

温度ひび割れを抑制するコンクリートの温度制御技術 －「クール&ヒート工法™」の開発と現場適用－

Method of Controlling Concrete Temperature to Prevent Thermal Cracks Development and Application of 'Cool & Heat System'

青山 達彦 柳井 修司
橋本 学 渡邊 有寿

要 約

温度ひび割れ抑制工法の一つであるパイプクーリングを応用した「クール&ヒート工法™」は、躯体内部に設置した埋設管に冷水だけでなく温水を循環させることで躯体温度を制御して、温度ひび割れを抑制するものである。開発にあたり、まず、クール&ヒート工法による温度ひび割れの抑制効果について解析的に検討し、本工法が従来のパイプクーリングよりも温度ひび割れの抑制効果に優れることを明らかにした。次に、実構造物（中空断面橋脚）に適用し、概念どおりに躯体温度を制御できることを温度計測によって確認するとともに、躯体の温度ひび割れを抑制できることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. クール&ヒート工法の基本概念
- III. 温度ひび割れ抑制効果の定量評価（解析的検討）
- IV. 埋設管の材質に関する検討
- V. 橋脚への適用
- VI. おわりに

I. はじめに

土木のコンクリート構造物は断面寸法が大きいため、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが問題となることが多い。耐久性を確保する上では、温度ひび割れの発生をできるだけ抑制することが重要であり、これまでに様々な対策が提案されてきた。それらのうち、打ち込まれたコンクリートを冷やすことで温度ひび割れを抑制する方法としてパイプクーリングがある²⁾。これは、あらかじめコンクリート躯体の内部に設置した埋設管に冷水を循環させることで、セメントの水和熱に伴うコンクリートの温度上昇を抑制する工法である。

今回、パイプクーリングを発展させた工法として、躯体温度の状態に応じ、冷水のみでなく温水も循環させて、より積極的に躯体内部の温度を制御することで温度ひび割れの発生を抑制する「クール&ヒート工法™」を開発した。本報では、本工法の効果を解析的に検討するとともに、実構造物に適用した検証結果について述べる。

II. クール&ヒート工法の基本概念

クール&ヒート工法の基本概念を Fig.1 に示す。本工法は、①クーリング（ピークカット）、②ヒーティング（徐冷）、及び③ヒーテ

ィング（保温）の三つの過程で構成される。それぞれの過程を以下に概説する。

① クーリング（ピークカット）

コンクリートの打込み前から埋設管に冷水を循環させることで、セメントの水和熱に起因するコンクリートの温度上昇量を抑制し、最高到達温度を低下させる（ピークカット）。これにより、内部拘束応力や外部拘束応力を抑制する。

② ヒーティング（徐冷）

コンクリートが最高温度に到達した後、循環させる水を冷水から温水に切り替える。放熱に伴うコンクリートの温度降下を緩やかにすることで収縮変形を抑制し、引張強度の発現が不十分な若材齢時に生じる外部拘束応力を緩和する。

③ ヒーティング（保温）

前過程に引き続き、次リフト（Fig.1 の n+1 リフト）の躯体温度が最高温度に到達するまで当該リフト（同 n リフト）の保温を継続

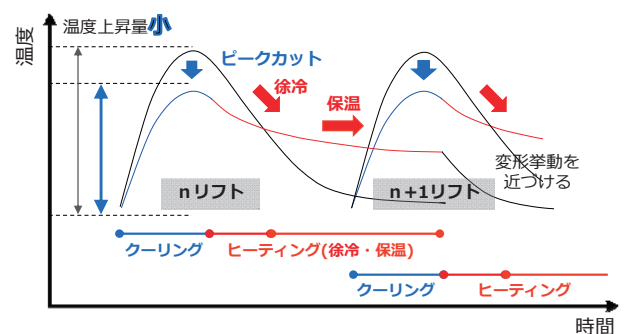


Fig.1 クール&ヒート工法の基本概念
(Concept of "Cool & Heat System")

キーワード: 温度ひび割れ, パイプクーリング, ヒーティング, 温度応力解析

Keywords: thermal cracking, pipe-cooling, pipe-heating, temperature stress analysis

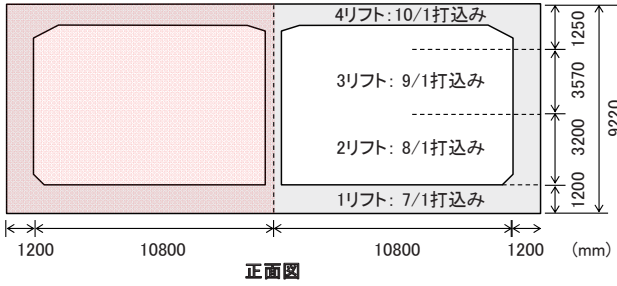


Fig.2 解析対象（ボックスカルバート）の概要図
Outline of Object for Analysis: Box-Culvert

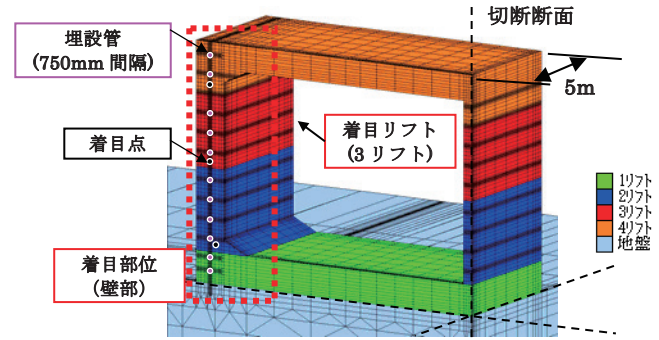


Fig.3 解析モデル
(Analysis Model)

し、躯体温度を高く保つことで $n+1$ リフト打込み後のリフト間の温度差、すなわち温度変形量の差を小さくする。さらに、 n リフトのヒーティングを $n+1$ リフトと同程度の温度となる時点で停止し、両リフトの収縮挙動を近づけ、同時に収縮変形させることで、 $n+1$ リフトに生じる外部拘束応力を緩和する。

Ⅲ. 温度ひび割れ抑制効果の定量評価（解析的検討）

本工法の温度ひび割れ抑制効果を定量的に示すために、内空幅が10.5mの大きな規模のボックスカルバートを対象として温度応力解析を実施した。ボックスカルバートの断面諸元を Fig.2 に示す。施工延長は10mであり、温度ひび割れの観点から厳しい条件となる夏の施工を想定した。

1. 解析概要

ボックスカルバートの解析モデルは、Fig.3 に示すように1/4モデルとした。埋設管は、図に記すように壁部に鉛直方向に750mm間隔で水平に配置した。解析に用いた入力値を Table 1 に示す。なお、地盤については、マスコンクリートのひび割れ制御指針¹⁾に示される一般的な地盤の物性値を用いた。検討ケースは、対策なし (Case N)、パイプクーリング (Case C)、クール&ヒート工法 (Case CH) とした。Case C、Case CH のクーリングは、15℃の冷水を打込み開始から2日間循環させる条件とし、Case CH のヒーティングは、クーリング停止後に60℃の温水に切り替えて、次リフトと同程度の温度となるまで循環させる条件とした。

2. 解析結果

ここでは、外部拘束応力が卓越する壁部に着目し、さらに壁部の中でも、クーリングとヒーティング両方の効果を評価することができる3リフト目に主眼を置いて結果を述べる。

(1) 温度履歴

3リフトの温度履歴を Fig.4 に示す。着目リフト前後の影響も示すため、2リフト及び4リフトの履歴も併せて記す。Case C、Case CH はクーリングの効果によってピークカットができています。Case CH では、ヒーティングによって温度降下が緩やかとなり、さらに、4リフトの温度降下時まで保温できており、本工法の基本概念を忠実に再現できている。

(2) 最大主応力の履歴

最大主応力の履歴の比較を Fig.5 に示す。Case N では、まず、最高温度到達後、温度降下に伴う収縮変形によって応力が生じている。次に、4リフトの最高温度到達時には、4リフトの膨張変形に引っ張られることで3.5N/mm²の最大応力が発生している。これが、

Table 1 解析入力値
(Input Value for Analysis)

項目	入力値	
打込み温度 (°C)	20	
単位セメント量 (kg/m ³)	330	
水セメント比 (%)	50	
比熱* (kJ/kg °C)	1.15	
熱伝導率* (W/m °C)	2.70	
密度* (kg/m ³)	2400	
断熱温度上昇量* (°C)	$K=53.9, \alpha=1.32, t_0=0.16$	
圧縮強度* (N/mm ²)	$\sigma_3=18.7, \sigma_7=29.5, \sigma_{28}=41.7$ (有効材齢)	
引張強度 (N/mm ²)	$f_t = 0.13 \times f_c^{0.85}$	
ヤング係数 (kN/mm ²)	$E=6300 \times f_c^{0.45}$	
ポアソン比*	0.2	
線膨張係数*	10.0	
循環条件	埋設管の表面熱伝達率(W/m ² °C)	鋼管(φ20mm, 流量30L/分)を想定; 929 ³⁾
	循環期間	クーリング: 最高到達温度から2日間ヒーティング: クーリングの停止から、次リフトの最高到達温度まで

*コンクリート標準示方書 [設計編]⁴⁾より

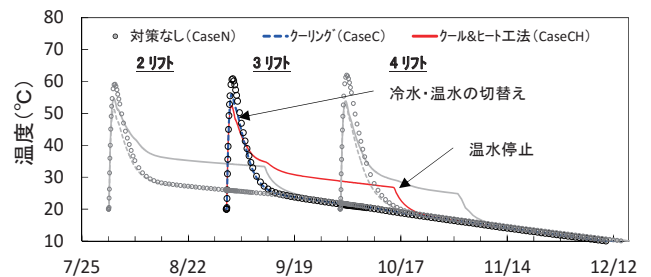


Fig.4 温度履歴 (2リフトから4リフト)
(Temperature History; 2Lift to 4 Lift)

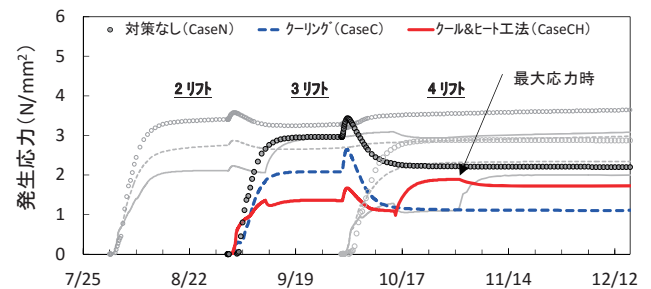


Fig.5 応力履歴 (2リフトから4リフト)
(Stress History; 2Lift to 4 Lift)

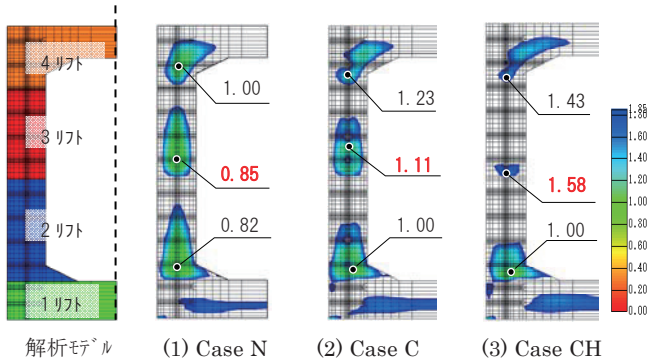


Fig.6 最小ひび割れ指数分布 (壁部)
(Distribution of Minimum Crack Index)

Case C では、クーリングによるピークカットにより最大発生応力は 2.5 N/mm^2 まで低減されている。Case CH については、本工法の過程に従って発生する応力について述べる。

① 打込みからクーリング停止まで

2 リフトのヒーティング (保温) によって、2 リフト及び3 リフトの温度変形挙動 (収縮変形) が近づき、2 リフトによる拘束力が緩和されるとともに、3 リフト自身のクーリングによって3 リフトに発生する応力を低減できている。

② クーリング停止からヒーティング (徐冷) まで

3 リフトのヒーティング (徐冷) によって、若材齢時において、温度降下に伴い発生する応力を低減できている。

③ ヒーティング (徐冷) からヒーティング終了まで

3 リフトのヒーティング (保温) 及び4 リフトのクーリングによって、4 リフトとの温度差すなわち温度変形量の差が小さくなることで、4 リフトの膨張変形によって発生する応力が低減できている。

ヒーティング停止後は、ヒーティング (保温) によって低減されていた収縮変形が進行するため応力が増大していくが、最大発生応力は 2.0 N/mm^2 に低減されているとともに、最大応力の発生時には材齢が進んでおり、引張強度が大きくなっていることから、ひび割れは生じにくくなっているものと考えられる。

(3) 最小ひび割れ指数分布

各リフトの最小ひび割れ指数分布を Fig.6 に示す。Case N に対して、Case C, Case CH では、各リフトのひび割れ指数が全体的に改善していることが確認できる。特に、Case CH において、3 リフトは、2 リフトのヒーティングの効果及び4 リフトのクーリングの効果を得られることから最も高い改善効果を示しており、Case N の 0.85, Case C の 1.11 に対して 1.58 まで改善できた。以上から、クール&ヒート工法は、従来のパイプクーリングと比較しても、より高いひび割れ抑制効果を有することが定量的に示された。

IV. 埋設管の材質に関する検討

パイプクーリングの埋設管には、一般に鋼管が用いられる。しかし、鋼管は腐食の懸念があることや、鉄筋量が多い構造物では型枠内での設置に手間がかかることが課題となる。そこで、腐食の懸念がなく、自在に曲げることができるグラウトホースとポリエチレン製可とう電線管 (以下、PE 管と称す) を埋設管に適用することを検討した (Photo 1)。これらを用いた場合の温度解析を精度よく行

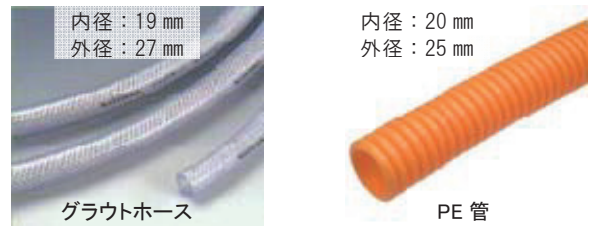


Photo 1 グラウトホースと PE 管
(Grout Pipe and Polyethylene Pipe)

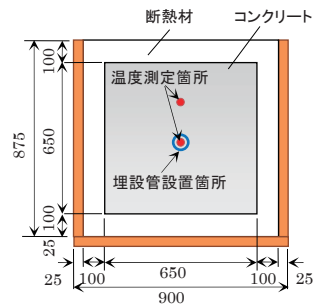


Fig.7 試験体概要
(Outline of Specimen)

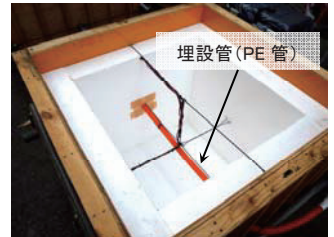


Photo 2 型枠
(Overview of Form)

Table 2 コンクリート配合
(Mix Proportion of Concrete)

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
36.1	44.5	18.0	4.5	170	471	743	942	6.0

C : 普通ポルトランドセメント, S : 山砂・砕砂, G : 砕石,
Ad : 高性能 AE 減水剤

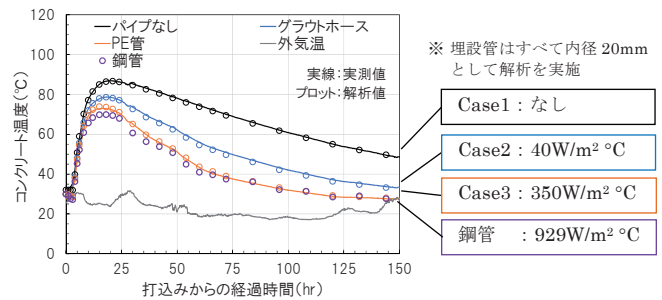


Fig.8 温度履歴と表面熱伝達率の比較
(Comparison of Temperature History and Heat Transfer Coefficient)

うためには、埋設管の表面熱伝達率を取得する必要がある。そこで、埋設管を設置した型枠内にコンクリートを打ち込み、部材内外の温度履歴を計測し、その計測結果に基づく同定解析を行った。

1. 実験概要

本実験では、Fig.7 及び Photo 2 に示すように、合板の内側に厚さ 100mm の断熱材を設置した型枠に Table 2 に示す配合のコンクリートを打ち込んだ。検討ケースは、埋設管を設置しない試験体を Case1, グラウトホース及び PE 管を設置した試験体をそれぞれ Case2, Case3 とした。埋設管は Fig.7 に示すようにコンクリート断面中心に水平に配置し、7~25°C の水を流量 30L/分で、打込み開

始から 10 日間循環させた。温度計測の位置は、Case1 は中心、Case2, Case3 は中心から 175mm 上方の点とした。

2. 同定解析による表面熱伝達率の推定

まず、Case1 の温度計測結果を用いて、コンクリートの断熱温度上昇量を推定した。次に、Case2, Case3 を対象として、埋設管の表面熱伝達率を同定した。今回の実験により求めた埋設管の表面熱伝達率を Fig.8 に記す。なお、比較用に、田邊式⁹⁾から算出した鋼管(φ20mm)の結果も併記する。PE 管はグラウトホースに比べて表面熱伝達率が大いことから熱交換効率が高く、効率的にコンクリート温度をコントロールできるものと判断された。また、鋼管の表面熱伝達率は PE 管と比較して非常に大きい、コンクリート温度の低減効果は、今回の実験の範囲では両者に大きな差はなく、PE 管でも十分な効果が得られるものと判断された。

V. 橋脚への適用

解析的な検討の結果を基に、クール&ヒート工法を実際の橋脚工事に適用し、その効果について検証した。当該橋脚は、Fig.9 に示すように中空断面ながらマスコンクリートであること、単位セメント量が多い配合 (Table 3) であることに加えて、夏期 (6 月～9 月) に施工されることから、温度ひび割れの発生が懸念され、温度ひび割れ抑制対策として本工法が採用された。適用に際し、コンクリート標準示方書 (設計編)⁹⁾に従った温度応力解析を事前に行い、クール&ヒート工法を適用することで、目標とした温度ひび割れ指数 1.0 を上回ることを確認した⁵⁾。

1. 施工方法

(1) 埋設管の設置箇所

本工法は、橋脚の 2 リフト目から 7 リフト目に適用した (Fig.9)。埋設管には、施工性と表面熱伝達率の観点から PE 管を採用した。PE 管は、Fig.9 に示す位置に、鉛直方向に 500mm～750mm 間隔で水平に設置した。PE 管の設置概要を Fig.10 に、設置状況を Photo 3 に示す。中空断面となる 2 リフト目から 5 リフト目では、壁部の中心に設置し、充実断面となる 6 リフト目及び 7 リフト目では図に示すように、水平方向に渦巻状に 750mm 間隔となるように設置した。

(2) 水の循環

水の循環設備の概要を Fig.11 及び Photo 4 に示す。クーリングでは、4m³の貯水タンクを備えたチラーユニットを用いて 10℃程度の冷水を製造し、ヒーティングでは、温度調節機能付きの投込みヒータを用いて 60℃程度の温水を製造した。これらは、チューブ式スクイーズポンプを用いて流量 15L/分で循環させた。クーリングは、打

込みと同時に開始し、コンクリートが最高温度に到達した時点から、さらに 10 時間が経過するまで循環させた。ヒーティングは、クーリング停止後から循環を開始した。なお、現場での循環設備は 1 系統としたため、次リフト打込み時にヒーティングを停止し、次リフトのクーリングに切り替えて順次使用した。また、5 リフト目の打込みは、比較的手間を要するハンチ部の型枠の組立作業や夏期休暇を挟み、4 リフト目の打込みから 1 か月後の計画であったため、ヒーティングを一時中断し、5 リフト目打込みの 2 日前から再開した。

2. 温度ひび割れ低減効果の検証

本工法の温度ひび割れ抑制効果を、全リフトで行った温度計測の結果と事後の温度応力解析によって検証した。

(1) 解析概要

解析において、水の循環過程による温度変化 (移流拡散現象) を考慮するために、橋脚全体をモデル化した。Table 4 に解析条件 (入力値) を示す。要因は、対策を実施しない場合 (Case N) 及びクール&ヒート工法 (Case CH) とした。

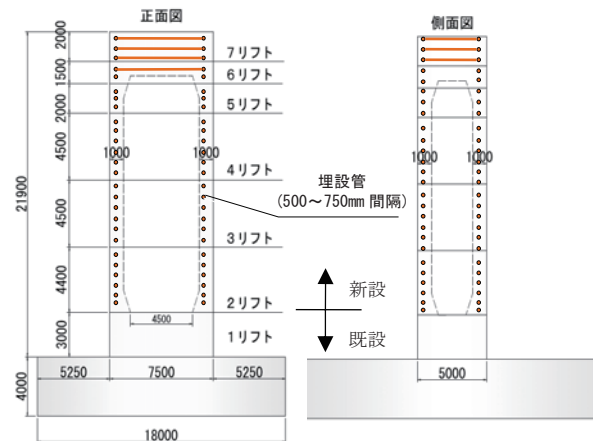


Fig.9 橋脚 構造一般図 (Outline of Bridge Pier)

Table 3 コンクリート配合 (Mix Proportion of Concrete)

W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
42.5	37.3	8.0	4.5	165	388	650	1120	4.27

C: 普通ポルトランドセメント, S: 山砂, G: 砂利, 砕石, Ad: AE 減水剤 (標準型)

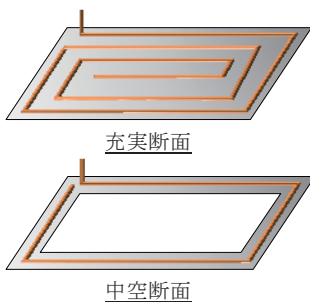


Fig.10 PE 管設置概要 (Outline of Pipe Location)



Photo 3 PE 管設置状況 (Pipe Location)

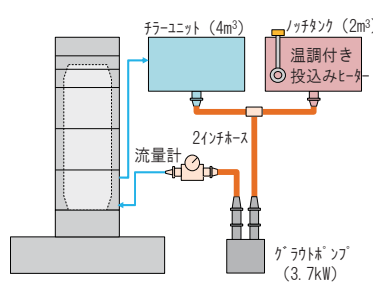


Fig.11 水の循環設備概要 (Outline of Circulation System)



Photo 4 水の循環設備 (Circulation System)

Table 4 解析入力条件
(Input Value for Analysis)

項目		2リフト	3リフト	4リフト	5リフト	6リフト	7リフト	備考
打込み日	—	6月20日	7月9日	7月23日	8月22日	9月4日	9月15日	—
打込み温度	°C	23.1	25.1	26.9	28.2	27.9	26.6	実測値
比熱	kJ/kg °C	1.28						同定解析より
熱伝導率	W/m °C	2.80	同左	同左	同左	同左	同左	同定解析より
密度	kg/m ³	2323						実測値
断熱温度上昇量	°C	$K=55.0$ $\alpha=1.64$ $\beta=1.00$ $t_0=0.12$	$K=54.9$ $\alpha=1.74$ $\beta=1.00$ $t_0=0.10$	$K=54.8$ $\alpha=1.84$ $\beta=1.00$ $t_0=0.08$	$K=54.8$ $\alpha=1.91$ $\beta=1.00$ $t_0=0.08$	$K=54.8$ $\alpha=1.90$ $\beta=1.00$ $t_0=0.08$	$K=54.8$ $\alpha=1.83$ $\beta=1.00$ $t_0=0.08$	5リフト目の簡易断熱上昇試験結果 (Fig.12) を, セメント総合技術資料を参考に補正
圧縮強度	N/mm ²	Fig.10						実測値
引張強度	N/mm ²	Fig.11						圧縮強度より推定
ヤング係数	kN/mm ²	Fig.12						圧縮強度より推定
ポアソン比	—	0.2	同左	同左	同左	同左	同左	JCI マスコン指針より
線膨張係数	—	10.0						JCI マスコン指針より
自己収縮	—	考慮						JCI マスコン指針より
乾燥収縮	—	非考慮						—

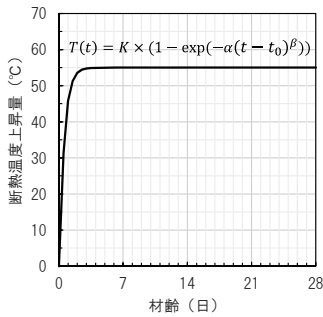


Fig.12 断熱温度上昇量 (5リフト)
(Heat Conductivity; 5 Lift)

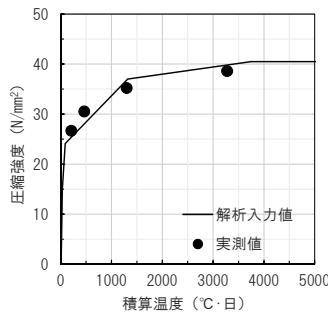


Fig.13 圧縮強度
(Compressive Strength)

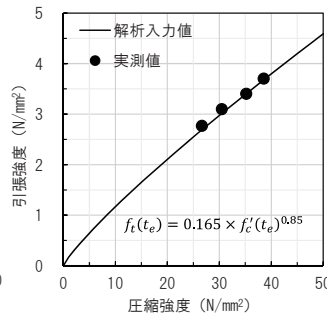


Fig.14 引張強度
(Tensile Strength)

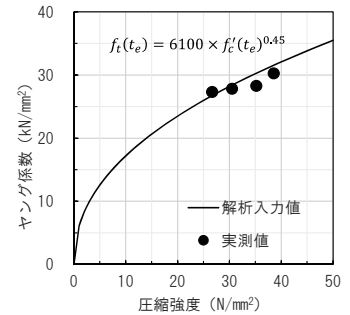


Fig.15 ヤング係数
(Young's Modulus)

(a) コンクリートの熱特性

5リフト目のコンクリートの熱特性 (断熱温度上昇式, 比熱, 熱伝導率) は, 打込みの際に実施したコンクリートの簡易断熱温度上昇試験⁶⁾によって定めた (Fig.12)。その他のリフトは, セメント総合技術資料⁷⁾を参考に, 打込み温度によって補正した。

(b) 強度発現

強度発現については, 簡易断熱温度上昇試験と同条件で養生した供試体の圧縮強度と積算温度の関係式を入力値とした (Fig.13)。また, 引張強度及びヤング係数は, 簡易断熱温度上昇試験の試験値に合うように, コンクリート標準示方書 (設計編) に示される圧縮強度をパラメータとした関係式を Fig.14, Fig.15 に示すように補正して定めた。

(c) その他の物性

ポアソン比, 線膨張係数, 自己収縮の影響についてはマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 に従い設定した。乾燥収縮の影響は考慮しないものとした。また, 各リフトの打込み日, 打込み温度及び脱型時期は, 実施工に合わせて設定した。外気温は, 現場の温度計測結果を用いた。

(d) 水の循環

クーリング及びヒーティングの温度は, 実施工において, コンクリート躯体に流入する直前 (型枠際) で測定した埋設管内の水温を用いた。PE 管の表面熱伝達率は, IV章に示した実験では流量 30L/分の場合の値として 350W/m²°C であったが, 実施工では流量 15L/

分で循環させたことから, 田邊式における流量と表面熱伝達率の関係式を参考に補正し, 174W/m²°C に設定した。

(2) 検証結果

まず, 温度履歴の結果について, 3リフト目及び4リフト目を例に取り上げて検証する。解析から算出された Case N の温度履歴と実施工での実測温度を Fig.16 に示す。Case N と比較して, 実施工では, 3リフト目及び4リフト目ともに, クーリングによって最高到達温度を低減できている。また, クーリング終了後にヒーティングに切り替えることによって, コンクリート温度の徐冷及び保温ができている。以上から, 実施工でも基本概念どおりに躯体温度を制御できることが確認された。

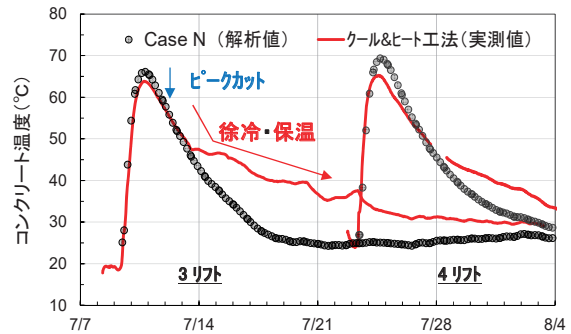


Fig.16 温度履歴の比較
(Comparison of Temperature History; 3,4 Lift)

次に、Case N 及び Case CH における、各リフトの最小ひび割れ指数分布の結果を Fig.17 に示す。図に示すように、クール&ヒート工法を適用することで、3 から 7 リフト目において、ひび割れ指数が改善し、目標とした 1.0 以上を満足する結果となった。特に、外部拘束応力が卓越する各リフトの下部部（打継目の直上）において改善できている。また、ひび割れ指数が最小となる 3 リフト目において、ひび割れ指数をひび割れ発生確率に換算した場合、発生確率は 50% となるが、施工した橋脚にひび割れは生じておらず、クール&ヒート工法によって温度ひび割れを防止することができたものと考えられる。

VI. おわりに

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) クール&ヒート工法のひび割れ抑制効果は従来のパイプクーリングよりも高いことが、ボックスカルバートや橋脚を対象とした温度応力解析によって確認された。
- (2) 実構造物においても基本概念どおりにコンクリート躯体の温度を制御できることが確認された。
- (3) 実構造物においてもひび割れ抑制効果が確認された。

本工法は、配合変更や膨張材の使用など、材料による対策ができない場合、パイプクーリングでの温度ひび割れ対策では不十分な場合の解決策として有効な手法であると思われ、施工の一助となれば幸いである。今後の課題としては、長期間実施するヒーティングのランニングコスト（温水の製造・循環）が高いことが挙げられるため、その改善に努力していく所存である。

参考文献

- 1) たとえば、日本コンクリート工学会；マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.11, pp.41-66.
- 2) 溝淵利明；マッシュなコンクリート構造物のパイプクーリングによる熱除去効果及びひび割れ抑制効果に関する研究, 博士論

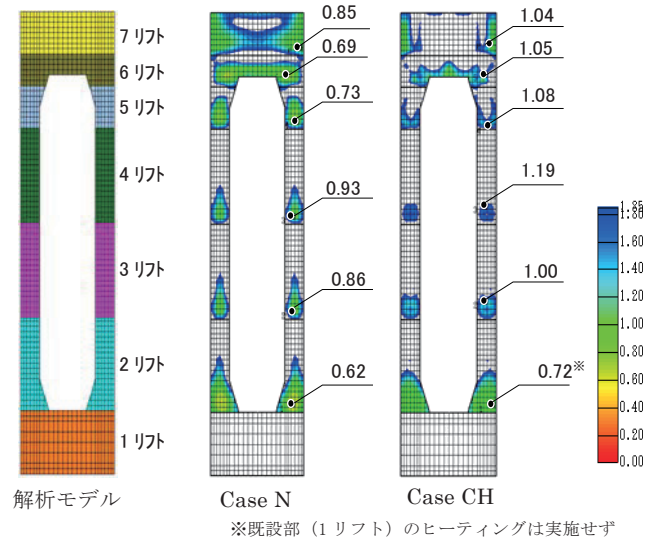


Fig.17 最小ひび割れ指数分布

(Distribution of Minimum Crack Index)

文, 2000.5.

- 3) 田邊忠顕ほか；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 343 号, 1984.3.
- 4) 土木学会；コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3, pp.303-318.
- 5) 村田和也ほか；冷温水の通水による新しい温度ひび割れ抑制工法の橋脚への適用, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.9.
- 6) 室野井敏之ほか；簡易断熱容器の形状が断熱温度上昇特性の推定に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.7, pp.1283-1287.
- 7) 太平洋セメント株式会社；セメント総合技術資料.

Method of Controlling Concrete Temperature to Prevent Thermal Cracks Development and Application of 'Cool & Heat System'

Tatsuhiko Aoyama, Shuji Yanai, Manabu Hashimoto and Yuji Watanabe

The pipe cooling method has been used since ancient times to prevent thermal cracks in concrete structures. An improved method, the 'Cool & Heat System,' has just been developed, in which the temperature of the concrete is controlled by circulating not only cold water but also hot water through a pipe placed in the structural member. The following were considered for the development of this method. First, analytical studies based on the concept were carried out to determine its effectiveness in preventing thermal cracks. Then the method was applied in actual construction work on a bridge pier and it was shown to have controlled the temperature of structural members as predicted, with no thermal cracks occurring in the members. Moreover, an accuracy analysis taking into consideration the field conditions and the actual properties of the concrete was conducted, and it showed the 'Cool & Heat System' to be more effective than the conventional pipe cooling method in preventing thermal cracks. This paper summarizes the results of these studies.