

液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵における塑性領域の検討

愛媛大学工学部 (正会員) 稲田善紀
 (独)応用地質調査事務所 (正会員) ○重信 純
 愛媛大学大学院 (学生員) 川端孝二

1. 緒言

液化天然ガスを地下岩盤内空洞に直接貯蔵する場合、空洞周辺に発生する塑性領域が時間的に変化するものでこれらを考慮して理論的に解析した結果について報告する。さらに模擬実験により孔周辺に発生した塑性領域を観察しこれと理論的に解析した塑性領域とを比較検討し、それらの差異について考察を行なった結果について報告する。

2. 空洞周辺の応力解析

2.1 解析に用いた諸定数および解析方法

実際の岩盤は地下水等の影響によって湿潤状態にあると考えられる。そしてこれらの物性値は温度とともにその値を異にする。低温下におけるこれらの値についてはすでに別の実験で求めているので、¹⁾本解析ではそれらの値を用いることにした。次に、ここでは巨視的にみて等方性弾性岩盤の地山内に直径5m、長さ10mの堅型円形空洞を掘削した場合について考え、軸対称問題として取扱った。なお、今回は側圧係数 $\lambda_0 = 0.5$ 、風化係数 $w = 1.0$ の場合について解析を行なった。この場合時間の概念を導入したいわゆる逐次破壊を考慮した解析を行ない、解析手法としては非引張解析法のうちのNo Tension法を用いた。また、岩盤内の降伏条件はMohrの破壊包絡線説に従うものとし、それによって破壊した領域を塑性領域と呼ぶことにする。この塑性領域内は破壊によって無数の亀裂の集合体になっているものとした。

2.2 解析結果および考察

図1はLNG貯蔵前の空洞周辺のr-z平面内における主応力方向線図であるが、応力はすべて圧縮で、いずれの位置においても塑性領域は発生せず安定している。図2(a)(b)は15分後および1年後の塑性領域を示している。15分後では空洞周辺に約10cmの塑性領域が発生しており、1年後では空洞側壁部において約6m、底部において約7mの塑性領域が発生している。図3は瞬間的に1年後の温度分布を与えて解析したものと1年後まで逐次破壊を考慮した解析を行なったものとを比較したものである。すなわち、前者の手法では底部に約11m、側壁部に約14mの塑性領域が発生するのに対し、後者は前述のとおりである。このように両者には大きな差がみられるが実際の現象としては1年後の温度分布が瞬間的に与えられることはなく、後者の方がより実際の現象に近い。

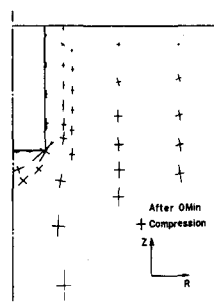
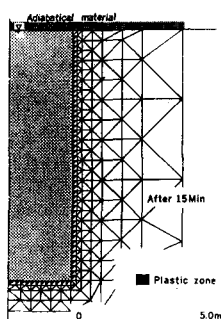
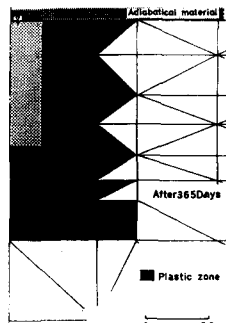


図1. 貯蔵前における空洞周辺の
主応力方向線図



(a) 15分後



(b) 1年後

図2. 逐次破壊を考慮した解析による塑性領域

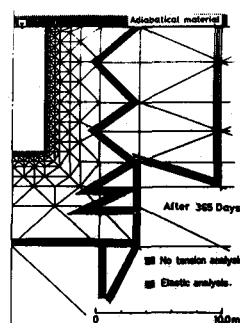


図3. 解析方法の違いによる
塑性領域の比較

3. 塑性領域の範囲に関する考察

まず、花崗岩試料を用いた模擬実験により孔周辺に発生した塑性領域を反射式顕微鏡によって観察したが、今回の観察結果では顕著な塑性領域はみられなかった。一方、前述の実験をモデル化して孔周辺の塑性領域をここで用いている手法によって解析した結果を図4に示す。その結果、理論解析では塑性領域は約2.5 cmにも及んでいる。両者の塑性領域の違いの要因として解析上においては花崗岩試料は巨視的に均質と考えられているが、実際の花崗岩試料は構成鉱物粒子自身ならびにそれらの間に弱面を有する微視的不均質なものである。従って熱応力の伝達過程において応力の解放が生じ、それらの差が両者の塑性領域の差となって現れたものと思われる。花崗岩試料の顕微鏡観察が十分にできなかったためエポキシ樹脂試料を用いた同様な実験を行ない、発生する塑性領域と理論解析による塑性領域の比較を行った。この試料を用いた理由は低温下において岩石と同様な脆性破壊を生じることおよび試料に光学的透過性があり、塑性領域の範囲が岩石に比べ肉眼観察が容易であることなどである。なお、この試料の物性値については別の実験で求めているので²⁾、その値を用いた。図5はこの試料に発生した孔周辺の塑性領域を模写したものであり、図6は解析結果を示している。両者の結果から塑性領域の範囲はほぼ似ている。ただし、試料内には解析結果のような無数の亀裂による塑性領域は存在せず大きな亀裂のみ生じていた。

以上花崗岩とエポキシ樹脂を用いた実験結果から、試料内部にマイクロクラックが存在するかまたは亀裂が進展することによってその周辺に応力の解放が生じたものと思われる。このことを確認するため、直径3 cmの長い岩石の円柱試料を液体窒素の中に浸し表面に人工的にスリットを設けた場合と設けない場合について平面ひずみ問題として解析を行った結果を図7および図8に示す。両者の結果から後者の場合には20 sec後には塑性領域が約0.5 cmにも発達しているにもかかわらず前者の場合には塑性領域はほとんど存在していないことがわかる。以上のことからスリットを設けた場合には、スリットを含むある大きさの範囲のみに応力解放が起こり、スリット自身は応力解放に伴って亀裂という状態で進展するものと考えられる。

4. 結 言

液化天然ガスの岩盤内直接貯蔵は地層の状態によっては危険を伴うのでメンブレンや支保工が必要になるものと思われる。また、スリットを設けることによる応力解放の現象を実際の空洞に適用することができるとすれば、初めから人工的にスリットを設けることでメンブレンや支保工に対する負担を抑制することができると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 稲田・ハ木; '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・利藤; '極低温が高分子系岩盤接着剤に及ぼす影響' 愛媛大学工学部紀要 10, 1, PP 343~350, 1982

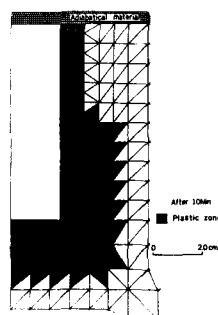


図4. 花崗岩試料における塑性領域の解析結果

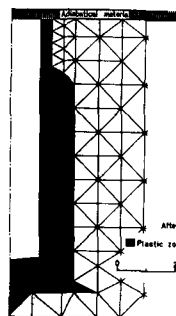


図6. エポキシ樹脂試料における塑性領域の解析結果

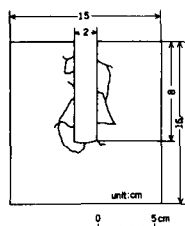


図5. 孔周辺に発生した塑性領域の模写図(エポキシ樹脂)

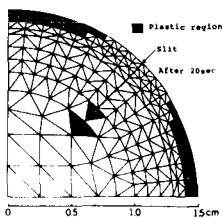


図7. 円柱試料の塑性領域 (スリットを設けた場合)

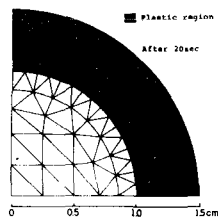


図8. 円柱試料の塑性領域 (スリットを設けな場合)