

(51) 破壊力学によるLPG岩盤内貯蔵空洞のき裂進展評価

清水建設㈱技術研究所 正会員 ○石塚与志雄, 木下直人

1. はじめに LPG等の低温液化燃料の岩盤内貯蔵の実用化のためには、空洞周辺に発生する熱応力に対する空洞の安定性、貯蔵液化燃料の外部への漏洩に対する検討が必要となる。図1に示すように、低温貯蔵方式によるLPG岩盤内貯蔵システムでは、空洞周辺に凍結領域を形成させ、空洞内にLPGを貯蔵させる構造のため、漏洩問題については、引張応力により発生する破壊き裂が凍結領域内に止まるか否かが重要課題となる。この課題に対する研究として、筆者らは、岩ブロックを用いた低温熱応力による模型破壊実験¹⁾、岩石物性の温度依存性、引張破壊を考慮した空洞安定解析方法²⁾、低温下の岩石の破壊靱性試験³⁾、線形破壊力学を用いた熱応力き裂発生進展解析⁴⁾など実施し、岩石の低温物性特性・破壊特性、空洞安定解析方法および線形破壊力学の岩石破壊問題への適用性等について検討してきた。その結果、低温熱応力による岩石のき裂発生進展問題については、破壊力学を用いたき裂発生進展解析の有効性が確認された。

そのため、本報告では、LPG岩盤内貯蔵空洞周辺に予想される破壊き裂の評価方法として、破壊力学を用いたき裂発生進展解析方法について検討し、従来の材料力学に基づく解析による空洞安定解析結果との対比を行い、LPGの漏洩問題について検討を行う。

2. 低温熱応力による空洞周辺のき裂発生進展評価方法 図1に示すように、LPG岩盤内貯蔵空洞の周辺に発生する破壊き裂は引張応力によって生じるため、破壊き裂発生を評価するパラメータは変形モードⅠに対応する応力拡大係数 K_I となり、 K_I が破壊靱性値(K_{Ic})を超える時、破壊き裂が発生することになる。そのため、FEMによるLPG岩盤内貯蔵空洞のき裂発生進展の解析では、つぎのような手順で解析を実施する(図2に解析フローを示す)。

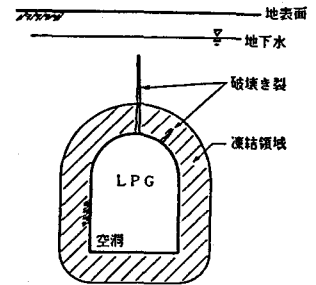


図1 LPG岩盤内貯蔵空洞と破壊き裂

- ①空洞掘削応力解析により空洞周辺の応力・ひずみを計算する。
- ②非定常熱伝導解析で各時間(貯蔵期間)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。
- ③②で得られる剛性マトリックスを用いて熱応力解析を行い、応力・ひずみを計算する。
- ④①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・ひずみを重ね合せ、き裂先端の応力拡大係数(K_I)を求め、破壊靱性値(K_{Ic})と比較し、 $K_I \geq K_{Ic}$ の時、き裂発生と評価される。以下、②～④のステップを繰り返す。

FEMによるき裂先端の K_I 解析方法⁵⁾としては、有限要素解析の結果得られるき裂先端近傍の応力、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、弾性体におけるき裂の伝播に伴うエネルギー解放率と K_I 値は対応関係を有するため、FEMでエネルギー解放率を求め、 K_I を計算するエネルギー法(全エネルギー法、J積分法)などが提案されているが、前者の直接法では精度の問題でき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して K_I を評価するなど複雑で精度に問題がある。これに対して、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、かつ、

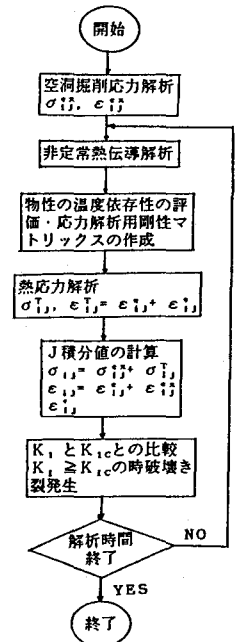


図2 解析フロー

弾塑性破壊力学問題にも適用できるなどの利点を有する。そのため、本論文では、K1 解析方法として J 積分法を用いることにする。

初期にRice⁶⁾によって提案された J 積分は塑性変形ひずみ、線膨張ひずみなどの固有ひずみが微小の時、積分領域、積分径路に依存せず、き裂進展に伴うエネルギー解放率に一致すると言う理論であるが、今回、問題としている LPG 岩盤内貯蔵では凍結膨張など大きな線膨張ひずみが生じるため、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、青木ら⁷⁾が、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径路に依存しない J 積分を提案し、その妥当性が確認されている。そのため、ここでは、青木らが提案した J 積分を用いて、熱応力時の K1 を評価する。J 積分は図3に示すき裂に対して、下のき裂面から上のき裂面に至る任意の径路に沿って次式で定義される。

$$\hat{J} = \int_{\Gamma} (W^e dX_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial X_1} dS) + \iint_A \sigma_{ij} (\frac{\partial \epsilon_{ij}^*}{\partial X_1}) dA \tag{1}$$

ここで、 W^e : 弾性ひずみエネルギー密度、 T_i : 径路 Γ 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 Γ 上の変位ベクトル、 S : 径路 Γ に沿う距離、 A : 径路 Γ で囲まれる領域である。今回の解析では、掘削応力解析時の応力・ひずみと熱応力解析時の応力・ひずみを重ね合わせるため、 W^e は次のように定義される。

掘削応力解析時および熱応力解析時の応力・ひずみを各々 $\sigma_{ij}^0, \epsilon_{ij}^0, \sigma_{ij}^T, \epsilon_{ij}^T = \epsilon_{ij}^0 + \epsilon_{ij}^*$ (ϵ_{ij}^* は線膨張ひずみ) とすると、全体の応力は $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^T$ 、弾性ひずみは $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^0 + \epsilon_{ij}^T$ となり、弾性ひずみエネルギー密度 W^e は $\int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$ で与えられる。FEM 解析では、図3の (b) に示すように、 Γ が要素の辺、 A がその辺で囲まれる要素となる。また、き裂先端の応力分布は、き裂方向を r として $r^{-1/2}$ の特異性を有するため、その特異性を考慮する必要があるが、ここでは、Barsour⁸⁾が提案した退化特異アイソパラメトリック要素を使用することにした。この要素は8節点4辺形アイソパラメトリック要素の1辺を1節点(き裂先端)とし、中間節点をき裂先端方向に 1/4 移動させて、特異性を評価する要素である。

3. 低温下の岩盤物性

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

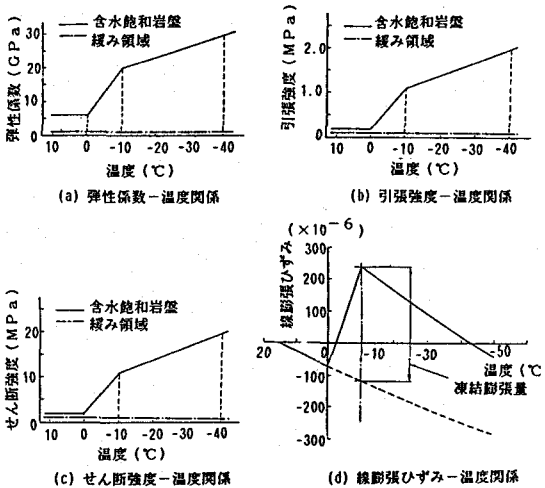


図4 低温下の岩盤物性

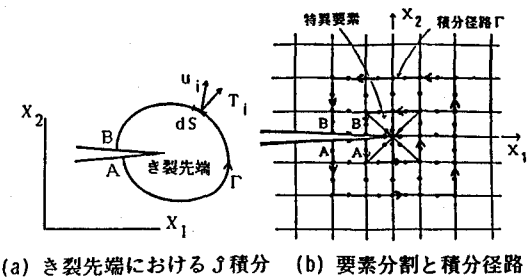


図3 き裂先端における J 積分

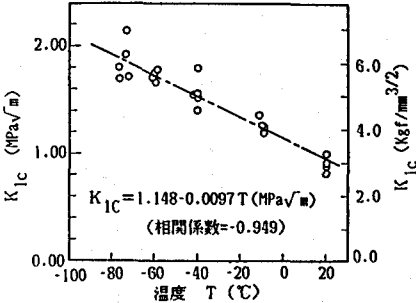


図5 低温下の破壊靱性値

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_{II} 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、熱的物性は原位置での実測例がほとんどないため、ここでは、低温下での室内岩石試験結果からC_{II} 級岩盤の低温特性を推定し、解析に入力することにする。図4に解析に用いた定数（弾性係数、引張強度、せん断強度、線膨張ひずみ）の温度との関係を示す²⁾。ここで、線膨張ひずみでは凍結膨張として0℃から-10℃で約 360×10^{-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得られた値で、最大生じると考えられる凍結量である。なお、き裂発生進展の規準となる破壊靱性値については岩盤と岩石の破壊靱性は同等と考えられるため、岩石試験の結果をそのまま使用することにする。図5は稲田花崗岩の試験結果で、K_{1c}は温度の低下に伴いほぼ線形に増加し、温度Tの関数として整理すると、次式のようになる³⁾。

$$K_{1c} = 1.148 - 0.0097T \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad \text{-----}(2)$$

4. LPG岩盤内貯蔵空洞のき裂発生進展解析

4.1 解析モデル LPG岩盤内貯蔵空洞の解析モデルとして、図6に示すような高さ20m、幅15m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55m、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℃一定、空洞のブレクリング方法は16℃からLPG貯蔵温度-42℃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-42℃一定とした。なお、地表面と外部大気との間は熱伝達境界、貯蔵期間は30年間、掘削による空洞周辺の緩み領域は壁面から2mとした。図7は有限要素解析に用いたメッシュ分割図で、き裂は最も破壊き裂が発生し易い天端方向に設定した。き裂長は凍結領域の範囲を考慮して最大40mとした。図7で斜線を施した部分は無限要素である。

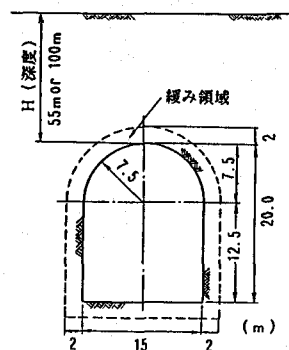


図6 解析モデル

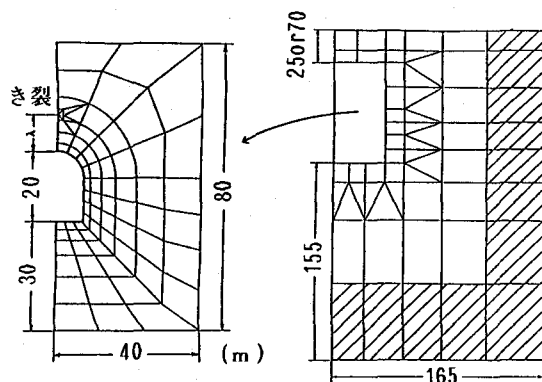


図7 解析メッシュ図

4.2 解析結果（従来の解析方法との比較）

(1) 温度分布：図8は天端方向の0℃以下となる凍結領域の経時変化を示したもので、深度100mの場合がわずかに大きくなるものの、深度55mと100mともほぼ同様の傾向となり、10年後で約19m、20年後で約25m、30年後で28～30mとなる。今回の漏洩に対する検討においてはこの凍結領域範囲内にき裂の進展が止まるかどうかが問題となる。

(2) き裂発生進展解析結果：図9は引張破壊を考慮した従来方法に基づく解析により得られた結果で²⁾、深度100mの場合には引張破壊は凍結領域内に止まり漏洩に対しては安全であるが、深度55mの場合では貯蔵期間が10年を経過すると引張破壊領域が凍結領域の外、特に天端方向に広がり、漏洩の危険性があると言う結果になった。これは、図10（掘削応力解析結果と熱応力解析結果を重ねたもの）で、斜線を施した部分が引張応力状態となり、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き裂進展評価解析を用いて、深度55mのケースについて解析を実施し、従来の解析方法と比較を行う。図

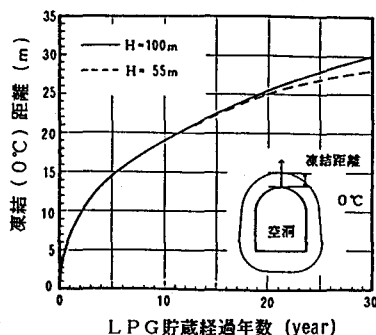


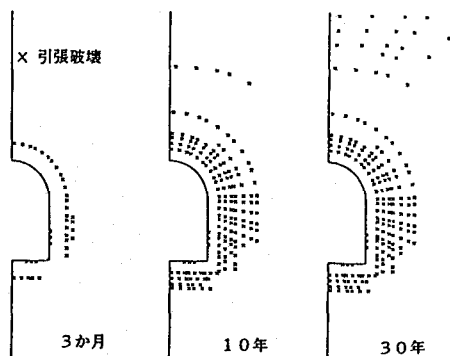
図8 凍結領域の推移

11はき裂長20、30、40mにおける応力拡大係数と破壊靱性値の経時変化を示したもので、4.2年で20m、8.7年で30m、22.0年で40mまでき裂が進展すると言う結果になり、従来方法による結果よりも早い時期にき裂が凍結領域外に進展することになる。これは、き裂を考慮した応力拡大係数解析では、LPGがき裂に沿って漏洩すると考えて、き裂面を熱伝達境界として解析したこと、また、破壊規準の違い（引張破壊強度と破壊靱性値）などにより生じたものと推定される。

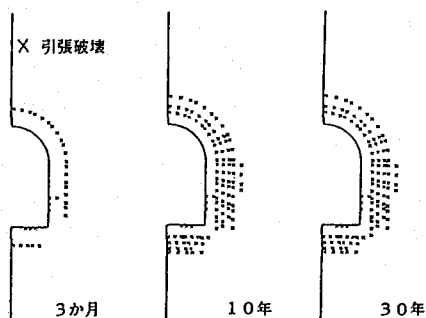
5. おわりに LPG岩盤内貯蔵に関連して、破壊力学に基づくき裂発生進展解析方法の検討を行い、LPGの漏洩問題について検討した。その結果、引張破壊を考慮した従来の解析方法で得られた引張破壊領域、き裂を考慮した応力拡大係数解析でも同様にき裂が進展することになり、深度55m程度の初期地山応力の空洞ではLPGは外部に漏洩する可能性があることが明らかとなった。そのため、凍結領域の外部で引張応力が発生しないような初期地山応力となる深度でLPGを貯蔵する必要がある。また、破壊発生時期については、LPGの漏洩がき裂に沿って生じると想定されることから、き裂を考慮した破壊力学による解析の方が精度が良いと考える。

参考文献

- 1) 木下, 石塚, 日比: 第14回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 181-185, (1982)
- 2) 石塚, 木下, 奥野: 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp. 243-250, (1986)
- 3) 石塚, 日比, 木下: 第16回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 61-65, (1984)
- 4) 石塚, 木下: 土木学会第41回年次学術講演会, Ⅲ-269, pp. 537-538, (1986)
- 5) 白鳥, 三好, 松下: 数値破壊力学, 実教出版株式会社, (1980)
- 6) Rice, J.R.: J. of Applied Mechanics, pp. 379-386, (1968)
- 7) 青木, 岸本, 坂田: 日本機械学会論文集 (A編), 46巻 410号, pp. 1049-1061, (1980)
- 8) Barsoum, R.S.: Int. J. for Num. Meth. in Engng., pp. 85-98, (1977)



(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9 従来解析法による引張破壊領域

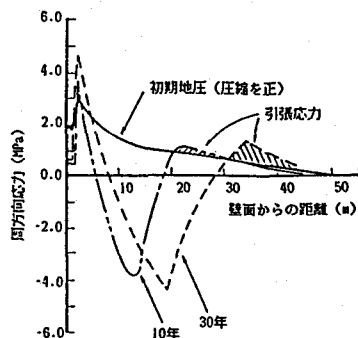


図10 深度55m時の引張応力領域

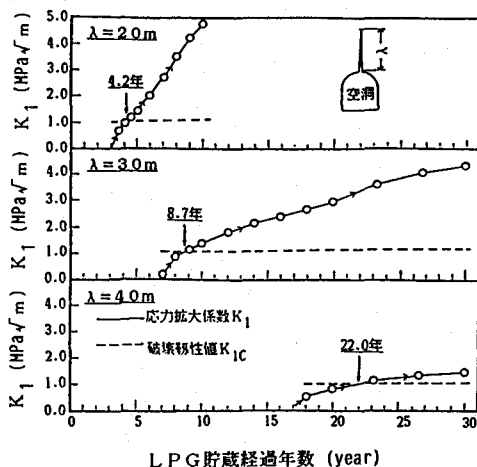


図11 各き裂長に対するK1の推移と破壊き裂発生時期

(51) Analysis of Crack Propagation around a LPG Storage Cavern using Fracture Mechanics

By Yoshio ISHIZUKA
Naoto KINOSHITA

Institute of technology,
SHIMIZU Construction Co., Ltd.

ABSTRACT

One of subjects for a feasibility of LPG underground storage as low temperature storage is to maintain the stability of a rock cavern and to protect the leakage of LPG from the cavern against thermal stresses. As for the leakage of LPG, the most important point is the evaluation of the fracture crack induced tensile stresses. In this problem, the authors have carried out the laboratory experiments to examine a thermal and mechanical properties of rocks, rock block fracturing test to investigate a fracture behavior induced by thermal stresses, the stability analysis of LPG underground storage using a heat conduction and stress analysis in consideration of a material nonlinearity and a numerical method of a crack initiation and propagation based on fracture mechanics. As a result, we have confirmed the validity of fracture mechanics in regarding of the analysis of the crack propagation in rocks.

In this paper, therefore, as a purpose of the investigation of the leakage of LPG, we have discussed the numerical analysis technique of a crack propagation using fracture mechanics, and then examined the possibility of the leakage of LPG by comparing with the result of the conventional numerical method taken account into tensile failures. In the estimation of stress intensity factor (K_I) at a crack tip at finite element method, $\hat{J}$ integral represented as a following equation proposed by AOKI etc. is applied. $\hat{J}$ integral is independent on an integral path in a crack propagation problem of a material containing an eigen strain which are plastic strain, thermal expansion strain etc. and also is coincide with a potential energy rate (G).

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

In this equation, a stress will superimpose a stress caused by excavation of a cavern to a thermal stress and a strain will separate into an elastic strain and a thermal strain ϵ_{ij}^* . In the crack propagation analysis for LPG underground storage, K_I at a crack tip is evaluated at each time step by the heat conduction and thermal stress analysis including the temperature-dependant of rock properties, and K_I compares with a fracture toughness (K_{Ic}) of rocks, that is, a fracture crack initiates at $K_I \geq K_{Ic}$.

In the results of the conventional analysis, all tensile failures remain in the freezing zone during a period of LPG storage in case of a cavern depth $H=100\text{m}$, but in case of $H=55\text{m}$ tensile failures spreads to the outside of the freezing zone over 10 years. On the other hand, in the analysis of a crack propagation at $H=55\text{m}$, the results indicates that a fracture crack propagates 20m length at 4.2 years, 30m length at 8.7 years and 40m length at 22.0 years. The time of the leakage of LPG resulting from the crack propagation analysis is faster than the time estimated by conventional analysis. This result is attributed that a thermal condition of a crack surface is assumed as a thermal convective condition and the difference of failure criterions. But the results of both methods shows that LPG leak out to the outside of a freezing zone. So, LPG underground storage must be constructed at a deep rocks which tensile stresses isn't occurred at the outside of the freezing zone.