

論文 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

水元 誠司*1・竹中 寛*2・白石 哲也*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、小型のモデル試験体を用いたコンクリートの蓄熱抑制効果、および中空材内部に通水することによる放熱効果について実験的検討を行い、実構造物へ適用した。その結果、中空材の設置や通水することによるコンクリートの蓄熱抑制、放熱効果が明らかとなり、温度履歴から見かけの熱伝達率を推定することで解析への反映を可能とした。また、当該工法を実構造物に適用し、ひび割れ抑制に大きく寄与することがわかった。

キーワード：マスコンクリート、温度ひび割れ、分割施工、中空材

1. はじめに

マスコンクリートの施工における温度応力ひび割れ抑制は、長期耐久性や橋脚などの耐震性確保の上でその重要性が増している。その主な方法として、低熱セメントや膨張材などの特殊な材料を使用する方法や、パイプクーリング、打設リフト厚の低減、ひび割れ誘発目地の適用などの施工による方法がとられている¹⁾が、より費用対効果に優れた対策の開発が望まれている。そこで、筆者らは図-1に示すように、マスコンクリート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ずらすことにより、コンクリート内部への蓄熱を低減する HTL(heat time lag)工法を考案した。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、また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、小型のモデル試験体（以下モデル試験体と称す）を用いた当該工法による蓄熱抑制効果、中空材内部に通水することによる放熱効果に関する実験、および擁壁築造工事への適用について報告する。

2. モデル試験体による検討

実構造物への適用にあたり、コンクリートの分割施工がコンクリートの内部温度に及ぼす影響を確認し、中空材を境界とする熱伝達率の推定を目的として、モデル試験体を用いた要素実験を行った。

2.1 実験概要

(1) 配合および使用材料

本実験で用いたコンクリートは後述する実構造物の

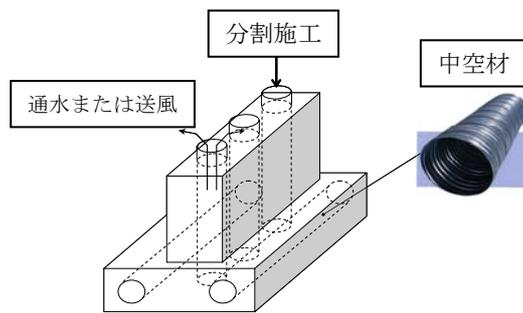


図-1 HTL工法イメージ

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m ³)					混和剤 SP (C×%)
				W	C	S1	S2	G	
55	12	4.5	20	158	287	634	272	982	0.75

表-2 使用材料

種類(記号)	産地・仕様
セメント(C)	低熱ポルトランドセメント 密度 3.24g/cm ³
細骨材 1(S1)	福岡市小呂島南西沖産 海砂 表乾密度 2.58g/cm ³ 粗粒率 2.40
細骨材 2(S2)	田川市弓削田産 砕砂 表乾密度 2.68g/cm ³ 粗粒率 3.00
粗骨材(G)	北九州市門司区大積東町産 砕石 表乾密度 2.72g/cm ³ 実績率 58.5%
高性能 AE 減水剤(SP)	ポリカルボン酸系

配合と同様のものとし、水セメント比 55%、単位セメント量 287kg/m³で一定とした。セメントは低熱ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。

(2) モデル試験体

モデル試験体は図-2に示す構造とし、内部に熱電対を設置し、外周を 200mm の断熱材で覆う簡易断熱状態とした。中空材は後述する実構造物に合わせて φ 125mm

*1 東洋建設(株) 九州支店技術部課長 (正会員)

*2 東洋建設(株) 技術本部美浦研究所研究員 工修 (正会員)

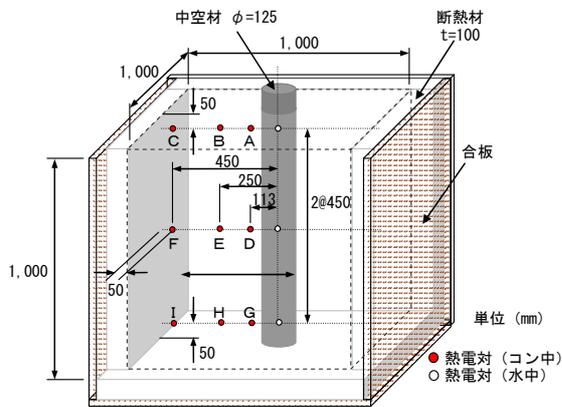
*3 国土交通省九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所所長

*4 早稲田大学 創造理工学部教授 工博 (正会員)

の鋼製（亜鉛メッキ）のものを用い、中空材内部を下端から上方へ通水させた場合の水の流量による影響を確認するため、試験体は表-3に示す4水準（中空材無し1水準、中空材有り3水準（水の流量：0, 10, 100ml/sec））とした。モデル試験体は8月下旬から9月にかけて平均気温が30℃程度の屋外に暴露し、コンクリートおよび中空材内部の水温を測定した。中空材に注水する水は水道水を使用し、水温は30℃程度であった。

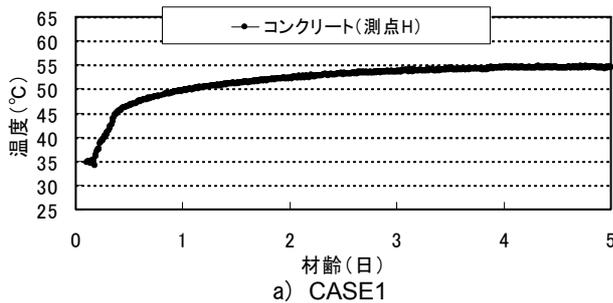
(3) 温度解析

温度解析はモデル試験体の1/4モデルとし、3次元FEM温度解析プログラムを用いて行った。解析に用いた各種物性値を表-4に示す。温度境界条件は、中空材(CASE3, 4)および断熱材に接する外型枠表面を熱伝達境界として設定した。断熱温度上昇量についてはセメントメーカーの技術資料を参考とし、練上がり温度から補正した定

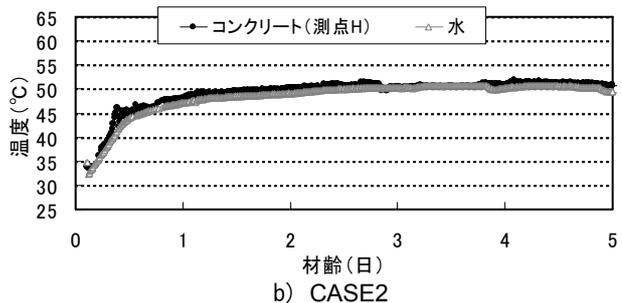


※コンクリート打設後、上面も断熱材で養生
 ※中空材無しモデルはコンクリート中の熱電対（図中最右端）はモデル中央部に設置

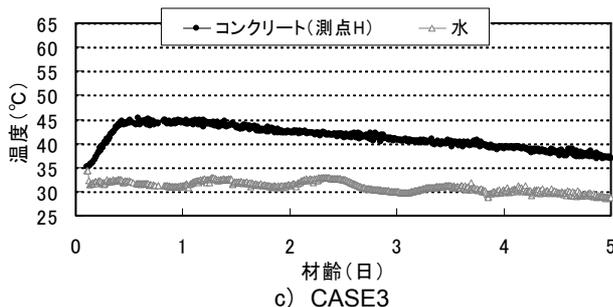
図-2 モデル試験体（中空材有り）



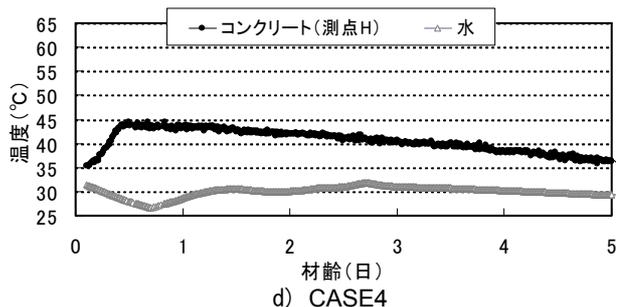
a) CASE1



b) CASE2



c) CASE3



d) CASE4

図-3 コンクリートおよび水の経時変化（中空材有り）

数を用いて算定した。また断熱材の熱伝導率については、CASE1 および CASE2（貯水した水を要素として設定）のモデルを用い、コンクリート温度の解析値と実測値が一致するよう同定して求めた。

2.2 実験結果

(1) コンクリートの内部温度

モデル試験体の測点Eにおけるコンクリートの温度履歴および中空材内部の水温履歴を図-3に示す。中空材や通水の有無により温度履歴に差異がみられ、中空材の

表-3 実験ケース

CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
中空材なし	中空材有り (流量 0ml/sec)	中空材有り (流量 10ml/sec)	中空材有り (流量 100ml/sec)

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°C	2.7	RC 示方書	
	密度	kg/m ³	2,300	RC 示方書	
	比熱	kJ/kg°C	1.15	RC 示方書	
	打設温度	°C	35.0	実測値	
	断熱温度上昇特性	K_T (°C)		42.7	メーカー技術資料
		α_T		0.511	
β_T			0.546		
	断熱温度上昇式		$Q = K_T(1 - \exp^{-\alpha_T t^{\beta_T}})$		
断熱材	熱伝導率	W/m°C	0.099	モデル同定	
	密度	kg/m ³	20.0	メーカー技術資料	
	比熱	kJ/kg°C	1.1		
水	熱伝導率	W/m°C	3.038	断面積比から算定*	
	密度	kg/m ³	1,000	理科年表	
	比熱	kJ/kg°C	4.18		
合板	熱伝達率	W/m ² °C	14	RC 示方書	

※水と中空材（鋼）の熱伝導率（理科年表）から断面積比により推定

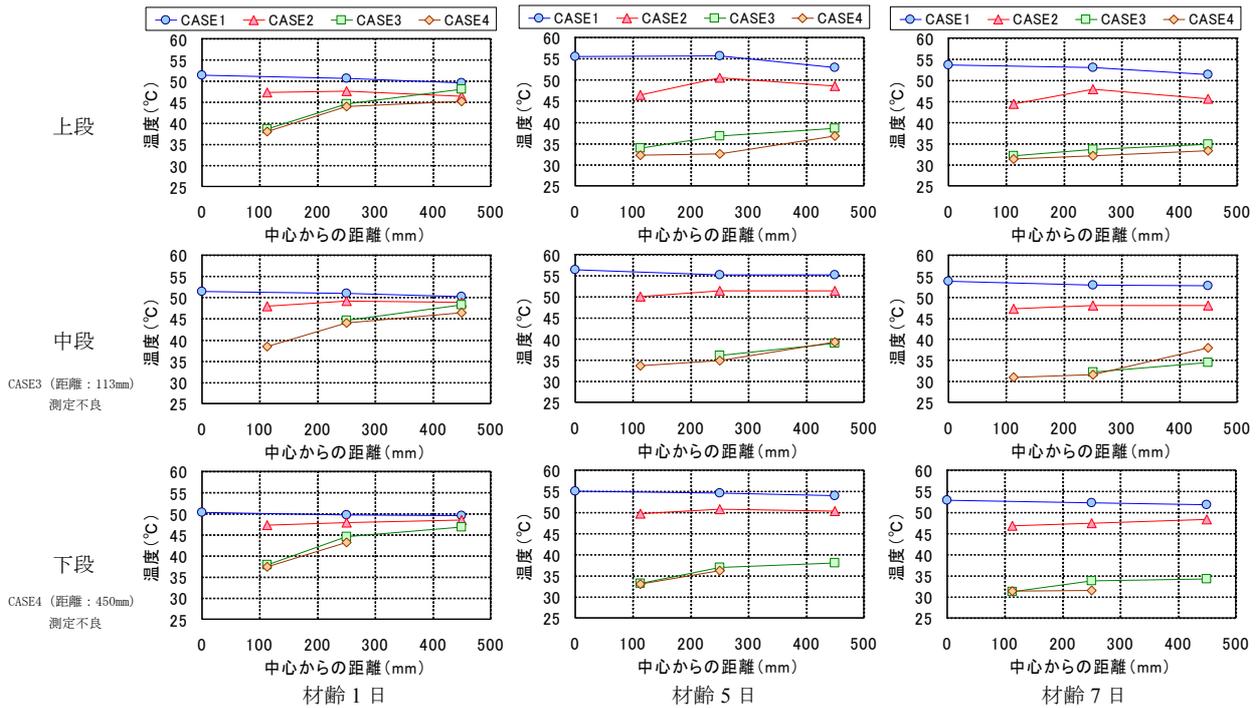


図-4 中心軸からの距離とコンクリート温度の関係

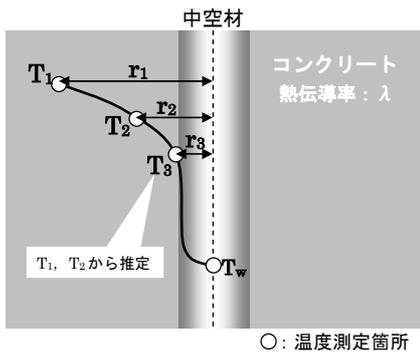


図-5 温度分布モデル

ないCASE1と比較して、最大温度はCASE2で5°C程度、CASE3およびCASE4で10°C程度低くなった。最大温度到達時の材齢はCASE2についてはCASE1とあまり差がみられなかったが、通水したCASE3およびCASE4については材齢2日目以降より下降する傾向がみられた。これはCASE3およびCASE4の場合、中空材内部の水温がコンクリート温度に追従することなくほぼ一定値であることから、放熱効果に大きく寄与したためであると考えられる。

モデル試験体内部の温度勾配を確認するため、各材齢(1, 5, 7日)における、モデル試験体の中心軸から測点までの距離と測定温度の関係を図-4に示す。コンクリート内部の熱を急激に下げた場合、放熱箇所近傍の温度のみが低下し、コンクリート内部との温度勾配が過大となることが懸念されるが、本実験で得られた結果に関しては、貯水のためのCASE2ではほとんど勾配は生じず、通水したCASE3およびCASE4については、材齢1日で

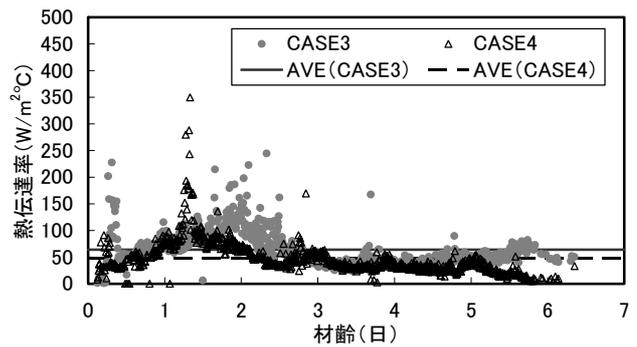


図-6 推定式から求めた熱伝達率の経時変化

10°C程度の勾配が生じるものの、材齢に伴い勾配は小さくなり、材齢3日では5°C程度であった。

なお、CASE3およびCASE4の水の流量の違いによる差異が小さかったことから、本実験の範囲では、コンクリートの発熱を抑制するためには10ml/sec以上の流量を与えればよいと判断できる。

(2) 見かけの熱伝達率の推定

中空材内部の流水による放熱効果を容易に解析へ反映させることを指向し、測定温度から見かけの熱伝達率(以下熱伝達率と称す)を推定した。推定手法は笹倉ら²⁾の手法を参考とし、図-5に示すコンクリート内部温度 T_1 , T_2 , T_3 (推定温度)および中空材内部の水温 T_w を用い、コンクリート内部温度 T_1 と T_2 を式(1)に示す関係式に代入して熱流束 q を求め、熱の収支から、式(2)に示す関係式(以下推定式と称す)より熱伝達率 η を求めた。なお式(1)中の r_1 , r_2 は測定点距離を、 λ はコンクリートの熱伝達率を示す。

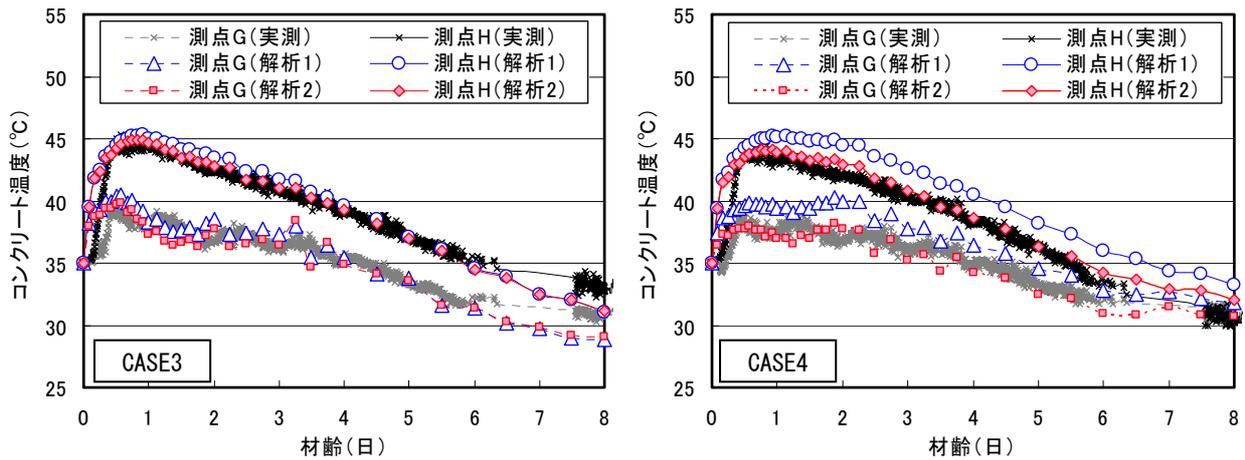


図-7 コンクリート温度の解析値と実測値の比較（モデル試験体）

$$q = \lambda \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (1)$$

$$q = \eta(T_3 - T_w)2\pi r_3 \quad (2)$$

推定した CASE3 および CASE4 の熱伝達率の経時変化を図-6 に示す。本実験で設定した水の流量における熱伝達率の差異は小さく、いずれも経時に伴い概ね 30～120W/m²°C 程度の範囲で変動した。なお後述する解析ではそれぞれの平均値（CASE3：64W/m²°C，CASE4：49W/m²°C）を適用した。

(3) 解析値と実測値の比較

推定式から求めた CASE3，CASE4 の熱伝達率を用いて温度解析を行った。コンクリート温度の解析値と実測値を図-7 に示す。なお測点については、モデル試験体中段の測点 E が断線のため測定不良であったため、下段の測点 G，H を対象とした。図に示すとおり、推定式から求めた熱伝達率を用いた場合（以下解析 1 と称す）、CASE3 では実測値との差異は小さかったものの、CASE4 については実測値よりも若干大きくなる傾向を示した。そこで本実験では、コンクリート温度の解析値と実測値を同定して熱伝達率を求め、この熱伝達率を用いて解析した結果（以下解析 2 と称す）と解析 1 の結果と比較することとした。熱伝達率の推定は、それぞれ実測水温を与えた CASE3 および CASE4 のモデル試験体の解析を行い、材齢 7 日までのコンクリート温度の解析値と実測値を同定して求めた。CASE3 および CASE4 の解析値と実測値を同定して求めた熱伝達率はそれぞれ 93W/m²°C，123W/m²°C であり、推定式から求めた場合に比べて大きくなったが、これは前述したとおり熱伝達率は経時に伴い変動し、解析では一定値（平均値）として設定していることが要因と考えられる。

以上の結果を纏めると、本実験における水の流量の違いによる熱伝達率は図-8 に示す範囲となる。

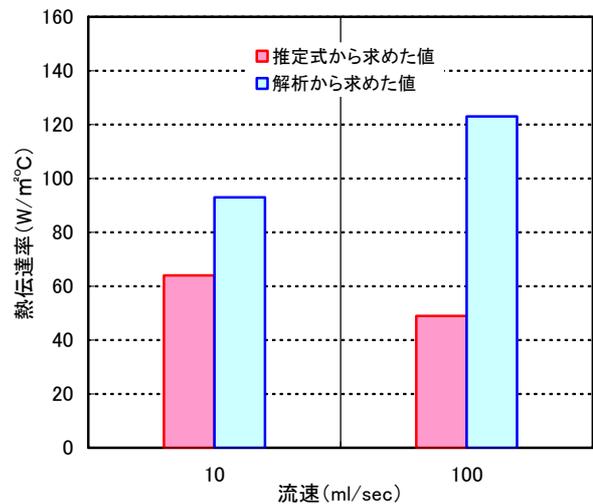


図-8 水の流量と熱伝達率の関係

3. 実構造物への適用

3.1 適用構造物

当該工法を適用した構造物は北九州市にて建設中の新若戸道路（若松側）の U 型擁壁部である。施工延長は約 35m，全高 15.0m，コンクリート打設数量は約 4,800m³ である。標準断面図を図-9 に示す。工事は平成 19 年 8 月下旬よりコンクリート打設を開始し、最終打設を平成 20 年 1 月下旬に終えている。コンクリートの配合と使用材料は前述の表-1～2 のとおりである。

工事着手前に実施した温度応力解析の結果、上部壁の収縮を底版や打設済みの側壁が拘束することによる外部拘束が卓越することが確認された。その対策としてコンクリートの分割施工により側壁 1 リフトおよび 2 リフトの温度上昇を抑えて壁全体の初期ひびきを抑制することとした。使用する中空材には、適用部位の配筋間隔から φ125mm の小口径のものを選定し、事前解析の結果から、目標ひび割れ指数（1.40 以上：ひび割れ発生確率 30% に相当）を満足する 4.5m ピッチ（縦断方向）で配置した（写真-1 参照）。また、前述したモデル試験体を用いた実験結果をもとに、中空管内は通水状態とし、放熱

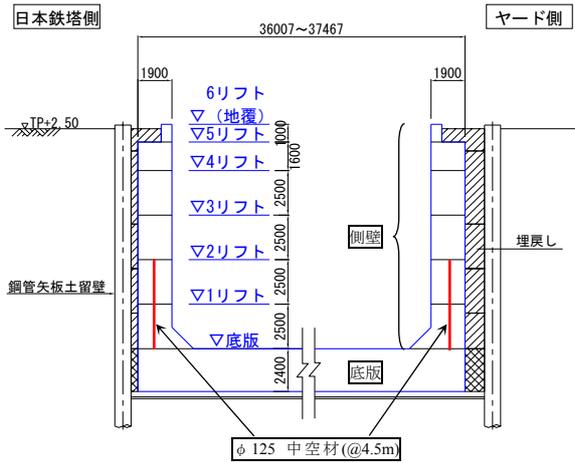


図-9 U型擁壁標準断面図（実施）



写真-1 中空材設置状況（側壁 1リフト）

効果を促進させ、さらに流出した余剰水はコンクリート上面の養生に使用した。なお中空材内部の充填・締めめは、次リフトのコンクリートを打設する際に充填し、長尺で細径の棒状パイプを用いて行った。

3.2 現場計測

当該工法の適用による効果を確認するため、施工中のコンクリート温度の測定を行った。

温度測定を行うための熱電対の設置位置は、側壁 1リフトの上層と下層各々 8箇所（計 16箇所）および側壁 2リフトの上層 8箇所（合計 24箇所）とし、中空材設置箇所付近の温度変化を観測するものである。測定位置を図-10~12に示す。なお測定結果は 3.3 にて解析した結果と合わせて示す。

3.3 FEM 温度応力解析

実施のコンクリートリフト高さ、打設月日、外気温（平均気温）等を現場計測結果と合致するように事前解析条件を見直し、解析を実施した（表-5 参照）。

中空材の熱伝達率は通水時の水の流量を 10ml/sec と設定し、小型モデル実験より、厳しい評価となる推定式から求めた $64\text{W/m}^2\text{C}$ を用いた。また、熱伝達境界の設定はコンクリート標準示方書 [施工編, 2002 年制定] に準じて表-6 のとおり設定した。

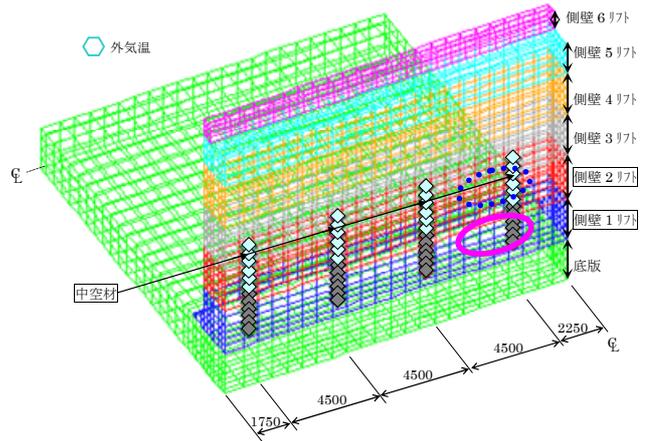


図-10 温度測定位置図（1/4 モデル鳥瞰）

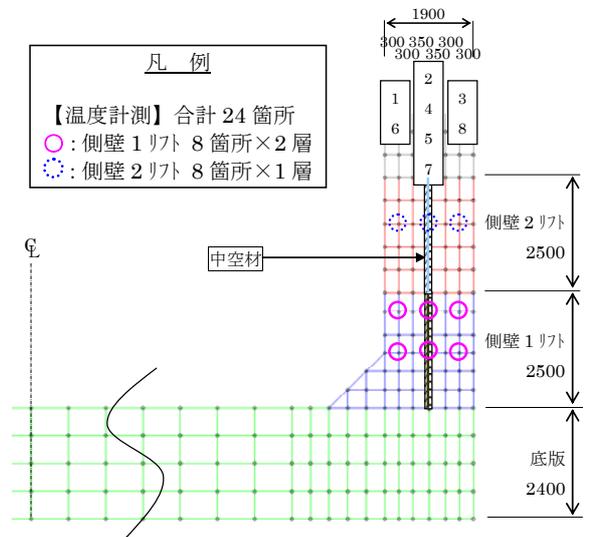


図-11 温度測定位置図（断面）

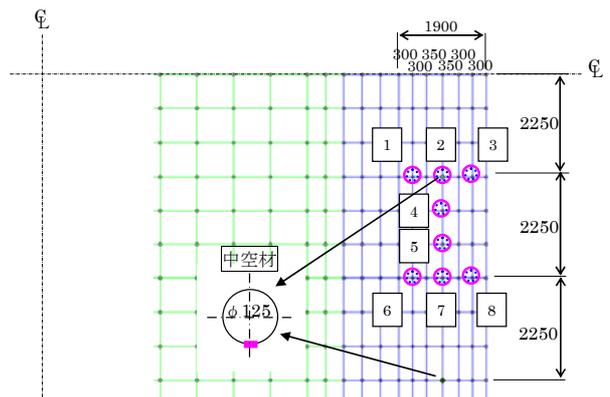


図-12 温度測定位置図（平面）

表-5 コンクリート特性値

リフト	コンクリート打設温度	終局断熱温度上昇量	温度上昇速度に関する定数	
		K_T	α_T	β_T
側壁 1リフト	31.6°C	43.430	0.476	0.553
側壁 2リフト	22.2°C	45.377	0.380	0.573

※コンクリート打設温度は現場測定値（平均）。

表-6 熱伝達境界設定

部位	期間 (材令)	養生方法	熱伝達率 (W/m ² C)	備考
壁内面	打設～1週	木製型枠	8	RC示方書の参考値
	1週～	外気	14	RC示方書の参考値
壁外面	打設～3日	木製型枠	8	RC示方書の参考値
	3日～	埋戻し土 (流動化処理土)	5	土の熱伝達率は水と同等であるため100mm以上の湛水と考える。
壁打継ぎ	打設～1週	散水	14	RC示方書の参考値
	1週～	外気	14	RC示方書の参考値
底板側面	全期間	先行捨コンクリート	2.6	先行コンと埋戻し土の合成 $1 / (1/5 + 0.5/2.7) = 2.6$
底板上面	打設～1週	湛水+養生マット	5	RC示方書の参考値
	1週～	外気	14	RC示方書の参考値
中空材内面	打設～1週	水冷却 (注水)	64	モデル実験より設定
	1週～ 次リフト	外気	14	RC示方書の参考値

表-7 ひび割れ低減効果

リフト	Case	最小ひび割れ指数	
		無対策	対策実施
側壁1リフト		1.35 (<1.40)	1.63 (≥1.40)
側壁2リフト		1.66	2.09
摘要	・目標ひび割れ指数は1.40。		

解析により算出した、当該工法を適用した場合のコンクリートの最小ひび割れ指数と無対策のものとの比較を表-7に示す。側壁1リフト、2リフトともに、当該工法を適用した場合の最小ひび割れ指数は、無対策のものに比べて向上しており、外部拘束による主応力が卓越する本構造物においても、コンクリートの分割施工法 (HTL 工法) によるひび割れ低減効果が確認できた。

4. まとめ

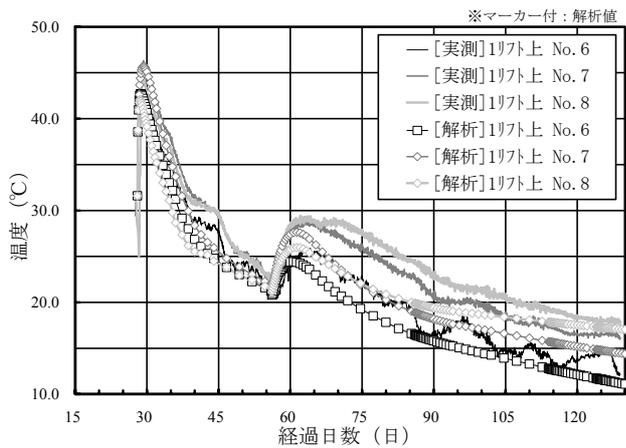
本実験および実構造物への適用で得られた知見を以下にまとめる。

- (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り、特に中空材内部に通水した場合、効果は顕著である。
- (2) 中空材内部に通水する場合、水の流量の大小による効果の差異は小さく、本実験の範囲では、10ml/sec 以上であれば十分な効果が得られる。
- (3) 通水した中空部の見かけの熱伝達率は、実測温度から熱収支により求める方法や、実測温度と解析値を同定して求める方法により推定できた。その値は経時により変動したが、平均値は前者の場合流量 10ml/sec で 64W/m²C、流量 100ml/sec で 49W/m²C、後者の場合流量 10ml/sec で 93W/m²C、流量 100ml/sec で 123W/m²Cであった。
- (4) 当該工法をマスコンクリートの実構造物に適用した場合、解析におけるひび割れ指数が向上し、実際にもひび割れが確認されていないことから、温度ひび割れの抑制に寄与することがわかった。

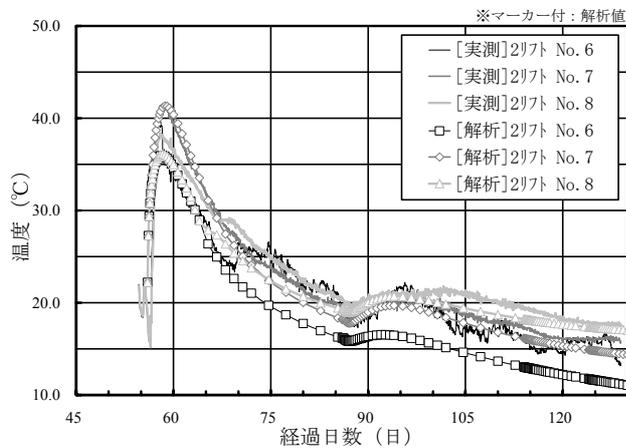
なお本実験で得られた知見に加え、今後更に当該工法を実構造物へ適用し、本実験と同様の計測を継続して行うことにより、施工性の向上や見かけの熱伝達率の設定精度の向上を目指す。

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) 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



a) 側壁1リフト(上層)



b) 側壁2リフト

図-13 コンクリート温度の解析値と実測値の比較 (実構造物)

コンクリート温度の解析値と実測値の経時変化を図-13に示す。傾向の相関は認められるが、温度は初期材齢で概ね近似した値を示しているものの、長期材齢で若干乖離する傾向がみられ、これは、モデル試験体の場合と同様、解析では熱伝達率を一定値として設定していることが要因と考えられる。また、外枠側 (No.8) の計測箇所は埋戻し (流動化処理土) の保温効果により温度低下が抑えられている。