

III-583

極低温物質の貯蔵により生じる空洞周辺の熱応力解析

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 福井 勝則

山梨大学工学部 正会員 平島 健一

1. 緒言

LNG(-162℃)など岩盤内への極低温物質の貯蔵に際しては空洞壁面円周方向には大きな引張熱応力 $\sigma_{\theta\theta}$ が発生することが知られている。ここでは凍結膨張性の粘土をライニング材として用いることによって引張応力を抑制し、熱応力に対して安全な構造物設計の可能性を検討する。

粘土の線膨張率はその成分構成材料の割合や粒径などにより、その値が変動し凍結膨張を示すものがある⁽¹⁾。このことを踏まえて数値計算上で引張応力が生じない粘土の物性値を見出し、その物性値の実現性や熱応力と凍結領域の大きさ、粘土の層厚などとの関係を調べる。解析ではヤング率と線膨張係数の温度依存性を考慮した定常軸対称問題とし、空洞周辺の熱応力と変位を算定する。

2. 解析方法

図-1に示すように、岩盤中には半径 a の空洞があり、その中心からの距離を r とする。空洞から遠方にとった半径 c ($c \gg a$)の円を応力算定領域と考え、その円周上で変位を0と仮定する。空洞壁面での温度を $T = T_a$ 、半径 b 以上での温度を $T = T_b$ とし、熱伝導を定常状態とする。これらの条件下で、フーリエの法則を用いて式(1)、(2)によって温度分布 $T(r)$ を求めることができる。

$$T(r) = T_b + (T_a - T_b) \frac{\ln \frac{b}{r}}{\ln \frac{b}{a}} \quad (a \leq r \leq b) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$T(r) = T_b \quad (r \geq b) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $\ln$ は自然対数を示す。 $a \leq r \leq b$ に粘土と岩などそれぞれ熱物性の異なる材料が存在する場合を考え、各々の熱伝導率より温度分布を求めた。

熱応力解析には、ヤング率と線膨張率の温度依存性を考慮した。

温度 T (℃)とヤング率 $E(T)$ には指数関係、割線線膨張率 $\alpha(T)$ とは線形関係があると仮定し、式(3)、(4)のように設定した。

$$E(T) = k_1 \exp(k_2 T) \quad \cdots \cdots (3) \quad \alpha(T) = n_1 + n_2 T \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 k_1, k_2, n_1, n_2 は定数であり、 k_1 は応力の次元を、 n_1 は線膨張率の次元、また k_2, n_2 は時間の逆数の次元をもつ。

以上の仮定のもとに、平面ひずみ円柱座標系における応力-ひずみの関係式および応力の釣合式を $r = c$ における境界条件 $[u_r]_{r=c} = 0$ のもとに連立させて解き、空洞壁面より半径方向各距離の地点で発生する熱応力(半径方向応力 σ_{rr} 、円周方向応力 $\sigma_{\theta\theta}$ 、鉛直方向応力 σ_{zz})および変位(半径方向変位 u_r)を求めた。ここでは引張応力および円孔内側への変位を正と定義する。

3. 解析結果

表-1にCase1~Case3の熱応力の算定条件と物性値を示す。そのときの熱応力の算定結果を図-2~4、変位を図-5に示す。 $a \leq r \leq b$ の材料はCase1では花崗岩、Case2はBoom Clay、Case3は引張応力を生じさせないような物性値をCase2をもとに考慮したものである。なお $r \geq b$ はCase1~Case3ともに花崗岩、 $b/a=2$ とした。

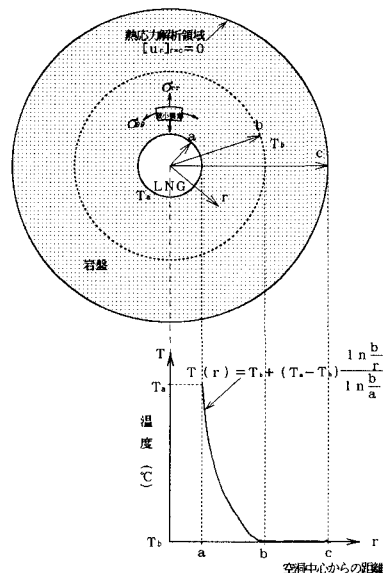


図-1 熱応力解析モデルとその温度分布

各熱応力図よりCase1では大きな引張熱応力が発生していることがわかる。-162℃での花崗岩の引張強度が15MPa程度⁽⁴⁾であるため空洞壁面では、亀裂や破壊が生じるとされる。Case2では小さな圧縮熱応力状態となり、粘土の-162℃の圧縮強度は20MPa程度⁽⁵⁾なので充分安全であると言える。図-5で非常に大きな正の変位が生じているのは粘土の膨張ひずみが花崗岩の収縮ひずみを上回っているためである。Case3の物性値は、-38.7℃以下での線膨張率 α の温度依存項を変化させることにより-162℃での α 値をCase2よりも大きくしたものである。この場合Case2よりも各熱応力、変位ともに小さく、粘土の物性を変化させることにより発生する熱応力を抑制することが可能であることがわかる。

各熱応力図の $b/a=2$ で屈曲点のようなものが見られるが、これは b/a の値が小さいため0℃付近での温度勾配が大きいために生じているものと思われる。

表-1 熱応力の算定条件と物性値

	$a \leq r \leq b$ の物性値		ポアソン比 ν	材料	算定条件			
	ヤング率 E (MPa)	線膨張率 α ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 適用温度範囲			温度 ($^{\circ}\text{C}$)	半径距離	b/a	c/a
Case1	$33000\exp(-0.0035T)$ ($-162 \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$)	$0.5^{(4)}$ ($-162 \leq T \leq 20$)	$0.25^{(4)}$	花崗岩	T_a			
Case2	$17\exp(-0.0253T)^{(1)}$	$-13.784 - 0.06532T^{(1)}$ ($-162 \leq T \leq -38.7$) $-5.329 + 0.1528T^{(1)}$ ($-38.7 \leq T \leq -23.7$) $2.90 + 0.5T^{(1)}$ ($-23.7 \leq T \leq 20$)	$0.3^{(1)}$	Boom Clay	T_a, T_b	20	2	1000
Case3	$17\exp(-0.0253T)$	$-14.538 - 0.08516T$ ($-162 \leq T \leq -38.7$) $-5.329 - 0.1528T$ ($-38.7 \leq T \leq -23.7$) $2.90 + 0.5T$ ($-23.7 \leq T \leq 20$)	0.3	Sample				

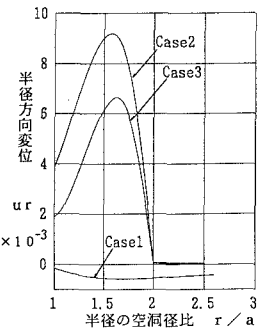
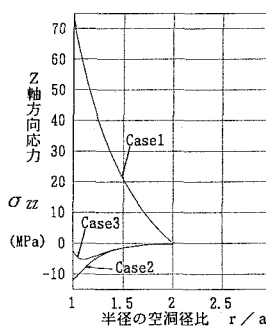
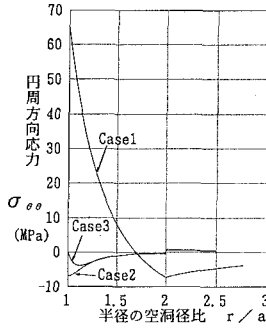
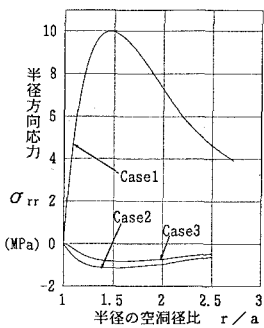


図-2 半径方向熱応力 図-3 円周方向熱応力 図-4 鉛直方向熱応力 図-5 半径方向変位

4. 結論

本研究では、LNG岩盤貯蔵施設周辺で発生する熱応力を抑制するために凍結膨張の特性をもつ粘土を用いて、定常状態の軸対称問題として熱応力と変位を算定し、物性と熱応力との関係を考察した。本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

- ①ライニングの無い岩盤（花崗岩）の場合、空洞壁面で大きな引張応力 σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ が発生し亀裂や引張破壊が生じる可能性がある。
- ②ライニング材として凍結膨張性の粘土を用いることにより、空洞周辺の引張応力を抑制することが可能であり、これは熱応力を低減させる上で非常に有効である。

〔参考文献〕

- (1) J.F. Unsworth, R.P. Sheppard, 1991, "Cryogenic Properties of soils and rocks; 2. The influence of water types on the uniaxial mechanical behaviour of clays", pp.211-225, Geotechnique 41 NO.2.
- (2) J.B. Homer, E. Horvat, J.F. Unsworth, 1989, "Laboratory experiments for unlined cryogenic cavern storage", pp.213-219, Storage of Gases in Rock Caverns.
- (3) 石塚, 木下, 奥野, 1985, "LPG岩盤内貯蔵空洞の安定解析", 清水建設研究報告, 第41号, pp.11-17.
- (4) 松永, 厨川, 木下, 1982, "岩石の低温下における機械的性質に関する研究", 探鉱と保安, 第28巻.
- (5) 土質工学会, 1982, "土の凍結—その制御と応用—", pp.59-68, 土質基礎工学ライブラリー 23
- (6) 竹内準一郎, 1971, 「熱応力」, 第5章, pp.76~114, 日新出版.