

鉛直・低流速パイプクーリングの実大実験と実施工による熱交換特性の評価

株式会社奥村組 技術研究所 フェロー会員 東 邦和
株式会社奥村組 西日本支社 正会員 森田修二

1. はじめに

近年、適用の多い鉛直パイプクーリングでは、従来の水平パイプクーリングより管径が大きく低流速となるが、低流速パイプクーリングの基礎研究は少ない。実大室内実験を行い、流速と熱交換特性およびパイプ延長方向のクーリング水温変化の関係を得た。また、鉛直パイプクーリングを用いた実施工の計測結果と解析結果により精度を検証した。

2. 実大室内実験

2-1 実験概要

試験体は、300mm×300mm×10mの大きさであり、横置きしている。断面中心にスパイラルシース管φ60mmを設置した。計測断面位置No.1～No.7に、温度計を設置している。設置位置を図-1に示す。

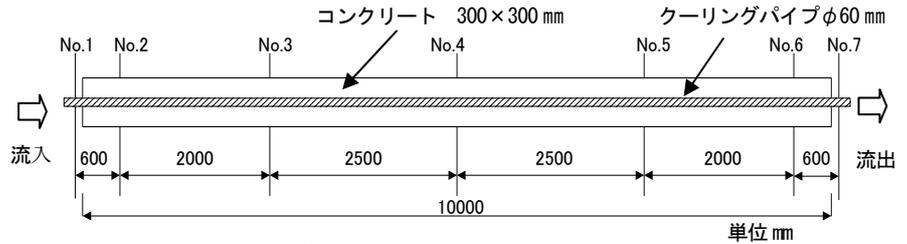


図-1 試験体 (No. 1～No. 7: 計測器設置位置)

それぞれの計測断面内の計測器設置位置を図-2に示す。試験体はコンクリート周囲に設置した電熱シートで加温し、設定温度は60℃とした。流量は、2～30 L/min (流速1.2～17.7cm/s) の6水準に設定した。

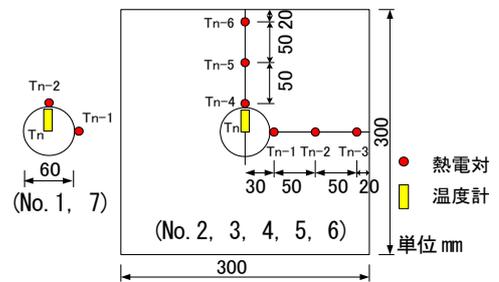


図-2 計測断面の計測器設置位置

2-2 実験結果

各断面 (No.1～No.7) において、コンクリート温度を6点 (T-1～T-6) と水温を1点 (パイプ中心) で測定しており、これらの測定結果からパイプクーリングにおける熱交換率 (パイプ表面の熱伝達率) を算定した。加温しながら通水した流量5L/minのケースのパイプ流水の水温 (No.1, No.7) と断面No.4のコンクリート温度の変化を図-3に示す。経過2時間～8時間ではコンクリート温度とパイプ水温はほぼ定常状態となっている。熱移動が平衡状態と仮定すると、(パイプクーリングからコンクリートへの熱移動量 Q_1) = (コンクリート内部の熱移動量 Q_2) が成立し、コンクリートの熱伝導率を定めるとパイプクーリングの熱伝達率 α が求められる。

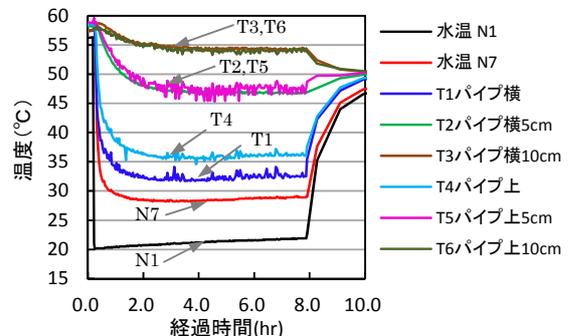


図-3 水温とコンクリート温度 (断面 No. 4)

流量5L/minのケースで求めた熱伝達率の経時変化を図-4に示す。計測断面 (No.2～No.6) ごとの熱伝達率は、断面によって幾分か

つきはあるが、ほぼ安定した結果が得られた。実験結果から得た流量と熱伝達率の関係を図-5に示す。図中の近似式を式(1)に示す。図中には田辺式¹⁾で求まる熱伝達率も示した。田辺式と比較して2～3倍の熱伝達率となっているが、田辺式とはパイプの径や材質、対象とする流速が異なることが原因と考えられる。

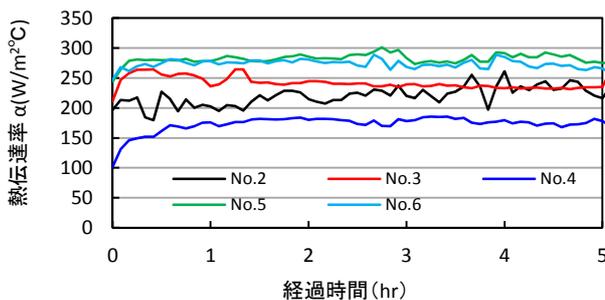


図-4 熱伝達率 (流量 5L/min)

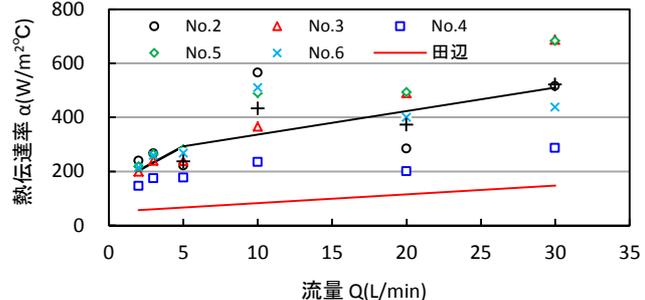


図-5 流量と熱伝達率の関係

キーワード：マスコンクリート、温度応力解析、鉛直パイプクーリング、熱伝達率、ひび割れ

連絡先 〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387 (株)奥村組 技術研究所 TEL 029-865-1521 FAX 029-865-1522

$$\alpha = 8.7 \times Q_w + 250 \quad (Q_w > 5)$$

$$= 30 \times Q_w + 143.5 \quad (Q_w < 5) \quad (1)$$

ここに、 α : 熱伝達率(W/m²C), Q_w : 流量(L/min)

2-3 水温変化を評価した温度応力解析

温度応力解析は汎用構造解析コード“FEAST”(JIPテクノサイエンス)を用いている。本コードではパイプクーリングの水温変化を簡易手法で評価している。パイプクーリングは、コンクリートとの熱収支により下流ほど水温上昇するので、パイプ延長の長い場合は水温変化の評価が重要となる場合がある。この解析精度については上記の室内実験で検証済みである。

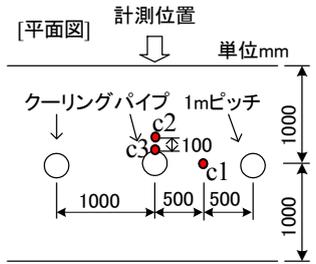
3. 解析と実施工の計測結果の比較

3-1 コンクリートの仕様と解析条件

実施工での水門構造物の堰柱コンクリート²⁾を対象に、室内実験で得られた低流速パイプクーリングの基本特性やクーリング水温変化の評価について検証した。鉛直クーリングパイプの設置状況を写真-1に示す。計測器の配置を図-6に示す。鉛直パイプクーリング配管は、φ60mm シース管を壁体幅2.0mの中心に1.0mピッチで設置した。パイプの上部から供給ホースを底部まで差し込んで、水を流出させて用いる。水量は1本当たり12L/minで、コンクリート打設翌日から5日間実施した。

3-2 解析結果

リフト壁体と床版の解析モデルを図-7に示す。解析条件を表-1に示す。コンクリートの断熱温度上昇値は、現場での断熱箱試験体から逆解析で求めた。パイプクーリングの熱伝達率は式(1)により決定した。壁体センター部のクーリング水温の解析結果を図-8に示す。クーリング開始直後(打設後1日)は温度が急変するため、ややばらつきが生じる。パイプの下段(流入)、中段、上段(流出)の順にコンクリートの熱を吸収して温度が高くなり、コンクリート温度の低下とともに温度差が縮小する。パイプ長が2.2mと短く水温上昇は約1.0°Cと小さいが、解析で水温変化が評価できており、パイプ表面のコンクリート温度が精度よく再現できている。コンクリート温度の経時変化を、パイプの中間位置(c1)、パイプから10cm位置(c2)、パイプ表面位置(c3)の測定値と解析値を図-9に示す。ピーク温度およびパイプ近傍温度の測定値と解析値は良く一致している。解析では、ひび割れ指数の増大が得られ、クーリングの効果を確認できた。²⁾



● 熱電対(c1~c3)

写真-1 鉛直クーリングパイプ設置状況 表-1 解析条件

項目	解析パラメータ ²⁾
配合	低熱高炉セメントB種に膨張材を内割り10kg添加, W/B54%
膨張ひずみ	$\epsilon_{ex, \infty}$: 145×10^{-6} 最大膨張ひずみの0.75倍 (低熱高炉: 75×10^{-6} , 膨張材: 70×10^{-6})
外気温	実測値, 打設温度は25.5°C
断熱温度上昇	Q_{ex} : 38.5, r : 0.95, t_{0Q} : 0.262
パイプクーリング	流入水温20°C, 熱伝達率350W/m ² C

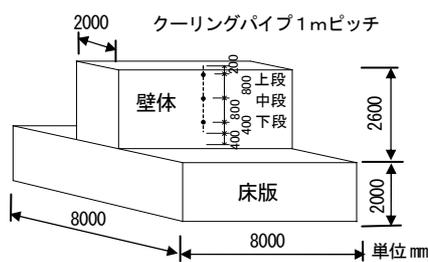


図-7 解析モデル

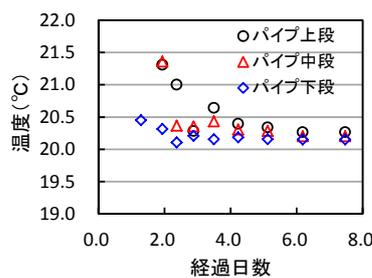


図-8 クーリング水温 (解析)

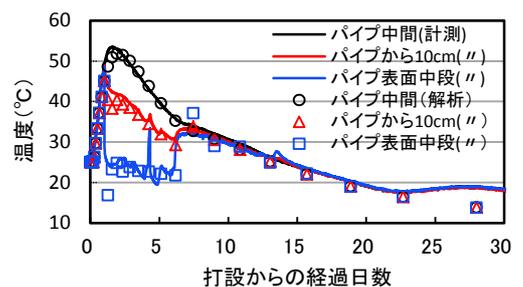


図-9 コンクリート温度 (実測と解析)

4. まとめ

本研究により次の結果が得られた。

- (1) パイプクーリング (パイプ内径φ60mm) の流速1.2~17.7cm/s (流量2~30L/min) の低流速範囲の実験により、流速に応じた200~500W/m²Cの熱伝達率の値が得られた
- (2) パイプクーリングの解析と現場測定データを比較することにより、十分な精度を持つことが確かめられた

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断面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析」, 土木学会論文集 No.343, pp.171-179, 1984.3
- 2) 東 邦和, 塚本耕治, 森田修二, 井 君人「マッシュな水門コンクリートの温度応力対策と効果の評価」, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1165-1170, 2015