

	の ま た つ や			
氏 名	野 間 達 也			
授 与 学 位	博士 (工学)			
学位授与年月日	平成11年3月25日			
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項			
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 地球工学専攻			
学位論文題目	液圧膨張式割岩工法を用いた硬岩トンネルの静的掘削法に関する研究			
指 導 教 官	東北大学教授 松木 浩二			
論 文 審 査 委 員	主査	東北大学教授	松木 浩二	東北大学教授 齋藤 清次
		東北大学教授	林 一夫	東北大学教授 岸野 佑次

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒論

都市域における硬岩トンネル掘削では、振動・騒音を伴う発破工法の採用が制限される傾向にあり、全面的に無発破機械掘削となる事例が増加している。

硬岩トンネルの無発破機械掘削は、単一機械掘削と割岩工法に分類されるが、岩盤の圧縮強度が100MPaを超過するような硬岩トンネルを数百m程度機械掘削する場合には、大幅な工法変更が不要である割岩工法が最も適している。

割岩工法を用いてトンネルを掘削するには、トンネル切羽に人工的な自由面形成した後、一次破碎(割岩)、二次破碎を行う必要がある。ここで、この工法で重要となる点は、効率的な自由面形成工法と割岩工法の開発であり、さらに、割岩工法をより経済的な方法とするために、理論に裏付けられた破碎設計法の確立が不可欠である。

本研究は、硬岩トンネルの無発破割岩掘削を主対象として、①新しい静的破碎工法の開発、②新しい自由面形成工法の開発、③破碎設計法の構築を目的として行った。すなわち、新しい静的破碎工法として、1)簡便・効率的に、2)安全に、3)経済的に岩盤を破碎することができる、アクアスプリッターを主体とした破碎工法を開発した。また、新しい自由面形成工法として、汎用のドリルジャンボを使用した自由面形成効率の高い単一孔連続穿孔による自由面形成工法を開発した。次に、これらの工法を実際のトンネル掘削に適用し、施工性・経済性ともに従来工法と比較して高いことを実証した。最後に、割岩工法の経済的な施工を可能とする破碎設計法を提案した。

本研究の要旨を各章毎にまとめると以下のとおりである。

### 第2章 液圧膨張式割岩機の開発

現在までに種々の静的破碎工法が開発されてきたが、一般的に油圧クサビに代表されるような破碎時間が短い工法は装置が大掛かりとなり、また静的破碎剤のように装置自体が軽微な工法は、破碎時間が必要な場合や安全性に問題が生じるといった問題を抱えている。

以上の問題に対処するために、アクアスプリッターを開発する際のコセプトとしては、①簡便・

効率的に岩盤を破碎可能、②安全に岩盤を破碎可能、③経済的に岩盤を破碎可能な工法となることを目指した。

静的破碎剤以外で簡便に岩盤を破碎する工法としては、液圧膨張式割岩工法があげられるが、既存のこの方法の最大の問題点は、1~2回で破損してしまうため、工法としての経済性が成立しない点にある。アクアスプリッターの開発時には、これを考慮に入れ、繰り返し使用が可能な方式とする点に重点を置いた。このため、アクアスプリッターの形状は高耐圧ゴムチューブ・プロテクトラバー・鋼製載荷板の三層構造とした。また、実用的で経済的な破碎システムとするために、アクアスプリッターの圧力と流量をコンピュータ制御できる油圧ユニットを開発した。次に、アクアスプリッターの破碎能力を検証するために、鋼管内にアクアスプリッターを挿入した載荷実験を行い、内圧 9.8MPa を加えることにより載荷板頂点部にほぼ 39.2MPa の圧力が加わることを確認した。さらに、80×40×70cm の花崗岩ブロックの破碎実験を実施し、アクアスプリッターが実用上十分な破碎性能を有することを検証した。

実際の岩盤への施工例として、明かり掘削用アクアスプリッターを用いて転石処理およびトンネル下半掘削を行ったところ、開発した破碎システムにより、無騒音・無振動で効率的な一次破碎を行うことができる事がわかった。また、アクアスプリッターの転用回数は 40 回以上が確保されているため、従来の液圧膨張方式と比較して経済的であり、安全性も確保されていることを検証した。

### 第3章 単一孔連続穿孔による自由面形成工法の開発

これまで開発されてきた自由面形成工法には、1)自由面形成に時間がかかりすぎる、2)自由面形成のための専用機が必要である、といった問題点がある。

本研究で開発した自由面形成工法は、専用機を用いずに200MPa以上の圧縮強度の岩盤にも施工可能な方法として、ドリルジャンボの能力を十分に利用した単一孔連続法を採用した。ここで、単一孔を連続的に穿孔する場合、穿孔時にはロッド・ビットが隣接する既設孔方向に孔曲がりしやすい性質がある。これを回避するため、連続孔を穿孔する際に隣接する既設孔にガイドとなるロッド（以下SAB (Spinning Anti-Bend) ロッドと称す）を挿入し、ビットをSABロッドに接触させこれを打撃しながら穿孔する方式を用いた。

連続孔穿孔手順としては、まずSABロッドを既設孔に挿入し、穿孔を開始する。このとき、ビットは孔曲がりによってSABロッドに接触し、これを打撃しながら穿孔すると同時に、ビットの回転力によりSABロッドが回転しながら所定の位置まで穿孔する。順次SABロッドを挿入して穿孔を繰り返すことにより連続孔を形成する。

開発した工法の特徴を要約すると、以下ようになる。

汎用ドリルジャンボにSABロッドを装着するのみの新しい自由面形成工法を開発した。自由面形成のための専用機は不要であり、一台のドリルジャンボによりトンネル掘削施工に必要な全ての穿孔作業が可能である。また、SABロッドにビットが接触・打撃しながら連続孔を穿孔するため、ロックブリッジが残らず、連続性の優れた自由面形成が可能であった。さらに、自由面形成速度の平均値は、一軸圧縮強度100~150MPaで 4.5m<sup>2</sup>/h、一軸圧縮強度150~200MPaで 4.1m<sup>2</sup>/h、一軸圧縮強度200~250MPaで3.7m<sup>2</sup>/hであった。

### 第4章 硬岩トンネルでの施工例

本章では、第2章で述べた液圧膨張式割岩工法、第3章で述べた自由面形成工法を実際の硬岩トン

ネル掘削で施工した結果を述べており、以下の結果が得られた。

新たに開発した自由面形成工法は、実際のトンネル掘削においても汎用のドリルジャンボにより施工可能である。このため、トンネル掘削のすべての穿孔作業を1台のドリルジャンボで施工可能であり、経済的である。また、形成される自由面の連続性が優れているために一次破碎に有利であり、自由面形成能力も既存の工法と比較して優れている。

アクアスプリッターによる一次破碎については、孔間隔は小さくなるが穿孔ビットが小口径であるために一孔あたりの穿孔時間が短縮され、これより全体的な割岩孔穿孔時間が、従来工法と同等かまたは短縮された。次に、油圧クサビはウェッジの挿入長分を確保するために割岩孔を破碎予定長さよりも深く穿孔する(1.7m程度)必要があるのに対し、アクアスプリッターは1.2~3m程度の穿孔で十分である。また、一度の割岩作業により長大なき裂を発生させること可能なため、効率的な一次破碎ができる。さらに、着脱装置の開発により、安全な一次破碎が確保された。

## 第5章 破碎設計法

前章まで示してきたように、本研究で開発した静的破碎工法、自由面形成工法は、実施工に十分適用可能であることが確認できた。しかしながら、静的破碎工法全体の問題として、破碎設計法が確立されていないことが挙げられる。

岩盤の静的破碎とは、割岩機を用いて岩盤にき裂を発生・成長させることにより岩盤そのものの強度を低下することであり、トンネルを対象とした場合、水平に配置した割岩孔間を完全にき裂で連結させることで目的が達成される。

本章では、アクアスプリッターにより発生するき裂進展について注目し、境界要素法を用いてき裂先端の応力拡大係数を解析し、線形破壊力学に基づいて岩盤の破碎に必要な力と最小抵抗線・割岩孔間隔の関係を求めることより破碎設計法の開発を試みた。本章の結果を以下に要約する。

二次元および三次元解析結果より、モードIに注目した場合、き裂の進展に伴う無次元応力拡大係数の最小値が存在することを明らかにした。ここで、三次元解析結果における最小無次元応力拡大係数は、二次元解析結果の63~66%程度であった。また、三次元解析結果より、定性的き裂進展形状を明らかにした。さらに、実際の三次元条件における最小無次元応力拡大係数を、二次元解析で得られた値の60%程度に見積もることにより、対象となる岩盤の破壊靱性値  $K_{Ic}$  に基づく破碎設計法を提案した。

## 第6章 結論

本章では、本研究で得られた内容を要約し、本論文を総括した。

開発した静的破碎工法と自由面形成工法からなる本静的破碎システムを提案した破碎設計法に基づいて運用することにより、従来工法と比較して経済的で合理的な割岩工法による硬岩トンネルの掘削施工が可能となることを示した。

## 審査結果の要旨

近年、都市域における硬岩トンネルを無振動・無騒音で掘削する必要が増大している。本研究では、このための方法として大幅な工法変更が不要である割岩工法に注目し、新しい静的破碎工法と新しい自由面形成工法よりなる硬岩トンネルの静的掘削法を開発し、実際のトンネル掘削に適用してその優れた施工性・経済性を実証するとともに線形破壊力学に基づく理論解析により破碎設計法を提案した。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、静的破碎工法として開発した液圧膨張式割岩システムについて述べている。本割岩システムは、高耐圧ゴムチューブ、プロテクトラバー、鋼製載荷板の独特な三層構造である割岩機、ならびに高耐圧ゴムチューブの圧力と流量をコンピュータ制御する油圧ユニットから成る。本割岩システムを実際のトンネル下半掘削などへ適用することにより、従来、1~2回であった同種割岩システムの寿命を40回以上に延ばすことに成功し、本割岩システムが安全性のみならず経済的にも優れていることを実証した。これは、極めて有用な成果である。

第3章では、単一孔連続穿孔による独特な自由面形成工法の開発について述べている。本工法は、汎用ドリルジャンボにガイド用ロッドを装着するのみの工法であり、一台のドリルジャンボによりトンネル掘削施工に必要な全ての穿孔作業が可能である。さらに、ビットが孔曲がりを起こしながらガイド用ロッドに接触・打撃しながら穿孔するため連続性の優れた自由面形成が可能であること、ガイド用ロッドの挿入孔が練り粉の排出を促進するため硬岩に対する自由面形成速度が優れていることを実証した。これらは、有用な成果である。

第4章では、開発した液圧膨張式割岩工法と自由面形成工法を用いて硬岩トンネルを掘削施工した実績に基づき、本静的掘削法が施工性・経済性に優れていることを実証している。特に、液圧膨張式割岩工法による一次破碎については、孔間隔は従来より小さくなるものの穿孔ビットが小口径であるために一孔あたりの穿孔時間が短縮され、結果として全体的な割岩孔穿孔時間が従来工法と同等かまたは短縮されたこと、ならびに一度の割岩作業により長大なき裂を発生させることが可能なため、効率的な一次破碎ができることを示した。

第5章では、2次元および3次元境界要素法を用いて液圧膨張式割岩工法により発生するき裂先端の応力拡大係数を解析し、線形破壊力学に基づいて岩盤の破碎に必要な圧力と最小抵抗線・割岩孔間隔の関係を求めることより破碎設計法を提案している。モードIのき裂進展に注目した場合、き裂進展に伴う無次元応力拡大係数に最小値が存在することから、最小無次元応力拡大係数に注目してき裂が隣接孔間で連結するための条件を解析し、対象岩盤の破壊靱性値に基づく破碎設計法を提案している。これは、今後のより総合的な掘削設計法確立のための基礎となる有用な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、独特の静的破碎工法と自由面形成工法からなる硬岩トンネルの新しい静的掘削法を開発し、その実用性を実証するとともに合理的な破碎設計法の基礎を確立したものであり、地殻工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。