

III-269 破壊力学を用いた岩石の低温熱応力き裂発生進展解析について

清水建設機技術研究所 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地下岩盤内貯蔵の実用化においては、空洞周辺に発生する熱応力に対する空洞の安定性、液密性の検討が必要となる。貯蔵空洞では引張応力が発生し、壁面からのき裂の発生、進展という形態で破壊が生じ、液密性を検討する際にはこのき裂の規模を評価する必要がある。筆者らは、この課題に対する研究として、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の検討²⁾、低温における岩石の破壊靱性試験等を行い³⁾、低温における岩石物性、破壊挙動などについて検討してきた。本報告では、岩石のき裂発生・進展評価手法として破壊力学を導入し、その解析方法の検討および模型破壊実験との対比によりその適用性の検討を行う。

2. き裂発生進展評価方法と破壊靱性値 貯蔵空洞周辺に発生するき裂の変形様式は引張型(モードⅠ)となるため、破壊き裂発生を評価するパラメータはモードⅠに対応する応力拡大係数 K_{Ic} となり、 K_{Ic} が破壊靱性値(K_{Ic})を超える時、き裂方向に破壊き裂が発生する。そのため、解析的にはき裂先端の K_I を評価し、 K_{Ic} と比較する事によりき裂の発生進展を評価する事になる。

本報告では、FEMによる K_I 解析方法としてJ積分法を用いる事にする。初期に提案されたJ積分は固有ひずみ(塑性変形ひずみ、線膨張ひずみなど)が微小の時、積分領域、積分経路に依存せず、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。今回、対象としている問題では大きな線膨張ひずみが生じるため、同方法をそのまま適用する事はできない。これに対して、青木ら⁴⁾は、固有ひずみを有する問題に対してき裂の定常進展によるエネルギー解放率が積分経路に依存しないJ積分を提案し、その妥当性を確認している。そのため、本報告では青木らが提案したJ積分を用いる事にする。J積分は図1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経路に沿って次式で定義される。

$$\hat{J} = \int_{\Gamma} (W^e dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dS) + \iint_A \sigma_{ij} (\frac{\partial \varepsilon_{ij}^*}{\partial x_1}) dA \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 W :弾性ひずみエネルギー密度、 S :経路 Γ に沿う距離、 T_i :経路 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 :経路 Γ 上の変位ベクトル、 ε_{ij}^* :固有ひずみ、 A :経路 Γ で囲まれる領域である。FEM解析では、 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。そのため、FEMでは各種の特異要素が提案されている。ここでは、き裂先端部分にBarsoum⁵⁾が提案した退化特異アイソパトリック要素を用いる。この要素は8節点4辺形アイソパトリック要素の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移動させるだけで特異性を表す事が可能で、通常のFEMプログラムを修正する必要がないと言う利点を有する。

き裂発生進展の規準となる破壊靱性値(K_{Ic})については、既に、筆者らが低温下における破壊靱性試験を実施し、岩石(稲田花崗岩)の K_{Ic} の温度依存性について検討しているので、その結果を用いる事にする。図2はその結果で、稲田花崗岩の K_{Ic} は温度の低下に伴い、ほぼ線形に増大する。試験結果を温度 T の関数として整理すると、 K_{Ic} は次のようになる。

$$K_{Ic} = 1.148 - 0.097 T \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad \text{----- (2)}$$

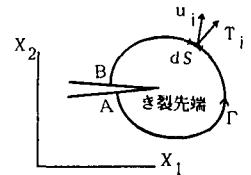


図1 き裂先端におけるJ積分

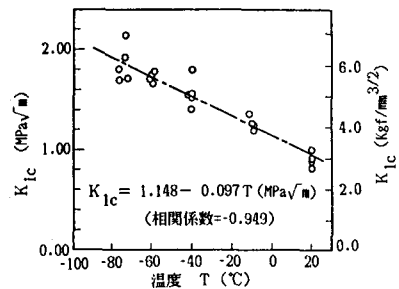


図2 低温下の破壊靱性値

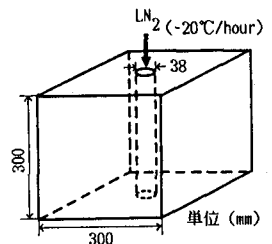


図3 模型破壊実験の概要

低温熱応力に対するき裂評価解析では、非定常熱伝導熱応力解析の各時間ステップにおいて、式(1)によりき裂先端の K_I を求め、その K_I を式(2)から求める K_{Ic} と比較し、 $K_I \geq K_{Ic}$ ならばき裂は進展すると評価する。

3. 低温熱応力による岩石円孔からの破壊

3.1 模型破壊実験と解析モデル 前章で検討した手法の実際問題への適用性を検討するために、図3に示すような円孔（直径38mm）を有する岩ブロック（300×300×300mm）で実施した冷却模型破壊実験との比較を行う。実験では、試験体側面を一定温度（10℃）に保ち、孔壁を10℃から-20℃/hour（LN₂を使用）の冷却速度で-180℃まで冷却し、AE計測、ひずみゲージで破壊挙動を調べた¹⁾。実験ではき裂岩（稲田花崗岩を加熱処理により人工的に間隙率を増大させた岩）で、試験体の側面まで達するき裂が生じた。図4は孔壁温度-80~-100℃の間で得られたAE位置標定結果で、-110℃前後で巨視的な破壊き裂が発生したと推定された。

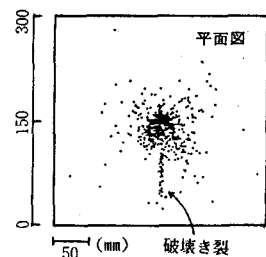


図4 AE位置標定結果

岩盤内低温液化貯蔵では破壊き裂の規模（凍結領域内に破壊き裂が止まるか否か）の評価が必要となる。そのため、解析では、一旦発生したき裂がどこまで進展するか検討するために、図5に示すようなFEM解析モデルを考える。一旦き裂が発生すると冷気（LN₂）がき裂内部に入り込む可能性があるため、温度境界として、孔壁面のみが温度指定境界となる場合（冷気がき裂内部に入らない場合）と、き裂面が熱伝達境界となる場合（冷気がき裂内部に入る場合）の2通りを考える。き裂長 λ は2.0~60.0mm（解析では2.0, 5.0, 10.0, 30.0, 60.0mmの5ケース）の範囲について解析を行った。なお、解析では、岩石物性の温度依存性を考慮し、力学定数を温度の関数として評価した。図6に解析に入力した力学定数を示す。

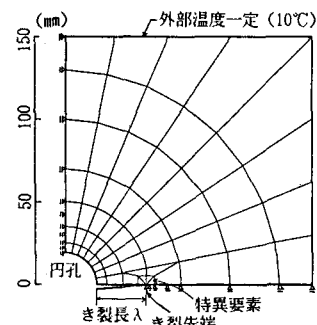


図5 解析モデル

3.2 解析結果 図7に孔壁温度-60℃、-80℃、-100℃における孔壁からのき裂長と K_I の関係を示す。これによると孔壁温度-60℃ではすべてのき裂長で $K_I < K_{Ic}$ となり、き裂は発生しない。これに対して、孔壁温度が-80℃になると、冷気がき裂内部に入らない場合で40.0mm程度までき裂が進展するが、それ以上には進展しないと言う結果になる。続いて、孔壁温度が-100℃になると冷気がき裂内部に入らない場合でも60.0mm以上き裂が進展するようになり、試験体の側面まで破壊き裂が進展するものと推定され、これらの結果は、実験結果と良い対応を示している。

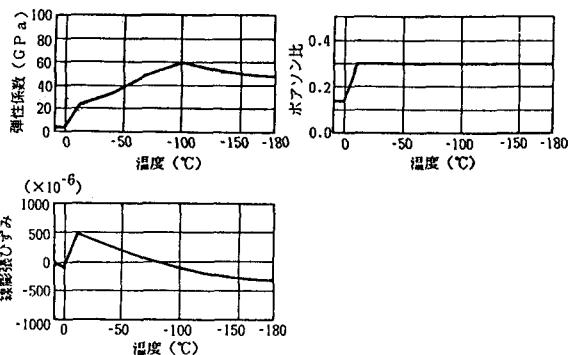


図6 解析入力定数

4. おわりに 今回の破壊力学を適用したき裂評価解析により、従来、困難であった破壊き裂の評価がある程度可能となった。そのため今回問題とした低温液化燃料の熱応力によるき裂評価はもちろん他のき裂問題、たとえば、水圧破砕時のき裂規模評価などに応用できると考えられる。

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: 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp.1233~1240 (1985)
- 3) 石塚, 木下, 日比: 第16回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.61~65 (1984)
- 4) 青木, 岸本, 坂田: 日本機械学会講演論文集, No.800-10, pp.53~60 (1980)
- 5) Barsoum, R.S.: Int. J. for Num. Methods in Engng., Vol.11, pp.85~98 (1977)

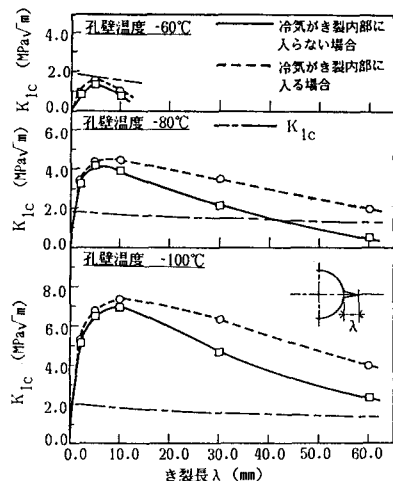


図7 き裂長に対する K_I の推移