

岩盤亀裂系への高圧空気侵入と裂か水流動の数値解析的研究

Numerical Study of Water Flow Induced by High-Pressure Air
Intrusion into Fracture Network of Rock Mass

川谷健*・久保真成**・高本英邦***

By Takeshi KAWATANI, Masanari KUBO and Hedikuni TAKAMOTO

A numerical simulation was carried out to study the high-pressure air intrusion into fractured rock mass and the flow of fissure water induced by the intrusion. The fracture network model consists of many interstices of different widths and various directions.

The results show that the air replaces the fissure water much faster in larger interstices than in smaller ones. Thus, larger interstices serve as the path of the air flow, while smaller ones function to store the water. This flow characteristics of the air and the fissure water is important to control the leakage of compressed air by water injection in fractured rock mass whose density of interstices is too small to regard rock mass as porous medium.

Keywords: fissure water, air intrusion, fracture network, numerical study.

1. はじめに

地下空間の有効利用の一つとして高圧ガスの地下貯蔵¹⁾がある。そのうち圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES) は、夜間の余剰電力で空気を圧縮貯蔵し、昼間の電力使用ピーク時にそのエネルギーを利用するもので、貯蔵空気圧は数十気圧に達し、貯蔵・放出の方法によっては1日のサイクルで変動する。岩盤内空洞に高圧空気を貯蔵するとき、岩盤亀裂系を通っての漏気が大きな問題となる。適切な漏気防止策あるいは制御策をたてるには、高圧空気が裂か水を流動・排除しながら岩盤亀裂系に侵入する状況を把握することが重要である。

岩盤亀裂系における空気と水という2流体の流れを解析するとき、亀裂密度が非常に高く、岩盤を巨視的には多孔質地盤と見なすことができる場合、飽和・不飽和浸透流の解析手法を適用することができる。^{2), 3)} 一方、亀裂密度が小さい場合、流れは亀裂系の特性(開口幅、割れ目の長さ、方向、それらの分布など)によってその様相が異なると考えられ⁴⁾、したがって個々の亀裂内での水と空気の流れに着目した解析が必要になる。

筆者らは、亀裂内の流れは亀裂開口幅の影響を最も強く受けると考え、1つの亀裂が間隙幅の異なる2つ

* 正会員 Ph.D. 神戸大学教授 工学部土地造成工学研究施設
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻

*** 学生会員 神戸大学大学院 工学研究科土木工学専攻

の亀裂に分岐したのち再び合流して1つになる系を設定し、空気侵入と裂か水流動の数値シミュレーションを行った⁵⁾。そして、空気は間隙幅の大きい亀裂に侵入し、小さい亀裂には裂か水が取り残されることを示した。本研究では、間隙幅の異なる亀裂が複雑に交差する亀裂系モデルを設定して、そこでの空気侵入と裂か水の流動・排除過程の数値解析を実行した。その結果、岩盤亀裂系内の空気と水の流れに多孔質地盤における飽和・不飽和浸透流とは明らかに異なる流況が認められたので、ここに報告する。

2. 解析方法

亀裂内の流れが平滑な平行板間の層流として取り扱えるものとする。水と空気はつねに明確な界面をもって分かれており、界面は個々の亀裂内の平均流速で移動するものとし、空気の侵入過程を界面の移動を追跡することによって解析する。

微小間隙内の層流の平均流速は

$$v_{\alpha} = -\frac{b^2}{12\mu_{\alpha}} \left(\frac{\partial p_{\alpha}}{\partial s} + \rho_{\alpha} g \frac{\partial z}{\partial s} \right) \quad (1)$$

である。ここに、添字 α は空気あるいは水を表し、空気るとき $\alpha = a$ 、水るとき $\alpha = w$ であり、 v_{α} は平均流速、 p_{α} は圧力、 μ_{α} は粘性係数、 ρ_{α} は密度、 g は重力の加速度、 b は開口幅、 s は割れ目に沿って測った距離、 z は鉛直座標（上向きを正）である。

連続の式は

$$\frac{\partial p_{\alpha}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\alpha} v_{\alpha})}{\partial s} = 0 \quad (2)$$

である。ここに、 t は時間を表す。

水は非圧縮性であるとして、開口幅が一定の区間では、式(1)と(2)より、

$$\frac{\partial^2 p_w}{\partial s_w^2} = 0 \quad \text{すなわち} \quad p_w(s_w) = \frac{p_{wL} - p_{w0}}{L_w} s_w + p_{w0} \quad (3)$$

が得られる。ここに、 L_w は水の領域の長さ、 p_{wL} と p_{w0} は両端の水圧である（図-1参照）。

空気の密度変化は理想気体のそれで近似できるとし、等温変化であるとするれば、空気の密度と圧力は比例する。さらに、亀裂内の流れは緩やかで、空気密度の時間変化が無視できるものとする。このとき、空気については

$$\frac{\partial^2 p_a^2}{\partial s_a^2} = 0 \quad \text{すなわち} \quad p_a^2(s_a) = \frac{p_{aL}^2 - p_{a0}^2}{L_a} s_a + p_{a0}^2 \quad (4)$$

が得られる。ここに、 L_a は空気の領域の長さ、 p_{aL} と p_{a0} は両端の空気圧である（図-1参照）。

亀裂内での水と空気の界面移動を追跡するにあたって考慮すべき条件は

(1) 亀裂の交点で、水あるいは空気についての連続の式が満たされること。

(2) 界面で、水圧と空気圧が等しいこと。実際には界面をはさんで圧力の不連続（毛管圧）が存在する。しかし本解析で取り扱う空気圧あるいは上・下流端の圧力差に較べて毛管圧は無視できるほど小さく、また界面の移動に表面張力（毛管圧）が果たす役割は小さいと考えられるので、この条件を設定する。

(3) 界面で、水の流速と空気の流速が等しいこと。

である。

界面で空気と水の流速が一致することから、図-1を参照して

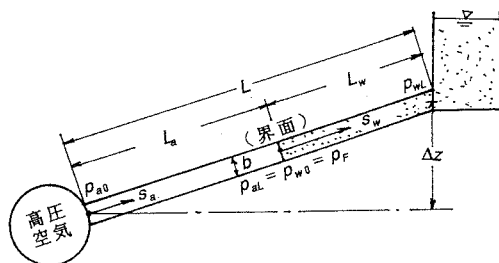


図-1 水圧及び空気圧の分布に関する式の記号

$$-\frac{b^2}{12\mu_a} \frac{\partial p_a}{\partial s_a} \Big|_{La} = -\frac{b^2}{12\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial s_w} \Big|_0 + \rho_w g \frac{\Delta z}{L} \right)$$

である。また界面で水圧と空気圧の勾配はそれぞれ式 (3) と (4) より

$$\frac{\partial p_w}{\partial s_w} \Big|_0 = \frac{p_{wL} - p_{w0}}{L_w} \quad \text{および} \quad \frac{\partial p_a}{\partial s_a} \Big|_{La} = \frac{p_{aL}^2 - p_{a0}^2}{2p_{aL}L_a}$$

であり、さらに界面での圧力を p_F とすれば $p_{aL} = p_{w0} = p_F$ であるので、

$$\frac{1}{\mu_a} \left(\frac{p_F^2 - p_{a0}^2}{2p_F L_a} \right) = \frac{1}{\mu_w} \left(\frac{p_{wL} - p_F}{L_w} + \rho_w g \frac{\Delta z}{L} \right)$$

と書ける。したがって図-2に示すような界面 k を考えると

$$\left(\frac{1}{\mu_w s_{wk}} + \frac{1}{2\mu_a s_{ak}} \right) p_k^2 + \frac{\rho_w g}{\mu_w} \frac{z_k - z_{wk}}{s_{wk}} p_k - \frac{1}{\mu_w s_{wk}} p_k p_{wk} - \frac{1}{2\mu_a s_{ak}} p_{ak}^2 = 0 \quad (5)$$

が導かれる。ここに、 p_k と z_k は界面 k の圧力と z 座標、 p_{wk} と z_{wk} は水の存在する側の交点の圧力と z 座標、 p_{ak} と z_{ak} は空気側の交点の圧力と z 座標である。この圧力に関する2次方程式によって亀裂交点の空気圧、水圧および界面の圧力が関係づけられる。

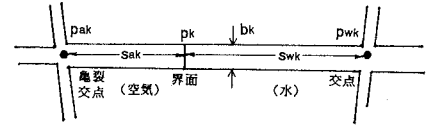


図-2 式 (5) の記号

一方、亀裂交点における連続の式より以下の関係式が導

かれる。いま図-3のように、亀裂交点を i 、交点 i を構成する亀裂を ij で表す。交点 i の圧力を p_i とし、亀裂 ij のもう一方の交点あるいは亀裂内の界面における圧力を p_{ij} とする。交点 i と隣接する交点あるいは界面との距離を s_{ij} 、亀裂 ij の開口幅を b_{ij} で表す。このとき、亀裂交点で水あるいは空気の質量保存を考えると、水で満たされた交点では、

$$\sum_{j=1}^{N_w} b_{ij} v_{wj} = 0 \quad \text{すなわち} \quad \sum_{j=1}^{N_w} b_{ij}^3 \left(\frac{p_i - p_{ij}}{s_{ij}} + \rho_w g \frac{z_i - z_{ij}}{s_{ij}} \right) = 0 \quad (6)$$

空気で満たされた交点では

$$\sum_{j=1}^{N_a} b_{ij} (\rho_a v_{aj}) = 0 \quad \text{すなわち} \quad \sum_{j=1}^{N_a} b_{ij}^3 \frac{p_i^2 - p_{ij}^2}{s_{ij}} = 0 \quad (7)$$

が得られる。ここに、 v_{wj} と v_{aj} は亀裂 ij 内の水および空気の流速、 N_w は亀裂 ij のうち交点 i の周りに水が存在する亀裂の数であり、 N_a は同様に空気が存在する亀裂の数である。 z_i は交点 i の z 座標、 z_{ij} は亀裂 ij のもう一方の交点あるいはその中の界面の z 座標である。

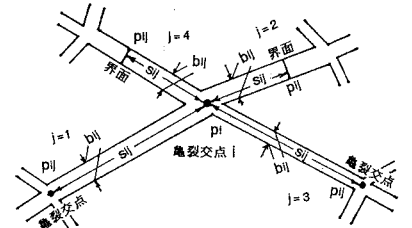


図-3 式 (6) と (7) の記号

式 (5), (6), (7) は、亀裂交点および界面での圧力を未知量とする連立2次方程式である。これを Newton-Raphson 法などを用いて解き、亀裂交点および界面での圧力が求まれば、界面での圧力勾配が算定でき、したがって界面の移動速度が決まる。時刻 t のときの界面の位置を $s(t)$ で表せば、 Δt 時間後の位置は $s(t + \Delta t) = s(t) + V_F(t) \Delta t$ (ここに $V_F(t)$ は界面の速度) で算定し、その結果、式 (6) ~ (8) 中の s_{ij} , s_{ak} , s_{wk} , z_k などを変えて新たな条件下での亀裂交点および界面の圧力を求める。この計算を Δt 時間ごとに繰り返し空気侵入長、空気圧分布、水圧分布を決定する。このような解析手法の妥当性は、簡単な亀裂系を設定して行った実験と数値シミュレーションでは確かめられている⁶⁾。

なお、この解析では両端に空気が侵入した亀裂内の水は流動しないものとして、そのような亀裂からの水の浸出量について亀裂交点での連続の式には考慮しなかった。その理由を以下に述べる。図-4は、1本の亀裂が間隙幅の異なる2本の亀裂に分岐したのち再び合流して1本の亀裂となる亀裂モデルを設定して実施

した空気侵入過程の数値シミュレーション結果である⁵⁾。分岐区間の2つの亀裂の開口幅の比は3:1である。図-4(a)は分岐区間に水が存在する場合の界面位置と圧力分布である。流速は間隙幅の2乗に比例するので、この場合には大きい亀裂の空気侵入長は小さい亀裂の約1.2倍となっている。また空気の粘性が小さいので、空気の区間の圧力低下は水の区間のそれと較べて無視できるほど小さい。図-4(b)は、分岐区間の大きい亀裂内の水が排除され、一方小さい亀裂内にはまだ水が存在する場合である。このとき、分岐区間の両端に空気が存在するので分岐区間の圧力低下は図-4(a)の場合よりはるかに小さくなり、そのため小さな亀裂の中の水はほとんど流動しないことになる。したがって、両端に空気が侵入した亀裂内の水の流動は無視し得るほど小さいと考えられる。しかし、小さな亀裂以外の水が排除されてしまうと空気の圧力勾配が亀裂両端の圧力差に支配されることになり、分岐区間の両端の圧力差も大きくなって小さい亀裂内の水は急速に流動する。したがって、ここで設定した条件は成立しなくなる。

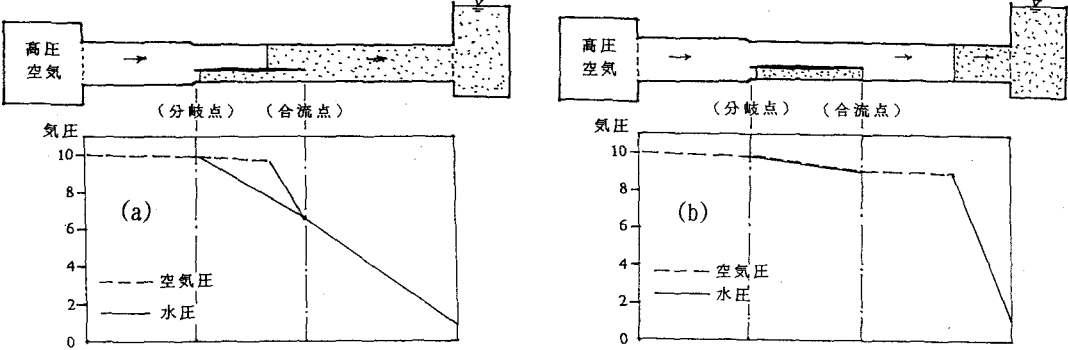


図-4 分岐・合流する亀裂モデルにおける空気侵入状況と水圧・空気圧分布

3. 解析結果

亀裂系モデルとして、鉛直面内の $(x=10\text{ m}) \times (z=20\text{ m})$ の矩形領域に40本の割れ目を分布させた。亀裂の間隙幅は、亀裂交点間の線分ごとに乱数を用いて設定することとし、ここでは指数分布を採用し、平均値を $30\mu\text{m}$ 、下限値を $10\mu\text{m}$ 、そして上限値を $50\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ とする3ケースについて解析を行った。最初、亀裂は水で満たされているものとし、領域の下端 ($z=0\text{ m}$) から高圧空気が侵入するものとする。境界条件は、下端の圧力が 2MPa 、上端 ($z=20\text{ m}$) の圧力が 0.1MPa 、左右の両境界 ($x=0\text{ m}$ および 10 m) が不透性境界とした。粘性係数は、空気が $\mu_a=18.65 \times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、水が $\mu_w=1010.0 \times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$ である。計算の時間間隔は $\Delta t=2\text{ 秒}$ とした。なお間隙幅 $10\mu\text{m}$ の場合の毛管水頭は約 150 cm である。

図-5に、間隙幅の上限値が $50\mu\text{m}$ の場合について、空気侵入の開始から10分後および15分後の空気の侵入状況および亀裂系内の圧力分布を示す。空気が侵入した領域（例えば15分後では $z=0\sim15\text{ m}$ ）では、亀裂内の圧力勾配は、まだ空気が侵入していない領域のに較べて非常に小さい。そのため、空気が侵入した領域においては、空気と較べて約50倍も粘性の大きな水はほとんど流動しなくなり、さらに流速は開口幅の2乗に比例するので、小さな亀裂内の水はますます流動し難く、事実上そこに封じ込められることになる。したがって、この解析で、両端に空気が侵入した亀裂内の水は流動しない、とした条件設定は妥当と考えられる。基本的には、大きい割れ目ほど水が流動し易く、空気が侵入し易いので、図に示すように、空気は大きい亀裂を通して10分後に $z=8.5\text{ m}$ 、15分後に $z=14\text{ m}$ 付近にまで達しているが、それより下方の領域の大部分の割れ目には水が封じ込められている。圧力分布は、空気が相対的に大きな割れ目を経路として侵入するにつれて大きく変わり、また水平断面 ($z=\text{const.}$) 内で圧力は必ずしも一定でないことが分かる。

図-6に、間隙幅の上限値が $50\mu\text{m}$ である場合と $100\mu\text{m}$ である場合について、空気が領域の上端 ($z=20\text{ m}$) から流出し始めたときの空気の経路と侵入状況を示す。また図-7は、空気が上端から流出し始めた

時点、領域を $\Delta z = 1\text{ m}$ で20分割して部分領域ごとに算定した飽和度を、間隙幅の上限値が $50\mu\text{ m}$ 、 $70\mu\text{ m}$ 、 $100\mu\text{ m}$ である場合について示したものである。この算定で、空隙の体積は（割れ目開口幅） $\times$ （割れ目の長さ）とした。また、不透性境界に直接つながる割れ目には空気が侵入しないので、それらは飽和度の算定対象としなかった。飽和度は、空気の流入端付近（ $z \leq 3\text{ m}$ ）および流出端付近（ $z \geq 15\text{ m}$ ）で、上方に向かってやや増加する傾向が認められる。しかし解析領域の大部分を占めるその他の領域（ $3\text{ m} \leq z \leq 15\text{ m}$ ）では、領域ごとにかんがりのばらつきがあり、平均値がほぼ0.65であるものの、そのまわりに最大 ± 0.15 程度のばらつきがある。このような飽和度の分布は、多孔質地盤を対象に飽和度の空間的な連続性とスムーズな変化を前提とする飽和・不飽和浸透解析の手法を適用することによっては得られないものであり、言い換えれば、岩盤亀裂系への高圧空気の侵入過程は多孔質地盤に対する飽和・不飽和浸透解析手法を直接的に適用するだけでは明らかにできないことを示唆している。

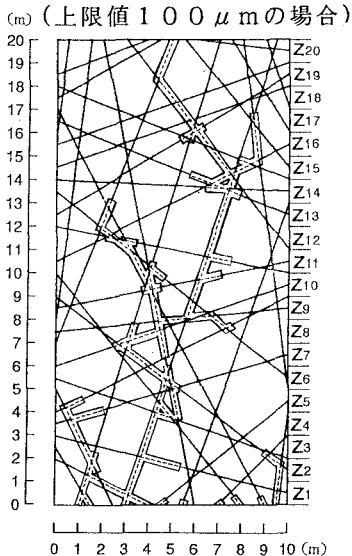
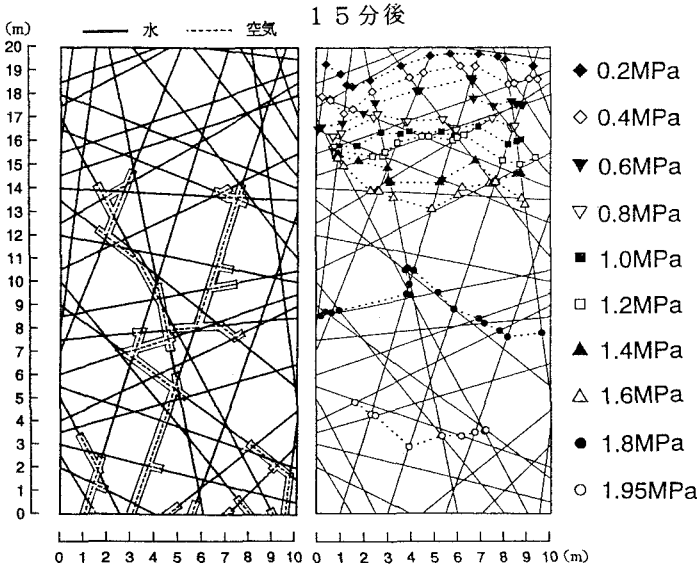
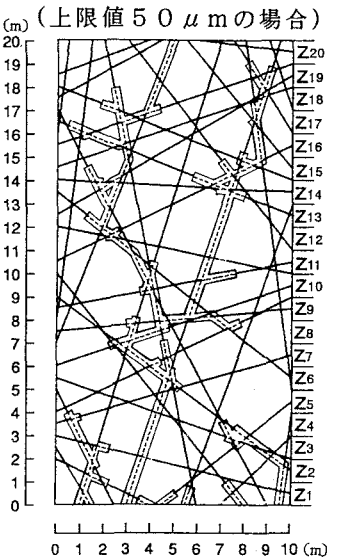
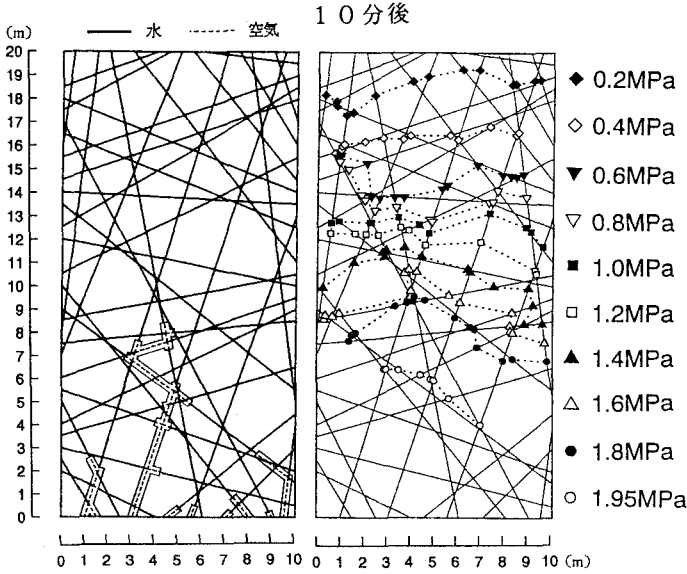


図-5 空気の侵入状況と圧力分布
（上限値 $50\mu\text{ m}$ の場合）

図-6 上流端から空気が流出し
始めたときの空気の経路

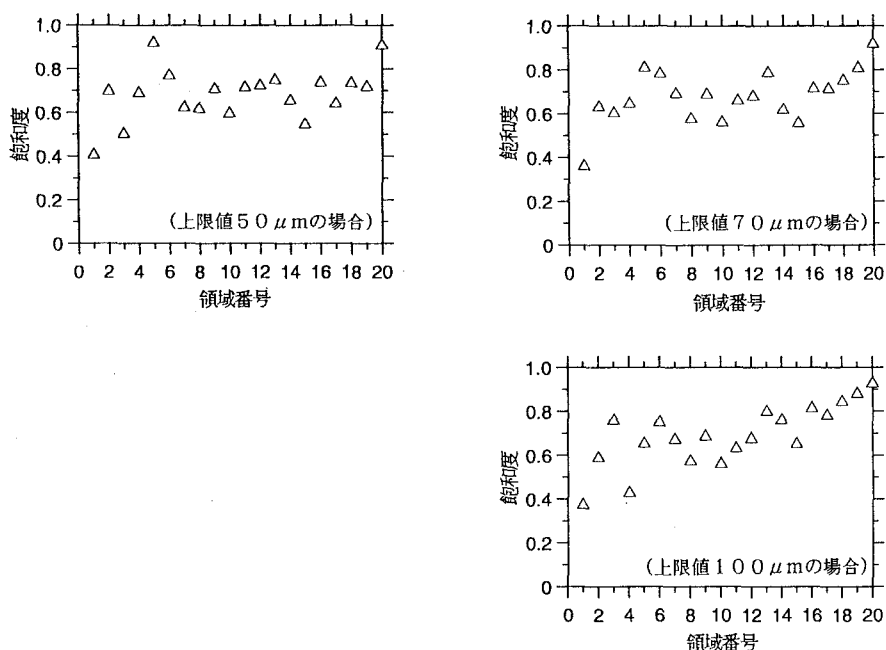


図-7 上流端から空気が流出し始めたときの各領域の飽和度分布

4. まとめ

間隙幅の異なる亀裂が複雑に交差する亀裂系に高压空気が裂か水を排除しながら侵入する過程について、数値解析を行った。その結果、相対的に間隙幅の大きい亀裂をつないで空気の侵入経路が形成され、一方小さい間隙幅の亀裂では水の流動抵抗が大きく、そこに空気はほとんど侵入できないことがわかった。また亀裂系の「飽和度」は必ずしも飽和領域から不飽和領域まで連続的に変化するものではないことも明らかになった。したがって裂か水の存在する岩盤亀裂系へ高压空気が侵入する過程あるいは現象について解析・シミュレーションを実行するとき、多孔質地盤における飽和・不飽和浸透流の解析手法を適用することについてはその妥当性を慎重に検討することが必要である。

参考文献

- 1) 桜井春輔・H. Kjørholt・田村富雄・山地宏志：高压ガス地下貯蔵の実績とわが国の動向，土木学会論文集，No. 474/VI-20，pp. 57-65，1993.
- 2) Meiri, D. : Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, Water Resources Research, Vol. 17, No. 5, pp. 1360-1366, 1981.
- 3) 中川加明一郎・駒田広也・宮下国一郎・村田満：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，第370号/III-5，pp. 233-241，1986.
- 4) Kovacs, G. : Seepage hydraulics, Elsevier Publishing Company, pp. 396-472, 1981.
- 5) 川谷健・池宮俊二：岩盤亀裂系への高压空気侵入に伴う裂か水の流動について，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 511-515，1993.
- 6) 川谷健・中北佳男・高本英邦：岩盤亀裂系における地下水回復時の空気の挙動について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 169-174，1994.