

堆積軟岩の加熱時間と一軸圧縮強さの関係

Relation between unconfined compressive strength and heating duration

岡田哲実*・澤田清司**・柴田英明***・小峯秀雄****

Tetsuji OKADA, Seiji SAWADA, Hideaki SHIBATA and Hideo KOMINE

The purpose of this research is to investigate the strength characteristics of soft rocks after heating. Unconfined compression tests are performed on sedimentary soft rocks of fine-grained sandstone, siltstone, mudstone and diatomaceous mudstone after heating for about 90 days. As a result, the unconfined compressive strength of the soft rocks decreases with the passage of heating duration. The reasons are examined with X-ray diffraction. Consequently, the strength reduction of siltstone and diatomaceous mudstone coincides with the decrease of pyrite (FeS_2). It can be supposed that this process may be caused by oxidation of pyrite by chemical weathering.

Key Word: temperature, soft rock, strength, weathering

1. はじめに

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念として、ガラス固化した廃棄体を格納容器に収め、その周りをベントナイトを主体とする緩衝材で囲み、岩盤中に埋設する方法が考えられている¹⁾。ガラス固化した廃棄体は核種の崩壊に伴い熱を発生する。この発熱によって、緩衝材や周辺岩盤の温度は、100℃以下ではあるが長期間にわたり、熱の影響を受けることになる(埋設後数十年程度で最も高くなり、その後徐々に低下する解析結果が得られている)¹⁾。

一方、岩石の力学特性の温度依存性については、数多くの研究が見られる²⁾。しかし、これらの研究の多くは硬岩を対象としており、熱による変質を受けやすいと考えられる軟岩を対象とした研究は意外に少ない。また試験条件としては、供試体内部の温度が均一となった直後での力学特性を調べたものが多く、長期間、高温下に置かれた場合の影響(加熱時間の影響)については、ほとんど把握されていないのが現状である。

そこで本研究では、堆積軟岩の長期間の加熱による力学特性の変化およびそのメカニズムを明らかにすることを目的とする。著者らはこれまで堆積軟岩であるシルト岩および珪藻泥岩を用いて、乾燥条件で長期間加熱(最大約100日、常温～200℃)した後の一軸圧縮強さの変化について検討を試みた^{3), 4)}。その結果、加熱時間の経過に伴い各温度で一軸圧縮強さが低下する傾向が見られた。特に、200℃のケースよりも110℃のケースの方が強度低下が著しかった。図-1は、その特徴を示すシルト岩の試験結果である。珪藻泥岩についてもほぼ同様の結果が得られた。また、泥岩を

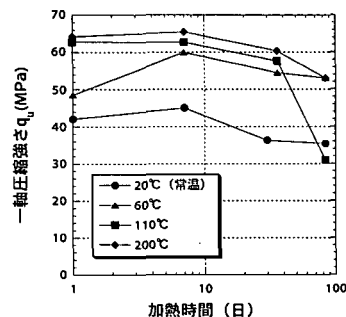


図-1 シルト岩の強度変化³⁾

* 電力中央研究所 地圏環境部

** 国土館大学 工学部 (卒業)

*** 国土館大学 工学部

**** 茨城大学 工学部

用いて110℃の乾燥条件で同様の検討を行ったところ、強度低下を示した³⁾。

本研究では、新たに細粒砂岩を用いて同様の検討を行うとともに、その結果をこれまで得られた実験結果と比較するとともに、強度低下のメカニズムについて検討した。

2. 実験方法

用いた試料は、第四紀の細粒砂岩である。以前検討した堆積軟岩^{3)~5)}と合わせて、その基本物性値を表-1に示す。細粒砂岩は同表の泥岩と同一地点のボーリングコアからサンプリングした。実験に使用したコアの深度は、160~190mで、サンプリングした直径約60mmのボーリングコアを直径50mm、高さ100mmにトリミングして使用した。

この供試体を110℃の乾燥炉で熱を加えた後、1日後、1週間後、2週間後に炉から取り出し、一軸圧縮試験および体積・重量の測定を行った。試験条件の温度を110℃と設定した理由は、前述したようにシルト岩および珪藻泥岩を用いた実験^{3), 4)}で110℃のケースが最も強度低下が著しかったためである。一軸圧縮試験の軸ひずみは、供試体の側面对角位置に張り付けた2枚のひずみゲージ(ゲージ長60mm)により計測した。一軸圧縮試験および体積・重量の測定は、各ケース3本ずつ試験を実施した。ただし、体積・重量の測定は、炉から取り出して計測した後、また炉に戻し、同じ供試体で計測を続けた。この他に、熱による変質現象のメカニズムを調べるため、X線回折、実体顕微鏡による観察を実施した。

3. 実験結果

試験結果は、著者らが以前検討した堆積軟岩の試験結果^{3)~5)}と合わせて示す。全て3本の試験の平均値で整理した。図-2に加熱時間と一軸圧縮強さ q_u の関係を示す。図より、4岩種ともに一軸圧縮強さは、加熱時間の経過とともに一旦上昇し、その後低下する。ただし、珪藻泥岩とシルト岩は約100日後に急低下するのに対して、泥岩と細粒砂岩は約10日後に急低下した。また、急低下した後さらに加熱すると、シルト岩、泥岩、細粒砂岩は供試体に多数のクラックが発生したため、以降の試験は実施できなかった。

図-3に加熱時間とひずみゲージの計測値から求めた変形係数 E_{50} の関係を示す。図より、細粒砂岩は加熱時間の経過とともに一旦上昇し、その後低下するという一軸圧縮強さと類似の傾向が見られる。シルト岩については、一

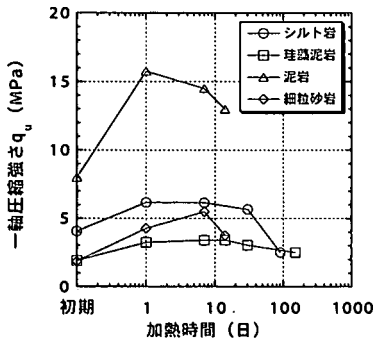


図-2 加熱時間と q_u の関係

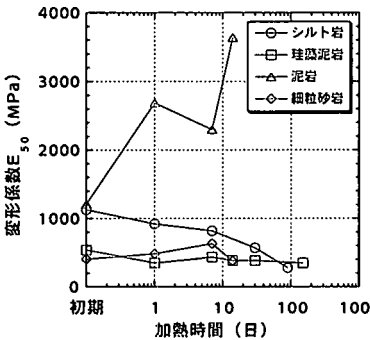


図-3 加熱時間と E_{50} の関係

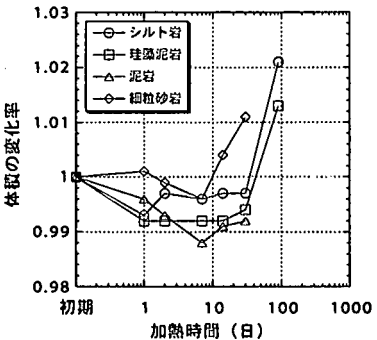


図-4 加熱時間と体積の関係

軸圧縮強さのようにいったん上昇する傾向は見られず、低下を続ける。珪藻泥岩はあまり変化しなかった。泥岩は、大きく上昇し、一軸圧縮強さが低下したケースでも E_{50} の低下は見られなかった。

図-4 に加熱時間と体積の変化率の関係を示す。図より、4 岩種ともに体積は、加熱初期には水分の蒸発（脱水）により一旦収縮し、その後加熱時間の経過にともない膨張する傾向が見られた。注目すべき点として、一軸圧縮試験の傾向と同様に、珪藻泥岩とシルト岩は約 100 日加熱後に急に体積膨張するのに対して、泥岩と細粒砂岩は約 10 日程度で膨張に転じている。このように、4 岩種ともに一軸圧縮強さの低下と体積膨張の時期がほぼ一致することから、両者には何らかの関係があると考えられる。

4. 考察

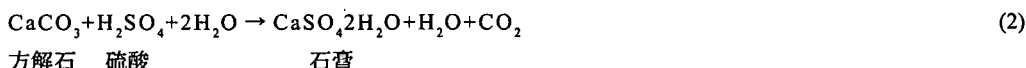
花崗岩では温度上昇に伴う強度低下のメカニズムとして、岩石を構成している鉱物粒子間の熱膨張率の不一致により、粒子の境界に微小なクラックが発生し、それが強度低下の原因になると考えられている。堆積軟岩を対象とした本実験では、これが強度低下の原因になるとは考えにくい。なぜなら、温度を変えて行った実験から、110℃と200℃の強度変化を比べた場合、110℃の方が強度低下が著しかったからである^{3), 4)}。また、熱膨張であれば、比較的短時間に膨張は収束するはずであり、10～100 日程度経過後に強度低下する今回の実験結果を説明することは難しい。

そこで、化学的風化が熱により促進されることが強度低下の原因ではないかと考え⁵⁾、加熱履歴に伴う鉱物の変化を調べる目的で X 線回折を行った。試料は熱を加える前に、あらかじめ粉末にし、初期状態の X 線回折終了後に乾燥炉に戻し、加熱履歴を与えた後、計測のたびごとに乾燥炉から同じ試料を取り出して計測を続けた。その結果、泥岩および細粒砂岩については顕著な変化は見られなかったが、珪藻泥岩およびシルト岩については、図-5 に示す変化が見られた。図より、加熱時間約 30 日から黄鉄鉱（Pyrite: FeS_2 ）の減少が見られ、約 100 日後には、ほとんどなくなっているのがわかる。強度低下を示す時期と黄鉄鉱の減少・消滅の時期がほぼ一致することから、以下の化学反応式⁶⁾ で表される風化が強度低下と密接な関係にあると推測される。

【岩石中の黄鉄鉱の酸化による硫酸の生成】



【生成された硫酸が方解石を溶解し、石膏を生成】



【岩石中のイライトを硫酸が分解してジャロサイトを生成】

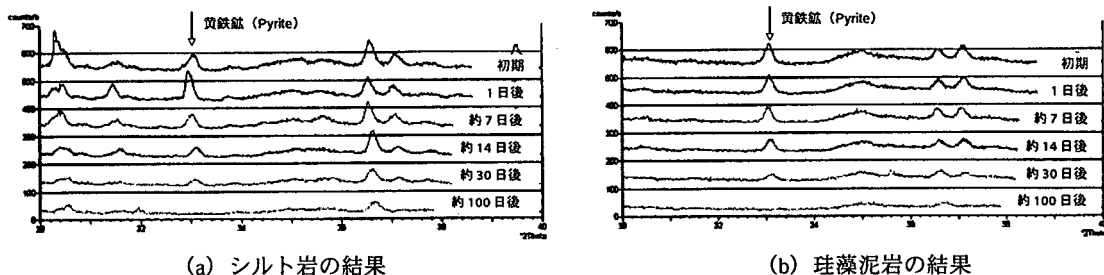
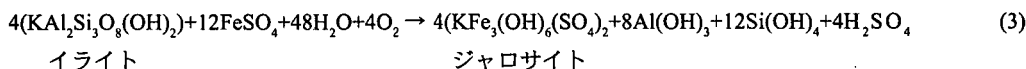
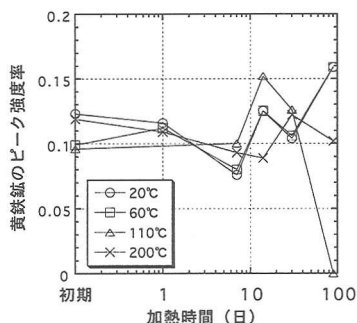
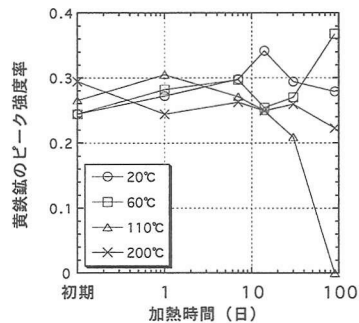


図-5 X 線回折結果

さらに、黄鉄鉱の変化をある程度定量的に比較するため、熱履歴による影響がほとんどないと考えられる鉱物である石英 (Quartz, $\theta = 26.5^\circ$) のピーク強度値で黄鉄鉱のピーク強度値を正規化した値を「ピーク強度率」と定義した。図-6 にシルト岩と珪藻泥岩の各温度のピーク強度率の時間変化を示す。図より、両岩種ともに急激な強度低下を示した110℃のケースだけが、黄鉄鉱の減少が見られる。しかも、黄鉄鉱の減少・消滅と強度低下の時期がほぼ一致している。この結果からも(1)式の反応と強度低下が密接に関係している可能性が高いことが証明された。



(a) シルト岩の結果



(b) 珪藻泥岩の結果

図-6 黄鉄鉱の変化率

以上より、シルト岩と珪藻泥岩の強度低下の原因は、(1)式の反応により生成した硫酸 (H_2SO_4) が岩石に何らかのダメージを与えたか、もしくは硫酸と反応して生成した石膏あるいはジャロサイトなどの2次鉱物の晶出する圧力が岩石の骨格構造を壊したためではないかと考えられる。ただし、今回のX線回折の結果では、硫酸と反応する方解石や2次鉱物の石膏、ジャロサイトなどは検出されなかった。

一方、X線回折の結果では顕著な鉱物の変化を示さなかった泥岩と細粒砂岩について、約2週間の加熱履歴に

よってクラックの発生した試料を実体顕微鏡により観察した。泥岩については、試料表面の浮き上がったクラック (写真-1上) を丁寧にピンセットで取り除いたところ (写真-1下)、石膏と思われる白い粒が見られた。細粒砂岩についても、クラックの起点となったと思われる石膏あるいはジャロサイトが見られる (写真-2)。これらの写真から、泥岩および細粒砂岩についても風化によって生じた石膏等の晶出する圧力が供試体の体積を膨張させるとともに、岩石の骨格構造を壊した可能性が高いことが示された。

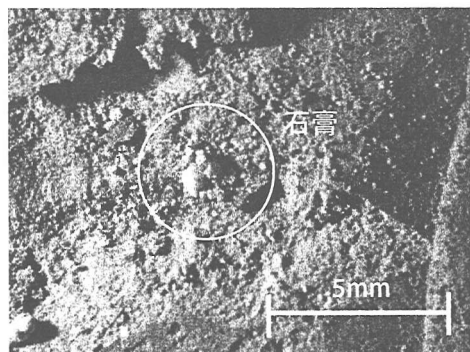
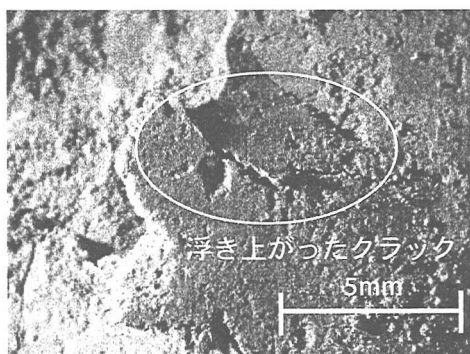


写真-1 実体顕微鏡写真 (泥岩)

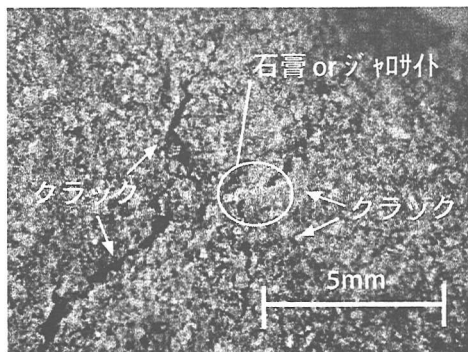


写真-2 実体顕微鏡写真 (細粒砂岩)

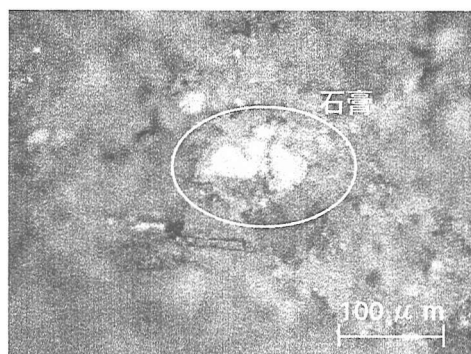


写真-3 偏光顕微鏡写真（シルト岩）

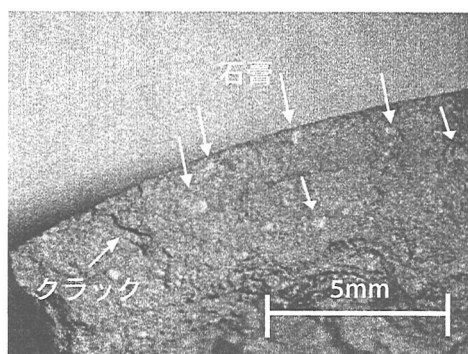


写真-4 実体顕微鏡写真（珪藻泥岩）

また、シルト岩と珪藻泥岩についても3ヶ月以上の加熱履歴を与え、クラックの発生した試料を用いて顕微鏡観察を行った。写真-3はシルト岩の偏光顕微鏡の写真を示す。これより、クリーム色の石膏またはジャロサイトと思われる非常に小さな粒が見られる。写真-4は珪藻泥岩の実体顕微鏡写真を示す。これより、石膏と思われる白い斑点が観察される。試料のリムの方に白い斑点が数多く見られるのは、黄鉄鉱の酸化反応が試料のリムからコアに向かって反応するためと考えられる。写真-1、2と写真-3、4を比較すると、後者は石膏（あるいはジャロサイト）の粒が小さく、均一に分布しているようにも見える。いずれにしても、これらの写真からは、シルト岩と珪藻泥岩についても、(3)式の反応により微量に含まれる方解石を溶解し、石膏などの2次鉱物が生成した可能性がある。

5. おわりに

図-7は、軟岩の化学的風化の反応を示す(1)～(3)式をチャートで示したものである。本実験に用いた4種類の堆積軟岩は、加熱時間の経過に伴い強度が低下し、クラックが発生する傾向が見られた。これは、堆積軟岩に一般的な傾向のようである。ただし、本実験に用いたシルト岩や珪藻泥岩のように2～3ヶ月後に強度低下を示すものと泥岩や細粒砂岩のように比較的早く強度低下を示すものがあった。前者については、X線回折により、強度低下と同時期に黄鉄鉱の減少が確認され、化学的風化の促進が強度低下を引き起こしている可能性が示された。この時生成した硫酸が岩石に何らかのダメージを与えたものと考えられる。後者については、X線回折による鉱物の変化は確認されなかったが、顕微鏡による観察からは、明らかに2次鉱物の生成がクラックを発生させている様子が観察された。このクラックの発生が体積膨張および強度の低下を引き起こしたと思われる。しかしながら、X線回折からは黄鉄鉱の減少や方解石の溶解は確認されなかった。

当初、110℃の加熱条件では、(1)式の反応に必要な H_2O が存在しないため、(1)式の反応は加熱により促進されないと考えていた。しかしながら、間隙水は蒸発したものの粘土中の層間水が風化に関与したのではないかと考えている。今後は、これらの点を含め、さらに検討を進めていきたい。

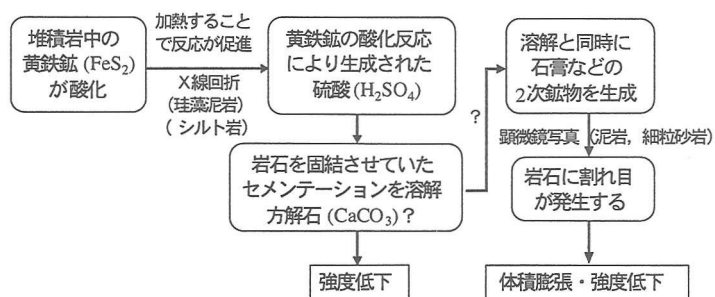


図-7 強度低下のメカニズムについて

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－総論レポート，JNC TN1400 99-020，1999.
- 2) 例えば，F. E. Heuze：High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks - A review, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.20, No.1, pp.3-10,1983.
- 3) 岡田哲実・小峯秀雄・澤田清司・柴田英明：長期間加熱したシルト岩の一軸圧縮・引張強度の変化，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp.1027-1028，2000.
- 4) 岡田哲実・小峯秀雄・菅原英明・柴田英明：長期間加熱した珪藻泥岩の一軸圧縮・引張り強さの変化，第36回地盤工学研究発表会講演集，pp.599-600，2001.
- 5) 岡田哲実・澤田清司・柴田英明・小峯秀雄：長期間加熱履歴を加えた堆積軟岩の強度特性の変化について，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.627-628，2002.
- 6) 例えば，大山隆弘・志田原巧：圧縮空気下での堆積岩の室内試験による酸化・溶解特性の評価，電力中央研究所研究報告 No.U97013，1997.