

III-218

岩盤凍結型LNG貯蔵空洞に関する
岩石熱物性および力学試験

山梨大学大学院 学生員○大里 祥生
大成建設(株)技術研究所 正会員 小川 豊和
大成建設(株)技術研究所 正会員 青木 智幸
山梨大学工学部 正会員 平島 健一

1. 緒 言

近年、岩盤凍結方式によってLNG(-162℃)を大深度地下に貯蔵しようと各種貯蔵方式が検討されてきているが⁽¹⁾、著者ら⁽²⁾は岩盤空洞に土質材料をライニング材として用いることを提案し、LNG貯蔵空洞ライニングが理論上、力学的に安定であることを示した。しかし、岩盤凍結方式によるLNGの貯蔵可能な施設は海外を含めほとんどないのが現状であり、この原因の一つにはLNG温度付近の極低温までの土質・岩石材料の物性変化が完全には把握されていないことが考えられる。また、熱伝導解析には熱拡散率の値が必要である。通常は熱伝導率、密度、比熱などの測定値から計算によって求められることが多いが、温度依存性を有するため、熱拡散率をLNG温度まで直接測定した方が容易であり正確である。しかし、現在土質・岩石材料のLNG温度までの熱拡散率を測定した例は極めて少ないようである⁽³⁾。

これらのことを踏まえ、著者らは土質・岩石材料の常温からLNG温度までの力学的性質ならびに熱的性質に関する室内試験を実施した。ここでは強度および熱拡散率測定試験結果について報告し、さらにその知見に基づき、すでに提案しているLNG貯蔵空洞モデルの成立可能性を検討する。

2. 測定方法

本研究ではまず各種物性試験の実施に先立ち、図1に示す液体窒素を冷媒とする対流式低温槽装置の温度制御性や槽内の温度均一性について調査し、その結果今後この装置を用いて物性試験を実施することに実用上問題がないことを確認した。強度試験は低温槽装置と圧縮試験機を組み合わせることにより、圧裂引張試験と一軸圧縮試験を実施した。熱拡散率の算定は温度測定結果を用いて稲田と八木⁽⁴⁾の微小体積内の熱収支によるシュミット理論を応用した要素分割法により行った。なお、本装置における強度、熱拡散率の測定誤差は文献値と比較して実用上問題のない範囲であった。実験に用いた土質・岩石材料を表1に示す。

3. 測定結果

図2、図3には低温下における圧裂引張強度、一軸圧縮強度の試験結果を示す。これより、含水した土質材料は常温から-120℃において20~50倍強度が増加し、-120℃から-170℃になると増加し続けていた強度は、ばらつき低下することがわかる。強度増加は間隙水が凍結し氷となったこと、-120℃以下での強度の低下はこの温度領域で間隙

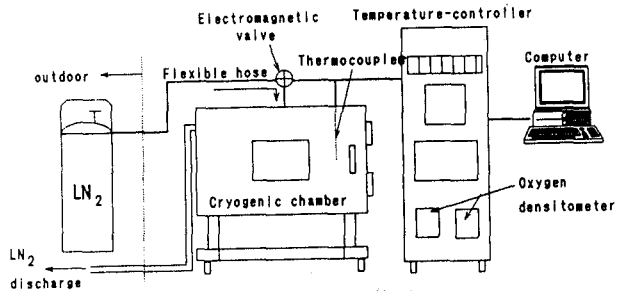


図1 極低温槽装置

表1 各種物性試験に用いた土質・岩石材料

Material	water content	ρ g/cm ³	n %	Properties		
				κ	σ_c	σ_t
Granite	DRY	2.61	0.5	○		
	WET	2.62	0.5	○		
Andesite	DRY	2.15	14.0	○		
	WET	2.35	14.0	○		
Sandstone	DRY	1.95	22.0	○		
	WET	2.15	22.0	○		
mudstone	DRY	1.47	56.5	○	○	○
	WET	1.85	56.5	○	○	○
Bentonite+Sand	15%	1.62	—	○	○	○
	10%	1.71	—	○	○	○
Kaolinite+Sand	15%	1.82	—	○		

Notes) ρ : bulk specific gravity, n: porosity,
 σ_c : uniaxial compressive strength,
 σ_t : tensile strength, κ : thermal diffusivity.

水が完全に凍結し脆性状態となり、間隙水の凍結膨張後の大きな収縮によって発生する氷と鉱物間のクラックが原因であると推定される。また、この現象は一軸圧縮試験よりも材料の微小亀裂に敏感に反応する圧裂引張試験において顕著であった。強度試験結果より、著者らの提案した岩盤空洞に土質材料をライニング材として用いてLNGを貯蔵する場合、土質材料を -120°C 以下に冷却すると強度のばらつきが生じるため、安定性の検討上、問題が残る。そのため、実用的には土質材料の内側に断熱材が必要であると考えられる。

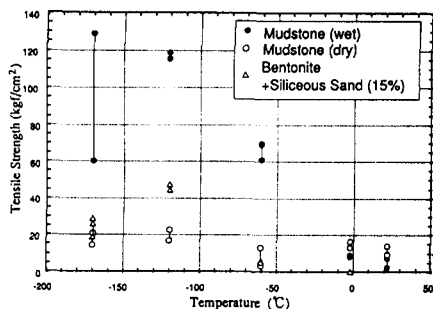


図2 圧裂引張強度の試験結果

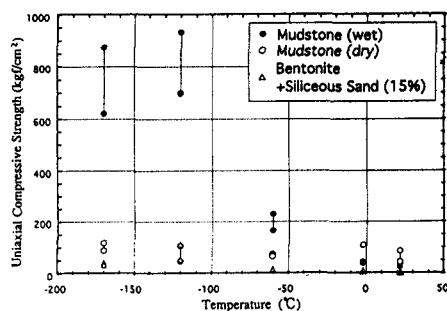


図3 一軸圧縮強度の試験結果

図4、図5には低温下における岩石・土質材料の熱拡散率の算定結果の一部を水・氷の熱拡散率とともに示す。これらから飽和・乾燥試料とも温度の低下とともに熱拡散率は増加し、常温からLNG温度までの熱拡散率の増加率は間隙率の小さい材料や間隙率が大きくても含水量の多い材料ほど大きい。そのため、同一材料の飽和と乾燥試料の低温下での熱拡散率は間隙率の大きい材料ほどその差は大きくなる。また、含水した試料は水の潜熱の影響を受けるため、見かけ上 0°C 付近で熱拡散率の急激な低下があった。この熱拡散率の低下現象は試料中の未凍結水量と関係があると思われる。

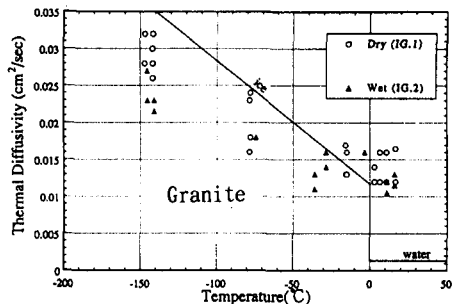


図4 花崗岩の熱拡散率算定結果

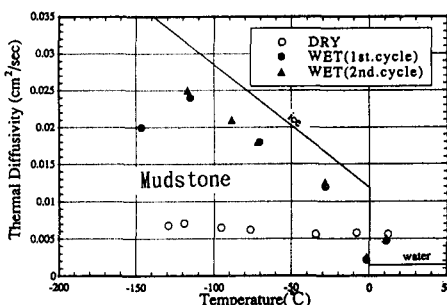


図5 泥岩の熱拡散率算定結果

4. 結 論

- 本研究では土質・岩石材料の常温からLNG温度までの物性試験を実施した結果、以下のことが判明した。
- 含水した土質材料の強度は温度低下とともに増加するが、LNG温度(-162°C)時の強度は -120°C 時の強度の $1/2 \sim 1/10$ まで急激に低下し、この現象は一軸圧縮試験よりも圧裂引張試験において顕著であった。
 - 土質・岩石材料の熱拡散率は温度低下とともに増加する。その増加率は間隙率や含水比などに依存し、常温から -160°C で約20～400%の増加が観察された。また、含水試料は 0°C 付近で熱拡散率が急激に低下する。
 - 前回提案したLNG貯蔵空洞モデル⁽²⁾はライニング材として用いた土質材料に -120°C 以下で強度のばらつきがあるため、実用的には土質材料の内側に断熱材を用いるなどの配慮が必要である。

〔謝辞〕 東京大学工学部、福井勝則助教授には低温槽装置の開発、実験などで御指導頂いたことを記し、ここに深く感謝いたします。

〔参考文献〕 (1) (財)エンジニアリング振興協会, 地下開発利用研究センター: ENAA GEC 1992-P6: 1993.

(2) 大里ら: 土木学会第48回年次学術講演会, III-583: 1993. (3) 幾世橋ら: 資源・素材学会, 1993年春季大会: 1993.

(4) 稲田, 八木: 材料, 第29巻, 第327号, pp. 1228-1233: 1980.