

## 審査の結果の要旨

氏名 岩井 卓

近年、地下岩盤の空間としての利用が世界的に進んでおり、鉄道・道路トンネル、地下発電所、大都市における地下鉄や地下街などの利用のほか、大規模なエネルギー備蓄（原油、LPG など）も実用化されており、将来的にはエネルギー備蓄（圧縮空気、天然ガス、熱など）、あるいは放射性廃棄物の地層処分場などとして利用されることになる。地下空間利用では、構造物が大規模になるほど局所的な亀裂・破砕帯を避けられない場合が多く、亀裂に支配された地下水流れの予測と制御が必要となる。著者は、その観点から、亀裂中の流れの内最も未解明な部分である“非線形流れ領域”について①非 Darcy 流れ、②2 相流れ、に分けて攻究している。

第一に、著者は、亀裂内流動では層流状態の流れ (Darcy 流れ) に対し、より高速の非 Darcy 流れが生じることを、山岳トンネルやダムサイトの事例から指摘し、その構成則および構成則の係数間の相関を実験・理論及び数値解析から検討している。著者は自然岩石割れ目の透明なレプリカ試料を複数作成し、水および空気の単相流を注入した時の流量と圧力勾配の関係を計測した。その結果、①圧力勾配は流量の2次関数としてよく近似できること、②2つの特性パラメータと試料亀裂面の幾何特性パラメータとの相関から一次項(粘性項)の係数  $k$  と二次項(速度項)の係数  $k'$  には比較的良い相関があり、全ての試料の結果から回帰される両パラメータ間の相関式はべき関数  $k' = \alpha k^\beta$  ( $\alpha = 3.4 \times 10^{-5}$ ,  $\beta = 0.85$ ) で表されること、③特性パラメータの相関は過去に提案された多孔質媒体中の非 Darcy 流れに対するものとは異なること、を見出している。この相関式は、水理試験によって Darcy 流れ領域の浸透率が知られれば、高速領域での非線形効果がおおよそ定量化できることになるため、今後の地下水解析上非常に有用なものと考えられる。さらに著者は、非 Darcy 流動方程式を組み込んだ地下水解析プログラムを用いて実験値の再現解析を行っている。その結果、非 Darcy 流動方程式の特性パラメータの相関式は、試料の小さな部分でも同一の形で成り立つ可能性が強いことが示唆されている。これは、実際の岩盤スケールへの拡張において重要な結果であるが、浸透性の大きく異なる亀裂が連結した場を考える場合には、相関式の非線形性に起因する制約を考えるべきことも言及している。

第二に、著者は、今後の地下空間利用において考えられている高圧気相備蓄を念頭に、岩盤割れ目中に2相流れが生じる可能性を指摘し、2相流れを規定する相体浸透率の形に関する検討を行っている。自然亀裂中の2相流れに関しては報告されている実験データも少なく、数値解析などに用いるべき相体浸透率の形をどうすべきかについては根拠が何も示されていない状況である。著者は、前記実験において作成した亀裂レプリカ試料を用いて、気液二相同時圧入実験を行い、流量、圧力の計測および亀裂試料内での気液分布状況の画像撮影を行った。画像解析により試料内飽和率をもとめると共に、

各相の流量から有効浸透率を算出し、両者の比(有効浸透率比)の形について検討を行っている。文献に報告されている平行平板、亀裂および多孔質体の実験結果と比較した結果、亀裂試料の残留水飽和率や有効浸透率比は平行平板のものとは大きく異なり、むしろ多孔質媒体のものと類似した結果となった。また、有効浸透率比の傾きや残留水飽和率は平行平板などのように人工的で単純な幾何形状のものほど小さく、亀裂試料のような自然状態に近いものほど大きくなることがわかった。最後に、亀裂試料に対する気液二相流の基本的な相対浸透率曲線が提案された。これは、現在行われている割れ目系岩盤の数値解析などに適用できる実用的なものと考えられる。

著者の以上の主要な成果は、単一の亀裂に関するものであるが、複雑な割れ目ネットワークにより構成されている亀裂性岩盤中の線形流れから非線形流れまでを包括的に捉える上で非常に有用な知見を与えるものである。今後、さらなる実験・理論的検討、フィールド計測や数値解析への展開が期待される場所である。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。