

審査の結果の要旨

氏 名 佐々木 憲 司

岩盤を対象とした透水試験（揚水試験，ルジオン試験，パルス試験など）では，ボーリング孔から揚水・圧力注水を行い，得られる時間・圧力・流量の応答からダルシーの法則に従って透水性が評価される．しかし，しばしば定量的説明の難しい現象が出現することが知られている．この現象は，ルジオン試験における圧力・流量間の非線形的挙動（逐次流量減少型，逐次流量増加型），揚水・注水試験時の Noordbergum 現象（注水時における井戸周辺地盤中の水圧降下，逆に揚水時における水圧上昇）であり，過去の研究でも説明が試みられているものの，未だに十分定量化された評価はなされていない状態にある．

本研究では，これらの現象を取り上げ，実際のダムで観測された観測結果を元に，地質学的立場から定性的検討を行うと共に，非ダルシー流れ，間隙の弾性変形，力学的変形伝播まで考慮した水理順解析技術・逆解析技術の開発を行い，前記現象を再現しパラメータの同定を行っている．本研究の成果として以下の事項が挙げられる．

① ルジオン試験における逐次流量減少型 P-Q 曲線，逐次流量増加型 P-Q 曲線につき，多数のデータを収集し地質学的特徴を整理している．異なる地質体で建設が行われた 6 ダムのルジオン試験データおおよそ 3000 サンプルから逐次流量減少型 79 サンプル，逐次流量増加型 19 サンプル計 98 サンプルを抽出すると共に，試験箇所の地質性状を整理し，逐次流量減少型 P-Q 曲線の多くはシーティングジョイントの発達する箇所のもので，逐次流量増加型 P-Q 曲線の多くは，割れ目間隔が 10cm 程度の頻度で発達する地盤のものであることを示している．

② この結果を踏まえ，前者の原因を流速の増加に伴う非ダルシー流れの発生，後者を間隙水圧に伴う間隙の弾性変化と浸透率の変化と考え，現象を再現可能な数理モデルの開発を行なっている．これは，基本構成則を Forchheimer 則として，ダルシー流れから慣性流まで取り扱えるようにした気液 2 相流れ円筒座標系のシミュレータである．特に，非ダルシー流速算出において解の公式の計算で生じる丸め誤差によって流速の算出ができなくなる問題を発見し，Newton-Raphson 法による反復法を導入すると共に，間隙率の弾性的変化，3 乗則に基づいた間隙率と浸透率の関係を考慮した定式化

を行っている．さらに，このシミュレータを順解析として非線形最小二乗法を用い，非ダルシー係数，浸透率，圧縮率などを求める逆解析手法を開発している．

③ 開発した手法を用いて，逐次流量減少型に関して非ダルシー係数と浸透率を同定している．非ダルシー係数—浸透率の関係を既往の多孔質媒体および亀裂性岩盤の提案式と比較し，透水性が高くなることによる慣性効果の減少率が，既往の提案式よりも小さいことを指摘し，原因を地表付近の透水経路の複雑さという観点から議論している．また，求められた浸透率は，層流換算ルジオン値と比較すると 5 倍～15 倍程大きいことを示し，レイノルズ数を指標に低圧部でも非ダルシー流れ発生している可能性を指摘している．さらに，求めた浸透率を既往研究による高粘性

流体ルジオン試験結果と比較することにより逆解析による浸透率の妥当性を示している。

流量増加型 P-Q 曲線については、圧縮率と浸透率を同定している。得られた浸透率は最急勾配を延長する通常の方法とくらべて同等か数倍高い傾向にあるが、2 点の観測点のみを用いる従来の方法とすべての観測点を使用する逆解析手法の違いを示し、種々の可能性を示しながらその優位性について言及している。逐次流量増加現象示す地盤の圧縮率は、 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6} [1/\text{Pa}]$ で既往文献における砂礫地盤に近いことを示している。同時に、Capillary Fissure Model に基づき間隙率と浸透率を見積もった所、既往の研究に比べて、同じ浸透率に対して本研究の方が高い値を有していることが示され、亀裂性岩盤の特性が現れた結果と解釈している。

④ 次に、多孔を用いた井戸試験においてしばしばあらわれる Noordbergum 現象に関して、そのメカニズムやモデル化の方法を検討している。

まず、第三紀の凝灰角礫岩と泥岩を基礎とするダムで行われたパルス試験のサイトの地質資料や既往文献をもとに Noordbergum 現象の生じたサイトの地質学的考察を行い、地質境界部とくに凝灰角礫岩部のポーラス部などの変形性の高い個所の存在が示唆され、パルス波形の応答時間が長いほどその影響が強くなることを示している。

次に、数理的に現象を再現するため、井戸付近の岩盤変形の伝播による間隙変化をトンネル設計に使われる距離と応力の推定式から力学的関係式を導入して変形の瞬時伝播を定式化し、前半で開発したシミュレータに組み込んでいる。このシミュレータにより、地質資料に示された試験環境をもとに条件設定を行い、パラメータの相違による受信点での圧力と時間の関係を数値実験によって検討している。この結果、浸透率は受信点での圧力の応答時間に関係し、弾性係数は圧力の上昇・降下量に関わる項目であること、一般的な弾性係数の $1/100$ 程度の値を有した透水媒体を観測点位置に設定すると、観測された Noordbergum 現象を良好に再現できることを示している。

以上の結果から、岩盤を対象としたルジオン試験などの透水試験における非ダルシー流れ、間隙の弾性変形、井戸付近の変形の伝播を考慮した適用性の広い解析技術が開発され、今後の岩盤透水性評価への実際的適用が期待される。

本研究は、以上の様に、岩盤透水性に関するより進んだ新しい評価方法を提案しており、特に土木水理分野の現場透水性評価の信頼性向上に大きく寄与するものと考えられる。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。