

はじめに

岩盤中の地下空洞に、ガス体あるいは酸化性の高い液体を貯蔵する計画が最近多く提案されている。この貯蔵における問題の一つは、貯蔵された、あるいは発生したガス体の、周囲岩盤中への漏気に対する安全性の確保である。安全性を確認するため、従来から多くの実験的研究が行われてきている¹⁾。それらの研究の成果の一つは、空洞中のガス体の圧力が、地下水流れが止まった時の、空洞上面に加わる静水圧以下であれば、漏気は発生しないというものである。一方、著者らは、空洞上部には一般的に不飽和帯が形成されており、その中の流れは、フィンガー型の浸透で特徴づけられることを示した。さらにこの場合、静水圧よりかなり低いガス圧で漏気を開始することを実験的に指摘した²⁾³⁾。しかしながら、漏気発生のメカニズムについては、フィンガー浸透の一つの特性であることを定性的に述べたにとどまっていた。そのため、今回、フィンガー浸透に類似し、かつ一般性の高い流れを実験的につくり、その中の圧力分布などを測定し定量的考察をおこなった。さらに近似理論による検討を加えて、漏気のメカニズムを調べることを試みた。その結果、フィンガー浸透と漏気発生について、まだ不十分な点はあるものの、ある程度明かとなったので報告する。

1 取り上げる岩盤割れ目モデルと流れの性質

ここで、図-1に模式的に示される空洞を考え、それが、空気などガス体で満たされているものとする空洞周辺には、多くの割れ目が存在している。簡単のため、割れ目は開口割れ目と仮定しておく。開口割れ目の間隙幅は一様ではない。したがって、割れ目透水係数は場所的に大きく変化していると考えることができる。ここで単一の割れ目を考える。その中の間隙幅の小さい部分の下方に、間隙幅の大きい部分があると、流れの連続条件から、間隙幅の大きい部分が不飽和状態となり、フィンガー型の浸透流を発生させる。そのため、漏気現象など空洞周辺の流れを考える場合、フィンガー型浸透の性質を把握しておかねばならない。いま単一割れ目に注目し、その中のフィンガー型浸透流の性質を、図-2に示すヘルショウセルにより調べる。セルは、厚さ1.0cmの二枚の亚克力板より成り、両側面、および下面は止水されている。このセル下部に、空洞を模す空気ボックスが取り付けられ

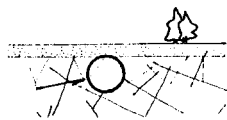


図-1 岩盤空洞モデル

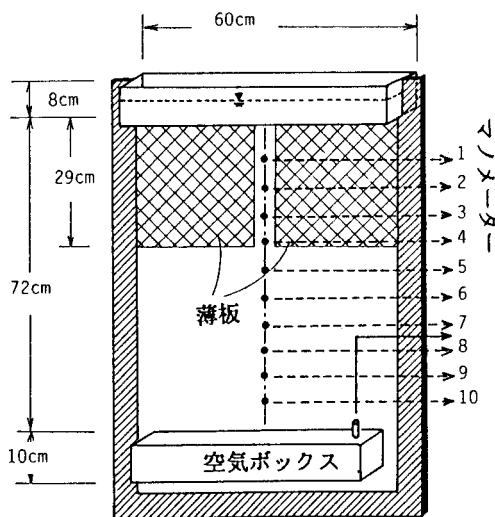


図-2 実験装置模式図

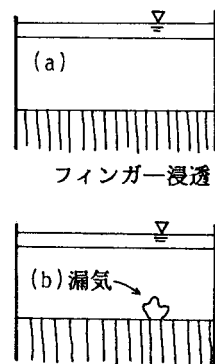


図-3 フィンガー浸透

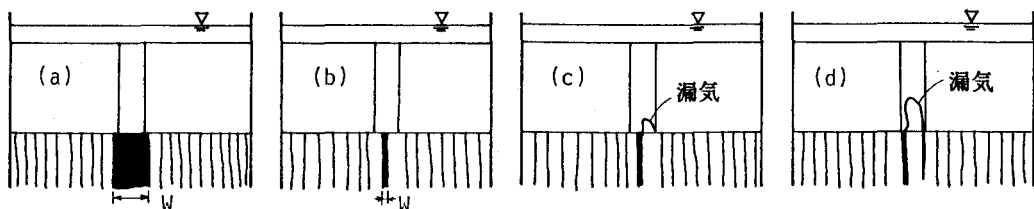


図-4 実験でみられた流れと漏気の発生

ている。ヘルショウセル上部には貯留槽が設けられ、この貯留槽中の液体が、下方にセル中を浸透し、空気ボックスに流入する。空気ボックスには排水孔が設けられてある。排水孔を閉じれば流入する液体によってボックス内の圧力は上昇していく。割れ目の間隙幅の変化を模するため、セル上部内側に薄いアクリル板(0.5 mm)をはりつける。この薄板を、両側のアクリル板にはりつけるため、その部分の間隙幅は1mmとなる。今回は、この薄いアクリル板を、図-2中に示すようにはりつけた。つまり、セル鉛直中心線に沿った幅4cmの部分を除いて、セル上部は間隙幅が小さくなっていることになる。これは、間隙幅の小さい部分に、局所的に間隙幅の大きい部分が存在していることをモデル化したものである。また、図中に黒丸1~10で示す中心線上の10点で液体の圧力をマノメーターにより測定する。フィンガー型浸透流は間隙幅が急変する部分から生ずる。以前の報告²⁾³⁾では、セル上部は鉛直中心線上に沿った部分もすべて間隙幅を1mmとした。その場合、図-3(a)に示すようなフィンガー型浸透が生じ、一つの、フィンガーより(b)のように漏気が開始した。一方、今回のモデルの場合、図-4(a)に模式的に示す流れが形成される。この場合は、中心線に沿った部分に主要な流れが形成され、周囲にフィンガー浸透が発生する。空気ボックス内の圧力が上昇することにより、間隙の大きい部分を通過する流れは図-4(b)のように細くなり、やがて図中(b),(c)の順で漏気が発生し、気体は上方へ動いていく。漏気発生時にも、全体として下向きの流れは存在しており、このことは、漏気が、前述したように、静水圧より低い圧力で開始することを意味している。

たしかに、図-3に示すフィンガーの間で発生する漏気と、図-4に示す漏気とは必ずしもメカニズム的に同じとは言えない。しかし、今回は、これら二つの漏気メカニズムは基本的な類似性が高いと考えた。そのため、図-4に示した流れの漏気メカニズムを調べることで、ある程度一般的なフィンガーからの漏気が把握しようと考えた。実際、フィンガーの幅は極めて細く、圧力分布などは容易に測定しえない。また、本モデルのように局所的に間隙幅が大きい割れ目は一般性があり、その中の流れと漏気現象を調べることは有用性が高いと言いうる。なお使用した液体はグリセリン水溶液であり、単位体積重量 1.25gf/cm³である。

2. 実験結果

まず、図-4(a)に示される様な、中心部の流れの幅Wの変化を調べた。図-5は、空気ボックス内空気圧(Pa)の上昇に伴って、この幅が、どのように変化するかを例示したものである。測定にあたって、空気圧は各値で定常にした。図中の縦軸は、流れ幅Wである。空気圧の上昇によって、流れの幅が減少し、やがて漏気が発生する。漏気は、流れ幅が2cm内外で発生している。図-6は、図-2中のマノメーターで測定したピエゾ水頭

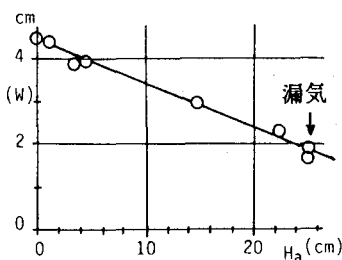


図-5 空気圧と流れ幅の関係

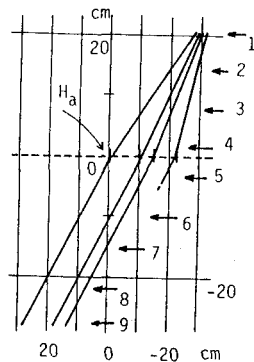


図-6 ピエゾ水頭分布

の分布を、図中に示す4つの異なった空気圧状態で測定した例である。図中の破線は、ヘルシウセル中の間隙幅の変化する高さを表しており、この高さをピエゾ水頭高さの基準(0)にしている。破線部直上のピエゾ水頭 H_p が、空気圧水頭 H_a から界面での毛管力水頭 H_c を引いた値より低下した時に漏気が始まることになる。 H_c の大きさは、グリセリン水溶液の表面張力がほぼ63dyn/cmであり、接触角が0に近くなると思われる最大値ではほぼ0.6cmと考えて良い。 H_p の値を直接測定することは難しい。そのため、図-6中の3番、4番マノメーターの値から線形外推して求めた。またこの図から、ヘルシウセル下部では、ほとんど重力勾配によって流下していることがわかる。図-7は、図-5に示した実験ケースの H_p-H_a と H_a との関係を見たものである。全体的に、空気圧水頭 H_a の上昇に伴って、 H_p-H_a が減少してゆき、やがて負値となり、 $-H_c$ (ほぼ-0.6cm)に近づくことがわかる。つぎに、このような特性を近似的な理論によって考察してみる。

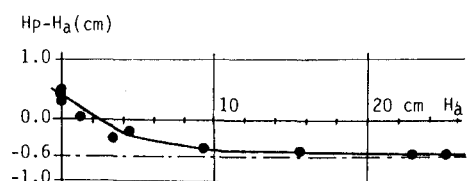


図-7 空気圧と圧力差(水頭)

る最大値ではほぼ0.6cmと考えて良い。 H_p の値を直接測定することは難しい。そのため、図-6中の3番、4番マノメーターの値から線形外推して求めた。またこの図から、ヘルシウセル下部では、ほとんど重力勾配によって流下していることがわかる。図-7は、図-5に示した実験ケースの H_p-H_a と H_a との関係を見たものである。全体的に、空気圧水頭 H_a の上昇に伴って、 H_p-H_a が減少してゆき、やがて負値となり、 $-H_c$ (ほぼ-0.6cm)に近づくことがわかる。つぎに、このような特性を近似的な理論によって考察してみる。

3 流れのメカニズムの検討

3-1 近似理論による定性的検討

まず、流れ幅の減少について考える。最も簡単な場合、図-8に示すように、流量は、ヘルシウセル中の間隙幅の狭くなる部分(A部)で決定され、下部(B部)の間隙幅の全体的に大きい部分は重力勾配でのみ流下すると仮定する。A部において、間隙の大きい部分と小さい部分との水の出入りはないと仮定する。貯留槽中の液体の位置水頭を図に示すように H_u とすれば、流量 Q は、

$$Q = k_1 \cdot d_1 \cdot D \cdot (H_u - H_a) / L_A \quad (1)$$

となる。 k_1 は、この間隙の大きい部分の透水係数、 d_1 はその間隙幅、 L_A はA部の鉛直長さ、 D は、A部中の間隙の大きい部分の幅である。従って、B部での流れ幅 W は、Cubic Law と流れの連続条件を考慮すれば、

$$W = D(d_1/d_2)^3 \cdot (H_u - H_a) / L_A \quad (2)$$

となる。 d_2 はB部の間隙幅であり、ここでは、A部の値とは異なると考えている。この関係を図-5と比較したものが図-9であり、おおまかに性質を表現することがわかる。詳細にみると、 H_a が増加するにつれて、実験結果がやや上方にずれるようにみえる。これは、 H_a の増加に比べて、B部の流れ幅の減少が少ないことを示している。しかし、この考えでは、界面に作用する表面張力の影響を全く考慮していない。表面張力を考えれば、界面は、液体の圧力が多少変化しても変形せず、極端な場合、管路壁のように作用すると考えることもできる。ここで、B部において、液体は流れ幅 W で重力勾配で流下すると考える。また、A部での流れは、 H_a ではなく界面直上の水頭 H_p に影響されると考える。これらの仮定に基づき、A部とB部との流量の連続条

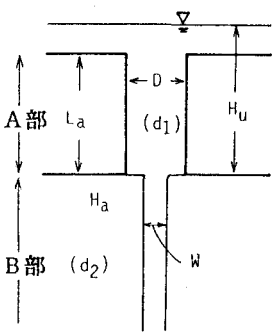


図-8 流れのモデル

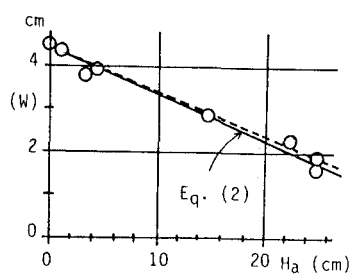


図-9 空気圧と流れ幅
(実験値との比較)

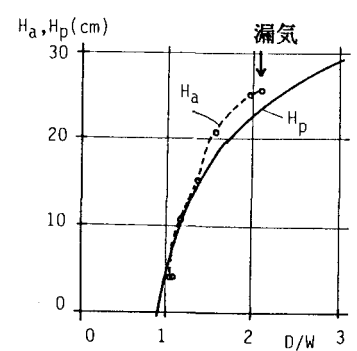


図-10 界面上の圧力
と実測空気圧

件を考慮すれば、 H_p は W を用いて次式のようにあらわしうる。

$$H_p = H_u - (d_2/d_1)^3 LA/\lambda \quad (3)$$

ここに λ は D に対する流れ幅 W の比(D/W)である。この式の H_p と λ の関係を、図-5に示した実験についてみたものが図-10である。図中あわせて、実験で得られた λ と H_a との関係を示している。図からみられるように、 λ が大きくなると、 H_a が(3)式で示される H_p より大きくなっている。これは、漏気が始まり易いことを意味している。 H_p は、(3)式からわかる様に、 W が大きい程小さくなる。したがって、 H_a が H_p より大きくなる理由として、空気圧 H_a が上昇し流れ幅がある程度小さくなると、空気との界面に働く表面張力が大きくなり、幅を減少させにくいことによるものと思われる。 H_a が上昇しても H_p は増加しにくいわけである。つまり、表面張力の影響の大きい現象といえる。

3-2 有限要素法による流れの解析

つぎに、3-1で述べた後者のモデルについて、実験みられた漏気発生直前に近い条件を設定して、流れの中の圧力水頭分布を有限要素法により調べてみる。その解析例を図-11(a),(b)に示す。図は、漏気の発生するA部とB部の境界付近のみをとり出し、 H_a を29.4cmに設定し、 H_u を(a)37cm、(b)39cmとした場合を示している。縮尺は図中示すように縦、横方向で異っている。流れの幅は1.0cmである。図は、中心線の片側のみを示している。この図から、 H_u が37cmの場合、流れが収縮する部分で圧力水頭が低下していることがわかる。この時、隅部の圧力は29cmであり、 H_a に比べて小さいことがわかる。このことは、図-4で示した漏気発生パターン、つまり、縮流部からの漏気の発生を裏づけるものであるといえる。

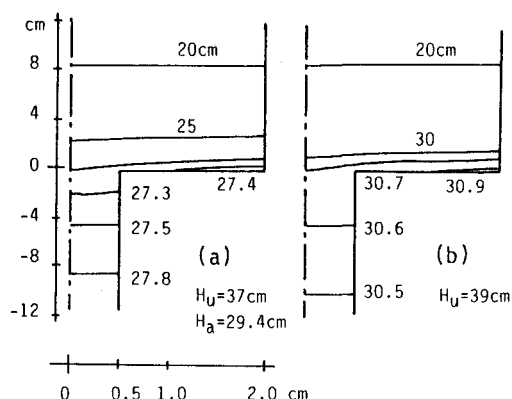


図-11 数値解析による圧力水頭分布

以上、簡単な解析によって、実験でみられる漏気発生のメカニズムについて考察した。その結果、とくに図-8中の間隙幅の大きい部分(B部)の流れ幅が、漏気条件につよく影響していることがわかった。また、この流れ幅を決定し、漏気圧を低下させる要因として、表面張力の効果が極めて大きいことが明らかになったと考える。

参考文献

- 1) たとえば、中川加明一郎、駒田広也、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、no. 380056、1981。
- 2) 石山宏二、渡辺邦夫、平野正明、開口割れ目内の間隙幅変化による岩盤内の不飽和特性に関する研究、第19回岩盤シンポジウム論文集、pp. 181-185、1987。
- 3) Watanabe, K., Ishiyama, K., Asaeda, T., Instability of the interface between gas and Liquid in an open fracture model, Proc. 6th Int. Conger. Rock Mecha. pp. 285-288, 1987。

(63) Influence of the finger-type flow on the gas leakage from a storage cavern in a fractured rock mass

Kunio Watanabe*

Hiroshi Sano*

Abstract

Recently, many underground caverns storing air or gas have been planned in some types of fractured rock mass. Gas leakage from the cavern must be completely prevented to avoid the pollution of groundwater. Detailed study on the two phase flow of groundwater and air/gas around the cavern is basically needed.

The authors studied the influence of the finger-type infiltration formed just over the cavern on the initiation of the gas leakage by some experiments conducted in laboratory. The experimental apparatus used was a vertical Hele-Shaw cell of 60 cm wide and 90 cm high. The gap width of the cell was 2mm. The cell was a model of an open fracture crossing a cavern. Four thin plates of 0.5 mm thick, 28 cm wide and 29 cm high were pasted on both inner sides of walls to partly reduce the gap width. These plates were stuck at the upper part except for a narrow space along the center line of the cell. An air box simulating a cavern was installed at the lowest part of the cell. Glycerol flowed from a storage tank prepared at the uppermost part of the cell toward the air box. Air pressure in the air box could be controlled. Although the upper part of the cell was saturated with glycerol, finger-type infiltration formed in the lower part of the cell. The finger formed below the narrow part along the center line became exceptionally large, because the gap width of this part was greater than the other part and much amount of glycerol could be supplied through the part. Pressure in this center finger was measured at 10 points along the center line. The obtained results were as follows;

- (1) The width of every finger decreased following the increase of air pressure.
- (2) Air mainly leaked through the narrow part along the center line after when the air pressure exceeded the critical value.
- (3) Many fingers still remained at the start of the leakage.
- (4) Capillary force acting at the side of finger may reduce the critical air pressure at which the leakage starts.

* Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, 338, Japan