

管内形状による乱流化を考慮したパイプクーリングの熱伝達率に関する提案

東洋建設株式会社 正会員 ○森田 浩史

東洋建設株式会社 正会員 竹中 寛

東洋建設株式会社 正会員 末岡 英二

1. 目的 マスコンクリート構造物は、温度ひび割れの発生が懸念されるため、施工面の対策としてパイプクーリングが適用されている。主なパイプクーリングは2種類で、管径が 25mm 程度の薄肉鋼管を水平に設置した水平パイプクーリング(以下、HPC)や管径が 50～75mm 程度のシース管を鉛直に設置した鉛直パイプクーリング(以下、VPC)である。筆者らはこれらのパイプクーリングの管壁面の熱伝達率は、流速と管径を変数とするレイノルズ数を用いた実験式から推定できることを報告している¹⁾。また、VPC に用いられるシース管の形状により層流域であっても水の流れが乱流化し、管壁面の熱伝達率が変動する可能性についても報告している²⁾。本稿では、上記のような現象により管壁面の熱伝達率が変動することを考慮した熱伝達率の算出式の提案とパイプクーリングの冷却効果について検討した結果を述べる。

2. 実験概要 コンクリートは呼び強度 27 のレディーミクストコンクリートを用いた。また、水セメント比は 52.0%，セメントの種類は高炉セメント B 種である。

検討ケースを表 1 に示す。冷却水によるクーリングの開始と温度計測はコンクリート打設終了直後とした。

実大実験の試験体および温度計測位置を図 1 に示す。試験体の寸法は、L:1000mm×B:1000mm×H:1000mm であり、試験体の周囲を厚さ 400mm の断熱材で覆った。また、シース管を下端まで挿入し、上向きに冷却水を流した。なお水温の測点 IN、U、M および L の温度計測の結果、コンクリートから冷却水への温度変化は小さかったことから、シース管壁面に接するコンクリートは一樣に冷却効果が得られているものと仮定した。

温度解析は、実大実験と同じ形状を 1/4 にした解析モデルにより、3 次元 FEM 温度解析プログラムを用いて行った。解析モデルを図 2 に示す。冷却水の水温をシース管壁面の温度履歴として与えた。解析で用いた主要物性値を表 2 に示す。コンクリートの断熱温度上昇量はマスコンクリートのひび割れ制御指針 2016(指針)を用いた。計測開始を材齢の起点となるように設定した。

コンクリートの温度履歴(実測値)を計測し、温度解析キーワード パイプクーリング、マスコンクリート、温度応力解析、熱伝達率、レイノルズ数

連絡先 〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領 1033-1 東洋建設(株)美浦研究所 TEL:029-885-7511

表 1 検討ケース

検討ケース	単位セメント量 (kg/m ³)	流速 (L/min)	シース管 内径 (mm)	冷却 期間 (day)	コンクリート 初期温度 (℃)	平均 水温 (℃)	平均 外気温 (℃)
① VPC-2-50	322	2	φ50	14	30.0	25.8	26.1
② VPC-4-50	322	4	φ50		25.2	24.6	27.8
③ VPC-1-75	316	1	φ75		9.6	11.4	20.0
④ VPC-4-75	316	4	φ75		9.6	10.0	20.0
⑤ VPC-8-75	316	8	φ75	7	21.7	14.0	20.0
⑥ VPC-4-100	322	4	φ100	14	30.0	25.8	26.1

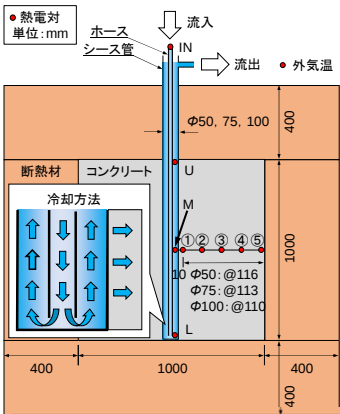


図 1 試験体概要
および温度計測位置

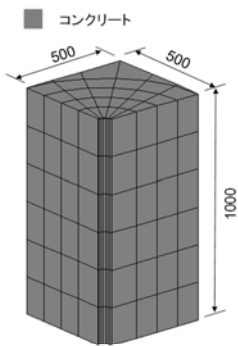


図 2 解析モデル

表 2 解析で用いた主要物性値

項目	物性値	備考
コンクリート	熱伝達率	2.7 W/m ² ℃ 指針
	密度	2311 kg/m ³ 実測値
	比熱	1.15 J/g℃ 指針
	断熱温度上昇量	Q(t)=(1-exp ^{-t}) 指針
断熱材	熱伝達率	0.09 W/m ² ℃ 既往の検討 ¹⁾
VPC	シース管壁面	熱伝達率
	VPC-2-50	92.7 W/m ² ℃ 提案式
	VPC-4-50	146.4 W/m ² ℃ 提案式
	VPC-4-100	92.7 W/m ² ℃ 提案式

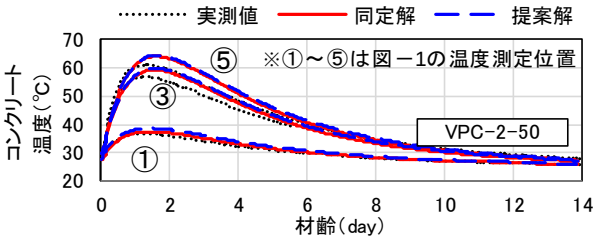


図 3 コンクリートの温度履歴の一例

から求まる解析値と同定して見掛けの熱伝達率(同定解)を求めた。また、既往の検討¹⁾²⁾の提案式(1)より算出した熱伝達率(提案解)と同定解を比較した。また、提案式に用いたレイノルズ数は式(2)より算出できる。

$$h_{VPC} = 1.20 \times Re^{0.66}, h_{HPC} = 0.67 \times Re^{0.66} \quad (1)$$

条件： $Re \leq 2000$ ：層流域， $2700 \leq Re$ ：乱流域

ここに， h_{VPC} ：層流域の熱伝達率($W/m^2\text{C}$)， h_{HPC} ：乱流域の熱伝達率($W/m^2\text{C}$)， Re ：レイノルズ数

$$Re = \rho u D_H / \mu \quad (2)$$

ここに， Re ：レイノルズ数， ρ ：水の密度(kg/m^3)， u ：流速(cm/sec)， D_H ：管径(mm)， μ ：水の粘性係数($Pa\cdot s$)

3. 実験結果 実大実験および温度解析から得られたコンクリートの温度履歴の一例を図3に示す。図3と同様にして得られた同定解および提案解を表3に示す。表より，同定解および提案解は，ややばらつきはあるもののよく一致する傾向となり，提案式により算出した熱伝達率の精度は良いことが認められた。一方，②の提案解と同定解はやや乖離する傾向となった。これは，シース管の表面の形状が凹凸であるため，管壁面での水の流れが乱流化し，層流域でありながら乱流での伝熱の機構が作用したことが要因と推察される²⁾。

4. 冷却効果の指数的収束 配管内を流れる冷却水がある一定の流速を超えると，冷却効果が収束するという報告³⁾がある。本研究においても同定解析を行う上でこの現象による冷却効果の収束を確認した。上記の要因を明らかにすべく，④と同一の解析モデル，解析条件を用いて温度解析を行い，管壁面の熱伝達率を0～500 $W/m^2\text{C}$ と変化させたときの冷却効果を調べた。管壁面の熱伝達率を変化させたときの管壁面からの距離とコンクリート温度の関係を図4に示す。なお，コンクリート温度は計測期間内における最大値を記す。図より，熱伝達率150，500 $W/m^2\text{C}$ における管壁面からの距離0mmでのコンクリート温度は29.5，25.5 $^{\circ}\text{C}$ で，その差は4.0 $^{\circ}\text{C}$ と僅かであった。このことから，熱伝達率が150 $W/m^2\text{C}$ より大きくなるとコンクリートへの冷却効果は収束する傾向となることを確認した。なお，ニュートンの冷却の法則は，液体や気体などの媒質中におかれた固体が媒質によって冷却される現象を表したものであり，この法則より導かれた方程式を解くことで，固体と媒質の温度差は指数的に減衰することが示されている。本検討の結果はこの法則の内容と一致する。

5. 層流域での乱流化の考慮 層流域において水の流れが乱流化した場合，②の同定解は82.0 $W/m^2\text{C}$ ，提案解は146.4 $W/m^2\text{C}$ である。このように，熱伝達率が大きく変化してしまう場合は，温度解析結果に及ぼす影響が懸念される。一方，乱流域における熱伝達率は大きく冷却効果は収束傾向にあり，温度解析結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。なお，熱伝達率100 $W/m^2\text{C}$ と150 $W/m^2\text{C}$ におけるコンクリート温度の差は2.5 $^{\circ}\text{C}$ と小さいことを確認している。以上より，管内形状によ

表3 クーリングの検討ケースと同定解および提案解

検討ケース	流速		シース管	Re	同定解 ($W/m^2\text{C}$)	提案解 ($W/m^2\text{C}$)
	(L/min)	(cm/sec)				
①	VPC-2-50	2	1.70 $\phi 50$	725	110.0	92.7
②	VPC-4-50	4	3.40 $\phi 50$	1450	82.0	146.4
③	VPC-1-75	1	0.38 $\phi 75$	241	65.0	44.8
④	VPC-4-75	4	1.51 $\phi 75$	967	120.0	112.1
⑤	VPC-8-75	8	3.02 $\phi 75$	1933	160.0	177.0
⑥	VPC-4-100	4	0.85 $\phi 100$	725	80.0	92.7

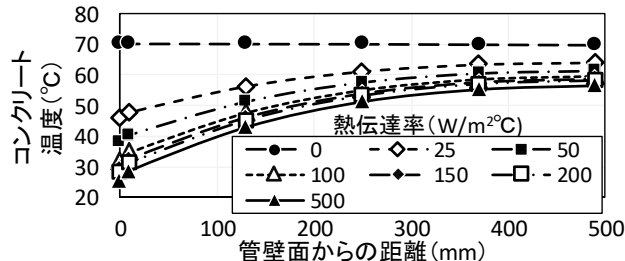


図4 管壁面からの距離とコンクリート温度の関係

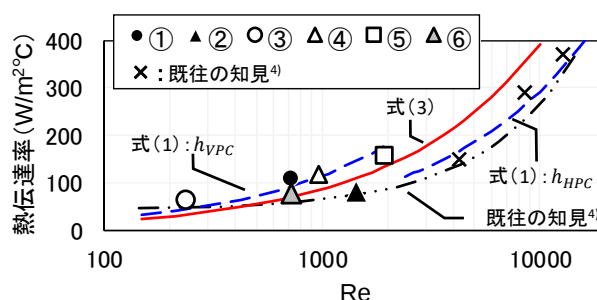


図5 同定解と提案式の関係

る層流域での乱流化および乱流域の冷却効果の収束を考慮して式(1)を修正すると，近似式(3)が提案できる。式(3)より，②の見掛けの熱伝達率は109.8 $W/m^2\text{C}$ となり，同定解により近い値を得られることが認められた。

$$h_{PC} = 0.90 \times Re^{0.66} \quad (3)$$

ここに， h_{PC} ：パイプクーリングの熱伝達率($W/m^2\text{C}$)
以上より，同定解と提案式の関係は図5となる。

6. まとめ 本検討の範囲において得られた知見を以下に示す。①管壁面の熱伝達率によるコンクリートへの冷却効果はニュートンの冷却の法則に従って150 $W/m^2\text{C}$ より大きくなると指数的に収束する。②管内形状に起因する層流域での水の流れの乱流化および乱流域の冷却効果の収束を考慮した熱伝達率の算出式を用いることで，精度良く温度解析ができる。

参考文献 1)森田浩史ら：各種パイプクーリングの管壁面の熱伝達率に関する検討，土木学会第74回年次学術講演会，V-380，2019。2)森田浩史ら：各種パイプクーリングの熱伝達率の高精度化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，2020(掲載予定)。3)例えば伊藤洋ら：パイプクーリング効果の高精度予測に関する研究，土木学会論文報告集，第396号/V-9，29-37，1988。4)田辺忠顕ら：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第34号，1984。