

## II-12 貯水位降下時における地すべり斜面の安定度評価に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 12～平 14

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：小山内信智、石井靖雄

### 【要旨】

貯水位降下時における地すべり斜面の安定には、斜面内に発生する残留間隙水圧が大きな影響を及ぼしている。そのため、残留間隙水圧をより合理的に設定し、地すべり斜面の安定性を的確に評価できる手法が求められている。本調査では、残留間隙水圧の設定手法として、統計モデル、水循環モデル、浸透流解析を用いた手法の適用性を検討するとともに、浸透流解析を実施する上で重要と考えられる飽和透水係数の設定手法について検討を行った。その結果、揚水試験により飽和透水係数を求め、浸透流解析を実施して残留間隙水圧を算定する手法が最も精度が高く適用性が高いことがわかった。

キーワード：地すべり、残留間隙水圧、浸透流解析、現場透水試験、飽和透水係数

### 1. はじめに

貯水地周辺斜面においては、貯水位の上昇及び降下に伴い地すべりが発生する事例がある。貯水位降下時に発生する地すべりの原因は、斜面内の地下水位が貯水位の降下に完全には追従せず、地下水位の低下に遅れが生じる残留間隙水圧が発生するためと考えられている。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、貯水位降下時の残留間隙水圧の発生を考慮した安定解析が実施され、対策が検討される<sup>1)</sup>。

残留間隙水圧は、現地にて十分なデータが得られていない場合には、既往の事例から残留間隙水圧の残留率を 50%として設定される場合が多い。しかしながら、貯水位降下時の残留率は、50%以下となっている実測例も多い<sup>2), 3)</sup>。残留間隙水圧は、地すべり対策工の工事量に影響を及ぼすことから、設定手法の一層の合理化が望まれている。

本調査では残留間隙水圧の設定に、統計モデル、水循環モデル、浸透流解析を用いた各手法の適用性を検討した。水循環モデル、浸透流解析を用いた手法の検討は、2つの貯水池周辺の地すべり地で実施した。また、現地で透水試験を行い、浸透流解析を行う上で特に重要と考えられる飽和透水係数の設定手法についても検討を行った。一方で、貯水位の変動に伴う残留間隙水圧の発生が、斜面の安定に及ぼす影響を明らかにするため、貯水位上昇時及び降下時の残留率及び安全率の変化を調べ両者の変化傾向を比較評価した。

### 2. 統計モデルによる残留率設定手法の検討

#### 2.1 検討方法

残留間隙水圧の残留率は、対象とする斜面の地形、地質等に応じて異なると考えられる。したがって、対象とする地すべりの地形等特性を考慮することによって残留率が推定できると考えられる。残留率に影響を及ぼす因子としては、表-1が考えられる。本調査では、表-1に示した因子からいくつかの因子を選択し、簡易に残留率を設定する手法の検討を行った。図-1に示すモデル斜面を用いて、斜面勾配、地すべり土塊の層厚、飽和透水係数、貯水位降下速度、貯水位降下量を表-2に示すとおり変化さ

表-1 残留率に影響を及ぼす因子

大分類		因子
すべり面		すべり面勾配
		水際からすべり面までの距離
湛水前の自然地下水位		すべり面から湛水前の自然地下水位までの距離
		湛水前の自然地下水位勾配
貯水位 下降後の 地下水位	地すべり 土塊 の物性	飽和透水係数
		不飽和特性
		有効間隙率、貯留係数
		地すべりタイプ
	地下水位	上部斜面からの地下水流入量
	貯水位	貯水位降下速度
		貯水位降下量
		地すべり土塊中の貯水位変動範囲
	地すべり土塊 の形状	斜面勾配
		地すべり土塊の層厚
対策工	地下水排除工	
	押え盛土工	

せて浸透流解析を実施し、感度分析を行った結果を用いて、各因子と残留率の関係について重回帰分析を行った。そして、残留率を推定する回帰式を求め、既往の貯水池周辺の地すべり 36 事例に適用して推定精度を検証した。ここで、飽和透水係数は一つの地すべりであっても地質毎に異なることや、全ての事例で現場透水試験を行うことが困難であるため、便宜的に被圧地下水を対象とした非定常一次元地下水流を対象とした地下水位の解析式<sup>4)</sup>を用いて、実測地下水位から地すべり土塊の飽和透水係数を求めた。

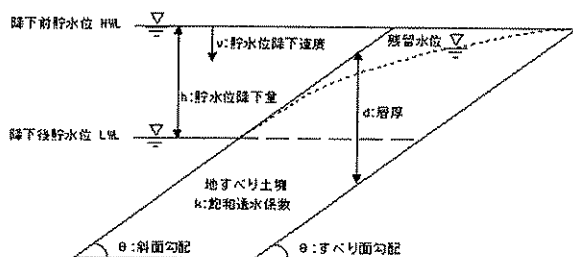


図-1 モデル斜面の概要

表-2 解析条件

斜面勾配	地すべり土塊の層厚	飽和透水係数	貯水位降下速度	貯水位降下量
10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40	$1 \times 10^{-0}$ , $1 \times 10^{-1}$ , $1 \times 10^{-2}$ , $1 \times 10^{-3}$ , $1 \times 10^{-4}$ , $1 \times 10^{-5}$ , $1 \times 10^{-6}$	0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	10, 20, 30, 40

## 2.2 検討結果

斜面勾配、地すべり土塊の層厚、飽和透水係数、貯水位降下速度、貯水位降下量と残留率の関係について重回帰分析を行った結果を表-2に示す。残留率と相関性が高かった因子は飽和透水係数で、単相関係数が0.92であった。残留率は飽和透水係数に大きな影響を受けると言える。

表-2 残留率と各因子の単相関係数

斜面勾配	地すべり土塊の層厚	飽和透水係数	貯水位降下速度	貯水位降下量
-0.15357	0.10914	-0.91885	0.16348	-0.03506

さらに、残留率に影響を与える因子を簡略化し、地すべり土塊の物性(飽和透水係数)、形状(地すべり土塊の層厚、斜面勾配、すべり面勾配、貯水位降

下量)、貯水位操作(貯水位降下速度、貯水位降下量)と残留率の関係について重回帰分析を行い、残留率を推定する回帰式として(1)式を得た。

$$\gamma = 0.109129 \times \ln(x_0) - 0.08066 \times \ln(k) + 0.06652 \times \ln(1/t) - 0.38624 \quad (1)$$

$\gamma$  : 残留率

$x_0$  : 水際からすべり面までの距離 (m)

$$X_0 = \frac{D}{\tan \theta b} + \frac{Y_0}{\tan \theta a}$$

D : 地すべり土塊の層厚

$\theta a$  : 斜面勾配

$\theta b$  : すべり面勾配

$Y_0$  : 貯水位降下量

k : 地すべり土塊の飽和透水係数 (cm/sec)

t : 貯水位降下時間 (d)

(=貯水位降下速度/貯水位降下量)

(1)式を既往の貯水池周辺斜面の地すべり 36 事例に適用し、残留率の推定値と実測値の関係を調べた結果を図-2に示す。残留率の推定値が40%程度以下の区間では、最大で20%程度の誤差範囲で推定できている。一方、推定値が40%程度以上の区間では、最大で53%もの誤差が生じている。

残留率の実測値は、地下水観測孔の間を直線補完して求めた地下水位線から得ている。事例の中には地下水観測孔の間隔が広いものもあり、残留率の実測値の精度が高いとは言えないものもあるため、このような誤差が生じたと考えられる。また、各地す

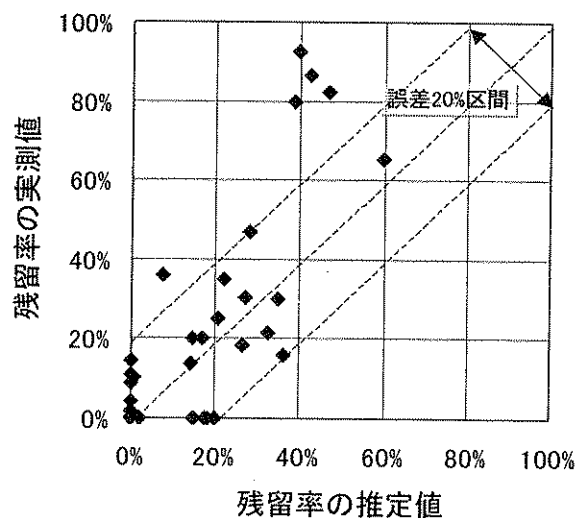


図-2 残留率の実測値と推定値の関係

べりの飽和透水係数は水平な地盤条件でかつ被圧地下水を対象とした解析式を用いて求めている。誤差の生じた原因として飽和透水係数算定式の適用性が高くない可能性も考えられる。

本手法の適用性を高めていくためには、地すべり斜面の飽和透水係数をよりの確に把握する手法を確立する必要があるが、現場透水試験を実施してもバラつきが生じるため、現状では困難と言わざるを得ない。

### 3 水循環モデルによる残留間隙水圧設定手法の検討

#### 3.1 検討方法

浸透流解析以外に地下水位の変動を予測する手法として、水循環モデルによる手法が考えられる。ここでは、既往の観測地下水位データをもとに水循環モデルで用いられる不飽和流、飽和流の解析モデル(SHERモデル<sup>5)</sup>)を地すべり斜面に応用し、貯水位低下時の地下水位の再現を試みた。

図-3に示すとおり、解析モデルでは地すべり土塊の一部をブロックと見なしブロック間の水収支を飽和透水係数を考慮した地下水浸透、中間流出、地下水流出等により表現することで貯水位低下時の残留間隙水圧の再現が可能と考えられる。等価含水比ブロックでは不飽和特性から地下水涵養量、中間流出量を算定し、等価ポテンシャル地下水ブロックでは、飽和透水係数、帯水層厚、隣接ブロック間の距離から地下水流出量が求められる。

本調査では、貯水地を飽和タンクで表現し、地下水観測孔設置位置を不飽和タンク(等価含水比ブロック)、飽和タンク(等価ポテンシャル地下水ブロッ

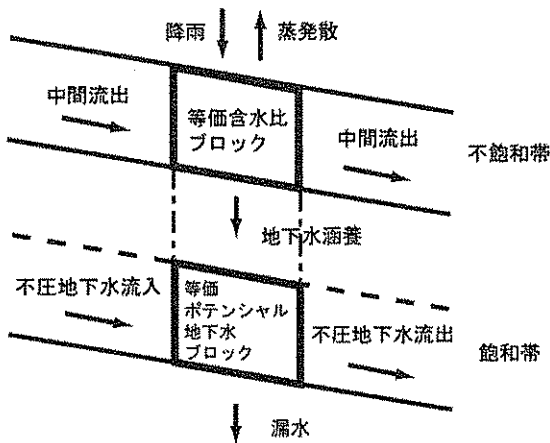


図-3 水循環モデルでの地下水流動の概念

ク)で表現することにより、貯水位変動に伴う地下水位の変動を再現できるモデルを作成した。そして、貯水位及び地下水位観測データを用いて、飽和透水係数を変化させることにより、貯水位低下時の地下水変動の再現性を検討した。

#### 3.2 検討対象地

水循環モデルによる解析は、既に運用がなされている貯水池周辺の地すべり地のうち、地下水位が継続して観測されている次の2つの地すべり地において実施した。解析対象の選定にあたっては、破碎帯地すべり、第三紀層地すべりをカバーできるよう考慮した。

##### 1) 寒河江ダムダムサイト左岸3地区

本地すべりは、ダムサイトに隣接する斜面で、ダム建設時にダム堤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。しかしながら、ダム運用段階においては、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-4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。

寒河江ダムは、常時満水位 398.5m、最低水位 341.5m に設定されているが、解析は貯水位を標高 383.90m から 367.95m まで低下させた 37 日間について

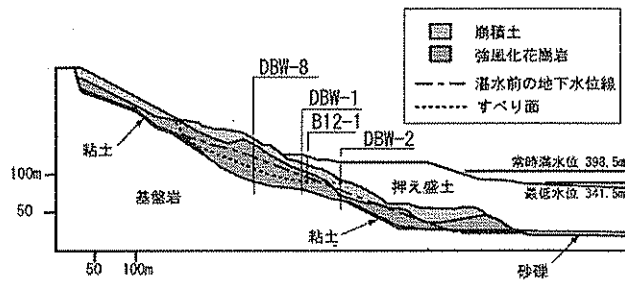


図-4 寒河江ダムダムサイト左岸3地区の断面図

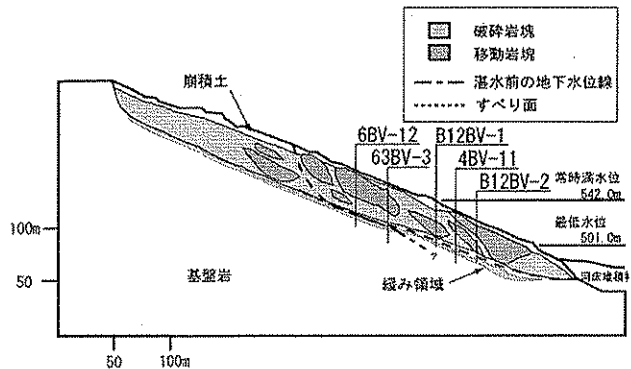


図-5 二瀬ダム麻生B地区の断面図

て行った。この間の貯水位降下速度は0.43m/日であった。また、観測水位から求めたこの時の残留率は22%であった。

## 2) 二瀬ダム麻生B地区

本地すべりは、試験湛水時に貯水位を急速に降下させたところ、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、輝緑凝灰岩、砂岩、チャート及びそれらの互層からなる。図-5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-5より、移動土塊は破碎されている部分が多い。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。

二瀬ダムは、常時満水位542.0m、最低水位501.0mに設定されているが、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。この間の貯水位降下速度は0.40m/日であった。また、観測水位から求めたこの時の残留率は0%であった。

## 3.3 検討結果

水循環モデルを用いて貯水位降下時の地下水位変動を再現した結果、寒河江ダムの一部期間で融雪期の地下水位上昇高が十分再現できなかったが、それ以外の期間については寒河江ダムダムサイト左岸3地区、二瀬ダム麻生B地区ともに地下水位変動を概ね再現でき、表-3に示すとおり残留率も整合する結果を得た。水循環モデルで設定した(逆解析により得られた)飽和透水係数は表-4のとおりであった。

表-3 水循環モデルにより求められた残留率

箇所名	貯水位			残留率(%)		
	降下期間	降下量(m)	降下速度(m/day)	実測値	水循環モデル	浸透流解析
寒河江ダムダムサイト左岸3地区	1996/8/16 ~ 1996/9/22	15.95	0.43	22	25	16
二瀬ダム麻生B地区	1995/6/20 ~ 1995/7/26	14.50	0.40	0	0	9

表-4 水循環モデルにおいて設定した透水係数

### 二瀬ダム 麻生B地区

地下水位観測孔(等価ブロック)	地すべり上部斜面	BT-8	6BV-12	4BV-11
帯水層の透水係数(cm/sec)	5.0E-04	5.0E-04	5.0E-04	1.0E-02

### 寒河江ダム ダムサイト左岸地区

地下水位観測孔(等価ブロック)	地すべり上部斜面	DVS-6	DBW-8	DBW-1	DBW-2
帯水層の透水係数(cm/sec)	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-03

た。地すべりの末端部にあたる4BV-11(二瀬ダム)、DBW-2(寒河江ダム)での飽和透水係数は他の同一の斜面内で得られた値よりも大きな値となっているが、この原因は不明である。本手法の適用性については、浸透流解析結果との比較により後述する。

## 4. 浸透流解析による残留間隙水圧設定手法の検討

### 4.1 検討方法

浸透流解析を用いて残留間隙水圧を求めるためには、的確な飽和透水係数の設定が不可欠である。そこで、本調査では、「3. 水循環モデルによる残留間隙水圧設定手法の検討」で検討対象とした2つの地すべり斜面において現場透水試験を実施し、得られた試験結果と、実際の地下水観測データを用いた逆解析により推定された飽和透水係数を比較し、浸透流解析に用いる飽和透水係数を求めるのに最適な試験方法の検討を行った。

#### 4.1.1 現場透水試験

現場透水試験方法にはいくつかの方法が提案されている。ここでは、単孔式透水試験、地表面浸透能試験、多孔式透水試験、トレーサー試験を実施し、飽和透水係数値を得た。ただし、地表面浸透能試験、多孔式透水試験は寒河江ダムにおいてのみ実施している。

##### 1) 単孔式透水試験

単孔式透水試験は、掘削したボーリング孔において、貯水位が低い時期に注水法・ピエゾメーター法を用いて実施した。

寒河江ダムダムサイト左岸3地区では、貯水位の影響を受けるB12-1にボーリングを行い、崩積土(深度19.0-19.2m、20.0-20.5m)、強風化岩(深度23.0-24.0m、31.0-31.5m)の4区間で透水試験を実施した。

一方、二瀬ダム麻生B地区については、B12BV-1(深度11.5-12.0m、14.8-15.3m)、B12BV-2(深度15.0-15.3m、22.0-22.3m、36.0-36.3m)、6BV-12(深度10.0-11.0m、15.0-16.0m、20.0-21.0m、35.0-36.0m、40.0-41.0m、41.0-43.0m、43.0-45.0m、43.0-48.0m、43.0-50.0m)で透水試験を実施した。

飽和透水係数は、Hvorslevの式<sup>6)</sup>により求められているが、今回の試験は不飽和域において注水法により実施したものであり、解析式の適用条件と一致しないと考えられる。そこで、浸透流

解析により現場での試験を再現し、得られた飽和透水係数値と Hvorslev の式により得られた値の整合性を比較評価した。

## 2) 地表面浸透試験

地表面浸透試験は、径 20cm、深度 100cm の掘削孔に注水し、浸透に伴う水位の低下量を計測することにより実施した。飽和透水係数は、浸透流解析により試験を再現して求めた。本試験は寒河江ダムダムサイト左岸 3 地区 DBW-8 付近において 3 箇所において実施した。

## 3) 多孔式透水試験

多孔式透水試験は、寒河江ダムダムサイト左岸 3 地区において、既設ボーリング孔を活用した揚水試験により実施した。B12-1 を揚水孔とし、約 5m 離れた位置に設置された DBW-1 を観測孔とした。揚水孔、観測孔ともに全孔ストレナ加工された塩化ビニルパイプ（口径 50mm）が設置されている条件下で試験を行い、段階試験、連続試験、回復試験という手順で行うこととした。

## 4) トレーサー試験

トレーサー試験は、食塩をトレーサーとして実施し、トレーサー投入後の観測孔における電気伝導度の変化からトレーサーの到達時間を求めた。

寒河江ダムダムサイト左岸 3 地区では、DBW-8 にトレーサーを投入後、DBW-1 及び DBW-2 において 1 日に 1 回採水を行い、電気伝導度を測定した。一方、二瀬ダム麻生 B 地区については、6BV-12 にトレーサーを投入後、63BV-3、4BV-11 において電気伝導度の計測に加えて、塩素イオン濃度も測定し、トレーサーの到達判定に役立てた。トレーサー投入直後の測定間隔は投入直後は 1 時間に 1 回とし、時間の経過とともに次第に計測間隔を長くした。

### 4. 1. 2 浸透流解析

浸透流解析は、調査対象地すべりの主測線の断面を用いて飽和・不飽和浸透流解析（解析コード：UNSAF<sup>6)</sup>・7)) により実施した。

解析に用いた地質区分は、図-4 及び 5 に示した既往の地質調査結果によった。寒河江ダムダムサイト左岸 3 地区については、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、押え盛土からなる区分とした。一方、二瀬ダ

ム麻生 B 地区については、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、基盤に区分し、基盤は緩み領域と非緩み領域に区分した。

寒河江ダムダムサイト左岸 3 地区、二瀬ダム麻生 B 地区ともに、現場透水試験結果を飽和透水係数の初期値とし、移動土塊の飽和透水係数を  $10^{-1} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$  の範囲で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。現場透水試験を実施していない地質区分の飽和透水係数値については、既往文献<sup>8)</sup>を参考に設定した。

## 4. 2 検討結果

### 4. 2. 1 逆解析結果の地下水位の再現性

浸透流解析を用いた逆解析により表-5 及び 6 に示す飽和透水係数を用いることで観測地下水位の再現が可能であった。解析により得られた地下水位線を図-6 に示す。解析の結果、地下水の残留状況は概観的にほぼ再現することができた。しかしながら、二瀬ダム麻生 B 地区で図-5 に示した貯水位付近の

表-5 寒河江ダムダムサイト左岸 3 地区で設定した飽和透水係数

地質・土質区分		透水係数 (cm/sec)
盛土		$5 \times 10^{-2}$
移動土塊	崩積土	$5 \times 10^{-2}$
	強風化花崗岩 (地下水位線より上位層)	$5 \times 10^{-3}$
	強風化花崗岩 (地下水位線より下位層)	$1 \times 10^{-4}$
粘土		$1 \times 10^{-6}$
砂礫		$1 \times 10^{-2}$
不動岩盤	基盤岩	$1 \times 10^{-5}$

表-6 二瀬ダム麻生 B 地区で設定した飽和透水係数

地質・土質区分		透水係数 (cm/sec)
現河床堆積物		$5 \times 10^{-2}$
移動土塊	崩積土	$1 \times 10^{-3}$
	移動岩塊	$5 \times 10^{-2}$
	破碎岩塊	$5 \times 10^{-2}$
粘土		$1 \times 10^{-6}$
不動岩盤	緩み領域	$1 \times 10^{-6}$
	新鮮岩	$1 \times 10^{-6}$

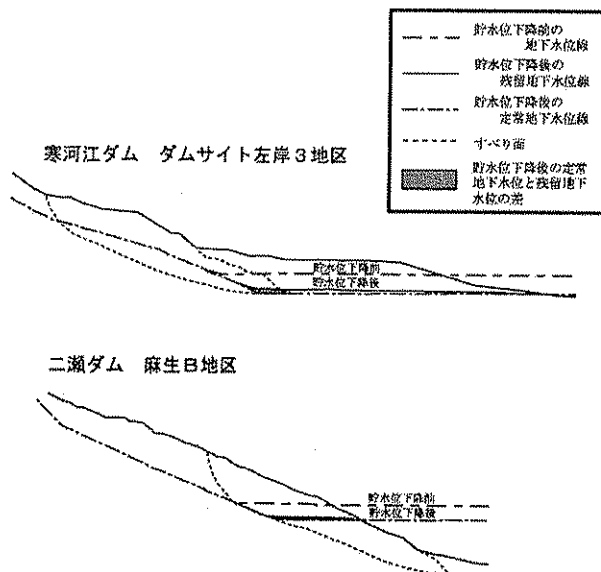


図-6 逆解析により得られた地下水位線

地下水位線を、局所的に再現することができていない。寒河江ダムダムサイト左岸3地区で行ったように、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。

寒河江ダムダムサイト左岸3地区においては、地すべり前面の押え盛土の影響で貯水位降下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、貯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。

#### 4. 2. 2 得られた飽和透水係数の比較

##### 1) 寒河江ダムダムサイト左岸3地区

寒河江ダムダムサイト左岸3地区での現場透水試験結果及び浸透流解析を用いた逆解析により得られた飽和透水係数値(以下、逆解析値という)を図-7に示す。単孔式透水試験結果と浸透流解析による逆解析値を比較すると、移動土塊で1~2オーダー程度異なる値となっている。地すべりの移動土塊は、逆解析値が試験値より高くなる傾向にある一方で、湛水前の地下水位線よりも下位の強風化花崗岩は、逆解析値が試験値より低めの値となっている。

また、地表面浸透試験結果は、崩積土での単孔式透水試験結果と概ね整合する値となっている。

多孔式透水試験結果及びトレーサー試験結果は、全孔ストレーナ加工された既存のボーリング孔を活用して実施している。したがって、特定の地質帯の飽和透水係数を求めているのではなく、

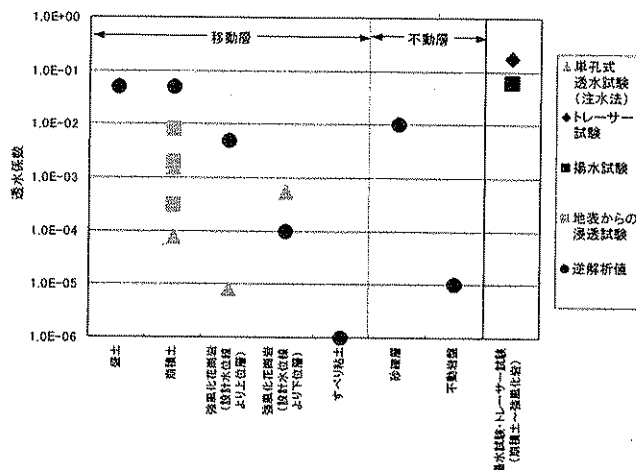


図-7 寒河江ダムダムサイト左岸3地区

地下水観測孔の設置区間である盛土・崩積土・強風下花崗岩の特性の合成された、もしくは最大の飽和透水係数を求めたことになると考えられる。試験結果を見ると、試験値は概ね盛土、崩積土の逆解析値と同じ値を示している。盛土、崩積土の飽和透水係の逆解析値は、強風化花崗岩(設計水位線より上位層)よりも1オーダー大きな値となっている。よって、試験結果は透水性の良い盛土、崩積土の特性を反映した結果になったと考えられる。B12-1(深度37.0m)の地質構成は、盛土の層厚が12.8m、崩積土の層厚が10.0m、強風化岩が14.2mとなっており、全体の約60%を盛土、崩積土が占めていることからみても試験結果は矛盾したものではないと考えられる。本調査で実施した多孔式透水試験では、ボーリング口径が小さかったため、十分な排水能力を有するポンプを使用できなかった。そのため、段階試験における水位低下高が最大で5cmと小さなものであった。より精度の高い試験結果を得るためには、口径の大きなボーリング孔を用いて、連続試験、回復試験まで実施しデータを取得していく必要がある。

トレーサー試験結果は、盛土、崩積土の逆解析値よりも若干大きめの値であるが、オーダーで見るとほぼ同じと言える。

##### 2) 二瀬ダム麻生B地区

二瀬ダム麻生B地区での現場透水試験結果及び浸透流解析による逆解析値を図-8に示す。単孔式透水試験結果と逆解析値は寒河江ダムでの調査結果と同様に、移動土塊で1~2オーダー程度異なる値となった。トレーサー試験結果は、貯

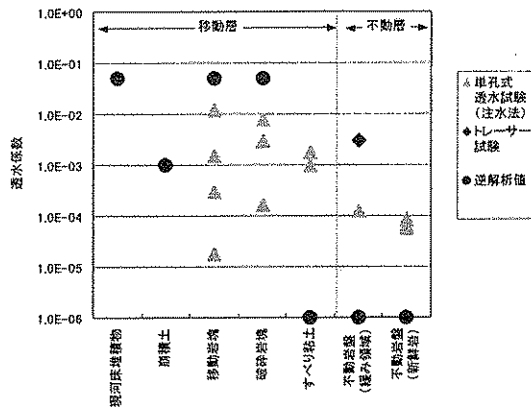


図-8 二瀬ダム麻生B地区  
で得られた透水係数

水位が低い状態での試験であったため、すべり面よりも下位層の不動岩盤（緩み領域）の飽和透水性係数を求める結果となった。トレーサー試験結果は、寒河江ダムでの調査結果と同様に、単孔式透水試験結果よりも大きな値となったが、基盤岩での逆解析値は透水試験結果よりも著しく小さい値となっている。局部的に亀裂が多かったとも考えられるが、この原因は不明である。

### 3) 現場透水試験結果の浸透流解析への適用性

2つの地すべり地での検討結果より、現場透水試験の浸透流解析への適用性についてとりまとめると次のとおりである。

#### a) 単孔式透水試験

単孔式透水試験結果（注水法・ピエゾメータ法）は、逆解析結果よりも1~2オーダー程度小さい値となる。この原因は、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、小さい飽和透水性係数得る）ためと考えられる。事実、注水を行っても水位が全く上昇しない区間があった。単孔式透水試験結果は、試験の実施可能な範囲での値となり、小さな値が算出されてしまったことも原因と考えられる。また、ボーリングによる孔壁の乱れの影響も原因の一つと考えられる。地表面浸透能試験結果は、単孔式透水試験結果とほぼ同じ値が得られたことから、単孔式透水試験と同じ特性を持った試験と考えられる。

透流解析により現場での試験を再現し得られた飽和透水性係数値（以下、試験逆解析値という）と Hvorslev の式により得られた値を比較

表-7 解析方法による透水性係数の違い

試験地	ボーリング孔	試験区間	Hvorslevの式	試験逆解析値
寒河江ダム	B12-1	19.0~19.2m	1.29E-03	1.50E-03
		20.0~20.5m	1.03E-04	8.00E-05
		23.0~24.0m	1.41E-05	8.00E-06
		31.0~31.5m	8.16E-04	5.50E-04
二瀬ダム	6BV-12	10.0~11.0m	1.38E-03	3.00E-04
		15.0~16.0m	9.72E-04	2.00E-04
		20.0~21.0m	1.20E-03	2.00E-04
		35.0~36.0m	2.00E-04	5.00E-05
	12BV-1	15.0~15.3m	7.84E-03	4.00E-04
		22.0~22.3m	2.96E-04	7.00E-05

した結果を表-7に示す。両者を比較すると、試験逆解析値が若干小さい値をとるが1オーダー以上の差は、12BV-1の15.0~15.3mのみであり、オーダーが大きく異なる値にはならないことが確認された。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 の式よりも浸透流解析を用いて今回のように飽和透水性係数を逆算することが望ましいと考えられる。ただし、試験逆解析値は、図-7及び8で示した逆解析値と比較して、Hvorslev の式よりもさらに小さい値となるため、残留間隙水圧推定のために実施される浸透流解析に対しては適用性が低くなる。

本調査では回復法を用いた単孔式透水試験の浸透流解析への適用性については、評価していないが、地下水がすべり面より高い場合の試験法の検討として今後実施していく必要がある。

#### b) 多孔式透水試験

多孔式透水試験を実施した結果、ボーリング孔計が小さかったため、十分な排水能力を有するポンプを使用できなかった。そのため、観測孔での水位低下は認められず、揚水孔で5cmの水位低下高であった。揚水孔で得られた結果より飽和透水性係数を求めた結果、逆解析結果とほぼ整合する値となった。揚水試験は試験中の水位変動から飽和透水性係数を評価するものであるため、亀裂部の特性も反映したマスとしての飽和透水性係数を得ることが出来る。したがって、浸透流解析による逆解析値と整合する結果となったと考えられる。次項で述べるが、トレーサー試験結果を考慮すると不動岩盤等性状の異なる地質での適応性も評価しておく必要がある。今回の試験結果からは、単孔式透水試験では、注水法より回復法（揚水試験）の精度

が高いと言える。

#### c) トレーサー試験

トレーサー試験結果は、逆解析結果とほぼ同等か大きな値となった。トレーサー試験は、トレーサーの到達量に応じて飽和透水係数を評価するのではなく、トレーサーの到達の有無のみを判断する試験であるためと考えられる。

寒河江ダムでの試験結果においては、浸透流解析に用いることが出来ると考えられる。しかし、二瀬ダムでの試験結果では、逆解析値に比べて大きな値となっており、浸透流解析には使用できないと考えられる。これは、不動岩盤(緩み領域)内の亀裂部をトレーサーがいち早く流れてしまうため、マスとしての評価がなされず、大きな飽和透水係数となったと考えられる。

以上のことから、地すべり地において浸透流解析を実施する際に用いる飽和透水係数を設定する手法として、揚水試験結果の適用性が高いと期待される。しかしながら事例が少ないことから、他の事例においても同様な評価検討を実施していく必要がある。

### 5. 適切な残留間隙水圧設定手法の評価

本調査では残留間隙水圧の設定に、統計モデル、水循環モデル、浸透流解析を用いた各手法の適用性を検討した。

統計モデルを用いた手法を検討した結果、高い精度で残留率を設定するためには、地すべり斜面の飽和透水係数をよりの確に把握する必要があることがわかった。しかしながら、透水係数を的確に把握できるのであれば、統計モデルを用いるよりも水循環モデル、浸透流解析を用いた方が合理的と考えられる。今後、推定精度が高くない可能性があるが、飽和透水係数を地下水勾配で代用する等算定式に組み込む因子をさらに検討して、事前に概略の残留率算定に統計モデルを用いた手法を活用するといった使い方が有効と考えられる。

水循環モデルによる残留間隙水圧の設定に際しては、透水係数の設定が現実には困難と考えられた。水循環モデルにより得られた飽和透水係数は、二瀬ダム麻生B地区の6BV-12(貯水位変動範囲にあるボーリング孔)で $1 \times 10^{-2}$ であったが、浸透流解析による逆解析値は、 $5 \times 10^{-2}$ (6BV-12において貯水位変動範囲の地質をなす移動岩塊、破碎岩塊の値)であっ

た。また、寒河江ダムダムサイト左岸3地区のDBW-1ではそれぞれ、 $1 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-3}$ (DBW-1において貯水位変動範囲の地質をなす強風化花崗岩の値)であった。また、DBW-2では、それぞれ $1 \times 10^{-3}$ 、 $5 \times 10^{-2}$ (DBW-2において貯水位変動範囲の地質をなす盛土、崩積土の値)であった。以上のように、水循環モデルにより得られた飽和透水係数は、浸透流解析による逆解析値よりも1オーダー程度低い値となっている。これは、モデルに入力した飽和透水係数よりも過大に地下水流動量が評価されているためと考えられる。地すべりという比較的勾配の急な斜面に水循環モデルを適用していることが原因の一つと考えられる。

水循環モデルを用いた逆解析により得られた飽和透水係数の持つ意味は、実際の斜面の飽和透水係数とは異なると考えられることから、湛水後の地下水位観測データをある程度得た後において、逆解析により飽和透水係数を求め、その後の水位予測をする場合には有効と考えられるが、湛水前の水位予測には使用困難と考えられる。

浸透流解析を用いた手法については、多孔式透水試験の実施により飽和透水係数の設定が可能と考えられた。したがって、今回検討した3つの手法(統計モデルを用いた手法、水循環モデルを用いた手法、浸透流解析による手法)の中では、浸透流解析により貯水位降下時の残留間隙水圧を設定する手法が最も精度が高い手法と考えられる。

### 6. 残留間隙水圧が斜面安定に及ぼす影響の評価

#### 6.1 検討方法

残留間隙水圧が斜面の安定にどのように影響を及ぼしているのかを明らかにするため、貯水位の変動に伴う残留率及び安全率の変化を調べた。安全率は、検討対象とした2つの地すべりにおいて、主測線上のボーリング孔設置位置における地下水位データ(浸透流解析結果)を用いて、基準水面法とフィルダム法により求めた。また、土質強度定数は、湛水前の斜面の安全率を1.00と仮定し、粘着力を地すべり層厚から推定して内部摩擦角を逆算した。解析期間は、水循環モデル及び浸透流解析で解析を行った貯水位降下期間に加えて、貯水位降下以前の上昇期間も対象とした。残留率は貯水位降下時のみ求めて、安全率との対応を評価した。



## 6. 2 検討結果

寒河江ダムダムサイト左岸3地区及び二瀬ダム麻生B地区での貯水位の変化に伴う安全率の変化は図-9及び10に示すとおりである。寒河江ダムでは貯水位の上昇により安全率が減少していくが、貯水位降下時の安全率は貯水位上昇時とは異なり、ヒステリシスを有する。安全率の変動にヒステリシスが生じた原因は、残留間隙水圧の発生の他に貯水位上昇時に発生した地盤内の地下水位上昇の遅れも原因と考えられる。

図-9及び10の中央に、貯水位降下時の残留率の変化を示す。寒河江ダムダムサイト左岸3地区についてみると、残留率の最大値は貯水位降下開始直後である。その後、残留率は貯水位の降下とともに低下していく。一方、残留間隙水圧の発生状況を表していると考えられる貯水位上昇時と降下時の安全率の差(図-9右側)を見ると、貯水位365.0~385.0mと385.0~395.0mの間にピークを有するような形状で、基準水面法、フィルダム法ともに安全率の差が大きくなっており、残留率の変化傾向とは整合していない。残留率計算

式(1)の分子(図-11)は地すべり土塊の透水性に大きく左右されて変化すると考えられるが、分母は貯水位降下量が大きくなるしたがって大きくなる。貯水位の降下にしたがって、分子の増加量より分母の増加量が大きくなったため、残留率は小さくなったと考えられる。

以上のことから、経時的な残留間隙水圧の発生状況を評価する場合、残留率は必ずしも地下水の残留状況を評価する指標とならないと言える。残留間隙水圧の残留率は設計上設定されているものであり、経時的な変化まで考慮されていない。そのため、貯水位上昇時と降下時の安全率の差と単純に比較することは出来ない。しかしながら、残留間隙水圧をより厳密に取り扱っていくためには、貯水位降下に伴う残留間隙水圧の変化を安全率という指標で分析し

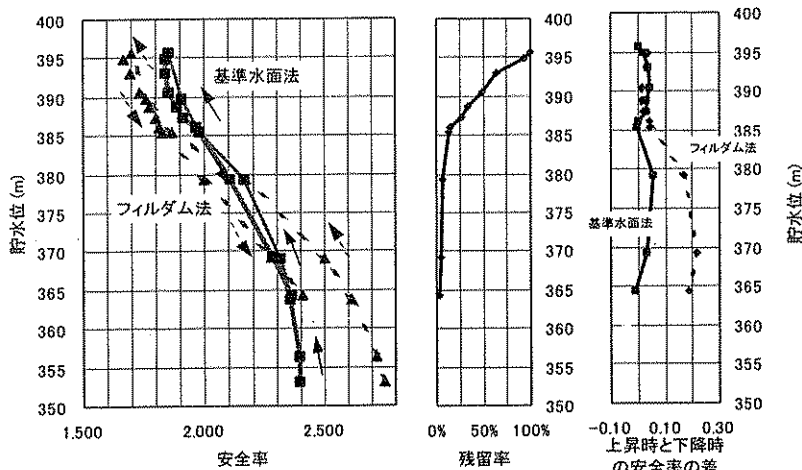


図-9 寒河江ダムダムサイト左岸3地区の安全率の変化

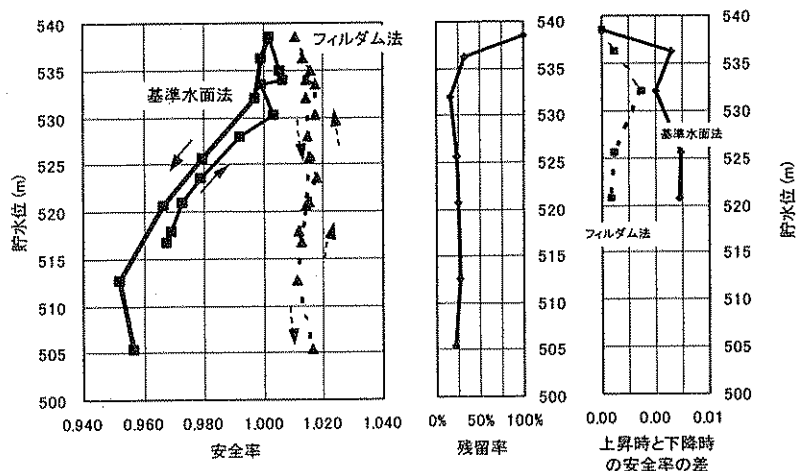


図-10 二瀬ダム麻生B地区の安全率の変化

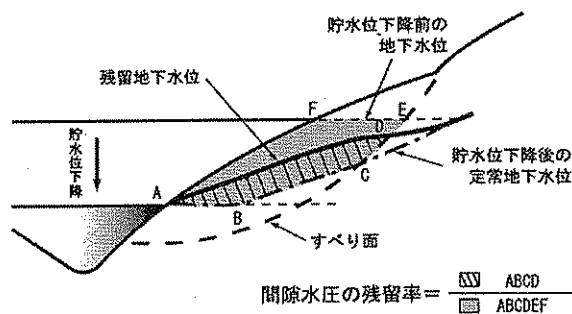


図-11 残留率の計算方法

ていくことが有効と言える。

二瀬ダム麻生B地区では、安全率の変化は1%程度であるが、貯水位上昇時の貯水位533m付近で安全率が急激に変化している。この原因は、前述のと

おり降雨が原因で地下水位が上昇したことによるものである。他の貯水位及び寒河江ダムでは、このような急激な安全率の変化は認められなかったが、降雨が安全率に及ぼす影響もあることに留意する必要がある。残留間隙水圧の斜面安定への影響を厳密に評価していく場合、このような降雨の影響も十分に考慮する必要があると考えられる。

本解析では、安全率の算出に基準水面法とフィルダム法を用いた。寒河江ダムダムサイト左岸3地区と二瀬ダム麻生B地区での基準水面法による安全率の変化傾向は異なっている。このことは、地すべりの形状、貯水位の変動範囲によって安全率の変化する傾向が異なるためである。

寒河江ダムダムサイト左岸3地区における安全率は、貯水位の変動に対してどちらの方法も同じ傾向で変化しているが、二瀬ダム麻生B地区では変化傾向は全く異なる結果となった。採用する解析式による影響が大きい場合もあると言える。このような差が生じた原因は、基準水面法は貯水位より上位の地下水によるスライス側部に働く水圧を考慮していないのに対して、フィルダムは考慮しているためである。理論的にはフィルダム法がより精度が高いと考えられるが、移動履歴を有する地すべりでの検討や他の解析手法の適用性を検討していく必要がある。

## 7. まとめ

本調査では、残留間隙水圧の設定に、統計モデル、水循環モデル、浸透流解析を用いた場合の各手法の適用性と、解析に用いる最適な現場透水試験方法を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 統計モデル、水循環モデル、浸透流解析を用いた手法では、解析における透水係数の設定方法が適切であれば、浸透流解析を用いた手法が最も精度が高く適当と考えられた。
- 2) 寒河江ダムダムサイト左岸3地区では、盛土・崩積土・強風化花崗岩を対象とした揚水試験結果が、盛土・崩積土での浸透流解析による逆解析結果と整合する値となった。試験数が少ない中での評価ではあるが、浸透流解析に用いる飽和透水係数としては、揚水試験結果が最も精度が高いと考えられる。
- 3) 貯水位の変動に伴う残留率及び安全率の変化を調べた結果、残留率は経時的な残留間隙水圧の発生状況を表さないことがあることがわかった。経時的な評価を行う場合には、貯水位上昇時と降下時

の安全率の差を指標とすることが有効と考えられる。ただし、安定解析式によって残留間隙水圧の影響度が異なることに留意する必要がある。

今後は湛水前に地下水の分布していない不飽和域での透水試験の実施方法や浸透流解析における飽和透水係数の具体的な設定方法について検討を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) (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.
- 2) 網木亮介：「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.
- 3) 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降下時の残留間隙水圧の検討」, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 61-69, 2000.
- 4) 河野伊一郎：「地下水工学」, pp. 34, 1989.
- 5) (社) 雨水貯留浸透技術協会：「都市域における水循環系の定量化手法」, pp. 74-75, 2000.
- 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) 例えば, 山本荘毅, 榎根勇 監修：最新地下水学—調査と実務のガイドライン—, pp. 12, 山海堂, 1977.