

# 破壊力学を用いた LPG 岩盤内貯蔵空洞の 亀裂進展解析に関する研究

## ANALYSIS OF A CRACK PROPAGATION AROUND A LPG STORAGE CAVERN USING FRACTURE MECHANICS

石塚与志雄\*・木下直人\*\*

By Yoshio ISHIZUKA and Naoto KINOSHITA

This paper discusses a numerical analysis of a crack propagation using fracture mechanics to evaluate a fracture crack induced by thermal stresses around a LPG storage cavern. *J*-integral is applied in the finite element method of thermal stress analysis for the calculation of stress intensity factor. A result of analysis on thermal stress fracturing tests of rock block shows that the crack propagation analysis is effective for thermal stress crack problem compared with a conventional method based on material mechanics. Crack analysis of LPG storage cavern indicates that a LPG leak out in case of a cavern with a small earth stress, so, storage cavern must be constructed at a deep rocks which tensile stresses isn't occurred at the outside of the freezing zone.

Keywords: thermal stress, fracture mechanics, *J*-integral, LPG storage, FEM

### 1. はじめに

LPG の岩盤内貯蔵方式<sup>1),2)</sup>には、LPG を高圧水封により貯蔵する常温貯蔵方式と、LPG (約  $-40^{\circ}\text{C}$ ) を直接空洞に供給し、空洞周辺の地下水を凍結させ貯蔵する低温貯蔵方式がある。一般に、低温貯蔵方式の LPG 岩盤内貯蔵システムは、高圧水封を必要としないため、常温貯蔵方式より浅い深度の空洞で貯蔵できるといわれている。しかし、低温貯蔵方式では、図-1 に示すように空洞周辺に凍結領域を形成させて LPG を貯蔵する構造のため、空洞周辺に発生する熱応力による空洞の安全性、LPG の外部への漏洩性が問題となる。特に、空洞周辺の破壊は、空洞の接線方向の引張応力により壁面からの亀裂の発生という形態で生じるため<sup>3),4)</sup>、漏洩問題については破壊亀裂が凍結領域内に止まるか否かを評価することが重要課題となる。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、熱応力により生じる破壊亀裂を評価する解析手法が必要となる。

低温液化燃料の岩盤内貯蔵時における空洞の熱伝導、熱応力解析方法に関しては、稲田らが LNG 貯蔵を対象として、微小体積内の熱収支によるシュミット方法を応用した要素分割法による熱伝導解析<sup>5)</sup>、岩盤の引張破壊を考慮した NO-TENSION 法および破壊亀裂の進展を評価するために引張破壊後要素を離散させる応力解析<sup>6),7)</sup>などを提案している。また、塩尻ら<sup>8)</sup>および日景ら<sup>9)</sup>は LPG 岩盤内貯蔵を対象として、一般的な FEM により空洞の構造的安定性、温度分布などについて検討している。また、浜島ら<sup>10)</sup>は剛体パネモデル (RBSM) をベースとした不連続性岩盤の熱と応力の連成解析手法を提案し、不連続性岩盤に対する非定常熱伝導、応力解析について検討している。著者らも LPG 岩盤内貯蔵空

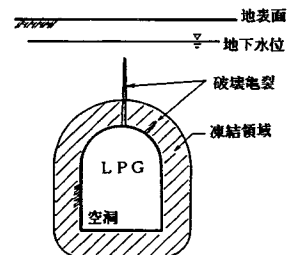


図-1 LPG 岩盤内貯蔵空洞概念図

\* 正会員 工修 清水建設 (株) 技術研究所  
(〒135 江東区越中島 3-4-17)

\*\* 正会員 理修 清水建設 (株) 技術研究所主任研究員  
(同上)

洞の熱応力に対する安定性の検討を目的として、岩盤物性の温度依存性、凍結膨張、引張破壊を考慮したFEM非定常熱伝導、熱応力解析<sup>11),12)</sup>を実施し、LPG岩盤内貯蔵空洞周辺の温度分布、熱応力に対する安定性について検討してきた。その結果、凍結膨張現象が空洞周辺に発生する応力分布に大きな影響を与え、凍結膨張が生じる場合の空洞周辺の引張応力は凍結膨張が生じない場合の5倍以上になること、深度が浅く初期地山応力が小さい場合には、凍結膨張領域の外部にも引張破壊が広がり、LPGが外部へ漏洩する可能性があることなどが明らかとなった。しかし、連続体力学に立脚した解析方法では、亀裂の存在を考慮していないため、破壊亀裂を定量的に評価するには限界がある。これに対して、破壊力学では亀裂の発生・進展問題を扱うため、破壊亀裂を評価しなければならない問題に対して有効と考える。特に、今回対象としているLPG岩盤内貯蔵施設は比較的堅固な岩盤に立地されたため、空洞周囲には緻密な凍結領域を形成され、連続体に近い状態になり、LPGの漏洩は、最も引張応力が卓越する部分からの破壊亀裂の発生により生じる。そのため、破壊力学による破壊亀裂の評価が有効であろう。

上記のような背景により、本研究では、LPG岩盤内貯蔵空洞周辺に予想される破壊亀裂の評価方法として、破壊力学を用いた亀裂発生進展解析手法について検討する。温度場における亀裂先端応力拡大係数解析としてJ積分法を使用した有限要素法を用いることにし、同解析手法の岩石亀裂発生進展問題への適用性を調べるために低温熱応力による岩石破壊実験との対比を行う。また、破壊力学を用いた亀裂発生進展解析を用いてLPG岩盤内貯蔵空洞の熱応力による亀裂進展解析を実施し、従来の連続体力学に基づく解析手法<sup>11),12)</sup>による空洞安定解析結果と比較し、LPGの漏洩問題について検討する。

2. 低温熱応力による亀裂発生進展解析

(1) 有限要素法による温度場の応力拡大係数解析

LPG岩盤内貯蔵空洞(図-1)の周辺に発生する破壊亀裂は引張応力により生じるため、破壊亀裂発生を評価するパラメータは変形モードI(引張型)に対する応力拡大係数 $K_I$ となり、 $K_I$ が破壊靱性値 $K_{Ic}$ を超えるとき、破壊亀裂が発生することになる。そのため、解析的には亀裂先端の $K_I$ を求め、 $K_I \geq K_{Ic}$ のとき亀裂が発生・進展すると評価する。

FEMによる $K_I$ 解析方法<sup>13)</sup>としては、解析で得られる亀裂先端近傍の応力、変位から、理論式により $K_I$ を計算する直接法(応力法、変位法)と、弾性体における亀裂の伝播に伴うエネルギー解放率と $K_I$ 値との対応関係を用いて、FEMでエネルギー解放率を計算し $K_I$ を

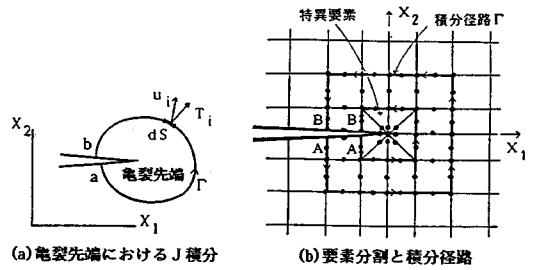


図-2 亀裂先端におけるJ積分と有限要素分割

評価するエネルギー法(全エネルギー法、J積分法)などが提案されている。前者の直接法では精度の問題で亀裂先端部分の要素を細分しなければならないこと、結果をグラフ上にプロットして外挿により $K_I$ を評価する必要があるなど煩雑で精度に問題がある。一方、エネルギー法のJ積分法は比較的粗い要素分割でもかなりの精度が期待でき、非線形破壊力学問題にも適用できるなどの利点を有する<sup>13)</sup>。そのため、本研究では、 $K_I$ 解析方法としてJ積分法を用いることにする。

初期にRice<sup>14)</sup>により提案されたJ積分は塑性変形ひずみ、熱膨張ひずみなどの固有ひずみが微小のとき、積分領域、積分径路に依存せず、亀裂進展に伴うエネルギー解放率に一致するという積分で図-2(a)に示す亀裂(亀裂の方向が軸 $x_1$ 方向に平行とする)に対して、下の亀裂面aから上の亀裂面bに至る任意の径路に沿って次式で定義される。

$$J = \int_{\Gamma} \left( W^e dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dS \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

- $W^e$ : 弾性ひずみエネルギー密度
- $T_i$ : 径路 $\Gamma$ の法線ベクトルを $n_i$ として $T_i = \sigma_{ij} n_j$ と定義される法線応力ベクトル
- $u_i$ : 径路 $\Gamma$ 上の変位ベクトル
- $S$ : 径路 $\Gamma$ に沿う距離

しかし、今回、対象とするLPG岩盤内貯蔵では空洞周辺に凍結膨張など大きな熱膨張ひずみが生じるため、このJ積分をそのまま適用することはできない。これに対して、Wilsonら<sup>15)</sup>が温度変化に伴う固有ひずみの発生を考慮した弾性エネルギー解放率に基づき $\hat{J}$ 積分を、また、岸本ら<sup>16)</sup>が、物体力、慣性力、固有ひずみを有する問題に対してエネルギー解放率が積分領域、積分径路に依存しない $\hat{J}$ 積分を提案している。温度場の応力拡大係数解析では、両手法のJ積分は同一であり、厳密解との比較により両手法の妥当性が検証されている。そのため、本研究では、この $\hat{J}$ 積分を用いて温度場における $K_I$ を評価する。 $\hat{J}$ 積分は熱膨張ひずみを考慮して次式で定義される。

$$\hat{J} = \int_{\Gamma} (W^e dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dS) + \int_A \sigma_{ij} \left( \frac{\partial \epsilon_{ij}^*}{\partial x_1} \right) dA \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

A : 径路  $\Gamma$  で囲まれる領域

$\epsilon_{ij}^*$  : 熱膨張ひずみ

応力拡大係数  $K_I$  は、次式の  $\hat{J}$  積分との関係より求めることになる。

$$(K_I)^2 = \frac{E}{1-\nu^2} \hat{J} \dots\dots\dots (3)$$

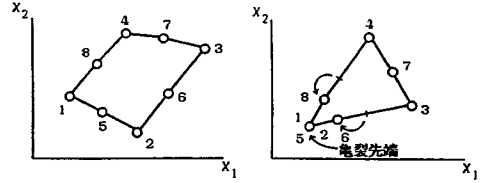
FEM 解析では、図-2 (b) に示すように、積分径路  $\Gamma$  は要素の辺、積分領域  $A$  はその辺で囲まれる要素となる。また、亀裂先端の応力分布は亀裂方向を  $r$  として  $r^{-1/2}$  の特異性を示す。そのため、FEM では各種の特異要素が提案されているが、ここでは、Barsoum<sup>17)</sup> が提案した退化特異アイソパラメトリック要素を用いることにした。この要素は、図-3 に示すように 8 節点 4 辺形アイソパラメトリック要素の 1 辺 (節点 1-5-2) を 1 節点 (亀裂先端) とし、中間節点 (節点 6, 8) を亀裂先端方向に 1/4 移動させるだけで特異性を表わすことが可能で、通常の FEM プログラムを修正する必要がないという利点を有する。

(2) 低温熱応力による亀裂発生評価解析

LPG 岩盤内貯蔵空洞周辺の破壊を検討する場合には、岩盤の初期地山応力、岩盤物性の温度依存性、凍結膨張等<sup>11), 12)</sup> が解析結果に大きな影響を与えるため、これらを考慮した解析が必要となる。そのため、以下のような手順で解析を実施する。この手順をフローで示すと、図-4 のようになる。

- ① 空洞掘削応力解析により空洞周辺の応力  $\sigma_{ij}^{ex}$ 、ひずみ  $\epsilon_{ij}^{ex}$  を計算する。
- ② 非定常熱応力解析で各時間 (貯蔵時間) における温度分布を求め、その温度に対応して個々の要素内で岩盤物性を逐次評価し、剛性マトリックスを再計算する。
- ③ ②で得られた剛性マトリックスを用いて、熱応力解析を実施し、応力  $\sigma_{ij}^T$ 、ひずみ  $\epsilon_{ij}^T = \epsilon_{ij}^{ex} + \epsilon_{ij}^*$  ( $\epsilon_{ij}^*$  は熱膨張ひずみ) を計算する。
- ④ ①の掘削応力解析による応力、ひずみと熱応力解析による応力、ひずみを重ね合わせ、亀裂先端の  $J$  積分を計算し、 $K_I$  を求める。 $K_I$  を破壊靱性値  $K_{Ic}$  と比較し、 $K_I \geq K_{Ic}$  のとき、亀裂発生と評価する。以下、②~④のステップを繰り返す。

なお、本解析では亀裂先端の応力拡大係数と破壊靱性値との比較だけを実施しており、亀裂発生と評価されても亀裂発生に伴う境界条件、構造的変化は考慮していない。亀裂がどこまで進展するかについては、予想される



(a) 8 節点 4 辺形アイソパラメトリック要素 (b) 退化特異アイソパラメトリック要素

図-3 亀裂先端近傍の特異要素

破壊亀裂長の範囲で数種類の解析を行い、破壊亀裂がどこまで進展するかを検討する。

LPG 岩盤内貯蔵空洞の解析では、上述のように応力は掘削時の応力と熱応力解析時の応力とを重ね合わせる必要があるため、式 (2) の弾性ひずみエネルギー密度  $W^e$  は、応力を  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{ex} + \sigma_{ij}^T$ 、弾性ひずみを  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^{ex} + \epsilon_{ij}^e$  として、 $W^e = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$  で評価される。また、熱膨張ひずみ  $\epsilon_{ij}^*$  は、基準温度からの岩盤自体の熱収縮と水が氷に相変化する際に発生する凍結膨張を重ね合わせたひずみと考える。

3. 低温熱応力による岩石円孔からの破壊

(1) 岩石冷却破壊実験<sup>4)</sup>

前章で検討した解析手法の実際問題への適用性を検討するために、図-5 に示すような円孔 (直径 38 mm) を有する岩石ブロック (寸法 300×300×300 mm) で実施

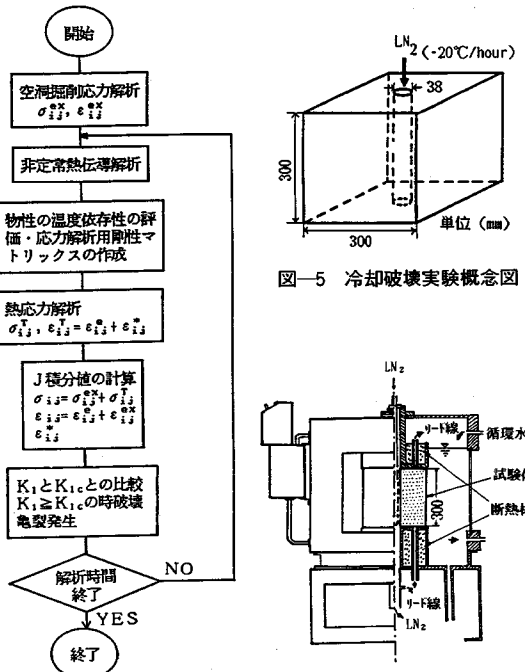


図-4 解析フロー

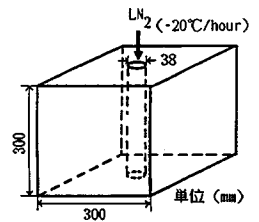


図-5 冷却破壊実験概念図

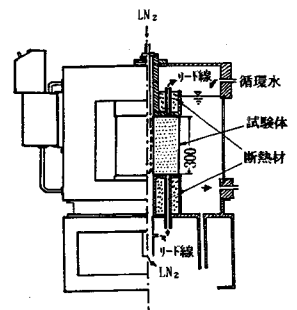


図-6 冷却破壊実験装置図

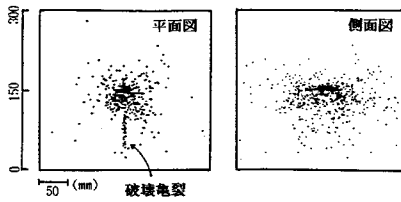


図-7 AE位置評定結果(亀裂岩・湿潤状態)

した岩石冷却破壊実験との比較を行う。実験では図-6に示すような試験装置により、試験体側面を循環水で一定温度(10°C)に保ち、孔壁を液体窒素(LN<sub>2</sub>)で10°Cから-20°C/hの冷却速度で-180°Cまで冷却し、AE計測、ひずみ分布の測定などで低温熱応力による破壊挙動を調べた<sup>4)</sup>。実験では、試験体として稲田花崗岩を用い、岩石の間隙率による破壊性状の差を調べるために加熱処理により人工的に間隙率を増加させた試験体(間隙率3.5%,以下、加熱処理をした試験体を亀裂岩、加熱処理しない試験体を堅岩とよぶ)についても試験を行った。なお、試験体の含水状態は、自然乾燥状態と湿潤状態の2ケースとしている。

実験では湿潤状態の亀裂岩で、試験体の側面まで達する亀裂が生じた。その他の試験体では肉眼で観察される破壊亀裂の発生はみられなかった。図-7に湿潤状態の亀裂岩におけるAE計測結果を示す。この図は孔壁温度-80~-120°Cの間で得られたAE位置評定結果で、-110°C前後で円孔から巨視的な破壊亀裂が発生進展したものと推定される。

(2) 解析モデルと解析入力物性

亀裂評価解析では、いったん発生した亀裂がどこまで進展するかを検討するために、図-8に示すようなFEM解析モデルを考える。いったん亀裂が発生すると冷気(LN<sub>2</sub>)が亀裂内部に入り込む可能性があるため、解析では、温度境界条件として、孔壁面のみが温度指定境界となる場合(冷気が亀裂内部に入らない場合)と、亀裂面が熱伝導境界となる場合(冷気が亀裂内部に入る場合)の2ケースを考える。また、破壊力学に基づく解

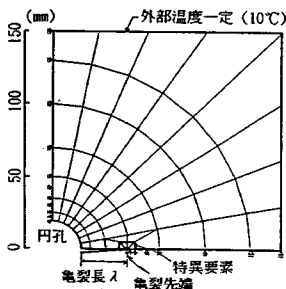


図-8 実験解析用メッシュ図

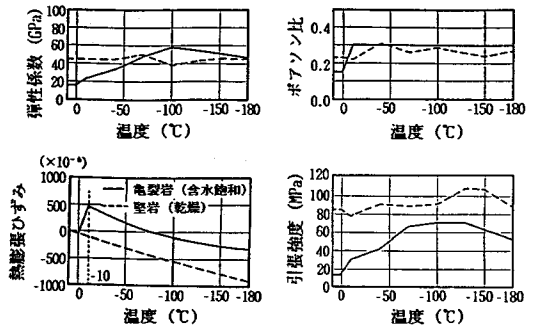


図-9 低温下における岩石物性(稲田花崗岩)

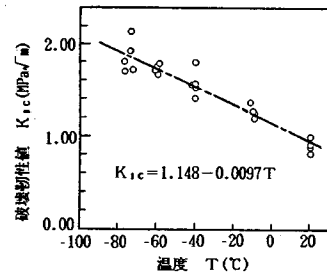


図-10 低温下における破壊靱性値(稲田花崗岩)

析と連続体力学に基づく解析との比較を目的として亀裂を考慮しない弾性熱応力解析も行うことにする。

解析の入力定数は、岩石物性の温度依存性を考慮して、力学定数、熱膨張ひずみを温度の関数として評価した。図-9に解析に用いた力学定数を示す。これは、室内低温下岩石試験から得られた結果<sup>4), 18)</sup>である。破壊靱性値  $K_{Ic}$  については低温下における破壊靱性試験<sup>19), 20)</sup>で得られた含水飽和状態の稲田花崗岩の試験結果(図-10に低温下における稲田花崗岩の  $K_{Ic}$  を示す)を用いることにする。低温下における稲田花崗岩の  $K_{Ic}$  は、温度を  $T$  として次式で近似できる。

$$K_{Ic}(T) = 1.148 - 0.0097 T \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}) \dots\dots\dots (4)$$

密度、比熱、熱伝導率については大きな温度依存性を示さないため、密度=2.5 g/cm<sup>3</sup>、比熱=0.753 kJ/(kg °C)、熱伝導率=2.33 W/(m °C)一定とした。

(3) 解析結果

a) 弾性熱応力解析による引張破壊

図-11(a)に実験で破壊が観測されなかった堅岩(自然乾燥状態)の弾性熱応力解析結果を、図-11(b)に破壊が観測された亀裂岩(湿潤状態)の結果を示す。図では孔壁温度-20, -60, -100, -140, -180°Cに対する半径方向の周方向応力と径方向応力の分布および各孔壁温度における引張破壊領域の推移を示す。解析の結果、堅岩(自然乾燥状態)では孔壁温度-44°C、亀裂岩(湿潤状態)では孔壁温度-46°Cで引張破壊が発

生ずるとの結果が得られた。しかし、実験では堅岩（自然乾燥状態）は破壊せず、また、亀裂岩（湿潤状態）は  $-110^{\circ}\text{C}$  付近で破壊しており解析結果と大きく食い違う。そのため、連続体力学に基づく解析では今回の実験の破壊現象を説明できない。

b) 破壊力学に基づく解析結果

前述のように堅岩（自然乾燥状態）については、弾性熱応力解析から得られる引張破壊からは実験結果を説明できない。そのため、まず破壊力学に基づく解析を用いて熱応力による円孔からの破壊を検討する。図-12は、亀裂長  $\lambda=0.05, 0.10, 0.50, 1.00\text{ mm}$  おのおのについて、各孔壁温度に対する応力拡大係数  $K_I$  と破壊靱性値  $K_{Ic}$  の推移を示したものである。図中、破線は亀裂先端の温度で評価した  $K_{Ic}$  であり、 $K_I \geq K_{Ic}$  となるとき、破壊亀裂が発生することになる。これによると、亀裂長  $\lambda$  が  $0.05\text{ mm}$  の場合は  $-180^{\circ}\text{C}$  まで破壊亀裂の発生は生じないが、 $\lambda$  が  $0.10\text{ mm}$  を超えると、破壊が生じることになる。 $\lambda=0.10\text{ mm}$  では  $-125^{\circ}\text{C}$  付近で、 $\lambda=0.50\text{ mm}$  では  $-25^{\circ}\text{C}$  付近で、また、 $\lambda=1.00\text{ mm}$  では  $-10^{\circ}\text{C}$  付近で破壊亀裂が発生することになる。この結果から堅岩の実験結果を考察すると、堅岩の円孔の先在亀裂長が  $0.05\text{ mm}$  程度であると仮定すると、実験結果を説明することができる。円孔周囲の先在亀裂長を正確に評価することはできないが、堅岩の場合、有効間隙率が  $1\%$  以下で、先在亀裂の量も少ないことから、円孔周囲の先在亀裂長もかなり小さいと考えられる。これに対し、亀裂岩の場合は、加熱処理をして人工的に亀裂を増加させているため、円孔周囲の先在亀裂長は堅岩の数倍になっているものと推定され、そのため、亀裂先端の  $K_{Ic}$  は堅岩より大きくなり、破壊亀裂が発生するようになる

と考えられる。

次に、亀裂岩（湿潤状態）について熱応力による破壊亀裂発生進展を検討するために、亀裂長を  $2.0\text{ mm}$  から  $60.0\text{ mm}$  まで ( $2.0, 5.0, 10.0, 30.0, 60.0\text{ mm}$  の5ケース) 変化させて解析を行った。図-13に孔壁温度  $-60, -80, -100^{\circ}\text{C}$  における亀裂長  $\lambda$  と  $K_I$  との関係は温度境界条件2ケース（冷気が亀裂内部に入らない場合と冷気が亀裂内部に入る場合）について示す。孔壁温度が  $-60^{\circ}\text{C}$  ではすべての亀裂長で  $K_I < K_{Ic}$  となり、亀裂は発生しない。これに対して、孔壁温度が  $-80^{\circ}\text{C}$  になると、冷気が亀裂内部に入らない場合で、 $40.0\text{ mm}$  程度まで亀裂が進展するが、それ以上は進展しないという結果になる。続いて、孔壁温度が  $-100^{\circ}\text{C}$  になると、冷気が亀裂内部に入らない場合でも  $60.0\text{ mm}$  以上亀裂が進展することになり、試験体の側面まで破壊亀裂が進展

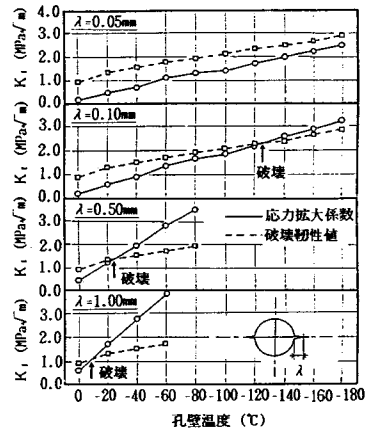


図-12 各亀裂長に対する孔壁温度と  $K_I$  の関係

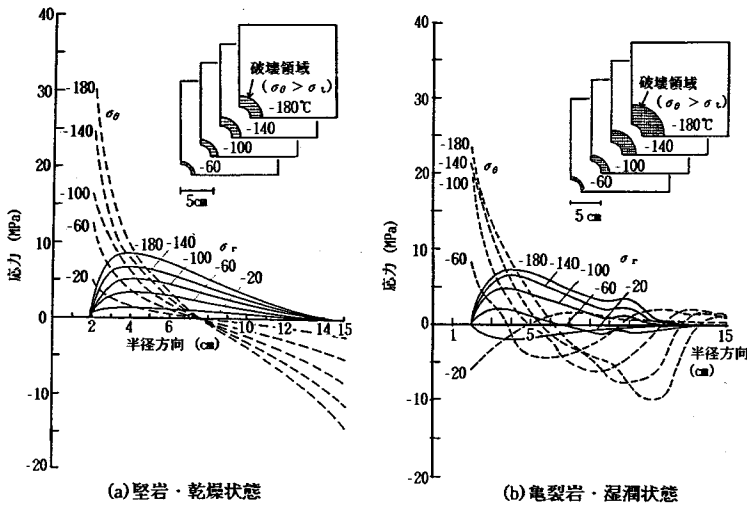


図-11 弾性熱応力解析による円孔周辺の熱応力分布

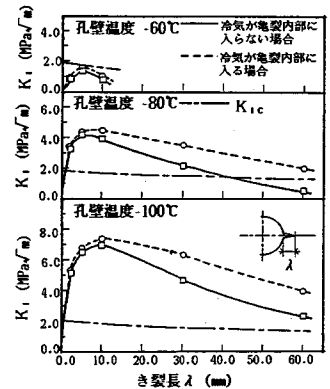


図-13 各孔壁温度に対する亀裂長と  $K_I$  の関係

するものと推定される。これらの結果は実験結果とよい対応を示しており、岩石の亀裂発生進展問題に対しては破壊力学を用いた解析手法が有効であるといえる。

### 4. LPG 岩盤内貯蔵空洞の亀裂発生進展解析

#### (1) 低温下の岩盤物性<sup>11)</sup>

日本において、LPG の岩盤内貯蔵の対象となる岩盤は花崗岩帯などの比較的良好な岩盤と考えられるため、本研究では電中研式岩盤分類で C<sub>H</sub> 級に相当する岩盤を検討の対象とした。低温下における岩盤の力学的、熱的特性は原位置での実測例がないため、ここでは、低温下での室内岩石試験結果と C<sub>H</sub> 級岩盤の物性から低温下の岩盤物性を評価することにした<sup>11)</sup>。図-14 に解析に用いた定数（弾性係数、引張強度、せん断強度、熱膨張ひずみ）の温度特性を示す。ここで、熱膨張ひずみは、凍結膨張として 0°C から -10°C で約  $360 \times 10^{-6}$  の凍結膨張ひずみを考慮した。この値は含水飽和状態の岩石の試験から求められたもので、岩盤においても最大生じると考えられる凍結量である。なお、亀裂発生進展の規準となる破壊靱性値については、岩盤中に新たに発生する破壊亀裂の先端と岩石における破壊亀裂の先端は同様と考えられるため、岩石試験の結果（式（4））をそのまま使用することにする。また、ポアソン比、密度、比熱、熱伝導率は大きな温度依存性を示さないため冷却破壊実験の解析同様、ポアソン比=0.3、密度=2.5 g/cm<sup>3</sup>、比熱=0.753 kJ/(kg・°C)、熱伝導率=2.33 W/(m・°C)一定とした。

#### (2) 解析モデル<sup>11)</sup>

LPG 岩盤内貯蔵空洞の解析モデルとして、図-15 に示すような高さ 20 m、幅 15 m の空洞を考える。空洞の深度は初期地山応力の影響を調べるために 55 m、100 m の 2 ケースとした。なお、初期地山応力を鉛直方向で土被り圧、水平方向を側圧係数 1.0 とした。温度条件は岩盤の初期温度、大気温度を 16°C 一定、空洞壁面のブレクーリング方法は 16°C から LPG 貯蔵温度 -42°C ま

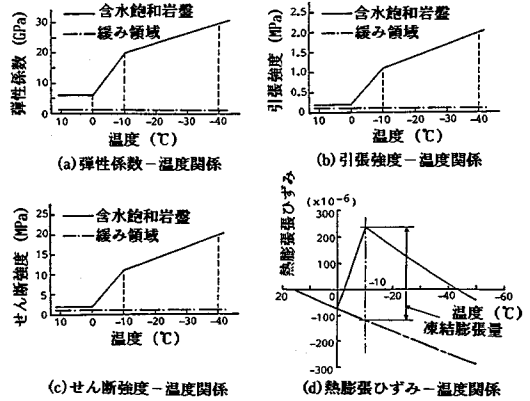


図-14 低温下における岩盤物性

で 3 か月間で 2 次曲線的に低下させる方法とし、その後は壁面を -42°C 一定とした。なお、地表面と外部大気との境界と亀裂面の温度条件は熱伝達境界とし、LPG の貯蔵期間は 30 年間を考える。掘削による空洞周辺の緩み領域は壁面から 2 m とした。図-16 は有限要素解析に用いたメッシュ分割図で、亀裂は初期地圧が小さく、最も破壊亀裂が発生しやすい天端方向に設定した。亀裂長は凍結領域の範囲を考慮して最大 40 m とした。なお、図-16 で斜線を施した部分は半無限境界を表すために用いた無限要素である。

#### (3) 解析結果

##### a) 温度分布

図-17 は破壊亀裂を考慮しない場合の熱伝導解析結果で、天端方向の 0°C 以下となる領域（凍結領域）の経時変化を示す。深度 100 m の場合がわずかに大きくなるものの、深度 55 m と 100 m とほぼ同様の傾向となり、10 年後で約 19 m、20 年後で約 25 m、30 年後で 28~30 m となる。今回の LPG の漏洩に対する検討においては、この凍結領域範囲内に破壊亀裂の進展が止まるか否かが問題となる。図-18 は破壊亀裂が発生しない場合と破壊亀裂が発生した場合（破壊亀裂 10 m と 30

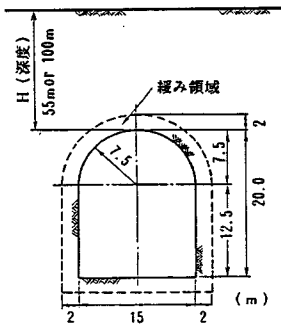


図-15 LPG 貯蔵空洞

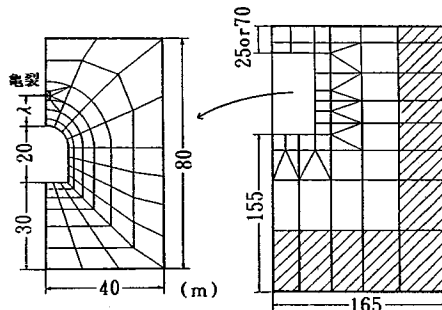


図-16 貯蔵空洞解析メッシュ図

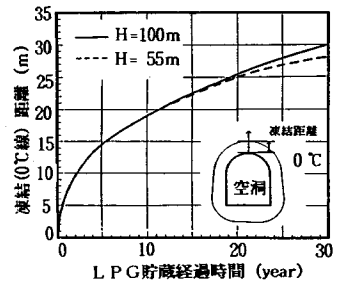
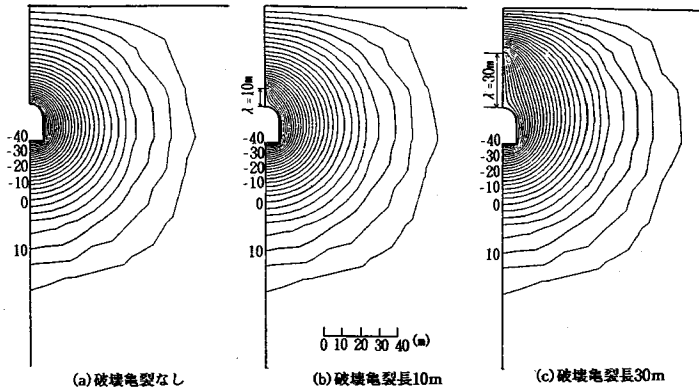


図-17 貯蔵時の凍結領域の推移



図一18 亀裂進展に伴う温度分布の変化 (30年後)

m の 2 ケース) の空洞周辺の 30 年後の温度分布で、破壊亀裂の発生により天端方向の温度勾配が急になる。

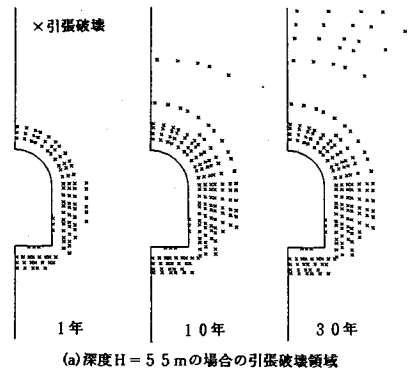
b) 空洞周辺の亀裂発生進展解析

図一19は連続体力学の観点から岩盤物性の温度依存性、引張破壊を考慮した有限要素解析から得られた解析結果<sup>11)</sup>、深度 100 m の場合には引張破壊は凍結領域内に止まり、LPG の漏洩は生じないと考えられる。一方、深度 55 m の場合では、貯蔵期間が 10 年を経過すると引張破壊が凍結領域外に、特に初期地圧が小さい天端方向に広がり、LPG が空洞外部に漏洩する可能性があるという結果になる。これは、図一20 (掘削応力解析結果と熱応力解析結果を重ねたもの) で、斜線を施した部分の熱応力が初期地圧を超えて引張応力状態となり、その応力が引張破壊規準を超えたために生じたものである。

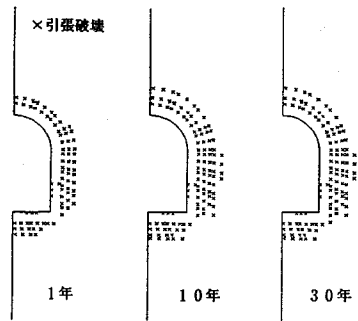
今回検討した破壊力学に基づく亀裂発生進展評価解析法を用いて、引張応力が凍結領域外でも発生する深度 55 m のケースについて解析を実施し、LPG の漏洩について検討することにした。図一21 は亀裂長 20, 30, 40 m に対する応力拡大係数  $K_I$  の経時変化を示したもので、図中の破線は亀裂先端温度に対する破壊靱性値  $K_{Ic}$  を示す。これによると、4.2年で 20 m, 8.7年で 30 m, 22.0年で 40 m まで破壊亀裂が進展するという結果になり、材料力学的観点に基づく解析による解析結果よりも早い時期に亀裂が凍結領域外に進展することになる。これは、亀裂を考慮した破壊力学による解析では、LPG が亀裂に沿って漏洩すると考えて、亀裂面の温度境界条件を熱伝達境界として解析したことおよび 3. の岩石冷却破壊実験の解析で述べたように材料力学における引張破壊規準と破壊力学における破壊靱性値をもととした破壊規準の違いにより生じたものである。

5. ま と め

本論文では、低温貯蔵方式による LPG 岩盤内貯蔵空

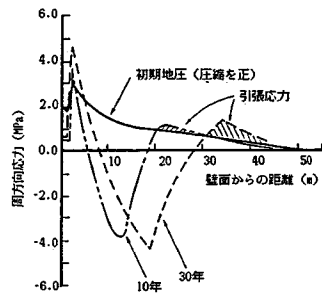


(a) 深度 H = 55 m の場合の引張破壊領域

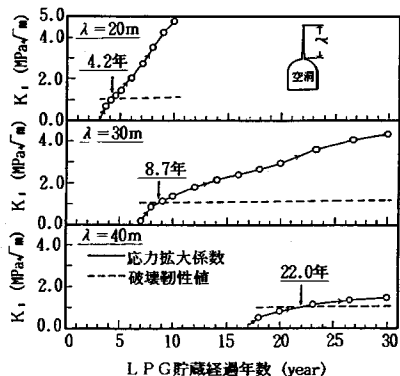


(b) 深度 H = 100 m の場合の引張破壊領域

図一19 従来解析方法による引張破壊領域の推移



図一20 凍結領域外部における引張応力の発生 (深度 55 m)



図一21 各亀裂長における  $K_I$  の経時変化

洞周辺に予想される破壊亀裂の評価手法として、 $J$ 積分による温度場の応力拡大係数解析方法を示した。また、同解析手法の適用性を調べるために冷却破壊実験との比較・検討を行い、続いて、この亀裂発生進展解析を用いたLPG岩盤内貯蔵空洞の熱応力解析によりLPGの漏洩問題について検討した。

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

(1)  $J$ 積分を用いた低温熱応力下亀裂発生進展解析は、岩石ブロックの低温熱応力による冷却破壊実験結果をよく説明でき、破壊力学に基づく解析手法の有効性が確認できた。

(2) 深度55mのLPG岩盤内貯蔵空洞では、引張破壊を考慮した従来の解析で得られた結果同様、破壊亀裂は凍結領域外部に進展し、LPGが外部に漏洩する可能性があるという結果になった。そのため、LPGの低温方式貯蔵においては、凍結領域外部に引張応力が発生しないような初期地圧応力となる深度に設置する必要がある。

今回検討した解析手法は、単一亀裂の発生進展を対象としているため、凍結により均質になるような岩盤およびいったん発生した巨視的亀裂がどこまで進展するかを評価する際に有効であろう。しかし、節理などの不連続面が卓越するような岩盤では、節理そのものの特性が破壊現象を支配するようになるため、別の取扱いが必要となる。また、岩盤の低温特性については、低温下岩石試験と岩盤等級から推定したものであり、低温下の岩盤物性の評価は十分とはいえない。特に、凍結膨張は空洞の安定性、漏洩問題に大きな影響を与えるため、定量的な検討が必要である。

#### 参考文献

- 財団法人エンジニアリング振興協会：昭和55年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。
- 厨川道雄：低温液化燃料の地下備蓄，西日本地下資源シンポジウム講演要旨集，pp.135-138，1978。
- Kuriyagawa, M., Matsunaga, I., Kinoshita, N. and Hibi, K. : Rock behavior of underground cavern with the storage of cryogenic liquified gas, Rock Store '80 Subsurface Space, Pergamon Press, pp. 665-671, 1981.
- 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，pp.181-185，1982。
- 稲田善紀・重信 純：液化天然ガスを地下岩盤内空洞に貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布，日本鉱業会誌，Vol.99, No.1141, pp.179-185, 1985。
- Inada, Y. : Stability of underground openings for storage of L.N.G., Proceeding of the 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp.1225-1232, 1985.
- 稲田善紀・北村聖一・岡田明浩：LNGの地下岩盤貯蔵における空洞の安定性の検討，土木学会論文報告集，第343号，pp.35-44，1984。
- 塩尻弘雄・岸 徳光・佐藤宏一・高野 博：周辺温度分布と熱応力，電力土木，No.166, pp.61-66, 1980。
- 日景秀治・添田弘基・西牧 均・関根一郎：LPG地下岩盤内低温槽に関する研究，戸田建設技術開発センター研究報告，Vol.10, pp.36-48, 1983。
- 浜島良吉・船生健一・草深守人・渡辺正明・小出 仁：3次元不連続性岩盤の熱と応力の連成解析，第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.221-225, 1987。
- 石塚与志雄・木下直人・奥野哲夫：LPG岩盤内貯蔵空洞の熱応力に対する安定性の検討，土木学会論文集，第370号/Ⅲ-5, pp.253-260, 1986。
- Ishizuka, Y., Kinoshita, K. and Okuno, T. : Stability analysis of a rock cavern with LPG storage under thermal stresses, Proceeding of the 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp.1233-1240, 1985.
- 白鳥正樹・三好俊郎・松下久雄：数値破壊力学，実教出版(株)，第4章，1980。
- Rice, J.R. : A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, J. of Applied Mechanics, pp.378-386, 1968.
- Wilson, W.K. and Yu, I. -W. : The use of the  $J$ -integral in thermal stress crack problems, Int. J. of Fracture, Vol.15, No.4, pp.377-387, 1976.
- 岸本喜久雄・青木 繁・坂田 勝：き裂の進展挙動を記述するための破壊力学パラメータについて，日本機械学会論文集(A編)，第46巻，第410号，pp.1049-1061, 1976。
- Barsoum, R.S. : On the use of isoparametric finite element in linear fracture mechanics, Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.10, pp.25-37, 1976.
- 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)一，日本鉱業会誌，Vol.97, No.1120, pp.421-436, 1981。
- 石塚与志雄・日比一喜・木下直人：低温下における破壊靱性試験，第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.61-65, 1984。
- 石塚与志雄・木下直人・安部 透：岩石の亀裂進展特性と破壊靱性特性に関する研究，土木学会論文集(投稿中)1987。

(1987.4.6・受付)