

岩盤内圧縮空気貯蔵空洞からの漏気防止条件

PREVENTION OF LEAKAGE OF COMPRESSED AIR STORED IN UNLINED ROCK CAVERNS

中川加明一郎*・駒田広也**・宮下国一郎***・村田 満****
 By Kameichiro NAKAGAWA, Hiroya KOMADA, Kuniichiro MIYASHITA
 and Mitsuru MURATA

In this study experimental examinations were carried out in order to investigate the ground water condition to prevent the leakage of the compressed air from an unlined rock cavern as energy storage. As a result it was affirmed that the compressed air can be stored if the air pressure is lower than hydrostatic pressure around the unlined cavern, or, if the ground water flows with positive hydraulic gradient normal to the surface of the cavern. The finite element analysis, derived from the concept of the gas-liquid two phase flow in the ground, applied to the investigation. The results reaffirmed the condition above mentioned and indicated that the numerical procedure proposed here is an effective tool to estimate the leakage of the air or gases from the storage caverns in the field.

1. 序 論

電力の安定供給にとってピーク負荷対応は重要な課題の1つである。これまでわが国のピーク負荷対応は主として揚水発電によっているが、岩盤内圧縮空気貯蔵(概略をFig.1に示す)も大規模電力貯蔵システムとして有効であると考えられる。

圧縮空気貯蔵を無覆工の岩盤空洞内に貯蔵しようとする場合、空気の漏洩防止が発電効率の点から重要な検討事項となる。これまでに、無覆工空洞からの漏気防止対策について、地下水面下に空洞を設けて地下水流を利用して漏気を防止する方法(水封式)が、水封式燃料地下貯蔵技術の確立を目的として検討されてきている¹⁾。この水封式における漏気防止条件としては、Aberg²⁾が提案した、「空洞周辺における地下水の流れの鉛直動水勾配が1以上であること」が採用されている。しかし、この条件を満足するためには、貯蔵用空洞を非常に深くす

るか、あるいは、空洞直上に水封用のトンネルやボーリング孔を設置し、注水する必要があるなど、必ずしも経済的でない場合も生じる。そこで、本報告では、水封式による岩盤内圧縮空気貯蔵に関し、模擬岩盤亀裂を用いた実験および無覆工空洞モデルを用いた圧縮空気貯蔵のモデル実験を実施し、新たに漏気防止条件を検討した結果を述べることにする。さらに、岩盤内の空気および水の挙動を同時に考慮できる気液二相流解析を、実規模空洞での圧縮空気貯蔵における漏気量の算定に適用するこ

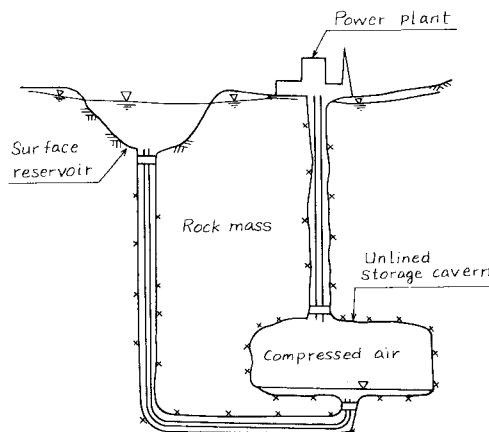


Fig. 1 General idea of compressed air storage.

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木研究所地盤構造研究室(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所土質基礎研究室長(同上)

*** 正会員 工修 清水建設株式会社エンジニアリング事業本部ロックエンジニアリング部(〒108 港区三田3-13-16)

**** 正会員 工修 (株)開発計算センターシステム第5部(〒100 千代田区丸の内1-8-2)

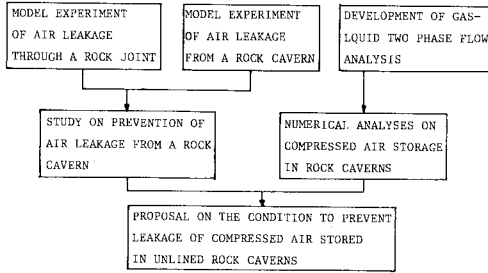


Fig.2 Flow chart of this study on the prevention of air leakage from unlined reservoirs in rock.

とにより、漏気防止条件を検討した結果について述べるものとする(なお、本報告の構成フローを Fig.2 に示す)。

2. 漏気防止条件の実験的検討

(1) 模擬岩盤亀裂による実験³⁾

a) 実験装置、方法

空洞壁面から岩盤亀裂への気体の侵入を防止する条件を検討するために用いた実験装置の概略を Fig.3 に示す。模擬岩盤亀裂 (Fig.4) は、約 1 mm のスペーサーをアクリル材によりはさんで作成したものであり、下端には空洞壁面の凹凸の影響を考慮するために角度 α の切欠きを設けた。ただし、 α は 30° 、 60° 、 90° および 120° とした。下端に切欠きのないものは $\alpha=180^\circ$ とし表わすことにした。模擬岩盤亀裂の上部および下部のそれぞれの空洞は外部の水槽と連結してあり、亀裂の上、下部間に所定の水頭差を与えることができたようにした。また亀裂の上、下部の圧力を、圧力変換器により測定した。なお、模擬岩盤亀裂内の流量と水位差とは直線関係にあり、亀裂内の流れは層流であった。

実験の手順として、まず、亀裂の上下間に十分な水頭

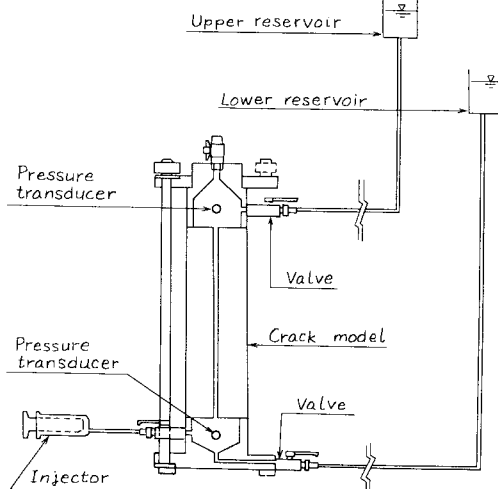


Fig.3 Layout of experiment apparatus.

差を与えた状態で下部空洞内に空気を注入した。次に、上下部間の水頭差を徐々に減少させてゆき、漏気にいたるまで、亀裂の上下における圧力および亀裂内の流量を測定した。また同時に、亀裂の入口でのメニスカス (水と空気の境界) の状態の観察と写真撮影を行った。

b) 実験結果と考察

模擬岩盤亀裂の上下間の水頭差を徐々に減少させてゆくと、亀裂下端部の切欠きの一部にメニスカスが発生した (Fig.5 (a))。さらに水頭差を減少させるとメニスカスは切欠きより亀裂内に進展してゆき (Fig.5 (b), (c))、最終的には封入されていた空気が下部空洞より漏気した。

実験結果として得られた漏気の生じる直前の亀裂上部の水圧 P_u と下部の貯蔵空気圧 P_a とを Table 1 に示す。この結果より切欠き頂部での静水圧 P_{ws} と空気圧 P_a との関係調べてみる。ただし切欠き頂部での静水圧 P_{ws} は亀裂上部での水圧 P_u に、切欠き頂部より上方の亀裂の長さ L ($=50$ cm) に相当する静水圧を加えたものである。すなわち、 $P_{ws}=P_u+\rho_w \cdot g \cdot L$ として計算される。ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力の加速度である。 P_{ws} も Table 1 に同時に示した。Table 1 から、いずれの切欠き角度 α に対しても、漏気防止の限界状態では貯蔵空気圧 P_a は静水圧 P_{ws} にほぼ等しくなることがわか

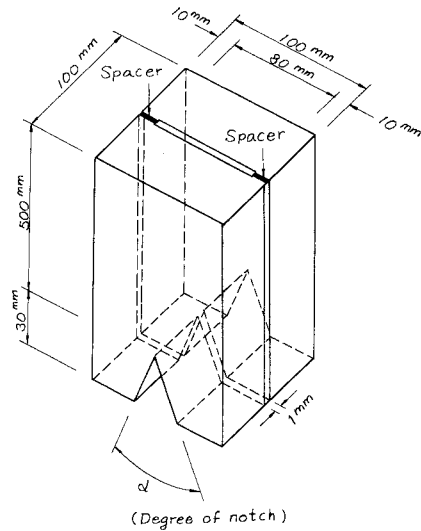


Fig.4 Acrylic crack model.

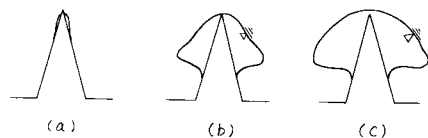


Fig.5 Process of air penetration into the crack from the notch.

る。またこれより漏気防止の限界動水勾配 I_n は $I_n=0$ であったことがわかる。以上のことより、無覆工空洞からの漏気防止条件が、「貯蔵空気圧が空洞壁面の静水圧より小さいこと、あるいは、岩盤亀裂内の動水勾配が空洞に流入する成分を有すること」となることが容易に推定される。また、壁面の凹凸の影響を考慮するためには、不規則な壁面形状の最も外側を連ねた面をあらためて空洞壁面とみなし、ここで、以上の漏気防止条件を適用すればよい。

(2) 岩盤内圧縮空気貯蔵のモデル実験⁴⁾

Table 1 Critical pressures to prevent air penetration into the crack.

Degree of notch α (Deg)	Water pressure at the top of the crack P_u (kPa)	Stored air pressure P_a (kPa)	Estimated static water pressure P_{ws} (kPa)	P_{ws}/P_a
30	7.93	12.54	12.93	1.03
60	8.06	13.02	13.06	1.00
90	6.48	11.03	11.48	1.04
120	8.46	13.66	13.46	0.99
180	2.57	8.05	7.57	0.94

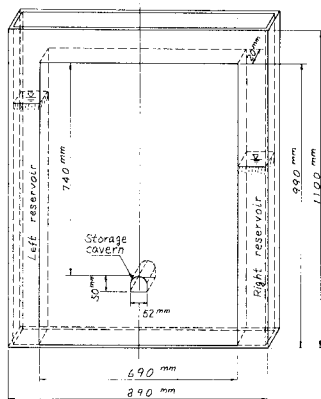


Fig. 6 Dimensions of model for compressed air storage.

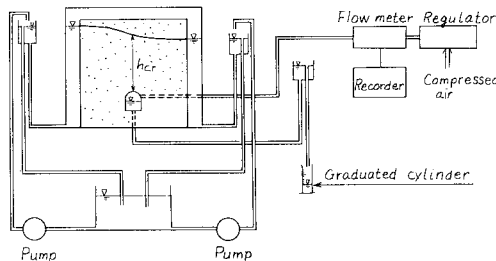


Fig. 7 Layout of apparatus for model experiment of air storage.

a) 実験装置、方法

次に、無覆工の岩盤内空洞に気体を貯蔵する際の漏気現象ならびに漏気防止条件をモデル実験により検討を加えた。実験に用いた岩盤空洞モデルの概略を Fig. 6 に、また、装置の構成を Fig. 7 に示す。岩盤空洞モデルは ABS 樹脂の粒を焼結し成形した合成樹脂製硬質多孔体（ダイセル化学工業（株）製パールコン）により作成したものである。このモデルの両側面の水頭値は外部の水槽の高さを調節することにより所定の値を保持できるようにした。空洞内には一定圧力の空気を送入できるようにし、送気量を流量計により読み取ることとした。また空洞内への湧水量もメスシリンダーにより読み取った。岩盤空洞モデルの前・後面には止水対策を十分に施し、アクリル板を密着させ、モデル内の気液境界面の観測も行った。実験に際しての左右の水頭値を Table 2 に示す。なおモデルには材質の異なる 3 種（B（製品名 BP-12）、C（BP-23）、D（BP-35））を用いた。各モデルの透水係数および透気係数を Table 3 に示す。

各実験ケースにおいて、まずモデルの両側面に所定の水位を与えて保持して貯蔵空洞内に空気を送入し、段階的に送入圧を上昇させた。そして、漏気を確認した後、段階的に送入圧を減少させ、漏気が停止した時点で実験を終了した。各段階において、気液境界面、空洞内湧水量および漏気量を測定し、定常状態になったことを確認してそのときの結果を記録した。なお実験中の室温は

Table 2 Test conditions.

Case No.	Total head (mm) ^{a)}	
	Left reservoir	Right reservoir
I	0	760
	1	700
	2	700
	3	500
II	1	500
	2	500
	3	400
	4	300
III	1	400
	2	400
	3	200
IV	1	300
	2	200
V	1	200

^{a)}Total head is 0 at the height of the crown of the cavern

Table 3 Permeabilities of materials.

Material	Water permeability (cm/sec)	Air permeability (cm/sec)
B	2.60×10^{-1}	4.77×10^{-1}
C	1.58×10^{-1}	4.72×10^{-1}
D	4.85×10^{-2}	4.42×10^{-1}

26°~30°Cであった。

b) 実験結果と考察

今回の実験で観測された自由水面形状のうち、B-I-1, D-I-1, D-I-4およびD-IV-1の結果を Fig. 8 に示す。いずれのケースにおいても、空洞内圧を大気圧より段階的に上昇させてゆくと、漏気が発生するまで自由水面は徐々に上方に移行していった。Fig. 8 は空洞内圧が大気圧の場合および漏気開始直前でのそれぞれの自由水面形状を示したものである。モデルの材質の相異としては、透水係数の大きい場合、透水係数の小さい材質のものに比べて自由水面は全体的に下方になる傾向があった。水分保持特性の差によるものであろう。

空洞から空気が漏洩する様子をモデルの前面の亚克力板を通しては、観測できなかった。漏気は流量計によ

り、また、モデルの上端あるいは側方の水槽内で連続的に発生する気泡の観察により確認できた。

Fig. 9 に D-I-1 および D-I-4 の場合の空洞内圧と空洞内への湧水量との関係を示した。また、Fig. 10 には空洞内圧と漏気量との関係を示した。空洞内の空気圧の上昇に伴い、湧水量はゼロになるまではほぼ直線的に減少することを Fig. 9 は示している。一方、空洞内の空気圧がある限界値以下であれば、漏気量がゼロであり空気の貯蔵ができることを Fig. 10 は示している。ただし、漏気の生じている状態から空洞内圧を減少させてゆく場合には、漏気量が昇圧過程におけるそれより大きくなること、そして、漏気の停止する空気圧は、漏気開始時の空気圧より小さくなるのが、実験結果よりわかった。以上のこれらの傾向は、モデルの材質あるいは左右の水

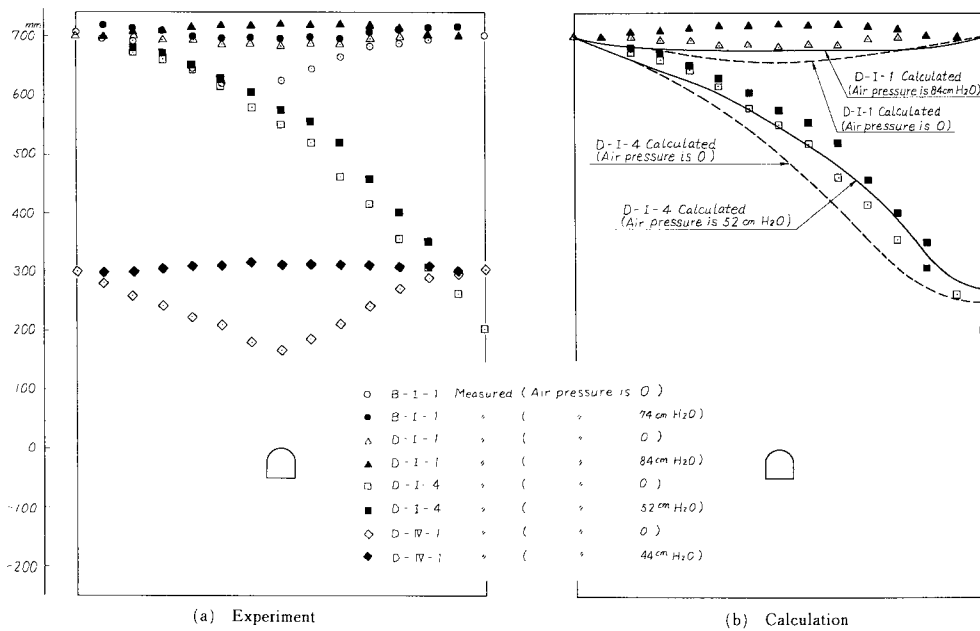


Fig. 8 Free surfaces of water.

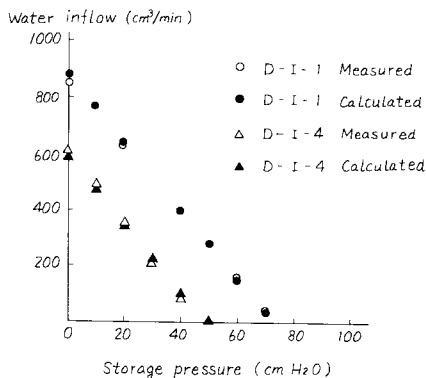


Fig. 9 Relations between water inflow and storage pressure.

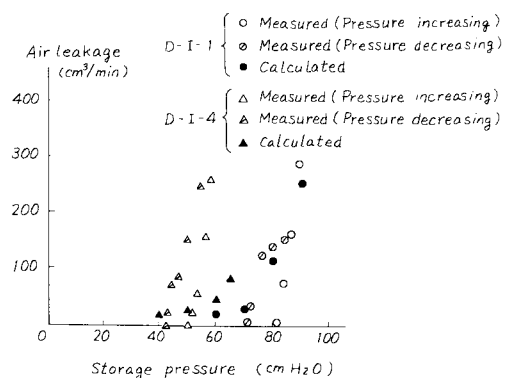


Fig. 10 Relations between air leakage and storage pressure.

Table 4 Critical hydraulic gradient.

Case No.	Material B		Material C		Material D		
	Pressure increasing	Pressure decreasing	Pressure increasing	Pressure decreasing	Pressure increasing	Pressure decreasing	
I	0	-0.053	0.000	-0.105	-0.079	-0.158	0.000
	1	-0.062	-0.007	-0.049	---	-0.155	0.013
	2	0.015	0.061	0.069	---	-0.139	0.056
	3	0.049	0.019	0.035	0.0086	-0.018	0.175
	4	0.226	0.108	0.078	0.176	0.133	0.287
II	1	-0.004	0.049	0.129	-0.025	-0.206	0.048
	2	0.022	0.141	0.087	-0.034	-0.228	0.060
	3	0.022	0.148	0.037	0.014	-0.152	0.021
	4	0.052	0.147	0.024	0.086	-0.090	0.163
	1	0.000	0.070	-0.130	-0.077	-0.253	0.014
III	2	-0.014	0.100	-0.129	-0.108	-0.252	0.016
	3	-0.012	0.138	-0.076	-0.094	-0.262	0.052
	1	-0.067	0.122	-0.136	-0.132	-0.350	0.128
IV	2	-0.028	0.071	-0.051	-0.077	-0.380	0.027
	V	1	-0.058	0.130	-0.185	-0.221	-0.256

頭値にかかわらず同様であった。

漏気開始時もしくは停止時の空洞内の空気圧を限界貯蔵圧 P_{cr} とし、これに対応する空洞直上の限界鉛直動水勾配 I_{cr} を次式により算出してみた。

$$I_{cr} = \frac{h_{cr} - (P_{cr} / \rho_w g)}{h_{cr}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h_{cr} は自由水面から空洞天端までの深さである。今回の実験結果から算出した I_{cr} を Table 4 に示す。なお、ここで求めた I_{cr} は、空洞周辺の厳密な鉛直動水勾配ではなく、空洞天端の鉛直線上の平均的な鉛直動水勾配の概略値である。Table 4 に示されるように求められた I_{cr} は $-0.4 \sim 0.3$ の範囲にあり、特に昇圧過程での漏気開始時に注目するとゼロの近傍に集中し、さらに、透水係数が小さいモデルでは負の値をとることが圧倒的に多くなる。このことは、地下水面下の空洞には、空洞天端の水深に相当する圧力まで昇圧しても、漏気なしに圧縮空気を貯蔵することが可能であることを示すものである。

(3) 漏気防止条件の提案

これまでの水封式燃料地下貯蔵の検討においては、空洞周辺の地下水の流れが 1 以上の鉛直動水勾配を有することを漏気防止の条件としてきた。この条件は、岩盤亀裂内にすでに存在する気泡が上昇しないための条件として、亀裂内の水の表面張力を無視して導かれたものである²⁾。これに対し、今回の実験結果は、この条件を満足しなくても、漏気の防止が可能であることを示している。すなわち、貯蔵された気体が空洞より周辺岩盤内に侵入することを阻止することをもって漏気防止とすれば、無覆工空洞からの漏気防止条件として、貯蔵気体圧 (P_a) が貯蔵用空洞天端での静水圧 (P_{ws}) より小さいこと

($P_a < P_{ws}$)、あるいは空洞周辺における地下水流が、空洞に流入する成分を有すること、が提案できる。

3. 気液二相解析による検討

(1) 有限要素法による気液二相解析手法の概略

地盤中の気体と液体の挙動を同時に表現でき、また、無覆工の貯蔵空洞からの漏気量を算定することを可能とする有限要素法による気液二相解析手法を開発した⁵⁾。

この解析手法の概略を以下に述べる。

地盤の間隙内の気液二相流の支配方程式は、ダルシー則と流体の連続式より以下のように導かれる⁶⁾ (なお、次式および以降の式では添字に関し、summation convention を適用する)。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\frac{K_{ra}}{\mu_a \beta_a} K_{ij} \left(\frac{\partial P_a}{\partial X_j} + \rho_a g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right. \\ & \left. + R_s \frac{K_{rw}}{\mu_w \beta_w} K_{ij} \left(\frac{\partial P_w}{\partial X_j} + \rho_w g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right] \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left[f \left(\frac{S_a}{\beta_a} + \frac{R_s S_w}{\beta_w} \right) \right] - q_a \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\frac{K_{rw}}{\mu_w \beta_w} K_{ij} \left(\frac{\partial P_w}{\partial X_j} + \rho_w g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right. \\ & \left. + R_v \frac{K_{ra}}{\mu_a \beta_a} K_{ij} \left(\frac{\partial P_a}{\partial X_j} + \rho_a g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right] \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left[f \left(\frac{S_w}{\beta_w} + \frac{R_v S_a}{\beta_a} \right) \right] - q_w \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 P_a 、 P_w は空気および水の圧力、 ρ_a 、 ρ_w は空気および水の密度、 μ_a 、 μ_w は空気および水の粘性係数、 β_a 、 β_w は空気および水の構成体積率、 K_{ra} 、 K_{rw} は空気および水の透過係数比、 K_{ij} は透過係数、 S_a 、 S_w は空気および水の飽和度、 R_s は空気の水中への融解率、 R_v は水の気化率、 q_a 、 q_w は空気および水の流入率、 f は間隙率、 g は重力の加速度、 X_i は座標 (X_3 は鉛直方向)、 t は時間を表わす。なお、ここでいう構成体積率 (β_a または β_w) とは、ある状態の体積 V の標準状態での体積 V_{sc} に対する比、すなわち、 $\beta = V / V_{sc}$ を意味するものである。また、 $K_{ij} / (\mu_w \rho_w g)$ は速度の次元をもつ通常の透水係数であり、透過係数は透水係数より計算される。飽和度 S_a 、 S_w は常に次式の関係にある。

$$S_a + S_w = 1 \dots\dots\dots (4)$$

サクシオン圧 P_c を

$$P_c = P_a - P_w \dots\dots\dots (5)$$

と定義し、サクシオン圧 P_c は水の飽和度 S_w の関数とする。さらに、構成体積率 β_a および β_w 、溶解率 R_s ならびに気化率 R_v が各相の圧力の関数であるとする。こうすることにより、支配方程式 (2) および (3) は、

各相の圧力 P_a および P_w を未知変数とする連立偏微分方程式として表わされることになる。 P_a , P_w を有限要素の節点の空気圧 P_a^k および P_w^k により,

$$P_a = N_k P_a^k, \quad P_w = N_k P_w^k \quad (k=1, \dots, m_a) \dots\dots\dots (6)$$

として離散化して近似し (ただし, N_k は形状関数, m_a は有限要素の節点数), Galerkin 法を適用することにより, 支配方程式の有限要素法による数値解法の基本式が以下のように得られる。

$$B_{mk}^{(a)} P_a^k + A_{mk}^{(a)} P_w^k + D_{mk}^{(a)} \left(\frac{\partial P_a^k}{\partial t} - \frac{\partial P_w^k}{\partial t} \right) + C_{mk}^{(a)} \frac{\partial P_a^k}{\partial t} + E_{mk}^{(a)} \frac{\partial P_w^k}{\partial t} = Q_m^{(a)} + G_m^{(a)} \dots\dots\dots (7)$$

$$B_{mk}^{(w)} P_w^k + A_{mk}^{(w)} P_a^k + D_{mk}^{(w)} \left(\frac{\partial P_a^k}{\partial t} - \frac{\partial P_w^k}{\partial t} \right) + C_{mk}^{(w)} \frac{\partial P_a^k}{\partial t} + E_{mk}^{(w)} \frac{\partial P_w^k}{\partial t} = Q_m^{(w)} + G_m^{(w)} \dots\dots\dots (8)$$

ここで

$$B_{mk}^{(a)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left(\lambda_a \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{ij} \frac{\partial N_k}{\partial X_j} \right) dV_\nu \dots\dots\dots (9)$$

$$A_{mk}^{(a)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left(R_s \lambda_w \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{ij} \frac{\partial N_k}{\partial X_j} \right) dV_\nu \dots\dots\dots (10)$$

$$D_{mk}^{(a)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left\{ f \left(-\frac{1}{\beta_w} + \frac{1}{\beta_w} R_s \right) S'_w N_m N_k \right\} dV_\nu \dots\dots\dots (11)$$

$$C_{mk}^{(a)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left\{ f (1 - S_w) \left(\frac{1}{\beta_a} \right)' N_m N_k \right\} dV_\nu \dots\dots\dots (12)$$

$$E_{mk}^{(a)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left\{ f S_w \left(R_s \left(\frac{1}{\beta_w} \right)' + R'_s \left(\frac{1}{\beta_w} \right) \right) N_m N_k \right\} dV_\nu \dots\dots\dots (13)$$

$$Q_m^{(a)} = \sum_{\nu=1}^N \left[\int_{V_\nu} (N_m q_a) dV_\nu + \int_{S_\nu} \left(N_m \frac{1}{\beta_a} \tilde{u}^{(a)} \right) dS_\nu + \int_{S'_\nu} \left(N_m R_s \frac{1}{\beta_w} \tilde{u}^{(w)} \right) dS'_\nu \right] \dots\dots\dots (14)$$

$$G_m^{(a)} = - \sum_{\nu=1}^N \left[\int_{V_\nu} \left(R_s \lambda_w \rho_w g \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{i3} \right) dV_\nu \right] \dots\dots\dots (15)$$

$$B_{mk}^{(w)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left(\lambda_w \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{ij} \frac{\partial N_k}{\partial X_j} \right) dV_\nu \dots\dots\dots (16)$$

$$A_{mk}^{(w)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left(R_v \lambda_a \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{ij} \frac{\partial N_k}{\partial X_j} \right) dV_\nu \dots\dots\dots (17)$$

$$D_{mk}^{(w)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left\{ f \left(-\frac{1}{\beta_w} + \frac{1}{\beta_a} R_v \right) S'_w N_m N_k \right\} dV_\nu \dots\dots\dots (18)$$

$$C_{mk}^{(w)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left\{ f \left(1 - S_w + R'_v \frac{1}{\beta_a} \right) N_m N_k \right\} dV_\nu \dots\dots\dots (19)$$

$$E_{mk}^{(w)} = \sum_{\nu=1}^N \int_{V_\nu} \left\{ f S_w \left(\frac{1}{\beta_w} \right)' N_m N_k \right\} dV_\nu \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_m^{(w)} = \sum_{\nu=1}^N \left[\int_{V_\nu} (N_m q_w) dV_\nu + \int_{S'_\nu} \left(N_m \frac{1}{\beta_w} \tilde{u}^{(w)} \right) dS'_\nu \right] \dots\dots\dots$$

$$+ \int_{S_\nu} \left(N_m R_v \frac{1}{\beta_a} \tilde{u}^{(a)} \right) dS_\nu \dots\dots\dots (21)$$

$$G_m^{(w)} = - \sum_{\nu=1}^N \left[\int_{V_\nu} \left(R_v \lambda_a \rho_a g \frac{\partial N_m}{\partial X_i} K_{i3} \right) dV_\nu \right] \dots\dots\dots (22)$$

ただし, $\lambda_a = K_{ra}/(\mu_a \beta_a)$, $\lambda_w = K_{rw}/(\mu_w \beta_w)$, $S'_w = dS_w/dP_c$, $(1/\beta_a)' = d(1/\beta_a)/dP_a$, $(1/\beta_w)' = d(1/\beta_w)/dP_w$, $R'_s = dR_s/dP_w$, $R'_v = dR_v/dP_a$, N は要素の総数, V_ν および S_ν は第 ν 番目の要素の体積および表面積, $\tilde{u}^{(a)}$ および $\tilde{u}^{(w)}$ は空気および水の流入量。

式 (7) および (8) は時間に関する微分を含んでいるが, 時間に関して差分近似することにより, P_a^k および P_w^k について解くことができる。

境界条件は圧力 (既知の水圧 \tilde{P}_w および 空気圧 \tilde{P}_a) またはフラックス ($\tilde{u}^{(w)}$ および $\tilde{u}^{(a)}$) で与えられる。ただし, 浸出点の現われる境界としては2通りが考えられる。すなわち, 気体 (空気) の占める境界に液体 (水) が浸出する場合と, 逆に, 液体の占める境界に気体が浸出する場合である (Fig. 11)。前者の境界では, $[P_a = \tilde{P}_a, P_a - P_w > P_{cc}, u_w = 0]$ の条件が適用される領域 (Fig. 11 の A) と, $[P_a = \tilde{P}_a, P_w = \tilde{P}_a - P_{cc}, u_w > 0]$ の条件が適用される領域 (Fig. 11 の B) がある。また後者の境界では, $[P_w = \tilde{P}_w, P_a - P_w < P_{cc}, u_a = 0]$ の条件の領域 (Fig. 11 の A') と, $[P_w = \tilde{P}_w, P_a = \tilde{P}_w + P_{cc}, u_a > 0]$ の条件の領域 (Fig. 11 の B') とがある。なお, P_{cc} は間隙における水の飽和度が飽和から不飽和に変わるところの毛管圧 (サクション圧) である。

(2) 手法の妥当性の検討

a) 浸透流解析との比較

地盤中の浸透流挙動を気液二相流の特別な場合として Fig. 12 に示すモデルについて, 二次元の浸透流解析と二相流解析とを実施し, 比較することとした。

入力物性値のうち, 飽和透水係数を $K_w = 1 \times 10^{-4}$ cm/s, 間隙率 $f = 0.3$ とした。また, 気温が 10°C であるとして, 空気の粘性係数 $\mu_a = 1.76 \times 10^{-5}$ kg/m/s, 水の粘性係数 $\mu_w = 1.307 \times 10^{-3}$ kg/m/s, 空気の密度 $\rho_a = 1.247$ kg/m³, 水の密度 $\rho_w = 999.7$ kg/m³ とする。また, 空気の構成体積率は 0°C , 1 atm (絶対圧) を基準状態とし, ポイル・シャルルの法則より, $\beta = (1/P_a) \cdot (273.15 + 10)/273.15$ として求められる。ただし空気圧 P_a の単

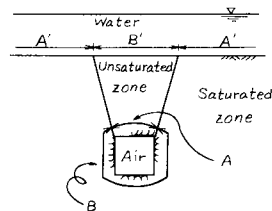


Fig. 11 Types of boundary conditions.

位は atm であり、絶対圧である。水については非圧縮とし、 $\beta_w=1$ とした。溶解率および気化率はここでは考えなかった。不飽和透過係数比および毛管圧特性は Fig. 13 および Fig. 14 に示すもの⁶⁾を用いた。

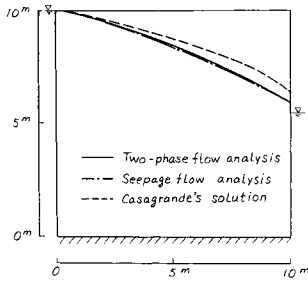


Fig. 12 Comparison between two-phase flow analysis and seepage flow analysis.

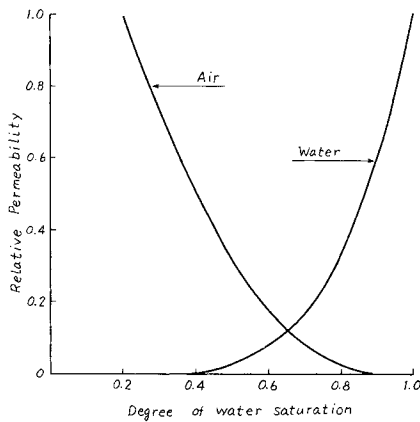


Fig. 13 Relative permeability characteristics for air-water system.

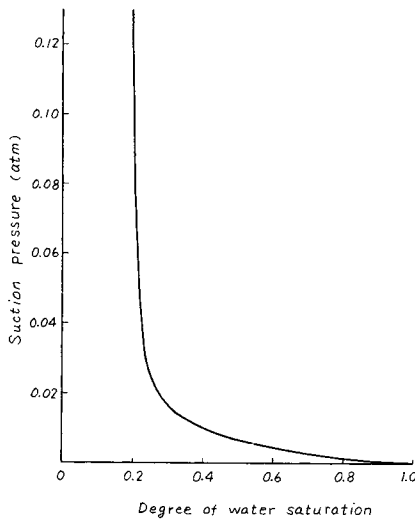


Fig. 14 Capillary pressure characteristics for air-water system.

解析結果を Fig. 12 に示す。両者の結果にはよい一致がみられ、気液二相流解析手法の妥当性が確認されたと判断した。

b) モデル実験の解析

先の 2. (2) のモデル実験の解析に今回の気液二相流解析を適用した。ただし、解析の対象としては、実験ケースのうち、D-I-1 と D-I-4 とした。

入力物性値のうち、飽和透水係数 K_w は Table 3 に示したものである。毛管圧特性は、加圧板法により得られた、飽和度とサクシヨンの関係 (Fig. 15) を用いた。水に関する相対透過係数比は不飽和透水試験により、飽和度と透水係数比との関係として得られたものを用いた (Fig. 16)。水の粘性係数は $\mu_w=1.307 \times 10^{-3}$ kg/m/s (10°C) とした。

空気の粘性係数は 10°C では本来 1.76×10^{-5} kg/m/s であるが、実測の透気係数 $K_a=4.42 \times 10^{-1}$ cm/s より算出される $\mu_a=(K_w/K_a) \cdot \mu_w=1.434 \times 10^{-4}$ kg/m/s を今回は用いた。空気に関する相対透過係数比については実測値がなく Fig. 13 と同一のものを想定した。

解析結果のうち、D-I-1 については空洞内圧を 0 および 84 cmH₂O (ゲージ圧) とした場合の地下水面形状を、D-I-4 については空洞内圧を 0 および 52 cmH₂O (ゲージ圧) の場合の地下水面形状を、Fig. 8 中に示し

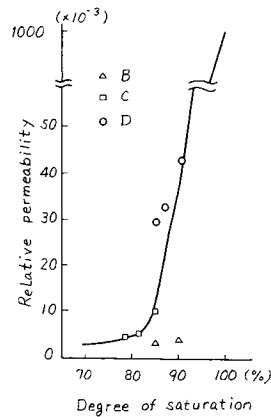


Fig. 15 Relative permeability characteristics of model materials.

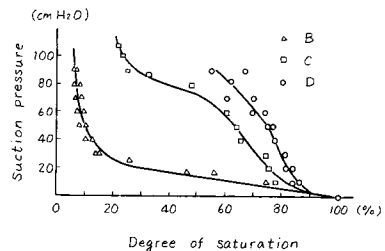


Fig. 16 Capillary pressure characteristics of model materials.

た。Fig. 9中には、空洞内圧と湧水量の関係の解析結果を示した。これらの解析結果は、モデル実験結果とよい一致を示していると思われる。したがって、今回の気液二相流解析が、実際の現象をよく表わし得るものであり、圧縮空気貯蔵における合理的な漏気防止対策の検討あるいは漏気量予測のための有効な手法であるものと判断した。

(3) 岩盤内圧縮空気貯蔵の解析

a) 解析条件

実規模と想定される圧縮空気貯蔵の検討に、気液二相流解析を適用した。貯蔵用空洞は地下水面下334 mの岩盤中に放置した4本の馬蹄形空洞(幅10 m, 高さ15 m)からなるものを想定した。解析モデルはFig. 17に示す二次元断面のものであり、対称面より右側を解析領域としている。なお、ゆるみ領域は空洞壁面より3 mあるとし、解析上空洞の一部として扱うこととした。

境界条件として、対称面およびモデル底面を不透水、不透気とし、遠方境界には静水圧を分布させた。モデル上面は大気圧とし、空洞内壁面には所定の貯蔵空気圧を分布させた。初期条件としては、いずれの場合も岩盤の

飽和状態を設定した。

入力物性値としては、地盤の飽和透水係数を $K_w = 1 \times 10^{-5}$ cm/s としたほかは、すべて、3. (2) a) と同一のものを想定した。

b) 解析結果と考察

解析結果として得られた地下水面形状をFig. 17に示す。空洞内圧が大きいと地下水面は高くなるが、ある限界(ここでは35 atm)を越えると、地下水面が空洞下方に低下する。

空洞内圧(絶対値)と、2つの空洞への湧水量および空洞から、漏気量との関係を、Fig. 18に示す。空洞への湧水量は貯蔵圧の増加に伴い直線的に減少し、貯蔵圧が35 atmではほぼ0となる。一方、漏気量は貯蔵圧が35 atmまではほとんど発生せず、35 atmを超過した場合に漏気が発生する。貯蔵容量に対する漏気量の比を漏気率とし、貯蔵圧との関係を示すとFig. 19のようになる。

以上の解析結果は、空気と水との両者の挙動を同時に扱う、より本質的な解析を行い得る本手法が、岩盤内圧縮空気貯蔵における漏気防止対策を検討し、漏気量を予測するために有効であることを明らかにした。

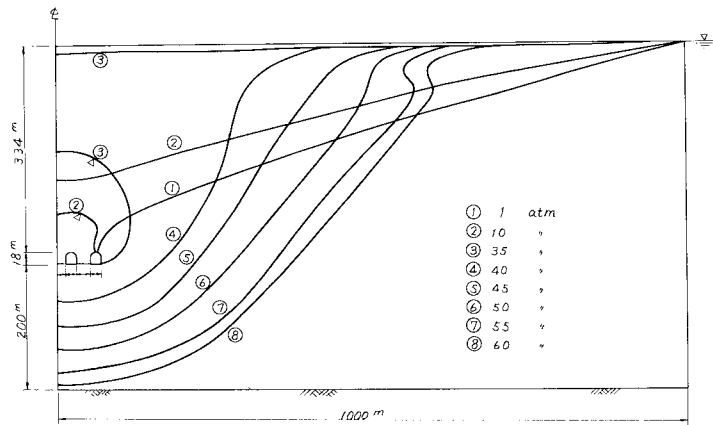


Fig. 17 Calculated free surface.

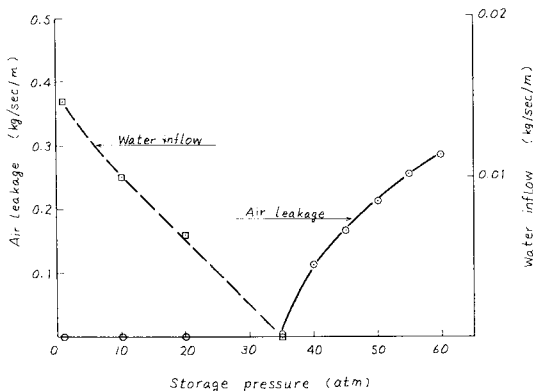


Fig. 18 Calculated air leakage and water inflow.

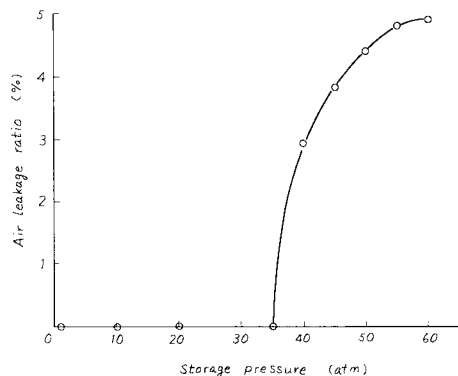


Fig. 19 Air leakage rate.

ところで、今回得られた貯蔵圧と漏気量の関係は、圧縮空気を無覆工空洞内に貯蔵するに際し、空洞深さ相当の静水圧分まで貯蔵圧を昇圧しても、特に漏気防止対策を行わなくても貯蔵が可能であることを示し、岩盤内圧縮空気貯蔵の漏気対策を大幅に合理化するものであることを示している。

4. 結 論

岩盤内の無覆工空洞に水封式により圧縮空気の貯蔵を行う際の漏気防止条件について、今回実施した実験的検討および解析的検討の結果を要約すると以下のようなる。

(1) 模擬岩盤亀裂を用いた漏気実験によれば、無覆工空洞からの漏気防止のためには、貯蔵圧 (P_a) を壁面での静水圧 (P_{ws}) 以下とすること ($P_a < P_{ws}$)、あるいは岩盤亀裂内の動水勾配が空洞に流入する成分を有することが必要であることが明らかとなった。

(2) 岩盤内圧縮空気貯蔵のモデル実験の結果は、地下水面下の無覆工空洞内には、空洞の水深に相当する静水圧とほぼ等しい圧縮空気を貯蔵することが可能であることを示した。ただし、貯蔵限界圧を越えて漏気がいったん発生すると、漏気を停止させるためにはこの貯蔵限界圧よりさらに減圧させる必要のあることも明らかにした。

(3) 有限要素法による気液二相流解析法を表わし、モデル実験の数値解析を行って手法の妥当性を確認した後、実規模と想定される圧縮空気貯蔵のケーススタディーを実施した。漏気量の計算結果から、空洞深さ相当の静水圧まで貯蔵圧を昇圧しても漏気のないことが示された。

(4) 上記の(1)~(3)は、地下水面下の空洞には空洞天端の水深に相当する静水圧にほぼ等しい圧力の空気を漏気なしに貯蔵することが可能であることを明らかにした。このことは、わが国の現行の水封式燃料地下貯蔵における漏気防止のための設計条件、すなわち、貯蔵用空洞周辺における地下水流の鉛直動水勾配が1以上であること、を必要条件とせず、漏気防止対策を大幅に合理化できるものであることを示している。

本報告は高圧空気貯蔵発電システムの可能性検討の主要課題である岩盤空洞内からの漏気防止条件について検討を加えたものである。今後、実用化の際には、原位置における漏気実験等により、今回示した漏気防止条件を検証する必要があるが、わが国における岩盤においても高圧空気貯蔵の成立性の見通しを得たものと考えらる。

参 考 文 献

- 1) 駒田, ほか: 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, 土木学会論文報告集, 第300号, pp. 69~80, 1980年8月.
- 2) Aberg, B.: Prevention of gas leakage from unlined reservation in rocks, Symp. on storage in excavated rock caverns, Rock Store 77, Stockholm, Sweden, pp. 399~414, 1977.
- 3) 中川・駒田: 地下水面下の岩盤空洞からの漏気防止条件に関する基礎的検討, 電力中央研究所報告 380056, 1981.
- 4) 駒田・中川: モデル実験による岩盤内圧縮空気貯蔵の検討, 電力中央研究所報告 384044, 1985.
- 5) 中川・駒田: 気液二相流解析による岩盤内圧縮空気貯蔵の検討, 電力中央研究所報告 384045, 1985.
- 6) Meini, D.: Analysis of compressed air aquifer storage by finite element method, Thesis of Dr. Eng., The University of Wisconsin, Milwaukee, 1979.

(1985.12.10・受付)