

LPGの地下岩盤内貯蔵に関する研究

愛媛大学工学部 (正会員) 稲田 善紀
大成建設株式会社 (正会員) 高市 一馬

1. まえがき

LPGを地下岩盤内空洞に貯蔵する場合、LPGが -43°C という低温のため岩盤はその影響を受けるので空洞の安定性が問題となる。空洞周辺ではLPGの貯蔵により温度分布が時間的に変化し、それにとまって塑性領域も時間的に変化し、進展してゆくことが予想される。本研究では、空洞周辺の温度分布を要素分割法¹⁾により求め、これに基づき、空洞周辺の塑性領域や亀裂の範囲をNo Tension解析法、亀裂解析法²⁾および異方性解析法を用いて求め比較し、さらに模擬実験により得られた結果とも比較し検討した結果について述べる。

2. 空洞周辺の温度分布

新鮮な花崗岩の岩盤中の空洞にLPGを直接貯蔵した場合を想定し、温度分布を非定常の熱伝導問題として扱い、要素分割法を用いて計算した。その結果、貯蔵初期の時間においては急激な温度勾配を示し、時間の経過とともに勾配は緩やかとなり、温度変化も緩慢となって約1年後には準定常の状態になることがわかった(図1参照)。また、空洞の直径が大きくなるにつれて凍結範囲は広がるが、この値は比較のため一次的に求めた値に漸近的に近づいており、直径が100m以上になると凍結範囲はほとんど変化しないことがわかった(図2参照)。

3. 空洞周辺の応力解析

均質な等方性岩盤中の空洞にLPGを貯蔵した場合を想定し、有限要素法を用いて応力解析を行った。岩盤内の破壊条件については、Mohrの破壊包絡線説に従うものとし、岩石の強度や熱物性値は温度によって変化することが実験により確かめられているので、これらの値を用いて解析を行った^{3) 4)}。解析方法として、No Tension解析法、亀裂解析法および異方性解析法を適用した。単一円形空洞の場合のLPG貯蔵前と貯蔵30分後の空洞周辺の主応力方向線図を図3(a), (b)に示した。これらの図より、LPG貯蔵前においては、空洞周辺には圧縮応力のみが生じているが、その大きさは破壊を生じるほどの値ではなく、したがって貯蔵前には空洞は安定していることがわかった。LPG貯蔵後においては、空洞周辺には熱応力により引張応力が生じ、この値は時間の経過とともに大きくなり塑性領域や亀裂が発生し、進展してゆくことがわかった。

温度分布が準定常状態となる1年後におけるそれぞれの解析法により得られた塑性領域および亀裂の範囲を比較したものが図4である。No Tension解析法、異方性解析法では空洞表面から約7mの範囲で同心円状に塑性領域が発生している。一方、亀裂解析法では空洞上下端周辺で約6m、側壁部周辺で約4mの範囲に亀裂が発生し、他の解析法に比べやや小さくなっていることがわかる。応力解析の結果と実際の現象とを比較するため、ガラス板を用いた液体窒素による熱衝撃実験を行った結果、亀裂解析法は他の解析法に比べ、より実際の現象に近い結果が得られることがわかった。しかし、実際には岩盤中に存在する亀裂の正確な情報を把握することが困難なので、一般的には塑性

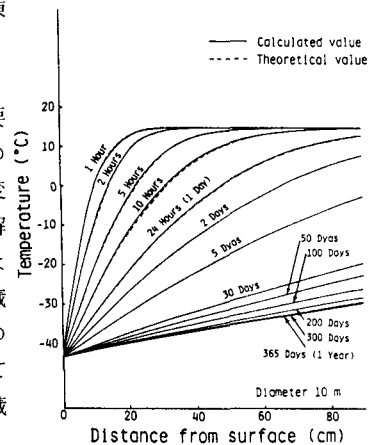


図1. 温度分布の時間的変化

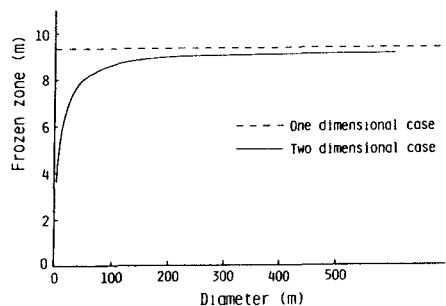


図2. 空洞直径が凍結範囲に及ぼす影響

領域の平均的な範囲をNo Tension解析法により求めることとなる。また、実験と解析の結果から、空洞周辺にあらかじめ人工的亀裂を設けることで、その周辺の亀裂を抑制することが可能であると推察される。堅型円形空洞の場合も同様に、LPG貯蔵後空洞周辺に大きな引張応力が発生し、図5に示すように塑性領域が進展してゆく様子がうかがえる。

4. 現場への適用に関する一考察

塑性領域や亀裂を抑制する方法、あるいは安定性の確保のための方法について検討を行った結果、Rock Boltを用いる場合、Boltを断熱し空洞中心でBoltを連結する方法では、1年後で約2m塑性領域を抑制できることがわかった。ただし、この場合低温下でも強度的に耐え得る特殊合金性のBoltを使用する必要がある。また、水封式貯蔵に関して実験および理論的な解析を行った結果、水結膨張により亀裂が広がっても、絶えず水が供給されるので亀裂中は常に水で満たされており、LPGは亀裂を通じて漏出することではなく、水封式の効果が確かめられた。

5. あとがき

本研究では地下岩盤内空洞にLPGを直接貯蔵した場合の空洞の安定性を検討してきた。その結果、LPG貯蔵後空洞周辺には熱応力により塑性領域および亀裂が発生し、時間の経過とともに広がって行くことがわかった。また、熱衝撃実験の結果より亀裂解析法の結果は実際の現象に近い結果であることがわかり、さらに両者を比較検討した結果より、空洞周辺に人工的な亀裂を設けることで望ましい方向に亀裂を誘導し、その周辺では亀裂を制御できることがわかった。また、Rock Boltを使用する場合、特殊合金製のBoltを用い熱伝導を遮断できれば塑性領域の抑制に効果があることがわかり、水封式貯蔵は理論的ならびに実験的にもその効果が確かめられた。いずれにせよ、完全な断熱が困難な現段階では、塑性領域の範囲を把握し、それを考慮した上で施工を行わなければならないと思われる。

参考文献

- 1) 稲田, 重信: 液化天然ガスを地下岩盤内空洞に貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布, 日本鉱業会誌, 99, 1140, PP. 179~185, 1983.
- 2) Y. INADA: Stability of underground openings for storage of L.N.G., Proceedings of the fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, A. A. Balkema, Vol. 2, PP. 1231~1232, 1985.
- 3) 稲田, 八木: 極低温下における岩石の力学特性, 材料, 29, 327, PP. 1221~1227, 1980.
- 4) 稲田, 八木: 低温下における岩石の熱物性値, 材料, 29, 327, PP. 1228~1233, 1980.

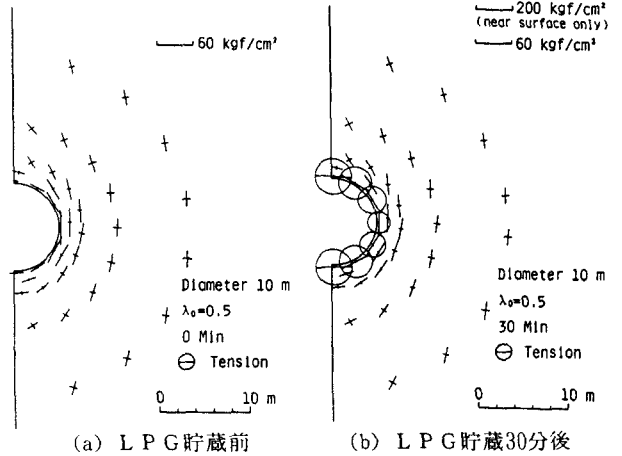


図3. 空洞周辺の主応力方向線図

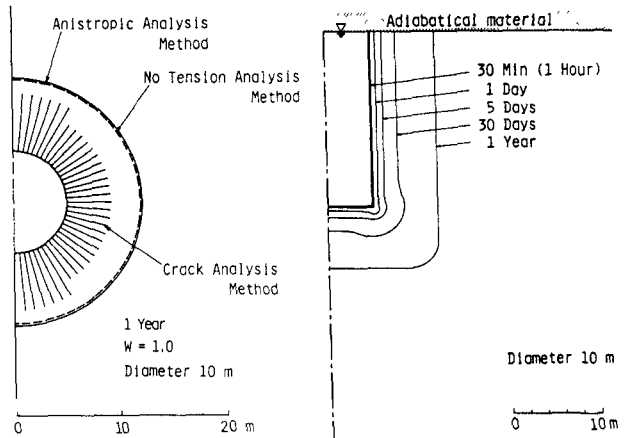


図4. 1年後の塑性領域および亀裂の範囲の比較

図5. 塑性領域の時間的変化