成されやすくなることを示し、大口径ガイドホールの有効性を明らかにしている。さらにガイドホールプラスティングの試験施工結果を分析し、現場の発破試験結果と数値解析結果がよく一致することを示し、本研究で提案する破壊プロセス解析及び設計法の妥当性を示している。これに引き続き、孔間距離や最小抵抗線が破断面形状特性に及ぼす影響を統計的に分析し、ガイドホールプラスティングの設計指針を示している。

第4章では、放電衝撃により非火薬類を爆燃させ、その圧力により岩質材料を破碎する方法“放電衝撃破碎法”を対象として、爆燃に起因する岩質材料の破壊プロセスとその設計法について検討を加えている。破壊プロセスは載荷特性により極めて大きな影響をうけることから、まず、放電衝撃破碎法で使用されている二トロメタンが装薬孔内で爆燃した場合のガス圧力の発現特性をモデル化する手法を提案している。次に、提案した圧力モデルを用いてコンクリートの破壊プロセス解析を実施し、放電衝撃破碎法における破碎プロセスとその特徴を明らかにするとともに、コンクリート供試体を用いた実規模試験の結果と比較して、解析結果は実験で観察された破碎形態と良く一致することを示し、提案したモデル化手法の妥当性を明らかにしている。さらに、孔間距離、最小抵抗線長等の破碎設計値と破断面平滑度との関係を定量的に分析し、放電衝撃破碎の最適設計指針を示している。

第5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、爆薬および爆燃を利用した岩質材料の制御破碎を対象として、それらの破壊プロセスを解明するとともに合理的な設計法を提案しており、発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。