水封設計における気密条件に関する実験研究

西本 吉伸 1* · 長谷川 登 2 · 西垣 誠 3

¹ 電源開発株式会社 土木建築部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6丁目15-1) ²株式会社開発設計コンサルタント 土木事業本部 (〒101-0021 東京都千代田区外神田2丁目16-2) ³岡山大学大学院 環境学研究科 (〒700-8530岡山市北区津島中3丁目1-1) *E-mail: yos_nishi@jpower.co.jp

地下水を利用した水封技術による圧力を有した気体や液体を地下空洞に貯蔵する技術は、合理的で経済 的な貯蔵技術であり、国内において原油及び石油ガスの地下備蓄プロジェクトに適用されている.水封設 計を行う際の設計基準として動水勾配をインデックスとして用いられる場合が多いが、統一的な基準が存 在するわけではない.

筆者らは、実際に気密性が確保される条件がどの程度となれば良いのか、その概要を把握すべく、岩盤の割れ目をガラス平行平板により模擬し実験的検討を行い、浮力、毛管圧力、抗力の効果を考慮して考察 を行った.

Key Words : cavern tank, gas-tightness, hydraulic gradient, buoyancy, capillary pressure, drag

1. はじめに

水封式岩盤貯蔵システムは、地下水が豊富に分布する 岩盤内に設けた岩盤空洞を利用し、気体や液体を貯蔵す る技術であり、水に溶解しにくい石油類の貯蔵に適用さ れ、日本でも原油及び石油ガスの国家戦略備蓄に利用さ れている.

水封技術は高価なライニング構造を必要とせず,岩盤 空洞と地下水で気密を確保するため,地質や水理条件さ え適合すれば,非常に合理的な貯蔵システムである.

水封設計における気密・液密保持条件については、既 に多くの研究が実施されているものの、一般的な設計基 準が確立されているわけではなく、国内における水封式 岩盤貯蔵技術の適用においても、多くの調査検討^{1,2,3}に 基づき設計が進められてきた.

水封設計の気密保持条件として、国内のプロジェクト においては動水勾配がインデックスとして用いられ、原 油貯蔵においては動水勾配0.8以上、石油ガス備蓄にお いては動水勾配0.5以上とされている.

筆者らは動水勾配が作用している地下水で満たされた 岩盤内において、どのように気密性が確保されるかを確 認するために、ガラス等の平行平板で模擬した実験を行 い気密保持条件の確認を行った.また気密保持条件につ いて浮力、毛管圧力、抗力の関係についてその効果を検 討した.本稿ではその内容を概説する.

2. 水封システムにおける気密性保持の考え方

(1) 岩盤割れ目における漏気メカニズム

岩盤空洞に貯蔵された気体が、岩盤の割れ目に沿って 漏えいして行く概念を図-1のように考えた.

<a>はガス圧力と、岩盤割れ目内の地下水圧及び毛管 圧力が吊り合っている状況でありガスは岩盤空洞内部に 留まる状態である.

はガスが岩盤割れ目の地下水を押しのけ岩盤割れ 目内にガスが浸入する状況である.

<c>はが進行し、ガスが岩盤割れ目内で独立した気 泡となり存在する状況である.



図-1 岩盤内割れ目におけるガスの漏えい概念

気密性という点では、気密性という点では、気密性という点では、気密性という点では、気密に示す状態が維持できれることが望ましいが、実際には空洞掘削工事中に、空洞周辺の岩盤はゆるみ、地下水は岩盤空洞内に湧出し多少の不飽和域が形成されると考えられる。その状態でガスを貯蔵すると、なのような状態ではなく、な>や<<p>の状態になることが想定される。気密性保持上において重要なことは、なっや<<p>マンの状態になっても、それ以上先にガスが浸出して行かないことであり、その状態が保持できればガスの漏えいは発生しないものといえる。

は、ガス圧が漏えい力になり、地下水圧と岩盤割れ目との接触により生じる毛管圧力の効果を加えたものが抑制力となり、後者が大きければ、ガスと地下水の界面の進行は抑制できる.すなわち少なくとも動水勾配が0以上あれば、毛管圧力の効果分が余裕となり気密性が保持されると考えられる.

<こ>では、ガスの浮力が漏えい力となり、岩盤割れ目との接触により生じる毛管圧力と、地下水の流れによってもたらされる抗力が抑止力になり、既往研究^{4,5}においても、浮力、毛管圧力、抗力が気密性保持の条件に寄与すると考えられる.

(2) 気密保持条件の考え方

ガスの気泡に作用する,浮力Fb,毛管圧力Fc,及び 抗力Fdの概念を図-2に示す.式(1)に示すように浮力に対 して,毛管圧力と抗力の合計が勝っていれば気泡は浮上 しないものと考えた.

$$Fb \leq Fc + Fd \tag{1}$$

浮力Fbは、気泡が概ね円盤状であれば式(2)のように示される.

$$Fb = (\rho_w - \rho_a)g \times \pi r^2 t \tag{2}$$

毛管圧力Fcは、表面張力によりもたらされるが、気 泡の移動を阻止する方向に作用する受動成分Fcpと、そ の反対に浮上を促進する方向に作用する 主動成分Fcaがあるため、両者の差が毛 (7) 管圧力による効果となり、平行平板では表面張力とメニ スカスの角度から式(3.1)~(3.3)のように表現される.

$$Fc = Fc_p - Fc_a$$

$$Fc_p = 2T \, r \cdot \cos\theta_p \, \int_0^{\pi} \sin\phi \cdot \, d\phi \qquad (3.2)$$

$$Fc_a = 2T \ r \cdot \cos\theta_a \int_{\pi}^{0} \sin\phi \cdot d\phi \qquad (3.3)$$

抗力Fdは、流体中の気泡の相対移動速度Vの2乗に比例し、抗力係数と気泡の投影面積の関係から、式(4)のように示される.

$$Fd = \frac{1}{2}\rho_a V^2 SC_D$$

ここに

ρ_n: 水の密度
ρ_a: 気泡の密度
g: 重力加速度 (m/s²)
r: 気泡半径 (m)
t: スリット幅 (m)
Fc_p: 受動毛管圧力 (N/m)
Fc_p: 受動毛管圧力 (N/m)
θ_p: 受動メニスカス角度 (deg)
θ_a: 主動メニスカス角度 (deg)
7: 表面張力 0.0728N/m @20°C
φ: 表面張力の作用方向
C_D: 抗力係数
V: 気泡浮上速度 (m/s)
S: 気泡投影面積 (m²)



図-2 平行平板における気泡に作用する成分

3. 平行平板による実験

(1) 実験概要

浮力,毛管圧力,及び抗力の関係を確認するために一 連の実験を行った.

まず基礎実験として毛管圧力確認実験を行った.ガラ ス平行平板における毛管上昇高さから毛管圧力を確認す るものである.

次に気密条件を確認するための平行平板実験装置を用 いた実験を行った.最初に静止水中における気泡挙動実 験を,次に動水勾配を付与した平行平板における気泡挙 動実験を行った.

(2) 実験装置概要

実験装置の概要は図-3に示すとおりであり、長さ 30cm×幅10cm×厚さ2cmのガラス平行平板を供試体とした.平行平板の間隔(以下「スリット幅」)は薄いスペーサーを挟み設定した.スリット幅については水理学的 開口幅を確認するため、予め透水試験を行い、スペーサ ーで設定したスリット幅と水理学的開口幅の差異を確認 した.

平行平板の側面及び上下面はコーキング材で止水し, 平行平板の上下端には通水パイプを設け,それぞれ異な るヘッドタンクに接続した.平行平板の中央部にピンホ ールを設け,注射針等から気体を注入できるようにした.

静止水中の実験では上下のヘッドタンクを同一高さに 設定し,動水勾配を作用させる実験においては,ヘッド タンクの位置を変えて実施した.

なお基礎実験となる毛管圧力実験では、長さ20cm× 幅10cmの小さなガラス平行平板を利用した.

(3) 毛管圧力確認実験

平行平板における毛管圧力については、メニスカスの 角度と表面張力により算定される.表面張力は水の物性 値として既知であるが、メニスカスの角度は接触する材 料や状態により異なる.平行平板での毛管上昇高さ実験 を行った.

メニスカスの角度は、水の移動方向により異なるため、 底面から水を毛管圧で吸水する過程 (Active process) と、 平行平板を水で満たした状態から排水する過程 (Passive process) の2通りの条件にて実施した.実験概要を図-4 に、また実験結果を図-5に示す.排水過程の毛管上昇高 さが、吸水過程のものより高い結果となる.平行平板の 間隔が狭くなるほど、毛管上昇高さ自体は大きくなり、 また排水過程及び給水過程における差も大きくなる.

(4) 静止水中における気泡挙動実験

前節の実験結果に基づき、気泡の浮力と毛管圧力の関



図-3 平行平板の実験装置概要



図-4 毛管上昇高さ実験の概念



係における気密保持状態を確認した.平行平板内の気泡 には浮力が作用するが、気泡周囲に作用する表面張力に より気泡は滞留し、浮力が大きくなり表面張力のみで浮 上を抑制できなくなると気泡は浮上を始める.毛管上昇 高さの測定実験結果から得られた、受動及び主動毛管圧 力に基づき、平行平板内の円形気泡に作用する毛管圧力

図-6に浮力と毛管圧力の算定結果を示す.スリット幅 を50,100,200,500 µmとし気泡径を1~100mmとした条件 での浮力と毛管圧力の算定結果である.浮力が毛管圧力

と浮力の関係を求めた.

より大きくなる条件で気泡は浮上することとなる.スリット幅が狭い場合は気泡は浮上しにくく,スリット幅が 広いと気泡径は浮上しやすくなる.

図-7には平行平板に気泡を注入し気泡の浮上速度を確認した結果を示す.気泡の注入は手作業によって行ったため、微妙な調整が難しく実験ケースにより気泡の大きさが異なってしまったが、挙動を確認できたケースのみ記載している.この結果によると、明瞭に気泡が浮上しているグループと、ほとんど動きのないグループに分けられる.スリット幅毎の結果は以下のとおりである.

スリット幅100μmのケースでは15 mm程度の気泡を注 入したが浮上しなかった.スリット幅200μmのケース では気泡径20 mmまでは概ね滞留するが,気泡径が30 mm以上になると浮上した.スリット幅300μmのケース では気泡径12 mm以下のケースであるが滞留する結果と なった.スリット幅500μmのケースでは気泡は10 mm以 下のものだけであったが,いずれも浮上する結果となっ た.

以上を図-6で理論的に算定した結果と比較すると、実際の気泡挙動は概ね整合が取れていることが確認できた.



図-6 気泡に作用する浮力と毛管圧力



図-7 静止水中における気泡挙動実験結果

気泡の形状と毛管圧力がある程度正しく把握することが できれば、気泡が浮上する条件についてはある程度の精 度で推定可能であるといえる.

開口幅の広い不連続面を有する状態は毛管圧力の効果 が小さく、水封設計上望ましくない条件であるというこ とがわかる.開口割れ目をできるだけ含まないような地 質の選定が重要であり、またその存在が想定される場合 にはグラウト注入等の処理により開口割れ目幅を狭める ことが重要と考えられる.

(5) 動水勾配が作用する場合の気泡挙動実験

動水勾配を作用した岩盤の割れ目では地下水流が生じ、 地下水流から気泡が受ける抗力も浮力抑止効果として作 用すると考えられる.

平行平板の実験装置において、ヘッドタンクの位置を 変え動水勾配を作用させ流れを作り、その中の気泡の動 きを確認した.気泡直径は、1,3,8mmとし、スリット幅 を100,200,300,500µmの条件として実施した.図-8は実 験結果を示したものであり、○は気泡が上昇しだす限界 (上昇限界)であり、●は気泡が下降しだす限界(下降 限界)を示している.

気泡が浮上する条件は上昇限界に着目すればよく,ス リット幅が500 µmで気泡径が8mmの場合に,下向きに 動水勾配が0.2程度となった時に浮上が確認されている.

この実験では浮上する条件と下降する条件の両方を行 っているが、スリット幅が広くなり気泡が大きくなると 移動しやすくなり、両者に挟まれた部分では気泡はスリ ット内に留まっている状態であり、スリット幅が狭い場 合には大きな動水勾配が作用しても、気泡は移動しにく い結果となる.

(6) 抗力の検討

次に実験結果に基づき,抗力についての検討を行った. 抗力は,式(4)に示したように,流速に抗力係数Coを乗



図-8 動水勾配が作用した平行平板中におけ る気泡が移動する動水勾配

じて得られるものである.しかし抗力係数は気泡の形状 や流速条件によりさまざまな値を取ることとなり抗力の 評価は容易に行うことはできない.このため,動水勾配 を作用させた平行平板実験において,気泡が上昇する限 界となる条件から,前節の実験で得られた,静止水中に おける気泡の浮上速度に基づき抗力の評価を行った.

式(5)のとおり,浮力,毛管圧力及び抗力が吊り合う 条件に基づき,気泡を円盤形と仮定し,気泡が平行平板 内を浮上し始める条件として,スリット幅,気泡径,平 行平板内水の流速を考慮することにより,抗力係数を式 (6)のように示すことができる.式(6)に静止水中におけ る気泡浮上速度及び気泡径,スリット幅の条件を代入す ることにより抗力係数が算定される.

$$Fb = Fc + Fd \tag{5}$$

$$C_{d} = \frac{(\rho_{w} - \rho_{a})g \times \pi r^{2}t - 4T(\cos\theta_{a} - \cos\theta_{p})r}{\rho_{w}V^{2} \times rt}$$
(6)

流体中の粒子や気泡においては、抗力係数はレイノル ズ数との関係で示されることから、レイノルズ数を式 (7)のように定義し、気泡が移動しだす条件におけるパ ラメータを代入し、レイノルズ数と抗力係数の関係を求 めた.その結果を図-9に示す.

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} \left(\frac{t}{d}\right)^2 = \frac{Vt^2}{2r\nu} \tag{7}$$

ここに

Re:	レイノルズ数
V:	気泡と水の相対速度
<i>d</i> :	気泡直径2r
v:	水の動粘性係数

両者の関係は両対数軸上において概ね直線で表現されることから、実験を行った条件においては、この関係を 維持しているものと考えられる.両者の関係は回帰式で 表すと式(8)のようになる.

$$C_D = 89.2 \, R_e^{-1.256} \tag{8}$$

以上より、レイノルズ数の関数で求めた抗力係数により気泡に作用する抗力を求め、改めて浮力と表面張力と 抗力の関係から、この実験における気泡が浮上しない条件、すなわち気密性保持条件を整理したものが図-10で ある.

図-10の横軸は気泡径であり、縦軸は抑制力となる毛



図-9 レイノルズ数と抗力係数の関係



管圧力力と抗力の合計を、漏気の原因となる浮力成分で 除したものであり、安全率に相当する値である.縦軸の 値が1を下回る範囲では浮力が勝ることとなり、気密性 が保持できなくなる状態を示す.この結果は動水勾配が 作用した実験結果である図-8のものと、概ね整合してい るように見える.

気泡径については100mm以下の範囲で算定したが、同

ー動水勾配,同一スリット幅においては,気泡径による 相違はそれほど大きくないように見える.

スリット幅については, 50~2000 μ mの範囲で算定し たが, スリット幅が広くなるにつれ気密条件は厳しくな ることが確認された.

動水勾配については、動水勾配が0.5であればスリット幅が1000 μ m以下であれば漏気は生じない結果となる.

6. 結論

以上の一連の実験により,ガラス平行平板を用いた理 想化された条件での実験ではあるが,静止水中の実験結 果から,浮力,毛管圧力及び抗力が把握できれば,気密 保持効果は評価できる可能性があることが確認できた.

浮力及び毛管圧力は、静止水中の気泡挙動試験から、 気泡形状や割れ目幅が確認できれば概ね適正に把握する ことが確認できた.

抗力については、静止水中の気泡の浮上速度に基づき 抗力係数を設定を試みたが、実験条件の範囲ではレイノ ルズ数と抗力係数は良好な相関が確認でき、概ね適切に 抗力を評価することができたと考える.

浮力,毛管圧力及び抗力の関係から,気密保持条件を, 力の吊り合いから理論的に推定したが,動水勾配が作用 する平行平板内における気泡の気密性確認試験結果と概 ね一致する結果が得られ,浮力,毛管圧力及び抗力の関 係により気密保持条件を評価できる可能性が確認できた.

気密保持条件については、気泡径よりもスリット幅に よる影響が大きくなることが確認され、幅の広い開口割 れ目の存在は、水封式岩盤貯蔵システムにおいては適さ ないと考えられる.そのような視点から、広い割れ目が 存在するような岩盤に対してはグラウト注入等による対 処が重要であると考えられる.

気密保持条件として設定される動水勾配については, 実験条件により確定的なことは言えないが,大きな開口 割れ目の存在が無ければ0.5程度の動水勾配があれば十 分に気密性が保持できる可能性が確認された.

本実験は理想条件による基礎的ものである.実岩盤への適用においては、不確定要素をさらに考慮していく必要があるが、汎用的な気密条件の検討の一つのアプロー チであると考えらえれる.

謝辞:

本報告は、岩盤備蓄プロジェクト取組前に自社研究と して取り組んだ実験データを再整理し、今回とりまとめ たものである.実験データ自体は古いものであるが、貴 重な実験データであり、当時の実験担当者の努力に謝意 を示す.

参考文献

- Aberg, B., : Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservation in Rock: Storage in Excavated Rock Carverns, *Proc. of Rock Store* 77, *Stockholm, Sweden*, pp.399-414. 1977.
- 約田広也、中川加明一郎、北原義浩、林 正夫: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、土木学 会論文集、No.300、pp.69-80、1980.
- 3) 中川加明一郎,駒田広也,宮下国一郎,村田 満:岩盤内 圧縮空気貯蔵空洞からの漏気防止条件,土木学会論文集, No.370, pp.233-241, 1986.
- 大西外明,江原雅彦,森 竜馬,瀬間 浩二:狭いスリット内の水中における気泡上昇に関する水理的研究,土木学会論文集,No.691/II-57, pp.53-62, 2001.
- 5) 冨山昭男,細川茂雄,江原雅彦,宮永佳晴,川久保芳男, 木野戸広:狭平行平板内静止水中単-空気泡の終端速度と抗 力係数,混相流学会誌,Vol.10No.2, pp.146-153, 1996.

EXPERIMENTAL STUDY ON GAS-TIGHTNESS CONDITION USING PARALLEL GRASS PLATE

Yoshinobu NISHIMOTO, Noboru HASEGAWA, Makoto NISHIGAKI

The water sealing system applied for crude oil and petroleum gas storage in mined cavern is a rational and economical storage technology by utilizing the groundwater. Design criteria of gas-tightness on water sealing system is often shown as hydraulic gradient, but the criteria is not always general.

In order to ensure the gas-tightness condition shown by the hydraulic gradient, authers implemented the experiments using glass parallel plates simulating actual rock joint, and confirmed the relationship between capillary pressure, buoyancy and drag on gas-tightness condition.