

高圧エネルギー貯蔵に係る水封機能の水理学的研究

HYDRAULIC STUDY ON WATER-SEAL SYSTEM FOR HIGH-PRESSURE GASES AND FUELS

埼玉大学 佐藤 邦明 Kuniaki Sato*)
トゥールズ工科大学 セルジュ・ボリス Serge Bories**)

SUMMARY (英文要約)

A number of rock caverns due to the water-seal system have been constructed to store a large amount of fuels like oils and liquified propane gas. The system is also useful for realizing the compressed air energy systems which aim at storage of high-pressure air instead of electric power energy.

This paper studies essentials of water-seal hydraulics theoretically and experimentally to clarify: (1) mechanism of gas penetration, (2) hydraulic performance of water-seal system.

The theories of water-seal are proved according to gas penetration and permeability tests, and useful knowledge for designing rock caverns is introduced comprehensively.

The results suggest that the design depth of caverns is specified not only by hydrostatic pressure but also by capillary pressure and threshold pressure of gas penetration in wetted rocks.

Keywords: groundwater(地下水), water-seal system(水封機能), gas penetration(透気), rock store(岩盤備蓄)

1. はじめに

水封機能(water-seal system)という用語が我が国で用いられるようになったのは、昭和50年ごろからであり、まだ新しい。しかし、その技術は北欧を中心に地下水面に掘られた岩盤空洞に石油を備蓄するため戦前(昭和20年8月終戦)より用いられ、今日では欧米はもとよりかなりの国で利用されている。我が国では第一次石油ショック(昭和49年)以後、石油の国家備蓄が叫ばれ、石油備蓄法(昭和52年)が成立し、化石エネルギー備蓄が本格化した。その中で岩盤タンク備蓄は、その技術が欧米で確立されているものの、我が国では初めてであるため、まず愛媛県越智郡菊間町の実証実験でその適用性が確かめられた後、実用化されるという経過を辿った^{1), 2)}。すでに、石油(原油)の岩盤タ

ンク備蓄は、岩手県久慈市、愛媛県越智郡菊間町、及び鹿児島県串木野市に本格的なものが完成している。

その後、液化石油ガスの備蓄への関心が持たれ、平成元年から岡山県倉敷市で小規模技術実験が始まり、平成6年にその当初の目的は達成され、その後、その実用化に向けて、保安対策調査が行われた。

他方、揚水式発電に代わる電力貯蔵法として圧縮空気エネルギー貯蔵(Compressed Air Energy System(CAES))が日本でも注目され、岩盤タンク貯槽内に封入される高圧圧縮空気の気密機能が水封方式に求められた。この場合、封入圧力が 80kgf/cm^2 程度と石油(常圧)や液化ガス(LPGの場合 $7\text{kgf/cm}^2 \sim 8\text{kgf/cm}^2$)に比べて高い。また、日常電力需要の平準化にこのシステムが利用されるため、1日に少なくとも1回封入圧力が、圧縮空気の出し

*) Assoc. Prof., Hydrosience & Geotechnology Lab. Faculty of Engineering, Saitama Univ., 255 Shimo-ohkubo, Urawa, Saitama 338 Japan

**) Directeur de Recherche au CNRS, Institut de Mecanique des Fluides de Toulouse(IMFT), Laboratoire Associee au C.N.R.S. 0005-INP-ENSEEIH, Avenue du Professeur, Camille Soula 31400 Toulouse, France

入れに伴って変わり、必然的に空洞内温度が変化する。さらに、空洞内の圧力と温度が変化することにより、空洞内へ地下水湧水の形で持ち込まれる水がフラッシュ（flashing vaporization: 急激な断熱的蒸発）及び凝結（condensation）する事になる。つまり、技術的に、圧縮空気エネルギー貯蔵システムの稼動には水封方式による空洞内への湧水の状態変化をどう処理するか、予め考えておく必要があるということになる。

以上、簡単に我が国における水封方式による岩盤タンクの技術導入の経過について要約した。その過程で絶えず技術関係者の間で話題となったし、かつ現在でも議論されていることは、水封の概念の理解が必ずしも統一されていないことである^{3), 4)}。岩盤タンク直上及びその近傍の地下水の水封水位をどう決めるか統一見解が得にくい。技術的に岩盤タンクは必要に浅い方が経済的である。これまでの我が国の岩盤タンクの深さは、①空洞最上部（最も危険側を与える点）における地下水の鉛直動水勾配が0.7～1.0 程度になる直上地下水位（あるいはピエゾ水頭）・（限界水位と呼ばれる）〔限界動水勾配〕を保つ、②空洞最上部における地下水圧（ほぼ静水圧）が常に貯蔵ガス圧以上になる地下水位を保つ

（図-1参照）、という概念を基本とし、過去の諸外国の実績を参考にし、安全確保のために余裕水位を加味して決められた。

もともと、これら2者の概念には考え方に基本的な違いがある。まず、前者で空洞最上部の動水勾配 i 。 （つまり地下水鉛直流速 v_v 、 n : 壁に垂直方向）が 0.7～1.0 という事は、貯蔵ガスの圧力が地下水の静水圧に勝って、空洞壁の割れ目や空隙から気泡状で漏気し、その気泡が浮力により上方に移動する鉛直速度 : v_b 。 (b : buoyancyの意味) を地下水の鉛直流速 v_v で抑止するという原理に根差す。つまり、 $v_v \geq v_b$ であれば漏気泡は空洞壁以外には浮上する事ができず、貯蔵ガスは完全に封入できる事になる。他方、空洞最上部の地下水圧 p_t 、(t : topの意味) より封入ガス圧力 p_g が常に小さいように貯蔵するという原理である。つまり、岩盤壁面がタンク壁と見ることと同じであり、岩盤地山はタンクの内圧力に抵抗するというわけである⁵⁾。

このように水封水位が決定されれば、それを自然

涵養の地下水に頼り得るか（地下水涵養が活発な場合）、あるいは人工涵養の地下水が必要かが、次の技術的要点となる（人工水封施設の建設）。さらに、一般に岩盤タンクは貯蔵効率の面から、いくつか建設されるため、そのタンク間隔を岩盤力学的かつ水理学的に有利に決めることが大切となる。

上述のような岩盤タンクの水封に対する概念がこれまで採用されてきたが、最近LPGの岩盤タンクの実用化に向け、加えて発展的に、CAESの実用化実験もあって、再び水封方式の設計法に関する議論が活発になっている⁶⁾。

本研究は、最近の動向に呼応して水封に対する新しい概念を、単に岩盤タンクそのものの水封に限らず、地山の地下水環境と一体として、室内実験と水封理論の両面から展開したものである。

2. 水封方式の技術的要点

水封方式による燃料（石油類、液化ガス）の岩盤タンク備蓄は、すでに述べたように過去に多くの実績があり、その考え方や方法は大変有効でかつ実用的である。その原理は、図-1のように、貯蔵しようとする燃料（水より比重が小さい）を地下水圧を絶えず受ける岩盤タンクで漏気・漏液を防ぎつつ、抱き込む形で貯えるものである。従って、岩盤地山は常に水で飽和されていなければならず、地下水の存在は必要・不可欠となる。

この水封方式で岩盤タンクを設計しようとする際、少なくとも以下の立場があり得る。

- (1) 岩盤タンクといえども構造物であるから、漏気・漏液はあってはならない（非漏気・漏液条件）。
- (2) 岩盤タンクといえども、経済上コンクリートライニングや鋼壁を施さないなら、たとえ少しぐらい漏気があったとしても、それが操業上あるいは環境保全上支障がなければ、水封性能を持つとする（操業の経済性・環境保全条件）。

前者の立場は、岩盤タンクを丁度地上の鋼鉄タンクと同じように見て、鋼鉄の肉厚に相当する部分が周辺地山であると単純に割り切って考える。つまり、図-1では水圧・表面張力バリアー（仮称）が漏気・漏液に対する仮定の岩盤タンク壁であると考え。他方、後者の考え方も考慮に入れば、岩盤タンク

の気密性についてはやや条件が緩められたものとなる。図-1では、地山バリアー（仮称）が漏気の対地上環境への拡散、ひいては安全性を損なうことを防止する。つまり、岩盤タンクの水圧・表面張力バリアーで漏気・漏液は基本的に抑止されるが、非常に小さい確率ではあろうが、微量漏気した場合、それは岩盤タンクに向かう地下水流と岩盤地山中の微小間隙や割れ目系に拘束され、地上には達しないと考えられる。ここでいう地山バリアーはそういった一種の緩衝帯の役割である。

以上のような水封概念は、実際上次のように考えるのが至当であろう。岩盤タンクの水封機能は、まず地下水圧と表面張力バリアーにより達成され、ついで地下バリアーによって支援されるように設計する。

次に、岩盤タンクの設計深さ h は次式で決められる^{8), 9)}。

$$\left. \begin{array}{l} h \geq \alpha p_m + h_a \\ \text{あるいは} \\ h > p_m + h_s + h_g \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここに、 α ：岩盤の地質や貯蔵物の種類による定数、 p_m ：岩盤タンク内の最大ガス圧力（ m 換算）、 h_a ：付加安全深さ（ m ）、 h_s ：近接岩盤タンクや空洞の形状による補正深さ（ m ）及び h_g ：地下水面の不規則性に対する安全深さ（ m ）である。

いずれにしても、岩盤タンクの設計深さは封入ガスの最大圧力（あるいは相当水深）に安全性を確保するための補正深さを加味して決められる。

以下に理論的に岩盤タンク水封水圧とタンク直上壁面に起こる表面張力の作用を検討する。

いま、図-2のように、岩盤タンクの壁面近傍におけるある開口割れ目（開口幅 δ 、単位奥行幅）中の間隙水が上部不圧帯水層とつながっていると考え、封入ガス圧力 p_g と岩盤タンクの理論深さ H の関係を調べる。力の釣り合いから^{10), 11), 12)}、

$$H = \frac{p}{\rho g} - \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g} \frac{1}{\delta} \quad (2)$$

ここに、 $p = (p_g - p_a)$ 、 $\rho = \rho_w - \rho_a$ 、

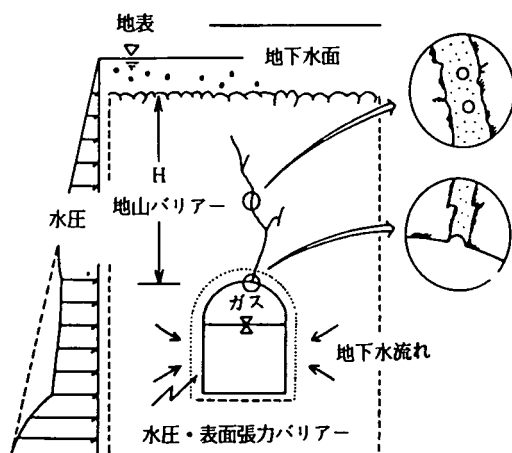


図-1 水封システムの原理
(Fig.-1 Concept of Water-Seal System)

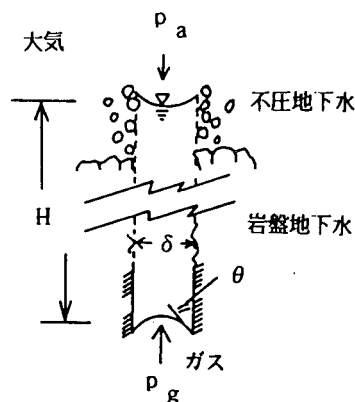


図-2 理論水封圧力の説明図
(Fig.-2 Explanation of Theoretical Water-Seal Pressure)

ρ_w 、 ρ_a ：各々水及び空気、 σ ：表面張力、 θ ：接触角、 g ：重力加速度。

上式(2)の第一項は純封入ガス圧力項であり、第二項が開口割れ目の表面張力による圧力項である。割れ目幅 δ が小さくなるほど、第二項は大きくなり岩盤タンクの理論深さ H は小さくて済むことになる。

いま、一例として、ガスの代わりに空気を封入するとし右辺第二項を水・ガラス・空気の三相で求めてみる。温度を 20°C とし標準大気圧で $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $\sigma = 0.0728 \text{ N/m}$ 、

$\theta = 10^\circ\text{C}$ とし、 $\delta = 0.1\text{mm}$ とすれば、第二項は
 0.147 m となる。従って、間隙幅が $(1/1000)\text{mm}$
 のときには 14.7m になり、マイクロクラックでは表
 面張力はかなり水封にプラスに働くことになる。言
 うまでもなく、封入圧力が非常に大きいと（例えば、
 液化プロパンガス（LPG）や圧縮空気エネルギー
 貯蔵システム（CAES）のように、 $7\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim$
 $80\text{kgf}/\text{cm}^2$ のような場合）、表面張力の効果はあま
 り期待できない。

3. 漏気メカニズムと単一開口割れ目中の気泡移動

岩盤タンクの水封性を考える場合、タンク壁に出来やすい割れ目系（実際には吹付けを行うことがあるが）からの漏気が最も懸念される。そこで、まずはじめに単一開口割れ目からの漏気とその後の気泡上昇実験について述べる。

実験は図-3のように、開口割れ目モデル横幅 0.1 m 、高さ 0.2 m （有効高さ： 0.15 m ）、開口幅（ $b = 0.1\text{ mm} \sim 1.0\text{ mm}$ ）に上方から下向きに一樣鉛直流を起こしつつ以下3つの事項を明かにするのが目的である。

- (1) 開口割れ目モデル下部からの加圧空気（侵入（漏気）限界圧力 p_g （つまり、図-1に示したようにガス（空気）圧が増すにつれ、開口割れ目中へガスが舌状に侵入し、限界圧力に達すると、急に分裂気泡になる瞬間圧力）と一樣鉛直下方動水勾配の関係。
- (2) 開口割れ目中の単一気泡（球形または平面楕円形）が静止状態になる鉛直動水勾配。
- (3) 実験結果と理論モデルの比較により漏気メカニズムの解明。

実験装置は、機能的に見て、

- ① 開口割れ目モデル（厚さ 8 mm 、幅 0.12 m 、高さ 0.24 m ）の2枚の透明ガラスにOーリングを両側溝にはめ込んだ平行間隙）、
- ② マノメーター付きガス（空気）注入（細）管（割れ目モデルの下端開口部にある圧力で空気を送り、下方から一樣に空気溜まりを作り、間隙中に空気を侵入（漏気）させ、漏気と共にマノメーターは波打ち、漏気時の圧力が判る）。

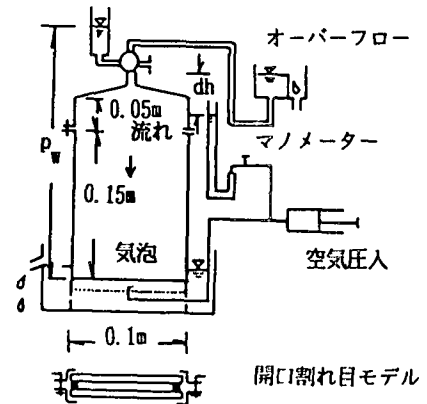


図-3 単一開口割れ目モデルによる漏気実験
 (Fig.-3 Gas Penetration Test in an Open-Single Fracture Model)

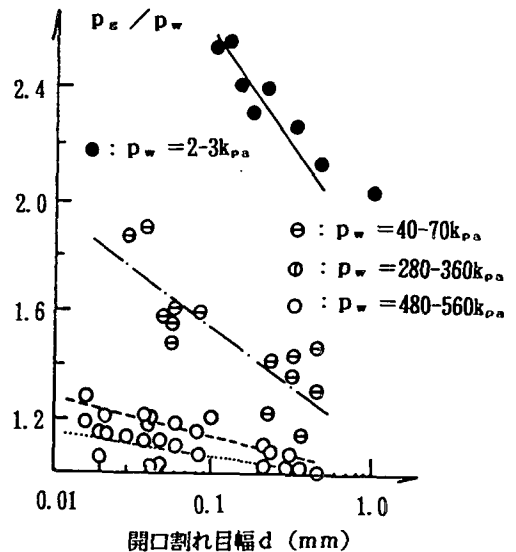


図-4 圧力比 p_g / p_w と開口割れ目幅 d の実験的關係
 (Fig.-4 Experimental Relationships between p_g / p_w and d)

同時に、気泡の上昇はガラス板による開口割れ目モデルの場合、肉眼で確認でき、岩石開口割れ目モデルでは上端貯水部で観察できる。今回の実験では、下部から割れ目に空気が侵入する限界空気圧 p_w と一度侵入した気泡が下向一樣水流によって抑止時（気泡の浮力と水流による抗力と釣り合って割れ目中で停止）の限界動水勾配 i の2者を実験的に決

めるのが目的である。従って、気泡の上昇速度とかその変形挙動といった事は今回は考えない。

まず、開口割れ目への空気侵入(漏気)に対する表面張力の影響を調べるため、開口幅 d と圧力比 p_g / p_w (p_g : 空気圧力、 p_w : 水圧) の実験的關係が図-4に示されている。比較のため筆者らによる圧力の大きい場合の別の実験結果も併せて示した⁷⁾。これらの関係は水圧 p_w のレベルによって違うものの、開口幅 d が大きくなるほど、 p_g / p_w が小さくなっており、しかも $p_g / p_w \geq 1.0$ である。この事は、図-2に示した開口割れ目下端の水相と気相の界面における表面張力圧力 $p_c = (2\sigma / r)$ (σ : 表面張力、 $r = d/2$: 界面曲率半径) が存在する事を実証している。つまり、ある圧力を持つガス(空気)が水圧を受けて割れ目中に侵入するには、界面曲率半径を $d/2$ とし、それに伴う表面張力の壁を破って、気泡状になる必要がある。水圧に対抗して表面張力が現れるわけであるが、開口幅に逆比例してその大きさが決まる。実験結果から水圧が大きい場合は表面張力の影響は相対的に小さくなり p_g / p_w が1.0に近づく。

以上の事は、実際の岩盤タンクに液化ガスや圧縮空気エネルギーの封入を考えた場合のように封入圧力が $8\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 80\text{kgf}/\text{cm}^2$ と大きいと、タンク壁に発生あるいは存在する開口割れ目やクラックの開口幅が 10^2 ミクロン程度と小さければ、表面張力の影響は考え得る。しかし、割れ目の開口幅が目に見える程度の大きさ 10^{-2}mm 程度では無視できるといえよう。

次に、図-5は、開口割れ目中の上昇気泡が抑止される限界動水勾配 i_c と開口割れ目幅 d の関係である。開口割れ目幅の間隙中に入った気泡は上端から下方に向かう一様流から抗力を受けて、浮力と釣り合って停止するわけである。従って、この結果は開口幅が小さいほど、大きな動水勾配、つまり一様流速がないと気泡を抑止できない事を意味する。これは、単に浮力と抗力の関係のみで気泡の拘束が起こるわけではなく、むしろ気泡の割れ目壁との摩擦、及び気泡の形状が間隙幅が小さくなるにつれ球状から楕円形に変化し、壁面に付着したようになるからでもある。普通、安定した気泡寸法は間隙幅程度であるから、球形気泡の一様流によって受ける抗力

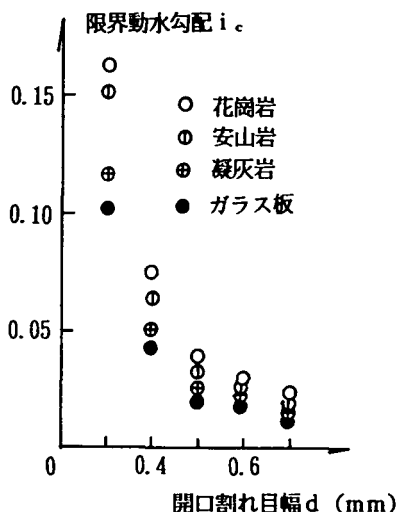


図-5 気泡上昇抑止時の限界動水勾配 i_c と開口割れ目幅 d の実験的關係
(Fig-5 Experimental Relationships between Critical Hydraulic Gradient i_c and d without Gas Bubble Motion)

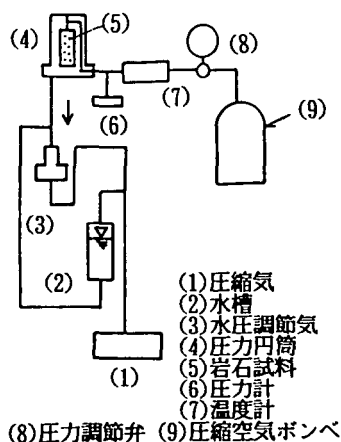


図-6 岩石の透気試験装置
(Fig-6 Apparatus of Gas Permeability Tests in Rocks)

$F_d \sim c_r d^2 U^2$ (d : 間隙幅、 U : 一様速、 c_r : 抗力係数) である。

實際上、岩盤タンクから漏気したガスは不規則な割れ目や間隙中に拘束されたり、地下水中に溶解したりして、一様な割れ目中の気泡挙動とは違ったも

のとなるう。

4. 岩の透気試験

4.1 実験装置と方法

3. で述べた単一開口割れ目を通してガスが漏気する可能性に比べれば岩石質を通して漏気する可能性は少なからう。しかし、空洞内の封入圧力は放射状に距離と共に急激に減少するものの、壁面周辺近傍では作用水压を排除 (gas-liquid water displacement) する形でガスは岩石質に侵入する可能性はある。この事は岩盤タンクが多数同一高さレベルに連設される場合には、各空洞に形成されるガス侵入帯が相互に干渉し合っている空洞から他のそれへ干渉漏気する可能性を生まないとはいえない。こういった観点から、岩石質自体の初期飽和時、湿潤及び乾燥時の透気について検討しておく必要はある。

そこで、図-6にそのシステムを示すような高圧岩石透気試験を行った。それは機能的には、①岩石試料封入圧力容器 (長さ: 200mm、直径: 106mm、肉厚: 10mmのステンレス製)、②岩石試料 (長さ: 0.15m、直径: 0.05m)、③ガス (空気) 圧力ゲージ (測定可能範囲: 0~100kgf/cm²)、④デジタル圧力及び温度レコーダー (精度: 1/100)、⑤空気流量計 (測定可能範囲: 微流量 0~10cm³/min及び普通流量: 0~100cm³/min) 及び岩石試料側圧機 (最大圧力: 80kgf/cm²) に分けられる。写真-1には実験装置の全景を示す。

実験手順は以下の通り。

すべての透気試験は、初期飽和状態の岩石試料と乾燥状態 (110℃炉乾燥) のそれと別々に行った。従って、前者の場合は初期に水で飽和された岩石試料は上端から空気圧をかけると、空隙中の水を排除しつつ空気が侵入し、気液界面 (つまり、上端から下方に空気が侵入するから安定した界面が形成。その逆に下方から上方に空気が侵入する場合は不安定。) が試料下端に達すると、はじめて透気が起こることになる。いうまでもなく、排除過程では水のみが流出する。結果的には、空隙中の水がすべて排除されるわけではないため、湿潤状態の岩石透気試験ということになる。乾燥状態の透気試験は空気圧をかけ

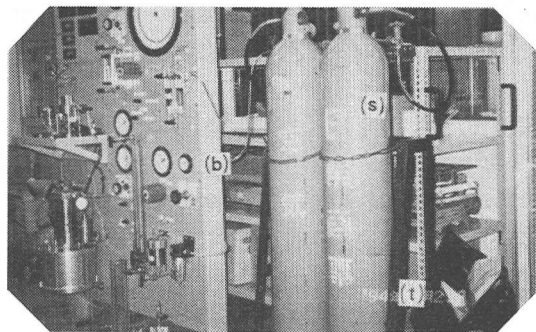


写真-1 実験装置の全景
(Photo -1 Picture of experimental apparatus)

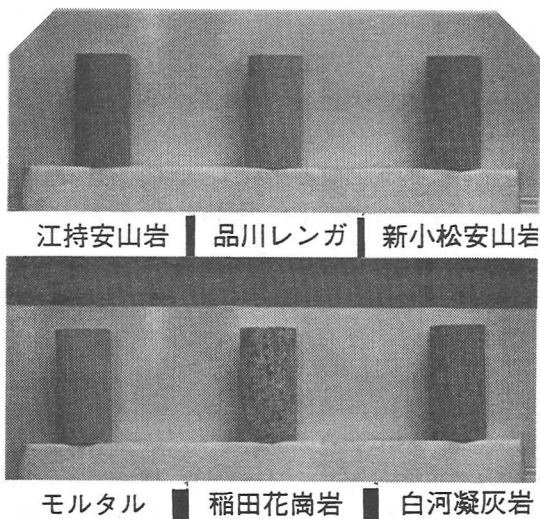


写真-2 透気試験に用いられた岩石資料
(Photo -2 Rock Samples in Gas Permeability Tests)

ると同時に透気が始まり、間もなく定常透気に至る。

まず、岩石試料封入圧力容器に岩石試料を挿入し、上下端にOリングをはめて、ゴムスリーブを被せて、容器下端のネジを留める。ついで、側圧荷重用コンプレッサーに連結し、岩石試料の周囲に透気圧力よりやや大きい程度 (1~2kgf/cm²大きい) の側圧をかける。そこで、圧縮空気ポンプ (120kgf/cm²封入) を一部開放して岩石試料の上端から所定の透気圧力をかけ、定常透気に至るのを待って透気量を測定する。すでに述べたように、その際、飽和岩

石の場合、定常透気状態に至るまでの間、侵入空気
の気液フロントが試料の下端に達するまで排除され
る水を計っておく。つまり、この排除水量がその圧
力レベルでの透気中の有効空隙ボリュームに等しい
からである。ある圧力レベルから次の高い圧力レベ
ルに変わる段階でさらにある量の水が排除される。
载荷透気圧力が高いほど、透気量は大きくなるわけ
で、その空隙流速も大きくなる。そのために空隙中
の水も排除され易く、有効空隙率は増大する。透気
流量は流量計により各载荷透気圧力ごとに測定し、
载荷透気圧力は0から順次増加させつつ加え、流量
計の性能が損なわれない圧力まで加える。言い換え
れば、透気性の大きい岩石では透気量が大きくなる
ため、载荷透気圧力は上げられないが、透気性の小
さい岩石では透気量が小さいため载荷透気圧力は容
易に上げ得る。すでに述べたように、初期飽和岩石
試料と乾燥のそれについて同様に実験を繰り返す。
すべて、実験は温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ の恒温室内で行われ
た。

表-1には、透気試験に用いられた岩石試料の物性
と実験より得られた透気係数が示されている。岩石
より透気性は大いに違うため、江持安山岩、新小松
安山岩、泉凝灰岩、白河凝灰岩、堤川花崗岩、稲田
花崗岩、及びセメントモルタルが用いられた（写真
-2参照）。

4.2 実験結果と考察

岩石の透気試験は表-1に示したように、6種類の
岩石及びモルタル1種類によって、乾燥状態（110
 $^{\circ}\text{C}$ 炉乾燥）及び初期飽和状態について行われた。そ
の試験結果の一例が図-7に示されている（江持安山
岩）。その他の試料についても同様であったが、透

気流量 q は载荷圧力 p_e の増加と共に増大する。乾
燥及び初期飽和状態の場合と共に非線形的に流量は
増加し、初期飽和の場合（定常透気時には一部空隙
水は排除され湿潤状態）にはある程度圧力をかけな
いと、透気が始まらない。いわゆる始動圧力値
 p_0 が存在する。

これら2つの特性は以下のように説明できる。ま
ず、岩の透気流速が非線形的に増加する原因は空気
の圧縮性による。つまり、透気载荷圧が数気圧から
数十気圧であるから、岩石中の透気は圧縮された状
態で浸透し、流速の計量時は大気圧であり、浸透時
より膨張した体積となっている。一般に、圧縮性を
持つ気体の流量はある基準圧力（通常大気圧）で計
量される。

このような圧縮性を持つ気体の浸透試験で得られ
る浸透係数は、透水のような場合と異なり、力学的
に

透水係数（多孔媒体の空隙特性、流体の物性、場
特性（重力））

と3つの特性に依存する。従って、圧縮性が大きい
場合、少なくとも多孔媒体の空隙特性と流体の物性、
場特性は切り離して議論しなければならない。

一般に、浸透係数はダルシーの浸透係数 k [L T^{-1}]
と固有浸透係数 K [L^2] に分けて、
 $k = K (\rho g / \mu)$ （ここに、 ρ ：流体密度、 μ ：
流体粘性係数、 g ：重力加速度）とする。

今回の透気試験では固有浸透（透気）係数 K は

$$K = \frac{2Q \mu_a p_{ar}}{A (p_{ao}^2 - p_{at}^2)} \quad (3)$$

で求めた。ここに、 Q ：空気流量（大気圧）、 μ_a ：
試験時の温度・平均圧力（積分平均） p_{ar} における

表-1 岩の透気係数 (Table-1 Gas Permeability of Rocks)

試料	乾燥有効空隙率 λ_c (%)	乾燥固有透気係数 k_d (10^{-16} m^2)	飽和有効空隙率 λ_{st} (%)	湿潤固有透気係数 k_{st} (10^{-16} m^2)
江持安山岩	12.96	1.120	1.12	0.054
新小松安山岩	3.54	6.184	1.45	3.641
泉凝灰岩	22.43	1.899	2.67	0.047
白河凝灰岩	21.30	69.000	9.79	8.150
堤川花崗岩	0.74	0.178	0.43	0.050
稲田花崗岩	0.67	0.127	0.21	0.047
セメントモルタル	23.57	16.92	2.49	0.154

粘性係数、 A : 岩石試料の断面積、 p_{ao} 、 p_{aj} : それぞれ上下端における透気圧。

表-1には、透気試験により得られた結果を示した。今回の透気試験では、乾燥岩石の透気流量は湿潤（初期飽和）状態のそれに比べ5%~30%に減少してしまう事が判った。

次に、初期に飽和した岩石の透気試験を力学的にどう理解すればよいか考えてみる。

図-8は飽和岩石の透気に伴う含水変化とそのメカニズムを説明する透気パイプモデルを示している。図中、(a) 図のように、初期飽和した岩石にある透気圧を上端に始動圧力（透気の発生）以下の値で加え、岩石の間隙中に表面張力で保持された毛管水は排除して透気が発生し得ない。つまり、毛管力が強く、間隙水を排除するため始動圧力以上の値を加えなければ、透気が発生し得ない。

いま、(b) 図のような透気パイプモデルで始動圧力を説明する。円管中に表面張力で保持された水の上端での空気圧、水圧を p_1 、 p_2 及び下端でのそれらを p_3 、 p_4 とする。また、それぞれ上下端でのメニスカスの曲率を r_1 、 r_2 とし、表面張力 σ 、保持水の長さ L 、 ρ_k 、 ρ_l を空気及び液の密度とする。これらの力学的関係は以下になる。ヤング・ラプラスの式より各点の圧力は、

$$p_1 - p_2 = 2 \sigma / r_1 \quad (4)$$

$$p_4 - p_3 = 2 \sigma / r_2 \quad (5)$$

静水圧力の釣り合いの式は、

$$\left. \begin{aligned} p_4 - p_1 &= \rho_k g L \\ p_3 - p_2 &= \rho_l g L \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

それらを組み合わせると

$$2 \sigma (1/r_1 - 1/r_2) = (\rho_l - \rho_k) g L, \quad \dots \dots (7)$$

結果、保持水柱の重さはその上下端の曲率差による表面張力と釣り合って支えられる。というより、釣り合うように上下端の曲率が決まる。

このパイプモデルによる力学的関係において、上

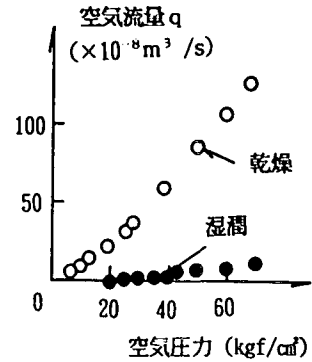
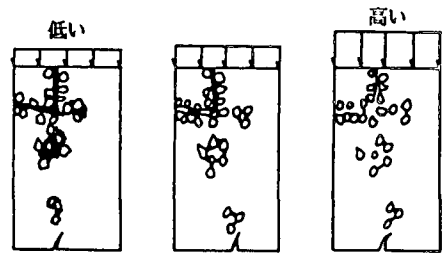
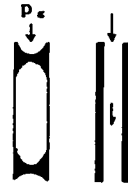


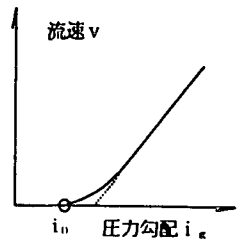
図-7 空気流量 q と圧力 p_g の実験的關係
(Fig-7 Experimental Relationships between Gas Flow Rate q and Pressure p_g)



(a) 透気圧による含水変化



(b) 透気パイプモデル



(c) 透気の $v-i_g$ 関係

図-8 岩石の透気における含水変化、透気パイプモデル及び透気流量 v と圧力勾配 i_g の関係
(Fig-8 Transition of Water Content, Pipe Models in Gas Seepage, and Relationship between Seepage Velocity v and Pressure Gradient i_g)

下端のメニスカスの曲率半径、 r_1 、 r_2 は岩石の間隙寸法程度である。従って、この力学関係を崩すために必要な透気載荷圧力が始動圧力以上の値が必要となる。これは、載荷空気圧を増加させても完全に間隙水を排除できず、その透気有効間隙率が空気

圧に比例して増えないためと考えられる。

むすび

ある建設プロジェクトを実現するためには技術アセスメントを公にし、予めいくつかの開発許可を得る必要がある。岩盤タンクによる燃料備蓄の場合、貯蔵燃料の漏気・漏液を確保するために水封機能がその前提でもあり、かつ必要でもある。それには岩盤タンク直上における安全な水封地下水位（水頭）の確保、言い換えれば、経済的な岩盤タンクの深さ（土被り）が不可欠である。過去の経験から、油類は常圧貯蔵であり、貯油の受入れ・払い出し（操業）の安全のため、余裕（安全）水位を加味する程度でよいと考えられた。一方、液化ガスの場合は、ガスの種類により異なるが、LPGでは封入圧力7kgf/cm²～10kgf/cm²に相当する地下水深（70m～100m）に余裕・安全水深を加えて決められた。

さらに、電力需要の平準化に利用されるCAESの場合、封入圧力は80kgf/cm²程度と高く、漏気に対処し得る機密性が求められる事はもちろんであるが、封入空気の出し入れによる温度変化と湧水のフラッシュ蒸発・凝結にも気配りがいる。

本研究は、これまで曖昧であった水封機能とその考え方について、水理学的立場より理論と実験を通してその要点を明かにした。その結果は、以下のよう要約される。

- ①岩盤タンクの水封は漏気（漏液）に対し、hydrostatic and surface tension barrier（静水圧・表面張力バリアー）とground water barrier（地下水バリアー）の2つに分けて考える事ができる。
- ②静水圧・表面張力バリアーのもつ水封は、封入ガス圧に対抗する地下水圧と岩盤タンク壁における水とガス間の表面張力の2つにより機能する。
- ③岩盤タンク壁からのガス侵入は、稼働率 $m = K_1 \mu_2 / K_2 \mu_1 > 1$ （ K, μ ：各々固有浸透係数、粘性係数、添字1、2：各々侵入・排除流体）で加速過程にある。
- ④岩盤地山の岩石（質）の透気は、岩石中の孔隙中が飽和もしくは湿潤状態で透気始動動水勾配をもち、透気係数は乾燥状態のそれに比べ5%～30%に減少する。

⑤岩盤タンク壁の空隙・割れ目から地山に離脱したガス（気泡）は重力、表面張力及び抵抗を受けつつ、上方へ体積変化を起こしつつ上昇する。上昇を抑止できる限界動水勾配が存在する。

最後に、これまでである程度共通して採用された水封方式による岩盤タンク設計限界水位は、本論で導入した（仮称）地下水バリアーと表面張力バリアーの概念を曖昧にしたまま、かなり安全側の決め方であったといえよう。

謝辞

本研究を進めるに当たって、岩石の透気試験と漏気実験は埼玉大学工学部地盤水理実験施設で行われたが、単一開口割れ目中の気泡上昇実験の一部は、トゥールーズ工科大学、C. N. R. S.、流体力学研究所（IMFT）のデータである。本論は筆者の1人がフランス文部省の助成により平成7年5月から約2カ月、同研究所に滞在中の研究成果の一部をまとめたものである。その際、フランス石油研究所（Institut Francais du Petrole）、Francois Kalaydjian部長、油田工学部（Reservoir Engineering Department）、Dr. O. Vizika氏、及びDr. R. Lenormand氏から有益な指示をいただいた。

ここに、記してフランス文部省及びフランス石油研究所の関係者各位にお礼申し上げます。

参考文献・資料

- 1) Japan National Oil Corporation : Petroleum Stockpiling in Japan, pp.1-17, 1994
- 2) Japan National Oil Corporation : LPG Underground Storage Method Testing, pp.1-9, 1993
- 3) Bengt Aberg: Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock, Proc. Rock Store '77, Vol.2, pp.175-189, 1977
- 4) Bengt Aberg: Pressure distribution around stationary gas bubbles in water saturated rock fractures, Proc. Int. Conference on Storage of Gas in rock Caverns, Trondheim, Norway, pp.77-86, 1989
- 5) K. Miyashita & K. Sato : An experimental study of two-phases flow of air and water in the jointed model, Proc. Soil and Foundation, Vol. 24, No. 4, pp.155-162, Dec., 1984(in Japanese)

- 6) K. Nakagawa, H. Komata, K. Miyashita & M. Kurata : Prevention of leakage of compressed air stored in unlined rock caverns, Proc. JSCE, Vol. 370/III-5, pp.233-241, 1986
- 7) T. Sakaguchi, Y. Ito, K. Sato & T. Shimizu : Fundamental study of gas seepage in rock and open-crack, Proc. of Japan Society of Civil Engineers(JSCE), No. 445III-18, pp.17-25, 1992
- 8) Japan National Oil Corporation : Report of LPG Stock Piling Technology, pp.1-194, March, 1990
- 9) Dames & Moore Pty Ltd. : Environmental Impact Statement-Moileux Facility-LPG Storage, Sydney, Australia, pp.1-385, 1992
- 10) Robert A. Greenkorn : Flow Phenomena in Porous Media-Fundamentals and Application in Petroleum, Water and Food Production, Marcel Dekker, INC, 1983, pp 164-177
- 11) D. A. Nield & Adrian Bejan : Convection in Porous Media, Springer-Verlag, 1992
- 12) Van P. Carrey : Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena-An introduction to the thermo-physics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment, Series in Chemical and Mechanical Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, 1992, pp. 1~645
- 13) R. Byron Bird, Warren E. Stewart & Edwin N. Lightfoot : Transport Phenomena, John-Wiley & Sons, Inc, 1960