

論文 鉛直型パイプクーリングの管壁面の熱伝達率に関する研究

森田 浩史*1・竹中 寛*2・末岡 英二*3

要旨: 近年、マスコンクリートにおけるひび割れ抑制技術として適用事例が増えている鉛直パイプクーリングやヒートパイプを用いたパイプクーリングを対象として実大実験を行い、冷却水の流速や風速が管壁面の熱伝達率に及ぼす影響について検討した。この結果、鉛直パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率は管径や流速を変数とするレイノルズ数により、ヒートパイプを用いたパイプクーリングにおける対流熱伝達率は、風速によりそれぞれ推定できることが認められた。

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

1. はじめに

マスコンクリートの構造物は、温度ひび割れの発生が懸念されるため、温度応力解析による事前の照査を行って対策を講じることが望ましい。また、施工面の温度ひび割れ抑制対策技術として、セメントの水和反応に起因するコンクリート内部の温度上昇を抑制する工法であるパイプクーリングが多く適用されている。

大規模なコンクリート構造物は、パイプの管径が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)が適用されている。これは、既往の知見¹⁾²⁾を基に得られた管壁面の熱伝達率を用いて温度応力解析を行うことが一般的である。また、橋脚の柱などのリフト高が高く狭長な構造物には、パイプの管径が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)の適用が増えている。しかしながら、数例の研究事例があるのみで、管壁面の熱伝達率の算出方法は明確化されておらず、実測値と温度応力解析の結果が乖離することも指摘されている³⁾⁴⁾。

近年、水を冷却媒体とするHPCやVPCの他に、ヒートパイプを冷却媒体としたパイプクーリング(以下、HP)が実用化され、温度応力解析も簡易的に行えるようになりつつある。これまでに風速5m/secにおけるHPの対流熱伝達率は報告されている⁵⁾が、距離減衰による風速の低下や風向き等の影響により、風速5m/secを保持することは容易ではない。ヒートパイプ近傍に到達する風速が変わればHPの放熱効果に影響を及ぼすため、対流熱伝達率も変わると考えられるが、これに関する研究事例は報告されていない。

本稿は、実大実験で得られたデータを基に同定解析を行い、VPCの管壁面の熱伝達率およびHPの対流熱伝達率の算出方法について検討した結果を述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリートの配合

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。

2.2 試験体作製および温度計測項位置

VPCおよびHPの試験体概要および温度計測位置を図-1, 2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、パイプの管径50または75mmのシース管を予め試験体中央に設置した。VPCシリーズは、ビニールホースをシース管内の下端まで挿入し、上向きに冷却水を流した。HPシリーズは、シース管内の中央の位置に下端までヒートパイプを挿入して設置した。温度計測には熱電対を用い、計測はコンクリート打設終了直後から行った。なお、温度計測は、VPCシリーズにおいて冷却水(IN)、パイプ内水温(U, M, L)、コンクリート温度(①~⑤)、HPシリーズにおいてヒートパイプの表面温度(U, M, L)、コンクリート温度(①~⑤)で実施した。

表-1 使用材料

使用材料		種類・備考
セメント:C	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³
細骨材:S	陸砂	茨城県神栖市産, 表乾密度2.59g/cm ³ 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 ³ 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 ³ 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 ³)				
					W	C	S	G	Ad
12	4.5	52.0	44.5	20	164	316	797	1021	3.16

*1 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 (正会員)

*2 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 東洋建設(株) 美浦研究所 所長 博(工) (正会員)

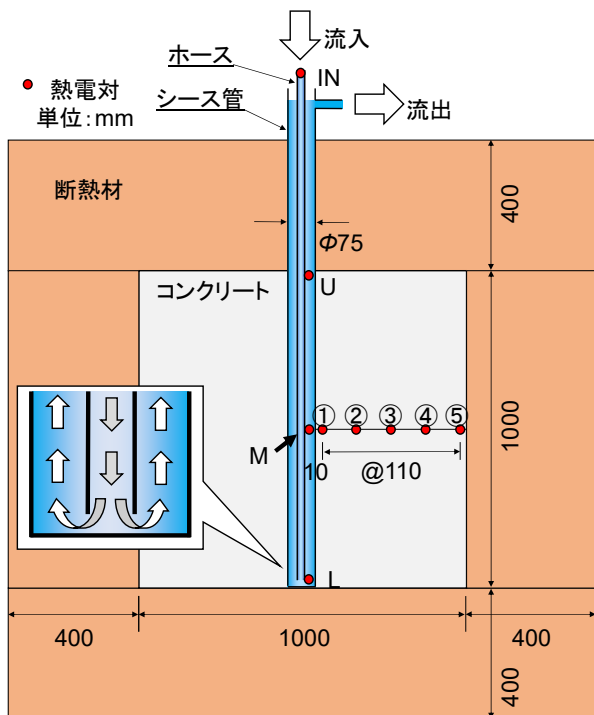


図-1 VPCの試験体概要および温度計測位置

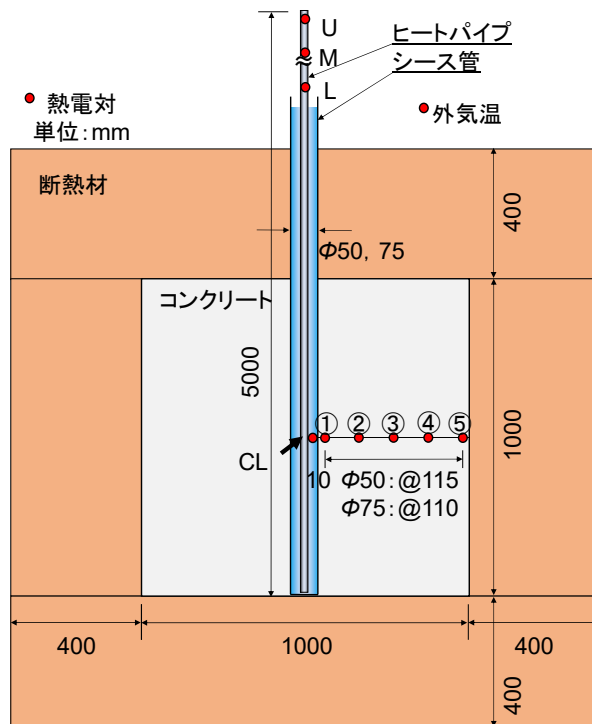


図-2 HPの試験体概要および温度計測位置

表-3 クーリングの検討ケース

シリーズ	検討ケース	冷却方法	流速 (L/min)	風速 (m/sec)	シース管内径 (mm)	冷却期間 (day)	コンクリート初期温度 (°C)	水温 ^{※1} (°C)	外気温 ^{※2} (°C)	環境	備考
VPC	VPC-1-75	水	1	-	φ75	14	9.6	11.4	20	室内	※1 水温は通水時の平均 ※2 空調により外気温一定
	VPC-4-75		4			14	9.6	10.0	20	室内	
	VPC-8-75		8			7	21.7	14.0	20	室内	
HP	HP-0-50	ヒートパイプ + 風	-	0	φ50	14	19.3	18.7	20.3~14.7	屋内	※1 水温は初期値 ※2 日陰となる空間
	HP-1-50			1		14	28.3	27.4	27.6~19.2	屋内	
	HP-3-50			3		14	28.3	28.7	27.6~19.2	屋内	
	HP-3-75			3		φ75	14	19.3	18.7	20.3~14.7	
N	N	-	-	-	-	-	21.7	-	20	室内	※2 空調により外気温一定

クーリングの検討ケースを表-3に示す。クーリングの開始時期は打設終了直後とした。HPシリーズの冷却媒体である風は、一様に気中部のヒートパイプに当たるようにした。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。

2.3 温度解析による同定

実大実験で得られたVPCおよびHPの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-3に示す。なお、解析プログラムでVPCおよびHPを接点としてモデル化し、温度解析を行うことができるが、要素の大きさにより温度解析の結果にばらつきが生じることが報告されている⁶⁾。そのため、本検討ではシース管壁面を熱伝達境界としてモデル化し、冷却水の水温を管壁面の温度履歴として与えた。一方、HPの解析モデル

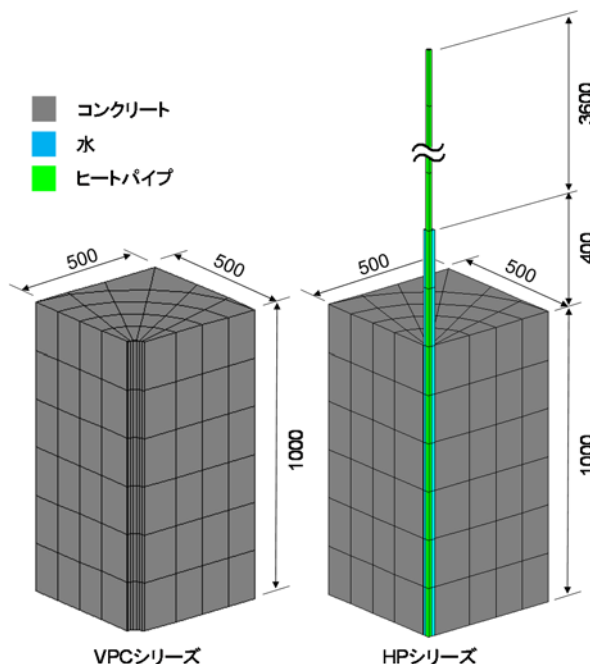


図-3 解析モデル

は、既往の知見⁵⁾を参照して水とヒートパイプも要素としてモデル化し、気中部のヒートパイプに接する空気との対流熱伝達率を求め、これを用いてコンクリートの温度と解析値を同定した。

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。Nの実測値と解析値の比較を図-4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(以下、指針)を用いることでよく一致したため、本検討では上記の指針に準じて断熱温度上昇量を設定することとした。なお、計測開始を材齢の起点となるように設定した。VPCの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¹⁾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/m²C)、 u ：流速(cm/sec)

HPの対流熱伝達率も、実測値と解析値を同定させて求めた。

3. 結果および考察

3.1 VPCの放熱効果

VPCのINとU, M, Lでの水温の差を図-5に示す。VPC-1-75はINでの水温との最大の温度差がU：0.5°C, M：0.6°CおよびL：1.0°Cとなり、Lの位置では他と比べて温度差が大きくなる傾向を示した。これは、シース管内における通水の助走区間の位置であるLと流れが発達した領域におけるU, Mとの流速の違いが影響したものと推察される。一方、VPC-4-75, VPC-8-75は、INでの水温との最大の温度差はU, M, Lの位置に依らず0.1～0.2°Cであった。これは、助走区間Lと流れが発達した領域U, Mにおける流速の差がVPC-1と比べて小さかったためと考えられる。なお、コンクリート打設終了直後から数時間、シース管内の温度差が負側となっているが、これは冷却水の温度がコンクリートの温度よりも大きく、コンクリート側へ伝熱したことによるものと考えられる。以上より、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、本研究で設定した水の流速でも、十分に冷却効果が得られたものと考えられる。

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-6に示す。図より、実測値と田辺解を比べると、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。本試験の範囲において、流速は1, 4および8L/min, すなわち, 0.38, 1.51および3.02cm/secであり、式(2)を用いて管内でのレイノルズ数を算出すると、242, 967および1933であるため、いずれも層流と判定することができる。

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 ² C	指針	
	密度	2311	kg/m ³	実測値	
	比熱	1.15	J/g°C	指針	
	断熱温度上昇量	Q(0)=(1-exp ^{-λt})		指針	
断熱材	熱伝達率	0.09	W/m ² 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	W/m ² C	田辺式
		流速 4L/min	58.3	W/m ² C	田辺式
		流速 8L/min	66.7	W/m ² C	田辺式
HP	ヒートパイプ	見掛けの熱伝達率	40000	W/m ² C	銅の約100倍
		密度	8940	kg/m ³	銅と同じ
		比熱	0.38	J/g°C	銅と同じ
		対流熱伝達率	70	W/m ² C	既往の知見 風速5m/sec程度
	シース管内の水	見掛けの熱伝達率	1.8	W/m ² C	
		密度	1000	kg/m ³	
		比熱	4.2	J/g°C	

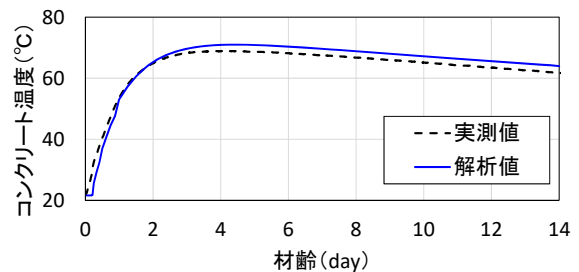


図-4 Nの実測値と解析値の比較

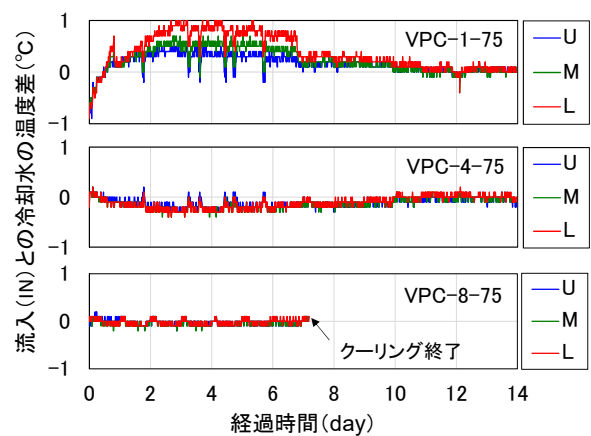


図-5 INとU, M, Lでの水温の差

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

ここに、 Re ：レイノルズ数、 ρ ：水の密度(kg/m³)、 u ：流速(cm/sec)、 D_H ：管径(mm)、 μ ：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⁷⁾によれば、層流域と乱流域での伝熱の機構が異なるため、層流域でのVPCの管壁面の熱伝達率は、田辺式を用いて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。これは、コンクリートが水和反応により温度上昇する前に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/m²Cより大きい熱伝達率を入力してもコンクリートのピーク温度は下がらなかったため、コンクリートに対してVPCの冷却効果そのものが限界に達したものと判断できる。

田辺解および同定解の流速と管壁面の熱伝達率の関係を図-7にまとめた。図より、流速が大きくなるにつれて、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倍となることがわかった。

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⁷⁾。ヌセルト数は対流による熱伝達と流体の熱伝導の比率を示す無次元数で、レイノルズ数とプラントル数の関数によって求まる。プラントル数は、熱伝導に関する無次元数で、流体の動粘度と温度拡散率の比である。式(4)を式(3)に代入して、熱伝達率 h とレイノルズ数 Re の関係として式(5)が得られる。なお、レイノルズ数以外の部分は既知または定数であるため、新たに定数 k として式(6)のようにまとめることができる。これより、層流域における管壁面の熱伝達率は、式(5)と同定解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、 h ：熱伝達率(W/m²C)、 L ：代表長さ(m)、 λ ：熱伝導率(W/mC)、 k ：定数

今回の実験結果から、レイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係を図-8に示す。また、これらの値から式(5)を同定すると、層流域におけるVPCの管壁面の熱伝達率の算出式として式(7)が提案できる。

$$h_{VPC} = 1.2 \times Re^{0.66} \quad (7)$$

条件： $Re \leq 2000$ ：層流、パイプの管径75(mm)

ここに、 h_{VPC} ：管壁面の熱伝達率(W/m²C)、 Re ：レイノルズ数

3.2 HPの放熱効果

HPの各計測位置(気中部のヒートパイプの平均表面温度、水温、外気温)の温度履歴を図-9に示す。図より、HP-1-50、HP-3-50、HP-3-75のUMLの温度履歴は、外気温の温度履歴と近い傾向を示したのに対し、HP-0-50のUMLはCLの温度履歴に近い傾向を示した。これは、HP-

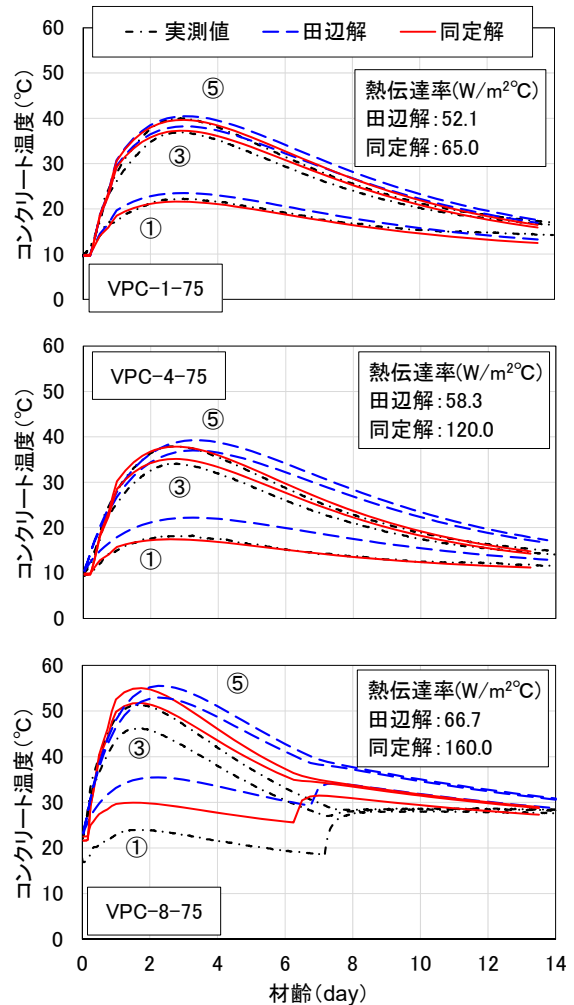


図-6 実測値、田辺解、同定解の温度履歴(VPC)

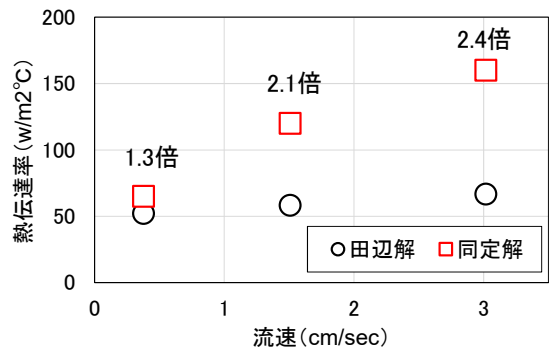


図-7 流速と管壁面の熱伝達率の関係

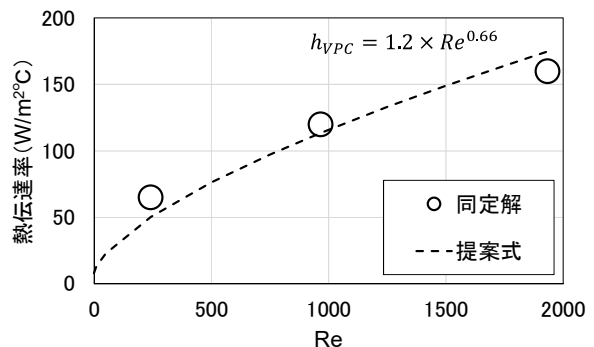


図-8 レイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係

HP-1-50, HP-3-50, HP-3-75 の UML は、風の影響によりヒートパイプから気中へ熱が放熱されたため外気温の温度履歴と近い傾向を示したと考えられる。ただし、風速の違いによる影響は小さかった。一方、HP-0-50 はヒートパイプから気中へ放熱がされにくかったため UML の温度履歴は CL の温度履歴に近い傾向を示したものと考えられる。

実大実験より得られたコンクリートの実測値と同定解の温度履歴を図-10 に示す。これらの図より、風速が大きくなるにつれて、またはパイプの管径が大きくなるにつれて、対流熱伝達率が大きくなることがわかった。HP-0-50 の対流熱伝達率が小さかった要因は、風速が 0m/sec であることからヒートパイプからの気中への放熱が自然対流のみであったためと考えられる。また、気中のヒートパイプ周辺で熱せられた空気も対流することができず境界層となり放熱の妨げになったことも要因であると推察される。一方、HP-1-50, HP-3-50 は、風速が大きくなるとともに、対流熱伝達率は大きくなる傾向を示した。これは、強制対流によってヒートパイプの放熱が促進されたためと考えられる。また、HP-0-50 と比べて強制対流の影響により気中部のヒートパイプ周辺の境界層が薄くなり、放熱しやすい状態になったことも寄与したと推察される。HP-3-75 は、同様の風速とした HP-3-50 と比べて熱伝達率は 2.75 倍となり、より放熱効果が高いことがわかった。これは、パイプの管径が 50 から 75mm となり、すなわち、およそ 2.25 倍に表面積が増えたことでコンクリートから水へ伝わる熱も増加したが、ヒートパイプにより十分に放熱できたためと考えられる。ヒートパイプの対流熱伝達率とパイプの表面積は、本試験の範囲ではほぼ比例することが認められた。ただし、パイプの管径(表面積)が大きくなりすぎると、コンクリートから水へ伝わる熱の方がヒートパイプ 1 本から放熱される熱より大きくなり、十分な効果が得られない可能性がある。これについては、今後検証を実施する予定である。

風速と対流熱伝達率の関係を図-11 に示す。図より、風速が大きくなると、管径 50mm における HP の対流熱伝達率も大きくなり、両者には高い相関性があることが認められた。なお、既往の知見⁸⁾より、風速が 5m/sec 以下においては、対流熱伝達率はほぼ直線的に増加することが実験的に認められている。よって、今回の実験結果から、管径 50mm における HP の対流熱伝達率の算出式を求めると式(8)のようになる。

$$h_{HP} = 11.669 \times v + 9.6186 \quad (8)$$

条件：パイプの管径 50(mm)

ここに、 h_{HP} ：対流熱伝達率(W/m²C)、 v ：風速(m/sec)
 なお、設置可能な送風機の数や周辺環境により風速が変化するため、事前に風速の検討を行うことが望ましい。

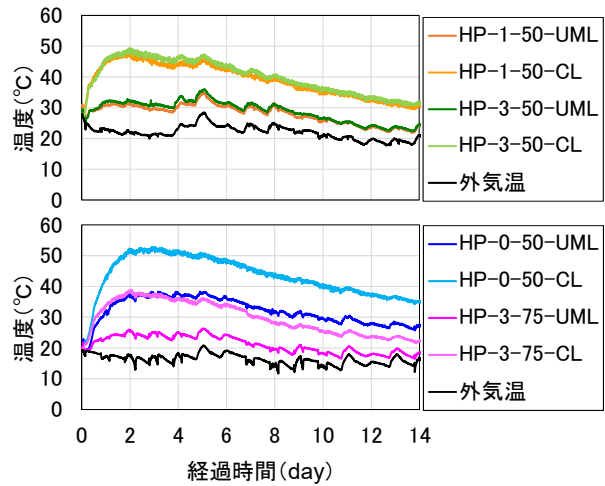


図-9 各計測位置の温度履歴

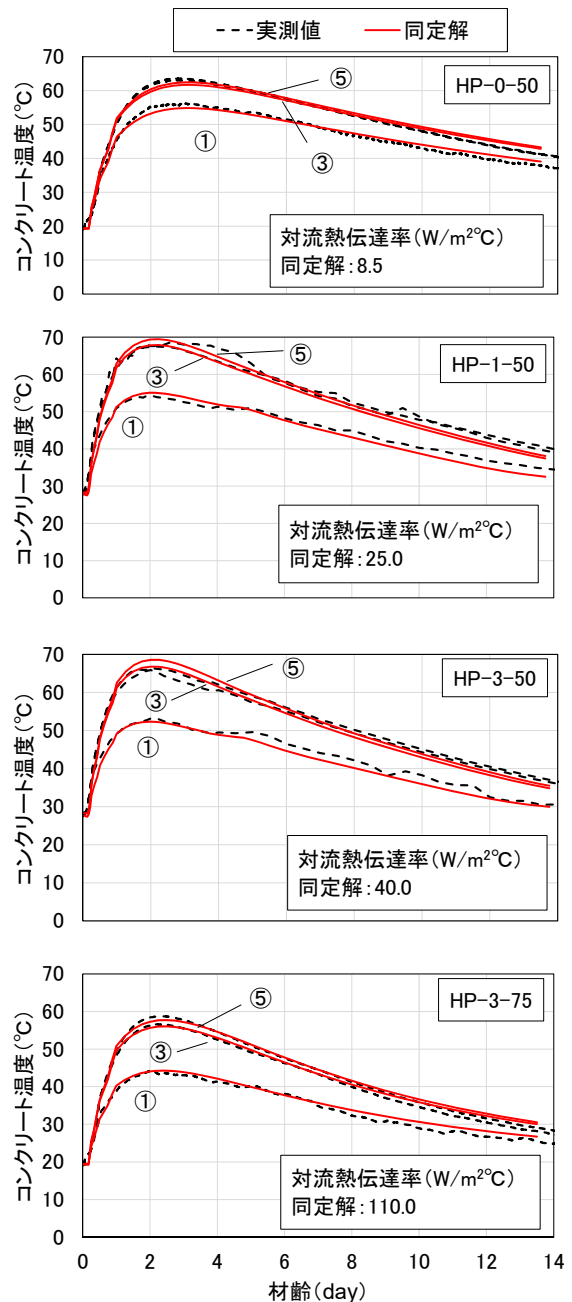


図-10 実測値と同定解の温度履歴(HP)

以上より、本試験で得られた VPC と HP の結果を整理すると、表-5 に示すとおりとなる。

4. まとめ

本検討で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 鉛直パイプクーリングにおける冷却水とパイプ内の水温の違いは、本実験においてはわずかであり、パイプ内の水温は概ね均一であった。
- (2) 層流域における鉛直パイプクーリングの管壁面の熱伝達率は、本試験の範囲において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。
- (3) 気中部のヒートパイプの表面温度は、風の影響を受けると強制対流により外気温に近い温度履歴となるが、風速の違いによる影響は小さい。
- (4) ヒートパイプを用いたパイプクーリングの対流熱伝達率は、本試験の範囲において風速に比例する。なお、設置可能な送風機の数や周辺環境により風速が変化するため、事前に風速の検討を行うことが望ましい。
- (5) ヒートパイプを用いたパイプクーリングは、本試験の範囲においてパイプの管径が大きい方が、放熱効果は増大する。

5. 今後の課題

今後の実施への適用を通じてデータを蓄積し、本試験において求めた鉛直パイプクーリングのレイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係式や、ヒートパイプを用いたクーリングにおける風速と対流熱伝達率の関係式についての検証や精度向上を図っていくことが重要と考えられる。

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) 溝淵利明, 成田総一郎, 都築慶剛, 平戸裕之, 田辺忠顕: 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に関する研究, 土木学会論文集, No.655

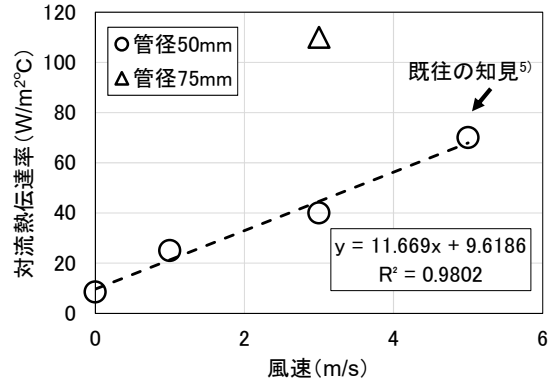


図-11 風速と対流熱伝達率の関係

表-5 VPC と HP の結果

シリーズ	冷却方法	流速 (L/min)	風速 (m/sec)	シース管内径 (mm)	熱伝達率 (W/m ² °C)	備考
VPC	水	1	-	75	65.0	熱伝達率は管壁面を示す
		4			120.0	
		8			160.0	
HP	ヒートパイプ+風	-	0	50	8.5	熱伝達率は対流を示す
			1		25.0	
			3		40.0	
			5 [※]		70.0	
			3	75	110.0	

※風速5m/secの結果は、既往の知見⁵⁾

／V-48, 119-132, 2000.8

- 3) 新居秀一, 村上祐治, 林俊斉, 白岩誠史: 鉛直パイプクーリング工法におけるクーリングパイプ表面の熱伝達率の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 4) 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, No.1, 2016
- 5) 伊吹真一, 船本恵一, 前田智宏, 飯塚隆博: ヒートパイプを利用したパイプクーリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 6) (株) 計算力学研究センター: クーリングパイプのモデル化についての検討, 2018.6
- 7) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第 5 版, 2009
- 8) 田中章浩, 奥島里美, 佐瀬勘紀, 伊藤實: 対流熱伝達率におよぼす風向・風速の影響, 農業施設 26 巻 1 号, 1995. 6, 3~11