

(18) LNG岩盤内貯蔵における空洞の安定性に関する検討

大成建設(株)技術開発部 真下 秀明 大川 孝 細田 泰宏
大成建設(株)土木設計部 岩野 政浩 Ajai Sulekh

Computational Study of Stress and Crack Propagation of LNG Storage Cavern in Rock

Hideaki Mashimo^{*1}, Takashi Okawa^{*1}, Yasuhiro Hosoda^{*1},
Masahiro Iwano^{*2} and Ajai Sulekh^{*2}

^{*1} Technology Development Department, Taisei Corporation

^{*2} Design Department of Civil Engineering, Taisei Corporation

Abstract

The LNG storage system in the rock cavern discussed in this paper has no heating facility and allows the reduction of temperature in rock around the cavern. The omission of heating operations in the rock would be beneficial from the standpoints of both construction and operation costs. However, the reduction of rock temperature can cause tensile stress in rock and the occurrence and propagation of cracks, resulting in major stability problems of the rock cavern.

The computational calculations by the finite element method and the distinct element method are performed to investigate the exchange of thermal distribution, the state of stress, and the propagation of cracks around the rock cavern. The results of the calculations in the two methods are compared in this paper. The properties of the rock used in the analysis are investigated by laboratory tests in cryogenic condition in order to consider the thermal dependence of rock properties. The effects of insulation installed on the surface of the rock cavern are also discussed. It was found that the installation of the insulation enhances the stability of the rock cavern by minimizing the magnitude of tensile stress and the propagation of cracks.

1. 緒 言

昨今、周辺への社会環境問題が重視される時代となり、新設構造物の地上における景観が周辺の住民におよぼす心理的影響や周辺環境との調和等が問われる時代になってきた。また、地震や火災に対する万全な安全対策が要求され、安全性をより確実なものにするために地下を利用した施設、あるいは地下特有の利点を活用した地下施設等が提案され、研究されてきた。このように地下空間の利用は土地の有効利用、安全性、環境保全などの時代のニーズから判断し、避けては通れないものになりつつあり、LNG^{1),2)}、LPG^{3),4)}等の液化燃料についても、岩盤内の貯蔵に注目して、実現化のための基礎的研究が行なわれている。

本研究はトンネル状の空洞にLNGを蓄えるLNG岩盤内貯蔵施設について空洞の安定性に関して検討を加えたものである。ここでは岩盤温度をコントロールするためのヒーティング施設を設けない貯蔵方式を想定し、空洞周辺の岩盤が極低温(−162℃)のLNGにより冷却される状態のものを取り扱う。この場合、岩盤の冷却に伴って空洞周辺に熱応力が増加し、クラックを発生する可能性があるが、この時の空洞の安定性確保が実用化のための課題となる。これを検討するために、低温下における岩石の熱的特性・力学的特性を室内実験により求め、物性値の温度依存性を考慮した熱伝導解析・熱応力解析を有限要素法・個別要素法を用いて実施した。その結果、温度低下に伴う熱応力により岩盤は引張破壊に至ることがわかったが、断熱材の空洞内設置により岩盤内の亀裂発生範囲が低減されることが明らかになった。さらに、空洞周辺の塑性領域・発生クラックのパターンを調べ、空洞周辺の温度分布が空洞の安定性に与える影響について検討した。

2. LNG岩盤内貯蔵タンクの概要

本研究におけるLNG岩盤内貯蔵タンクは、図-2.1に示すようなトンネル状の岩盤空洞にLNGを貯蔵する施設で、貯槽が地中に設置されるため地上から貯槽本体が見えないところに特長がある。

このLNGは常圧（1気圧）のもとで-162℃という極低温の液体であるため、貯蔵方式として空洞周辺岩盤に凍結領域を自由に形成させて空洞内にLNGを貯蔵する岩盤凍結方式のものと、ヒーティング設備により周辺岩盤の温度を管理する温度コントロール方式のものに大きく分類される。本研究においては、前者の岩盤凍結方式の貯蔵タンクについて検討を行なうため、地表あるいは他の地下構造物への影響を考え、設置深度を100m程度に設定した。また、空洞は温度応力により発生する引張応力の集中を低減するため円形断面を考えた。これら貯蔵タンクの液密性は凍結岩盤、コンクリートライニング、スチール性メンブレン等により確保する方式が考えられる。

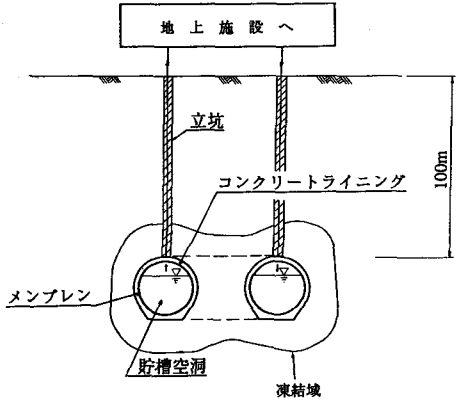


図-2.1 LNG岩盤貯蔵タンク断面図

3. 解析条件の設定

岩盤凍結方式のLNG貯槽空洞の安定性を検討する場合、岩盤物性値の温度依存性を把握することが重要である。これは貯蔵時間の増加とともに空洞周辺の冷却領域が広がるが、貯槽空洞周辺の温度分布、応力分布、クラックの発生状況を予測する場合に、温度依存性を考慮した岩石物性値を用いる必要がある。そこで第三紀中粒砂岩を採取して15℃から-160℃の範囲で室内試験を行ない、解析に用いる基本的な岩石の物性値を調査した。その結果、表-3.1、表-3.2に示す物性を設定して熱伝導解析、温度応力解析を実施した。また、解析は図-3.3に示す解析領域によりモデル化を行なっている。また、空洞内壁に断熱材を施し、断熱材の有無による温度分布の違いや応力状態の違いを比較した。

表-3.1 熱物性値

物 性 (温度依存性無し)	岩 盤	断熱材
単位体積重量 (kg/m ³)	2,490	30
比 熱 (kcal/kg℃)	0.2	0.3
熱伝導率 (kcal/mhr℃)	0.9	0.02
初期温度 (℃)	15	15

表-3.2 代表温度における岩盤の物性値

物 性 (温度依存性有り)	測定温度 (℃)				
	15	0	-50	-100	-160
線膨張係数 (×10 ⁻⁴)	8.60	8.60	8.28	7.51	4.89
弾性係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	1.96	2.02	2.22	2.52	3.35
ポアソン比	0.185	0.187	0.194	0.204	0.239

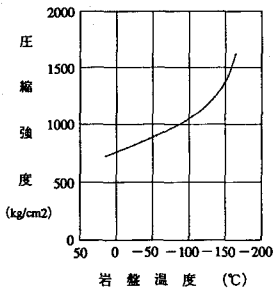


図-3.1 圧縮強度

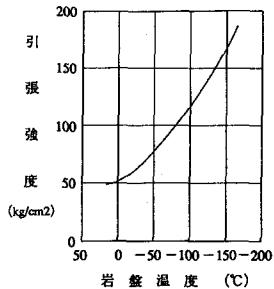


図-3.2 引張強度

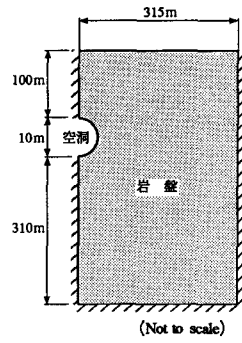


図-3.3 解析モデル

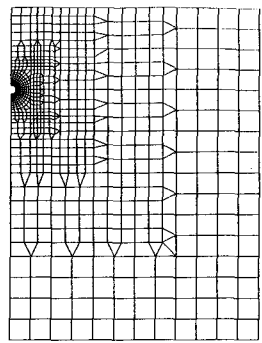


図-3.4 解析メッシュ

4. 有限要素法による熱伝導解析

岩盤凍結方式のLNG貯蔵タンクの場合、岩盤から空洞内への熱の流れが生じ、これに伴った岩盤の熱放出により空洞周辺の岩盤が冷却されることになる。この場合、空洞周辺の低温域は時間とともに広がるが、温度低下により岩盤の状態は変化し、水の相変化を伴った複雑な現象を引き起こす。すなわち、空洞周辺の岩盤では温度応力、クラックへの応力集中、地下水流の変化、水の凍結に伴う膨張等の現象等を受け、さらにはこれらの現象が付近の地下構造物、地上・地下環境等に影響をおよぼすことも考えられる。

今回、LNG岩盤貯蔵タンク内にLNGを貯蔵した場合の有限要素法非定常熱伝導解析を実施することにより、空洞周辺岩盤の温度変化の状況を調査した。また、空洞ライニングに断熱材を施した場合についても熱伝導解析を実施し、断熱材の性能が周辺岩盤の温度分布におよぼす影響について調査した。

図-4.1は断熱材の有無により温度コンターの経時変化を比較したものである。また、図-4.2は30年後において、断熱仕様の違いによる空洞側方の温度分布を比較したものである。これらの図から、30年後における凍結領域は断熱材の無い場合で空洞壁面から38m、断熱材20cmの場合で27m、断熱材40cmの場合で20mになり、温度の影響範囲の低減に断熱材が大きく寄与することが確認された。さらに断熱材を施さない場合、岩盤温度は空洞表面で -162°C まで冷却されるが、断熱材を20cmおよび40cm施した場合、岩盤表面温度がそれぞれ -75°C および -50°C となり、岩盤の温度低下を抑制できることがわかった。

5. 有限要素法による温度応力解析

LNG岩盤貯蔵タンクの熱伝導解析結果を用いて空洞周辺岩盤の温度応力解析を実施する。熱伝導解析からわかるように、LNG岩盤貯蔵タンク内への熱流入とともに空洞周辺の岩盤が冷却されるが、これとともに温度応力が発生する。時間とともに進展する空洞周辺の低温域の拡大に伴ってこの温度応力の影響範囲も広がり、その応力度も岩盤温度の低下とともに増加の傾向にある。温度低下は岩盤に引張応力を発生し、既存クラックの開口および新たなクラックの発生等周辺地盤の状態変化を引き起こす。これに伴って、周辺の地下構造物、地上・地下環境等に影響を及ぼすことも考えられ、事前に安全性を評価しておくことが重要である。

今回、岩盤タンク内にLNGを貯蔵した場合の有限要素法による弾性および弾塑性応力解析を行ない、空洞周辺岩盤の応力、変位、降伏の状況を調査した。前章の熱伝導解析より断熱材を用いた場合、空洞周

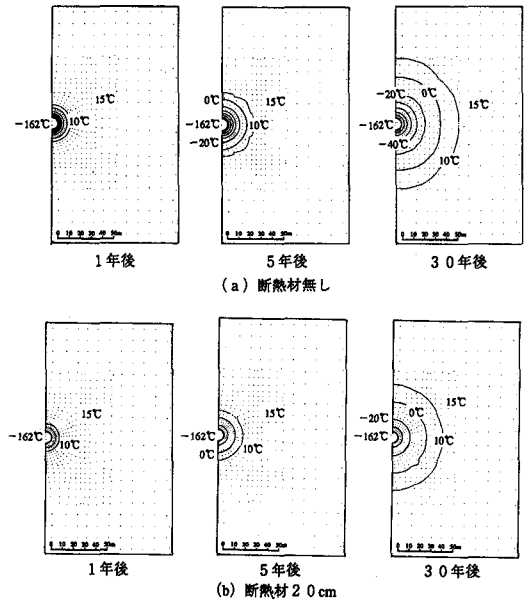


図-4.1 温度コンター経時変化

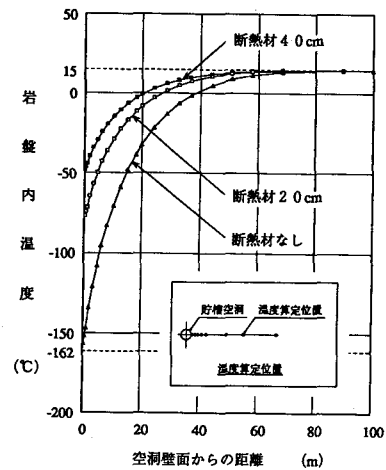


図-4.2 温度分布図

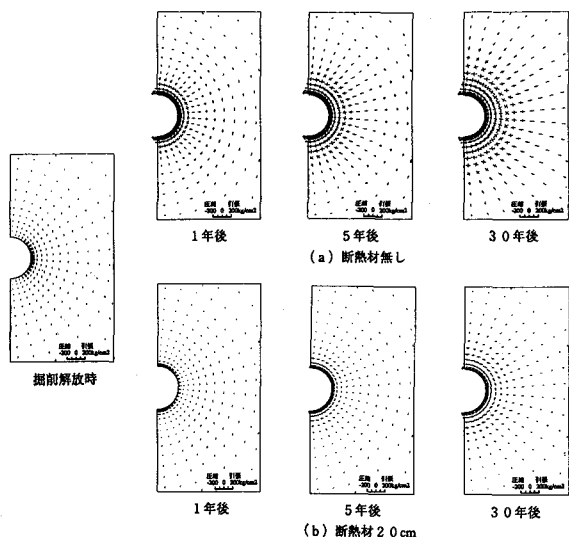


図-5.1 空洞付近主応力図(弾性解析)

辺への温度変化の低減効果が確認されたが、温度応力解析においても空洞ライニングに断熱材を施した場合、断熱材による空洞周辺の力学的挙動への影響について調査した。

図-5.1は弾性解析により空洞周辺の主応力分布を算定し、その経時変化の様子を断熱材の有無により比較して示したものである。断熱材の厚さは20cmであるが、その効果は明らかで引張応力が大きく低減されている。また、引張強度および圧縮強度からDrucker-Pragerモデルの降伏条件を設定して、弾塑性解析により空洞周辺の降伏領域を算定し、その結果を図-5.3に示した。降伏領域の経時変化の様子は断熱材の有無により大きく異なることがわかるが、30年後において断熱材の有無によりそれぞれ37mおよび18mとなっている。

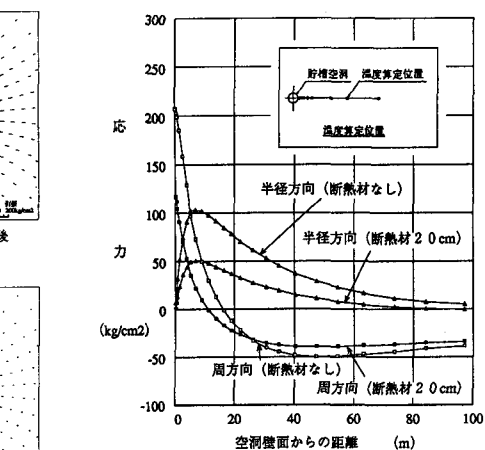


図-5.2 空洞周辺の応力度(30年後)

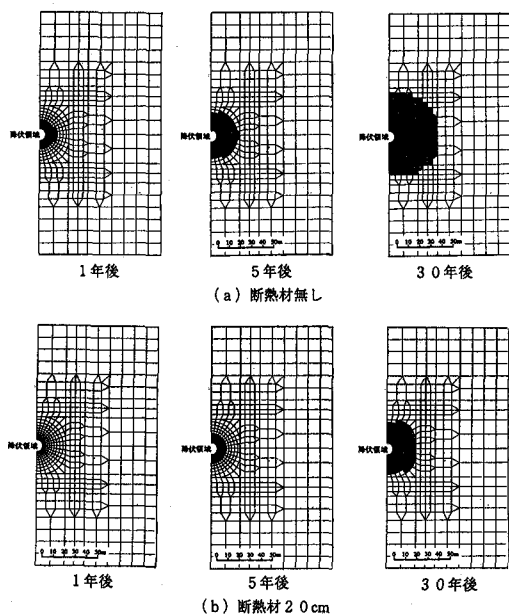


図-5.3 降伏領域経時変化

6. 個別要素法による熱伝導・温度応力解析

個別要素法を用いて熱伝導解析ならびに温度応力解析を実施し、有限要素法との比較を行なった。図-6.2に個別要素法に用いた解析メッシュ、図-6.3に温度コンター経時変化、図-6.4にその時の降伏領域の経時変化を示した。ただし、本解析においては初期地圧および空洞の掘削解放力による影響は考慮していない。有限要素法による温度コンター図と比較するとほぼ同様の温度分布が得られている。しかしながら、応力解析から求めた降伏領域については有限要素法のものと比較して若干大きくなっており、30年後においては断熱材の有無によりそれぞれ空洞壁面から45mおよび35mの範囲となっている。この原因として、応力解析における初期地圧の有無、解析領域の違い等が影響していると考えられる。また、個別要素法の温度応力下に起きる引張亀裂進展解析への適用性も確認されたものと考えられる。

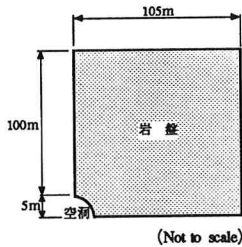


図-6.1 解析モデル

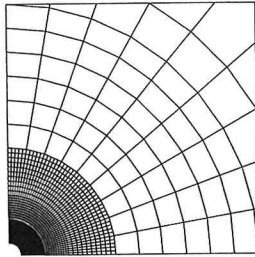


図-6.2 解析メッシュ

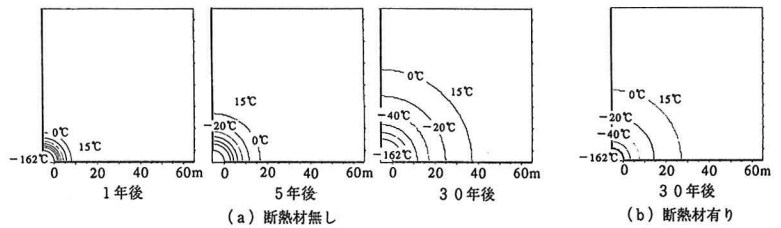


図-6.3 温度コンター経時変化

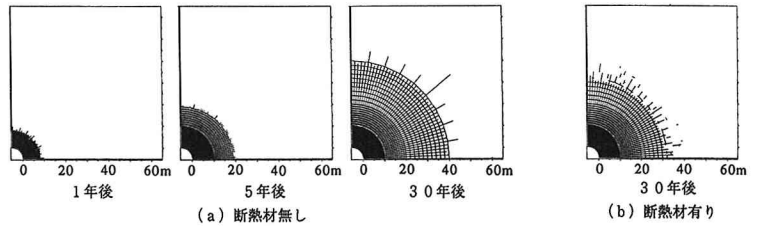


図-6.4 降伏領域経時変化

7. 結 言

本研究では地山岩盤内に設けた空洞にLNGを貯蔵することを想定して、空洞周辺の温度分布、応力分布、クラックの発生状況を調査した。また、空洞内部に断熱材を施した場合についても解析を実施し、断熱材の効果を調べた。本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

- ① 断熱材（物性値は表-3.1に示した）を20 cm 敷設することにより空洞周辺における岩盤温度の低下は半分程度にまで抑えられたが、このことから適当な仕様の断熱材を選択・敷設することにより岩盤温度の低下をある程度抑制できることが明確となった。
- ② 弾性応力解析の結果、空洞周辺の引張応力は断熱材（20cm）の敷設により半分程度まで低減されることが示された。また、弾塑性解析より引張応力によって発生する降伏領域も断熱材の敷設により半分程度に減少することが示された。
- ③ 有限要素法と個別要素法により算出した温度分布は比較的一致したものとなったが、応力解析による降伏領域については解析条件等の違いにより、有限要素法の結果に比べ個別要素法の方が大きくなっている。しかしながら、不連続体モデルによる亀裂進展解析への適用性・有用性が示された。

本研究の遂行にあたり、三井石炭鉱業株式会社、愛媛大学工学部稲田善紀教授ならびに同研究室の方々に御協力を得たことをここに記しておく。なお、個別要素法は UDEC version ICG1.7 を用いて実施した。

[参考文献]

- 1) 稲田善紀：地下の空間利用，森北出版株式会社，pp87～134，1989
- 2) 稲田善紀，甲村雄一：極低温下における岩盤と氷の力学的挙動，愛媛大学工学部起要，Vol.12，No.1，pp253～262，1990
- 3) 木下直人，石塚与志雄 日比一喜：岩石の低温特性と熱応力による破壊，第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp181～185，1982
- 4) 石塚与志雄，木下直人，奥野哲夫：LPG岩盤内貯蔵空洞の安定解析，清水建設研究報告，No.41，pp11～17，1985