

論文 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

森田 浩史*1・竹中 寛*2・末岡 英二*3

要旨: 各種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および管径が熱伝達率に及ぼす影響について検討した。この結果、冷却水を用いた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算定できるが、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 $150\text{W/m}^2\text{C}$ より大きくなると指数的に収束すること、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、風速よりも管径の影響が大きいことが認められた。

キーワード: パイプクーリング, レイノルズ数, 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の施工においてコンクリートの水和熱に起因して生じる温度ひび割れは、温度応力解析による事前の照査を行って抑制対策を行うことが望ましい。材料面の温度ひび割れ抑制対策技術は、セメントの種類の変更や膨張材の添加等がある。施工面の温度ひび割れ抑制対策技術は、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。

主なパイプクーリングは 2 種類で、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 $20\sim 60\text{cm/sec}$ とした水平パイプクーリング(以下, HPC)とパイプの管径が $50\sim 75\text{mm}$ 程度のシース管を鉛直に設置し、冷却水の流速を $1\sim 5\text{cm/sec}$ とした鉛直パイプクーリング(以下, VPC)がある。HPC 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となっている。一方, VPC は、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、密閉容器中の作動液が循環することで、小さな温度差であっても大きな熱量を輸送可能な高性能伝熱素子である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ってきた⁵⁾。

これまでに筆者らは、これらのパイプクーリングの冷却効果を温度応力解析に反映させるため、HPC および VPC 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、HP の対流熱伝達率は風速より推定できることを報告している⁶⁾⁷⁾。

しかしながら、HPC や VPC における管径や流速の違

いによる影響、HP における管径の違いによる影響についてデータを補足することが望ましいと考えられる。

本稿はこれまでの報告した検討結果の更なる精度向上を志向し、HPC や VPC における管径や流速の違いによる影響や、HP における管径の違いによる影響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 VPC および HP の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、 $L:1000\text{mm} \times B:1000\text{mm} \times H:1000\text{mm}$ 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, 75, 100mm のシース管を下端まで挿入し、上向きに冷却水を流した。HP は、

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p (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	44.1	20	167	322	784	1021	3.22

*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)

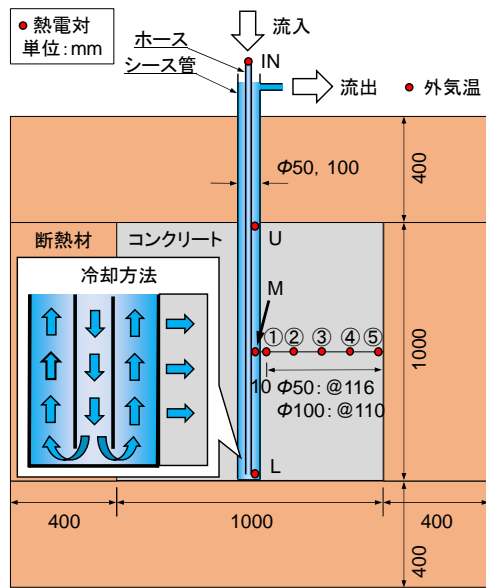


図-1 VPCの試験体概要および温度計測位置

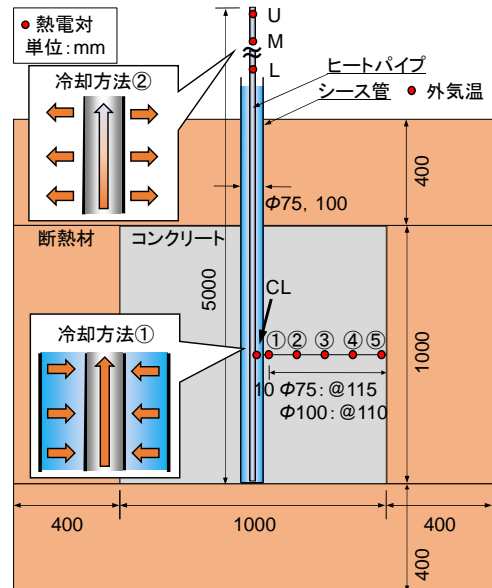


図-2 HPの試験体概要および温度計測位置

表-3 クーリングの検討ケース

シリーズ	冷却方法	検討ケース	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)	平均外気温 (°C)
VPC	水	VPC-2-50	2	-	φ50	14	30.0	25.8	26.1
		VPC-4-50	4				25.2	24.6	27.8
		VPC-4-100	4		φ100		30.0	25.8	26.1
HP	ヒートパイプ+風	HP-0-75	-	0	φ75		27.0	27.2	29.2
		1		26.9			25.0	24.8	
		0		φ100	27.3		27.4	29.2	
		1			25.2	22.9	28.6		
		3			26.4	24.6	24.8		

※1 VPC: 計測期間中のシース管内の平均水温, HP: 計測初期のシース管内の水温

シース管内を水で満たし、そ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。なお、作用させる風は、一様に気中部のヒートパイプに当たるようにした。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、計測開始を材齢の起点となるように設定した。VPCは冷却媒体である水の温度変化を確認することを目的に、冷却水(IN)、パイプ内水温(U, M, L)およびコンクリート温度(①～⑤)において温度の計測を実施した。また、HPは冷却媒体であるヒートパイプの表面の温度変化を確認することを目的に、気中部3点(U, M, L)、パイプ内水温(CL)およびコンクリート温度(①～⑤)において温度計測を実施した。

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。VPCシリーズの測点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伝熱による温度変化は小さかったことから、本検討の範囲において、シース管壁面に接触しているコンクリートは一様に冷却効果が得られていたものと仮定した。また、HPシリーズの測点U, M, Lは既往の検討⁶⁾と同様に、風速の影響がある場合はヒートパイプから熱が放出されるため外気温に近い温度履歴を、風速の影

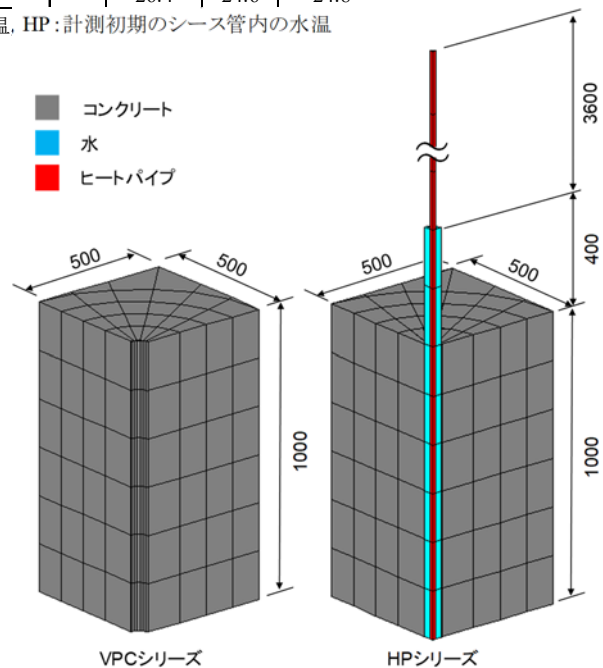


図-3 解析モデルの例

響がない場合はCLの温度に近い温度履歴を示すことを確認している。

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(ASTEA MACS)を用いて行っ
 た。解析モデルの例を図-3 に示す。なお, 本解析プロ
 グラムで VPC および HP を接点としてモデル化し, 簡易
 的にパイプクーリングによる温度解析を行う機能が備わ
 っているが, 解析に使用する要素の大きさによりシース
 管壁面の温度解析結果にばらつきが生じることが報告さ
 れている⁸⁾。そのため, 本検討ではシース管壁面自体を
 熱伝達境界の要素としてモデル化し, 冷却水の U, M お
 よび L の平均水温を管壁面の温度履歴として与えて同定
 解析を行った。一方, HP の解析モデルは, 既往の知見⁵⁾
 を参照してコンクリートの他に水とヒートパイプも熱伝
 達境界の要素としてモデル化し, 空気に接する気中部の
 ヒートパイプ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。なお, コン
 クリートの断熱温度上昇量が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す
 ることを既往の検討⁹⁾にて確認している。

本実験の VPC の管壁面の熱伝達率は, 既往の検討⁶⁾
 の提案式(1), (2)によって算出した。また, 提案式に用い
 たレイノルズ数は式(3)より算出できる。

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

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

$$h_{HPC} = 0.67 \times Re^{0.66} \quad (2)$$

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

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

$$Re = \rho u D_H / \mu \quad (3)$$

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
 (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

本実験の範囲において, 式(3)を用いてレイノルズ数
 を算出すると表-5 のとおりとなる。表より, いずれの
 ケースも層流と判定し, 式(1)より管壁面の熱伝達率の
 算出を試みた。算出した熱伝達率(以下, 提案解)と, 実
 測値と解析値を同定させて求めた熱伝達率(以下, 同定
 解)を比較した。

HP シリーズは, 実測値と解析値を同定させて対流熱
 伝達率を検討した。

3. 結果および考察

3.1 レイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係

実大実験より得られたコンクリートの実測値, 提案解,

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^2C 指針
	密度	2311	kg/m^3 実測値
	比熱	1.15	J/gC 指針
	断熱温度上昇量	$Q(t)=(1-\exp^{-\lambda t})$	指針
断熱材	熱伝達率	0.09	W/m^2C 既往の検討 ⁶⁾
VPC	シース管壁面	VPC-2-50	92.7 W/m^2C 提案式
		VPC-4-50	146.4 W/m^2C 提案式
		VPC-4-100	92.7 W/m^2C 提案式
	ヒートパイプ	見掛けの熱伝達率	40000
密度		8940	kg/m^3 銅と同じ
比熱		0.38	J/gC 銅と同じ
対流熱伝達率		70	W/m^2C 既往の知見 ⁵⁾ 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^2C
	密度	1000	kg/m^3
	比熱	4.2	J/gC

表-5 レイノルズ数

検討 ケース	流速		シース管 (mm)	Re	水の 流れ
	(L/min)	(cm/sec)			
VPC-2-50	2	1.70	$\phi 50$	725	層流
VPC-4-50	4	3.40	$\phi 50$	1450	層流
VPC-4-100	4	0.85	$\phi 100$	725	層流

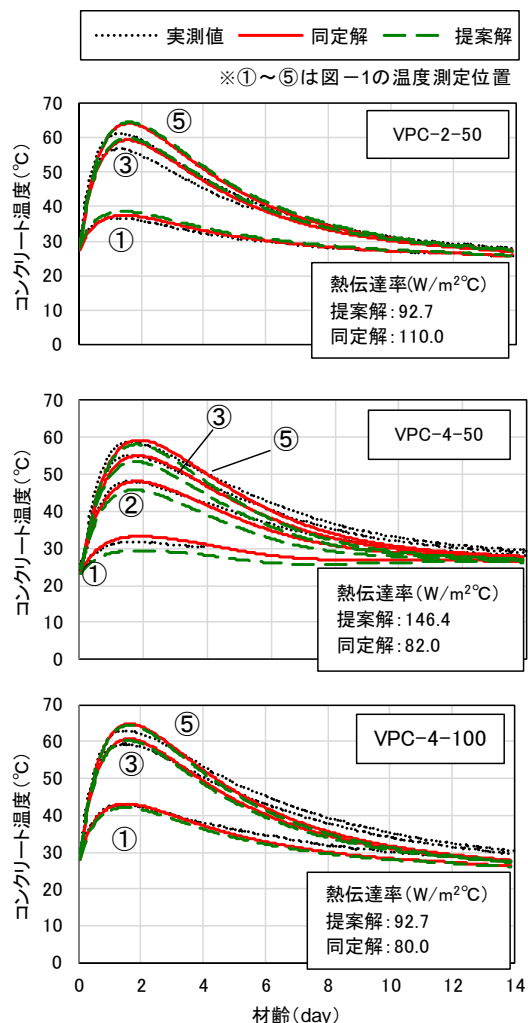


図-4 コンクリートの温度履歴

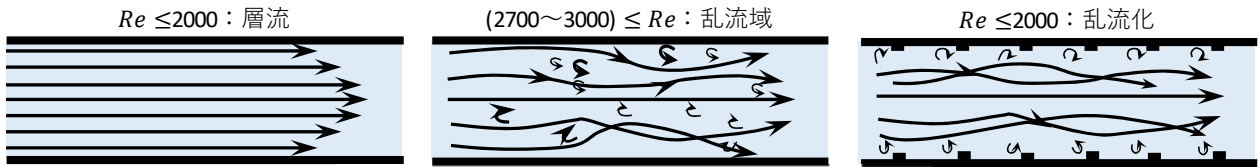


図-5 管内の水の流れのイメージ

同定解の温度履歴を図-4に示す。図より、VPC-2-50およびVPC-4-100の提案解および同定解の熱伝達率は、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、VPC-4-50の提案解と同定解の熱伝達率はやや乖離する傾向となった。これは、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。シース管の表面の形状は凹凸になっており、管壁面での水の流れが乱流化したと考えられる。管内の水の流れのイメージを図-5に示す。この図が示すように、伝熱工学資料¹⁰⁾によれば、単相流強制対流熱伝達の促進方法として管壁面に二次突起を設けることで見掛けのレイノルズ数を大きくする方法が紹介されている。ただし、シース管の内径がφ75やφ100のケースでは乱流化しなかったことから、シース管の内径が小さいほど、二次突起の作用による乱流化のしやすさや冷却効果に変化する可能性があると考えられる。

今回の実験の結果および既往の検討⁶⁾より得られたレイノルズ数 Re と管壁面の熱伝達率の関係を図-6に示す。なお、図に併記した田辺式は既往の知見¹⁾により提案された熱伝達率の算定式である。図より、流速や管径によらず、レイノルズ数を用いることで管壁面の熱伝達率を式(1)、(2)より算出できることが明らかとなった。また、VPCのレイノルズ数は比較的小さいため式(1)を、HPCのレイノルズ数は比較的大きいため式(2)を用いて熱伝達率を求めることが望ましい。

3.2 管壁面の熱伝達率と冷却効果関係

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⁹⁾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、VPC-4-50と同一の解析モデル、解析条件を用いて3次元FEM温度解析プログラムにより温度解析を行い、管壁面の熱伝達率を0~500W/m²Cと変化させたときのコンクリートへの冷却効果を調べた。

管壁面の熱伝達率を0~500W/m²Cまで変化させ、コンクリートを冷却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-7に示す。なお、コンクリート温度は冷却の有無によらず計測期間内における最大値を記す。図より、熱伝達率150、500W/m²C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°C

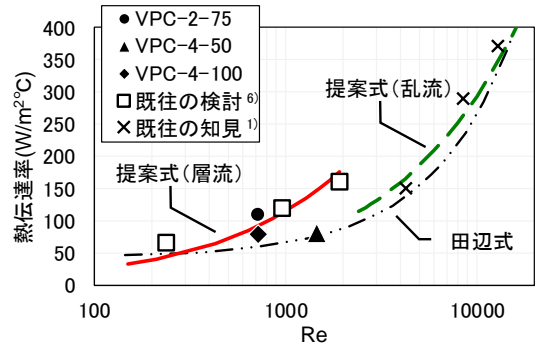


図-6 レイノルズ数と管壁面の熱伝達率の関係

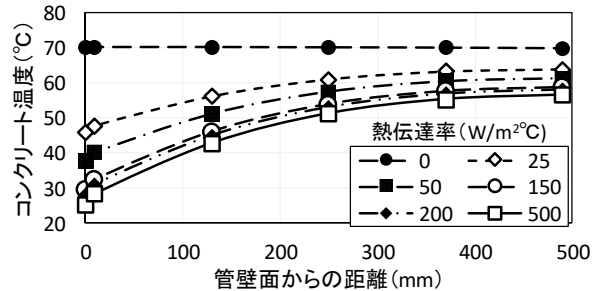


図-7 管壁面からの距離とコンクリート温度の関係

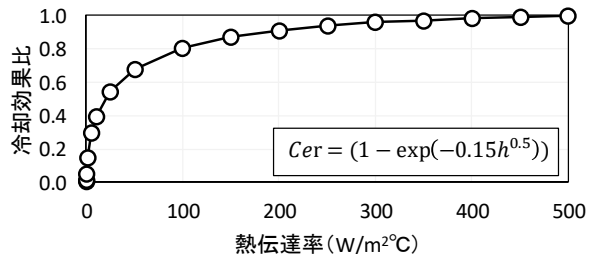


図-8 熱伝達率と冷却効果比の関係

で、その差は4.0°Cと僅かであった。このことから、熱伝達率が150W/m²C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。また、冷却水の平均水温が24.6°Cであることから、両者ともに十分に冷却された状態となっていると考えられる。

管壁面の熱伝達率と冷却効果比の関係を図-8に示す。管壁面からの距離0mmにおける各々の熱伝達率で冷却されたときのコンクリート温度を熱伝達率500W/m²Cで冷却されたときのコンクリート温度で除した値を冷却効果比 Cer と定義した。熱伝達率はニュートンの冷却の法則において液体や気体などの媒質によって固体が冷却される時に用いられる比例定数である。ニュートンの冷却の法則とは、液体や気体などの媒質中におかれた固体

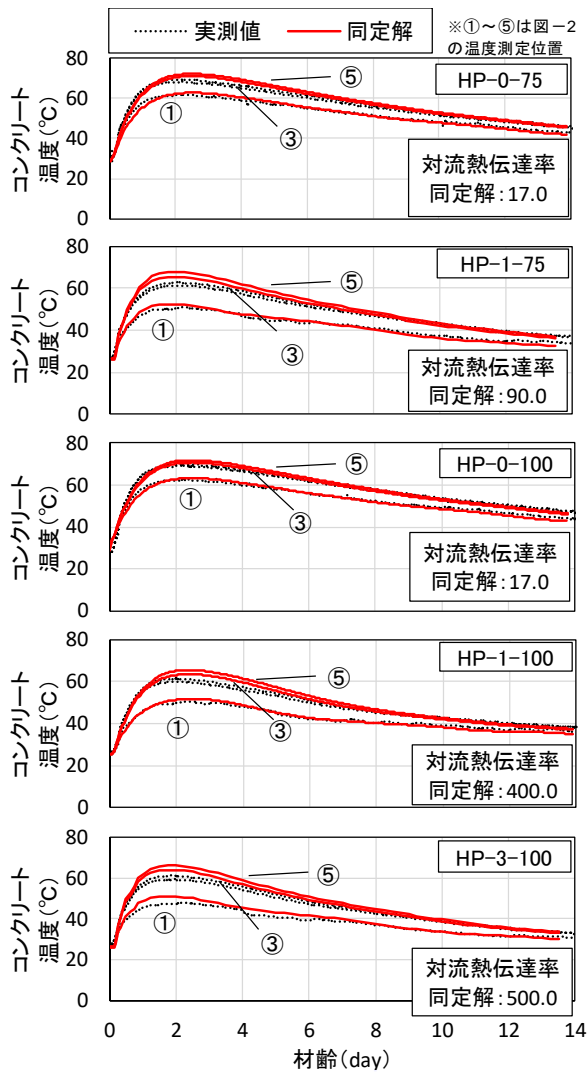


図-9 コンクリートの温度履歴

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¹¹⁾。図より、熱伝達率と冷却効果比の関係を指数関数にて近似すると、熱伝達率を変数とする式(4)となり、熱伝達率が150W/m²°Cより大きくなると冷却効果比は指数的に収束することが認められた。

$$Cer = (1 - \exp(-0.15h^{0.5})) \quad (4)$$

ここに、Cer：冷却効果比、h：熱伝達率(W/m²°C)

3.3 管径の違いがHPの対流熱伝達率に及ぼす影響

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-9に示す。図より、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認められた。一方、HP-0-75およびHP-0-100の対流熱伝達率が小さかった要因は、既往の検討⁶⁾と同様に風速が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自然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

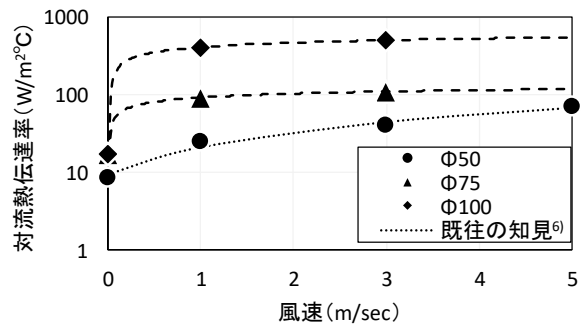


図-10 風速と対流熱伝達率の関係

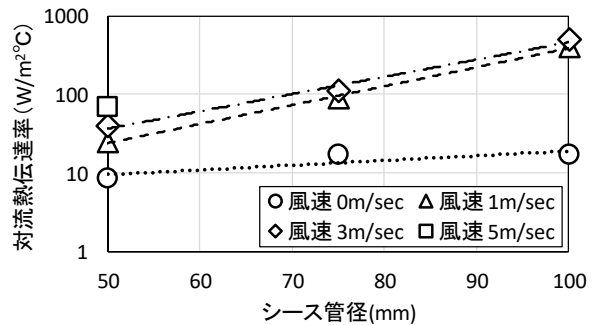


図-11 シース管径と対流熱伝達率の関係

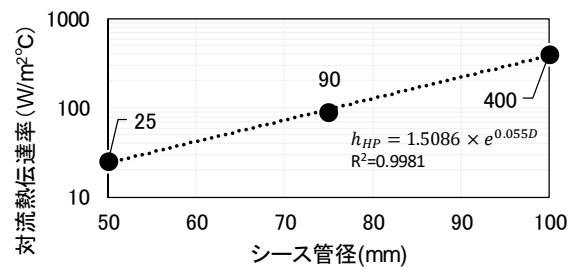


図-12 風速 1m/secにおけるHPの対流熱伝達率

であると推察される。一方、HP-1-75、HP-1-100 および HP-3-100 は、対流熱伝達率が 90.0、400.0 および 500.0W/m²°Cと大きくなる傾向を示した。既往の検討⁶⁾で管径を 50mm から 75mm にすることで風速 3m/sec における対流熱伝達率は 2.25 倍になったと報告したが、管径を 100mm とさらに大きくすることで対流熱伝達率をさらに大きくできることが認められた。実用ヒートパイプ¹²⁾によれば、ヒートパイプ自体の対流熱伝達率は 2,000～10,000W/m²°C程度とされていることから、本検討の範囲ではシース管径を 100mm までとしたが、さらに管径を大きくすることでより大きな放熱効果が得られる可能性がある。

風速と対流熱伝達率の関係およびシース管径と対流熱伝達率の関係を図-10、11に示す。既往の検討⁶⁾によれば、風速により直線的に対流熱伝達率が大きくなるとの報告がなされたが、図より、管径が大きくなると風速と対流熱伝達率の関係は対数的に収束することが認められた。これは、少量の風によってもヒートパイプ周辺で熱せられた空気を取り除かれたためと推察される。また、

シース管径と対流熱伝達率の関係より、対流熱伝達率は風速よりもシース管径の方が影響は大きく、指数的に放熱効果が得られることが認められた。なお、風速 1m/sec 程度であれば送風機等の大きな設備が不要となると考えられるため、建造物の大きさや配筋のピッチを考慮してシース管径を選定し、簡潔にクーリングすることが可能と考える。風速 1m/sec における HP の対流熱伝達率を図-12 に示す。図より、風速 1m/sec 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。

$$h_{HP} = 1.5086 \times e^{0.055D} \quad (8)$$

ここに、 h_{HP} : 対流熱伝達率(W/m²C), D : シース管径(mm)

以上より、本試験で得られた VPC と HP の同定解を整理すると、表-6 に示すとおりとなる。表より、VPC の熱伝達率は流速とシース管内径の両者が影響するが、HP の熱伝達率は無風でない限りにおいてはシース管内径のみが影響することが認められた。

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) 層流域および乱流域におけるパイプクーリングの管壁面の熱伝達率は、流速と管径によらず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。
- (2) シース管の内径が φ50 のケースでは、シース管表面の凹凸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減少する可能性がある。
- (3) 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 150W/m²C より大きくなると指数的に収束する。
- (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、風速よりもシース管の内径の影響を大きく受ける。

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

表-6 VPC と HP の結果

シース	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	2	-	50	110.0	※管壁面の熱伝達率を示す	
		4			82.0		
		2		100	80.0		
HP	ヒートパイプ + 風	-	-	75	0		17.0
					1		90.0
				100	0		17.0
					1	400.0	
					3	500.0	

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 / 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) 森田浩史, 竹中寛, 末岡英二: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019
- 7) 森田浩史, 竹中寛, 末岡英二: 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
- 8) (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
- 9) 例えば伊藤洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 森清就: 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
- 10) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第 5 版, 2009
- 11) 例えば一色尚次, 北山直方: 伝熱工学 改訂・新装版, 2014
- 12) 日本ヒートパイプ協会: 実用ヒートパイプ第 2 版, 2001