

液化天然ガスの地下貯蔵に関する基礎的研究 (堅型空洞の安定性)

愛媛大学工学部 (正会員) 稲田 善紀
総合地質調査(株) 松井 毅

愛媛大学大学院 (学生員) の重信 純
(株) 応用地質調査事務所 馬判 卓

1. 緒言

液化天然ガスを地下の岩盤内堅型空洞に貯蔵する場合、空洞周辺に発生する塑性領域を No Tension法を用いて解析し、その安定性を検討した結果について報告する。

2. 堅型空洞周辺の温度分布について

2.1 温度分布の計算方法

空洞周辺を三角形要素にて分割した軸対称モデルを考える。要素が図1のように連結している場合の要素2における温度は次の近似式で与えられる。

$$U_{2,t+\Delta t} = U_{2,t} + \frac{K}{S_2 \Delta t} \left\{ \frac{U_{1,t} - U_{2,t}}{l_{1,2}} d_{1,2} + \frac{U_{4,t} - U_{2,t}}{l_{2,4}} d_{2,4} + \frac{U_{3,t} - U_{2,t}}{l_{2,3}} d_{2,3} \right\} \quad (1)$$

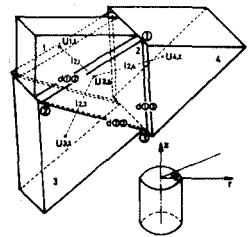


図1. 温度計算説明図

2.2 温度分布の計算結果および考察

軸対称モデルにおいて上部と下部を断熱材で覆うと軸方向には温度差のないいわゆる二次元モデルとなるがこれをまず(1)式にて計算した。次に二次元の場合における空洞周辺の温度分布を与える理論解は次式で与えられる。¹⁾

$$v = U_i + \frac{(V - U_i)a^2}{r^2} \operatorname{erfc} \frac{r-a}{2\sqrt{Kt}} + \frac{(V - U_i)(r-a)(Kt)^{3/2}}{4a^2 r^2} \operatorname{erfc} \frac{r-a}{2\sqrt{Kt}} + \frac{(V - U_i)(9a^2 - 2rt - r^2)Kt}{32a^2 r^2} i^2 \operatorname{erfc} \frac{r-a}{2\sqrt{Kt}} + \dots \quad (2)$$

ただし、 v : 求める温度、 V : 液化天然ガスの温度、 U_i : 岩盤初期温度、 K : 熱伝散率

r : 空洞中心からの距離、 a : 空洞の半径

(1)式および(2)式を用いて計算したものを比較したものが図2であるが、両者はほぼ一致していることがわかる。一方、30cm×30cm×20cmの花崗岩の中央に直径4cm、深さ15cmの孔をあげて孔周辺の温度分布の時間的変化を測定し、計算値と比較したものが図3であるが初期の時間でみれば両者はよく一致しているが以後(1)式を用いて温度分布を求めた。

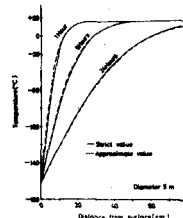


図2 理論値と計算値との比較

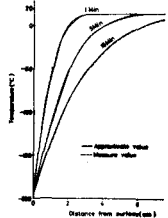
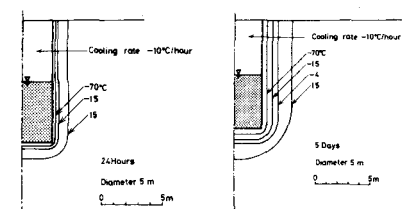


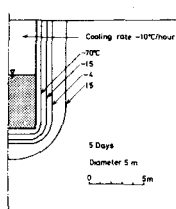
図3 実験値と計算値との比較

さて、液化天然ガスの貯蔵量の変化に応じて堅型空洞周辺の温度分布を計算したものが図4および図5である。ここでバイルオフガスと空洞壁面間には熱伝達が行なわれるのでいわゆる表面熱抵抗による等価厚さを考え、さらにこの部分での冷却速度は $-10^\circ\text{C}/\text{h}$ とした。

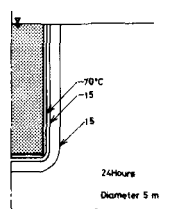
図4 空洞周辺の温度分布(貯蔵量50%)



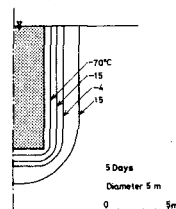
(a) 24時間後



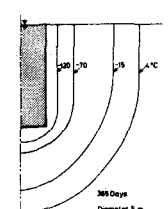
(b) 5日後



(c) 24時間後



(d) 5日後



(e) 365日後

図4 空洞周辺の温度分布(貯蔵量50%)

図5 空洞周辺の温度分布(貯蔵量100%)

これらの図から24時間後では貯蔵液量の差異による温度分布の違いがみられるが、5日後にはいずれも温度分布が同じになることがわかる。

3. 空洞周辺の応力分布について

3.1 応力解析の方法

空洞周辺には地山の自重によりすでに応力分布が存在しているが、さらに変化天然ガスの貯蔵により熱応力が重畳され、塑性領域も時間的に変化する。本解析ではすべて軸対称問題として取扱うこととし、時間の概念を導入したいわゆる逐次破壊解析を行なった。この場合塑性領域を考慮した非引張解析法のうちNo Tension法で解析を行なった。

3.2 応力解析結果と考察

ここでは巨視的に等方性弾性岩盤の地山を想定し、直径5m、深さ10mの堅型空洞を考える。また、今回は側圧係数 $\lambda = 0.5$ 、風化係数 $w = 1.0$ の場合のみについて解析している。

さて、図6は貯蔵前のト-ε平面内における主応力線図であるが、応力はすべて圧縮でありいずれの位置においても塑性領域は発生せず安定している。図7および図8は貯蔵液量の変化に応じてNo Tension法で15分後、5日後、1年後の塑性領域およびゆるみ領域を比較したものであるが、15分後では貯蔵液量の差異によって空洞周辺の塑性領域、ゆるみ領域に違いが生じているが、5日後にはいずれも同じになることがわかる。また、1年後では空洞側壁部において約6m、底部においては約7mの塑性領域、ゆるみ領域が発生している。次に図9は前述の温度測定を行なった後、孔周辺の塑性領域を反射式顕微鏡によって観察したものである。一方、図10は前述の実験をモデル化して孔周辺の塑性領域を

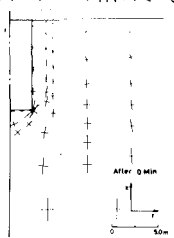
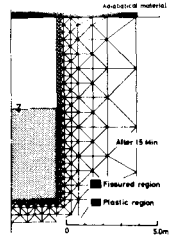
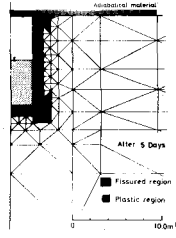


図6 貯蔵前における空洞周辺の主応力線図

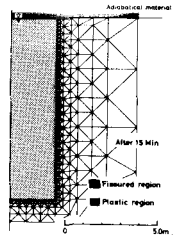


(a) 15分後

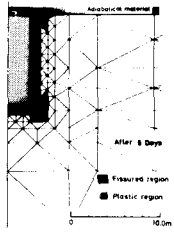


(b) 5日後

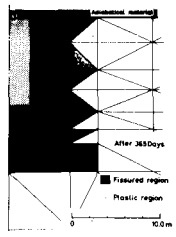
図7 No Tension法による塑性領域とゆるみ領域 (貯蔵液量 50%)



(a) 15分後



(b) 5日後



(c) 365日後

図8 No Tension法による塑性領域とゆるみ領域 (貯蔵液量 100%)

No Tension法によって解析したものである。図9より実際には塑性領域は約1.5mmであるのに対し、図10の計算結果では約5cmにも及んでいる。このことは岩石内の不規則なマイクロクラックの存在ならびに岩石の破壊時に応力解放が行なわれるという考え方がNo Tension法には導入されていないことなどが原因となっているものと思われる。

4. 結言

今回は、岩盤内堅型空洞の安定性について報告したが、今後はNo Tension法を改良し発展させることが必要である。

参考文献

- 1) H. S. Carslaw 他; "Conduction of heat in solids", Oxford at the Clarendon Press, 1959, P. 336

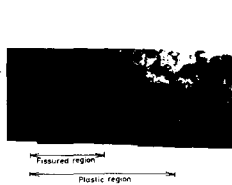


図9 顕微鏡による観察結果

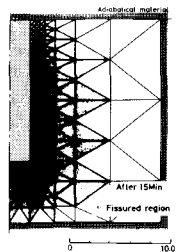


図10 実験モデルのNo Tension法による塑性領域