

報文集

平成30年度



報文集 第30号 目次

融雪期に試験湛水を実施する供用中ダムの浸透量予測とその検証結果……………	1
	多田飛鳥
肥培かんがい施設の機能診断事例について……………	13
	村山和佳
農業水利施設（用水路）の機能診断調査についての事例紹介……………	23
	井上誠司
寒冷地における開水路の目地補修工法及び診断手法の適用性検討……………	35
	松本康宏・藤田修
用水再編・畑地かんがい事業地区における営農計画策定の事例紹介……………	45
～国営かんがい排水事業 芽室川西地区の事例～	
	君沢竜也
無人航空機（UAV:Unmanned Aerial Vehicle）の活用と事例について……………	55
	鈴木聡明・加藤裕
現地状況を効率的に把握するためのUAVと3Dレーザースキャナーの利用……………	61
	佐々木尊

融雪期に試験湛水を実施する供用中ダムの 浸透量予測とその検証結果

多田 飛鳥

1. はじめに

北海道旭川市の北東約20km地点に築造された当麻ダムは、昭和35年より供用中の農業用ダムである。

積雪寒冷地に築造されたかんがい用のダムでは、貯水を4～5月の融雪水に委ねていることが多い。

新設のダムでは、試験湛水が完了した後にかんがい用水の取水を開始するが、本ダムのような供用中のダムでは、これらを同時期(同年度)に実施することが要求される。

このため、試験湛水は、融雪水の流入が見込まれる4～5月に実施することとなるが、この場合、安全かつ確実に試験湛水を行うためには、当該期間の諸条件(降水量・融雪量)を把握する必要がある。

さらに、近年では温暖化や気候変動による融雪時期の早期化や、急激な気温上昇による突発的な融雪量の増加などが懸念されるため、精度の高い積雪融雪モデルによる融雪量を考慮した浸透量の予測が必要となる。

これら背景を踏まえて、本稿では「供用中のダムにおいて、融雪期に試験湛水を実施する場合の浸透量の予測方法」を紹介するとともに、予測値と実測値との比較による検証結果を報告する。



図-1 当麻ダム位置図

2. ダムの概要

2.1 ダムの諸元

当麻ダムの諸元を表-1に示す。

表-1 当麻ダム諸元

	既設堤体部	新設堤体部
貯水容量	3,039,000m ³	
基盤面標高	EL. 193.50m	EL. 207.00m
天端標高	EL. 214.80m	EL. 214.80m
堤高	21.30m	7.80m
堤頂長	221.00m	21.40m
堤体積	197,000m ³	3,000m ³

2.2 新設堤体の盛立概要

当麻ダムでは、流域の開発等により洪水流出形態が変化したため、洪水吐の改修により洪水流下能力を増強させ、併せて既設洪水吐撤去後の跡地に新設堤体を造成する工事が平成19年度より行われた(図-2参照)。

当麻ダムの新設堤体盛立は、平成28年7月1日より開始し、同8月25日までの約2ヶ月間で完了した。新設堤体の堤体積お3,000m³であり、既設堤体(197,000m³)と比較して約1/67と非常に小さい規模である。

当該ダムの既設堤体及び新設堤体の標準断面をそれぞれ図-3、図-4に示す。

2.3 新設堤体の盛立結果

新設堤体は、既設堤体と同様に「鋼土」、^{はかねど}「抱土」、^{だきど}「^{きやど}轄土」の3種類のゾーンで構成されている。

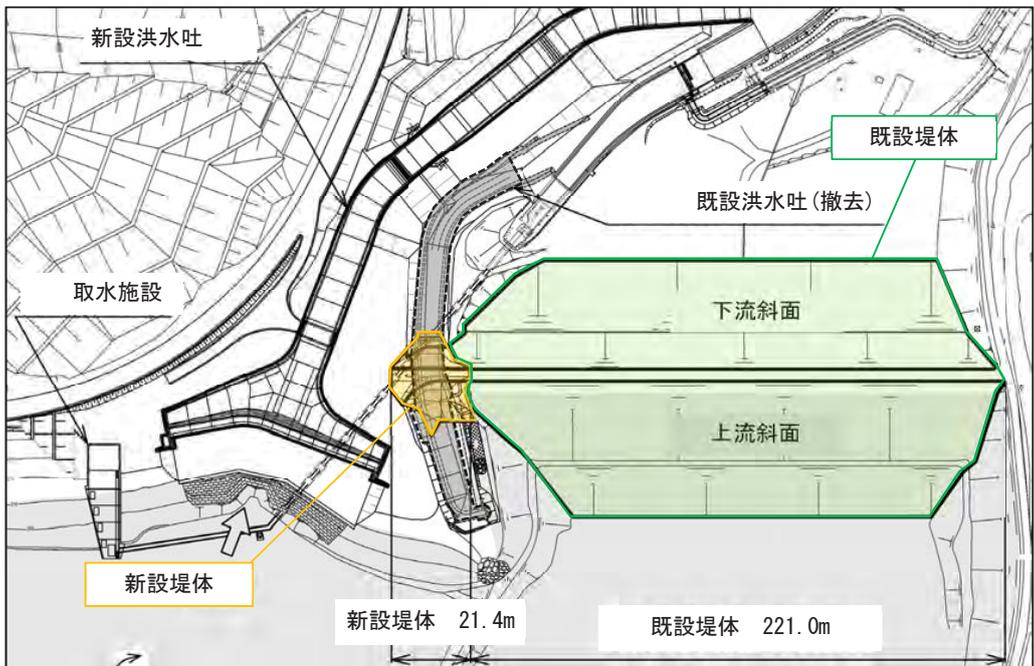


図-2 対象施設平面図

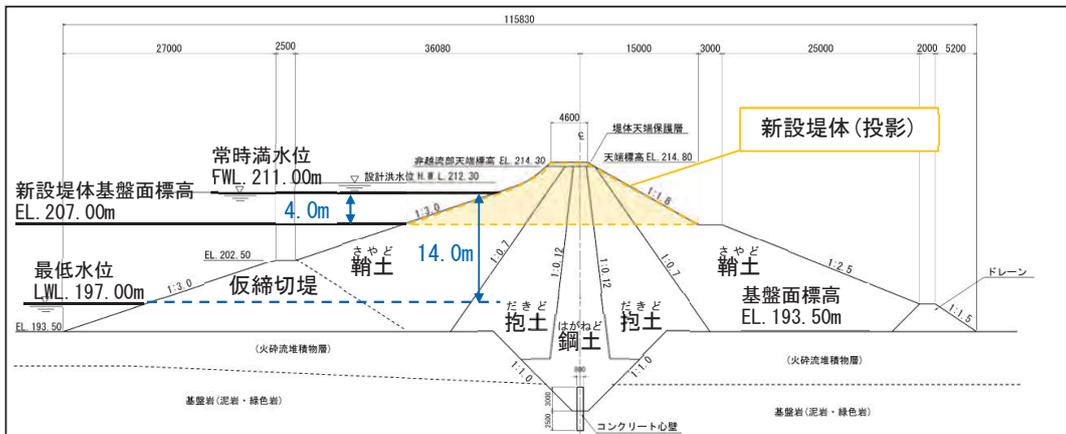


図-3 既設堤体 標準断面図

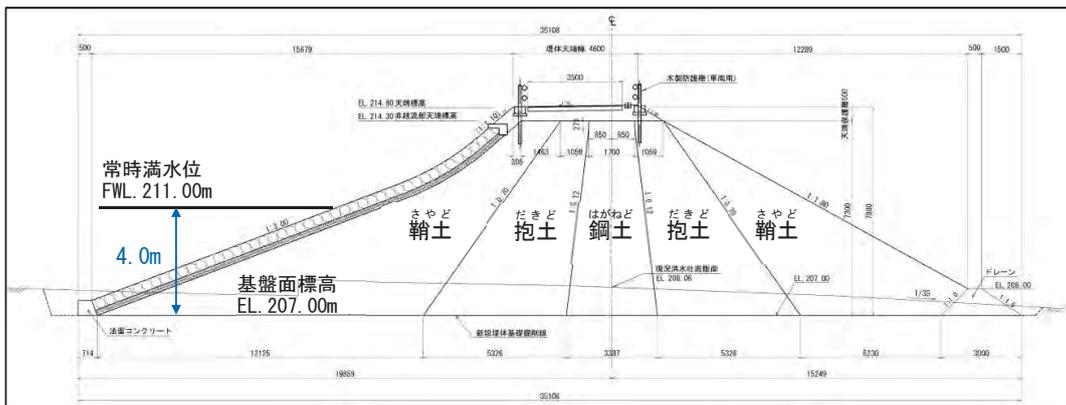


図-4 新設堤体 標準断面図

しかし、新設堤体は、施工規模が小さく狭い範囲で施工を行い、既設堤体の「鋼土」と「抱土」はほぼ同様な材料特性を示すことから、これらを同一の材料及び盛立仕様により施工を行っている。

新設堤体の転圧仕様は、平成25年度及び平成26年度に実施した盛立試験結果から、下表に示すとおり設定されている。盛立施工仕様を表-2、盛立管理基準値を表-3に示す。

表-2 盛立施工仕様

		盛立施工仕様	
		鋼土材	鞆土材
撤出し	機械	3ton級ブルドーザ	3ton級ブルドーザ
	厚さ	20cm以下/層	40cm以下/層
転圧	機械	11ton級振動タンピングローラバット型(SV512T)	11ton級振動タンピングローラバット型(SV512T)
	回数	8回転圧以上/層	8回転圧以上/層

表-3 盛立材料品質管理基準

	盛立管理基準	
	鋼土	鞆土
現場透水係数	$k \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$	-
施工含水比	$\omega f = 15.0\% \sim 17.9\%$	$\omega f = 9.4\% \sim 12.0\%$
管理密度(乾燥密度)	D値 $\geq 95\%$	D値 $\geq 95\%$
最大粒径	75mm	75mm

新設堤体は、既設洪水吐の跡地に造成するために縦断方向の延長が極端に短い(約11m)ことから、盛立標高が低い段階で上下流方向への転圧、盛立標高が高い段階でダム軸方向への転圧を行っている。その切り替えは、「ダム軸方向の走行距離 > 上下流方向の走行距離」となるEL. 211.00mで行っている。

また、転圧作業は、GNSS(全球測位衛星システム)により締固め機械の位置を取得し、走行軌跡や締固め回数をリアルタイムで運転席モニタに写すマシンガイダンス(MG)を採用し、施工精度を向

上させている。

次に、上下流方向転圧の状況を写真-1、ダム軸方向転圧の状況を写真-2に示す。

表-3に示す盛立材料品質管理基準に従って実施した各ゾーンの品質管理試験結果を表-4に示す。

表-4によれば、全ての結果において管理基準値を満足する数値が得られており、締固め度は、D値=95.6~99.0%が得られ、透水係数は、鋼土で平均 $K = 2.63 \times 10^{-6}$ (cm/sec)、鞆土で平均 $K = 2.01 \times 10^{-4}$ (cm/sec) が得られた。



写真-1 上下流方向転圧



写真-2 ダム軸方向転圧

表-4 品質管理試験結果一覧表

ゾーン区分	乾燥密度 $\rho t(\text{g/cm}^3)$			透水係数 $k(\text{cm/sec})$				含水比 $\omega(\%)$				締固め度 D値 (%)			
	最大値	最小値	平均値	管理基準値	最大値	最小値	平均値	管理基準値	最大値	最小値	平均値	管理基準値	最大値	最小値	平均値
鋼土	1.863	1.793	1.827	$\leq 1.00 \times 10^{-5}$	6.36×10^{-6}	6.04×10^{-7}	2.63×10^{-6}	15.0~17.9	16.73	15.07	15.82	95.0以上	99.0	95.6	97.6
鞆土	2.050	2.027	2.038	-	2.70×10^{-4}	1.21×10^{-4}	2.01×10^{-4}	9.4~12.0	11.00	10.43	10.67	95.0以上	97.1	96.6	96.9

4. 浸透量予測

4.1 浸透量の予測方法

試験湛水期間中は、貯水による堤内浸透量（真の浸透量）を把握する必要があるが、三角堰で計測する実測浸透量は、降雨や融雪の影響を受けた「みかけの浸透量」である。

このため、堤体の浸透量予測は、「農業用ダム機能診断マニュアル 計測データ分析用¹⁾」に示される「重回帰分析による浸透量再現モデル ((1)式)」により行った。

当モデルは、当時間における i 時間前の降水量 (R_i)、当時間の貯水位 WL を変数として与え、回帰係数 (a_i)、貯水位の影響 (c) 及び基底流量 (d) によって浸透量 (Q) を再現するものである。

【基本式】 ((1)式)

$$Q = \sum \frac{a_i \times R_i}{\text{降水項}} + \frac{c \times WL}{\text{貯水項}} + \frac{d}{\text{基底流量項}}$$

Q : 当時間における浸透量 (L/min)

a_i : i 時間前の降水に対する回帰係数

R_i : 当時間における i 時間前の降水量 (mm/hr)

c : 貯水位による浸透の係数

WL : 当時間の貯水位 (WL. m)

d : 基底流量 (L/min)

ただし、当該地区のような積雪寒冷地では、(1)式の基本式で与えられるパラメータの他に「融雪による浸透」を把握することが重要となる。

ここでの「融雪による浸透」は、堤体下流法面上の積雪が融け、降雨による浸透と同様に下流鞘土内を浸透し、法先ドレーンに集水されることである。

そこで、融雪量算定項として当時間における j 時間前の融雪量 ($M_{r,j}$)、 j 時間前の融雪に対する回帰係数 (b_j) を(1)式に与えることにより、降水量・融雪量・貯水位・基底流量の変化を反映した浸透量再現モデル ((2)式) を与えた。

【融雪浸透量再現モデル】 ((2)式)

$$Q = \sum (a_i \times R_i) + \sum \frac{b_j \times M_{r,j}}{\text{融雪項}} + c \times WL + d$$

b_j : j 時間前の融雪に対する回帰係数、

$M_{r,j}$: 当時間における j 時間前の融雪量 (mm/hr)

4.2 パラメータの設定

パラメータ ((2)式の a_i 、 b_j 、 c 、 d) の同定に使用する観測データは、浸透量・降水量・融雪量・貯水位・気温の5項目である。

ここで、同定に使用可能な新設堤体に関する観測データは、平成28年8月26日（盛立完了）から同12月18日までの約4ヶ月間と短い期間に限られ、さらには融雪期間（3～5月頃）の観測データが得られていない。

このため、パラメータの同定は、長期観測データが得られている既設堤体で行うこととし、ここで得られたパラメータを新設堤体の「初期パラメータ」として与えた。

初期パラメータは、影響を及ぼす時間 i 、 j 及び回帰係数 a_i 、 b_j を重回帰分析、貯水位の影響 c を A. Casagrande の方法により設定した。基底流量 d は、降雨及び融雪の影響がない時間の最低実測値とした。

既設堤体の同定期間は、平成26年4月1日～平成28年12月26日とし、新設堤体は、平成28年8月26日～同12月18日とした。

浸透量、降水量、貯水位、気温データは当該ダム地点で観測された実測データを使用し、欠測データ（落水後の10～3月など）についてはダム近傍に位置する比布観測所の観測データを使用した。

融雪量については観測データが得られていないため、推定式により算出することとした。

融雪量の算定は、一般的に下記の方法によって推定される^{2)、3)}。

- ①雪面低下法 ②熱収支法、
- ③積算温度法 ④タンクモデル法

①雪面低下法は、観測された積雪深の変化量から融雪量を推定する方法である。

ただし、融雪量の算定には、当該地点の正確な積雪深及び積雪の密度データなどを収集する必要がある。

②熱収支法は、大気及び地盤から積雪に向かうエネルギー及び積雪層から大気に向かうエネルギーの収支を評価し、大気と積雪層の熱交換をモデ

ル化した手法である。

この手法は高い信頼性を期待できる物理モデルであるが、放射収支量・気温・水蒸気圧・風向風速・雪面積雪温度・積雪密度等の多様な実測データを要求される。

③積算温度法は、融雪量が対象地域の気温と線形関係にあると仮定し、気温に融雪係数を乗算することで融雪量を求める手法である。

ただし、この手法は熱収支法で考慮されている放射収支量・風速などの物理性を表現できず、適用性に限界がある。

④タンクモデル法は、積雪層を1段のタンクと仮定し、積雪浸透による遅れを考慮した融雪量の算出が可能な高い再現性を期待できる方法である。

一方、この手法は一般的な流出解析に用いられるタンクモデル法と同様に概念モデルであり、パラメータの同定に長期観測データが必要である。

また、野村ら⁴⁾の研究によれば、積雪の層構造により浸透形態が異なるため、モデルパラメータは同年の積雪に対しても通年での同定が困難であったと報告されている。

ここで、③積算温度法に含まれるDegree-hour法⁵⁾は、キャリブレーションパラメータが1つでインプットデータが気温のみと簡便な手法であるが、地域によっては適用性の低い場合がある。

しかし、宮田ら⁶⁾の研究によると、北海道のような積雪量が多い地域、特に当該ダム地点を含む北海道北西部では、積算温度法による融雪量の推定に高い精度があったと報告されている。

以上のことから、本報での融雪量の推定は、当該ダム地点での観測データで対応できる積算温度法によって求めることとした。

積算温度法【Degree-hour法】((3)式)

$$M_{w,j} = K_w \times T_j$$

$M_{w,j}$: 融雪量 (mm/hr)、

K_w : 融雪係数 (mm/hr・°C)、

T_j : 気温 (°C) [$T > 0^\circ\text{C}$]

融雪係数は、既設堤体の実測値を用いた重回帰分析により設定した結果、 $K_w = 0.06 \text{mm/hr} \cdot ^\circ\text{C}$ が得られた。

この値は、日本で一般的とされている $0.03 \sim 0.33 \text{mm/hr} \cdot ^\circ\text{C}$ ($= 0.7 \sim 8.0 \text{mm/day} \cdot ^\circ\text{C}$)⁷⁾ の範囲に収まっていることから、妥当であると判断した。

ここで、(3)式は当該気温に対応した融雪量が算出されるが、残存する積雪量がそれ未満だった場合には水収支に不整合が生じる。

このため、前時間までの積雪量 (S_{j-1}) を考慮した (3') 式及び(4)式を与えた。

次に、前時間までの積雪量 (S_{j-1}) は、当時間までの積雪量 (S_j) として、(5)式が与えられる。

(5)式は、当時間の気温 (T_j) が 0°C 以下の場合にはそのまま積雪にカウントし、 0°C を超過する場合には融雪が発生することを意味する。

$$M_{w,j} = K_w \times T_{j,j} \quad [S_{j-1} > M_{w,j}] \quad \dots (3')$$

$$M_{w,j} = S_{j-1} \quad [S_{j-1} > M_{w,j}] \quad \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} S_j &= S_{j-1} + R_j \quad [T_j \leq 0^\circ\text{C}] \quad \dots \\ S_j &= S_{j-1} - M_{w,j} \quad [T_j > 0^\circ\text{C}] \quad \dots \end{aligned} \right\} (5)$$

S_j : 当時間までの積雪量 (mm/hr)、

S_{j-1} : 前時間までの積雪量 (mm/hr)、

R_j : 当時間の降水量 (mm/hr)

(3') 式～(5) 式で求められる積雪・融雪モデルの概念を図-7に示す。

これら式で算定した融雪量 ($M_{w,j}$) は、(2)式の融雪項に適用させた。

5. モデルの妥当性確認

構築したモデル ((2)式) の妥当性は、既設堤体で平成26年4月1日～平成28年12月26日、新設堤体で平成28年8月26日～12月18日の期間を対象として行った。その結果を図-8、図-9に示す。

モデルパラメータは、既設堤体では相関係数が最大となるように設定し、新設堤体では試験湛水時の管理を想定し、ピーク流出量が合うように設定した。

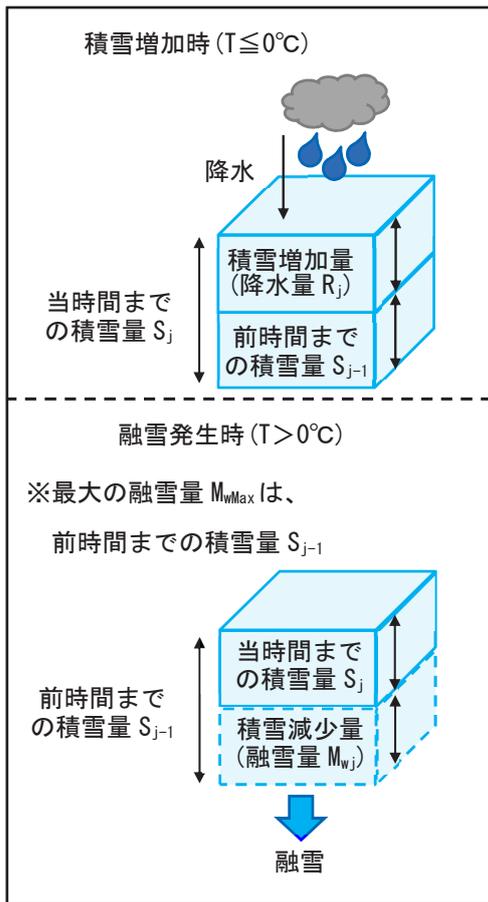


図-7 積雪・融雪モデル概念図

その結果、既設堤体では通年で相関係数 $R=0.66$ と比較的高い相関性が認められたため、降雨・融雪・貯水による浸透を概ね再現することができた。

一方、新設堤体ではピーク流出量によるフィッティングで相関係数 $R=0.53$ が得られた。

この結果、ピーク流出量は概ね再現され、低流量部でも大きな乖離は認められないものの、10月3日以降の少雨時及び低流量部で、実測値を計算値が超過する傾向となり、再現性の低下が見られた。

再現性低下の要因は、以下の3つと推測される。

- ①新設堤体が盛立完了後間もないため、観測データの収集期間が短く、なおかつ融雪期や貯水期間のデータが得られていないこと。
- ②平成28年10月3日以降で実測の基底流量が観測されなくなったこと。
- ③降雨による実測浸透が発生しにくくなったこと。

以上より、既設堤体では貯水・降雨・融雪の影響、新設堤体では降雨の影響による浸透量の再現を行った結果、概ね再現することができ、モデルの妥当性が確認された。

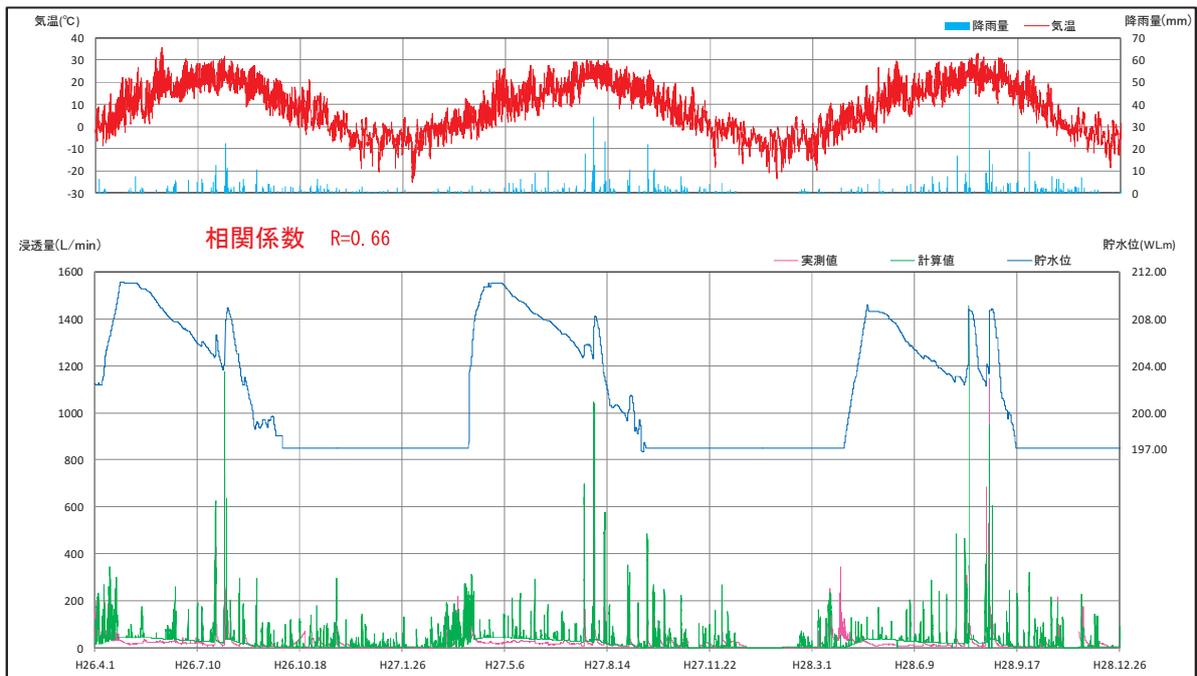
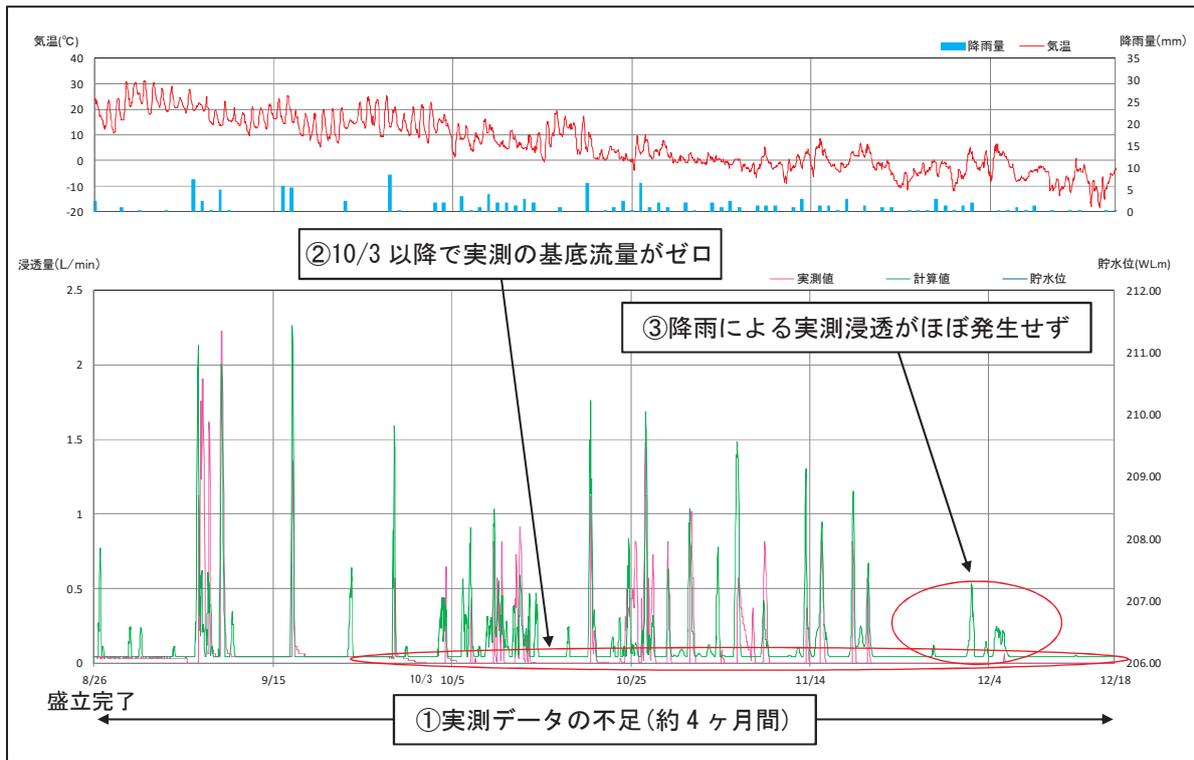


図-8 既設堤体 浸透量解析結果 (平成26年4月1日～平成28年12月26日)



図－9 新設堤体 浸透解析結果（平成28年8月26日～12月18日）

6. 試験湛水期間での検証結果

前項より本モデルの妥当性が確認されたため、試験湛水期間（平成29年4月10日～5月22日）を対象として浸透量を予測した結果、既設堤体で図－10、新設堤体で図－11に示すとおりとなった。

6.1 既設堤体

既設堤体では、相関係数 $R = 0.72$ が得られ高い相関となった（図－10参照）。

融雪期のピーク時波形は良好に再現できたものの、解析初期（4月10日～4月12日）で計算値が小さくなる傾向を示したことや、貯留時（4月13日～4月22日）で計算値の急激な減少による乖離が見られた。加えて、常時満水位時（4月29日～5月7日）に実測値が減少傾向を示したことから再現性が低くなった。

再現性低下の要因は、以下の4つと推測される。

- ① 4月10日～12日で計算値が実測値と比較して降雨及び融雪に対する反応が悪いのは、キャリブレーション期間を設けていないため、浸透量

予測を開始した4月10日以前の融雪・降雨・貯水位の影響を考慮できていないこと。

- ②貯留時の再現性低下要因は、降雨・融雪後における実測流出量の減少が緩やかなのに対し、計算値におけるピーク後の低下が顕著であるため、堤体内で流出遅れが生じ、当初に想定した降雨及び融雪の影響時間が長いこと。
- ③当該モデルでは流出遅れの再現として影響を及ぼす時間までの降雨・融雪に係数として与えているため、前タイムステップの浸透量を考慮しておらず、貯留による遅れが再現できていない可能性が高いこと。
- ④水位上昇時及び常時満水位保持期間の実測浸透量が、貯水位の上昇などの挙動に対応せず、減少傾向を示したため、当該ダムの浸透量は貯水による浸透の影響が小さく、降雨や融雪の寄与が大きいこと。

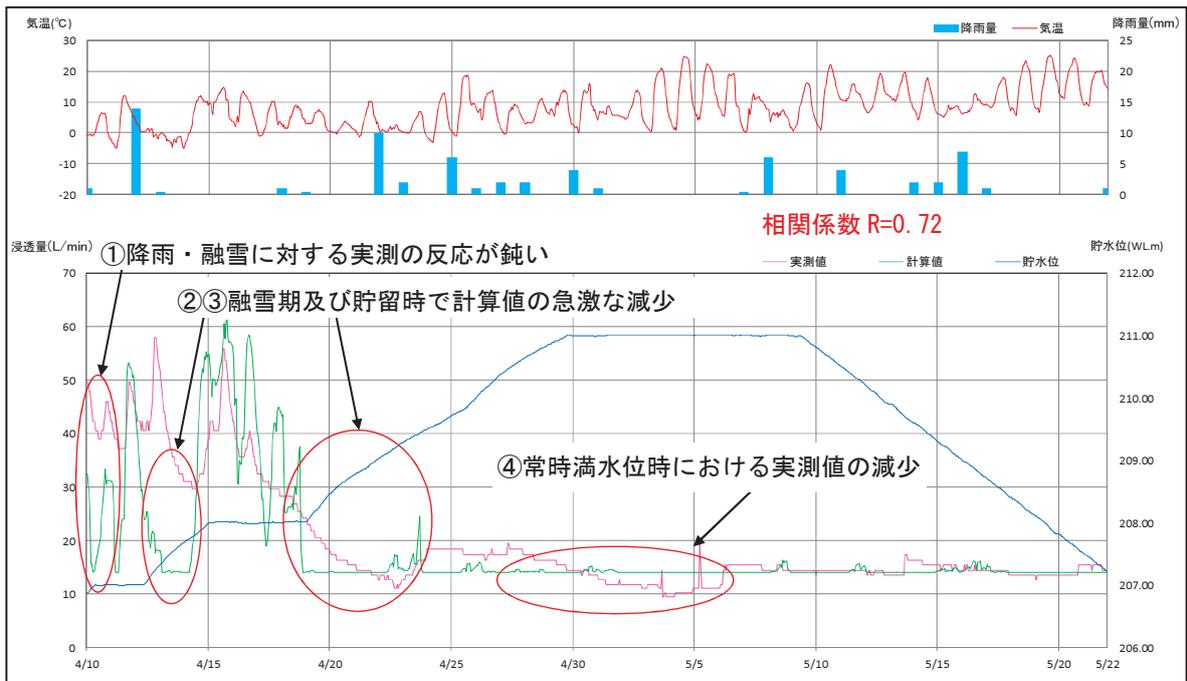


図-10 既設堤体 浸透解析結果（平成29年4月10日～5月22日）

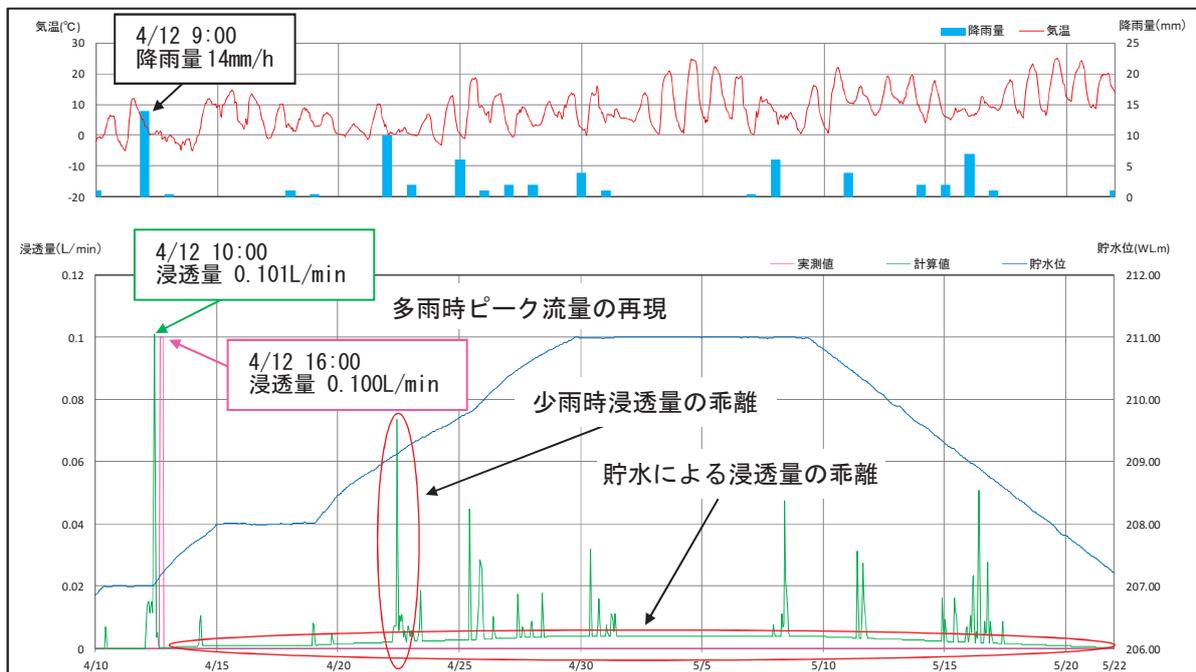


図-11 新設堤体 浸透解析結果（平成29年4月10日～5月22日）

6.2 新設堤体

新設堤体は、4月12日に観測されたピーク流量及び流出遅れは良好に再現できたものの、その他期間での再現性が低くなった（図-11参照）。

これは、実測浸透量が全期間を通じてほぼ0.00

(L/min)であったことに起因しており、堤内浸透水が法先ドレーンに到達しなかったか、あるいは堤外への漏水が発生している可能性が示唆される。

実測浸透量が観測されなかった要因は、以下の3つが挙げられる。

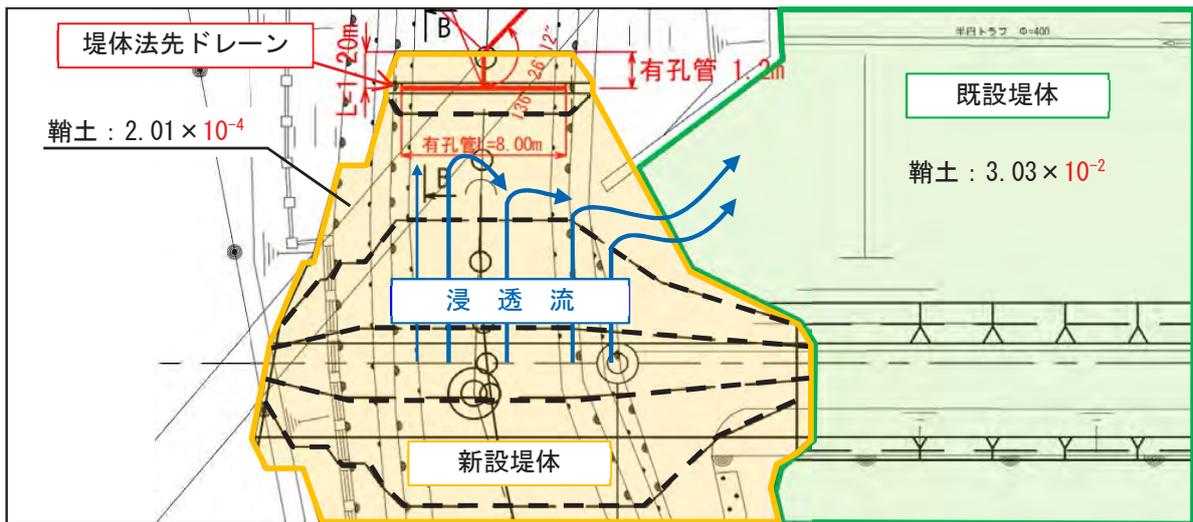


図-12 堤体内浸透流予測図

- ①新設堤体は盛立直後であるため、堤体内で間隙水圧の消散が完了しておらず、定常状態の浸潤線が形成されていないこと。
- ②「2.2 新設ダムの盛立施工結果」の表-4で示したように、新設堤体軸土ゾーンの平均透水係数が $K=2.01 \times 10^{-4}$ (cm/sec) であるのに対し、既設堤体のそれは、 $K=3.03 \times 10^{-2}$ (cm/sec) と約100倍大きいため、図-12に示すように新設堤体の鋼土・抱土を流下した浸透水が既設堤体の軸土に漏水している可能性があること。
- ③当該ダム周辺の地質は、剪断による破碎化や噴出相などの複雑な地質構造を示す当麻層が分布するため、ダムサイト内の基盤ではダムの安全性に問題がない小規模な亀裂や断層が確認されている。このため、適切な処理が施されているが、支障のない範囲で局所的に透水性の高い基盤や周辺地山へ部分的に浸透している可能性があること。

7. おわりに

構築したモデルによる新設堤体の浸透量予測では、堤体内で間隙水圧の消散が不十分であったことや既設堤体と新設堤体の下流軸土の透水性の違いなどにより実測浸透量が計測されず、検証期間中の大部分で再現が困難であったが、融雪期に観測されたピー

ク流量に対して再現性が得られた。

一方、既設堤体では、流出遅れ及び貯水位の影響に対する再現性が低い傾向にあったものの、実測値との高い相関が得られ融雪期のピーク時波形に対する再現性を確認できた。

以上の結果より、定常状態となった新設堤体の実測浸透量の計測、既設堤体で流出遅れ及び貯水位影響の再現精度をより向上することが可能になれば、当該ダム浸透量の予測が期待できる。

一方で、長期的なデータ収集を行うことが今後における最大の課題である。

これは、今回の浸透量予測で盛立完了直後の堤体を対象にしたため、「積雪寒冷地において重要な融雪期」、「近年多発している突発的な豪雨や台風の影響による多雨時の降雨量」、「堤体内で間隙水圧の消散が完了した定常状態時の浸透量」、「期別変化による基底流量」などの各種実測データが絶対的に不足していたことである。

当該ダムの新設堤体は、堤高に対する鋼土・抱土の幅が広い上に、貯水深が堤高の半分程度と低いことから、浸透量の増減は、貯水の影響より降雨及び融雪の影響が支配的と考えられる。

このため、本ダムのように法先ドレーンに集水するまでの影響時間が想定より長期化する可能性がある場合は、貯留関数法の導入や降雨及び融雪が影響

を及ぼす時間や日数の再評価などを行い、より精度の高い流出遅れを再現することが望ましい。

(NTCコンサルタンツ(株)北海道支社)

【引用文献】

- 1) 農林水産省農村復興局農業用ダム機能診断マニュアル計測データ分析用 平成23年4月、P17-19
- 2) 中津川誠・臼谷友秀・星清：積雪貯留を考慮した実用的な融雪流出モデル
- 3) 榎興和製作HP 融雪量推定手法
http://www.jasdim.or.jp/gijutsu/jisuberi_joho/kaiseki/yuseturyo/model.html
- 4) 野村睦・石井良之・兒玉裕二・小林大二：融雪流出の遅れ過程Ⅰ：融雪水の積雪内伝播低温科学物理篇 1991
- 5) 多目的ダムの建設 第2巻 環境調査編Ⅰ P140-142
- 6) 宮田俊介・朝岡良浩・風間聡 全国のAMeDAS観測点におけるDegree-Day法及び融雪係数の検証 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 68、No.4 I_343-I_348、2012
- 7) 板倉忠興：水理公式集 社団法人土木学会 P27、1949