

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

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

表1 使用材料

使用材料		種類・備考
練混ぜ水:W	上水道水	-
セメント:C	高炉セメントB種	密度3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材:S	陸砂	茨城県神栖市産, 表乾密度2.59g/cm <sup>3</sup> 粗粒率2.30
	陸砂: 砕砂 =7:3	栃木県佐野市産, 表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> 粗粒率2.30
粗骨材:G	砕石2005	茨城県土浦市産, 表乾密度2.68g/cm <sup>3</sup> 実積率60%
混和剤:Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸

表2 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	Ad
12	4.5	52.0	44.5	20	164	316	797	1021	3.16

表3 クーリングの検討ケース

シリーズ	検討ケース	流速 (L/min)	冷却期間 (day)	コンクリート初期温度 (°C)	水温* (°C)	備考
VPC	VPC-1-75	1	14	9.6	11.4	* 水温は通水時の平均
	VPC-4-75	4	14	9.6	10.0	
	VPC-8-75	8	7	21.7	14.0	
N	N	-	-	21.7	-	

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多く適用されている。一般的には管径が25mm程度の薄肉鋼管を水平に設置し、冷却水の流速を20~60cm/secとした水平パイプクーリング(以下、HPC)が用いられている。また、管径が50~75mm程度のシース管を鉛直に設置し、冷却水の流速を1~5cm/secとした鉛直パイプクーリング(以下、VPC)の適用も増えている。本稿では、VPCは実大実験と温度解析の同定により、HPCは既往の知見を基に、各々の管壁面の熱伝達率の算出方法について検討した結果について述べる。

2. VPC 実大実験の概要 使用材料とコンクリートの配合を表1, 2に示す。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。

クーリングの検討ケースを表3に示す。冷却水によるクーリングの開始時期は打設終了直後とした。外気温は20°Cで一定である。試験体概要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。温度計測はコンクリート打設終了直後から行った。なお、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伝熱による温度変化は小さく、一様に冷却効果が得られていることを確認している。なお、断熱材の保温効果を熱伝達率として定量化するため、比較用としてクーリングを実施しない試験体Nを1体作製した。

実大実験で得られたコンクリートの温度履歴(以下、実測値)と、温度解析から求まる解析値を同定し、見掛けの熱伝達率を求めた。温度解析は、実大実験と同じ形状で1/4とした解析モデルを対象とし、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。なお、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4に示す。断熱材の熱伝達率は、Nのコンクリート温度の実測値と解析値を同定することで設定した。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(以下、

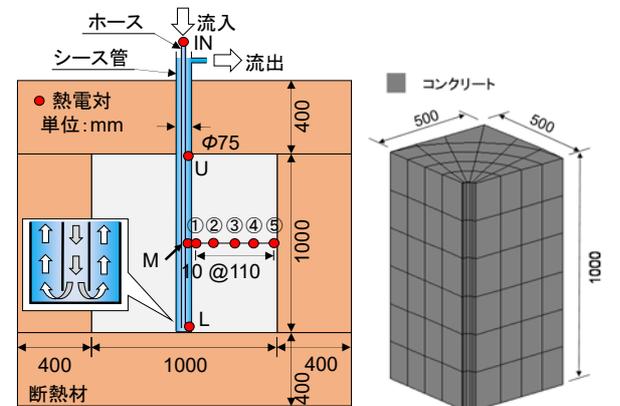


図1 試験体概要

図2 解析モデル

および温度計測位置

表4 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 <sup>2</sup> °C	指針
	密度	2311 kg/m <sup>3</sup>	実測値
	比熱	1.15 J/g°C	指針
	断熱温度上昇量	Q(t)=(1-exp <sup>-γt</sup> )	指針
断熱材	熱伝達率	0.09 W/m <sup>2</sup> °C	Nより同定解析
VPC シース管壁面	熱伝達率		
	流速 1L/min	52.1	田辺式
	流速 4L/min	58.3	田辺式
	流速 8L/min	66.7	田辺式

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

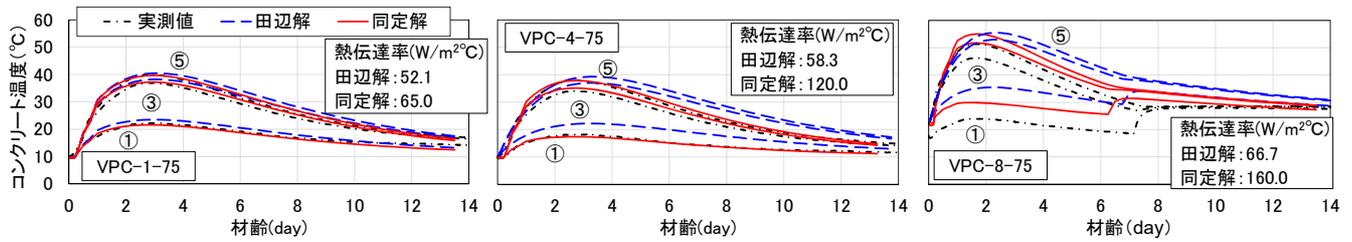


図3 コンクリートの実測値, 田辺解, 同定解の温度履歴

指針)を用いた。なお、計測開始を材齢の起点となるように設定した。クーリングによるシース管壁面の熱伝達率は、既往の知見<sup>1)</sup>の田辺式(1)によって算出した値(以下、田辺解)と、実測値と解析値を同定させて求めた値(以下、同定解)を比較した。

$$h = (4.75 \times u + 43.0) \times 1.16279 \quad (1)$$

ここに、 $h$  : 熱伝達率(W/m<sup>2</sup>°C),  $u$  : 流速 cm/sec

**3. 実験結果** 実大実験より得られたコンクリートの実測値, 田辺解, 同定解の温度履歴を図3に示す。図より、実測値と田辺解を比べると、冷却水の流速が速くなるほどコンクリートの温度履歴が乖離していくことがわかった。また、同定解の管壁面の熱伝達率は田辺解の管壁面の熱伝達率と比べて 1.3~2.4 倍となった。本試験の範囲において、流速 1, 4, 8L/min は、式(2)を用いて管内でのレイノルズ数を算出すると、242, 967, 1933 であったことから、いずれも層流と判定できる。

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

ここに、 $Re$  : レイノルズ数,  $\rho$  : 水の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $u$  : 流速(cm/sec),  $D_H$  : 管径(mm),  $\mu$  : 水の粘性係数(PaS),  $Re \leq 2000$  : 層流域,  $2000 \leq Re \leq (2700 \sim 3000)$  : 遷移域,  $(2700 \sim 3000) \leq Re$  : 乱流域

田辺式は、パイプの管径を 25mm とし、冷却水の流速を 20~60cm/sec 程度の遷移域から乱流域の範囲を条件として構築された実験式である。伝熱工学資料<sup>2)</sup>によれば、層流域と乱流域での伝熱の機構が異なるため、田辺式を用いて層流域での VPC の管壁面の熱伝達率を算出することは適切ではないと考えられる。これらのことが要因となり、田辺解は実測値と乖離したと考えられる。なお、VPC-8-75 は、同定解であっても実測値がやや一致しなかった(特にシース管近傍)。これは、VPC により周辺のまだ固まらないコンクリートが冷却され、コンクリートの初期温度が同定解析に入力した初期値と乖離したことが要因であると考えられる。なお、管壁面の熱伝達率を 160.0W/m<sup>2</sup>°C より大きくしてもコンクリートの最大温度は下がらなかったため、本検討では熱伝達率を便宜的に 160W/m<sup>2</sup>°C と設定した。

層流域と乱流域における熱伝達率の理論式は式(3)で示される<sup>2)</sup>。式(4)を式(3)に代入して、熱伝達率 $h$ とレイ

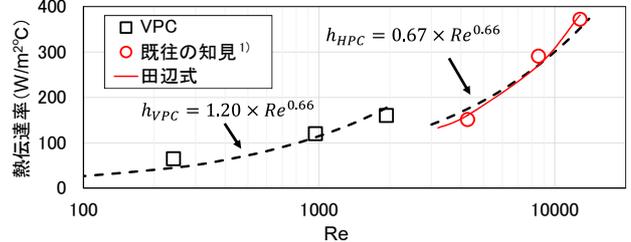


図4 レイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係

ノルズ数 $Re$ の関係として式(5)が得られ、レイノルズ数以外の部分は定数 $k$ として式(6)のようにまとめることができる。これより、層流域と乱流域における管壁面の熱伝達率は、式(5)によりレイノルズ数を変数とする半理論的な実験式から求めることができると考えられる。

$$Nu = C \times Re^m \times Pr^n \quad (3)$$

$$Nu = hL/\lambda \quad (4)$$

$$h = k \times Re^m \quad (5)$$

$$k = \lambda/L \times C \times Pr^n \quad (6)$$

ここに、 $Nu$  : ヌセルト数,  $C$  : 定数,  $Re$  : レイノルズ数,  $Pr$  : プラントル数(水は約 7),  $h$  : 熱伝達率(W/m<sup>2</sup>°C),  $L$  : 代表長さ(m),  $\lambda$  : 熱伝導率(W/m°C),  $k$  : 定数

本実験結果および既往の知見<sup>1)</sup>から、レイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係を図4に示す。また、これらの値を式(5)と同定すると、層流域における VPC および乱流域における HPC の管壁面の熱伝達率の算出式として式(7), (8)が提案できる。

$$h_{VPC} = 1.20 \times Re^{0.66} \quad (7)$$

条件 :  $Re \leq 2000$  : 層流域, パイプの管径 75(mm)

$$h_{HPC} = 0.67 \times Re^{0.66} \quad (8)$$

条件 :  $2700 \leq Re$  : 乱流域, パイプの管径 25(mm)

ここに、 $h_{VPC}$ ,  $h_{HPC}$  : 管壁面の熱伝達率(W/m<sup>2</sup>°C),  $Re$  : レイノルズ数

**6. まとめ** 本検討の範囲において、層流域における鉛直パイプクーリングおよび乱流域における水平パイプクーリングの管壁面の熱伝達率は、レイノルズ数を変数とする半理論的な実験式から求めることができる可能性が見出せた。

**参考文献** 1)田辺忠頭ら: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. 2)日本機械学会:伝熱工学資料改訂第 5 版, 2009