

(35) 地下空洞を対象とした気液二相流に関する基礎的研究

清水建設(株)大崎研究室 正会員 ○ 百田 博宣
埼玉大学 工学部 正会員 佐藤 邦明

1. はじめに

岩盤内の地下空洞に高压の気体や圧縮空気を貯蔵する場合、気体の浸透や気液各相の挙動も興味深い課題の一つである。最近、気体の圧縮性や気液各相の相互作用まで考慮できる気液二相流のFEM解析法が提示されており^{1) 2)}、駒田らは圧気貯蔵システムのモデル解析を実施している¹⁾。しかし、地下空洞を対象とした気液二相流の現象自体に未解明な点もあり、基本的な物理現象を実験的かつ理論的に漸次解明していくことも必要と考えられる。

このような背景から、本論では地下空洞を対象とした気液二相流の簡単なモデルを用いて理論を誘導すると共に、理論上の取り扱いの是非を室内実験で確認し、現象の基本的な性質を知ることを目的とする。

2. 気液二相流理論

地下空洞を対象とした気液二相流の現象自体に未解明な点が多いため、ここでは物理現象の基本的なモデル化を行い理論を誘導する。すなわち気体の圧縮性は無視し、二種の流体が明瞭な気液境界面を形成して非定常運動をすると仮定する。また、空洞からの気体の浸透を二段階でとらえ、初期には円状の気液境界面を形成する放射気液二相流モデルとみなす。その後、浮力や表面張力の影響で気液境界面が不安定となり、鉛直一次元的な気液二相流モデルに移行すると考える。

2.1 理論の誘導

(1) 放射二相流モデル

図-1 に示すように、地盤上にy軸、鉛直下方にx軸をとると共に、中心深さが H_0 、半径 r_0 で内圧 P_d の円形空洞中心より距離 r 、角度 θ の r - θ 座標系も設定する。いま簡単のため、気液境界面($r=\xi'$)が空洞と同心円状に拡大する条件を仮定し空洞壁面と気液境界面を等ポテンシャル面とみなせば、領域1の気相は放射流れ、領域2の地下水は半無限領域中の気液境界面に対する流れと考えることができる³⁾。よって、本条件下の領域1の気体ポテンシャル $\phi_1(h_1 k_1 w_1 / \mu_1)$ と領域2の地下水ポテンシャル $\phi_2(h_2 k_2 w_2 / \mu_2)$ は次のように与えられる。

$$h_1 = -\frac{\mu_1 Q_1}{4\pi k_1 w_1} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) + \frac{P_d}{w_1} - H_0 \quad (1)$$

$$h_2 = -\frac{\mu_2 Q_2}{4\pi k_2 w_2} \ln \frac{(x - \sqrt{H_0^2 - \xi'^2})^2 + y^2}{(x + \sqrt{H_0^2 - \xi'^2})^2 + y^2} + \frac{P_u}{w_2} \quad (2)$$

ここに、添字1,2はそれぞれ気体と地下水を意味し、 w : 単位重量、 μ : 粘性係数、 k : 地盤の固有の浸透係数(L^2)、 Q : 流量、 P_u : 地盤上端の水圧、である。したがって、 $r=\xi'$ 上で式(1),(2)を圧力と流速の連続条件で等値すれば Q_1 と Q_2 が得られることになるが、この場合に両条件を満足することは困難である。よって、 $x=d-\xi'$ 、 $y=0$ で圧力を一致させ $Q_1=Q_2$ という条件を導入することによって、近似的に Q_1, Q_2 が算定でき、式(1),(2)に ξ' を与えれば所要の解を算出できる。

気液境界面位置は $F(r,t)=r-\xi'=0$ で与えられ、 V_r を気液境界面の r 方向のダルシー速度、 λ を間隙率とすれば、気液境界面方程式は次のように表せる。

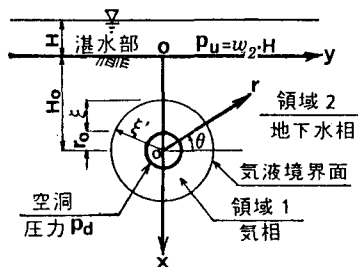


図-1 放射二相流モデル

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{V_r}{\lambda} \frac{\partial F}{\partial r} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\xi}{dt} = \frac{V_r}{\lambda} \quad (3)$$

故に、式(1)を変形して式(3)に代入すれば、気液境界面速度 $d\xi/dt$ は式(4)で与えられ、式(4)を時間 t で積分すれば任意時刻の ξ を求めることができる。

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{Q_1}{2n\lambda\xi} = \frac{k_1}{\mu_1\lambda\xi} \cdot \frac{p_d - p_u - (w_1 - w_2)\xi - w_2 H_o}{\ln\left(\frac{\xi}{r_o}\right) - M \ln \frac{\sqrt{H_o^2 - \xi^2} - H_o + \xi}{\sqrt{H_o^2 - \xi^2} + H_o - \xi}} \quad (4)$$

ここに、 M : mobility ratio で $M = (k_1/\mu_1)/(k_2/\mu_2)$ で定義される。

(2) 鉛直一次元二相流モデル

図-2 に示すように、空洞頂部より鉛直上方に s 軸をとり気液境界面位置を $s = \xi$ と設定すれば、一次元モデルの領域1の気体圧力 P_1 、領域2の地下水圧力 P_2 及び気液境界面速度 $d\xi/dt$ は次のように与えられる⁴⁾。

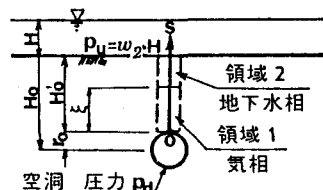


図-2 鉛直一次元二相流モデル

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= - \frac{p_d - p_u + (H_o - \xi)(Mw_1 - w_2)}{(1-M)\xi + MH_o} \cdot s + p_d \\ P_2 &= \frac{-M(p_d - p_u) + \xi(Mw_1 - w_2)}{(1-M)\xi + MH_o} \cdot (s - H_o) + p_u \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{k_1}{\mu_1\lambda} \cdot \frac{p_d - p_u - (w_1 - w_2)\xi - w_2 H_o}{(1-M) + MH_o} \quad (6)$$

2.2 理論の性質

理論の性質を明らかにする意味で、空洞内圧 P_d が 3.0, 4.5, 6.0 kg/cm²G の条件下でモデル解析を行う。解析モデルは空洞半径 r_o は 2m、中心深さ H_o が $H_o/r_o = 10$ とし、湛水位 H は $H=0$ である。透水係数 k_w ($k_2 w_2/\mu_2$) は 10^{-5} cm/s、間隙率 λ は 0.1 とし、温度は 15°C で M は $M \approx 64$ と仮定する。この条件下で放射流モデルと鉛直一次元モデルを用いて空気浸透開始からの気液境界面位置 ξ と経過時間 t の関係を求め、図-3 に示す。本図中、 $\xi/H_o = 0.1$ は気液境界面が空洞頂部、 $\xi/H_o = 1.0$ は地盤上端に位置することを意味し、実線は放射流モデル、破線は一次元モデルの解析結果である。図-3 によれば両モデル共、 P_d の増大によって ξ の上昇速度が増大するが、岩盤では静水圧以上の空洞内圧でも空気浸透はかなり遅いものと判断できる。また、一次元モデルでは M の影響で ξ が速度を増大させながら上昇するのに対し、放射流モデルは ξ の速度の増大が小さく、両モデルの違いを認識できる。次に、 P_d が 3.0 kg/cm²G、 $\xi/H_o = 0.55$ の条件下で両モデルを用いた空洞鉛直上方 r の圧力分布を図-4 に示す。これによれば両モデル共、気相部分の圧力はほぼ一定で、気体の圧縮性の影響はそれほど大きくないと推測される。

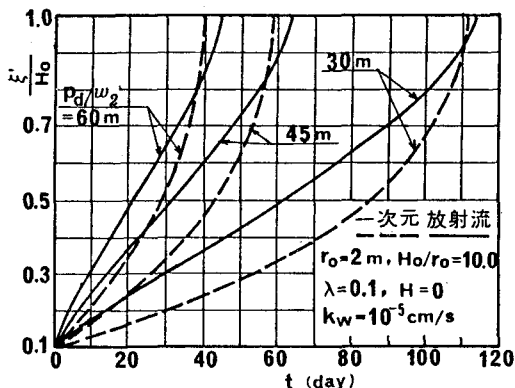


図-3 気液境界面位置 ξ と時間 t の関係 (理論解)

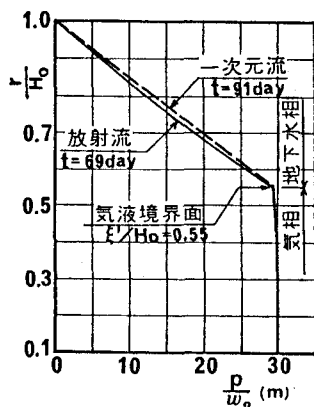


図-4 空洞鉛直上方 r の圧力分布 p (理論解... $P_d/w_2 = 30m$)

3. 気液二相流の実験とその検討

空洞モデル周辺の空気浸透に係わる気液二相流理論を予め展開したが、理論上の取り扱いの可否を室内実験で確認し、現象の基本的な性質を検討する。

3.1 実験方法及び実験条件

図-5 に実験装置図を、表-1 に実験条件の一覧表を示す。図に示すように、実験では内空寸法の幅が50cm、高さ90cm及び奥行き2cmのアクリル製の容器にガラス球を詰めた模擬地盤(高さ70cm)に鋼製の円形空洞を設置し、湛水位 H で実験を行った。空洞は中心深さ $H_0=35\text{cm}$ 、直径 $2r_0=2.7\text{cm}$ であり、空気の圧入には250cc/本の4本の注射器を用いた。本装置で、静水状態で空洞に空気を圧入し、模擬地盤への空気の侵入を写真撮影すると共に、空洞圧力 P_d をU字管で測定した。

実験条件は表に示すように、ガラス球直径 d と湛水位 H をパラメータとした。表中の透水係数 k_w は $H=10\text{cm}$ 、空洞圧力を大気圧の条件で流量測定を行い、同条件下で実施したグリーン公式による浸透流解析⁵⁾を用いて逆算した模擬地盤の透水係数を記入している。本実験は k_w が大きく実際には砂質土に対応すると考えられ、透水性の低い岩盤との現象の合致性が問題となるが、空気の浸透現象を写真撮影する観点からガラス球を用いた。

3.2 実験結果

実験の代表的なケースとして、CASE-2.2 の空気浸透状況を初期、拡大及び最終状態の三段階でとらえ、写真-1 に示す。写真では模擬地盤中の白い部分が空気相部分である。写真によれば、模擬地盤への空気の侵入は空洞頂部から鉛直上向きに起こり、一次元的な空気流れを生じるが、次第に空気相部分を拡大し最終的にはくさび形の空気相を呈することが認められる。空洞からの空気の侵入圧力や浸透速度の違いは各実験ケースであるものの、このような空気挙動は全ケースで傾向が一致していた。このように今回の実験では、安定した円形の気液境界面の形成をとらえることができないと共にくさび形の空気流れが認められ、理論的な取り扱い上の問題点がとらえられた。これは、今回用いたガラス球が岩盤と水理物性が異なり、 k_w が大きくかつ表面張力の効果を期待できないこと、なども影響した結果と考えられる。

全実験ケースの最終状態の最大空気幅を写真より読み取り、これを空洞頂部までの深さ H_0' で割った漏気帯の広がり角 θ_0 を各ケースの透水係数 k_w でまとめ図-6 に示す。図には同じ湛水位 H 毎に直線で結び表しているが、 k_w 、 H と θ_0 の関係は把握できず、本図からは今回の実験条件下では θ_0 が $20\sim 35^\circ$ 程度と判読された。次に、全実験ケースの模擬地盤への空気侵入開始の空洞圧力 P_d をその深さに対応した静水圧 $w_2(H+H_0)$ で無次元化して透水係数 k_w を横軸にしてプロットし、湛水位 (H) の条件毎に直線で結び図-7 に示す。これによれば、透水係数 k_w の低いものほど空気の侵入が起こりにくいこと、また無次元空洞内圧は1.0より大きいことから表面張力の影響が透水係数 k_w の低いものほど大きいと推定され、合理的な結果と言える。更に、湛水位 H が大きいと空洞頂部に圧力が集中し、地盤への空気の侵入が起こり易くなると考えられた。

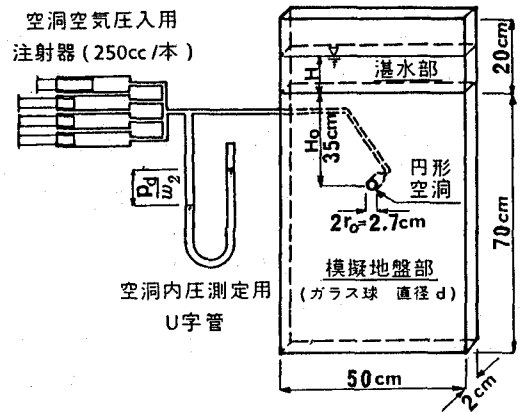


図-5 気液二相流実験装置

表-1 気液二相流の実験条件一覧表

	ガラス球 直径 d (mm)	間隙率 λ	透水係数 k_w (cm/s)	湛水位 H (cm)	温度 ($^\circ\text{C}$)	
					気温	水温
CASE-1.1				2.0	16.0	12.5
1.2	0.5 ~ 0.8	0.464	0.3450	10.0	//	//
1.3				18.5	//	//
2.1				2.0	11.5	10.0
2.2	0.8 ~ 1.5	0.443	0.8323	10.0	//	//
2.3				18.5	//	//
3.1				2.0	12.5	10.5
3.2	1.5 ~ 2.5	0.403	1.7499	10.0	13.5	11.5
3.3				18.5	12.5	10.5

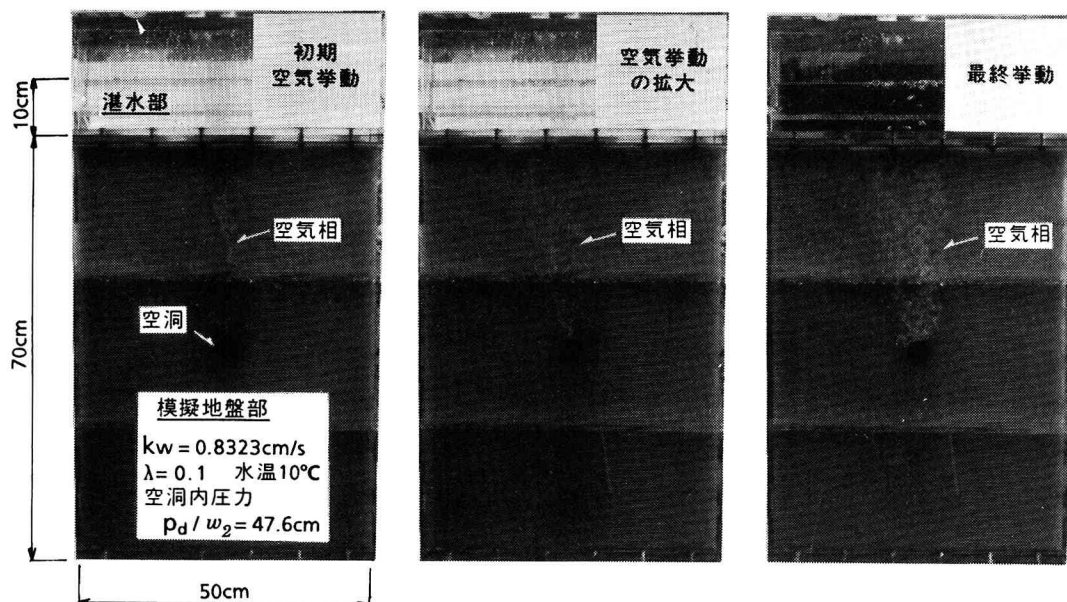


写真-1 空洞周辺における空気の挙動 (CASE-2.2)

4. 結論

地下空洞を想定した気液二相流に関する基礎的な検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本実験では空気は空洞頂部から模擬地盤に侵入し、一次元的な浸透を生じるが、次第にその領域を拡大し、最終的にくさび形の気相を形成することが認められた。
- (2) くさび形の漏気帯の広がり角は概ね20°~35°であった。
- (3) 実験における無次元の限界空洞内圧は透水性の低いものほど大きい結果が得られた。これは、表面張力が影響した結果と思われた。

今回の基礎的な研究により、地下空洞を対象とした気液二相流について幾つかの知見を得たが、目的とする岩盤での物理現象を把握するには至っていない。今後の研究が望まれるところである。なお、今回の実験に当たっては、森信博氏(サンコーコンサルタント)の助力があった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 駒田広也他：第19回土質工学研究発表会，pp.1369~1370，1984年6月。
- 2) 河野伊一郎他：第19回土質工学研究発表会，pp.1371~1374，1984年6月。
- 3) 佐藤邦明：トンネルと地下，第11巻10号，pp.47~52，1980年10月。
- 4) 水理委員会密度流研究小委員会：土木学会論文報告集，No.243，pp.99~121，1975年11月。
- 5) 百田博宣他：第26回水理講演会論文集，pp.601~606，1982年2月。

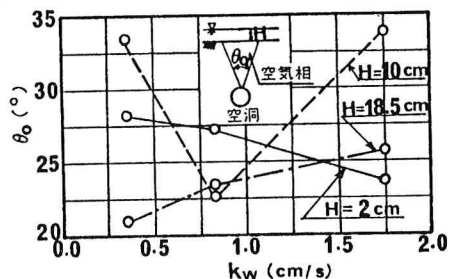


図-6 透水係数 k_w と漏気帯の広がり角 θ_0 の関係 (最終状態)

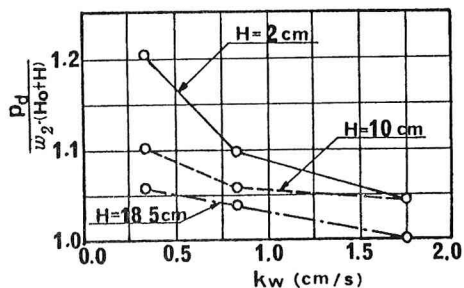


図-7 透水係数 k_w と空洞内圧力 p_d の関係 (空気浸透開始時)

(35) A Basic Study on Two-Phases Flow of Air and Water around Cavern

Hironobu Momota (Shimizu Construction Co., Ltd.)

Kuniaki Sato (Saitama University)

When we deal with the behavior of compressed air around rock cavern, it is needed to study the two-phases flow in porous media. Recently, the FEM technique for analyzing air flow has been proposed by taking account of compressibility and interaction between air and liquid. Because the character of the phenomenon has some difficulties, basic experimental and theoretical studies have been required. In this paper, the authors try basic research of two-phases flow in porous media around cavern. Then, the characteristics of two-phases flow are discussed by experimental results obtained from a laboratory by using simple models.

Main results obtained from this study are as follows;

1. Air penetration occurs at the top of cavern and finger-shaped peneration appears over critical air pressure.
2. Air phase takes the form of wedge shape with angle $20\sim 35^\circ$ in steady state.
3. Air penetration occurs easily with increase of permeability.