

Ⅲ-314

岩石の力学的特性に及ぼす温度の影響

三井建設(株) 正会員 ○木山 保、喜多治之
動力炉・核燃料開発事業団 佐藤稔紀、青木和弘
北海道大学 石島洋二

1. はじめに

地下岩盤内の熱水貯蔵や圧縮空気貯蔵時の断熱圧縮による温度上昇、あるいは高温岩体発電システム等、岩盤の安定性に及ぼす熱の影響を把握しなければならない地下構造物が近年多く検討されている。これらに関連して、岩石の強度・変形特性に及ぼす温度の影響については多く報告されている。しかし、粘着力・内部摩擦角や破壊後挙動に関する検討例は少ない。本報では、花崗岩を用いて、室温から200℃の範囲で一軸および三軸圧縮試験を行い、粘着力・内部摩擦角を含めた強度特性および破壊後挙動まで含めた変形特性に及ぼす温度の影響について検討した結果を報告する。

2. 試料および試験装置

試験に用いた花崗岩は、茨城県笠間市産の稲田花崗岩である。試料の長軸がリフト面の法線と一致するように直径50mm、長さ100mmに整形した。試料は、温度履歴の影響を排除するために1ヶ月以上真空脱気を行い、乾燥状態とした。

試験装置は、デジタルサーボコントロール機能を有するMTS社製815(容量450kN)を用いた。本試験装置は、三軸セルの外側に取り付けられたバンドヒータにより封圧媒体のオイルを加熱して、最高200℃の雰囲気下で圧縮試験を行うことができる。軸荷重は、ひずみゲージタイプの三軸セル内ロードセルによって測定する。軸ひずみは、軸載荷アクチュエータ変位計と供試体側面に取り付けられ軸ひずみ計とを併用して測定し、横ひずみは、試料外周に巻き付けるチェーン式の周方向変位計によって測定する。試験温度は、三軸セル内の熱電対により測定し、試験中一定温度になるように制御される。

3. 試験方法

試験温度は、室温、60、90、120、160、200℃の6段階とし、設定封圧は各試験温度とも大気圧、10、20および30MPaの4段階である。試料は、これらを組み合わせた24ケースについて、それぞれ各1個準備した。

試験方法を示す。まず、熱膨張による荷重が加わらないように試料を三軸セルにセットし、封圧媒体のオイルを注入した。次に、一軸圧縮試験の場合は、三軸セル内の温度を設定値までおよそ50℃/hrの加熱速度で上昇させた。三軸圧縮試験の場合は、所定の封圧に設定した後に設定温度まで加熱した。設定温度に到達した後も数時間放置し、変位計等の出力が安定するのを確認した後に軸載荷を開始した。軸載荷は、周方向の変位速度が0.02mm/min、つまり横方向のひずみ速度に換算して約 2.1×10^{-6} /secとなるように制御した。

4. 試験結果および考察

まず、各試験温度の下で得られた完全応力-ひずみ特性の例として、封圧30MPaにおける軸差応力-軸ひずみ線図および軸差応力-横ひずみ線図をそれぞれ図1、図2に示す。軸差応力-軸ひずみ線図における載荷初期の段階では、160℃および200℃のコンプライアンスが大きく、非線形性が顕著である。強度破壊点以降の破壊後領域では、すべての温度で軸ひずみが減少する領域が出現しクラスII特性を示す。しかし、160℃以上になると軸ひずみのスナップバック(戻り量)が小さくなる。軸差応力-横ひずみ線図をみると、低い温度では強度破壊点前後の曲線がなめらかに上に凸になっているのに対し、160℃以上になると強度破壊点直後に急激に応力が低下している。また、強度破壊点での軸載荷開始からの横ひずみの大きさは、160℃になると小さくなる。これらの傾向は、いずれの封圧でも認められた。

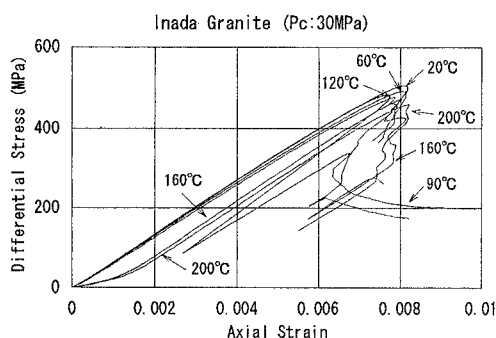


図1 封圧30MPaにおける軸差応力-軸ひずみ線図

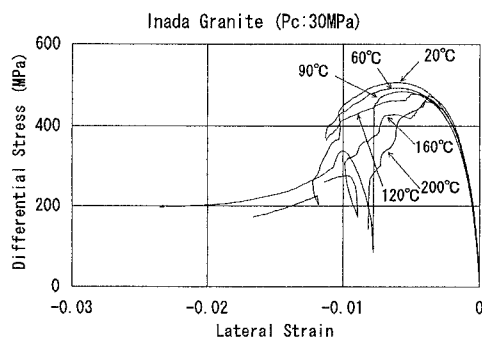


図2 封圧30MPaにおける軸差応力-横ひずみ線図

次に、稲田花崗岩の力学的物性値と温度との関係について検討する。図3は、稲田花崗岩の圧縮強度と温度との関係である。各封圧とも、温度の上昇にしたがって圧縮強度は減少する。200℃では、室温の圧縮強度に比べて70～90%に減少する。これらの強度に関する試験結果から求めた粘着力と内部摩擦角と試験温度との関係を図4に示す。粘着力は温度の上昇とともに減少し、200℃では室温の値の約70%になる。一方、内部摩擦角は温度によって変化しない。ヤング率（圧縮強度の30%から50%の応力における接線ヤング率の平均）と温度との関係を図5に示す。一軸圧縮試験では、温度の上昇にともなって減少する傾向が認められる。三軸圧縮試験では、160℃までほとんど変化しないが、200℃になると数%減少する。ポアソン比（圧縮強度の30%から50%の応力における平均）と温度との関係を図6に示す。一軸圧縮試験ではバラツキが大きく明確な傾向は認められないが、三軸圧縮試験では120℃以上になると温度の上昇にともない若干減少する傾向がみられる。

高温下では花崗岩の構成鉱物粒子の熱膨張が異なるため粒子間に熱応力が発生し、マイクロクラックが粒界あるいは粒内に形成されることが考えられる。マイクロクラックの発生による構成粒子間の結合力の低下が、圧縮強度および粘着力の低下として現れたと推察される。内部摩擦角はクラック表面のすべりに対する摩擦に関連していると仮定すると、内部摩擦角が温度によって変化しないことから、本試験の温度範囲では熱応力によりマイクロクラックは増加するもののクラックの表面特性までは変化していないことになる。このことは、鉱物組織は変化していないことを示唆するものと考えられる。

また、160℃以上で熱応力により増加したマイクロクラックは、軸載荷初期にその多くが閉口するため、コンプライアンスが増大すると考えられる。軸差応力-横ひずみ線図でみられた強度破壊点直後の応力の急激な低下や軸差応力-軸ひずみ線図においてみられたスナップバックの減少は、熱応力によるマイクロクラックの成長から巨視的な亀裂への速やかな形成と関連していると推察される。

5. おわりに

稲田花崗岩は温度上昇にともなって圧縮強度、粘着力の低下が顕著であるが、内部摩擦角は変化しない。また、160℃以上では軸載荷初期のコンプライアンスの増大や破壊後挙動の変化がみられる。これらは、温度上昇にともなう熱応力によるマイクロクラックの増加が原因であると考えられる。今後さらにこれらを明らかにするためには、マイクロクラックの発生や成長に関する微視的な観察や弾性波速度の変化などの調査を進める必要がある。

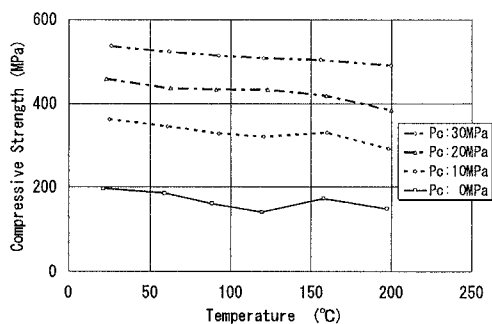


図3 稲田花崗岩の圧縮強度と温度との関係

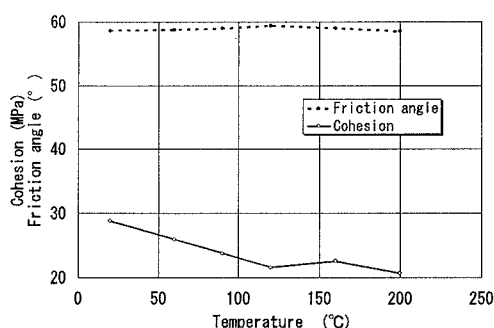


図4 稲田花崗岩の粘着力および内部摩擦角と温度との関係

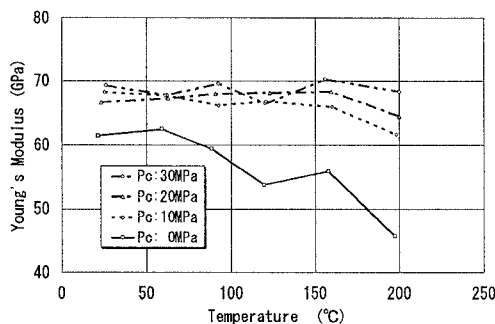


図5 稲田花崗岩のヤング率と温度との関係

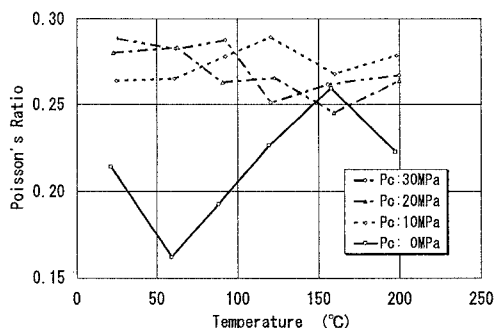


図6 稲田花崗岩のポアソン比と温度との関係