

Ⅲ-12 極低温の熱履歴が岩盤内空洞の挙動に及ぼす影響

愛媛大学工学部 フェロー会員 稲田善紀
愛媛大学工学部 正会員 木下尚樹
愛媛大学工学部 学生員 ○伊与田亮
芙蓉調査設計事務所 正会員 山田公雄

1. はじめに

筆者らは LNG, LPG, 冷凍食品等の低温物質を地山岩盤内に設けた空洞に直接貯蔵することを提案し、検討してきている¹⁾。この岩盤内に低温物質を貯蔵する際、その貯蔵量の変動や、空洞内の清掃および点検等により空洞周辺岩盤が熱履歴を受け、その強度の低下が予想される。本研究では、極低温の熱履歴を受けた岩石の強度・変形特性を求め考察し、その値を用いて LNG を貯蔵することを想定し、空洞周辺岩盤が熱履歴を受けた場合の挙動を解析により求め考察した結果について述べる。その際、同じ種類の岩石であっても構成鉱物粒子の大きさや空隙率などの物理的性質が異なった様々なものが存在しその挙動も異なると考え、今回この構成鉱物粒子の大きさにも着目した。

2. 実験方法

本実験では比較的粒子の小さな岩石として大島花崗岩（愛媛県越智郡大島産）を比較的粒子の大きな岩石として稲田花崗岩（茨城県笠間市稲田産）を試料として用いた。これらの岩石試料を一軸圧縮試験用に $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、圧裂引張試験用に $\phi 3 \times 3\text{cm}$ に成形した。さらに以下に示す方法で処理し、異なる 2 種類の含水状態のものを用意した。①：室内で 1 週間自然乾燥させ、さらにデシケータ内で 1 週間乾燥する。②：①の状態のものを蒸留水を満たしたデシケータ内で真空ポンプにより 5 時間脱気する。以降、①の状態のものを“Dry”，②の状態のものを“Wet”と呼ぶことにする。各岩石の物理的性質を表 1 に示す。次に熱サイクル試験装置を用いて試料に 15°C （常温） $\sim -160^{\circ}\text{C}$ の熱履歴を与えた。 15°C から熱衝撃の影響を受けないと考えられる範囲の $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温し、試料の中心温度が -160°C であることを確認しながら 60 分間保温し、同じく $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で昇温し、 15°C で 60 分間保温した。以上の過程を 1 サイクルとした。

表 1 岩石の物理的性質

	空隙率 (%)	含水比 (%)	飽和度 (%)	見かけ 比重	真比重
稲田花崗岩 (Dry)	1.5	0.03	5.45	2.63	2.67
稲田花崗岩 (Wet)	1.5	0.24	44.14	2.63	2.67
大島花崗岩 (Dry)	0.8	0.09	28.54	2.65	2.67
大島花崗岩 (Wet)	0.8	0.24	81.32	2.65	2.67

3. 実験結果および考察

過去の研究から低温物質を貯蔵した場合、引張応力によって亀裂が発生することがわかっている²⁾、まず引張強度について述べる。図 1 は室温下の実験結果において熱履歴を受けた岩石の引張強度 (σ_t) を履歴を受けていない引張強度 (σ_{ti}) で除した値を引張強度比 (σ_t/σ_{ti}) として示したものである。熱履歴回数の増加に伴い両花崗岩とも強度が低下していることがわかる。また両花崗岩を比べてみると稲田花崗岩の方が強度の低下

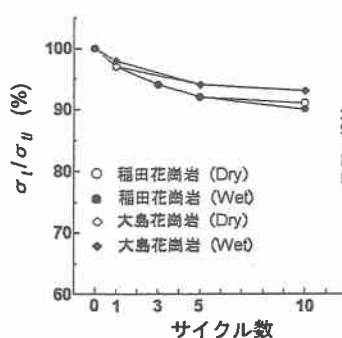


図 1 引張強度比

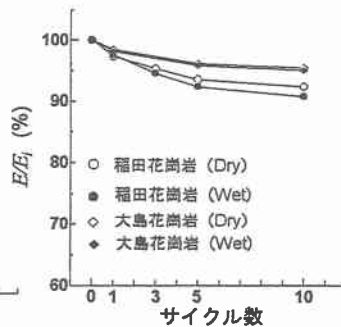


図 2 接線弾性係数比

の割合が大きい。この理由として稲田花崗岩の構成鉱物粒子が大島花崗岩に比べて大きいこと、温度変化に伴う鉱物粒子間の膨張および収縮量の相対的な差が大きくなり、マイクロクラックの増加や拡大をより促進したものと考えられる。圧縮試験を行った結果についても同様の傾向がみられた。次に、圧縮試験の際に得られた応力-ひずみ曲線より求めた両花崗岩の接線弾性係数から引張強度比と同様にして接線弾性係数比を

求めた。結果を図 2 に示す。いずれの場合も熱履歴回数が増加するのに伴い値が低下していることがわかる。また引張強度比と同様に稲田花崗岩の方が値の低下の割合が大きい。

4. 空洞周辺の温度分布

本解析では、土被り 100m の地山岩盤内に直径 10m の単一円形空洞を設け LNG (−162℃) を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法³⁾を用いて求めた。本解析では以下に示す 2 通りの場合を想定した。Case A として貯蔵後 1 年までを、Case B として 1 年間の内 1 ヶ月間を整備・点検等で空洞を常温に戻して 11 ヶ月間貯蔵することを想定した。稲田花崗岩と大島花崗岩の熱拡散率差は小さくほとんど同じ温度分布を示したので稲田花崗岩についての結果を図 3 および図 4 に示す。Case A から初期の時間には急激な温度勾配を示しているが、時間の経過とともに緩慢となり空洞周辺岩盤に温度が及んでいくことがうかがえる。また Case B より貯蔵を停止した場合、空洞表面における温度は上昇し急激な温度勾配を示すが 30 日後までに温度が上昇するのは空洞表面から 7m 程度であり、貯蔵を再び開始すると温度勾配は時間の経過に伴い緩やかになり、空洞周辺岩盤に温度が及んでいくことがうかがえる。

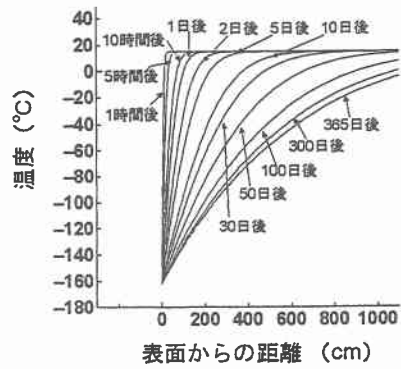
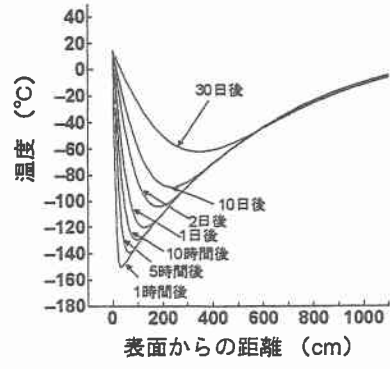
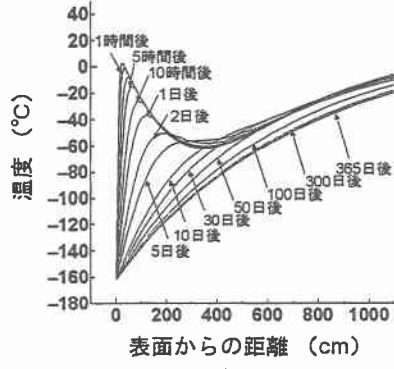


図 3 空洞周辺の温度分布 (Case A)



(a) 1 年後 LNG 排出時



(b) 再び LNG 貯蔵時

図 4 空洞周辺の温度分布 (Case B)

5. 応力分布

温度分布をもとに空洞周辺岩盤の応力分布を亀裂解析法⁴⁾により求めた。Case A および Case B における亀裂の進展長および凍結領域の経時変化を図 5 に示す。これらの図から両岩石とも Case A に比べて Case B の方が凍結領域および亀裂の進展長の範囲が約 1m 小さいことがわかった。また時間の経過に関わらずその範囲に差は現れないことがわかった。稲田花崗岩と大島花崗岩で亀裂の進展長を比較すると、稲田花崗岩の方が 10 年後で約 1m 程度大きいことがわかった。これは稲田花崗岩の方が図 1 からわかるように強度の低下の割合が大きいためにその違いが結果として現れたものと考えられる。

6. おわりに

低温物質を地山岩盤内空洞に貯蔵した場合、空洞周辺岩盤が熱履歴を受けても、亀裂の進展長は熱履歴を受けていない場合とほとんど変わらないことがわかった。

参考文献 1) 稲田善紀：地下・地下・地下！，138～146 頁，森北出版，1992。

2) 稲田善紀：地下の空間利用，112～124 頁，森北出版，1989。

3) 前掲 2) 101～103 頁。

4) 前掲 2) 118～119 頁。

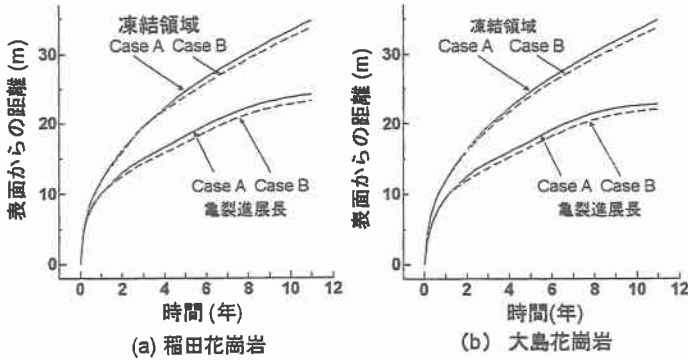


図 5 亀裂の進展長および凍結領域の経時変化