

◆ 特集：土砂災害 ◆

# 地すべり地における現場透水試験結果の浸透流解析への適用性

檀上裕司\* 石井靖雄\*\* 藤澤和範\*\*\* 小山内信智\*\*\*\*

## 1. はじめに

地すべりの安定解析を行う際には、地下水位の的確な把握が求められる。特に、貯水池周辺の地すべりにおいては、貯水位降下時の残留間隙水圧の発生を考慮した安定解析により対策が計画される<sup>1)</sup>。残留間隙水圧の残留率は地すべり土塊の性状によって異なり、貯水位降下速度、地すべり土塊の透水係数、有効間隙率、上部斜面からの地下水の流入量等が影響を及ぼすと言われている。現在のところ、残留間隙水圧の残留率は、十分なデータが得られていない場合には、既往の経験をもとに安全側の判断として残留率を50%として設定される事例が多いが、より合理的に設定する方法としては浸透流解析の活用が有効と考えられる。浸透流解析により地すべり土塊内の地下水位を評価する場合には、飽和透水係数等の解析パラメータを適切に設定する必要があり、飽和透水係数の設定にあたっては、現場透水試験の実施が考えられる。現場透水試験は複数の試験方法が提案されている<sup>2)</sup>が、それらの試験方法の適用性については必ずしも明確にはなっていないため、本調査では原位置における各種透水試験により求められる飽和透水係数の浸透流解析への適用性を検討した。

## 2. 調査方法

### 2.1 調査概要

調査は、一つの貯水池周辺斜面において、注水法および揚水法による単孔式現場透水試験、トレーサー試験を実施し、それぞれの現場透水試験結果より飽和透水係数を算出した。一方、貯水位変動時の地下水位観測結果を用いて浸透流解析を実施し、現地の地下水位変動を再現できる飽和透水係数を逆算した。そして、図-1に示すフローに従い、現場での透水試験結果と浸透流解析による

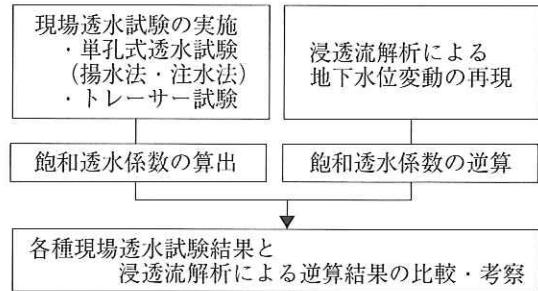


図-1 調査フロー

逆算結果を比較することにより、浸透流解析に用いるうえで最適な飽和透水係数の試験方法を評価した。

### 2.2 調査位置

調査は、すでに運用されているダム貯水池周辺の一つの地すべり地において実施した(図-2参照<sup>3)</sup>)。ダム貯水池周辺地すべり地においては、貯水位変動にともない地下水位が上昇・下降することから、自然地下水位が低い地すべり地であっても貯水位の上昇にともない地下水位が上昇する。そのため、貯水位の異なる時期に試験を行うことで、貯水位が低い状態においては注水法による単孔式透水試験が可能であり、貯水位が高い状態においては地すべり土塊中での揚水法による単孔式透水試験やトレーサー試験が可能となり、数種類の現場透水試験をほぼ同じ地点で実施することができる。また、貯水位の変動により地下水位が各地質区分中を大きく変動するため、浸透流解析により各地質区分の平均的な飽和透水係数が逆算で

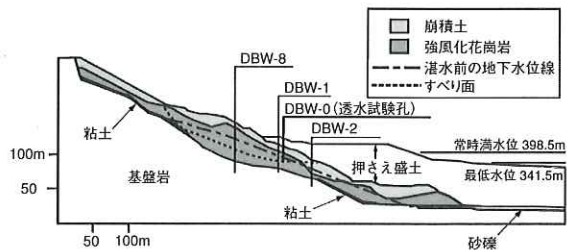


図-2 試験対象地すべり地の地質断面図

Comparison of Permeability Coefficient between Back Analysis of Finite Element Analysis Seepage and In-situ Permeability test in Landslide.

きる。

調査を実施した地すべり地の主な地質は、閃緑岩および花崗岩を基盤とし、その上位を強風化花崗岩、粘土層、崩積土が覆っている。対策工として、抑え盛土工等が施工されている。

### 2.3 調査方法

本調査で実施した現場透水試験および浸透流解析の方法は以下に示すとおりである。

#### 2.3.1 注水法による単孔式現場透水試験

注水法による単孔式現場透水試験（以下、注水試験と呼ぶ）は、図-2に示すDBW-0孔において、一つの地質区分に対して2箇所です試験予定区間を掘進する毎にピエゾメータ法を用いて実施した。注水試験の概要を図-3に示す。試験は貯水位が低い時期に非定常法により実施し、試験孔内に注水することで一時的に地表面付近まで孔内水を満たしたのち注水を中止し、その後、経時的な孔内水の低下量を測定した。

試験結果より、飽和透水係数を(1)式に示すHvorslevの算定式<sup>4)</sup>によって算出した。

$$k = \frac{0.66d^2 \log(2L/D)}{L} \times \frac{\log(s_1/s_2)}{t_1 - t_2} \quad (1)$$

ここで、 $k$ ：飽和透水係数 (cm/s)、 $d$ ：測定用パイプの内径 (cm)、 $D$ ：試験区間孔の直径 (cm)、 $L$ ：試験区間の長さ (cm)、 $t$ ：経過時間 (s) である。

上記のHvorslevの算定式の適用範囲は、試験区間が地下水面以下の飽和した地盤を対象としているが、今回の試験では不飽和領域において注水試験を実施した区間もあり、Hvorslevの算定式は適用条件に合致しない。よって、浸透流解析により不飽和領域での試験を図-4に示すようにモデル化し、試験での孔内水位低下状況を再現することにより試験区間の飽和透水係数を逆算した。モデルの地層は単層とし、飽和透水係数を半オーダー毎に変化させて水位低下曲線を最もよく再現する飽和透水係数を逆算し、Hvorslevの算定式により算出した飽和透水係数と比較した。

#### 2.3.2 揚水法による単孔式現場透水試験

揚水法による単孔式現場透水試験（以下、揚水試験と呼ぶ）は、注水試験を実施した孔と同じDBW-0孔において、掘進終了後全孔ストレーナを設置して実施した。揚水試験の概要を図-5に示す。試験は貯水位が上昇した時期に定常法により実施し、孔内水を連続的に揚水することにより

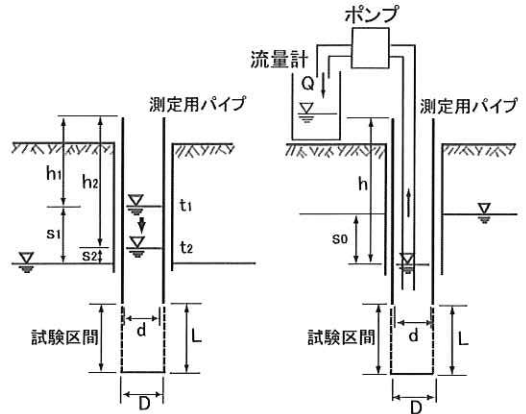


図-3 注水試験の概要

図-5 揚水試験の概要

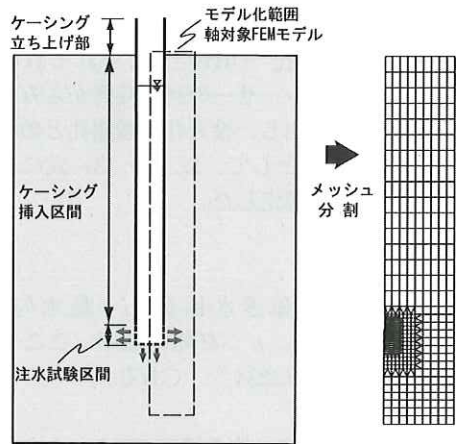


図-4 注水試験を再現する解析モデル

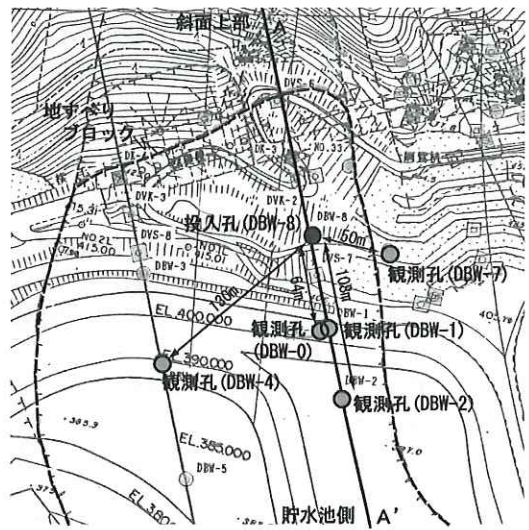


図-6 トレーサー試験の調査配置図

定常状態での孔内水位低下量と揚水量を測定した。試験結果より、飽和透水係数は以下の(2)式<sup>4)</sup>によって算定した。

$$k = \frac{1.15Q_0}{\pi s_0 L} \log(2L/D) \quad (2)$$

ここで、 $k$ :飽和透水係数 (cm/s)、 $Q_0$ :揚水量 (cm<sup>3</sup>/s)、 $s_0$ :孔内水位低下量 (cm)、 $D$ :試験孔の直径 (cm)、 $L$ :試験区間の長さ (cm)である。

### 2.3.3 トレーサー試験

図-6にトレーサー試験を実施した投入孔と観測孔の位置関係を示す。トレーサーには塩化ナトリウムを使用した。バックグラウンド観測は投入日を含めて6日間、投入後の観測は1日目2回、2~20日間は1日1回の頻度で行った。試験結果については、投入孔 (DBW-8) とそれぞれの観測孔間の距離とトレーサーの到達時間からみかけの地下水流速を算出し、投入孔と観測孔との孔内水位差を動水勾配として、以下の(3)式により地盤の透水係数を算定した。

$$k = \mu v_0 / i \quad (3)$$

ここで、 $k$ :飽和透水係数、 $i$ :動水勾配、 $v_0$ :みかけの流速、 $\mu$ :有効間隙率 (ここでは砂質土の一般値 = 0.3234<sup>5)</sup>) である。

### 2.3.4 浸透流解析

浸透流解析は、貯水位を標高 383.9m から標高 367.95m まで降下させた 37 日間における実測の地下水位観測値を用いて、図-7に示すフローにしたがって実施した。解析に用いた飽和-不飽和浸透流解析 (UNSAF<sup>6), 7)</sup> の基礎式は以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} + R$$

ここで、 $K_x(\psi)$ :水平方向の不飽和透水係数、 $K_z(\psi)$ :鉛直方向の不飽和透水係数、 $\psi$ :圧力水頭、 $\theta$ :体積含水率、 $R$ :単位長当たりの涵養量、揚水量、 $t$ :時間である。

計算に用いる初期水位条件および解析モデルの境界条件は、図-8に示すように設定した。初期条件については、計算開始時に現地観測された貯水位および地下水位を満足するようにモデルの物性値を設定したうえで定常解析を行い、得られた地下水面形を初期条件とした。境界条件について

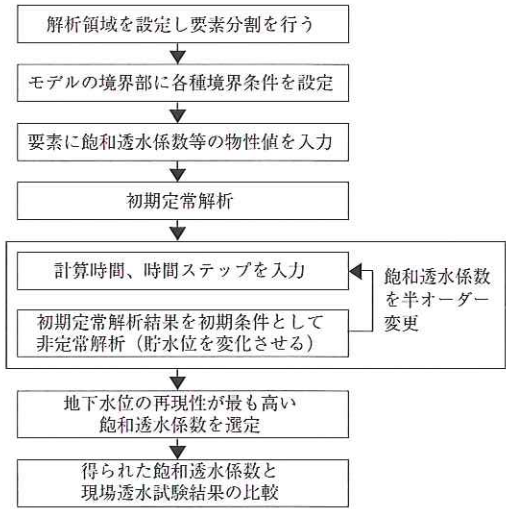


図-7 浸透流解析のフロー

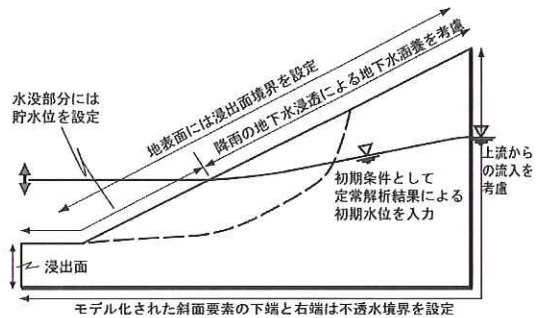


図-8 解析モデルにおける初期条件および境界条件の設定

は、斜面の水没部分は貯水位の実測データとした。地表面は降雨の地下水浸透による地下水かん養量を設定した。解析モデルの外縁部については、不透水境界とした。

次に、上記の初期定常解析結果の地下水面形を入力後、非定常解析により貯水位データを経時的に変化させ、計算によって算出される各時間の地下水面形から地下水位の変動状況を求めた。この過程を、各地質区分に入力する飽和透水係数を半オーダー毎に変更して繰り返し、実測の地下水位変動を最も再現する飽和透水係数を逆算して求めた (以下、逆算値と呼ぶ)。さらに、浸透流解析により得られた逆算値と現場透水試験により得られた飽和透水係数を比較することにより、各種現場透水試験結果の浸透流解析への適用性を検討した。

### 3. 調査結果

#### 3.1 現場透水試験

##### 3.1.1 注水試験結果

試験を行なったボーリング孔 (DBW-0) の地質は、地表部から盛土、崩積土および強風化花崗岩からなる。注水試験はこのうち、崩積土で2箇所、強風化花崗岩で2箇所の計4地点で実施した (図-9参照)。

表-1に、注水試験結果から Hvorslev の算定式により算出した飽和透水係数と、ボーリング孔のモデル (図-4参照) を作成して不飽和浸透流解析を用いた逆解析により求められた飽和透水係数 (以下、試験逆解析値と呼ぶ) を示す。Hvorslev の算定式による値と試験逆解析値を比較すると、試験逆解析値がやや小さい値を示すものの、オーダーで見ると差は小さく近い値となっている。ただし、値は大きく異なるものの、試験の物理的な意味を考慮すると、不飽和領域での試験結果は Hvorslev の式よりも不飽和浸透流解析を用いて飽和透水係数を逆算することが望ましいと考えられる。

##### 3.1.2 揚水試験およびトレーサー試験結果

揚水試験実施時の試験孔 (DBW-0) は全孔ストレーナ加工されており、試験開始前に孔内水位が崩積土中に認められたため、揚水試験の対象区間は崩積土および強風化花崗岩の二つの層からなる (図-9参照)。トレーサー試験については、観測孔の一部で孔内水位が盛土部に存在していたため、盛土、崩積土および強風化花崗岩の3つの層が試験対象区間となる。したがって、揚水試験およびトレーサー試験結果より得られる飽和透水係数は、試験対象区間に分布する複数の層の平均的な値、もしくはそれらの最大の値を求めることとなる。

表-2に注水試験、揚水試験およびトレーサー試験の結果を示す。揚水試験結果により得られた飽和透水係数は  $6.3 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、トレーサー試験結果により得られた飽和透水係数は  $4.1 \times 10^{-2} \sim 1.8 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$  であった。

##### 3.1.3 現場透水試験結果の比較

表-2に示した各現場透水試験結果を比較すると、揚水試験およびトレーサー試験の結果は注水試験の結果に比較して2~4オーダー程度大きな値となった。注水試験では、50cm程度の局所的な部分を試験対象としているのに対して、揚水試

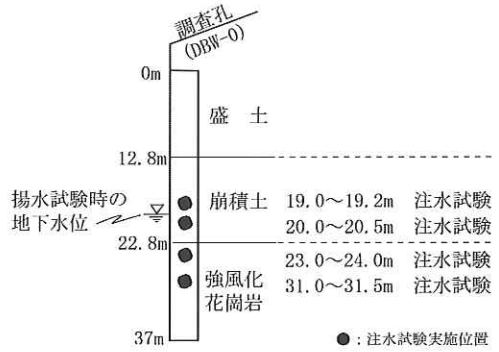


図-9 現場透水試験の実施箇所

表-1 解析方法による透水係数の違い

地質区分	試験区間	透水係数 (cm/sec)	
		Hvorslev の式	試験逆解析値
崩積土	19.0 ~ 19.2m	$1.29 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$
	20.0 ~ 20.5m	$1.03 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-5}$
強風化花崗岩	23.0 ~ 24.0m	$1.41 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-6}$
	31.0 ~ 31.5m	$8.16 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-4}$

表-2 現場透水試験結果一覧

地質・土質区分	透水係数 (cm/sec)		
	単孔式透水試験		トレーサー試験
	注水法 (試験逆解析値)	揚水法	
盛土	-	-	$4.1 \times 10^{-2}$ ~ $1.8 \times 10^{-1}$
崩積土	$1.5 \times 10^{-3}$ $8.0 \times 10^{-5}$	$6.3 \times 10^{-2}$	
強風化花崗岩 (設計水位線より上位層)	$8.0 \times 10^{-6}$		
強風化花崗岩 (設計水位線より下位層)	$5.5 \times 10^{-4}$		

験およびトレーサー試験の試験区間 (地下水位面からボーリング孔底までの区間) は約 13 ~ 23m となっている。揚水試験およびトレーサー試験では、注水試験と比較して、長い試験区間のうち透水性の大きい部分を流れる地下水の挙動が反映されて、大きな値となったと考えられる。また、注水試験は、ボーリング孔壁の目詰まりの影響により他の透水試験に比較して過小な透水係数となったことも考えられる<sup>4)</sup>。

#### 3.2 現場透水試験結果と浸透流解析結果との比較

図-10に浸透流解析による地下水位変動の再現実況を示し、表-3に浸透流解析による飽和透水係数の逆算値を示す。盛土および崩積土の逆算値は、強風化花崗岩 (設計水位線より上位層) の逆算値よりも1オーダー大きい値となっている。

図-11に、現場透水試験により得られた飽和透水係数と、浸透流解析による飽和透水係数の逆

算値を比較して示す。図-11では、注水試験結果と逆算値の関係を地質区分毎に示した。揚水試験については試験区間が崩積土と強風化花崗岩に、トレーサー試験においては試験区間が盛土、崩積土および強風化花崗岩にまたがっているため、図-11の左側に別に示している。

各地質区分毎にみると、注水試験結果は逆算値と比較して半オーダー～3オーダー程度の差が認められる。これは、前項でも述べたとおり、50cm程度の局所的な部分を試験対象としているため、各試験対象層の代表的な透水性を反映できていないこと、また、注水試験は目詰まりの影響により過小な透水係数を得る傾向があることが原因と考えられる。

揚水試験およびトレーサー試験の試験対象区間は複数の層にまたがっているが、試験結果は試験対象区間のうち透水性の大きい部分の地下水の挙動を反映していると考えられる。一方、逆算値についてみると、盛土および崩積土の逆算値が強風化花崗岩の逆算値に比べて大きく、また、揚水試験およびトレーサー試験結果に近い値となっている。よって、揚水試験およびトレーサー試験結果は、盛土および崩積土の透水性を強く反映していると考えられる。

したがって、逆算値と注水試験、揚水試験およびトレーサー試験結果の比較から、本調査を実施した地すべりでは、盛土、崩積土についてみると、揚水試験およびトレーサー試験結果が浸透流解析への適用性が高かったといえる。

### 3.3 現場透水試験に関する考察

前項で述べたとおり、本調査で得られた注水試験結果は、逆算値と比較すると半～3オーダー程度の差が認められた。この原因としては、次に述べるとおり、試験区間が短かったことと、注水試験の特性および試験数が少なかったことが考えられる。

試験区間は、50cm ないしは 1m 区間をとってあるが、崩積土中の深度 19.0～19.2m 区間では孔壁の自立が困難であったため、対策として試験区間を 20cm と短くとした。これらは各地質の層厚に比べるといずれも小さく、局所的な透水性を評価している可能性があり、各地質を代表する透水係数を得られていないと考えられる。

本調査で実施した非定常法による注水試験の特性として、試験孔に注水しても孔内水の上昇が認められない、もしくは上昇が認められても瞬時に

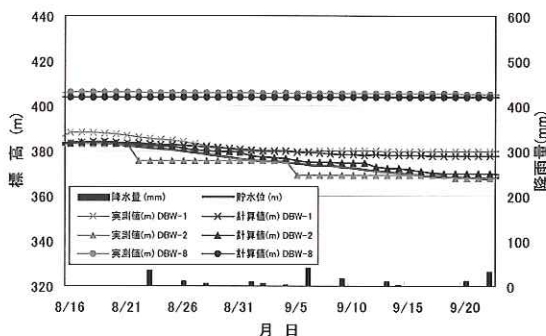


図-10 浸透流解析による地下水変動の再現状況

表-3 浸透流解析による逆結果

地質・土質区分	逆解析結果 (cm/sec)
盛土	$5 \times 10^{-2}$
崩積土	$5 \times 10^{-2}$
強風化花崗岩 (設計水位線より上位層)	$5 \times 10^{-3}$
強風化花崗岩 (設計水位線より下位層)	$1 \times 10^{-4}$

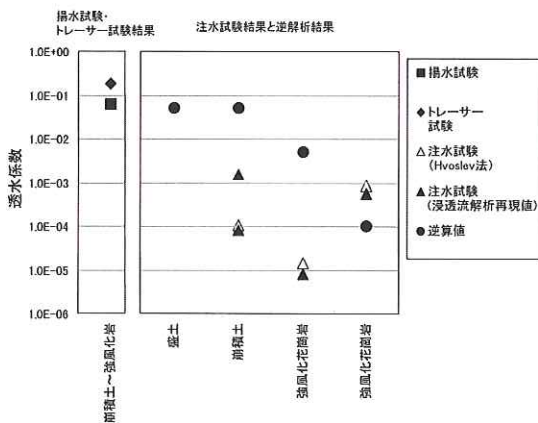


図-11 試験値と逆算値の比較

試験前の孔内水位に戻ってしまうような場合には試験ができなかった。このため、透水性が大きな部分の飽和透水係数は評価できず、試験が成立する条件下で得られた飽和透水係数は小さめの値となったと考えられる。よって、本調査地の盛土や崩積土のように透水性の大きな地質の評価には適さないと考えられる。

試験数量については、透水係数の比較的小さい強風化花崗岩中では、解析モデルの地質区分に対して各1回づつの試験となっている。透水性の小さな層の評価については、上述のように試験区間

が各地質の層厚に比較して短いため、代表性を評価するために多くの位置で試験を実施して試験結果のばらつきを評価する必要があると考えられる。

揚水試験については、全孔ストレーナを設置して崩積土から強風化花崗岩の10m区間を対象として試験を行なっている。この試験方法では、試験対象層の平均的な透水係数、もしくは透水性の大きい部分の透水係数が得られるものと考えられる。揚水試験結果は、浸透流解析結果のうち崩積土の逆算値とほぼ同じ値となっており、透水性の大きい崩積土の影響を強く受けたと考えられる。ただし、この方法では試験区間のうち透水性の小さい部分の透水性（本調査では強風化花崗岩）を把握できなかった。これについては、今後、試験区間を区切った場合の揚水試験（例えば削孔途中段階でのピエゾメータ法や、パッカー法による試験）を実施することにより改善できる可能性がある。

#### 4. まとめ

現場での各種透水試験により求めた飽和透水係数と、実際の地下水位観測値を用いた浸透流解析により逆算した飽和透水係数を比較することにより、地すべり地における浸透流解析への現場透水試験結果の適用性を検討した。その結果、以下の結果を得た。

- (1) 浸透流解析による飽和透水係数の逆算値と、各種原位置試験結果による飽和透水係数を比較したところ、調査を実施した地すべりの盛土と崩積土においては、注水法による単孔式試験結果よりも揚水法による単孔式透水試験およびトレーサー試験結果が浸透流解析への適用性が高い結果を得た。

- (2) 注水法を用いた単孔式透水試験結果は、揚水法を用いた単孔式透水試験およびトレーサー試験結果よりも、2～4オーダー程度小さな値となった。

本調査は一事例での調査解析結果について述べた。今後、同様な調査検討を行い、浸透流解析における飽和透水係数の設定手法についてさらに検討していく必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター：「貯水池周辺の地すべり調査と対策」, 山海堂, pp129-142, 1995.
- 2) (財) 国土開発技術研究センター：「地下水調査および観測指針（案）」, 山海堂, pp183, 1993.
- 3) 石井靖雄, 綱木亮介, 小山内信智：透水係数が浸透流解析による残留間隙水圧推定に及ぼす影響, 土木技術資料, Vol.44, No.6, pp30-35, 2002.
- 4) (社) 地盤工学会：「地盤調査法」, p.289, 1995.
- 5) S.Herath：「Unsaturated Zone Hydraulic Property Estimation and Application to Infiltration Facility Analysis」, 1987.
- 6) 西垣 誠：地下水数値計算法 (3) 1-2. 有限要素法による不飽和浸透流の解析, 地下水学会誌, Vol.32, No.3, pp.163-171, 1990.
- 7) 西垣 誠：地下水数値計算法 (4) 1-3. 有限要素法の局所的な地下水流動解析への応用, 地下水学会誌, Vol.32, No.3, pp.173-182, 1990.

檀上裕司\*



独立行政法人土木研究所  
土砂管理研究グループ地  
すべりチーム交流研究員  
Yuji DANJO

石井靖雄\*\*



独立行政法人土木研究所  
土砂管理研究グループ地  
すべりチーム主任研究員  
Yasuo ISHII

藤澤和範\*\*



独立行政法人土木研究所  
土砂管理研究グループ地  
すべりチーム上席研究員  
Kazunori FUJISAWA

小山内信智\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
土砂管理研究グループ火  
山・土石流チーム上席研  
究員（前土砂管理研究  
グループ地すべりチーム  
上席研究員）、農博  
Dr. Nobutomo OSANAI