

# 報告 ダム仮締切工事における水中不分離性マスコンクリートの施工

金谷 文昭\*1・綱川 浩太\*2・中村 亮太\*3・田中 久人\*4

**要旨：**ダム仮締切の構造は、ボックス型鋼矢板と中詰コンクリートを一体化させて湖水を半円形に締切るものであり、仮締切底部に止水や揚圧力対策を兼ねた将来建造物の基礎として、台座コンクリートを水中不分離性コンクリートにより施工した。台座コンクリートはマスコンクリートとなることから、温度ひび割れや凝結時の熱膨張の影響が懸念されたため、事前の試験練りや温度応力解析による材料および配合の選定と、液体窒素によるプレクーリングを実施した。また、構造物におけるコンクリート温度および鋼矢板のひずみ等による計測施工を行った。本稿では一連の検討結果や施工結果について取りまとめた。  
**キーワード：**水中不分離性コンクリート、マスコンクリート、温度応力、プレクーリング

## 1. はじめに

本工事は既設のコンクリート重力式ダムを利用して発電所を増設するにあたり、ダム本体に取水口を新設するために、鋼コンクリート構造からなる半円形セル型の仮締切（直径16.3m、平均深さ50m、以下“セル”と呼ぶ）によりダム湖水を締切るものである。台座コンクリートは図-1に示す仮締切内底部に厚さ13.1mの水中不分離性コンクリートを打設し、締切の止水およびコンクリート下面に作用する揚圧力に対する安全性を確保するとともに、将来建造物の基礎とするものである。また、同コンクリートはマスコンクリートとなるため、締切内をドライアップした後の温度ひび割れによる漏水や凝結時の熱膨張に伴うセルへの影響が懸念された。

本報告はコンクリートの試験練りや温度応力解析から配合を選定し、液体窒素を用いたプレクーリングやコンクリート温度および鋼矢板のひずみ等の計測施工を実施した結果について報告するものである。

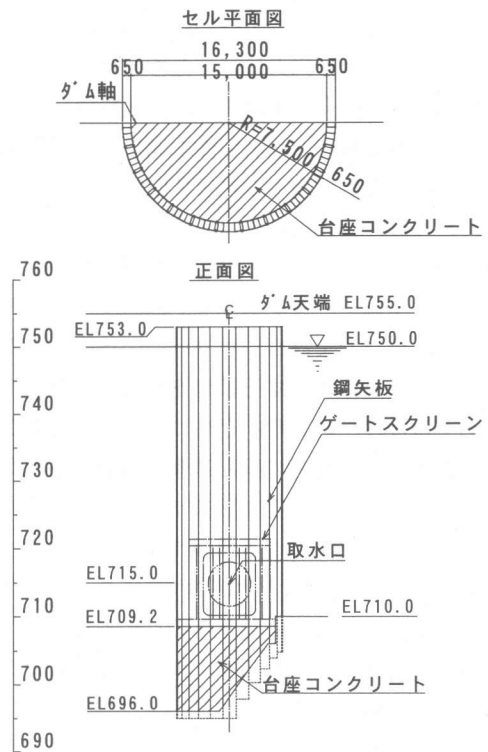


図-1 仮締切工の概要図

\*1 東洋建設(株) 東北支店 奥只見作業所 主任 (正会員)

\*2 電源開発(株) 奥只見・大鳥増設建設所課長代理

\*3 東洋建設(株) 総合技術研究所美浦研究所 (正会員)

\*4 鹿島建設(株) 北陸支店 奥只見発電所増設工事事務所 工事課長

## 2. コンクリートの使用材料および配合

### 2.1 コンクリートの使用材料

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントは温度ひび割れ低減のために、フライアッシュを20%混合した高ピーライト系の3成分低発熱型高炉セメントを使用し、骨材は生コン工場で製造している砕砂と砕石を用いた。混和剤は水中不分離性混和剤と流動性における温度依存性が小さく、比較的凝結時間の早いポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

### 2.2 コンクリートの配合

台座コンクリートの要求性能を表-2に示す。これらの要求性能のうちコンクリート強度はドライアップ時の水圧とコンクリート膨張圧による支圧応力度から材齢10日で10N/mm<sup>2</sup>が必要であり、また温度応力低減のために断熱温度上昇量の少ない配合が求められた。試験練りの結果フレッシュ性状、強度特性を満足し、断熱温度上昇量の少ない表-3に示す配合とした。

### 2.3 温度応力解析

抽出したコンクリートの配合を用いて温度応力解析を実施し、コンクリートの温度ひび割れに対する検討およびコンクリートの熱膨張によるセルの安全性に対する検討を行った。前者の検討では温度、応力解析ともに二次元 FEM を用いた。一方、後者の検討は複雑な境界条件を持つセル自体の応力度を照査するため、三次元 FEM による温度応力解析を実施した。解析ケースは各検討で無対策と10℃のプレクーリングを実施した場合の対策効果との比較を行った。

解析条件を表-4に示す。解析に用いたコンクリートの断熱温度上昇特性および強度特性は、室内試験より得られた結果を用いた。また、圧

表-1 使用材料

材料名	記号	種類	物性値または成分
セメント	C	フライアッシュ混合低発熱型高炉セメント	密度:2.78g/cm <sup>3</sup> 比表面積:4170cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	砕砂	表乾密度:2.69 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:1.31% 粗粒率:2.55
粗骨材	G	20-10mm 砕石	表乾密度:2.72 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.75% 粗粒率:6.94
		10-5mm 砕石	表乾密度:2.73g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.85% 粗粒率:6.01
混和剤	UW	水中不分離性混和剤	メチルセロース系
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 台座コンクリートの要求性能

項目	要求性能
設計基準強度	18N/mm <sup>2</sup> (配合強度27N/mm <sup>2</sup> ):材齢28日 10N/mm <sup>2</sup> (ドライアップ完了時):材齢10日
流動性	スランプフロー:500±30mm(120分程度の保持)
材料分離抵抗性	水中気中強度比0.8以上(材齢28日) <sup>1)</sup>

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	UW	SP
62.0	42.0	210	339	676	1025	2.42 W×1.15%	10.85 C×3.2%

縮強度推定式については、前者では材齢と圧縮強度の関係から求めた式を、後者では初期発熱時の弾性係数をより厳密に設定するために、断熱温度上昇試験による積算温度と圧縮強度の関係から求めた式を採用した。

#### (1) 温度ひび割れに対する検討

最小ひび割れ指数分布を図-2に示す。いずれのケースもダム本体コンクリートおよびセルの外部拘束による水平方向の引張応力が卓越し、最小ひび割れ指数となる材齢は、400日と長期材齢であり、その大きさは無対策のケースで

表-4 解析条件

項目	温度ひび割れに対する検討		コンクリートの熱膨張による鋼矢板の安全性に対する検討	
	アレ-リング無し	アレ-リング10℃	アレ-リング無し	アレ-リング10℃
解析方法	二次元FEM		二次元FEM	
潮水温度	10℃		10℃	
打設温度	20℃	10℃	20℃	10℃
断熱温度上昇式	$Q(t)=36.2 \times \{1 - e^{-(0.56 \times t)}\}$	$Q(t)=38.5 \times \{1 - e^{-(0.24 \times t)}\}$	$Q(t)=36.2 \times \{1 - e^{-(0.27 \times (t-0.6)^{0.9})}\}$	$Q(t)=38.5 \times \{1 - e^{-(0.24 \times t)}\}$
圧縮強度	$f_c'(t)=40t/(2.5+0.93t)$ N/mm <sup>2</sup>		$f_c=54.4 \cdot \log M - 181.7$ N/mm <sup>2</sup> (M≧2400/Chr)	
引張強度	$f_t(t)=0.127 \times (f_c'(t))^{0.919}$ N/mm <sup>2</sup>		$f_t(t)=0.127 \times (f_c(t))^{0.919}$ N/mm <sup>2</sup>	
有効弾性係数	$E_e(t)=\phi(t) \times 3.89 \times 10^3 \times f_c'(t)^{0.556}$ N/mm <sup>2</sup>		$E_e(t)=\phi(t) \times 3.89 \times 10^3 \times f_c(t)^{0.556}$ N/mm <sup>2</sup>	
	φ:材齢3日まで0.73, 5日以降1.00, その間は直線補間		φ:材齢3日まで0.45, 5日以降0.53, その間は直線補間 <sup>2)</sup>	

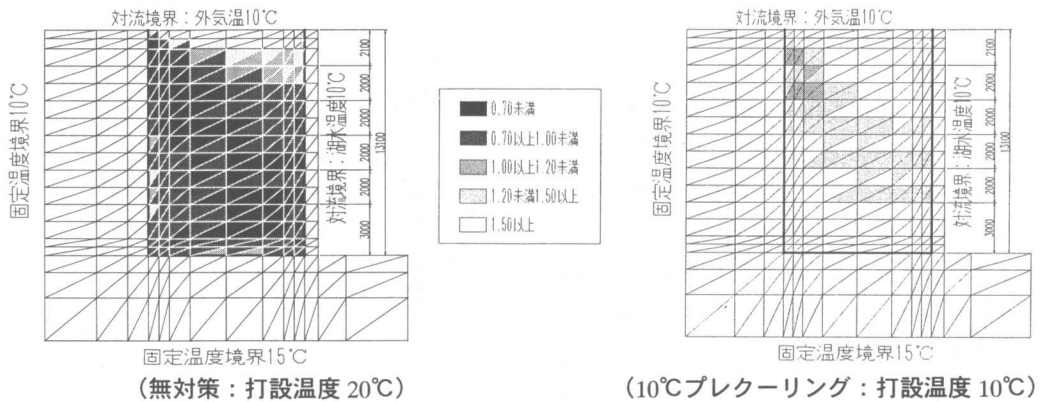


図-2 ひび割れ指数分布

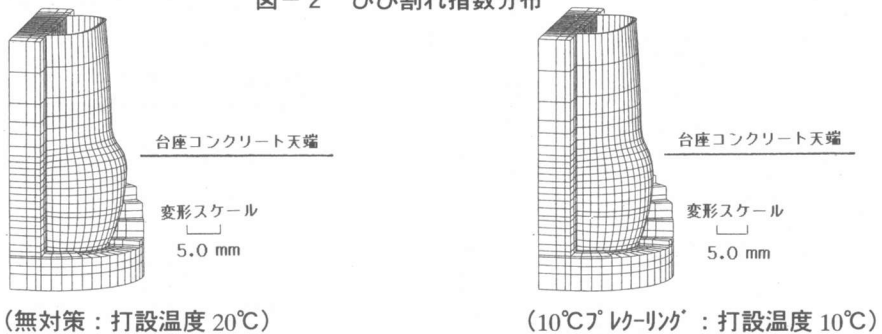


図-3 コンクリートの膨張圧による鋼矢板の変形

0.54, 10°Cのプレクーリングを実施したケースで1.01となった。分布を見ると前者はコンクリート天端から約2mの部分を除き、ひび割れ指数が1.0未満であるのに対し、後者はダム本体側の局所的な部分で1.2以下となるものの、概1.2以上のひび割れ指数を満足する結果となった。以上のことから温度低下の目標値を10°Cと設定したプレクーリングを採用した。

(2)熱膨張によるセルの安全性に対する検討

セルはコンクリート打設時の型枠として使用されるが、比較的剛性が高い部材であるため、コンクリートの熱膨張を拘束する効果が高い。このため、わずかな変形であってもセルに過大な断面力が発生し、セル自体の安全性が損なわれることが懸念された。

温度応力解析の結果として、セルの変形図を図-3に、セルに発生する応力度およびせん断力を表-5に示す。なお、セルの設計では、曲げ引張応力および鉛直方向せん断力に対しては

ボックス鋼矢板で抵抗し、円周方向せん断力については鋼コンクリートサンドイッチ構造として抵抗するものとした。セルの最大発生変位は無対策のケースで2.3mm, 10°Cのプレクーリングを実施したケースで1.8mmとなった。セルに発生する応力度およびせん断力は、両ケースにおいて優位な差は見られなかったが、いずれのケースにおいても許容値以下となり、セルの安全性が確認された。ただし、セルの剛性やクリープ係数の評価によっては、中詰めコンクリートのひび割れ等の問題が生じることが想定されたため、計測によって、実際に鋼矢板フランジ部に発生する応力度を確認することとした。

表-5 セルに発生する応力度およびせん断力

項目	単位	許容値	無対策	プレクーリング 10°C
円周方向 曲げ引張応力度	N/mm <sup>2</sup>	270	140	143
円周方向 せん断力	kN	8.00	5.18	3.96
鉛直方向 曲げ引張応力度	N/mm <sup>2</sup>	210	68	58
鉛直方向 せん断応力度	N/mm <sup>2</sup>	120	43	39

### 3. コンクリートの施工

#### 3.1 打設方法

コンクリートの打設状況を図-4に示す。コンクリートの打設はφ250mmのトレミー管を3本用いて行った。トレミー管の設置位置は、コンクリートの最大流動距離が5.0m以下<sup>1)</sup>となるようにし、全体が均等に打ち上がるようにポンプ車から3ヶ所へ順番に供給した。トレミー管の先端には油圧式のシャッターバルブを取付け、遠隔操作によりコンクリート打設口の開閉ができる構造とした。打設中は水中落下を防ぐため、トレミー管先端が常にコンクリート中に埋設された状態とし、コンクリート面上昇に伴いトレミー管上端の配管を撤去して打設を行った。打設ロットは5ロットに分割し、表-6に示すような打設量と高さとした。

#### 3.2 プレクーリング

プレクーリングは図-5に示すように、液体窒素をアジテータ車に搭載したコンクリートへ直接噴霧する方法とし、目標とするコンクリート温度を冷却後で10℃に設定した。

冷却手順を図-6に示す。液体窒素の供給はローリー車から直接配管したため、ローリー車の残圧により、液体窒素の投入量にばらつきが生じた。そこで、コンクリート温度および性状の確認を、コンクリート製造時、液体窒素投入前、コンクリート打設直前に実施し、これらの結果を常にフィードバックすることとした。

#### 3.3 コンクリートの品質

##### (1)流動性

プレクーリングによる冷却前後のスランプフローを図-7に示す。プレクーリングによるスランプフローの変化は、冷却後のスランプフローが若干小さくなる傾向を示したものの、その大きさは概ね20mm程度であり、10℃程度に冷却したコンクリートにおいても500±30mmの基準値を満足することができた。

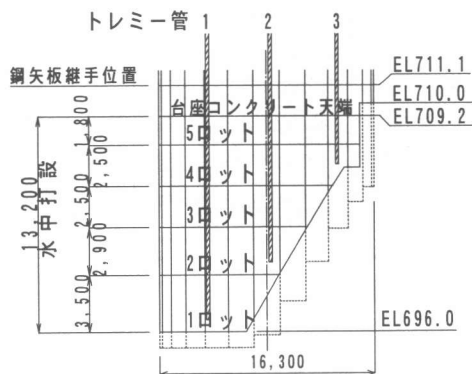


図-4 コンクリート打設状況

表-6 コンクリートのロット割

打設ロット	打設量 (m <sup>3</sup> )	打設高さ (m)
1	113.0	3.5
2	170.5	2.9
3	189.0	2.5
4	166.5	2.5
5	144.0	1.8

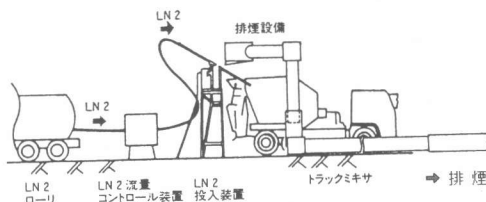


図-5 液体窒素による冷却方法

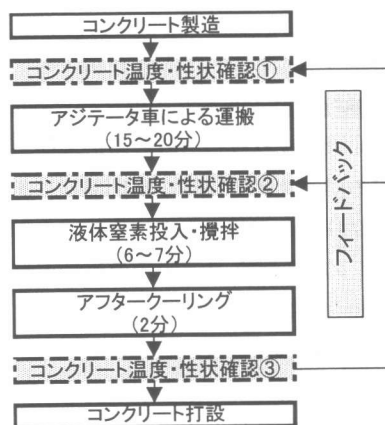


図-6 冷却手順

## (2)コンクリート温度

冷却前後のコンクリート温度を図-8に示す。冷却前後のコンクリート温度の平均は19.9℃と9.3℃であり、概ね事前の解析で実施したコンクリート温度と同程度であった。また、平均冷却温度は10.6℃であった。冷却後のコンクリート温度のヒストグラムを図-9に示す。冷却後のコンクリート温度は概ね7~13℃であった。

## (3)圧縮強度

水中作製供試体による圧縮強度試験結果を図-10に示す。圧縮強度は良好な強度発現を示し、各ロットでドライアップ時に必要な強度10N/mm<sup>2</sup>を材齢7日で満足し、材齢28日では30N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を示した。

### 3.4 コンクリート打設時の各種計測結果

#### (1)打ち込み後のコンクリート温度

打設後の温度履歴の一例を図-11に示す。計測位置は事前に行った温度応力解析と同一断面で、高さは台座コンクリートの中心位置である。打設直前のコンクリートの平均温度が9.3℃であったのに対して、打設直後のコンクリート温度は鋼矢板付近で10~12℃、断面中央付近では15~17℃であった。また、最高温度は打設後6~8日で56~57℃を示し、解析結果より約10℃高くなった。

その要因として以下のことが考えられた。a)ダム湖水の水温が当初の想定より高かった。b)締切内の水温が想定より高かった。c)実際の断熱温度上昇特性が事前解析時のものと異なる。d)施工中の待ち時間にトレミー管内の滞留コンクリートが暖まった。e)粗骨材寸法が20mmと比較的小さく、表面積が大きいいため、冷えやすく暖まりやすかった。温度応力解析において、a)とb)の条件を反映し、コンクリートの打設温度を15℃に変化させて、計測値に合う断熱温度上昇式を推定した。

その結果は、図-11に示すように、鋼矢板付近のコンクリート温度は解析値と比べて計測値のほうが低かったものの、他の計測位置では概ね解析値と計測値が一致する結果となった。

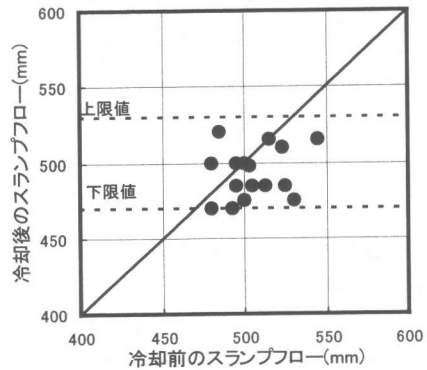


図-7 冷却前後のスランプフロー

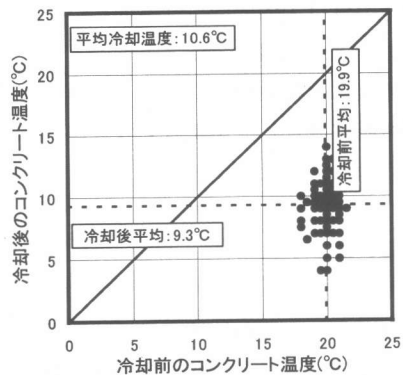


図-8 冷却前後のコンクリート温度

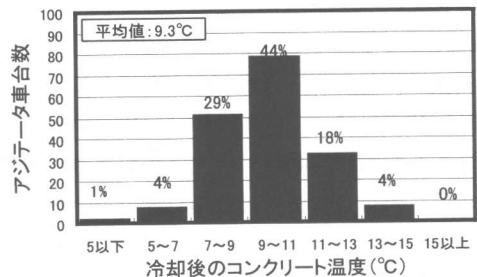


図-9 冷却後のコンクリート温度

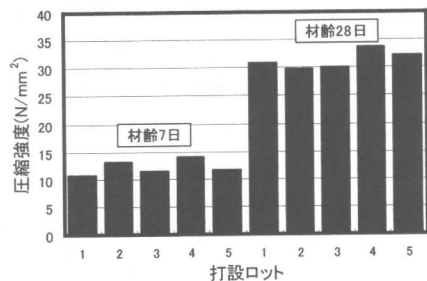


図-10 各打設ロットの圧縮強度

上述の条件において温度応力解析を行った場合の最小ひび割れ指数分布を図-12に示す。最小ひび割れ指数は、台座コンクリート天端から5m区間において1.0以下になる範囲もあるが、概ね1.0~1.2以上であり、実施工におけるプレクーリングの温度ひび割れ抑制効果が十分に発揮されることが確認された。

(2) 鋼矢板に作用する応力度

コンクリート打設後のボックス鋼矢板フランジ部に作用する水平方向応力度履歴の一例を図-13に示す。コンクリートの膨張圧により発生した応力度は18N/mm<sup>2</sup>で、事前に行った解析結果の13%程度であった。

この原因は硬化過程のコンクリートのクリープが解析時に設定した値よりも大きかったことが考えられた。

4. まとめ

(1) 10℃程度のプレクーリングであれば、冷却前後でコンクリートの性状変化は比較的少なく、製造時、冷却前後、打設前の各段階における性状をフィードバックすることで良好な施工が実現できた。

(2) ドライアップ後の湧水量が少ないことや、鋼矢板に作用した応力度が小さかったことおよび計測結果に基づく解析等から、プレクーリング等のひび割れ抑制効果が発揮されたものと考ええる。しかし、解析では長期材齢でひび割れ指数が最も小さくなることから、今後の追跡調査が必要である。

(3) 鋼矢板に作用した応力度が解析値に比べて13%程度であった原因として、硬化過程のコンクリートのクリープが解析時の想定よりも大きく、温度応力を緩和する結果となったものと考えられる。

初期材齢のクリープ挙動が温度応力に与える影響は大きく、環境や構造物の条件に応じて適切な値を設定することが肝要と考える。

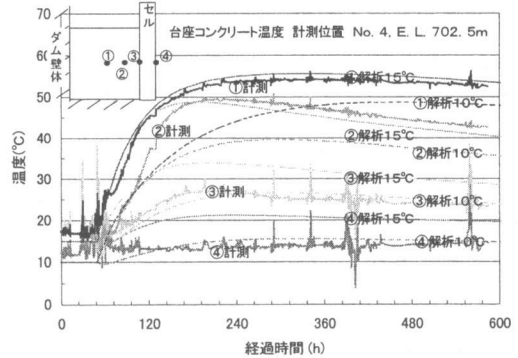


図-11 コンクリート温度履歴

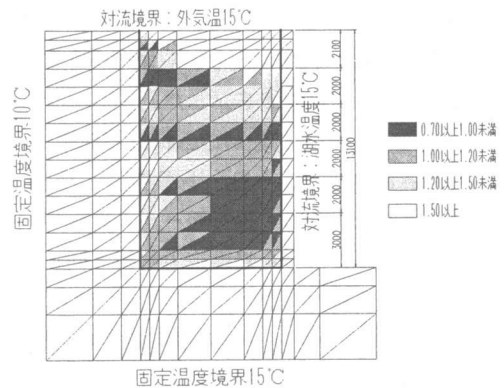


図-12 ひび割れ指数分布 (打設温度15℃)

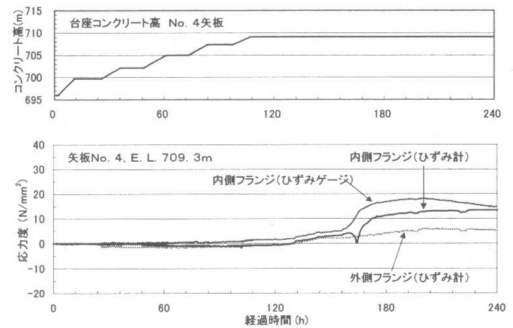


図-13 鋼矢板に作用する水平応力度履歴

参考文献

- 1)コンクリートライブラリー67, 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), 土木学会, 1991.5
- 2)コンクリート技術シリーズ24, コンクリートのクリープおよび乾燥収縮, 土木学会, 1997.10