

# 報告 アーチ式ダムにおける2次クーリングが温度応力に及ぼす影響に関する検討

溝渕利明\*1・峰村修\*2・藤村和也\*3・坂田昇\*4

要旨：ダムにおけるブロック施工においては、パイプクーリングによってコンクリートを冷却し、収縮継目を開口させる2次クーリングが行われる。しかしながら、2次クーリングは、比較的短期間に部材全体が冷却されることから、部材内部に温度応力が生じ、温度ひび割れ等を生じさせる可能性があると予想される。

本報文中では、アーチ式ダムにおいて2次クーリングによる温度応力が部材に及ぼす影響について解析を行い、当該構造物に適した冷却方法の選定を行うとともに、実測温度データを基にブロックに生じる応力について推定を行った結果について報告する。

キーワード：パイプクーリング、温度応力、マスコンクリート、アーチ式ダム

## 1. はじめに

コンクリートダムにおけるブロック施工の場合、止水性及び一体性の点からブロック間の隙間を充填する必要がある。2次クーリングは、ブロック間継目にグラウトを行う際に、コンクリート内部に埋設したパイプに通水することで対象とするブロックを予想される最終安定温度まで冷却し、ブロック間継目を開口させるものであり、通常打設したコンクリートが最も収縮する冬場に行われる。また、2次クーリングを実施する場合、急冷による温度ひび割れを抑制するために、クーリングは数ヶ月かけて温度降下量を0.5～1.0℃/日に抑えるようにしながら、コンクリート温度を10℃～20℃低下させる。

パイプクーリングにおいて温度降下速度を制御するためには、パイプ内の通水温度及び通水量を調整する必要がある。従来は、クーリング水に河川水を用いている場合が多いにもかかわらず、多くの施工事例及び解析検討において15 L/分程度の流量が適しており、それ以上流量を増加させても効果はほとんど変わらないといわれている[1]。

本報文中では、2次クーリングにおける上記の流量設定の妥当性及び流量の増減が温度応力に及ぼす影響について検討するために、現在建設中のアーチ式ダムの2次クーリング実施ブロックを対象に、通水量をパラメータとした温度応力解析を行い、温度降下速度、目標温度到

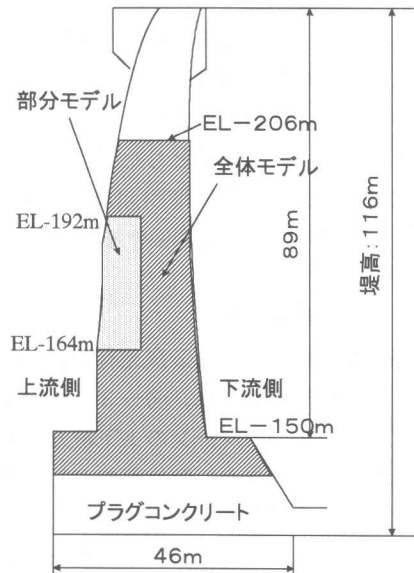


図-1 構造物の概要

- \*1 鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第2研究室(正会員)
- \*2 新潟県三面川開発事務所ダム課(正会員)
- \*3 鹿島建設(株)情報システム部開発課土木解析グループ
- \*4 鹿島建設(株)北陸支店奥三面ダム工事事務所(正会員)

達期間及び部材温度応力の観点から、2次クーリングに適した通水量について検討を行った結果を報告する。また、2次クーリング実施区間全体をモデル化し、実測温度データからブロックに生じる応力を推定するために実施した解析結果の概要についても報告する。

## 2. 構造物の概要

構造物の概要を図-1に示す。本検討で対象とした構造物は、堤高116m、堤長244mのアーチ式ダムであり、堤長を約15mの幅で16ブロックに分割して施工するもので、1リフトの標準打設高は2mである。2次クーリング実施区間は14m(7リフト分)を1ゾーンとし、一度に2~4ゾーン行われる。コンクリート配合は、設計基準強度 $37\text{N/mm}^2$ 、粗骨材最大寸法150mm、スランプ3cmで、セメントは中庸熟ポルトランドセメントである。

## 3. 2次クーリングに適した流量に関する検討

### 3.1 検討の概要

2次クーリングを実施する部位について、表-1に示すように通水流量を5L/分から30L/分まで変化させた場合の温度応力解析を行い、温度応力を極力制御し、かつ温度低減効果の高い通水流量の選定を行った。検討対象とした部位は、図-1に示す2次クーリング実施区間EL-150m~EL-206mの4ゾーンのうち、解析の簡便化を目的にEL-164m~EL-192mの2ゾーンとした。

### 3.2 解析方法

温度及び応力解析は2次元有限要素法を用いて行った。解析モデルは、図-2に示すように解析対象とした2つのゾーンの上下流方向断面の部分モデルとした。また、解析部位が対称断面であると仮定し、上流側半分を対象とした矩形モデルで解析を行った。ただし、パイプクーリングを考慮した部位は上部1ゾーンのみとした。

境界条件は、温度解析において解析対象部位の上下面及び対称面を断熱境界とし、外気と接する面を対流境界とした。応力解析は、平面ひずみで行うものとし、解析対象部位の下面を鉛直方向固定とし、対称面を水平方向固定とした。また、解析には上部ゾーンの重量を荷重として考慮した。また、解析はクーリングの影響を考慮して節点数2169、要素数2097のメッシュで行った。

表-1 検討ケース

ケースNo.	流量(L/分)
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25
6	30

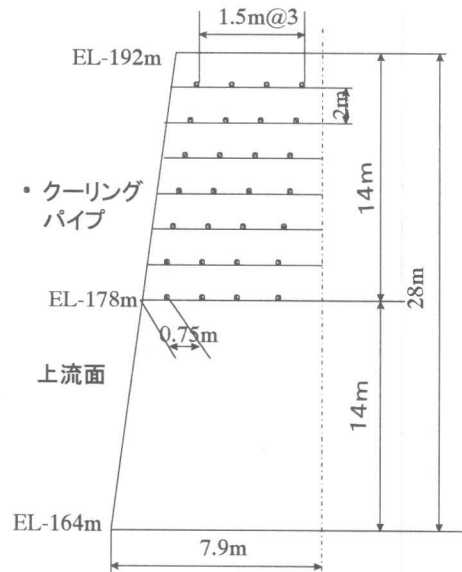


図-2 解析モデル

表-2 解析条件

項目	解析条件
比熱(kJ/kg°C)	1.16
熱伝導率(W/m°C)	2.70
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2400
表面熱伝達率(W/m <sup>2</sup> °C)	14.0
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.04
弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	21800
ポアソン比	0.20

### 3.3 解析条件

温度応力解析に用いたコンクリートの熱特性及び力学的特性を表-2に示す。コンクリートの初期温度は、部材中央部が1次クーリングの目標温度25℃であると仮定した。また、その他の部位は表面部が2次クーリングの開始される12月末の外気温と同じ2℃であると仮定した場合の温度分布を定常解析を行って算定した。外気温は、ダム付近の過去2年間の測定データを用いた。クーリング水温は、2次クーリングに用いる河川の過去10年間の月別平均水温を用いた。ただし、2次クーリング実施期間である12月～4月の河川水温は、0.4℃～8.2℃であった。解析に用いた12月～4月の月別水温を表-3に示す。

表-3 月別水温(12月～4月)

12月	1月	2月	3月	4月
2.9～7.9℃	0.4～2.9℃	0.0～0.4℃	0.4～3.3℃	3.3～8.2℃

パイプクーリングによる熱除去効果の評価方法には、パイプ位置を固定温度とする方法や吸熱接点とする方法があるが、本検討ではパイプへの通水量 $u$ (L/分)の変化を考慮し、コンクリート温度とクーリング水温との熱収支を直接評価することが可能なパイプ壁面での熱伝達境界を用いることとした。流量変化に伴うパイプ壁面の熱伝達率 $\beta_w$ を(1)式に示す[2,3]。

$$\beta_w = 19.7 \times u + 33.14 \text{ W/m}^2\text{C} \quad (1)$$

### 3.4 解析結果

2次クーリングは部材全体を最終安定温度まで下げることが目的に行われることから、温度解析結果はクーリング効果の影響が小さいリフト中央部でかつゾーン中央のリフトを対象とした。また、各材齢の応力分布図から本検討での流量範囲では、部材中央部が最大引張応力を示したことから、応力解析結果についても部材中央部で比較検討することとした。

#### (1).温度解析結果

各ケースの部材中央部の温度履歴を図-3に示し、流量と温度低下速度との関係を図-4に示す。また、コンクリート温度が4℃～10℃に到達する日数と流量との関係を図-5に示す。

図-3、4から、クーリング開始から10日までは流量の違いによって温度低下速度が異なるが、20日以降流量の違いによる温度低下速度にほとんど差異は見られなかった。ただし、クー

リング開始初期において、20 L/分以上の場合温度低下速度が1℃/日に近くとなり、15 L/

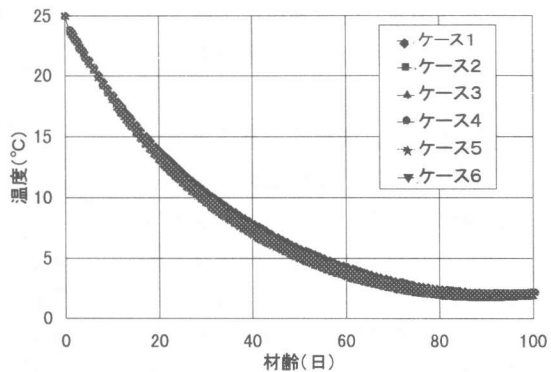


図-3 温度解析結果

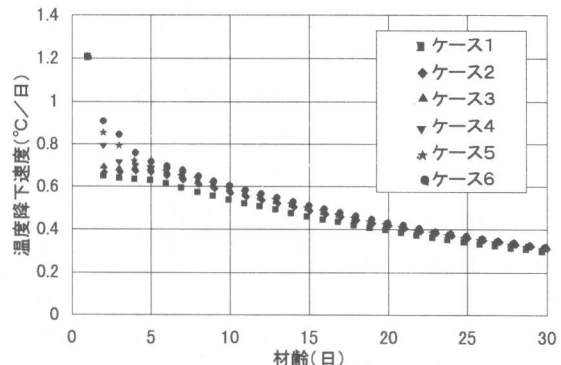


図-4 流量と温度低下速度との関係

分以下に比べて急冷される傾向にあった。また、図-5に示すように部材中央のコンクリート温度が10℃に到達する日数は、流量の差異がほとんどなく約30日であった。一方、部材中央のコンクリート温度を4℃まで下げた場合、流量5 L/分と30 L/分では約2週間の差異があるものの、20 L/分以上では流量による差異はほとんど見られなかった。

## (2) 応力解析結果

応力解析結果のうち上下流方向の解析結果を図-6、7に示す。図-6、7から、上下流方向の応力は小さく、部材中央でコンクリート温度を4℃まで下げた場合でも、約0.4 N/mm<sup>2</sup>、ひび割れ指数が8程度であった。ただし、施工時のセメントの水和によって生じた温度応力と重ね合せた場合には、部位によってはひび割れ発生の可能性がある場合も考えられる。

鉛直方向応力は、図-8、9に示すように上下流方向に比べて卓越する結果となった。部材中央のコンクリート温度が10℃に達した時点で、流量に関係なく約1.6 N/mm<sup>2</sup>であった。コンクリート温度を6℃以下に下げた場合、ひび割れ指数は1.5以下となり、部位によっては水平打継ぎ部付近を中心とした水平ひび割れや水平打打継ぎ部の開きの生じる可能性がある場合も推察される。

また、1次クーリングの場合には、流量の増加に伴いパイプ周辺に引張応力が生じる。本検討でもその傾向が見られたが、30 L/分の場合で上下流方向0.5 N/mm<sup>2</sup>、鉛直方向1.0 N/mm<sup>2</sup>程度であった。

以上の解析結果から、流量の違いが温度降下速度及び部材応力に及ぼす影響は特に見られなかった。ただし、クーリング開始初期の急冷を極力抑え、効率的に

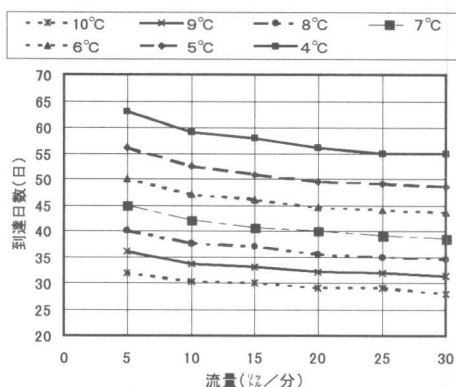


図-5 流量と目標温度までの到達日数

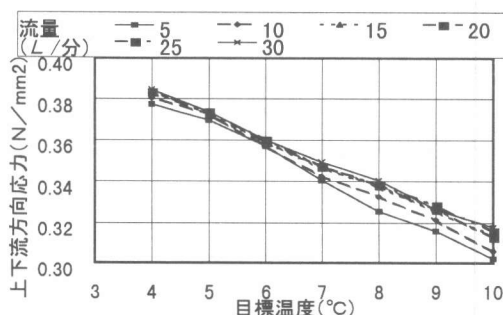


図-6 応力解析結果（上下流方向）

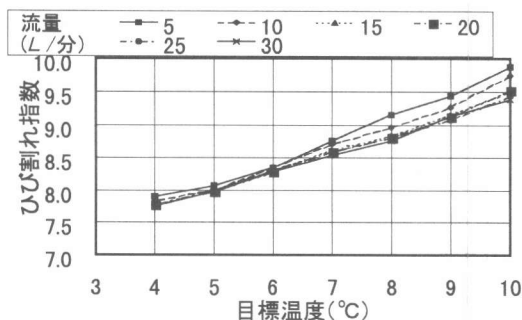


図-7 ひび割れ指数履歴（上下流方向）

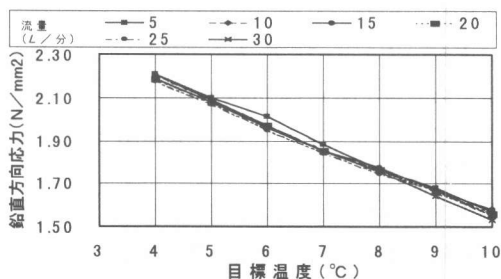


図-8 応力解析結果（鉛直方向）

行うためには、本構造物での施工条件では 15 L/分程度にするのが望ましいと考えられる。また、温度ひび割れ制御を考慮した場合、本検討での対象部位では、2次クーリングによる目標温度を 6°C 以上にすることが望ましいと思われる。

4. 測定結果を基にした温度応力解析  
部分モデルの解析結果から、2次クーリングでの流量を 10 L/分として行うこととした。また、2次クーリング実施部位に生じる応力を推定するために、2次クーリング実施時のコンクリート温度及びクーリング水温等の温度計測を行い、その温度計測結果を基に、2次クーリング実施部位全体を解析対象部位とした温度応力解析を行った。

解析は、図-10 に示すように境界条件等の影響を極力受けないように2次クーリング実施区間及び既設コンクリートを含めた全体モデルで解析を行った。外気温等の解析条件は計測データを用い、その他の条件は部分モデルの解析条件を用いた。

温度解析結果を図-11 に示す。各ゾーンでのコンクリート温度計測結果と一致するようにパイプ壁面での熱伝達率を変化させた結果、2次クーリング実施時の流量である 10 L/分から算定した熱伝達率を用いて行った解析結果とほぼ同様の値を示した。

応力解析結果を図-12 に示す。上下流方向応力は、クーリング開始後 20 日の部材中央で  $1.13 \text{ N/mm}^2$  となり、部分モデルに比べて約 4 倍大きい値を示した。これは、部分モデルが堤体部分のみをモデル化したため、既設コンクリートの拘束力の影響を十分考慮できなかったためと思われる。したがって、上下流方向に対しては2次クーリングによる温度応力のみでひび割れが生じる可能性は低いものの、施工時のセメントの水和熱による温度応力と重ね合せた

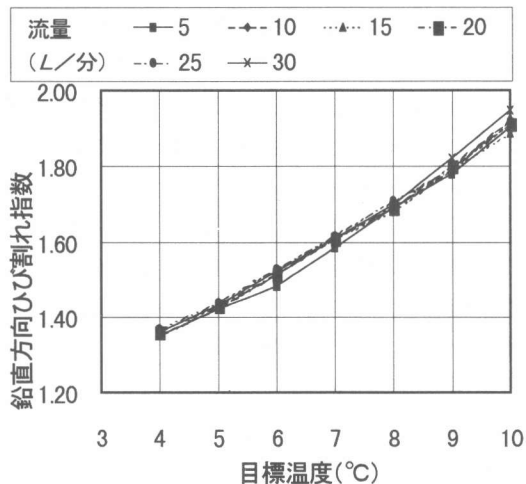


図-9 ひび割れ指数履歴 (鉛直方向)

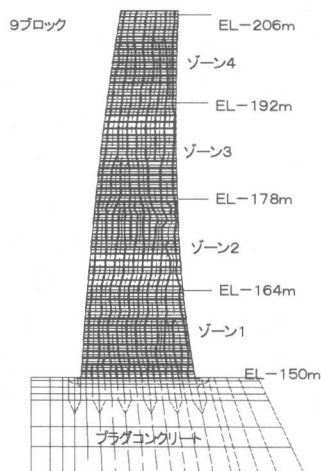


図-10 メッシュレイアウト (全体モデル)

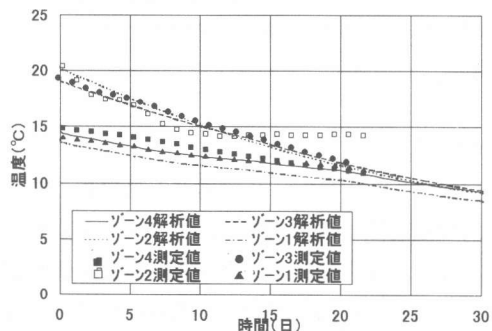


図-11 温度解析結果 (全体モデル)

場合には、部位によってはひび割れ発生の可能性があると考えられる。

一方、鉛直方向の応力は、クーリング開始後20日の部材中央で $1.58\text{ N/mm}^2$ の引張応力が生じる結果となり、部分モデルとほぼ同様の傾向を示した。ただし、全体モデルにおいて計測データを基に算定した初期温度は、部分モデルよりも $5\sim 7^\circ\text{C}$ 低いことから、開始20日以降全体モデルの方が部分モデルに比べて $0.4\sim 0.7\text{ N/mm}^2$ 小さい結果となった。

以上の解析結果から、2次クーリングによる温度応力のみでひび割れ発生の可能性は低いものの、セメントの水和熱による温度応力等を考慮した場合、水平打継ぎ部の開きや上下流直行方向のひび割れ等の可能性があると考えられる。2次クーリングによるひび割れを抑制するためには、2次クーリングでの温度降下量の負担を低減する必要があり、1次クーリングでの目標温度を下げることやクーリング実施回数を多くし、最終安定温度に達するまでの降下速度を小さくする等の方法が考えられる。

## 6. おわりに

アーチ式ダムでの2次クーリングに適した流量評価に関して、解析及び実測データによる温度応力の推定を行った。その結果、現行のパイプレイアウトで河川水を用いた場合、流量の影響は特にみられないものの開始初期の急冷及び効率的な冷却を考慮した場合、本構造物での施工条件では流量 $15\text{ L/分}$ 程度、目標温度 $6^\circ\text{C}$ 以上が望ましいと考えられる。また、全体モデルによる解析結果から2次クーリングによる温度応力のみでひび割れ発生の可能性は低いものの、セメントの水和熱による温度応力を考慮した場合にはひび割れなどの変状の可能性があることを推察した。

今後は、パイプクーリングによる熱除去方法の最適化及び温度応力制御を目的に、最適なパイプレイアウト、通水温度及び通水量についてさらに検討していくつもりである。

## 参考文献

- [1]建設省河川局編：多目的ダムの建設 第3巻，土木施工管理技術研究会，pp.175-197，1977
- [2]田辺忠顕，溝渕利明：パイプ・クーリングにおける管壁面の熱伝達係数についての検討，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.73-76，1983.6
- [3]溝渕利明，田辺忠顕：マスコンクリートのパイプクーリングによる熱除去効果の解析，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.37-40，1985.6

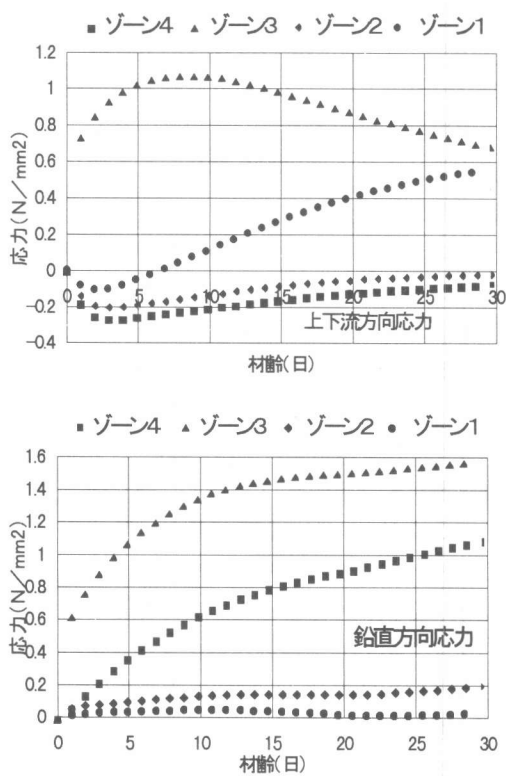


図-1.2 温度応力解析結果