

報告 パイプクーリングと保温養生の併用による温度ひび割れ抑制

壹岐 直之*1・牧原 久利*2・渡部 耕平*2・清宮 理*3

要旨: ラーメン構造の橋梁下部工の施工において、梁部材はマッシュプであるため内部拘束による温度応力と、強固な柱に拘束されるため外部拘束による温度応力が作用し、温度ひび割れが発生すると予測された。この温度ひび割れを抑制するため、パイプクーリングと保温養生を併用した対策を実施した。2つの対策の併用によって、事前解析では最小ひび割れ指数を0.62から1.19に改善できると予測され、実構造物においてひび割れの発生を防止できた。また、2つの対策を適切に組み合わせることによって、対策の規模と期間を低減できた。
キーワード: マスコンクリート、温度ひび割れ、パイプクーリング、保温養生、温度応力解析、現場計測

1. はじめに

ラーメン構造の橋梁下部工において柱部材と梁部材が共にマッシュプである場合は、梁部材では温度上昇時に内部拘束による温度応力(図-1中のA)が生じる。また、温度降下時には、柱部材の拘束によって外部拘束による温度応力(同B)と、内部拘束による温度応力が反転するため生じる梁部材内部の引張応力(同C)が生じる。とくに、温度降下時は2つのメカニズムによる温度応力(同B+C)が同時に作用するため、図-1に示すような貫通ひび割れが生じることがある。この貫通ひび割れを抑制するためには、プレクーリングやパイプクーリングの実施、あるいは低発熱セメントの使用など、部材内部の温度上昇を低減させる対策が有効である。しかし、工事予算と工期には制約があるため、これらの対策は経済性や工程などを圧迫することが懸念される。また、低発熱セメントは、現場への調達が困難な場合がある。このため、上述のような部材に対しても、温度応力を効率的かつ経済的に抑制できる対策が望まれる。

本報告は、ラーメン構造の橋梁下部工において、温度ひび割れを防止した事例を報告するものである。温度ひび割れの抑制対策は、一般的な方法よりも簡易なパイプクーリングと保温養生を併用することとした。

一般に、パイプクーリングは、部材内部の熱をパイプ内の水を介して部材外部へ放出する工法であり、打ち込まれたコンクリートの温度上昇を抑制できるため、内部拘束と外部拘束の両方による温度応力を緩和できる。しかし、施工性や経済性の観点からは、不利な対策である。一方、保温養生は部材表面を保温することによって、部材内部との温度差を緩和する工法である。この対策は、比較的簡便に行うことができるが、部材全体の温度を上昇させることになるため、外部拘束による温度応力を助長するおそれがある。このため本工事では、パイプクーリングと保温養生をバランスよく組み合わせることで、両者の長所を活かし、効率的な温度ひび割れの抑制を狙うこととした。

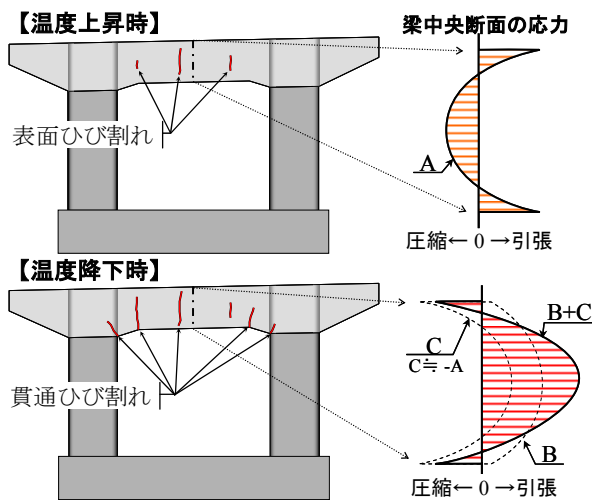


図-1 ラーメン橋梁下部工における温度応力の概念と温度ひび割れのイメージ

2. 橋梁下部工の形状寸法およびコンクリートの配合

橋梁下部工の形状寸法を図-2に示す。梁部材は、3.0m×3.5mの断面を有し、長さは26.6mであった。コンクリートの打設日について、フーチングは2009/12/12、柱部材下半分は2009/12/24、柱部材上半分は、2010/2/18、梁部材は2010/3/27であった。型枠は木製合板である。

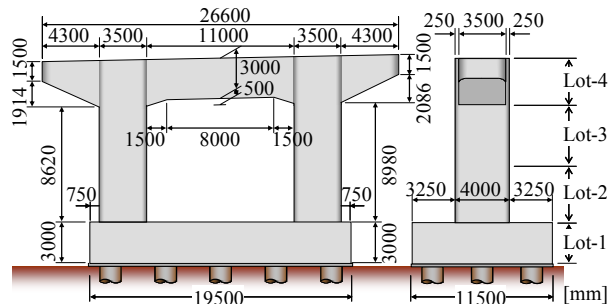


図-2 ラーメン橋梁下部工の形状寸法

*1 若築建設(株) 建設事業本部 総合評価対策室 課長 博(工) (正会員)
 *2 若築建設(株) 名古屋支店 紀勢線船津川橋下部工事 海山作業所
 *3 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合 (24-8-25 BB)

W/C [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	s/a [%]	単体量 [kg/m ³]				
				水	C	S	G	Ad
53.0	8	4.5	42.1	150	284	780	1080	0.74

記号：W=水,C=セメント,S=細骨材,G=粗骨材,Ad=混和剤

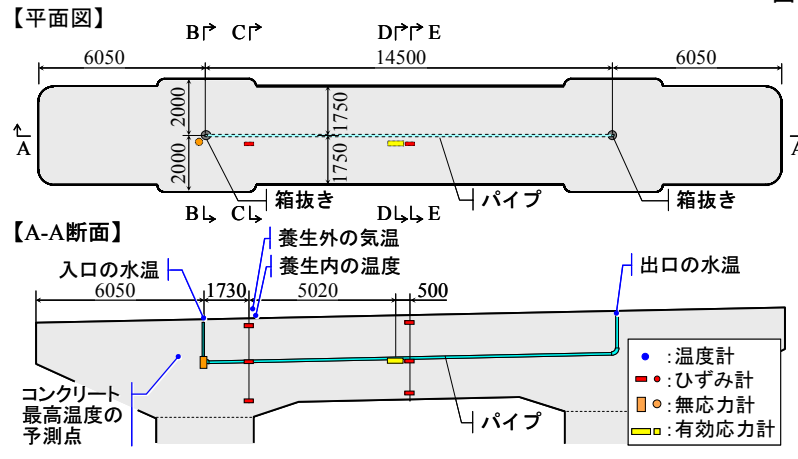


図-3 クーリングパイプおよび計測機器の配置

コンクリートの配合を表-1に示す。使用したセメントは高炉セメントB種、混和剤はAE減水剤標準形(I種)である。

3. 温度ひび割れ抑制対策の方法

温度ひび割れの抑制対策は、文献¹⁾などに示されるように種々の方法があるが、この工事ではパイプクーリングと保温養生の併用を選定した。この対策以外では、低発熱セメントの使用が有効と考えたが、本工事の現場では調達することが不可能であったため、採用できなかった。また、膨張材の使用については、内部拘束による温度応力には効果が期待できない²⁾ことや、梁部材の水和熱による膨張に膨張材による作用が加わると、柱部材に悪影響を及ぼす懸念があると考え、採用しないこととした。本工事でのパイプクーリングおよび保温養生の実施方法は、4章で述べるように、目標ひび割れ指数を満足するよう温度応力解析に基づいて決定した。

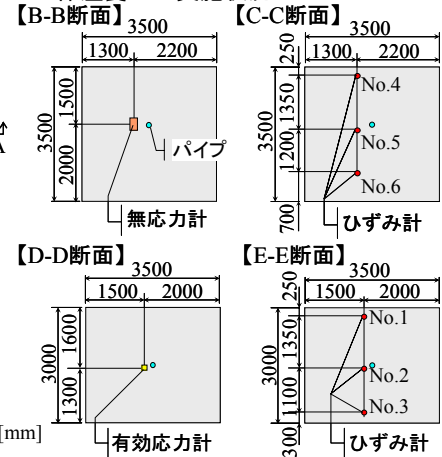
なお、フーチングおよび柱部材では、内部拘束による温度応力が卓越し、外部拘束による温度応力はほとんど作用しないと温度応力解析で予測されたため、温度ひび割れ抑制対策として保温養生を単独で行った。

3.1 パイプクーリングの実施方法

パイプクーリングは、コンクリート打設直後から開始した。パイプは、図-3に示すように梁部材の中心に1本とした。使用する冷却水は、構造物の傍らに置いた水槽内に溜めた水を使用した。冷却装置などは使用せず、外気によって自然に冷却することを期待した。ただし、水槽内の水温を計測し、水温が25℃を超える場合は、冷



図-4 保温養生の実施状況



却水を入れ替えることで水温を25℃以下に保った。通水速度は20l/分程度とした。パイプクーリングの終了は、梁部材中心のコンクリート温度と外気温の差から判断し、材齢8日に通水を停止した。

一般的に、パイプの間隔は50~75cmとしている事例が多い¹⁾。一般的な事例に倣うと、本構造物の梁部材では、パイプを4本以上配置することになる。また、特別な冷却装置を用いない場合の通水温度は、一般的に15~20℃とした事例が多い¹⁾が、本工事では20~25℃とした。これらのことから、本工事でのパイプクーリングは、一般的な事例と比較して簡易的な方法と言える。

3.2 保温養生の実施方法

保温養生は、コンクリート養生マット(材質は連続性ウレタンフォーム、厚さ10mm、熱伝導率0.035W/m²℃)を1枚使用した。保温養生は、コンクリート打設の翌日から開始した。保温養生の終了は保温養生内(養生マットとコンクリート表面の隙間)の温度と、外気温の差から判断し、材齢15日に養生材を撤去した。保温養生の実施状況を図-4に示す。

3.3 温度応力計測の実施方法

本工事では、上述した2つのひび割れ抑制対策を管理し、効果を検証するため、温度応力計測を実施した。

計測機器の配置は図-3に示した。温度計は、図に示した5箇所と冷却水槽内の1箇所の、計6箇所とした。埋込型ひずみ計は、温度計測機能を有するものであり、計6箇所とした。無応力計(無応力容器内に埋込型ひずみ計を設置)と有効応力計は、それぞれ1箇所とした。ひずみおよび応力の計測方向は、橋軸直角方向とした。

表-2 事前に行った温度応力解析における設定値

項目		フーチング	柱-1	柱-2	梁
打設時コンクリート温度		14.4	13.3	13.1	17.0
断熱温度 上昇式	Q_{∞} [°C]	49.7	49.8	49.8	49.5
	γ	0.59	0.55	0.55	0.67
コンクリート の熱特性	熱伝導率	2.7 [W/m°C]			
	密度	2400 [kg/m ³]			
	比熱	1.15 [kJ/kg°C]			
表面の熱伝達 係数	露出面	14.0 [W/m ² °C]			
	型枠 (5日間)	8.0 [W/m ² °C]			
	保温養生(14日間)	2.8 [W/m ² °C]			
外気温		施工場所近傍における月別平均気温(気象庁2007-2009)			
パイプ クー リング	パイプ内径	27.6 [mm]			
	表面の熱伝達率 ³⁾	358 [W/m ² °C]			
	通水温度	22.5 [°C]			
線膨張係数		12.0 [μ /°C]			
圧縮強度 推定式	$f_c'(91)$	35.6 [N/mm ²]			
	a	7.12			
	b	0.71			

4. 解析によるひび割れ抑制対策の施工前検討

4.1 温度応力解析の方法

施工に先だって温度応力解析を行い、温度ひび割れ抑制対策の実施方法を検討した。温度応力解析は文献¹⁾に記される方法に準拠した。設定値を表-2に示す。同表に示していない条件は、文献¹⁾に記される通りとした。

本構造物でのひび割れ指数の目標値は、発注者と協議を行って1.2とした。3章で述べたパイプクーリングと保温養生の方法は、温度応力解析によるひび割れ指数の推定値が、目標値を満足するように決定したものである。

4.2 温度応力解析の結果

温度応力解析で予測した最小ひび割れ指数の分布を図-5に示す。同図は、任意の時間におけるひび割れ指数の分布を表したのではなく、各要素における解析期間を通じての最小値を表したものである。

(1) 無対策の場合

温度ひび割れ抑制対策を実施しない場合の最小ひび割れ指数は、梁部材表面では0.62、梁部材内部では0.94と予測された。ひび割れ指数が1.0を下回る範囲が広く分布しているため、多数の表面ひび割れが発生し、梁部材を貫通するひび割れも発生すると推測された。

なお、梁-柱接合部の内部でひび割れ指数が0.94となるのは材齢28日以降であり、仮に柱による拘束度を緩和した解析を行った場合は梁-柱接合部のひび割れ指数が向上したことから、1章で述べた2つの温度応力が作用していると推測される。

また、梁部材の張出し部の下面端部は、最小ひび割れ指数が0.51であったが、評価の対象から除外した。この理由について、解析では仮設支保工を適切にモデル化できないため自重を考慮していない。実際には自重が作用し、張出し部の下面には圧縮応力が生じるため、解析ではひび割れ指数を過小に評価すると考えたためである。

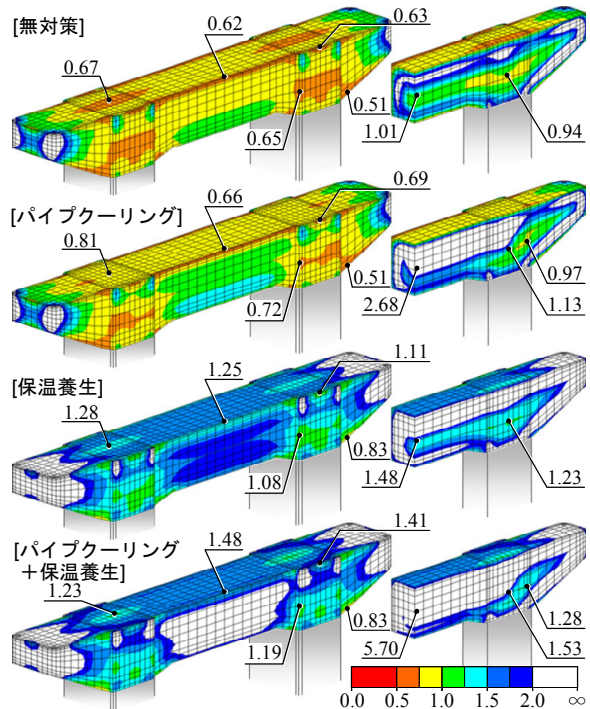


図-5 事前解析で予測した最小ひび割れ指数の分布

(2) パイプクーリングを単独で行った場合

パイプクーリングを行った場合の最小ひび割れ指数は、梁部材表面では0.66、梁部材内部では1.13と予測された。梁部材内部のひび割れ指数は目標値の1.2近くまで向上するが、梁部材表面のひび割れ指数ほとんど向上せず、パイプ本数を増やすなどの追加対策が必要と判断された。

(3) 保温養生を単独で行った場合

保温養生を行った場合の最小ひび割れ指数は、梁部材表面では1.08、梁部材内部では1.24と予測された。最小ひび割れ指数は1.0以上に向上したが、目標値には若干不足する結果となった。

梁部材内部のひび割れ指数は目標を満足しているため、保温養生を強化することで目標を満足すると考えられる。しかし、パラメータ解析を行った結果、養生マットを1枚から2枚に増やすと、材齢14日に養生マットを取外した時のひび割れ指数の低下が大きく、表面の最小ひび割れ指数が0.82になると予測された。また、このひび割れ指数の低下を抑制するためには、養生期間を5日以上長くする必要があると予測された。

(4) パイプクーリングと保温養生を併用した場合

パイプクーリングと保温養生を併用した場合の最小ひび割れ指数は、梁部材表面で1.19、梁-柱接合部で1.28となり、目標値をほぼ満足すると予測された。とくに、梁部材中央でのひび割れ指数の向上が大きく、ひび割れ指数が1.85以上であるため発生確率は5%を下回り¹⁾、貫通ひび割れの発生を防止できると推測された。

(5) ひび割れ抑制対策の管理方法

パイプクーリングあるいは保温養生を行う場合は、コ

表-3 パイプクーリングおよび保温養生の管理方法

抑制対策	管理方法
パイプクーリング	冷却水の温度が25℃を超える場合は、冷却水の温度を下げる。
	梁部材内部の温度と日平均気温の差が38℃以下になるまで、パイプクーリングを継続する。
保温養生	梁部材内部と表面の温度差が20℃を超える場合は、養生材を追加する。
	梁部材内部の温度と日平均気温の差が28℃以下になるまで、保温養生を継続。

コンクリートの温度性状や応力性状などを事前の予測と比較して管理し、必要に応じて対策の追加や修正を検討しなければならない¹⁾。とくに外気温の変動や、セメントの発熱速度の違いなどに応じた対応が必要になる。

本構造物でのパイプクーリングおよび保温養生の管理方法を表-3に示す。同表での温度の管理値は、パイプクーリングと保温養生を併用する場合の解析結果に基づき、最小ひび割れ指数発現時や養生終了時の温度に着目して定めたものである。施工中は、表-3の管理方法と温度の計測結果に基づいて対策を管理した。

5. 温度応力計測の結果と対策の効果

5.1 温度応力計測の結果

(1) 温度

コンクリート温度の経時変化を図-6に、養生環境内の温度とパイプクーリングの通水温度を図-7に示す。

打設時のコンクリート温度は14~16℃であり、この時点の外気温は11~12℃であった。

コンクリートの最高温度は、材齢4日に51.8℃であった。計測点No.2は、無対策の場合は最高温度予測点(図-3に図示)と同程度の温度になると予測されたが、パイプクーリングによって温度が低下し、最高温度は41.2℃であった。梁部材内部と表面の温度差が最大になったのは、材齢4日であり、温度差は16.7℃であった。

パイプ出入口の水温は、出入口での温度差はほとんどなく、外気温よりも5℃程度高かった。材齢5日と7日に水温が25℃を超えたため、冷却水を入れ替えた。

保温養生環境内(養生材とコンクリート表面の隙間)の温度は、外気温よりも10℃程度高かった。

(2) 自由ひずみ

無応力容器内で計測した自由ひずみと温度の関係を図-8に示す。この関係を直線近似すると、コンクリートの熱膨張係数は $10.1 \mu / \text{℃}$ と推測された。なお、高炉セメントB種コンクリートの熱膨張係数は、ひび割れ照査を行う場合は $12 \mu / \text{℃}$ を標準として用いること¹⁾とされているが、本工事で使用したコンクリートの熱膨張係数は文献⁴⁾に示されている値 $10 \mu / \text{℃}$ に近かった。

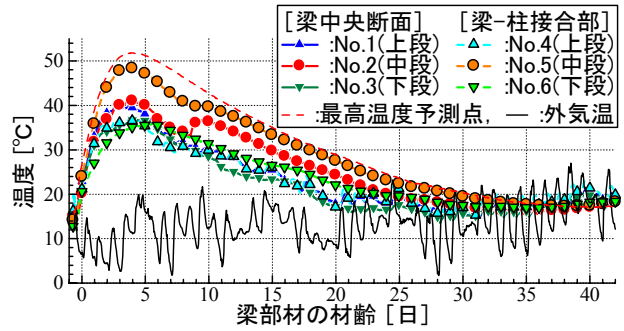


図-6 温度の計測結果(コンクリート温度)

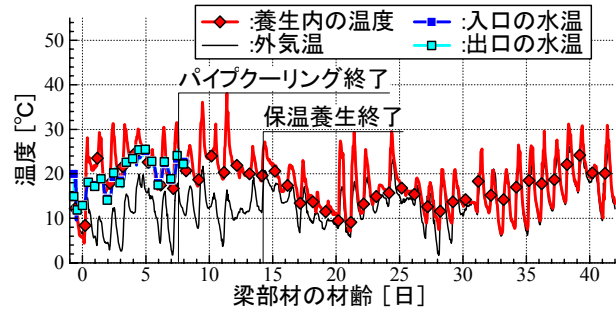


図-7 温度の計測結果(養生温度など)

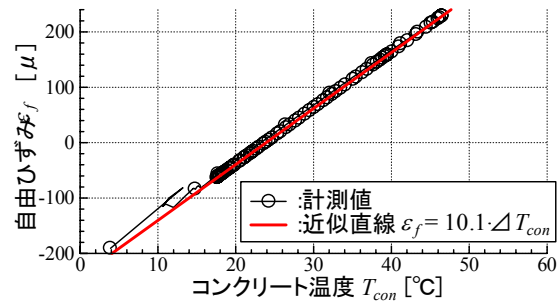


図-8 コンクリート温度と自由ひずみの関係

(3) 圧縮強度

管理供試体(φ100×200mm)を用いた圧縮強度の試験結果図-9に示す。材齢7日の圧縮強度は $15.7 \text{N}/\text{mm}^2$ 、材齢27日の圧縮強度は $30.9 \text{N}/\text{mm}^2$ であった。圧縮強度の試験結果に一致するよう、コンクリート標準示方書に示される圧縮強度推定式⁴⁾の係数を推定した。推定した圧縮強度の曲線を図-9に示す。

(4) 有効応力

梁部材中央断面の中段において、有効応力計で直接計測した有効応力を図-10に示す。同図には、有効応力計近傍(No.2)で計測したひずみから換算した有効応力も示した。有効応力への換算は以下の方法で行った。すなわち、各計測点の温度変化に線膨張係数 $10.1 \mu / \text{℃}$ を乗じて、各計測点での温度ひずみ ϵ_T を計算。各計測点の実ひずみ ϵ_r からそれぞれの温度ひずみ ϵ_T を減じて、有効ひずみ ϵ_e を計算。コンクリートの有効ヤング係数 E_e を、文献¹⁾に示される式を用い、図-9に示した圧縮強度の推定曲線から計算。各計測点の有効ひずみの増分 $\Delta\epsilon_e$ に、その時点の有効ヤング係数 E_e を乗じて有効応力の増分 $\Delta\sigma_e$ に換算し、これを累計して各計測点での有効応力 σ_e を求めた。

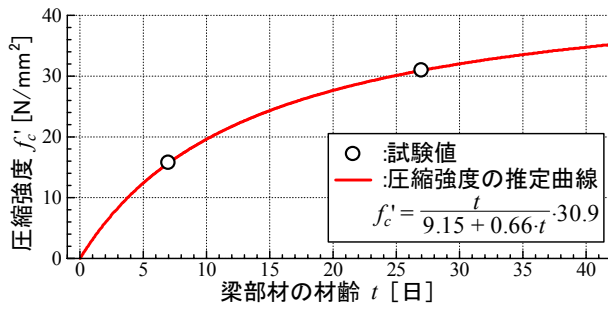


図-9 コンクリートの圧縮強度

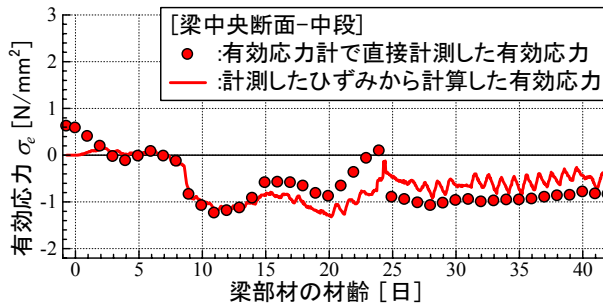


図-10 梁部材中心での有効応力計の計測結果

実ひずみから換算した有効応力は、図-10に示したように、有効応力計で直接計測した値とほぼ一致した。

各ひずみ計測点 (No.1~6) での、有効応力の経時変化を図-11に示す。実ひずみから有効応力への換算は上述の通りである。引張強度は、図-9に示した圧縮強度の推定曲線から文献¹⁾に示される式で推定したものである。また、材齢24日における有効応力の不連続な変化は、仮設支保工の取り外しによるものである。

梁-柱接合部の上段 (No.4) における有効応力は、材齢6.5日に最大値0.55N/mm²に達した。この時の引張強度の推定値は、1.27N/mm²である。他の計測点でも、材齢4~6日程度までは引張応力が生じ、その後は圧縮応力に反転する傾向が認められた。材齢20日程度以降、梁中央断面の上段 (No.2) と梁-柱接合部下段 (No.6) の引張応力が増加した。No.6の引張応力は最大で0.95N/mm²に達した。

(5) ひび割れ指数

ひび割れ指数の経時変化を図-12に示す。ひび割れ指数は、圧縮強度から推定した引張強度¹⁾を、有効応力で除した値である。

梁-柱接合部の上段 (No.4) の最小ひび割れ指数は、材齢2.3日において1.39 (ひび割れ発生確率15.7%¹⁾) であった。梁-柱接合部の下段 (No.6) の最小ひび割れ指数は、材齢40.3日において2.05 (同確率 5%未満¹⁾) であった。

5.2 ひび割れ抑制対策の効果

本工事で行った温度ひび割れ抑制対策の有効性を検証するため事後解析を行った。対策を実施した場合について計測結果と一致するように解析条件を策定し、その解析条件で無対策の場合のひび割れ指数を推定して、両者を比較した。策定した解析条件を表-4に示す。同表

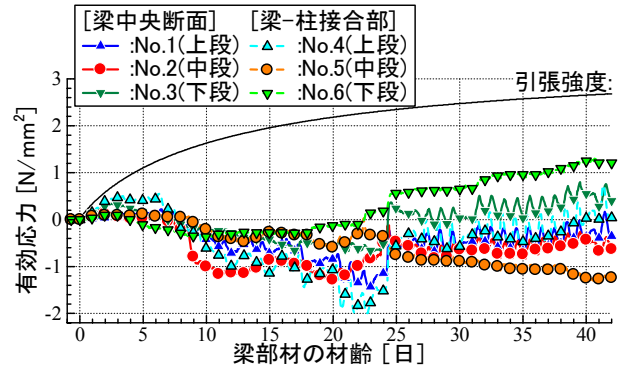


図-11 有効応力の経時変化

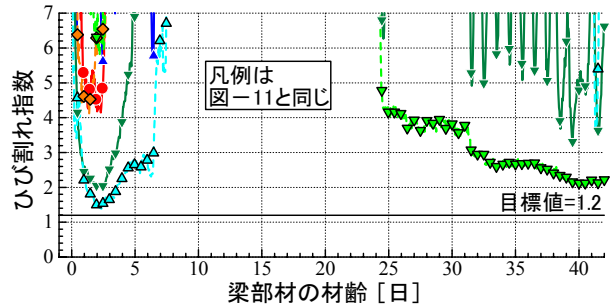


図-12 ひび割れ指数の経時変化

表-4 計測結果から策定した温度応力解析の設定値

項目		梁部材
断熱温度上昇式		$Q_{\infty}=39.5 [^{\circ}\text{C}] \gamma=0.9$
コンクリートの熱特性	熱伝導率	2.6 [W/m ² C]
	比熱	1.20 [kJ/kg ² C]
保温養生実施中(15日間)のコンクリート表面の熱伝達係数		3.0 [W/m ² C]
外気温		実測値
パイプクーリング水温		実測値
線膨張係数[μ/°C]		10.1 [μ/°C]
圧縮強度	$f'_c(28)$	30.9 [N/mm ²]
	係数 a および b	a=9.15 b=0.66

※ 表-4に示した項目以外の設定値は表-2と同じ。

に示した項目以外は、事前に行った解析の条件 (表-2) と同じである。

事後解析で推定した最高温度の分布を図-13に、最小ひび割れ指数の分布を図-14に示し、両者の比較を表-5に示す。梁部材全体での最高温度は、保温養生を行ったためクーリングパイプから離れた位置での温度が上昇した。梁中心断面に着目すると、パイプクーリングによって、最高温度が2.4°C低下し、温度が高い範囲を狭めることができた。また、表面の温度は保温養生によって7.8°C上昇した。これらの効果によって、梁中心断面では、部材内部と表面の最大温度差を22.0°C低減することができたと推測された。

無対策の場合のひび割れ指数は、梁部材の表面では広い範囲で0.75を下回り、中心付近では1.1以下であった。対策の実施によって最小ひび割れ指数は、梁部材表面では0.49、梁部材内部では0.35向上させることができた。しかしながら、梁-柱接合部の表面などでは、対策の計画時に目標とした1.2を満足しない部分があった。

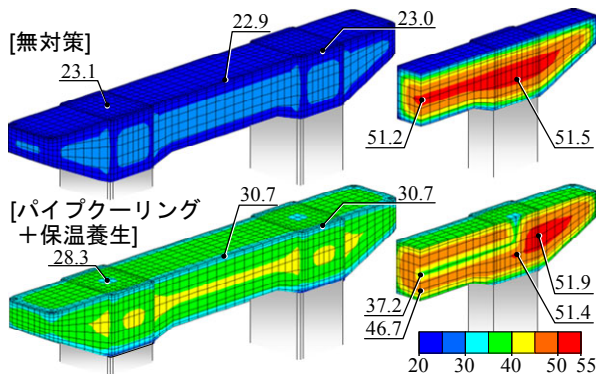


図-13 事後解析で推定した最高温度の分布

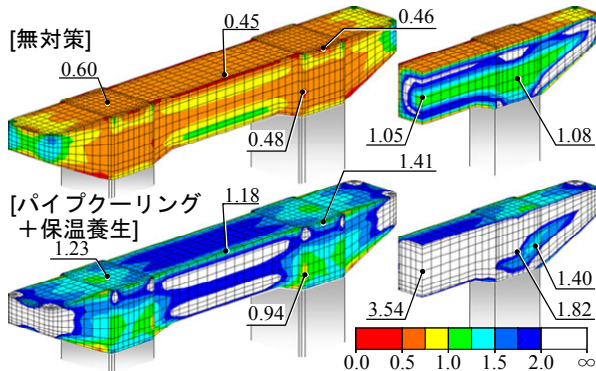


図-14 事後解析で推定した最小ひび割れ指数の分布

温度およびひび割れ指数の経時変化を図-15および図-16に示す。これらの図の着目点は、梁-柱接合部で計測を行った位置である。事後解析で推定した温度およびひび割れ指数は、図-6および図-12とほぼ一致しており、事後解析の条件設定は適切であったと考えられる。

これらの図からも、簡易なパイプクーリングによって部材内部の温度を若干低減し、保温養生によって表面の温度が上昇したことが分かる。その結果、図-16に示した箇所では、材齢10日までの内部拘束によるひび割れ指数は0.8程度改善され、材齢10日以降での外部拘束応力と反転した内部拘束によるひび割れ指数を2.8程度改善できたと推測された。

材齢50日以降に、目視によるひび割れ調査を行ったが、ひび割れは発見されなかった。このため、目標としたひび割れ指数1.20を満足しない箇所があったものの、実施した温度ひび割れ抑制対策は必要十分であったと考える。

6. まとめ

内部拘束と外部拘束による温度応力が作用するラーメンの橋梁下部工において、温度ひび割れ抑制対策としてパイプクーリングと保温養生を併用した対策を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 事前検討では、無対策での最小ひび割れ指数は広い範囲で0.75を下回り、多数のひび割れが高い確率で発生し、貫通ひび割れも発生すると予測された。
- (2) 対策として、材齢8日間の簡易なパイプクーリングと

表-5 事後解析による対策の有無の比較

項目	無対策	対策実施	差	
梁部材全体での最高温度[°C]	51.5	51.9	0.4	
梁部材の中心断面	内部の最高温度*[°C]	48.8	-2.4	
	表面の最高温度*[°C]	22.9	30.7	7.8
	内部と表面の温度差*	42.2	20.2	-22.0
最小ひび割れ指数	梁部材表面	0.45	0.94	0.49
	梁部材内部	1.05	1.40	0.35

*同一時刻ではないため、温度差は上2つの差とは異なる。

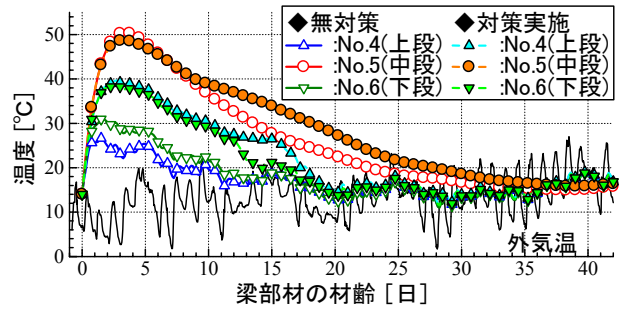


図-15 事後解析で推定した温度の経時変化

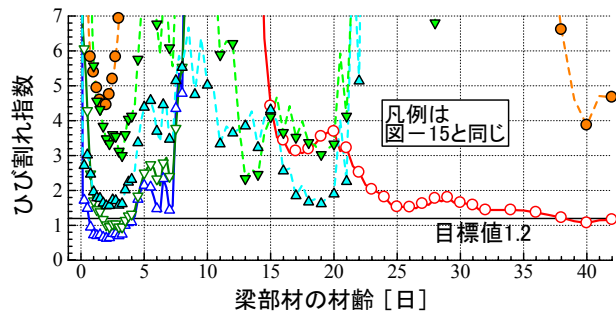


図-16 事後解析で推定したひび割れ指数の経時変化

材齢15日間の保温養生を併用して行った。

- (3) 上記対策を実施した結果、ひび割れ指数は0.35以上向上し、目標としたひび割れ指数1.2をほぼ満足した。
- (4) 実構造物にひび割れは発生せず、温度ひび割れを防止することが出来た。

以上のことから、本工事で行った温度ひび割れ抑制対策は、効果的かつ効率的であったといえる。

参考文献

- 1) 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指針，2008.11
- 2) 壹岐直之・清宮理・何海明・植田智幸：膨張材を混入したコンクリート梁の挙動とひび割れ抑制効果の解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.157-162，2008.7
- 3) 田辺忠頭，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，Vol.343，pp.171-179，1984.3
- 4) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008.3