

論文

[1145] パイプクーリングにおける冷却効果の実験および解析による検討

正会員○岩佐正徳 (大林組 土木技術本部)  
 正会員 今枝靖典 (大林組 土木技術本部)  
 正会員 若松 岳 (大林組 土木技術本部)  
 正会員 原田 暁 (大林組 土木技術本部)

1. まえがき

コンクリートのパイプクーリングは、ダムや大型橋梁等の重要かつ大規模なマスコンクリート構造物の温度応力制御として使われてきた。しかし、近年、躯体を最終安定温度まで下げるための使用に加えて、最高温度を低減するピークカットのための使用も増加している。パイプクーリングを実施する際には、クーリングによる局所的な引張応力が生じないように、配管網のレイアウト、管径、冷却水の流速(流量)を予測解析をもとに適切に設計する必要がある。その解析手法については、クーリングパイプを要素としてではなく、ある吸熱定数を有する節点としてモデル化し、吸熱効果を評価しようとする方法が一般的である(本論文では、吸熱節点法と称す)。しかし、パイプクーリングの効果を定量的に評価した例は少ない。

本論文では、低発熱セメントを用いて単純モデル化したパイプクーリング実験を行い、詳細な温度計測を行ってパイプクーリングによる温度低減効果を実測した。そして、吸熱節点法により温度解析を実施し、実験結果と比較して解析手法の妥当性を検証した。さらに、パイプクーリングの効果を評価するために、ダムのようにリフト施工において、リフト厚とコンクリートの発熱特性(K値、α値)をパラメータとしたパイプクーリング効果の解析検討を行った。

2. パイプクーリング実験

2. 1 実験概要

(1) コンクリートの発熱特性

コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは、大型橋梁向けに開発された低発熱型高炉セメントB種を使用した。ここでは、一辺が1.0mのマスブロックを厚さ20cmの発泡スチロールで覆った簡易断熱温度上昇試験体を作製して内部の温度を測定し、3次元FEM温度解析によってコンクリートの断熱温度上昇量を求めた。その結果を図-1に示す。マスブロック中心の温度上昇量は31.4℃であり、解析により求めた断熱温度上昇式は式(1)のようになった。

表-1 コンクリートの配合

スラブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
12	4.5	45	44	145	322	791	1036

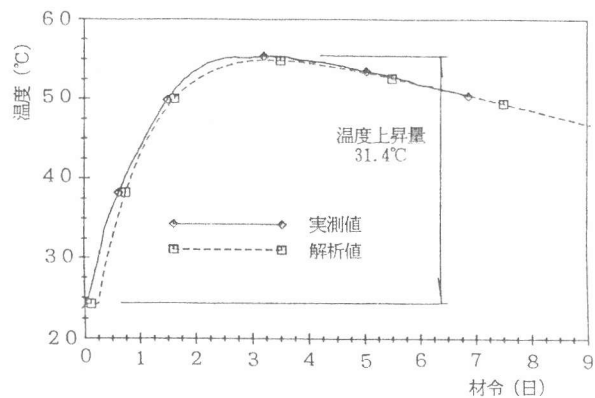


図-1 簡易断熱温度上昇試験

$$T = 36.7 (1 - e^{-0.804(t-0.125)}) \dots\dots\dots (1)$$

### (2) クーリングモデル供試体

供試体寸法を図-2に示す。幅および高さが1.5m、長さ5.0mのコンクリートマスブロックの中心部に、クーリングパイプとして薄鋼電線管 (E-39,  $\phi 35\text{mm}$ ) を通した。供試体の表面は断熱条件とするため、6面とも厚さ20cmの発泡スチロールで覆った。クーリング水の流量は、管内が乱流となるように30ℓ/minとた。

### (3) 温度計測

温度計測は熱電対を用い自動計測とした。熱電対は供試体の長さ方向5つの断面に配置した。例えば、中央部の断面では、パイプに接した部分、パイプ中心からの距離がそれぞれ、5.10、15.20.30.50.75cm の合計8点の温度を計測した。さらに水温および外気温も計測した。

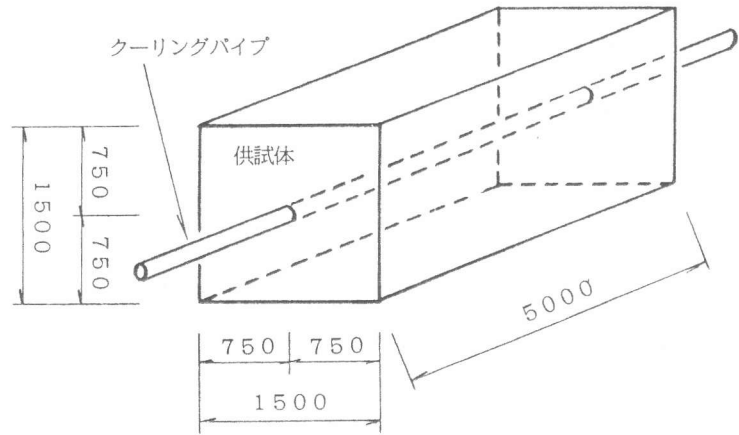


図-2 供試体寸法

### 2.2 実験結果

温度の経時変化を図-3に、断面内の温度分布を図-4に示す。パイプから最も遠い計測点 (パイプ中心から75cmの点) での最高温度は45.5℃、温度上昇量は25.5℃であった。図-1に示したように、断熱温度上昇試験の結果の温度上昇量は31.4℃であったため、およそ6℃の温度低減効果があったことが分かる。

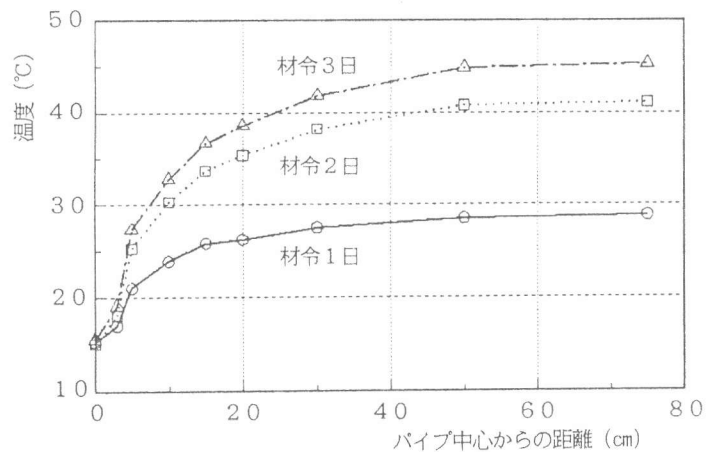


図-4 温度分布

温度変化はパイプ中心から50cmまでに生じており、それ以上はほとんど温度差は生じていない。

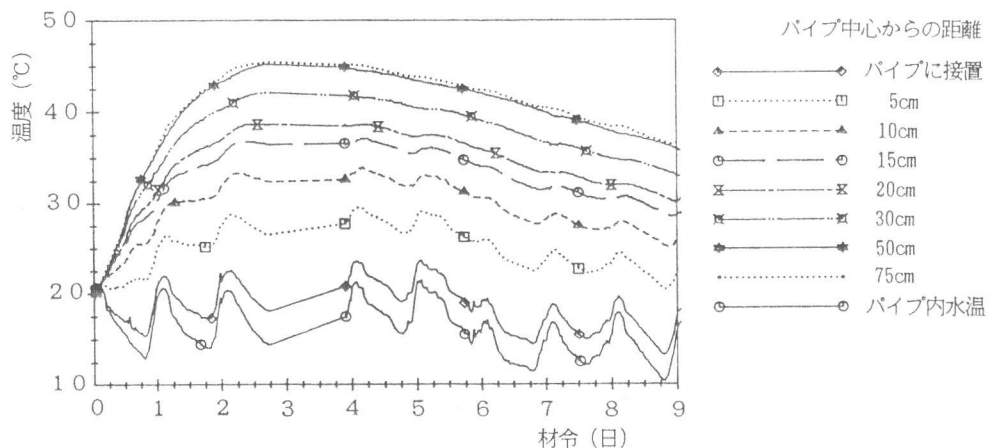


図-3 温度の経時変化

### 3. 吸熱節点法の検証

#### 3.1 吸熱節点法の概要 [1]

吸熱節点法とは、パイプを一つの吸熱節点として考慮し、これに吸熱定数を与えて解析する方法である。図-5に示すように、節点*i*にクーリングパイプがあり、パイプは薄肉で、パイプ外側表面の温度と、クーリング水の水温がほとんど等しいと仮定する。この時パイプ位置の節点*i*とパイプと隣接する距離*a*の節点との間の正確な温度勾配は図-5の実線のようなになる。これに対して、有限要素法解析において、クーリングパイプとその隣接節点との温度勾配を破線のように線型と仮定すると、クーリングパイプへ流れる熱量は式(2)で与えられる。ここで、*H*は吸熱定数である。

$$q = H \cdot (T_w - T_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$H = \frac{2 \pi k t}{\ln(a/R) - 2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、*H*：吸熱定数、*k*：パイプ周辺要素の平均熱伝導率、*t*：要素の厚さ  
*a*：隣接節点間距離、*R*：クーリングパイプの半径

#### 3.2 吸熱節点法の検証

##### (1) 解析概要

パイプクーリング実験について、吸熱節点法および熱伝達要素法の2手法で解析を行い、解析手法の検証を行った。ここでいう熱伝達要素法とは、クーリングパイプに相当する部分を要素分割して、熱伝達境界として取り扱い、解析する方法である。

解析定数を表-2に示す。

吸熱節点法における吸熱定数は式(3)より求めた。今回の解析では、隣接節点間距離 *a* = 13.5cmとした。熱伝達要素法において熱伝達率は田辺らの研究[2]を参考にして求めた。吸熱節点法の場合の節点数は、熱伝達要素法の場合の節点数よりも約25%少なくなった。

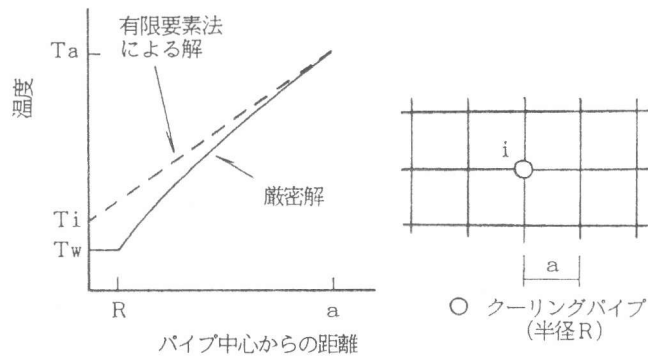


図-5 パイプ付近の温度分布

表-2 解析定数

コンクリートの発熱関数	$T = 36.7(1 - e^{-0.804(t - 0.125)})$
コンクリートの単位重量	2294 (kg/m <sup>3</sup> )
コンクリートの比熱	0.22 (kcal/kg·°C)
コンクリートの熱伝導率	2.0 (kcal/m·hr·°C)
コンクリートの打設温度	20.0 (°C)
吸熱節点法における吸熱定数	274 (kcal/m·hr·°C)
熱伝達要素法における熱伝達率	300 (kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C)

(2) 解析結果および検証

吸熱節点法、熱伝達要素法を用いた解析結果と実験結果との比較を図-6に示す。両手法による解析結果とも実験結果とよく合致している。しかし、節点数では、吸熱節点法は熱伝達要素法の3/4で解析することができ、吸熱節点法の方がかなり効率的である。特に、実規模構造物のパイプクーリング解析には有効であると考えられる。

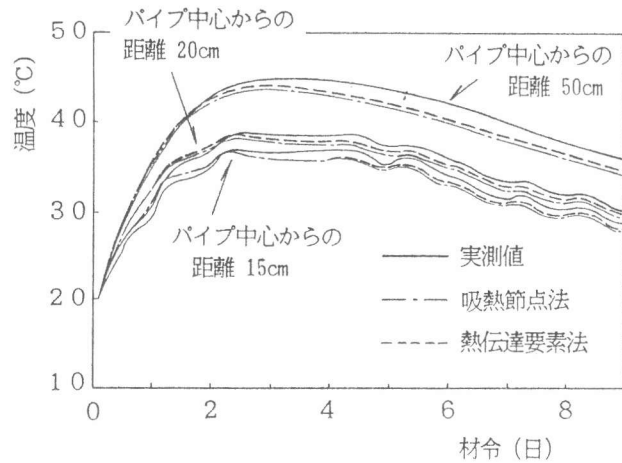


図-6 解析と実験との比較

4. パイプクーリング効果の検討

4.1 検討条件

ここでは、リフト施工されるマスコンクリートに対してパイプクーリング解析を行い、リフト厚、断熱温度上昇式を変化させ、クーリング効果の定量的評価を試みた。

解析モデルを図-7に示す。高さ5.0mの既設リフト上に、厚さを変化させたリフトを4リフト打設する。打設間隔は10日とした。クーリングパイプは、各リフト最下端に設置し、パイプの水平方向の間隔は1.5mで一定とした。通水期間は、コンクリート打設から解析終了までとした。解析定数を表-3に、発熱関数を表-4に示す。リフト厚を0.75、1.5、2.5mの3種類とした。同時にパイプクーリングを実施しない場合の解析も行い、合計30ケースの解析を行った。評価は、境界条件の影響の少ない第4リフトの断面内中央部とした。

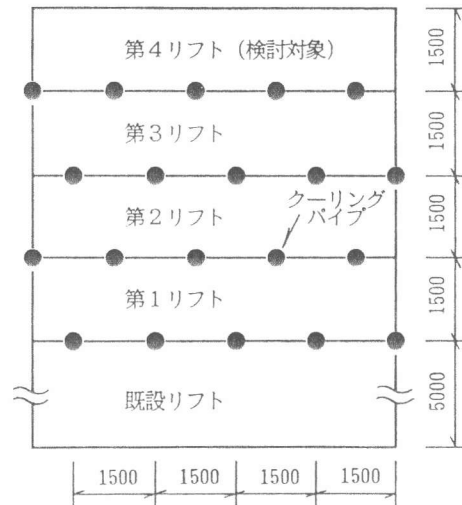


図-7 解析モデル

表-4 解析ケース

K α	25	35	45
0.5	-	○	-
1.0	○	○	○
1.5	-	○	-

○：解析実施  
-：解析実施せず

表-3 解析定数

コンクリートの単位重量	2300 (kg/m <sup>3</sup> )	
コンクリートの比熱	0.22 (kcal/kg·°C)	
コンクリートの熱伝導率	2.0 (kcal/m·hr·°C)	
コンクリートの打設温度	20.0 (°C)	
クーリング水の水温	15.0 (°C)	
外気温	20.0 (°C)	
コンクリート表面の熱伝達率	10.0 (kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C)	
吸熱 定数	リフト厚 0.75m	198 (kcal/m·hr·°C)
	リフト厚 1.5, 2.5m	26.8 (kcal/m·hr·°C)

#### 4. 2 検討結果

温度の経時変化の一例としてリフト厚1.5m、 $K=35^{\circ}\text{C}$ 、 $\alpha=1.0$ の場合の第4リフトについて図-8に示す。リフト中央部における温度上昇量は、クーリングを行わない場合で $26.8^{\circ}\text{C}$ 、クーリングを行った場合で $25.4^{\circ}\text{C}$ 、ピークカット量は $1.4^{\circ}\text{C}$ であった。クーリングを行う場合のパイプ位置の温度は、水温( $15^{\circ}\text{C}$ )よりも高くなっている。

温度上昇量と $K$ 値、 $\alpha$ 値との関係を図-9~10に示す。 $K$ 値が大きくなるにしたがって、比例的に温度上昇量は大きくなった。 $K=45^{\circ}\text{C}$ 、リフト厚0.75mの場合の温度上昇量と、 $K=25^{\circ}\text{C}$ 、リフト厚2.5mの場合の温度上昇量はほぼ等しくなった。 $\alpha$ 値の小さいコンクリートほど温度上昇量は小さくなり、その割合は、 $\alpha$ 値が小さいほど大きくなった。 $\alpha=1.5$ 、リフト厚1.5mの場合の温度上昇量と、 $\alpha=0.5$ 、リフト厚2.5mの場合の温度上昇量はほぼ等しくなった。

ピークカット量と $K$ 値、 $\alpha$ 値との関係を図-11~12に示す。ピークカット量はリフト厚が薄いほど大きくなったが、リフト厚が0.75~1.5mの範囲では顕著な差がなかった。本解析ではパイプピッチを1.5mとしたが、リフト厚がパイプピッチより小さい範囲では、パイプクーリングによるピークカット能力はパイプピッチに依存していることを示していると考えられる。

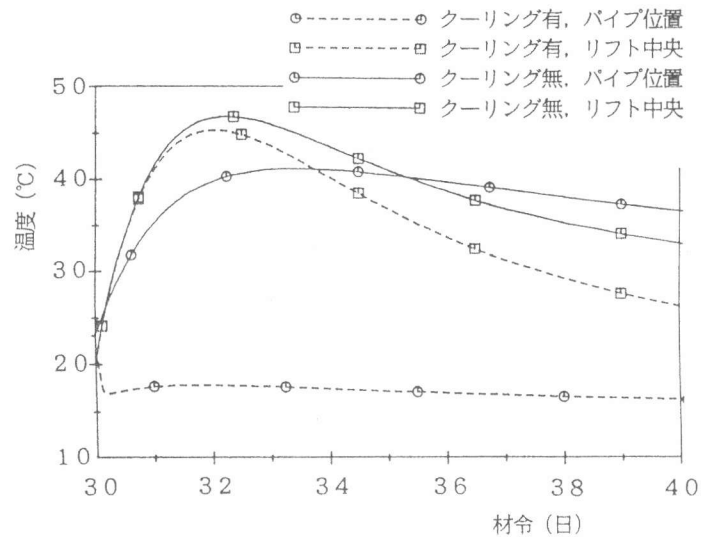


図-8 温度の経時変化

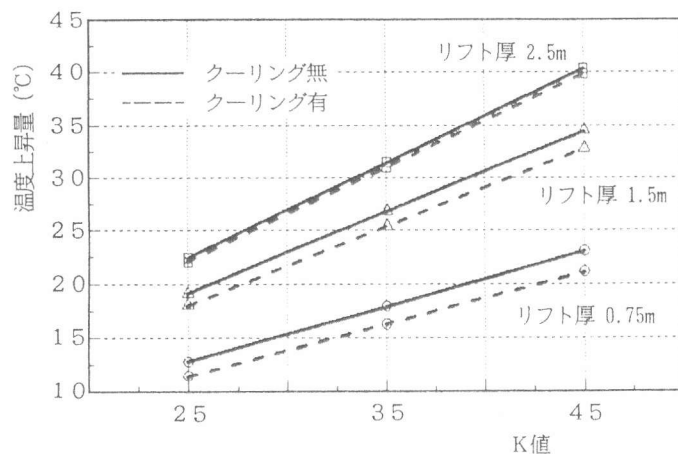


図-9 温度上昇量と $K$ 値 ( $\alpha=1.0$ )

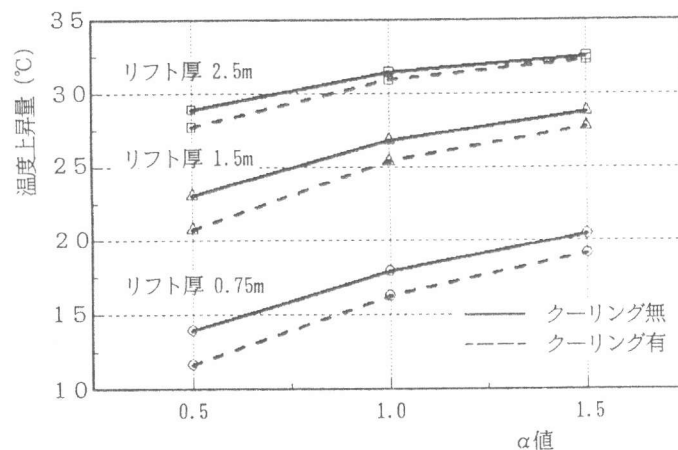


図-10 温度上昇量と $\alpha$ 値 ( $K=35$ )

K値を25~45℃の範囲で変化させた場合、ピークカット量に大きな差はなかった。 $\alpha$ 値を0.5~1.5の範囲で変化させた場合、 $\alpha$ 値がピークカット量に与える影響は大きい。特に $\alpha$ 値が1.0より小さい範囲では $\alpha$ 値が小さくなるとピークカット量は大きくなった。

今回の解析条件のように、各リフトの最下端に1.5m間隔でクーリングパイプを設置するような場合、リフト厚0.75~1.5m、 $\alpha = 0.5$ の場合で、2℃程度のピークカットが期待できる。しかし、より大きなピークカットを目的としてパイプクーリングを行う場合は、今回の検討よりも密にクーリングパイプを配管する必要があると考えられる。

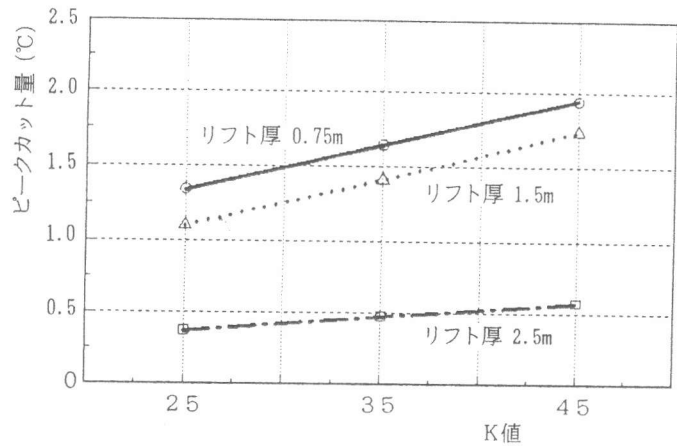


図-11 ピークカット量とK値 ( $\alpha = 1.0$ )

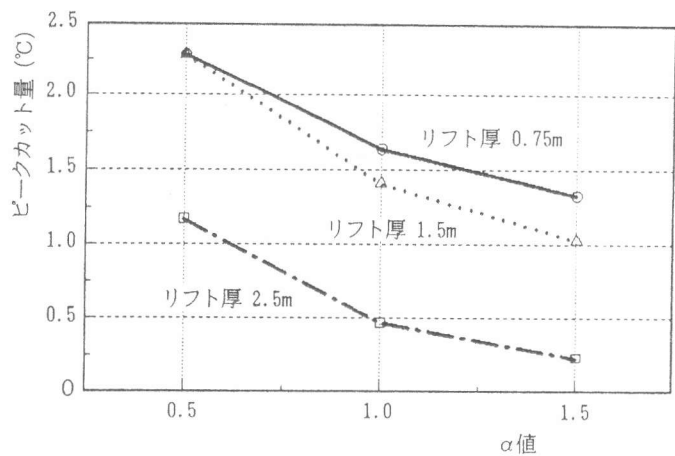


図-12 ピークカット量と $\alpha$ 値 (K=35)

#### 5. まとめ

- 1) コンクリートのパイプクーリング実験を行った。簡易断熱モデル供試体におけるピークカット量はおよそ6℃であった。
- 2) 吸熱節点法での解析結果は実験結果とよく合致した。節点数が少なくすむため、実規模構造物におけるパイプクーリング解析には有効な手法であると考えられる。
- 3) リフト厚がパイプピッチより小さい場合のピークカット能力はパイプピッチに依存し、その効果はリフト厚とパイプピッチが同等である場合に最も大きいと思われる。
- 4) パイプクーリングによるピークカットに適したセメントは $\alpha$ 値の小さなセメントである。その観点から、近年開発されている低発熱セメントとパイプクーリングの組み合わせは有効であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) R.M.Polivka, E.L.Wilson: Finite Element Analysis of Nonlinear Heat Transfer Problems, Structural Engineering and Structural Mechanics Department of Civil Engineering University of California, Jun. 1976.
- 2) 田辺忠顕, 溝渕利明: 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.