

埼玉大学工学部 学生会員 ○ 石 山 宏 二

" 正会員 渡 辺 邦 夫

" 平 野 正 明

1. はじめに

近年、岩盤の有効利用の1つとして、岩盤中に地下空洞を掘削し、その中にLNGなどを貯蔵する地下備蓄方式の導入が検討されている。しかし、この場合、その周辺部における流れの状態は非常に複雑なものとなる。岩盤の浸透流問題では、その主要な浸透経路となる割れ目の性状は重要である。この割れ目が空洞を掘削した影響により、開口するなどの形状変化を起こすことが考えられる。また、空洞内は空気（または一般的にガス体）で満たされている状態となるため、その周辺部では水と空気の共存する流れ、いわゆる不飽和な状態の流れとなる。そこでこのような複雑な流れを考える一考察として、本報告では、空洞周辺における場所的に間隙幅の変化した割れ目に対するモデル化を行なう。そして、その中で起こる空洞に向かう流れや、漏気の現象を気・液相の界面変動に着目し、その特性に関して実験的に検討した。

2. 空洞周辺の流れ場のモデル化

空洞周辺の流れ場を図-1 (a) のようにとらえることとする。図において、岩盤上部の表土層には地下水位がある。また、岩盤中には割れ目が存在し、その中のいくつかが相互連結し合い、その中を通して地下水が空洞に流れ込むものとする。割れ目の間隙幅は一様でなく、場所的に変化するものであり、特に空洞周囲のゆるみ領域内では割れ目は開口し、間隙幅が急に広がっていると考える。

今、この (a) のように設定した流れ場を (b) のように単純にモデル化する。表土層と空洞間は図のように単一の鉛直割れ目によって連結され、その走向と空洞長軸方向は同一とする。割れ目の間隙幅は、その流れに与える影響を明確にするために、ゆるみ領域末端部でのみ急拡しているものと仮定した。

そこで、図-1 (b) の流れ場を表現するために、用いた実験装置の模式図を図-2 に示す。実験装置は基本的に上方を除く3方を止水した、間隙幅 2mm のアクリル製鉛直ヘルシウセルより成る。上部には地下水位を表現するための供給槽、下部片面には空洞を模すためのボックスがそれぞれ取り付けられている。また、ボックスには内部空気圧を測定するためのマンメーターおよび排気コックが取り付けられている。さらに図中斜線で示しているセル上半部内側には両面に薄いアクリル板を貼付け、間隙幅の変化を表現している。ただし、このアクリル薄板は、長さ L_1 および厚さを変えることができるも

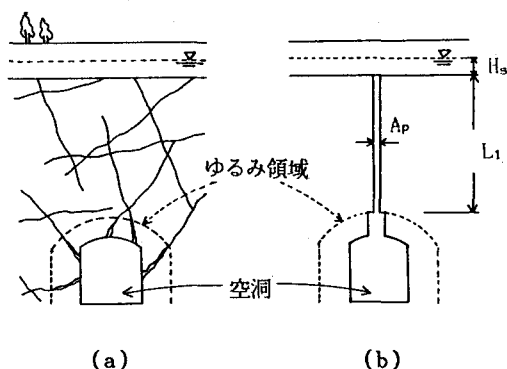


図-1 空洞周辺の流れ場とそのモデル化

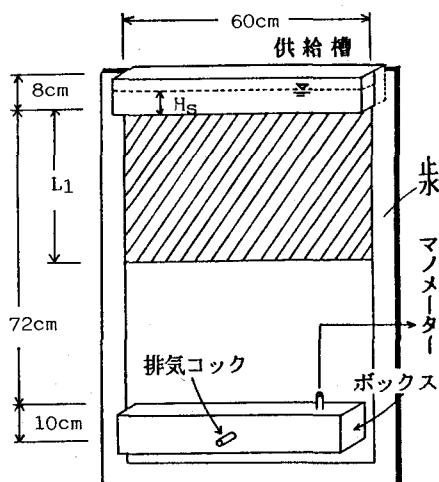


図-2 実験装置模式図

のとする。つまり、セル内の間隙幅は A_p から 2mmに変化する。なお、実験は20℃の恒温室で行ない、液体としてはグリセリン水溶液、気体として空気を用いた。

3. 実験結果

3.1 実験結果と手順¹⁾

実験は表-1のように、 L_1 、 H_s 、および A_p の値を変えることによって総計22ケース行った。実験ケースは大別して6ケースに分けられ、その内 Exp-1,5は間隙幅が一定であり、それぞれ 2mmおよび 1mmとした。用いたグリセリン水溶液と空気との界面に働く表面張力 T は、約65.8dyn/cmとする。間隙幅が 2mmおよび 1mmのスリット内におけるグリセリン水溶液の毛管上昇高は、それぞれ約 1mmおよび 2mmであった。

実験の手順としては2つに区別することができる。第一段階の自由流下実験では、まず装置上部の供給槽にグリセリン水溶液を所定水深までいれておき、これを瞬時にヘルシヨウセル内に流下させる。これ以後、供給槽内水位を一定に保つために常時水溶液を供給し続ける。このボックスについている排気コックは開放とし、ヘルシヨウセル内を大気圧とする。供給槽から流下する水溶液がセル内を満たし、ボックス内に流入する様子を観察する。ひきつづき第二段階の漏気実験を行う。排気コックを閉鎖し、その結果としてボックス内に水溶液が流入した分だけセル内部の空気圧は高まり、最終的に漏気が生じる。ただし、漏気が生じる前に水溶液の流下が止まり平衡状態となった場合は、注射器によって排気コックより空気を注入し強制的に漏気をおこさせる。漏気発生時の空気圧はマンメーターによって計測し、漏気の様子を観察する。

表-1 実験条件

Exp. case	L_1 (cm)	H_s (cm)	A_p (mm)	γ_g^*	Exp. case	L_1 (cm)	H_s (cm)	A_p (mm)	γ_g^*	Exp. case	L_1 (cm)	H_s (cm)	A_p (mm)	γ_g^*
Exp-1.1	0	1.0	1	1.259	Exp-3.1	40	2.5	1	1.256	Exp-5.1	72	2.5	1	1.252
” -1.2	”	4.25	”	1.256	” -3.2	”	4.25	”	”	” -5.2	”	4.25	”	”
” -1.3	”	8.0	”	”	” -3.3	”	6.0	”	”	” -5.3	”	8.0	”	”
					” -3.4	”	8.0	”	1.252					
Exp-2.1	16	2.5	1	1.258	Exp-4.1	56	2.5	1	1.252	Exp-6.1	16	2.5	0.5	1.235
” -2.2	”	4.25	”	”	” -4.2	”	4.25	”	”	” -6.2	”	4.25	”	”
” -2.3	”	6.0	”	”	” -4.3	”	6.0	”	1.250	” -6.3	”	6.0	”	”
” -2.4	”	8.0	”	1.256	” -4.4	”	8.0	”	1.258	” -6.4	”	8.0	”	”

* Unit weight per volume of glycerol (gf/cm³)

3.2 実験結果

White ら²⁾がすでに指摘しているように、自由流下実験のような条件下でセルの間隙幅が急拡した場合図-3に示すような流れが生じる。図に見られるように、間隙幅の急拡部で界面の不安定現象が生じ、「スダレ状」のフィンガリングを起こしていることがわかる。この時セルの上部では、グリセリン水溶液によって完全に満たされた状態となっている。また、隣接する「スダレ状」フィンガーの間隔はほぼ一定であり、この時の平均間隔を D_1 とする。

排気コックを閉じ漏気実験を開始すると、ボックス内の空気圧が上昇を始め、限界圧力水頭 H_0 に達した瞬間に漏気が起こる。また、空気圧の上昇により「スダレ状」フィ

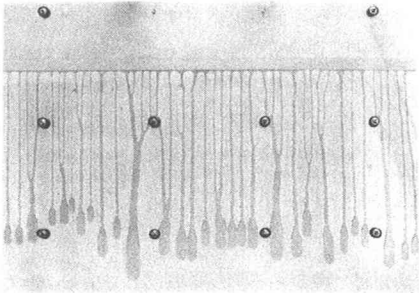


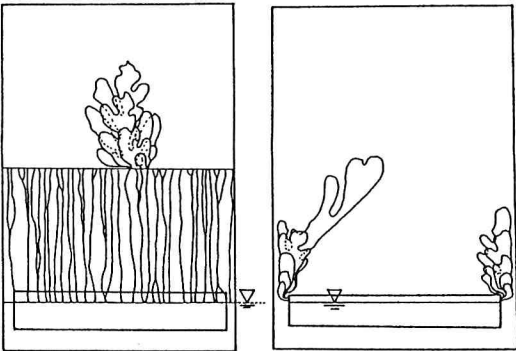
図-3 間隙幅急拡による流れ (Exp. 2-4)

ンガー間隔Dも大きくなり、フィンガー数が減少する。この漏気発生直前の平均フィンガー間隔をDcとする。しかし、すべてのフィンガーが漏気の始まる前に消える、つまりDcが無限になる場合もある（例、Exp-2, 6）。図-4は、「スダレ状」フィンガー間隔DiとDcを比較したものである。

図-5は、セル上部のグリセリン水溶液が満たされた部分に空気塊が侵入する、漏気の発生と発達過程を示したものである。漏気の発生は、その直前に「スダレ状」のフィンガーが存在した場合、多数のフィンガー間からメニスカスが上昇することに始まる。その中の一つのメニスカスが大きく成長し、空気塊が上方に浮上するにつれて水溶液との界面を枝別れ状に変形させながら発達する様子がみられる。図-6 (a) はこの発達過程の代表例を5秒おきに描いたものである。また (b) はセル間隙幅が一定、しかも「スダレ状」フィンガーが起きえない場合の発達過程を3秒おきに描いている。この場合、ボックス（空洞モデル）側面から漏気が生じている。漏気発生時におけるボックス内の空気圧Haと供給槽水頭Hとの関係を図-7に示す。供給槽水頭Hは次の式で表現できる。

$$H = (H_a + L_1) / (\gamma_a / \gamma_w) \quad (1)$$

ここに、 γ_w は水の単位体積重量である。図からL1が16cmのものを除いて、Haの方がHより小さくなる傾向が見られる。一方、L1が16cmの場合はHaとHがほとんど等しくなるか、むしろHaの方がやや大きな値をとっている。これはボックス内の空気圧上昇によって供給槽からの下向きの流れが止まり、すべての「スダレ状」フィンガーが消え、間隙幅急狭部にある界面に下向きの毛管力が働くためである。しかし、グリセリン水溶



(a) Exp-3.1 (b) Exp-1.2
図-6 漏気の発達模式図

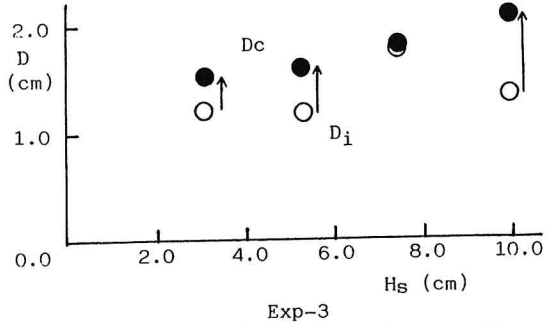


図-4 「スダレ状」フィンガー間隔の変化

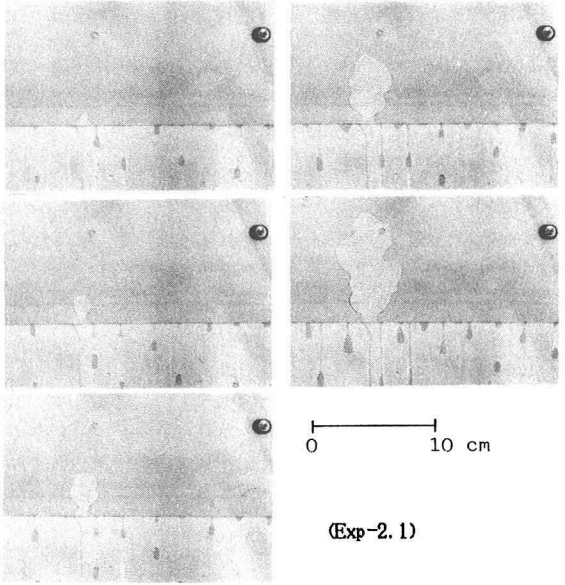


図-5 漏気の発生と発達過程

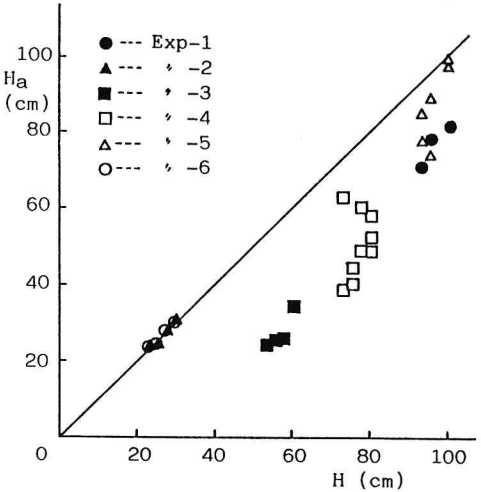


図-7 限界圧力Haと供給槽水頭Hの関係

液の毛管力水頭 h_c は、先に記した通りさほど大きくないため、 H_0 と H の値がほぼ等くなると漏気が起こる。このような結果から「スダレ状」のフィンガリングは漏気の起こる限界圧力にかなりの影響を及ぼすようである。しかし、どのような条件下でフィンガリングが残存したりあるいは消滅したりするのかは明らかでない。

4. 理論的考察

White らは、ヘルシヨウセル内を流下する液体と空気間の界面における微小乱れに対して、不安定解析を基に乱れ波数 M について理論的に検討をした。また、次式で表現される値が正であれば乱れが成長し、フィンガーとなることを指摘した。

$$\sigma = CM (G - M^2 T / \gamma_d) \quad (2)$$

$$M = 2\pi / \lambda \quad (3)$$

$$G = \{-(H_0 \gamma_d / \gamma_w - H_0 - H_1) + L_1 (x-1)\} / L_1 x \quad (4)$$

$$x = k_2 / k_1 \quad (5)$$

ここに、 σ は不安定パラメーター、 C は比例定数、 G は界面における圧力ポテンシャル勾配、 T は表面張力、 λ は乱れ波長（ここでは D に等しい）、 k_1 、 k_2 はそれぞれセル内の間隙幅急拡部を境とする上下部の透水係数である。ここで、 σ が0となる場合の波数 M が界面の乱れを増長させはじめる波数であり、限界波数 M_{crit} とする。一方、 σ を最大にする M を M^* とし、次式によって求めることができる。

$$M_{crit} = (\gamma_d G / T)^{1/2} \quad (6)$$

$$M^* = (\gamma_d G / 3T)^{1/2} \quad (7)$$

図-8の二つの曲線は実験ケース中における G の最大および最小値に対応する σ/C と M の関係を示したものである。式

(3)に実測した D_1 と D_2 値を導入して求めた値を、それぞれ図中に●と○で、 $\sigma/C=0.5$ の M 軸上にプロットした。ただし、Exp-6における自由流下実験での流れは「スダレ状」ではなく、断続的な「シズク状」の流れとなるため、特に○で示すことにする。△はWhite らの実験結果である。図から算定された M はかなりのばらつきを示し、 M^* よりも M_{crit} 値の領域内に近いことがわかる。そこで逆に M^* 、 M_{crit} より求めた λ^* 及び λ_{crit} と実測値 D とを比較したものが図-9である。 D と λ_{crit} の関係を○、 λ^* との関係を●でそれぞれ示した。この図からも同様に、実測値 D は λ^* よりも λ_{crit} に近い値を示す。このことから、本実験のように間隙幅の急変した流れ条件下で起きる「スダレ状」フィンガーの間隔は、White らが指摘した λ^* よりはむしろ λ_{crit} の方が良い近似を示すといえる。

以上のように、本研究によって不安定現象が漏気の発生に影響を及ぼすなど2、3の特徴が明らかとなった。

参考文献

- 1) 石山宏二、渡辺邦夫、平野正明 (1986)、日本応用地質研究発表会、PP.147-150.
- 2) White, I., P.M.Colomera, and J.R.Philip. (1977), Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 41, PP. 483-489.

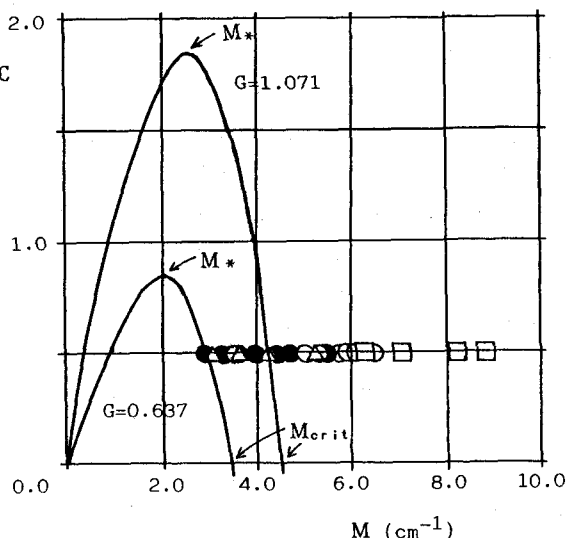


図-8 不安定パラメーター σ と波数 M との関係

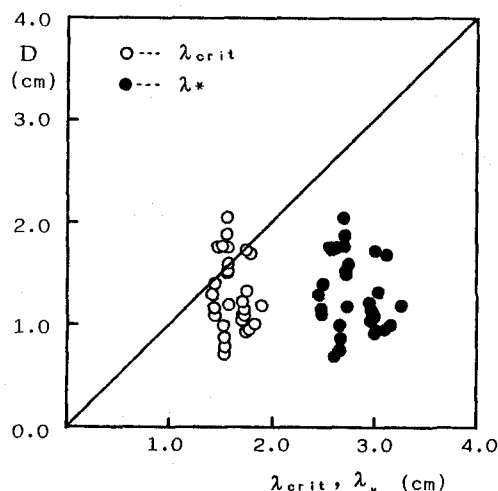


図-9 実測値 D と理論値 λ との比較

(38) Experimental study on two-phase flow around an underground cavern

Koji Ishiyama*

Kunio Watanabe**

Masaaki Hirano***

Abstract

The mechanism of two-phase flow in an open fracture must be basically studied to make clear the groundwater flow around an underground cavern. The gap width of an open fracture does not uniformly distribute even in a small fracture and usually varies from place to place. From the reason, it can be said important to clarify the influence of the spatial variation of the gap width on two-phase flow.

The present authors have tried to experimentally make clear the flow in a model of a vertical open fracture in which the gap width stepwise increases from a certain depth.

22 cases of experimental runs have been carried out by the use of a Hele-Shaw cell having an air-box at the lowest part of it. The cell and the air-box simulate an open fracture and an underground cavern, respectively. The pattern of groundwater flow around the air-box and the leakage of air from the box in the cell was fundamentally studied.

Obtained results are as follows :

- (1) Finger type infiltration occurred in the large gap width part.
- (2) The average interval between fingers can be well evaluated by a theoretical equation based on the instability analysis of flow.
- (3) The pattern of fingers much influence on the critical air pressure at which the air in the box starts to leak.

* Graduate Student, Faculty of Engineering, Saitama University.

** Associate Professor, Faculty of Engineering, Saitama University.

*** Student, Faculty of Engineering, Saitama University.