

岩盤亀裂系への高圧空気侵入と裂か水の流動に関する研究

神戸大学工学部 正 川谷 健
 神戸大学大学院 学 高本 英邦
 東京電力(株) 中北 佳男

1. はじめに 高圧空気を岩盤内空洞に貯蔵するとき、適切な漏気防止・制御策をたてるためには、岩盤亀裂系における空気侵入過程と裂か水の挙動を把握することが重要である。筆者らは、1つの亀裂が間隙幅の異なる2つ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¹⁾。その結果、空気が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が明らかになった。本報では、複雑な構造の亀裂系における空気侵入過程と空気侵入に伴う裂か水の流動について理解するため、間隙幅の異なる亀裂が複雑に交差する亀裂系を設定して実行した数値解析結果について報告する。

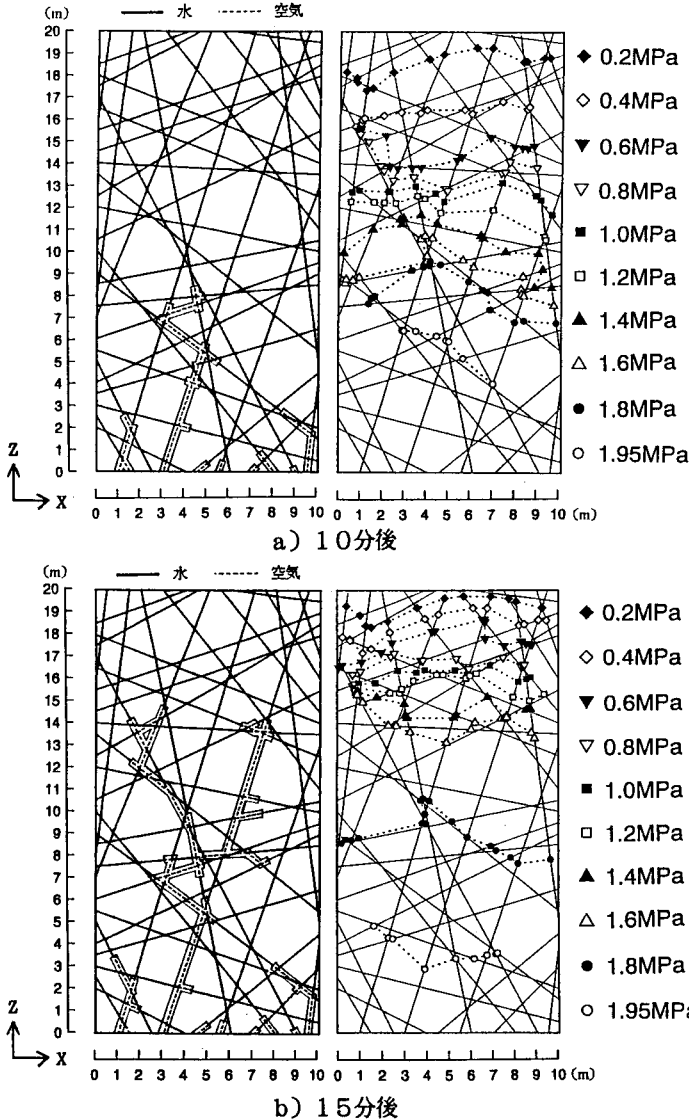
2. 解析方法 亀裂内の流れは平行板間の層流であり、また空気密度は等温変化であるとする。このとき、間隙幅が一定の区間では、水圧はその勾配が一定、空気圧はその2乗の勾配が一定である²⁾。この圧力分布を考慮して、① 亀裂交点で、水あるいは空気の質量保存が成り立つこと、② 水と空気の界面(水面)で、水圧と空気圧が等しく、また水と空気の流速が一致すること、を定式化すれば、亀裂交点および界面での圧力を未知量とする連立2次方程式が導かれる²⁾。連立方程式の解は、例えば Newton-Raphson 法を用いて求める。これらの圧力が求まれば、界面の移動速度、したがって時々刻々の界面の位置が決定できる。なおこの解析では、上述の分岐・合流する亀裂系での解析結果に基づき、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た。

3. 解析条件と解析結果 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本の亀裂を分布させた。亀裂の間隙幅は、亀裂交点間の線分ごとに指数乱数を用いて与えた。ここでは、平均値 $30\mu\text{m}$ 、上限値 $50\mu\text{m}$ 、下限値 $10\mu\text{m}$ の指数分布とした。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 2 MPa 、上端($z=20\text{ m}$)の圧力が 0.1 MPa 、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。

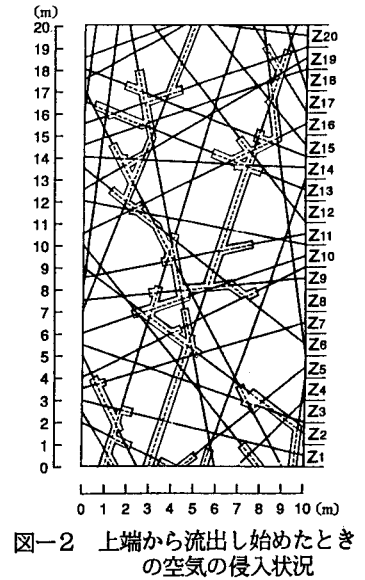
図-1に、空気侵入の開始から10分後および15分後の空気の侵入状況および亀裂系内の圧力分布を示す。亀裂内の流速は間隙幅の2乗に比例するので、大きい亀裂では水が流動し易く、空気が侵入し易い。一方、小さい亀裂では、水の流動抵抗が大きい上に、その両端に空気が侵入するとその区間の圧力勾配が小さくなるため、水はますます流動し難くなり、亀裂に封じ込められることになる。図に示すように、空気は10分後に $z=8.5\text{ m}$ 、15分後に $z=14\text{ m}$ 付近にまで達しているが、それより下方の領域の大部分の亀裂には水が封じ込められている。亀裂系内の圧力分布は、空気が亀裂系内の相対的に大きな亀裂を経路として侵入するにつれて大きく変わり、水平断面($z=\text{const.}$)内で圧力は一定でないことが分かる。

図-2に、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。このとき、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、図-3に示す。この算定で、空隙の体積は(亀裂間隙幅) $\times$ (亀裂長)とした。また、不透性境界に直接つながる亀裂には空気が侵入しないので、それらの亀裂は飽和度の算定対象としなかった。飽和度は、下流端(z_1 区間)で0.4と最小になり、それより5m上方の z_5 区間で0.95と最大であるが、全体的にはほぼ一様で0.7程度である。このような飽和度の分布は、亀裂密度が小さい場合、亀裂性岩盤への空気侵入過程の解析に多孔質地盤における飽和・不飽和浸透解析の手法を直接的には適用できないことを示唆している。

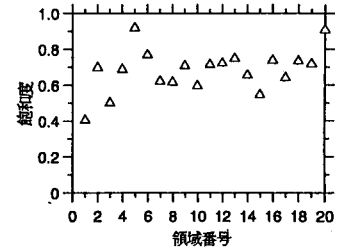
4. まとめ 間隙幅の異なる亀裂が複雑に交差する亀裂系に、高圧空気が裂か水を排除しながら侵入する過程について数値解析を行った。その結果、相対的に間隙幅の大きい亀裂が空気の侵入経路となり、一方、小さい間隙幅の亀裂では水の流動抵抗が大きく、そこに空気はほとんど侵入できないことがわかった。そして亀裂系の「飽和度」は必ずしも、飽和領域から不飽和領域まで連続的に変化するものではなく、したがって空気侵入の解析に多孔質地盤の飽和・不飽和浸透解析を適用するとき、その妥当性の検討が重要である。



図一1 空気の侵入状況および圧力分布



図一2 上端から流出し始めたときの空気の侵入状況



図一3 上端から流出し始めたときの各領域の飽和度

参考文献 1) 川谷・池宮；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、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1993。

2) 川谷・中北・高本；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，1994。