

LNGの地下岩盤内空洞貯蔵における空洞周辺の塑性領域の検討

愛媛大学 工学部 (正会員) 稲田 善紀
愛媛大学 大学院 (学生員) 谷口 浩二
四国日本電気ソフトウェア (正会員) 宇都宮和顯

1. まえがき

液化天然ガス(LNG)を地下の岩盤内空洞に貯蔵する場合、LNGが -162°C という極低温であるため岩盤はその影響を受け、空洞の安定性が問題となってくる。また、空洞周辺の温度分布が時間とともに変化してゆくため、それにともなう塑性領域も時間的に変化してゆくものと思われる。本研究ではNo Tension解析法、亀裂解析法および異方性解析法を用いて、空洞周辺に発生する塑性領域および亀裂の範囲を求め、比較し考察を行った結果について述べる。

2. 空洞周辺の応力解析の方法

土径100mの新鮮な花崗岩の岩盤中に直径10mの単一円形空洞を掘削し、その中にLNGを貯蔵する場合を想定して応力解析を行った。また、実際の岩盤は地下水等の影響により湿潤状態にあると考えられるので、本研究では別の実験により求められている位温下におけるそれらの諸物性値を用いた¹²⁾。

岩盤内の破壊条件については種々の考え方があがるが、ここではMohrの破壊包絡線説に従うものとした。つまり、主応力が引張強度を越えた場合には要素内はその直角方向に薄いせんべいを重ねたように破壊しているものと考えられ、また破壊していない主応力方向は弾性体としてふるまうと考えられるので、ここではこのような要素を塑性領域とよぶこととする。また、3つの主応力とも破壊している場合を破壊領域とよぶことにし、両者を区別している。

応力解析はすべて平面ひずみ問題として取り扱うこととし、有限要素法を用いた。さらに時間の概念を取り入れ逐次破壊を考慮した解析を行った。解析手法としては、圧縮応力にはある程度耐え得るが引張応力には抵抗し得ないような材料に対する非引張解析のうち、No Tension解析法³⁾と異方性解析法⁴⁾を用いた。No Tension解析法は、破壊判定により塑性領域および破壊領域が生じた場合には、この領域では破壊を起こさせた応力方向には引張力をもはや伝え得ないものとしてこれらを節点外力に置き換え、引張応力がほぼ零になるまで繰り返し計算を行う。また異方性解析法は、まず等方性材料として応力解析を行い、破壊判定により引張破壊が起こっているならばその引張応力の方向の弾性定数に零またはきわめて小さな値をヒットし、他の応力の方向の弾性定数はもとの値をもつ直交異方性と考え再度計算を繰り返す。No Tension解析法および異方性解析法の手順をそれぞれ図1と図2に示した。一方亀裂解析法は、各要素に引張強度を越える引張応力が生じた場合、各要素は破壊せず隣接要素間に亀裂が進展すると考え、その節点に自由度をもたせ解析を行う。亀裂解析法の原理を図3に示した。

3. 応力解析の結果および考察

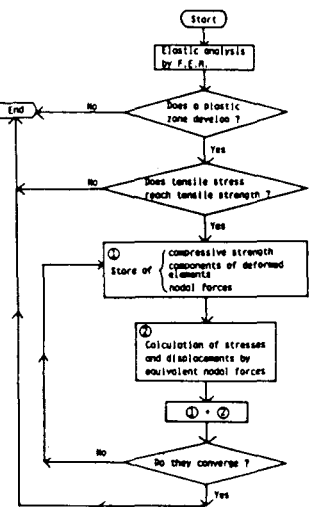


図1. No Tension 解析法の手順

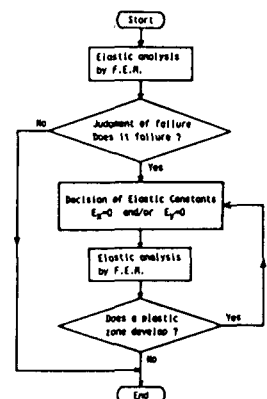


図2. 異方性解析法の手順

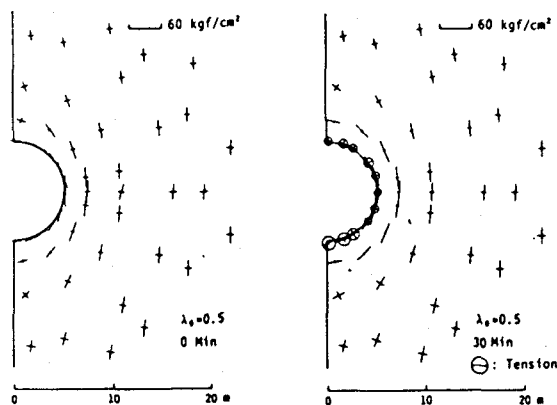
LNG貯蔵前の空洞周辺には地山の初期応力が存在している。この場合は図4(a)に示すように破壊強度に達するような引張応力は存在していないので、空洞は安定していると考えられる。

LNG貯蔵30分後における空洞周辺の応力状態を図4(b)に示した。熱応力による引張応力が空洞周辺にほぼ同心円状に発生していることがわかる。

空洞周辺の温度分布は、貯蔵約1年後にはほぼ準定常状態になるこ

とがわかっている。本研究では1年後までの塑性領域の解析を行った。1年後における塑性領域および亀裂の範囲と比較したものが図5である。No Tension解析法および異方性解析法によって得られた塑性領域は、同心円状に空洞表面からほぼ12mであった。一方、亀裂解析法によって得られた結果からはその範囲が一樣でなく、亀裂は1年後には最大9.5m、最小7mの範囲に達することがわかった。これらのことから、ある亀裂の先端に应力が集中して亀裂がさらに進展した場合、その亀裂の周辺では逆に应力の解放がみこり、亀裂の進展が抑制されていることがわかった。しかし、実際には潜在的な亀裂の形状や位置を明確に予測できないため、実用上は塑性領域の平均的な範囲を予測することとなる。

また、実際に岩石の供試体も液体窒素中に30分間投入した後、顕微鏡観察も行った結果と、これまでの手法を用いて理論的に解析も行った結果とを比較すると、理論的に得られた塑性領域の範囲の方が実際よりも数値大きいことがわかった。これらのことから、実際の空洞周辺の塑性領域の範囲は、理論的に得られた結果よりかなり小さいものと思われる。



(a) LNG貯蔵前 (b) LNG貯蔵30分後
図4. 空洞周辺の主応力方向線図

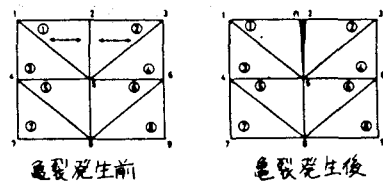


図3. 亀裂解析法の原理説明図

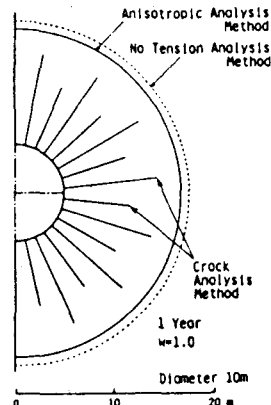


図5. 1年後における空洞周辺の塑性領域および亀裂の範囲

4. あとがき

本研究は、LNG貯蔵による空洞周辺の塑性領域および亀裂の範囲をNo Tension解析法、亀裂解析法および異方性解析法を用いて解析比較した。いずれにしても、液もれ・ガスもれ防止のための安全対策として特殊合金製メンブレンなどを空洞内壁に使用することや、断熱材使用により熱応力による引張応力に対処する工夫が必要であると思われる。

- 参考文献 1) 稲田・八木；極低温下における岩石の力学特性，材料，29，327，pp.67～73，1980
2) 稲田・八木；極低温下における岩石の熱物性値，材料，29，327，pp.74～79，1980
3) Zienkiewicz, O. C., S. Valliappan and I. P. King; Geotechnique, 18, 56～66, 1968
4) 榎木武著；トンネル力学，142，1978，共立出版