

氏名	酒井 昇
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和63年7月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和24年9月 東北大学大学院特別研究生（前期）修了
学位論文題目	高温下における岩石の破壊特性の評価に関する研究
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 八嶋 三郎

論文内容要旨

第1章 緒言

地熱開発においても、地層処分においても高温、高圧、水環境が予想され、前者においてはき裂の発生、進展、後者においてはき裂の保持、抑止が重要な課題となる。このように、き裂の発生と進展、または、き裂の抑止と保持を人為的に制御するには、地下き裂設計の観点に立脚した力学的取扱が前提となる。しかしながら、現段階では、こうした前提は著しく立ち遅れ、まだ経験的要素に支配されているのが現状である。したがって、地下き裂を工学的に設計する技術の開発は今後の重要な課題であり、その達成には高温、高圧、水環境下における岩石の力学的特性の把握が必要である。本研究では材料力学の分野において基本的試験事項に属し、地熱開発ならびに地層処分を実施する上で急務と見なされる高温下における一軸圧縮試験、高温水環境下における三軸試験、高温下における岩石の破壊靱性に関する引き裂き試験、加熱冷却の繰り返しによる熱衝撃疲労試験の各装置を試作し、秋吉大理石、稲田花崗岩、荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩および米待砂岩などの岩石試料について各試験条件下における力学的特性、とくに、破壊特性ならびに破壊靱性の評価に関して検討した。なお、この種の試験は、従来三軸試験に見られる高温高圧を除けば、せいぜい高温、または常温下において実施された程度で、本研究で実施したような三軸試験における高温高圧水環境、引き裂き試験における高温、熱衝撃疲労試験における急熱急冷などの条件下における試験の類例はほとんど見られない。

第2章 高温一軸圧縮試験による岩石の破壊特性の評価

高温下における岩石の基本的特性を求めると同時に、対比するためにも、常温で一般的に用いられる一軸圧縮試験で実施することが有効と考えられる。試験に当たり、秋吉大理石、稲田花崗岩、荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩からなる円柱形試験片（ $\phi 25 \times 50 \text{mm}$ ）を縦型中空円筒形の電気炉内で加熱し、そのまま試験温度、所定時間保持して一軸圧縮試験に供する。この際、予備試験により、昇温による非低常熱応力に試験片が破損されることの無いと認められた昇温速度、 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ に制御し、試験温度は20, 150, 300, 450, 600°C に保持した。荷重は上部パンチを固定し、これに対するラムの上に球座、受圧器、下部パンチ、試験片を重ね、軸線を揃えて一定量の油をラムへ送るひずみ制御で圧縮する。このように応力-ひずみ線図を計測し、さらに試験温度と破壊強度、試験温度とヤング率、試験温度とひずみの関係で整理する。まず、各岩石の破壊強度と実験温度の関係について、試験温度の上昇に伴って圧縮強度は江持熔結凝灰岩では増加し、荻野凝灰岩では 300°C まで減少して以後増加に転じ、秋吉大理石と稲田花崗岩では減少している。こうした傾向は試験温度-割線ヤング率においても同様であり、試験温度-ひずみでは逆な傾向を示す。このような傾向を示すのは、碎屑岩では脱水により膠結、焼成し、これに伴って圧縮強度が増加するのに対して、結晶質岩では構成鉱物の熱膨張により粒界、粒内にき裂、空隙が発生し、圧縮強度が減少するためと見なされる。また、実験温度の上昇に伴って破壊強度が、江持熔結凝灰岩において増加し、荻野凝灰岩において一旦減少して上昇に転ずるが、これは江持熔結凝灰岩は構成鉱物の変質が少なく直ちに脱水、膠結が始まるのに対して、荻野凝灰岩では粘土化、沸石化など、構成鉱物の変質のため間隙水、吸着水、結晶水の脱水が終わるまで膠結、焼成が始まらず、この間は強度は減少するためと考えられる。

第3章 高温水環境三軸試験による岩石の破壊特性の評価

高温、高圧、水環境と考えられる地下深所における岩石の破壊特性を評価するには地圧状態を模擬しうる高温水環境三軸試験機が有用と考えられる。試験に際して三軸釜を試作し、釜内に無被覆で試験片（ $\phi 38.7 \times 77.5 \text{mm}$ ）を設置し、封圧媒体として水を用いて水圧ポンプとブルトン管圧力計で封圧を上げながらハイドロパルス圧縮試験機で加圧する。試験封圧は0, 100, 200, $250 \text{kgf}/\text{cm}^2$ の4段階とした。加熱は釜の中に挿入されたカートリッジヒータで行いサイリスターユニットを用いて $40^\circ\text{C}/\text{h}$ の速度で、試験温度を20, 100, 200, 250, 300°C まで上昇する。荷重とひずみの関係はハイドロパルス圧縮試験機に内蔵されたローセルと差動トランスで計測する。

試験片に作用する有効応力は主応力差であり、この最大主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ） $_{\text{max}}$ とひずみとの関係を、a) 常温下における各封圧について、b) 試験封圧 $100 \text{kgf}/\text{cm}^2$ 下における各温度について、この2つの場合について試験すると、a) においては、立ち上がり非線形部分が増加しているものの圧縮強度は、ばらつきを考慮すればほぼ等しく、b) においては、試験温度の高いものほど圧縮強度応力は減少し、破壊後も急に崩落することなく、非脆性的挙動を示す。a), b) の結果を圧縮強度応力-試験温度の関係で整理すると、圧縮強度は 100°C までは大した差異がないが、これを越えると比例的に急減少する。また、乾燥状態において同じ種類の岩石に対して筆者ならびに他の

研究者が行った高温一軸圧縮試験の結果と比較すると、高温水環境下に行った本試験の結果のほう
が大幅に減少している。

第4章 高温引き裂き試験による岩石の破壊特性の評価

水圧破碎において荷重一定でき裂が進展するわけではなく、また、対象岩体は、いわゆる、高温乾燥岩体で、高温乾燥状態が多いと考えられる。よって、高温下における岩石の引き裂き試験は地熱開発において有用である。試験に際し、箱型電気炉の内で来待砂岩、稲田花崗岩の板状試験片(200×150×20mm³)を速度12.5℃/hで制御しながら昇温して試験温度20, 100, 200, 300℃に所定時間保持する。ついで、予め試験片に刻み込まれた切り欠けヘスプリターの顎を差込みハンドルを回して拡大し試験片を引き裂く。この顎に受圧器、カンチレバーを取り付け、荷重-開口変位の関係を計測し、これから開口変位-き裂長さ線図を作成してコンプライアンスの勾配を求め、既存の計算式に代入して応力拡大係数を求め、応力拡大係数-き裂長さ線図を作成する。各岩石とも各温度について、き裂長さ85mmを越えると応力拡大係数が一定となる。これが求める破壊靱性値である。さらに、破壊靱性値と温度の関係を求めると、来待砂岩は100℃で下降し以後上昇し、稲田花崗岩は温度上昇とともに低下している。こうした傾向に関しては高温一軸圧縮試験において述べた考察がそのまま本章でも適用できるものと思われる。

第5章 加熱冷却熱衝撃疲労試験による岩石の破壊特性の評価

地熱開発、地層処分何れにおいても急熱急冷による熱衝撃疲労破壊が予想される。したがって、こうした岩石の熱衝撃疲労による破壊特性を知ることが不可欠である。本研究では、電気炉とその下部に設置した水槽の間に試験片を昇降させ、加熱冷却による熱衝撃を繰り返す。その繰り返し回数は5, 25, 125, 625回として、試験温度は常温, 150, 300, 600℃とする。しかしながら、秋吉大理石、稲田花崗岩については600℃では試験開始後間もなく崩壊するので450℃でも試験した。試料岩石の種類ならびに試験片の形状寸法は高温一軸圧縮試験におけると同様である。試験の後、破壊の様態を観察し、見かけ密度 ρ 、P波速度 V_p を測定し、一軸圧縮試験を行い応力-ひずみ線図から圧縮強度 S_c 、50%割線ヤング率 E 、線形部の傾き、非線形部100kgf/cm²における割線ヤング率 E' を求める。

各岩石のき裂形態に差異があるが、これを様態により分類して縦軸を温度 T 、横軸を冷却回数 N として両対数紙に記入すると、各様態境界は平行線となり、発生前、発生、合体、破壊の各領域に細分される。各岩石について、これらの平行線を、温度 T と冷却回数 N との関係で表すと、式(1)、(2)がえられる。

$$T = A_i N^{-k} \quad (1)$$

ただし、 N ：加熱冷却の繰り返し回数

T ：加熱温度

A_i ：定数 ($i=1, 2, 3$ はき裂の発生、合体、破壊を示す)

k ：勾配

$$N = C_i T_i^{(1/K)} \quad (2)$$

ただし、 $C_i = A_i^{(1/K)}$

これらの係数 A_i 、 K_i は関連して温度 T によるき裂の伸展の目安となり、 C_{i+1}/C_i は繰り返し数 N に関連してき裂の発生の目安となる。また、圧縮強度 S_s と 50% 割線ヤング率 E_{s0} 、または、 S_c と P 波速度 V_p との対応を検討すると、 E_{s0} は良く対応するが、 V_p は江持溶結凝灰岩において必ずしも良好とは言えない。一方、応力-ひずみ線図の線形部の傾斜は各岩石によってほぼ一定となる。これは、応力-ひずみ線図は非線形部から始まり線形部に移行するが、試験温度が高く加熱冷却の繰り返し回数が多ければ多いほど、き裂、空隙の発生が多く、非線形部がこれらのき裂、空隙を閉じる過程でき裂、空隙をこれ以上閉鎖しえぬ段階が直線部になると考えられる。また、応力-ひずみ線図における非線形部から線形部への漸移帯、多分に熱衝撃疲労が残留している 100 kgf/cm^2 レベルにおける割線ヤング率 E' と各試験温度、各繰り返し回数においてほとんど一定値を示す見かけ密度 ρ とから計算した $\sqrt{E'/\rho}$ と V_p との関係を検討すると、かなり良く対応する。以上から V_p を計測することにより熱衝撃疲労を類推することが可能と見なされる。

第 6 章 結 論

以上、各章で述べてきたように、本研究においては、地熱開発、地層処分には不可欠と考えられる地下き裂の発生、伸展、または、保持、抑止について、これを人為的に制御し、工学的に設計するための基礎資料とも言うべき岩石の力学的特性、とくに、破壊特性の評価に関して、単純応力下においては、高温一軸圧縮試験、高温水環境三軸圧縮試験、破壊靱性に関する高温岩石の引き裂き試験により、また、繰り返し応力下においては、加熱冷却の繰り返しによる熱衝撃疲労試験により、それぞれ地下深所の条件を模擬して、その力学的特性を解明し、その評価法について提言している。

審査結果の要旨

高温岩体地熱開発あるいは放射性廃棄物地下保管など地下の岩体を対象とした国家規模の開発プロジェクトがいくつか実施されているが、いずれの場合にも高温における岩石の変形ならびに破壊挙動を把握することが重要課題となっている。

本論文は上述の岩石の破壊挙動を高温下における一軸圧縮試験，高温水環境下における三軸圧縮試験，高温下の引き裂き試験ならびに加熱冷却繰返しの熱衝撃疲労試験などに分けて実施し，それらの結果をとりまとめたもので，全編6章よりなる。

第1章は序論で研究の位置づけを述べている。

第2章では4種類の岩石（大理石，花崗岩，凝灰岩など）について高温から600℃の範囲で標準圧縮試験を実施し，その変形ならびに破壊挙動に著しく影響し，結晶岩質の大理石，花崗岩の場合には高温になる程ヤング率や強度は低下し，破壊ひずみは増加し，一方堆積岩質の凝灰岩では全く逆の傾向が観察された。これらの温度依存性，岩質依存性が加熱過程あるいは試験中の試験片内の微視割れ形成と良く対応していると結論した知見は注目して良い。

第3章は高温岩体地熱開発や放射性廃棄物地下保管技術開発において重要となる温度300℃，封圧200気圧の高温高圧水環境中3軸圧縮試験装置の試作例の紹介である。ここで用いた岩石は花崗岩であるが，破壊強度ならびにヤング率は共に水の存在により著しく低下すると報告している。

第4章では砂岩と花崗岩の引き裂き試験による300℃までの高温破壊靱性試験の結果について述べている。破壊靱性の温度依存性を2つの岩石の構成鉱物ならびに微細構造の差より説明するなどこれまでにない新しい見方である。

第5章は岩石の熱衝撃疲労試験に関するものである。ここでは4種類の岩石（大理石，花崗岩，凝灰岩など）について600℃までの温度範囲で急加熱急冷繰返しの熱サイクルを与え，その後音速測定，圧縮試験を実施し，熱衝撃繰返し回数の増加と物性値の変化について注目すべき関係を得ている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は，高温下における岩石の破壊特性の評価法に関する基礎的知見を収集し，地下岩体の地下き裂評価法を確立する上で重要な貢献をしており，岩石力学，岩石破壊力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。