

## ICT 施工を導入したロックフィルダムの施工管理方法の合理化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：水工研究グループ（水工構造物）

研究担当者：佐々木隆、佐藤弘行、坂本博紀

### 【要旨】

近年、我が国の社会資本整備において、施工の効率化や精度の向上、品質管理の合理化等を目的に ICT 施工の積極的な導入が推進されている。一方で、最重要構造物の一つであるロックフィルダムは求められる品質レベルは他の一般的構造物より高いため、ICT 施工の導入による品質管理の合理化までには至っていない。品質管理を合理化するためには、ICT 施工導入による施工プロセス管理の確実性向上に加え、盛立材料の粒度や含水比のばらつきによる、密度、遮水性などの盛立品質のばらつきを把握した上で、検討する必要がある。

平成 24 年度は、現場盛立試験を実施することにより、密度試験や透水試験結果に影響する要因を分析し、密度や遮水性の多点計測と現場での迅速な把握を行う観点から、任意の粒径以下に設定せずに全粒径レベルで管理できる管理項目を検討した。また、試験時間が長く施工の効率化の妨げになっている現場透水試験に関して、不飽和浸透流解析により短縮化する方法について、その精度向上のため、過剰間隙水圧、蒸発量の影響を分析し、試験時間短縮化の可能性について検討を行った。

キーワード：フィルダム、ICT 施工、品質管理の合理化、現場盛立試験、不飽和浸透流解析

### 1. はじめに

近年、我が国の社会資本整備において、施工の効率化や精度の向上、品質管理の合理化等を目的に ICT 施工の積極的な導入が推進されている。平成 20 年 7 月には「情報化施工推進戦略<sup>1)</sup>」が策定され、ダム分野においても ICT 施工の導入が重要であると位置づけられている。河川土工および道路土工等では、ICT 施工を施工管理に導入した場合、まき出し厚、締固め回数等、施工プロセス管理の確実性を向上させることができることから、密度試験等、締固め後の現場試験を省略する方針へ転換しており<sup>2)</sup>、建設業界全体としては盛土の品質管理は合理化・省略化が進んできている。

一方で、大量の貯水を行う最重要構造物の一つであるロックフィルダムに要求される品質レベルは他の構造物よりも高い。また、盛立材料の密度のほか遮水性も品質管理対象としており、密度と遮水性ともに設計上の重要性は大きい。このような理由から、ロックフィルダムの品質管理において、転圧回数等の工法規定管理のみをもって従来の品質管理と置き換えることは容易に許容できるものではない。しかし、社会資本整備予算が縮小され、ダムの設計施工においても従来以上の合理化が求められている現状において、ICT を利用した施工管理の合理化は推進していかなければならない重要な課題である。

ICT 施工をフィルダムの盛立工事に導入した場合、

まき出し厚、締固め回数等、施工プロセス管理の確実性が向上する。これらに加え、盛立材料、粒度、含水比などの条件が一定であれば、密度、遮水性等の盛立品質を一定にすることが可能と考えられる。平成 23 年度は、この点に着目し、ICT 施工が導入された殿ダムの品質管理試験結果を分析し、盛立材料の粒度分布を区分することにより、乾燥密度、透水係数といった盛立後の品質も明確な分布の差が現れる結果が得られた<sup>3)</sup>。従って、盛立材料の品質をより厳密に管理できれば、盛立後における品質管理試験を減じる可能性がある。

しかし、フィルダムにおける実際の盛立現場では、粒度、含水比などがばらついているとともに、日々の天候、材料特性の経時的な変化等も伴うため、締固めエネルギーを一定にしても締固め後の密度などの盛立品質がばらつくことが予想される。そのため、ICT 施工導入によって品質管理を合理化・高度化するためには、盛立材料の粒度や含水比のばらつきによる、密度などの盛立品質のばらつきを把握した上で、品質管理を行うことが重要である。

盛立品質のばらつきを把握するためには密度や遮水性をできるだけ多く計測する方法が考えられるが、特に遮水ゾーンにおける現場透水試験は測定に時間を要し、ダムの施工条件によっては施工の効率化を妨げる要因となりうるため、現場での試験回数を増やすこと

は容易ではない。そのため、平成 24 年度は、以下の二つの方法により、品質管理の合理化に向けた検討を行った。

一つ目の方法は、施工の効率化を妨げずに迅速に計測でき、密度や遮水性を間接的に管理できる項目を検討することである。これまでも、多くの現場では、限られた頻度・箇所で行われる透水試験と合わせて、D 値あるいは密度を規定することにより間接的に遮水性の管理が行われている。しかし、測定された乾燥密度について、任意粒径を基準として礫混入率補正する必要がある等、迅速な遮水性の把握には不向きである。したがって、現場盛立試験を実施することにより、密度試験や透水試験結果に影響する要因を分析し、密度や遮水性の多点計測と現場での迅速な把握を行う観点から、任意の粒径以下に設定せずに全粒径レベルで管理できる管理項目を検討した。これらの検討結果は 2 章に示す。

二つ目の方法は、試験時間が長く、試験中の周囲の盛立を中断する必要がある現場透水試験を合理化する方法である。遮水ゾーンでの現場透水試験の試験時間が長時間となる理由は、試験孔周辺の透水条件が飽和状態となり定常化するまでに時間を要するためである。よって、仮に定常化するまでに飽和状態の透水流量を高い精度で予測することが出来れば、その予測値をもって透水係数を算出することが可能となり、試験時間を短縮することが出来るようになる。試験初期段階の不飽和状態での予測には、不飽和から飽和に変化していく際の試験データを元に不飽和浸透流解析によって飽和状態での透水係数を算定することが最良な手段と考える。既往の研究<sup>4)</sup>においてもその検討がなされている。しかしながら、現場透水試験データから試験終了時の透水流量を予測する方法を試みた既往の検討において、経時的に透水量が増加する現象確認されており、この現象によって解析精度が低下していたケースがあった。この現象の要因として盛立後の過剰間隙水圧の上昇もしくは試験孔からの蒸発が指摘されている。したがって、本研究では盛立中に間隙水圧を計測し分析をした。また、現場透水試験と併せて経時的に蒸発量を測定し、現場透水試験における蒸発の影響を分析した。さらに、現場透水試験データを用いて、蒸発を考慮した場合と考慮しない場合で不飽和浸透流解析を実施し現場透水試験の再現を試みた。この結果から、最終的な安定透水流量から算出される透水係数およびその解析精度に与える影響を分析し、試験時間の短縮化の可能性について検討した。

## 2. フィルダム遮水材料の現場盛立試験

### 2.1 現場盛立試験の概要

本章では、遮水材料を対象として行った現場盛立試験について述べる。本現場盛立試験の目的は、以下のとおりである。

- ICT 施工によって盛立面全体にわたって得られる 1 層あたりの仕上がり厚データにより、密度や遮水性などの盛立品質が管理可能か確認する。
  - 密度や遮水性について現場での迅速な把握を行う観点から、任意の粒径以下に設定せずに全粒径レベルで管理できる管理項目を検討する。
  - 振動ローラ転圧時における間隙水圧の測定と現場透水試験測定中に発生する蒸発量の測定を行う。
- なお、この測定結果を用いた分析は 3 章で行う。

### 2.2 試験方法

#### 2.2.1 盛立試験材料

盛立試験材料は、現在建設中のアースダムの遮水材料を使用した。この遮水材料は、細粒材（砂岩・DLL 級）と粗粒材（泥質角礫岩・DH～CL 級）を 1 : 1.5 で混合したものである。

#### 2.2.2 試験条件および試験方法

##### (1) 試験条件

盛立試験の試験ヤードは、平成 24 年 8 月に 2 ヶ所、同年 11 月に 1 ヶ所造成した。後述するように、各試験ヤード造成に使用した材料は、同一のストックパイルから採取したものの、盛立日によって粒度分布が若干異なる結果となった。また、気温、湿度等の天候が異なっていることも、透水試験結果に影響している可能性がある。そのため、8 月に造成した試験ヤードを A1、A2、11 月に造成した試験ヤードを B と区別する。また、幅広い含水比のデータを得る目的から、A1 の試験材料については、試験数日前より攪拌、薄層敷均しにより、A2 の材料よりも乾燥させることを試みた。

表-2.1 に各試験ヤードの試験条件を整理する。

##### (2) 試験方法

試験項目と数量を表-2.2 に示す。

##### 1) 室内試験

① 締固め試験：JIS A 1210(φ 15cm モールド, -19mm)

締固めエネルギーを 1 Ec, 2 Ec, 3 Ec に変化させて、それぞれのケースにおける締固め含水比と締固

表-2.1 各試験ヤードの試験条件

試験ヤード	盛立日	含水比(実績)
A1	H24.8.21	Wopt+1.4～2.5%
A2	H24.8.21	Wopt+2.6～2.7%
B	H24.11.15	Wopt+1.5～2.7%

表-2.2 各試験ヤードの試験項目

項目	試験規格	数量				
		A1	A2	B	計	
室内試験	締固め試験	JIS A 1210 (φ 15cmモールド、 -19mm)	-	-	-	3ケース
	透水試験	JIS A 1218 (φ 15cmモールド、 -19mm)	-	-	-	3ケース
	密度・吸水率試験	JIS A 1202(-9.5mm) JIS A 1110(+9.5~19,+19mm)	-	-	-	3試料
	塑性限界・液性限界試験	JIS A 1205	-	-	-	3試料
	粒度試験(搬出時)	JIS A 1204(30kg) (置換孔から採取)	5	5	5	15試料
	粒度試験(盛立面)	JIS A 1204(30kg) (置換孔から採取)	5	5	7	17試料
	含水比(搬出時)	JIS A 1203(-19mm)	5	5	5	15試料
	含水比(盛立面)	JIS A 1203(-19mm) (置換孔から採取)	5	5	7	17試料
原位置試験	密度 砂置換	JIS A 1214 又は JGS1611-2003 (φ 30cm×H30cm)	5	5	7	17点
	透水試験	定水位法(置換孔使用) (φ 30cm×H30cm)	5	5	7	17点
	蒸発量測定	-	1	1	2	4点
	間隙水圧	-	2	1	0	3箇所



図-2.1 透水試験実施状況

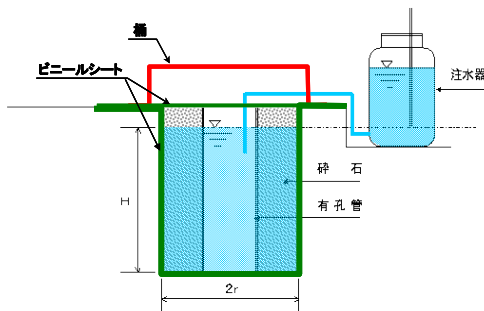


図-2.2 蒸発量測定孔模式図

め密度の関係、最適含水比と最大乾燥密度を求めた。

- ②透水試験：JIS A 1218(φ 15cm モールド、-19mm)
- ③密度・吸水率試験：JIS A 1210(-9.55mm),JIS A 1110(+9.5~19,19mm)
- ④塑性限界・液性限界試験：JIS A 1205
- ⑤粒度試験：JIS A 1204
- ⑥含水比試験：JIS A 1203(-19mm)

2)原位置試験

①現場密度試験(砂置換法)(JIS A 1214 又は JGS 1611-2003)(φ 30cm×H30cm)

②現場透水試験(定水位法)

現場透水試験については蒸発による計測誤差が懸念されるため、図-2.1 のように、試験孔の上部をビニールシートと桶で覆うことにより、可能な限り蒸発防止に努めた。

③蒸発量測定

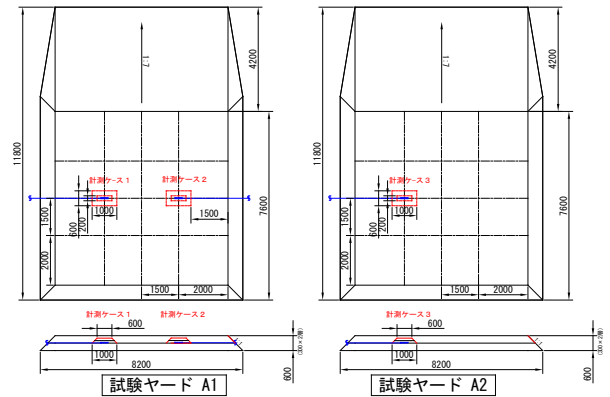


図-2.3 間隙水圧計設置概要

累積透水量の経時的変化など透水試験結果に対する蒸発量の影響を検討することを目的に、蒸発量の測定を行う。蒸発量の測定は、図-2.2 のように、試験孔上部だけでなく孔壁もビニールシートで覆い、ビニールシートの隙間等からの蒸発に伴って減少する試験孔内の水量を蒸発量として計測した。

④間隙水圧測定

転圧時に発生する過剰間隙水圧が、現場透水試験結果に対する影響を検討することを目的に、間隙水圧の測定を行う。図-2.3 に転圧時の盛土中の間隙水圧計の設置概要を示す。間隙水圧計は最終層に埋設し、転圧で使用する 10 t 級振動ローラが、間隙水圧計が設置している箇所を通過する際の間隙水圧の上昇とその後の消散の様子を 1/100 秒の間隔で計測を行った。また、20Hz のローパスフィルタ処理を行ったデータをデータロガーに記録した。

2.2.3 試験ヤードの造成

(1)試験ヤードの造成

試験ヤードの基盤となる盛土箇所について、10t 級振動ローラによる転圧を行った。また、基盤転圧後には、バックホウあるいはブルドーザーの走行による目荒しを行った。

試験ヤードの造成は、小型バックホウまたはブルドーザーにより遮水材料をまき出した後、10 t 級振動ローラにより転圧を 8 回行い、層あたりの仕上り厚が 30cm になるように 2 層造成した。なお、1 層目の転圧面はバックホウの爪によるレーキングを行い、層間がよくなじむように努めた。また、最終層である 2 層目転圧後、層あたりの仕上り厚測定を行ったが、試験ヤードの面積は限定的であるためレベルとロッドを用いた測定を行っており、ICT 施工で導入されている GPS を用いた仕上がり厚管理システムは使用していない。

図-2.4 に試験ヤードと試験孔の位置を示す。孔壁状態が悪いと透水試験結果に影響することから、そのよ



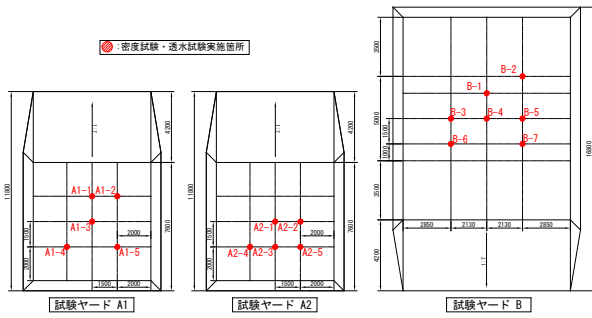


図-2.4 試験ヤードと試験孔の位置



試験ヤード A1      試験ヤード A2      試験ヤード B

図-2.5 試験ヤードの状況

うな試験孔が発生した場合は再削孔した。また、試験ヤード B については、先に行った試験ヤード A1, A2 と同様の形状を予定していたが、試験ヤードが狭く、試験孔位置を変更する際に予備となるスペースが少なかつたことから、試験ヤードの面積を拡大した。

(2) 間隙水圧計の埋設

図-2.6 に間隙水圧計の設置詳細図を示す。また、以下に設置手順を示す。

① 計器設置基盤の造成

1 層目を転圧、レーキング後、計器の設置高さの -10cm 程度の位置まで掘削し、保護材により設置高さまでビブロプレートを用いて埋戻した。保護材は、転圧時における間隙水圧計の故障の原因となる大礫からの保護を目的とするものであり、表-2.3 のように、図-2.3 中に示した計測ケース 1~3 の保護材は、遮水材を 9.5mm のふるい目を通過した材料または砂を用いた。また、保護材は加水し、飽和状態とした。

ゾーン	施工厚 (mm)	材料	機械
①	100	保護材	ビブロプレート
②	100	保護材	木槌・ビブロプレート
③	100	保護材	木槌・ビブロプレート
①+②+③	200	保護材	木槌・ビブロプレート
④	300 (100)※	遮水材	振動ローラ

※施工厚の括弧内は最小値

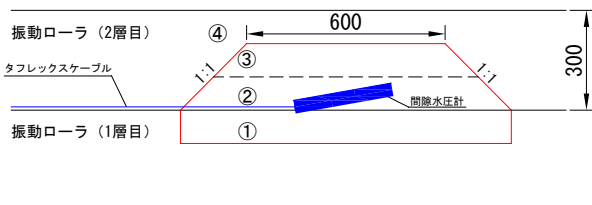


図-2.6 間隙水圧計設置詳細図

表-2.3 保護材として使用している材料

計測ケース	保護材
1	遮水材(-9.5mm)
2	砂
3	遮水材(-9.5mm)

② 計器設置及び人力転圧

間隙水圧計を斜め 10° 程度向上に向けて設置し、計器直上は木槌により数 cm ずつ締め固め、保護材の層厚が 10cm になるまで繰り返した。その後、保護材を 10cm 程度ずつまき出し、ビブロプレートを用いて締め固めた。

③ 振動ローラによる転圧

通常の遮水材をまき出し、振動ローラにより転圧を行った。この際に、転圧時における間隙水圧の測定を行った。

2.3 試験結果

2.3.1 物理試験

(1) 粒度分布

まき出し時に採取した全 15 試料の粒度を図-2.7 に、

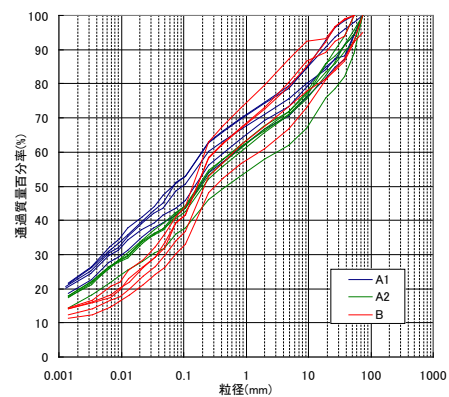


図-2.7 まきだし時の粒度

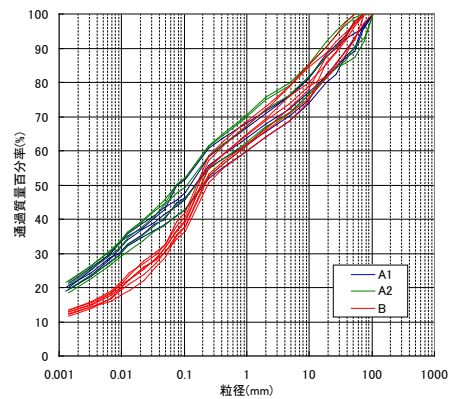


図-2.8 盛立面の粒度

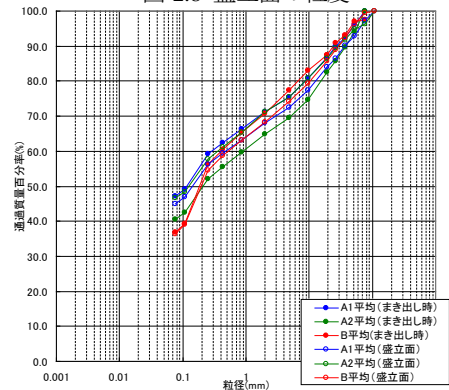


図-2.9 まきだし時・盛立面の平均粒度 (+19mm)

表-2.4 材料の基本物性

項目	A1	A2	B	平均
土粒子密度: $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	2.766	2.767	2.775	2.769
液性限界: $w_L$ (%)	81.1	77.9	83.6	80.9
塑性限界: $w_P$ (%)	44.3	43.8	34.2	40.8
絶対比重: $G_b$ ( $g/cm^3$ )	2.300	2.291	2.343	2.311
吸水率: $Q$ (%)	6.5	6.8	6.0	6.4

締固めエネルギー	1Ec	2Ec	3Ec
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	1.506	1.583	1.633
最適含水比 $W_{opt}(\%)$	24.9	22.4	20.3

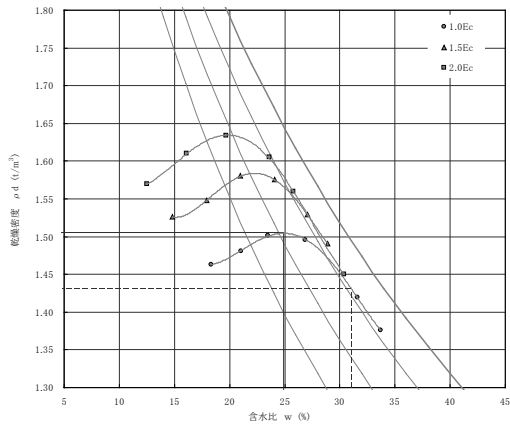


図-2.10 締固め曲線と透水特性 (1Ec,2Ec,3Ec)

盛立面の試験孔から採取した全 17 試料の粒度を図-2.8 に示す。また、図-2.9 は、試験ヤード毎にまき出し時と盛立面の粒度を平均したものである。粗粒分の粒度は各試験ヤードで大きな差はないが、0.075mm 以下の細粒分含有率が A1, A2 と B で違いがみられ、A1, A2 の方が大きくなっている。

(2) 材料の基本物性

表-2.4 に使用した材料の基本物性を示す。土粒子密度、絶対比重、吸水率は、それぞれの盛立材料でほとんど差がない値である。

2.3.2 締固め試験・透水試験

使用材料における粒径 19mm 以下の試料について、締固めエネルギー 1 Ec, 2 Ec, 3 Ec で行った突固めによる締固め試験と透水試験結果について整理したものを図-2.10 に示す。1Ec においては、最大乾燥密度は  $\rho$

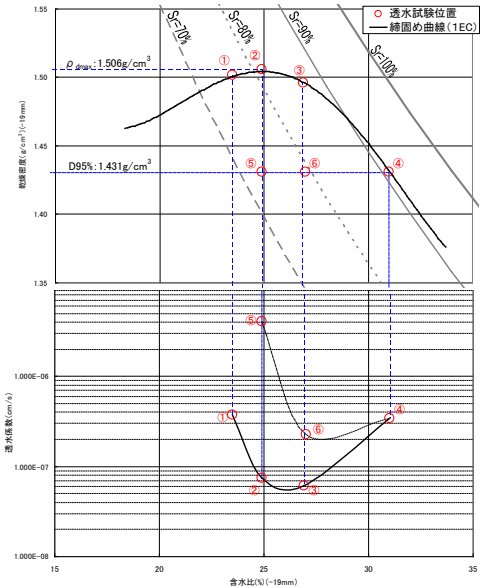


図-2.11 締固め曲線と 1Ec, D95 時の透水特性

表-2.5 透水試験結果

番号	含水比 (%)	乾燥密度 ( $g/cm^3$ )	透水係数 ( $cm/s$ )	備考
①	23.5	1.502	3.72E-07	乾燥側
②	24.9	1.506	7.40E-08	最適含水比
③	26.9	1.496	6.16E-08	湿潤側
④	31.0	1.431	3.43E-07	D95%・湿潤側
⑤	24.9	1.431	4.11E-06	D95%・最適含水比
⑥	27.0	1.431	2.27E-07	D95%・Sr80%

$d_{max}=1.506g/cm^3$ 、最適含水比は 24.9% であった。

次に、同一の材料を用い、含水比、締固め度が異なる供試体を作成し、透水試験を実施した。図-2.11 と表-2.5 に供試体の含水比、乾燥密度と、それを用いた室内透水試験の結果を示す。

2.3.3 現場密度試験

(1) 現場密度試験結果

砂置換法における現場密度試験結果を以下のように整理した。

- 含水比、乾燥密度それぞれについて礫混入率補正前、後の比較を行った。
- 乾燥密度 (全粒径) と、D 値 (-19mm) との比較を行った
- ICT 施工の導入によって得られる締固め後の層厚データにより、密度を管理できないか確認するため、乾燥密度 (全粒径)、D 値 (-19mm) と、最終層厚との関係を分析した。
- 乾燥密度 (全粒径)、D 値 (-19mm) と、含水比、粒度 (細粒分混入率、粗礫混入率) との関係を分析した。

1) 礫混入率補正について

図-2.12、図-2.13 に含水比、乾燥密度それぞれについて礫混入率補正前、後の比較を示す。全粒径での含水

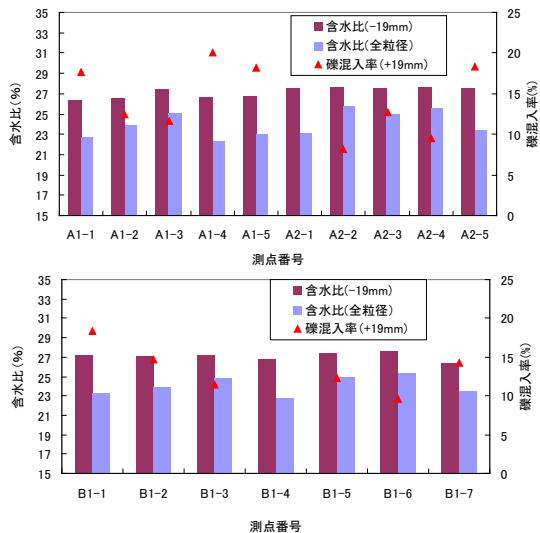


図-2.12 含水比 (-19mm) と含水比(全粒径)の比較

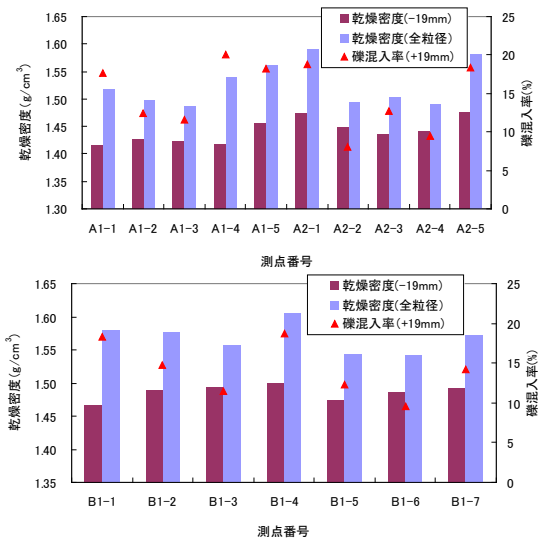


図-2.13 乾燥密度 (-19mm) と乾燥密度(全粒径)の比較

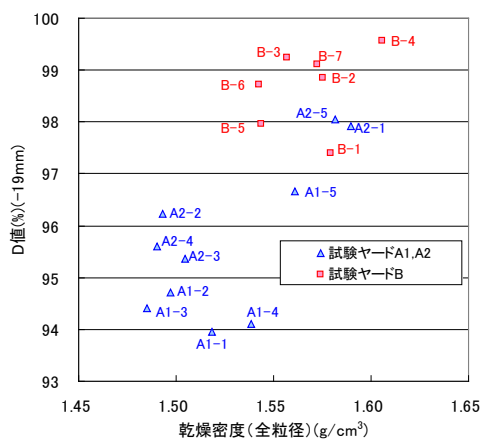


図-2.14 乾燥密度(全粒径)－D値(-19mm)

比は、室内試験により測定した 19mm 粒径以下の含水

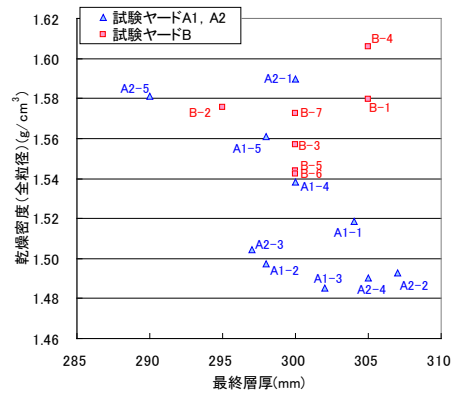


図-2.15 最終層厚－乾燥密度 (全粒径)

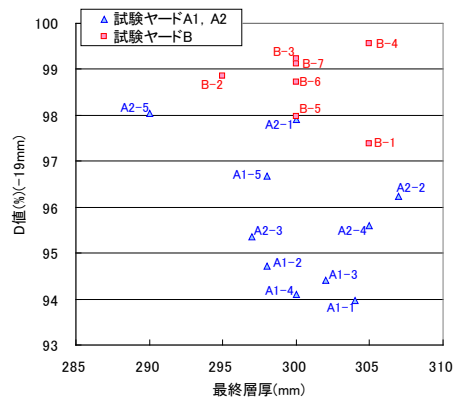


図-2.16 最終層厚－D 値 (-19mm)

比を礫混入率補正して求め、19mm 粒径以下での乾燥密度は、全粒径の乾燥密度を礫混入率補正して求めた。なお、礫混入率補正には、Walker-Holtz の方法を用いた。

$$w = w_{(-19mm)}(1 - P) + Q \cdot P$$

$$\rho_{d,(-19mm)} = \frac{\rho_d \cdot G_b(1 - P)}{G_b - \rho_d \cdot P}$$

ここに、

$w$  : 全粒径の含水比 (%)

$w_{(-19mm)}$  : 19mm 粒径以下部分の含水比 (%)

$Q$  : 粗礫 (19mm 以上) の吸水率 (%)

$P$  : 粗礫混入率

$\rho_d$  : 全粒径の乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_{d,(-19mm)}$  : 19mm 粒径以下部分の乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$G_b$  : 粗礫の絶乾比重

## 2) D 値(-19mm)の算出について

多くのダム現場では、盛立に使用する材料の代表試料から、室内試験の「突固めによる締固め試験」により最大乾燥密度を調べ、その値と現場の乾燥密度を比較した D 値により管理されている。この際、締固め試験の許容最大粒径を超える礫を含む場合は、前項のように、礫混入率補正を行い、基準粒径以下の乾燥密度を用いて D 値が求められている。なお、基準粒径が 19mm の場合、D 値 (-19mm) の定義は、以下のとおりである。

$$D \text{ 値}(-19\text{mm}) = \frac{\rho_{d,(-19\text{mm})}}{\rho_{d \text{ max},(-19\text{mm})}} \times 100$$

乾燥密度(全粒径)と D 値(-19mm) の関係を整理したものが、図-2.14 である。これらの関係は、ある程度の相関はみられるものの、ばらつきも大きくなっている。

## 3) 最終層厚との関係

最終層厚と乾燥密度(全粒径)、D 値(-19mm) との関係それぞれ図-2.15, 図-2.16 に示す。試験ヤード A1, A2 については、最終層厚が大きくなるにしたがって乾燥密度(全粒径), D 値(-19mm) とともに低下し

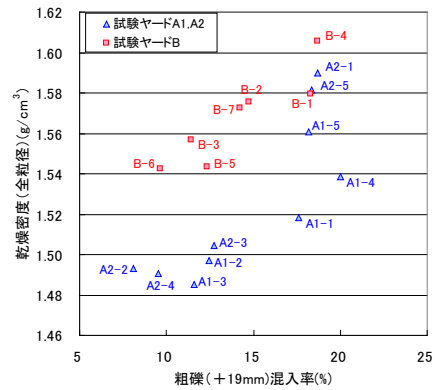


図-2.19 粗礫混入率－乾燥密度(全粒径)

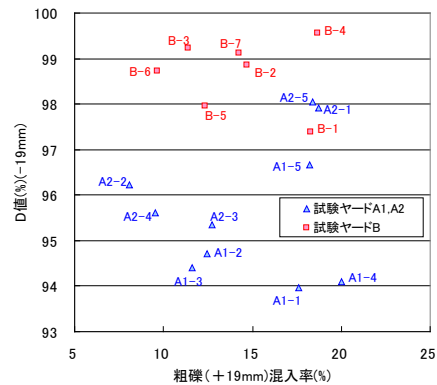


図-2.20 粗礫混入率－D 値(-19mm)

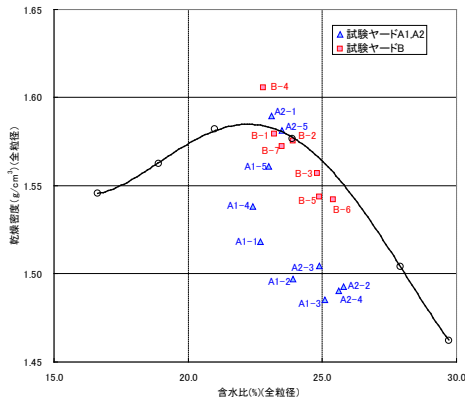


図-2.17 含水比(全粒径)－乾燥密度(全粒径)

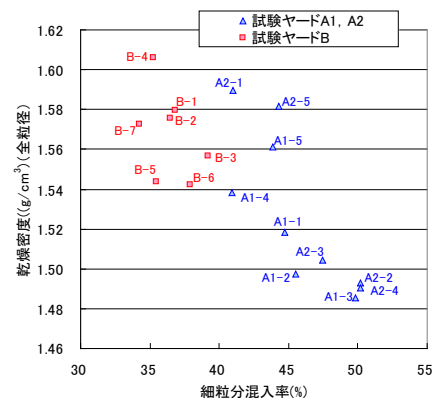


図-2.21 細粒分混入率－乾燥密度(全粒径)

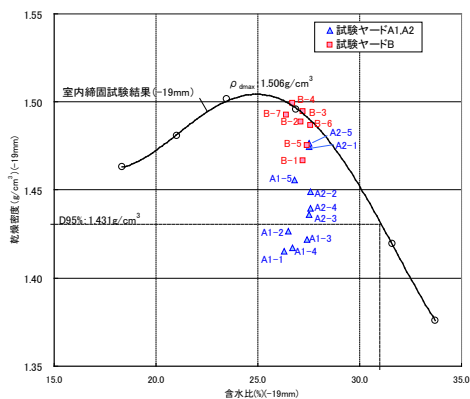


図-2.18 含水比(-19mm)－乾燥密度(-19mm)

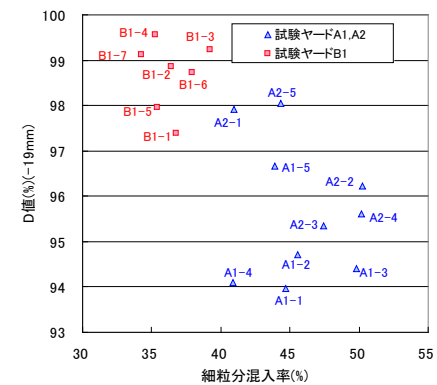


図-2.22 細粒分混入率－D 値(-19mm)





との関係を整理した。

- ICT 施工の導入によって得られる締固め後の層厚データにより、遮水性を管理できないか確認するため、透水係数と最終層厚の関係について整理した。
- 透水係数と、D 値(-19mm)、乾燥密度(全粒径)、飽和度との関係を整理した。その際、粒度のばらつきを踏まえた管理や、礫混入率補正を行わない全粒径レベルでの管理目指す観点から、今回試験での基準粒径である 19mm 粒径以上の混入率（粗礫混入率）にも着目した整理を行った。

### 1) 蒸発量について

試験ヤード A1, A2、試験ヤード B それぞれで実施した透水試験と、同時刻に測定した蒸発量の結果について、図-2.23、図-2.24 に示す。8 月に実施した試験ヤード A1, A2 の試験では、11 月に実施した試験ヤード B と比べて蒸発量が多い。そのため、試験ヤード A1, A2 の透水試験結果は、試験孔上面をビニールシートで覆っているものの、蒸発量の影響が試験ヤード B よりも大きいと考えられる。なお、蒸発量の詳細な分析結果については 3 章に示す。

図-2.25 に実測元データと蒸発量を考慮した透水係数の比較を示す。なお、蒸発量を考慮した透水係数の算出方法については、3 章で示す。以上で示した蒸発量による透水係数への影響は、次項以降の分析結果に影響するほど大きくなかった。そのため、次項以降の分析では実測元データをそのまま用いることとした。

### 2) 含水比との関係

含水比と透水係数との関係について、全粒径、19mm 以下粒径の部分、それぞれを基準としたものを図-2.26、図-2.27 に示す。これらの図より、全粒径、-19mm ともに含水比と透水係数との相関はみられない。

### 3) 最終層厚との関係

最終層厚と透水係数との関係を図-2.28 に示す。この

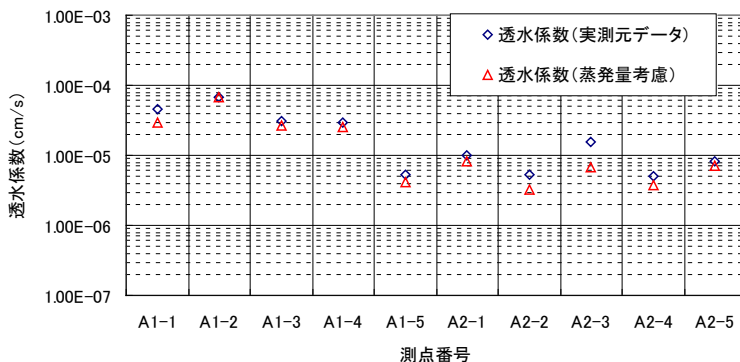


図-2.25 実測元データと蒸発量を考慮した透水係数の比較(試験ヤード A1, A1)

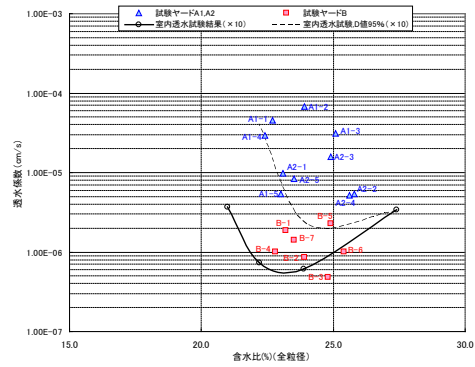


図-2.26 含水比(全粒径)一透水係数

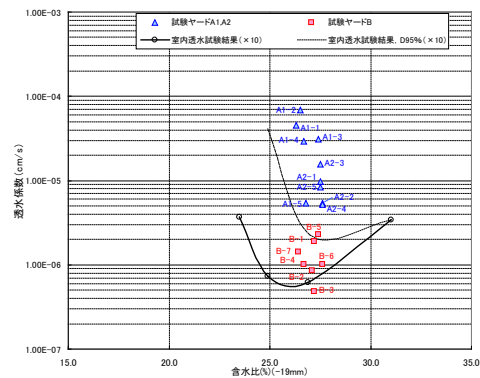


図-2.27 含水比 (-19mm) - 透水係数

図より、最終層厚と透水係数には相関はみられない。

### 4) D 値 (-19mm) との関係

図-2.29 は 19mm 以上の粗礫混入率をパラメータとして、19mm 以下の部分を基準とした D 値と透水係数の関係を示したものである。この図より、D 値(-19mm)と透水係数  $\log k$  とは粗礫混入率が異なるにもかかわらず、ほぼ直線関係があることが認められ、D 値(-19mm)により透水係数を間接的に管理する方法の有効性を示していると考えられる。

しかし、D 値 (-19mm) を現場における品質管理で行う場合、密度試験の実施箇所ごとの粒度試験結果を用いた礫混入率補正を行う必要があり、多点測定と迅速な品質評価には不向きであると考えられる。

### 5) 乾燥密度 (全粒径) との関係

図-2.30 は粗礫混入率をパラメータとして、全粒径の乾燥密度と透水係数の関係を示したものである。図から、乾燥密度 (全粒径) と透水係数  $\log k$  とは、粗礫混入率ごとに直線関係にあることがわかる。このことは、使用する材料の粗礫混入率を事前に把握できれば、乾燥密度 (全粒径) によって礫

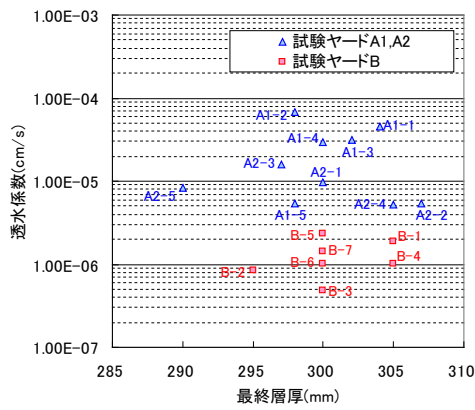


図-2.28 最終層厚—透水係数

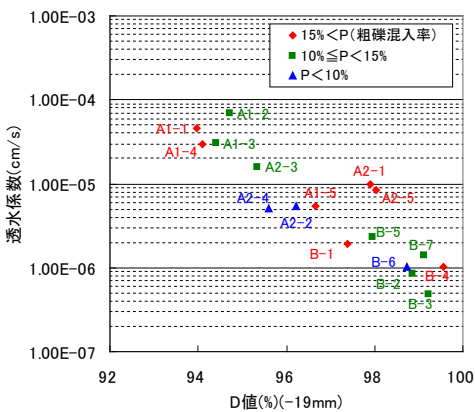


図-2.29 D 値(-19mm)—透水係数

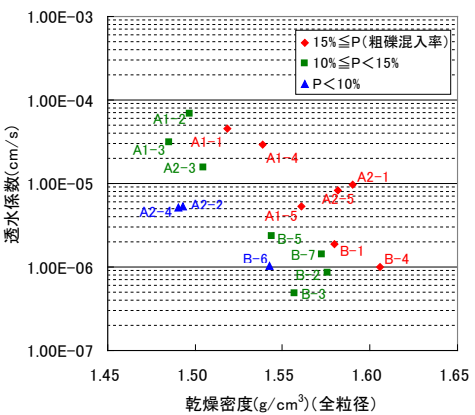


図-2.30 乾燥密度 (全粒径) —透水係数

混入率補正なしで透水係数を予測でき、遮水性を間接的に管理できることを示している。実施工においても、RI 試験法により計測した乾燥密度 (全粒径) による管理が行われている。

しかし、今回の試験で使用した材料のように、粒度がばらついている材料では、事前に行う数点の粒度試験結果から材料全体の粒度特性を捉えることは難しい。そのため、粒度のばらつきがほとんどない場合でないと、乾燥密度 (全粒径) による遮水性の合理的な管理は困難であると考えられる。

## 6) 飽和度との関係

飽和度は以下の式により求めた。

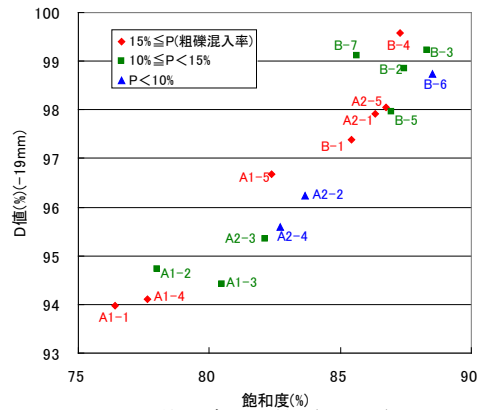


図-2.31 飽和度—D 値 (-19mm)

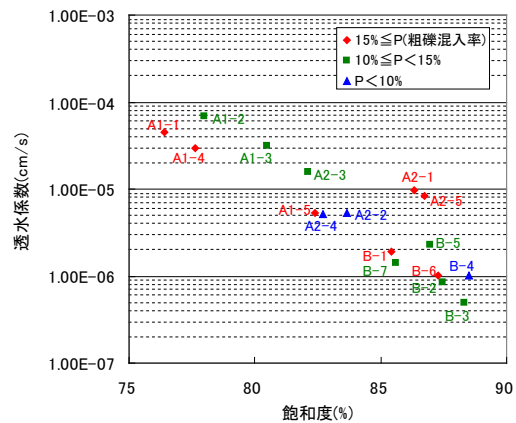


図-2.32 飽和度—透水係数

$$S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} \quad e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

ここで、

$S_r$  : 飽和度

$w$  : 含水比

$\rho_s$  : 土粒子密度

$e$  : 間隙比

$\rho_w$  : 水の密度

図-2.31 に飽和度と D 値 (-19mm) の関係を示す。図より、今回の試験で使用した材料の含水比、粒度範囲においては、飽和度は D 値(-19mm)と正の相関関係がある。また、飽和度は全粒径レベルでの管理が可能であり、D 値 (-19mm) の代わりに飽和度を用いることにより、遮水性を現場で迅速に把握することが可能と考えられる。

そこで、図-2.32 に飽和度と透水係数との関係を示す。この図より飽和度と透水係数  $\log k$  は、粗礫混入率が異なるにもかかわらず直線的な相関関係にあることか

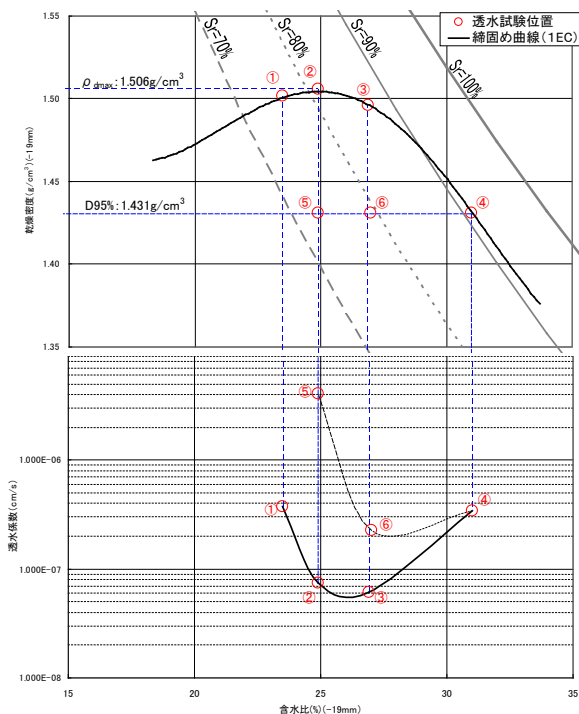


図-2.33 締固め曲線と 1Ec,D95 時の透水特性

ら、遮水性を間接的に管理する項目として用いることが可能と考えられる。なお、これまででも自然含水比が著しく高い細粒土において、飽和度による品質管理が行われている。これは、飽和度が高いと、その後の降雨等で土中に水が浸透してきても体積変化や強度低下を引き起こし難いことから、水浸に対する安定性のみを保証するものとして用いられているものである。

**(2) 現場透水試験結果の考察**

現場透水試験結果を整理した前項の結果より、飽和度と透水係数  $\log k$  は、粗礫混入率が異なるにも関わらず、直線的な相関関係がみられることから、遮水性を間接的に管理することが可能であることを示した。

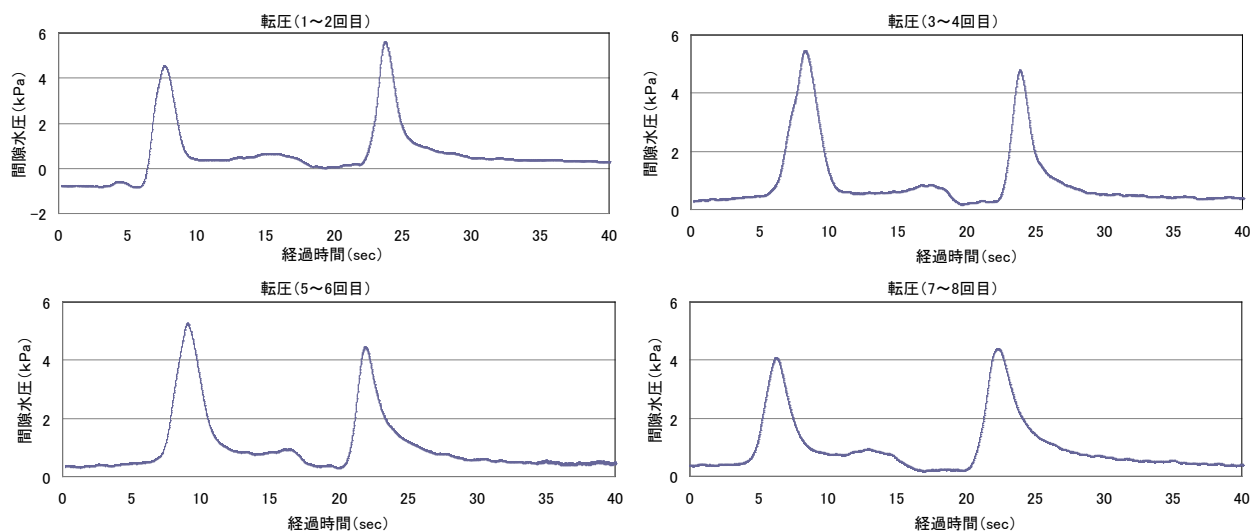


図-2.35 転圧時の間隙水圧 (計測ケース 1)

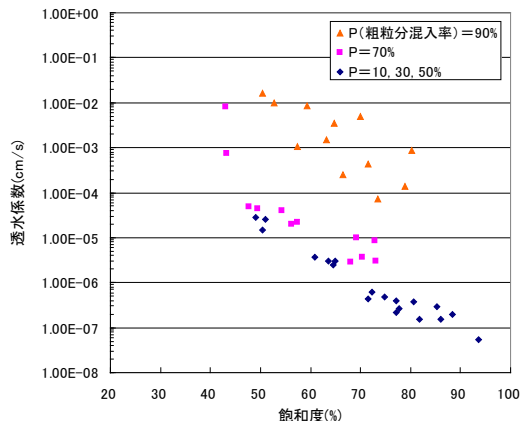


図-2.34 飽和度－透水係数(最大粒径 4.76mm)

ここでは、今回の現場試験で確認できなかった含水比や粒度範囲をもつ材料における、飽和度と透水係数の関係について、室内試験データから考察を行う。考察に使用する室内試験データは、今回の盛立試験と同一の材料を用い、含水比や締固め度を変えて室内透水試験を行った図-2.33 (再掲) と、礫分、砂分、細粒分の割合や締固め度を変化させて遮水性や強度特性について室内試験を行った文献 5) のデータである。

図-2.33 より、飽和度  $S_r$  は、⑤①⑥②③④の順に大きくなっている。対応する供試体の透水係数は、⑤①④⑥②③の順に大きくなっており、最適含水比から 6% 程度湿潤側の④を除くと、飽和度が増加するにしたがって、透水係数が減少する図-2.32 と同様の傾向がみられる。

次に、図-2.34 は、文献 5) の室内試験データも用い粗粒分混入率ごとの飽和度と透水係数の関係を示したものである。ここで粗粒分混入率は粒径が 0.074mm 以上のものの混入率であり、図-2.32 などの粗礫混入率に相当するものである。この図より、粗粒分混入率が 50%

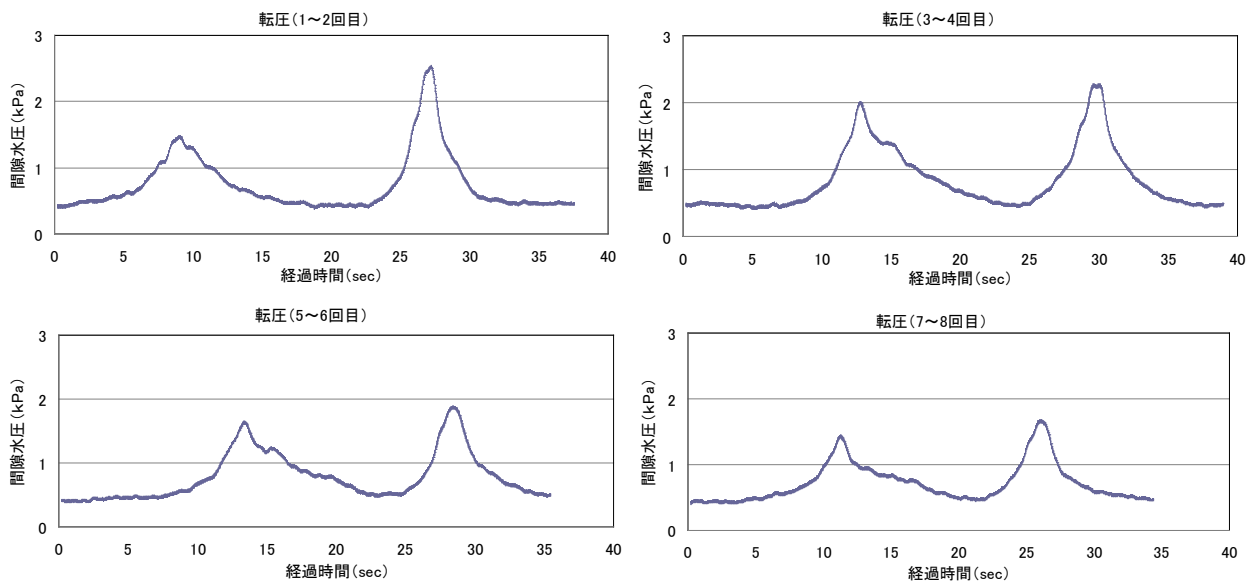


図-2.36 転圧時の間隙水圧 (計測ケース 2)

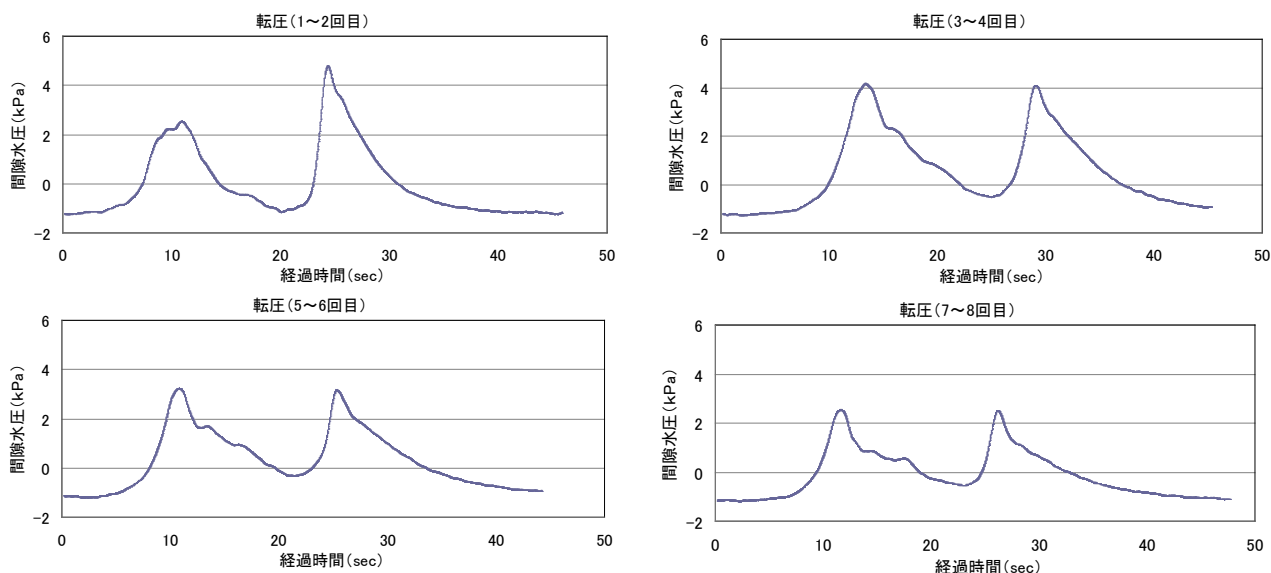


図-2.37 転圧時の間隙水圧 (計測ケース 3)

までは飽和度と  $\log k$  との間に直線上の相関関係が認められるが、粗粒分混入率が 70%を超えると、これまでとは異なる領域で相関が認められる。

以上のことから、図-2.32 のように飽和度と透水係数  $\log k$  に直線状の相関関係は、どのような含水比、粒度でもいえる基本的な性質でないと考えられる。しかし、使用する遮水材料について、含水比、粒度のばらつき範囲を考慮した飽和度と透水係数  $\log k$  の関係について、直線状の相関を事前に確認しておけば、遮水性を間接的に管理する項目として飽和度は有用であると考えられる。また、全粒径での管理が可能のため、RI 試験法を用いた多点計測と迅速な遮水性の把握が可能であると考えられる。

### 2.3.5 転圧時における間隙水圧の測定

計測結果を図-2.35～2.37 に示す。収録したデータは 0.4 秒分 (41 個のデータ分) 移動平均した。これらの図より、全てのケースで、転圧時の間隙水圧の上昇を確認できた。間隙水圧の最大値は、保護材に遮水材 (-9.5mm) を使用した計測ケース 1,3 で約 5kPa 計測され、砂を使用したケース 2 で約 2.5kPa 計測された。間隙水圧の低下の状況については、保護材に砂を使用したケース 2 よりも、遮水材 (-9.5mm) を使用した計測ケース 1,3 で比較的緩やかな低下がみられたものの、約 20 秒程度でほとんど消散した。したがって、透水試験結果に対して、間隙水圧の影響はないと考えられる。

### 2.4 現場盛立試験のまとめ

- ICT によって得られる層厚データのみから、乾燥密度(全粒径)、D 値 (-19mm)、透水係数を管理



することは困難である。

- 乾燥密度（全粒径）は、粗礫混入率や細粒分含有率等の粒度から、ある程度値を予測することが可能と考えられる。しかし、粒度がばらついている材料では、盛立面全体にわたって乾燥密度(全粒径)を管理することは困難である。
- 透水係数について、粗礫混入率をパラメータとして、飽和度との関係を分析すると、粗礫混入率に関わらず、相関がみられた。また、飽和度は全粒径レベルでの管理が可能であることから、RI 試験法を用いた多点計測と、迅速な遮水性の把握が可能であると考えられる。

### 3. 不飽和浸透流解析を用いた原位置浸透試験の短時間化の検討

1 章でも述べたようにフィルダム遮水ゾーンにおける透水性の品質管理は現場透水試験によって行っている。しかしながら現場透水試験は試験孔が飽和状態となり定常化するまでに時間を要するため必然的に試験時間は長くなり、試験中は盛立が中断する必要がある。また、現場透水試験の既往の研究<sup>4)</sup>において、一度定常化してから再度透水流量が増加する現象がみられた。これらの要因については、2 章で蒸発の影響を受けている可能性があることを示している。ここでは、施工の効率化を図ることを目的として、透水試験結果を詳細に分析し、蒸発の影響を考慮した不飽和浸透流解析を用いて現場透水試験の短時間化について検討した。

#### 3.1 現場透水試験

現場透水試験の方法については、2 章の 2.2.2 節にて示されているが、詳細な部分も含めて改めて整理しておく。各ケースの試験条件を表-3.1 に示す。

##### (1) 現場透水試験条件

計測時間は 20 時間以上とし盛立完了直後の夕方もしくは夜間から計測を開始した。計測ピッチについては 1 時間毎を基本とし、透水量の変化が大きい透水試験開始直後の数時間は 20 分～30 分で設定した。透水試験孔には図-3.1 に示すように、上面にビニールシートを被せて雨水の浸入、風による水面からの蒸発の抑制を図った。なお、ビニールシートは U-19 法<sup>9)</sup>の湿潤範囲の試験孔周辺 50cm 程度を被覆するものとした。

##### (2) 蒸発量測定

透水試験孔と同様の蒸発対策をした上で、図-3.1 のピンクの線で示すように試験孔の孔壁と砕石の間にビ

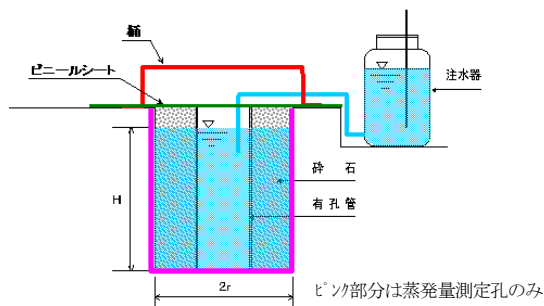


図-3.1 試験孔模式図

ニールシートを挟み、地盤内に浸透しないようにして、注水器内の水の減少分を蒸発量とした。計測ピッチについては、透水試験孔と同様とした。蒸発量測定孔数は 8 月の試験では 1 孔設置し、これをケース A1 およびケース A2 に対する蒸発量とした。また、11 月の試験では 2 孔設置し、この平均値をケース B に対する蒸発量とした。

#### 3.2 試験時の気象条件

ケース A1 およびケース A2 の試験期間 (8 月) における試験実施場所に最も近いアメダスの気温・湿度・日照時間および試験孔内水温を図-3.2 (a) に示す。同様にケース B についても図-3.2 (b) に示す。図-3.2 (a) より A1 および A2 の試験期間の気温は 26°C～32°C 程度で推移しており、日照時間が長い 10 時～18 時では 30°C を超える。湿度は日中で 80% 程度、夜間では 85～95% で推移している。ケース B の試験時と比較すると昼夜での気温変動が大きく、湿度も気温と相反して昼夜で大きく変動している。試験孔内の水温は、気温変化に伴って変動しているが、気温よりも 4～5 時間ほど遅れて変動している。

図-3.2 (b) よりケース B の試験期間 (11 月) の気温は 19°C～24°C 程度で推移しており、昼夜での気温変化は最大でも 5°C 程度である。湿度については、概ね 60～70% で 11 月 17 日 10:00 以降は降雨の発生に伴い、気温が低下し湿度が上昇している。日照時間と気温には相関関係が認められる。試験孔内の水温は 20°C 程度で試験期間を通してほぼ一定である。

以上の気象データより、ケース B の試験では、気温そのものが低いことと気温・水温の変化が小さいことから、試験孔内の飽和水蒸気量の差が生じにくく、蒸発量は比較的少なくなると想定される。一方でケース A1, A2 の試験では日照時間が長く、ビニールシートのみの蒸発対策であったため、試験孔内の空気および水温の上昇が促進された可能性がある。また、図-3.3 のように、ビニールシートに多数の水滴の付着も確認されており、水温の観測結果からも試験孔内は外部よりも高温・多湿な状態であったと推測される。

#### 3.3 試験結果

表-3.2 に透水試験結果の概要を示す。計測値より算

表-3.1 試験条件

試験ケース	実施日	施工含水比	蒸発対策	透水試験孔	蒸発量測定孔
A1	8/21～23	wopt+1.4～2.5%	ビニールシート	5 孔	1 孔
A2	8/21～23	wopt+2.6～2.7%	ビニールシート	5 孔	
B	11/15～17	wopt+1.5～2.7%	桶+ビニールシート	7 孔	2 孔

※最適含水比(-19.0mm) : 24.9%

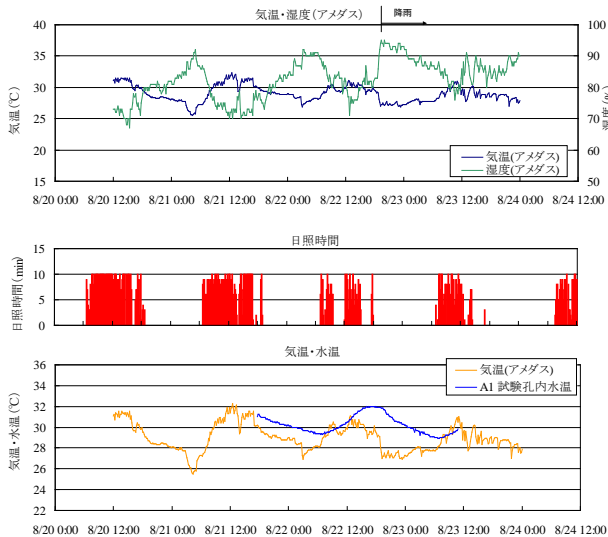


図-3.2 (a) A1,A2 試験実施時の気温、日射量および孔内水温の経時変化 (8/20~8/23)

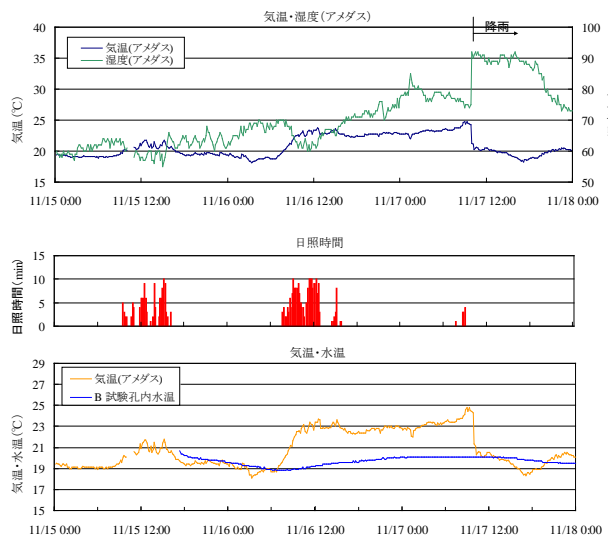


図-3.2 (b) B 試験実施時の気温、日射量および孔内水温の経時変化 (11/15~11/18)



図-3.3 ビニールシートに付着する水滴

出した透水係数は  $6.8 \times 10^{-5} \sim 4.8 \times 10^{-7}$  (cm/sec) の範囲にあり、ある程度の幅を有している。蒸発を考慮し

表-3.2 透水試験結果

	試験継続時間 (hr)	透水試験結果 [蒸発考慮無し]	透水試験結果 [蒸発単純考慮]	εQ(t)の経時変化傾向	
		(※1) (cm/s)	(※2) (cm/s)		
A1	A1-1	21.9	$4.6 \times 10^{-5}$	$3.9 \times 10^{-5}$	上に凸 (t=12~20で増加傾向)
	A1-2	25.1	$6.8 \times 10^{-5}$	$6.0 \times 10^{-5}$	上に凸
	A1-3	25.4	$3.1 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	上に凸
	A1-4	25.0	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$	上に凸 (t=15~24で増加傾向)
	A1-5	38.0	$5.4 \times 10^{-6}$	—	上に凸 (t=15~20で流量増有)
A2	A2-1	22.0	$9.8 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-6}$	上に凸 (t=12~20で増加傾向)
	A2-2	34.8	$5.4 \times 10^{-5}$	—	直線型 (t=10~15で急増)
	A2-3	22.0	$1.6 \times 10^{-5}$	—	上に凸 (t=12~20で増加傾向)
	A2-4	35.4	$5.2 \times 10^{-6}$	—	上に凸 (t=12~20で増加傾向)
	A2-5	22.0	$8.3 \times 10^{-6}$	—	上に凸 (t=12~20で増加傾向)
B	B-1	41.7	$1.9 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-6}$	上に凸 (t=15~24で増加傾向)
	B-2	25.0	$8.6 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-7}$	上に凸
	B-3	40.8	$4.8 \times 10^{-7}$	$4.5 \times 10^{-7}$	上に凸
	B-4	39.7	$1.0 \times 10^{-6}$	$7.8 \times 10^{-7}$	上に凸
	B-5	25.0	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-6}$	上に凸
	B-6	40.8	$1.0 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-7}$	上に凸
	B-7	25.0	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$	上に凸

(※1)：計測値から算出した透水係数  
(※2)：計測値から実測蒸発量を差し引いて補正した値より算出した透水係数

た場合(※2)は若干透水係数が小さくなる。蒸発量を考慮した透水係数の算出方法は後述する。

各ケースにおける実測累積透水量および累積蒸発量の経時変化を図-3.4に示す。なお、蒸発量が極めて少ない場合、表面張力の関係で1時間ピッチの蒸発量が計測できない(計測値として現れない)現象が生じた。このような場合に限り、次に計測された蒸発量をその前の最後に蒸発量が計測された時刻までの区間時間で除することによって蒸発量を平準化して算出している。

(1) 累積透水量

累積透水量は(ΣQ)は、A1が全体的に他のケースに比べて多い。累積透水量の経時変化の傾向は、不飽和浸透地盤の特性により初期に透水流量が多く、透水流量が徐々に定常化するに従って増加は小さくなる「上に凸」(透水流量が減少するパターン)が多いが、ある時点から流量が増加する傾向を示す孔が存在している。特に8月に試験を実施したA1とA2でその傾向が顕著に見られる。これについては、蒸発による影響が現れている可能性がある。また、B-2、B-5、B-7では開始3時間程度までの透水量が大きい。これは、当該孔の計測を日中から始めるために、他孔から約15時間遅らせて開始したことによってその間に表層付近が乾燥したことが要因と考えられる。

(2) 蒸発量

図-3.5に累積蒸発量および単位時間当たりの蒸発量

	A1-1	A1-2	A1-3	A1-4	A1-5
試験継続時間 (hr)	21.9	25.1	25.4	25.0	38.0
透水試験結果 [蒸発考慮無し] (cm/s)	$4.6 \times 10^{-5}$	$6.8 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-6}$
EQ(0)の 経時変化傾向	上に凸 t=12-20で増加傾向	上に凸	上に凸	上に凸 t=15-24で増加傾向	上に凸 t=15-20で増量増大

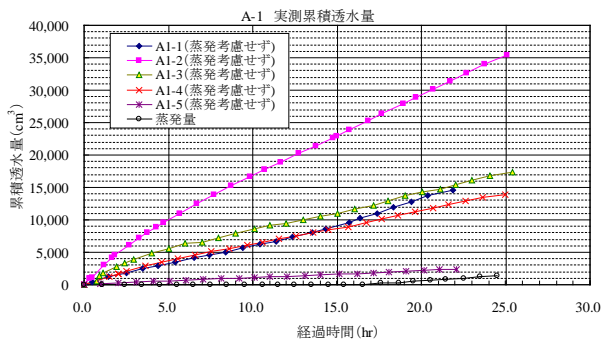


図-3.4 (a) A1 の累積透水量

	A2-1	A2-2	A2-3	A2-4	A2-5
試験継続時間 (hr)	22.0	34.8	22.0	35.4	22.0
透水試験結果 [蒸発考慮無し] (cm/s)	$9.8 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-6}$	$8.3 \times 10^{-6}$
EQ(0)の 経時変化傾向	上に凸 t=12-20で増加傾向	直線型 t=10-15で急増	上に凸 t=12-20で増加傾向	上に凸 t=12-20で増加傾向	上に凸 t=12-20で増加傾向

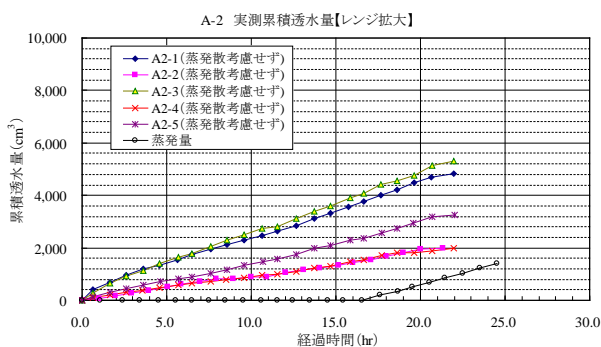


図-3.4 (b) A2 の累積透水量

	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
試験継続時間 (hr)	41.7	25.0	40.8	39.7	25.0	40.8	25.0
透水試験結果 [蒸発考慮無し] (cm/s)	$1.9 \times 10^{-6}$	$8.6 \times 10^{-7}$	$4.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-6}$
EQ(0)の 経時変化傾向	上に凸 t=15-24で増加傾向	上に凸	上に凸	上に凸	上に凸	上に凸	上に凸

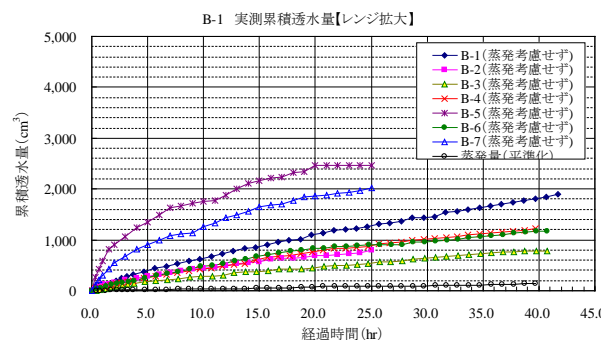


図-3.4 (c) B の累積透水量

(cm<sup>3</sup>/s)の経時変化を示す。B(11月)の蒸発量は極めて少なく、日中と夜間で差もみられない。一方、A1,A2(8月)は日中に集中して蒸発が生じ、夜間の蒸発量は0である。計測開始25時間後のA1,A2の累積蒸発量は同時間経過したBの累積蒸発量の約15倍程度である。

両者の差が生じた要因は気象条件の違いやBでは桶

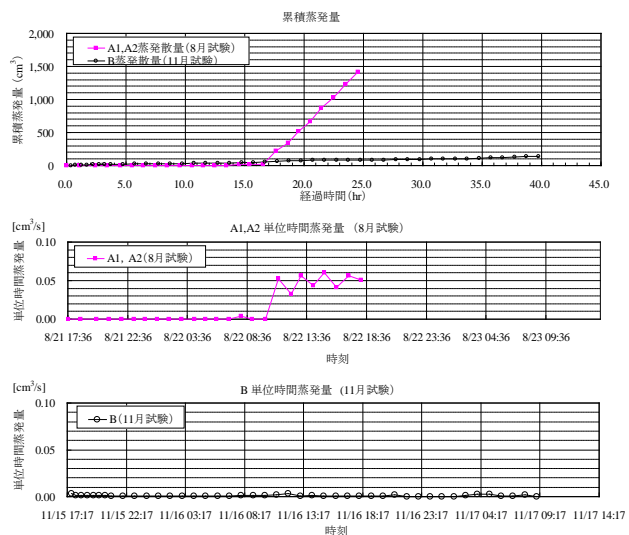


図-3.5 蒸発量の経時変化

を被せるなどの蒸発対策等の違いが考えられるが、シートを被せたBで昼夜の蒸発量に差が無いことから、試験孔に対する直射日光の有無が蒸発量に大きく影響していると考えられる。逆に夜間での蒸発量がほぼ0に等しいことから、孔口をシートで養生した条件では、孔内からの蒸発量は気温や湿度などの直射日光以外の影響はほとんど受けないと考えられる。

また、ケースBの方がA1,A2よりも気温が低いにもかかわらず、夜間の蒸発量は若干多い現象が生じている。これは湿度差の違いが主たる要因と考えられる。Bの湿度は昼夜を通して60~70%程度(降雨時は除く)に対しA1,A2の夜間の湿度は90%以上にまで上昇しており、Bの方がA1,A2に比べ蒸発しやすい環境となっていたと考えられる。A1,A2では直射日光によって試験孔内が高温状態となっていたと想像され、それが夜間に急激に冷やされたため、試験孔内の湿度がほぼ100%となり夜間での蒸発が生じにくくなった可能性があると考えられる。よって、基底の蒸発量は湿度差が寄与している可能性が考えられ、季節、地域特性によって若干の差が生じるものと推測される。

### (3) 透水流量の変化

図-3.6(a)よりA1,A2では安定状態となつてから透水流量が増加している孔が認められる。この時の同時刻の蒸発量も増加している。また、蒸発量が0となる最後の夕刻の計測ではすべての透水試験孔で透水流量が減少していることから蒸発の影響を受けていると考えられる。ただし、蒸発の影響と考えられる透水流量の増加量は各透水試験孔で一定量ではなく、試験孔の設置状態などの微細な差によって、孔内からの蒸発量に



はバラツキが生じていると考えられる。A1 の安定透水流量は  $0.03 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{s}$  でバラツキが大きく、A2 は

$0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$  以下で A1 よりもバラツキが少ない。A1 では盛立の施工仕様が異なり、締固め度も他のケースよりも低いことから、施工ヤード全体で締固めの粗密が生じたためと考えられる。

図-3.6(b)に示す B では蒸発量も少なく、透水流量は時間とともに増加する現象はみられない。試験開始から 6 時間程度で安定した流量となっていることがわかる。ただし、計測開始を送らせた B-2, B-5, B-7 では計測開始直後は透水流量が大きく、透水流量が安定するまでの時間は 9 時間程度となっており、他の孔よりも 3 時間程度長い。

これは先述したとおり、表層が乾燥したことが要因と考えられる。なお、B-1 の安定透水流量はいずれの孔も  $0.05 \text{ cm}^3/\text{s}$  以下でバラツキは少ない。

### 3.4 不飽和浸透流解析条件

不飽和浸透流解析は岡山大学地盤環境評価学研究室より公開されている解析ソフト AC-UNSAF2D<sup>7)</sup> をベースに改良したプログラムを用いて解析を行った。

#### (1) 解析モデル

解析モデルは半径 10m、高さ 10m の軸対象モデルとした (図-3.7 参照)。モデル中の試験孔の直径、深さ、孔内水位は各試験の実測値を用いた。中心軸と底面は不透水境界とし、側面および表面を浸出点境界とした。また、初期条件としてモデル内の飽和度は一様とし、飽和度に対応する有効体積含水率と v-G 式から逆算される圧力水頭をモデル全体に与えた。

#### (2) 構成式

飽和・不飽和浸透流解析の支配方程式は、ダルシー

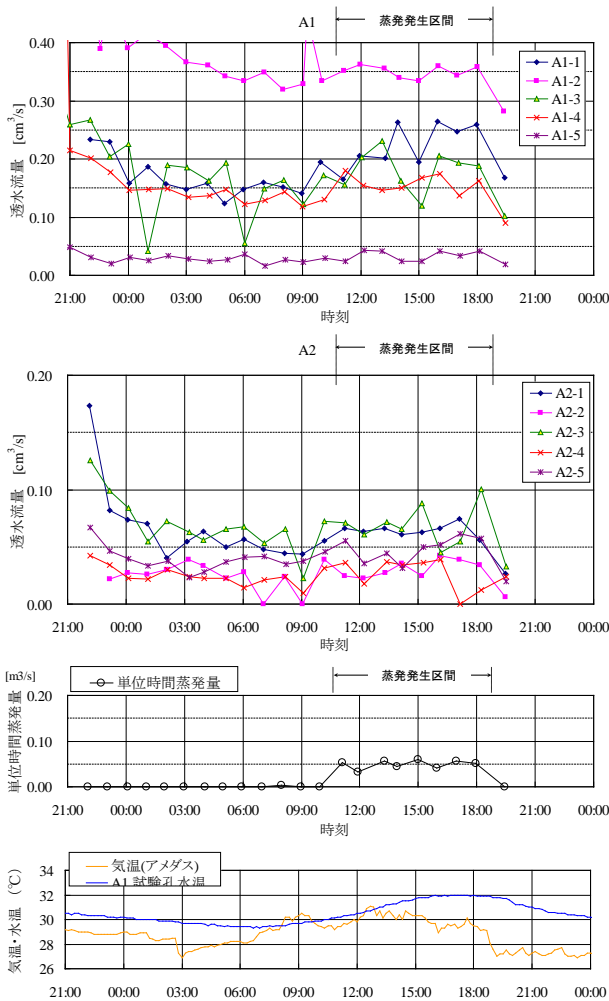


図-3.6(a) A1, A2 の透水流量と単位蒸発量の経時変化

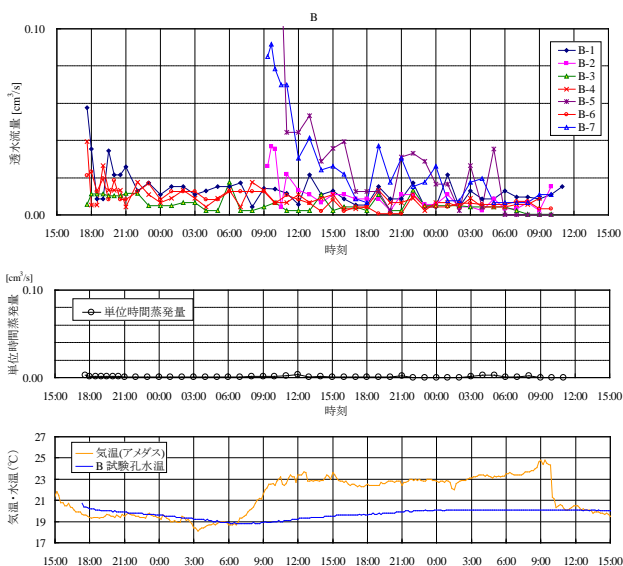


図-3.6(b) B の透水流量と単位蒸発量の経時変化

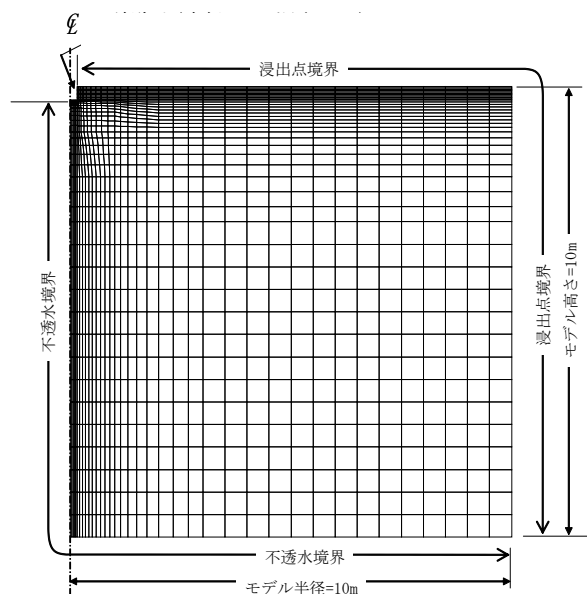


図-3.7 解析モデル

則と連続の式により以下のように求められる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + K_{i3} \right\} - q = (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3-1)$$

$$\frac{d\theta}{d\psi} \equiv c(\psi) \quad (3-2)$$

ここに、

- $K_{ij}$  : 透水係数
- $E$  : 圧力水頭
- $S_s$  : 比貯留係数
- $q$  : 流出入流量
- $c$  : 比水分容量
- $\theta$  : 体積含水率
- $2$  : 飽和領域で  $2=1$ , 不飽和領域で  $2=0$

なお、本研究では軸対象モデルによる検討を行ったため、式(3-1)を円筒座標系に変換した以下の式(3-3)に基づき数値解析を行っている。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ K_{rr} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{zz} \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_{zz} \right\} - q = (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3-3)$$

### (3) 解析物性値

解析物性値については、本試験で用いた材料の不飽和浸透特性を求める実験を行っていないため、胆沢ダムの◎◎材の不飽和浸透特性を参考に設定した。図-3.8 に胆沢ダムの試験結果から得られる体積含水率とサクシヨンの関係 ( $\theta - E$ ) と体積含水率と比透水係数 (不飽和浸透係数と飽和浸透係数の比:  $kr=k/ks$ ) の関係 ( $\theta - kr$ ) の関係をプロットし、さらに数値解析が必要となる近似曲線も併せて示す。これらの不飽和特性曲線は、以下に示す Van-Genuchten の推定式<sup>8)</sup>を用いて算出した。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( 1 + |a \cdot \phi|^n \right)^{-m} \quad (3-4)$$

$$kr = Se^2 \left\{ 1 - \left( 1 - Se^m \right)^2 \right\} \quad (3-5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3-6)$$

ここに、 $Se$  : 有効飽和度,  $kr$  : 比透水係数,  $\theta$  : 体積含水率,  $\theta_s$  : 飽和体積含水率,  $\theta_r$  : 残留含水率,  $E$  : 圧力水頭,  $a, n, m$  : 定数

近似式を定める際に必要な飽和含水係数 $\theta_r$ および残留含水係数 $\theta_s$ については実験結果を代入し、定数 $a, n$ の設定は準ニュートン法により残差二乗和を最小とす

る数値を設定した。この際、透水係数は  $6.4 \times 10^{-9} \sim 2.8 \times 10^{-7}$  の 3 桁にわたって分布するため、単純に残差二乗和を最小とする定数を求めると、透水係数が大きい範囲の試験値の精度に合わせた近似曲線となったため、試験実施区間で平均的な近似曲線となるよう、実験値と近似値の対数の差の二乗和が最小となるよう  $a, n$  を設定し、これに対応する  $\theta - E$  の関係を水分保持曲線とした。一方、相対透水性曲線については、解析値が安全側になるよう透水係数が大きい範囲での精度を高めるため実験値と近似値の残差二乗和が最小となる  $n$  を別途定め、これに対応する  $\theta - k/ks$  の関係を相対透水性曲線とした。実験結果の近似式の設定に採用した  $\theta_r, \theta_s, a, n$  を表-3.3 に示す。解析に用いた各孔の諸元を表-3.4 に示す。

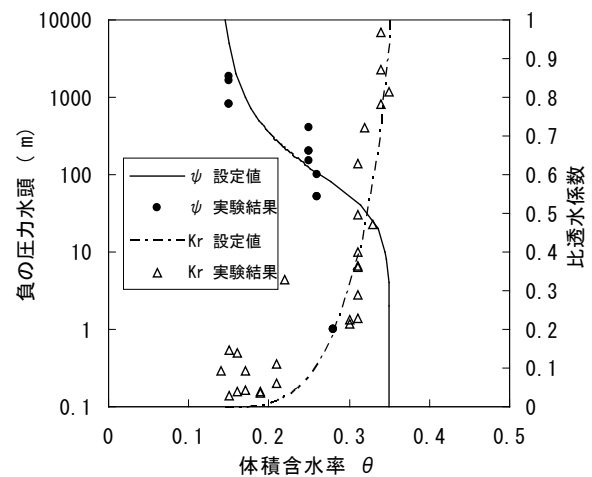


図-3.8 不飽和浸透特性 (実験値・近似値)

表-3.3 近似曲線の定数

	圧力水頭	比透水係数
$\theta_r$ : 飽和含水係数	0.350	0.350
$\theta_s$ : 飽和含水係数	0.139	0.139
$a$ : 推定式定数	0.0188	-
$n$ : 推定式定数	1.650	4.010

表-3.4 解析に用いた各孔の諸元

1)A1							
	A1-1	A1-2	A1-3	A1-4	A1-5		
試験孔半径 (cm)	13.00	14.00	13.60	14.50	14.00		
試験孔水位 (cm)	25.63	24.32	26.05	23.95	25.00		
飽和度 (%)	76.30	77.90	80.00	77.40	82.30		
サクシヨン (-cm)	93.87	85.47	75.50	88.02	65.69		
2)A2							
	A2-1	A2-2	A2-3	A2-4	A2-5		
試験孔半径 (cm)	14.00	13.80	13.00	14.10	14.10		
試験孔水位 (cm)	26.63	22.33	21.33	23.45	25.68		
飽和度 (%)	86.10	84.10	82.30	82.70	86.70		
サクシヨン (-cm)	51.40	58.67	65.69	64.08	49.32		
3)B							
	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
試験孔半径 (cm)	13.91	14.04	14.00	14.59	14.64	14.50	14.16
試験孔水位 (cm)	26.67	25.60	23.10	25.90	26.13	23.73	26.00
飽和度 (%)	85.20	87.37	88.22	87.25	86.75	88.45	85.58
サクシヨン (-cm)	54.61	46.93	44.26	47.27	49.32	43.27	53.17

(4) 飽和透水係数の同定方法

解析では修正マルカート法<sup>9)</sup>により、同定対象時間内の各時間ステップにおける累積浸透流量の解析値と実績値の残差二乗和が最小となるまで飽和透水係数を変化させて収束計算を行う。

(5) 解析ケース

全試験データを対象に蒸発の考え方を以下の3種類の解析ケースを定めた。

(a) 蒸発を考慮しない場合

蒸発分も含まれている実測の累積透水量から最終安定流量を推定して透水係数を算出する。

(b) 実績蒸発量を控除した場合

図-3.9 のように実測累積透水量から蒸発量を差引いて補正した値から最終安定流量を推定し透水係数を算出する。ただし、前節でも述べたとおり各試験孔で蒸発量のバラツキが生じていると考えられ、透水流量よりも単位時間当たりの蒸発量の方が多き孔については解析対象外とする。

(c) 蒸発発生後の流量の増加を無視した場合

蒸発によって透水流量が増加している区間の透水流量を蒸発発生前の透水流量で一定値として最終安定流量を推定し透水係数を算出する。図-3.10 に示すとおり、蒸発分が含まれていると推定される9:00~19:00の区間について直前の数時間の平均透水流量をその孔での安定透水流量とし、実測値と安定透水流量の差は蒸発

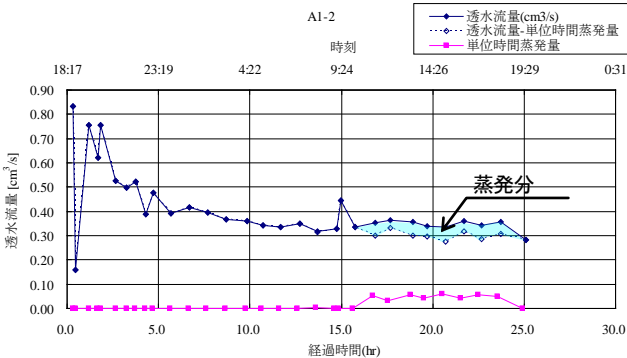


図-3.9 実績蒸発量を控除した補正例

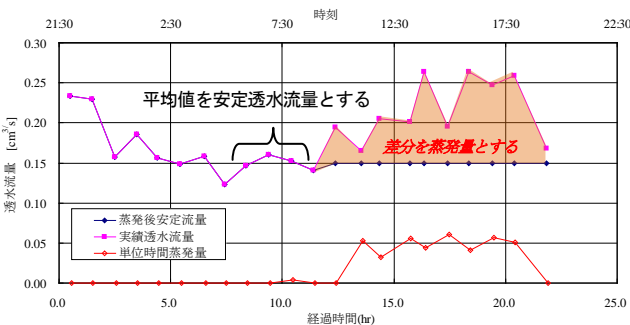


図-3.10 蒸発発生後の流量の増加を無視した補正例

量と考える。

3.5 不飽和浸透流予備解析

(1) 解析条件

不飽和浸透流解析に用いる不飽和浸透特性は、胆沢ダムの材料特性を利用したため、仮に実際の材料の不飽和浸透特性で解析した結果と異なる懸念がある。今回の現場透水試験の実測データを用いて、胆沢ダムと高瀬ダムの2種類の不飽和浸透特性を用いて、不飽和浸透特性の違いが解析結果に与える影響について検証した。

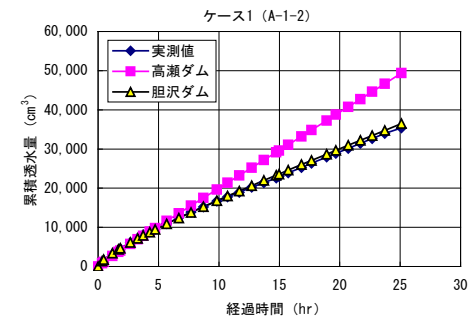
図-3.8 に、ここでの予備検討で用いた不飽和浸透特性を示す。解析ケースについては、今回計測した実測データのうち、比較的飽和度が低く、サクシオン領域が大きいケース1 (A1-2) と、今回の試験での平均的なサクシオン領域となるケース2 (A2-4) とし、それぞれで異なる不飽和浸透特性で検証した。解析ケースを表-3.4 に示す。

(2) 解析結果

表-3.4 予備解析ケース

ケース	解析対象データ	物性
ケース1胆沢	A1-2	胆沢
ケース1高瀬		高瀬
ケース2胆沢	A2-4	胆沢
ケース2高瀬		高瀬

ケース	透水係数
ケース1胆沢	$6.94 \times 10^{-5}$
ケース1高瀬	$1.09 \times 10^{-4}$



ケース	透水係数
ケース2胆沢	$2.81 \times 10^{-6}$
ケース2高瀬	$5.35 \times 10^{-6}$

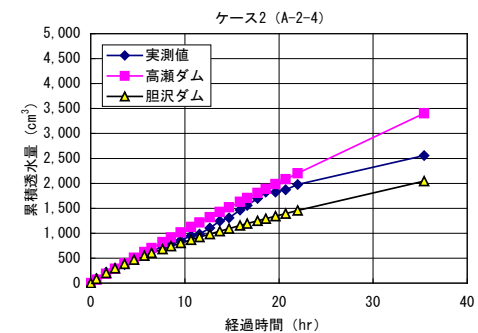


図-3.11 不飽和浸透特性を変えた解析結果

解析結果を図-3.11 に示す。不飽和浸透特性が違うため、累積透水量の軌跡は異なる結果となる。安定流量から求めた透水係数は飽和度が低く、サクションが大きいケース 1 では違いが大きくなるが、平均的なサクションのケース 2 では大きな違いはみられなかった。よって、今回の試験における飽和度領域では不飽和浸透特性が最終的な推定安定透水流量に与える影響は小

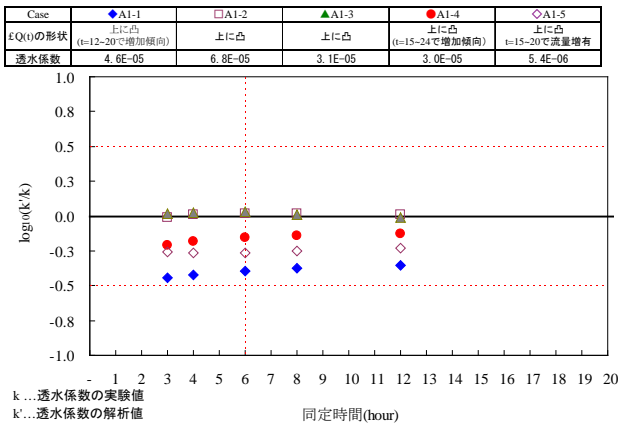
さく、解析結果の透水係数に大きな違いは生じないと考える。

### 3.6 不飽和浸透流解析結果

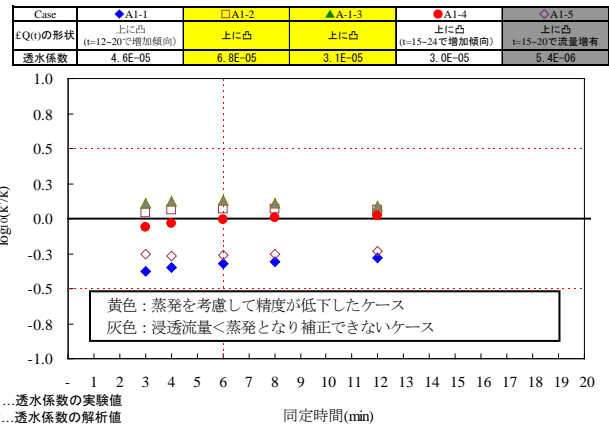
#### (1) 透水係数の推定精度

#### 1) 蒸発量測定孔より得られた蒸発量を控除した場合

(a)蒸発を考慮しない場合と(b)実績蒸発量を控除し

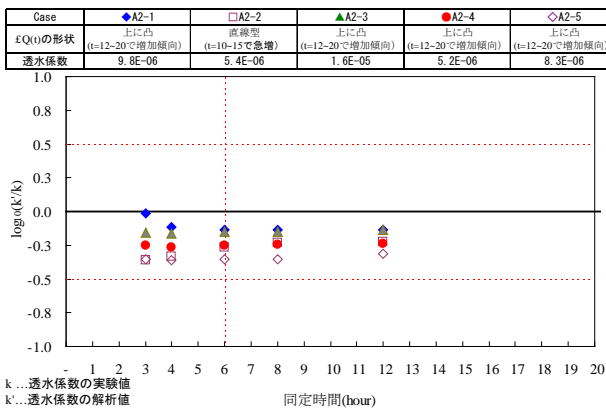


(a) 蒸発を考慮しない場合

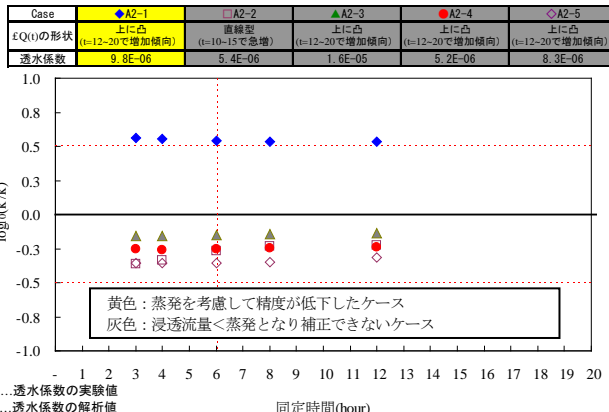


(b) 実測蒸発量を控除した場合

(1) A1 (8/21~8/23)

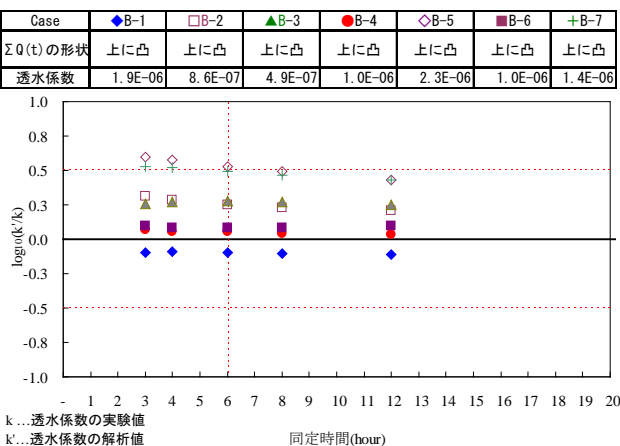


(a) 蒸発を考慮しない場合

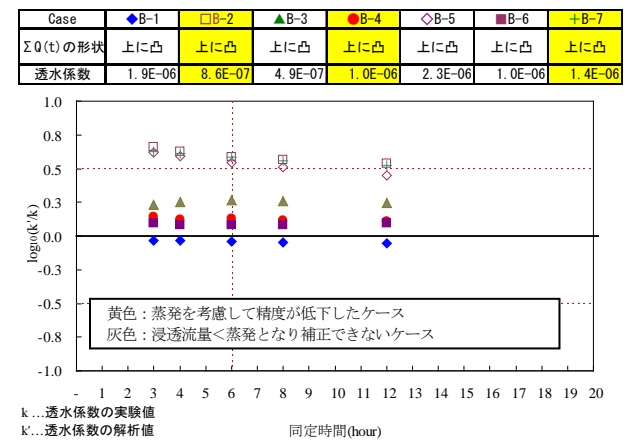


(b) 実測蒸発量を控除した場合

(2) A2 (8/21~8/23)



(a) 蒸発を考慮しない場合



(b) 実測蒸発量を控除した場合

(3) B (11/15~11/17)

図-3.12 現場透水係数の再現精度



た場合について、同定時間毎の透水係数の比率（解析値／実測値。数値が負になると、実測値に比較して解析値が小さいこととなる。）を図-3.12 に示す。

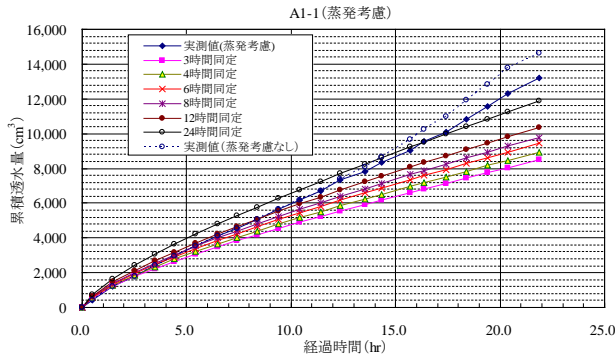


図-3.13 蒸発を考慮することによって解析精度が向上した例 (A1-1)

(a)蒸発を考慮しない場合では、17 ケース中 13 ケースで 6 時間の同定を行えば概ね  $\log_{10}(k'/k)$  は  $\pm 0.3$  以内に納まっている ( $0.5 \leq k'/k \leq 2.0$ )。その他の 4 ケース (B-5, B-7, A1-1, A2-5) でも  $\log_{10}(k'/k)$  は  $\pm 0.5$  程度である。蒸発を考慮すると、A1 の 6 時間の同定で  $\log_{10}(k'/k)$  が 0.2 程度で精度が向上する。ただし、蒸発の考慮をすることで、解析精度が向上する場合と低下する場合がある。特に A2-1 で蒸発を考慮したことによって精度が低下している。精度が低下したパターンの一例として A2-1 の累積透水量のグラフを図-3.14 に示す。蒸発量測定孔での得られた蒸発量を無条件に控除したことによって、地盤内への透水量が大きく減少しており、蒸発量を考慮した場合の実測安定流量が小さくなり、解析値よりも大きく透水係数が下がったためである。一方、精度向上した A1-1 の図-3.13 では、15 時間後からの蒸発による透水量（蒸発量）の増加が大きく、蒸発を考慮することによって本来の地盤内への透水量に近似できたと思われる。前節でも示したとおり蒸発量は各試験孔で異なっており、透水試験孔からの蒸発量が蒸発測定孔より得られた蒸発量に近い場合は、解析精度は向上するが、逆に両者の蒸発量が大きく異なる場合については、解析精度は低下する。したがって、各孔の蒸発量を 1 孔の蒸発量測定孔での計測値で代表させるのは適切とは言い難い。なお、A2 では各透水試験孔の透水量が蒸発量測定孔で計測した蒸発量よりも小さい試験孔が 4 孔確認されている。

## 2) 蒸発発生後の透水量の増加を無視した場合

各試験孔によって蒸発量が異なる可能性が高いため、蒸発によって透水流量が増加している区間の透水流量を蒸発発生前の透水流量で一定として最終安定流量を

定めた。上記の考え方(図-3.10 参照)から算出した各透水試験孔の累積蒸発量を図-3.15 に示す。新たな仮定に基づき算出した蒸発量は A1 でバラツキが大きく、蒸

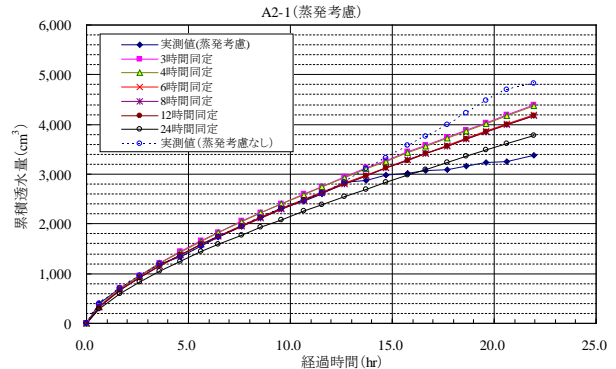


図-3.14 蒸発を考慮することによって解析精度が低下した例 (A2-1)

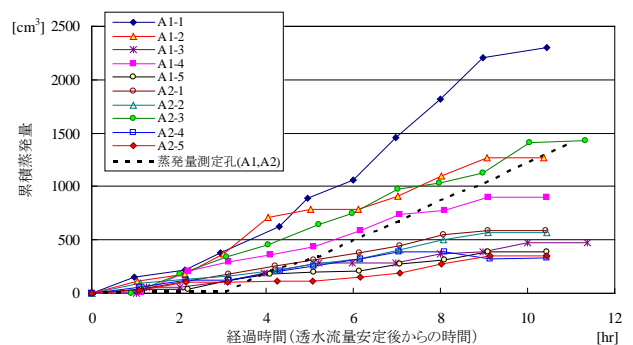


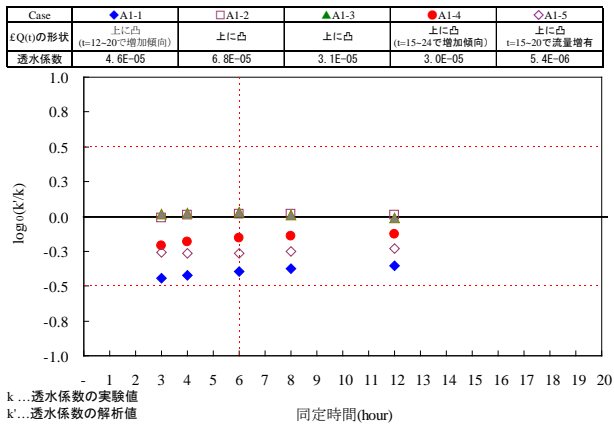
図-3.15 蒸発発生後の透水流量の増加を無視した場合の算術累積蒸発量

発測定孔(A1,A2)の実測蒸発量は A1 の平均程度である。

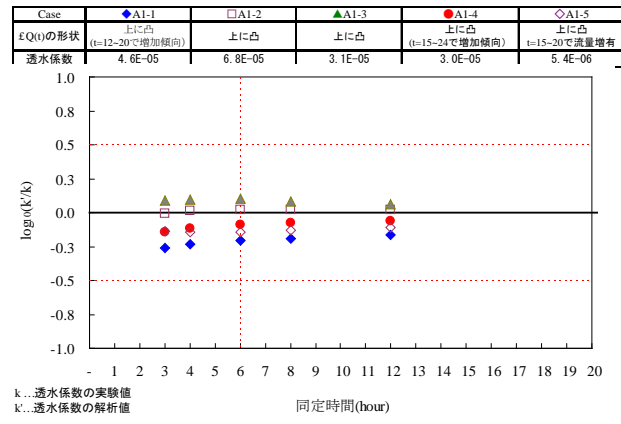
解析結果については、図-3.16 に示すとおり最終安定流量に対する再現精度は  $\log_{10}(k'/k)$  が概ね  $\pm 0.3$  以内に入っており、A2-3 のみ減少過程で最終安定流量を定めたため再現精度が低下する結果となった。なお B については、蒸発量が極めて少なかったため、本ケースでの検討の対象外とした。

## (2) 再現精度の傾向分析

いずれの同定時間の透水係数も実測よりも小さくなる結果となっている。また、3～6 時間で同定を行えば概ね透水係数が収束し、それ以上の同定時間でも最終的な透水係数に有意な差が見られないことがわかる。よって、不飽和浸透流解析での同定時間を 6 時間確保できるまで、試験を実施するのが透水係数の予測においては安全と考える。同定時間を 6 時間としたすべてのケースでの実測透水係数と解析より得られた透水係数の対比を図-3.17 に示す。図-3.17 より 8 月に実施した試験ケースでは、 $\log_{10}(k'/k)$  が負となり、解析値の方が実測値よりも小さくなる傾向がある。夏季において

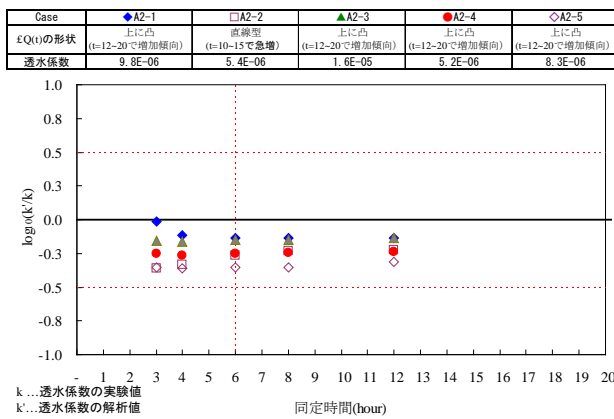


(a) 蒸発を考慮しない場合

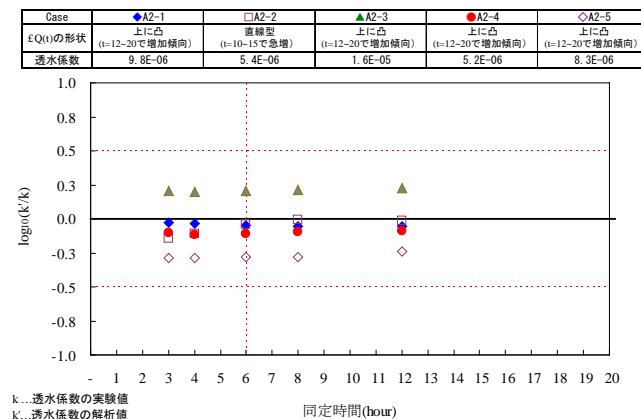


(b) 実測蒸発量を控除した場合

(1) A1 (8/21~8/23)



(a) 蒸発を考慮しない場合



(b) 実測蒸発量を控除した場合

(2) A2 (8/21~8/23)

図-3.16 現場透水係数の再現精度

	A1					A2					B						
	A1-1	A1-2	A1-3	A1-4	A1-5	A2-1	A2-2	A2-3	A2-4	A2-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
蒸発考慮なし(log <sub>10</sub> k'/k)	-0.39	0.01	0.03	-0.15	-0.26	-0.13	-0.26	-0.15	-0.25	-0.35	-0.10	0.25	0.28	0.05	0.53	0.08	0.49
蒸発考慮(log <sub>10</sub> k'/k)	-0.32	0.07	0.13	-0.01	-	0.54	-	-	-	-	-0.04	0.58	0.27	0.13	0.55	0.12	0.59
透水流量増加を蒸発分と仮定(log <sub>10</sub> k'/k)	-0.21	0.02	0.10	-0.09	-0.15	-0.05	-0.04	0.21	-0.11	-0.28	-	-	-	-	-	-	-
透水係数実験値(k)	4.6×10 <sup>-5</sup>	6.8×10 <sup>-5</sup>	3.1×10 <sup>-5</sup>	2.9×10 <sup>-5</sup>	5.4×10 <sup>-6</sup>	9.8×10 <sup>-6</sup>	5.4×10 <sup>-5</sup>	1.6×10 <sup>-5</sup>	5.2×10 <sup>-6</sup>	8.3×10 <sup>-6</sup>	1.9×10 <sup>-6</sup>	8.6×10 <sup>-7</sup>	4.8×10 <sup>-7</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	2.3×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	1.4×10 <sup>-6</sup>

黄色：実測蒸発量を考慮した場合に精度が低下ケース      灰色：浸透流量<蒸発量となり補正できないケース

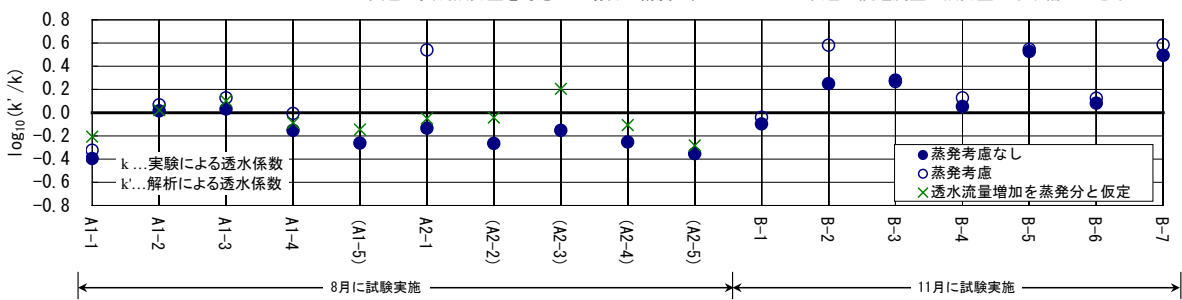


図-3.17 各ケースの実測透水係数と解析透水係数の差(6時間同定)

は蒸発の影響を受けやすく、同定対象とする試験時間以降において、蒸発量が増加した場合に、解析精度が低下する結果となる。本試験においては、日没以降に試験を開始していることから、試験開始後10~15時間後の日中に蒸発の影響で透水量が増え、実測値が増大するため解析値の方が小さくなったと考えられる。11月に試験を実施したBは実測値よりも解析値の透水係

数のほうが大きくなっている。Bの24時間後の累積蒸発量は、A1,A2の1/15程度であり、蒸発量が少なかったためA1,A2よりも蒸発を考慮した場合としない場合との差は小さい。また、解析精度のバラツキが大きくなっていることから、蒸発や計測誤差が生じやすくなっていることに加え、計測時の目盛の変化が小さくなったために、A1,A2の透水係数に比べBの透水係数は1

オーダー程度小さくなり相対的に誤差が表れやすくなったと考えられる。A1 と A2 で透水流量がほぼ定常となった時刻以降の透水流量増加を蒸発分と仮定した場合の結果からは、解析精度が向上するものが多い。このことから前節でも述べたとおり各試験孔からの蒸発量は試験孔の設置状況等によりバラツキがあり、蒸発量が多くなる夏季では透水係数の予測に大きく寄与するものと考えられる。

### 3.7 不飽和浸透流解析を用いた原位置浸透試験の短時間化の検討のまとめ

蒸発量は季節や試験孔の設置状況によって異なる。特に夏季では蒸発量のバラツキが大きく、蒸発の影響を考慮するにあたっては、測定孔を増やす等の対策が必要である。今回の蒸発を考慮した不飽和浸透流解析では、透水係数は蒸発の影響を受けやすい夏季で実測値よりも解析値の方が小さくなる結果となったが、蒸発量を適切に測定して解析に反映させることができれば、解析精度を向上させること可能と考えられ、6 時間程度までは安全に試験時間を短縮化できると考える。

## 4. まとめ

平成 24 年度は、現場盛立試験を実施することにより、密度試験や透水試験結果に影響する要因を分析し、密度や遮水性の多点計測と現場での迅速な把握を行う観点から、任意の粒径以下に設定せずに全粒径レベルで管理できる管理項目を検討した。また、試験時間が長く、施工の効率化の妨げになっている現場透水試験を対象に、不飽和浸透流解析を用いて簡易化する方法について、その精度向上のため、過剰間隙水圧、蒸発量の影響を分析し、試験時間短縮化の可能性について検討を行った。以下に、その結果をまとめる。

- (1) ICT によって得られる層厚データのみから、乾燥密度(全粒径)、D 値 (-19mm)、透水係数を管理することは困難である。乾燥密度(全粒径)は、粗礫混入率や細粒分含有率等の粒度から、ある程度値を予測することが可能と考えられる。しかし、粒度がばらついている材料では、盛立面全体にわたって乾燥密度(全粒径)を管理することは困難である。透水係数について、粗礫混入率をパラメータとして、飽和度との関係を分析すると、粗礫混入率に関わらず、相関がみられた。また、飽和度は全粒径レベルでの管理が可能であることから、RI 試験法を用いた多点計測と、迅速な遮水性の把握が可能であると考えられる。
- (2) 蒸発量は季節や試験孔の設置状況によって異な

り、特に夏季では蒸発量のバラツキが大きく、蒸発の影響を考慮するにあたっては、測定孔を増やす等の対策が必要である。今回の蒸発を考慮した不飽和浸透流解析では、透水係数は蒸発の影響を受けやすい夏季で実測値よりも解析値の方が小さくなる結果となったが、蒸発量を適切に測定して解析に反映させることができれば、解析精度を向上させること可能と考えられ、6 時間程度までは安全に試験時間を短縮化できると考える。

## 参考文献

- 1) 情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略, 2008 年 7 月.
- 2) 国土交通省：TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, 2012 年 3 月.
- 3) 山口嘉一, 佐藤弘行, 坂本博紀：ICT 施工を導入したロックフィルダムの施工管理方法の合理化に関する研究, 平成 23 年度土木研究所年次報告書, 2012 年 4 月.
- 4) 坂本博紀, 下山顕示, 山口嘉一, 大川孝士, 西垣誠：飽和・不飽和浸透流解析を用いたロックフィルダムのコア現場透水試験の再現解析, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1015-1016, 2011.7.
- 5) 建設省土木研究所機械施工部土質研究室：締固めた礫混じり土の工学的性質に関する実験的研究, 土木研究所資料 No.2995, 1986 年 2 月
- 6) U.S. Bureau of Reclamation : Earth manual, p.253, 1958.
- 7) 西垣誠, 進士喜英：有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析-AC-UNSAF2D-プログラム解析およびユーザーマニュアル, 岡山地下水研究会, 2005.
- 8) M. Th. van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 9) 中川徹, 小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版, pp.95-124, 1982.

RESEARCH ON RATIONALIZATION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT OF ROCKFILL DAMS USING ICT CONSTRUCTION

**Abstract:** In the public works in Japan, introduction of ICT construction is promoted for the purpose of the increase in efficiency of construction, improvement in accuracy and rationalization of quality control. Since the quality level required for a rockfill dam is higher than that of other earth structures, rationalizations of quality control using ICT construction have not been achieved yet. Since budget for public works including dams has been reduced because of the financial situation, the rationalization using ICT is an important issue which must be promoted. The certainty of construction process management can be improved using ICT construction. In addition, if we control grain size distribution and water content of embankment materials more appropriately using ICT, we can propose a new quality control method which can reduce the frequency of in-situ tests.

In fiscal year 2012, we conducted field embankment test to investigate the relationships among grain size distribution, density, permeability and other conditions. We conducted unsteady seepage analysis to predict the saturated permeability from early in-situ permeability test results to reduce time for in-situ permeability tests.

**Key words:** rockfill dam, ICT construction, rationalization of quality control, field embankment test, unsaturated seepage analysis.