

論文 パイプクーリングによる温度制御の影響範囲に関する研究

國松 祥弘*1・溝渕 利明*2・森田 義則*3・梅原 秀哲*4

要旨：パイプクーリングはダム等に適用される熱応力制御方法のひとつである。また、セメントの水和発熱によって構造物内部に発生する温度応力をあらかじめ予測することは、熱応力制御対策を講じる上で重要である。本論文では、パイプクーリングの温度制御範囲および効果について詳細に述べるとともに、温度解析でクーリングを考慮する際に重要となってくるパイプ壁面の熱伝達率について検討を行った。その結果、パイプクーリングの影響範囲はパイプ周囲 30cm 程度で、その温度制御効果は 5℃程度であった。また、パイプ壁面の熱伝達率は 1 次クーリング時の値が 2 次クーリングに比べて大きくなることが明らかとなった。

キーワード：温度応力、パイプクーリング、アーチダム、パイプ壁面の熱伝達率

1. はじめに

ダム等のマスコンクリートにおける熱応力制御方法には各種のものがあ、り、その中でもセメントの水和熱を除去するパイプクーリングは、熱応力の制御手法としてこれまで多く適用されてきた。パイプクーリングに関する実験、解析方法等が、これまでに数多く報告されているが、実際の大型構造物におけるパイプクーリングの温度制御の影響範囲および効果については、十分把握されていないのが現状である。また、パイプクーリングの温度制御範囲・効果を把握するための一手法として、パイプ壁面の境界条件として特殊な熱伝達境界を設定する解析方法がある。パイプと冷却水との熱伝達境界に使用される熱伝達率は、式(1)に示すように通水量(流速)によって変化すると考えられている。

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

ここに、 u ：通水量(L/分)

式(1)は、コンクリート温度が収束し、内部温度がほぼ均一になっている状態における実験¹⁾によって求められたものである。そこで、コンクリートの発熱時でも式(1)を用いた熱伝達境界の適用が可能かどうか確認する必要がある。

本論文では、実際にパイプクーリングが実施されたアーチダムから得られたデータを基に、パイプクーリングによる温度制御範囲・効果の把握およびパイプ壁面の熱伝達率について検討を行った。

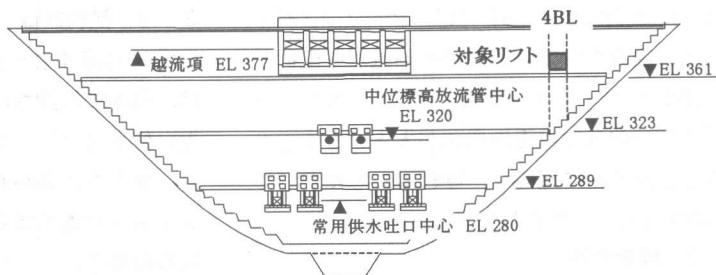


図-1 アーチダム下流面展開図

* 1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻(正会員)

* 2 鹿島建設(株) 技術研究所第2研究部第2研究室(正会員)

* 3 建設省中国地方建設局 温井ダム工事事務所

* 4 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D.(正会員)

2. 温度解析方法

解析方法はパイプレイアウトを考慮するため、3次元有限要素法で行った。また、コンクリートとクーリングパイプとの境界条件を考慮し、ガラーキン法により有限要素法によって定式化した解析方法^{2) 3)}を用いた。また、パイプ壁面とクーリング水との境界条件は式(2)を用いた。

$$\rho_w C_w U \frac{\partial T_w}{\partial S} + \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \frac{2}{r} \beta_w (T_w - T_c) = 0 \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 ρ_w 、 C_w は水の密度および比熱、 U は流速、 S はパイプ入口からの距離、 t は時間、 r はパイプの半径、 β_w はパイプ壁面の熱伝達率である。また、 T_w 、 T_c はパイプ内水温とパイプ壁面のコンクリート温度である。

3. 解析条件

3. 1 解析对象

解析対象ブロックは、図-1 中に示すように 4BL の EL365~373m の 4 リフトとした。1 リフトは約 15m × 11.5m × 2m で施工された。なお、EL365~367 を Lift 1, 続けて 2m ごとに Lift 2, 3, 4 とした。クーリングパイプの配置は図-2 に示すように、パイプ間隔は 1.5m で敷設された。解析期間は 7/7~9/21 とし、各リフトの打設日を図-2 に示す。またコンクリートの打込み温度は実測データを用いた。

Lift 2, 3 (EL369±1m) には、クーリングパイプ周辺の温度を測定するために熱電対を配置した。図-3 に示すように熱電対は、クーリングパイプに近い位置では温度変化が大きいと予想されることから密に配置し、離れるにしたがって間隔を大きくして配置した。

3. 2 境界条件

EL365m の面は固定温度境界とし、この時期のコンクリートの収束温度を 35℃とした。外気と接している面は対流境界とし、左右のブロックに隣接している面はすでに隣接ブロックが先行して打設されているので、断熱温度境界とした。外気温は実測データを使用した。

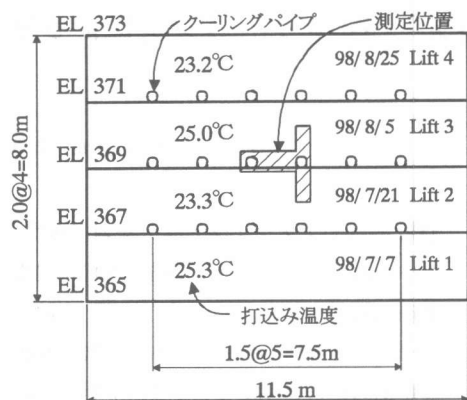


図-2 パイプレイアウト (断面図)

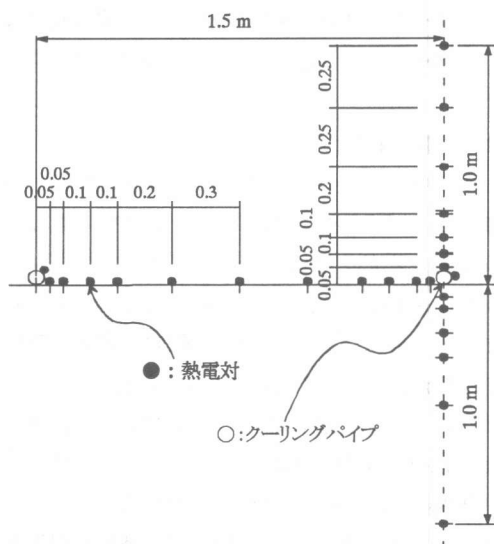


图-3 测定位置

3. 3 熱特性値

表-1 に示すように、コンクリートの熱特性値は、現場で打設されたコンクリートの特性値に近い値を用いた。コンクリートの表面熱伝達率は、養生方法等が異なることから、コンクリート標準示方書を参考に、リフト上面と側面で異なる値を用いた。パイプ壁面の熱伝達率は暫定的に、式(1)より求めた値を使用した。

3. 4 クーリング条件

クーリングパイプ（内径 25mm）の入口での通水温度は約 15℃であった。各リフトにおけるクーリングは、打設直後から最高温度に達する材齢まで行う 1 次クーリングにおける第 1 段階と、

2 次クーリング時で急激な温度降下を生じさせないように、できる限り緩やかに部材温度を低下させる第 2 段階の 2 段階に分けて行われた。第 1 段階クーリングは、コンクリート打設後に流量 20 L/分 (68cm/s) を 3~4 日程継続して行われ、第 2 段階クーリングは第 1 段階クーリング終了後、約 25 日経過した後に流量 16 L/分 (54cm/s) で 1 日おきに断続的に行なわれた。なお、熱電対が配置されたパイプには第 1, 2 段階ともに流量 16 L/分であった。またパイプクーリングの温度制御効果を把握するために、クーリングを行わない条件での解析も行った。

3. 5 要素分割図

要素分割図を図-4 に示す。メッシュレイアウトは、クーリングパイプおよび温度計測点と解析点が比較できるようにした。

4. 解析結果

4. 1 温度履歴

表-1 熱特性値

項 目		熱特性値
密 度 (kg/m ³)		2413
比 熱 (J/kg℃)		0.90
熱伝導率 (W/m℃)		2.44
熱伝達率 (W/m ² ℃)	リフト上面	8
	リフト側面 (型枠脱型前・後)	10・14
パイプ壁面の熱伝達率 (W/m ² ℃)	流速 68cm/s	427
	流速 54cm/s	348

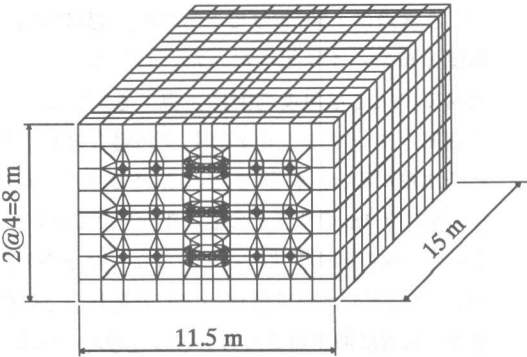


図-4 要素分割図

図-5、図-6 は、打継ぎ面から鉛直方向に 1m (lift 3) の位置およびパイプ壁面での実測値と解析値の温度履歴を比較したものである。ここで、Lift 3 打設日を材齢 0 日とした (以降 Lift 3 打設日を材齢 0 日とした)。

図-5 から、実測値とクーリングを実施したケースの解析値とを比較した場合、その差異は約 1℃であり、ほぼ精度良く解析が行うことができた。ここで、パイプクーリングによってコンクリート温度を 5℃以上低下させた場合には、応力低減に効果がある⁴⁾と考えられることから、この温度低減範囲をクーリングによる制御効果範囲とした。クーリングを行わない場合の解析値と実測値とを比較すると、両者の差異はピーク時で約 2.5℃であったが、40 日以降ではその差異が 5℃以上となった。

図-6 から、パイプ壁面では第 1 段階および第 2

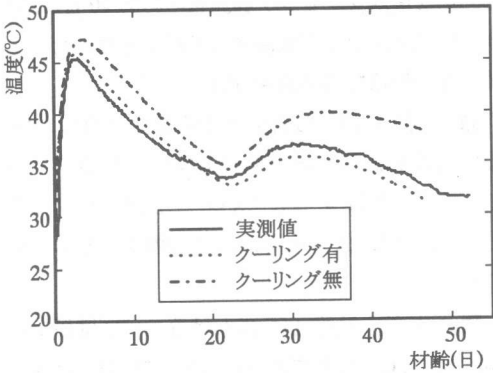


図-5 温度履歴図 (Lift 3)

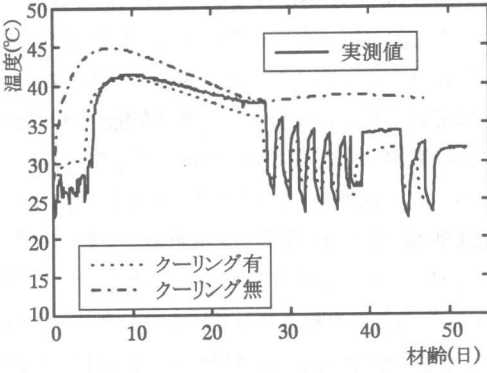


図-6 温度履歴図 (パイプ壁面)

段階クーリングとともにその影響が顕著に現れる結果となった。クーリング実施時の解析値と実測値との温度履歴の差異は、第 1 段階クーリング時で約 5℃、それ以降は約 2.5℃となり、第 2 段階クーリング以降は 3℃程度となった。クーリング時期での差異は大きいものの、温度変化に関してはほぼ同様な履歴を示す結果を示した。また、第 1 段階クーリング時においては、解析値のほうが実測値よりも大きい結果であった。これは、コンクリートの水和発熱時の場合、パイプ壁面の熱伝達率の設定値が小さかったために生じたのではないかと推測される。

クーリングを実施しない場合の解析値と実測値との差異は、第 1 段階クーリング後の材齢 9 日前後で約 5℃であり、リフト中央部においても温度制御効果があると考えられる。また、第 2 段階クーリング開始前の材齢 25 日には、クーリングの有無に関係なく約 38℃で差異はないものの、第 2 段階クーリング実施後の材齢 40 日には、約 34℃となり約 4℃低減させる結果となった。

4. 2 鉛直方向の温度分布

図-7、図-8 は、打継ぎ面から鉛直方向に±1m 範囲内の実測値と解析値の温度分布を示すものである。打設後 4 日までが第 1 段階クーリングであり、材齢 27 日以降に第 2 段階クーリングが行われた。

図-7 から、材齢 1 日におけるパイプ壁面での温度は 26℃、打継ぎ面から 0.3m で 37℃となっており、温度勾配は約 30℃/m であった。打継ぎ面から 0.1m 下方では 31℃で、0~-0.1m の範囲では温度勾配が約 50℃/m であった。また、打継ぎ面から 0.5~1m および 0.1~1m の範囲では、大きな変化は見られなかった。温度勾配が 30℃/m 以上の範囲は、上方で約 30cm、下方で約 10cm であった。以上から、パイプクーリングによる温度制御の影響範囲は、水和発熱しているリフトで約 30cm、温度の収束しているリフトで約 10cm であり、水和発熱しているコンクリートの方が影響範囲は大きく、材齢 3 日まで同様な傾向であった。また、実測値とクーリングを実施

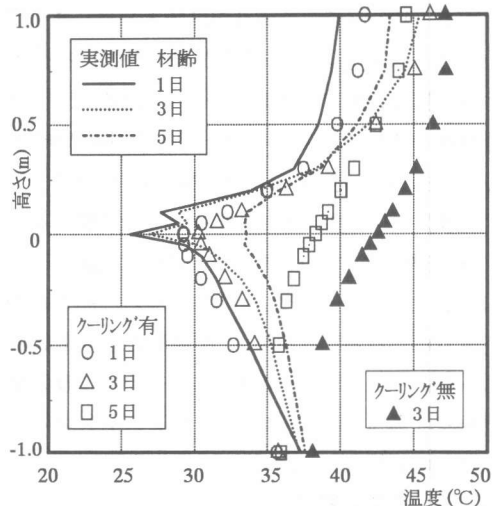


図-7 鉛直方向の温度分布図(第1段階)

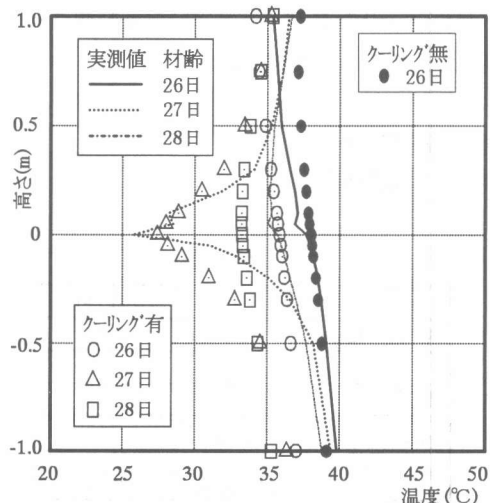


図-8 鉛直方向の温度分布図(第2段階)

した場合の解析値を比較すると、材齢 5 日を除いて温度差は±3℃程度であったが、ほぼ同様な温度分布を示す結果となった。しかし、パイプ近傍での大きな温度勾配は表現できていない。実測値とクーリングを実施しない場合の解析値とを比較すると、材齢 3 日において打継ぎ面からの距離が 1m の位置での温度差が約 2℃であり、それほど温度制御効果はみられなかったものの、0.5m の位置では温度差が約 5℃であり、この位置までの温度抑制効果はあるものと考えられる。

図-8 から、第 2 段階クーリング実施前の材齢 26

日でのパイプ壁面の温度は約 37℃であるが、クーリング実施後の材齢 27 日には、約 25℃まで低下する結果となった。一方、材齢 28 日にはクーリング停止に伴い約 35℃まで上昇する結果となった。第 2 段階クーリングによる効果は、打継ぎ面下方 0.5～1.0m では、0.5℃/日の温度降下速度であり、±0.5m の範囲では 1℃/日であった。打継ぎ面上方 0.5～1.0m の範囲ではクーリング期間でほとんど温度降下が見られなかった。これは、この時期に Lift 4 が打設されたために、Lift 3 側への熱流入があり、そのためにクーリング効果が相殺されたのではないと思われる。

以上の結果から、パイプクーリングの温度制御の影響範囲は、上下方向ともに約 30cm であると考えられる。

4. 3 水平方向の温度分布

図-9、図-10 は、パイプ間の水平方向 1.5m 範囲内の実測値と解析値の温度分布を表している。

図-9 から、第 1 段階クーリング期間中の材齢 1, 3 日ではパイプクーリングの影響範囲は 30cm 程度であった。材齢 3 日において、パイプから 0.75m の位置では約 38℃であるのに対して、図-7 に示すように鉛直方向+0.75m の位置では約 42℃であり、パイプからの距離は同じであっても約 4℃の差異があった。これは、水平方向の方が隣合うパイプの影響で、鉛直方向よりもクーリング効果が大きくなったためと考えられる。また、実測値とクーリングを実施しない場合の解析値とを比較した場合、クーリング実施期間において、パイプから 0.75m の位置での温度差は 5℃程度であり、クーリングによる温度制御効果があったと考えられる。

図-10 から、第 2 段階クーリングの温度制御の影響範囲は約 30cm であった。材齢 26 日でのパイプから 0.75m 離れた位置での温度は、37.5℃であったが、材齢 27 日には 37℃に低下し、クーリングを停止した材齢 28 日には、約 36℃まで低下する結果となったことから、第 2 段階クーリングによって約 1℃/日の温度降下速度があったことになる。

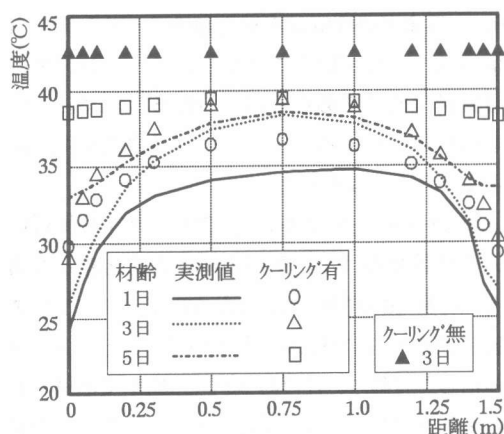


図-9 水平方向の温度分布図(第1段階)

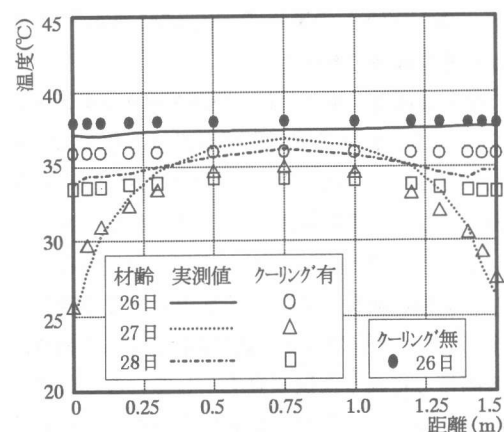


図-10 水平方向の温度分布図(第2段階)

5. パイプ壁面の熱伝達率について

5. 1 パイプ壁面の熱伝達率による温度変化

パイプ壁面の熱伝達率の変化によって温度がどの程度変化するかを把握するために、熱伝達率 β_w の値を 348 の 2 倍の 700 W/m²℃として解析を行った。他の条件は前章と同じである。なおクーリング水の流速は変えていない。

5. 2 解析結果

図-11、図-12 は、パイプ壁面とクーリング水の実測値と解析値の温度履歴を示したものである。

図-11 から、材齢 2 日までのパイプ壁面の実測値と $\beta_w = 348$ W/m²℃の解析値との差異は約 5℃であり、 $\beta_w = 700$ W/m²℃にした場合には 1.5℃程度低くなったものの、実測値との差異は約 3℃であり、あまり大きな変化は見られなかった。材

齢 2 日までの実測値と解析値のクーリング水温はほぼ一致していることから、クーリング水の吸熱量は同じであると考えられる。また、熱伝達率の違いによるクーリング水温の差異は、ほとんど見られなかった。

図-12 から、実測値と $\beta_w=348 \text{ W/m}^2\text{C}$ の解析値の各材齢でのパイプ壁面の温度とを比較した場合、材齢 26 日で約 37.5℃と 35.5℃、クーリング後の材齢 27 日で約 26℃と 27.5℃、クーリングを停止した材齢 28 日で約 36℃と 32.5℃であり、各材齢の差異は 2～3℃程度であった。また、両者の温度履歴はほぼ一致する結果となった。 $\beta_w=700 \text{ W/m}^2\text{C}$ の場合は、 $\beta_w=348 \text{ W/m}^2\text{C}$ とほぼ同様な傾向であった。

壁面温度は、第 1、第 2 段階クーリングのどちらにおいても解析値の方が実測値よりも高い結果となった。また、クーリング水温は、第 1 段階クーリング中の材齢 2 日まではほぼ一致しているが、第 2 段階クーリングでの解析値はクーリング開始直後に低下するものの、その後のクーリング期間中はほぼ一定の温度となっており、実測値とは違う温度履歴を示している。これらの差異は、パイプ壁面の熱伝達率を大きくするだけでは改善されないと思われることから、解析で用いたパイプ壁面の熱伝達率について、他の工事でのデータを含めた検討を行い、最適なパイプ壁面の熱伝達率を評価していく必要があると思われる。

6. まとめ

- 1) パイプクーリングの及ぼす影響範囲はパイプ周りの約 30cm までが大きく、その温度制御効果はパイプ付近、鉛直方向+1m、水平方向にパイプから 0.75m の位置でそれぞれ約 5℃であった。
- 2) パイプクーリングによる影響範囲は、温度が収束しつつあるコンクリートよりも、水和発熱している時期の方が大きかった。
- 3) 今回の施工例では、パイプ壁面の熱伝達率は 1 次クーリング時での値が 2 次クーリング時に比べて大きくなることが分かった。

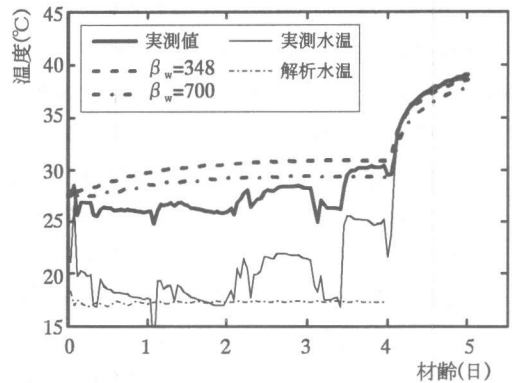


図-11 パイプ壁面での温度履歴(第1段階)

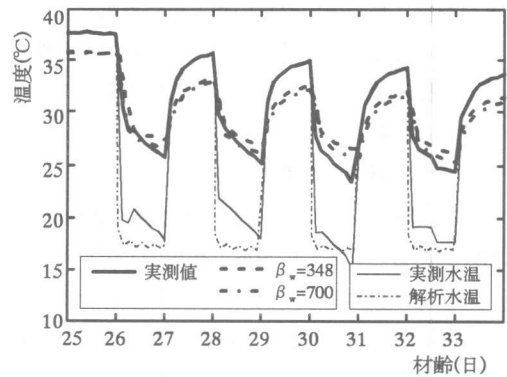


図-12 パイプ壁面での温度履歴(第2段階)

参考文献

- 1) 田辺忠顕・山川秀次・渡辺 朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第 343 号 pp171-179，1984.3
- 2) 田辺忠顕・溝淵利明：パイプ・クーリングにおける管壁面の熱伝達係数の決定についての検討，コンクリート工学年次講演会論文集，第 5 回 pp73-76，1983.6
- 3) 溝淵利明・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，コンクリート工学年次講演会論文集，第 7 回 pp37-40，1985.6
- 4) 川原場博美・鹿子木唯夫・田辺忠顕：マスコンクリートの温度応力に対するパイプクーリング効果の自由度 FEM 解析プログラムの開発，コンクリート工学年次講演会論文集，第 8 回 pp45-48，1986.6
- 5) 伊藤 洋・坂口雄彦・西山勝栄・森 清就：パイプクーリング効果の高度予測に関する研究，土木学会論文集，第 396 号 pp29-37，1988.8