

エアパイプクーリングによる温度ひび割れ 抑制効果に関する検討

伊 藤 始

中 島 良 光

三 島 徹 也

柘 植 浩 史^{*1}藤 本 英 二^{*2}加 藤 育 久^{*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。一般に、このようなひび割れ抑制対策の採否を決定する場合には、事前にその効果の検討として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、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いるのが現状であり、実際のパイプ内の送風状況を考慮していないため、解析を改善するためには、それら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、実測物性値を用いた温度応力解析を行うことで、パイプによる抑制効果の検討を実施した。その結果、ひび割れ抑制対策としてエアパイプクーリングは有効な手段であることが確認できた。加えて、熱伝達係数の設計用値を提案するとともに、今後の解析への適用方法を示した。

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／熱伝達係数

目 次

- | | |
|--------------|---------|
| 1. はじめに | 4. 適用方法 |
| 2. 高岡高架橋への適用 | 5. まとめ |
| 3. 栗東橋での模型実験 | |

A STUDY ON THE EFFECT UPON THERMAL CRACK RESTRAINT BY AIR PIPE COOLING

Hajime ITO
Tetsuya MISHIMA
Eiji FUJIMOTO

Yoshimitsu NAKAJIMA
Hiroshi TSUGE
Ikuhisa KATO

Synopsis:

Application of air pipe cooling method, which installs cooling pipes in the pier section and ventilates forcibly, is increasing for large section piers in purpose of radiation of hydration heat. In case of analysis for air pipe cooling method, the coefficient of heat transmitting from concrete to open air have been using without considering of ventilation so far. However, to improve the accuracy of analysis, it is necessary to research more practical coefficient of heat transmitting with considering of ventilation.

In this study, the coefficient of heat transmitting was estimated through the temperature measures on site and experiment, and the effect of crack restraint on the pipe was studied. As a result, it was confirmed that air pipe cooling is effective for crack restraint. Additionally, coefficient of heat transmitting for design was proposed.

* 1 中部支店 土木部

* 2 中部支店 高岡高架東作業所

* 3 関西支店 栗東橋作業所

1. はじめに

近年、進められている第2東名および第2名神高速道路の建設においては、往来6車線で建設されることや山間を通るルートが多く50mを越える高橋脚となっていることなどの理由で、橋脚断面が大断面となっている。このような断面ではマスコンクリート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、この種のひび割れ対策としては、温度勾配を緩やかにすることを目的として、低発熱型セメントの使用や表面の保温養生などが採用されてきた。最近では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、このようなひび割れ抑制対策の採否を決定する場合には、事前にその効果の検討として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、断面内に要素としてクーリングパイプを設定し、内面に対流境界を設けて放熱を表現しているが、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¹⁾(以下、標準示方書)の値を用いているのが現状であり、実際のパイプ内の送風状況ではないため、それら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、実測物性値を用いた温度応力解析を行うことでパイプによる抑制効果の検討を実施した。

2. 高岡高架橋への適用

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、フーチング天端から梁までの高さ16.6m、脚柱部の断面寸法7.0×4.5mよりなり、φ600mmのクーリング用のパイプを6本埋め込んだ断面である。打設は、フーチング部、脚柱下部、脚柱上部、梁部に分けて実施され、脚柱部1リフトの打設高さは5.4mである。

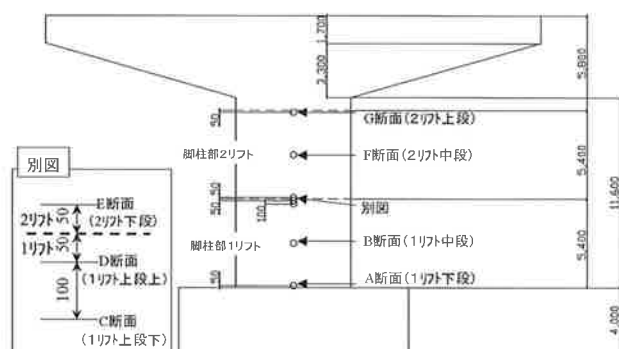


図-1 計測対象構造物

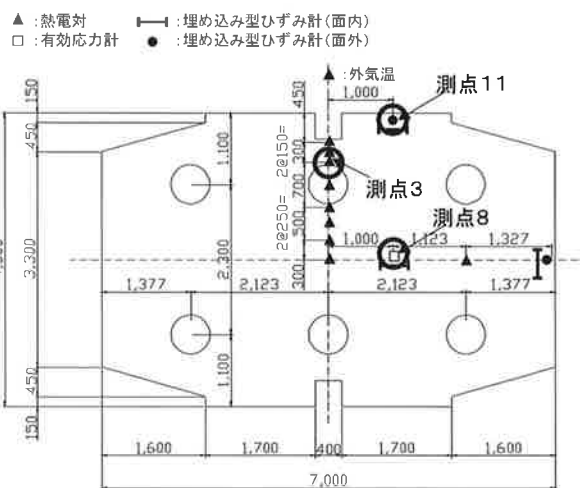


図-2 断面内の計測位置図(B断面)

(2) 工程

打設工程、クーリング期間、および計測期間は、図-3に示すとおりである。クーリングは、打設1日後から1週間程度の期間実施した。計測は、脚柱1リフトを主対象としているため、1リフトの打設後2ヶ月間とした。

	平成13年				
	3月	4月	5月	6月	7月
コンクリート打設	フーチング	脚柱1リフト	脚柱2リフト		梁(予定)
クーリング・フロー運転					
計測					

図-3 打設、クーリング、および計測工程

(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クーリング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-4に示す方法で設置し、クーリングパイプ1本に付き1基配置した。送風機の風量は毎分55m³であり、管内での風速は風量と断面積より計算すると、内管と外管の間の排気側で約2.9m/sである。

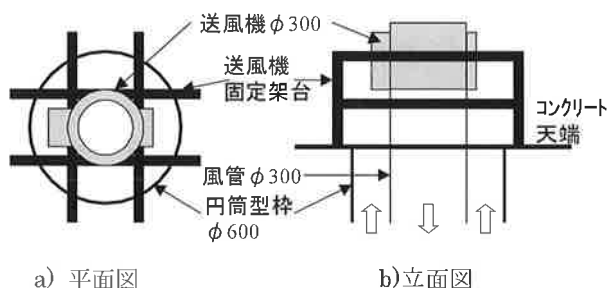


図-4 送風機設置方法

(4) 配合

橋脚に打設したコンクリートの配合表を表-1に示す。

表一 1 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	混和 材
25	47.5	40	162	341	694	1076	3.41

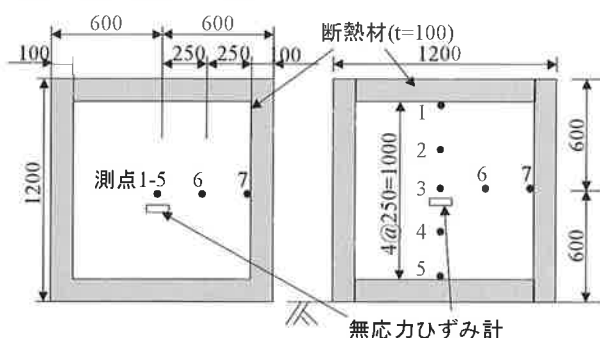
*セメント：高炉セメントB種

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、温度およびびずみを測定した。試験体寸法と計測点を図－5に示した。試験体は、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。



圖一 5 試驗体寸法 (左: 平面図, 右: 立面図)

(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、コンクリート有効応力計を用いたコンクリート応力とした。

計測は、図- 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- 2にはB断面における計測位置図を示した。

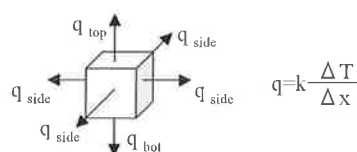
2.3 計測データからの解析物性値の推定

(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⁾を差分化した式〔1〕を用いて、中心温度をその外側の温度により補正することで求めた。（図-6）

$$\Delta Q = \rho c \Delta T + \frac{4q_{side} + q_{top} + q_{bot}}{\Delta x} \Delta t \quad [1]$$

ここで Q : 発熱量 (J/m^3), ρ : 単位体積重量 (kg/m^3),
 c : 比熱 ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), q : 熱流束 (W/m^2)



図一 6 微小立方体と熱流束

セメント組成より求める方法は、東京大学・岸教授の温度依存性のあるモデル³⁾（以下、岸モデルと記す）を用いて、表-2に示す入力値を入力することで求めた。

表一 2 岸モデルへの入力値

パラメータ		入力値
打設温度 (°C)		19.0
セメント組成 (%)	C ₃ A	10.4
	C ₄ AF	9.4
	C ₃ S	47.2
	C ₂ S	27.0
	CS ₂ H	3.9
粉末度 (cm ² /g)	普通	3380
	スラグ	4200
スラグ混合割合		42.5

推定した結果を図-7に示す。計測より求めた結果は、解析物性値として使用しやすいように、最小自乗法を用いて式〔2〕に示したJCI式に近似させた。⁴⁾ (表-3)

図-7の結果を見ると、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。

$$T = K(1 - \exp(-\alpha(t - t_0)^\beta)) \quad [2]$$

ここで、 K : 終局断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$)、 $\alpha \cdot \beta$: 温度上昇に関する定数、 t_0 : 発熱の遅延日数 (days)

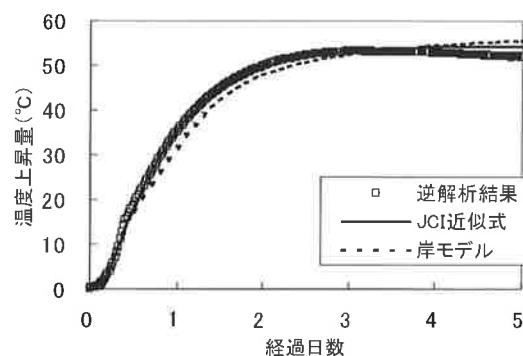


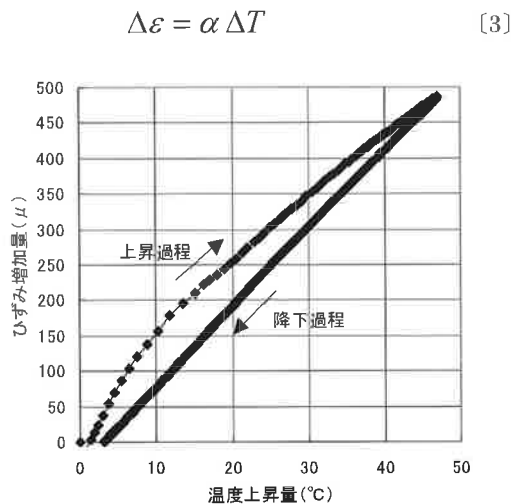
図-7 断熱温度上昇特性の推定結果

表-3 JCI式の推定値

J C I 式・定数	推定値
K (°C)	54.4
α	1.258
β	1.088
t_0 (days)	0.15

(2) 線膨張係数

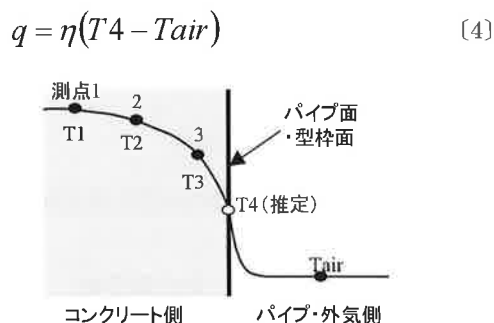
線膨張係数は、断熱温度上昇試験の温度計測結果と無応力ひずみ計の測定結果より求めた。温度上昇量と膨張量（ひずみ増分）の関係を図－ 8に示す。線膨張係数 α ($\mu/\text{°C}$) は、式 [3] で表せることより、図中の勾配を見ると温度上昇過程では、 $18 \mu/\text{°C}$ から $8 \mu/\text{°C}$ に変化しており、降下過程では、 $12 \mu/\text{°C}$ 程度となっている。これらより、線膨張係数は、温度履歴により差があるものの、平均的に見れば、一般的な $10 \mu/\text{°C}$ に近い値となる。



図－ 8 ひずみ増加量と温度上昇量の関係

(3) 熱伝達係数

熱伝達係数は、コンクリートからパイプへの伝達とコンクリートから外気への伝達を対象として推定した。熱伝達係数の推定は、図－ 9に示すようにコンクリート側の 3 測点の温度 $T1 \sim T3$ に放物線を仮定して、コンクリート境界面の温度 $T4$ を推定する。推定した $T4$ とパイプ内または外気の温度 T_{air} の関係は、式 [4] に示すような熱流束で与えられるため、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。

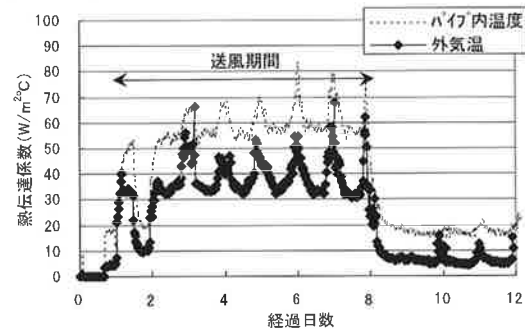


図－ 9 コンクリート界面の温度分布モデル

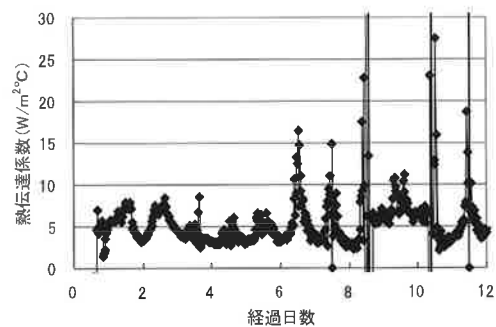
コンクリートからパイプ内および外気への熱伝達係数の推定結果を図－ 10および図－ 11に示す。図－ 10に示

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 $60 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$ 、送風していない時は $20 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$ 程度であった。

図－ 11に示した外気への熱伝達係数は、 $6 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$ 程度であった。経過日数 8 日以降の大きな値や負の値は、外気温の急激な上昇や送風終了などが原因である。



図－ 10 熱伝達係数の推定結果（パイプ）



図－ 11 熱伝達係数の推定結果（外気）

(4) 強度特性

計測したひずみを応力に換算する場合、ヤング係数を用いる必要があり、精度の高い換算を行うために、若材齢を含む 5 材齢で圧縮強度試験を実施した。養生方法は標準養生とし、ヤング係数の測定はコンプレッションメーターを用いた。

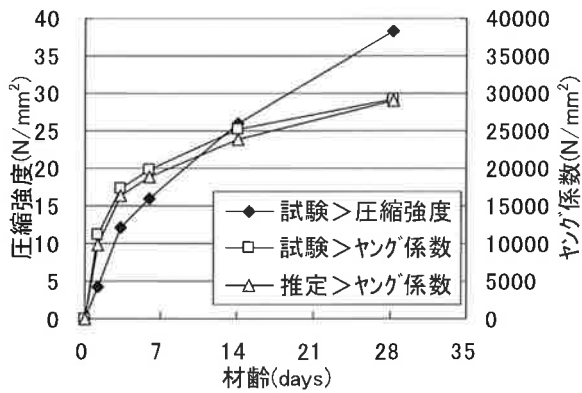
図－ 12に材齢と圧縮強度およびヤング係数の関係を示す。圧縮強度（◆印）は、左縦軸を使用し、ヤング係数（□・△印）は、右縦軸を使用する。凡例の推定・ヤング係数とは、圧縮強度試験の結果より標準示方書において用いられている式 [5] を用いて推定した値である。

$$E(t) = 4700 \sqrt{f'_c(t)} \quad [5]$$

ここで、 f'_c : 圧縮強度、 E : ヤング係数 (N/mm^2)

ヤング係数について、試験値と推定値を比較するとほぼ一致していることが分かる。そのため、ヤング係数の推定には式 [5] を用いることとした。圧縮強度は、標準示方書の推定式 [6] により近似した。（表－ 4）

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} f'_c(91) \quad [6]$$



図－ 12 材齢－圧縮強度・ヤング係数関係

表－ 4 圧縮強度の近似式

JSCE 式・定数	近似値
a	11.5
b	0.76
$f_c'(91)$	43.5

2.4 計測結果と解析結果の比較

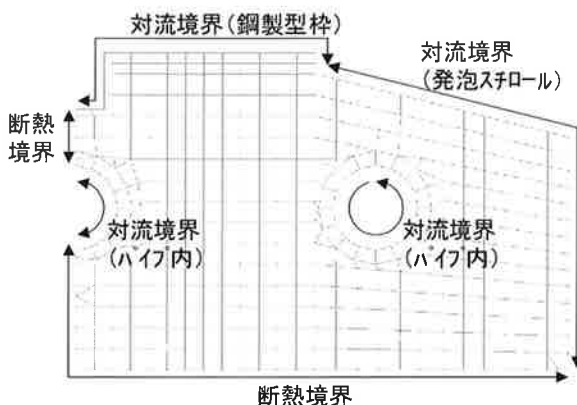
(1) 解析の方法

解析は、有限要素法を用いた温度応力解析プログラム「MASCOTS」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－ 13 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。応力解析に用いる拘束条件は、対称軸面を X 方向および Y 方向拘束境界とした。

(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－ 5 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。



図－ 13 温度解析モデル

表－ 5 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	$W/m^{\circ}C$	2.7
	密度	kg/m^3	2273
	比熱	$J/kg^{\circ}C$	1.15
	断熱温度 上昇特性	$K \cdot ^{\circ}C$	54.4
		α	1.258
		β	1.088
	$t0 \cdot days$	0.15	
強度物性	打設温度	$^{\circ}C$	19.0
	圧縮強度	a	11.5
		b	0.76
		$f_c' \cdot N/mm^2$	43.5
	ヤング係数	N/mm^2	JSCE 式
	引張強度	N/mm^2	JSCE 式
	ポアソン比	—	0.18
対流境界条件	線膨張係数	$\mu/^{\circ}C$	10
	熱伝達係数 鋼製型枠	$W/m^2^{\circ}C$	6
	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	$^{\circ}C$	計測値

(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－ 14 に示す。

測点 3 では、ピーク後の解析結果は放熱が小さいように見られる。測点 8 では、温度のピーク、勾配ともにおおむね一致している。若干ではあるが経過日数 8 日まで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。

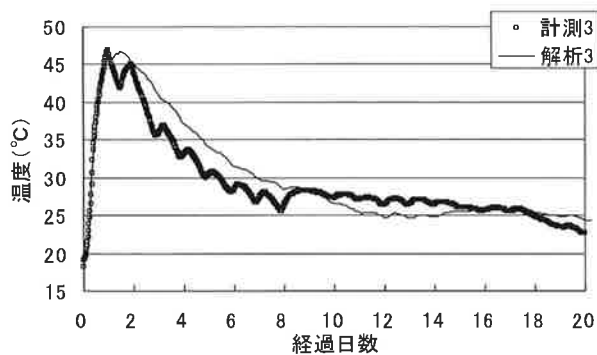
温度履歴について、差異が見られた原因は、実際の構造物では逐次変化している熱の伝達状態をある一つの熱伝達係数と仮定しているためと考えられる。しかしながら、比較結果を見るとこの仮定においても、十分に履歴の傾向は再現できることが確認できた。

(4) 応力履歴の比較

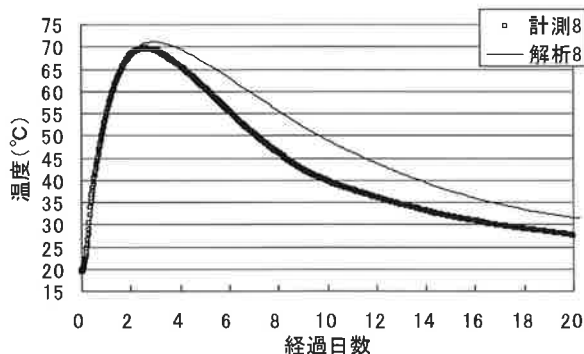
応力履歴の比較を 1 リフト中段の B 断面 (図－ 2) および 1 リフト下段の A 断面において行った。ここでは、中心部分の測点 8 と表面部分の測点 11 における左右方向の応力を比較した。図－ 15 に応力計、ひずみ計、および解析により求められた応力履歴を示す。

ひずみ計を算出する場合の温度ひずみには、線膨張係数を温度上昇時の上昇量 $10^{\circ}C$ までは $18 \mu/^{\circ}C$ 、それ以後は $8 \mu/^{\circ}C$ 、降下時は $12 \mu/^{\circ}C$ を用いた。

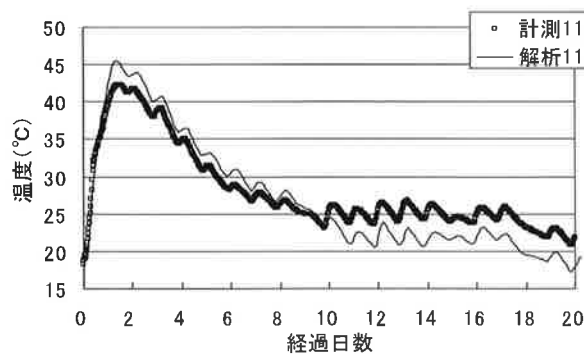
図－ 15 a) に示した A 断面の応力計とひずみ計の結果を比較すると、経過日数が 6 日から 8 日にかけてひずみ計が若干大きいものの、圧縮および引張の最大応力がほぼ一致していることがわかる。B 断面のひずみ計と解析



a) パイプ近傍部分・測点3



b) 中心部分・測点8



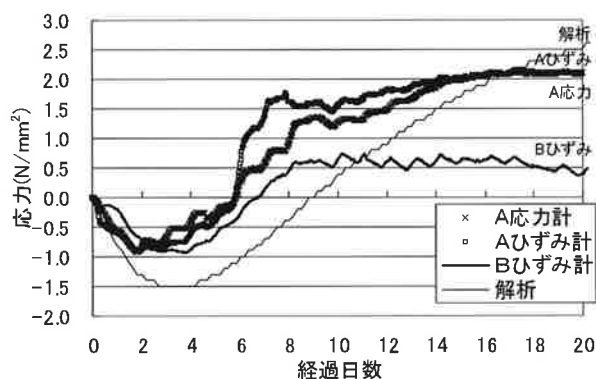
c) 表面部分・測点11

図一 14 温度履歴の比較

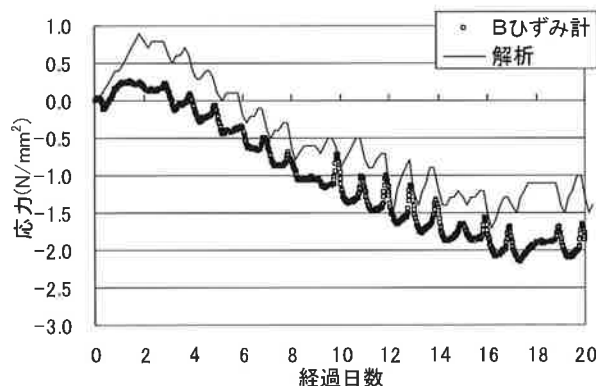
の結果を比較すると、圧縮側、引張側ともに解析の応力が大きくなっており、その差は最大 2.0 N/mm^2 である。

全体を見ると若材齢で圧縮応力が発生し、ピーク後6～9日で引張応力へ転じる傾向は、すべて共通している。

図一 15 b)では、測点11のB断面のひずみ計と解析結果の比較を示した。結果を見ると傾きはほぼ同様であるが、材齢初期に 0.5 N/mm^2 程度の差が生じている。



a) 中心部分・測点8



b) 表面部分・測点11

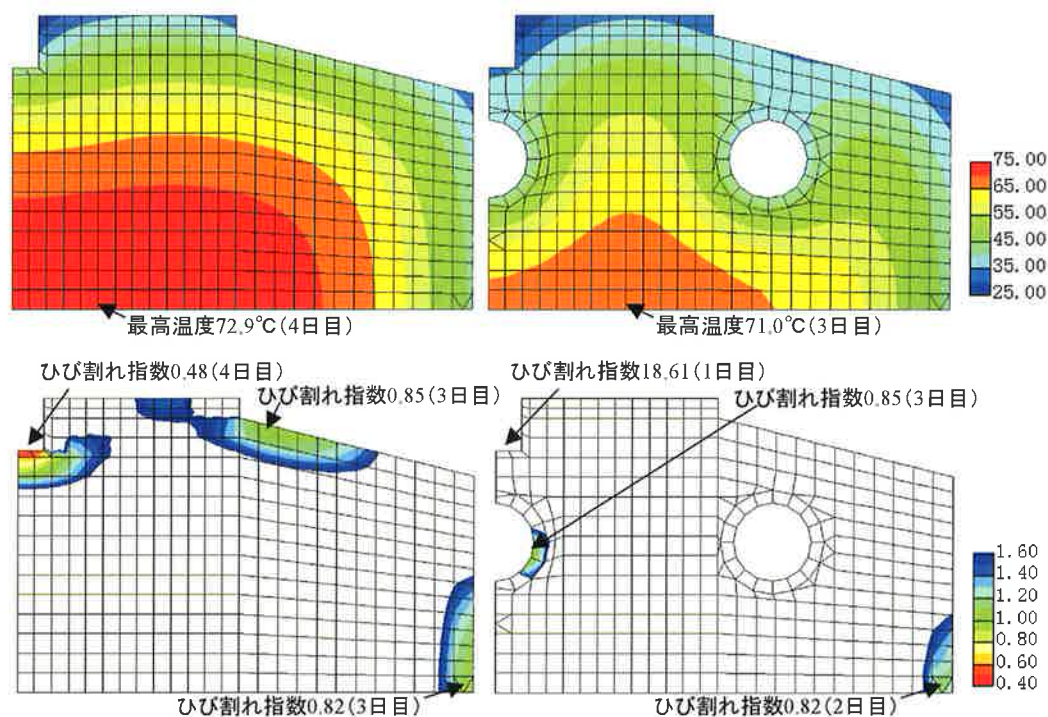
図一 15 応力履歴の比較

2.5 エアパイプクーリングの効果

2.4節において、実構造物の温度および応力状態をある程度、温度応力解析で表現できることが確かめられたため、温度応力解析を用いてエアパイプクーリングの効果を検討した。効果の把握は、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の分布にどのような相違があるかを検討することで行った。ひび割れ指数とは、最大発生応力 $\sigma_{\max}$ に対するそのときの引張強度 f_t で算出する。解析は表一 5に準じた。

解析結果を図一 16に示す。材齢は、パイプ無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 20°C 程度の差が見られる。

図のひび割れ指数分布を見ると、パイプ無しのケースは、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、パイプ有りのケースは、パイプの影響が少ない右下部分、温度勾配が大きいパイプ近傍部分で指数が大きくなっている。これらより、エアパイプクーリングのひび割れ低減効果は十分にあることが確認できた。



図ー 16 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）

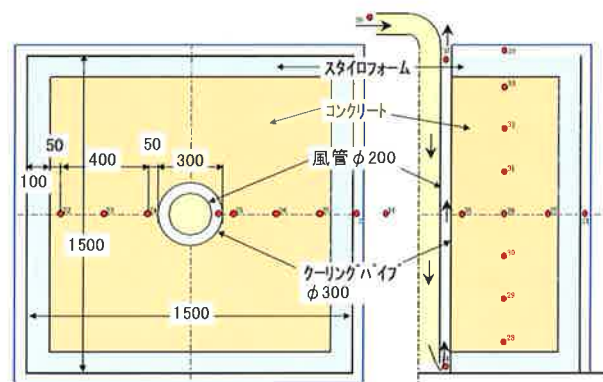
3. 栗東橋での模型実験

3.1 実験概要

(1) 実験目的

第2名神高速道路の栗東橋下部工工事においては、最大断面が14m×11mの橋脚に自己充填高強度コンクリートを使用するが、セメント量が多く、水和発熱によるひび割れが懸念された。そのため、表ー 6に配合表を示す配合を用いて模型実験を行った。

実験は、解析に用いる水和発熱量の把握のために断熱温度上昇特性を求め、橋脚断面内の最高温度低減のために使用が検討されているエアパイプクーリングの効果を把握することを目的に実施した。



図ー 17 パイプクーリング模型試験体

表ー 6 配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セ ト比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材
20	34.0	51	155	456	879	841	7.75

*セメント：低熱ポルトランドセメント

(2) 実験方法

実験は、断熱温度上昇試験体と図ー 17に示すパイプクーリング模型試験体の2つについて行った。両試験体ともに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。

計測は熱電対を用い、両試験体あわせて36点で温度について行った。送風は、風量毎分20m³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。

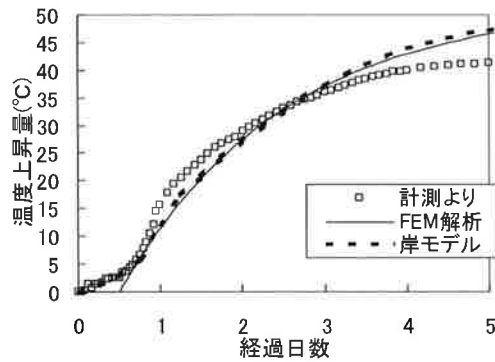
3.2 実験結果

(1) 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性は、2.3節で用いた方法に加えて、FEM解析を用いてパラメータスタディをする方法の3方法を用いて推定した。推定結果を図ー 18に示す。計測結果より算定した曲線は、他の2結果に比べて小さく、推定値としては、FEM解析を用いた方法とセメント組成を用いた方法を採用することとした。（表ー 7）

表ー 7 J C I 式の推定値

J C I 式・定数	推定値
K (°C)	52.0
α	0.50
β	1.00
t_0 (days)	0.5

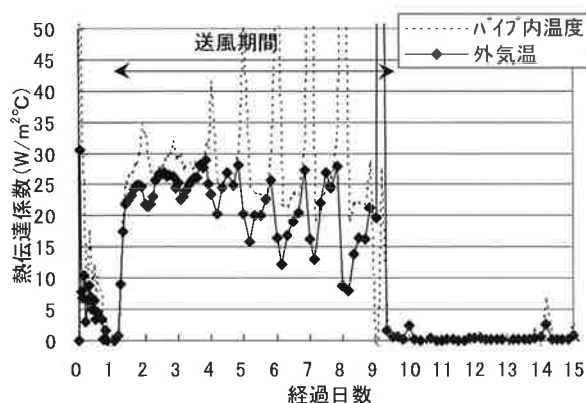


図－ 18 断熱温度上昇特性の推定結果

(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。算定は、2.3節に示した方法で行った。

推定結果を図－ 19に示す。熱伝達係数の平均値は送風時 $30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 、無風時 $4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 程度となった。



図－ 19 熱伝達係数の推定結果

4. 適用方法

(1) 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。橋脚本体および模型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－ 10および図－ 19に示した。これらを管内風速との関係にまとめたのが図－ 20であり、参考として他の研究実績²⁾も示した。

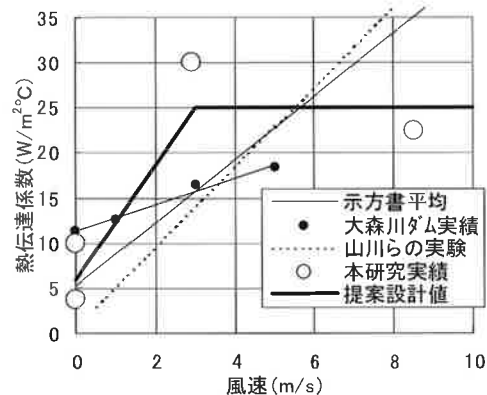
本研究では、これらの実測値を考慮することで解析に用いる熱伝達係数を図の設計用値として提案した。3m/sより風速が大きい場合の熱伝達係数については、データ数が2つと少ないため $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ で一定値とした。また、風速 0 m/s から 3 m/s の間に実際の変曲点があると予想さ

れるため、今後の研究において提案設計用値を更新していく必要がある。

(2) 解析への適用

橋脚を対象に横断面方向で解析をする場合、以下の方法で行う。

- (1) クーリングパイプは、要素を用いて表現し、その内面を対流境界を設ける。
- (2) 対流境界の温度は、パイプ内温度の代わりに月平均気温や現場計測データより外気温を与える。
- (3) 熱伝達係数は、検討対象のパイプの直径と送風機の風量によって算定される風速より、図－ 20の関係を設計用値とする。



図－ 20 風速と熱伝達係数の関係

5. まとめ

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 断熱温度上昇特性は、断熱試験結果より求めた値とセメント組成より求めた値の整合を図ることで適切な値を推定でき、試験をしない場合にセメント組成の値のみでも、十分に推定できることが確認できた。
- (2) 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、発生応力を低下するため、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。
- (3) エアパイプクーリングの熱伝達係数を、解析に用いることができる設計用値として提案した。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編，pp24-36，2000.
- 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，土木学会年次学術講演会，pp826-827，1996.
- 3) Koichi Maekawa, Rajesh Chaube and Toshiharu Kishi: Modeling of Concrete Performance, E&FN SPON, pp178-248, 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協会，pp3-8，1985.