

(7) 水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討

電力中央研究所 ○駒田 広也
 " 中川 加明一郎
 " 北原 義浩
 " 林 正夫

1. まえがき

石油類貯蔵方式として、土地の有効利用、環境保全、安全性および経済性等に優れていると考えられる水封式燃料地下貯蔵の検討が進められている。この貯蔵方式は貯蔵油の漏油、漏気を地下水圧によって防止する方式である。本方式の最大の特徴は、スチールライニング等を使用することなく、自然または人工の地下水圧により漏油、漏気を防止する、いわゆる水封システムである。水封方式は欧米各国で数多くの実績があるが、この方式をわが国のような節理の多い岩盤に採用するにあたっては、貯油槽の液密気密構造などの検討をする必要がある。

ここでは、水封式燃料地下タンクにおいて、構造上最も重要と思われる、漏油と漏気の防止に必要な水封圧、環境に影響を及ぼす恐れがある地下水位の低下、および設備機器の容量、経済性を決める湧水量等を浸透流解析および実験によって行なった結果を述べる。¹⁾

2. 自然地下水圧による水封効果の数値解析的検討

重油、軽油などの蒸気圧が低い石油類を大気圧で貯蔵する場合には、地下空洞周辺が完全に地下水に覆われた状態でなく、地下水面が空洞に達していても漏気することがなく、空洞周囲からしみ出してくる地下水によって漏油を防止すれば、石油類を貯蔵できる。したがって、重油、軽油などを自然地下水のみの水封によって貯蔵する場合には、空洞周辺における自然地下水の経時的挙動を把握することが必要である。ここでは、飽和・不飽和2次元浸透流解析によって、図-1および図-2に示すように、それぞれ、単設空洞および3連空洞の場合の空洞周辺の地下水の挙動を解析した。²⁾

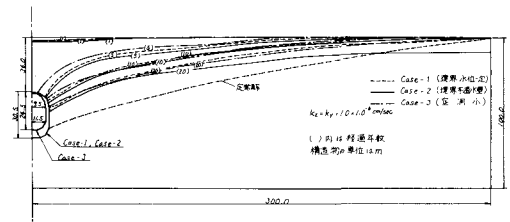


図-1 単設空洞の地下水位低下の経時変化

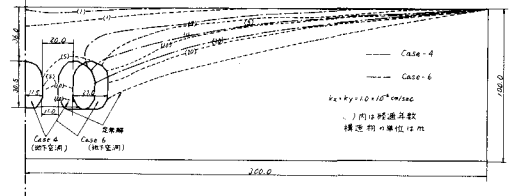


図-2 3連空洞の地下水位低下の経時変化

在来地下水位下設置深度40m(空洞周辺のゆるみ領域の幅4mは空洞の一部とする)の地下空洞では、定常状態に達した地下水位は空洞側壁の高さの1/3程度以下にまで低下し、複数空洞の空洞間の地下水位はほぼ空洞底部まで低下している。したがって、自然地下水位のみの水封方式では空洞間の岩盤壁への油浸は避けることができない。上述の定常状態に達するには、岩盤の透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ の場合、20年以上も必要であるが、 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の場合、1年以下である。なお、透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ の場合には、単設空洞、3連空洞とも、空洞掘削1年後の地下水位低下は2~10mであり、掘削5年後には地下水位が天端に達している。

3. ウォーターカーテンよりの人工地下水圧による水封効果の数値解析的検討

岩盤内の無覆工な空洞に、LPGや原油等の石油類を圧力貯蔵する場合には、貯油槽の液密、気密構造を確実なものとしなければならない。しかし、地盤内地下水の自然水封圧だけで対処する場合には、貯油槽を非常に深くする必要があるために、一般には図-3に示すように貯油槽上部に水平ウォーターカーテン(水

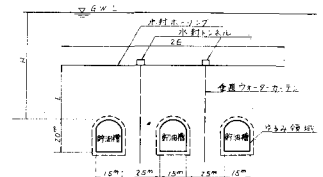


図-3 圧力貯蔵の配置モデル

封トンネルと水封ボーリング)を設置して、適切な設置深度で液密、気密構造を形成する。またガス圧の異なる石油類を近接して貯蔵する場合には、混合防止用の垂直ウォーターカーテンを設置した構造とする。

岩盤内の無覆工な貯油槽内のガスが岩盤内の亀裂を通して洩れないための条件は、水の毛細管力を無視すれば、鉛直方向動水勾配を1以上に保つことである。図-4は単設貯油槽内に原油満たん時の周辺岩盤の鉛直動水勾配を有限要素法で求めた例である。Case-7Aでは、貯油槽周辺で鉛直動水勾配が0.5より小さく、毛細管力を無視した場合に、気密構造が保たれない恐れがある。

(1) 貯油槽の湧水量

岩盤内に掘削した水封方式の貯油槽への水の流れは、ほぼ有限長さをもつ水平ウォーターカーテンより供給されるために、水封方式の浸透流問題には、有限幅の湛水部をもつ円形暗きょの浸透流問題を取り扱った上田の理論式を適用することができると考えられる。上田の理論を適用するにあたって、図-5に示すようなモデル化を行なうと、貯油槽湧水量は次式で示される。

$$Q = \frac{2\pi K(H_0 - \{(P_c/r_w) - 1\})}{\ln \frac{a + (L-r)/\sqrt{E^2 + (L-r)^2}}{a - (L-r)/\sqrt{E^2 + (L-r)^2}}} \dots\dots\dots(1)$$

$$a = \sqrt{\frac{L^2 - r^2}{\{(L+r)^2 + E^2\} \{(L-r)^2 + E^2\}}}$$

ここで、Kは透水係数、Pcは貯油槽内の圧力である。
式(1)より計算した貯油槽設置深度と湧水量の関係を図-6に示す。図には、ゆるみ領域を考慮したFEMの解析ケースに対応して、FEMの解析結果もプロットされている。上田式の結果はFEM結果よりも小さな値を示しているが、その差はほぼ10%以内であり、両者はよく一致している。

(2) 貯油槽周辺の動水勾配

上田の理論により、貯油槽周囲の各点で動水勾配を求めることができる。しかし、図-5のように、モデル化の作業によって、空洞形状の変更や貯油槽の水頭の平均化を行なったために、それ程の精度を期待することはできないと考えられる。したがって、ここでは、実用的に式(1)より、貯油槽周辺の平均の法線方向の動水勾配を求めることにした。すなわち、次式で与えられる。

$$I = Q / 2\pi r K \dots\dots\dots(2)$$

式(2)より計算した貯油槽設置深度と動水勾配の関係を図-7に示す。これより、貯油槽周囲の動水勾配を1以上に保つためには、設置深度を、原油貯蔵では約50m以上に、LPG貯蔵では約90m以上に必要がある。

(3) 水封ボーリング長さと位置

圧力貯蔵の貯油槽では、液密、気密構造を確実にすることが最も重要である。したがって、これらを判定する要素となる動水勾配(I₀)の値をパラメーターとして、水封ボーリング長さと位置の関係を式(1)と式(2)から求めること

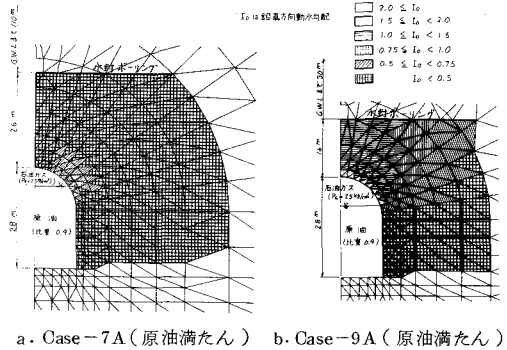


図-4 鉛直方向動水勾配分布図

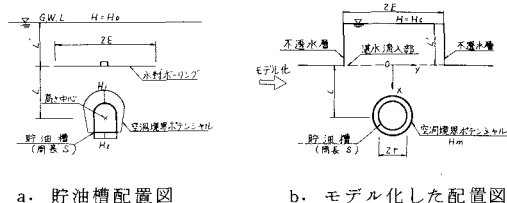


図-5 上田理論を適用するためのモデル化

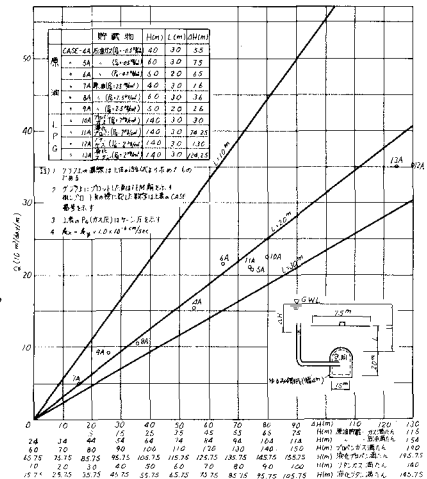


図-6 空洞湧水量(Q)と貯油槽設置深度(H)の関係

ができる。一例として、原油貯蔵の場合で、設置深度 50 m の条件下で、 $I_0=0.75, 1.0, 1.25$ について、水封ボーリング長さ と位置の関係を図-8 に示した。

(4) 水封ボーリング間隔

2 次元有限要素法では、水封ボーリングを板状のスリットとしてモデル化しているため、水封ボーリング間隔の影響を考慮していない。ここでは、水封ボーリング間隔をきめるために、図-9 のようなモデルを取り扱う。

水封ボーリングには、地下水面からの深さに対応する静水圧をかけ、水頭 $H=h_w$ 、貯油槽上端の水頭 $H=h_1$ とする。ここで浸透領域において、2 次元等方等質性の浸透流であり、浸透流がダルシーの法則に従うものとする、Muskat が誘導した無限に配列された無限長さの井戸のまわり⁵⁾の圧力分布の式を用いて、Aberg が水封ボーリング間隔(A)に関する理論式を提案している。この問題を取り扱う場合は、地下水面と水封ボーリング間で水の流れがない状態を仮定し、次式によって水封ボーリングの水封圧 h_w と貯油槽上端の動水勾配 I の関係式を用いることができる。

$$h_w = h_1 + AI \left\{ \frac{L}{A} + \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{A}{2\pi r} \right) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、上式は $L > A$ の条件の場合に成立する。

式(3)を用いて、原油貯蔵について、水封ボーリング間隔と水封ボーリング位置の関係を求め、図-10 に示す。水封ボーリング間隔を大きくすると、水封ボーリング位置を貯油槽に近づけなければならないことがわかる。また、貯油槽の設置深度を深くすることによって、水封ボーリング間隔を大きくすることができる。

4. 岩盤亀裂内への燃料ガス漏気に関する実験的検討

前述の漏気防止のための動水勾配の鉛直成分 I_0 が 1 より大きいという条件は、亀裂内の毛細管力を無視することを前提にして得られたものである。しかし、実際には毛細管力の影響が大きく、 $I_0 > 1$ には相当の余裕が含まれていると考えられる。このような観点に立ち、亀裂模型を用い、亀裂からの漏気を防止するのに必要な鉛直動水勾配を求めてみた。

(1) 実験装置

実験装置の概略を図-11 に示す。亀裂はアクリル材を用いたスリットにより模擬し、スリット厚は 0.3, 0.5, 1.0, 2.0 mm の 4 種類とした。

漏気防止のための水頭差の測定は、次の手順によった。

- 1) 所定の厚さ t のスリットをセ

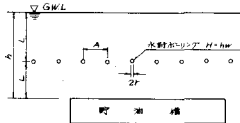


図-9 貯油槽の縦断面配置図

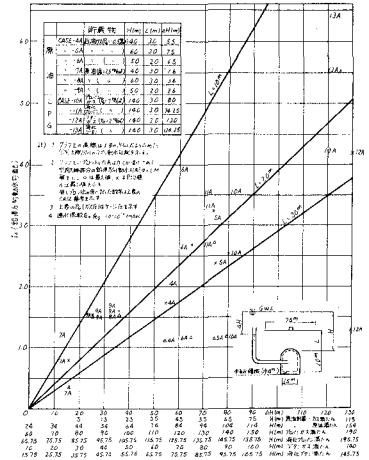


図-7 動水勾配 (I_0) と貯油槽設置

深度(H)の関係

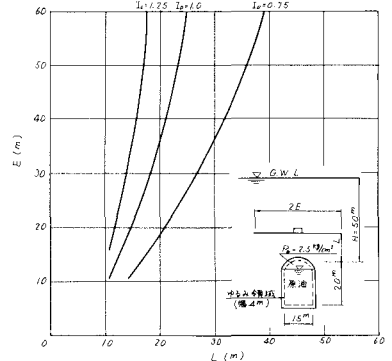


図-8 水封ボーリング長さ(L)と位置(L)

の関係 (原油, $H = 50 \text{ m}$)

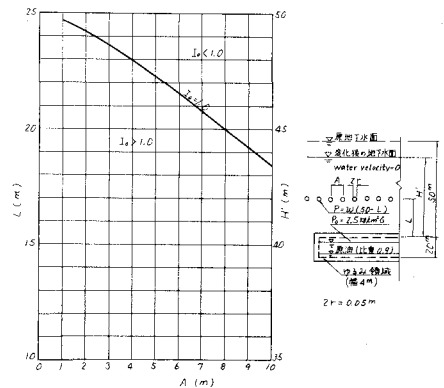


図-10 水平ウォーターカーテンの間隔(A)と位置(L)の関係 (原油 $H=50 \text{ m}$)

2) 注射器によって下部空洞に空気を最初に圧入する際に、空気を停留させることが可能な最小の水頭 h_1 を下部水槽を移動させて求める。 3) 下部空洞に十分空気を貯め、次に、下部水槽を移動させて、漏気が始まる水頭差 h_2 を求め、その漏気が再び止まる水頭差 h_3 を求める。さらに、スリット内の毛管上昇高さを求めるために、スリットを水中に立て、スリット内の水面上昇高さ h_c を測定した。

(2) 実験結果

漏気防止に関する水頭差 h_1 , h_2 , h_3 および毛管上昇高さ h_c を表-1 に示す。これらの水頭値より鉛直動水勾配を求め表-2 に示す。また、4 種類のスリット厚 t の毛管上昇高さから、水 — 空気 — アクリルの接触角 θ の平均を求めると、 $\theta = 47.4^\circ$ が得られた。⁷⁾

(3) 考察

亀裂内の気泡の停留条件は、毛細管力を考慮した場合、次のようになる。⁷⁾

$$I_0 \geq 1 - (2T \cos \alpha) / (r_w l t) \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 T : 水の表面張力、 α : 気泡上昇の接触角、 r_w : 水の単位重量、 l : 気泡の長さ、 t : 亀裂幅

つまり、気泡の長さ l および亀裂幅 t が小さく、接触角 α が小さければ、気泡の停留条件は $I_0 \geq 1$ よりも軽減できるものと思われる。一方、今回の実験結果の表-2 からでも、1 よりも小さな鉛直動水勾配で、漏気防止の可能なことが示された。なお、2.0 mm のスリットの場合は、空気が貯蔵されても不安定であったが、0.3 mm、0.5 mm および 1.0 mm の場合は安定して空気が貯蔵された。したがって、岩盤空洞内に気体を貯蔵する際、ある程度以上の間隔の亀裂をグラウトすれば、巻立を行なわなくても、水封方式が可能となる見通しを得た。そして、今

回求められた接触角 47.4° は、水 — 空気 — 普通ガラスの接触角に比べても大きく、接触角にもとづく抵抗の小さいことが予想されるが、このような大きな接触角を示す場合も、必要な鉛直動水勾配は、必ずしも $I_0 > 1$ でなくともよいことが今回の実験から示された。しかしながら、ここでは、必要な鉛直動水勾配を定量的に断定することができなかった。さらに、空洞の形状や寸法の影響に関しても論じられなかった。今後の研究課題としたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、中国電力株式会社ならびに清水建設株式会社の関係各位より、種々の御協力を得た。末筆ながら深謝いたします。

参考文献：1) 駒田，他 3 名「水封式燃料地下貯蔵の技術開発に関する研究 — 燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討 — 」電中研報告 378028 1979.4 2) 駒田広也「飽和・不飽和土中の非定常浸透流解析」電中研報告 377015 1978.2 3) B. Åberg : Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock : Rock Store 77 Vol.2, pp.399 ~ 414, 1977. 4) 上田，他 1 名「被圧水で満たされた円形暗きょの取水量について」土木学会論文報告集 194, pp.91 ~ 101, 1971.10 5) M. Muskat : The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, pp.524 ~ 530 McGraw-Hill 1937. 6) B. Åberg : Model Tests on Oil Storage in Unlined Rock Caverns : Rock Store 77 Vol.2, pp.517 ~ 530, 1977. 7) 中川，他 3 名「岩盤亀裂内の気泡上昇防止の動水勾配に関する基礎実験」第 14 回土質工学研究発表会 pp.1353 ~ 1356 1979.6 8) 本間仁「水理学」丸善 p.4 1972.

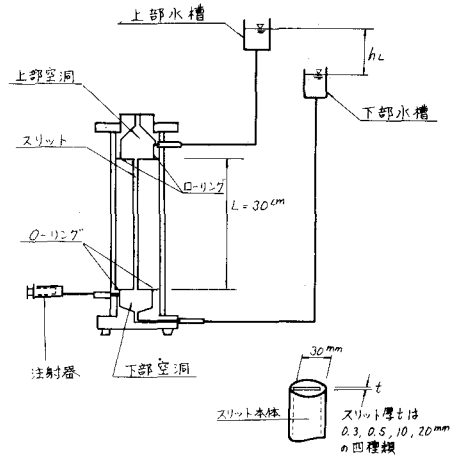


図-1-1 実験装置概略図

表-1 水頭差，毛管上昇高

亀裂厚 t (mm)	毛管上昇高 h_c (mm)	ヘッド差 (cm)		
		貯蔵可能 h_1	漏気開始 h_2	漏気停止 h_3
0.3	40.0	5.0	3.0	6.0
0.5	20.0	5.0	3.0	8.0
1.0	7.0	6.0	4.0	6.0
2.0	5.0	4.0	4.0	7.0

表-2 動水勾配

亀裂厚 t (mm)	動 水 勾 配		
	貯蔵可能 I_1	漏気開始 I_2	漏気停止 I_3
0.3	0.20	0.10	0.20
0.5	0.20	0.10	0.27
1.0	0.20	0.13	0.20
2.0	1.33	0.13	0.23

STUDY ON SEEPAGE FLOW
THROUGH ROCK MASS SURROUNDING CAVERNS FOR PETROLEUM STORAGE

by H. Komada, K. Nakagawa, Y. Kitahara and M. Hayashi
Central Research Institute of Electric Power Industry

In unlined underground rock caverns, liquid petroleum and petroleum gas can be stored by making use of natural or artificial ground water pressure. In case of applying the unlined underground storage caverns to the cracky rock mass, it seems to be most important that the behaviour of the ground water through the rock mass surrounding the caverns is studied in advance.

This study, therefore, discusses the following subjects concerning unlined underground oil storage caverns.

1. The numerical study on the effects of natural ground water pressure on the storage caverns.

In order to study the behaviour of natural ground water surrounding the caverns, two dimensional unsteady seepage flow analyses were performed by finite element methods.

According to the finite element analyses, in case of the caverns for heavy oil located 40 meters below natural ground water level in the rock mass with permeability of 1×10^{-6} cm/sec, the ground water level fell down to less than 1/3 height of the side wall of the caverns after about 20 years since the construction of the caverns. Moreover, in the rock pillar between the adjacent caverns, the ground water level fell down to the level of the bottom of the caverns.

Consequently, storage system using only natural ground water pressure can not prevent the oil leakage into the rock.

2. The numerical study on the effects of artificial ground water pressure on the storage caverns.

In order to study the storage system using artificial water pressure from an array of boreholes for crude oil and liquified petroleum gas which are volatile and necessary to be stored in larger pressure than atmospheric pressure, two dimensional steady seepage flow analyses were carried out by finite element methods. The results show that the caverns for crude oil and those for liquified petroleum gas should be located about 50 meters and about 100 meters respectively below the ground water level. These depths may be varied in some degree depending on the location of horizontal water curtains.

The allowable water leakage into the caverns should be determined by taking into consideration following factors; the mechanical stability of excavation, the cost of treatment of the water leakage and the cost for heating of stored fuel. The finite element analyses show that the amount of water leakage into a cavern would be $30 \text{ m}^3/\text{hr}$ per stored oil of $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ in case of the rock mass with permeability of 1×10^{-5} cm/sec.

3. Model experiment about gas leakage into the crack of rock mass.

The hydraulic conditions necessary to prevent the gas leakage were investigated through the experiment with the acryl model of the rock mass.

According to the investigation it is possible to design the storage caverns with smaller vertical hydraulic gradient than 1.0 proposed by B. Aberg.