

先行降雨を考慮した貯水池周辺地すべりの残留間隙水圧の残留率の評価

ACCOUNTING FOR ANTECEDENT RAINFALL IN ANALYSIS OF RESIDUAL PORE PRESSURE OF A LANDSLIDE ON THE LIMB OF A RESERVOIR

牧野孝久 *・田内宏明 **・倉岡千郎 *・飯沼達夫 ***

Takahisa MAKINO, Hiroaki TAUCHI, Senrou KURAOKA and Tatsuo IINUMA

Residual pore water pressures are known to develop in slopes of dam reservoirs during drawdown operations. The residual pore pressure is an important factor that may cause instability of the landslide. Hence, seepage analysis of the residual pore pressure within a landslide of Hachisu dam was conducted to study the effects of rapid drawdown on the residual pore water pressure. Furthermore, the effects of antecedent rain on residual pore pressure were simulated to estimate the maximum potential residual pore pressure. As a result, the residual pore pressure increased by 10% due to antecedent rain. It was therefore shown that antecedent rain must be taken into account when analyzing the effects of drawdown.

Keywords : Residual pore water pressure, reservoir limb landslide, seepage flow analysis

1. はじめに

貯水池周辺斜面においては、貯水位の変動に伴い地すべりが発生する可能性がある。とくに、貯水位の急激な下降時には、斜面内の地下水位が貯水位の下降に追随せず、地下水位の低下に遅れが生じて残留間隙水圧が発生し、それが地すべりを誘発す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では、残留間隙水圧の発生を考慮した安定解析¹⁾により対策が計画されている。この残留間隙水圧の残留率(以下、残留率と記す)については、地すべり土塊の透水係数や貯水位降下速度などの影響を受けることが実測事例や数値解析から報告されている^{2),3)}。残留率に影響を与える要因の1つとして、貯水位降下前の降雨(以下、先行降雨と記す)が考えられるが、一般的な残留率の考え方には降雨は考慮されておらず、降雨の影響を検討した事例はほとんど報告されていない。

そこで本報告では、蓮ダム(中部地方整備局)の貯水池周辺地すべりを対象に実施した浸透流解析による残留率の推定解析を例として、先行降雨と貯水位降下速度が残留率に与える影響の検討結果を報告する。

2. 業務概要

(1) 蓮ダム概要

蓮ダムは、国土交通省中部地方整備局により昭和46年から建設され、平成3年9月に完成した多目的ダムである。蓮ダムの主な諸元を表-1に示す。

表-1 蓮ダムの諸元

河川名	櫛田川水系蓮川	
位置	三重県松阪市飯高町森	
集水面積	80.9km ²	
総貯水容量	32,600,000m ³	
形式	重力式コンクリートダム	
堤体諸元	堤高	78m
	堤頂長	280m
	堤体積	約 484,000m ²
	堤頂標高	EL.319.0m

(2) 地形地質概要

蓮ダムは紀伊半島中央部台高山脈高見・国見山・赤倉山を結ぶ山系の東側に当たり、三重県櫛田川支流蓮川に位置する。ダムサイト付近の地形は、V字型の谷と急峻な斜面とからなる典型的な壮年期の山岳地形で標高600m程度の山稜がほぼ東西に連なる。蓮ダムの流域は、このうち南側を国見山・赤倉山・池小屋山・白倉山・迷岳、北側を国見山・青田を結ぶ稜線で囲まれた約80.9km²である。櫛田川は地質構造を反映してほぼ東に向かって流れ、流域も東西に長い。北側の分水界は粥見でほぼ直線状を呈する。この地域の地質は、西南日本外帯三波川変成帯に属し、黒

* 中央研究所 総合技術開発部

** 大阪支店 技術第二部

*** コンサルタント国内事業本部

社会システム事業部 防災マネジメント室

色片岩、砂質片岩、緑泥片岩などの低変成の結晶片岩類からなっている。本地域の北方約 10km 地点には、地質的に日本列島の西半分を南北に二分する中央構造線(大断層)が東西に走る。ダムサイト付近の地層は、ほぼ東西方向に延びて分布することから、大局的には中央構造線に支配された地質構造といえる。

(3) 検討内容

蓮ダムの貯水池周辺地すべりに対しては、指針¹⁾に従って残留率を 50% として対策工が計画・実施してある。今後、急激な貯水位降下を行う可能性があり、残留率が 50% を超過する可能性が懸念されたため、断面 2 次元 FEM 浸透流解析により残留率が 50% 以下となる貯水位降下速度を算出することとした。また、急激な貯水位降下が必要となるのは洪水調節の水位低下のための放流時であり、そうした状況下では貯水位降下前までに集中豪雨があるのが普通であり、それが残留率に影響すると考えられるため、先行降雨量を考慮した解析を実施した。なお、蓮ダム貯水池内には 13 の地すべりブロックが存在するが、湛水時に水面下に没する面積の割合などから考えられる危険度と、浸透流解析に使用できる観測データ量から、検討対象地区として D 地区を選定した(図-1)。

3. 浸透流解析手法について

(1) 検討フロー

浸透流解析の検討フローを図-2に示す。地下水変動予測モデルの構築として、まず、①地形形状、地質区分等を考慮した解析モデル(FEM メッシュ)の作成を行い、次に透水係数の逆算を目的として②観測地下水位の再現解析を実施する。そして、③透水試験結果と比較し、逆算された透水係数の妥当性を検討する。このようにして構築された地下水変動予測モデルに④降雨条件を与え、⑤貯水位降下に伴う残留率の推定解析を実施する。

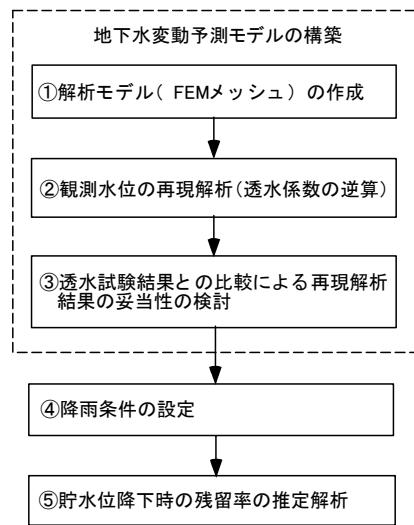


図-2 検討フロー図

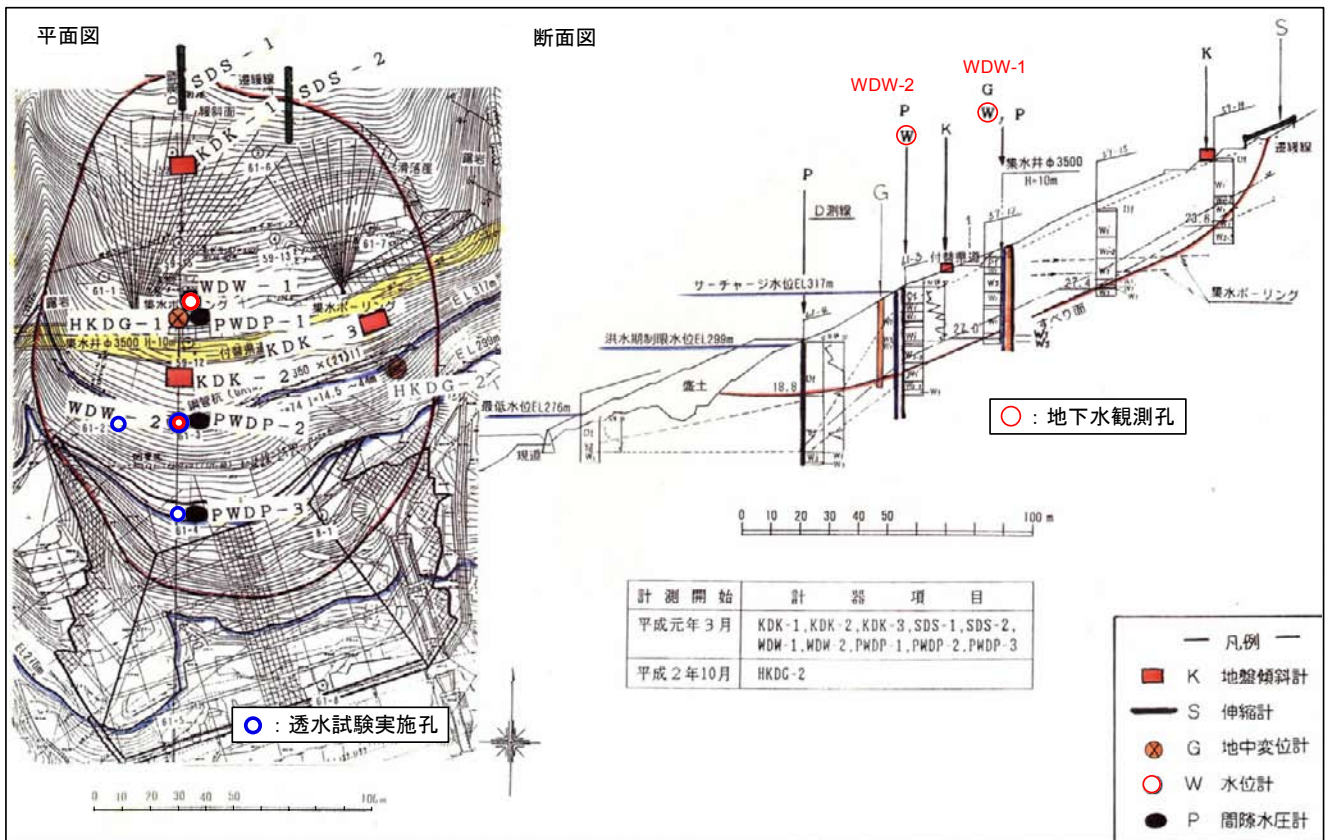


図-1 蓮ダムD地区平面図および断面図

貯水位降下に伴って不飽和領域が発生することから、FEM 飽和不飽和浸透流解析を採用した。

(3) 解析モデルおよび境界条件

図-3 に解析モデル図を示す。解析領域は地すべりブロックをすべて含む領域とし、山側境界についてはブロック頭部から十分離れた位置までモデル領域とした。谷側境界は蓮川付近までとした。

モデル右側の山側境界は水頭固定条件とした。水頭固定値は観測地下水位線を斜面勾配に沿って延長し、EL=385m とした。なお、当境界は、貯水位変動区間より十分上位にあり、水頭固定とした場合の残留率推定への影響は許容範囲内にあると考えられる。一方、再現解析に際してのモデル左側河川部境界は、河床標高の EL=257m を水頭固定条件とした。なお、降雨については、地表面からの流入量として設定した。また、透水特性を設定する物性区分は、風化区分を参考にしたが、再現解析を行っていく上で修正した。

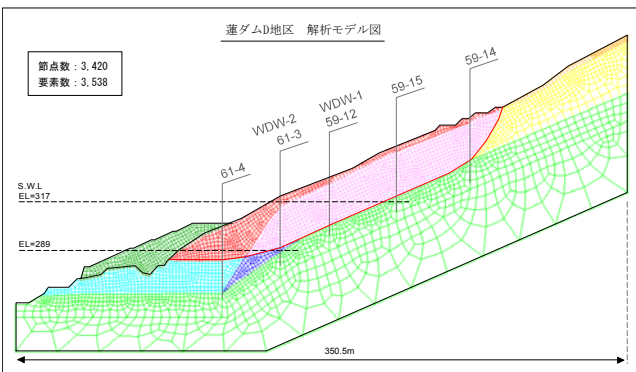


図-3 解析モデル図

4. 再現解析

(1) 観測地下水位

D 地区では過去に地下水位観測を 2 孔で実施している。図-4 に孔内水位変動図を示す。

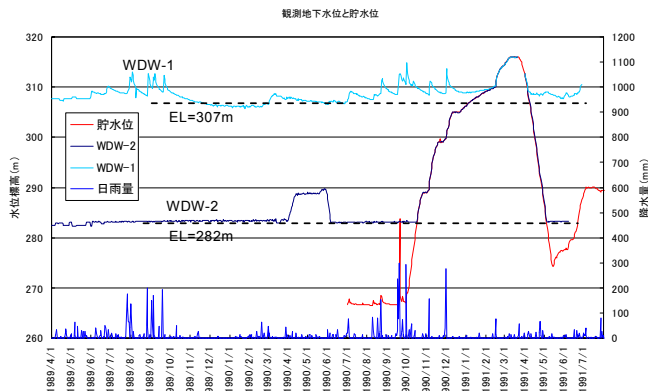


図-4 観測地下水位

観測地下水位の変動特性は下記のとおりである。

- ① WDW-1 孔は降雨に対して良い反応が確認できる。
- ② WDW-2 孔は降雨に応答する変動はほとんど無く、WDW-1 孔の変動特性とはまったく異なる。
- ③ WDW-1 の無降雨時の基底水位は EL=約 307m、WDW-2 は EL=約 282m である。
- ④ 貯水位変動時の孔内水位は、両孔とも貯水位と同標高で変動する。

なお、再現解析を実施する期間は、貯水位変動データのある 1990 年 7 月 1 日から 1991 年 5 月 31 日とする。

(2) 再現解析結果

無降雨時の基底水位に対する地下水ポテンシャル分布を図-5 に示す。なお、WDW-1、WDW-2 以外の孔では地下水位観測を実施していないため、ボーリング削孔時の水位を再現対象とした。また、地下水位変動再現結果を図-6 に、逆算された透水係数と有効間隙率を図-7 に示す。

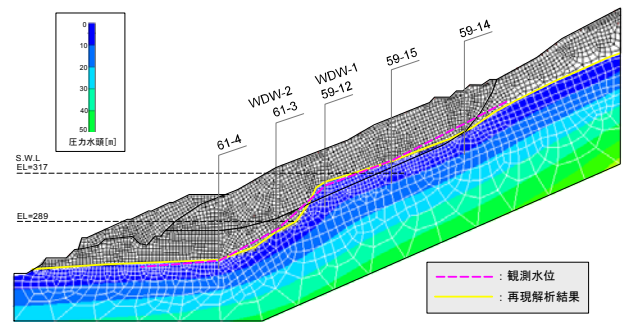


図-5 再現地下水位形状(基底水位時)

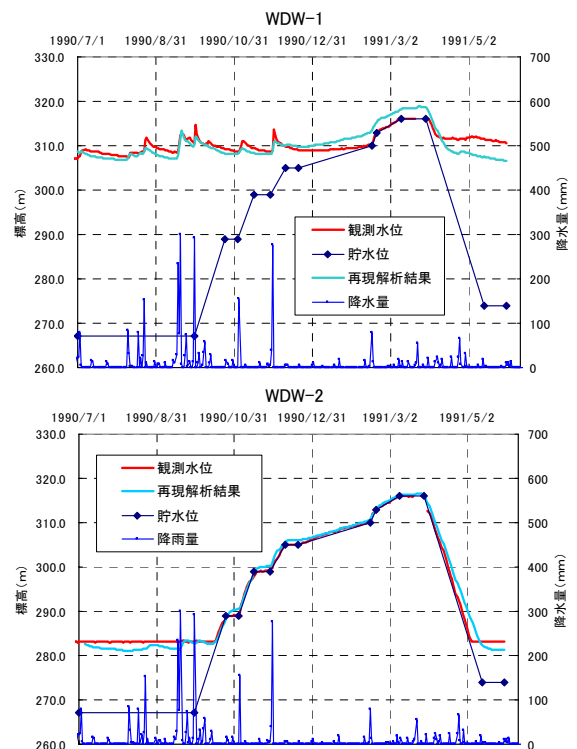


図-6 再現解析結果(上: WDW-1、下: WDW-2)

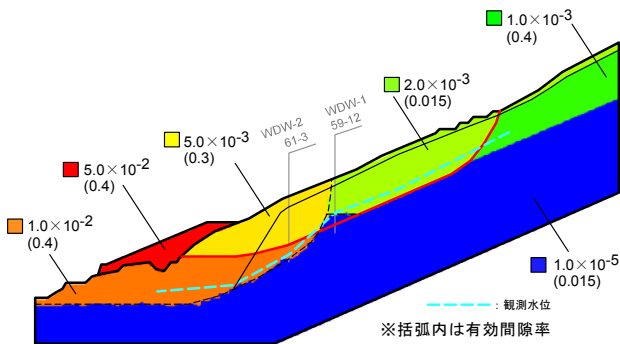


図-7 逆算された水理定数(透水係数の単位: cm/sec)

再現解析結果の要点を以下に示す。

- ① 無降雨時の基底水位の分布および時系列の地下水位変動が良く再現できている。
- ② WDW-1 孔の地下水位変動の追従性(図-6)を改善するには、地下水が速やかに流れ出るように透水性をさらに高くする必要があるが、そうした場合、地下水位が全体的に低下し、降雨応答部分の再現性も悪化する。降雨応答と追従性の両者の再現性のバランスを考慮してこの結果を採用した。
- ③ 降雨に対する応答性を再現するため、両孔で異なる水理定数区分とした(図-7)。その差異はとくに有効間隙率で顕著であり、降雨との応答性が高い WDW-1 では有効間隙率 0.015、降雨に応答しない WDW-2 では有効間隙率 0.3 ~ 0.4 となった。

(3) 解析結果の妥当性検証

解析対象の D 地区では、昭和 61 年度に現場透水試験(簡易揚水試験)を 61-2 ~ 61-4 孔の 3 孔で実施している(図-1)。試験結果を図-8、図-9 に示す。

透水試験結果の要点は以下のとおりである。

- ① 移動土塊でおおむね 10^{-3} cm/s オーダーである。
- ② 61-4 孔では、すべり面以下でも透水性の高いゾーン($10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s)が存在する。

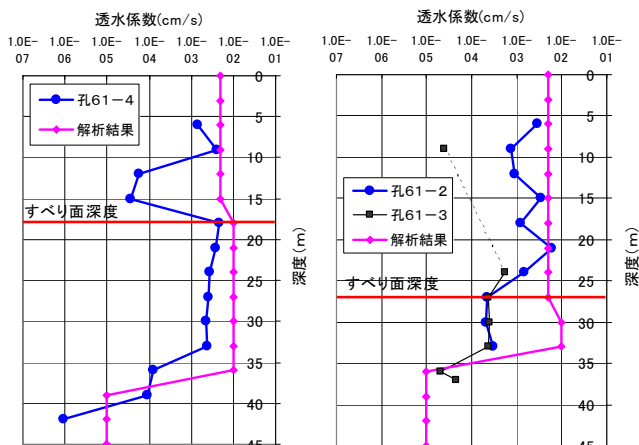


図-8 深度ごとの透水係数

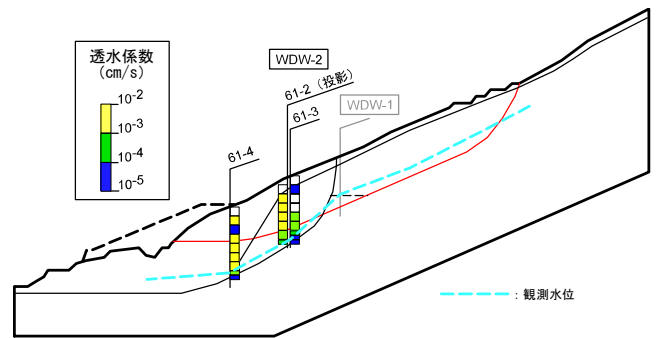


図-9 透水係数分布図(試験結果)

以上のように、再現解析で逆算した透水係数分布(図-7)は透水試験結果の傾向とおおむね整合することから、解析結果の妥当性が示された。

なお、貯水前の自然地下水位(観測水位)は 10^{-5} cm/s オーダーの領域の上部に位置する傾向が見られる。

5. 残留率の推定解析

(1) 降雨条件

残留率は貯水位降下前までの降雨の影響を受けると考えられる。そこで、本解析では貯水位降下開始直前まで集中豪雨を与えた後に貯水位降下を行うものとした。この貯水位降下前までに与える降雨を「先行降雨」と呼ぶものとし、その降水量は既往の観測結果から最大値を選択した。平成元年(1989年)4月から平成17年(2005年)1月までの蓮ダム観測所における降水量の最大値は以下の通りである。

- ① 月最大降水量は1992年8月の1,275mm/月であり、約1/30年確率相当となる。その内、最大連続降水量は8月17日~8月20日の949mm/4日である。
- ② 日最大降水量は2004年9月29日の546mm/日である。

これらの結果から、貯水位降下前までの降雨条件は累積最大パターン(図-10、以下、先行降雨1)と日最大パターン(図-11、以下、先行降雨2)の2パターンとした。また、比較のため先行降雨が無いケースについても実施した。

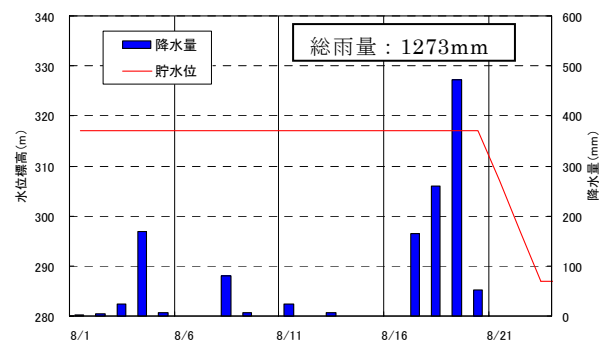


図-10 先行降雨1(累積最大降雨)の降雨パターン

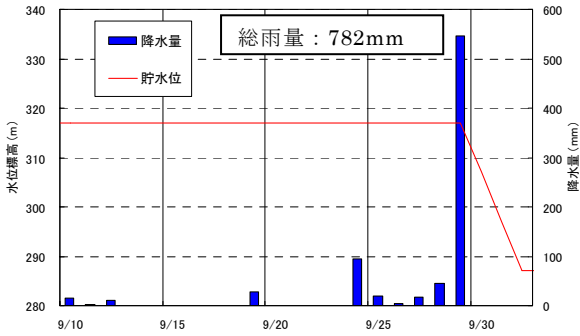


図-11 先行降雨 2(日最大降雨)の降雨パターン

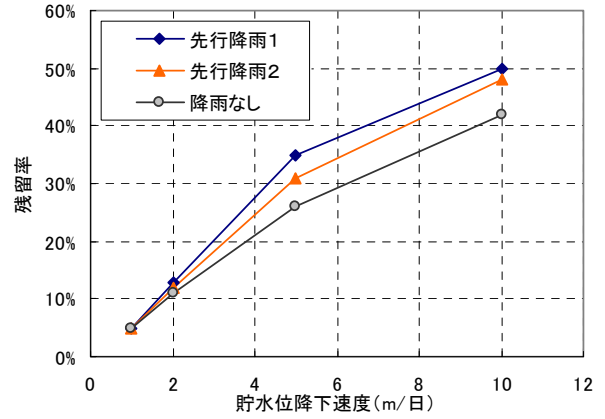


図-13 貯水位降下速度と残留率の関係

(2) 貯水位変動条件

貯水位変動条件は、実際の運用に合わせて表-2に示す通りとし、このときの残留率を推定する。

表-2 貯水位変動条件

貯水位変動	EL=317m(サーチャージ水位) ↓ EL=289m(夏季制限水位 299m - 10m)
貯水位低下量	28 m
貯水位降下速度	1m/日, 2m/日, 5m/日, 10m/日

(3) 予測解析結果

解析結果として、先行降雨 1、貯水位降下速度 10m/日のケースにおける貯水位低下後の地下水形状を図-12に示す。また、先行降雨および貯水位降下速度を変えた場合の推定残留率を図-13に示す。

10m/日で貯水位降下を実施した場合、先行降雨 1(累積最大降雨)での残留率 50%、先行降雨 2(日最大降雨)で残留率 48%と推定された。

以上の結果から、当地区においては、既往最大相当(約 1/30 年確率)の降雨後に貯水位降下を行う場合、貯水位降下速度 10m/日以下であれば残留率は 50%以下になると推定され、結果的にこの条件に従った放流であれば当地すべりは安定である推定された。

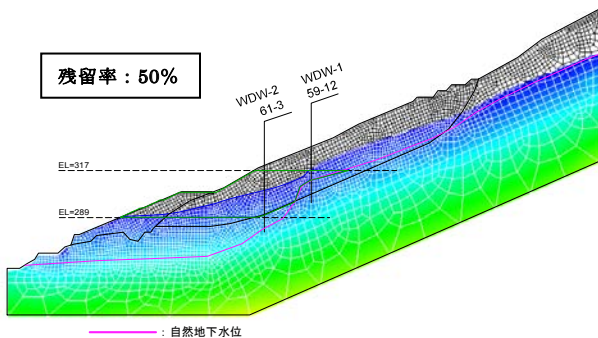


図-12 貯水位降下後の地下水位分布図 (先行降雨 1、降下速度 10m/日)

6. まとめ

残留率の予測解析から得られた結論を以下に示す。

- ① 先行降雨を考慮した解析では、先行降雨を考慮しない場合と比較して、残留率は最大約 10%程度高くなると推定された。
- ② 貯水位降下速度が大きいほど先行降雨の影響が大きくなり、貯水位降下速度が遅い場合には、先行降雨の影響は少ない。
- ③ 数日間の累積降雨(先行降雨 1)のほうが、1日集中型の豪雨(先行降雨 2)より、若干ではあるが残留率が大きいことが示された。
- ④ 先行降雨の有無によらず、貯水位降下速度が大きくなるにつれ残留率も大きくなる。

なお、実際の貯水位変動は、集中豪雨により急激に貯水位が上昇し、その後すぐに放流によって急低下することになるが、本解析では満水位の状態ですべて十分時間が経ってから貯水位降下を行っているため、地下水位が最も高く地すべり発生危険度が高い条件での推定結果であるといえる。

以上より、先行降雨の影響により残留率は変化し、とくに急降下時に残留率が大きくなる傾向が示された。よって、今後、貯水位急降下時の残留率を浸透流解析にて推定する場合には、先行降雨を考慮した解析を行うべきであり、また、実際の貯水位操作に合わせた解析を実施し、その時の残留率から地すべりの安定性を評価することが望ましい。

謝辞：本検討にあたり、国土交通省 中部地方整備局 蓮ダム管理所の関係各位には、多大なご協力と貴重な資料のご提供をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局開発課 監修：貯水池周辺の地すべり調査と対策、山海堂、1995.
- 2) 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、地すべり第36巻、第4号、pp.61-69、2000.
- 3) 江田充志、鈴木将之、藤澤和範、石井靖雄、檀上裕司：浸透流解析による貯水位周辺地すべりの残留率設定に関する研究、日本地すべり学会 第44回研究発表会概要集、pp.117-118、2005.