

水門構造物における鉛直パイプクーリングの熱伝達率の逆解析

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

鉛直パイプクーリングは従来のパイプクーリングより低流速であり、その熱伝達率の検証例は少なく、明確になっていない。すでに、筆者らは実大室内実験によって流量と熱伝達率との関係式を提案¹⁾しているが、本報告では水門構造物を対象に現地の施工条件（パイプクーリングの流量や水温など）での計測データを逆解析することで熱伝達率の同定を行った。実大室内実験や既往の研究結果²⁾との比較を行ない、熱伝達率について考察を行ったので報告する。

2. ひび割れ低減対策と計測結果

2-1 壁体コンクリートの仕様と対策

鉛直パイプクーリング状況を写真-1に示す。壁体リフト割とクーリング位置を図-1に示す。ひび割れ低減対策として、材料面では低熱高炉セメントと膨張材添加を採用し、施工面では、鉛直パイプクーリングを併用した。鉛直パイプクーリング配管は、各リフトごとに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、水を流出させている。



写真-1 鉛直パイプクーリング状況

2-2 計測器の配置

計測器の配置を図-2に示す。リフト1のパイプ表面位置温度およびリフトごとのクーリングパイプ2本の間位置、パイプから100mm位置、流入流出水および外気の温度測定を行った。各リフトとも、クーリングを打設翌日から5日間実施した。壁体コンクリートの配合と解析条件およびクーリング流量、水温および打設温度を表-1に示す。

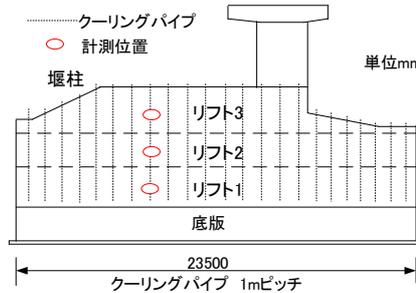


図-1 壁体リフト割とクーリング位置

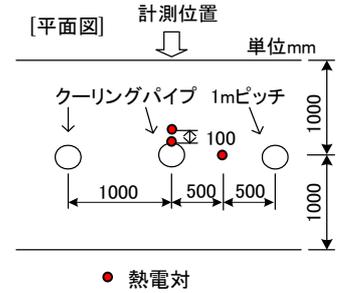


図-2 計測器の配置 (平面図)

3. 逆解析によるクーリングパイプの熱伝達率の検討

3-1 実大室内実験

これまでに実大モデルによる室内実験（パイプ延長10m）の研究結果から、低流速パイプクーリングの熱伝達率の近似式を求めている¹⁾。室内実験における流量と熱伝達率の近似式を図-3に示す。黒線は近似式、赤線は田辺式²⁾を低流速範囲に延長して求まる熱伝達率を示し、逆解析による熱伝達率の値も図にプロットした。

3-2 逆解析による熱伝達率検討

解析プログラムはFEAST（JIPテクノサイエンス）を使用し、逆解析による同定には、拡張カルマンフィルターを用いた推定法を適用した。逆解析フローを図-4に示す。解析モデルを図-5に示す。モデルは、床版コンクリートと堰柱コンクリート壁の、クーリングパイプ間の躯体の対称形状を考慮した1/4のモデルである。逆解析の

表-1 配合と解析条件

項目	解析パラメータ	
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	$\epsilon_{ex, \infty}: 145 \times 10^{-6}$ 最大膨張ひずみの0.75倍 (低熱高炉: 75×10^{-6} , 膨張材: 70×10^{-6})	
断熱温度上昇	$Q_{ex}: 38.5, r: 0.95, t_{0Q}: 0.262$	
外気温	実測値 リフト1: 20°C~リフト3: 打設時10°C~解析終了時7°C	
パイプクーリング	リフト1	流量12ℓ/min, 流入水温20°C, コンクリート打設温度25.5°C
	リフト2	流量20ℓ/min, 流入水温15°C, コンクリート打設温度21.0°C
	リフト3	流量10ℓ/min, 流入水温14°C, コンクリート打設温度19.0°C
逆解析	リフト1のパイプ表面温度データおよびリフト2,3のパイプ表面温度推定値から熱伝達率を解析	

推定物性は、クーリングパイプの熱伝達率である。観測データは、鉛直クーリングパイプ表面位置の温度計測データとした。リフト1では、パイプ表面温度の測定データを用いた。リフト2, リフト3では、パイプ表面位置の温度は、測

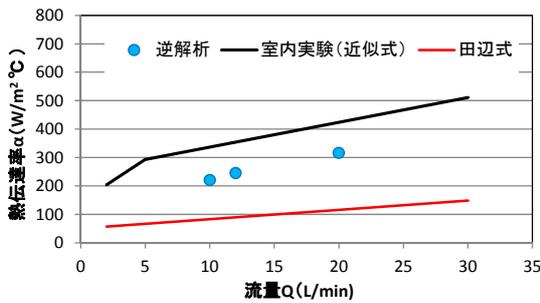


図-3 熱伝達率の実験データと逆解析の値の比較

定していないことから、パイプ表面から 100mm 位置とパイプ 2 本の間位置のデータから、温度の低下量を評価してパイプ表面温度を推定した。熱伝達率の逆解析は、打設リフトごとに行った。下部リフトから順に熱伝達率を決定して、次リフトの逆解析のステップに進む手順とした。本手法では、温度の時刻歴データについて収束判定を行い、温度変化を踏まえた逆解析を実施している。逆解析による値は、リフト 1: 245W/m²C, リフト 2: 316W/m²C, リフト 3: 220W/m²C であり、前掲図-3 に青丸で示した。逆解析値は、実大室内実験で求めた近似式より小さい値となった。

各リフトの計測値および逆解析より得た値を入力した順解析結果(凡例: 逆解析)を図-6~8 に示す。図中のクーリングパイプ 2 本の間値は、コンクリートのピーク温度を示している。逆解析値によるピーク温度の解析結果は、リフト 1, 3 では計測値と一致しているが、リフト 2 では計測値を 2°C 程度上回っている。パイプ表面から 100mm 離れの解析値はリフト 1, 2 では計測値から 3~4°C 程度高くなっており、リフト 3 では 2°C 程度下回っている。熱伝達率はリフト 1, 2 ではもう少し大きい方が、リフト 3 では少し小さい方が計測結果とより一致すると考えられるが、全体として計測結果を良く表している。

4. まとめ

- (1)鉛直パイプクーリングの計測結果から、クーリングパイプ表面温度(1 リフト) および推定値(2, 3 リフト)を観測データとして逆解析を適用し、熱伝達率を同定することができた。
- (2)熱伝達率の逆解析値は、実大室内実験結果に比べてやや小さいが、既往の研究結果を含め一定範囲にあることが分かった。
- (3)この熱伝達率を用いた解析結果は、コンクリートの温度分布の変化を良く再現できており、今後の設計に適用できる。

今回はパイプクーリングの熱伝達率に絞って逆解析を行ったが、そのターゲットを複数設定することも可能であり、今後も検討を進めていきたい。

参考文献

- 1)東 邦和, 森田修二「低流速パイプクーリングの実大実験と効果の解析的検証」, コンクリート工学年次論文集Vol.38, pp.1479-1484, 2016.7
- 2) 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

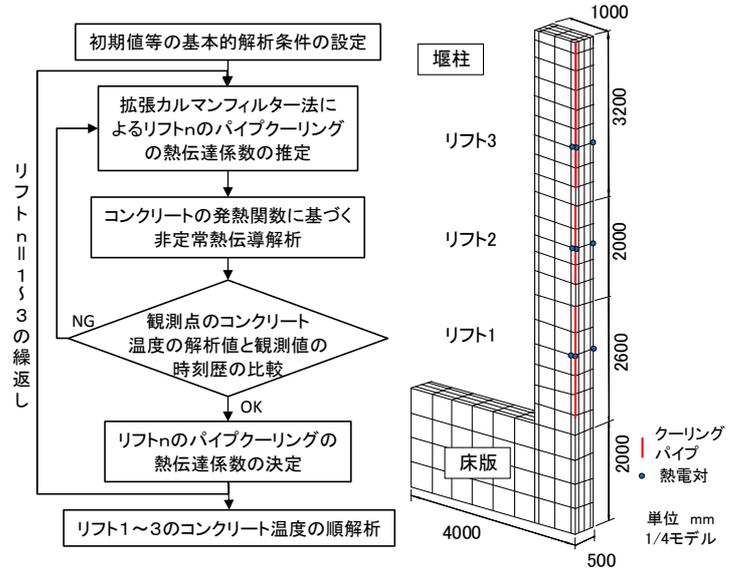


図-4 逆解析フロー

図-5 解析モデル

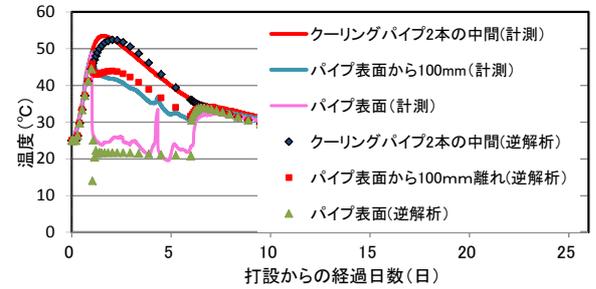


図-6 実測値と解析値の比較 (リフト 1)

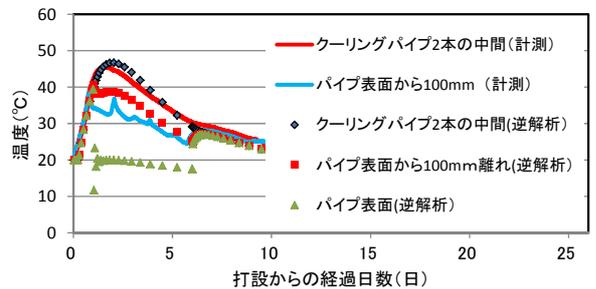


図-7 実測値と解析値の比較 (リフト 2)

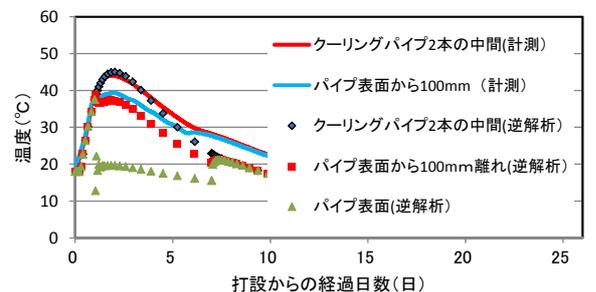


図-8 実測値と解析値の比較 (リフト 3)