

超臨界水環境下における花こう岩の破壊および透水特性と水圧破碎挙動に関する研究

著者	高橋 亨
号	2417
発行年	1999
URL	http://hdl.handle.net/10097/7690

氏名	たか はし とおる 高 橋 亨
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成12年3月23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) 機械知能工学専攻
学位論文題目	超臨界水環境下における花こう岩の破壊および透水特性と水圧破碎挙動に関する研究
指導教官	東北大学教授 橋田 俊之
論文審査委員	主査 東北大学教授 橋田 俊之 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 松木 浩二 東北大学教授 林 一夫

論文内容要旨

第1章 緒言

近年のエネルギー需要の増加に伴い、エネルギーの安定供給ということが急務の検討課題となっており、次世代の代替エネルギーとして、多用でかつクリーンな自然エネルギーの利用が進められている。なかでも地熱エネルギーはこれまでの開発実績やその膨大なエネルギー埋蔵量から考えて、次世代のエネルギー供給源としてきわめて有望である。

特に日本においては近年の地熱資源探査により、深度4km以下の比較的浅い領域において温度が500℃を越える有望な地熱地帯が発見され、今後の利用に期待が寄せられている。このような大深度地熱地帯から熱抽出を行うには、水圧破碎技術による人口き裂の作成により熱水の流路を確保する必要があるが、温度が500℃を越える領域においては熱抽出媒体となる水が超臨界状態になっているものと予想される。熱抽出媒体となる超臨界水は通常の水と比較して熱容量が極めて多きいため、地熱エネルギーを効果的に抽出できることが期待されている。しかしながら超臨界地熱貯留層の開発はこれまでの地熱開発においては未経験の高温に加えて、超臨界水との相互作用による岩体の破壊特性や水圧破碎による貯留層形成プロセスが大きく変化することが予想され、超臨界水環境下における岩体の特性を把握することが急務の検討課題となっている。

以上のような背景のもと、本研究においては超臨界水環境下における岩石特性の変化に着目し、まず超臨界水環境下における岩石のせん断破壊試験を行うことにより、その温度・圧力依存性について検討を行った。特に熱履歴にともなう微視き裂の形成が岩石の破壊挙動におよぼす影響に着目して検討を行った。次に地下岩体の透水特性について検討を行うため、超臨界水環境下における透水試験を実施し、温度による透水特性の変化と超臨界水の影響について検討を行った。さらに超臨界水環境下において水圧破碎実験を実施し、得られた知見をもとに水圧破碎による破壊挙動を予測する水圧破碎機構線図の作成を行った。

第2章 超臨界水環境下における破壊特性

まず初めに、第2章においては超臨界水環境下における岩石の破壊特性を得るために、超臨界水環境下における岩石の三軸圧縮試験によるせん断破壊試験を行い、せん断破壊による貯留層形成機構を想定したせん断強度の温度依存性について検討を行った。

地下の貯留層設計においては、水圧破碎時における地下岩体のき裂進展挙動を把握することが必要不可欠である。そのため、高温・高圧水環境下における岩石の破壊挙動を知ることが重要な課題となっている。本研究では地下4000m、温度500℃の超臨界貯留層を模擬できる三軸圧縮試験装置を用いて実験を行った。実験装置は封圧が最大150MPa、間隙圧が最大50MPa、温度が500℃の環境下での実験が可能であり、想定している温度・圧力領域を十分模擬できるものである。供試材として、直径29mm、長さ90mmの円柱形に加工した福島県飯館村産の花こう岩を用いた。これは地表に露出している花こう岩である。

常温・大気圧下に存在する花こう岩を用いて地下環境を模擬した実験を行うと、岩石は多種の鉱物より構成されているため、鉱物間の熱膨張率の違いにより温度上昇過程において岩石中に熱微視割れが発生し、地下環境にある岩体を正確に模擬することができない可能性がある。そこで本研究ではあらかじめ大気圧下において 500℃までの熱処理を行うことにより、熱履歴を加えることによる熱微視割れの岩石強度におよぼす影響について検討を行った。

まず温度特性については、最大のせん断応力の温度依存性について検討を行った結果、最大せん断強度は 300℃付近までは大きな変化は観察されなかったが、その後 350℃を越える温度領域において急激に強度低下を生じている様子が観察された。また熱履歴を加えていない intact 試験片と熱履歴を加えた試験片とを比較した結果、両者には強度的な差は観察されず、同じような温度依存性を示すことが観察された。熱処理試験片は予め 500℃まで加熱されていることから、温度上昇にともなうせん断強度の低下は熱微視割れの影響によるものではないと考えることができ、本研究で得られたせん断強度の温度変化は本花こう岩に固有の温度依存性を与えているものと判断することができる結果が得られた。

第 3 章 超臨界水環境下における透水特性

次に、第 3 章においては、地下岩体からの熱抽出の観点からもう一つ重要な特性である岩石の透水特性について、円筒試験片を用いた透水試験による実験的検討を行った。

岩体の透水特性の把握は、地下貯留層からの熱抽出量を予測するために必要不可欠な要素である。第 3 章においては、超臨界水環境下における岩石の透水特性に関する知見を得ることを目的とし、岩石に熱履歴を加えることによる透水率への影響と高温水の影響、および温度依存性について検討を行った。

透水実験においては、長さ 90mm、外径 45mm の円柱試験片の中心に直径 5mm のボアホールを設けた円筒試験片を用いた。供試材は前述の花こう岩である。本研究では封圧が 150MPa、ボアホール圧が 300MPa、温度が 600℃まで作用させることができる超臨界地下ボイラー模擬装置を用いた。実験は、所定の温度、圧力を作用させた後にボアホール内部に一定流量で水を注入し、ボアホール圧が一定となったときの流量と、ボアホール内圧と封圧の圧力差を測定することにより岩石の透水率を求めた。透水率の測定においても熱履歴を加えることによる熱微視割れの影響について検討を行うため、予め 500℃まで加熱した試験片と intact 試験片との比較を行うことにより、熱履歴の透水特性におよぼす影響について検討を行った。

実験においては、温度を室温から 3℃/min で昇温し、100℃毎にボアホールに水を一定流速で注入してボアホール圧力を測定して透水率の計算を行った。測定の結果、熱処理を行った試験片、intact な試験片ともに、温度上昇にともない透水率の上昇の様子が観察された。熱処理試験片と intact 試験片との透水率の差は初期の状態においては若干の差が見られたが、その後はほぼ同じ傾向で変化の様子が観察された。温度上昇にともなう透水率の上昇の要因を検討するため、intact 試験片と透水試験後の試験片、および大気圧下で熱処理を加えただけの試験片の各々について薄片を作成し、本花こう岩の主要鉱物である石英、カリ長石、斜長石について微視き裂形成の様子を観察した。その結果、石英に関しては各試験片ともに微視き裂の形成の様子に大きな変化は観察されなかった。一方、カリ長石、斜長石においては、intact 試験片に比較して熱処理を加えたものは熱微視割れが比較的多く発生している様子が観察され、さらに透水試験を行った試験片においては顕著に微視き裂密度が増大している様子が観察された。本研究で観察されたように長石類が水環下において非常に微視き裂が卓越していることから、この長石類が本花こう岩の約 60%を占めることにより、温度上昇にともなう透水率の上昇が観察されたものと考えられる。また熱処理した試験片と比較して透水試験を行った試験片はより顕著に微視き裂が発達していることから、岩石中に微視き裂が生じる過程において、水の存在が重要な役割を果たすことが推察でき、したがって地下の超臨界貯留層においても水を注入することにより微視き裂の増大が期待され、透水率の増加に伴いより大きな抽熱量が期待されるものである。

第 4 章 超臨界水環境下における水圧破碎実験

岩石の破壊特性、透水特性について検討を行った結果、超臨界水環境下においても岩石は脆性破壊することが明らかとなり、また高温状態においては岩石中への水の浸透が卓越することが明らかとなった。これは水圧破碎を行ったときにも温度・圧力条件によっては脆性破壊が生じたり、あるいは浸透の卓越により破壊が生じないことを示唆しており、その破壊機構の直接的な解明が検討課題となる。したがって第 4 章においては、超臨界貯留層における水圧破碎挙動に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、超臨界水環境下における水圧破碎実験を行い、圧力および温度変化による水圧破碎形態について検討を行った。

水圧破碎実験においては、第3章と同じ実験装置を用いて実験を行った。試験片の形状および寸法も同様である。水圧破碎実験においては、封圧を作用させた状態において昇温し、ボアホール内に一定流速で水を注入して、温度、注入流速、応力状態を変化させたときの水圧破碎挙動の様子を観察する。

まず温度25℃、注入流速が5.0mm³/secの状態の水圧破碎試験を行ったときは封圧100MPaに対してボアホール内圧が113.9MPaに達したところで水圧破碎が生じた。しかしながら、同じ封圧、注入流速条件において温度を600℃として水圧破碎実験を行うと、ボアホール内圧は封圧と同じ100MPaに達したところでそれ以上のボアホール内圧の上昇は観察されなかった。これは透水試験で観察されたように、高温領域においては岩石の透水率が大きく、ボアホール内圧の上昇よりも岩石中への水の浸透が卓越するためであると考えられる。そこで温度を500℃とし、注入流速を200mm³/secと上昇させて水圧破碎実験を行うと、ボアホール内圧は最大106.5MPaまで上昇し、水圧破碎き裂を生じさせることができた。よって超臨界水環境下においてもボアホール内への注入流速を増大させることにより、水圧破碎き裂を生じさせることが可能であることが示された。

次に封圧を100MPa、温度を500℃とし、軸圧を封圧より高い200MPaとして水圧破碎実験を行ったところ、三軸圧縮試験を行った試験片に見られるようなせん断型のき裂が生じている様子が観察された。これは軸圧が高いことにより試験片内にせん断応力が生じ、またボアホールからの水の浸透により岩体中の間隙圧が上昇することにより有効応力が低下することによりせん断破壊が生じたものと考えられる。

第5章 水圧破碎機構線図の作成

本研究で得られた知見をもとに、水圧破碎時の破壊形態を予測するための水圧破碎機構線図の作成を行った。超臨界水環境下における水圧破碎挙動は、その温度、圧力条件により、1. 開口型の水圧破碎き裂が形成される場合、2. せん断方水圧破碎き裂が形成される場合、3. 透水率の増加により浸透が卓越し、き裂進展が生じない場合に分類できることが明らかとなった。よって本論文において得られた実験結果をもとに開口き裂が生じる条件、せん断破壊が生じる条件、浸透が卓越し破壊が生じない条件をそれぞれ定義し、本実験で用いた円筒試験片における水圧破碎機構線図を作成した(図1)。本手法による水圧破碎機構線図と実験結果とを比較するとほぼ一致した結果を得ることができ、本手法の有効性を示すとともに、破壊条件を定義することにより実フィールドにおける水圧破碎挙動も予測可能であることを示すことができた。

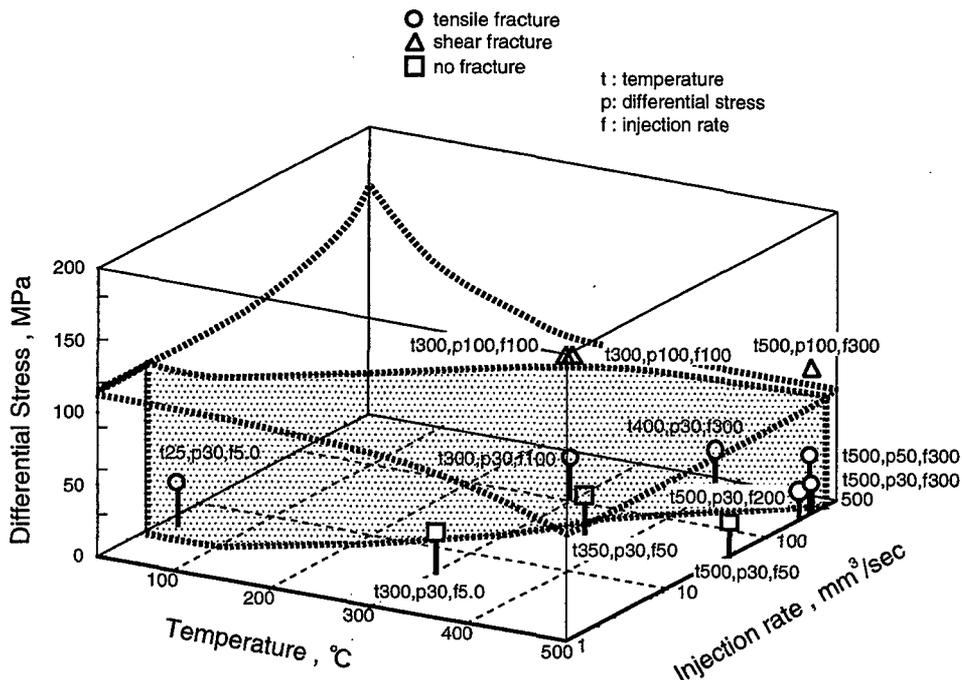


図1 水圧破碎機構線図

審査結果の要旨

既存地熱貯留層の直下に広がる高温岩体からの抽熱が、地殻エネルギー抽出量の増大に大きく貢献できるものと期待されている。近年の調査では、未利用の 350 °C を越える高温岩体には天然き裂が乏しいこと、ならびに抽熱に関与する水が超臨界状態にある場合も存在することが示されている。しかしながら、このクラスの岩体における人工貯留層の形成機構については未解明である。

本論文は、大深度高温岩体における水圧破碎挙動の解明を目的に、温度 600 °C、圧力 100 MPa までの超臨界水条件を含む水環境下において花こう岩を用いた破壊および透水試験、さらに模擬水圧破碎試験を実施し、それらの結果をまとめたもので全編 6 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景を述べている。

第 2 章では、三軸圧縮試験を行うことによりせん断強度の温度依存性を評価した結果について述べている。従来の研究では検討されていなかった加熱に伴う熱微視割れのせん断強度に及ぼす影響に注目した実験を行い、熱微視割れの影響を除きうる封圧が存在することをはじめて見出し、花こう岩に固有の温度依存性を明らかにしている。

第 3 章では、円筒内圧試験片を用いて透水率の温度依存性を評価すると同時に、600 °C の水環境下においては注水に伴い主要構成鉱物である長石粒内に数多くの微視き裂が発生することを示している。これは新しい貯留層形成方法を提供するもので重要な知見である。

第 4 章では、模擬水圧破碎試験を実施することにより、温度、封圧、注入流量に依存して、開口型あるいはせん断型き裂が形成される場合、さらにき裂が発生せず透水が卓越する場合のあることを明らかにしている。

第 5 章では、第 2-4 章の結果を総合することにより、温度、差応力、注入流量に基づく水圧破碎機構線図を提案し、3 つの貯留層形成機構の発生条件を定量的に表現している。また、注水に伴う岩体中への透水挙動の解析を行うことにより、抽熱に効果的な多孔質型貯留層が形成されうる可能性が示唆されている。これは貯留層形成プロセスを解明する上で重要な知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、花こう岩を用いた室内模擬試験に基づき、超臨界水条件下ある大深度高温岩体の水圧破碎機構を明らかにしたものであり、機械工学ならびに貯留層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。