

氏名	橋田俊之
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和60年3月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第5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)機械工学専攻
学位論文題目	岩石の破壊靱性評価と水圧破碎き裂の進展挙動に関する研究
指導教官	東北大学教授 高橋 秀明
論文審査委員	東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 小林 良二

## 論文内容要旨

### 第1章 序 論

地殻深部からの熱エネルギー抽出を目的とした地熱エネルギー開発が各国で活発に進められている。とりわけ地下刺激技術法として水圧破碎を用いる地熱開発が注目されており、特定の深さに要求される寸法の地下き裂を工学的に設計することが必要とされている。このためには、地下き裂の進展挙動の破壊力学的解明が必要不可欠となり、本研究の主目的である岩石の破壊靱性値の評価ならびにき裂進展過程の破壊力学的記述が重要な課題となる。この検討においては、原位置から採取可能な破壊靱性試験片は小型であることを考慮すると、まず変形ならびに破壊挙動に及ぼす試験片寸法効果に充分注意を払う必要がある。

本研究は以上の背景に基づき、高温乾燥岩体の一つの対象岩体である花崗岩を用い、米国材料試験規格に準拠した破壊靱性試験を実施し、非線形破壊力学、J積分、に基づく破壊靱性値ならびにき裂進展抵抗の評価を行う。用いる試験片は寸法効果に注目するために、各種寸法を有するCT試験片(1T~8TCT)ならびに3点曲げ試験片(1T~20TBend)である。さらに、実験室規模(寸法1m以内)の模擬水圧破碎実験を実施し、破壊靱性試験で得られた結果との比較検討を行う。

## 第2章 岩石の破壊靱性試験とき裂端における非線形挙動

本研究で用いる花崗岩は全て福島県飯館村前田産のものである。小型破壊靱性試験片を用いた破壊靱性値の評価を目的とするために、まず本章では小型試験片で観察される基本的な破壊特性につき記す。破壊靱性試験に際しては、き裂端での微視破壊過程を検出するために同時にAE計測を実施し、さらに高感度の光弾性効果を有する透明強誘電体セラミックス、 $(\text{Pb}_{0.91}, \text{La}_{0.09})(\text{Zr}_{0.65}, \text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ 、を皮膜材料として用いき裂端の観察ならびにひずみ場の測定を行った。変形および破壊挙動には顕著な非線形性が観察され、この非線形性はAE計測およびき裂端の観察結果に基づき、き裂端に形成される微視割れに起因することを示し、さらにき裂端に微視割れ領域が形成されてはじめて巨視き裂が進展開始をするという破壊過程を見出した。さらに強誘電体セラミックスを用いた測定結果により、この微視割れ領域内のひずみ分布はJ積分により記述できることを示し、J積分に基づく破壊靱性値の評価が妥当であることを示した。

## 第3章 コンプライアンス法による有効接線縦弾性係数の評価

本章においては、微視割れ形成開始時の平均引張り応力を用い破壊靱性試験片に対して弾性限を定義し、コンプライアンス法に基づく有効接線縦弾性係数 $E'$ の評価を試みる。この $E'$ の値は破壊靱性評価において重要となる。初期接線縦弾性係数の定義に従い、 $E'$ の算出においては初期試験片コンプライアンスを用いる。初期き裂として切欠きを導入した切欠き材を採用し、コンプライアンス法により評価した $E'$ は試験片寸法ならびに形状に依存せず、かつ丸棒引張り試験で測定した縦弾性係数と一致する。このことにより、コンプライアンス法により縦弾性係数を測定することの妥当性を与え、破壊靱性試験と同時に縦弾性係数を評価することを可能にした。さらに、疲労予き裂材に関しては試験片コンプライアンスに及ぼす疲労予負荷の影響が著しく、 $E'$ の評価においては疲労予き裂材は不適であることを示した。

## 第4章 非線形破壊力学パラメータ（J積分）に基づく破壊靱性値の評価

本章では、第2章で示した知見に基づきJ積分を用いた平面ひずみ破壊靱性値 $K_{IC}$ の評価法につき記す。き裂進展過程の観察結果を基に、巨視き裂進展開始点の検出法としてAE法が有用であることを示し、この負荷段階に対応するJ積分値を $J_{iAE}$ と表記した。第3章で得られた結果に基づき初期き裂として切欠きを用いる。有効な破壊靱性値 $J_{iAE}$ を与える限界切欠き幅が平均結晶粒径にほぼ対応することを実験的に見出し、鋭い切欠きを用いることにより正確な破壊靱性評価ができることを示した。以上の結果を背景にし、 $J_{iAE}$ 値は試験片寸法ならびに形状に依存しないことを示し、材料固有の破壊靱性値として採用できることを明らかにした。さらに、線形破壊力学に基づく結果の整理と比較検討することにより大規模岩体内の地下き裂に対しては線形破壊力学が適用可能であることを示し、この進展挙動の把握には次式により換算される平面ひずみ破壊靱性値 $K_{IC}$ を採用することが合理的であることを明らかにした。

$$K_{IC} = \sqrt{E' J_{iAE}} \quad (1)$$

ここにE'は第3章で評価した初期有効接線縦弾性係数を用いる。この初期縦弾性係数を用いる妥当性を、変形挙動の試験片寸法効果の観点より示した。さらに、試験片寸法に対する微視割れ領域の規模の相対的大きさの観点より、岩石材料に線形破壊力学が適用可能となる条件、小規模マイクロクラッキングの考え方を提案した。

## 第5章 J積分に基づくき裂進展抵抗の評価

岩石材料においても安定き裂進展段階が存在することを示し、き裂初生抵抗の評価において有用性が確かめられたJ積分をき裂進展過程の記述においても用い、J積分抵抗曲線として評価した。J積分抵抗曲線は試験片寸法および形状に依存しないことを示し、充分なき裂進展段階の後(き裂進展量 $\Delta a \geq 100\text{mm}$ )にはJ積分値が一定でき裂が進展することを見出すことにより、この一定のJ積分値を評価することの重要性を指摘した。小型試験片ではこの充分なき裂進展段階を得ることが不可能であることを考慮して、さらにfinal stretchモデルに基づくJ積分抵抗曲線の記述を試み、次式にて実験結果が表現できることがわかった。

$$\frac{\Delta a}{\Delta} = \log \frac{1 - \frac{J_i}{J_\infty}}{1 - \frac{J}{J_\infty}} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta a$ はき裂進展量であり、 $J_i$ ならびに $J_\infty$ はそれぞれ巨視き裂進展開始点のJ積分値および充分なき裂進展段階に達した後のJ積分値である。 $\Delta$ は本岩石材料に対して28.8mmと求まる。上式に基づくことにより、 $J_i$ ならびに短いき裂進展段階のJ積分抵抗曲線を小型破壊靱性試験片を用いて評価すれば、J積分抵抗曲線の形状ならびに $J_\infty$ を予測することが可能となる。ここで得られた結果は、前章までに述べた知見とあわせ、岩石の破壊靱性評価法の観点より図1で示した流れ図のようにまとめることができる。

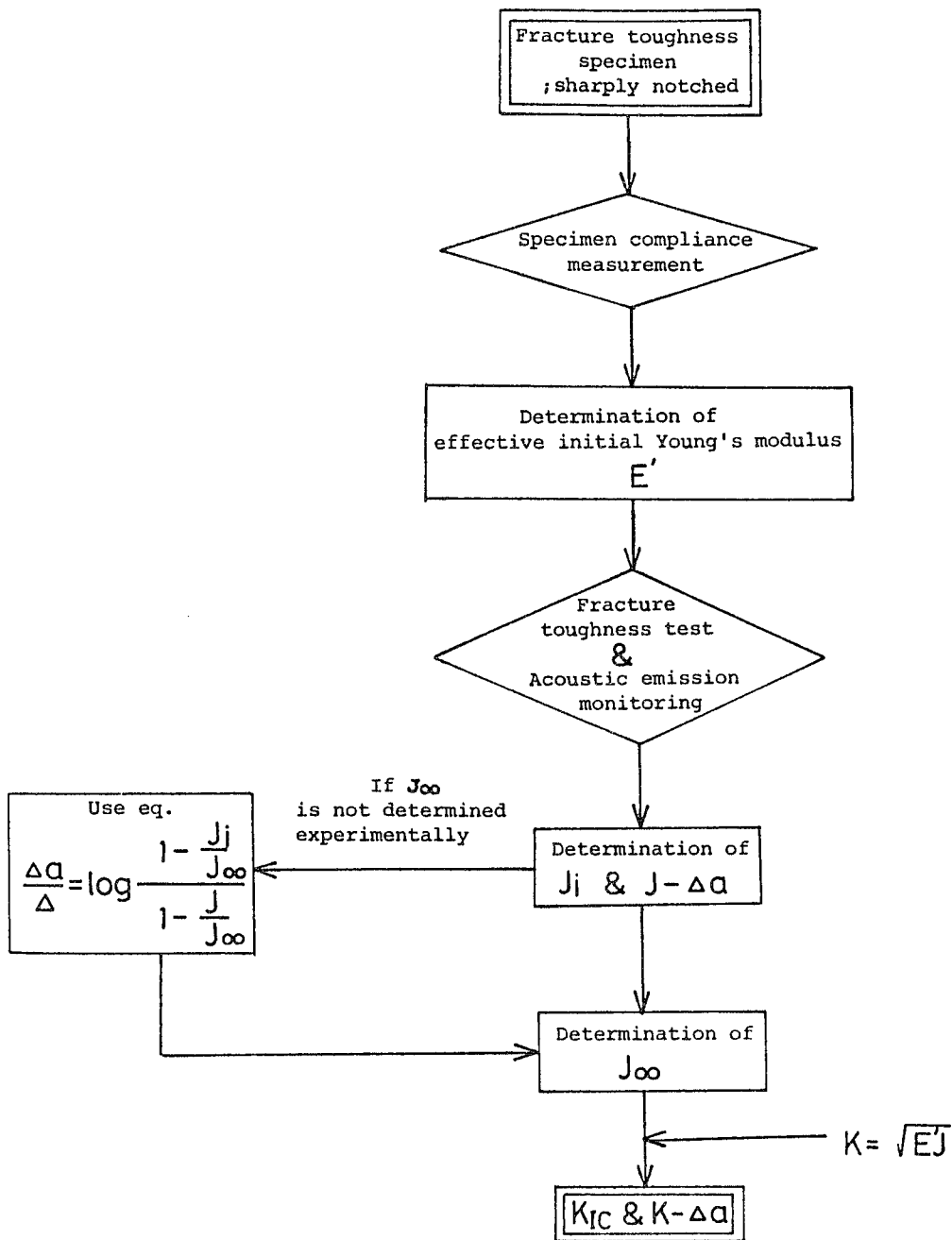
## 第6章 破壊靱性値ならびにき裂進展抵抗に及ぼす岩石組織の影響

破壊靱性値ならびにき裂進展抵抗曲線に及ぼす異方性の影響を調べ、異方性に関しても破壊靱性試験において考慮に入れる必要があることを示し、とりわけE'の異方性に関する依存性が大きいことを示した。

さらに、final stretchモデルに基づくJ積分抵抗曲線の記述が、異なる岩石微視組織を有するものに対しても適用が可能であることを示した。

## 第7章 小規模水圧破碎実験

大規模水圧破碎における水圧破碎き裂進展挙動の把握のための予測試験として実施した破壊靱性試験の結果をふまえ、本章においては実験室規模の模擬水圧破碎実験を実施し、破壊靱性試験で得た知見と比較検討する。まず水圧破碎き裂の進展過程に関する基礎的知見として、水圧破碎き裂はボアホール両壁より進展し、その形状はほぼ円き裂として進展することを示した。得られたとき裂



⊗ 1

進展に伴うボアホール内圧の変化挙動を説明し、さらに水圧破碎実験においてもき裂進展抵抗曲線を得る方法を記述しK抵抗曲線として評価した。ここでも試験片寸法効果に注目した検討を行い、小規模マイクロクラッキング状態下においてはJ積分抵抗曲線により水圧破碎き裂進展挙動を把握することが可能であることを示した。

## 第8章 岩石の破壊靱性試験と水圧破碎き裂進展

現場水圧破碎で測定される基礎的關係はボアホール内圧の経時変化であり、水圧破碎き裂の進展挙動の解明にはき裂進展に伴うボアホール内圧の定量的予測に向けた検討がとりわけされなければならない。本章では、前章で得た知見をふまえ破壊靱性試験の結果得られたJ積分抵抗曲線を用い、水圧破碎き裂進展に伴うボアホール内圧の変化挙動を予測し、実験結果と対比する。第5章で示した final stretch モデルに基づくJ積分抵抗曲線（式(2)）は、小規模マイクロクラッキング条件下では次式に変換することができる。

$$\frac{\Delta a}{\Delta} = \log \frac{1 - \left(\frac{K_i}{K_\infty}\right)^2}{1 - \left(\frac{K}{K_\infty}\right)^2} \quad (3)$$

上式は地下き裂の進展挙動を解析するためのK抵抗曲線となる。これにより予測されるき裂進展に伴うボアホール内圧の変化は、本実験結果の変化挙動をよく記述することができることを示し、J積分抵抗曲線の測定が重要であることを指摘した。

## 第9章 結 び

本章は、本研究の主たる結果をまとめたものである。

## 審査結果の要旨

乾燥高温岩体からのエネルギー抽出を目的とした新しい地熱開発においては、ボーリングによる地熱貯留層までの掘削などに代表される従来型の地熱開発とは異なり、深部地殻に熱交換面となるき裂を作成し、人工貯留層を設計することが重要であり、このための破壊力学的研究が注目されている。この地下き裂の作成には水圧破碎法の応用が最も有望視されているが、地熱開発のための技術として開発途上のものであり、基礎研究も含めて研究開発の問題が多い。本論文は地熱開発のための水圧破碎法の基本となる岩石の破壊靱性評価法とそれの小規模水圧破碎実験への応用に関するもので、全編9章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の位置づけを述べている。

第2章では岩石の非線形破壊について、アコースティック・エミッションならびに光弾性皮膜法を併用し、実験的に検討している。ここでは巨視的き裂進展に先行するマイクロクラック形成が非線形挙動の主要因であることを明らかにし、さらに金属材料試験で採用されている非線形破壊力学パラメータ（J積分）が岩石の場合にも適用できることを示している。

第3章では小型試験片を用いたコンプライアンス法による岩石の初期接線縦弾性係数の新しい測定法を提案している。この測定法自体極めて簡便で、かつ得られた数値が地下き裂評価の基礎量となるなど、実用的価値も極めて高い。

第4ならびに5章では地下の大規模なき裂進展を記述するための破壊物性値（破壊靱性値）をボーリングコアサンプル程度の小型試験片により評価する方法を提案している。ここでは上述のJ積分を用いて、き裂初生ならびに伝播抵抗を整理しているが、特に試験片寸法効果について、小規模ならびに大規模マイクロクラッキングの概念を用いて巧みに説明している。これは新しい知見である。

第6章は岩石特有の破壊の異方性に関する破壊力学的考察である。

第7ならびに第8章では一辺20 cmから100 cmの立方体岩石ブロックを用いた小規模水圧破碎実験について述べている。実際の水圧破碎で見られるポアホールからの三次元的なき裂進展挙動を小型試験体で詳細に観察し、第4、5章で述べた破壊靱性試験片の結果と対比、検討している。さらに小型試験片で決定した破壊靱性値を用いて水圧破碎き裂の進展挙動を予測する手法についても言及するなど、新しい試みとして注目に値する。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、新しい地熱開発のための地下き裂設計法の基本となる岩石の破壊靱性測定法ならびにその評価法を提案したものであり、地熱工学ならびに機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。