

(49) 低温物質の岩盤内貯蔵時に岩質の差異が挙動に及ぼす影響

愛媛大学工学部

稲田善紀

愛媛大学大学院

藤原斉郁

(株)フジタ技術研究所 門田俊一 姚 義久

Difference of rock mass behavior due to storage of low temperature materials

Yoshinori Inada, Tadafumi Fujiwara, Ehime University
Shunichi Kadota, Yi Jeou Yao, Fujita Co., Ltd.

Abstract

In the case of low temperature materials storage in underground openings excavated in mountain, as the authors have made clear by theoretical analysis and experiment, leakage of liquid, gas and heat along the cracks becomes an important problem.

In this study, as one of the way to select suitable mountain for storage of low temperature materials, the authors proposing expansibility of freezing of water in rock.

Therefore, strength and deformation characteristics, and thermal properties of some rocks under low temperatures were investigated by experiment. Using these values, behavior of openings effected by low temperature were analyzed and way to select a suitable mountain are discussed.

1 緒言

現在、石油代替エネルギーとしてLNG、LPGの需給量の増加が予想され¹⁾、安定供給のための大規模な貯蔵基地が必要となっている。また、冷凍食品の供給量も共働き夫婦の増加、冷凍食品の多種多様化を背景として著しく増加しており²⁾、今後冷凍倉庫の需要もさらに増加するものと予想される。我国ではこれらの低温物質の貯蔵方法として地上式や半地下式が用いられているが³⁾、この方法は大規模な貯蔵には多大な敷地を必要とし、国土の狭い我国にとって土地の有効利用の面からも得策とは言い難い。そこで、筆者らはこれらを地山岩盤内に設けた空洞に貯蔵する方法を提案し検討を行ってきた。この場合、一般的に低温物質を貯蔵した際、空洞周辺の岩盤は低温物質の影響を受け、熱収縮により放射状に亀裂が発生し、時間の経過とともに進展するので、亀裂からの液漏れおよび冷気漏れの防止対策が必要となる⁴⁾。

そこで、本研究では低温物質貯蔵に適した地山を選定する際の目安の一つとして氷結時の岩石の膨張性に着目した。すなわち、湿潤状態での土質地盤のように、岩石でも空隙の多いものであれば、空隙中の水分が氷結する際、見かけ上全体として膨張することが予想される。そこで本研究では、空隙率すなわち含水量の違う岩石として花崗岩（愛媛県越智郡大島産、通称大島みかげ、空隙率約2%）、砂岩（福岡県大牟田市産、空隙率約8%）および凝灰岩（栃木県宇都宮市産、通称大谷石、空隙率約37%）について低温下における強度・変形特性および熱物性値を実験により求め、これらの値をもとに湿潤状態での低温物質を貯蔵した場合を想定して解析を行い、空洞周辺岩盤の挙動の違いおよび貯蔵に適した地山の選定について検討した結果について述べる。

2 線膨張係数

今回用いた岩石の物理的性質を表1に示す。本実験では $\phi 3 \times 6$ cmに成形した供試体を用い、石英ガラス棒を用いた比較法⁵⁾により温度低下にともなうひずみを測定した。なお、供試体を冷却する際、熱衝撃による破壊を防ぐため降温速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ とし、60分間保温した後ひずみを測定した。

実験結果を図1に示す。花崗岩、砂岩のDry およびWetとも温度の低下とともに収縮しているのがわかる。また、花崗岩ではDryとWetを比較するとほとんど差が見られないのに対し、砂岩ではDryよりもWetの方が収縮量が多いことがわかる。これは花崗岩と砂岩の含水量の差から空隙中の水が氷結した後、氷が収縮する影響を砂岩の方が大きく受けたためと考えられる。次に凝灰岩ではDryは収縮しているがWetでは空隙の水が氷結する際に約 4000×10^{-6}

の膨張ひずみを示した後に、温度の低下とともに収縮していることがわかる。またその収縮量は他の岩石よりも大きいことがわかる。これは凝灰岩の鉱物粒子間の結合力が弱く、含水量も多いため氷結時の急激な膨張や、氷結後の温度の低下にともない収縮するという氷の熱的挙動⁶⁾の影響をかなり受けているためと推察される。一方、氷自体も氷結の際、約 30000×10^{-6} の膨張ひずみを示すことが報告されているため⁶⁾、逆に、氷自体も凝灰岩によって影響を受けているものと考えられる。また、凝灰岩のみが岩石中の水が氷結する際の膨張の影響を受け、花崗岩や砂岩は影響を受けず収縮していることがわかる。これは凝灰岩の含水量が最も多く、さらに0℃付近の接線弾性係数が氷の接線弾性係数に対して花崗岩や砂岩よりも近いためと考えられる。

3 強度・変形特性

本実験には圧縮試験用のものは $\phi 3 \times 6$ cm、引張試験用は圧裂引張試験にて代用したので $\phi 3 \times 3$ cmに成形した供試体を用い、低温下にて実験を行った。なお、降温速度は1℃/min、保温

表1 岩石の物理的性質

		Prosty (%)	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	True specific gravity (g/cm ³)
Granite	Dry	1.99	0.16	20.67	2.625	2.673
	Wet	1.99	0.62	70.86	-	2.673
Sand stone	Dry	8.12	1.46	16.77	2.400	2.616
	Wet	8.12	3.42	96.89	2.488	2.616
Tuff	Dry	37.09	1.39	5.76	1.560	2.446
	Wet	37.09	24.01	99.62	1.908	2.446

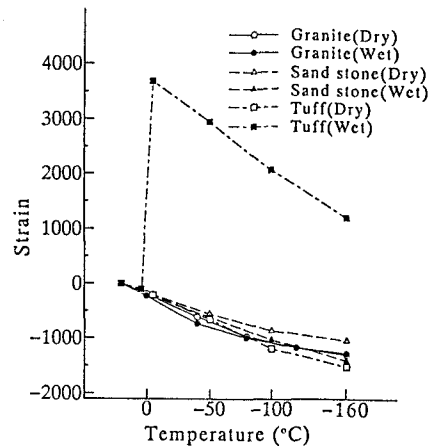


図1 低温下におけるひずみ

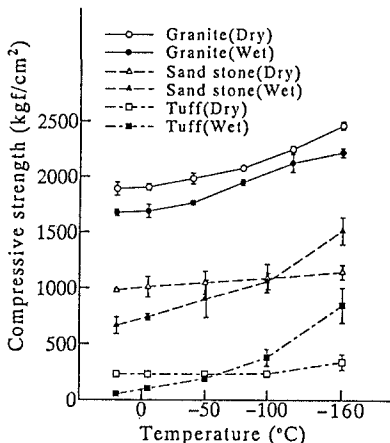


図2 低温下における圧縮強度

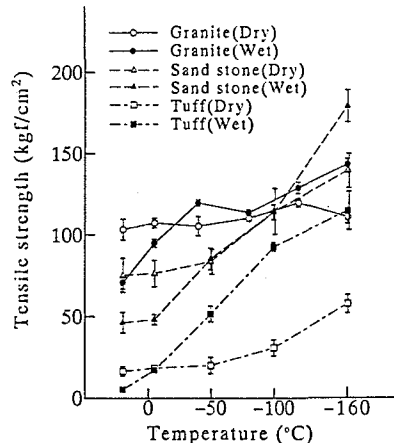


図3 低温下における圧裂引張強度

時間は60分間とし、荷重速度は圧縮試験は5 kgf/cm²/sec，圧裂引張試験は2 kgf/secとした。

結果を図2および図3に示す。圧縮強度および圧裂引張強度ともに常温ではいずれの岩石もWetの方がDryより小さいことがわかる。これはWetに処理する際、真空ポンプで供試体中の空気を脱気し水を浸潤させる時にマイクロクラックをさらに押し広げる結果となったことや、圧縮時に空隙中の水に間隙水圧が生じ破壊を促進するためであると考えられる。低温下においては、温度の低下とともにDryおよびWetのいずれも強度が上昇していることがわかる。これは温度の低下とともに鉱物粒子が収縮し硬化することによるものであると考えられる。また、砂岩や凝灰岩ではこの上昇の割合はWetの方がDryよりも大きい。これはWetは空隙が氷によって満たされており、氷は-20℃から-160℃で約2.8倍の強度上昇を示す⁶⁾ためであると考えられる。またWetの強度上昇の割合は空隙の多い岩石ほど大きいことがわかる。これは空隙が多く、粒子間結合の弱い岩石ほど氷の膠結物質としての役割が大きくなっているためと推察される。この傾向は圧縮強度よりも引張強度の方が大きいことがわかる。

次に圧縮試験の際、供試体の表面に貼り付けたひずみゲージによって得られた応力—ひずみ曲線により破壊応力の30%付近の接線弾性係数およびポアソン比を求めた結果を図4および図5に示す。接線弾性係数は常温では強度と同様にDryの方がWetより大きいことがわかる。花崗岩では低温下でもほぼ一定の値とみなせることがわかる。また、砂岩および凝灰岩では温度の低下とともにDryおよびWetのいずれもわずかながら値が上昇していることがわかる。これは温度の低下とともに鉱物粒子が収縮し硬化することによるものであると考えられる。また、Wetの方がDryより値が上昇する割合が大きい。これは空隙が氷によって満たされていて、温度の低下とともに氷自身の接線弾性係数が上昇する⁶⁾ためであると考えられる。

ポアソン比は平均的にみて常温ではWetの方がDryより大きいことがわかる。これは圧縮の際、空隙を満たしている水分による水圧が、縦方向の応力を横方向にも伝え、横方向に変形しやすくなったことによるものであると考えられる。また、花崗岩では温度の低下とともに値が低下している傾向が見られる。これは鉱物粒子の収縮による鉱物粒子自身および隣接鉱物粒子間のマイクロクラックの増加によるものと考えられる。また砂岩および凝灰岩では温度の低下とともに値が上昇していることがわかる。これは温度の低下とともに空隙中の水のポアソン比の上昇によるためと考えられ、この傾向は凝灰岩で最も大きいことがわかる。

4 温度分布および応力解析

本解析では、図6に示すように土被り100mの位置に直径10mの単一円形空洞を設けそれぞれの岩石に低温物質を貯蔵した場合を想定して解析を行った。

まず実験により要素分割法を実測値に適用させる方法³⁾で求めた熱拡散率（花崗岩： $\kappa = 11.0 \times 10^{-3}$ (cm²/sec)，砂岩： 5.0×10^{-3} ，凝灰岩： 4.0×10^{-3} ）を用い、空洞周辺の温度分布を要素

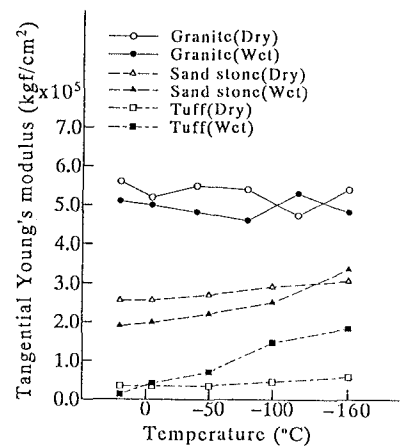


図4 低温下における接線弾性係数

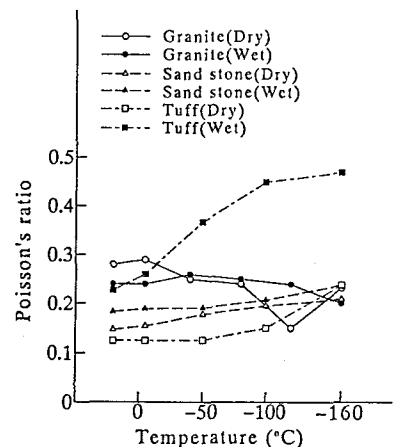


図5 低温下におけるポアソン比

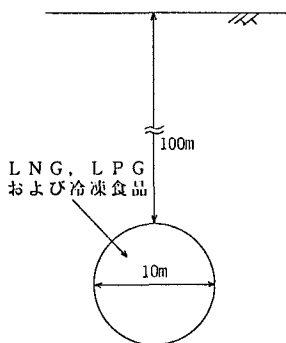


図6 解析に用いた空洞モデル

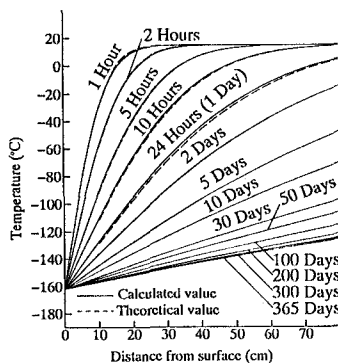
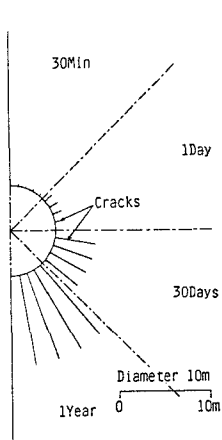
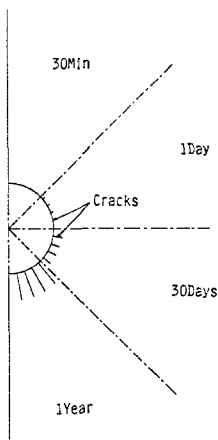


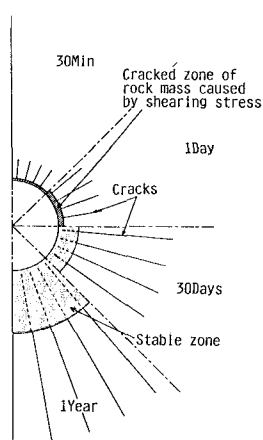
図7 空洞周辺の温度分布



(a) 花崗岩



(b) 砂岩



(c) 凝灰岩

図8 応力解析の結果 (LNG貯蔵)

分割法によって求めた³⁾。代表例として花崗岩岩盤内にLNG (空洞内温度-162°C) を貯蔵した場合の結果を図7に示す。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やかになっている。また、空洞表面から同一距離において時間の経過とともに温度変化は緩慢となっており、貯蔵1年後にはほぼ準定常状態³⁾となることがわかる。また、初期の時間に限られるが、厳密解の近似式⁷⁾で求めた温度分布 (図中に点線で示している) とよく一致し、他の岩石も同様の結果となった。

次に、前述の温度分布および実験により求めた物性値をもとに亀裂解析法³⁾を用い、応力解析を行った。結果を図8(a)~(c)に示す。花崗岩岩盤内に貯蔵した場合、貯蔵開始後、空洞周辺岩盤は低温の影響を受け収縮し、見かけ上、地山が固定点となり空洞が拡がり、貯蔵1日後には放射状に最大90cm、貯蔵1年後には最大9.5 mの亀裂が生じている。また砂岩の場合も花崗岩と同様の挙動を示し、亀裂の範囲は貯蔵1日後には最大30cm、1年後には最大3.0 mとなった。凝灰岩の場合は、他の岩石とは異なり、貯蔵30分後には空洞表面から10cmの範囲が氷結し、氷結時の急激な膨張によりせん断破壊し、また引張強度がかなり小さいため自重の影響により天端付近に亀裂が発生している。この時の空洞は氷結域がわずかなため変位していない。そして、貯蔵開始から1日後には氷結域は50cmとなるが、氷結域の空洞表面側の方が接線弾性係数が大きいので空洞側へ膨張できず、地山の方へ膨張し氷結域の周辺に亀裂が生じている。その後、氷結域は貯蔵開始から30日後には2.2m、1年後には7 mと拡がるが、逆に亀裂は氷結時の膨張によりふさがり安定することがわかった。

6 実用化に向けての一考察

花崗岩および砂岩では、低温物質を貯蔵すると空洞周辺岩盤には亀裂が生じるが、凝灰岩は全く異なった挙動を示し、空洞表面付近には安定領域が発生することがわかった。そのため、石油の備蓄に用いられている水封式を併用することにより低温物質の貯蔵は可能であると考えられる。また、空洞周辺岩盤に人工的に亀裂を入れておき、氷結時の膨張による応力を緩和すれば亀裂の発生を抑制することができると考えられる。また凝灰岩よりも鉱物粒子間の結合力が強く、空隙率が15～25%程度の岩盤を選定すれば、氷の影響が少なくなり、氷結時の膨張が抑制され、温度低下による接線弾性係数の上昇が小さくなり、引張強度が大きくなるなど、低温物質貯蔵に有利となり、亀裂の発生が抑えられるのではないかと考えられる。

7 結言

本研究では、花崗岩、砂岩および凝灰岩岩盤内に低温物質を貯蔵する場合を想定し、実験によりそれぞれの低温下での物性値を求め、解析によりそれぞれの岩盤の挙動の違いについて検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 低温下におけるひずみは、凝灰岩のWet では0℃付近で急激な膨張を示し、さらに低温下では収縮するがその他の岩石ではDry では温度の低下とともに収縮する。
- 2) 強度および接線弾性係数は常温においてはWetよりDryの方が大きい。また、砂岩や凝灰岩では温度低下とともに値が上昇し、その上昇する割合はDryよりWetの方が大きい。
- 3) ポアソン比は常温においてはDryよりWetの方が大きい。また、花崗岩では温度の低下とともに鉱物粒子の収縮による鉱物粒子自身および隣接鉱物粒子間のマイクロクラックの増加により値が低下し、砂岩および凝灰岩では温度の低下とともに空隙中の氷のポアソン比の上昇により値が上昇する。
- 4) 解析の結果、花崗岩および砂岩に低温物質を貯蔵した場合、空洞は見かけ上拡がり、放射状に亀裂が生じる。しかし凝灰岩の場合、空洞周辺岩盤には亀裂を生じるが、氷結時の膨張により空洞表面付近は安定しており、他の岩石とは全く異なった挙動を示す。
- 5) 凝灰岩よりも鉱物粒子間の結合力が強く空隙率が15～25%程度の岩盤地山を選定すれば、氷結時の膨張が抑制され、低温物質貯蔵に有利になることが予想される。

謝辞

本研究の遂行にあたり、愛媛大学大学院畑野俊一郎君の御協力を得たことをここに記しておく。

参考文献

- 1) (財)省エネルギーセンター編：省エネルギー便覧，44～45頁，1990.
- 2) 農林水産省経済統計情報部編：ポケット農林水産統計，36～37頁，1990.
- 3) 稲田善紀：地下の空間利用，森北出版，1989.
- 4) 稲田善紀，北村聖一，岡田明浩：LNGの地下岩盤内空洞貯蔵における空洞の安定性の検討，土木学会論文報告集，第343巻，35～44頁，1984.
- 5) 稲田善紀，寺田孚，伊籾一郎：岩石の線膨張係数について，水曜会誌，第17巻，第5号，200～203頁，1971.
- 6) 稲田善紀，甲村雄一：極低温下における氷の力学的挙動，第10回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，47～53頁，1989.
- 7) H.S. Carslaw, J.C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press, pp. 335～336, 1959.