

## 不飽和地盤の飽和透水性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：水工構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行、坂本博紀

### 【要旨】

不飽和の自然および人工地盤中の浸透に関する問題は、自然地盤の降雨や地下水の浸透、人工地盤である盛土や堤防、フィルダムのコアの浸透に関する調査、設計に際して重要である。しかし現在、不飽和地盤において飽和透水係数を求める原位置試験方法は確立されていない。不飽和地盤において注水式による原位置透水試験を実施したとき、非定常浸透や重力流の影響により、飽和透水性を過大に評価してしまうおそれがある。本研究では、不飽和軟岩地盤における原位置透水試験を想定した飽和－不飽和浸透流解析において、有効注入圧力、飽和透水係数および地下水位を種々に変化させた解析を行い、それらの条件が注入流量の非定常特性や、安定流量に与える影響を評価した。この結果を受けて、実務的な実施時間の原位置透水試験の結果から、飽和透水係数の評価に必要な安定流量を推定する方法を提案した。さらに、不飽和状態にあるダム基礎軟岩地盤で行われた長時間透水試験において、試験初期の注入流量データに本手法を適用して安定流量を推定した結果、推定された安定流量は高い精度で安定流量実測値を再現できることがわかった。

キーワード：不飽和地盤、透水性、飽和－不飽和浸透流解析、非定常浸透、ダム基礎軟岩

### 1. はじめに

不飽和の自然および人工地盤中の浸透に関する問題は、自然地盤の降雨や地下水の浸透、人工地盤である盛土や堤防、フィルダムのコアの浸透に関する調査、設計に際して重要である。しかし、不飽和透水係数と飽和度の関係を求める原位置試験方法だけでなく、飽和透水係数を求める原位置試験方法についても確立されていない。近年、地表面付近では室内試験に近い高い制御精度のシステムを用いた試験方法についての検討がなされているが、地表面付近を除き、地下深部も含めて対象とできる、ボーリング孔を利用した試験についてはほとんど検討が行われていない。

一方、近年、ダム建設事業においては、コスト縮減と環境保全の観点から、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。このような状況下において、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の透水試験を行う場合、特に、地下水位が低く、不飽和帯となっている場合においては、注入水の浸透形態は非定常浸透となり、実務的な注水時間程度では各注入圧力段階に

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。このような地盤では、通水時間を長くして定常流量を得る長時間透水試験<sup>1)</sup>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。また、定常流量が得られた場合でも、重力流の影響により地下水面下の飽和帯におけるポテンシャル流とは異なる流量になると考えられる。これらのことから、不飽和地盤における非定常浸透や重力流の影響を考慮した、飽和透水係数評価方法を開発することは、地盤の止水対策などのコスト縮減の観点から重要である。

本研究では、非定常の飽和－不飽和浸透流解析により、有効注入圧力を1段階とした透水試験について、有効注入圧力、飽和透水係数および地下水位を変化させた解析を実施し、それらの条件が注入流量の非定常特性や安定流量に与える影響を評価した。この結果に基づき、実務的な実施時間の原位置透水試験の結果から、飽和透水係数の評価に必要な安定流量を推定する方法を提案した。さらに、本手法の適用性を評価するために、不飽和状態にあるダム基礎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。

2. 浸透流解析を用いた地盤および試験条件が長時間透水試験結果に与える影響の検討

2.1 解析モデル

本研究の対象とする地盤は割れ目の発達していない軟岩地盤であることから、多孔質媒体モデルを用いた浸透流解析を行う。

図-1に解析モデル概要を、表-1に解析モデル諸元を示す。解析モデルは半径30m、高さ25mの軸対象モデルであり、試験孔半径を0.033m、試験区間は地表から-10m~-15mの5m区間に設けた。境界条件は、軸対称モデルの外周側の側面の地下水位以下を水頭固定境界、地下水位以上を浸出点境界、その他を不透水境界に設定した。

表-2に物性値を、図-2に不飽和浸透特性を示す。解析に用いる物性値は、10Lu程度の等方の透水性を有する多孔質媒体とみなせる地盤を想定して、松本ら<sup>2)</sup>の研究を参考に設定した。なお、これらの物性値は、土木研究所水工構造物チームが行った同様の研究<sup>3)</sup>でも使用している。

解析における注水時間は、流量が十分に定常状態に達すると考えられる長時間を想定して $1 \times 10^9$ 秒(約31年)とした。

2.2 検討ケース

検討ケース一覧を表-3に示す。解析は、地下水位や

表-1 モデル諸元

項目	値
モデル半径 $R$ (m)	30
モデル高さ $H$ (m)	25
孔径 $\phi$ (mm)	66
試験区間上端深さ (m)	10
試験区間長 $L$ (m)	5

表-2 解析物性値

項目	値
飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$1.3 \times 10^{-4}$
比貯留係数 $S_s$ (cm <sup>-1</sup> )	$1.0 \times 10^{-7}$
間隙率 $n$	0.2
不飽和浸透特性	図-2

表-3 検討ケース一覧

飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	有効注入圧力							備考
	地下水位	0.049MPa	0.098MPa	0.196MPa	0.294MPa	0.49MPa	0.98MPa	
$1.3 \times 10^{-4}$	GL.-0m GL.-5m	●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間よりも上
	GL.-10m	●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間上端
	GL.-11.25m GL.-12.5m GL.-13.75m	●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間内
	GL.-15m	●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間下端
	GL.-20m GL.-22.5m	●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間よりも下
	GL.-0m GL.-15m GL.-22.5m	-	●	-	-	●	-	飽和透水係数の影響
$1.3 \times 10^{-5}$ $6.7 \times 10^{-5}$ $2.7 \times 10^{-4}$ $1.3 \times 10^{-3}$								

有効注入圧力を種々に変化させ、注入流量の非定常性や安定流量に与える影響を検討した。

地盤の飽和透水係数は、10Lu程度に相当する $k_s=1.3 \times 10^{-4}$ cm/sを基本とし、さらに、代表的な地下水位(GL.-0m, -15mおよびGL.-22.5m)および有効注入圧力(0.098, 0.49MPa)については、飽和透水係数の影響を調べるために、1Lu相当( $k_s=1.3 \times 10^{-5}$ cm/s)~100Lu相当( $k_s=1.3 \times 10^{-3}$ cm/s)の範囲で4種設定した。

2.3 解析結果

2.3.1 地下水位、注入圧力の影響

(1) 非定常浸透状況におよぼす影響

図-3に注入流量の経時変化を示す。注入流量は非定常の傾向を示している。試験開始直後は注入流量が多

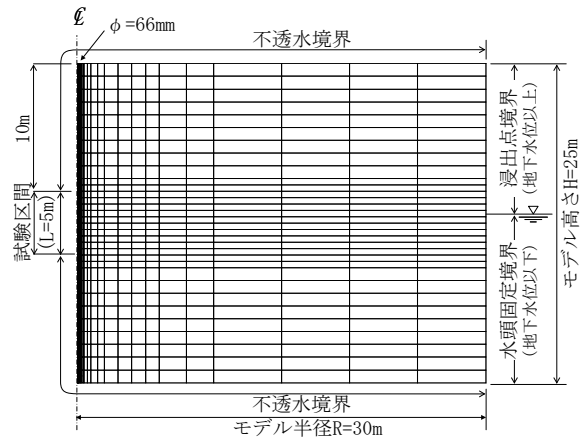


図-1 モデル概要図

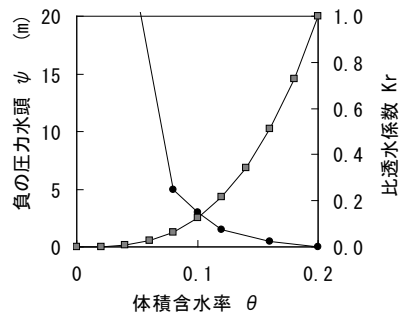


図-2 不飽和浸透特性

く、時間の経過とともに低減しながら徐々に安定する。  
 非正常の傾向は、同一有効注入圧力においては、地下水位が低くなるほど強くなる。

注入流量は、時刻 $t=10^7\sim 10^9$ 秒で概ね安定する。

(2) 安定流量におよぼす影響

注入流量がほぼ定常状態となる  $1.0\times 10^9$ 秒の注入流量を安定流量として整理した。表-4 に安定流量の一覧を示す。地下水位や有効注入圧力と注入流量の安定流量の関係には以下の傾向が見られた。

1) 完全飽和状態に対する各地下水位における安定流量の増減

図-4 に、地下水位を GL.-0m に設定することでモデル全体を完全に飽和させた状態（以下、完全飽和状態と呼ぶ）の安定流量を 1 とした場合の各地下水位での相対的な安定流量（以下、安定流量比と呼ぶ）を示す。この図は、安定流量比と地下水位の関係を有効注入圧力別に整理したものである。

- a) 地下水位が試験区間よりも上に位置する場合、有効注入圧力が小さくなるにつれて安定流量比は小さくなる。これは、地下水位が飽和時よりも低い場合、注入に伴って試験区間周辺の地下水位が上昇し、有効注入圧力が相対的に小さくなることが要因と考えられる。
- b) 地下水位が試験区間上端よりも下に位置する場合、地下水位が下がるにつれて安定流量比は大きくなる。これは、重力流の影響によるものと考えられる。
- c) 地下水位が安定流量比に与える影響は、有効注入圧力が小さいほど大きい。地下水位の影響が最も大きいのは、有効注入圧力が 0.049MPa のケースであり、地下水位 GL.-10m（試験区間上端）での注入流量は完全飽和状態の約 95%、地下水位 GL.-22.5m（試験区間下端より 7.5m 下方）での注入流量は完全飽和状態の約 142%となる。

表-4 安定流量 ( $\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )

有効注入圧力	0.049	0.098	0.196	0.294	0.49	0.98
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
地下水位 GL.-0m	4.56	9.12	18.2	27.4	45.6	91.2
GL.-5m	4.51	9.03	18.1	27.2	45.3	90.9
GL.-10m	4.32	8.72	17.6	26.5	44.5	89.9
GL.-11.3m	4.34	8.69	17.5	26.4	44.4	89.6
GL.-12.5m	4.53	8.87	17.7	26.5	44.4	89.6
GL.-13.8m	4.85	9.21	18.0	26.9	44.7	89.8
GL.-15m	5.31	9.71	18.5	27.4	45.2	90.3
GL.-20m	6.41	11.1	20.2	29.2	47.1	92.0
GL.-22.5m	6.48	11.4	20.6	29.6	47.5	92.4

2.3.2 地盤の飽和透水係数の影響

(1) 注入流量の経時変化

図-5 に注入流量の経時変化を示す。注入流量は、飽和透水係数が大きいほど多くなり（曲線が上方に移動し）、飽和透水係数が大きいほど、注入流量が安定するまでの時間が短くなる（曲線が左側に移動する）。

このことを詳細に検討するため、注入流量の経時変化について、流量および時刻を無次元化し、その合致の度合いを確認した。

注入流量および時刻の無次元化は、以下のようを行った。

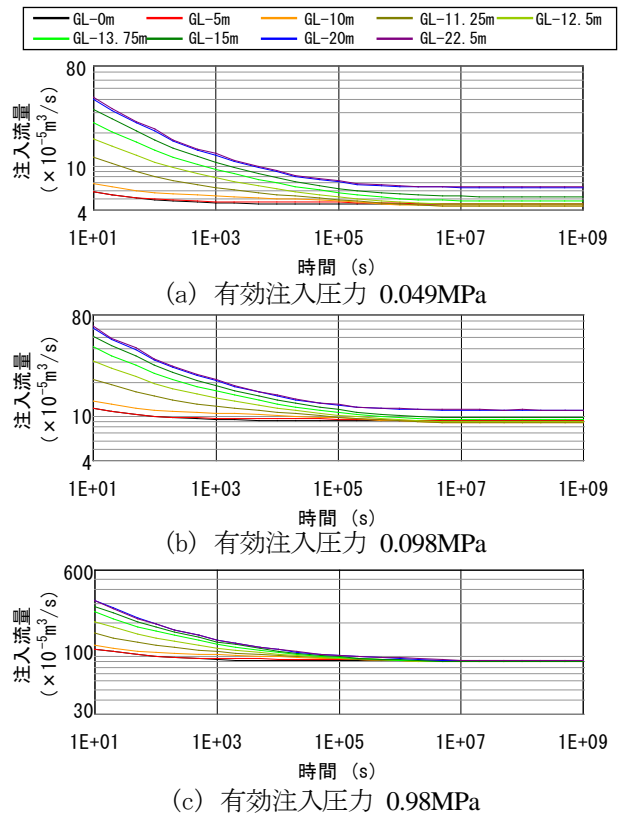


図-3 注入流量の経時変化の例

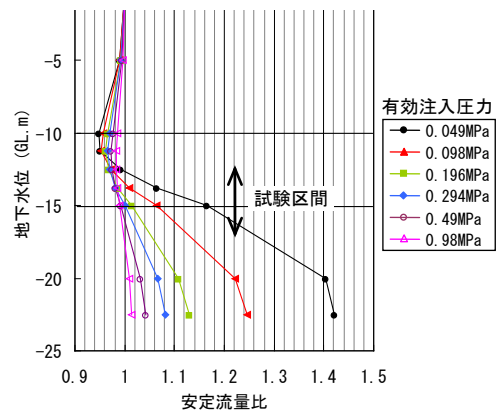


図-4 地下水位と安定流量比の関係

- a) 注入流量の無次元化は、飽和透水係数 $k_s$ 、有効注入圧力に相当する圧力水頭 $H$ 、試験区間長 $L$ で行った( $Q/k_s LH$ )。
- b) 時刻の無次元化は、飽和透水係数 $k_s$ の逆数、有効注入圧力に相当する圧力水頭 $H$ で行った( $t \cdot k_s / H$ )。

図-6に、注入流量、時刻を無次元化した注入流量の経時変化を示す。無次元化した注入流量は、地下水位および有効注入圧力が同じであればほぼ一致し、1本の曲線となった。

(2) 完全飽和状態に対する各地下水位における安定流量の増減

表-5に各条件における安定流量を示す。完全飽和状態 (GL-0m) を基準とした各地下水位での安定流量比は、飽和透水係数に関わらずほぼ一致した。

2.3.3 不飽和地盤に対する安定流量から完全飽和状態の安定流量への換算係数

これまでの検討結果より、安定流量は、地下水位および有効注入圧力に影響を受けることがわかった。また、各地下水位での安定流量を完全飽和状態での安定流量で除した安定流量比は、飽和透水係数に影響を受けないことがわかった。

表-5 安定流量 ( $\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )

(a) 有効注入圧力 0.098MPa

地下水位	$k_s$	$1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$6.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
GL-0m		$9.12 \times 10^6$ (1.00)	$4.70 \times 10^5$ (1.00)	$1.89 \times 10^4$ (1.00)	$9.12 \times 10^4$ (1.00)
GL-15m		$9.71 \times 10^6$ (1.06)	$5.00 \times 10^5$ (1.06)	$2.02 \times 10^4$ (1.06)	$9.71 \times 10^4$ (1.06)
GL-22.5m		$1.14 \times 10^7$ (1.25)	$5.86 \times 10^5$ (1.25)	$2.36 \times 10^4$ (1.25)	$1.14 \times 10^5$ (1.25)

(b) 有効注入圧力 0.49MPa

地下水位	$k_s$	$1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$6.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
GL-0m		$4.56 \times 10^5$ (1.00)	$2.35 \times 10^4$ (1.00)	$9.47 \times 10^3$ (1.00)	$4.56 \times 10^3$ (1.00)
GL-15m		$4.52 \times 10^5$ (0.99)	$2.33 \times 10^4$ (0.99)	$9.39 \times 10^3$ (0.99)	$4.52 \times 10^3$ (0.99)
GL-22.5m		$4.75 \times 10^5$ (1.04)	$2.45 \times 10^4$ (1.04)	$9.87 \times 10^3$ (1.04)	$4.75 \times 10^3$ (1.04)

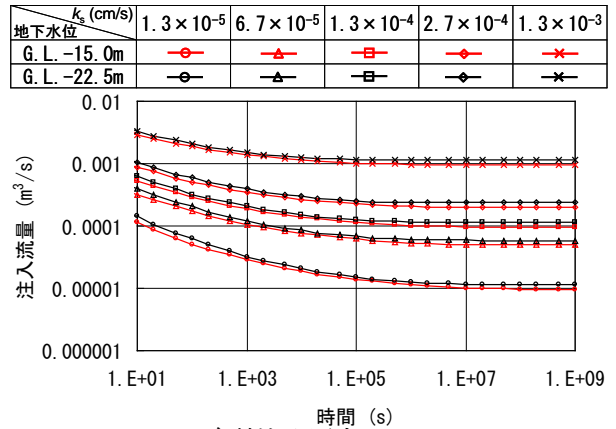
注) 括弧内は完全飽和状態との比

このことは、地下水位、有効注入圧力が既知であれば、飽和透水係数に関わらず図-4に示す安定流量比の逆数を用いて完全飽和状態の安定流量に次式(1)のように換算できることを示している。

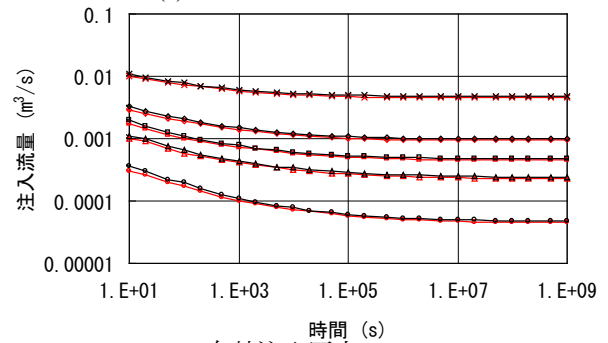
$$Q'_s = \beta Q_s \tag{1}$$

ここに、 $\beta$ :完全飽和状態の安定流量への換算係数、 $Q'_s$ :完全飽和状態における安定流量、 $Q_s$ :各地下水位

での安定流量である。式(1)により得られた $Q'_s$ を用いて完全飽和状態におけるルジオン値や透水係数を求めることが可能となる。

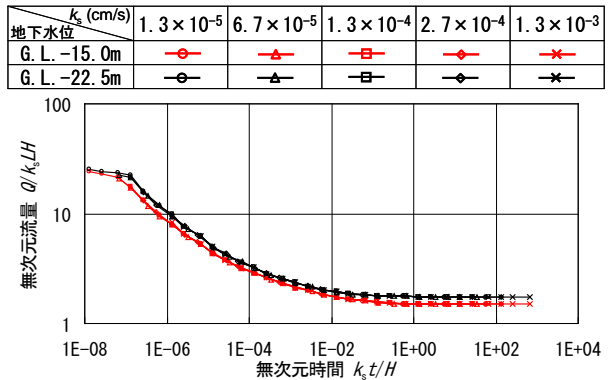


(a) 有効注入圧力 0.098MPa

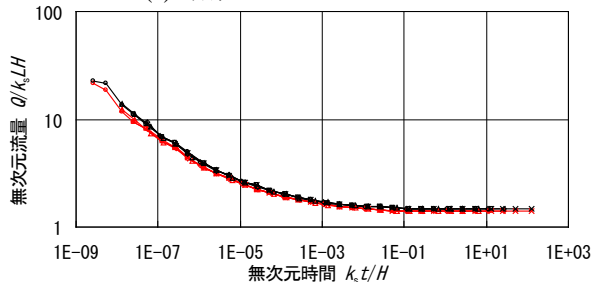


(b) 有効注入圧力 0.49MPa

図-5 注入流量の経時変化の比較



(a) 有効注入圧力 0.098MPa



(b) 有効注入圧力 0.49MPa

図-6 注入流量の経時変化の比較 (流量および時刻を無次元化した結果)

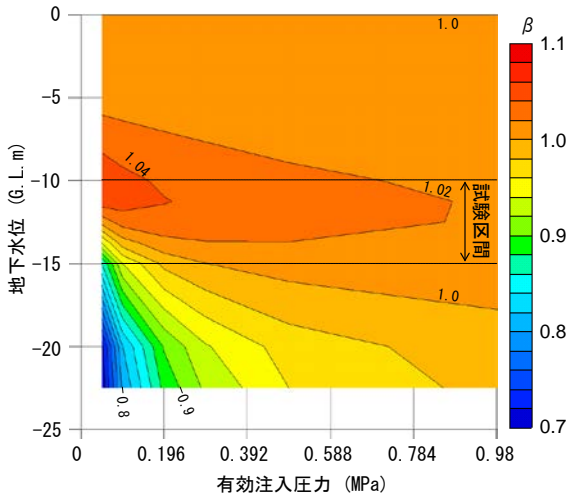


図-7 地下水位-有効注入圧力平面における換算係数 $\beta$ の分布

図-7に、地下水位、有効注入圧力に対応する換算係数 $\beta$ の分布を示す。

### 3. 浸透流解析を用いた透水試験における安定流量を推定する手法の検討

#### 3.1 浸透流解析を用いた実測注入流量推定方法の提案

##### 3.1.1 実測注入流量推定方法の流れ

前章までの検討結果より、浸透流解析による注入流量の時刻歴は、有効注入圧力、地下水位等の試験条件が同一であるとき、注入流量および時刻を飽和透水係数について無次元化すれば、得られる曲線は一致することがわかった。

このことに着目し、実測注入流量と解析流量のフィッティング方法を以下のように提案する。

##### 3.1.2 実測注入流量推定方法手順

###### (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 $k_1$ を設定して浸透流解析を実施する。

このとき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、解析結果による注入流量の出力時刻に補正係数 $\alpha$ を乗じるため、浸透流解析による注入流量の出力時刻は $\alpha$ の値によって変化し、必ずしも実測データと同時刻の流量値が得られない。このことを回避するため、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次式(2)のとおりとした。

$$Q_B(t) = a \cdot t^b + c \quad (2)$$

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(3)を用いてフィッティングを行う。

$$Q_{BT}(t) = \alpha Q_B(\alpha t) \quad (\alpha: \text{補正係数}) \quad (3)$$

ここで、補正係数 $\alpha$ は最小二乗法などを用いて決定する。

### (4) 完全飽和状態の安定流量への換算

フィッティングにより得られた $Q_{BT}(t)$ の安定流量を $Q_{BTS}$ とし、換算係数 $\beta$ を用いて完全飽和状態の安定流量 $Q_{BT'S}$ を次式(4)を用いて算出する。

$$Q_{BT'S} = \beta Q_{BTS} \quad (4)$$

ここで、換算係数 $\beta$ は、試験孔の孔径や試験区間の位置を再現したモデルを用いて浸透流解析を行い、図-7に相当するものを作成することで得られる。

### 3.2 浸透流解析による種々の条件を想定した適用性評価

#### 3.2.1 検討条件

種々の飽和透水係数、地下水位を想定したモデル地盤を対象に、浸透流解析による模擬透水試験を実施し、得られた注入流量時刻歴 $Q_A(t)$ に対して本手法を適用し、フィッティング方法の適用性について検討する。

検討条件は以下に示すとおりである。

a) モデル地盤は、飽和透水係数 $k_s$ が $6.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  (5Lu相当) および $2.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  (20Lu相当) の2種、地下水位は試験区間よりも下方で2種とした。不飽和浸透特性には、第2章で用いた10Lu程度の飽和透水性を有する軟岩地盤を想定したモデル(以下、基本モデルと呼ぶ)を用いた。模擬透水試験は、それぞれの地盤について2種の有効注入圧力で行った。

模擬透水試験の試験条件を表-6に示す。

b) フィッティングに用いる注入流量 $Q_B(t)$ は、飽和透水係数 $k_s$ が $1.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ であり、模擬透水試験と同じ地下水位、不飽和浸透特性を有するモデル地盤で再現解析を行い、得られた注入流量の時刻歴を式(2)の累乗式により近似したものを使用した。

- c) フィッティングに使用するデータは試験開始から5分間のデータとした。
- d) 模擬透水試験結果の出力時間間隔は10秒とした。
- f) 同定精度の評価指標は安定流量とした。安定流量は、注入流量が十分に定常に達したと判断できる $10^9$ 秒における注入流量とした。

表-6 模擬透水試験の試験条件

Case	有効注入圧力 (MPa)	地下水位 (G.L.m)	モデル地盤の飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	備考
1	0.098	-15	$6.7 \times 10^{-5}$	5Lu 相当の透水性
2	0.098	-22.5	$6.7 \times 10^{-5}$	
3	0.49	-15	$6.7 \times 10^{-5}$	
4	0.49	-22.5	$6.7 \times 10^{-5}$	
5	0.098	-15	$2.7 \times 10^{-4}$	20Lu 相当の透水性
6	0.098	-22.5	$2.7 \times 10^{-4}$	
7	0.49	-15	$2.7 \times 10^{-4}$	
8	0.49	-22.5	$2.7 \times 10^{-4}$	

### 3.2.2 検討結果

図-8に注入流量時刻歴のフィッティング結果の一例を示す。模擬透水試験の注入流量 $Q_A(t)$ とフィッティングで得られた注入流量 $Q_{BT}(t)$ はほぼ一致していることがわかる。

表-7に、各ケースにおけるフィッティング結果を示す。表中には、各ケースにおける模擬透水試験結果 $Q_A(t)$ の安定流量 $Q_{AS}$ と、フィッティング結果 $Q_{BT}(t)$ の安定流量 $Q_{BTS}$ を示している。 $Q_{BTS}$ は $Q_{AS}$ にほぼ一致しており、フィッティングにより模擬透水試験結果を良好に再現できていることがわかる。

表-7 安定流量の再現精度

(a) 飽和透水係数  $k_s=6.7 \times 10^{-5}$ cm/s

	Case1	Case2	Case3	Case4
モデル地盤の $k_s$ (cm/s)	$6.7 \times 10^{-5}$			
有効注入圧力 (MPa)	0.098		0.49	
地下水位 (G.L.m)	-15	-22.5	-15	-22.5
安定流量 $Q_{AS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$5.00 \times 10^{-5}$	$5.86 \times 10^{-5}$	$2.33 \times 10^{-4}$	$2.45 \times 10^{-4}$
安定流量 $Q_{BTS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$4.89 \times 10^{-5}$	$5.73 \times 10^{-5}$	$2.27 \times 10^{-4}$	$2.40 \times 10^{-4}$
$Q_{BTS}/Q_{AS}$	0.98	0.98	0.97	0.98

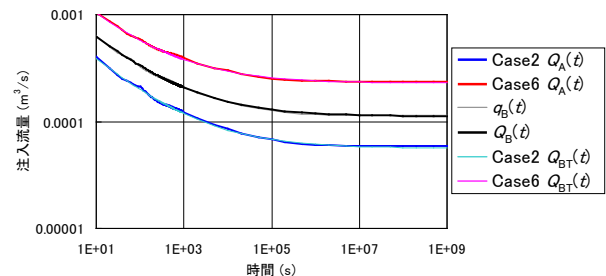
(b) 飽和透水係数  $k_s=2.7 \times 10^{-4}$ cm/s

	Case5	Case6	Case7	Case8
モデル地盤の $k_s$ (cm/s)	$2.7 \times 10^{-4}$			
有効注入圧力 (MPa)	0.098		0.49	
地下水位 (G.L.m)	-15	-22.5	-15	-22.5
安定流量 $Q_{AS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2.02 \times 10^{-4}$	$2.36 \times 10^{-4}$	$9.39 \times 10^{-4}$	$9.87 \times 10^{-4}$
安定流量 $Q_{BTS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2.00 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^{-4}$	$9.30 \times 10^{-4}$	$9.74 \times 10^{-4}$
$Q_{BTS}/Q_{AS}$	0.99	0.98	0.99	0.99

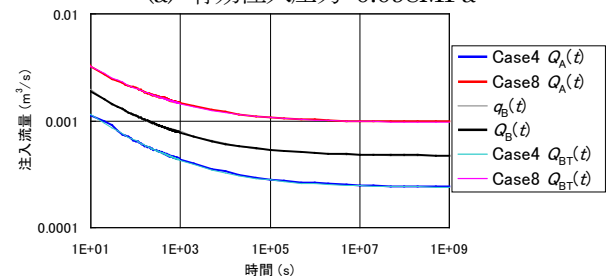
### 3.3 不飽和浸透特性の不確実性がフィッティング結果

#### に与える影響の検討

不飽和浸透特性は、注入流量の非定常特性や安定流量に影響をおよぼす重要な項目である。ここでは、文献調査や室内試験により種々の不飽和浸透特性を有するモデル地盤を作成して模擬透水試験を行い、不飽和浸透特性に基本モデルを用いた再現解析によりフィッティングを行った際の安定流量の再現精度について検討する。



(a) 有効注入圧力 0.098MPa



(b) 有効注入圧力 0.49MPa

図-8 注入流量のフィッティング結果  
(地下水位 G.L. -22.5m)

### 3.3.1 種々の材料の不飽和浸透特性

#### (1) 不攪乱軟岩試料の不飽和浸透特性

##### 1) 試料および試験の概要

本研究では、大保脇ダム左岸リム部において実施された長時間透水試験<sup>1)</sup>に本フィッティング手法を適用し、安定流量の再現性を確認している。ここでは、試験が実施された左岸リム部よりD<sub>H</sub>級岩盤の不攪乱試料を採取し、室内試験により不飽和浸透特性を明らかにする。フィッティングの適用結果については3.4で詳述する。

不攪乱試料の採取は、図-9に示す位置に採取ヤードを設け、ブロックサンプリングにより行った。

D<sub>H</sub>級岩盤は全体的に風化が進んだ状態であり、均質多孔体的な性状である。また、一部で片理面および他の割れ目が比較的保存された状態の箇所もあるが、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る。ただし、室内試験の供試体寸法を考慮して、サンプリングの位置は、ブロックサンプルに割れ目が

入らないように選定した。

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 の円柱型とし、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。図-10 に供試体の形状を示す。不飽和浸透特性試験は、西垣ら<sup>4)</sup>の提案する試験方法により行った。

作製した供試体の初期状態での諸元を表-8 に示す。供試体 1, 2 は間隙率が 0.48、飽和透水係数が  $10^{-5}$  cm/s オーダーであった。供試体 3 は間隙率が 0.45、飽和透水係数が  $10^{-7}$  cm/s オーダーであった。飽和透水係数の算出方法については後述する。

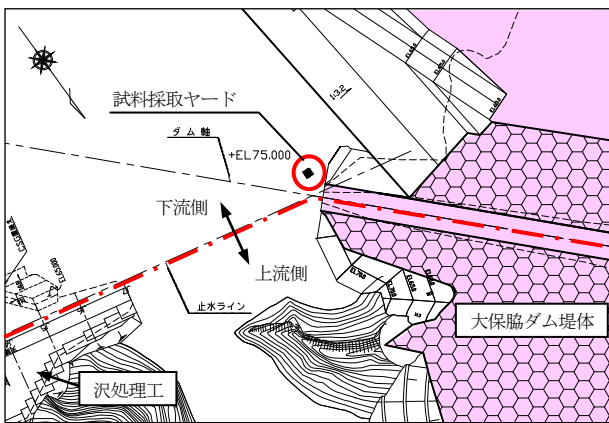


図-9 D<sub>11</sub>級不攪乱試料採取箇所

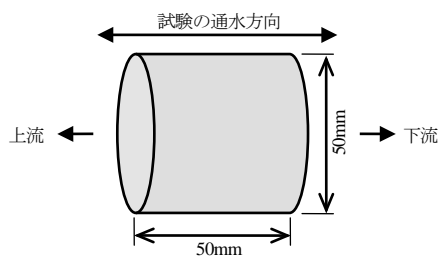


図-10 供試体の形状

表-8 各供試体の物理特性

供試体番号	供試体 1	供試体 2	供試体 3
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.78	1.76	1.85
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.42	1.43	1.49
含水比 $w$ (%)	25.7	23.2	24.2
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.74	2.74	2.74
飽和度 $S_r$ (%)	76	69	79
間隙率 $n$	0.48	0.48	0.45
飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$5.5 \times 10^{-5}$	$5.5 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-7}$

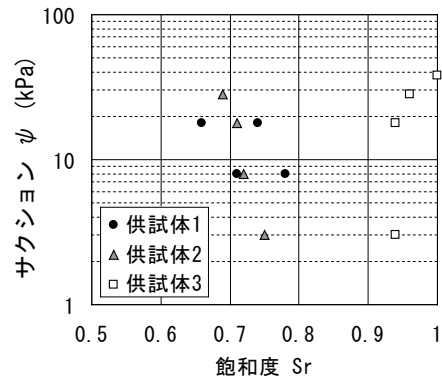
不飽和浸透特性試験結果を図-11 に示す。

飽和度とサクシジョンの関係については、供試体 1, 2 はサクシジョンが 10kPa より大きくなると体積含水率の低下傾向が確認できた。しかし、供試体 3 は、今回実施した試験の範囲では、サクシジョンを大きくしても体積含水率は低下しなかった。

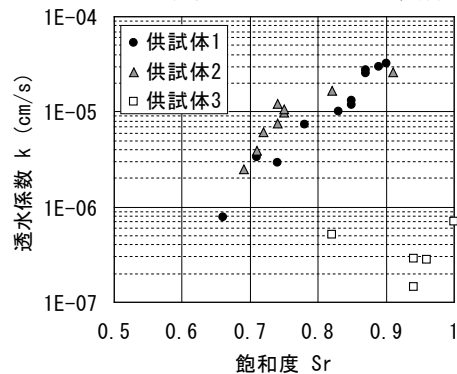
飽和度と不飽和透水係数の関係については、供試体 1, 2 は飽和度が低くなるにしたがい透水係数も小さくなり、飽和度 0.9 と 0.65 の間には、1 オーダー以上の透水係数の差が生じた。供試体 3 は  $10^{-7}$  cm/s オーダーの透水性の非常に低い供試体であり、飽和度と透水性に明瞭な関係は見られなかった。

不飽和浸透特性は、物理特性および不飽和浸透特性試験結果の類似した供試体 1, 2 から得られたものを千枚岩 D<sub>H-1</sub> として整理し、供試体 3 から得られたものを千枚岩 D<sub>H-2</sub> として整理した。なお、供試体 3 の飽和度と比透水係数には明瞭な関係性が見られなかったため、D<sub>H-1</sub> に対する飽和度と比透水係数の関係を D<sub>H-2</sub> でもそのまま用いることとした。

図-12 に千枚岩 D<sub>H-1</sub>、D<sub>H-2</sub> の不飽和浸透特性を示す。飽和透水係数  $k_s$  は、加圧型透水試験結果の飽和度 100% 付近の透水係数より、千枚岩 D<sub>H-1</sub> は  $k_s = 5.5 \times 10^{-5}$  cm/s、千枚岩 D<sub>H-2</sub> は  $k_s = 7.0 \times 10^{-7}$  cm/s とした。



(a) 飽和度とサクシジョンの関係



(b) 飽和度と透水係数の関係

図-11 不飽和浸透特性試験の結果

## 2) 試験結果

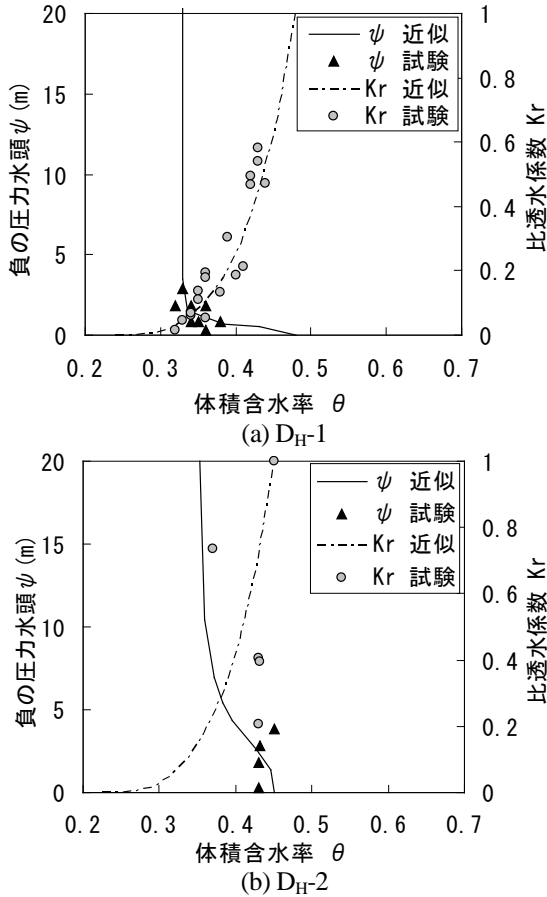


図-12 不飽和浸透特性

(2) 文献調査による不飽和浸透特性の事例整理

文献調査により、種々の地盤材料の保水特性の事例を収集した。本研究で対象とする地盤は、透水性が10Lu ( $k_s=1.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ) 程度の軟岩地盤であるが、このような材料に対する不飽和浸透特性はほとんど得られていない。そのため、対象とする地盤と同程度の透水性を含めた幅広い範囲の透水性を有する試料を抽出することとし、飽和透水係数が  $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$  オーダーで、乱さない供試体を用いた試験の結果を収集した。

表-9 に収集した不飽和浸透特性の一覧を示す。なお、ここで示す保水特性は、試験結果をもとに van Genuchtenモデル<sup>12)</sup>により近似されたものであることに注意されたい。

図-13 に各材料の保水特性を示す。材料の負の圧力水頭を比較するため、横軸には飽和体積含水率  $\theta_s$  を基準とした相対的な体積含水率  $(\theta - \theta_s)$  を用いて整理した。

本研究で想定する地盤と同等以上の透水性を有する材料では、同一  $(\theta - \theta_s)$  に対する負の圧力水頭は、本研究で用いている基本モデルや千枚岩D<sub>H</sub>-1 と同程度かそれ以下となっている。透水性の小さな材料では、

No.6 の泥岩を除いて、概ね同一  $(\theta - \theta_s)$  に対する負の圧力水頭が大きく、千枚岩D<sub>H</sub>-2 に近い形状となっている。

表-9 不飽和浸透特性の一覧

No	試料	間隙率	$k_s$ (cm/s)	状態	文献
1	クロボク	0.80	$7.00 \times 10^{-4}$	乱さない	5,6
2	シラス	0.52	$2.25 \times 10^{-4}$	乱さない	5,7
3	シラス	0.54	$1.00 \times 10^{-4}$	乱さない	8
4	泥岩	0.58	$1.70 \times 10^{-7}$	岩石	9
5	島尻層群泥岩	0.30 <sup>*)</sup>	$1.00 \times 10^{-7}$	岩石	10
6	宮崎層群泥岩	0.37 <sup>*)</sup>	$1.00 \times 10^{-7}$	岩石	10
7	白浜砂岩	0.15	$1.00 \times 10^{-8}$	岩石	11

\*) No.6, 7 の間隙率は有効間隙率

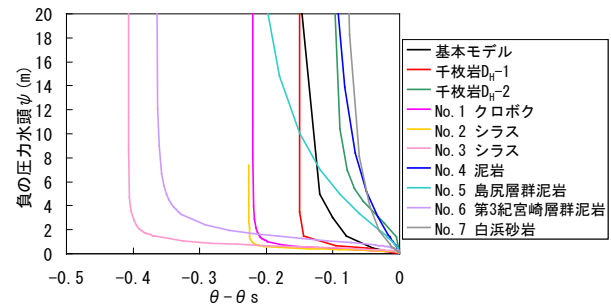


図-13 各試料における  $\theta_s$  で基準化した保水特性

3.3.2 検討条件

(1) 検討対象とする不飽和浸透特性

試験により求めた千枚岩D<sub>H</sub>級材料の不飽和浸透特性と、文献調査により収集した各材料の不飽和浸透特性を用いて透水試験の再現解析を実施し、不飽和浸透特性の違いが透水試験における安定流量の同定精度に与える影響を検討する。

文献整理により収集したデータに対する体積含水率と不飽和透水係数の関係には、松本ら<sup>2)</sup>の研究と同様に、S. Irmay<sup>13)</sup>の提案式  $k_r = \{(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)\}^3$  を採用した。

図-14 に検討に使用した不飽和浸透特性を示す。比較のため、 $\theta_s$  を各試料に一致するように  $\theta$  を平行移動させた基本モデルを併記している。

(2) 解析モデルおよび解析条件

検討に用いるモデル地盤には、第2章で採用した半径30mの軸対象モデルを用いた。試験条件は、注入流量への不飽和浸透特性の影響が大きくなる条件とし、有効注入圧力を0.098MPa、地下水位をGL.-22.5mとした。



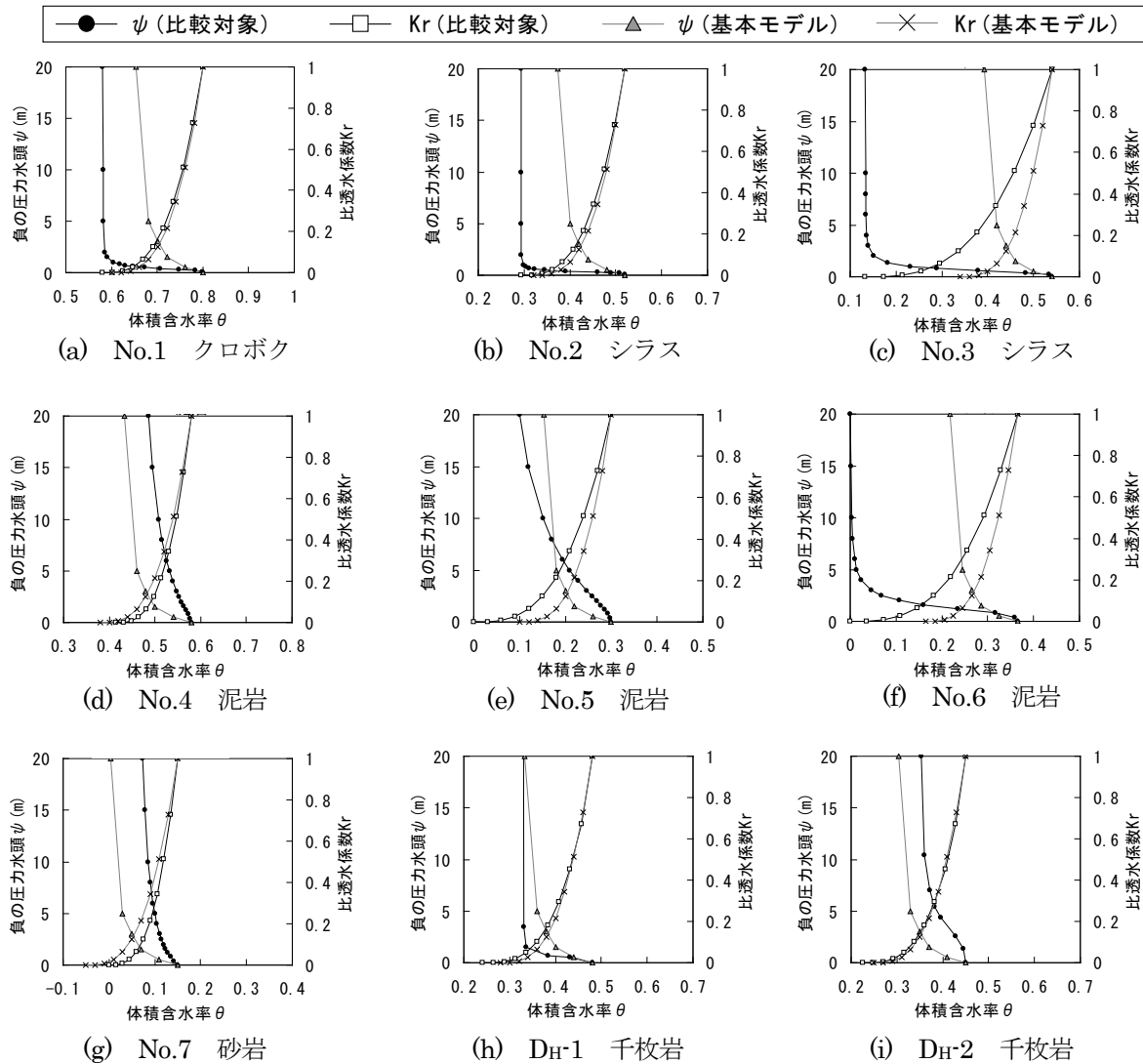


図-14 比較対象とする不飽和浸透特性（基本モデルを併記）

### (3) 検討方法

#### 1) 非定常浸透特性および安定流量に与える影響

フィッティング結果の検証に先立ち、不飽和浸透特性が注入流量の非定常特性や安定流量に与える影響を検討する。地盤の飽和透水係数 $k_s$ を $1.3 \times 10^4 \text{cm/s}$ として、(2)に示す条件で模擬透水試験を実施し、注入流量の非定常特性や安定流量に与える影響を比較する。

#### 2) フィッティング精度に与える影響

以下に示す手順により、フィッティング精度に与える不飽和浸透特性の影響を検証する。なお、フィッティング方法および安定流量の再現精度の確認方法は3.2と同様とするが、フィッティングに使用する時間の範囲が精度に与える影響を評価するため、使用する時間の範囲を表-10のように定めた。

- a) 図-14に示す種々の不飽和透水係数を有し、飽和透水係数 $k_s$ が $6.7 \times 10^5 \text{cm/s}$  (5Lu相当) および $2.7 \times 10^4 \text{cm/s}$  (20Lu相当) のモデル地盤を作成する。
- b) 作成したモデル地盤に対し、(2)に示す条件で浸透流解析による模擬透水試験を行い、注入流量の時刻歴 $Q_A(t)$ およびその安定流量 $Q_{AS}$ を得る。同時に、地下水位GL.-0m条件についても解析を実施し、完全飽和状態の安定流量 $Q_{A's}$ を把握しておく。
- c) 各モデル地盤の不飽和浸透特性が未知であると想定し、飽和透水係数 $k_s$ を $1.3 \times 10^4 \text{cm/s}$ 、不飽和浸透特性を基本モデルとした再現解析を行い、注入流量 $Q_B(t)$ およびその安定流量 $Q_{BS}$ を得る。また、b)と同様に完全飽和状態の安定流量 $Q_{B's}$ も算出し、安定流量の比を $\beta (=Q_{B's}/Q_{BS})$ とおく。
- d)  $Q_B(t)$ を用いて各モデル地盤の $Q_A(t)$ を対象にフィ

ッティングを行い、各モデル地盤に対する注入流量の同定値 $Q_{BT}(t)$ を得、その安定流量を $Q_{BTS}$ とする。得られた $Q_{BTS}$ の $Q_{AS}$ に対する再現精度を検証する。

e)  $Q_{BTS}$ に $\beta$ を乗じることで、各モデル地盤に対する完全飽和状態の安定流量同定値 $Q_{BT}'s$ を算出する。得られた $Q_{BT}'s$ と各モデル地盤の $Q_{A}'s$ を比較し、再現精度を検証する。

表-10 フィッティングの対象とする時間の範囲のパターン

Case	データ使用範囲	備考
1	10 秒～300 秒 (5 分間)	使用データ量の影響
2	10 秒～600 秒 (10 分間)	
3	10 秒～900 秒 (15 分間)	使用時間帯の影響 (5 分間)
4	300 秒～600 秒 (5 分間)	
5	600 秒～900 秒 (5 分間)	使用時間帯の影響 (10 分間)
6	300 秒～900 秒 (10 分間)	

3.3.3 検討結果

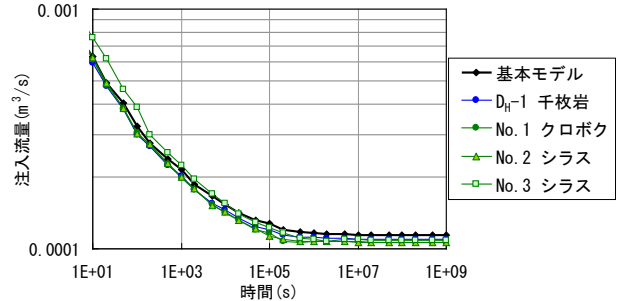
(1) 非定常浸透特性および安定流量に与える影響

図-15 に各モデル地盤における注入流量の経時変化を示す。注入流量は不飽和浸透特性に影響を受け、モデル地盤ごとにばらつきが見られる。注入流量の低減傾向は、不飽和浸透特性ごとに異なった傾向を示す。No.3,5,6のように、体積含水率の変動幅( $\theta_s - \theta_r$ )が基本モデルよりも広い材料は、注入初期の流量が大きい。

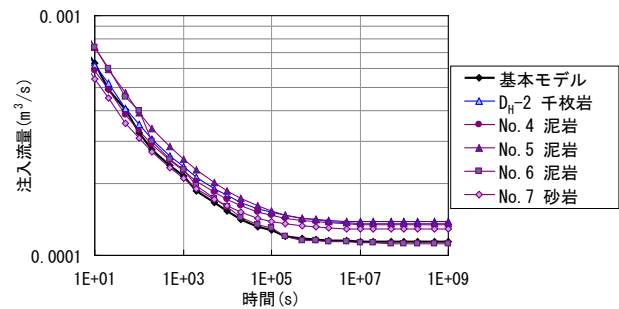
図-16 に試料の飽和透水係数 $k_s$ と安定流量の関係を示す。安定流量は、試料の飽和透水係数 $k_s$ が大きいNo.1,2,3材料および千枚岩 $D_H-1$ については、基本モデルよりもわずかに小さくなった。試料の飽和透水係数 $k_s$ の小さい岩石材料および千枚岩 $D_H-2$ については、基本モデルよりも大きくなった。ただし、他の岩石材料に比べて負の圧力水頭が小さなNo.6 泥岩の安定流量は、基本モデルとほぼ同じとなった。

ここで、各モデル地盤の安定流量から本模擬透水試験条件に応じて求めた図-7に相当する安定流量の換算係数 $\beta$ を用いて完全飽和状態の安定流量を予測する場合を想定する。各モデル地盤の不飽和浸透特性は未知であることを想定し、基本モデルにおける $\beta$ を用いて完全飽和状態の安定流量を予測した。図-17 に飽和安定流量の再現精度と各試料の飽和透水係数 $k_s$ の関係を示す。再現精度は0.94~1.21の範囲で分布している。これより、再現解析の対象が基本モデルに対して同一( $\theta - \theta_s$ )に対する負の圧力水頭が大きい地盤であった場合、基本モデルを用いて完全飽和状態の安定流量に換算した場合、最大で21%程度過大評価することがわかる。また、再現解析の対象が基本モデルに対して

同一( $\theta - \theta_s$ )に対する負の圧力水頭が小さい地盤であった場合、基本モデルを用いて完全飽和状態の安定流量に換算した場合、最大で6%程度過小評価することがわかる。



(a) 試料の飽和透水係数が大きいケース



(b) 試料の飽和透水係数が小さいケース

図-15 注入流量の経時変化

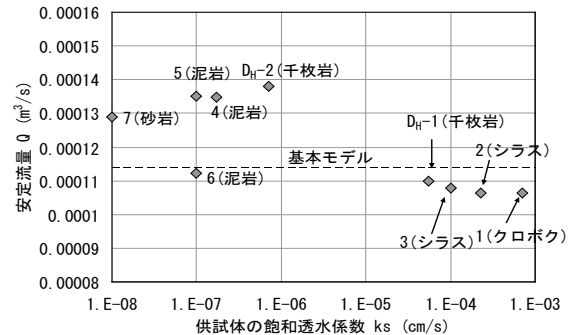


図-16 飽和透水係数と安定流量の関係

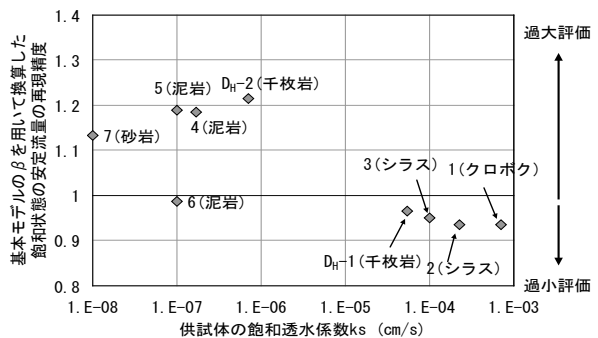
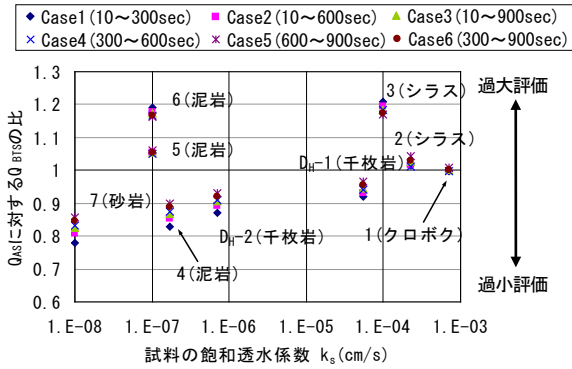
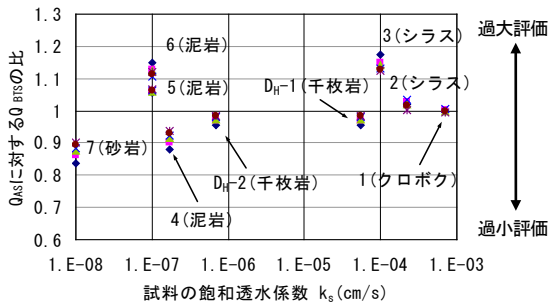


図-17 各物性における安定流量に対し、基本モデルの $\beta$ を用いて飽和安定流量を算出したときの再現精度



(a) モデル地盤の飽和透水係数  $6.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$



(b) モデル地盤の飽和透水係数  $2.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$

図-18 各試料の飽和透水係数  $k_s$  と、安定流量  $Q_{AS}$  に対する  $Q_{BTS}$  の再現精度の関係

(2) フィッティング結果に与える影響

図-18 に各試料の飽和透水係数  $k_s$  と、安定流量  $Q_{AS}$  に対する  $Q_{BTS}$  の再現精度の関係を示す。同一  $(\theta - \theta_s)$  に対する負の圧力水頭が大きな No.4, 7 および千枚岩  $D_H-2$  については、安定流量を過小評価する傾向が見られ、逆に、同一  $(\theta - \theta_s)$  に対する負の圧力水頭が小さな No.3, 6 については、安定流量を過大評価する傾向が見られる。

フィッティングに使用するデータ量の影響は、使用するデータ量が同じであれば、時間帯が遅いほど安定流量の再現精度が高い傾向が見られる。フィッティングに使用するデータの開始時刻が同じであれば、データ使用量が多いほど再現精度が高い傾向が見られる。また、同じ不飽和浸透特性を有するモデル地盤では、フィッティングに使用するデータの範囲が同じ場合、飽和透水係数が大きいほうが、安定流量の再現精度が高い。これらの傾向は、安定流量の再現精度が比較的低いモデル地盤で顕著であり、再現性の高いモデル地盤では明瞭な傾向は見られなかった。このように、条件の違いによりフィッティング結果に与える影響が多少異なるが、本検討における安定流量の再現精度は概ね 77~121% の範囲であった。

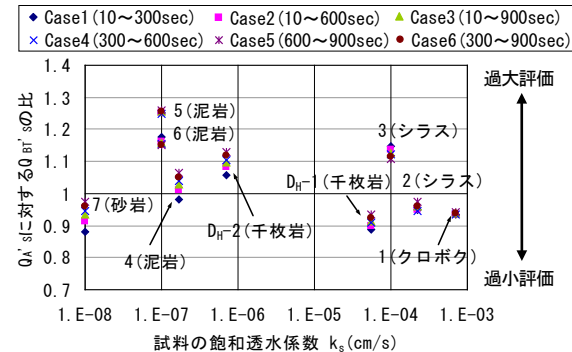
次に、基本モデルによる  $\beta$  を用いて完全飽和状態の安定流量  $Q_{BT's}$  を算出した。図-19 に各材料の飽和透水係数  $k_s$  と、 $Q_{A's}$  に対する  $Q_{BT's}$  の再現精度の関係を示す。ここで、上述のとおり、同一  $(\theta - \theta_s)$  に対する負の圧力水頭が大きいモデル地盤では、 $Q_{AS}$  に対する  $Q_{BTS}$  の再現精度は過小評価される傾向があるが、この不飽和浸透特性を有するモデル地盤では、(1)の検討結果から、基本モデルの  $\beta$  を用いて完全飽和状態の安定流量を推定すると、過大評価される傾向が見られた。その結果、完全飽和状態の安定流量  $Q_{A's}$  に対する  $Q_{BT's}$  の再現精度は、両検討による誤差が相殺する形となり、概ね 88~127% となった。

3.4 大保協ダム長時間透水試験結果への適用

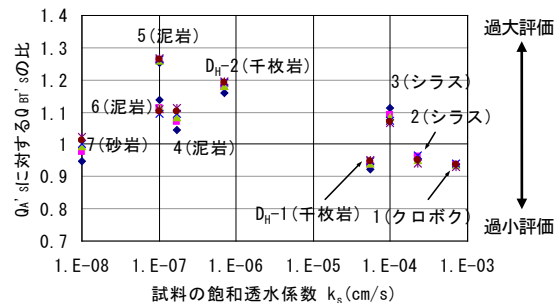
大保協ダム左岸リム部において実施された長時間透水試験結果<sup>1)</sup>に対して本フィッティング手法を適用し、安定流量の再現精度の検証を行った。

3.4.1 長時間透水試験および対象とする試験データの概要

表-11 に長時間透水試験の仕様を、図-20 に長時間透水試験の概念図を示す。また、図-21 に左岸リム部の岩級区分と試験孔の位置図を示す。長時間透水試験の



(a) モデル地盤の飽和透水係数  $6.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$



(b) モデル地盤の飽和透水係数  $2.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$

図-19 各試料の飽和透水係数  $k_s$  と、飽和安定流量  $Q_{A's}$  に対する  $Q_{BT's}$  の再現精度の関係

対象である千枚岩D<sub>H</sub>級岩盤は全体的に風化が進んだ状態であり、均質多孔体的な性状である。また、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る。なお、試験および地質条件の詳細については参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

試験データのうち、注入流量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-22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行った10分移動平均データを表示した。なお、2BLの第2.1ステージの現場計測データのように、初期段階で大きな注入流量の変動がみられる孔があるが、これは試験開始時にボーリング孔内が満水になるまでに注水した量が加算されたと考えられる。

表-11 長時間透水試験の仕様

項目	仕様
削孔径 φ	66mm
ステージ長	2.5m
一定水位 <sup>*)</sup>	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。

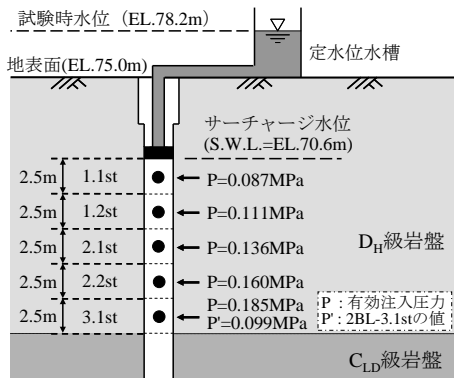


図-20 長時間透水試験の概念

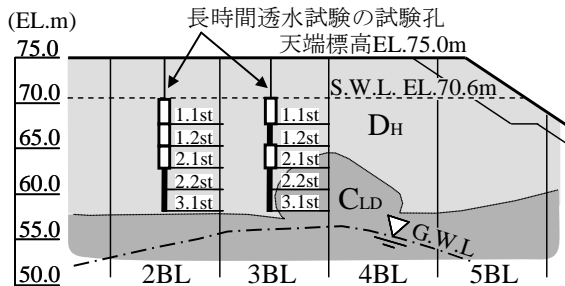
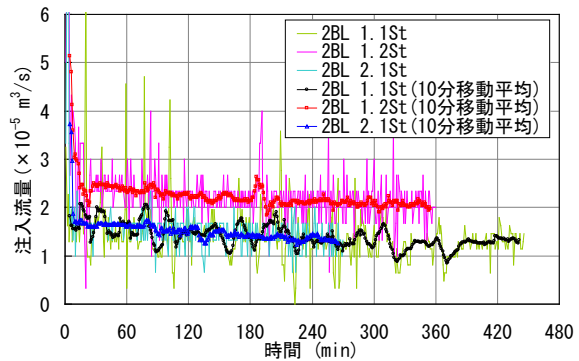


図-21 長時間透水試験の試験孔位置  
(□：再現解析の対象とするステージ)

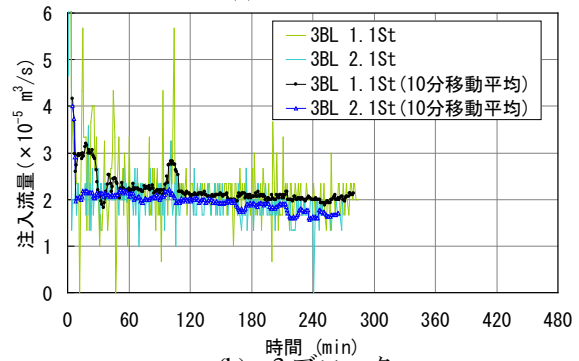
### 3.4.2 浸透流解析による大保脇ダム長時間透水試験結果の再現解析

長時間透水試験において非定常浸透の傾向を示したデータ（図-22 参照）を対象に、飽和一不飽和の非定常浸透流解析による再現解析を実施し、得られた解析結果を用いて実測データへのフィッティングを行った。再現解析の対象とするステージは、図-21 に示す5ステージである。

なお、解析結果と比較を行う試験データ（1分間隔計測）はばらつきが大きいいため、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。



(a) 2ブロック



(b) 3ブロック

図-22 注入流量の経時変化

#### (1) 解析モデルおよび解析物性値

解析モデルの一例を図-23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、その他の部分は不透水境界とした。

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とした。

表-12に解析物性値を示す。解析に用いる物性値は、10Lu程度の多孔質媒体とみなせる軟岩地盤を想定して、飽和透水係数を $1.3 \times 10^{-4}$ cm/sで等方に設定した。

解析に用いる不飽和浸透特性は、供試体の飽和透水係数が長時間透水試験結果より得られた透水性に近い供試体1,2より得られた不飽和浸透特性(千枚岩D<sub>H</sub>-1)を用いる。また、解析に用いる不飽和浸透特性の影響を確認するため、基本モデルについても実施した。間隙率は、モデル解析に用いた物性については0.2、室内試験結果から設定した物性については供試体の初期状態の間隙比を用いることとし、千枚岩D<sub>H</sub>-1は0.48とした。

表-12 解析物性値

項目	諸元
飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$1.3 \times 10^{-4}$
比貯留係数 $S_s$ (cm <sup>3</sup> )	$1.0 \times 10^{-7}$
間隙率 (D <sub>H</sub> -1) $n$	0.48
間隙率 (基本モデル) $n$	0.2

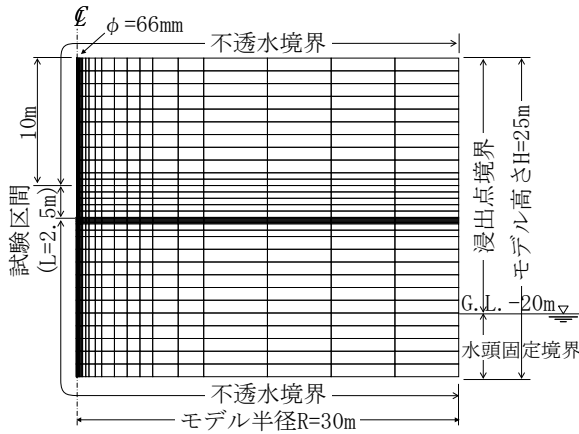


図-23 解析モデル (2.1ステージ)

(2) フィッティングおよび検証方法の概要

大保脇ダム長時間透水試験の実測データと浸透流解析結果のフィッティングを行い、本フィッティング手法による実測データの再現性を検証した。

フィッティング結果の評価に用いる安定流量 $Q_{AS}$ および $Q_{BTS}$ には、注入流量の実測データにばらつきがあることを考慮して、試験終了直前1時間の注入流量の平均値を用いることとした。なお、実測データにおける試験開始1時間の注入流量については、注入初期の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60~120分とした。

(3) 検討結果

図-24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よく再現できていることがわかる。

表-13に、各ステージにおける安定流量 $Q_{BTS}$ による $Q_{AS}$ の再現精度を示す。原位置より採取した供試体の不飽和浸透特性D<sub>H</sub>-1を使用した場合、 $Q_{AS}$ 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場合についても再現精度にあまり差は見られず、 $Q_{AS}$ の再現精度は0.92~1.04となった。

表-13 安定流量の再現精度

(a) 2ブロック

ブロック		2	2	2
ステージ		1.1	1.2	2.1
試験継続時間 (h)		7.35	5.92	4.42
有効注入圧力 (MPa)		0.087	0.111	0.136
D <sub>H</sub> -1	フィッティングによる飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$2.12 \times 10^{-5}$	$2.78 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{AS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.31 \times 10^{-5}$	$2.06 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{BTS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.22 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$
	$Q_{BTS}/Q_{AS}$	0.94	0.96	0.99
基本モデル	フィッティングによる飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$1.85 \times 10^{-5}$	$2.54 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{AS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.31 \times 10^{-5}$	$2.06 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{BTS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.20 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$
	$Q_{BTS}/Q_{AS}$	0.92	0.94	0.99

(b) 3ブロック

ブロック		3	3
ステージ		1.1	2.1
試験継続時間 (h)		4.67	4.42
有効注入圧力 (MPa)		0.087	0.136
D <sub>H</sub> -1	フィッティングによる飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$1.93 \times 10^{-5}$	$3.46 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{AS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.70 \times 10^{-5}$	$2.02 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{BTS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.78 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-5}$
	$Q_{BTS}/Q_{AS}$	1.04	0.99
基本モデル	フィッティングによる飽和透水係数 $k_s$ (cm/s)	$1.85 \times 10^{-5}$	$3.04 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{AS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.70 \times 10^{-5}$	$2.02 \times 10^{-5}$
	安定流量 $Q_{BTS}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-5}$
	$Q_{BTS}/Q_{AS}$	1.04	0.98

3.5 原位置試験への適用方法の検討

これまでの検討結果を踏まえ、本フィッティング手法を原位置試験へ適用し、実務的な実施時間の注入流量データから安定流量を推定する方法を図-25のように提案する。

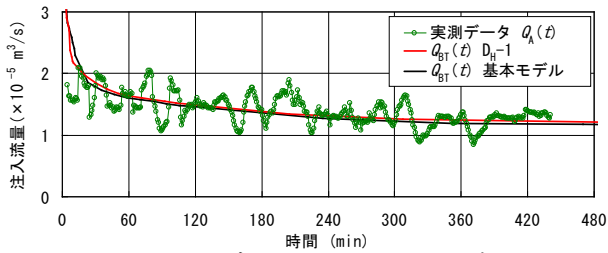
検討の流れは以下のとおりとなる。

(1) 解析モデルの作成

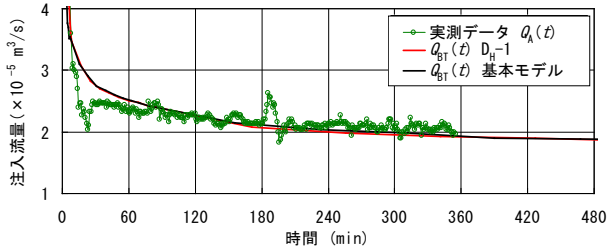
試験計画や調査結果をもとに、試験条件(地下水位、孔径、注入圧力、深度等)を再現した解析モデルを作成する。

非定常浸透状況に影響をおよぼす不飽和浸透特性については、当該地盤に対する試験結果を用いることが望ましい。当該地盤に対する試験結果がない場合には、本検討で用いた基本モデル等を用いることとなるが、

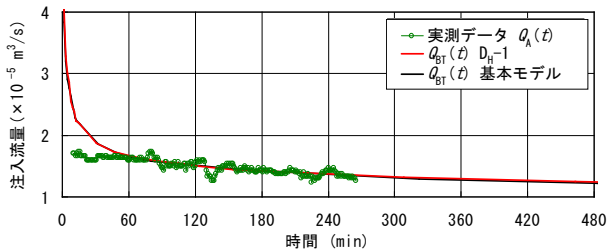
3.3 に示すように、-12%～+27%程度の誤差が生じる可能性があることに留意する必要がある。



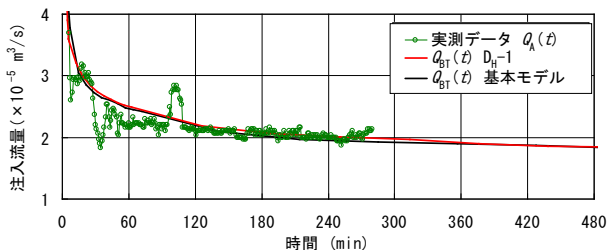
(a) 2ブロック, 1.1ステージ



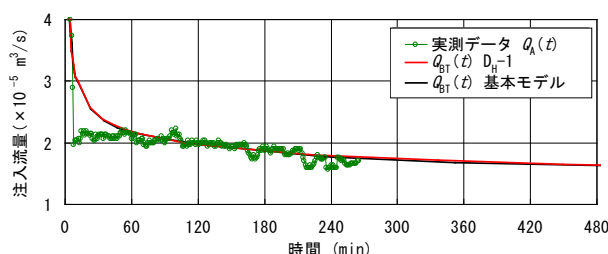
(b) 2ブロック, 1.2ステージ



(c) 2ブロック, 2.1ステージ



(d) 3ブロック, 1.1ステージ



(e) 3ブロック, 2.1ステージ

図-24 注入流量の経時変化

## (2) 予備試験による原位置試験への適用性の確認

本フィッティング手法を原位置試験へ適用するにあたり、あらかじめ対象とする地盤が、本手法が適用可能な地盤であるかを予備試験により確認しておく必要

がある。

確認方法は以下のとおりとする。

- 本試験実施前に、予備試験として、現実的な範囲で可能な限り長時間の透水試験を行う。
- 手順 a)で得られた注入流量の実測データを用いてフィッティングを行い、予備試験の最終時間の注入流量の再現性を検証する。このとき、フィッティングに使用するデータの範囲は、本試験の継続時間を想定して設定することとし、種々のデータ範囲によるフィッティング結果を比較することで、最適なデータ使用範囲を検討する。
- 手順 b)において、フィッティングにより実測データの最終時間の注入流量を精度良く再現できる場合、予備検討の最終時間までの注入流量をフィッティングにより推定可能と判断する。
- 予備試験の最終時間を $t_e$ とし、フィッティングにより得られた注入流量 $Q_{BT}(t)$ において、時間 $t_e$ における注入流量 $Q_{BT}(t_e)$ を安定流量 $Q_{BS}$ とする。
- 本試験の継続時間は、手順 b)において、フィッティングに用いる最適なデータ範囲が得られる程度とする。

## (3) 完全飽和状態における安定流量 $Q_{CS}$ の算出

本試験の試験条件（地下水位、孔径、注入圧力、深度等）を再現した解析モデルを対象に、図-7に相当する安定流量の換算係数 $\beta$ を用いて、完全飽和状態の安定流量 $Q_{CS}$ を算出する。なお、ここで用いる安定流量の比 $\beta$ は、注入流量がほぼ定常状態に達した $10^9$ 秒における注入流量の比であり、 $Q_{BS}$ を決定する際の時刻 $t_e$ とは異なるが、不飽和帯における注入流量と完全飽和状態の注入流量の比は、非定常浸透の影響により、時間の経過とともに小さくなるため、有限の時間を $t_e$ として設定すれば、ダム的基础グラウチングを考慮した場合、安全側の評価となる。

## 4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 長時間透水試験を再現した飽和 - 不飽和浸透流解析により、種々の有効注入圧力、地下水位を設定した数値解析による検討を行った。その結果、注入流量の非定常性は、注入圧力が小さいほど、地下水位が低いほど強くなることがわかった。また、地下水位が試験区間よりも下部に位置するとき、注入流量の安定流量は、地下水位が低いほど大きくなることがわかった。地下水位が安定流量におよぼす影響、

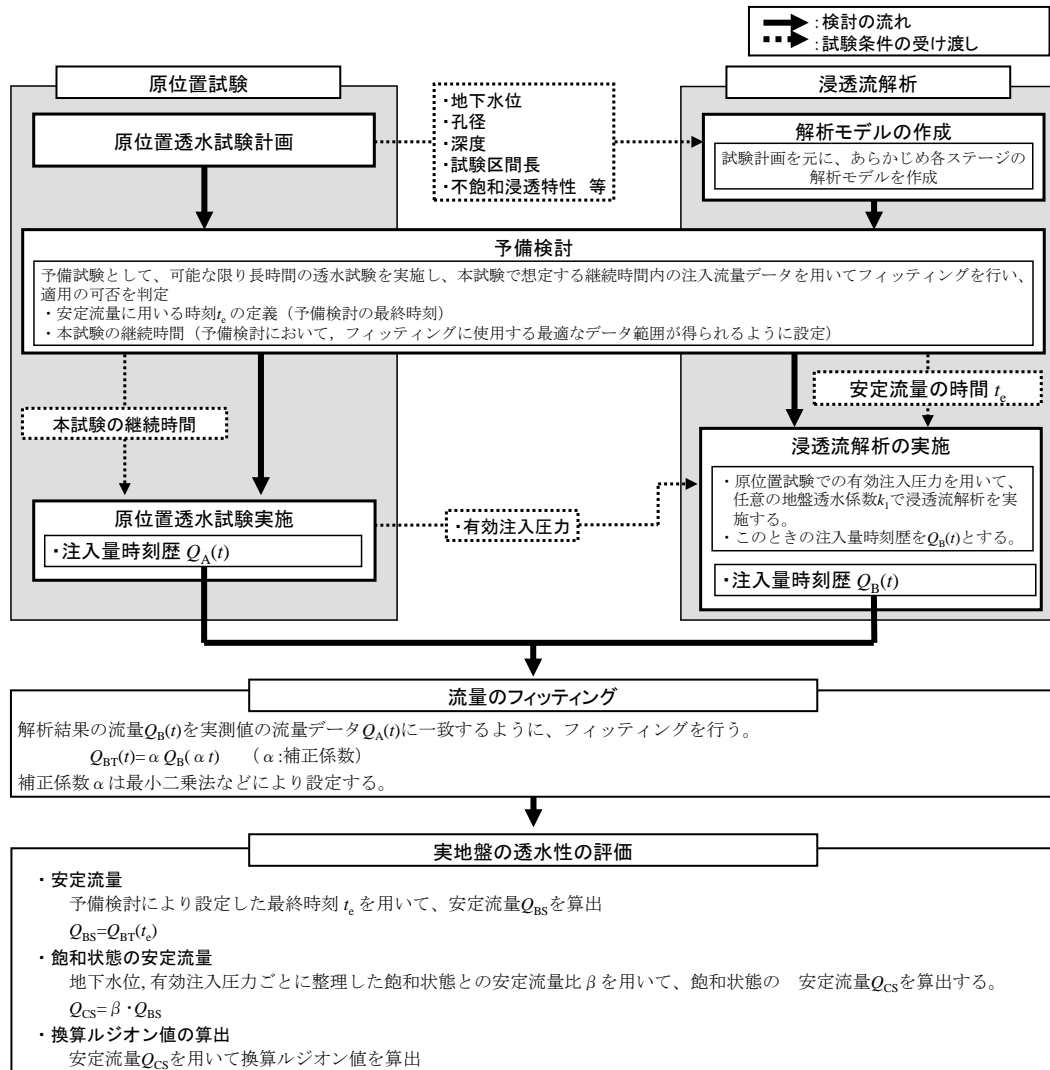


図-25 原位置透水試験への適用の流れ (案)

つまり重力流の影響は、有効注入圧力が小さいほど大きいことがわかった。

- (2) 地盤の飽和透水係数のみが異なる条件による解析結果を比較した。その結果、注入流量が十分に安定していれば、完全飽和状態 (GL.-0m) に対する各地下水位での相対的な安定流量は、飽和透水係数に関わらずほぼ一致することがわかった。このことから、地下水位、有効注入圧力が既知の地盤に対しては、飽和透水係数に関わらず得られた安定流量から換算係数  $\beta$  を用いて完全飽和状態の安定流量に換算できることを示した。
- (3) 飽和透水係数が注入流量の非定常性に与える影響を検討した。その結果、時間および注入流量を飽和透水係数を用いて無次元化すれば、飽和透水係数に関わらず注入流量はほぼ一致し、1本の曲線となることがわかった。このことを利用して、浸透流解

析を用いて実務的な注水時間の透水試験データから安定流量を推定する方法を提案した。

- (4) 大保協ダム左岸リム部で実施された長時間透水試験に対して本手法を適用した。その結果、試験最終時刻の注入流量を高い精度で再現できることがわかった。
- (5) 完全飽和状態の安定流量への換算係数  $\beta$  および実務的な注水時間の透水試験データから安定流量を推定する方法を組み合わせ、不飽和地盤における原位置透水試験に対して、浸透流解析により完全飽和状態の安定流量を推定する方法について提案した。種々の不飽和浸透特性を有するモデル地盤を想定し、安定流量の再現精度を検証した結果、飽和安定流量の再現精度は 0.88~1.27 で、原位置透水試験としては適切な精度を有していることがわかった。

## 参考文献

- 1) 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, 2008.9
- 2) 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, No.2518, 1987.11
- 3) 山口嘉一, 池澤市郎: 不飽和地盤の定常浸透状態における飽和透水性の評価, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.731-732, 2008.9
- 4) Makoto Nishigaki, Mitsuaki Haruna and Claudia Hartwig: A new method to measure the unsaturated properties of soils, XXXVIII IAH Congress, pp.2343-2345, 2010.9
- 5) 西垣 誠, 竹下祐二: 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学工学部土木工学課, 1993.5
- 6) 長谷川周一, 前田 隆: 不飽和浸透流におけるダルシーの法則の適用, 農業土木学会論文集, 第 70 号, pp.13-19, 1977.8
- 7) 西垣 誠, 森田 修, 浅野茂生, 延山政之: 不攪乱不飽和土の浸透特性の求め方, 土木学会第 43 回年次学術講演会, pp.890-891, 1988.10
- 8) 中野政詩, 雨宮 悠, 武藤 勲, 塩沢 昌, 中村忠春: 宮崎県東諸県郡塚原シラス台地の水文地質構造, 農業土木学会論文集, 第 93 号, pp.7-12, 1981.6
- 9) 西垣 誠, 鍵富 淳, 下茂道人: 瞬時水分計測法の適用限界と泥岩の保水特性について, 第 17 回土質工学研究発表会, pp.2385-2388, 1982.6
- 10) 堤 和大, 渡辺邦夫, 菅伊三男, 山脇真二: 岩石の不飽和特性の逆推定法, 応用地質, 35 巻 2 号, pp.23-30, 1994.6
- 11) 雨宮 清, 今井 久, 佐藤稔紀, 菊地 正, 榊 利博: 砂岩の不飽和浸透特性の測定 (その 1 : サクシオンに着目して), 土木学会第 53 回年次学術講演会, pp.658-659, 1998.10
- 12) 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.
- 13) S. Irmay: On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Transactions, American Geophysical Union, Vol.35, No.3, pp.463-467, 1954.6



## EVALUATION METHOD OF SATURATED PERMEABILITY OF UNSATURATED FOUNDATIONS

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Research Period** : FY2008-2010

**Research Team** : Dam and Appurtenant Structures  
Research Team, Hydraulic  
Engineering Research Group

**Author** : YAMAGUCHI Yoshikazu  
SATOHI Hiroyuki  
SAKAMOTO Hiroki

**Abstract** : The problem on seepage in an unsaturated foundation is very important in the case of surveying and designing through embankments and embankment dams, infiltration of rainfall, ground water and so on. However, the method of in-situ permeability test, that can accurately estimate the saturated permeability of unsaturated grounds, has not been established. In an unsaturated zone, the permeability might be overestimated by the unsteady seepage and the influence of the gravitational head. In this study, we conducted saturated-unsaturated seepage analysis that reproduce the in-situ permeability test conducted in soft rock foundations under various effective injection pressure, permeability and ground water level, and evaluated the effect of these conditions on the unsteady seepage tendency of the injection flow rate or steady flow rate. Based on the results of these investigations, we proposed the method of estimating the steady flow rate which is necessary to estimate the saturated permeability from the data measured in permeability test in the early period of the test. In addition, we applied this method to an actual long-term permeability test result which has been conducted on unsaturated soft rock dam foundation and confirmed that this method was able to estimate the steady flow rate from the data in the early period of the test with high accuracy.

**Key words**: unsaturated ground, permeability, saturated-unsaturated seepage analysis, unsteady seepage, dam foundation soft rock