

Ⅱ-13 浸透流解析による残留間隙水圧推定時の透水係数の設定に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤澤和範、鈴木将之

【要旨】

浸透流解析等を用いて貯水池周辺斜面における残留間隙水圧を算定する手法を提案することを目的として、ボーリング孔および立坑を用いた現場透水試験、地下水位観測、およびそれらの結果に基づく浸透流解析を実施した。地下水位観測とその解析の結果、飽和地盤の透水試験により得た透水係数を用いて浸透流解析を行い、降雨時の水位分布変化を再現するパラメータを用いることで、貯水位降下時における水位が十分な精度で計算できることがわかった。さらに、立坑を用いた浸透実験を行い、ボーリング孔周辺を飽和状態にして単孔式透水試験により透水係数を求めた結果、ボーリング孔を挟む2本の立坑に注水することにより立坑に挟まれた地盤の水位を制御し、単孔式透水試験を実施すれば、不飽和地盤の原位置において飽和透水係数を測定しうることがわかった。

キーワード：現場透水試験、不飽和地盤、観測、立坑、浸透実験

1. はじめに

貯水池周辺地すべり対策を実施する際には、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。このため、残留間隙水圧の設定をより合理的に行い、地すべり斜面の安定性を的確に評価できる手法が望まれている。そこで、浸透流解析等を用いて残留間隙水圧を算定する手法を提案することを目的として、調査を実施した。

残留間隙水圧の残留率には、貯水位下降速度や水際から自然地下水位までの距離等のほかに、地すべり土塊の性状、すなわち透水係数や有効間隙率等が影響を及ぼすと考えられている¹⁾。対策工の設計にあたり、これらのデータが十分得られていない場合、安全側の判断として残留率を50%とすることが一般的である²⁾。

しかし、貯水位降下時の斜面地下水位・水圧の観測値をまとめた報告^{1), 3)}によると、実測に基づく残留率は、設計上一般的に用いられている50%を下回る事例が多い。このため、残留率を、対象地区の地形・地質条件、地すべり土塊の土質特性に応じて設定する手法の開発が求められている。

貯水池周辺斜面の地下水流動を対象に2次元非定常飽和不飽和浸透流解析を用いる場合、通常のボーリング調査による測線断面の土質・地質区分に対応する飽和透水係数と不飽和特性を割り当てる。この

際、多くのパラメータは試行錯誤により求めざるを得ない。しかしながら、未知量が多い上に、解析結果はパラメータ設定値により大きく左右され、例えば1オーダーの透水係数の違いが均質傾斜地盤のモデルにおいても残留率の数10%の違いをもたらす⁴⁾ことが知られている。

綱木¹⁾は湛水前に残留率を精度よく求めるための今後の課題として、浸透流解析に用いるパラメータの設定手法や詳細な計算手順を明らかにすること等を挙げている。すなわち、予測計算の再現性を確保するには、パラメータを決め結論を導くまでの手順を定式化する必要があることを指摘している。

本調査では浸透流解析等を用いた残留間隙水圧算定手法の確立に向け、地下水位・水圧観測ならびに現場透水試験とそれらの結果に基づく浸透流解析を行った。以下、貯水池周辺斜面における現場計測値に基づく地下水解析手法の提案に向け、観測と試験の解析を行った結果を報告する。

2. 調査対象地区の概要

現地調査は、運用段階にある宮ヶ瀬ダム KR-8 地区（図-1）において実施した⁵⁾。

KR-8 地区では、深礎杭が施工済みで現在孔内傾斜計等に累積的な変動はなく、ダム管理事務所が BVKR8-1 孔において孔内水位計1基、BVKR8-2 孔において孔内傾斜計1基と地盤傾斜計2基により観

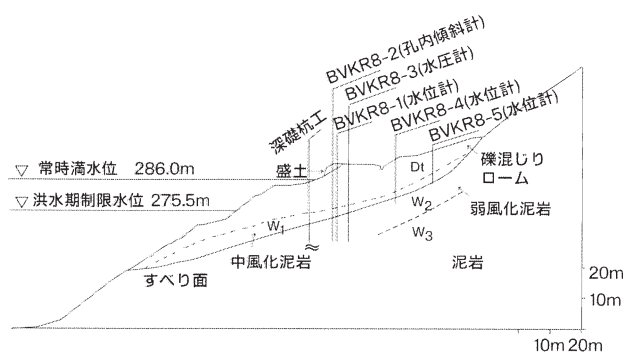


図-1 KR-8 地区の断面図

測を行っている。

地質は、泥岩(W3)、弱風化泥岩(W2)、中風化泥岩(W1)、および2次堆積の礫混じりローム(Dt)から構成される。風化泥岩(W1、W2)は、すべり面を境界に上部が中風化泥岩(W1)、下部が弱風化泥岩(W2)に区分される。この区分の考え方は、風化度合と、地形変換点等の地形的要因から移動土塊を判定する藤原⁶⁾による。

3. 調査方法

3.1 現地試験と観測

平成16年2月にBVKR8-3孔(25.0m)を清水掘り、同10月にBVKR8-4孔(15.0m)とBVKR8-5孔(10.0m)を清水掘りおよび無水掘りにて掘削し試験と観測を行った。8-4、8-5孔の地下水面上では、無水掘りにて掘削後孔内洗浄し、洗浄前後にカメラ確認を行った。

BVKR8-3孔の掘削中、飽和地盤における透水試験を6深度7回実施した。試験区間はいずれも裸孔とし区間長を50cmとした。各深度で定常法と非常法の両方の透水試験を実施し、定常法として8.0～8.5m、14.0～14.5m、18.0～18.5mでは注水法、9.0～9.5m、11.0～11.5mでは揚水法、15.0～15.5mでは注水法と揚水法の両方を実施し、試験方法の適用性を検討した。定常法の定常水位と非常法の初期水位はボーリング孔の孔口とした。

BVKR8-3孔掘削にあたり、既存のBVKR8-1、8-2のボーリング柱状図に基づき、礫混じり砂質ローム層(Dt)と中風化泥岩層(W1)の境界を16.0mと見込んでいた。礫混じり砂質ローム層では揚水法透水試験も実施することを予定し、大きな孔径を準備することにした。そこで、地表～16.0mまではまず径86mmで掘削し、16.0～25.0mの間は注水法透水試験のみを実施することを予定して、径66mmで

掘削した。さらに、86mm掘削区間については、試験区間外から水が流入することを防ぐため、試験区間下端まで径86mmで掘削後、試験区間上端まで径116mmに拡孔して内径100mmのケーシングを建て込んだ。

貯水位の変動に伴う残留間隙水圧の発生状況を詳細に調べるため、透水試験後、BVKR8-3孔の8.0m、11.0m、14.0m、23.0mの各深度に間隙水圧計を埋設し、毎時観測を開始した。

BVKR8-4孔とBVKR8-5孔の掘削中、径66mm、区間長200cmの裸孔の試験区間をとり、不飽和地盤における定常法透水試験を6試験区間、飽和地盤における非常回復法透水試験を5試験区間でそれぞれ実施した。

ボーリング孔を利用する透水試験法で、不飽和地盤を対象とする場合は、現在基準化された方法がない。BVKR8-3孔の飽和地盤を対象とした透水試験の結果、注水法の透水係数値が小さくなる原因として、注水によって試験区間に与える水頭差が過大なのが一因と考えた。そこで、BVKR8-4、8-5孔透水試験では、地盤工学会の地盤調査法⁷⁾で基準化された方法をもとに、各試験区間に対し複数の孔内水位を設定して、透水係数値への影響を調べることにした。BVKR8-4、8-5孔を用い、孔内の水深を60cm、90cm、200cmに設定した不飽和地盤での透水試験、同じく200cm、300cm、400cm、500cmに設定した飽和地盤での非常回復法透水試験を行った。

地下水面上で実施した透水試験については、「単孔を利用した透水試験方法」の定常法の算定式により、地下水面上で実施した透水試験については、「単孔を利用した透水試験方法」の定常法の算定式と、「締め固めた地盤の透水試験方法」の算定式により、透水係数を計算した。地下水面上では、「単孔を利用した透水試験方法」の算定式は適用対象外であるが、参考のため計算した。

地下水面上で実施した透水試験の透水係数計算においては、孔底の位置を地下水位とした。これは、孔のごく近傍ではほとんど飽和状態と考えられるのに対し、注水によって孔内水面から地下水面上までの鉛直方向数mにわたって飽和するとは考えられないので、浸透流量がごく小さい限りにおいて、確実に飽和に近い部分との水位差を計算に用いることにしたものである。

自由水面の形状を調べるため、透水試験後、BVKR8-4孔とBVKR8-5孔に水位・導電率計を設置

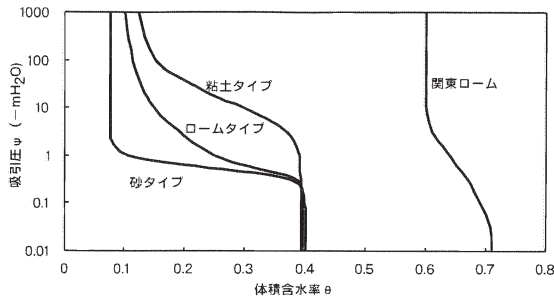


図-2 不飽和領域における $\theta - \Psi$ の関係⁷⁾

し、毎時観測を開始した。

3. 2 浸透流解析

解析は、現場透水試験による透水係数を用い、平成16年10月7日0時から同10月31日0時までの、降雨と貯水位変化を含む水位・水圧観測データの再現を行った上で、得られたパラメータを用い、平成10年9月16日から同10月25日までの貯水位降下時の水位を計算するという手順で行った。解析には Dtransu2D の浸透流解析部を使用し、解析時間を1日ごととし、1日を100分割し計算した。Dtransu は岡山大学西垣誠教授らが開発した飽和・不飽和・浸透流・移流分散解析プログラムで、浸透流解析部のコードは UNSAF と大部分同一である。基礎方程式は以下の通りである。

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

ここで、 $K_x(\Psi)$: 水平方向の飽和透水係数、 $K_z(\Psi)$: 鉛直方向の飽和透水係数、 Ψ : 圧力水頭、 θ : 体積含水率、 α : 飽和で1、不飽和で0の係数、 S_s : 比貯留係数、 t : 時間 である。

浸透流解析のパラメータは以下のように定めた。

3. 2. 1 各地質の材料特性

飽和透水係数は、現場透水試験により算出された透水係数の範囲付近の値を設定した。すなわち、 D_t は $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、 $W1$ は $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、 $W2$ は $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ である。

不飽和浸透特性については試験値がないため、Herath⁸⁾による関東ロームのヒステリシスのないパラメータを用いた。Harvercamp 型の体積含水率 θ -吸引圧 Ψ の関係式

$$Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_0 - \theta_r) = \alpha / (\alpha + (\ln(\Psi))^{\beta})$$

⁸⁾ のパラメータを、 $\theta_0 = 0.707$ 、 $\theta_r = 0.598$ 、 $\alpha = 72.8$ 、 $\beta = 3.92$ に、Irmay 型の有効飽和度 Se -不飽和透水係数 K_r 関係式

$$K_r = Se^n$$

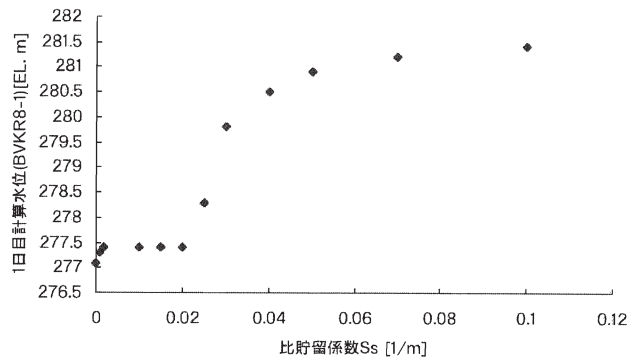


図-3 比貯留係数と平成16年10月水位再現計算1日目の水位との関係

のパラメータを、 $n = 3.11$ とした (図-2)。

有効間隙率は、コア観察から5%程度以下と見積もり、0.03を用いた。

比貯留係数は、飽和領域で単位の水頭変化によって単位体積の多孔体から放出される水の量と定義される。水頭変化による地盤と水の圧縮性が無視できるならば、定義から比貯留係数は0となるが、その他のパラメータ設定値の誤差とモデルの制約のため、0とした結果が最善とは限らない。

このため、比貯留係数については Dtransu のマニュアル⁹⁾に引用されている塑性粘土の値 $2.0 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ を初期値として感度を調べ、計算結果が水位観測データによくあうものを採用するという方法によった。

本事例においては、比貯留係数を大きくすると、降雨に対する水位上昇量を抑えることができた。しかし、降雨がなくても非定常計算1日目の計算水位が高くなってしまいうという好ましくない効果もあり、適切な数値の設定が必要であることがわかった。図-3に示す比貯留係数と1日目(平成16年10月8日)の計算水位との関係により、1日目の計算水位が上昇せず、かつ降雨後の水位上昇量が実測値に近いものとなるように、比貯留係数を $2.0 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ とし、この値を平成10年貯水位降下時の地下水位の順解析に用いた。

3. 2. 2 非定常計算開始時の水頭分布

以下の条件での定常解析により得られた水頭分布をモデルに入力した。

初期条件として、定常計算開始時点では水頭固定境界を除く全節点に圧力水頭ゼロの初期値を与えた。境界条件として、非定常計算開始時点の貯水位と実測 BVKR8-1 水位を満足する水面形をなすように、流量固定境界をモデル外縁の節点に設定した。現地の地表面に湧水や流水地形は見られないので、地表

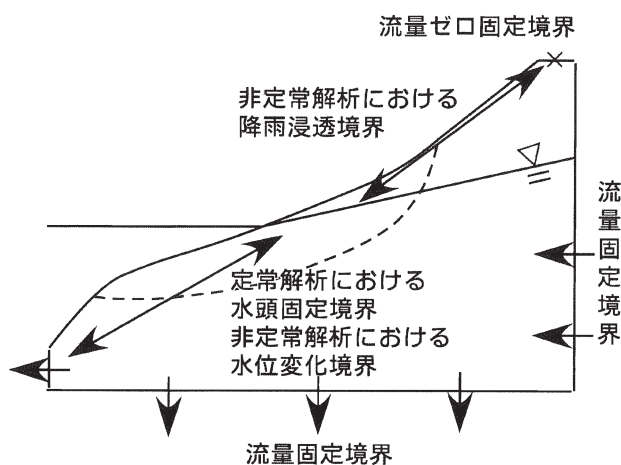


図-4 モデルの境界条件

面が飽和しないことを条件とした。モデルへの流入・モデルからの流出量は未知量であるが、本解析においては上方斜面長と降雨量を参考に、また地表面が飽和しないこと、地下水圧分布が概ね地表面地形に沿った形状となることを条件に探索して、 $0.3 \text{ m}^3/\text{日}$ に設定した。

3. 2. 3 降雨浸透境界

現地では道路の舗装および湖岸法面への吹きつけがなされており、地すべり土塊の中央部から下部では実質的に降雨の地表面からの浸透はないものと判断した。そこで非定常解析における降雨浸透境界は、地すべり土塊上部と斜面上部の要素の面に対して設定した(図-4)。

降雨問題を解く場合、西垣ら⁹⁾は、地表面近傍の深度方向節点間隔をできるだけ細かくとるよう指示している。どの程度細かくとるかについて、地表面付近の土壌水流動問題に対しては、5cm以下という結論¹⁰⁾が出されている。しかし2次元モデルの規模を考えると、地表面近傍で膨大な数の要素を作るのは得策ではないので、地層分布境界を表現できる程度の要素分割(節点数2055、要素数3607)を行っている。

3. 2. 4 降雨量

非定常解析における降雨量データについて、西垣ら⁹⁾は、降雨強度の急な立ち上がりは解の収束を悪化させるので、降雨が始まる時間では時間分割を細かくすることを推奨している。すなわち、計算上は次第に降雨強度が増加する降雨形が望ましく、このためプログラムでは、入力した時間-降雨強度の表から内挿補完して連続した降雨強度時系列を作成している。したがって、日雨量を時間-降雨強度の表に1日ごとにそのまま入力するとモデルでの総雨量が過

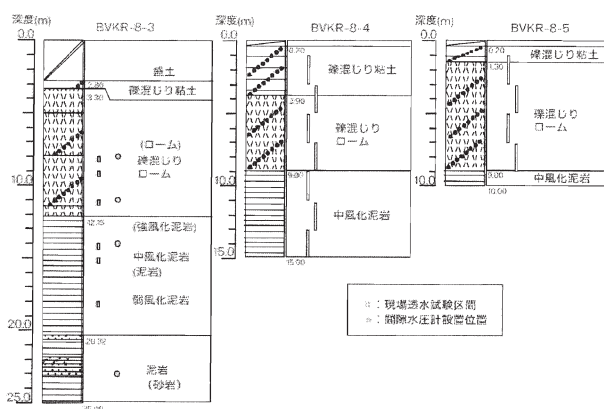


図-5 BVKR8-3、BVKR8-4、BVKR8-5 柱状図

大となる。そこで、解析では例えば24時間の降雨量が24mmであった場合、雨量強度を0時は0mm/h、24時は2mm/h、24.001時は0mm/hというようにし、のこぎり型の降雨形で入力した。

4. 結果

4. 1 掘削結果

柱状図を図-5に示す。礫混じりローム層(Dt)と風化泥岩層(W1)の境界はBVKR8-3孔では12.15m、BVKR8-4孔とBVKR8-5孔ではともに9.00mであった。

礫混じりローム層(Dt)は、不均一な2次堆積物で混入物の多いロームが主で、一部にやや均一で比較的固結しているロームも含む。

風化泥岩層(W1、W2)は、コア長1~5cm程度の片状コアを主体とし、亀裂沿いに褐色化および軟質化が認められる。また、岩片も風化によりやや軟質化している。

泥岩層(W3)は、棒状コアを主体とし、一部片状部分を挟在する。亀裂沿いの風化は軽微もしくは認められない。

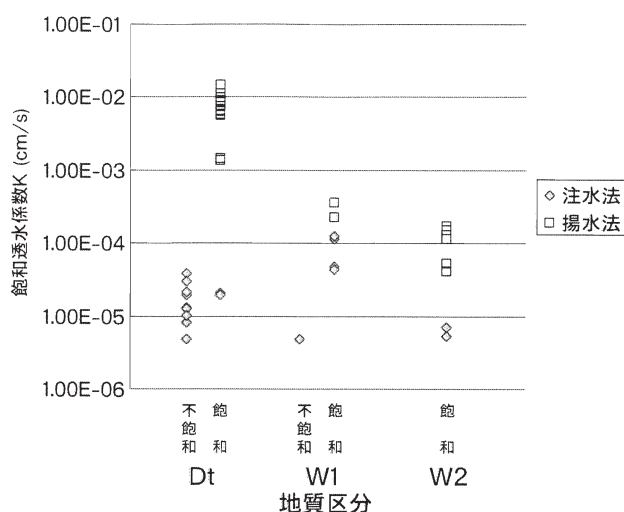
4. 2 現場透水試験結果

現場透水試験結果を図-6に示す。

BVKR8-4、8-5孔透水試験時は、マッドケーキによる目詰まりの状況をいくらか定量的に把握することを目指してカメラ撮影も行った。しかし、ローム層内では、マッドケーキ付着部と非付着部で孔壁の濡れ具合が若干異なるように見え、洗浄前後の差から洗浄の効果もある程度認めるものの、目詰まりの状況の可視化にまで至らなかった。

4. 2. 1 飽和地盤における現場透水試験結果

BVKR8-3孔透水試験実施期間中、毎日の作業開始



図一6 飽和地盤および不飽和地盤における現場透水試験結果

前時点の孔内水位は7.75m付近でほぼ一定であった。

中風化泥岩中の同一深度で注水・揚水の両法によって試験を行った1深度(15.0~15.5m)を含め、注水法による透水係数は揚水法による透水係数に比べ小さな値である。

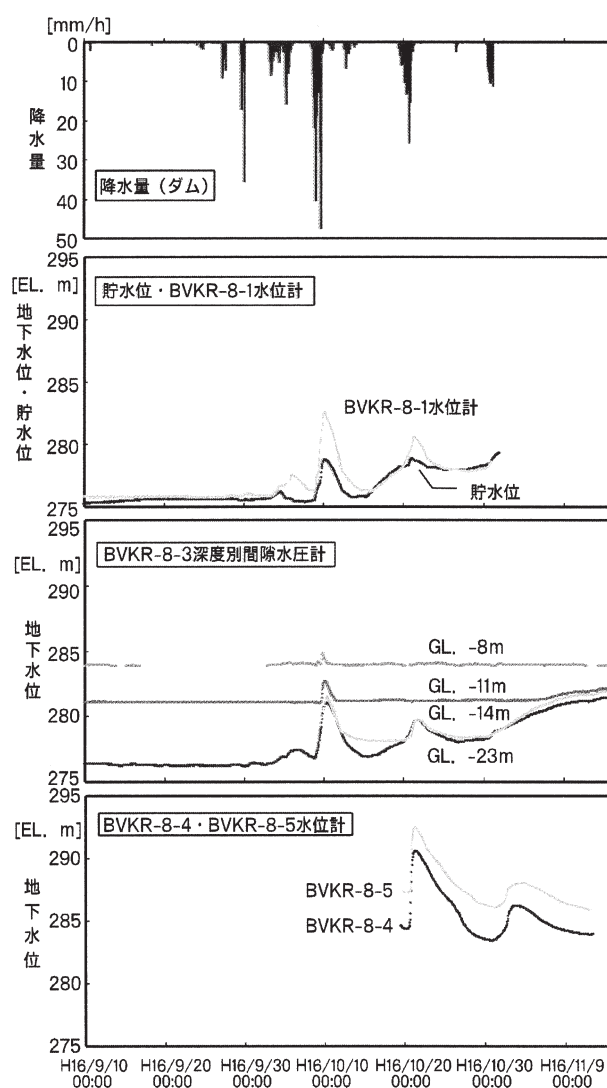
BVKR8-4、8-5孔を用い、孔内の水深を200cm、300cm、400cm、500cmに設定し飽和地盤での揚水法透水試験を行った結果、少なくとも500cm以内のときは、孔内水深の設定は透水係数に影響しないことが確かめられた。BVKR8-4、8-5孔の地下水面下では注水法を実施していないので、飽和地盤における注水時の孔内水深の設定の影響については確かめられていない。

4. 2. 2 不飽和地盤における透水試験結果

地下水面上で注水法による現場透水試験を行った結果、ボーリング孔への注水量がおおよそ0.5L/分未満であれば、1時間弱の試験時間中、ボーリング孔からの浸透流量は孔内水深に関わらずほぼ一定であることがわかった。

そこで、透水試験後翌朝までの孔内水位データを用い、試験区間の長さを一定、すなわち翌朝の水深とし非定常法により透水係数を計算した。単孔・非定常法の数値は、試験時間中に計測した定常流量に基づく単孔・定常法の数値と近い値であり、締め固めた地盤の透水試験法の数値との差も半オーダー以内にある。

すなわち、各試験における浸透流量はそれぞれ異なるが、1時間弱の試験時間中および試験後翌朝までの期間における、孔内水深の変化速度が小さいた



図一7 平成16年台風21・22・23号襲来時の深度別地下水頭、貯水位および孔内水位

めに、孔内水深の時間変化は透水係数に影響していないことになる。

したがって、浸透流量が小さい限りにおいては、注水がもたらす飽和域の広がりにはボーリング孔のごく近傍にとどまっており、計算に用いる地下水水位を孔底の位置とする仮定は概ね妥当なものとする。地下水面上で注水法により実施した透水試験の結果は、単孔を利用した透水試験方法の算定式による透水係数、締め固めた地盤の透水試験方法の算定式による透水係数とも、飽和地盤における透水係数より3オーダーほど小さく、飽和浸透流の透水係数とするには小さすぎる。

4. 3 深度別間隙水圧・地下水水位観測状況

台風22号により、平成16年10月9日のダム流域平均雨量は283.1mmに達した。貯水位は10月8日

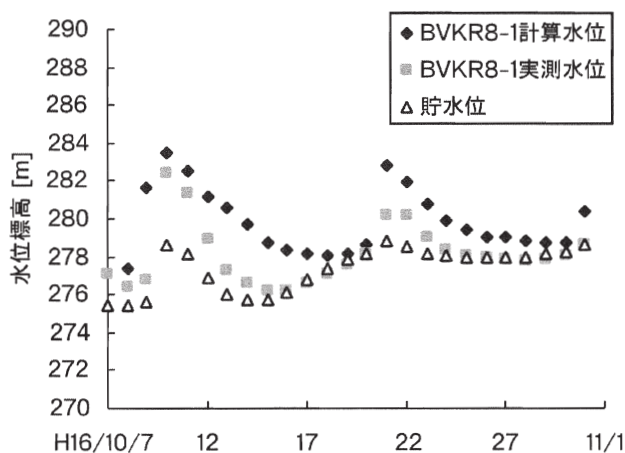


図-8 平成16年10月のBVKR8-1水位再現計算結果

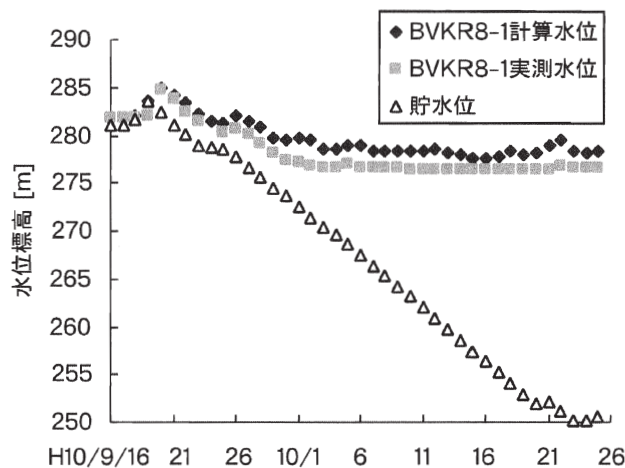


図-10 平成10年貯水位低下時のBVKR8-1水位順解析結果

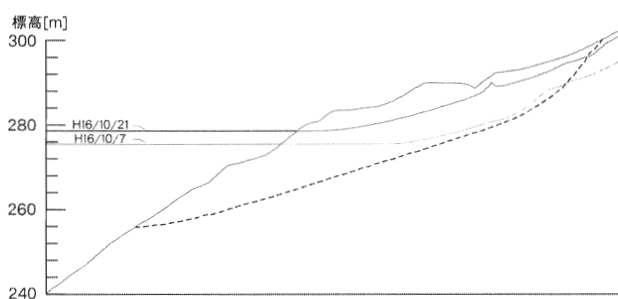


図-9 平成16年10月の水位分布計算結果

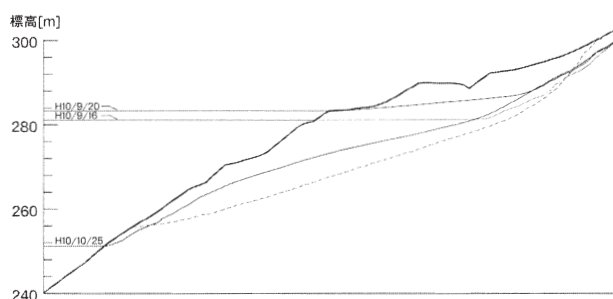


図-11 平成10年貯水位低下時の水位分布順解析結果

22時に標高275.520mであったが、10日4時に同278.720mまで上昇した。同時期に、BVKR8-1孔の水位とBVKR8-3孔の深度8m、11m、14m、23mの地下水頭が上昇した(図-7)。

台風23号による、10月19日8時から21日8時までのダム流域平均雨量は、255.1mmであった。このときは、BVKR8-3孔の深度8m、11mの地下水頭に変化は見られないが、BVKR8-1、8-4、8-5孔の水位とBVKR8-3孔の深度14m、23mの地下水頭は、貯水位の上昇が停止した後も上昇しピークに至っている。

4.4 水位再現計算結果

比貯留係数を $2.0 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ とした平成16年10月のBVKR8-1水位再現計算結果を図-8に示す。10月21日、31日のBVKR8-1計算水位は、BVKR8-1実測水位に比べ高めになっている。しかしながら、図-7のBVKR8-4、8-5孔実測水位によると、10月21日の両孔の水位は290m程度に上昇している。また、11月2日の両孔の実測水位は287m程度に上昇しており、計算水位の上昇時期は実測より2日早い

が、水位上昇の現象そのものは再現されている。

したがって、図-9に示す10月21日の計算水位分布は妥当であり、再現計算は地すべり土塊全体では十分な精度であるものと判断した。水位の上昇時期が実測より早いのは、降雨形の与え方のほか、降雨開始前の不飽和水分分布が実際と異なる、すなわちモデルに用いた不飽和特性が地盤の不飽和特性を完全に模したのではないことに起因すると考える。

BVKR8-1孔の水位および8-3孔の水圧は貯水位に極めて近い値となることがあり、貯水池に近い両孔付近では設置済の深礎工が孔内水位に影響を及ぼしている可能性も捨てきれない。したがって、個々の箇所の水位変化に完全に合わせるのではなく、地盤の飽和透水性が均質という仮定の下で土塊全体の水位分布が無理なく再現できているかが重要と考える。

4.5 貯水位低下時の地下水位計算結果

平成16年10月の地下水位再現計算で得られたパラメータを用い、平成10年9月16日から同10月25日までの貯水位低下時の水位を計算した結果を

図-10、図-11 に示す。貯水位の上昇および速度変化を含む降下による、水位への影響が的確に計算されていると考える。

5. 立坑浸透実験

前章までは、現場透水試験ならびに地下水位・水圧観測とその結果に基づく飽和・不飽和浸透流解析を行った。

その結果、飽和地盤の透水試験により得られた透水係数を用いて浸透流解析を行い、降雨時の水位分布変化を再現するパラメータを用いることで、貯水位降下時における水位が十分な精度で計算できるといふ結論を得た。

以下では、立坑を用いた浸透実験とその解析結果を述べ、不飽和地盤でのボーリング孔を用いた透水試験法について検討を加える。

6. 実験方法

実験は国土技術政策総合研究所構内の屋外実験ヤードにおいて実施した。

6. 1 ボーリング孔透水試験

掘削長 2.0m、掘削径 66mm のボーリング孔 B-1 および B-2 を掘削した (図-12)。B-1、B-2 とも深度 0.0~1.7m 区間は孔壁崩壊を避けるため無水掘り、ストレナ付近の深度 1.7~2.0m 区間は清水掘りとした。

掘削長 3.0m、掘削径 66mm のボーリング孔 B-3 孔を掘削し、その間 GL-0.5~1.0m、GL-1.5~2.0m、GL-2.5~3.0m の試験区間で定常注水法により単孔式透水試験を実施した。試験区間の径は 66mm であり、その他は径 66mm で掘削後ケーシングを追い込み径 86mm にて仕上げた。B-4 孔は掘削長 3.0m、掘削径 66mm で無水掘りにて掘削した。

B-1、B-2、B-3 孔には先端 0.1m を有孔とした VP-50 管を挿入して保孔した。保孔管と孔の間隙は先端 0.1m については砂を、それより上部についてはベントナイトを用いて充填した。B-4 孔はケーシングにて保孔した。

B-3 孔不飽和地盤での透水係数を求める式は、地下水位が未知でも計算可能という意味において不飽和帯での適用が可能である、パッカー法の解析式によった。

$$k = (Q/2\pi L H) \times \ln(L/r)$$

ここに k = 透水係数 (cm/s)

Q = 注入量 (cm³/s)

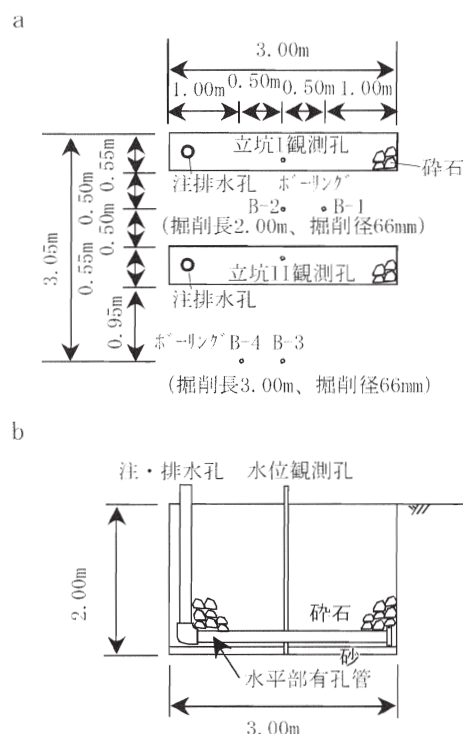


図-12 立坑浸透実験の平面図および断面図。a: 実験位置平面図。b: 立坑断面図。

L = 注入区間長 (cm)

H = 全水頭 (cm)

r = 試験孔の半径 (cm)

6. 2 立坑掘削

立坑の仕様は地下水涵養に関する文献^{11), 12)}を参考に、幅 0.55m、長さ 3.0m、深さ 2.0m とし、バックホウを用いて掘削した。地下水位を短時間で安定させることをねらい、立坑を 1.0m の間隔を置いて 2 本掘削した (図-12)。立坑の底面には漏水防止のためベントナイトを薄く散布し、その上に不陸調整のため砂を厚さ 0.1m 敷き、水位観測孔用の VP-50 管および注・排水孔用の VP-150 管 (端部のふたおよび曲部を含む) 各 1 本を建て、VP 管の外部を規格 25mm 以下の砂利で埋め戻した。水位観測孔用の VP-50 管は下端 0.1m を開口率 5% の有孔管とした。注・排水孔用の VP-150 管は、垂直部の長さを 2.5m、水平部の長さを 2.5m とし、水平部を開口率 5% の有孔管とした。掘削中立坑内に水面は生じなかった。

6. 3 立坑透水試験

立坑からの浸透により人為的に地下水位を設定し、自然状態では不飽和の地盤においてピエゾメーター法透水試験を精度良く実施できるかの検討を行った。はじめに試験地盤を飽和させるため、立坑の注・排水孔から注水を行い、立坑内の水位を地表面まで上

昇させた。立坑内への注水と、立坑内、B-1～B-4 孔における水位の毎時自動観測を継続し、立坑内の水位を GL-0.2m に 50 時間維持した。地表の標高は 10.1m である。

立坑内の水位を GL-0.2m にあわせた状態、および立坑の注・排水孔から排水して水位を下げた状態で、B-2 孔において孔底から 0.1m の区間を試験区間としてピエゾメーター法透水試験を実施した。試験時間中立坑の水位、注排水量、B-1 孔の水位を観測した。透水試験は水位 GL-0.2m、GL-1.0m で回復法を各 1 回、水位 GL-1.5m、GL-1.75m で定常注水法を各 1 回それぞれ実施した。定常注水法は、保孔管の立ち上がりの上端に水面を維持するように注水して行った。

立坑の水位の制御は注・排水孔への水の供給と注・排水孔内のポンプによる排水を併用して行った。

非定常回復法の透水係数は地盤工学会基準 JGS1314-1995 の式により得た。定常注水法の透水係数は、次式により得た。

$$k = \frac{Q}{2\pi hL} \cdot \ln \left(\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right)$$

7. 実験結果

立坑掘削後の観察により、現場の土質は礫質土砂で、盛土のためほぼ水平構造であることが確認された。表層から層厚 20～30cm は礫混じり土砂、その

表-1 立坑浸透実験における現場透水試験結果および解析に基づく透水係数計算結果

a. 現場透水試験結果

地盤条件	試験区間 (GL-m)	試験法	透水係数 (cm/s)
① 不飽和	0.5-1.0	定常注水法	1.25×10^{-5}
② 不飽和	1.5-2.0	定常注水法	1.34×10^{-5}
③ 不飽和	2.5-3.0	定常注水法	6.44×10^{-5}
④ 水位GL-0.2m	1.9-2.0	非定常回復法	7.76×10^{-5}
⑤ 水位GL-1.0m	1.9-2.0	非定常回復法	1.23×10^{-4}
⑥ 水位GL-1.5m	1.9-2.0	定常注水法	1.23×10^{-4}
⑦ 水位GL-1.75m	1.9-2.0	定常注水法	1.87×10^{-4}

b. 透水係数を 1.3×10^{-4} cm/s とした解析結果から透水係数を再算出した結果

地盤条件	試験区間 (GL-m)	試験法	透水係数 (cm/s)
④ 水位GL-0.2m	1.9-2.0	非定常回復法	8.9×10^{-5}
⑤ 水位GL-1.0m	1.9-2.0	非定常回復法	9.3×10^{-5}
⑥ 水位GL-1.5m	1.9-2.0	定常注水法	1.6×10^{-4}
⑦ 水位GL-1.75m	1.9-2.0	定常注水法	1.6×10^{-4}

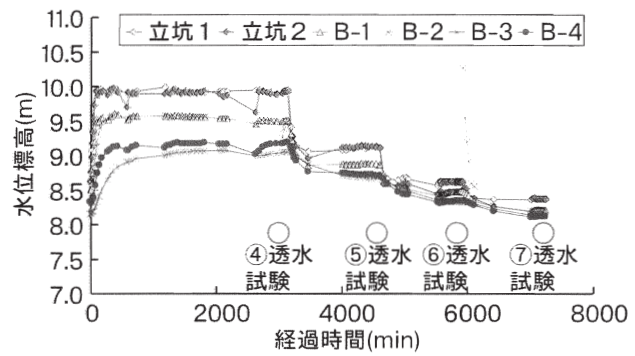


図-13 立坑浸透実験中の水位

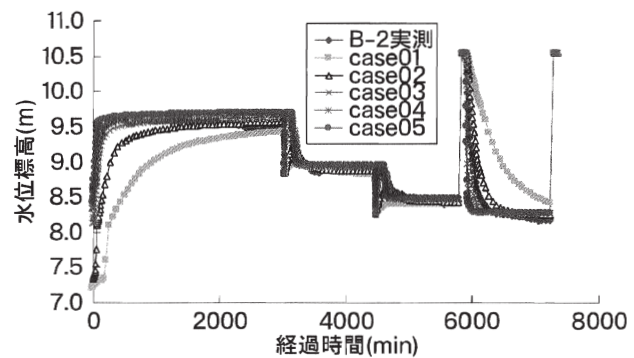


図-14 B-2 孔における実測水位と計算水位

下位に層厚 20cm 程度の礫混じりシルト層が分布し、その下位に再び層厚 10cm 程度の砂を挟み、それ以深 3m まで礫混じり砂質シルト層が分布する。礫混じり砂質シルト層は、コンクリート破片、材、鉄板、ビニールなどを含む。これら異物を含むものの、礫質土砂としては均質な土層と判断された。

ボーリング孔掘削中の孔内、および立坑掘削中の立坑内に水面は生じなかった。このため地下水位は GL-3.0m (EL7.1m) 以深であり、実験ヤードから約 50m 離れた池の水面とほぼ同じ約 EL6.2m 付近にあると判断された。

現場透水試験は表-1(a)に示す①から⑦の順に行った。①～③の不飽和地盤での単孔式透水試験の結果、深度 2m までの透水係数として 1.3×10^{-5} cm/s が得られた。

立坑内および各ボーリング孔の水位は立坑注水開始後およそ 1000 分でほぼ定常状態となった。水位が定常状態となったことを確認後実施した④～⑦の単孔式透水試験の結果、①～③の試験に比して約 6 倍から 10 倍の透水係数値が得られた。④～⑦の試験は同一試験区間で行ったが、地下水位の高い条件において回復法で実施した結果 (④) の方が地下水位の

低い条件において注水法で実施した結果 (7) よりやや小さな透水係数値となった。

8. 解析方法

掘削の結果、現場の土質はほぼ水平構造の盛土であることが確認された。また立坑透水試験の間、B-1、B-2 孔の孔内水位はほぼ同じであった。そこで、2本の立坑に挟まれた空間の水位は、立坑の水位を境界条件として決定できるものと仮定し、まず立坑の内側に位置する B-2 孔の孔内水位を再現することを解析の目標とした。

B-2 孔水位再現解析には Dtransu2D の浸透流解析部のうち、軸対象モデルを使用した。Dtransu2D の軸対象モデルは、土質が水平構造である現場を対象に、モデルの中心に位置する井戸の揚水・注水条件を境界条件として設定し、透水試験の再現解析を行うためのモデルである。一方、立坑の外側に位置する B-3 孔の水位再現解析には、鉛直 2 次元断面モデルを用いた。

解析領域内の水理物性値は均一とした。透水係数は、①～③の透水試験結果の代表値である $1.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ を初期値とし、case ごとに設定してパラメータ探索を行った。有効間隙率、非貯留係数は、沖積・砂層の揚水試験による文献値を参考とし、全 case 一定の 15%、 $1.0 \times 10^{-6}/\text{cm}$ にそれぞれ設定した。

境界条件は以下の通り設定した。B-2 孔より 50m 遠方の解析領域端に EL6.15m の水位固定境界を設定した。立坑の壁面は時間-水位指定境界を実験データに合わせ設定した。B-2 孔の境界条件は、軸対称モデルでは井戸条件、初期水位指定、注水法では孔内水位固定とし、鉛直 2 次元断面モデルでは水位を固定しない不透水境界とした。今回の解析では、立坑の壁面は水位固定境界もしくは不透水境界として扱っており、立坑からの浸透水量を流量境界条件とする解析は実施していない。

9. 解析結果

軸対称モデルによる解析の結果、立坑への注水開始から透水試験前、および④～⑦の透水試験時における B-2 孔の水位は、透水係数 $k = 1.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ (図-14 中の case02) とするとよく再現できることがわかった。さらに、この解析結果に透水係数を求める式を再度適用すると、得られる透水係数は、設定透水係数 $k = 1.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ に対し-31～+26%と狭い範囲に入っており (表-1(b))、現場透水試験とその結

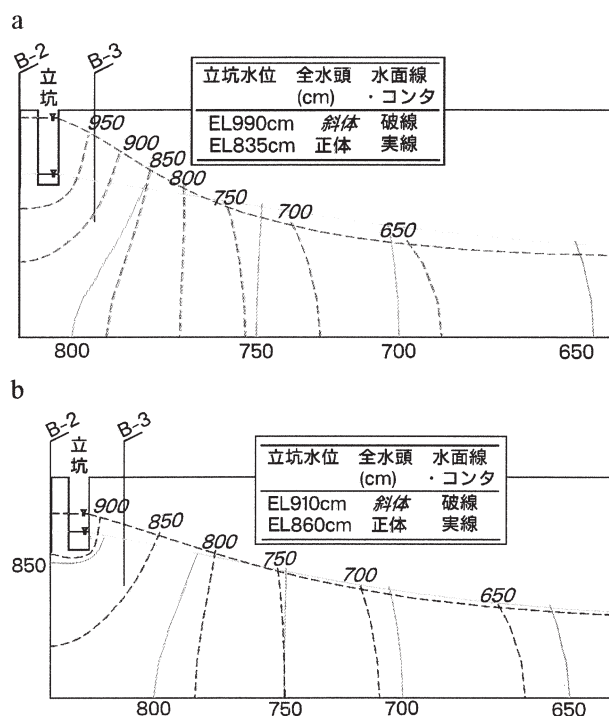


図-15 立坑からの浸透状況の鉛直 2 次元断面解析結果。a: 実験開始 3030 分後 (④透水試験開始前、立坑水位 EL990cm) と 5916 分後 (⑦透水試験開始前、立坑水位 EL835cm) における地下水面と全水頭のコンタを示す。b: 実験開始 4470 分後 (⑤透水試験開始前、立坑水位 EL910cm) と 5853 分後 (⑥透水試験開始前、立坑水位 EL860cm) における地下水面と全水頭のコンタを示す。

果の解析は精度よく行われたことを示唆するものとなっている。

立坑の外側に位置する B-3 孔の計算水位は、軸対称モデルでは EL 約 785cm が最高となり、実測の EL 約 900cm に対し大幅に低い。しかし鉛直 2 次元断面モデルによる解析の結果 (図-15)、B-3 孔の計算水位は EL 約 890cm となり、注水開始から最高値に達するまでの時間が約 3000 分で、実測の約 2000 分より遅いながら、立坑注水による B-3 孔の水位上昇量をほぼ再現することができた。

10. まとめ

本調査ではまず降雨後における水位分布の変化を観測しこれを解析した。その結果、飽和地盤の透水試験により得られた透水係数を用いて浸透流解析を行い、降雨時の水位分布変化を再現するパラメータを用いることで、貯水位降下時における水位が十分

な精度で計算できるという結論を得た。

つぎに不飽和地盤に注水してボーリング孔の周囲を飽和状態にし、単孔式透水試験によって飽和透水係数を得る実験を行った。解析の結果、注水後の透水試験で得られた透水係数は、実験中の水位変化をよく説明しうるものであり、本実験手法により現場透水試験とその結果の解析が精度よく行われたことを示唆している。

11. おわりに

斜面に大規模な散水を実施することは現実的ではないので、貯水位・地下水位低下時の水分状態に近い状態で斜面の透水性の実測値を湛水前に得るには制約が多い。本報告では貯水池周辺斜面における地下水解析手法として以下のように提案する。

- ・飽和地盤の透水係数が得られている場合は、複数の孔において水位観測を行い、なるべく顕著な降雨後における水位分布の変化を無理なく再現しうるパラメータをもって、湛水後の地下水位予測計算に用いる。
- ・不飽和地盤において飽和透水係数を得る1つの方法として、ボーリング孔を挟む2本の立坑に注水することにより立坑に挟まれた地盤の水位を制御し、単孔式透水試験を実施する。

不飽和地盤で一般的に行われる非定常透水試験の計測対象は、地表面における透水係数に限られている。これに対し今回の実験方法は、実質が単孔式透水試験であるから、立坑の壁面が自立する限りにおいて、不飽和域の任意の原位置における透水係数を対象としうると考える。

今後の課題は、立坑の奥行きを短くするなどによって浸透水量を縮減することと、細粒土以外を主体とする地盤やより深い位置における試験の実施である。岩盤地すべりに近い現場¹³⁾など、各種の不飽和斜面地盤において試験の適用性を検討していきたい。

参考文献

- 1) 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、ダム工学、Vol. 10、No. 1、pp. 33-41、2000
- 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、1995
- 3) 貞弘丈佳、平野 勇、阪元恵一郎、小池淳子：ダム貯水池周辺地すべりの貯水位変動による残留間隙水圧の実態、ダム工学、Vol. 10、No.2、pp. 116-127、2000
- 4) 貞弘丈佳、平野 勇、小池淳子、上原芳久：ダム貯水池周辺地すべりの浸透流解析による残留間隙水圧の検討、ダム工学、Vol. 11、No.1、pp. 5-13、2001
- 5) 鈴木将之、藤澤和範：ロームを主とする貯水池周辺地区における地下水解析、ダム技術、No.224、pp. 23-34、2005
- 6) 藤原明敏：地すべり機構解明のための地質判定について、地すべり、Vol. 8、No. 2、pp. 11-15、1971
- 7) 地盤工学会：地盤調査法、1995
- 8) Herath, S.: Unsaturated Zone Hydraulic Property Estimation and Application to Infiltration Facility Analysis, Doctoral dissertation submitted to Univ. of Tokyo, p. 305, 1987
- 9) 西垣 誠、三菱マテリアル株式会社、株式会社ダイヤコンサルタント：オイリアン・ラグランジアン飽和・不飽和浸透流-移流・分散解析プログラムデータ入力マニュアル(Ver. 1.11)、2002
- 10) 岡 太郎：自然丘陵地における土壌水流動、京大防災研究所年報、Vol. 26-B2、pp. 213-224、1983
- 11) 石崎勝義、北川 明、佐合純造、寺川 陽：地下水涵養技術とその応用、月刊建設、pp. 46-53、1981
- 12) 雨水貯留浸透技術協会：雨水浸透施設技術指針〔案〕調査・計画編、1995
- 13) 双木英人、小池淳子：貯水池地すべりブロックの不飽和浸透特性の研究、独立行政法人水資源機構技術研究年報(平成15年度)、pp. 28-31、2004