

岩石の低温特性と熱応力による破壊

清水建設(株)研究所 正員 ○木 下 直 人

〃 正員 石 塚 与志雄

〃 日 比 一 喜

1. まえがき

低温液化燃料の地下岩盤内備蓄の実用化にあたって検討すべき重要な問題として、熱応力に対する構造的な安定性および気密・液密性の保持に関する問題があるが、未解明の点が多く残されている。そこでこの問題に対する基礎的研究として、低温における岩石の熱応力による破壊実験を行ってきた。^{1),2)} 今回は主として湿潤状態にある堅岩およびき裂岩を用いた実験とFEMによる熱応力解析の対比を行なった結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体 試験体としては、堅岩(稲田花崗岩)の他にき裂岩を用いた。これは稲田花崗岩を電気炉内で500℃および600℃に加熱処理したものであり、以下前者をき裂岩A、後者をき裂岩Bと記すものとする。有効間隙率はそれぞれ1.8%および3.5%となっている。試験体はいずれも一辺が30cmの立方体で、中心軸に直径3.8cmの円孔(冷却孔)を有するものである。含水状態は、自然乾燥状態(室内に長期間放置した状態)および湿潤状態(水中に1ヶ月以上放置した状態)とした。

2.2 実験装置と方法 使用した実験装置の概略を図-1に示す。試験体の冷却は、中心軸に設けた円孔(冷却孔)内にノズルを挿入し、液体窒素を孔壁面に霧状に吹き付けることによって行なった。予め冷却実験を行なって、できるだけ孔壁面の温度が一樣になるように、ノズルの孔の大きさ、方向および配置を決定した。試験体の上下面にはひずみゲージと熱電対を設置できるようになっているが、同時に試験体の上下方向にできるだけ温度差が生じないようにするため、上下面を断面材で覆っている。

試験体は実験槽内に設置されるが、一定温度(10℃)に保った水を循環することにより、その側面を一定温度に保つようにしている。なお、自然乾燥状態で実験を行なう場合には、試験体側面に液化ゴムを塗布し、乾燥状態を保つようにした。

孔壁面の冷却速度は1時間当り約20℃とし、-180℃まで冷却を行なった。そして、同一試験体について3回くり返し実験を行なった。

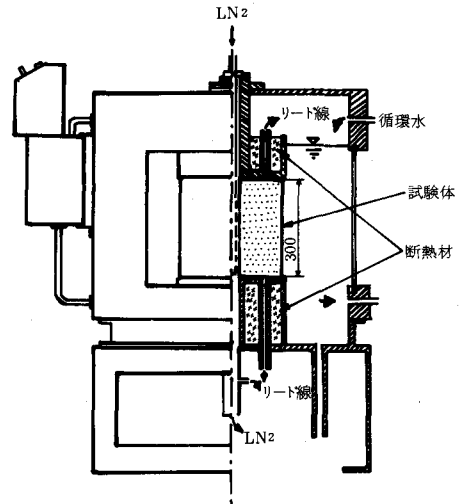


図-1 実験装置

2.3 ひずみの測定 熱応力に関する実験を行なう場合

合、温度および熱応力の時間的、空間的变化を測定する必要があるが、熱応力に関してはまだこれといった方法がないというのが現状である。今回はひずみゲージにより熱応力を推定する方法について検討し、測定を試みた。熱応力に関する実験において測定されるひずみ指示値は、試験体内の温度差により生じるひずみ、岩石とゲージの温度収縮ひずみ、ゲージの電気抵抗の変化等の影響を含む値である。したがって、同一試験体について試験体内に温度差が生じないようにして全体を冷却した場合のひずみ指示値を求め、両者の差をとれば、試験体内の温度差によるひずみだけを取り出すことができるので、予め静弾性係数を求めておけば熱応力を推定することができる。なお、湿潤状態の試験体の場合には、凍結膨張によるひずみが生じることも

考えられるが、それが冷却方法や拘束状態に依存しない場合にのみ上記の方法で熱応力の推定が可能になる。

2.4 AE測定 熱応力による破壊の発生時期および位置を推定するために、AE（アコースティック・エミッション）の測定を行なった。試験体の側面に5個のセンサーを設置し、AE発生率、センサー間の到達時間差等の測定を行なったが、堅岩では100～200 kHz、き裂岩では20～200 kHzの周波数帯域を対象とし、増幅率は70 dBとした。AEの発生位置は、試験体の弾性波速度を定数（既知）として、4組の到達時間差を用いて決定した。

3. 熱応力解析

実験と対比するために、8節点4辺形アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法による熱応力解析を行なった。解析モデルは、平面応力状態とし、図-2に示すような要素分割および境界条件を用いた。解析は堅岩、き裂岩A、き裂岩Bのそれぞれについて、孔壁面の温度 T_i が0℃から-180℃までの範囲で-20℃ごとに、定常状態を仮定して行なった。なお、予備解析により、温度伝導率が $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ 、孔壁面の冷却速度が-20℃/h程度であれば、定常解析と非定常解析の応力分布の差はあまり大きくないことを確認している。解析に用いた物性値を図-3に示したが、これらは事前に実施した岩石試験結果に基づいており、温度依存性を考慮している。

ここで、熱ひずみは凍結膨張ひずみを含んでおり、これに関して
も岩石試験で得られた値をそのまま用いている。しかし、実際のところどのような条件下でどの程度の凍結膨張が起るのかよくわかっていない。そこで凍結膨張の影響を検討するために、堅岩についてのみ凍結膨張を起さない場合の解析も行なった。

4. 実験、解析結果および考察

4.1 熱応力による岩石の破壊とAE

各試験体について3回くり返して実験を行なった後、円孔周辺岩石の破壊状況の観察を行なった。き裂岩B（湿潤状態）

では試験体のほぼ側面にまで達するき裂が生じていた。図-4はき裂岩Bのくり返し3回目の実験におけるAE位置標定結果を示したものであるが、位置標定のデータから-110℃前後からき裂が発生し、その後徐々に側面に向かって進展していったことが推定できる。それ以外の試験体では、肉眼で観察できるようなき裂は全然発見されなかった。また、実験終了後の試験体から採取したコアを用いて

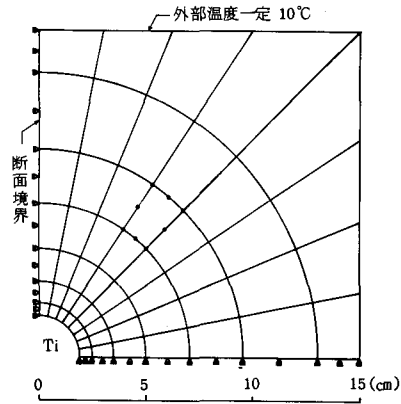


図-2 解析モデル

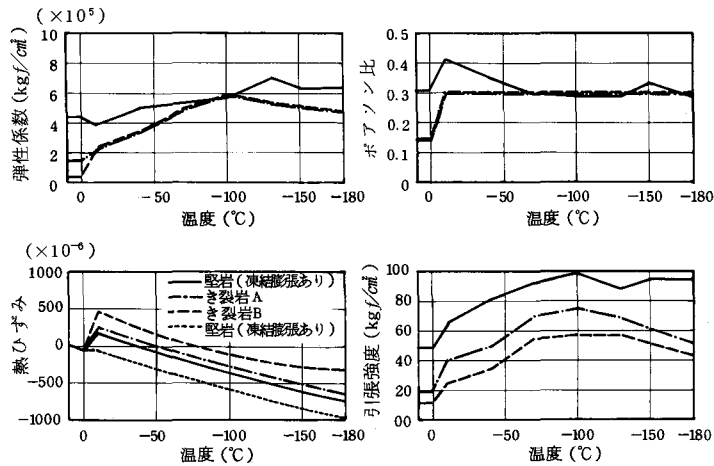


図-3 解析に用いた物性値

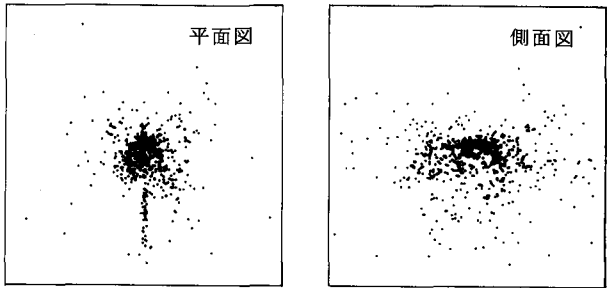


図-4 AE位置標定例（き裂岩B，くり返し3回目）

圧引張試験および弾性波速度測定を実施したが、円孔周辺部においても引張強度や弾性波速度は実験の影響を受けていなかった。

表-1は、湿潤状態の試験体を用いた実験において、AEが発生し始めた時の孔壁面の温度（以下AE発生開始温度と記す）を示したものであるが、試験体による差はわずかであり、いずれもAEはLPG貯蔵温度範囲（-42℃以上）では全然発生せず、-50~-80℃の温度になってから発生し始めている。これは熱応力解析で得られた引張破壊開始温度（最大引張応力が引張強度と等しくなる温度）と対応している。

湿潤状態における実験では、孔壁面の温度の低下に伴いAE発生率は大きく増加しており、図-5に示すようなAEの集中発生が時々みられた。このような微小破壊の集中発生が岩石の力学的性質や挙動にどのような影響を及ぼすかについてはよくわかっていないが、巨視的な破壊に結びつく可能性があると考えるのが妥当であると思われる。また、AEは間隙を充てんしている氷の部分で発生することが多いと考えられ、この場合には、実験時の円孔周辺岩石の強度は氷の破壊により低下しているけれども、実験後の常温における強度はほとんど変わらないということになる。したがって、AEが集中発生している場合には、実験後の強度試験等でその影響を確認できなくても熱応力に対して安定であると言える。

表-1 AE発生開始温度

No.	試験体	くり返し回数	AE発生開始温度(℃)	$\sigma_\theta = \sigma_t$ となる温度(℃)
1	堅岩 湿潤	1	-47	-70
		2	-50	
		3	—	
2	き裂岩A 湿潤	1	-50	-63
		2	-65	
		3	-53	
3	き裂岩B 湿潤	1	-80	-46
		2	-82	
		3	-63	

図-6は、熱応力解析により得られた試験体内部の応力分布を、孔壁面の温度が-20、-60、-100、-180℃の場合について示したものである。ここで、符号は引張を正としている。凍結膨脹が存在し、かつ孔壁面の温度が比較的高い場合を除けば、孔壁面における円周方向応力 σ_θ が最大の引張応力になる。そこで、 σ_θ が引張強度 σ_t を越えた領域を破壊領域とし、その進展状況も同時に図-6に示す。湿潤状態では、孔壁面の温度が-180℃になったときの破壊領域は堅岩、き裂岩とも孔壁面から2.0~3.0cmに及んでいる。また、孔壁面における円周方向応力は引張強度の3~4倍に達している。したがって、解析結果もLNG貯蔵温度（-162℃）のような極低温では、熱応力に対する安定性を確保するのは困難な

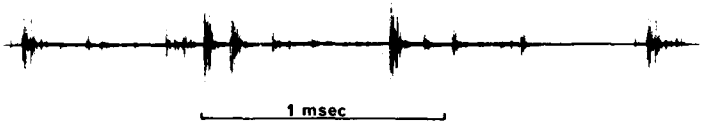


図-5 AEの集中発生例（堅岩、湿潤状態）

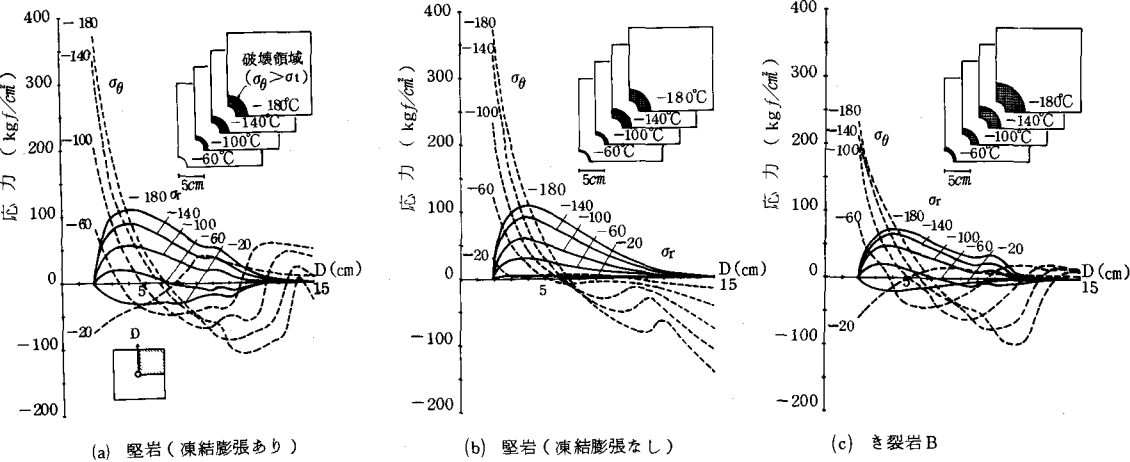


図-6 熱応力分布および破壊領域の進展状況（湿潤状態の場合）

ことを示している。

4.2 凍結膨張に関する検討

乾燥状態の試験体を用いた実験において、試験体内の温度差により生じたひずみとして測定された値は、一般に比較的単調な経時変化をしている。そして、個々の測定値はばらついているものの、その平均値をとると、

孔壁面近傍の円周方向ひずみ以外は解析値とほぼ類似の傾向を示している。

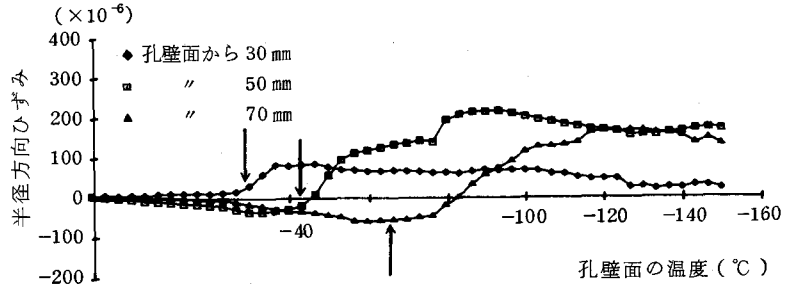


図-7 湿潤状態における半径方向ひずみの測定例 - き裂岩A

一方、湿潤状態の試験体の場合には全く異なった結果が得られている。図-7はき裂岩Aにおける半径方向のひずみの経時変化の測定例である。円周方向のひずみは凍結前線の通過の影響をあまり受けないのに対して、半径方向のひずみは、凍結前線の通過(図中に矢印で表示)直後に引張側に急激な変化を示す場合が多い。このようなひずみの変化は、凍結膨張現象が存在する場合にのみみられるものであり、その変化量の大きさから、土が凍る場合と同様に、熱流方向(この場合は半径方向)に凍結膨張が卓越しているものと考えられる。したがって、凍結膨張ひずみは冷却方法に依存することになり、湿潤状態では、今回のような方法で熱応力を推定することはできない。

FEM解析によって、凍結膨張の有無による熱応力分布の相違を求めた結果を図-6に示す。凍結膨張が存在する場合は堅岩、き裂岩とも凍結前線の側面への進行に伴い、応力分布は大きく変動する。特に孔壁面の温度が比較的高い場合の孔壁面周辺の応力は、凍結膨張が存在しない場合には半径方向、円周方向とも引張となるのに対して、凍結膨張が存在する場合には逆に圧縮となっている。塩尻³⁾も凍結膨張の影響について検討を行ない、同様のことを指摘している。堅岩で、凍結膨張が等方的に起る場合についてしか比較のための解析を実施していないが、凍結膨張が存在するとした場合の方が引張破壊の開始時期が遅くなる。しかし、温度の低下に伴い凍結膨張の影響は少なくなり、 -180°C における破壊領域の広がりには両者の間にほとんど相違がみられない。このような凍結膨張の有無による熱応力分布の相違は、き裂岩でも同様であると考えられる。

5. まとめ

今回の実験と解析によって得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 花崗岩のように間隙率の小さい岩石でも湿潤状態では凍結膨張現象がみられ、それは熱流方向に卓越する。そして凍結膨張の起り方により、周辺岩石の応力分布は大きな影響を受ける。
- (2) LPG貯蔵温度範囲では堅岩、き裂岩とも熱応力に対して安定であるが、LNG貯蔵温度のような極低温では、熱応力に対する安定性を確保するのはかなり困難である。
- (3) 堅岩とき裂岩を比較すると、熱応力に対する安定性という点では、両者の間にあまり相違がみられない。

謝 辞 この研究をすすめるにあたり御指導を頂いた通産省工業技術院公害資源研究所厨川道雄氏、松永烈氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kuriyagawa, Matsunaga, Kinoshita and Hibi: Subsurface Space, Proceedings of the International Symposium (Rockstore 80), pp.665~671 (1980)
- 2) 木下, 厨川, 松永: 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.342~343 (1980)
- 3) 塩尻, 岸, 佐藤, 高野: 電力土木, No.166, pp.46~61 (1980)

Rock Properties and Their Effect on Thermally Induced Stresses under
Low Temperature

by Naoto KINOSHITA

Yoshio ISHIZUKA

Kazuki HIBI

The Research Laboratory of
Shimizu Construction Co., Ltd.

ABSTRACT

In this paper, laboratory experiments and thermal stress analysis by the finite element method were performed to investigate the behavior of rocks under thermal stresses.

The materials used in the investigation were intact rocks (granite) and randomly jointed rocks which were made by heating the intact rocks. The rock specimen used was a cube of 30 cm with a 3.8 cm borehole in the center. The temperature of the borehole wall was lowered by liquified nitrogen at the rate of -20°C/hr and the outer surface of the specimen except two surfaces having the hole was kept at 10°C . Temperatures, strains and acoustic emission (AE) events were measured during the experiments.

Since mechanical and thermal properties of rocks depend on the temperature according to previous rock experiments, the thermal stress analysis was executed considering the temperature dependence.

The main results obtained are summarized as follows:

- (1) Even rocks with a small porosity such as granite indicated a freezing expansion phenomenon in a wet state. The freezing of rocks excelled in the direction of a heat flow and had influence on the thermal stress distribution of the surrounding rocks.
- (2) Beyond the minimum temperature of LPG storage, cracks observed by the naked eye and AE generated have not produced in the specimen of randomly jointed rocks as well as intact rocks. The tensile fractures by the thermal stress analysis were not produced, either.
- (3) On the other hand, at a LNG storage operating temperature, cracks have been observed in only one case of rock specimens. However, the number of AE generated increased and tensile fracture zones by the thermal stress analysis were rather progressive in every specimen at the operating temperature. As a result, we could conclude that it is difficult to maintain a rock stability under thermal stresses at this temperature.
- (4) For the specimens in a wet state, there were no distinctions between intact rocks and randomly jointed rocks among the initiated temperature of AE generated, the initiated temperature of the tensile fracture and the propagation of tensile fractures by the thermal stress analysis.