

論文 コンクリートの分割施工による蓄熱抑制効果に関する実験的検討

竹中 寛¹・末岡 英二^{*2}・水谷 征治^{*3}・清宮 理^{*4}

要旨：マスコンクリートにおける温度ひび割れ抑制の一方法として著者らが考案した、中空材内外のコンクリートを分割して施工する HTL(heat time lag)工法に関して、中空材内部の冷却手法の違いによる効果を検証すること、各種冷却手法を適用した場合の温度応力解析で用いる熱伝達境界条件を定量化することを目的としてモデル実験を行った。その結果、各種冷却手法の適用によるコンクリートの蓄熱抑制効果および中空部の放熱効果が明らかとなり、温度履歴から条件に応じた見かけの熱伝達係数を推定することで、温度応力解析への反映を可能とした。

キーワード：HTL 工法、マスコンクリート、蓄熱抑制、温度応力解析、熱伝達係数

1. はじめに

マスコンクリートの施工において、温度応力に起因するひび割れ（以下、温度ひび割れと称す）の抑制は、長期耐久性や橋脚などの耐震性確保の観点から重要である。温度ひび割れの抑制には、主に低発熱性セメントや膨張材などの特殊な材料の使用、パイプクーリング、打設リフト高さの低減およびひび割れ誘発目地の適用などの方法がとられている¹⁾が、方法によっては過大な費用や施工手間を要することもあり、より費用対効果に優れる対策の開発が望まれている。そこで、このような状況に対応すべく、図-1 に示すように、コンクリートの内部に薄鋼板の中空材を配置し、その内部のコンクリートと周辺のコンクリートの打込み時期を変えることにより、内部への蓄熱を低減する温度ひび割れの抑制方法として HTL (heat time lag) 工法を開発した^{2)~4)}。なお、当該工法は、一般的なパイプクーリングで用いられるような複雑な配管の設置が不用であり、中空材内外は同一のコンクリートを打ち込むため、材料管理が容易であるなどの利点を有する。

本稿では、当該工法を適用したモデル試験体による実験から得られた、中空材内部の冷却手法の違いが、コンクリート内部の蓄熱抑制効果や中空材の境界面からの放熱効果に及ぼす影響や、各種冷却手法を適用した場合の温度応力解析で用いる熱伝達境界条件について述べる。

2. モデル実験

2.1 実験概要

(1) コンクリートの配合および使用材料

モデル試験体は、呼び強度 30 のレディーミクストコンクリートを用いて作製した。コンクリートの配合を表

ー1 に、使用材料を表-2 に示す。

(2) モデル試験体

モデル試験体は、大型モデル試験体と小型モデル試験体の 2 種類作製した。大型モデル試験体は、図-2 およ

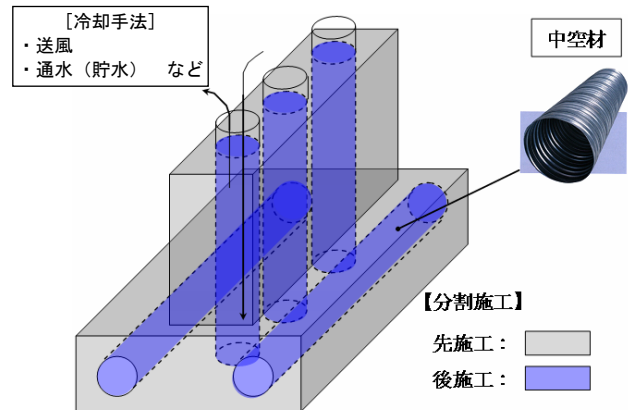


図-1 HTL 工法のイメージ

表-1 コンクリート配合表

スラブ ^o (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
12	4.5	48.5	43.3	20	159	328	784	1041	3.49

表-2 使用材料

使用材料		成分・性質
セメント：C	高炉セメントB種	密度3.04, 粉末度3,860cm ² /g
細骨材：S	陸砂	神栖産, 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.67%, 微粒分量0.8%, 粗粒率：2.38
陸砂：砕砂=8：2	砕砂	佐野産, 表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率1.66%, 微粒分量4.2%, 粗粒率：3.09
粗骨材：G	碎石2005	石岡産, 表乾密度2.67g/cm ³ , 吸水率0.46%, 実積率59.7%, 粗粒率：6.61
混和剤：Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸系

*1 東洋建設（株） 美浦研究所主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 東洋建設（株） 美浦研究所材料研究室長 博士(工学) (正会員)

*3 東洋建設（株） 美浦研究所主任研究員 (正会員)

*4 早稲田大学 創造理工学部教授 工博 (正会員)

び写真-1 に示すとおり、フーチングと壁を模擬した形状とし、フーチング部に冷却条件の異なる $\phi 500\text{mm}$ の中空材を 3 本、壁部に $\phi 175\text{mm}$ および $\phi 100\text{mm}$ の中空材を各 1 本ずつ配置した。一方、小型モデル試験体は、図-3 および写真-2 に示すようなブロック体の形状とし、冷却効果の異なる $\phi 300\text{mm}$ の中空材を 3 体の試験体に 1 本ずつ配置した。なお、大型モデル試験体のフーチング部のコンクリートは 9 月初旬に打設し、壁部および小型

モデル試験体はその 4 週間後に打設した。また、モデル試験体には図-2, 3 に示すとおり熱電対を設置し、コンクリートの打設直後から温度計測を行った。モデル試験体の検討ケースおよび詳細条件を表-3 に示す。

コンクリートの打込み面の養生は、湿潤状態の養生マットを用い、材齢 1 日から型枠を取外す材齢 7 日まで行った（大型モデル試験体のみ）。

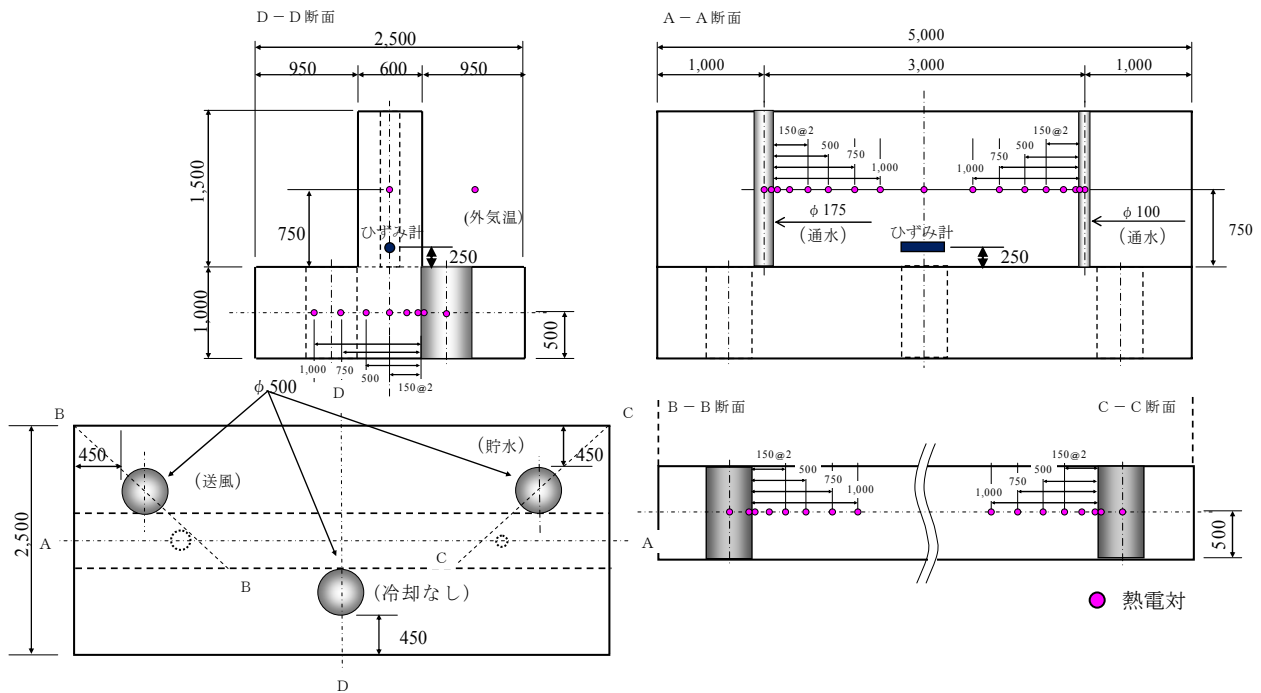


図-2 大型モデル試験体

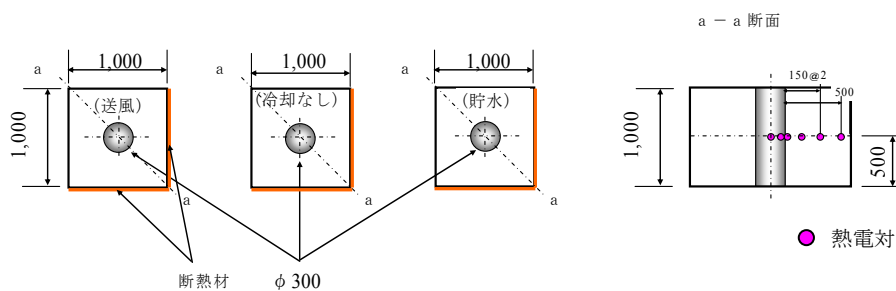


図-3 小型モデル試験体



写真-1 大型モデル試験体



写真-2 小型モデル試験体

表-3 モデル試験体の検討ケースおよび詳細条件

モデル種類	径 (mm)	中空材内部の冷却条件	備考
大型	φ 500	送風 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1～7日: 送風 (送風機(口径300mm, 70m ³ /min) + 風管(φ 300)) 材齢7日～: 冷却なし	写真-3 a) 参照
		貯水 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1日～: 貯水(初期水温26.1℃)	写真-3 b) 参照
		冷却なし	写真-3 c) 参照
	壁	φ 175 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1～7日: 通水(流速10ml/s, 初期水温22.6℃) 材齢7日～: 貯水	写真-3 d) 参照
		φ 100 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1～7日: 通水(流速10ml/s, 初期水温24.0℃) 材齢7日～: 貯水	—
		φ 300 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1～7日: 送風 (送風機(口径300mm, 70m ³ /min) + 風管(φ 300)) 材齢7日～: 冷却なし	—
小型	φ 300	送風 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1～7日: 送風 (送風機(口径300mm, 70m ³ /min) + 風管(φ 300)) 材齢7日～: 冷却なし	—
		貯水 材齢0～1日: 冷却なし 材齢1日～: 貯水(初期水温26.0℃)	—
		冷却なし	—

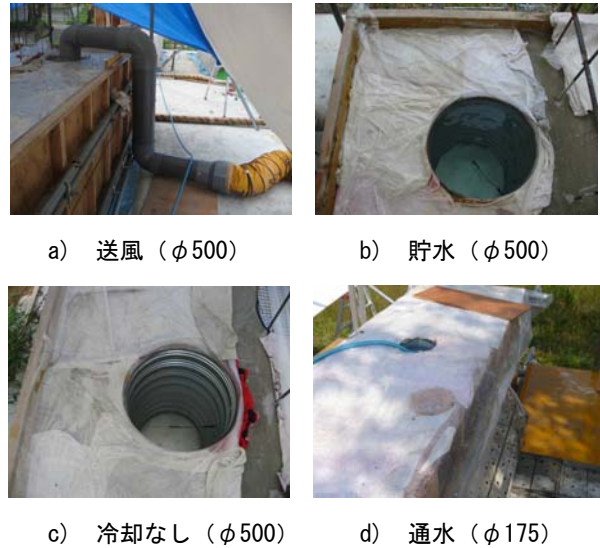


写真-3 冷却状況

2.2 実験結果

中空材の径や中空材内部の冷却手法の違いが、コンクリートの内部温度に及ぼす影響を図-4に示す。

中空材の径が 500mm (大型モデル試験体フーチング部) の場合、中空材を冷却する前においても、中空材とコンクリートの境界付近の温度が内部に比べて 7℃程度低くなる傾向を示し、中空材を設置するだけでも放熱の効果があることが確認された。コンクリートの水和発熱温度が最大となる、冷却開始後の材齢 1.4 日では、送風および貯水した場合、中空材境界面からコンクリートの深さ方向に 500mm の範囲でコンクリートの内部温度が低下する傾向を示し、境界付近では内部に比べて 20℃程度低くなった。また、材齢 3 日では、貯水した場合の温度が送風した場合に比べて 5℃程度大きくなっているが、これは貯水の水温がコンクリートの水和熱の上昇に伴い増加し、吸熱効果が低減したためであると考えられる。

中空材の径が 300mm (小型モデル試験体) の場合、φ 500mm の場合に確認された冷却開始前の放熱効果は殆どみられなかったが、冷却開始後の効果についてはφ 500mm の場合と同様の傾向を示し、コンクリートの水和発熱温度が最大となる材齢 1.3 日での送風や貯水による温度低減効果(中空材境界面とコンクリート内部の温度差)は 10℃程度であった。

中空材の径が 100mm および 175mm (大型モデル試験体壁部) の場合、φ 300mm の場合と同様、中空材を設置するだけの放熱効果は殆どみられないが、通水して冷却することにより、中空材の境界付近で 15℃程度の温度低減効果が確認された。

一般的に、パイプクーリング工法などのコンクリートの冷却工法を適用する場合、冷却部近傍の温度勾配を過度に大きくすることで温度ひび割れの発生を助長することが懸念されるが、本研究における冷却条件では、中

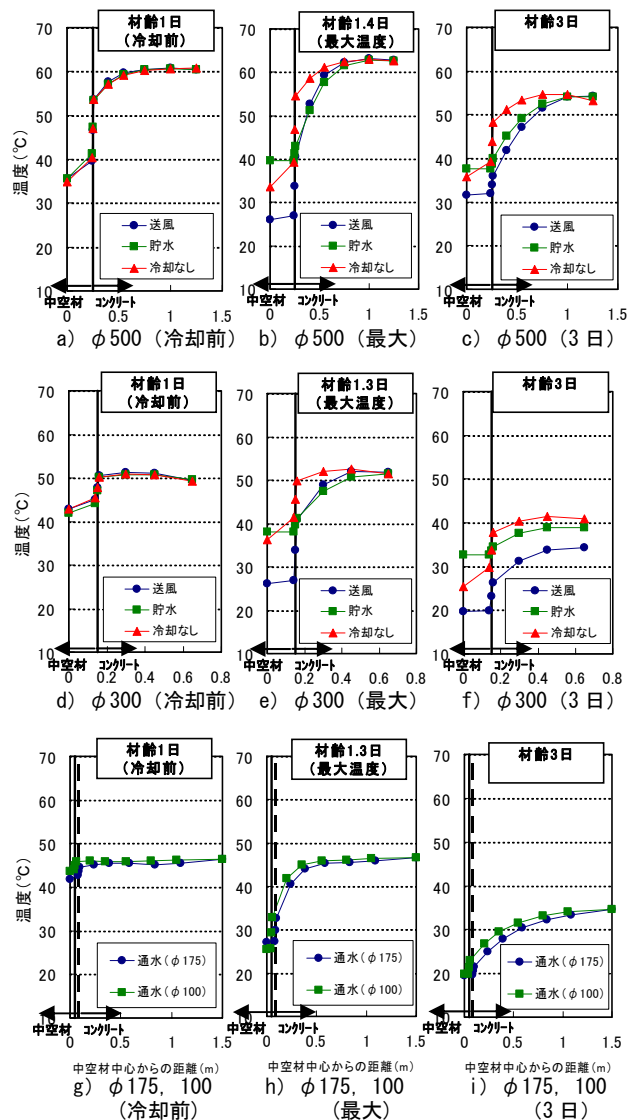


図-4 中空材の条件が冷却効果に及ぼす影響

空部と中空材近傍のコンクリートとの温度差はいずれも 10℃程度以下と緩やかであり、後述する解析や実モデルにおいてもひび割れは確認されなかった。

3. 温度解析による同定

当該工法を温度応力解析に反映させる場合の、中空材の境界面における見かけの熱伝達係数を定量化するため、前章のモデル実験で得られた各中空材の径や内部の冷却手法を変えた場合のコンクリートの内部温度と、温度解析から求まる解析値を同定した。

3.1 解析条件

温度解析は、大型モデル試験体については図-5 に示すモデル試験体と同じ形状のモデルを、小型モデル試験体については図-6 に示す 1/2 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。表-4 に示す解析上の各種物性値を初期条件として解析を行い、前章で得られたコンクリートの内部温度のうち、中空材の境界面からコンクリートの深さ方向に 300mm までの実測値と解析値を最小二乗法により同定し、中空材内部の冷却を開始する前後の、中空材境界面の見かけの熱伝達係数を算定した。なお、表-4 の断熱温度上昇量の係数は、コンクリート標準示方書【設計編】の設定値を初期値とし、フーチング部についてはφ500mm の中空材の境界面からコンクリートの深さ方向に 1000mm の測点、壁部については部材中央部（φ175mm の中空材の境界面から約 1400mm）の測点において実測値と解析値と同定して求めた値である。また、中空材の境界面における見かけの熱伝達係数の初期値は、笹倉ら⁵⁾の手法を参考とし、図-7 に示すコンクリート内部温度 T_1 、 T_3 （推定温度）および中空材内部の温度 T_A を熱の収支の関係式（1）に代入して算定した値とした。上昇中空材内部の温度 T_A については、解析の簡便性や条件設定の容易さに配慮し外気温度とした。

$$\lambda \frac{2\pi(T_1 - T_3)}{\ln \frac{r_1}{r_3}} = \eta(T_3 - T_A)2\pi r_3 \quad (1)$$

ここに、

η ：見かけの熱伝達係数（W/m²℃）

λ ：コンクリートの熱伝導率（W/m℃）

T ：温度（℃）

r ：中空材中央から温度計測箇所までの距離（m）

なお、中空材内部に貯水する場合の見かけの熱伝達係数は、図-8 のとおり貯水直後に最大となり、その後はコンクリートの水和に伴い水温が上昇するため小さくなる傾向を示す。したがって本解析では、実状に近い条件を、比較的簡便に模擬できるようにするため、貯水する場合のみ、図中の破線で示すような条件で見かけの熱伝達係数を設定した。

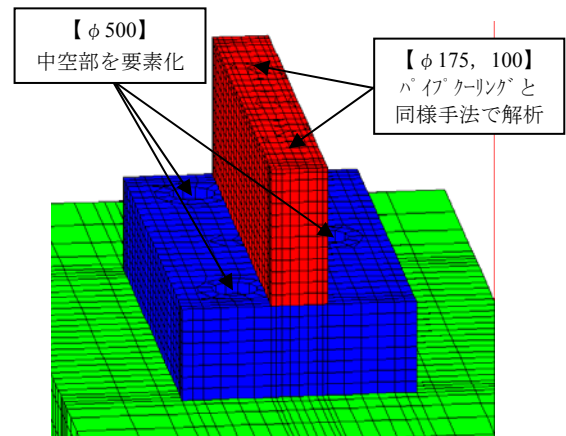


図-5 解析モデル（大型）

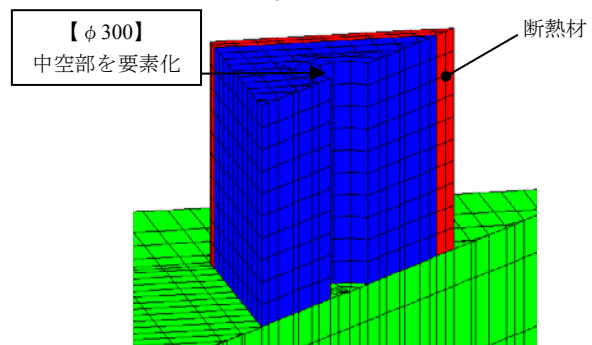


図-6 解析モデル（小型）

表-4 解析で用いた主要物性値

項目				係数・単位	物性値	備考
コン ク リ ー ト	熱伝導率			W/m℃	2.7	示方書
	密度			Kg/m³	2,316	実測値
	比熱			kJ/kg℃	1.308	示方書
	打設 温度	フーチング°		℃	30.9	実測値
		壁・小型			19.7	
	断熱温 度上昇	Q(t)=(1 - exp ^(-γt))				示方書
		フーチング°		Q _∞	45.9	同定 解析
				γ	1.283	
		壁・小型		Q _∞	56.0	
	γ			0.927		
中 空 材	外気			W/m²℃	14	示方書
	型枠（合板）				8	示方書
	灌水養生				5	示方書
	φ 500	送風	d0～1		14	示方書
			d1～7		52	熱収支
			d7～		14	示方書
		貯水	d0～1		14	示方書
			d1～2		64	熱収支
			d2～		13	熱収支
			なし		d0～1	12
	φ 300	送風	d0～1		14	示方書
			d1～7		35	熱収支
			d7～		14	示方書
		貯水	d0～1		14	示方書
			d1～2		58	熱収支
			d2～		6	熱収支
			なし		d0～1	8
	φ 175	通水	d0～1		14	示方書
			d1～7		37	熱収支
			d7～		6	熱収支
	φ 100	通水	d0～1		14	示方書
			d1～7		49	熱収支
			d7～		6	熱収支

3.2 解析結果

(1) 見かけの熱伝達係数

コンクリートの内部温度の実測値と解析値を同定して得られた、中空材内部の冷却開始後の見かけの熱伝達係数を図-9に示す。

表-4に示す見かけの熱伝達係数の初期値と乖離する結果となったが、これは、冷却前の初期値についてはコンクリートの水和熱による中空材内部の蓄熱を考慮していないこと、冷却後の熱の収支から算定した見かけの熱伝達係数の初期値は、外気温の変化に伴い増減する値を平均したものであり、対象とする材齢の範囲によってばらつきが生じることが要因と考えられる。一方、同定解析から求めた値についても、コンクリート温度に及ぼす他の要因も含むため、誤差を生じることとなるが、本研究では、解析へ反映させるための便宜上、同定解析から得られた値を見かけの熱伝達係数の設定条件とする。また、壁部に設置したφ175mmおよびφ100mmの小径中空材の場合、初期値に比べて大幅に増加する結果になっているが、これは、解析モデルでは中空部をパイプクーリングの条件で設定しているためである。

見かけの熱伝達係数は、図-10に示すイメージに準じて、冷却開始材齢を境に変化させて設定するものとし、中空材内部に貯水する場合については、熱の収支から求めた場合と同様に見かけの熱伝達係数の変化点を2箇所設け、冷却開始材齢から翌日までの間は線形補完する。また、送風および通水する場合は、冷却開始材齢から見かけの熱伝達係数を変化させ、冷却期間中は一定の値とする。冷却しない場合（大径中空材（φ500、φ300）のみ）については、初期材齢から一定の値とする。

以上により、温度応力解析で用いる見かけの熱伝達係数を整理すると表-5に示すとおりである。

(2) 有効ひずみ

本検討で実施した同定解析の妥当性を評価するため、図-2の大型モデル試験体の壁部に埋め込んだひずみ計の実測値と同定解析から得られた解析値を比較した。コンクリートの内部に生じるひずみの実測値と解析値の経時変化は図-11に示すとおりであり、コンクリートの

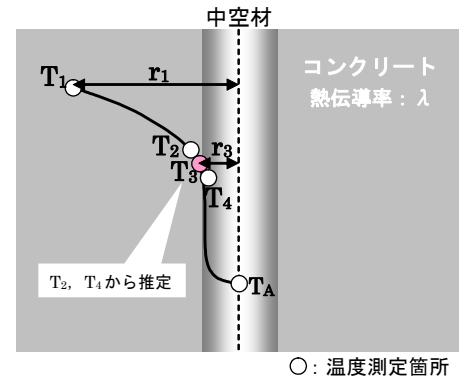


図-7 中空材近傍の温度分布

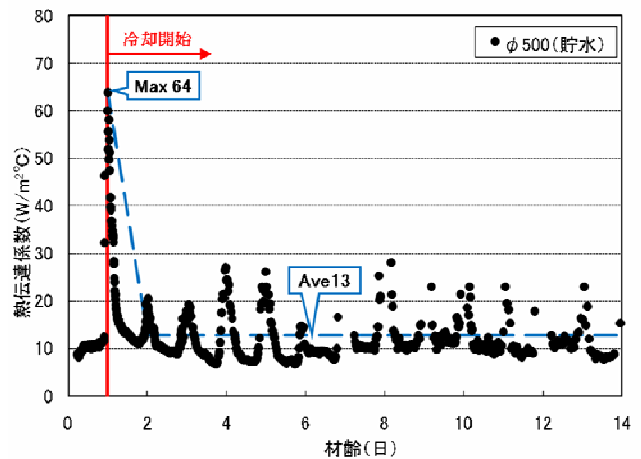


図-8 熱の収支から求めた見かけの熱伝達係数
(φ500mm (貯水))

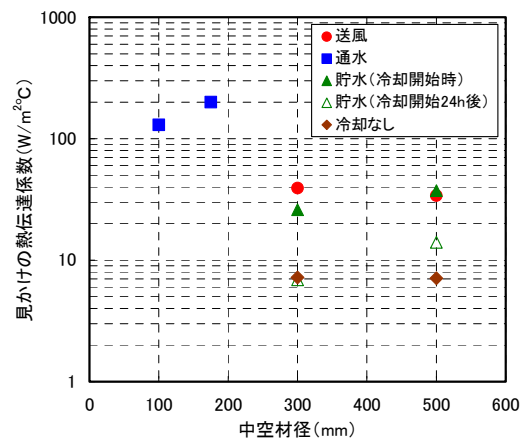


図-9 中空材径と見かけの熱伝達係数の関係

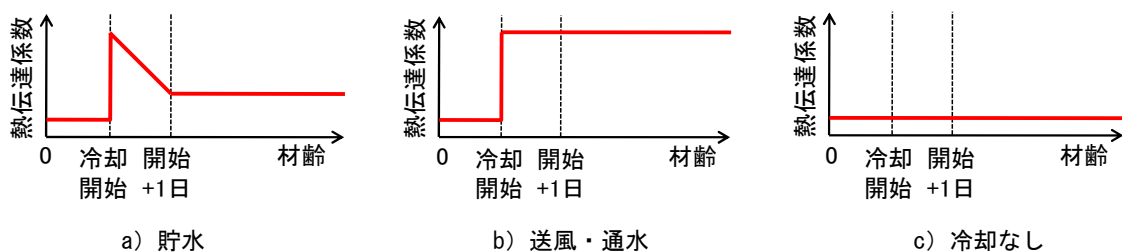


図-10 見かけの熱伝達係数の設定イメージ

表-5 見かけの熱伝達係数の設定値

中空材径	冷却方法	見かけの熱伝達係数 (W/m ² ℃)			環境温度
		材齢 0 日～	冷却開始	冷却開始+1 日～	
φ 500mm	貯水	7	37	14	外気温
	送風	7	37		
	冷却なし	7			
φ 300mm	貯水	7	26	7	
	送風	7	37		
	冷却なし	7			
φ 175mm※	通水	1	200		水温 (外気+5℃)
φ 100mm※	通水	1	300		

※φ 175mm および φ 100mm の小径中空材はパイプクーリングとして設定

初期材齢における有効ひずみで若干の乖離がみられ、実測値のほうが大きくなっているが、実測値と解析値は概ね同等の傾向を示していることから、同定解析の妥当性が確認されたといえる。なお、初期材齢における両者の値の乖離は、コンクリートの断熱温度上昇量や壁側面の熱伝達境界条件（合板部分）の精度が影響を及ぼしたものと推察される。

以上により、当該工法をコンクリート構造物の施工に適用する場合の解析手法を一通り確立することができたが、今後も更なる精度の向上を図るべく、実施工をとおして検討を継続する予定である。また、今回の検討で対象とした中空材の径や内部の冷却手法は、実施工において選定頻度が高いと想定される代表的な条件のものであり、今後適用実績を増やしていく中で、これら以外の条件についても技術を蓄積していく必要がある。

3. 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) 中空材を設けることでコンクリート内部の蓄熱が抑えられるため、温度ひび割れの抑制に有効である。
- (2) 中空材の境界面からの放熱効果は、大径の中空材を用いた場合ほど大きく、本検討の範囲では、φ 500mm の中空材を配置した箇所でも最も効果がみられた。
- (3) φ 500mm や φ 300mm の大径の中空材を用いた場合、その放熱効果は内部を冷却しないときにもみられたが、内部を貯水または送風することにより、更なる放熱効果が期待できる。
- (4) φ 175mm や φ 100mm の小径の中空材を用いた場合についても、内部を通水することにより放熱効果が期待できる。なお、その通水量は、一般的なパイプクーリングとは異なり比較的少ない流量でよく、本検討の範囲では、10ml/sec 程度でも十分な効果が得られることがわかった。
- (5) 中空材の境界面における見かけの熱伝達係数を、モ

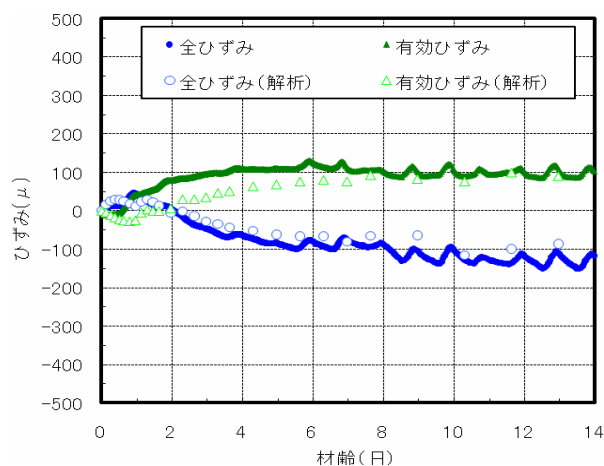


図-11 内部ひずみの比較

デル実験の実測値と温度解析の解析値を同定することにより定量化することができ、HTL 工法の温度応力解析への反映を可能とした。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書，2006.6
- 2) 水元誠司ほか：コンクリートの分割施工による温度ひび割れ抑制効果とその適用について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.151-156，2008.6
- 3) 末岡英二ほか：マスコンクリート内部に配置した中空部による蓄熱低減効果に関する検討，土木学会年次学術講演会公演概要集，Vol.63，No.5，pp.889-890，2008.9
- 4) 水谷征治ほか：岸壁上部工におけるコンクリートの分割施工と膨張材による温度ひび割れ抑制効果について，土木学会年次学術講演会公演概要集，Vol.64，No.6，pp.137-138，2009.9
- 5) 笹倉伸晃ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.981-986，2006.6