

論文の内容の要旨

論文題目 熱環境における岩石の力学・水理学特性および岩盤空洞の挙動

氏 名 木 下 尚 樹

岩盤が熱の影響を受ける施設として放射性廃棄物地層処分、高温蒸気貯蔵、圧縮空気貯蔵、TRU 処分などが提案・検討されている。これらの岩盤空洞は温度環境が変化するのに加え、熱に起因して周辺岩盤の応力状態や地下水環境の変化も生じる。本研究では、このような状態を熱環境と称している。

省エネルギー対策の一環として、毎日のごみ焼却等で発生する排熱を利用して水を熱水に変え、一般家庭への給湯、地域暖房、温水プール、ビニールハウス等多目的に利用すれば、地域還元もできるという点で、地域の過疎化対策やごみ焼却場の立地等にも有効である。多目的に熱水を使用する場合、使用量が一日の時間帯や季節によって変動することから、安定供給のための一時的な貯蔵を行う施設が必要となる。熱水の貯蔵方法としては、地山岩盤内に空洞を設け一時貯蔵することが考えられる。この方法は、土地の立体的有効利用や地上環境への影響が小さいこと等で利点がある。また、地方都市では地形的に都市近郊に山地が迫っていることが多く、地山岩盤を利用した下水処理場や美術館などの施設が建設されていることから、地方都市近郊の地山岩盤の利用方法の一つとして考えられる。本研究ではこれを熱水貯蔵システムと呼ぶ。また、空洞内の水の想定温度は 100℃である。

わが国では 2011 年度現在、ごみ焼却施設からの余熱を温水や蒸気、発電などで有効利用している施設の割合は、全国で約 7 割であり、発電、温水・熱供給、地域暖房等に利用されている。しかし、利用量は発生熱量の 4 分の 1 程度に留まり、未利用排熱の有効利用が望まれている。

熱水貯蔵システムと同様の研究事例として、発電所の夜間余剰蒸気を岩盤空洞内に熱水として貯蔵することが提案され、技術的および経済的検討により実現可能性が示されているが、高温状態の岩盤の力学特性・熱物性とそれに基づく岩盤空洞の安定性評価や周辺地下水の挙動を明らかにすることなどが課題であるとされている。

前述の通り、熱環境下の岩盤空洞においては空洞が熱源となって周辺岩盤に非定常の温度分布が生じ、それに起因して熱応力が発生し周辺岩盤の応力分布が時間的に変化するた

め、それらを考慮した空洞の長期安定性評価が課題となる。そこで、本研究では熱水貯蔵システムを想定し、以下の通り熱環境における岩石の力学・水理学特性および岩盤空洞の挙動について検討を行なった。

安定性評価を行なうために熱環境下の岩石の力学特性および熱物性を把握し温度依存性を評価しておく必要がある。また、一日の使用量や季節により熱水貯蔵量変動することによって空洞周辺岩盤は高温の温度履歴を受けることになる。このため、温度履歴を受けた岩石の強度・変形特性も必要である。

そこで、典型的と考えられる5種類の岩石の高温下における強度・変形特性および熱物性値を実験により求め、物理的性質や含水状態の違いがこれらに及ぼす影響を考察した。その結果、温度の上昇に伴い、強度および弾性係数は低下する温度依存性がみられた。これは温度上昇に伴う岩石を構成する鉱物粒子の熱膨張率の不一致によってマイクロクラックが発生し、また潜在的マイクロクラックが拡大されることが原因であると考えられる。弾性波伝播速度も同様な傾向が得られ、力学特性の結果を裏付けているものと考えられる。熱物性である熱拡散率および熱伝導率の温度依存性は小さくほぼ一定の値であった。

つぎに、熱サイクル試験装置にて岩石供試体に高温の温度履歴を与えた後、強度試験を実施し、強度・変形特性を求めた。また、温度履歴に伴う熱膨張ひずみや弾性波伝播速度の変化を求めた。さらに、拘束圧下で温度履歴を与えた場合の岩石物性も求めた。これらの結果から履歴温度幅、履歴回数、雰囲気温度等の温度条件や拘束圧、また、岩石の空隙率、含水状態等の岩石の物理的性質が強度・変形特性に及ぼす影響について考察し、以下の通り結果を得た。

岩石の強度や弾性係数は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなるが、減少割合は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなり、ある値へ収束する傾向が伺える。拘束圧下では温度履歴の影響が小さく、強度・変形特性の低下の割合も減少した。また、温度履歴幅が大きい方が強度低下も大きくなる。温度履歴に伴う岩石のひずみを測定した結果、温度履歴を受け室温に戻した場合には元のひずみの値にはならず、残留ひずみがみられた。しかし、温度履歴回数が増加するのに伴い残留ひずみは無限に増大するのではなく一定値に収束することが伺える。顕微鏡観察およびX線回折の結果、岩石が温度履歴を受けると構成鉱物粒子の膨張率の違いにより潜在的クラックが拡大・増加することが観察され、これらが原因であると考えられる。

熱環境下の岩盤空洞においては、周辺岩盤が熱・水・応力の影響を長期に渡り受ける。そのため、これらの相互作用が影響を及ぼし、岩石の力学特性が経時的に変化するものと考えられる。まず、時間依存性挙動であるクリープ現象について、高温下における一軸圧縮クリープ試験を実施し、クリープ現象に及ぼす温度の影響について検討した。また、実験結果から岩盤空洞の挙動解析に必要となる Burgers model および Norton 方程式における諸定数を算定した。

その結果、1 次クリープに及ぼす温度依存性はほとんどみられないが、最小ひずみ速度は 20 °C から 90 °C の変化で、1 オーダー増加することがわかった。また、破壊に至る時間は温度の上昇により短くなることが確認された。3 次クリープ特性の温度依存性については明確な傾向はみられなかった。

つぎに、岩石の鉱物溶解現象に着目し、高温下において岩石の純水への浸漬試験を実施して、浸漬後の力学特性について検討した。また、溶解元素の定量分析を実施し、化学作用である鉱物溶解現象の力学特性変化に及ぼす影響について考察した。実験結果より、岩石の一軸圧縮強さ、弾性係数は浸漬により低下する傾向にあり、特に高温下において顕著な傾向となる等の結果が得られた。また、pH 測定、溶解元素濃度分析により、化学作用である鉱物溶解現象と力学特性の関連性を確認した。

花崗岩のような低透水性の結晶質系の岩石では、岩盤内の不連続面性状が水理学的性質を左右するため、不連続面の透水特性を評価することが課題の一つであるといえる。熱水貯蔵システムを想定した場合には熱・応力の影響を考慮した不連続面の透水特性評価が必要である。そこで、単一不連続面を有する花崗岩供試体を用いて透水実験を実施し、不連続面開口幅の経時変化を定量的に評価し、不連続面形状、拘束圧、温度および透過水の pH が透水性に与える影響を検討した。透水実験中には透過水をサンプリングし、物質濃度を定量的に評価し、透水性変化に起因する鉱物溶解現象を検討した。

透水実験では、不連続面の水理学的開口幅は実験開始直後から連続的に減少し、数百時間程度でほぼ定常に至るが、その後温度を上昇させると再び開口幅が減少し、開口幅の変化は作用温度に依存することが確認された。不連続面が平坦なほど、また拘束圧が大きいほど最終開口幅が小さくなる結果となった。アルカリ性流体の透過により溶解作用を促進した場合、透水性が定常となる時間が短縮されることがわかった。温度および pH を上昇

させると透過水中の物質濃度が増加することなどから、透水性の変化と鉱物溶解現象との関連を確認した。

熱環境下における岩石の強度・変形特性および熱物性を用いて、熱水貯蔵時の空洞周辺岩盤の温度分布および応力分布を解析により求め、空洞の安定性および熱的挙動について検討し、以下の通りの成果を得た。

単一円形空洞に熱水を貯蔵することを想定した場合、周辺岩盤の温度分布は貯蔵初期の時間には空洞表面付近で急激な温度勾配を示しているが、時間の経過とともに次第に緩慢になり、空洞周辺に温度の影響が及ぶ。また、空洞周辺岩盤の熱膨張により空洞の接線方向に大きな圧縮応力が発生し、時間の経過とともに増大する。この場合、岩質の違いにより熱水貯蔵時の各岩石の挙動および応力分布は異なっており、これは接線弾性係数の値の違いに起因し、発生する熱応力の違いによって生じたものと考えられる。空洞周辺岩盤が温度履歴を受けた場合には、弾性係数、線膨張係数が減少するため、発生する熱応力は減少するものと考えられる。ただし、岩盤強度も減少すると考えられるため、安定性評価は総合的に判断する必要がある。

クリープ変形を考慮した場合、貯蔵 1000 日で空洞の内空変位量が 2 % 程度となることが予想され、変形抑制対策が必要であると考えられる。また、空洞周辺岩盤の地下水の対流を考慮した解析結果から、透水係数が 1×10^{-4} cm/s の場合、温度分布はほぼ同心円状となり地下水の対流現象は無視できるものと考えられる。最後に熱応力の軽減対策として空洞表面に施す断熱材が有効な手段と成り得ることを示し、また、空洞からの漏水防止対策として高分子系材料のライニングを提案した。

本研究では、熱水貯蔵システムを想定し、熱環境における岩石の力学・水理学特性および岩盤空洞の挙動の検討を行なった。今後は周辺岩盤の長期透水挙動評価やフィールド実験等による挙動評価を通じて供用期間 50 年程度の安定性を立証することが必要であると考えられる。

省資源、省エネルギー対策は低炭素社会や循環型社会の構築を通じて持続可能な社会を実現するための重要な課題の一つであり、未利用エネルギーを有効利用する本システムが有効な方策の一つとして活用されることを期待している。