

清水建設(株) 技術研究所 正会員 ○石 塚 与志雄
正会員 木 下 直 人

1. はじめに LPGを岩盤内に低温貯蔵する場合、空洞周辺に発生する熱応力に対する空洞の安定性、外部への液密性について検討する必要がある。筆者らは、この問題に対する基礎研究として岩石の低温特性の把握、熱応力による岩石の破壊実験、解析を行ってきた¹⁾。この結果、熱応力を評価するには物性の温度依存性、凍結膨張現象を考慮した解析が必要であることが明らかとなった。また、熱応力解析では、境界条件の取り方により熱応力値が異なることが予想される。そのため、今回は半無限境界を減衰型無限要素²⁾でモデル化すること、物性の温度依存性を考慮したFEM熱伝導熱応力解析を行うことにより、減衰型無限要素の妥当性、凍結膨張が空洞周辺の熱応力に与える影響について検討した。

2. 岩盤の低温特性 LPG貯蔵の対象となる岩盤は比較的良好な岩盤であることから、0℃以上の力学的特性値として電研式岩盤分類でC_H級下限の値を用いることにした。低温下における岩盤物性は、実測データがないので、含水飽和状態の岩石試験結果から推定した。岩石試験によれば、弾性係数Eは間引き水の凍結に伴い、0～-10℃で急激に高くなるが、ポアソン比νはあまり温度の影響を受けない。そのため、解析では図1(a)に示すような弾性係数の温度依存性を考慮し、ポアソン比についてはν=0.3とした。熱物性に関しては、現状では原位置における有力な測定方法がないこともあり、岩石試験から得られた値を用いることにした。比熱をC=0.18Kcal/kg℃、熱伝導率をK=2.0Kcal/mh℃の一定値とし、線膨張ひずみについては凍結膨張の影響を調べるために、図1(b)に示すような凍結膨張がある場合とない場合の2種類の線膨張ひずみを入力値とした。線膨張ひずみは間引き率1.8%の花崗岩の線膨張係数測定結果で、凍結膨張は0～-10℃で生じる。

・ 発破などの掘削による損傷領域では不飽和状態となり、物性の温度依存性は少ないと考えられる。そのため、 $E=1.2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.2$ 、熱物性については0℃以上の非損傷領域岩盤の値と同様にした。

3. 無限要素および解析モデル 減衰型無限要素の妥当性を検討する

ために図2に示すような半径r=10mの円孔を有する岩盤に温度荷重が作用する問題を解析した。解析領域をr=150m、孔壁温度を-42℃、 $10 \text{ m} < r < 100 \text{ m}$ で定常温度状態、 $100 \text{ m} \leq r \leq 150 \text{ m}$ で0℃一定とした。図3は $E=1.2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.2$ 、線膨張係数 $\alpha=0.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ とした時の周方向応力の半径方向分布であり、厳密解と境界を拘束した場合、無拘束とした場合、減衰型無限要素を用いた場合のFEM解を示す。厳密解は境界を無限とした場合

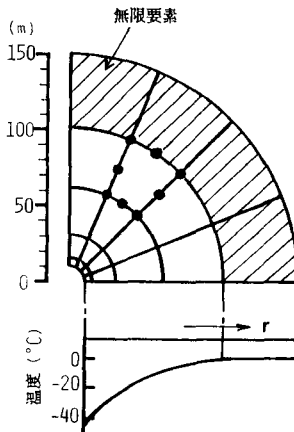
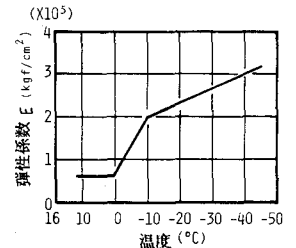
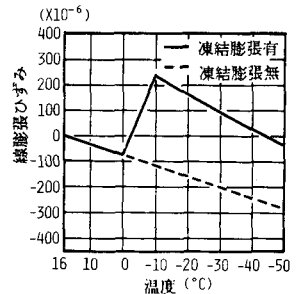


図2 温度荷重を受ける円孔



(a)温度—弾性係数関係



(b)温度—線膨張ひずみ関係

図1 物性の温度依存性

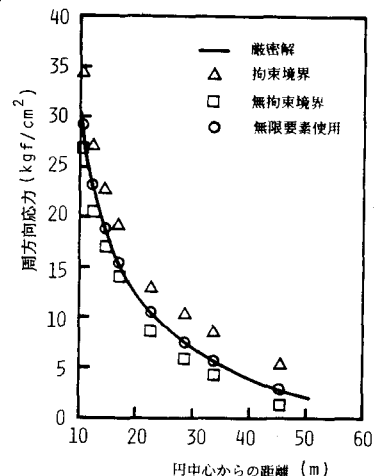


図3 厳密解とFEM解

の理論解で、無限要素を用いたFEM解はこれと良い一致を示す。

LPG岩盤内貯蔵空洞のモデルとして、図4に示すような深度55m、高さ20m、幅15mの空洞を想定した。温度条件は、岩盤初期温度、大気温度を16℃一定、空洞のプレクーリングは16℃から-42℃（LPG貯蔵温度）まで3か月間で2次曲線的に低下させる方法とし、その後は壁面温度-42℃一定とした。弾性係数、線膨張ひずみの温度依存性は温度の関数として解析に取り入れ、貯蔵期間30年間について熱伝導熱応力解析を行った。なお、掘削による損傷領域は空洞壁面から2mの領域とした。

4. 解析結果 空洞周辺の温度分布はほぼ同心円状に広がる。空洞側壁方向の温度勾配の経時変化は図5に示すとおりで、プレクーリングの終了時（3か月後）で最も大きい温度勾配が生じ、その後、徐々に減少する。0℃以下の凍結領域は30年後で壁面から約30mとなる。

空洞周辺の熱応力分布の経時変化を、凍結膨張無、凍結膨張有のそれぞれについて図6に示す。ここで引張を正としている。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、空洞から遠ざかるに伴い低下する。この場合、貯蔵期間中の最大引張応力は約1年後に生じる。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、その前後の領域で引張応力が誘発される。引張応力は凍結領域の進展、時間の経過とともに増大し、その値は凍結膨張が生じない場合と比べてかなり大きくなり、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. 結 論 以上から、凍結膨張の有無により空洞周辺の熱応力の分布、値が大きく異なることになり、凍結膨張の大きさが空洞の安定性に大きな影響を与えると考えられる。また、境界条件により熱応力値に差が生じるため、精度の良い解析を行うには減衰型無限要素などの無限要素を使用する必要がある。一方、今回用いた凍結膨張ひずみは無拘束下の岩石試験から求めた値であるため、より厳密な検討を行うには、拘束状態、熱流方向をパラメータとした凍結膨張現象の定量的把握が必要となる。

参考文献

- 1) 木下直人ほか：
第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集
(1982) PP.181～185
- 2) Battess, P. :
Int. J. for Num. Meth. in Eng.
Vol.15 (1980)
PP. 1613～1626

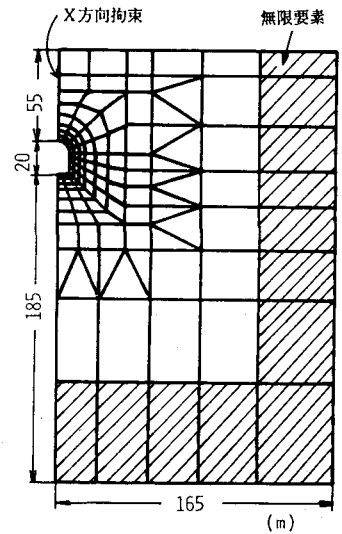


図4 LPG貯蔵解析モデル

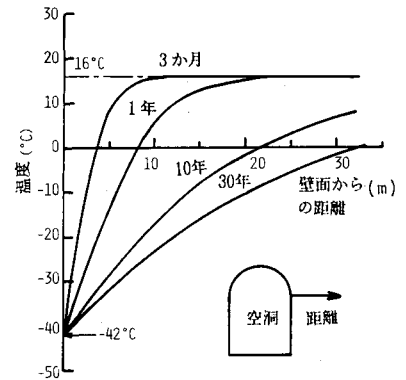


図5 空洞周辺の温度分布

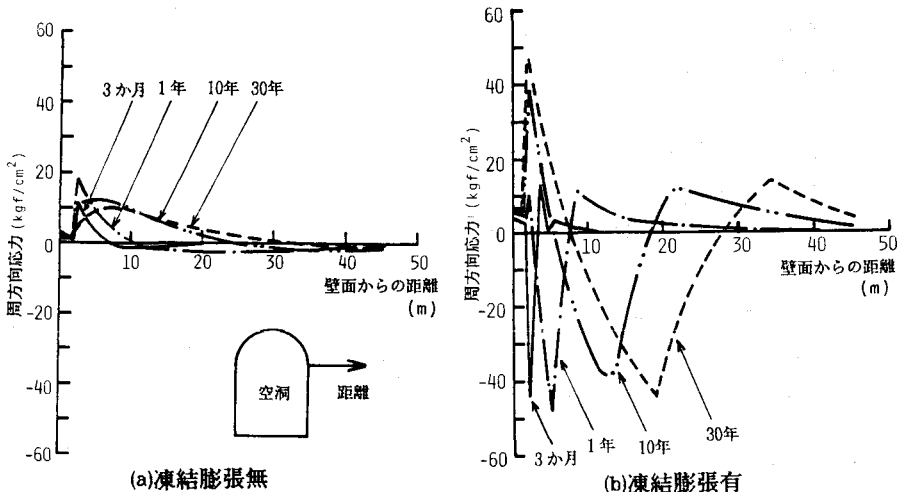


図6 空洞周辺の熱応力分布