

論文 エアパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果に関する研究

笹倉 伸晃*1・伊藤 始*1・三島 徹也*2・中島 良光*3

要旨: 大断面橋脚では、ひび割れ抑制対策として、セメント水和熱の放熱促進のために、断面内にクーリングパイプを設置し、送風機により強制換気を行うエアパイプクーリングの使用が盛んになっている。熱伝達係数は、コンクリートから外気への熱の伝わりを対象とした値を用いており、実際のパイプ内の送風状況を考慮した熱伝達係数を求める必要がある。

本研究では、実構造物での計測および模型実験を通して熱伝達係数を測定し、設計用値の提案と実測物性値を用いた解析でのひび割れ抑制効果の検討を実施した。

キーワード: 橋脚, マスコンクリート, ひび割れ抑制対策, エアパイプクーリング

1. はじめに

近年、進められている第2東名・名神高速道路の建設において、橋脚断面が大断面となり、セメントの水和発熱によるひび割れが問題となるケースが増えている。

橋脚におけるひび割れは、コンクリート表面と中心部分の温度差により発生することが多く、温度勾配を緩やかにすることを目的として、橋脚断面内に放熱用のパイプを埋め込んで、送風機により強制換気をするエアパイプクーリングの使用が盛んになっている。

一般に、ひび割れ抑制対策の採否を決定する場合には、事前に温度応力解析を実施している。エアパイプクーリングを対象に解析をする場合、対流境界での熱伝達係数は、コンクリートから

外気への熱の伝わりを対象とした土木学会・コンクリート標準示方書施工編¹⁾の値を用いているのが現状であり、パイプ内の送風状況やひび割れ発生に対して実際とは異なった評価をする可能性があるため、それらを考慮した熱伝達係数の設計用値の決定が必要である。

2. 実橋脚での計測

2.1 計測対象構造物

(1) 構造物の寸法

計測対象構造物は図-1および図-2に示すように一柱式の橋脚であり、φ600mmのクーリング用のパイプを6本埋込んだ断面である。

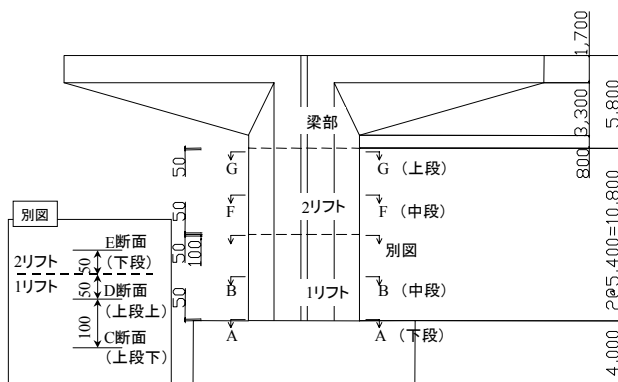


図-1 計測対象構造物

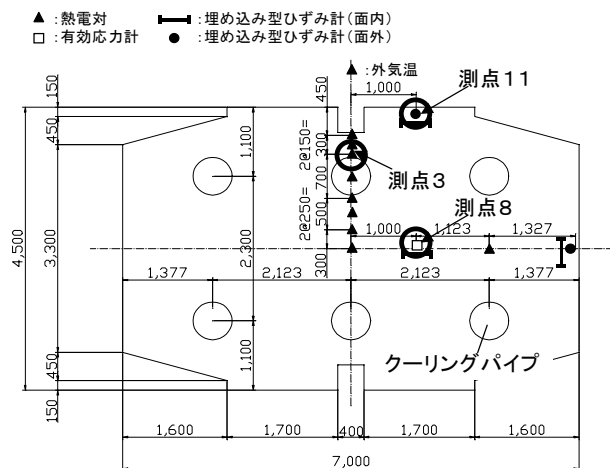


図-2 断面内の計測位置図 (B断面)

*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 工博 (正会員)

*3 前田建設工業 (株) 関西支店 栗東橋作業所 工修 (正会員)

(2) 工程

表一 1に工程を示す。送風は、打設1日後から1週間実施した。計測は、1リフトの打設後2ヶ月間とした。

表一 1 打設, クーリング, および計測工程

	平成13年				
	3月	4月	5月	6月	7月
コンクリート打設	■	■	■		■
送風機運転	■	■	■		
計測		■	■	■	■

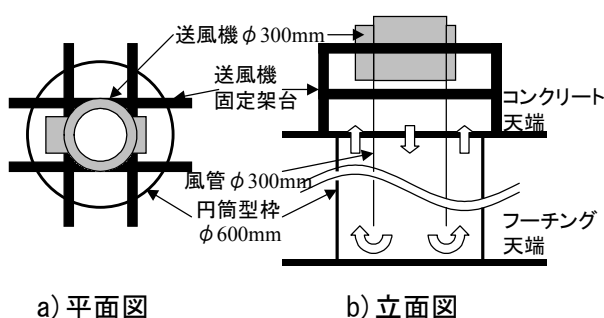
(3) エアパイプクーリング

エアパイプクーリングは、橋脚断面内に配置したパイプ内に、送風機による強制的な送風を行い、断面内の最高温度を低減するとともに、表面と内部との温度勾配を緩やかにすることを目的に実施するものである。

送風機は、図一 3に示す方法で設置し、クーリングパイプ1本につき1基配置した。送風機の風量は毎分55m³であり、管内での風速は内管と外管の間の排気側で約2.9m/sである。

(4) 配合

コンクリートの配合表を表一 2に示す。



図一 3 送風機設置方法

表一 2 配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	47.5	40	162	341	694	1076
						AE 減水剤 3.41

* 高炉セメント B 種 (密度: 3.04g/cm³)

2.2 計測方法

(1) 断熱温度上昇試験体の計測

断熱温度上昇特性および線膨張係数を求める目的で、断熱温度上昇試験体を製作し、温度およびひずみを測定した。試験体は、1辺1200mmの立方体で、型枠内側に厚さ100mmの断熱材を貼り付けたものであり、橋脚本体の打設時にコンクリートを充填した。

計測について、熱電対7点、無応力容器に入れたひずみ計1点により行った。

(2) 橋脚本体の計測

橋脚本体の計測項目は、絶縁被膜熱電対を用いたコンクリート温度、パイプ内温度、および外気温、埋込型ひずみ計を用いたコンクリートひずみ、有効応力計を用いた応力とした。

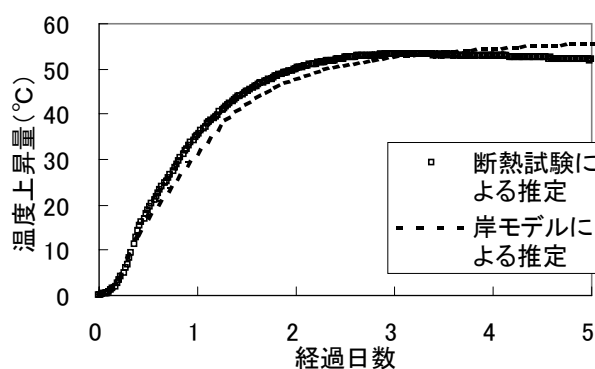
計測は、図一 1に示した高さ方向A~Gの7断面内に配置した熱電対31点、ひずみ計10点、応力計1点で行った。図一 2にはB断面における計測位置図を示した。

2.3 計測データからの解析物性値の推定

(1) 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性は、断熱温度上昇試験の計測結果より求める方法と、セメント組成より求める方法の2つの方法で推定した。計測結果より求める方法は非定常熱伝導方程式²⁾を差分化して求めた。セメント組成より求める方法は、岸モデル³⁾により求めた。

図一 4では、ほぼ一致した断熱温度上昇曲線を描いており、これらを推定値として用いた。



図一 4 断熱温度上昇特性の推定結果

(2) 線膨張係数

線膨張係数は、断熱温度上昇試験の温度計測結果と無応力ひずみ計の計測結果より求めた。温度上昇量と膨張量（ひずみ増分） $\Delta \varepsilon$ の関係を図-5に示す。線膨張係数 α ($\mu/^\circ\text{C}$) は、式(1)で表せることより、図中の勾配を見ると温度上昇過程では、 $18 \mu/^\circ\text{C}$ から $8 \mu/^\circ\text{C}$ に変化しており、降下過程では、 $12 \mu/^\circ\text{C}$ 程度となっている。これらより、線膨張係数は、温度履歴により差があるものの、平均的に見れば一般的な $10 \mu/^\circ\text{C}$ に近い値となる。

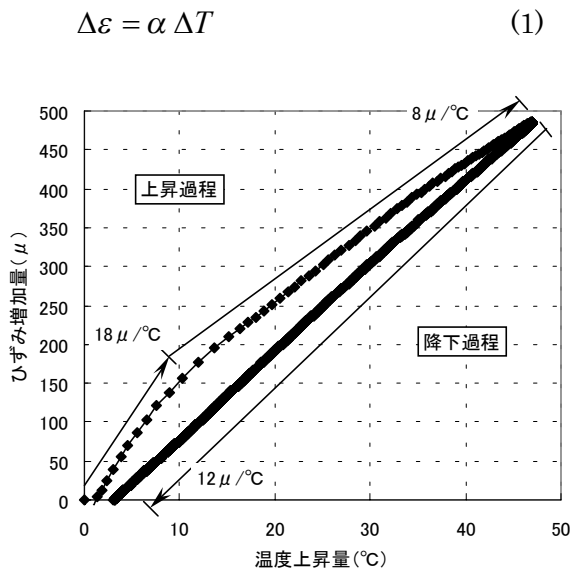


図-5 ひずみ増加量と温度上昇量の関係

(3) 熱伝達係数

エアクーリングの冷却効果を検討する際には、パイプ内の空気がある流速で流れているため、厳密には、熱の移流効果を考える必要があるが、解析への導入が煩雑となる。ここでは見掛けの熱の伝わりとして静止流体に対する熱伝達係数で評価することとした。

熱伝達係数の推定は、図-6に示すようにコンクリート側の3測点の温度 $T_1 \sim T_3$ に放物線を仮定して、コンクリート境界面の温度 T_4 を推定する。推定した T_4 とパイプ内空気の温度 T_{air} の関係は、式(2)に示すような熱流束 q (W/m^2) で与えられるため、境界面（測点4）と測点3の間に微小立方体を仮定して、熱の収支により、

熱伝達係数 η ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) を求めた。

$$q = \eta(T_4 - T_{\text{air}}) \quad (2)$$

コンクリートからパイプ内への熱伝達係数の推定結果を図-7に示す。図-7に示した推定結果に関して、パイプ内の温度 T_{air} を実測のパイプ内温度として求めた結果によれば、送風期間中は $60 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ 、送風しない時は $20 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ 程度であった。

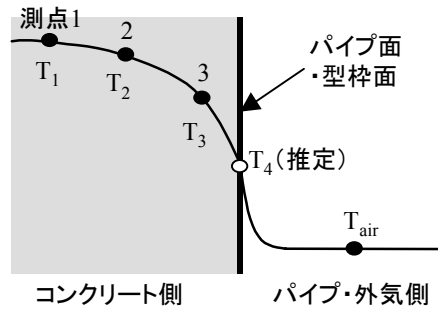


図-6 コンクリート界面の温度分布モデル

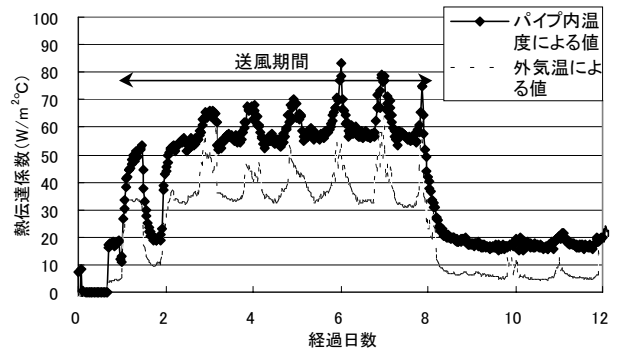


図-7 熱伝達係数の推定結果

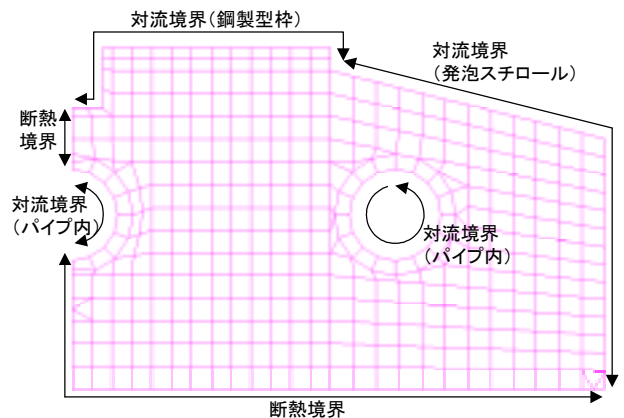


図-8 温度解析モデル

2.4 計測結果と解析結果の比較

(1) 解析の方法

解析は、温度応力解析プログラムを用いて橋脚横断面方向で行った。要素分割および境界条件を含んだ温度解析モデルを図-8に示す。解析モデルは対称形であり4分の1モデルとした。

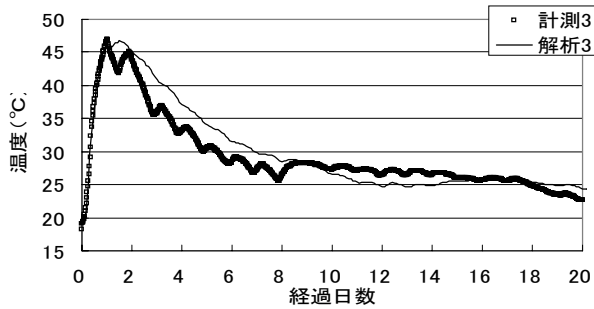
温度境界条件は、対称軸面を温度の出入りがない断熱境界とし、鋼製型枠面、テクスチャーとして発泡スチロールを貼り付けた面、そしてクーリングパイプ内を対流境界とした。

(2) 解析に用いた物性値

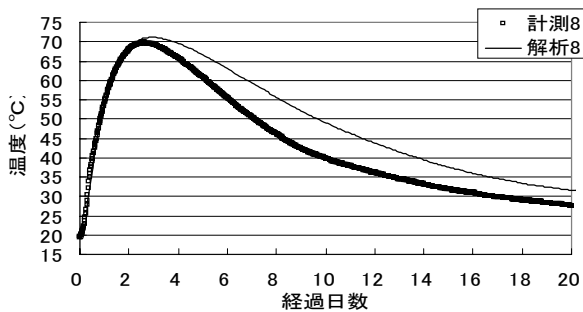
解析に用いた熱物性値、強度物性値、および対流境界条件を表-3に示す。計測結果や実験で求められなかった物性値については、標準示方書の一般的な値を用いた。

表-3 解析に用いた物性値

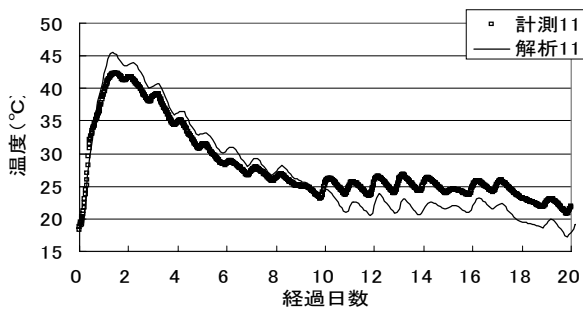
項目	係数・単位	物性値	備考	
熱物性	熱伝導率	W/m°C	2.7	
	密度	kg/m ³	2273	配合より
	比熱	kJ/kg°C	1.15	
	断熱温度 上昇特性	K・°C	54.4	計測より JCI式 に近似
		α	1.258	
β		1.088		
打設温度	°C	19.0	実績より	
強度物性	圧縮強度	a	11.5	試験より JSCE式 に近似
		b	0.76	
		f_c' ・N/mm ²	43.5	
	ヤング係数	N/mm ²	JSCE式	試験より
	引張強度	N/mm ²	JSCE式	
ポアソン比	—	0.18		
線膨張係数	μ /°C	10	計測より	
対流境界条件	熱伝達係数 鋼製型枠	W/m ² °C	6	計測・逆 解析より
	発泡 スチロール		4	
	パイプ・通常		20	
	パイプ・送風		60	
	外気温・パイプ 内温度	°C	計測値	計測より



a) パイプ近傍部分・測点3



b) 中心部分・測点8



c) 表面部分・測点11

図-9 温度履歴の比較

(3) 温度履歴の比較

温度履歴の比較を1リフト中段のB断面(図-2)における11測点を対象に行った。ここでは、測点3, 8, 11について図-9に示す。

測点3および測点8とも計測値と解析値は、ピークまでおおむね一致し、その後の温度降下時で解析値のパイプからの放熱を小さく評価している。測点11では、経過日数8日以降は外部への放熱が多いようである。

温度履歴について、差異が見られた原因は、実際の構造物では逐次変化している熱の伝達状態をある一つの熱伝達係数と仮定しているためと考えられる。しかしながら、比較結果を見るとこの仮定においても、実用上、十分に履歴の傾向は再現できることが確認できた。

(4) エアパイプクーリングの効果

エアパイプクーリングによるひび割れ抑制効果を温度応力解析により検討した。効果の検討は、橋脚横断面へのパイプ設置の有無に対して、断面内の温度およびひび割れ指数にどのような相違があるかを検討することで行った。なお、解

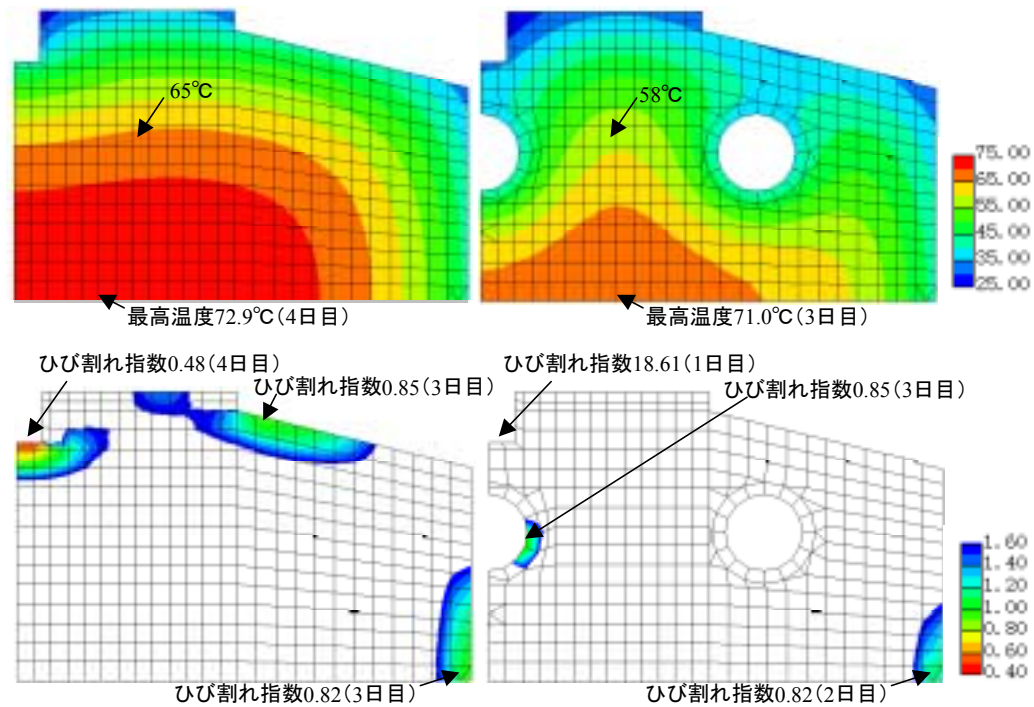


図- 10 パイプの有無による解析結果の比較（4日目、上段：温度、下段：ひび割れ指数）

析は、図- 8に示すモデルを用い、表- 3に示す物性値を用いて行った。

解析結果として、温度およびひび割れ指数の分布を図- 10に示す。材齢は、パイプなしのケースが最高温度を示す打設後4日目である。温度分布を見るとパイプがあるものは、放熱が促進され全体的に温度が低下しており、中心部分では7℃程度の差が見られる。

ひび割れ指数分布を見ると、パイプなしのケースでは、表面の大部分で指数が1.6を下回る値となっており、左端の切り欠き部分では、最小0.48となっている。一方、パイプありのケースは、パイプの影響が現れにくい右下部分や温度勾配が大きいパイプ近傍部分で指数が小さくなっているが、それ以外の部分では1.6を上回っており、エアパイプクーリングのひび割れ抑制効果は十分に確認できた。

表- 4 配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
20	34.0	51	155	456	879	841	7.75

3. 熱伝達係数の設計用値の検討

3.1 実験概要

本実験は、エアパイプクーリングを用いた場合の熱伝達係数をさらに詳細に把握する目的で実施した。

実験は、図- 11に示すパイプクーリング模型試験体を用いて行った。試験体は、1辺1500mmの立方体の型枠内面に100mmのスタイロフォームを貼り付けたものである。セメントは低熱ポルトランドセメントを用いた。表- 4に配合を示す。

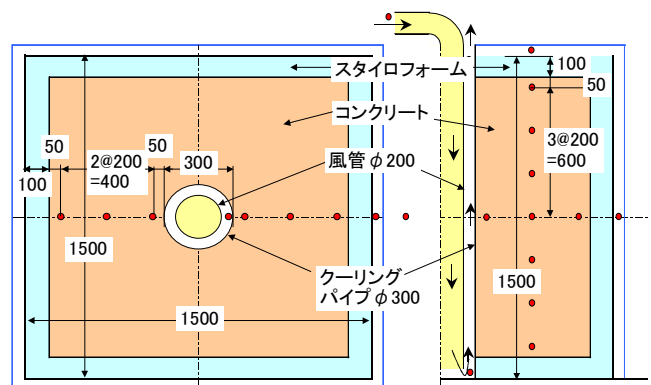


図- 11 パイプクーリング模型試験体

計測は熱電対を用い、17点で温度について行った。送風は、風量毎分 20m^3 の送風機を用い、打設後 1 日目から 9 日目まで行った。風速は、外管と内管の間の排気側で約 8.5m/s である。

3.2 熱伝達係数

クーリングパイプを埋め込んだ試験体における計測結果より、コンクリートからパイプ内への熱伝達係数を算定した。推定結果を図-12に示す。熱伝達係数の平均値は送風時で $30\text{W/m}^2\text{C}$ 、無風時で $1\text{W/m}^2\text{C}$ 程度となった。

3.3 設計用値の提案

エアパイプクーリングを解析に適用する場合、実際には 2 章のようにパイプ内温度を与えられないため、パイプ内温度の代わりに月平均気温や現場外気温測定データを用いることになる。橋脚本体および実験の測定結果より外気温を用いて算定した熱伝達係数を図-7および図-12に示した。これらを管内風速との関係にまとめたのが図-13であり、参考として他の研究実績⁴⁾も示した。

本研究では、これらの実測値を考慮することで解析に用いる熱伝達係数を図の設計用値として提案した。実測値 4 点を用いた近似直線は、示方書平均に近い直線となったことより、 5.0m/s より風速が小さい場合の熱伝達係数は、示方書平均にしたがうこととした。 5.0m/s より大きい場合は安全側の値とするために $22.5\text{W/m}^2\text{C}$ で一定値とした。今回の設計用値は、少ない測定値より提案しているため、今後の研究を通して測定値を増やすことが必要である。

4. まとめ

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) エアパイプクーリングは、コンクリート内部の温度を下げ、発生応力を低減するため、ひび割れ抑制対策として有効な手段であることが確認できた。
- (2) パイプによるクーリング効果は、パイプ内の空気による熱の移流効果を考慮せず、管内風速の関数として与えた熱伝達係数を用いて簡易的

に評価できることが確認できた。

- (3) パイプにおけるコンクリートから空気への熱伝達係数を、解析への適用が簡易となる設計用値として提案した。

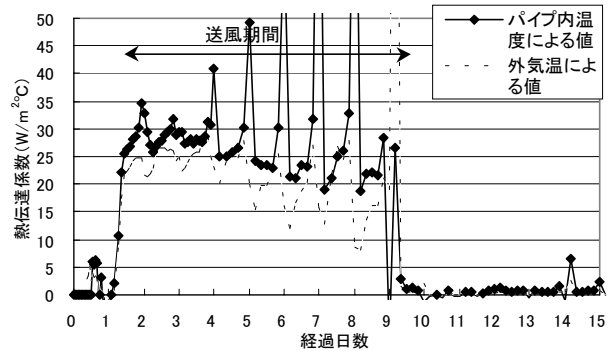


図-12 熱伝達係数の推定結果

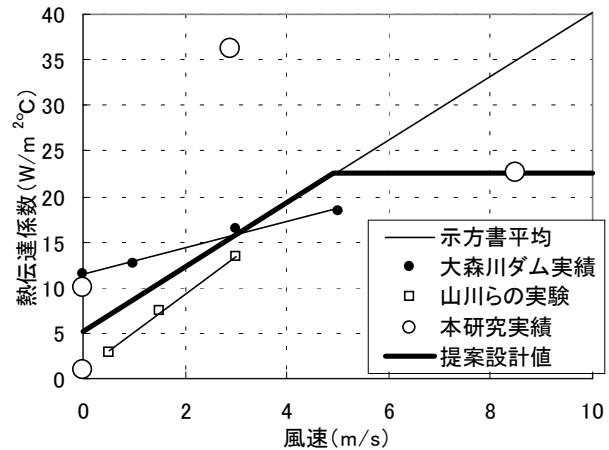


図-13 風速と熱伝達係数の関係

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編，pp.24-36，2000。
- 2) 小嶋和弘，三島徹也，渡部正：構造物の温度実測結果に基づくコンクリートの発熱特性の推定，第 51 回土木学会年次学術講演会，pp.826-827，1996。
- 3) Koichi Maekawa, Rajesh Chaube and Toshiharu Kishi: Modeling of Concrete Performance, E&FN SPON, pp.178-248, 1999.
- 4) マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム，日本コンクリート工学会，pp.3-8，1985。