

LPG 岩盤内貯蔵空洞の安定解析

石塚 与志雄
(技術研究所)木下 直人
(技術研究所)奥野 哲夫
(技術研究所)

§ 1. はじめに

石油, LPG, LNG などのエネルギー貯蔵に関して土地の有効利用, 安全性, 環境保全などの観点から, 地上タンクに代わる岩盤内貯蔵システム¹⁾が注目を集めている。

低温貯蔵方式による LPG 岩盤内貯蔵の実用化のための課題としては, 空洞周辺に発生する熱応力に対する空洞の安定性, LPG の外部への液密性の確保がある。この課題を検討するためには, 低温下における岩盤の力学的・熱的性質の把握とともに, 熱応力による空洞の安定性を評価する解析手法の開発が必要となる。筆者らはこの課題に対する基礎研究として岩石の低温特性の把握²⁾, 熱応力による岩石の破壊実験・解析³⁾などを実施してきた。その結果, 岩石の力学特性は顕著な温度依存性を示すこと, 岩石中の水が氷に相変化する際に凍結膨張が生じること, 低温熱応力によって生じる破壊は引張破壊が主になることなどが明らかとなり, 安定解析では物性の温度依存性, 凍結膨張, 引張破壊を考慮した非線形解析が必要となる。有限要素法による熱応力解析では, 岩盤の半無限領域の境界条件の取り方により空洞周辺の熱応力値が異なると予想されるため, 境界条件について検討

する必要がある。

そのため, 本研究では LPG 岩盤内貯蔵空洞の安定性を検討するための解析手法を確立することを目的として, 以下の項目について検討した。

- (1) 岩盤の低温特性の推定
- (2) Bettess の無限要素の妥当性
- (3) 物性の温度依存性・凍結膨張・材料非線形性を考慮した熱伝導熱応力解析
- (4) モデル解析により, 空洞周辺の温度分布, 凍結膨張および初期応力状態が空洞の安定性に与える影響

§ 2. 岩盤の低温特性

日本において LPG 岩盤内貯蔵の対象となる岩盤は, 花崗岩帯のような比較的良好な岩盤(電中研式岩盤分類⁴⁾で C_H 級程度)と考えられる。低温下における岩盤特性は, 原位置での実測例が無いため, 室内の岩石試験結果から推定することにした。試験に用いた岩石は稲田花崗岩である。室内試験から得られた主な結果は以下のようである。

(1) 弾性係数

図-1 は, 含水飽和状態の岩石の一軸圧縮試験から得られた各温度(20, -10, -40, -70℃)に対する割線弾性係数-間隙率の関係である。各間隙率によりばらつきはあるものの, 温度の低下に伴い, 弾性係数は増大する。この傾向は間隙率が大きいほど著しく, 間隙率3%以上の岩石では-40℃以下の弾性係数は20℃の値の10倍以上となる。

(2) 破壊強度

乾燥状態, 含水飽和状態それぞれの岩石に対する引張強度-温度関係, 一軸圧縮強度-温度関係を図-2, 3に示す。ここで, μ は間隙率である。乾燥状態の岩石の引張強度はほとんど温度依存性を示さないが, 含水飽和岩石の引張強度は顕著な温度依存性を示し, 温度の低下

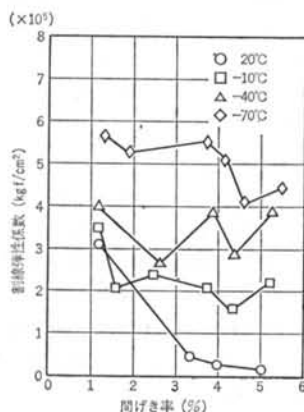


図-1 低温下の割線弾性係数-間隙率関係

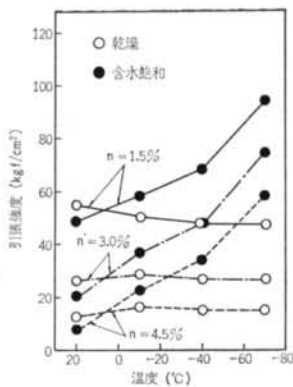


図-2 引張強度-温度関係

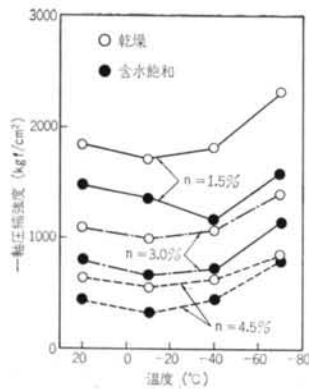
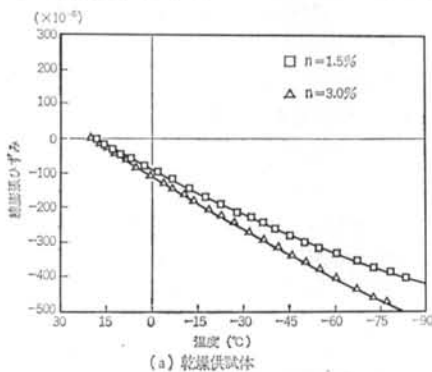
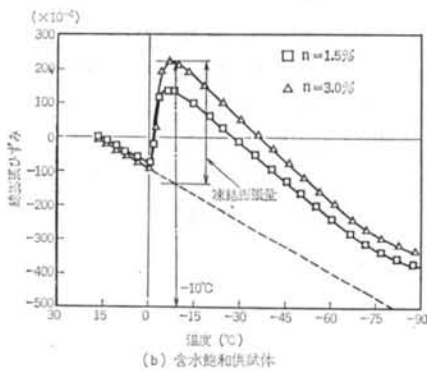


図-3 一軸圧縮強度-温度関係



(a) 乾燥供試体



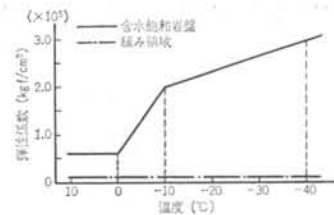
(b) 含水飽和供試体

図-4 線膨張ひずみ測定結果

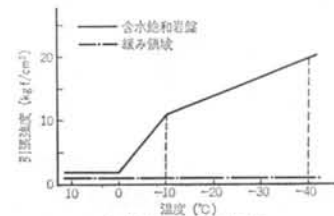
に伴い増大する。これに対して一軸圧縮強度は乾燥、含水飽和状態とも20~40℃間では大きな変化は見られず、-70℃でわずかに増大する傾向を示す。

(3) 線膨張ひずみ

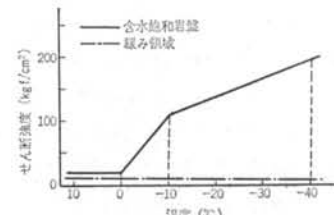
供試体寸法 $\phi 20 \text{ mm} \times l 200 \text{ mm}$ の岩石 (間隙率 $n=1.5, 3.0\%$) を用いた線膨張ひずみ測定試験結果を 図-4 に示す。-90℃までの乾燥岩石ではほとんど温度依存性を示さないが、含水飽和岩石では0℃から凍結膨張が生じ始め-10℃付近で最大の凍結膨張を示す。-10℃以下になると、氷の熱収縮のために線膨張ひずみは減少するよ



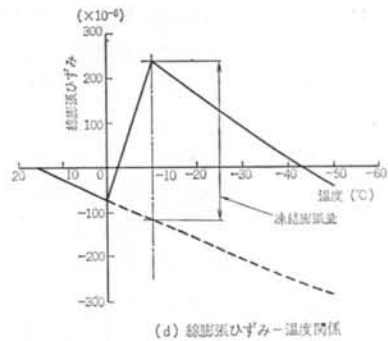
(a) 弾性係数-温度関係



(b) 引張強度-温度関係



(c) せん断強度-温度関係



(d) 線膨張ひずみ-温度関係

図-5 解析に使用した岩盤物性の温度依存性

うになる。間隙率3%の含水飽和岩石の最大凍結膨張量は約 360μ となる。

以上のような室内試験結果と C_{II} 級の岩盤物性値を基として、低温下の岩盤物性を 図-5 に示すように評価した。含水飽和岩盤の弾性係数・引張強度は、常温 (0℃以上) の値を岩盤分類 C_{II} 級の物性値とし、低温下の物性値は室内岩石試験で得られた温度依存性が岩盤でも同様な傾向であると仮定した。せん断強度については低温三軸圧縮試験を実施していないため、ここではせん断強度と引張強度の比を温度に依存せず一定 (せん断強度/

定 数	値
内部摩擦角	45°
ポアソン比	0.3
比 熱	0.18 Kcal/kg°C
熱伝導率	2.0 Kcal/mh°C

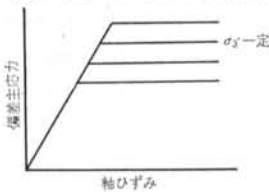
表一 1 解析に用いた岩盤物性

引張強度=10)とした。実際の空洞周辺の熱収縮・凍結膨張現象は、熱流方向、岩盤の含水状態、応力状態、岩盤の異方性などの影響を受けると考えられるが、現状ではこれらの因子を考慮した岩盤の凍結膨張の定量的な把握は行われていない。そのため本研究では、含水岩盤に対しては間隙率3.0%の含水飽和岩石の線膨張試験結果を、また緩み領域など凍結膨張が生じないと考えられる場合には間隙率3.0%の乾燥岩石の試験結果を用いることにした。試験結果は含水飽和・無応力下での値であり、実際の空洞周辺で生じる凍結膨張量よりも大きく評価することになると考えられる。その他の物性値、内部摩擦角、ポアソン比、比熱、熱伝導率については、表一1に示すように温度依存性はなく一定値とした。一方、掘削により生じる空洞周辺の緩み領域では不飽和状態となり、乾燥岩石の室内試験結果と同様の温度特性を示すと考えられる。そのため、緩み領域の岩盤物性は温度に関係なく一定とし、凍結膨張は生じないとした。

§ 3. 解析方法

3.1 岩盤の材料非線形性・温度依存性を考慮した解析方法

§ 2. で示したように、岩盤の弾性係数、破壊強度は温度



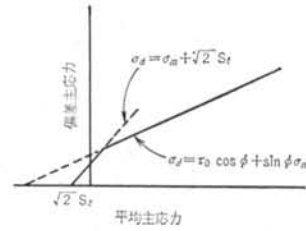
(a) せん断破壊に対する応力-ひずみ関係



(b) 引張破壊に対する応力-ひずみ関係

図一 6 理想化した応力-ひずみ関係

の低下に伴い増大し、低温下の岩盤は常温時よりも、より脆性的挙動を示す。そのため、今回は図一6(a)に示すように破壊までは弾性挙動し、破壊後完全塑性となる、bilinearな応力-ひずみ関係を用いた。引張破壊に対する応力-ひずみ関係は、岩盤をno-tension材料と考え、最小主応力が岩盤の引張強度を超えるまでは弾性挙動し、破壊後は引張応力に抵抗し得



図一 7 破壊規準

ないとした。図一6(b)に、引張破壊に対する応力-ひずみ関係を示す。岩盤のせん断破壊に対応する破壊規準には、せん断強度 τ_0 、内部摩擦角 ϕ で定義されるモール・クーロンの破壊規準を用いた。引張破壊規準を組み入れた破壊規準式は次のようになる(図一7参照)。ここで、符号は圧縮側を正とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 < S_t : \sigma_a = \sigma_m + \sqrt{2} S_t \\ \sigma_3 \geq S_t : \sigma_a = \tau_0 \cos \phi + \sin \phi \sigma_m \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ここに、 σ_1 :最大主応力、 σ_3 :最小主応力、 S_t :引張強度、 $\sigma_a = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 、 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ である。

岩盤物性は、図一5に示す温度依存性をそのまま温度の関数として解析に取り入れた。具体的には、非定常熱伝導解析の各時間ステップで要素内ガウス積分点の温度を求め、その温度値から力学物性値を評価し、熱応力解析を実行した。

以上の考えに基づき、LPG岩盤内貯蔵空洞安定解析では、有限要素法を用いて次のようなフローで解析を実施した。

- (i)材料非線形性を用いた応力解析により、空洞掘削後の応力を求める。
- (ii)非定常熱伝導解析で各時間ステップの温度分布を求める。
- (iii)上の温度分布から岩盤の力学特性と増分線膨張ひずみ量を評価し、剛性マトリックスを作成し増分熱応力を計算する。
- (iv)上で求めた増分熱応力を前時間ステップまでの応力に加え、非線形解析を実施する。
- (v)所定の時間まで、(ii)~(iv)の手順を各時間ステップで実行する。

3.2 半無限領域への無限要素の適用

熱応力解析のような初期ひずみ問題では、解析領域の大きさ、境界条件の差異により空洞周辺の応力値が大きく異なる。そのため、本研究では Bettess が提案した無限要素⁵⁾で岩盤の半無限領域を表わすことにし、その妥当性を検討した。

Bettessの無限要素は、8節点2次元アイソパラメトリ

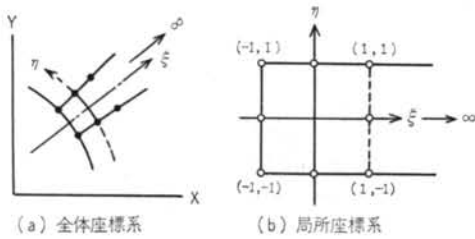


図-8 Bettess の無限要素

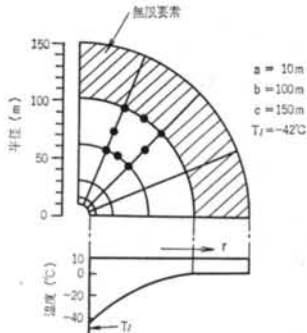


図-9 温度荷重が作用する円孔の有限要素モデル

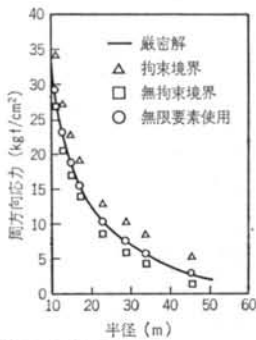


図-10 厳密解とFEM解

ック要素を拡張したもので、図-8に示すように通常の要素の1辺を無限遠点に移動させ、無限遠点でのポテンシャルがゼロになるように内挿関数を選ぶことにより、半無限領域を表現することができる要素である。この無限要素の妥当性を検討するために、図-9に示すような半径 a の円孔を有する岩盤に温度荷重が作用する問題について解析した。解析領域を c とし、温度分布を孔壁で T_i 、 $a < r < b$ で定常温度分布、 $b \leq r \leq c$ で 0°C 一定とした。図-10は $a=10\text{ m}$ 、 $b=100\text{ m}$ 、 $c=150\text{ m}$ 、 $T_i=-42^\circ\text{C}$ 、弾性係数 $E=1.2 \times 10^8\text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、線膨張係数 $\alpha=0.5 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ としたときの半径方向の周方向応力分布であり、厳密解と境界を拘束した場合、無拘束とした場合、無限要素を用いた場合のFEM解を示す。なお、厳密解は温度分布を $t(r)$ として次式⁶⁾で与えられる。

$$\sigma_o = -\frac{E}{1-\nu} \left[\frac{1}{r^2} \int_a^r at(r)rdr - at(r) - \frac{\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)}{a^2 + (1-2\nu)c^2} \int_a^b at(r)rdr \right] \dots\dots(2)$$

$t(r)$ は定常熱伝導より $t(r)=T_i \log(b/r)/\log(b/a)$ となり、上式の積分項は次のようになる。

$$\int_a^r at(r)rdr = \frac{\alpha T_i}{\log(b/a)} \left\{ \frac{1}{2} [r^2 \log(b/r) - a^2 \log(b/a)] + \frac{1}{4} (r^2 - a^2) \right\}$$

$$\int_a^b at(r)rdr = \frac{\alpha T_i}{\log(b/a)} \left[\frac{1}{4} (b^2 - a^2) - \frac{1}{2} a^2 \log(b/a) \right]$$

この比較によると、境界を拘束および無拘束とした場合の解は厳密解と大きく異なり、境界の影響が大きく現われる。これに対して、無限要素を用いた解析値は厳密解と良い一致を示し、熱応力解析に対する Bettess の無限要素の妥当性が確認できた。

§ 4. LPG 岩盤内貯蔵空洞の解析モデル

LPG 岩盤内貯蔵空洞の解析モデルとして、図-11に示すような高さ20m、幅15mの空洞を想定した。空洞深度は、初期地山応力の影響を調べるために55mと100mの2種類とした。温度条件は岩盤初期温度、大気温度を 16°C 一定、空洞のプレクーリング方法は 16°C から LPG 貯蔵温度 -42°C まで3か月間で2次曲線的に低下させる方法とし、その後は空洞壁面温度 -42°C 一定とした。解析時間は30年間とした。なお、空洞掘削による空洞周辺の緩み領域は壁面から2mとした。図-12は、有限要素解析に使用したメッシュ分割図で、空洞の長手方向長さが空洞断面に対して十分に長いものとし、平面ひずみ問題として扱った。要素は、空洞周辺に高次要素(8節点四辺形アイソパラメトリック要素)を使用し、空洞から遠ざかるに従って節点数の少ない要素(4~7節点四辺形アイソパラメトリック要素)を用いた。無限要素は図-12で斜線で示した部分に配置した。

§ 5. 解析結果

5.1 空洞周辺の温度分布

プレクーリング、LPG 貯蔵によって生じる側壁方向の温度勾配の経時変化を図-13に、空洞周辺の温度分布、

凍結領域 (0℃以下となる領域) の経時変化を 図-14 に示す。空洞周辺の温度勾配はブレイキングが終了する約3か月後で最も大きくなり、その後徐々に減少する。

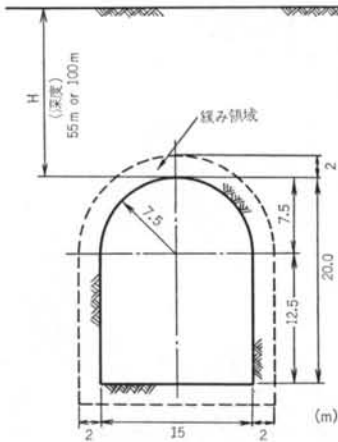


図-11 LPG 岩盤内貯蔵空洞

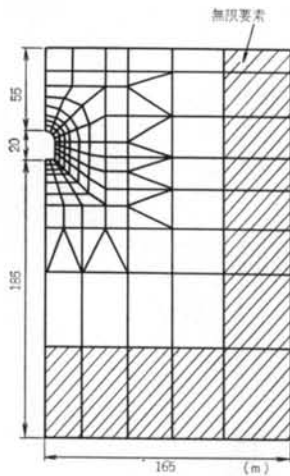
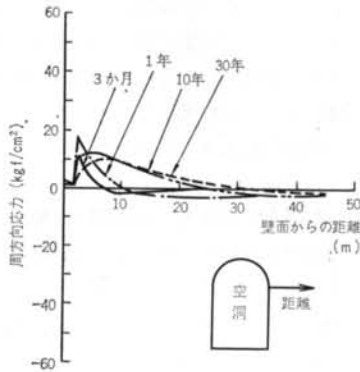


図-12 LPG 貯蔵解析 FEM モデル



(a) 凍結膨張なし

図-15 空洞周辺の弾性熱応力分布の推移

温度分布は、深度55mの場合でも地表の影響をほとんど受けずほぼ同心円状に広がる。凍結領域は、30年後で空洞壁面から約30mに達する。

5.2 空洞周辺の弾性熱応力分布

空洞周辺に発生する側壁方向の周方向熱応力分布の経時変化を 図-15(a), (b) に示す。図(a)は凍結膨張が生じない場合、図(b)は凍結膨張が生じる場合の結果で、符号は引張を正としている。

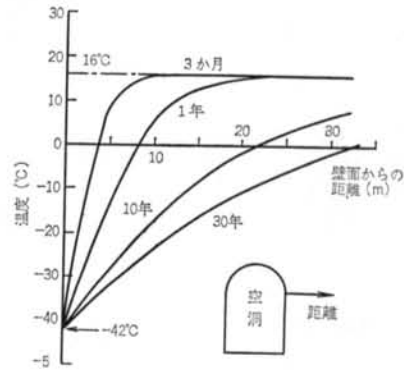


図-13 空洞周辺の温度勾配の推移

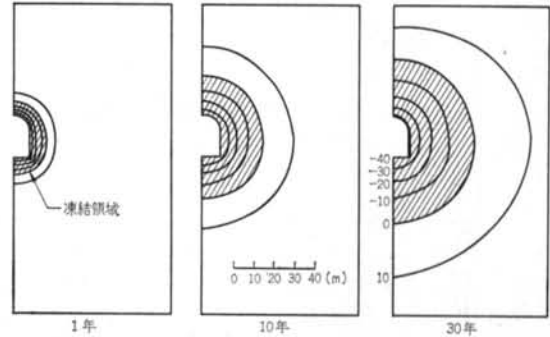
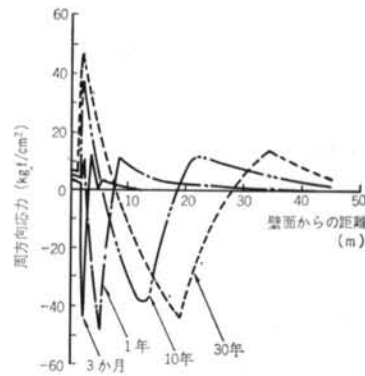
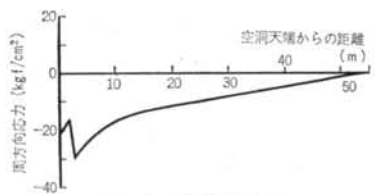


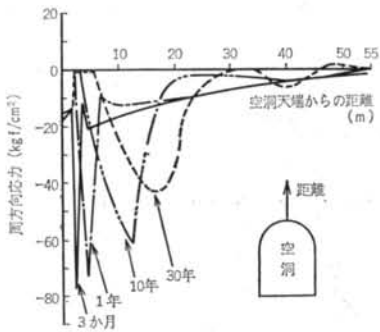
図-14 空洞周辺の温度分布と凍結領域の推移



(b) 凍結膨張あり

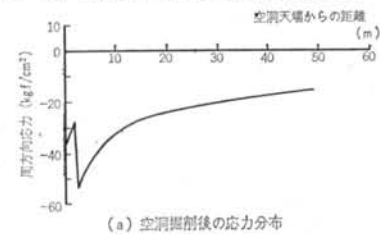


(a) 空洞掘削後の応力分布

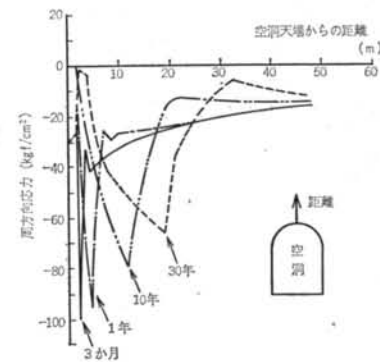


(b) LPG貯蔵時の応力分布の推移

図-16 深度 $H=55$ m の場合の応力分布



(a) 空洞掘削後の応力分布



(b) LPG貯蔵時の応力分布の推移

図-17 深度 $H=100$ m の場合の応力分布

凍結膨張が生じない場合は空洞近傍の周方向に最大引張応力が発生し、壁面から遠ざかるに伴い低下する。貯蔵期間中の最大引張応力は約1年後(約18 kgf/cm²)に生じる。一方、凍結膨張が生じる場合は0~-10℃で凍結膨張が生じるため、0~-10℃領域で大きな圧縮応力が発生し、凍結面の前後の領域に大きな引張応力が誘発される。1年後までは凍結面の前部が最大引張応力とな

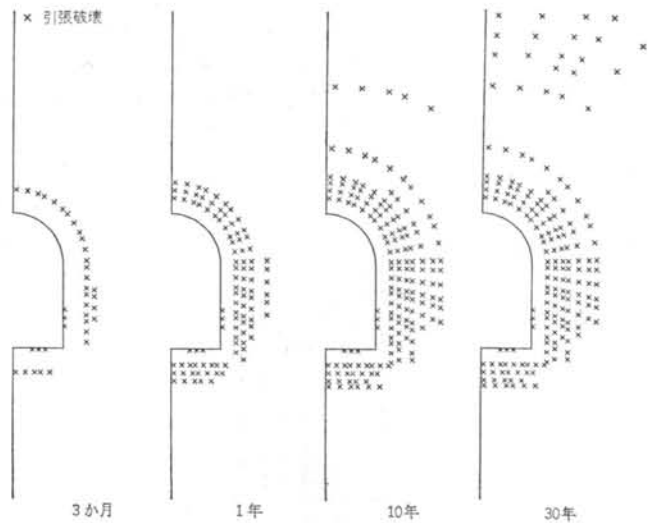


図-18 空洞周辺の破壊領域の進展(深度 $H=55$ m)

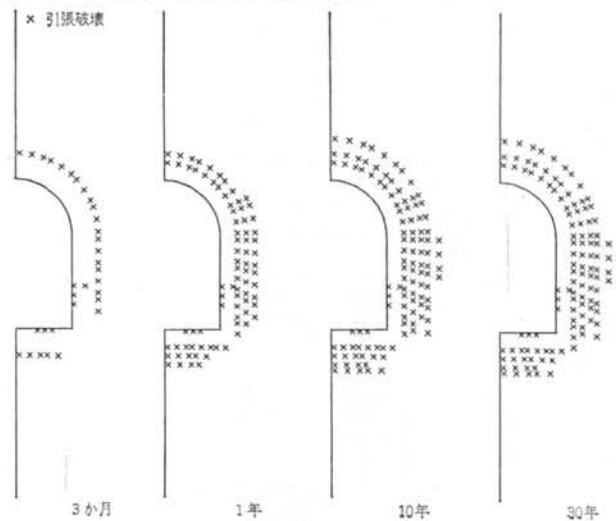


図-19 空洞周辺の破壊領域の進展(深度 $H=100$ m)

るが、その後は緩み領域に接する空洞近傍が最大の引張応力となる。引張応力は凍結領域の進展、時間の経過とともに増大し、30年後には凍結膨張が生じない場合の5倍以上の引張応力が発生することになり、凍結膨張現象が熱応力に大きな影響を与えることになる。

5.3 LPG 岩盤内貯蔵空洞安定解析結果

掘削後の応力と熱応力を重ね合せ、非線形応力解析により得られた空洞周辺の応力分布の経時変化を、深度55 m、100mそれぞれについて図-16、17に、破壊領域の進展状況を図-18、19に示す。図-16、17には掘削後の応力分布も示す。これらの図は、全て凍結膨張が生じる場合の解析結果である。凍結膨張が生じない場合は、最

大引張応力が生じる1年後においても破壊が発生せず、全貯蔵期間で安定という結果になった。凍結膨張が生じる場合は、深度55m、100mともにプレクーリングの終了する約3か月後に最初の引張破壊が発生し、その後側壁部分に引張破壊が広がる。貯蔵期間が10年を経過すると、空洞深度で破壊領域が大きく異なってくる。深度55mでは5年までは凍結領域内に破壊領域は止まるが、10年以降になると凍結領域外部の非凍結領域にも破壊が広がり、応力は地表面下15m付近まで乱れるようになる。これに対して、深度が100mとなると引張破壊が生じるものの貯蔵期間中は凍結領域に止まり、外部に広がることは無い。

破壊領域がどの程度広がれば空洞が不安定になるか、またはLPGが空洞外に漏えいするか厳密に言及することはできないが、非凍結領域にも引張破壊が生じると空洞外部にLPGが漏えいする可能性があると考えられる。今回の解析では、深度が浅い55mの場合に10年以上経過するとLPGが漏えいする可能性が生じるという結果になった。

§ 6. 結論

本研究では、低温貯蔵方式によるLPG岩盤内貯蔵の

実用化の際に必要な岩盤の低温物性、安定解析手法、モデル解析結果について検討した。結果として以下のような結論が得られた。

(1)空洞周辺の温度勾配は、プレクーリング期間が終了する時点で最も大きくなる。温度分布は同心円状に広がり、30年後の凍結領域は壁面から約30mとなる。

(2)空洞周辺の熱応力値、応力分布は凍結膨張の有無により大きな違いが生じる。室内線膨張試験から求めた凍結膨張量(約 360μ)を用いた今回の解析では、凍結膨張が生じる場合の最大引張応力値は凍結膨張が生じない場合の5倍以上となる。

(3)安定解析結果によると破壊は引張破壊が主となる。深度が浅く、かつ凍結膨張量が大きい場合は凍結領域外部にも破壊領域が発生し、LPGが外部へ漏えいする可能性がある。

(4)熱応力解析では、境界条件の取り方により熱応力値が大きく異なってくる。精度のよい解析を実施するためには無限要素を使用する必要がある。

今回評価した岩盤の低温特性は、岩盤分類と低温岩石試験結果から推定したものであり、より厳密な評価を行うためには原位置岩盤試験で検証する必要がある。特に、凍結膨張現象は空洞安定性に大きな影響を与えるため、定量的検討が必要となる。

<参考文献>

- 1) 財団法人エンジニアリング振興協会編：“昭和55年度LPG地下備蓄技術調査報告書” エンジニアリング振興協会(1981年)
- 2) 松永烈、厨川道雄、木下直人：“岩石の低温における機械的性質—LNGの地下備蓄に関する基礎的研究(第1報)—” 日本鉱業会誌 Vol. 97, No. 1120 (1981年) pp. 431~436
- 3) 木下直人、石塚与志雄、日比一喜：“岩石の低温特性と熱応力による破壊” 第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(1982年) pp. 181~185
- 4) 楠建一郎、菊地宏吉、斎藤和雄：“岩盤等級と原位置せん断試験結果との対応” 第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(1979年) pp. 6~10
- 5) P. Bettess: “More on Infinite Elements” Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 15 (1980) pp. 1613~1626

