

新桂沢ダムの温度応力対策について

—同軸嵩上げダムにおける温度応力対策試験施工—

札幌開発建設部 幾春別川ダム建設事業所 ○菅野 裕也
 札幌開発建設部 幾春別川ダム建設事業所 山内 洋志
 札幌開発建設部 幾春別川ダム建設事業所 蝶野 誠一

新桂沢ダムは、直轄初の同軸嵩上げ式の重力式コンクリートダムである。寒冷地ダムの施工では越冬時に発生するコンクリートの温度応力によるひび割れ発生を抑制する対策が必要となる。これに加え嵩上げダムでは、新旧堤体接合部の一体性確保という技術的課題がある。本報告は、新桂沢ダム温度応力対策工検討において、大型コンクリート供試体を使用した試験施工結果を報告するとともに、応力緩和のための対策工検討結果を報告する。

キーワード：基礎技術、同軸嵩上げ、温度応力、試験施工

1. はじめに

(1)ダムの概要

新桂沢ダムは、石狩川水系幾春別川上流に位置する北海道開発局で最初に建設された多目的ダムである桂沢ダム（昭和32年完成、堤高63.6m、堤頂長334.25m）を、我が国の直轄ダムとしては初めてダム軸を同じくして11.9mの嵩上げ（表-1、図-1,2）を行う再開発ダムであり、洪水調節、流水の正常な機能の維持、工業用水、水道用水、発電を目的としている。

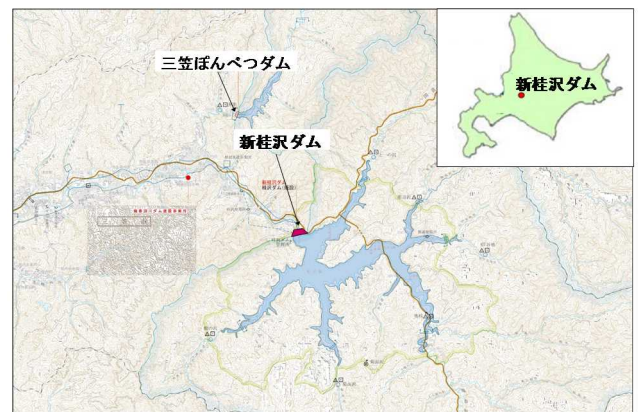


図-1 新桂沢ダム位置図

表-1 新桂沢ダムの計画概要

項目	桂沢ダム(既設)	新桂沢ダム	
堤体	位置	北海道三笠市桂沢地先	
	型式	重力式コンクリートダム	
	堤高	63.6m	75.5m(+11.9m)
	堤頂長	334.25m	397.00m(+62.75m)
	堤体積	350,000m ³	594,800m ³ (+244.8千m ³)
	非越流部標高	EL.188.60m	EL.199.90m
貯水池	集水面積	298.7km ² (うち、間接流域147.5km ²)	147,300千m ²
	湛水面積	4.99km ²	6.66km ² (+1.67km ²)
	総貯水容量	92,700千m ³	136,400千m ³ (+54,600千m ³)
	有効貯水容量	81,800千m ³	136,400千m ³ (+54,600千m ³)
	洪水期制限水位	EL.184.750	EL.190.700
	常時満水位	EL.187.000	EL.193.100
	サーチャージ水位	EL.187.000	EL.196.800
	設計洪水水位	—	EL.198.900
	計画流量	最大取水量 23.5m ³ /s	25.847m ³ /s
	計画高水流量 550m ³ /s	910m ³ /s	
	ダム設計洪水流量 660m ³ /s	1,200m ³ /s	

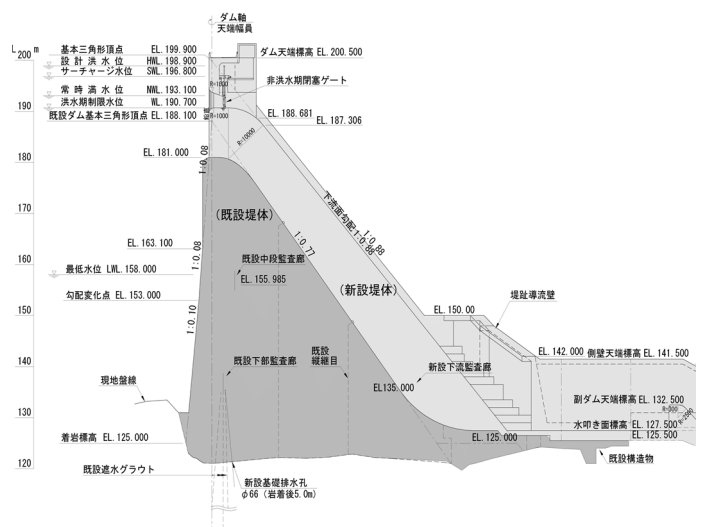


図-2 新桂沢ダム標準断面図

(2)積雪寒冷地における同軸嵩上げダムの課題

新桂沢ダムは積雪寒冷地で施工する嵩上げダムであり、越冬時において大きな温度応力が発生する。着目箇所として下記の3点がある(図-3)。

- ①新旧堤体接合部に発生する応力集中 → 新桂沢ダム(積雪寒冷地の嵩上げダム)特有の課題
- ②堤体下流面に大きな温度降下により発生する温度応力 → 積雪寒冷地のダムの共通の課題
- ③越冬時のリフト表面に発生する温度応力 → 積雪寒冷地のダムの共通の課題

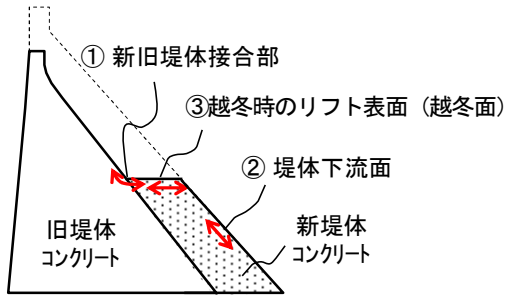


図-3 新桂沢ダムの温度応力の着目点

上記の②(堤体下流面)、③(越冬時のリフト表面)については、これまでの道内他ダムでは、「養生(断熱マット)により対策を講じている。①(新旧堤体接合部)については、③(越冬時のリフト表面)の内部拘束応力により、越冬面付近に水平方向の引張応力が発生し、新旧堤体接合部の隅角部に応力が集中し、新旧堤体接合面にひび割れが発生するリスクを有している。ダム嵩上げは、垣谷の嵩上げ理論に基づいた設計を行っており、新旧堤体接合部の一体化は嵩上げダムの構造系に関わる重要な前提条件である。本稿では新桂沢ダムの温度応力対策の考え方と大型コンクリート供試体を使用して対策効果の検証を行った現地試験施工について報告するとともに、応力緩和のための対策工検討結果を報告する。

2. 温度応力対策工(原案)

(1) 温度応力対策工の選定

新桂沢ダムの温度応力対策は、越冬面を加温する、あ

るいは温度低下しないように保温する方法を基本として、パイプウォーミング²⁾、電熱マット、断熱材設置の3案について検討し、温度応力対策としての確実性、経済性、施工性の面から、断熱材設置(EPS+養生マット)を選定した(図-4)。

【温度応力対策工の概要】
越冬時は堤体下流面全面を養生マットで覆う。1年目は越冬面(打設面)にEPS(厚さ1m)を配置すると共に、養生マット・ブルーシートを設置。

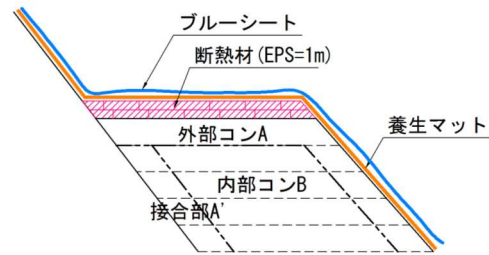


図-4 温度応力対策工概念図(EPS+養生マット)

(2) 温度応力解析

新桂沢ダムの打設スケジュールを踏まえた温度応力解析を行い、温度応力対策(EPS厚さ1m+養生マット)の効果検証を行った。

温度応力解析は、最大断面を対象として堤体のリフトスケジュールに基づき、貯水位・外気温・貯水温の変動を考慮したFEMによる逐次解析を行った。なお、貯水位は現ダムの既往貯水位実績の平均値を用いた。

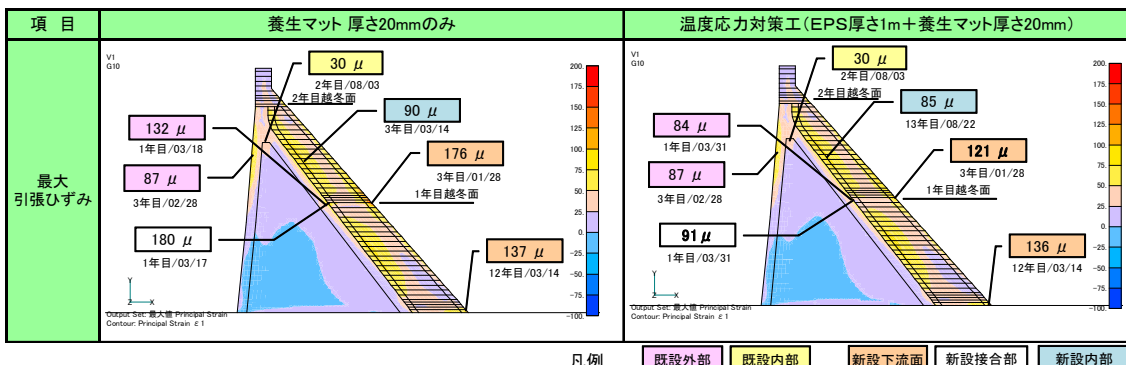
解析の結果、対策工を行った場合は越冬面の新旧接合部及び新堤体下流面に発生する引張ひずみは、概ね許容値(新旧堤体接合部100 μ 、堤体下流面120 μ)以下となることを確認した(表-2)。

3. 現地試験施工

(1) 試験目的

新桂沢ダムの温度応力対策工は、前述したようにFEM解析を用いて効果の有効性を評価している。解析においては、EPSの熱伝導率を0.036(W/mK)・厚さ1m、

表-2 温度応力解析結果(施工時~最終安定温度までの最大引張ひずみ、引張応力、最小ひび割れ指数の分布)



養生マットの熱伝導率を0.031 (W/mK)・厚さ20mmとして(熱伝導率はいずれもカタログ値)、2つの保温材の効果が複合された形での“熱伝達率”を「コンクリート標準示方書³⁾」に示された算定式(式①)を用いて算出し0.036 (W/m²K)と設定した。

この熱伝達率について、実施工に合わせてEPS(厚さ1m)+養生マット(厚さ20mm)の対策工による現地試験施工を行い、コンクリート供試体の実測温度が、想定した熱伝達率に基づく解析結果と整合するか確認し、解析定数(熱伝達率)及び対策工の妥当性を検証することとした。

熱伝達率(熱伝達係数)

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (\text{式①})$$

ここに、 η : 熱伝達率(W/m²K)
 β : 外気にふれる面の熱伝達率
 (一般値 12W/m²K)
 d_i : 断熱材の厚さ(m)
 λ_i : 断熱材の熱伝導率(W/mK)

(2) 試験方法

1) 基本方針

一定規模のコンクリートブロック供試体をダムサイトに築造・越冬させ、その実測温度と、解析モデルによる理論計算値(温度履歴解析)とを対比した。試験期間は、実施工の越冬直前リフトの施工日を考慮し、供試体コンクリートを11月初旬に打設し、外気温が最も低下する1月末までとした。

2) 解析ケース

- 1案：無対策
- 2案：養生マット(厚さ20mm)
- 3案：養生マット(厚さ20mm)+EPS(厚さ1m)

3) 使用材料

- ・コンクリート：C=285kg(購入)
- ・養生マット：熱伝導率0.031W/m・K,厚さ10mm×2枚
- ・EPS：熱伝導率0.036W/m・K,厚さ0.5m×2段

4) 試験供試体形状

塊体温度応力解析結果から、越冬面の表面温度は約3°Cで下流面から水平方向に平均約2mは同程度の温度分布となる(図-5)。また、試験施工供試体を模した二次元FEM解析により、供試体幅が5mより小さいと短期間でコンクリート内部温度が外気温程度まで低下し、断熱材の効果を的確に発揮することが困難となる。これらを踏まえ、供試体の幅は両側に2mの厚みを確保して、1m(中心部)+2m×2(側部)=5m、供試体の厚さは、基礎への温度低下を考慮して断熱温度状態が確保できるように2リフト(3m)とした(図-6、写真-1)。

5) 温度計測方法

本試験は、コンクリート温度を的確に把握することが重要であるため、熱電対を用いてコンクリート温度を計

測し、現地のデータロガーに記録した。熱電対は、1供試体につき、5断面×10個/1断面の計50個を配置した。

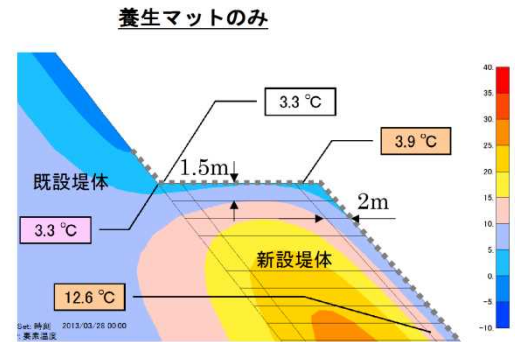
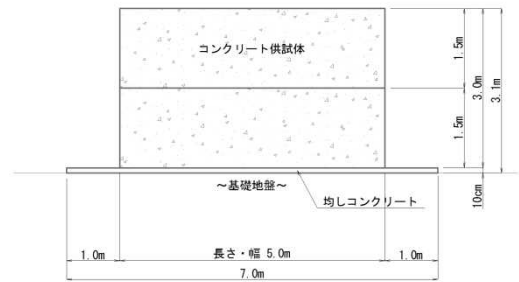
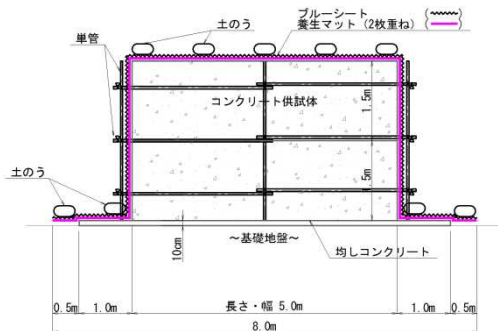


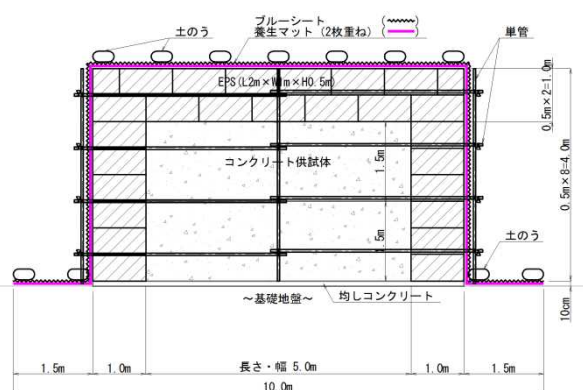
図-5 越冬面付近のコンクリート温度分布



1案：無対策



2案：養生マット(厚さ20mm)



3案：養生マット(厚さ20mm)+EPS(厚さ1m)

図-6 試験施工供試体側面図

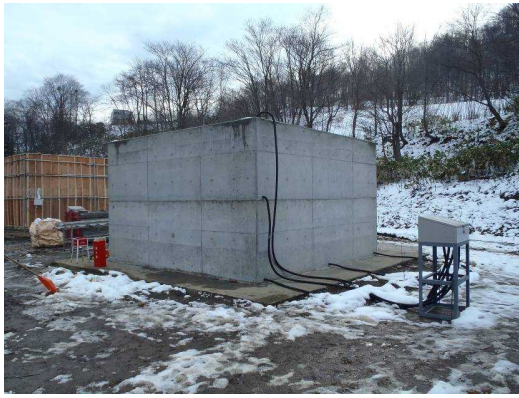


写真-1 現地試験施工供試体状況

(3) 試験結果

図-7に供試体の温度計測結果を示す。温度計測結果は代表として最も気温の影響を受ける供試体端部（図-8の赤丸で示す箇所）を示している。

無対策（1案）は、外気温と同様の挙動となっている。養生マット（2案）、養生マット+EPS（3案）は、打設直後に外気温相当まで急激に低下し、断熱材設置後はコンクリートの発熱により温度が上昇している。養生マット+EPS（3案）は、外気温の影響をほとんど受けず10℃程度で推移しており、高い保温能力を有することを確認した。

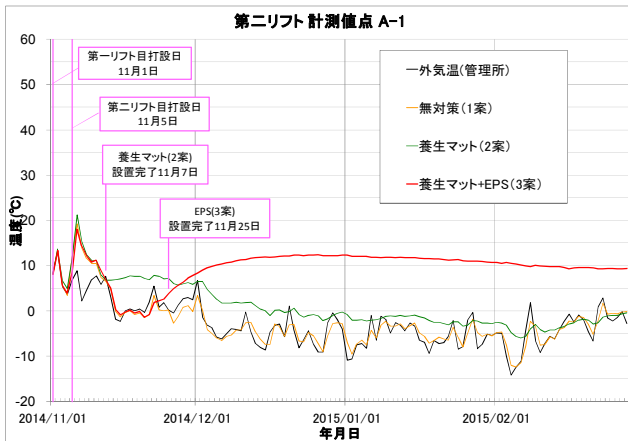


図-7 試験施工供試体温度計測結果

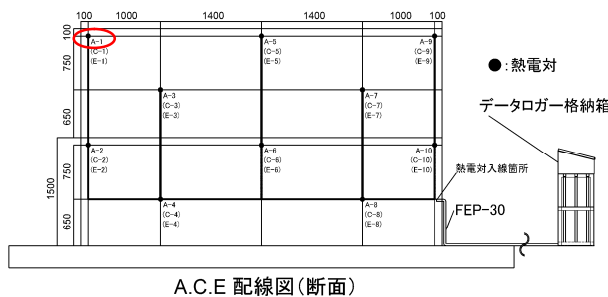


図-8 計測地点箇所図（赤丸箇所を図-7に明示）

(4) FEM解析による熱伝達率の検証

1) 解析モデル

解析モデルは、基礎地盤とコンクリート供試体を再現

した三次元FEM解析モデルを用いた（図-9）。供試体ケースに応じた断熱材の熱伝達率をモデル表面に与え温度履歴解析を行い、計算結果と熱電対による実測温度を対比して、断熱材の熱伝達率の検証を行った。

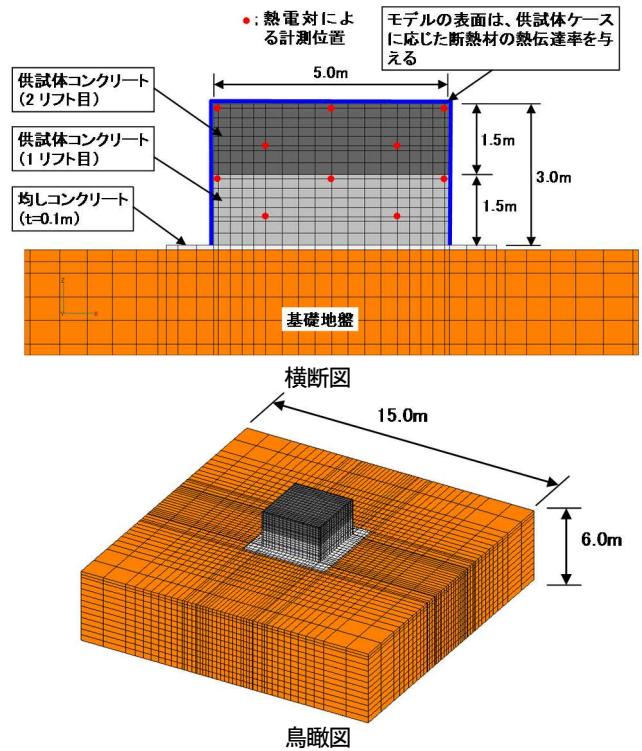


図-9 三次元 FEM 解析モデル図

2) 解析条件

- ・外気温条件；桂沢ダム管理所の日平均気温データ。
- ・熱伝達率；パラメータとして数値を変えて各ケースの最適値を同定。
- ・コンクリートの初期打設温度；熱電対の温度時刻履歴データから、打設時刻におけるリフト毎の平均値。
- ・コンクリートの断熱温度上昇式；実際に打設した生コンクリートのセメント量 285kg/m^3 を用いてコンクリート標準示方書の断熱温度上昇特性標準値により設定。
- ・コンクリートと基礎地盤の解析定数は表-3のとおり。

表-3 コンクリート・基礎岩盤の解析定数

項目	単位	生コンクリート	基礎地盤	備考
比熱	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	1.12	1.14	空気と岩盤の加重平均(土の間隙比0.3)
密度	kg/m^3	2,300	1,900	一般値
熱伝導率	$\text{W/m}^\circ\text{C}$	1.9	1.83	空気と岩盤の加重平均(土の間隙比0.3)
熱拡散率	$10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$	0.73	1.02	砂(湿潤)の一般値

3) 熱伝達率の検証

養生マット（2案）、養生マット+EPS（3案）について解析を行い、実測値と解析値の差分を整理した。

2案（養生マット）；熱伝達率を $0.6\sim 1.2\text{W/m}^2\text{K}$ で変化させて解析し、熱伝達率 $1.1\text{W/m}^2\text{K}$ で概ね実測温度を再現（誤差 1°C 未満）した（図-10）。この熱伝達率より、熱伝導率を逆算すると 0.024W/mK となり、カタログ値 0.031W/mK よりも小さい結果となった（表-4）。

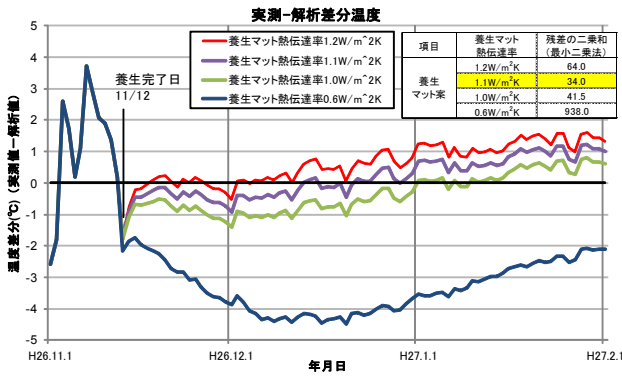


図-10 2案（養生マット）の実測値と解析値の差分

表-4 2案 養生マットの熱伝導率

養生マット(20mm)				
項目	記号	単位	数値	備考
外気に触れる熱伝導率	β	$W/m^2 \cdot K$	12.0	一般値
養生マット	厚さ	d2	mm	20
	熱伝導率	$\lambda 2$	$W/m \cdot K$	0.024
熱伝導率	η	$W/m^2 \cdot K$	1.1000	

3案（養生マット+EPS）；熱伝導率を $0.030W/m^2K$ （カタログ値より若干優れる程度） $\sim 0.043W/m^2K$ （最低規格程度）で変化させて解析を行い、カタログ値の $0.036W/m^2K$ 以下の熱伝導率を有することを確認した（誤差 $1^{\circ}C$ 程度）。これより、EPSの熱伝導率や厚さをパラメータとした熱伝導率算定式（式①）による熱伝導率は概ね妥当と判断した。EPSの保温効果は、設計で考えている特号規格の熱伝導率 $0.036W/m^2K$ と下位規格の熱伝導率 $0.043W/m^2K$ で解析結果に大差なく、規格を下げることも考えられるが、温度応力対策としては安全側に配慮して規格上位の特号（熱伝導率 $0.036W/m^2K$ ）を用いることとした。

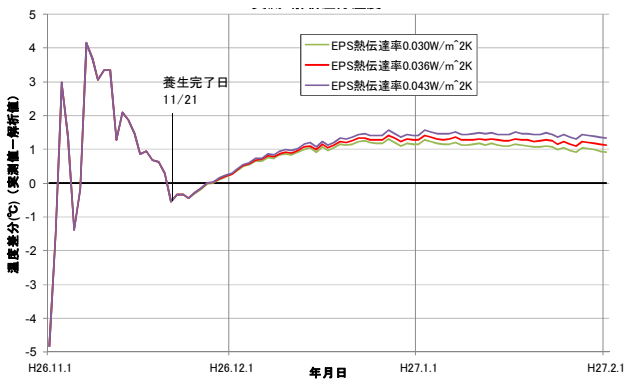


図-11 3案（養生マット+EPS）実測値と解析値の差分

表-5 3案（養生マット+EPS）熱伝導率

EPS(1m)+養生マット(20mm)				
項目	記号	単位	数値	備考
外気に触れる熱伝導率	β	$W/m^2 \cdot K$	12.0	一般値
EPS	厚さ	d1	m	1.0
	熱伝導率	$\lambda 1$	$W/m \cdot K$	0.037
養生マット	厚さ	d2	mm	20
	熱伝導率	$\lambda 2$	$W/m \cdot K$	0.024
熱伝導率	η	$W/m^2 \cdot K$	0.0358	≈ 0.036 (試験同定値)

4) 熱伝導率の設計値

ダム本体の温度応力解析に用いた度応力対策（EPS+養生マット）の熱伝導率は、カタログに示される熱伝導率、試験施工結果から式①より逆算して求めた熱伝導率の両方を踏まえて、安全側（いずれか大きい方）に設定し、設計値とした。（表-6）。

表-6 温度応力対策の熱伝導率設計値

	カタログ値	試験施工結果より	
養生マット熱伝導率	0.031W/mK	0.024W/mK	
EPS熱伝導率	0.036W/mK	0.037W/mK	
↓			
EPS+養生マット(20mm)の熱伝導率	式①より	式①より	
	EPS 1.0m	0.0351W/m ² K	0.0358W/m ² K
	EPS 0.2m	0.1591W/m ² K	0.1582W/m ² K
↓			
設計値	EPS 1.0m	0.036W/m ² K ※最大値を	
	EPS 0.2m	0.160W/m ² K 切り上げ	

4. 貯水位運用変更による温度応力対策（合理化案）

(1) 工事中の貯水位運用

本稿2節で述べた温度力対策は（EPS厚さ1m）は、現ダム貯水位運用実績を用いた温度応力解析により設定したものである。新桂沢ダム工事の貯水位運用は、工事中の洪水対応などの制約条件により計画していたが、堤体の温度応力等の緩和にも着目し、工事中貯水位運用を検討した。

越冬時に発生する引張応力は、貯水位が最も低下する3月下旬に最大値が発生する。これは、越冬前の高い水位時に下流側向きに受けた水圧荷重が水位低下により除荷させるためであり、この水位差を軽減、すなわち、3月下旬の貯水位をできるだけ高く保てば、堤体に発生する引張応力が緩和されると考えられる。

一方で、桂沢ダムでは、4月からの融雪出水に備えて3月下旬までに一定の空き容量を確保するため貯水位を低下させる必要がある。このため、過去20ヶ年の流量資料を用いたシミュレーション計算により、融雪出水時に満水位を超えず、かつ、3月末時点で出来るだけ高い水位を求め、その結果、3/31時点での目標水位をEL172mに設定した。

この貯水位条件を用いて温度応力解析を行った結果、越冬時に発生する引張応力は原案に比べて約70%に緩和される結果となった（図-12）。

(2) 対策の合理化（EPSの薄化）

工事中の貯水位運用により引張応力が緩和されることまた、現地試験施工により熱伝導率算定式（式①）の妥当性が確認されたことを受けて、原案（EPS厚さ1m）に対して、引張ひずみが許容値内に収まる範囲でEPSを薄くする合理化案について検討した。

その結果、合理化案はEPSの厚さ0.2mで引張ひずみが許容値以下に収まる結果となった（表-7）。

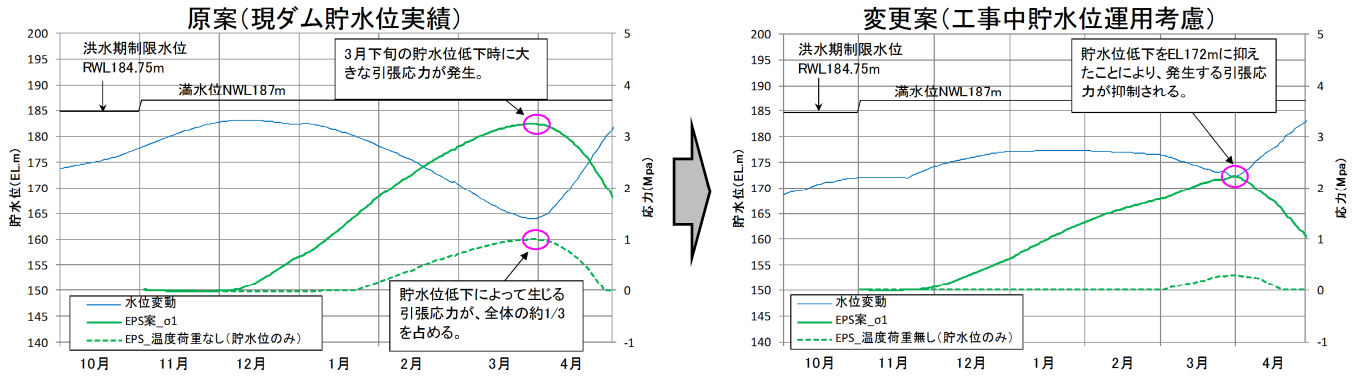
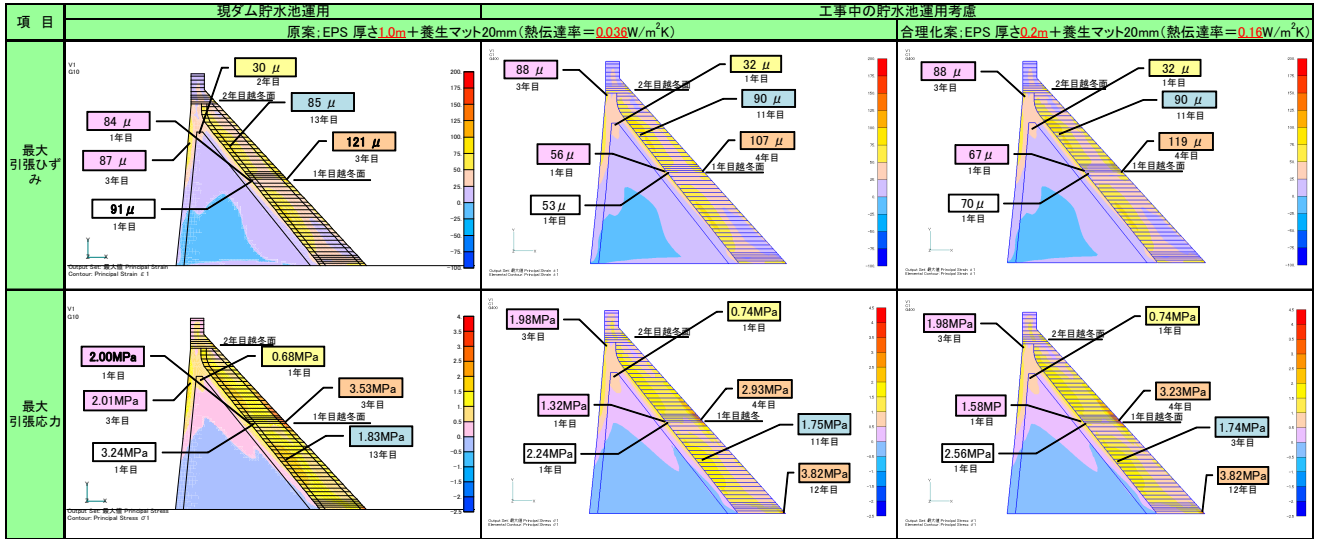


図-12 工事中の貯水池運用により引張応力の緩和

表-7 温度応力対策の合理化案 (EPSの薄化)



5. まとめ

本論の内容をまとめると以下のとおりである。

- ① 温度応力対策検討のため、現地に大型コンクリート供試体 (5m×5m×3m) を築造し、実際にEPSによる温度応力対策を設置して越冬させ、熱電対による供試体温度計測、3次元FEM温度解析により試験結果を再現し、熱伝達率及び対策工の妥当性を検証した。
- ② 検証の結果、熱伝達率算定式 (式①) で求めた熱伝達率による温度解析により、供試体の実測温度が概ね再現され、式①で求めた熱伝達率は妥当であることを確認した。
- ③ ダム本体の温度応力解析において用いる温度応力対策 (EPS+養生マット) の熱伝達率は、カタログに示される各材料の熱伝導率、試験施工結果から逆算して求めた熱伝導率の両方を踏まえて、安全側となるように設定した。
- ④ 工事中の貯水位運用を検討し、越冬前と越冬時の水位差を軽減、すなわち、3月下旬の貯水位をできるだけ高く保てば、越冬時に堤体に発生する引張応力が緩和される結果となった。
- ⑤ 新桂沢ダム工事中の貯水位運用を踏まえた温度応

力解析を行い、引張りずみが許容値内に収まる範囲でEPSを薄くする合理化案を検討した。堤体の温度応力解析を行った結果、EPSの厚さは0.2mで引張りずみが許容値以下に収まる結果となり、原案 (EPS厚さ1.0m) に対して対策を合理化した。

新桂沢ダムは、平成28年8月より堤体建設工事に着手した。温度応力対策工については、受注者の技術提案により、本報告とは異なる方法が提案されている。実施工に向けては、打設スケジュールや外気温条件が、解析と同じとは限らないため、再度確認の解析を行い、対策工の安全性を再確認することを考えている。

謝辞: 本検討を行う上で、土木研究所並びに国土技術政策総合研究所から評価手法及び評価内容に関する多数の助言を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) (財) ダム技術センター: 多目的ダムの建設 第5巻 設計Ⅱ編 平成17年, p255, 2005年
- 2) 佐々木 晋, 久保 徳彦, 山本 富佐雄: 新桂沢ダムにおける越冬時の温度応力対策-越冬リフトのウォーミング-, 国土交通省北海道開発局第54回 (平成22年度) 北海道開発技術研究発表会
- 3) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 平成8年, p184, 1996年