

論文

[1194] パイプクーリングの熱伝達係数に関する室内実験と評価

正会員 近久 博志 (飛鳥建設技術本部)
 正会員 津崎 淳一 (飛鳥建設技術本部)
 正会員○中原 博隆 (飛鳥建設技術本部)
 筒井 雅行 (飛鳥建設技術本部)

1. はじめに

マスコンクリート構造物のポストクーリングとして一般的なパイプクーリング工法に使用するパイプの熱伝達係数は、パイプの配管網のレイアウトやクーリング水の流量およびリフトスケジュール等の決定に重要な項目であるが、試験方法や設定方法が十分に確立されていないのが現状である。これに対して、ここでは、有限要素法の非定常熱伝導解析に非線形計画法を応用した逆解析手法[1]を用いて、室内実験結果からクーリングパイプの熱伝達係数を同定することによって、本手法の適用性を示すとともに、得られたパイプの熱伝達係数について考察を試みる。

2. 熱特性実験

2.1 実験装置

実験装置と熱電対の埋設位置を図-1と図-2に示す。熱電対が埋め込まれた直径40cm、高さ50cmの円柱状のコンクリート供試体から成っており、中央部には通水用のパイプ(外径1inchの薄肉電縫鋼管)を設置してある。今回の実験では、供試体を水温調節のできる水槽に設置し、20℃の水をパイプ内に通した。実験に使用したコンクリートの配合と熱特性試験結果を表-1と表-2に示す。

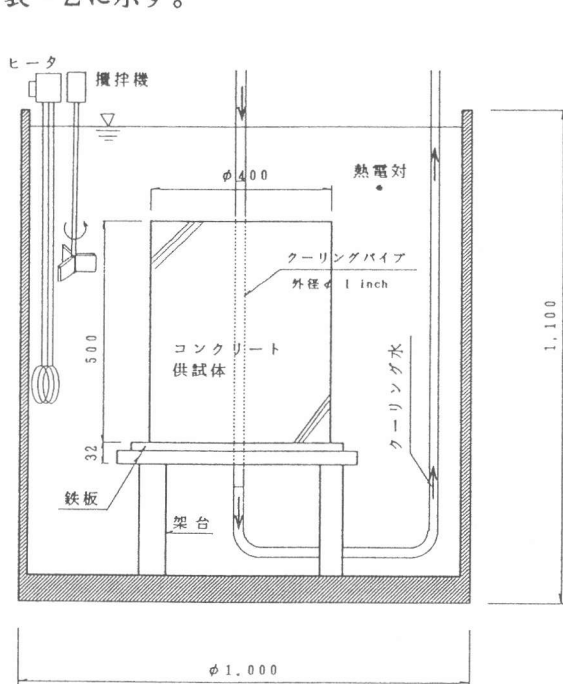


図-1 実験装置

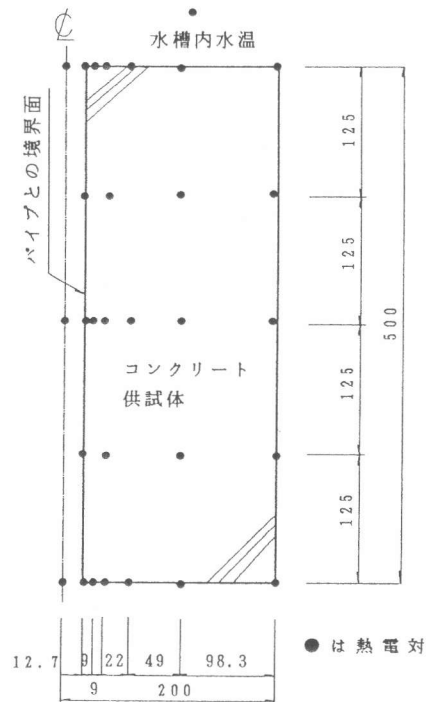


図-2 熱電対埋設位置

2.2 実験方法

水槽内の水温とコンクリートの内部温度が所定温度で安定したことを確認した後に、パイプに通水する。そして、通水に伴うコンクリート供試体内部の温度変化を測定する。

クーリング水の流量は、5, 10, 15, 20 l/min の4段階に変化させた。また、クーリング水と供試体内部の温度差が、10, 20, 25 °C になるように、水槽内の水温を 30, 40, 45 °C に変化させた。水量と温度差のそれぞれの組み合わせによって、表-3に示すような12ケースの実験となった。

3. 評価

上記のコンクリート供試体に対して、図-3に示したような有限要素法のアイソパラメトリック軸対称モデルを用いて逆解析を実施する。使用した節点数と要素数は、110 と 128 である。また、パイプ部は、通水温度を外部温度とする熱伝達境界とし、供試体の上面部、側面部および底面部は、それぞれ水槽内の水温を外部温度とする熱伝達境界として評価した。

解析に用いたクーリング水温は、パイプ内の3測点（流入部、中央部、流出部）で測定した計測水温の平均値を用いた。測定された流入部と流出部の水温差は、最大でも 0.3 °C 程度であった。図-3に●印で示した計測点の温度結果を用いて、通水後 10 時間までの温度変化に対してパイプ部と供試体の上面部、側面部および底面部の各熱伝達係数を 1 時間毎に同定する。このため、ここではそれぞれの境界面における 1 時間毎の平均的な熱伝達係数が求められることになる。

4. 計測結果

計測結果の一例として、流量 10 l/min、水槽内の水温 40 °C（供試体とクーリング水の温度差が 20 °C）のときの供試体中央部の測定温度、水槽内の水温およびクーリング水温の経時変化を図-4に示す。図中の測点番号は、図-3の測点に対応している。本実験では、通水後のコンクリート供試体の内部温度は、パイプに近い測点から順に温度が低下し、通水後約 4 時間で定常状態になった。

表-1 コンクリートの配合表

最大寸法 mm	スラン cm	空気量 %	W/C %	s/a %
13	14	3.8	53.9	50

単 位 量 (kg/m ³)				
C	W	S	G	混和剤
317	171	898	904	0.793

28日強度:384 kg/cm²、セメント:普通ポルトランドセメント、水:水道水、細骨材:鹿島産川砂(FM=2.69)、粗骨材:多摩産碎石13mm(FM=6.22)、混和剤:AE減水剤(ホヰリスNo70)

表-2 熱特性試験結果

密度 t/m ³	比熱 kcal/kg·°C	熱拡散率 m ² /hr	熱伝導率 kcal/m·hr·°C
2.362	0.277	0.00367	2.40

表-3 実験ケース

クーリング水と コンクリートの 温度差 (°C)	クーリング水の流量 (l/min)			
	5	10	15	20
10	○	○	○	○
20	○	○	○	○
25	○	○	○	○

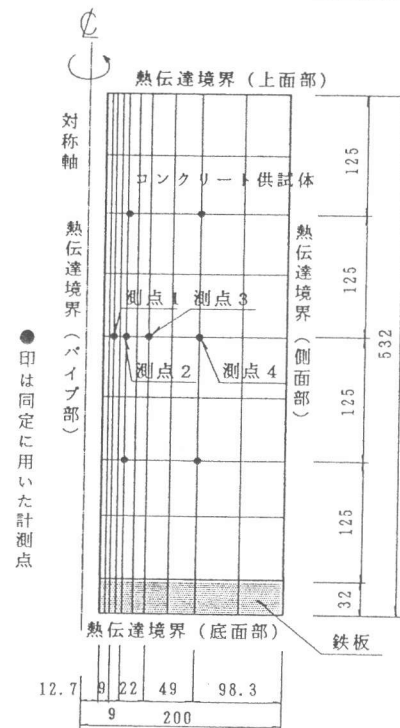


図-3 解析モデル

5. 解析結果

流量 10 l/min、水槽内の水温 40 °C のときの実験結果を基にして実施した解析結果の中から、図-4 に示した温度測定結果と比較できるように供試体の内部温度等の経時変化を図-5 に示す。また、通水開始10時間後の供試体内部の温度分布を図-6 に示す。同定結果として、水槽内の水温 40 °C (供試体とクーリング水の温度差が 20 °C) のときのクーリング水の流量変化に対するパイプの熱伝達係数の経時変化を図-7 に示す。また、クーリング水の流量 10 l/min のときの水槽内の水温変化に対するパイプの熱伝達係数の経時変化を図-8 に示す。通水後 4 時間までの供試体の内部温度がかなり非定常状態にあるにも拘らず、同定されたパイプの熱伝達係数は安定した値を示している様子が分かる。

各実験結果から同定されたパイプの熱伝達係数を整理すると図-9 のようになる。同図には参考のために田辺らと守分らの研究成果[2],[3]も記入する。図-9 より、クーリング水の流量とパイプの熱伝達係数の関係は、流量が多くなるにつれて熱伝達係数も増加するが、流量が 15 l/min を越えた付近から次第に収束傾向を示す。このとき、クーリング水の流量と熱伝達係数との関係は、次式で近似できる。

$$\alpha = 533 \cdot (1 - \exp(-0.18q))$$

(5 ≤ q ≤ 20 l/min) …………… (1)

ここで、 α : 熱伝達係数(kcal/m²・hr・°C)、
q : 流量(l/min)

6. おわりに

クーリングパイプの熱伝達係数については、次のようにまとめられる。

- 1) 同定されたパイプの熱伝達係数は、非定常状態でも安定した値を示す。
- 2) クーリング水温とコンクリート温度の温度差、換言すれば、クーリング水の温度には関係なくパイプの熱伝達係

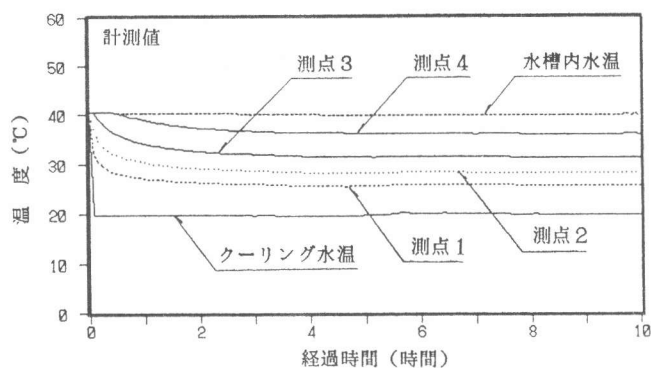


図-4 供試体中央部の経時温度図(計測値)
(流量: 10 l/min, 水槽内水温: 40 °C)

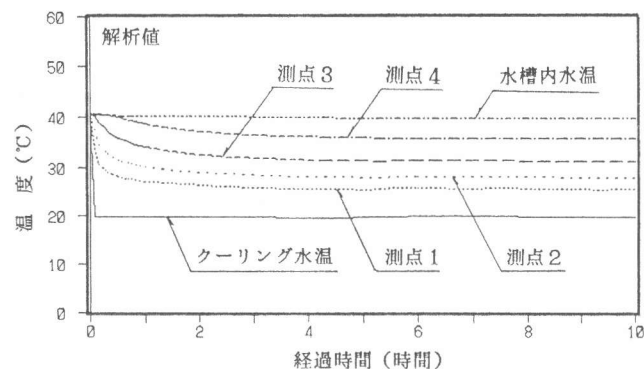


図-5 供試体中央部の経時温度図(解析値)
(流量: 10 l/min, 水槽内水温: 40 °C)

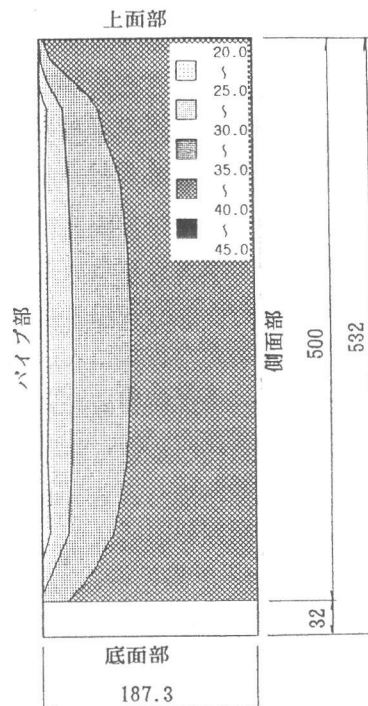


図-6 コンクリートの温度分布図
(10時間後の解析結果,
流量: 10 l/min,
水槽内水温: 40 °C)

数は、ほぼ一定値を示す。

3) 本実験では、流入するクーリング水の流入量が多くなればなるほど、パイプとクーリング水との熱伝達の効率が悪くなっており、パイプの熱伝達係数を評価すると図-9のように流量に対して非線形な関係(式(1))が得られることとなった。

逆解析手法を用いれば、非定常状態における温度測定結果から、複数個の未知数でも容易に効率よく同定することができることがわかった。ここでは、未知数をクーリングパイプの熱伝達係数としたが、他の熱特性値でも同様に求めることができると考えられる。さらに、今後、パイプが設置されているマスコンクリート構造物の温度に関する現場計測を実施し、同様の手法によるデータの評価を予定している。こうしたデータの積み重ねは、パイプクーリングの設計に役立つものと考えている。

参考文献

- 1) 近久博志ほか：“マスコンクリートの熱伝導解析への逆解析の適用”、土木学会第43回年次学術講演会、V、pp.450-451、1988.10.
- 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.

3) 千葉孜ほか：“スリットケー

ルのスリット部温度解析について”、土木学会第45回年次学術講演会、V、pp.410-411、1990.9.

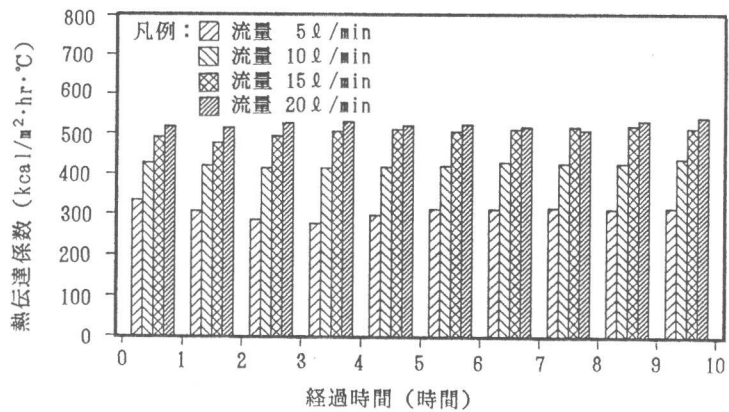


図-7 同定された熱伝達係数の経時図
(水槽内水温：40 °C)

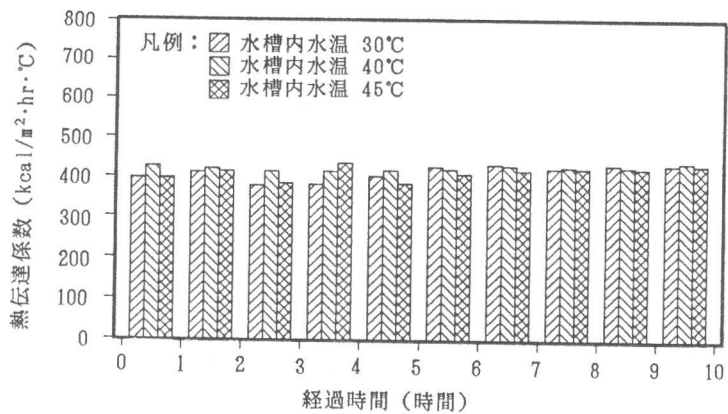


図-8 同定された熱伝達係数の経時図
(流量：10 l/min)

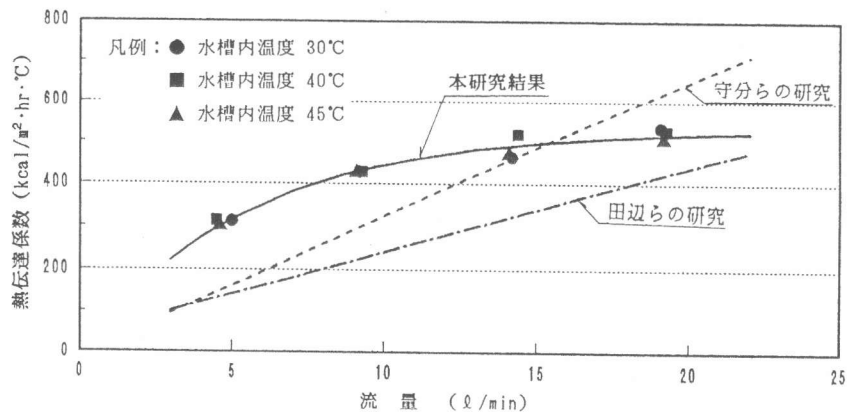


図-9 流量と熱伝達係数の関係