

学 位 論 文 題 名

Dynamic fracture process analysis of rock and its application to fragmentation control in blasting

（岩石の動的破壊プロセス解析とその発破粒度制御への適用）

学位論文内容の要旨

<Abstract>

The mechanism of dynamic fracture is of engineering importance to break rock efficiently and to control fracture in rock. The knowledge of the mechanism has been demanded on the mining industry to increase productivity and reduce costs, while at the same time reducing the adverse effects of the operation on their neighbors and underground construction to produce an excavation contour without fracturing or damaging the remaining rock. However, it seldom success to predict fragmentation and the expected fracture propagation by means of drilling and blasting as well as controlled blasting because the dynamic fracture involves the complexities of rock inhomogeneity, stress loading, geometry, interaction of stress and crack, location and sequencing of detonation etc..

The topic of the dissertation is dynamic fracture process analysis for verification of dynamic fracture and fragmentation mechanism of rock blasting.

The dissertation is divided into seven chapters:

In chapter 1, the purpose of this dissertation and the literatures related to dynamic fracture and fragmentation in rock blasting are introduced.

In chapter 2, this chapter proposes a dynamic fracture process analysis based on dynamic finite element method and rock fracture mechanics. This is able to describe dynamic fracture process of rock subjected to various loading conditions. To consider physical fracture phenomena, rock inhomogeneity and fracture process zone are employed. A remeshing algorithm is used to model crack initiation, growth and coalescence.

In chapter 3, the dynamic and static tensile strengths of rocks are presented. The differences of the strengths and the strain-rate dependency of the dynamic tensile strength are investigated. In order to verify the differences and the strain-rate dependency, the fracture processes under various loading conditions are analyzed by the proposed dynamic fracture process analysis. These analyses verify that the differences are due to the stress concentrations and redistribution mechanisms in the rock. The rock inhomogeneity also contributes to the difference between the dynamic and static tensile strengths. An increase in the uniformity coefficient stimulates a reduction in the strain-rate dependency; *i.e.*, the strain-rate dependency of the dynamic tensile strength is caused by the inhomogeneity of the rock. The results

support that the observed dynamic tensile strength increased at a high strain rate is caused by arrests due to the generation of a large number of microcracks.

In chapter 4, in order to verify the dynamic fracture mechanism related to a blast induced borehole breakdown, the dynamic fracture process analyses under different waveforms for applied borehole pressure are conducted. The fracture processes are predominantly affected by the rising time increase than the decay time. At a high stress-loading rate, the applied stress field increases the number of crack and the growth of cracks is arrested by the stress released from adjacent cracks. This leads to shorter crack extensions. At a shorter stress-loading rate, a few of predominant crackings are generated during the early portion of the applied pressure. Ultimately, it leads to the longer crack extensions. The dynamic fracture process analysis is extended to one free face blasting, which is general blast pattern. This reveal that the crack-arrested time can be expected from the peak phase time of the reflected wave from the free face. This will provide an insight into an effective fracture control by means of rock blasting.

In chapter 5, in order to estimate fragmentation in bench blasting, two test blasts are performed. The fragment sizes of blasted rocks are estimated by sieving analysis and image analysis. The findings show that rock fragmentation cannot be simply predicted because the fragmentation in bench blasting consists of widely ranged size from fine to coarse. In order to verify fragmentation mechanism and predict optimum fragmentation, a new numerical approach using the dynamic fracture process analysis and image analysis program is proposed and applied to bench blasting. The predicted fragmentations caused by different specific charges, burdens and spacings are discussed and compared with the experimental fragmentations. To investigate optimum fragmentation mechanism the effect of shot delay timin on the rock fragmentation is simulated and discussed. It is pointed out that experimental optimum delay time is related to the interaction of radiating stress waves from the adjacent hole and detonation gas pressurization into the fractures.

In chapter 6, the effect of the gas flow though the fractures due to detonation of explosive on the fracture process of rock is investigated. In order to simulate the gas flowing and pressurization in the fractures, the dynamic fracture process analysis is combined with the finite difference method. The numerical gas velocity agrees well with the experimental velocity. Using the relationship between gas flow and radiating stress wave from the adjacent hole, optimum fragmentation condition with respect to the delay timing in the bench blasting is discussed.

In chapter 7, the results are reviewed and some suggestions for future research are given.

The results provide decisive information about dynamic fracture mechanism of rock and the proposed dynamic fracture process analysis approaches give new insight on the prediction of fracture and fragmentation in rock blasting.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 勝 比 古

副 査 教 授 樋 口 澄 志

副 査 教 授 石 島 洋 二

副 査 教 授 米 田 哲 朗

学 位 論 文 題 名

Dynamic fracture process analysis of rock and its application to fragmentation control in blasting

(岩石の動的破壊プロセス解析とその発破粒度制御への適用)

発破は、最も効率的な岩盤破碎工法として広く用いられてきているが、最近では、経済性と品質の向上さらに環境影響の低減などの要請から、高度な制御発破技術に対する要求が高まってきている。しかし、発破における岩石破壊現象は、岩盤物性、薬種・装薬方法、装薬孔配置、起爆方法など多くの因子に関係した動的現象であるため、発破効果を予測し、破壊を制御するためには、岩石の動的破壊プロセスとそれに及ぼす諸因子の影響を解明することが不可欠である。

本研究では、岩石の動的破壊プロセスの数値解析手法を開発し、発破効果を支配する主要因子である岩石動的強度のひずみ速度依存性、円孔内圧載荷における破壊形態の加圧速度依存性などを明らかにしている。さらに、提案した方法を一自由面発破に適用し、発破起砕物の粒度分布を推定する方法を提案するとともに、発破条件が起砕物粒度に及ぼす影響を分析し、粒度制御発破の最適起爆条件を明らかにしている。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、岩石の動的破壊と発破における岩石破碎に関する既往の研究を展望している。

第2章では、岩石動的破壊現象の数値解析法として、強度不均一性と亀裂進展を考慮した動的有限要素解析法を提案している。とくに、岩石組織に起因する不均一性を表現するために、微視的強度分布の概念を導入している。

第3章では、岩石動的引張強度のひずみ速度依存性とそのメカニズムについて論じている。まず、静的一軸引張試験と動的引張試験法であるホプキンソン効果試験の数値解析を実施し、動的強度は静的強度より大きく、かつ、ひずみ速度に強く依存することを示すとともに、解析された動的強度のひずみ速度依存性や破壊形態は実験結果の傾向をよく表現していることを明

らかにしている。さらに、供試体中の動的応力状態と亀裂進展プロセスとの関係を分析し、引張強度のひずみ速度依存性は微視的強度の不均一性に起因した亀裂進展プロセスの変化として説明されることを明らかにしている。

第4章では、無自由面破碎および一自由面破碎を対象として、装薬孔内作用圧力の時間変化が破壊形態に及ぼす影響について論じている。まず、破碎形態は主として圧力の立上り時間に影響され、立上り時間の増大に伴って動的破碎形態から準静的・静的破碎形態に遷移することを示し、その遷移条件とメカニズムを明らかにしている。

第5章では、ベンチ発破における起砕物粒度に関する実験的・数値解析的検討の結果をまとめている。まず、実際のベンチ発破における起砕物の粒度分布を分析し、その特徴を明らかにするとともに粒度分布計測への画像処理の適用法を明らかにしている。次に、ベンチ発破の動的破壊プロセス解析を実施し、引張亀裂の進展形態と装薬孔周囲の圧縮破壊圏体積から起砕物の粒度分布を推定する方法を提案するとともに、推定された粒度分布は実測値の傾向をよく表現していることを示している。さらに、これらの結果に基づいて、装薬条件・装薬孔配置・起爆時間差が起砕物粒度に及ぼす影響を定量的に明らかにしている。

第6章では、応力波とともに爆発生成ガスの亀裂内流動を考慮した破壊プロセスの数値解析法を開発している。具体的には、2章で提案した方法に、応力波で生成した亀裂群から装薬孔と連結する亀裂ネットワークを抽出し、この亀裂ネットワークに対してガス流動を計算する機能を付加させている。また、解析結果から、応力波により亀裂が生成した後、亀裂内へのガスの流入により亀裂が拡大すること、亀裂内ガス流速は装薬孔近傍を除けば音速以下であり、この値は他の実験報告例と一致することなどを明らかにしている。さらに、ガスによる亀裂拡大速度と応力波の伝播速度との関係から、粒度制御のための最適起爆時間差を予測する方法を提案している。

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、岩石の動的破壊プロセスの解析法を提案し、これにより岩石の動的強度特性と破壊形態の特徴を明らかにするとともに、発破における破碎粒度を予測・制御する方法を提案しており、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。