

◆ 土砂災害特集 ◆

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

石井靖雄* 綱木亮介** 小山内信智***

1. はじめに

貯水池周辺斜面においては、貯水位の上昇及び下降に伴い地すべりが発生する事例がある。その発生原因としては、貯水位の上昇に伴い斜面が水没し浮力が発生すること、貯水位の急激な下降により地すべり斜面内に残留間隙水圧が発生すること等が挙げられている¹⁾。貯水位下降時には、斜面内の地下水位が貯水位の下降に完全には追従せず、地下水位の低下に遅れが生じ残留間隙水圧が発生する場合があります。残留間隙水圧の発生が貯水位下降時の地すべりの発生原因となると考えられている。そのため、貯水池周辺斜面の地すべりに対しては、一般の地すべりとは異なり、貯水位下降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²⁾。

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、貯水位下降速度、地すべり土塊の透水係数、有効間隙率等が影響を及ぼすと言われている¹⁾。一般に、残留間隙水圧の算定は、十分なデータが得られていない場合には、既往の事例をもとに、安全側の判断として、残留率を50%として設計されることが多い。しかしながら、貯水位下降時の残留率は、50%以下となっている実測例が多いことも指摘されている^{3),4)}。残留間隙水圧の設定は、地すべり対策工の工事量に関わることであり、設定手法の一層の合理化が望まれている。

地すべり土塊の透水係数を的確に把握できる場合には、貯水位下降後の地下水位を、浸透流解析により予測することも可能である²⁾。しかしながら、浸透流解析に及ぼす透水係数の影響は大きいとの指摘もあり^{3),4)}、残留間隙水圧の推定に浸透流解析を用いるためには、地すべり土塊の透水係数を的確に把握しておく必要がある。

筆者らは、残留率に大きな影響を与えたと考え

られる透水係数の設定手法を検討するため、2つの貯水池周辺の地すべり地において現場透水試験を実施した。そして、貯水位下降時の観測地下水位から浸透流解析を用いた逆解析により得られた透水係数と現場透水試験結果を比較し、現場透水試験結果の浸透流解析への適用性について検討を行った。

2. 調査対象地すべりの概要

調査は、既に運用がなされているダム貯水池に隣接する地すべり地のうち、地下水位が継続して観測されており、既往の調査により地質構造が明らかとなっているA地すべり及びB地すべりで実施した。

A地すべりは、ダムサイトに隣接する斜面で、湛水に伴い斜面の不安定化が懸念された地区であった。ダム提体掘削の影響を受けて斜面の一部に変状が発生し、押え盛土工、集水井工等の対策が実施された地すべりである。なお、当地すべりでは貯水位の上昇、下降に伴う顕著な移動は認められていない。対象地の地質は、閃緑岩及び花崗岩を基盤とし、その上を粘土層やマサ化した風化岩、崩積土が覆っている。図-1に既往の調査によりとりまとめられた地質断面図を示す。地下水観測孔での観測結果では、DBW-1, 2は貯水位の変動に追従して地下水位が変化する傾向が認められたが、DBW-3には貯水位との相関性は認められなかった。

B地すべりは、貯水位を急速に下降させたところ幅約300m、長さ約180mの規模で地すべりが発生したため、対策として鋼管杭工が実施された箇所である。対象地の地質は、粘板岩、黄緑凝灰岩、砂岩、チャート及びそれらの互層からなる。図-2に既往の調査によりとりまとめられた地質断面図を示す。図-2より、移動土塊は破碎されている部分が多いことがわかる。すべり面付近には粘土層が分布しその下位は基盤岩となっているが、緩んだ領域がすべり面に沿って分布している。

Influence of Permeable Coefficient on the Seepage Flow Analysis to Estimate Residual Pore Water Pressure in Landslides around Reservoir

地下水観測孔での観測結果では、4BV-11 は貯水位の変動に追従して地下水位が変化する傾向が認められた。一方、6BV-12 は、貯水位が EL=530m 以上で、貯水位の変動に追従して地下水位が変化する傾向が認められた。

3. 調査解析方法

3.1 現場透水試験

現場透水試験は、掘削したボーリング孔を用いて行う単孔式の透水試験で、ピエゾメータ法⁵⁾を用いて、貯水位が低い時期に注水法を用いて実施した。

A 地すべりは、貯水位の影響を受ける DBW-1 近傍でボーリングを行い、崩積土(深度 19.0-19.2m、20.0-20.5m)、強風化岩(23.0-24.0m、31.0-31.5m)の4区間で透水試験を実施した。

一方、B 地すべりについては、6BV-12、B12BV-1、B12BV-2 及び解析を行った地すべりに隣接するブロックで実施された現場透水試験結果を用いて、解析に用いる透水係数を算定した。

3.2 浸透流解析

3.2.1 基礎式

解析は、調査対象地すべりの主測線の断面を用いた飽和・不飽和浸透流解析により実施した。解析プログラムには、UNSAF^{6),7)}を使用した。UNSAF は、飽和・不飽和領域の非定常断面2次元浸透流解析を行う解析プログラムで、基礎方程式は式(1)により示される。

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

x : 水平方向の座標

z : 鉛直方向の座標

$K_x(\Psi)$: 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

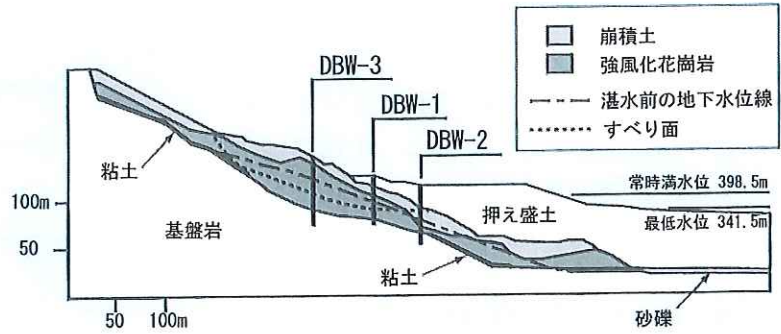


図-1 A 地すべりの断面図

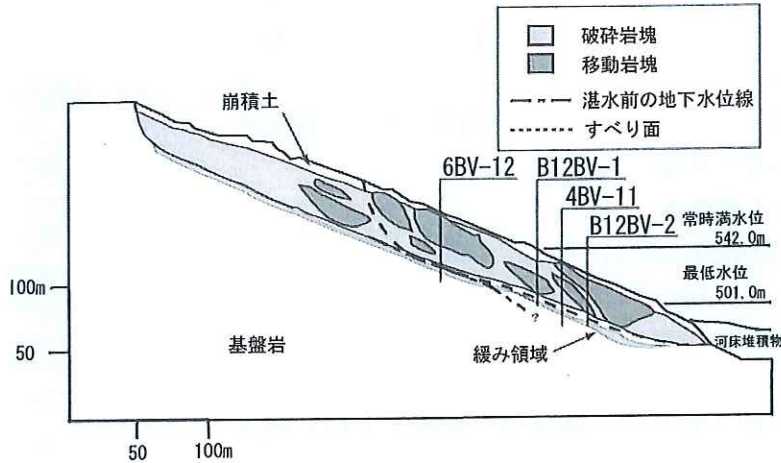


図-2 B 地すべりの断面図

Ψ : 圧力水頭

θ : 体積含水率

R : 単位長当たりの涵養量、揚水量

t : 時間

3.2.2 初期条件、境界条件、不飽和特性

式(1)を解くためには、初期条件および境界条件を設定する必要があるが、計算開始時の貯水位を与えた初期定常解析により得られた地下水面形を初期水位として解析モデルに入力した。水頭既知境界は、斜面の水没部分を対象に設定し、該当する節点には貯水位データより算定した水頭値を与えている。また、計算が長期間に及ぶ場合に、基盤中の地下水位が低下するのを防ぐため、基盤岩の上端部に定水頭条件を設定している。浸出面境界は地表面とし、地下水位が地表面まで達した時に、水頭値に応じた浸出量とした。貯水池水没部分を除く地表面は、流量既知境界とし、単位長当たりの降雨量を与えている。また、解析モデルの外縁部は不透水境界とし、流量を0と設定した。

不飽和特性は、Harvercamp式、Kozeny-Irmay式を用いて求めた粘性土、砂質土の水理特性値⁸⁾および両者の中間的な性質を持つものとして、地

質状況に応じて設定した。

3.2.3 地質区分

解析に用いた地質区分は、図-1 及び 2 に示した既往の地質調査結果によった。A 地すべりについては、移動土塊を崩積土、強風化花崗岩(湛水前の地下水位線より上位、下位に区分した)、粘土に区分している。移動土塊以外は、基盤岩、押え盛土からなる区分とした。

一方、B 地すべりについては、移動土塊を移動岩塊、破碎岩塊、粘土に区分し、移動土塊以外には、河床堆積物、基盤岩に区分し、基盤岩は緩み領域と非緩み領域に区分した。メッシュ分割は、これらの地質区分境界、地下水観測孔の位置を考慮して行った。

3.2.4 残留率

残留間隙水圧は、一般に残留率を用いて算定される。残留率は貯水位下降後の残留地下水位と貯水位下降後の定常地下水位に囲まれた地すべり土塊の領域の面積と、貯水位下降前の地下水位と貯水位下降後の定常地下水位に囲まれた地すべり土塊の領域の面積の比で表される(図-3)。本報では、現場透水試験結果と貯水位下降時の観測地下水位をもとにした逆解析結果の整合性について、残留率を用いて評価を行った。

3.2.5 解析対象期間

A 地すべりは、常時満水位 398.5m、最低水位 341.5m に設定されている湛水池に隣接する地すべりにおいて、貯水位を標高 383.90m から 367.95m まで低下させた 37 日間について解析を行った。この間の貯水位下降速度は 0.43m/日であった。またこの時、観測地下水位から求めた残留率は 22%であった。

一方、B 地すべりについては、常時満水位 542.0m、低水位 501.0m に設定されている湛水池に隣接する地すべりにおいて、貯水位を標高 538.50m から 524.00m まで低下させた 36 日間について解析を行った。この間の貯水位下降速度は 0.40m/日であった。またこの時、観測地下水位から求めた残留率は 0%であった。

4. 調査結果

4.1 現場透水試験結果

A 地すべりの DBW-1 近傍で実施した現場透水

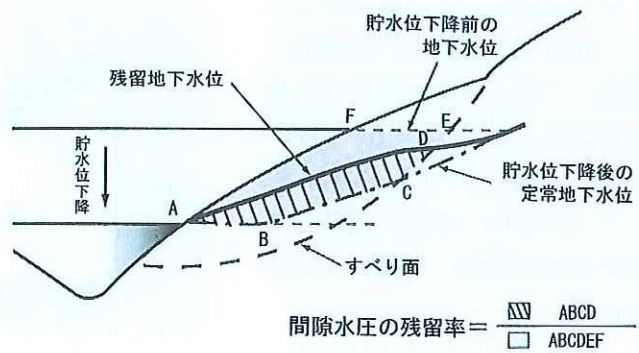


図-3 残留率の計算法保

表-1 現場透水試験結果 (A 地すべり)

位置	試験深度 (m)	地質区分	コア状況	浸透係数 (cm/sec)
DBW-1 近傍	19.00 ~ 19.20	崩積土	径 1cm 以下の角礫混じり砂状	1.01×10^{-3}
	20.00 ~ 20.50	崩積土	最大径数 mm ~ 3cm の角礫混じりシルト	1.33×10^{-4}
	23.00 ~ 24.00	強風化花崗岩	径 1 ~ 3cm の角礫混じり粗粒砂状	1.23×10^{-5}
	31.00 ~ 31.50	強風化花崗岩	31.00 ~ 31.40 : 径数 mm の礫混じり砂状 31.40 ~ 31.50 : 粘土混じりシルト	8.04×10^{-4}

表-2 現場透水試験結果 (B 地すべり)

位置	試験深度 (m)	地質区分	コア状況	浸透係数 (cm/sec)
B12BV-2	11.50 ~ 12.00	移動岩塊	珪化著しい輝緑凝灰岩で径 3 ~ 10cm の岩塊状	1.21×10^{-2}
	14.80 ~ 15.30	破碎岩塊	深度 14.80 ~ 15.05m : 粘板岩の短柱状コア 深度 15.5 ~ 15.3m : 径 5 ~ 30mm の粘板岩の細礫状	3.08×10^{-3}
B12BV-1	15.00 ~ 15.30	破碎岩塊	径 1 ~ 5cm の粘板岩の礫 ~ 細礫状	7.84×10^{-3}
	22.00 ~ 22.30	移動岩塊	原岩色の粘板岩の棒状	2.96×10^{-4}
	36.00 ~ 36.30	粘土	径 5 ~ 40mm の粘板岩の礫状 深度 36.25 ~ 36.30m 間は粘土	1.02×10^{-3}

試験結果は表-1 に示すとおりであった。

一方、B 地すべりの B12BV-1、B12BV-2 で実施した現場透水試験結果は表-2 に示すとおりであった。図-4 は、表-2 に示した値に 6B-V-12 および隣接するブロックでの試験結果を加え、崩積土、強風化岩、風化破碎岩、弱風化岩、基盤岩からなる風化区分⁹⁾により試験結果を整理したものである。透水係数値は、バラつきはあるものの平均値(透水係数を対数に変

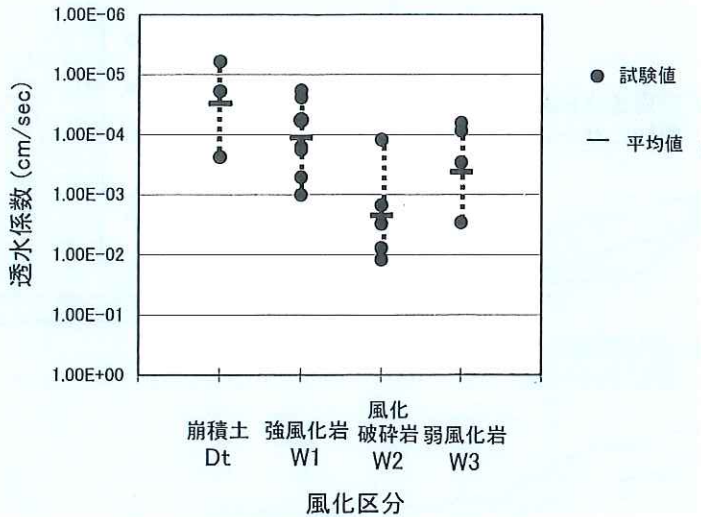


図-4 風化区分と透水係数 (B地すべり)

換し、算術平均をした後、真数に変換したもの)でみると崩積土、強風化岩、風化破碎岩の順に値が高くなっている。B地すべりの弱風化岩以外の風化区分では、風化が著しくなるにつれて透水係数が低くなった。しかしながら、図-4において、透水係数値はいずれの風化区分においても、2オーダー程度の範囲に分布しており、明瞭に分離できるわけではない。透水係数の分布範囲は地すべり土塊の風化、破碎状況により地すべり毎に異なると考えられる。少ないデータからのみの透水係数の決定は困難と考えられる。

4.2 観測水位による逆解析結果

4.2.1 透水係数

A地すべりについては、現場透水試験結果を初期値とし、また、B地すべりについては、図-4に示した風化区分毎の平均値を初期値とし、浸透流解析において観測地下水位と適合するような透水係数を探索した結果を表-3及び4に示す。B地すべりについては、移動岩塊はW2、破碎岩塊はW1、基盤の緩み領域はW3の値を初期値とした。現場透水試験を実施していない地質区分の透水係数値については、既往文献¹⁰⁾を参考に設定した。

逆解析では、 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ cm/secの範囲で透水係数を半オーダーピッチで変化させて解析結果と観測地下水位との適合性が良いケースを探索した。

A地すべりの逆解析の結果、盛土については、DBW-1において降雨、融雪への地下水位の反応を再現する必要があり、貯水位に対する地下水位の相関性を低下させるため、透水係数は初期値よりも低い値となった。崩積土については、貯水位

の下降に伴う地下水位低下の追従性を良くするため、透水係数は高くなった。強風化花崗岩については、湛水前の地下水位線より上位層では、崩積土と同様の理由により透水係数は高くなった。一方、湛水前の地下水位線より下位層では、地下水位が観測値よりも低下してしまうことから、透水係数を低くする必要があった。粘土、砂礫、基盤岩については、初期設定値を用いることで、観測地下水位の再現が可能であった。

一方、B地すべりの逆解析の結果、崩積土については、貯水位に対する地下水位の追従性を良くするため、透水係数は初期値よりも高くなった。移動岩塊、破碎岩塊については、崩積土と同様に、貯水位に対する地下水位の追従性を良くするため、透水係数は初期値よりも高くなった。粘土については、地下水位が低下してしまうため、初期値より低い値となった。一方、基盤岩については、斜面上方からの地下水の流入量が過大に評価され、地下水位が高くなるため、初期値より低い値となった。

表-3 逆解析結果 (A地すべり)

地質・土質区分		透水係数 (cm/sec)	
		初期値 (試験値)	逆解析結果
盛土		1×10^{-1}	5×10^{-2}
移動土塊	崩積土	5×10^{-4}	5×10^{-2}
	強風化花崗岩 (地下水位線より上位層)	1×10^{-5}	5×10^{-3}
	強風化花崗岩 (地下水位線より下位層)	1×10^{-3}	5×10^{-4}
粘土		1×10^{-6}	1×10^{-6}
砂礫		1×10^{-2}	1×10^{-2}
基盤岩		1×10^{-5}	1×10^{-5}

注) 下線は、既往文献を参考に設定

表-4 逆解析結果 (B地すべり)

地質・土質区分		透水係数 (cm/sec)	
		初期値 (試験値)	逆解析結果
現河床堆積物		5×10^{-2}	5×10^{-2}
移動土塊	崩積土	5×10^{-5}	1×10^{-3}
	移動岩塊	1×10^{-3}	5×10^{-2}
	破碎岩塊	1×10^{-4}	5×10^{-2}
粘土		1×10^{-3}	5×10^{-6}
基盤岩	緩み領域	5×10^{-4}	1×10^{-6}
	非緩み領域	1×10^{-5}	1×10^{-6}

注) 下線は、既往文献を参考に設定

表-3 及び 4 より、現場透水試験結果と観測水位による透水係数の逆解析結果(以下、逆算値という)を比較すると、移動土塊で1~2オーダー程度透水係数が異なる値となった。地すべりの移動土塊は、逆算値が試験値より高くなる傾向にある一方で、A地すべりの湛水前の地下水位線よりも下位の強風化花崗岩、B地すべりの粘土、基盤岩は、逆算値が試験値より低めの値となっている。

既往の報告によると、単孔式透水試験結果と比較すると多孔式透水試験では1オーダー程度高い透水係数値をとる場合が多いことが指摘されている¹¹⁾。また、貯水池周辺の地すべりではないが、既往の地すべり地での計測事例によれば、単孔式透水試験結果とトレーサー試験結果では、2オーダー程度の差があったとの報告がある¹²⁾。いずれの報告も、単孔式透水試験が、亀裂部を流れる地下水を評価できていない(つまり、低い透水係数の値を得る)ことを指摘するものである。逆算値が試験値より高くなったことに関しては、亀裂部を流れる地下水を考慮できなかったためと考えられ、多孔式透水試験、地下水追跡試験の適用性を検討する必要がある。

試験値が逆算値より低くなったことに関しては、ボーリングによる地盤の攪乱の影響も考えられるが、今後さらに検討していく必要がある。

A地すべりにおいて、風化花崗岩では、湛水前の地下水位線の上位と下位で透水係数を変えた方が、適合性が良かった。透水係数は、湛水前の地下水位の分布状況を考慮して領域を区分し設定する必要があると言える。

4.2.2 残留地下水位

現場透水試験値、逆算値を用いて浸透流解析を行った結果を図-5及び6に示す。現場透水試験値を用いたケースは、貯水位下降後の残留地下水位と定常地下水位の差(地下水が残留している領域)が逆算値を用いたケースと大きく異なる結果となっている。逆算値を用いたケースでは、地下水の残留状況を、概観的にほぼ再現することができた。しかしながら、局所的に、B地すべりで図-2に示した貯水位付近の地下水位線を再現すること

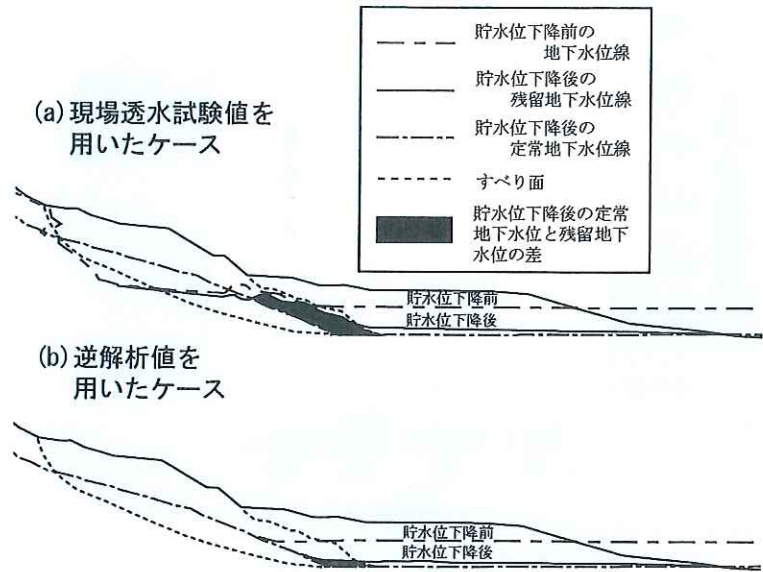


図-5 A地すべりの浸透流解析結果

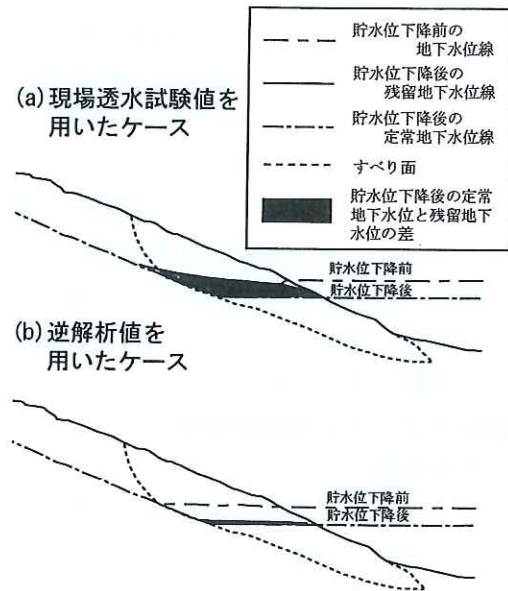


図-6 B地すべりの浸透流解析結果

はできていない。A地すべりで行ったように、地下水位の分布状況に応じて、一般的な地すべり調査で行っている地質区分よりも細かく区分した方が、再現性が良いものと考えられる。

図-1及び5より、A地すべりにおいては、地すべり前面の押え盛土の影響で貯水位下降後の地下水位線が若干上昇していることがわかる。押え盛土工は、湛水地周辺の地すべり対策工として多用される工法の一つではあるが、残留率を高めることもあることに留意する必要があると言える。

5. まとめ

本報では、浸透流解析による残留間隙水圧の算

定を目的として、貯水池周辺地すべりの透水係数の実態について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 今回解析を行った2つの地すべりでは、地すべり調査で一般になされている地質区分程度で観測地下水位をもとに逆解析を行い透水係数を設定した結果、ほぼ実際の観測地下水位を再現できた。
- (2) 単孔式現場透水試験結果と観測地下水位をもとにした逆解析結果では、地すべり土塊の透水係数が、移動土塊で概ね1~2オーダー程度高くなった。単孔式透水試験では、亀裂部を流れる地下水を評価できていないことが原因と考えられる。
- (3) A地すべりにおいては、湛水前の地下水位の上位と下位に区分して解析を行ったところ観測地下水位との適合性が良かった。浸透流解析を行う場合には、湛水前の地下水位の分布状況を考慮して透水係数を設定する必要がある。
- (4) 今回解析を行った地すべりの1つでは、地すべり末端部での押え盛土によって残留率が高くなった。押え盛土の施工による残留間隙水圧の上昇に留意する必要がある。

浸透流解析による残留率の算定は、解析結果の信頼性の向上、コストの縮減の観点から有効と考えられる。しかしながら、解析に用いる透水係数によっては結果が大きく異なることから、湛水前に地すべり土塊の平均的な透水性を的確に評価する必要がある。

今回は、少ない単孔式現場透水試験結果をもとにした解析結果の報告にとどまっているが、多孔式透

水試験や湛水前の地下水位の変化から透水係数を推定する手法などにより地すべり土塊の平均的な透水係数の推定手法を検討していく必要がある。今後、これらについて検討を行い、浸透流解析による残留間隙水圧の算定手法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 中村浩之：ダム貯水位変動に伴う地すべり斜面の安定度, ダム技術, Vol.6, No.1, pp.53-62, 1988.
- 2) (財) 国土開発技術センター：貯水池周辺の地すべり調査と対策, 山海堂, pp.129-142, 1995.
- 3) 綱木亮介：貯水池周辺の地すべり地における残留間隙水圧の実態と解析事例, ダム技術, Vol.10, No.1, pp.32-41, 2000.
- 4) 貞弘丈佳、青木美樹：ダム貯水池周辺地すべりの地下水調査と貯水位下降時の残留間隙水圧の検討, 地すべり, Vol.36, No.4, pp.61-69, 2000.
- 5) (社) 地盤工学会：地盤調査法, pp.288-295, 1999.
- 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 (3) 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.
- 8) S. Herath : Unsaturated Zone Hydraulic Property Estimation and Application to Infiltration Facility Analysis, pp.303, 1987.
- 9) 藤原明敏：地すべりの解析と防止対策, 理工図書, pp.32, 1979.
- 10) 例えば、山本莊毅、榎根勇 監修：最新地下水学 - 調査と実務のガイドライン -, 山海堂, pp.12, 1977.
- 11) 西垣誠：単孔式原位置透水試験法の整理 (その1), 地下水と井戸とポンプ, Vol.28, No.2, pp.11-23, 1986.
- 12) 高木万隆、中村忠春：破碎帯地すべり地における透水性の実態, 農業土木学会四国支部講演会講演要旨, Vol.42, pp.91-93, 1987.

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

綱木亮介**



ネパール王国水資源省治水砂防局 (前 土砂管理研究グループ地すべりチーム上席研究員), 学術博
Dr.Ryosuke TSUNAKI

小山内信智***



同 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