平成22年度

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—

札幌開発建設部　幾春別川ダム建設事業所　○佐々木　晋
札幌開発建設部　幾春別川ダム建設事業所　　久保　　徳彦
アイドールエンジニヤリング株式会社　　山本　富佐雄

ダムの嵩上げ工事においては、新旧堤体コンクリートを一体化させることが構造上重要である。寒冷地に位置する新桂沢ダムでは、コンクリート打設後における越冬養生時の温度応力が新旧堤体の一体化を阻害する可能性が予測され、その防止が重要な課題であった。検討の結果、従来の水和熱対策では効果的な温度応力低減が困難であったことから、越冬時の表面リフトに配管を行い、温水を通水して加熱する「ウォーミング」による温度応力を緩和する方法を考案し、その効果を温度応力解析により確認した。

キーワード：嵩上げダム、温度応力解析、ウォーミング

1. はじめに

新桂沢ダムは，国土交通省北海道開発局が石狩川水系幾春別川に、洪水調整・かんがい・水道・発電を目的に建設された重力式コンクリートダムである桂沢ダムを11.9m嵩上げし、堤高75.5mとするものである。新桂沢ダムの計画概要を、**表-1**に示す。新桂沢ダムの標準断面図を**図-1**に示す。新桂沢ダムは既設の桂沢ダム堤体下流面に腹付けし、同軸で嵩上げする方式である。

寒冷地に位置する新桂沢ダムでは、越冬養生時の温度応力が新旧堤体の一体化を阻害する可能性が予想されるため、温度応力解析を行い、温度応力対策方法を検討した。

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	334.3m	406.5m(+72.2m)
	堤体積	350,000m^3	596,000m3(+246千m^3)
	非越流部標高	EL. 188.60m	EL. 200.50m
貯水池	集水面積	298.7km^2(うち、間接流域 147.5km^2)	
	湛水面積	4.99km^2	6.66km2(+1.67km^2)
	総貯水容量	92,700千m^3	147,300千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
	設計洪水位	—	EL.199.800
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
	ﾀﾞﾑ設計洪水流量	660m^3/s	1,200m^3/s

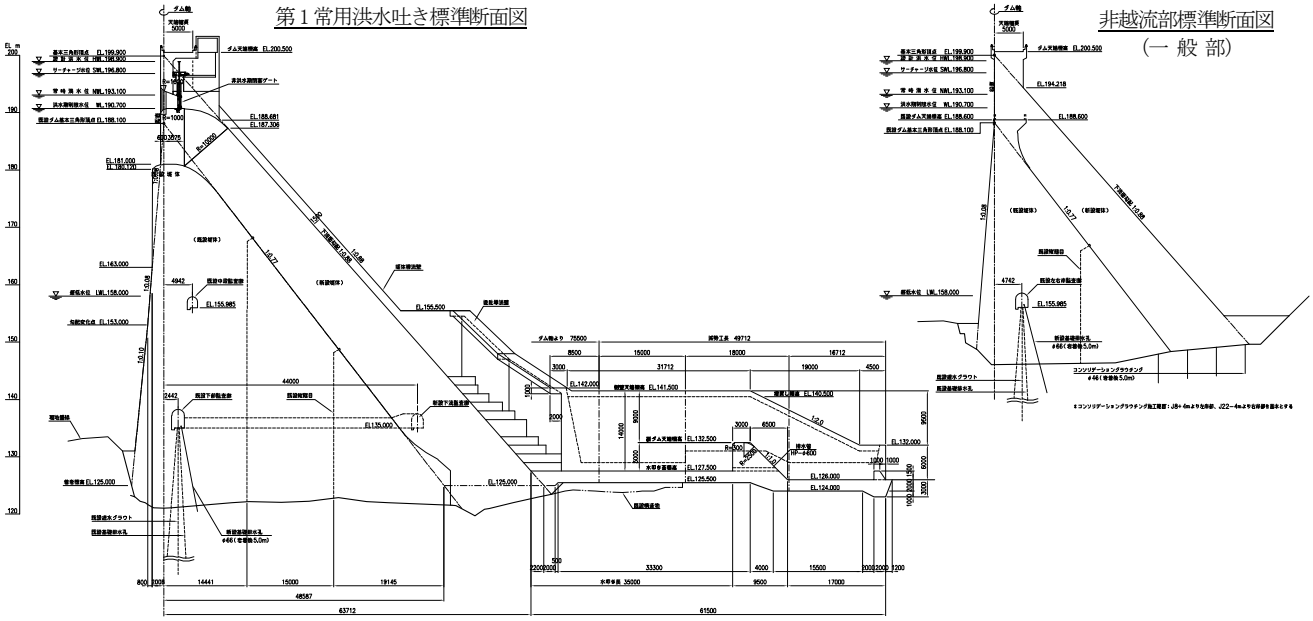


図-1　新桂沢ダム標準断面図

Susumu Sasaki, Norihiko Kubo, Fusao Yamamoto

2.　嵩上げダムにおける温度応力の影響

同軸で嵩上げするダムの断面設計は、一般に垣谷公式[1]等、剛体法で設計されており[2]、新旧堤体コンクリートの一体化を前提としている。

越冬を有する新桂沢ダムにおいては、越冬時に外気温の降下によりコンクリート表面温度が降下し、越冬面に内部拘束応力が発生する。[3]また、施工中の新旧堤体接合部は隅角をなすため、**図-2** に示すように、新旧堤体接合部に応力集中が発生し、一体化が保証されない可能性が考えられた。このため、有限要素法による逐次解析を行い、温度応力発生機構を検証した。

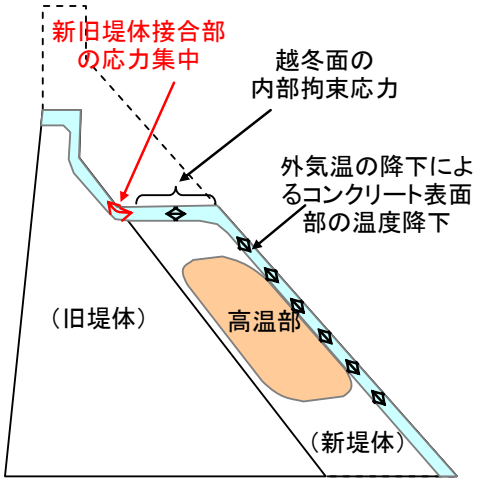


図-2　越冬面及び新旧堤体接合部の温度応力発生機構

(1)　解析条件

温度応力解析モデルを、**図-3** に示す。要素の大きさは、ダム表面の温度変化に対するダムコンクリート反応深さを勘案して 25cm 程度とした。

なお、新旧堤体接合面のひびわれの伸展はジョイント要素で表現した。

温度応力解析条件を**表-2** に示す。解析条件は、桂沢ダムにおける計測値および試験値を主として用い、不足するものについては他ダムの事例を勘案して定めた。本解析において、特徴的な解析条件を以下に記す。

a) 外気温

温度応力解析に用いる外気温は、日間変動の影響を考慮するために、一般的なサインカーブ近似ではなく、観測された外気温の変動をそのまま用いることとした。桂沢ダムにおいて外気温は、毎日 9 時に観測されたデータが蓄積されている。外気温データは、平成 3 年から平成 19 年（1991 年～2007 年）の 17 年間に観測された桂沢ダムのデータから、新桂沢ダムの打設年数を考慮し 1/4 確率年程度の厳しさとなる平成 12 年（2,000 年）の外気温と桂沢ダムのコンクリート表面温度の観測結果を勘案して定めた（**図-4**）。

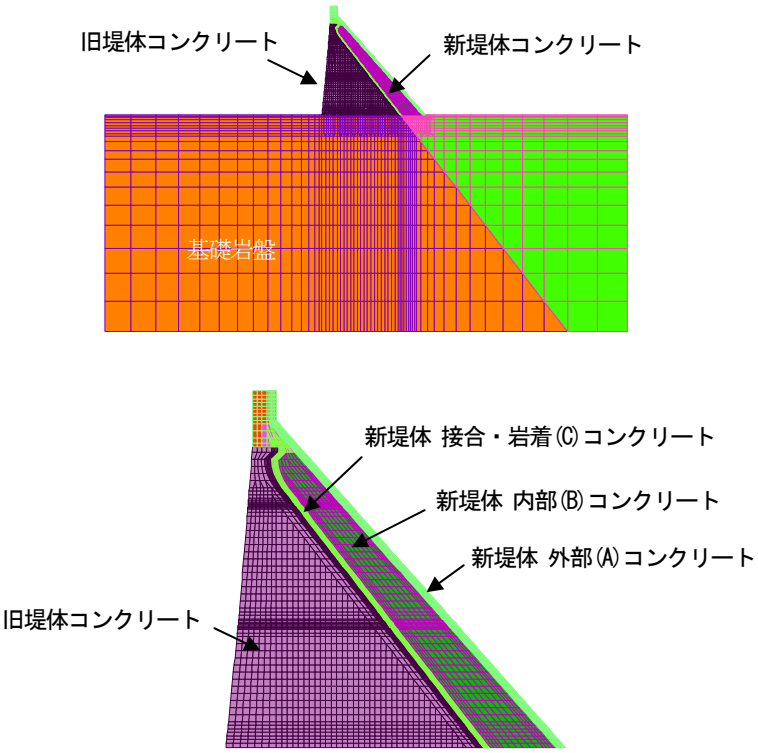


図-3 解析モデル

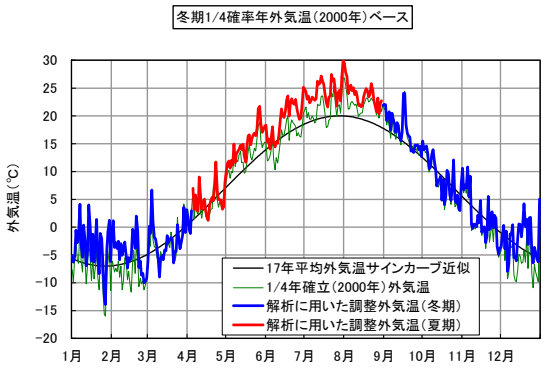


図-4　解析に用いる外気温（平成 12 年（2000 年）ベース）

b) 貯水池水温

温度応力解析に用いる貯水池水温は、月 1 回の鉛直温度分布および毎日の表面水温のデータのある平成 9 年 1 月から平成 18 年 11 月の水温分布データに、毎日の鉛直温度分布が得られているデータ（平成 3 年 4 月～平成 3 年 11 月）を用いて、月 1 回の鉛直温度分布データおよび毎日の表面水温のデータを補間し、**図-5** のとおり設定した。

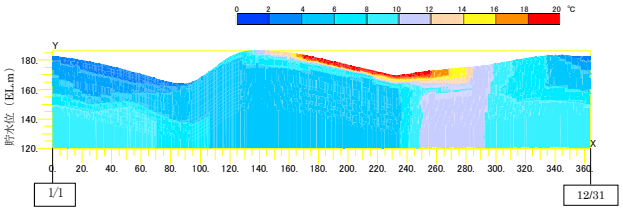


図-5 貯水池温度の経時変化

Susumu Sasaki, Norihiko Kubo, Fusao Yamamoto

c) コンクリートの発熱特性

温度応力解析に用いるコンクリートの発熱特性は、ダムコンクリート用のセメントである、中庸熱ポルトランドセメントとフライアッシュの混合セメントの長期的な発熱特性を考慮するために、断熱温度上昇試験結果とセメントの水和熱を勘案した補正値とした[4), 5)]（**図-6**）。

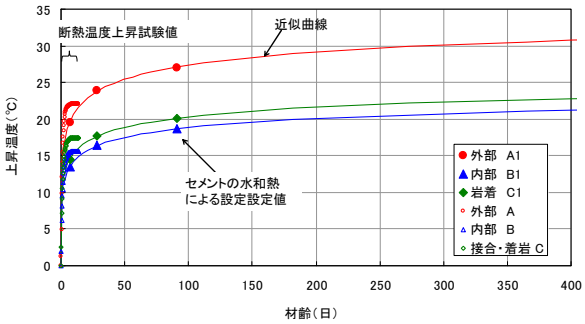


図-6 解析に用いたコンクリートの発熱特性

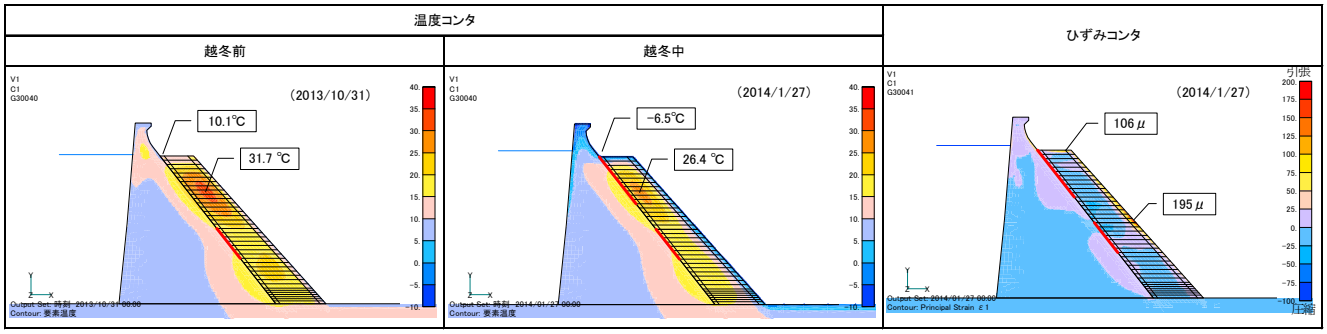
表-2 温度応力解析条件

区分	項目	計算条件							備考
初期条件・境界条件	外気温	過去 17 年間の外気温に基づき冬期 1/4 確率年外気温を入力 桂沢ダムの実測値と合うように、冬期および夏期の外気温を調整							平成 3 年(1991 年)～平成 19 年(2007 年)(9 時気温)
	貯水位	過去 50 年間の日貯水位の平均を年データとしてつないた貯水位							昭和 33 年(1958 年)～平成 19 年(2007 年)
	貯水温	平成 9 年 1 月～平成 18 年 11 月までの水温分布データを参考に設定							鉛直分布データをもとに補間
	骨材温度	上記外気温の 6 日積算(平均)温度(T_6)として設定　$Ta=T_6$							平成 3 年(1991 年)～平成 19 年(2007 年)(9 時気温)
	練混水温	平年貯水温(過去 10 年間の日毎の貯水温(表面水温)を平均)を練混ぜ水温(Tw)と設定							平成 9 年～平成 18 年
	打込温度	ヒートバランス計算(下記式による計算値)による $T=Q/CW$　(5℃＜T) $C=(CgWg+CsWs+CcWc+CwWw)/W$,　$W=Wg+Ws+Wc+Ww$ $Q=CgWgTg+CsWsTs+CcWcTc+Cw(Ww-SrWs-GrWg)Tw+Cw(SrWsTs+GrWgTg)+Q_M$							T:温度, C:比熱, W:単位量, Q:熱量 添字は, g:粗骨材, s:細骨材, c:結合材, w:水
		材料	温度 T (℃)	比熱 C (kJ/kg℃)	単位量 W (kg/m³) 新堤体 外部(A)	内部(B)	接合・岩着(C)	旧堤体	
		粗骨材 g	Ta	0.71	1,528	1,511	1,524	－	表面水率 Gr=1.3%
		細骨材 s	Ta	0.71	460	537	511	－	表面水率 Sr=3%
		結合材 c	30	0.92	230	160	180	－	
		水 w	Tw	4.19	96	108	106	－	
		メカニカルヒート Q_M		1,884kJ/m³				－	傾胴式ミキサー 1.5m³×3 台　53kW(損料表),101.3m³/h(H12 ダ積)
	リフトスケジュール	現計画の打設スケジュールを設定							「平成 18 年度施行　幾春別川総合開発事業の内　新桂沢ダム施計画修正業務」より
	熱伝達率	コンクリートと外気:12 W/m²℃, コンクリートと貯水:280 W/m²℃ 養生マットを設置した場合:1.2W/m²℃							コンクリートと外気は湿潤養生の一般値、コンクリートと貯水は空気水の熱伝導率比より仮定、養生マットは札内川ダムの実績。
物性値	物性値 ＼ 区分			基礎岩盤	新堤体 外部(A)	内部(B)	接合・岩着(C)	旧堤体	
	発熱特性	最終上昇温度 Q∞(℃)		—	35.1	24.2	26.0	－	$Q(t)=Q_\infty(1-\exp(-\alpha t^\beta))$ t:材齢(日)
		定数 α		—	0.523	0.522	0.524	－	
		定数 β		—	0.23	0.23	0.23	－	
	熱定数	比熱 C(kJ/kg℃)		1.19	1.13	1.14	1.19	1.19	C=k/(h²ρ)による計算値
		密度 ρ (kg/m³)		2,300	2,315	2,316	2,321	2,300	新堤は配合設計値, 旧堤はコア抜試験結果に基づき設定
		熱伝導率 k (W/m℃)		2.60	1.90	1.93	2.02	2.60	試験値
		熱拡散率 h² (×10⁻⁶m²/s)		0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	
	物理定数	線膨張係数 α (μ/℃)		—	8.2	8.6	8.3	(8.0)	
		圧縮強度 f'c(t) (N/mm²)	f'c(91)	—	37.5	17.7	20.8	－	f'c(t)=t/(a+bt)×f'c(91)　　t:材齢 配合試験結果による近似
			a	—	19.2	23.7	22.4	－	
			b	—	0.77	0.77	0.77	－	
		引張強度 $f_t(t)$ (N/mm²)		—	$f_t(t)=0.13\times f'_c(t)^{0.9}$　t:材齢				「平成 19 年度コンクリート配合試験業務」による引張割裂試験結果よる近似
		弾性係数 E(t) (N/mm²)		6,000	$E(t)=\phi(t)\times4.2\times10^3\times\sqrt{f'_c(t)}$ 材齢 3 日まで φ=0.73, 材齢 5 日以降 φ=1.0　t:材齢(日)			23,000	「平成 19 年度コンクリート配合試験業務」による静弾性試験結果による近似

(2) 解析結果

温度応力緩和について、無対策の場合における 2 年目の越冬時の温度応力発生状況を**表-3** に示す。図の左図は、越冬直前の温度分布、中図は越冬中の外気温最低時の温度分布、右図はそのときの温度ひずみ分布図を示したものである。越冬面の温度は越冬前に 10.1℃であったものが、越冬中には−6.5℃まで降下し、越冬面の内部拘束応力により隅角部にひび割れが発生する結果となった。越冬面の温度ひずみは、隅角部にひび割れが発生した後でも、100μを超える結果となった。

表-3 温度応力解析結果



※ 新旧堤体境界面の赤線表示は、新旧堤体間を引張強度 2MPa のジョイント要素としてひび割れ伸展解析を行った結果から、ひび割れの範囲を図示したものである。

Susumu Sasaki, Norihiko Kubo, Fusao Yamamoto

3.　クーリングによる対策

新旧堤体接合面の一体化を阻害する要因は、越冬時の内部拘束応力である。そこで、冬期の外気温の降下に伴う新堤体コンクリートの表面温度の降下を緩和するための養生マットと夏期打設部の高い水和熱による高温部を消して温度分布を均一化し、発生する温度応力を低減させる手法として一般的なクーリングによる対策による効果の検討を行った。

(1)　検討ケース

a) 養生マットによる保温

冬期の外気温の降下に伴う新堤体コンクリート表面部の温度降下を緩和するために、養生マットの効果を検討した。

養生マットの熱伝達率は熱伝達率1.2W/m²℃とし、設置期間は、当該年度打設部全体について、越冬前から次年度リフト打設直前までとした。

b) 養生マット＋プレクーリング

養生マットの設置に加え、内部温度を下げて表面部の温度応力を抑制する方法として、予め内部温度を下げておくプレクーリングを検討した。

プレクーリングは、混練水温6℃、細骨材の温度降下－5℃程度として、打込温度を25℃から20℃にする5℃程度の温度降下を想定した。プレクーリングは6月16日～9月15日の期間とした。

c) 養生マット＋パイプクーリング

養生マットの設置に加え、内部温度を下げて表面部の温度応力を抑制する方法として、パイププレクーリングの検討を行った。

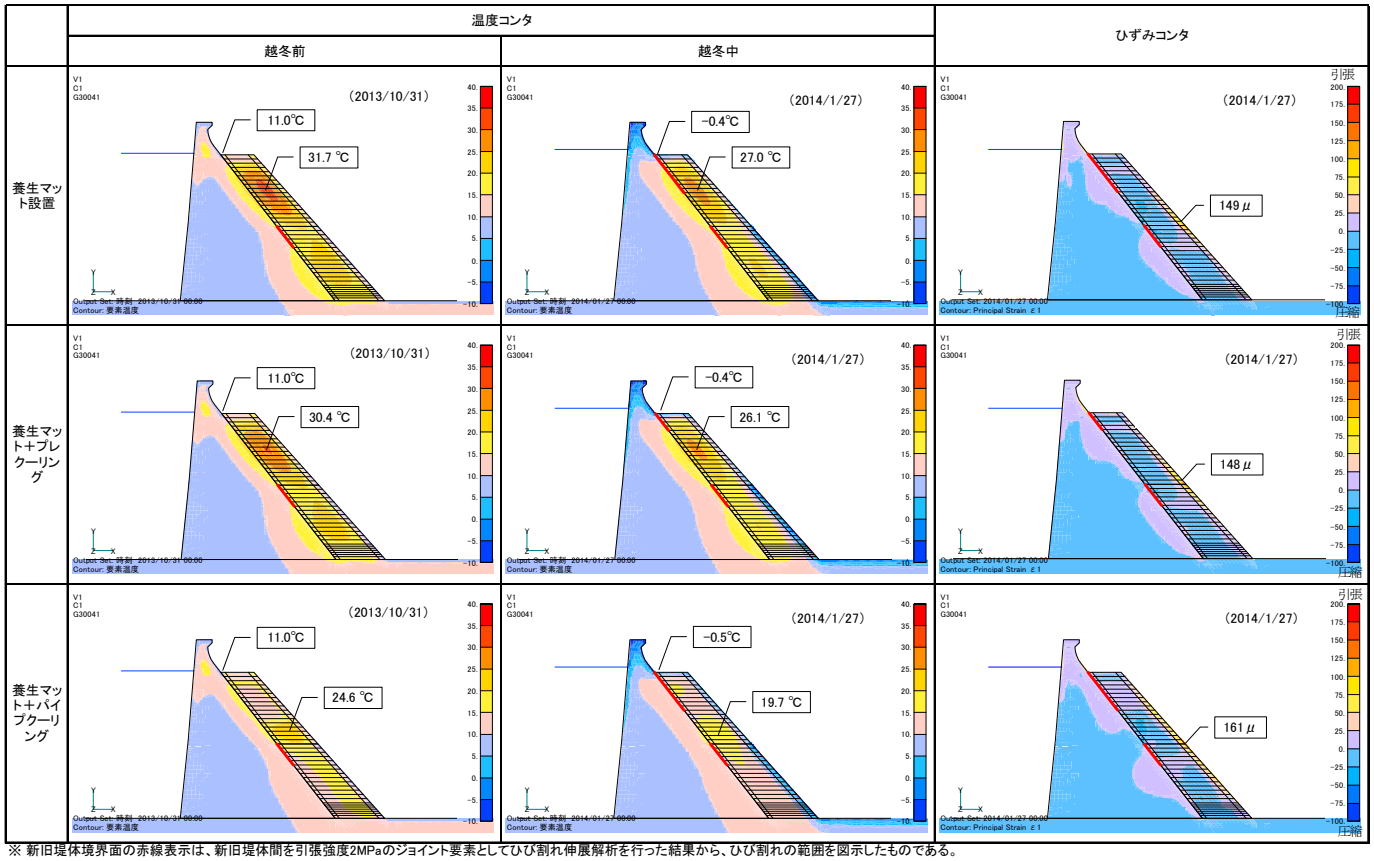
パイプクーリング対象リフトは、プレクーリングの検討と同様に6月16日～9月15日打設リフトとした。配管ピッチは1.5m間隔千鳥とし、下流面の温度を下げずに、内部の温度のみを下げるために、パイプは下流面から3m以上離すこととした。通水期間は、各リフト打設直後から当該年度の越冬直前（断熱マットの設置前）までとした。

(2) 解析結果

解析結果を、**表-4** に示す。解析結果では養生マットによる対策である程度の効果は認められたものの新旧堤体接合部のひびわれを大きく抑制できるまでの効果は得られなかった。

さらに、プレクーリングやパイプクーリングを行った場合も、コンクリート温度を低下させるのが夏期打設部で、越冬面から離れているため、越冬面付近での温度勾配の緩和効果がほとんど見られず、ひび割れ抑制の効果が得られないことがわかった。

表-4　クーリングによる対策検討結果



※ 新旧堤体境界面の赤線表示は、新旧堤体間を引張強度2MPaのジョイント要素としてひび割れ伸展解析を行った結果から、ひび割れの範囲を図示したものである。

Susumu Sasaki, Norihiko Kubo, Fusao Yamamoto

4.　ウォーミングによる対策

(1)　ウォーミングの仕様

クーリングによるコンクリート内部温度の低減が、ひび割れを抑制するほどの効果が得られなかったため、越冬コンクリートの表面を加温する方法について検討した。越冬コンクリートの加温方法は、越冬リフトを富配合の外部コンクリート配合とする方法とリフト内に配管し温水を通水する方法（以下「ウォーミング」と称す）」の併用とした(**図-7**)。

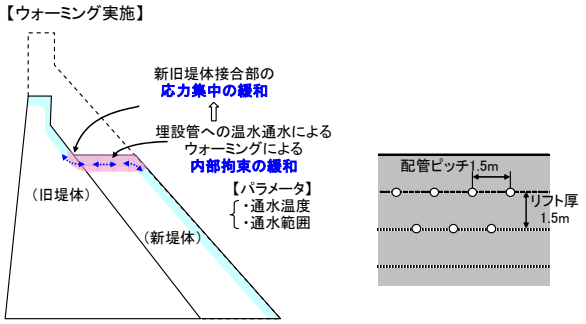


図-7 ウォーミングによる対策の概念図

ウォーミングの仕様については、以下の検討を行った。

a) 通水リフト数

通水リフトを、表面リフトから 1～3 リフトと変化させて隅角部の温度と温度ひずみを検討した。

その結果、隅角部の温度ひずみを低減するには、ある程度表面に近い部分を加熱した方が効果的であり、表面リフトから 1 リフト目のみに通水した場合が最も効果的であった（**図-8**）。

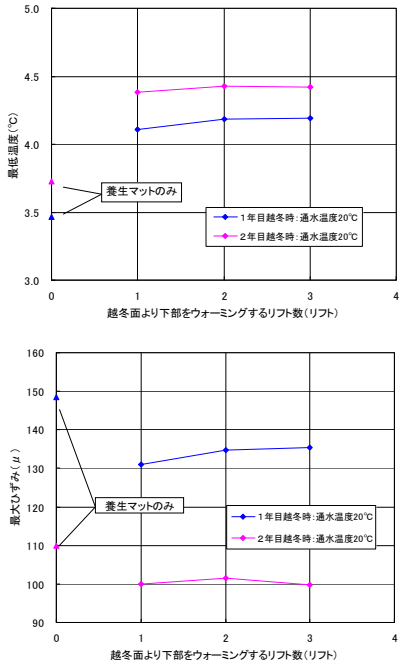


図-8 ウォーミングリフト数とコンクリート温度，ひずみの関係

b) 通水温度

通水温度を、20～40℃に変化させて、隅角部の温度と温度ひずみを検討した。併せて、越冬前の最終リフトをハーフリフトとして、その間に配管した場合の効果についても検討した。

その結果、通水温度を40℃とすることで、新旧堤体接合部の隅角部の温度ひずみを100μ以下に抑えることができることがわかった。さらに、ハーフリフトに配管した場合は、通水温度30℃で同等の効果が得られることがわかった（**図-9**）。

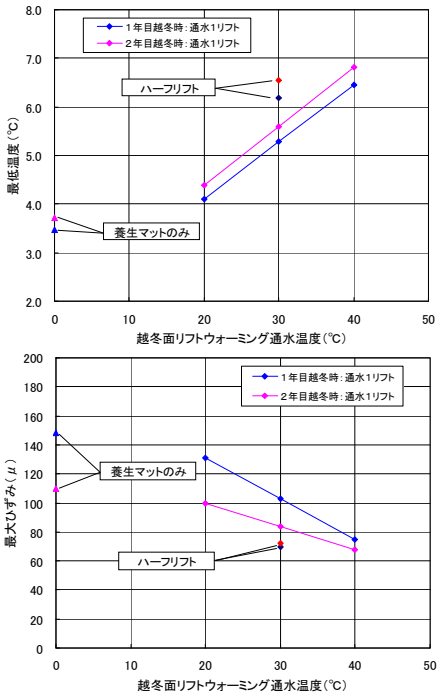


図-9 ウォーミング通水温度とコンクリート温度，ひずみの関係

c) 対策仕様

以上の検討結果から、新旧堤体接合部の温度応力対策は、**表-5**、**図-10**に示すとおりとした。

表-5　決定したウォーミングによる対策仕様

対　策	仕　様	適　用
養生マットの設置	熱伝達率 1.2W/m²℃以下	設置範囲は、越冬面、下流面、および旧堤体の越冬面より 2 リフト上部までとする。
越冬面の外部コンクリート使用	単位結合材量 C+F=230kg/m³ C:セメント、F:フライアッシュ	
越冬リフトのウォーミング	薄肉電縫鋼管 φ1.0 インチ 配管ピッチ 1.5m 通水量 20 ℓ/分以上 通水温度 30℃以上	越冬リフトをハーフリフトで打設し、ハーフリフト管に配管を行う。 温水通水期間は、越冬リフト打設から越冬後、外気温が 10℃以上となる期間までを目安とする。

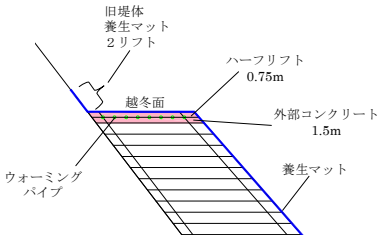


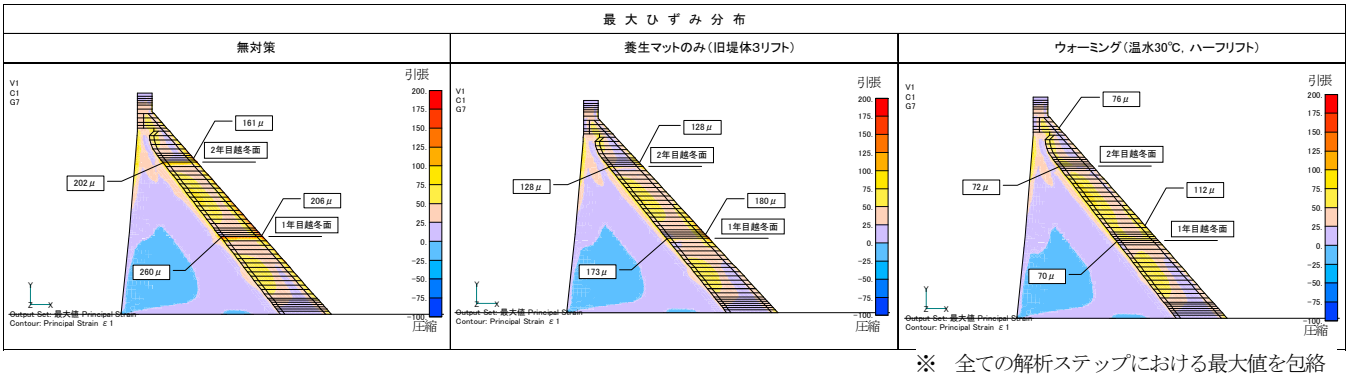
図-10 決定したウォーミングによる対策仕様の概念図

(2) ウォーミングの効果

表-6 に、無対策の場合、養生マットを設置した場合、さらに、**表-5** に示したウォーミングによる対策を行った場合の最大ひずみ分布を違いを示す。養生マットによる断熱養生と無対策の比較からは、養生マットにより、ある程度の効果が得られているものの、ひずみの発生を大きく抑制する効果までには至っていないことがわかる。一方、養生マットとウォーミングの併用による対策では、無対策の場合と比較して、越冬面の隅角部の温度ひずみを約 1/3 に低減でき、新堤体下流面の越冬面付近に発生する温度ひずみにおいても、無対策の場合と比較して下流面の温度ひずみを 1/2 程度に低減できることがわかる。また、発生するひずみの値についても、一般的にひびわれの制御目標とされている 100μ 程度を満たす結果となっている。

以上のことから、越冬時の対策として、養生マットとウォーミングを併用することで、桂沢ダムの嵩上げの際の新旧堤体コンクリートの一体化を図ることができるものと考えられる。

表-6　ウォーミングによるひずみ抑制効果



※　全ての解析ステップにおける最大値を包絡

5. まとめ

本検討の結果をまとめると以下のとおりである。

① 嵩上げダムの断面設計は、新旧堤体の一体化を前提としているが、越冬を有する新桂沢ダムでは施工中の温度応力により、一体化が保証されない可能性が考えられる。

② 有限要素法による逐次温度応力解析の結果から越冬面の内部拘束応力により新旧堤体接合部の隅角部に応力集中が発生し、ひび割れが発生する可能性が考えられる。

③ 養生マットによる断熱養生により、ある程度の温度応力の緩和効果は得られるが、ひび割れの発生を大きく抑制するまでには至らない。

④ プレクーリングやパイプクーリングは、コンクリート温度を低下させるのが夏期打設部であり、越冬面から離れているためことから、越冬面付近での温度勾配の緩和効果がほとんど見られず、ひび割れ抑制の効果が得られない。

⑤ 越冬リフトを富配合の外部コンクリート配合にするとともに、リフト内に配管し温水を通水する「ウォーミング」により、越冬コンクリートを直接加温することで温度応力緩和効果が得られた。

参考文献

1) 垣谷正道、嵩上げダムの安定計算法に就いて、電力技術研究所土木科報輯報 昭和 21 年 3 月土第 1202 号
2) 吉田等 他、環境に配慮したダムの効率的な建設・再開発技術に関する研究、土木研究所報告 第 208 号
3) 永山功、コンクリートダムの温度応力と温度規制、ダム技術 Vol. 1-2
4) 鈴木康範 他、コンクリート中に存在するセメントの水和発熱仮定の定量化、土木学会論文集　第 414 号/V-12 1990 年 2 月
5) 舎川徹 他、ダムコンクリートへの水和発熱モデルの適用に関する研究、土木学会論文集　No. 690/ V -53, 21-33 2001. 11