

(106) 岩盤亀裂系への高圧空気侵入に伴う裂か水の流動について

神戸大学工学部 正会員 川谷 健
神戸大学大学院 学生員 池宮 俊二

Study on Flow of Fissure Water Induced by High-Pressure Air Flow in Openings of Rock

Takeshi KAWATANI, Faculty of Engineering, Kobe University
Shunji IKEMIYA, Graduate School, Kobe University

Abstract

The movement of fissure water induced by a high-pressure air intrusion into interstices of rock mass was numerically analyzed for better understanding of the phenomenon. A one-dimensional model employed in this study consisted of the interstices which diverged and joined again. It was assumed that a definite interface separated the air from the water in each interstice and moved in a steady state for a small time interval.

The results show that the removal of the fissure water by the air intrusion is much faster in larger interstices than in smaller ones. Thus, larger interstices serve as the path of the air, while smaller ones function to store the water. This behavior of the fissure water is important to understand the two-phase flow of the air and water in openings of rock mass in the case where the density of openings is too small to regard the rock mass as a porous medium.

1. はじめに

高圧の圧縮空気を岩盤内地下空洞に貯蔵するとき、岩盤亀裂系への高圧空気の侵入が問題となる。多くの場合、亀裂内には裂か水が存在するが、そこへの高圧空気の侵入を考えると、圧縮性をもつ空気と、それによって流動をはじめる裂か水の2流体の流れを取り扱うことが必要となる。とくに比較的短時間に空気の貯蔵と放出が繰り返されるCAESなどの場合、亀裂系内の流れは非定常であり、その挙動は複雑となる。本研究では、亀裂系に高圧空気が侵入し、裂か水が流動・排除される過程を理解するため、簡単な1次元モデルを設定し、流れが準定常流であるとして解析を行った。さらに非定常流としての解析を差分法で行うことも検討し、非定常流解析と準定常流解析の結果を比較することで空気流の非定常項が解析結果に与える影響を調べた。

2. 解析方法

非常に高い亀裂密度の岩盤では、流れは巨視的には均質な多孔質体内の浸透流として解析できる。この場合、空気と水の2流体の流れも、例えば不飽和浸透流として解析できる¹⁾。しかし亀裂密度が小さいとき、岩盤内の流れは個々の亀裂の特性、とくに開口幅の影響を受けると考えられる。したがってこの場合、2流体の流れの挙動を理解するには、個々の亀裂での流れについて知ることが重要となる。そして空気と水とが明確な内部境界で分離された流れの解析、すなわち移動境界問題の解析が必要となる。ここでは亀裂内の流

れを平行板の微小間隙内の層流として解析する²⁾。

[基礎方程式]

いま亀裂が水平であり重力を無視すれば、亀裂内での空気と水の平均流速は、 $V_a = -(b^2/12\mu_a)(\partial p_a/\partial x)$ および $V_w = -(b^2/12\mu_w)(\partial p_w/\partial x)$ (1) である。ここに、 V は平均流速、 p は圧力、 μ は粘性係数、添字 a と w はそれぞれ空気と水を表す。これらを連続の式に導入すれば、水については圧縮性を無視できるので $\partial^2 p_w / \partial x^2 = 0$ (2) が得られる。一方、空気については理想気体に対する状態方程式を用いて等温変化を考える。さらに空気と水を分ける内部境界面の移動が空気および水の領域内での圧力伝播より遅いとき、 $\partial p_a / \partial t$ は無視できるので $\partial^2 p_a^2 / \partial x^2 = 0$ (3) が得られる。式(2)と(3)より、水の領域では水圧(p_w)は線形分布、空気の領域では空気圧の2乗(p_a^2)が線形分布であることがわかる。内部境界で満たされるべき条件は、空気圧と水圧が等しく、また空気と水の流速の境界面に垂直な成分が等しいことである。

[分岐・合流する亀裂内での空気侵入と裂か水の流動]

図-1から図-3に示すように、分岐・合流する亀裂に空気が入り込む場合を考える。

空気侵入域が分岐点より手前のとき(図-1)、時刻 t のときの空気侵入長 $L_x(t)$ が与えられれば、境界面での圧力 p_x に関する2次方程式が導かれる。これを解いて p_x が求まれば、境界面の速度 $V_x(t)$ も算定できるので、 Δt 時間後の空気の侵入長は $L_x(t+\Delta t) = L_x(t) + V_x(t)\Delta t$ となる。この計算を Δt 時間ごとに繰り返せば空気侵入長、空気圧分布、水圧分布が求まる。

空気が分岐区間に侵入したとき(図-2)、分岐点において空気に関する質量保存を考え、また合流点で水の質量保存を考える。さらに L_2 および L_3 区間のそれぞれで境界面での流速条件を適用すれば、境界面での圧力 p_y および p_z 、および分岐点と合流点の圧力 p_{L1} と p_{L2} を

未知数とする4つの連立2次方程式が導かれる。これを数値計算的に解いて p_y と p_z が求まれば、境界面の移動速度 $V_y(t)$ および $V_z(t)$ も計算できるので、 Δt 時間後の空気侵入長は $L_y(t+\Delta t)$ と $L_z(t+\Delta t)$ が計算できる。この手順を繰り返せば Δt 時間ごとの各区間での空気圧と水圧の分布が求まる。

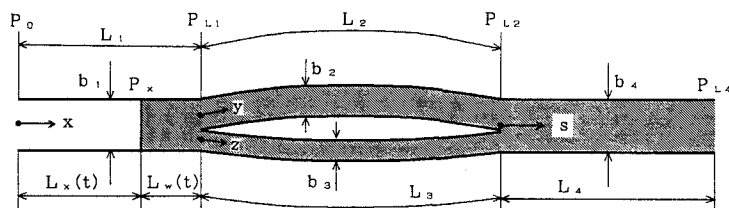


図-1 分岐・合流する割れ目の解析モデル (空気が L_1 区間に侵入した場合)

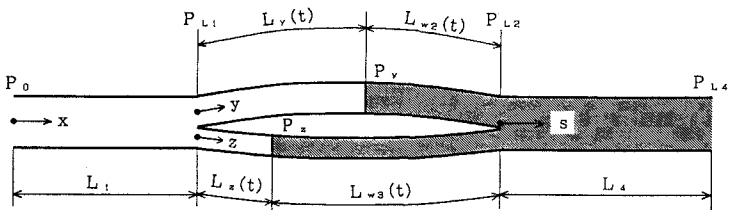


図-2 分岐・合流する割れ目の解析モデル (空気が L_2, L_3 区間に侵入した場合)

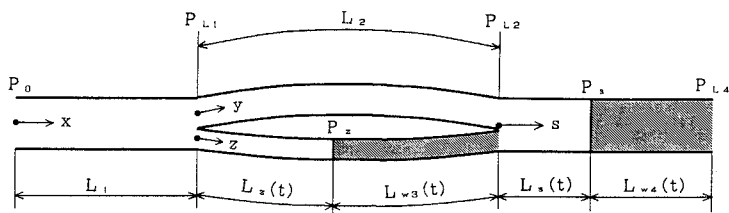


図-3 分岐・合流する割れ目の解析モデル (空気が L_4 区間に侵入した場合)

空気が合流点より下流に達した場合（図-3）を考える。いま分岐区間の亀裂開口幅 b_2 と b_3 にかかなりの差があるとすれば、流速は開口幅の2乗に比例するので、流速の差はさらに大きくなる。それゆえ図-3のように L_2 区間の水が排除された後も L_3 区間にはまだ水が残っていると考えられる。まず空気に関する質量保存を分岐点および合流点で考える。一方、水の質量保存に関しては、図-3のように L_2 区間が空気の流路になってしまうと分岐点と合流点の圧力差は小さくなり L_3 区間に残った水はほとんど移動しないと考えられるので、 L_4 区間の流量には L_3 区間からの流入量を算入しないこととする。さらに境界面では空気と水の流速が等しいことを L_3 および L_4 区間のそれぞれで考慮すれば、 p_a , p_z , p_{L1} , p_{L4} を未知数とする4つの連立2次方程式が導かれる。これを解けば空気圧分布、水圧分布、および境界面の移動速度が算定できる。

3. 解析結果

以下の結果は、計算条件を次のように設定した場合である。各区間の長さは $L_1 = 30 \text{ cm}$, $L_2 = L_3 = 30 \text{ cm}$, $L_4 = 40 \text{ cm}$ である。亀裂幅は $b_1 = 500 \mu\text{m}$, $b_2 = 300 \mu\text{m}$, $b_3 = 100 \mu\text{m}$, $b_4 = 400 \mu\text{m}$ である。上流端の空気圧は $p_0 = 10 \text{ 気圧}$, 下流端の水圧は $p_{L4} = 1 \text{ 気圧}$ である。時間間隔は $\Delta t = 1/1000 \text{ 秒}$ である。粘性係数は 空気が $\mu_a = 1.80 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 水が $\mu_w = 1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。

空気と水の境界面が、 L_1 区間にあるときの圧力分布を図-4に、 L_2 区間と L_3 区間にあるときの圧力分布を図-5に、 L_4 区間と L_3 区間にあるときの圧力分布を図-6に示す。そして L_3 区間にだけ水が残っているときの圧力分布を図-7に示す。

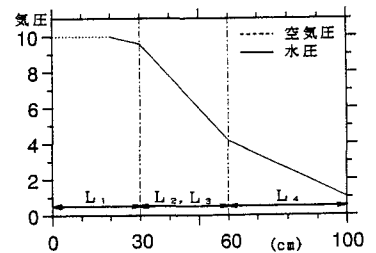


図-4 空気が $x=20\text{cm}$ まで侵入したときの空気圧および水圧の分布

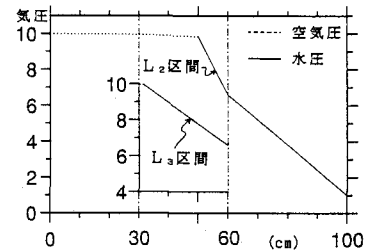


図-5 空気が $y=20\text{cm}$ ($z=1.6\text{cm}$ まで) 侵入したときの空気圧および水圧の分布

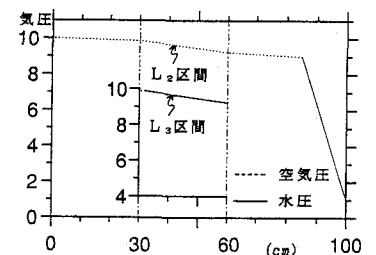


図-6 空気が $s=20\text{cm}$ ($z=1.9\text{cm}$ まで) 侵入したときの空気圧および水圧の分布

空気が L_1 区間にあるとき（図-4），空気の区間での圧力損失は非常に小さい。 L_2 区間に空気が 20 cm 侵入（図-5）したとき， L_3 区間には空気が約 1.6 cm しか侵入していない。この場合も，空気の区間での圧力損失は小さい。 L_2 区間の水が排除され，空気が L_4 区間に 25 cm 侵入（図-6）したときでも， L_3 区間の大部分にはまだ水が残っており， L_3 区間の空気侵入長は約 2 cm にすぎない。空気の区間での圧力損失は図-4や図-5の場合と比べてやや大きくなっており，なかでも開口幅の小さい L_2 区間での損失が相対的に大きい。 L_2 区間の水が排除されると， L_2 区間（したがって L_3 区間）の両端の圧力差は，水が存在したときよりも小さくなるので， L_3 区間の水の流速は非常に小さくなる。 L_4 区間の水が排除されてしまうと（図-7），空気の圧力勾配が大きくなり， L_3 区間の両端の圧力差も再び大きくなるので， L_3 区間の水の流速も速くなる。

図-8は， L_3 区間における境界面の移動速度の経時変化である。 L_2 区間に水が残っている間は境界面の移動速度が急速に減少している（すなわち図中 $a \sim b$ ）。つぎに， L_2 区間の水が排除されて空気が L_4 区間に侵入すると，境界面の移動速度がきわめて小さくなり，ほぼ一定となった後ふたたび大きくなる（図中の， $b \sim c$ ）。そして， L_3 区間にだけ水が残った状態になると，この区間の水は急速に排除される（図中， $c \sim$ ）。

空気圧と水圧の分布については以下の点が指摘できる．内部境界では空気と水の流速（境界面の法線方向の流速成分）が等しいが， $\mu_a \approx (1/50) \mu_w$ であるので，空気圧の勾配は水圧勾配のほぼ $1/50$ となる．したがって，裂か水が存在する亀裂内では空気圧の低下は小さく，内部境界での圧力は貯蔵空気圧とほぼ等しい．

4. 差分計算と非定常項が計算結果に与える影響の検討

ここでは単一の亀裂（図-9）における空気と水の流れを解析する．

空気域での基礎式は
$$\frac{1}{p_a} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{b^2}{12\mu_a} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0$$

である．ここに， $\Psi = p_a^2$ である．

上式を後退差分法によって離散化し，以下の手順で計算を実行する．1) 節点は割れ目に沿って等間隔 Δx で配置する．2) 各時間ステップで，空気と水の境界面は Δx だけ進むものとする．したがって，時間間隔 Δt は境界面がどの節点にあるかによって異なる．いま境界面が節点 j にあれば，そのときの時間間隔 Δt_j は $\Delta t_j = \Delta x / V(j-1)$ である．ここに $V(j-1)$ は境界面が節点 $j-1$ にあるときの境界面の移動速度である．3) $t = 0$ のときの境界面の移動速度は，亀裂が水で満たされているときの水の流速とする．4) 境界面が節点 j にある場合，まず境界面での圧力 p_j に近似値 ϕ_j を与え，これを x_j での境界値として空気域内の各節点 ($x = \Delta x, \dots, x_{j-1}$) での Ψ を求める．そして境界面における空気の流速と水の流速を算定し， $|V_a - V_w| < \varepsilon$ なる条件が満たされているかどうかを調べる．5) 収束条件が満たされていないときは，上記の V_a と V_w の値にもとづいて，はさみうち法³⁾によって ϕ_j の修正値を求める．これを採用して4)にもどり繰り返し計算を行う．この繰り返し計算では非線形項の修正も行う．

図-10 は，単一亀裂内の空気と水の圧力分布であり，流れを準定常流と仮定した解析結果と非定常流として差分計算した結果の比較である．亀裂の長さは $L = 1 \text{ m}$ ，幅は $b = 200 \mu\text{m}$ であり， $\Delta x = 2.5 \text{ cm}$ ， $p_0 = 10 \text{ 気圧}$ ， $p_L = 1 \text{ 気圧}$ である．

空気と水の境界面が $x = 90 \text{ cm}$ に達するまでは，両者の解析結果に大きな差は見られない．しかしそれ以後は，非定常流として計算した場合の空気圧が大きくなっている．これは，境界面の移動速度が下流端に近づくほど大きくなるため，非定常項すなわち圧力の時間変化が大きくなるためと考えられる．

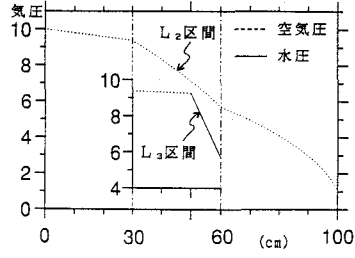


図-7 裂か水が L_3 区間だけに残っているときの空気圧および水圧の分布 (L_3 区間の空気侵入域は $z=20\text{cm}$)

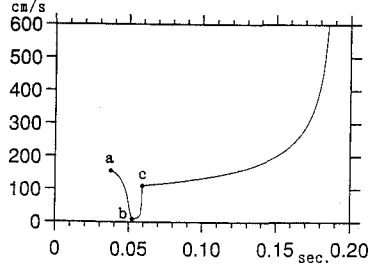


図-8 L_3 区間における空気と水の境界面の移動速度の経時変化

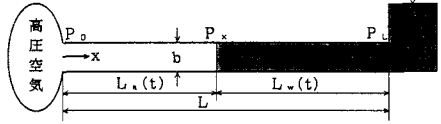


図-9 解析モデル（単一の割れ目）

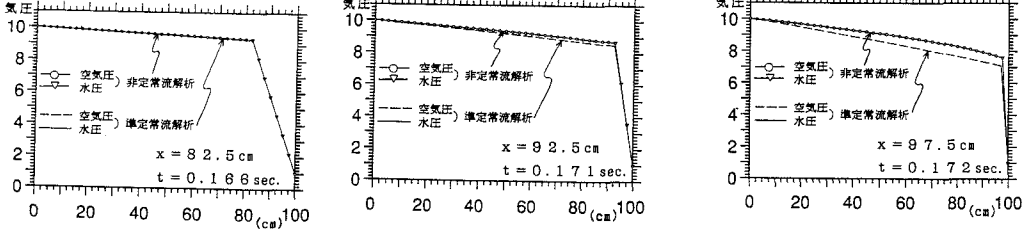


図-10 非定常流の差分計算結果と準定常流の解析結果との比較（単一割れ目内の空気圧と水圧の分布）

5. まとめ

本研究では、分岐・合流する亀裂内に高圧空気が侵入し、それによって裂か水が排除される過程を、簡単な一次元の亀裂モデルを設定して解析した。その結果、高圧空気は相対的に大きな開口幅の亀裂に侵入し、その亀裂から分岐する小さな開口幅の亀裂にはほとんど侵入せず、そこでの裂か水の流動も小さいことが明らかになった。このことから、裂か水の存在する岩盤亀裂系に高圧空気が侵入する場合、まず開口幅の大きい亀裂が空気の流路となり、比較的小さい亀裂には裂か水がとりに残され则认为られる。したがって、「岩盤の飽和・不飽和」を考えるうえで亀裂系における開口幅のばらつきは重要な要素であると思われる。なお、一次元の亀裂系モデルで空気と水という2流体の流れを解析する場合、空気密度の時間微分項が解析結果に及ぼす影響は小さいと认为られる。

おわりに

本研究が文部省科学研究費一般(B)(課題番号, 04452227)による成果であることを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川加明一郎, 駒田広也 他: 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, 370 (III-3), 233-241, 1986.
- 2) Bear, J.: Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier, pp. 690-693, 1972
- 3) E. クライツィグ: 数値解析(5), 培風館, pp. 15-17, 1988.