

審査の結果の要旨

氏名 末永弘

地下岩盤を利用した貯蔵・隔離施設・方法として、石油・LPG（液化石油ガス）・天然ガスなどのエネルギー地下貯蔵、CAESガスタービン発電（電力の圧縮空気による貯蔵）、放射性廃棄物処分（中深度処分、大深度地層処分）、二酸化炭素地中貯留などがある。特に、石油・LPG地下貯蔵やCAESを考える場合には、割れ目を含む硬岩中に貯蔵された流体の漏洩を防止するために地下水圧による封入方式（水封）が適用されることが多く、貯蔵施設の長期安全性を評価するためには、万一漏洩した場合の岩盤内における地下水と気体の挙動を的確に把握する必要がある。また、放射性廃棄物処分では長期の腐食ガスの発生と移行も安全評価上重要と考えられる。

しかしながら、これまで室内実験、理論的検討、一般的数値解析は実施されてきたものの、実際の施設を模擬したスケールでの岩盤内気体漏洩を含めた実験事例は報告されておらず、数値解析による評価の妥当性は必ずしも明らかではなかった。

そこで、本研究では、地下深部割れ目系岩盤に掘削した試験空洞において岩盤中への気体漏洩を含めた現場データを取得すると共に、取得データの分析、およびそれを利用した3次元数値解析により岩盤内2相流パラメータの同定が行われた。その結果、過去の解析事例には見られないパラメータ形状の組み合わせが発見され、その妥当性が様々なセンシティブィタディなどにより検討されている。

本研究の具体的内容と成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 割れ目系岩盤内に掘削した空洞（径3.2m，長さ51m）およびその周辺に温度・圧力・水位計測システムを配置して、数か月にわたり空洞内圧の変化を与えた試験を行い、間隙圧力，空洞内温度，圧力，水位の時間変化を多点で計測した。さらに、取得データの分析を行い、湧水量・漏水量・漏気量の時間変化を算出するとともに、岩盤の平均絶対浸透率，異方性，置換圧の推定を行った。
- (2) 本試験地の岩盤を均質・異方性岩盤として平均水理物性を求めるため、空洞を含む三次元岩盤水理モデルを作成し、湧水観測量とのマッチングにより水理パラメータの定量化を行った。湧水量の再現解析から岩盤の平均間隙率は0.2%程度，平均絶対浸透率は鉛直方向で $6 \times 10^{-14} \text{m}^2$ 程度，水平方向は鉛直方向の1/100程度の異方性があることが推定された。これらは，空洞壁面・コア観察，原位置透水試験・間隙水圧測定などから推定されるものと整合的であった。
- (3) 空洞からの高圧気体漏洩時の現象を再現する二相流特性（水相および気相の相対浸透率，毛管圧力）を同定する目的で、Brooks、Corey、Mualem、van Genuchtenなどにより提唱されている曲線のパラメータを変化させた多数の試行錯誤計算が行われた。その結果，気相相対浸透率(k_{rg})は水飽和から数%の水飽和率(S_w)減少で急増する形状（上に凸），液相相対浸透率(k_{rw})は極めて急激な減少、毛管圧(P_c)は極めて急激な増加をする形が同定された。更なる検討から，(a) k_{rw} が一般的な形状とした場合 P_c は S_w の1からの数%の減少で急増する形状を，(b) P_c を0か小さい値にした場合、 k_{rw} は S_w の1からの数%の減少でほとんど0となる形状を与える組み合わせのことが明らかとなった。これらの組み合わせは、湧水・漏気の時間変化の再現性、

空洞周辺の圧力計測値の再現性も良好であった。

(4) 同定された三つのパラメータの組み合わせは、一般的に気液2相解析に利用される形状とは大きく異なることから、モデル設定妥当性の検討、多数の文献レビューが行われた。モデル設定の妥当性については、各種条件設定の適切性確認、パラメータ個々の感度、離散化スケールのちがい、異方性のちがいなどが検討され、結果的に同定された形状は変わらないことが確認された。また、関連分野における割れ目系研究を中心に2相流パラメータ形状の文献調査（実験、数値解析）が行われ、一般的な形状が用いられたものがほとんどであること、わずかな事例で同定されたパラメータ形状が用いられたものがあるが、三つのパラメータ形状が本研究で同定された形で使用されているものはなかった。

(5) 物理的側面に関する詳しい数値解析で気液2相の動きが検討され、 S_w の大きい（ S_g の小さな）状態で気体が流動し、水の下方流動が抑えられる形（カウンターフローの抑制）で両相の流動が起こったことが推定された。また発見された組み合わせの中で、水飽和からの S_w のわずかな減少により急増する k_{rg} 、および P_c を与え、 k_{rw} には一般的な形状を与えることが水理学的に適切であろうと結論された。

ケーススタディとして圧縮空気貯蔵における自然水封水位低下による漏気挙動を、一般的な形状の組み合わせと発見された組み合わせで比較したところ、漏気挙動に大きな違いが見られることが明らかとなった。

(6) ここで見出された高圧気体の漏洩現象を表現する巨視的気液2相流パラメータ形状の組み合わせは、原位置試験と数値解析による再現解析が行われなければわからなかったものであり、従来の石油・LPG地下備蓄、CAES等を対象とした安全評価や、今後の放射性廃棄物処分における気体生成・長期移行の安全性評価も含め、考慮すべき重要な知見と考えられる。

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。