

LPG 岩盤内貯蔵空洞の熱応力に対する安定性の検討

STABILITY OF A ROCK CAVERN FOR UNDERGROUND LPG
STORAGE UNDER THERMAL STRESSES

石塚与志雄*・木下直人**・奥野哲夫***

By Yoshio ISHIZUKA, Naoto KINOSHITA and Tetsuo OKUNO

To clarify the possibility of underground LPG storage, the temperature-dependence of mechanical properties and frost heaving of rock are expressed as functions of temperature, and a method of heat conduction analysis and thermal stress analysis including material nonlinearity is developed using finite element method. As the result of computations for underground LPG storage, the failure around a rock cavern is produced as tensile failure and frost heaving exerts a great influence on the stability of LPG storage. In thermal stress analysis for underground rock cavern, it is necessary to represent the semi-infinite domain with an infinite element.

1. ま え が き

石油, LPG, LNG などのエネルギー貯蔵に関して土地の有効利用, 安全性, 環境保全などの観点から, 地上式タンクに代わる岩盤内貯蔵システムが注目を集めている。LPG 岩盤内貯蔵方式^{1),2)}には, LPG を高圧下で水封原理で貯蔵する常温貯蔵方式と, LPG (約 -40°C) を直接空洞内に供給し, 空洞周辺の地下水を凍結させて貯蔵する低温貯蔵方式がある。わが国において, LPG 岩盤内貯蔵が立地可能な地域は主に花崗岩類地帯で, 約17か所ほど考えられている¹⁾。

低温貯蔵方式によるLPG岩盤内貯蔵の実用化のためには, 空洞周辺に発生する熱応力に対する空洞の安定性, LPGの外部への漏洩に関する検討が必要となる。この課題を検討するためには低温下における岩盤の力学的, 熱的性質の把握とともに, 熱応力による空洞の安定性を評価する解析手法の開発が必要となる。低温下における岩石物性, 解析に関する研究としては, 稲田らがLNG

貯蔵を対象として低温下の岩石の力学特性³⁾, 熱物性⁴⁾および微小体積内の熱収支によるシュミット方法を応用した要素分割法による熱伝導解析⁵⁾, 安定解析^{6),7)}などを, 岡林ら^{8)~10)}および日景ら¹¹⁾がLPG岩盤内貯蔵を対象として低温下における岩石の性状, 熱応力解析について検討してきている。また, 塩尻ら¹²⁾は熱応力による空洞の構造的安定性, 温度分布などについて検討している。著者らもLPG岩盤内貯蔵に関する基礎研究として岩石の低温特性の把握¹³⁾, 熱応力による岩石の破壊実験, 熱伝導熱応力解析など^{14),15)}を実施してきた。この結果, 岩石の力学特性は顕著な温度依存性を示すこと, 岩石中の水が氷に相変化する際に凍結膨張が生じること, 低温熱応力によって生じる破壊は引張破壊が主になることなどを明らかとした。そのため, LPG岩盤内貯蔵空洞の安定解析では物性の温度依存性, 凍結膨張, 引張破壊を考慮した非線形解析が必要となる。岩盤空洞の熱応力解析では岩盤の半無限領域の境界条件の取り方により空洞周辺の熱応力値が異なると考えられるため, 境界条件について検討する必要がある。

これまで, 岩盤物性の温度依存性, 材料非線形性を考慮した解析^{6),14)}は実施されてきているが, 凍結膨張が空洞の安定性に与える影響についてはほとんど検討されていない。また, 境界条件についても厳密な検討は行われ

* 正会員 工修 清水建設(株)技術研究所
(〒135 江東区越中島3-4-17)

** 正会員 理修 清水建設(株)技術研究所主任研究員
(同上)

*** 正会員 工修 清水建設(株)大崎研究室
(〒100 千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル27F)

てきていない。そのため、本研究ではLPG岩盤内貯蔵空洞の安定性を検討するための解析手法の確立と凍結膨張が安定性に与える影響を調べることを目的として、以下の項目について検討する。

- (1) 物性の温度依存性、凍結膨張、材料非線形性を考慮した熱伝導熱応力解析手法
- (2) 熱応力解析における半無限領域の境界条件
- (3) 凍結膨張、初期地山応力状態が空洞の安定性に与える影響

2. 解析方法

LPG岩盤内貯蔵空洞の安定性を検討するための解析方法、すなわち、岩盤の材料非線形性、温度依存性を考慮した非定常熱伝導熱応力解析方法と熱応力解析時の半無限境界条件の影響について記す。

(1) 岩盤の非線形性、温度依存性を考慮した解析方法

岩盤の弾性係数、破壊強度は温度の低下に伴い増大し、顕著な温度依存性を示す。破壊特性は常温時と比較してより脆性的な傾向、すなわち、破壊荷重点までは弾性挙動し、破壊荷重点後、脆性破壊するようになる。しかし、破壊後の岩の挙動についてはまだ未解明のため、ここでは Fig. 1 (a) に示すように破壊までは弾性挙動し、破壊後完全塑性となる応力-ひずみ関係を用いることにする。引張破壊については、破壊後の岩盤を no-tension 材料と考え、Fig.1 (b) に示すように、最小主応力が岩盤の引張強度を超えるまでは弾性挙動し、破壊後は引張応力に抵抗し得ないとする^{16), 17)}。岩盤のせん断破壊に対応する破壊基準には一般的なせん断強度 τ_0 、内部摩擦角 ϕ で定義されるモール・クーロンの破壊基準を採用する。引張破壊を考慮した破壊基準式は次のよ

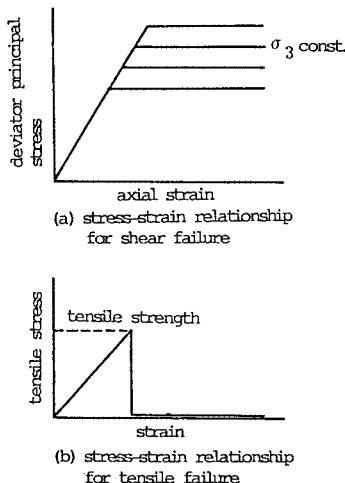


Fig. 1 Idealized stress-strain relationship.

うに表わされる (Fig.2 参照)。ここで、符号は圧縮側を正とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 < S_t : \sigma_d &= \sigma_m - \sqrt{2} S_t \\ \sigma_3 \geq S_t : \sigma_d &= \tau_0 \cos \phi + \sin \phi \cdot \sigma_m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ_1 : 最大主応力、 σ_3 : 最小主応力、 S_t : 引張強度、 $\sigma_d = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 $\sigma_m = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3)$ である。

岩盤の温度依存性は、物性 (弾性係数、ポアソン比、引張強度、せん断強度、線膨張ひずみなど) を温度の関数として定義し、非定常熱伝導解析の各時間ステップで求まる温度分布から各要素内の物性を逐次評価することにより解析に組み入れた。岩盤の熱収縮および岩盤中の水が氷に相変化することにより生じる凍結膨張は岩盤の線膨張特性 (線膨張ひずみを温度の関数として表現) として考え、解析では各時間間隔で生じる初期ひずみとし

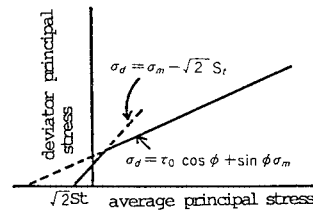


Fig. 2 Failure criteria.

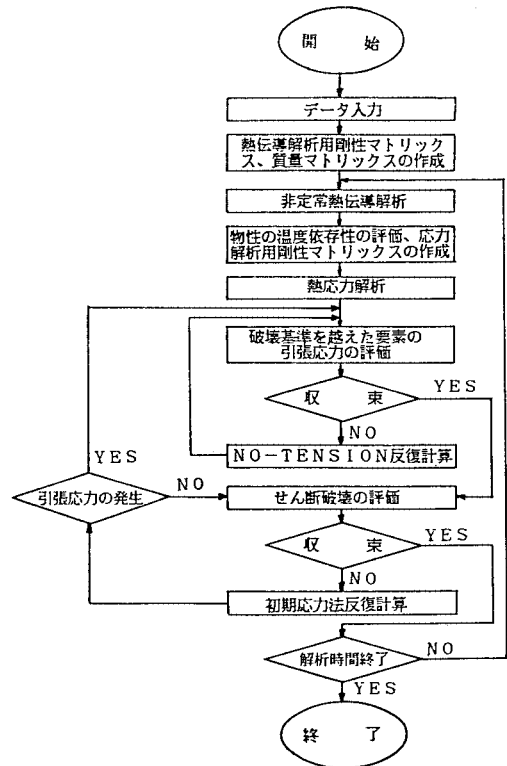


Fig. 3 Flow chart of numerical analysis.

て熱応力解析を行う。また、岩盤中の水が凍結する際に発生する潜熱が空洞周辺の温度分布、熱応力に与える影響は、LPG 岩盤内貯蔵で対象とする岩盤の間隙率が小さい(2.0%程度)ためほとんど生じない¹²⁾。そのため、潜熱の影響は考慮しないことにした。Fig. 3 に岩盤の温度依存性と材料非線形性を考慮した解析手順を示す。破壊時の収束計算には初期応力法¹⁸⁾を用いている。

(2) 熱応力解析時の半無限境界条件の検討

熱応力解析のような初期ひずみ問題では、岩盤の解析領域の大きさ、境界条件の差異により空洞周辺の応力値が大きく異なる。そのため、本研究では Bettess が提案した無限要素¹⁹⁾で岩盤の半無限領域を表わすことにし、その妥当性を検証する。

Bettes の無限要素は、8 節点二次元アイソパラメトリック要素を拡張したもので、Fig. 4 に示すように通常の要素の一边を無限遠点に移動させ、無限遠点でのポテンシャルがゼロになるように内挿関数を選ぶことにより半無限領域を表現する要素である。ここでは、内挿関数として以下に示す指数減衰関数 $f_i(\xi, \eta)$ を用いた。通常の要素の形状関数を $N_i(\xi, \eta)$ とすると、無限要素に対する形状関数は $N'_i(\xi, \eta) = f_i(\xi, \eta) \cdot N_i(\xi, \eta)$ となる。

$$f_i(\xi, \eta) = \exp\{(\xi + \eta - \xi - \eta)/L\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 i は要素の節点、 ξ, η は局所座標における座標値、 L は減衰長である。

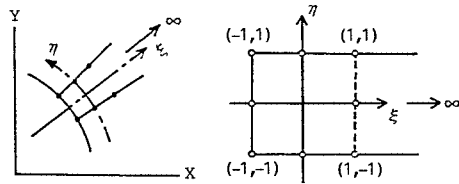


Fig. 4 Bettess's infinite element geometries.

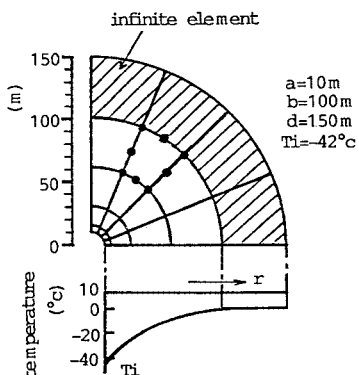


Fig. 5 Finite element geometries for borehole applied thermal load.

この無限要素の妥当性、境界条件の影響を調べるために Fig. 5 に示すような半径 a 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。解析条件は、解析領域を d とし、温度分布を孔壁で $T_i, a < r < b$ で定常温度分布、 $b \leq r \leq d$ で 0°C 一定とした。Fig. 6 は、 $a=10\text{ m}, b=100\text{ m}, d=150\text{ m}, T_i=-42^\circ\text{C}$ 、弾性係数 $E=12\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、線膨張係数 $\alpha=0.5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ としたときの半径方向の周方向応力分布であり、厳密解と境界を拘束した場合、無拘束とした場合および無限要素を用いた場合の FEM 解を示す。なお、中空円筒の熱応力厳密解は、半径方向 r の温度分布を $t(r)$ として次式で与えられる。

$$\sigma_{\theta} = -\frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \int_a^r dt(r) r dr - dt(r) \right\} - \frac{\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)}{a^2 + (1-2\nu)d^2} \int_a^b dt(r) r dr \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $t(r)$ は定常熱伝導の解として、 $t(r) = T_i \log(b/r) / \log(b/a)$ と与えられる。

これによると、境界条件として拘束または無拘束とした場合の熱応力分布は厳密解と大きく異なり、境界条件の取り方が熱応力の精度に大きな影響を与えることになる。一方、無限要素を用いた場合の解析値は厳密解とよい一致を示し、熱応力解析時には無限要素等により半無限領域を表わす必要があることが明らかとなった。

3. 岩盤の低温特性の評価

日本において、LPG の岩盤内貯蔵の対象となる岩盤は花崗岩帯などの比較的良好な岩盤と考えられるので、本研究では、電中研式岩盤分類²¹⁾で C_H 級に相当する岩盤を検討対象とした。LPG の岩盤内貯蔵で問題となるような低温下(約 -40°C まで)における岩盤の力学的、熱的物性は原位置での実測例がほとんどないため、十分

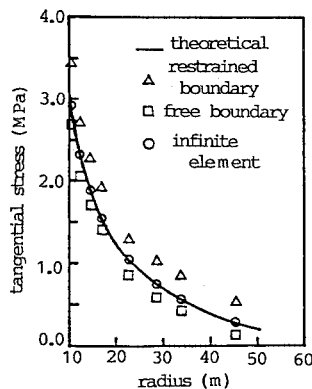


Fig. 6 Theoretical solution and results of finite element analysis.

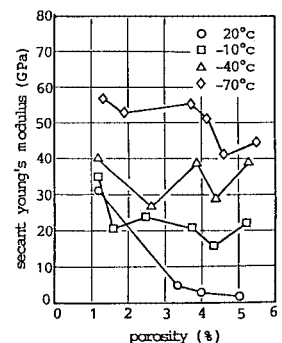


Fig. 7 Secant young's modulus versus porosity at various temperature.

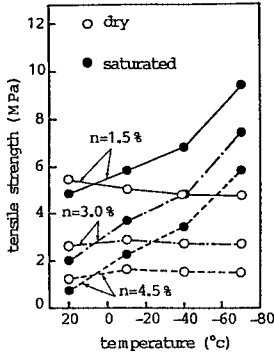


Fig. 8 Tensile strength versus temperature.

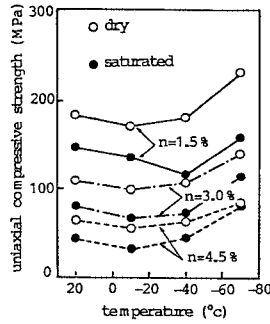


Fig. 9 Uniaxial compressive strength versus temperature.

な評価は行われていないのが現状である。そのため、本研究では低温下での室内岩石試験結果から C_H 級岩盤の低温特性を推定することにした。試験に用いた岩石は稲田花崗岩であるが、岩盤内に存在する亀裂の影響を評価するため、稲田花崗岩を電気マッフル炉内で加熱処理することにより人工的に種々の量の亀裂を生じさせたものを供試体として用いた。以下に室内試験で得られた主な結果を示す。

(1) 弾性係数

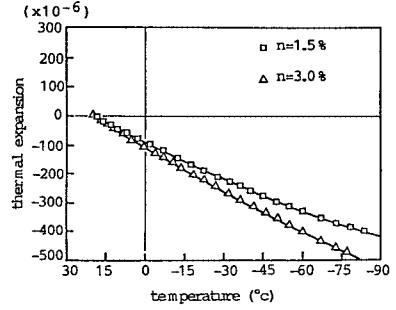
Fig. 7 は含水飽和状態の岩石の一軸圧縮試験から求めた各温度に対する割線弾性係数-間隙率の関係である。間隙率によってばらつきはあるものの、弾性係数は顕著な温度依存性を示し、温度の低下に伴い、大きく増加する。この傾向は間隙率の大きいほど著しくなり、間隙率 3.0% 以上では -40°C 以下の弾性係数は室温 (20°C) の値の 10 倍以上となる。

(2) 引張強度と一軸圧縮強度

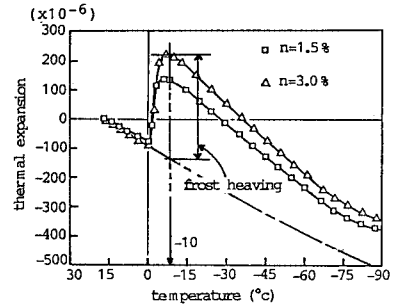
乾燥、含水飽和状態それぞれの岩石に対する引張強度-温度関係、一軸圧縮強度-温度関係を Fig. 8, 9 に示す。ここで、図中の n は間隙率である。乾燥状態では引張強度はほとんど一定で温度依存性を示さないが、含水飽和岩石の引張強度は温度の低下に伴い増大する。一軸圧縮強度は乾燥、含水飽和状態とも -40°C 程度までは大きな変化はみられないが、-70°C でわずかに増大する傾向を示す。

(3) 線膨張ひずみと凍結膨張

φ 20 mm × l 200 mm の岩石 (間隙率 n = 1.5, 3.0%) を用いた線膨張ひずみ測定試験結果を Fig. 10 に示す。乾燥岩石では温度の低下に伴い線膨張係数は徐々に減少するが、その温度依存性はあまり大きくない。一方、含水飽和状態では 0°C から凍結膨張が生じ始め、-10°C 付近で最大の凍結膨張を



(a) dry specimen

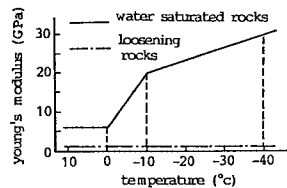


(b) water saturated specimen

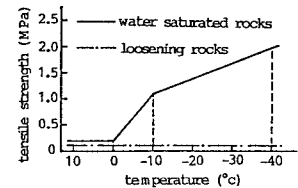
Fig. 10 Thermal expansion with decreasing temperature.

示す。-10°C 以下における線膨張係数は氷の熱収縮のために 0°C 以上の線膨張係数より大きくなる。間隙率 3.0% の含水飽和岩石の最大凍結膨張ひずみは約 360 × 10⁻⁶ となる。

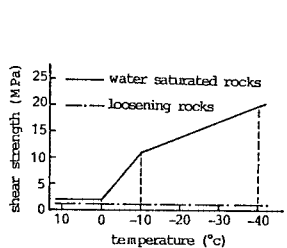
以上の室内試験結果と常温時の C_H 級の岩盤物性値をもとに、低温下の岩盤物性を Fig. 11 に示すように温度の関数として評価する。0°C 以上の岩盤の弾性係数 E,



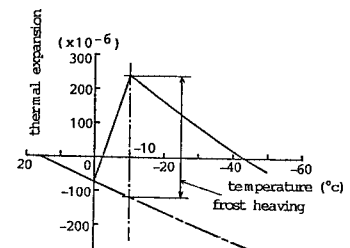
(a) young's modulus as a function of temperature



(b) tensile strength as a function of temperature



(c) shear strength as a function of temperature



(d) thermal expansion with decreasing temperature

Fig. 11 Mechanical properties of rocks at low temperature.

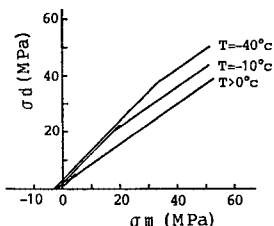


Fig. 12 Failure criteria as a function of temperature.

Table 1 Other properties of rocks.

Constant	Value
Angle of friction	45°
Poisson's ration	0.3
Specific gravity	2.5 g/cm ³
specific heat	0.753 kJ/(kg °C)
Heat conductivity	2.33 W/(m °C)

引張強度 S_t は岩盤分類 C_{II} 級の物性値 ($E=6.0$ GPa, $S_t=0.2$ MPa) とし、低温下の物性値は岩石試験で得られた温度依存性が岩盤でも同様な傾向を示すと仮定した。せん断強度 τ_0 については低温三軸圧縮試験を実施していないため、せん断強度と引張強度の比 (τ_0/S_t) を温度に依存せず、一定 ($\tau_0/S_t=10$) と仮定した。破壊基準は温度低下により引張強度、せん断強度が増加するため、Fig. 12 のように変化する。実際の空洞周辺の熱収縮、凍結膨張現象は熱流方向、岩盤の含水状態、応力状態、異方性などの影響を受けると考えられるが、これらの因子を考慮した岩盤の凍結膨張の定量的把握はいまだ行われていないのが現状である。そのため、本研究では、含水岩盤について間隙率 3.0% の含水飽和岩石の線膨張試験結果を用いることにする。試験結果は含水飽和、無拘束圧下での値であり、実際の空洞周辺で生じる凍結膨張量より大きく評価することになると考えられる。また、低温下における花崗岩のポアソン比、密度、

比熱、熱伝導率は大きな温度依存性を示さないことが確認されているため^{13),22)}、Table 1 に示すように一定値とする。内部摩擦角については実験結果がなく、その性状が不明のため、温度に依存せず一定値と仮定する。

掘削によって生じる空洞周辺の緩み領域では岩盤の劣化により強度の低下、変形性の増加、また、緩むことにより不飽和状態となる。そのため、緩み領域の物性は、引張強度とせん断強度は 1/2 に、弾性係数は 1/5 に低下 (Fig. 11 の一点鎖線) させる。また、不飽和状態のため、乾燥岩石の試験結果と同様、ほとんど温度依存性を示さないと推定されるため、緩み領域の岩盤物性は温度依存性はなく、凍結膨張は生じないとした。

4. LPG 岩盤内貯蔵空洞の安定解析

(1) 解析モデル

LPG 岩盤内貯蔵空洞の解析モデルとして、対象岩盤がほぼ同様と考えられる石油岩盤内備蓄菊間実証プラント (以下、菊間実証プラント) を想定する。菊間実証プラントの空洞規模は Fig. 13 に示すような高さ 20 m、幅 15 m、長さ 112 m で、平均空洞深度は 55 m である。空洞の深度 (初期地山応力) は空洞の安定性に大きな影響を与えることが予想されるため、深度 100 m についても検討する。掘削による空洞周辺の緩み領域は、菊間実証プラントの実測では約 1.5 m となったため、ここでは、安全側の解析を行うことを考え、緩み領域は壁面から 2 m と仮定した。温度条件は岩盤の初期温度と大気温度を 16°C 一定、LPG 貯蔵に伴う温度変化は LPG 貯蔵温度を -42°C とし、空洞壁面温度を次のように与えた。空洞のプレクーリング方法は 16°C から -42°C まで 3 か月間で二次曲線で低下させる方法とし、その後は壁面温度 -42°C 一定とした。なお、地表面と外部大気

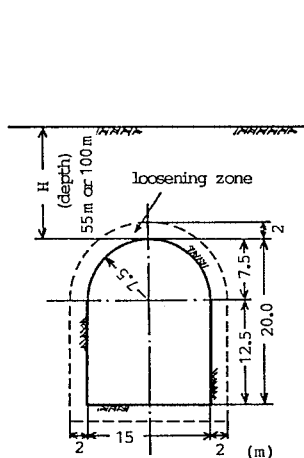


Fig. 13 Underground rock cavern geometry for LPG storage.

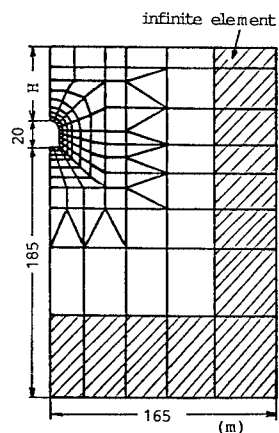


Fig. 14 Finite element mesh for modeling of underground rock cavern.

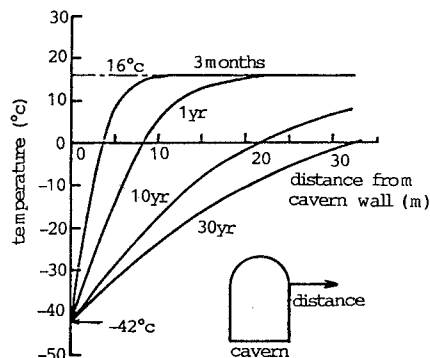


Fig. 15 Transition of temperature gradient around a rock cavern.

との間は熱伝達境界，貯蔵期間は30年間とした。

Fig. 14は有限要素解析に使用したメッシュ分割図で，空洞の長手方向長さ(112m)は空洞断面に対して十分長いので，平面ひずみ問題として扱った。要素は空洞周辺に高次要素(8節点4辺形アイソパラメトリック要素)を用い，空洞から遠ざかるに従って節点数の少ない要素

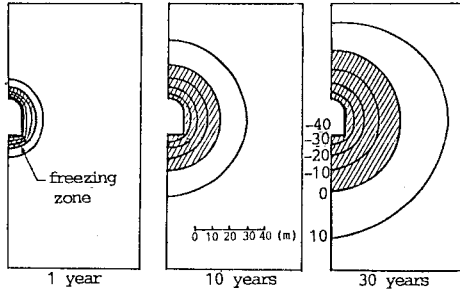
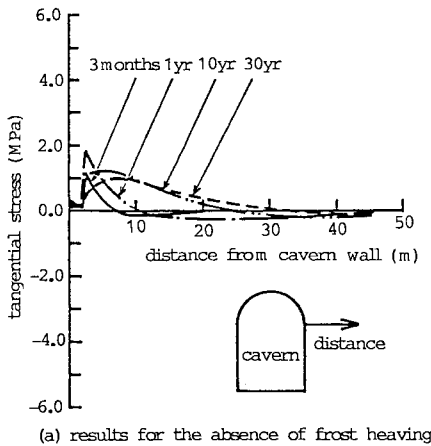
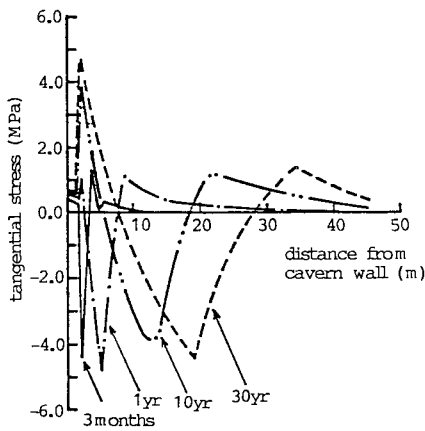


Fig. 16 Temperature distribution and progress of freezing zone.



(a) results for the absence of frost heaving



(b) results for the presence of frost heaving

Fig. 17 Elastic thermal stress distribution in tangential direction of a rock cavern.

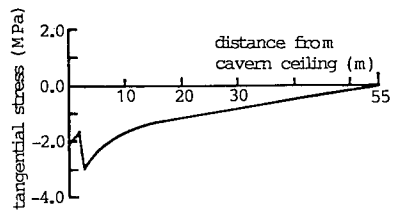
(4~7節点4辺形アイソパラメトリック要素)を用いた。無限要素はFig. 14の斜線部分に配置した。

(2) 空洞周辺の温度分布

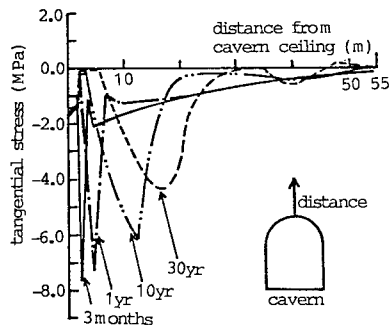
空洞側壁方向の温度勾配の経時変化をFig. 15に，空洞周辺の温度分布，凍結領域(0°C以下の領域)の経時変化をFig. 16に示す。温度勾配はプレクーリングが終了する約3か月後で最も大きくなり，その後徐々に減少する。温度分布は空洞に対してほぼ同心円状に広がり，深度が55mの場合でも地表部にはほとんど影響を与えない。凍結領域は壁面から，1年後で約7.5m，10年後で約20m，30年で約30mとなる。

(3) 空洞周辺の熱応力分布

空洞周辺に発生する側壁方向の周方向熱応力分布の経時変化を，凍結膨張が生じない場合と凍結膨張が生じる場合についてFig. 17に示す。符号は引張を正としている。凍結膨張が生じない場合は緩み領域に接する岩盤の周方向に最大の引張応力が発生し，壁面から遠ざかるに従い低下する。貯蔵期間中の最大引張応力は約1年後(約1.8MPa)に生じ，その後は徐々に低下していく。一方，凍結膨張が生じる場合は0~10°Cで凍結膨張が生じるため，空洞周囲の0~10°C領域で大きな圧縮応力が発生し，凍結面の前後で大きな引張応力が生じる。1年内では凍結面の前方部が最大の引張応力領域となるが，その後，緩み領域に接する岩盤で最大の引張応力が発生するようになる。引張応力は凍結領域の進展とともに最大し，30年後には凍結膨張が生じない場合の5倍



(a) stress distribution after excavating cavern



(b) stress distribution during LPG storage

Fig. 18 Stress distribution in tangential direction at various time for case of depth H=55m.

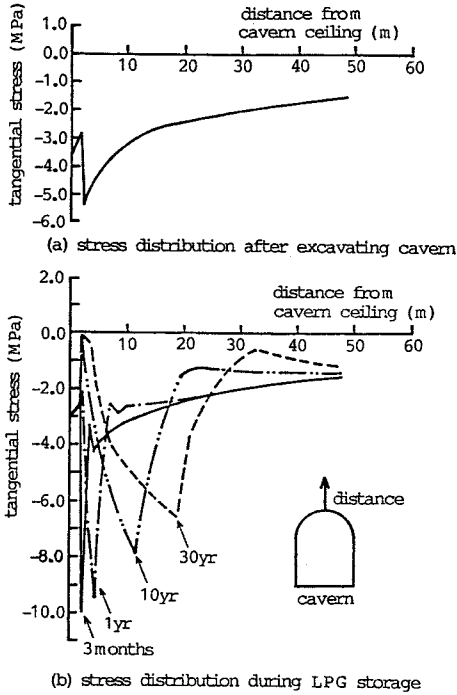


Fig. 19 Stress distribution in tangential direction at various time for case of depth $H=100$ m.

以上の引張応力が発生することになる。

(4) 空洞の安定解析結果

岩盤の破壊特性を考慮した非定常熱伝導熱応力解析によって得られた空洞天端方向の周方向応力分布の経時変化を、深度 55 m と 100 m それぞれについて Fig. 18, 19 に、破壊の進展状況を Fig. 20, 21 に示す。ここで、応力の符号は引張を正としている。これらの図は凍結膨張が生じる場合の解析結果で、空洞掘削後の岩盤の応力を考慮したものである。初期地山応力は鉛直方向で土被り圧、水平方向で側圧係数 1.0 として、掘削応力解析を行った。凍結膨張が生じない場合は最大引張応力が発生する 1 年後でも破壊は生じず、貯蔵期間を通して空洞は安定という結果になった。凍結膨張が生じる場合は、深度が 55 m, 100 m の両ケースともにプレクーリングの終了する約 3 か月後に最初の引張破壊が空洞周辺全域で生じるが、貯蔵期間が 10 年を経過すると、両者の破壊領域の分布が異なってくる。深度 55 m では 10 年以降になると凍結領域外部の非凍結領域（特に初期地山応力の小さい空洞天端方向）にも破壊が広がり、応力も地表面下 15 m 付近まで乱れるようになる。これに対して、深度 100 m の場合には引張破壊は徐々に増加するものすべて凍結領域内にとどまる。

(5) LPG 岩盤内貯蔵空洞の安定性

熱応力解析および安定解析の結果、空洞周辺の応力分

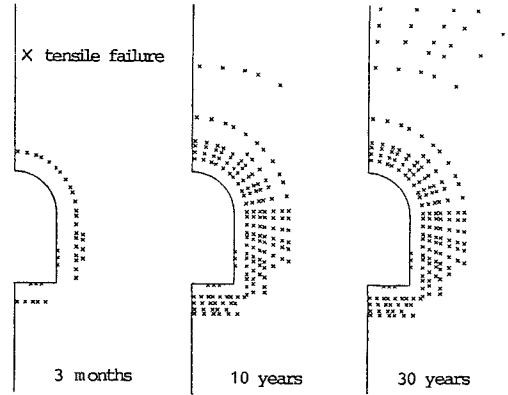


Fig. 20 Progress of failure around a rock cavern during LPG storage for case of depth $H=55$ m.

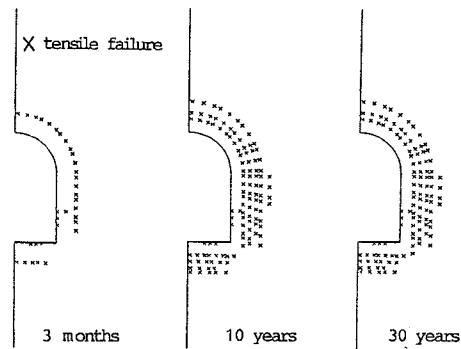


Fig. 21 Progress of failure around a rock cavern during LPG storage for case of depth $H=100$ m.

布、破壊領域の進展は、凍結膨張現象、初期応力状態に大きく影響されることが明らかとなった。初期地山応力を考慮しても破壊様式は引張破壊となり、引張破壊によって生じる亀裂からの LPG の漏洩が問題となる。引張破壊が凍結領域内にとどまっている段階では漏洩は生じないが、凍結領域外部の非凍結領域にも引張破壊が生じ始めると空洞外部に LPG が漏洩すると考えられる。今回の解析では、凍結膨張が生じ、初期地山応力が小さい場合（深度 $H=55$ m）に 10 年以上経過すると LPG が漏洩する可能性があるという結果になった。そのため、LPG 岩盤内貯蔵空洞建設に際しては凍結膨張量の定量的把握とともに、建設地点の初期地山応力の評価が重要になる。

5. まとめ

本研究では低温貯蔵方式による LPG 岩盤内貯蔵空洞の安定性を評価する際に必要となる安定解析手法、岩盤の低温物性について検討し、モデル解析を実施した。本研究の結果をまとめると以下のようなことになる。

(1) LPG 岩盤内貯蔵空洞の熱応力に対する安定性を検討するための解析手法について示した。本手法では有限要素法を用い、岩盤物性の温度依存性、非線形性を考慮した解析が可能で、特に、凍結膨張現象を評価できる特徴を有している。

(2) 岩盤空洞の熱応力解析では、半無限領域の境界条件の取り方により熱応力値が大きく異なってくる。精度のよい解析を実施するためには無限要素を使用する必要がある。

(3) 凍結膨張の有無、初期地山応力状態が空洞周辺の熱応力値、応力分布および破壊領域に大きな影響を与える。今回用いた凍結膨張(ひずみで約 360×10^{-6})では、凍結膨張が生じない場合の5倍以上となる。深度が浅く初期地山応力が小さい場合には、凍結領域外部にも引張破壊が広がり、LPG が外部へ漏洩する可能性があるため、貯蔵空洞建設に際しては、建設地点の初期地山応力の評価が重要となる。

今回用いた岩盤の低温物性は低温岩石試験結果と岩盤等級から推定したものであり、低温時の岩盤物性の評価が十分とはいえない。特に、凍結膨張現象は空洞の安定性に大きな影響を与えるため、定量的に検討する必要がある。また、わが国においては、空洞の耐震性に対する安全性の検討も必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 財団法人エンジニアリング振興協会：昭和55年度LPG地下備蓄技術調査報告書，エンジニアリング振興協会，1981.
- 2) 厨川道雄：低温液化燃料の地下備蓄，西日本地下資源シンポジウム講演要旨集，pp.135-138，1978.
- 3) 稲田善紀・八木則男：極低温下における岩石の力学特性，材料，第29巻，第327号，pp.1221-1227，1981.
- 4) 稲田善紀・八木則男：極低温下における岩石の熱物性値，材料，第29巻，第327号，pp.1228-1233，1981.
- 5) 稲田善紀・重信 純：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，Vol.99，No.1141，pp.179-185，1983.
- 6) Inada, Y. : Stability of underground openings for storage of L.N.G., Proceedings of the 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp.1225-1232, 1985.
- 7) 稲田善紀・北村聖一・岡田明浩：LNGの地下岩盤貯蔵における空洞の安定性の検討，土木学会論文報告集，第343号，pp.35-44，1984.
- 8) 岡林信行・青木謙治・大野 清・関屋 徹：低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究(その1)，鹿島建設技術研究所年報，第26号，pp.7-14，1978.
- 9) 岡林信行・青木謙治・大野 清・森 孝之：低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究(その2)，鹿島建設技術研究所年報，第27号，pp.33-38，1979.
- 10) 岡林信行・青木謙治・大野 清・森 孝之：低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究(その3)，鹿島建設技術研究所年報，第28号，pp.61-66，1980.
- 11) 日景秀治・添田弘基・西牧 均・関根一郎：LPG地下岩盤内低温貯蔵槽に関する研究，戸田建設技術開発センター研究報告，Vol.10，pp.36-48，1983.
- 12) 塩尻弘雄・岸 徳光・佐藤宏一・高野 博：周辺温度分布と熱応力，電力土木，No.166，pp.49-61，1980.
- 13) 松永 烈・厨川道雄・木下直人：岩石の低温における機械的性質—LNGの地下備蓄に関する基礎的研究(第1報)一，日本鉱業会誌，Vol.97，No.1120，pp.421-436，1981.
- 14) Kuriyagawa, M., Matsunaga, I., Kinoshita, N. and Hibi, K. : Rock behavior of underground cavern with the storage of cryogenic liquified gas, Rock Store '80 Subsurface Space, Pergamon Press, pp.665-671, 1980.
- 15) 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，pp.181-185，1982.
- 16) Zienkiewicz, O.C. et al. : Stress analysis of rock as 'No Tension' materials, Geotechnique, Vol.18, pp.56-66, 1969.
- 17) 川本眺万・石塚与志雄：ひずみ軟化を考慮した岩盤掘削の解析，土木学会論文報告集，第312号，pp.107-118，1981.
- 18) Zienkiewicz, O.C. et al. : Elasto-plastic solution of engineering problems 'Initial Stress', finite element approach, Int. J. for Num. Meth. in Engng., Vol.1, pp.75-100, 1969.
- 19) Bettess, P. : More on infinite elements, Int. J. for Num. Meth. in Engng., Vol.15, pp.1613-1626, 1980.
- 20) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. : Theory of Elasticity, 3rd ed., MacGraw-Hill, 1970.
- 21) 楠建一郎・菊地宏吉・斉藤和雄：岩盤等級と原位置せん断試験結果との対応，第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.6-10，1979.
- 22) 松永 烈・厨川道雄：低温における岩石の熱伝導率に関する研究，探鉱と保安，Vol.26，No.9，pp.448-455，1980.

(1985.12.11・受付)