

論文 クーリングおよびヒーティングを用いた温度ひび割れ抑制技術に関する効果の定量評価

高木英知*1・芦澤良一*2・柳井修司*3・横関康祐*4

要旨：温度ひび割れを抑制する対策として、躯体コンクリートの温度上昇や温度降下に応じて部材内に配置した通水管に冷水あるいは温水を通し、クーリングとヒーティングによって躯体温度を制御する「冷・温水通水工法」について、実大規模の試験体を用いて効果を定量的に評価した。その結果、本工法の適用により、実大規模の部材に生じるひずみおよび発生応力が低減し、ひび割れを抑制することができるとともに鉄筋に発生する応力の低減にも寄与することを定量的に確認した。

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

1. はじめに

コンクリート構造物が所定の性能を発揮するためには、施工時に生じる有害なひび割れを抑制することが必要である。特に、マスコンクリートに生じる温度ひび割れは、部材を貫通して発生する 경우가多く、水密性や鋼材腐食に伴う耐久性の低下に繋がる。このため、実施工では、材料、配合および施工における様々な観点から温度ひび割れを抑制するための対策が講じられている。その一つとして、パイプクーリングが挙げられる。パイプクーリングは、部材内にあらかじめ設置した通水管に冷水を通すことでコンクリートの温度上昇量を低減し、温度ひび割れの発生を抑制する方法である。これを基に筆者らは、コンクリートの温度上昇時に冷水を通すだけでなく、温度降下時には温水を通すことで徐冷・保温し、コンクリート構造物の温度をコントロールして温度ひび割れの抑制効果を高めた「冷・温水通水工法」を実用化している¹⁾。本工法については、これまでに解析的な検討や実構造物への適用によって、その効果を検証してきた¹⁾²⁾。しかしながら、同一条件下で本工法の有無による効果を直接的に比較した事例はない。そこで、ボックスカルバートの底版と中壁を模擬した実大規模の試験体を同一条件下で作製し、本工法の有無を要因としてひび割れ抑制効果を定量化するとともに部材に生じるひずみおよび発生応力の低減効果についても考察を加えた。

2. 冷・温水通水工法の基本概念

冷・温水通水工法の基本概念を図-1に示す。本工法は、1.クーリングによる最高温度のピークカット、2.ヒーティングによる徐冷、および3.ヒーティングによる保温の3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)

通水管に冷水を通すことで、コンクリートの温度上昇を抑制し、最高温度を低下させる。

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、冷水の通水を停止、または温水による給熱を行いコンクリートの温度降下を緩やかにして急激な収縮変形を抑制する。

3. ヒーティング (保温)

次(最終)のリフト(n+1リフト)のコンクリート温度が最高温度に到達するまで当該リフト(nリフト)の給熱を継続し、(n+1リフト)打込み後のリフト間の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)と同程度の温度になる時点で停止し、両リフトの温度収縮挙動を近づけて同時に変形させることで(n+1リフト)に生じる外部拘束力を緩和する。

以上のように、本工法は1系統の通水管に対してクーリングだけでなくヒーティングを行うことでコンクリート構造物の温度を積極的にコントロールすることに特長を有する。

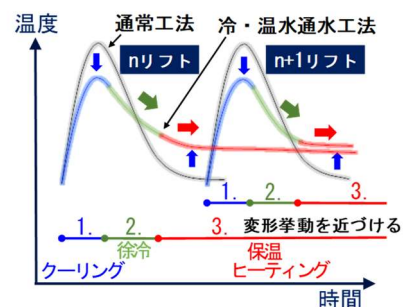


図-1 冷・温水通水工法の基本概念

*1 鹿島建設(株)	技術研究所	土木材料グループ	研究員	修士(工学)	(正会員)
*2 鹿島建設(株)	技術研究所	土木材料グループ	主任研究員	修士(工学)	(正会員)
*3 鹿島建設(株)	土木管理本部	土木技術部	担当部長	修士(工学)	(正会員)
*4 東洋大学	理工学部	都市環境デザイン学科	教授	博士(工学)	(正会員)

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

図-2 に試験体の形状と寸法を示す。試験体は、ボックスカルバートの底版および中壁を模擬したものである。底版の寸法は厚さ 1.2m、幅 9.0m、延長 9.0m であり、高さ 0.8m のハンチを設けた。また、壁の寸法は厚さ 1.5m、高さ 6.0m、延長 9.0m とし、これを 2 リフトに分けて構築した。鉄筋は SD345 を使用し、主筋および配筋にはそれぞれ D32 および D16 を 250mm 間隔で配置した（鉄筋比 $p=0.11\%$ ）。

表-1 および表-2 に、コンクリートの使用材料および配合をそれぞれ示す。使用したコンクリートは、高炉セメント B 種を用いた水セメント比 52.2%のものとした。目標スランプと目標空気量はそれぞれ $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。試験体は 2 体作製し、1 体は本工法を適用せず（以下、Case N とする）、残り 1 体には本工法を適用した（以下、Case CH とする）。

3.2 事前温度応力解析

本工法を適用するにあたり、これまでの実績りに基づき通水管の配置、通水温度、流量および通水期間を設定し、それらの妥当性を事前解析により確認した。解析は、Case N と Case CH に加えクーリングのみを適用した場合（以下、Case C とする）についても同一条件で実施した。

(1) クーリングおよびヒーティングの仕様

図-3 に通水管の配置を示す。通水管には、内径 $\Phi 20\text{mm}$ の炭素鋼管（SGP 管）を用い、鉄筋と干渉しないように底版では鉛直方向に 500~600mm の間隔、水平方向に 500~750mm の間隔で、壁では鉛直方向に 500~750mm の間隔、水平方向に 500mm の間隔で、せん断補強筋の位置に合わせて配置した。冷水および温水の設定温度はそれぞれ 10°C および 35°C とし、流量は 25L/分とした。クーリングは、コンクリートの打込み時から開始し、クーリング停止後の温度の再上昇を回避するために最高温度に到達してから 12 時間が経過するまで行うこととした。また、ヒーティングは、クーリングの停止後、試験体の温度が 35°C まで降下してから開始し、3 リフト目のコンクリート温度が 35°C になるまで継続した。その後、3 リフト目のコンクリート温度が 35°C になった時点から、2 日間で全てのリフトの水温を 35°C から 30°C まで順次降下させて通水を終了するものとした。

(2) 解析の入力条件

表-3 に 3 次元有限要素法による温度応力解析の入力値を示す。入力値はマスコンクリートのひび割れ制御指針⁴⁾に基づき、気温は気象庁の過去 3 年間の日平均気温を用い、コンクリートの打込み温度は月平均気温に 5.0°C 加えた値を用いた。また、型枠はせき板とし、材齢 7 日後に取外しとした。移流拡散を考慮した通水管の表面熱

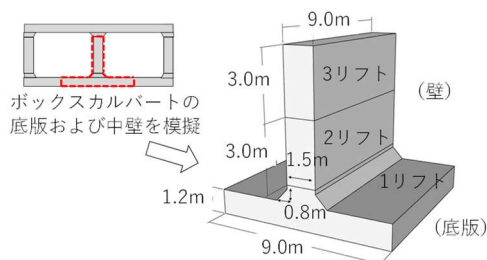


図-2 試験体の概要

表-1 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	地下水
セメント	C	高炉セメント B 種、密度： 3.04g/cm^3 、比表面積： $3750\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S1	砕砂、表乾密度： 2.63g/cm^3 、粗粒率：3.10
	S2	山砂、表乾密度： 2.59g/cm^3 、粗粒率：1.70
粗骨材	G	砕石、表乾密度： 2.65g/cm^3 、実積率：59.0%
AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸塩（標準形）

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)					
			W	C	S1	S2	G	Ad
52.2	12.0	4.5	168	322	541	293	960	3.22

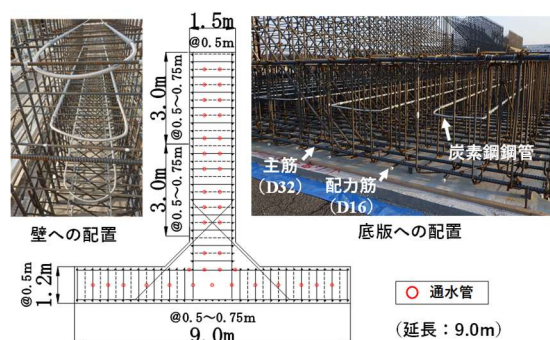


図-3 通水管の配置状況（試験体の断面図）

表-3 解析入力値

項目	入力値
比熱* ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)	1.15
熱伝導率* ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	2.70
密度 (kg/m^3)	2289
断熱温度上昇量 ($^\circ\text{C}$)	$Q_s=48.0$, $r_{AT}=0.70$, $s_{AT}=1.20$, $t_{0,Q}=0.0^{(3)}$
圧縮強度* (N/mm^2)	$a=7.00$, $b=0.75$, $S_r=0.42$
引張強度* (N/mm^2)	$f_t(t_c)=0.13 \times f_t(t_c)^{0.85}$
有効ヤング係数* (kN/mm^2)	$E_c(t_c)=6300 \times \Gamma_t(t_c)^{0.45}$
ポアソン比*	0.2
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	11.9
せき板の熱伝達率 ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	8.0
通水管の熱伝達率 ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	炭素鋼鋼管（SGP 管 $\Phi 20\text{mm}$ 、流量 25L/分）： $782^{(5)}$

*2016 年制定 マスコンクリートのひび割れ制御指針より⁴⁾

伝達率は、田邊らの算定式⁵⁾より算出した $782\text{W/m}^2\text{C}$ を用いた。

(3) 解析結果

図-4 に、解析より得られた各リフトにおける断面中心の温度履歴を示す。Case C および Case CH の最高温度は、打込み後のクーリングにより 1 リフト目で 37.9C 、2 リフト目で 39.5C 、3 リフト目で 42.7C となり、Case N に比べて 15C 程度低減した。また、クーリング停止に伴う温度の再上昇はほとんどない解析結果となった。その後、Case N や Case C では、コンクリートの温度は外気温まで低下するのに対して Case CH では、ヒーティングへ切り替えることでコンクリート温度を概ね 30C に保持している。また、最後に、各リフトのヒーティングを同時に停止することで、全リフトのコンクリートの温度が概ね同じように低下することを確認した。図-5 に各ケースにおける最小ひび割れ指数を示す。Case N に比べて Case C ではクーリングによる最小ひび割れ指数の向上が確認される。さらに Case CH ではクーリングだけでなくヒーティングによる効果が確認でき、最小ひび割れ指数は、各リフトとも Case CH > Case C > Case N の順で大きくなる結果となった。これらより、通水管の配置、通水温度、流量および通水期間が妥当であると判断し、この仕様を本実験に適用することとした。

3.3 試験体の施工

(1) クーリングおよびヒーティングに関する設備

クーリングおよびヒーティングに用いる冷水および温水の温度調整には、それぞれ 67.0kW 級のチラーユニットおよび 5.0kW 級の温度調整機能付きの投込みヒーターを用いた。

(2) コンクリートの打込み、締固め、脱枠

試験体の構築は、表-4 に示すように 3 月から 5 月にかけて底版および壁を 3 リフトに分けて施工した。コンクリートは、ブーム付きポンプ車を用い、底版では 1 層あたりの高さを $20\sim 50\text{cm}$ とした 3 層で、壁では 1 層あたりの高さを 50cm とした 6 層で打ち込んだ。締固めには、 $\Phi 50\text{mm}$ のバイブレータを用いた。また、再振動として $\Phi 40\text{mm}$ のバイブレータを主筋の内側に、かつ $\Phi 30\text{mm}$ のバイブレータをかぶりにかけた。締固め時間は 1 箇所あたり約 10 秒とし、挿入間隔は 50cm とした。型枠にはせき板を用い、材齢 7 日で取外しとした。

3.4 計測項目

図-6 に計測器の配置図を示す。本実験では、底版には熱電対のみを、壁には熱電対、埋設型コンクリートひずみ計、有効応力計および鉄筋ひずみ計を設置した。熱電対は、各リフトのうち事前解析で最も温度が高くなった断面中心とかぶり（表面から 80mm の位置）に設置した。埋設型コンクリートひずみ計および有効応力計は、

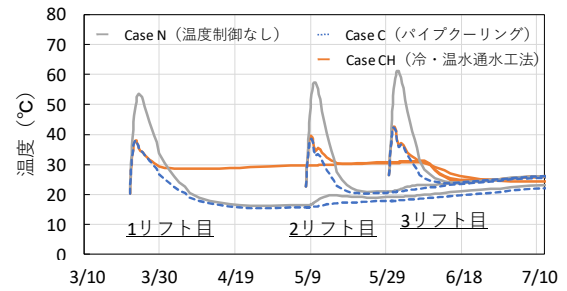


図-4 コンクリートの温度履歴（事前解析）

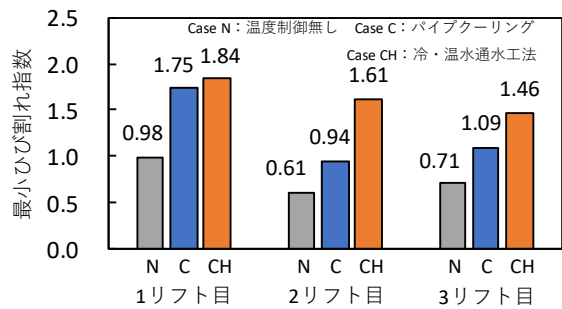


図-5 最小ひび割れ指数

表-4 打込み日と外気およびコンクリート温度

リフト No.	打込み日	高さ (m)	日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)	打込み温度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	3月22日	1.2	17.8	19.0~23.9
2	5月8日	3.0	16.3	23.5~25.8
3	5月30日	3.0	21.4	26.7~28.6

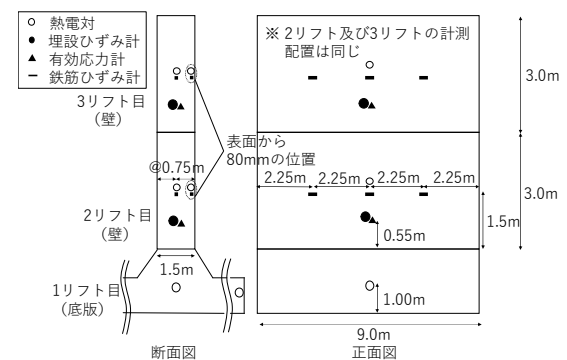


図-6 計測工の配置図

事前解析で最も応力が大きくなったリフト下端から高さ 0.55m となる断面中心に設置した。鉄筋ひずみ計は、試験体の延長 9.0m を 4 等分する位置の断面中心およびかぶりに配力方向（延長 9.0m の方向）の鉄筋に沿わせて設置した。また、脱枠から 1 回/日の頻度で、目視によりひび割れを観察し、ひび割れが発生した場合にはひび割れの位置、幅および長さを記録した。

4. 実験結果

4.1 ひび割れの発生状況

Case N では図-7 に示すように、2 リフト目および 3

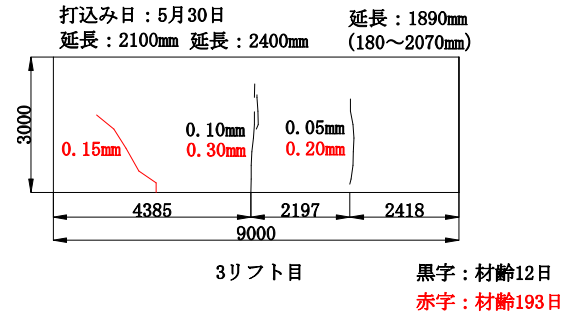
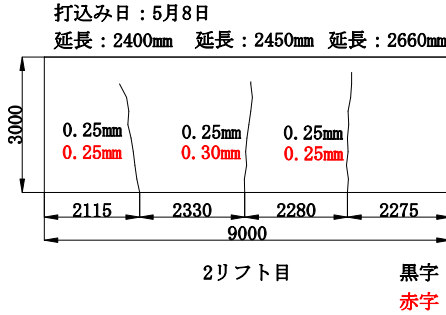


図-7 Case Nにおけるひび割れの発生状況（正面図）

リフト目において材齢 12 日に温度ひび割れの発生を確認した。2 リフト目では、試験体の延長 9.0m を 4 等分するように 3 本のひび割れが鉛直方向に確認され、最大ひび割れ幅は 0.25mm であった。また、3 リフト目では、試験体の延長 9.0m のうち中心に 1 本とそのひび割れと試験体端部の中間に 1 本のひび割れが鉛直方向に確認され、最大ひび割れ幅は 0.10mm であった。その後、2 リフト目では材齢 215 日において、最大ひび割れ幅は 0.30mm となり、3 リフト目では材齢 193 日において確認した際には、ひび割れが新たに 1 本発生し、最大ひび割れ幅は 0.30mm となった。これは、乾燥や外気温の低下による影響であると考えられる。一方で、本工法を適用した Case CH では、いずれのリフトにおいても温度ひび割れは全く認められず、高いひび割れ抑制効果があることが確認された。

4.2 コンクリートの温度履歴

図-8 に、各リフトにおける断面中心の温度履歴を示す。Case N の最高温度は、1 リフト目で 59.0℃、2 リフト目で 64.5℃、3 リフト目で 75.1℃となった。一方で、Case CH の最高温度はクーリング（通水温度は、10.5～16.8℃）により 1 リフト目で 42.4℃、2 リフト目で 40.8℃、3 リフト目で 50.5℃となり、図-9 に示すように Case N に比べて最高温度が 16.6～24.6℃と大幅に低減した。また、Case CH では、クーリングによって最高温度が低減することにより、ヒーティング開始までの温度低下の速度が Case N よりも緩やかになり、その降下速度は Case N の 4.8℃/日程度から 2.0℃/日程度と半減する結果となった。その後、Case N では、コンクリートの温度が外気温まで低下するのに対して、Case CH では 3 リフト目の打込み後に、全リフトのヒーティング（通水温度は、34.6～37.2℃）を停止することにより、コンクリート温度は 30℃程度から外気温まで全リフト同時に降下した。

図-10 に断面中心とかぶりにおける内外温度差の最大値を示す。同図より、Case N の内外温度差は、1 リフト目で 23.4℃、2 リフト目で 18.1℃、3 リフト目で 22.6℃であるのに対して、Case CH では、1 リフト目で 8.0℃、

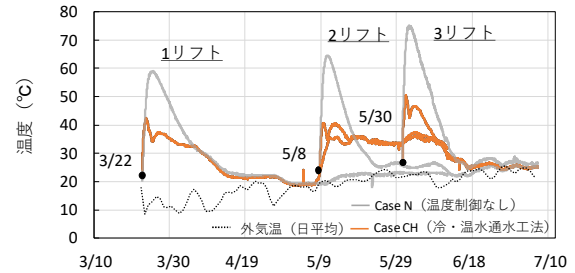


図-8 コンクリートの温度履歴（実測値）

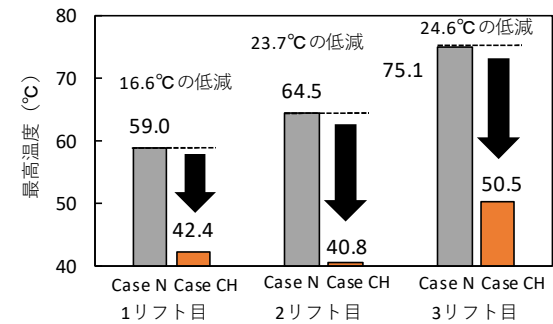


図-9 最高温度の低減効果

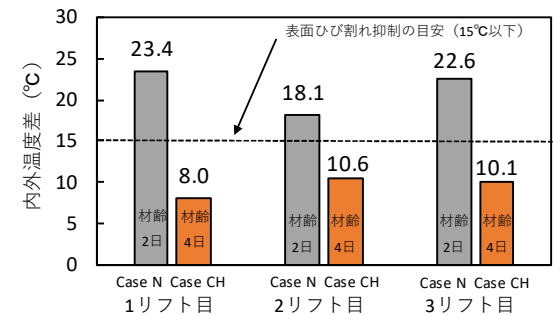


図-10 内外温度差の低減効果

2 リフト目で 10.6℃、3 リフト目で 10.1℃と Case N に比べて内外温度差が小さく、表面ひび割れ抑制の目安となる 15℃以下⁴⁾の内外温度差とすることができた。これはクーリングによって断面中心の最高温度が低減されたためであり、クーリングは材齢初期の内外温度差に起因する内部拘束の緩和にも有効であるものと考えられる。

4.3 ひずみおよび発生応力の履歴

(1) コンクリートのひずみ

図-11 に材齢初期のコンクリートの全ひずみの履歴を示す。Case N では、2 リフト目および3 リフト目において、コンクリートの温度上昇に伴い膨張側へひずみが推移し、その後、温度降下に伴い各リフトともそれぞれ収縮側へ推移した。また、収縮側へ推移する過程で急激な収縮ひずみの増大が確認された。これは、ひび割れの発生によるものと考えられる。一方で、同図に示す1.から4.は、Case CH における1.クーリング期間、2.クーリング停止後の徐冷期間、3.コンクリートの保温期間、4.試験体全体の徐冷期間を示したものである。Case CH の2 リフト目および3 リフト目のひずみは、1.のクーリング期間で打込みと同時に膨張側へ推移し、2.の徐冷期間でCase N に比べて最高温度が低くヒータリングまでの温度低下が緩やかであることから、収縮側への推移も緩やかとなる。その後、2 リフト目では、3.の保温期間でひずみの降下が収まり、4.の全リフトの温度を同時に降下させることにより、2 リフト目および3 リフト目のひずみがほぼ同じ勾配で降下し、ひずみが温度の履歴に合せて推移していることが確認できる。

ここで、膨張側の最大値から Case N でひび割れが発生した材齢までのひずみの変化量に着目すると Case N では、2 リフト目で 108μ 、3 リフト目で 221μ 、Case CH では、2 リフト目で 66μ 、3 リフト目で 150μ となり、ひずみの変化量は Case CH では Case N の $3/5$ 程度に低減される結果であった。

(2) コンクリートの発生応力

図-12 にコンクリートの発生応力の履歴を示す。Case N では、2 リフト目および3 リフト目において、ひずみの履歴と同時期に引張側へ応力が推移する過程でひび割れの発生を捉えられていることが分かる。このときの発生応力は、2 リフト目で 1.51N/mm^2 、3 リフト目で 2.06N/mm^2 であり、材齢はそれぞれ8日および12日であった。また、このときの引張強度をマスコンクリートのひび割れ制御指針に定める引張強度の算定式と実測した圧縮強度より算出した場合、それぞれ 2.23N/mm^2 、 2.24N/mm^2 (有効材齢は、それぞれ14日、17日) となり、引張応力が引張強度より小さい範囲でひび割れが発生している。これについては、引張強度の推定精度、有効応力計の精度による影響や高温履歴を受けた高炉セメントの強度発現の特性⁹⁾による影響などが考えられる。なお、高温履歴を受けた高炉セメントの強度特性について既往の知見では、材齢8~12日において1割程度の強度低下が報告されている。一方、Case CH では、2 リフト目および3 リフト目において、コンクリートの温度上昇に伴い圧縮側へ応力が推移し、温度降下に伴い引張側へ推移す

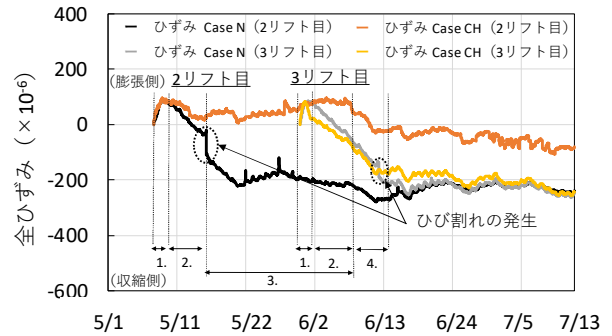


図-11 コンクリートの全ひずみの履歴

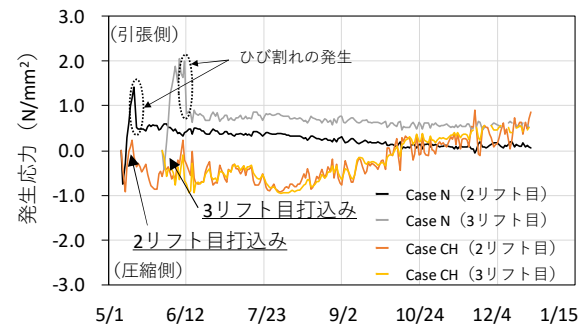


図-12 コンクリートの発生応力の履歴

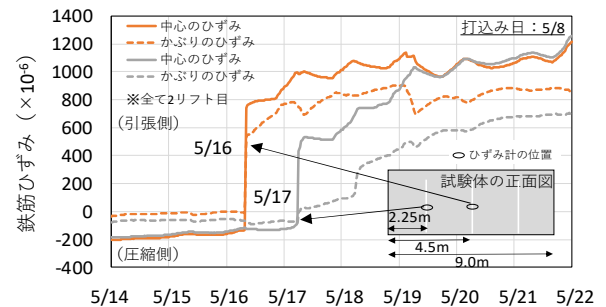


図-13 Case N における鉄筋ひずみの履歴

るものの、その後、季節的な外気温の上昇により概ね圧縮側で 0.5N/mm^2 の付近を推移している。10月以降では、外気温の降下に伴い引張側へ推移するが、材齢が215日(2 リフト目)、193日(3 リフト目)において 1.0N/mm^2 に及ばない範囲で応力が推移している。これについては、今後も引き続き季節変動に伴う応力の推移を観察していく。

(3) 鉄筋のひずみ

図-13 に、Case N の2 リフト目に設置した鉄筋ひずみ計の計測結果を示す。同図より、材齢8日に試験体の延長方向中央における断面中心およびかぶりの鉄筋ひずみが同時に引張側に大きく推移(ひずみおよび応力の履歴と同時期)した。これは、試験体の延長方向中央に貫通ひび割れが生じたことによるものと考えられる。その後、材齢9日に試験体の延長方向 $1/4$ の位置において、断面中心の鉄筋ひずみが急激に引張側へ移行した。ただし、かぶりの鉄筋ひずみの増加はわずかであり、その後2日程度をかけて漸増した。これは、断面中心でひび割れが

生じた後に、やや遅れて表面までひび割れが到達することを示唆しているものと考えられる。この傾向は、3リフト目でも同様であった。なお、同図には試験体の両端1/4に位置するひずみはそれぞれ同様の傾向にあったため、片端部のひずみのみを表記している。また、10月以降の鉄筋ひずみ（図示は省略）は、外気温の降下に伴い僅かに引張側へ推移する傾向にあり、前述のひび割れ幅が材齢215日および193日において僅かに大きくなることと傾向が一致する。一方で、Case CHでは、図-14に示すように2リフト目および3リフト目の鉄筋ひずみはほとんど発生せず、急激なひずみの変化も確認されず、前述したコンクリートのひずみの履歴と同様に鉄筋ひずみからもひび割れが発生していないことが確認された。10月以降では、外気温の降下に伴い圧縮側へ推移する結果となった。

また、ひび割れ発生後に鉄筋に残留する最大応力を鉄筋ひずみとヤング係数の関係から算出した。図-15に、2リフト目および3リフト目において、試験体の延長を等分し、かぶりに位置する鉄筋の残留応力をそれぞれ材齢215日および193日までの期間で示す。鉄筋比が0.11%と非常に小さい部材であることもありCase Nでは、温度ひび割れの発生に伴う残留応力が2リフト目で227.2N/mm²、3リフト目で107.9N/mm²となった。これは、SD345の降伏値の65.9%および31.3%に相当する。一方で、Case CHでは、2リフト目で13.9N/mm²、3リフト目で12.6N/mm²となり、Case Nの1割程度となる。冷・温水通水工法によりひび割れを抑制することで、鉄筋に発生する残留応力も大幅に低減することが確認された。このように、ひび割れを抑制することで、ひび割れからの劣化因子の侵入を防ぐだけでなく、施工時に生じる残留応力の低減にも寄与することができる。このことは、供用開始後に作用する外力に対する構造性能の確保に繋がると言え、本工法は耐久性および構造性の両方の観点から構造物の長寿命化に資するものと考えられる。

5. おわりに

本文では、実大規模の試験体を用いて、冷・温水通水工法の効果を評価した。その結果を以下に示す。

- (1) 本工法を適用していない試験体では、ひび割れが発生したが、適用した試験体ではひび割れが発生せず、本工法の高いひび割れ抑制効果を確認した。
- (2) クーリングおよびヒーティングにより、躯体コンクリートのひずみの変化量および発生応力が低減することを確認した。
- (3) 本工法は鉄筋に発生する応力の低減にも効果があることを確認した。

今後は、実測値と逆解析により同定した値との整合を

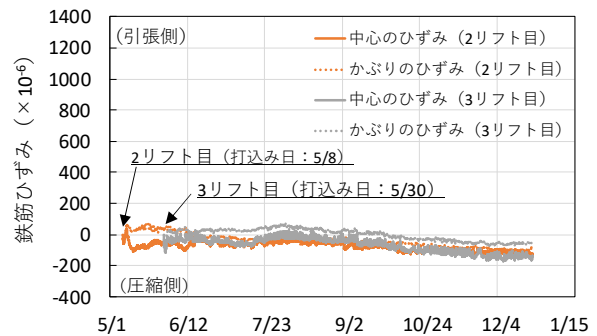


図-14 Case CHにおける鉄筋ひずみの履歴

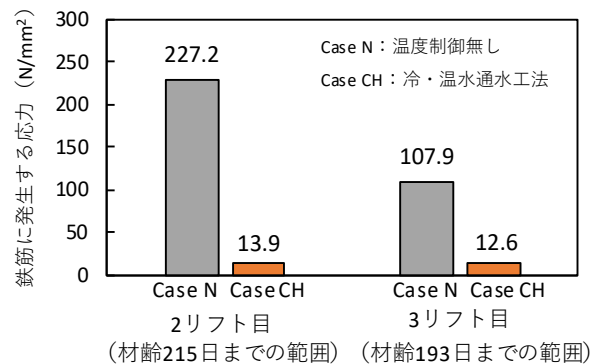


図-15 鉄筋に発生する引張応力（鉄筋比 $p=0.11\%$ ）

図り、温度の履歴や発生応力の履歴の差異について考察していく。

参考文献

- 1) 青山達彦, 柳井修司, 橋本 学, 渡邊有寿: 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—, 鹿島建設技術研究所年報, 第64号, pp.78-83, 2016.11.
- 2) 青山達彦, 柳井修司, 山本 徹, 戸張正利: 冷・温水を通水させる躯体の温度制御による温度ひび割れ制御効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017, pp.1345-1350.
- 3) 室野井敏之, 井上量介, 溝渕利明: 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.
- 4) 日本コンクリート工学会; コンクリートのひび割れ制御指針, pp.41-97, 2016.11.
- 5) 田邊忠頭, 山川秀次, 渡辺 朗: 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, pp.171-179, 1984.3.
- 6) 細田 暁, 藤原浩一, 青木千里: 高炉スラグ微粉末含有コンクリートの力学的特性に対する微視的溫度応力の影響, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.549-561, 2007.10.