

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(2)

山口嘉一* 坂本博紀**

1. はじめに

近年、我が国では公共事業においてコスト削減と環境保全への要請が高まっており、ダム建設においても従来は掘削除去していたような地盤上でも、適切な調査、検討の結果を踏まえて安全性を確認した上でダムを建設しなければならない状況にある。特にダム堤体からの荷重が相対的に小さくなる堤高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等において、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顕著な非定常浸透となる¹⁾。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。

前報¹⁾では上記のような透水性評価の課題に対する対策として、通水時間を長くして定常流量を得る長時間透水試験の概要とこの試験の適用により基礎処理の合理化を図った事例を紹介した。また、長時間透水試験の持つ試験時間が長いという課題を解決するために、土木研究所で新たに考案した、実務的な試験時間（2時間程度）の注入流量データ（不飽和状態での注入流量データ）から飽和状態における最終的な安定注入流量を推定する方法（以後、「新推定法」という）についても紹介した。

本報では引き続き、上記の新推定法を実際の長時間透水試験データに適用した場合の最終安定流量の予測精度を検証した結果について報告する。

2. 新推定法の概要

新推定法の概要については前報でも解説しているが、重要な内容であるため再度説明する。

新推定法では、飽和-不飽和浸透流解析と実務的な試験時間の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ものである。具体的手順を以下に示す。また手順のイメージを図-1に示す。

- (1) 飽和不飽和浸透流解析による原位置試験の再現解析を実施し、注入流量の時刻歴関数 $Q_B(t)$ を得る。この際、飽和透水係数 k_s は任意の値で設定する。
- (2) $Q_B(t)$ から実務的な試験時間内（2時間程度）の実測注入流量を再現できるような補正係数 α を同定解析により算定し、補正関数 $Q_{BT}(t)$ を得る。
- (3) $Q_{BT}(t)$ から安定流量を算定する。

3. 大保脇ダム長時間透水試験結果への適用

3.1 適用対象データの概要

大保脇ダム（沖縄県総合事務局、堤高66m、堤頂長445m、堤体積1930千 m^3 、2010年完成）の左岸リム部において実施された長時間透水試験結果³⁾に対して新推定法を適用し、安定流量の再現精度の検証を行った。

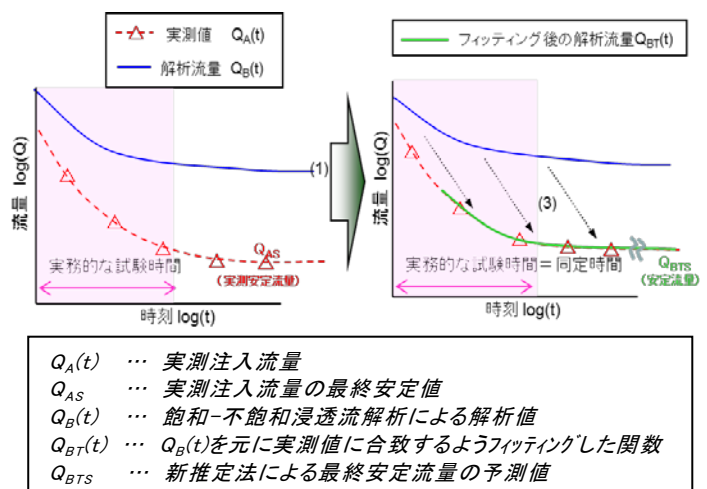


図-1 新推定法の手順のイメージ

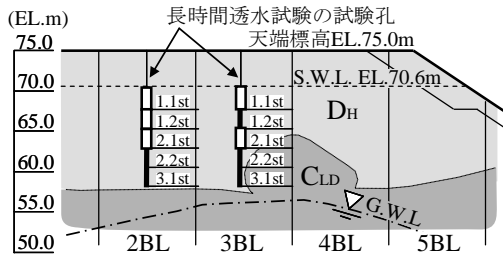


図-2 長時間透水試験の試験孔位置
(□：再現解析の対象とするステージ)

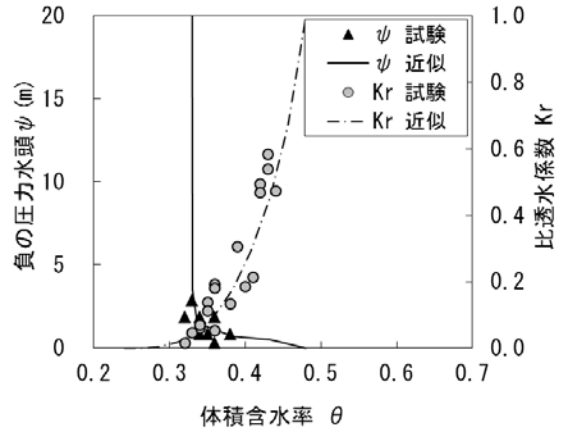


図-4 不飽和浸透特性 (千枚岩 D_H-1)

5ステージである。解析結果と比較を行う試験計測データ (1分間隔計測) はばらつきが大きいため、今回は10分移動平均による注入流量を用いることとした。

(1) 不飽和浸透特性

1) 試料および試験の概要

新推定法の第1ステップである飽和-不飽和浸透流解析を実施するために必要な試験対象地盤の**不飽和浸透特性***は、当該ダムサイトで採取した試料を用いて室内試験結果に基づき設定した。試料は長時間透水試験が実施された左岸リム部の D_H級岩盤から不攪乱試料として採取した。

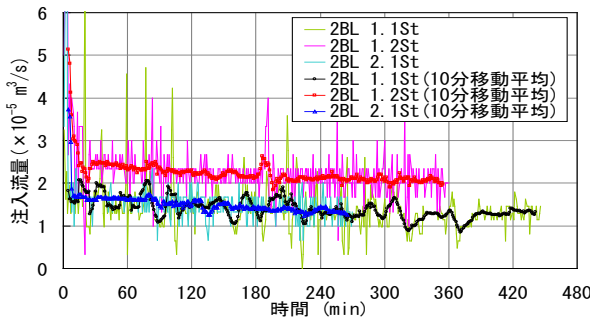
供試体の作製は、切り出し時に試料が乱れないように、採取したブロックサンプルを凍結させた状態で行った。供試体の大きさは、直径50mm、高さ50mmの円柱形とし、透水試験における通水方向が、ダム湛水時の主な浸透方向である上下流方向となるように作製した。不飽和浸透特性試験は、西垣らの提案する試験方法⁴⁾により行った。

2) 試験結果

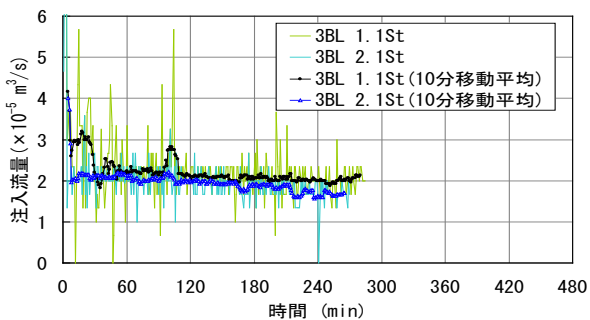
図-4に試験結果と試験結果に van-Genuchtenモデル⁵⁾を適用して求めた千枚岩 D_H-1の不飽和浸透特性 (体積含水率 θ と負の圧力水頭 ψ 、比透水係数 k_r の関係) の近似値を示す。飽和透水係数 k_s は、加圧型透水試験結果の飽和度100%付近の透水係数を参考に千枚岩 D_H-1は $k_s = 5.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ とした。

(2) 解析モデルおよび解析物性値

解析モデルの一例 (2.1st用モデル) を図-5に示す。解析モデルは半径30m×高さ25mの軸対称モデルとした。境界条件は、軸対称モデルの外周側面の地下水位以下を水位固定境界、地下水位以上を浸出点境界とし、その他の部分是不透水境界とした。解析モデルにおける試験孔は、各ステー



(a) 2ブロック



(b) 3ブロック

図-3 注入流量の経時変化

検証に用いた長時間透水試験の試験孔の位置と周辺岩盤の岩級区分を図-2に示す。長時間透水試験の対象である千枚岩 D_H級岩盤は全体的に風化が進んだ状態で、片理面や亀裂は見られる部分もあるが、連続性が乏しいため、卓越した水みちはないものと考えられ、概ね均質多孔体的な性状であるとみなせる。試験および地質条件の詳細については参考文献³⁾を参照されたい。

試験データのうち、注入流量の経時変化が相対的に強い非定常の傾向を示すステージの注入流量の経時変化を図-3に示す。図中には、現場計測 (1分間隔の注入流量) データおよび現場計測データのばらつきをある程度平滑化するために実施した10分移動平均データも併せて表示した。

3.2 浸透流解析による長時間透水試験の再現解析

再現解析の対象とするステージは、図-2に示す

*土木用語解説：不飽和浸透特性

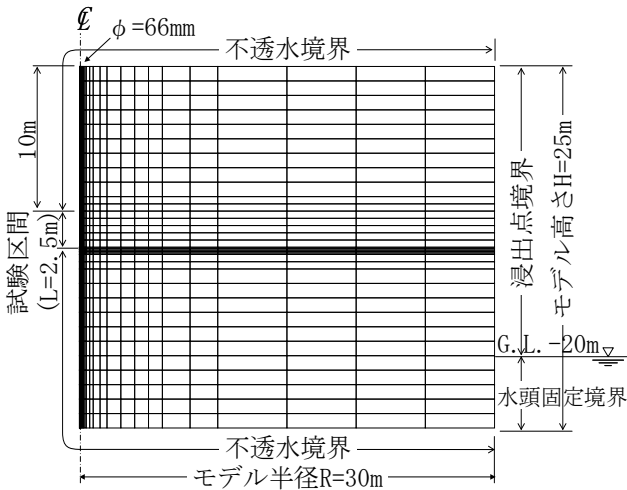


図-5 解析モデルの例 (2.1st)

表-1 解析物性値

	Case1	Case2
飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}
比貯留係数 S_s (cm^{-1})	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
間隙率 n	0.48	0.20
不飽和浸透特性	図-4	図-6

ジの長時間透水試験の条件を極力再現するために、試験区間の深度を実際の深度とほぼ同一になるように設けるとともに、試験区間長を2.5m、試験孔半径を0.033mと試験条件と同一とした。

解析物性値を表-1に示す。解析物性値のうち、飽和透水係数 k_s および比貯留係数 S_s については、ルジオン値が10Lu程度の多孔質媒体とみなせる軟岩地盤を想定して、Case1、2ともに松本らの研究⁶⁾で用いた数値を採用した。また、本研究では不飽和浸透特性の設定値が新推定法の推定精度に及ぼす影響を確認するため、表-2に示すとおり2種類の不飽和浸透特性を用いて解析を実施した。間隙率と不飽和浸透特性はCase1では不攪乱試料に対する室内試験結果に基づき設定し、Case2では松本らの研究⁶⁾に基づき設定した。両ケースの不飽和浸透特性はそれぞれ図-4および図-6のとおりである。

(3) 新推定法の再現性の検証方法

大保脇ダム長時間透水試験の試験初期の実測値を用いた新推定法による最終安定流量の予測値を実測値と比較し、新推定法の再現性を検証した。

検証において、長時間透水試験の実測値に基づく最終安定流量 Q_{AS} および新推定法に基づく最終安定流量 Q_{BTS} の設定については、実測値にばらつきがあることを考慮して、試験終了直前1時間

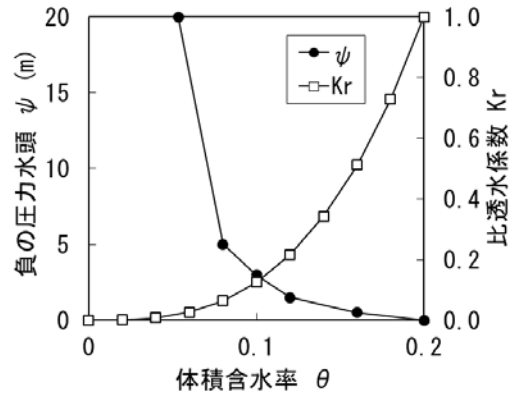


図-6 不飽和浸透特性 (Case-2)

表-2 最終安定流量の再現精度

ブロック	2	2	2	3	3	
ステージ	1.1	1.2	2.1	1.1	2.1	
Case1	$Q_{AS}(\text{m}^3/\text{s})$	1.31×10^{-5}	2.06×10^{-5}	1.36×10^{-5}	1.70×10^{-5}	2.02×10^{-5}
	$Q_{BTS}(\text{m}^3/\text{s})$	1.22×10^{-5}	1.97×10^{-5}	1.35×10^{-5}	1.78×10^{-5}	2.00×10^{-5}
	Q_{BTS}/Q_{AS}	0.94	0.96	0.99	1.04	0.99
Case2	$Q_{AS}(\text{m}^3/\text{s})$	1.31×10^{-5}	2.06×10^{-5}	1.36×10^{-5}	1.70×10^{-5}	2.02×10^{-5}
	$Q_{BTS}(\text{m}^3/\text{s})$	1.20×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.35×10^{-5}	1.78×10^{-5}	1.97×10^{-5}
	Q_{BTS}/Q_{AS}	0.92	0.94	0.99	1.04	0.98

の注入流量の平均値を用いることとした。また、試験開始から1時間の注入流量の実測値は変動が大きく、初期流量の乱れの影響が懸念されたため、フィッティングに使用する時間の範囲は試験開始後60~120分とした。

(4) 検証結果

図-7に各ステージにおける実測データ $Q_A(t)$ およびフィッティング結果 $Q_{BT}(t)$ の経時変化を示す。使用した不飽和浸透特性に関わらず、 $Q_A(t)$ と $Q_{BT}(t)$ はよく一致しており、注入流量の実測データを比較的よく再現できていることがわかる。この結果から、フィッティング時間についても開始から2時間程度と設定することに大きな問題はないといえる。

表-2に、各ステージにおける新推定法による安定流量推定値 Q_{BTS} の実測データの安定流量 Q_{AS} の再現精度 Q_{BTS}/Q_{AS} を示す。原位置より採取した供試体の不飽和浸透特性を使用したCase1では、 Q_{AS} の再現精度は0.94~1.04であり、高い精度で実測データを再現できていることがわかる。また、不飽和浸透特性を基本モデルとしたCase2では、 Q_{AS} の再現精度は0.92~1.04となり再現精度に大きな差は見られなかった。また、Case1、2の比較より、今回の検討範囲では不飽和浸透特性による解析精度への影響は小さかったといえる。

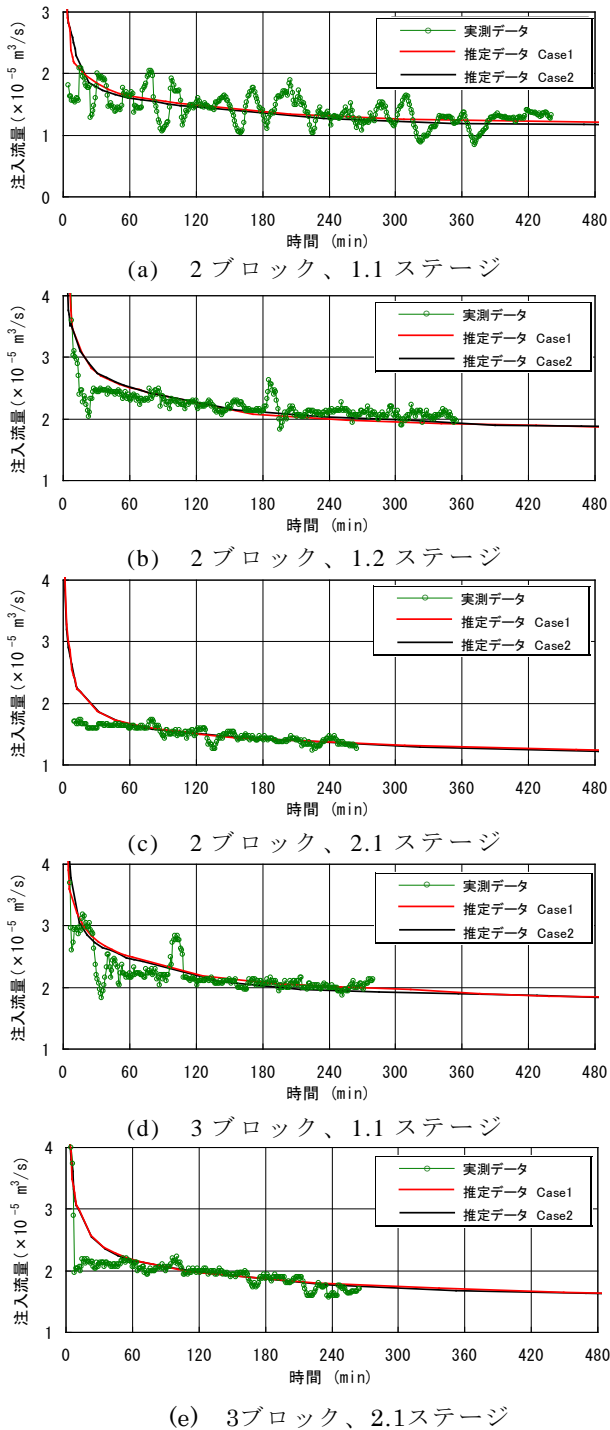


図-7 注入流量の経時変化

4. まとめ

本研究では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において、既設ダムで基礎処理のコスト縮減に有効な成果を挙げている長時間透水試験と同等の精度での評価を、より短時間(2時間程度)の原位置透水試験と浸透流解析を組み合わせることで可能とする新たな推定法を提案した。また、この推定法の再現性を実際の原位置透水試験結果を用いて検証し、実務で利用で

きる精度が得られていることを確認した。

今後は実ダムにおいて、提案した推定法の適用を試み、実績と改善を積み重ねることで推定法の完成度を高めていく必要がある。また、本手法と同様に不飽和浸透条件での原位置試験で試験時間の長期化が課題となっているロックフィルダムのコアゾーンの原位置透水試験等へ適用範囲を拡大することも検討しているところである。

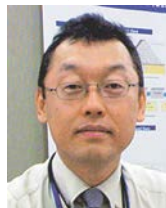
謝辞

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) 山口嘉一、坂本博紀：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)、土木技術資料、第54巻、第10号、pp.34~37、2012。
- 2) 国土技術研究センター：ルジオンテスト技術指針・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) M. Nishigaki, M. Haruna and C. Hartwig: A New Method to Measure the Unsaturated Properties of Soils, XXXVIII IAH Congress, pp.2343-2345, 2010
- 5) M. Th. van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980
- 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