

論文 マスコンクリートのクーリングパイプ周辺の温度場に関する研究

浅野 勇^{*1}・向後 雄二^{*2}・林田 洋一^{*3}

要旨：室内クーリング実験を行い，クーリングパイプ周辺の温度場について検討した。その結果，クーリングパイプ周辺で時間的，空間的に温度変化が大きな領域は，パイプ表面から10cm 前後の領域であること，パイプ周辺の温度分布は，パイプからの距離，クーリング水温およびパイプから 30cm 程度離れた位置でのコンクリート温度から推定可能であることを確認した。また，有限要素法による数値解析から，パイプを有限要素分割したモデルの解析精度が高いこと，パイプを節点に配置したモデルでは，パイプを配置した要素に幅が 5～10cm 程度のものを使用することにより解析精度が向上することを確認した。

キーワード：パイプクーリング，断熱温度上昇試験，有限要素法，マスコンクリート

1. はじめに

パイプクーリングは，コンクリートの打設初期に発生する温度応力を制御する手段として有効である。本研究は，室内クーリング実験を行い，クーリングパイプ周辺の温度分布を実験的に明らかにし，その温度分布を解析的に追跡することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 室内クーリング実験装置

部材厚が数 m 以上のパイプクーリングが行われている構造物を考える。部材の中央部付近のパイプ周辺に図-1 に示すような直方体を考える。直方体内の温度分布はパイプと垂直な断面内（xy 平面）で特に大きく変化するが，パイプから離れるにつれてその勾配は緩やかになる。また，パイプの長手方向（z 方向）の温度変化は数 m の範囲内であれば極めて小さい。直方体の面を貫く熱流束は，その面に垂直な方向の温度勾配に比例するので，ある程度パイプから離れた面を考えれば，その面は，ほぼ断熱状態にあると考えることができる。本実験では，この疑似断熱状態を室内で確保することにより，実構造物中の

パイプ周辺の温度分布を再現できると考えた。その際，パイプと垂直な断面の寸法が問題となる。フィルダム監査廊の現場温度計測結果からは，パイプと垂直な断面における温度勾配が大きな領域は，パイプからほぼ 20cm 以内であると報告されている¹⁾。そこで，今回はパイプ表面から約 30cm 離れた面を断熱状態と仮定し，室内クーリング実験装置を作製した。

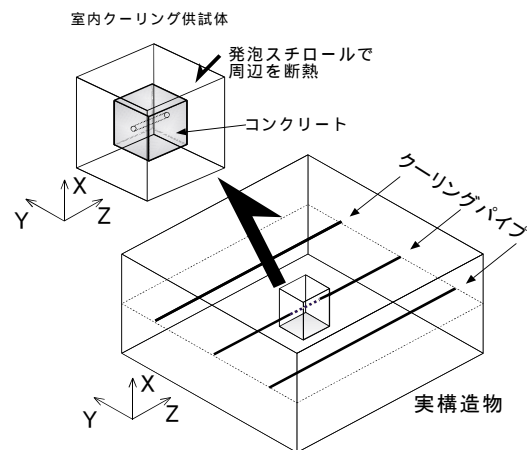


図-1 実構造物と室内クーリング実験の関係

図-2 に室内クーリング実験装置の外形を示す。試験装置は，鋼製型枠を箱形に組み立て，その内側を 10～15cm 厚の発泡スチロール板で

*1 独立行政法人 農業工学研究所 構造研究室 主任研究官（正会員）

*2 独立行政法人 農業工学研究所 構造研究室 室長 農博

*3 独立行政法人 農業工学研究所 構造研究室 研究員 農修

Figure 1: Comparison of mold structures. The image shows three different mold configurations labeled (a), (b), and (c). (a) is labeled "クーリング 供試体" (Cooling specimen) and shows a mold with a cooling pipe. (b) is labeled "クーリング無 供試体 (大)" (No cooling specimen (large)) and shows a mold without a cooling pipe. (c) is labeled "クーリング無 供試体 (小)" (No cooling specimen (small)) and shows a mold without a cooling pipe. Arrows indicate the flow of material from the cooling pipe to the mold. A label "発泡スチロール" (Expanded polystyrene) points to the insulation material. A label "クーリングパイプの 出口" (Cooling pipe outlet) points to the exit of the cooling pipe. A label "メタルフォーム" (Metal foam) points to the mold structure.

供試体	記号	目的	供試体寸法
クーリング	CL	クーリング現象の把握	60×60×50cm
簡易断熱	AL	供試体の断熱温度上昇曲線，熱伝導率，熱伝達率の同定	60×60×50cm
	AM		40×40×40cm

打込み 温度 (℃)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)				Ad (Kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (28日) (N/mm ²)
			W	C	S	G				
13.2	58	43.4	155	268	815	1094	2.85	9.1	5.8	22.9

-976-

は，クーリング供試体と同寸法の簡易断熱供試体中心温度履歴も併記した。図-4 から，パイプに近い領域ほどコンクリートの温度上昇は抑制されており，特にパイプから 10cm 以内の領域でその効果が大きいことがわかる。クーリング開始から 2 日後にクーリングを停止したところ，各点の温度は，約 6 時間でほぼ等しい温度に上昇した。クーリング開始から 6 日後にクーリングを再開した。各点の温度は，徐々にクーリング水温に漸近した。クーリング停止および再開時に，コンクリート温度の時間的変化が大きい領域は，いずれの場合も，パイプから 10cm 前後の領域であった。

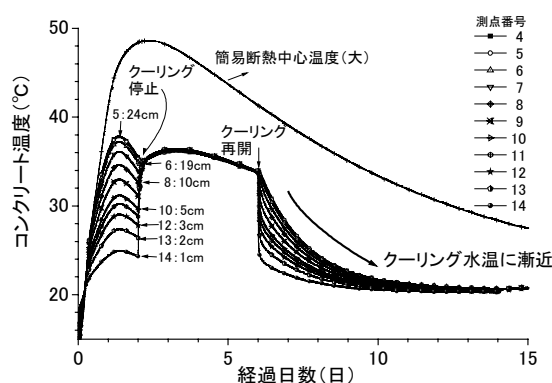


図-4 パイプ周辺の温度履歴

3.2 パイプ周辺の温度分布

パイプ周辺の温度分布の時間変化を発熱時（試験開始～2 日後），再クーリング時（試験開始 6 日後～14 日まで）に分けて，図-5, 6 に示す。図-5 から，発熱時のパイプ周辺の温度勾配は，コンクリートの打込み初期には小さく，その後増加し，その温度がピークを迎える 35 時間前後に最も大きくなることがわかる。図-6 から再クーリング時では，温度勾配は，クーリング再開直後が最も大きく，その後徐々に小さくなることがわかる。いずれの場合も，温度勾配が大きいのは，パイプから 10cm 前後の領域である。前節の結果も含めて，今回の実験の範囲内では，コンクリートの温度変化が，時間的，空間的に激しい領域は，パイプから 10cm 前後の

領域であることを確認した。

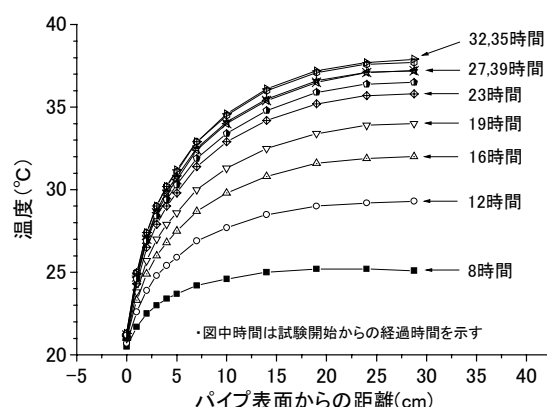


図-5 発熱時のパイプ周辺温度分布

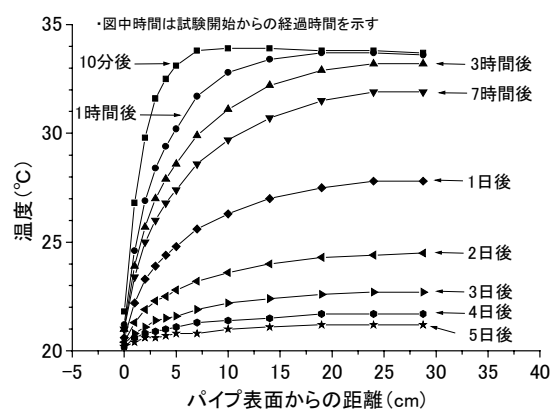


図-6 再クーリング時のパイプ周辺温度分布

3.3 パイプ周辺の温度分布の無次元化

クーリングパイプ周辺の温度分布については，解析的な検討から無次元化が行われている²⁾。今回は，室内試験結果に基づく無次元化を試みた。クーリング水温 T_w の影響を評価するために， T_w とパイプから約 30cm 離れた位置のコンクリート温度 $T(30)$ を用いて，パイプ表面から x cm 離れた位置におけるコンクリート温度 $T(x)$ を式(1)で無次元化した。無次元化の概要を図-7 に示す。

$$T_c(x) = \frac{T(x) - T_w}{T(30) - T_w} \quad (1)$$

図-5 に示したクーリング開始 8～43 時間のパイプ表面からの温度分布を式(1)を用いて無次元化した結果を図-8 に示す。クーリング開始 8 時間後の測定結果を除けば，無次元化した温度

$T_c(x)$ と位置 x の関係は，時間経過に関係なくほぼ一本の曲線で表すことが可能と思われる。また，結果は割愛するが，図-6 に示した再クーリング開始～5 日後までの実測温度分布に同様の無次元化を行うことにより，やはり一本の曲線に整理することができた。図-8 の関係を指数関数で近似すると以下の式（2）で表される。

$$\frac{T(x) - T_w}{T(30) - T_w} = 1 - e^{-x/a} \quad (2)$$

ここで， a はパラメーター。

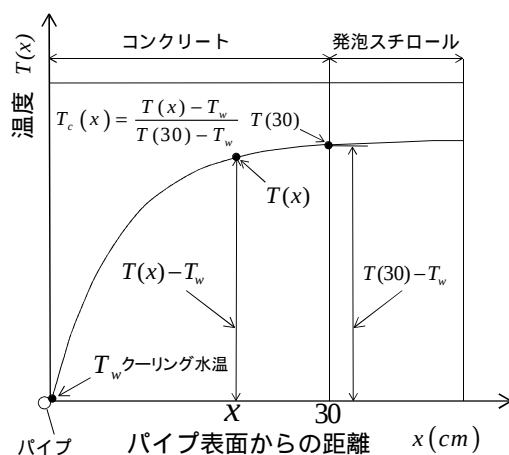


図-7 無次元化の方法

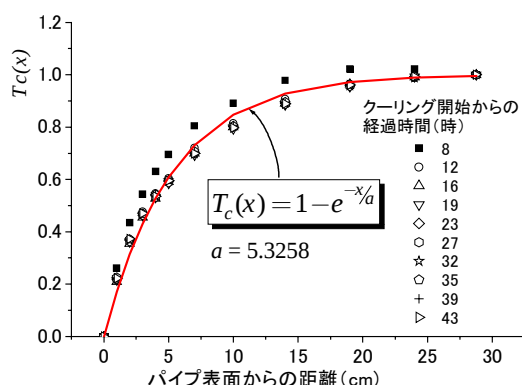


図-8 発熱時の温度分布を無次元化した結果

本実験の範囲内では，（2）式からクーリング時に，パイプ周辺の温度 $T(x)$ は， T_w と $T(30)$ と位置 x で推定可能であることがわかる。また，無次元化された温度 $T_c(x)$ の分布形状は，パイプに向かって指数関数的に減少する曲線であることがわかる。

4. 数値解析結果

4.1 解析モデルおよび境界条件

メッシュ分割およびパイプのモデル化が解析結果に与える影響を明らかにするために，それらを変化させた解析を行った。解析コードとしては，（株）計算力学センターの ASTEA-MACS for Windows Ver2.0 を使用した。表-3 に解析ケースを示す。

表-3 解析ケース

解析シリーズ	記号	パイプのモデル化	要素分割	その他
A パイプ分割	API-100	パイプを有限要素分割し，パイプの表面を熱伝達境界に設定	0.1～1.2cm	熱伝達率 100(W/m ² °C)
	API-300		"	熱伝達率 300(W/m ² °C)
	API-1000		"	熱伝達率 1000(W/m ² °C)
	API-T	パイプを有限要素分割し，パイプ表面を固定温度境界に設定	"	固定温度は，クーリング水の平均温度 20.2°Cとした。
B 吸熱節点	B02	節点にパイプを配置し，吸熱節点として取り扱う。節点の境界条件として固定温度境界を設定	0.2cm	固定温度は，クーリング水の平均温度 20.2°Cとした。
	B05		0.5cm	
	B1		1.0cm	
	B5		5.0cm	
	B10		10.0cm	

注：要素分割とは，パイプ周辺約10cm正方形領域の有限要素の一辺の長さを表す。

解析モデルは，供試体中央断面の 1/4 を対象とした 2 次元モデルとした。使用要素は 4 角形 1 次要素とした。代表的な要素分割図と境界条件を図-9 に示す。また，パイプのモデル化について図-10 に示す。シリーズ A では，パイプを有限要素分割し，解析を行った。シリーズ B では，パイプを節点に配置し，吸熱節点として取り扱い，解析を行った。パイプの境界条件としては，シリーズ A では，クーリング水と接するパイプの表面を熱伝達および固定温度境界とした。シリーズ B では，吸熱節点を固定温度境界とした。A,B シリーズともに固定温度境界には，クーリング水の平均温度 20.2 を固定温度として与えた。パイプ以外の外気と接する面は，固定温度境界とした。また，その固定温度には，実測外気温を用いた。その他の面は断熱境界とした。

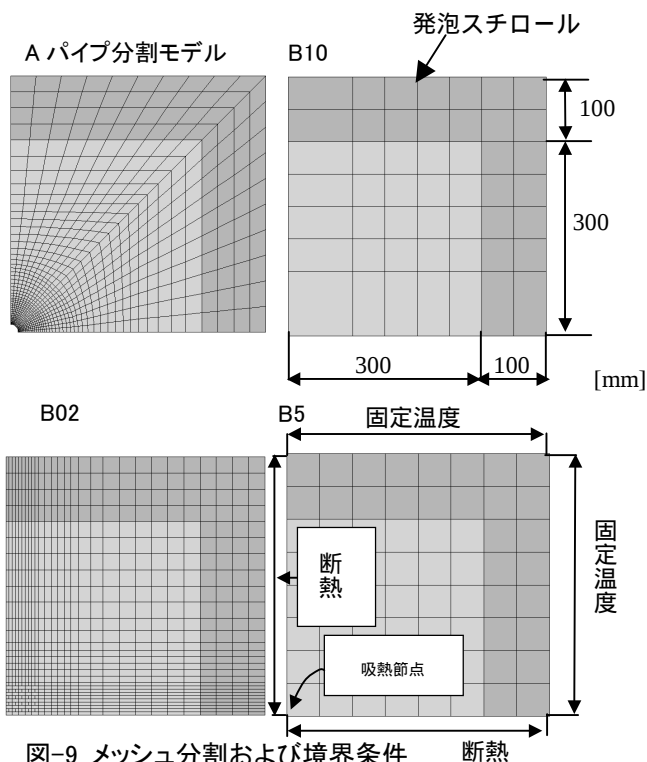


図-9 メッシュ分割および境界条件

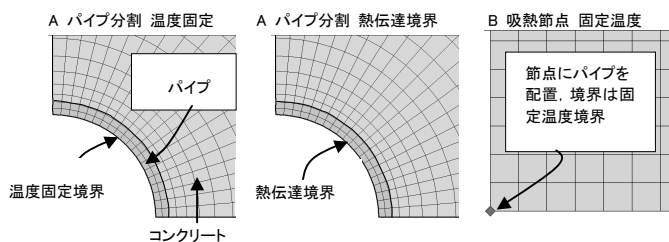


図-10 パイプのモデル化

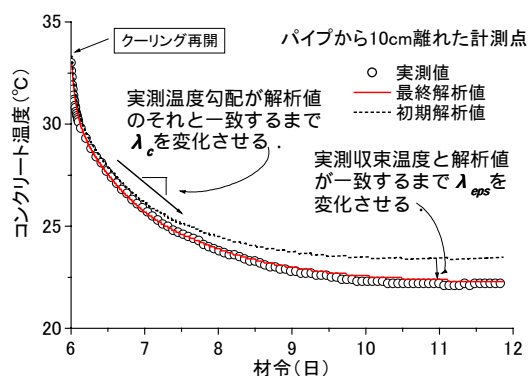


図-11 パラメータの同定方法

4.2 解析パラメータの同定

コンクリートの断熱温度上昇曲線は、簡易断熱温度上昇試験³⁾から推定した。また、型枠の見かけの熱伝導率 λ_{eps} およびコンクリートの熱伝導率 λ_c は、再クーリングの実測温度計測値から、図-11に示す方法により試行錯誤的に決

定した。解析パラメーターを表-4に示す。

表-4 解析パラメーター

項目	単位	コンクリート	発泡スチロール	パイプ
熱伝導率	W/m°C	(2.10)	(0.0517)	80.29
比熱	kJ/kg°C	1.047	1.901	0.442
密度	kg/m ³	2370	28.6	7870
断熱温度上昇曲線式(コンクリートのみ)	°C	$Q(t) = 42.0(1 - e^{-1.150t})$		
初期値	°C	14.4	16.8	14.4

注: () は、有限要素法の解析結果と実測値を比較し、求めた値

4.3 考察

(1) パイプの熱伝達率の検討

パイプを有限要素分割し、パイプの熱伝達率を 100, 300, 1000 W/m² と変化させたケースと温度固定としたケースの解析結果と実測値を比較した結果を、図-12, 13 に示す。図-12, 13 では、パイプから 1cm, 10cm 離れた位置での値を比較している。実測値と解析値がほぼ一致するのは、パイプの熱伝達率を 1000 W/m² としたケースとパイプを固定温度境界としたケースである。固定温度境界は、熱伝達率を極めて大きくした熱伝達境界条件に相当する。一般にパイプの熱伝達率は、約 300 W/m²⁴⁾と報告されているが、今回の実験からは、その値より大きな値を設定した方が、実測値と良く一致する結果を得た。また、パイプ表面を固定温度境界とし、固定温度としてクーリング水温を与えることにより妥当な解が得られることがわかった。

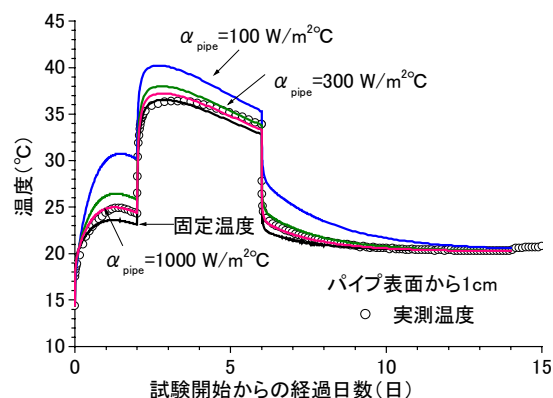


図-12 解析と実測の比較(パイプから 1cm)

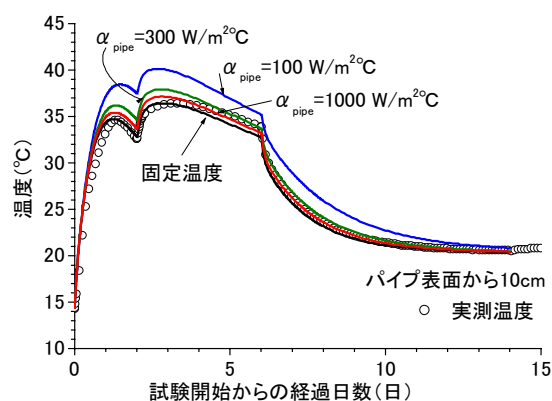


図-13 解析と実測の比較(パイプから 10cm)

(2)要素分割の影響

パイプを節点に配置し、固定温度境界として扱った場合を検討した。この場合、解析結果は、パイプを配置した要素とその周辺の要素分割に強く影響を受ける。図-14 に、要素分割を変化させた場合のパイプ周辺の温度解析結果と実測値を比較した結果を示す。図-14 には、パイプを要素分割した解析結果も比較のため併記した。

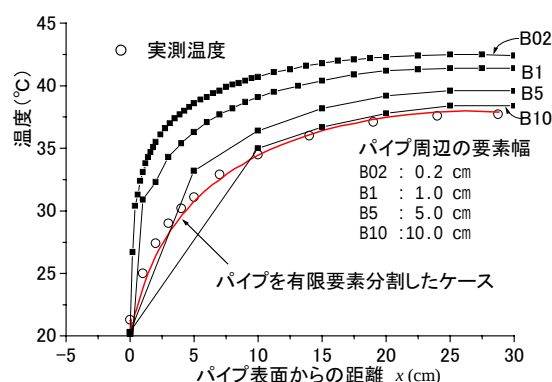


図-14 温度分布の比較(打込み 36 時間後)

図-14 より、実測値とほぼ一致するのは、パイプを有限要素分割したケースであることがわかる。しかし、このケースでは、極めて多くの要素分割が必要であり、実用上は問題が多い。一方、節点にパイプを配置した解析では、必ずしも細かい要素分割を行うことが解析精度を向上させないことがわかる。要素の幅が 5cm より小さい B1, B02 の解析値は、実測値より高めの値となる。一方、要素の幅が 5, 10cm の B5, B10 のケースでは、パイプ近傍の温度の予測精度は

粗いが、全体的には、実測値と良く一致する結果を示す。このような現象が生じる理由としては、1cm 程度の幅の要素で、直径約 2.5cm のパイプを節点として取り扱うことに矛盾があるためと推測される。本実験の範囲内ではあるが、節点にパイプを配置する解析では、5～10cm 程度の要素をパイプ近傍に配置するのが妥当と思われる。

5. まとめ

本研究の範囲から以下のことが言える。

- 1) クーリングパイプ周辺で時間的、空間的に温度変化が大きな領域は、パイプ表面から 10cm 前後の領域である。
- 2) クーリングパイプ周辺の温度分布は、その位置、クーリング水温およびパイプ表面から 30cm 程度離れた位置における温度で無次元化が可能である。
- 3) 有限要素法によるパイプクーリングの解析では、パイプを有限要素分割したモデルの精度が高い。
- 4) パイプを節点に配置したモデルでは、解析精度はメッシュ分割に依存する。節点を温度固定境界とした解析では、パイプを配置した節点が存在する要素の大きさを 5～10cm と調整することで、室内試験結果とほぼ一致する解析結果を得ることが可能である。

参考文献

- 1) 浅野 勇, 向後雄二: フィルダム監査廊におけるクーリングパイプ周辺の温度分布について, 平成 12 年度農業土木学会大会要旨集, pp. 604-605, 2000
- 2) 溝淵 利明, 田邊 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範囲に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, pp. 1123-1128, 2001
- 3) 浅野 勇ほか: 簡易断熱温度上昇試験に基づくコンクリートの断熱温度上昇曲線・上昇曲線の推定方法, 平成 13 年度農業土木学会要旨集, pp. 572-573, 2001
- 4) 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精度予測に関する研究, 土木学会論文集, 第 396 号 /V-9, pp. 29-37, 1988