

ダムの貯水により飽和する不飽和地盤の透水性の合理的評価法 (1)

山口嘉一* 坂本博紀**

1. はじめに

ダムの建設工事では、ダムの貯水池湛水後の基礎地盤（アースダムを除き岩盤であることが一般的）中の浸透を抑制して適切な貯水機能を確保するため、基礎地盤の深度方向およびダム軸方向の一定の範囲においてセメントと水の懸濁液を注入するセメントグラウチングにより適切な遮水性の改善を行う¹⁾。この際、**ルジオンテスト**[※]と呼ばれる岩盤の透水試験²⁾をあわせて実施して透水性が所定の基準値以下となることを確認している。

一方、近年、我が国では、ダム建設事業を含む公共事業においてコスト縮減と環境保全の要請により、従来は掘削除去していたような地盤上においても、適切な調査・検討の結果に基づき安全性を確認した上でダムを建設する事例が増えている。特にダム堤体からの荷重が相対的に小さくなる堤体の低い部分から袖部にかけては、風化度の高い岩盤（風化軟岩地盤）や未・低固結の堆積軟岩盤を基礎とする事例も多くなってきている。

このような風化軟岩地盤において、特に地下水位が低く、不飽和帯となっている場合は、透水試験における注入水の浸透形態は非定常浸透となる。貯水池湛水後における、任意の貯水位における安定した浸透量を評価するためには、基礎地盤の浸透特性として、飽和条件における透水性を評価する必要がある。しかし、不飽和条件下の地盤で透水試験を実施した場合、実務的に許容できる試験時間（標準的なルジオンテストでは1圧力段階で10分程度、全試験時間で2時間程度²⁾、以後「実務的な試験時間」という）では各注入圧力段階における定常流量が得られず、結果的に透水性を過大に評価してしまうおそれがある。対策として、通水時間を長くして定常流量を得る長時間透水試験³⁾を実施することが考えられるが、工期やコストの観点から、この試験方法を数多く実施することは難しい。これらのことから、実務的な試験時

間（2時間程度）の注入流量データから飽和透水性を合理的かつ適切に評価できれば、基礎処理の施工数量縮減および工期短縮を図ることが可能となりコスト縮減につながると考えられる。

上記に鑑み、本研究では数値解析による様々の検討結果に基づき、実務的な試験時間内の原位置透水試験結果に対して、飽和-不飽和浸透流解析結果をフィッティングすることで最終的な安定注入流量を推定する方法（以後、「新推定法」）を提案した。また、この新推定法の適用性を評価するために、不飽和軟岩地盤において実施された長時間透水試験を対象に、実務的な実施時間の注入流量データを用いて安定流量の推定を行い、安定流量の実測値に対する再現精度を検証した。

本稿では、不飽和地盤における長時間透水試験の有用性とその課題を概説するとともに、課題改善のために提案した新推定法の概要について報告する。なお、次号では、実際の長時間透水試験結果に基づく新推定法の再現性の検証について報告する予定である。

2. 不飽和地盤における透水性評価

2.1 不飽和地盤における透水特性

本節では本研究で対象としている不飽和条件下における風化軟岩地盤の透水性評価における課題と、前章で述べた長時間透水試験の有効性について概説する。

風化軟岩地盤では、亀裂性岩盤とは浸透特性が異なる。亀裂性岩盤では、岩盤内に存在する亀裂内の浸透が卓越する。一方、風化軟岩地盤では、卓越した水みちとなるような亀裂は存在しないが、岩自体の浸透もある程度存在し、地盤全体としては巨視的に多孔体とみなせ、その浸透はダルシー則に従うものと考えられる。岩盤がこのような不飽和条件にある場合、透水試験における浸透流量は同一注入圧力条件下で経時的に小さくなる。これは、乾いたスポンジに注水すると、空隙が完全に水で満たされる飽和に近づくとつれてスポンジの吸水量が小さくなることをイメージすると分か

A Rationalized Evaluation Method of Permeability of Unsaturated Foundation Saturated by Dam Impounding

*土木用語解説：ルジオンテスト

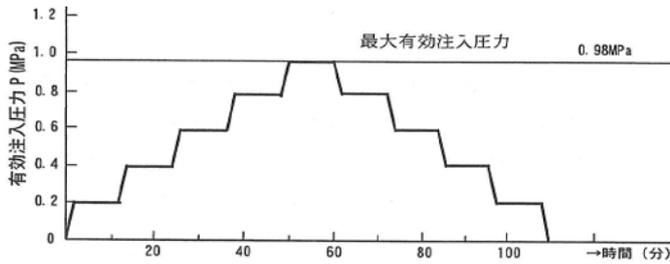


図-1 ルジオンテストの標準的な注入パターン例2)

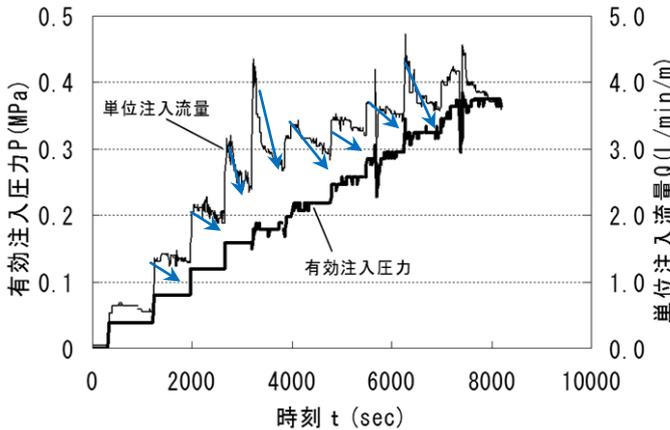


図-2 不飽和浸透特性が確認される注入データの例

りやすい。

さて、前述したとおりダム基礎地盤の透水性は、一般的にルジオンテスト（あるいは簡易なルジオンテストである水押し試験）を実施して得られる、**ルジオン値***と呼ばれる指標を用いて評価される。この試験は一定の区間長に仕切られたボーリング孔内に多段階の一定の有効注入圧力で注水を行い、有効注入圧力(P)と注入流量(Q)の関係から透水性を評価する試験である。この際、有効注入圧力は図-1に示す通り、0.98MPaまで段階的に上昇させ、その後、段階的に降下させる。また、図-1に示されるように、各圧力段階における計測時間は概ね10分程度が一般的である。ただし、各圧力段階における注入流量の経時変化が確認される場合、計測中の変動が平均値に対する10%未満が確認されるまで計測することとされている²⁾。

一方、不飽和浸透形態が確認されるルジオンテストの注入データの一例を図-2に示す。図-2より昇圧時の各圧力段階で経時的に透水量が減少している。この事例では、各圧力段階で10分程度で前述した注入流量の変動条件が満足することを確認して、圧力段階を引き上げている。しかし、仮に圧力段階を引き上げないまま、注入流量が引き続き低下し続けるとすると、最終的な安定流量よりも大きい注入流量で透水係数を評価してしまうことで、透水性を過大に評価していることになる。

*土木用語解説：ルジオン値

表-1 長時間透水試験の仕様例

項目	仕様
削孔径 φ	66mm
ステージ長	2.5m
一定水位 ⁹⁾	EL.78.2m
計測時間間隔	1分間
継続時間	4時間以上

*) 孔口付近に定水位水槽を設けて一定水位を保つ。

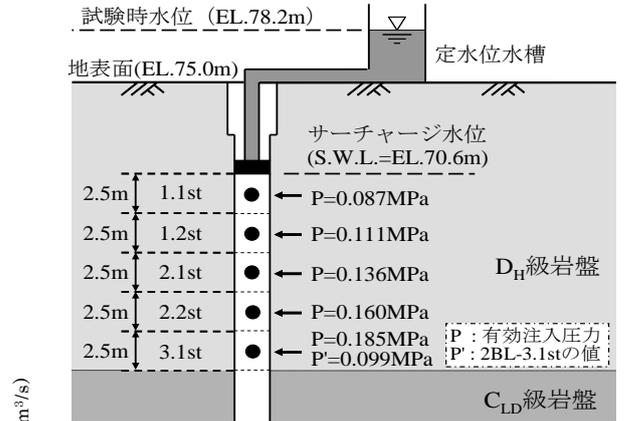


図-3 長時間透水試験の概念

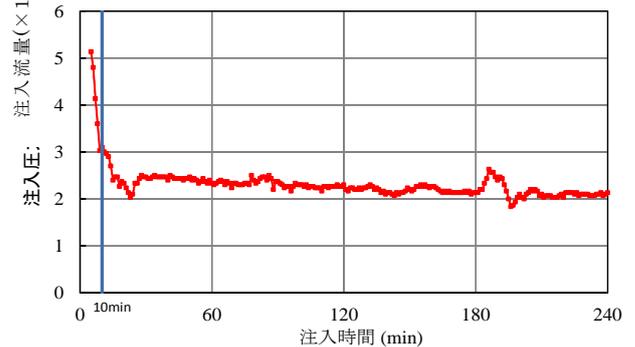


図-4 長時間透水試験の試験結果例

2.2 長時間透水試験の概要³⁾

前述した、不飽和地盤を対象とした透水試験における透水性の過大評価を避けるための対策の一つとして長時間透水試験が挙げられる。この試験は、低圧かつ一定の注入圧力条件下において、注入流量が安定するまで注入を継続する試験である。内閣府沖縄総合事務局の大保脇ダムで実施された長時間透水試験の概要を図-3と表-1に示す。大保ダムでは予備試験の結果に基づき試験時間は最低でも4時間継続するものされている。長時間透水試験結果の例を図-4に示す。この例では、10分後の単位注入流量は4時間後の計測値の1.5倍程度の値を示しており、計測時間が短い場合、透水性を過大評価してしまうことが分かる。

2.3 長時間透水試験の適用事例

前述の大保脇ダムでは同一の試験区間において、長時間透水試験と簡易なルジオンテストである水押し試験の両方を実施して試験結果の関係を分析

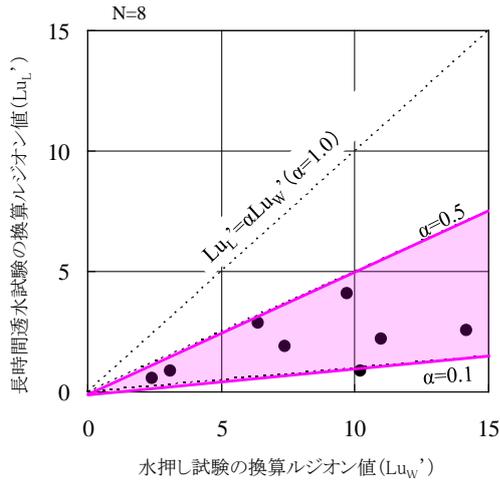


図-5 長時間透水試験と水押し試験の関係 (大保脇ダム)

している。図-5に大保脇ダムで得られた両試験結果の関係を示す。この図より、長時間透水試験から得られる換算ルジオン値は水押し試験から得られるルジオン値の1/10～1/2となっている。この結果を基に、大保脇ダムでは水押し試験から得られるルジオン値が5～10Luの場合、飽和条件における透水性は5Lu以下であると判定した。この結果、透水性改良のための追加グラウチングの施工数量を大幅に減ずることが可能となり、建設期間と建設コストの縮減に寄与している⁴⁾。

2.4 長時間透水試験の課題と本研究の目的

前述のとおり、不飽和条件下の風化軟岩地盤の透水性評価において長時間透水試験の適用は極めて有効である。その一方で、一回の試験時間が最低でも4時間以上必要となり、試験時間および試験コストの面で通常のルジオンテストよりも不利になる。このため、長時間透水試験を全ての対象ステージで実施することは現実的ではなく、既設ダムの事例でも前述のように、代表孔で水押し試験との関係を把握したうえでその関係を全体評価に反映するという利用法に留めている。

試験時間を実務的に許容できる時間、例えば標準的なルジオンテストの全圧力段階を通しての合計試験時間である2時間程度に抑えつつ、最終的な飽和透水条件における注入流量を予測することが出来れば、不飽和地盤における透水性評価はより高精度かつ合理的なものとなると考えられる。

本研究ではこのような背景から、新たに合理的な透水性評価手法を提案する。

3 飽和透水性の新推定法の提案

本研究では長時間透水試験における最終安定注

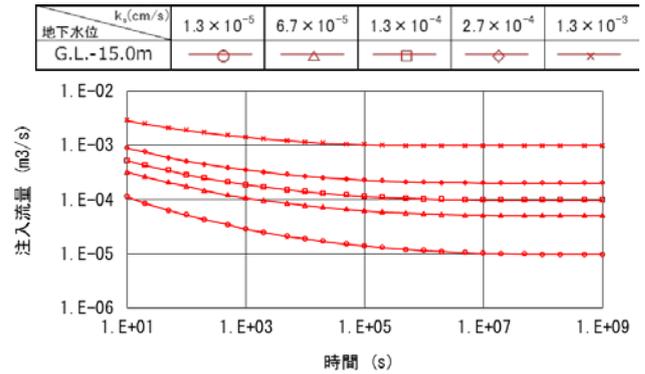


図-6 注入流量の経時変化

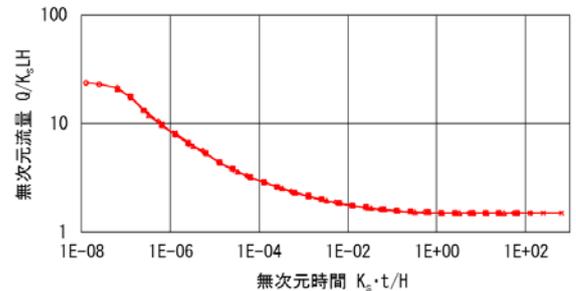


図-7 注入流量の経時変化 (流量・時刻を無次元化)

入流量 Q_s の推定法についての種々の検討を行い、その合理的な推定方法(新推定法)を提案する⁵⁾。検討の詳細については、参考文献⁵⁾に譲り、本稿では新推定法の概要について説明する。

3.1 新推定法の概要

新推定法では、飽和・不飽和浸透流解析と現地試験の組み合わせにより長時間透水試験の最終安定流量を推定する。

著者らは有効注入圧力、飽和透水係数、地下水位等の解析条件を変化させた数多くのケースの数値解析を実施し、それらの解析条件が解析結果に与える影響について検討・整理した。浸透流解析結果から得られる注入流量の時刻歴を両対数グラフにプロットすると、有効注入圧力、地下水位等の試験条件が同一であるとき、透水係数が異なる場合の注入流量の時刻歴関数群は、理論的考察からも明らかのようにグラフ上で縦軸および横軸方向に引き伸ばさないしは縮小することにより同一形状となる(図-6参照)。これらの時刻歴関数群を飽和透水係数 k_s 、試験区間長 L 、有効注入圧力水頭 H を用いて無次元化すると、図-7に示すように、概ね一本の曲線に一致した。このことは、飽和透水係数のみが異なる場合、注入流量の時刻歴関数群は1つの変数によりフィッティングすることが可能であることを示している。このことに着目し、試験条件を考慮して実施した浸透流解析の

結果として得られる解析流量により実測注入流量を、補正係数を介して再現するフィッティング手法を提案した。次節にその詳細を示す。

3.2 新推定法の実施手順

(1) 浸透流解析の実施

有効注入圧力、地下水位、試験孔の大きさ等の試験条件を再現した解析モデルを作成し、任意の飽和透水係数 k_s を設定して浸透流解析を実施する。本研究では、解析モデルとして解析物性値は各現場の地盤材料を用いた室内試験から求めることが望ましいが、既往の研究⁶⁾を参考に設定することも可能である。ここで得られた注入流量の時刻歴を $q_B(t)$ とする。

(2) 解析による注入流量時刻歴の近似式を作成

フィッティングの際には、後述するように解析結果による注入流量の出力時刻に補正係数 α を乗じるため、フィッティング後の注入流量の出力時刻は α の値によって変化し、必ずしも補正前のデータと同時刻の流量値が得られない。このため、フィッティングに使用する解析流量 $Q_B(t)$ には $q_B(t)$ の近似式を使用する。近似式の形式は、注入流量時刻歴の形状から式(1)のとおりとした。

$$Q_B(t) = a \cdot t^b + c \quad \text{式(1)}$$

ここに、 a 、 b 、 c ：定数である。定数 a 、 b 、 c は、 $q_B(t)$ と $Q_B(t)$ がよく一致するように最小二乗法などにより決定する。

(3) フィッティングの実行

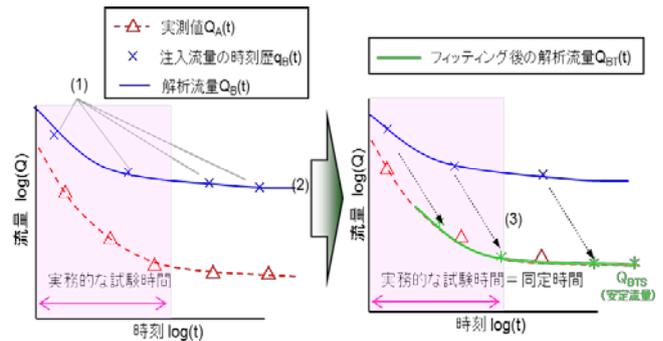
解析結果の流量 $Q_B(t)$ を、実測値の流量データ $Q_A(t)$ に一致するように式(2)を用いてフィッティングを行う。

$$Q_{BT}(t) = \alpha Q_B(\alpha t) \quad (\alpha: \text{補正係数}) \quad \text{式(2)}$$

ここで、補正係数 α は最小二乗法などを用いて決定する。フィッティングにより得られた $Q_{BT}(t)$ の安定流量を最終安定流量 Q_{BTS} とする。参考に新推定法の手順のイメージを図-8に示す。

4. まとめ

本稿では、不飽和条件下の風化軟岩基礎において有用な長時間透水試験とその適用により、コスト削減した大保ダムの事例を紹介した。また、長時間透水試験の試験時間とコストに関する課題を改善するために新たに提案した、数値解析と原位置試験を併用した最終安定注入流量の推定方法の概要を報告した。



- (1) 任意の k_s による浸透流解析による注入流量の時刻歴 $q_B(t)$ を得る
- (2) $Q_B(t) = a \cdot t^b + c$ として $q_B(t)$ に良く一致する $Q_B(t)$ の a 、 b を決定
- (3) $Q_{BT}(t) = \alpha Q_B(\alpha t) \approx Q_A(t)$ となるような α を最小二乗法などで求め $Q_{BT}(t)$ を決定(フィッティング)

図-8 新推定法の手順のイメージ

謝 辞

本研究を進めるにあたり、内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所の関係各位には多大なるご協力を、また岡山大学大学院の西垣誠教授に適切な御指導をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 国土技術研究センター編集：グラウチング技術指針・同解説、(株) 大成出版社発行、2003
- 2) 国土技術研究センター：ルジオンテスト技術指針・同解説、大成出版社、2006
- 3) 山口嘉一、安仁屋勉、池澤市郎、赤松利之：風化軟岩地盤の不飽和帯における長時間透水試験、地盤工学ジャーナル、Vol.3、No.3、pp.229～242、2008
- 4) Yamaguchi, Y., Satoh, H. and Shimoyama, K.: Rationalization of Grouting in Unsaturated Soft Rock Foundation Based on Results of Long-term Permeability Tests, International commission on large dam, 78th annual meeting, 2010
- 5) 下山顕治、坂本博紀、山口嘉一、佐藤弘行、西垣誠：不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法、土木研究所資料、第4210、pp.123～136、2011
- 6) 例えば、松本徳久、山口嘉一、弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈、建設省土木研究所資料、第2518号、1987

山口嘉一*



財団法人ダム技術センター
首席研究員 (前 独立行政法人
土木研究所つくば中央研究所
所水工研究グループ水工構造
物チーム上席研究員)、工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

坂本博紀**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループ水工構造物
チーム 研究員
Hiroki SAKAMOTO