

報告 橋脚フーチングへの保温養生と封緘養生を併用した温度ひび割れ抑制対策

秋山 哲治*1・飯野 智裕*2・牧原 久利*3・清宮 理*4

要旨: 内部拘束の温度ひび割れが卓越する部材に対して、保温養生と封緘養生を併用した対策を適用した。前者は、部材周囲の雰囲気温度を積極的にコントロールして、その表面温度を効率的に制御する。後者は、保温養生下での脱枠後の乾燥を防止するため、プラスチックフィルムを用いて部材表面を覆うものである。本対策により、無対策と比べて最小ひび割れ指数を 0.77 から 1.19 に改善できると予測され、部材表面に断熱材を設置する従来の保温養生と同等以上のひび割れ抑制効果が得られることを確認した。また、型枠への断熱材の設置や取替え手間を省略できる等、養生対策における施工上の既往の課題を改善することができた。

キーワード: 温度ひび割れ, 内部拘束, 保温養生, 温度制御, 封緘養生

1. はじめに

橋脚のフーチングなど、一般に部材寸法が大きなマスコンクリート構造物では、外部から拘束を受けなくても、コンクリート打設後の初期材齢において、部材の中心と表面との温度差による内部拘束型の温度ひび割れが発生することが多い。このひび割れへの対策としては保温養生が採用されることがあるが、施工上の課題が幾つかあり、対策が効果的かつ効率的に行われているとは言い難い。写真-1 に示すように、既往の保温養生では、a) 断熱材の型枠取付け時の加工や脱枠時の張り替え手間、b) 保温養生期間の短縮¹⁾ のための、段階的な断熱材の取り替え手間、c) 異形型枠へ断熱材を設置した際に起こり得る断熱効果の不確実性、d) 施工後は断熱材が廃材となるなど、幾つかの課題があった。

そこで、これらの課題を解決することを目的として、保温養生と封緘養生を併用して、実施工で橋脚のフーチングにおいて適用した。採用した保温養生は、3 次元有限要素法による事前解析に基づき、温風ヒータを用いて部材周囲の空間温度を段階的にコントロールするものである。すなわち、部材表面での放熱抑制を、周囲の雰囲気温度を制御することで行うため、断熱材を用いない、換言すると、型枠への資材設置など現場の施工手間等を大幅に軽減できる保温方法と言える。もう一つの封緘養生は、脱枠後の乾燥に配慮するため、部材表面をプラスチックフィルムで覆う方法とした。ここで、封緘養生を併用したのは、温度ひび割れ対策としての保温養生は、一般的な型枠存置期間²⁾ 以上の養生期間が必要であり、今回採用した保温方法では、養生中に脱枠を行うと部材表面からの水分逸散が懸念されたためである。脱枠後の

封緘養生は、養生中の乾燥を抑制することができ、コンクリートの品質向上に有効³⁾ となる一つの方法である。封緘養生は現場での取り扱いが比較的容易であるため、構造形式にもよるが、湿潤養生と比べると施工性や経済性等をより改善できる場合があると考ええる。

本報告では、まず、対策を適用した橋脚のフーチング 2 基 (A 橋脚-冬期, B 橋脚-通常期) のうち、内部拘束による温度ひび割れが、より懸念される冬期施工の A 橋脚を対象として、保温養生による対策の有効性を検証した結果を取り纏めた。次に、保温養生下での封緘養生の適用性について、A 橋脚でのコンクリート供試体による結果、および B 橋脚のフーチングへの適用性を評価した結果について整理した。

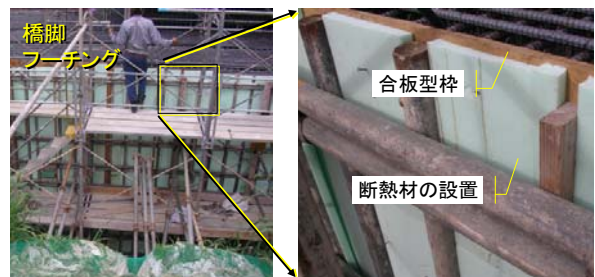


写真-1 温度ひび割れ対策としての既往の保温養生

2. 橋脚のフーチング形状寸法およびコンクリート配合

橋脚のフーチング形状寸法を図-1 に示す。フーチングの橋軸方向×橋軸直角方向×高さは、10.5m×10.5m×2.2m で 2 基とも同一であり、柱と梁も含め、内部拘束型の温度ひび割れが懸念される典型的な構造形式である。フーチングのコンクリート打設日は、A 橋脚 2014/1/21、

*1 若築建設(株) 建設事業部門 技術設計部 技術課長 工修 (正会員)

*2 若築建設(株) 名古屋支店 三重営業所作業所 桑名作業所

*3 若築建設(株) 名古屋支店 土木部 次長

*4 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)

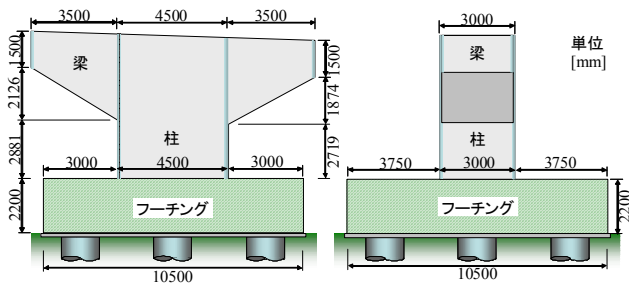


図-1 橋脚のフーチング形状寸法

表-1 コンクリートの配合 (24-8-25BB)

W/C [%]	スランブ [cm]	空気量 [%]	単位量 [kg/m ³]				
			W	C	S	G	Ad
54.4	8	4.5	158	290	788	1060	3.19

[記号] W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, Ad:混和剤

B 橋脚 2014/4/2 であった。

表-1 にコンクリートの配合を示す。設計基準強度は 24N/mm²、使用したセメントは高炉セメント B 種、混和剤は AE 減水剤標準型 (I 種) である。

3. 温度ひび割れ抑制対策の方法

温度ひび割れ対策は、文献⁴⁾などに示されるように、対策の水準や施工条件により様々であるが、本橋脚では施工性や材料調達等を総合的に勘案して保温養生を選定した。保温養生は、施工検討の結果、フーチングは主として温風ヒータによる方法、柱と梁は断熱材設置による既往の方法とした。対策としての、ひび割れ指数の目標

値は 1.0 以上とした。本橋脚での温度ひび割れは、ひび割れが発生したとしても部材表面に限定され、構造物の性能への影響が少ないと判断したことによる。また、ひび割れが発生した場合は、必要に応じ補修を行うことを前提とした。以下ではフーチングの結果のみ報告する。

3.1 保温養生の方法

保温養生の実施状況を写真-2 に示す。本橋脚のフーチングは、地盤を掘り込んで構築しており、養生空間の作製に際しては、現場施工性を考慮して地上の手摺りからフーチング天端の角部までを、気泡シート (2 枚重ね) で覆うことを行った。このため、フーチング天端面に対する保温養生は、保水効果と断熱性を併せ持つ養生マットを敷設することで対処した。

保温養生の期間と温度は、目標ひび割れ指数 1.0 以上を満足するよう、3 次元温度応力解析の結果に基づいて、材齢 7 日まで 23℃、材齢 8~15 日まで 18℃として 2 段階で制御した。保温養生の終了材齢は、養生終了直前のコンクリート温度と外気温を踏まえて判断した。

温風ヒータは、熱出力 35kW 程度をフーチング 1 基当たり 2 台使用し、その運転制御は養生空間内の温度センサー (温風ヒータ 1 台当たり 2 箇所) により自動監視することで行った。養生空間の温度設定について、運転制御部は複数段階で任意に温度が設定でき、また養生温度を段階的に切り替える作業が自動で行える。保温養生では、保温効果を一定に保持すると養生期間が長くなってしまうため、養生期間を短縮するためには、材齢の経過に応じて部材の放熱を適度に促す必要がある。

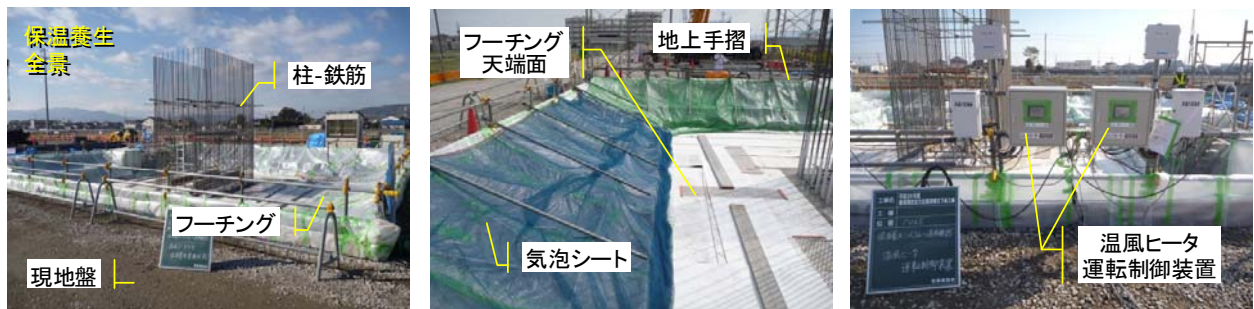


写真-2 保温養生の実施状況

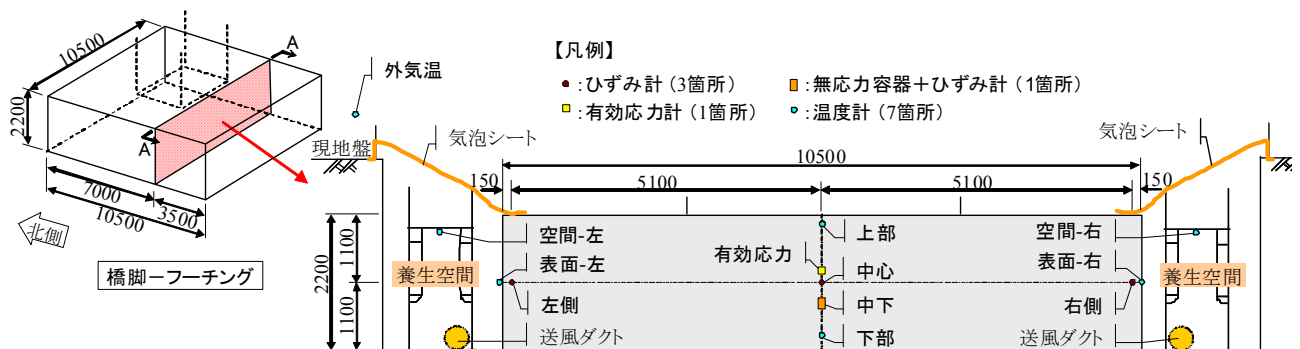


図-2 計測機器の配置 (フーチングの内部と表面, 養生空間, 外気温)

3.2 封緘養生の方法

封緘養生は、脱枠後に厚さ 0.02mm のプラスチックフィルムをフーチング側面に巻き付ける方法とした。また、封緘作業に先立ち、塗布型収縮低減剤を躯体に散布することで、フィルム材の部材への密着性を確保した。

3.3 温度応力計測の実施方法

本工事では、先述したひび割れ制御対策の効果を検証するため、温度応力計測を実施した。計測機器の配置を図-2 に示す。

温度計 (T 型 $\phi 0.65$) は、フーチングの内部 (上部・下部) と表面 (表面-左・右), および養生空間 (空間-左・右) にそれぞれ 2 箇所と外気温 1 箇所の、計 7 箇所とした。表面の温度計は、脱枠まで型枠表面に、脱型後は部材表面に貼り付けた。埋込型ひずみ計 (左側・中心・右側: KM-100BT) は、温度計測機能を有するもので、計 3 箇所とした。無応力計 (中下-無応力容器: KMF-51) に埋込型ひずみ計を設置) と有効応力計 (GK-10N-505) は、それぞれ 1 箇所とした。計測値は、データロガー (TDS-102) で記録した。コンクリートひずみおよび応力の計測方向は、橋軸方向とした。計測期間は、保温養生終了材齢から施工状況を踏まえて 7 日間とした。

4. 計測結果と対策の有効性評価

4.1 温度応力の計測結果

(1) 温度

フーチング内部のコンクリート温度、養生空間の温度、外気温の計測結果を図-3 に示す。

打設日のコンクリート温度は 10°C 程度であり、この時点の外気温は 6~7°C であった。コンクリートの最高温度は中心で材齢 4 日に 48.1°C で、内部が最高温度に達したとき、表面-右・左 (型枠面) は 27.0~28.6°C であり、最高温度との差は 19.5~21.1°C であった。保温養生終了の材齢 15 日では、表面-右・左は 20.1~20.6°C, 外気温は 3.1°C で、温度差は約 17°C であった。

養生空間の設定温度 (材齢 7 日まで 23°C, 材齢 8~15 日まで 18°C) に対して、計測値は材齢 7 日まで平均 20.7°C, 材齢 8~15 日まで平均 16.0°C であった。計測の方が 2°C 程度低かったが、計測値の経時変化を踏まえると、概ね目標とする養生温度を確保できた。材齢 15 日の養生終了以降の養生空間の計測値は、外気温とほぼ一致した。

(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-4 に示す。コンクリート温度とひずみの関係は、温度上昇時 $9.0 \mu / ^\circ C$, 温度降下時 $10.1 \mu / ^\circ C$ と推測された。文献²⁾では、高炉セメント B 種コンクリートの熱膨張係数は $12 \mu / ^\circ C$ が標準とされるが、計測結果は 2007 年制定コンクリート標準示方書に示す値 $10 \mu / ^\circ C$ に近かった。

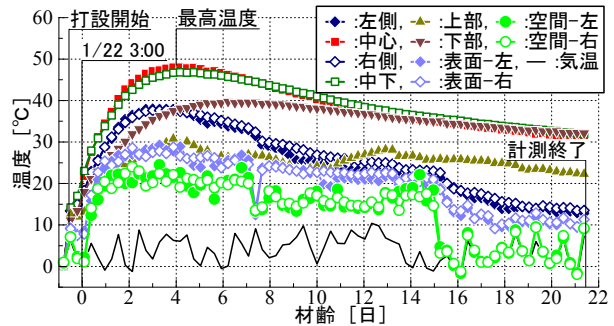


図-3 温度の計測結果

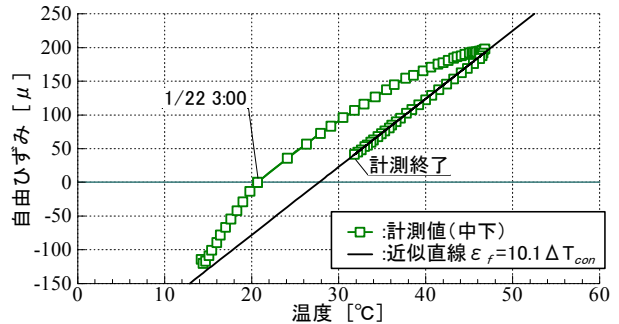


図-4 コンクリート温度と自由ひずみの関係

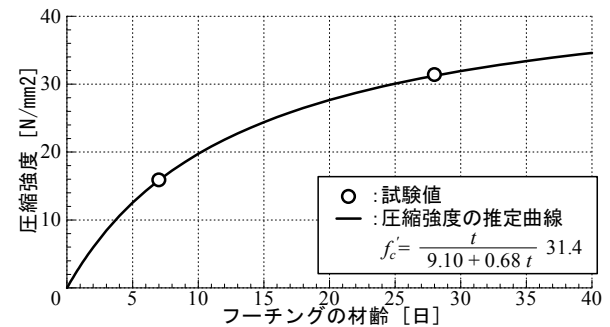


図-5 コンクリートの圧縮強度

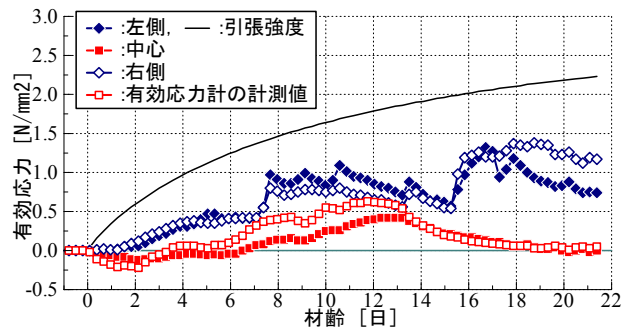


図-6 コンクリート有効応力の経時変化

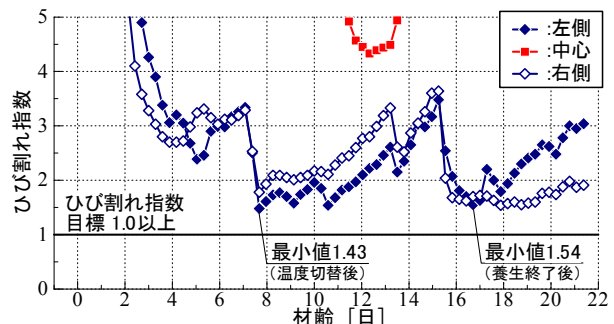


図-7 ひび割れ指数の経時変化

(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を図-5に示す。圧縮強度は、材齢7日は15.9N/mm²、材齢28日は31.4N/mm²であった。圧縮強度の試験結果に一致するよう、文献²⁾に示される圧縮強度算定式の係数を推定した。この推定した圧縮強度の曲線を同図に示す。

(4) 有効応力

フーチング断面中央の有効応力計で直接計測した有効応力を図-6に示す。同図には、有効応力計近傍（中心）、およびフーチング内部の表層（左側・右側）で計測したひずみから換算した有効応力も併せて示した。

有効応力への換算は以下の方法で行った。すなわち、各計測点での温度変化に熱膨張係数10.1μ/°Cを乗じて、各計測点での温度ひずみε_Tを計算し、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を計算した。次に、コンクリートの有効弾性係数E_eを、文献²⁾に示される算定式を用い、図-5に示した圧縮強度の推定式から計算した。最後に、各計測点の有効ひずみの増分Δε_eに、その時点の有効弾性係数E_eを乗じて、有効応力の増分Δσ_eに換算し、これを累計して各計測点での有効応力σ_eを算出した。

左側と右側の有効応力の経時変化は、材齢21日まで引張領域で推移しているが、保温養生を終了した材齢15日以降は、引張応力が横這いから徐々に低下する傾向を示した。また、養生空間の設定温度を23から18°Cに切り替えた材齢7日後と、保温養生を終了して養生空間の温度が18°Cから外気温に変化した材齢15日後で増加した。有効応力は、材齢19日に最大値1.43N/mm²を記録した。

有効応力計により中心の直上で計測した応力と、計測したひずみから算出した有効応力は、概ね一致しており、各計測点での有効応力の算出方法は妥当と考える。計測した有効応力は、養生温度の切替え直後と、保温養生の終了直後に増加したが、引張強度を上回っておらず、ひずみ計の計測結果からひび割れは発生していないと推測された。

(5) ひび割れ指数

ひずみ計の各計測点でのひび割れ指数について、引張強度を有効応力で除して算出した結果を図-7に示す。

左側と右側の最小ひび割れ指数について、養生空間の温度を23から18°Cに切替えた直後は、左側で材齢7日後に1.43であった。また、保温養生を終了し、養生空間の温度が18°Cから外気温に変化したタイミングでは、右側で材齢16日後に1.54であった。計測を終了した材齢以降は、ひび割れ指数が増加する傾向で推移しており、フーチングにひび割れは発生しないと推測した。

表-2 計測結果から策定した解析条件

項目	設定値
熱伝導率	[W/m°C] 2.70
密度	[kg/m ³] 2400
比熱	[kJ/kg°C] 1.15
断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty} \cdot (1 - e^{-\gamma t})$	Q_{∞} [°C] 50.4
	γ 0.455
コンクリート初期温度	[°C] 10.1
圧縮強度 $f_c'(t) = \frac{t}{a+b \cdot t} \cdot f_c'(28)$	$f_c'(28)$ 31.4
	a 9.10
	b 0.68
ポアソン比	0.2
熱膨張係数	[μ/°C] 10.1
養生期間中の熱伝達係数	天端面 [W/m ² C] 6.2
	側面 8.0
保温養生の空間温度	計測値
外気温	計測値

※表中は対策時。無対策は、保温養生中の熱伝達係数を天端14W/m²C、養生空間の温度を外気温とした。

4.2 保温養生の有効性評価

橋脚フーチングで実施した温度ひび割れ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、その解析条件に基づいて無対策の場合を推定し、両者を比較した。策定した解析条件を表-2に示す。

事後解析で推定した対策と無対策における、最高温度の分布と温度の経時変化を図-8と図-9に、最小ひび割れ指数の分布とひび割れ指数の経時変化を図-10と図-11に示す。経時変化の着目点は、フーチングの中心、表面（解析では橋脚を1/4でモデル化しているため、着目点としての表面は左と右の区別はない）、天端（角部）とした。また、対策と無対策の温度と最小ひび割れ指数について、両者の比較結果を表-3に整理した。

(1) 温度

中心でのコンクリート最高温度について、無対策47.4°Cであり、対策48.7°Cで概ね同じであった。一方、中心で最高温度を記録した材齢までの表面の最高温度は、無対策20.5°C、対策32.5°Cであった。以上のことから、フーチングの中心と表面との温度差は、無対策26.9°C、対策16.2°Cとなり、対策を行うことによって温度差を10°C程度緩和することができた。ここで、事後解析での対策の表面温度が、計測結果28.6°C（表面-左）と比較して大きく、また材齢7日までの解析結果が計測結果と比べて2~4°C程度大きいのは、計測では温度計を型枠表面に貼り付けたことに因るものと推測する。

最高温度の分布においても、表面では、無対策は25°C以下となったが、対策では無対策と比較して高い温度の範囲が広く分布しており、フーチング全体で保温養生の

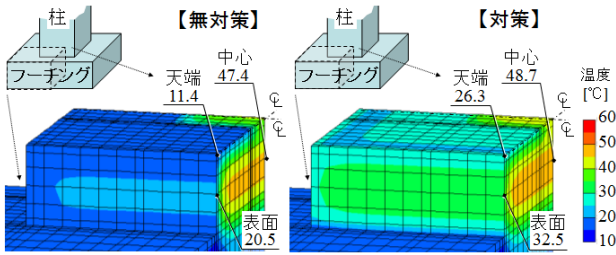


図-8 最高温度の分布

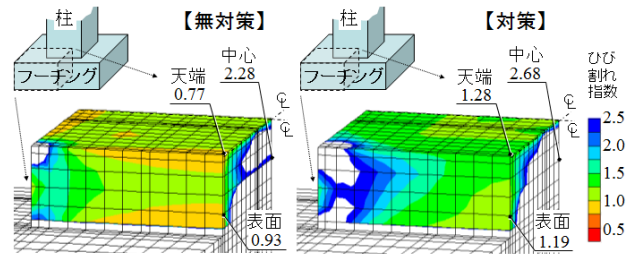


図-10 最小ひび割れ指数の分布

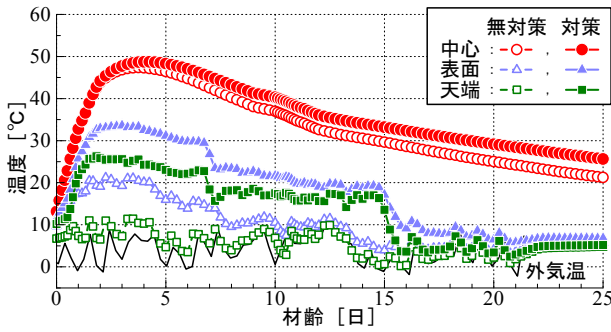


図-9 温度の経時変化

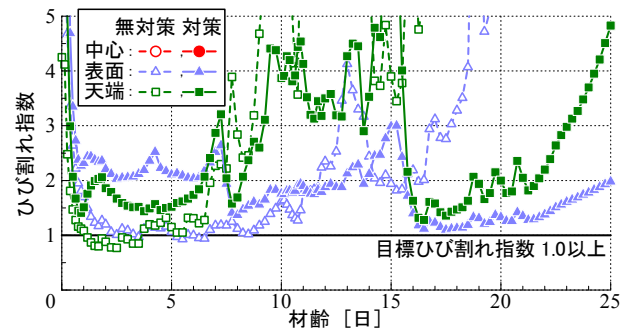


図-11 ひび割れ指数の経時変化

効果を確認できた。

(2) ひび割れ指数

ひび割れ指数の経時変化について、無対策は材齢1週間程度以内に1.0以下で推移したが、対策ではすべての材齢において目標ひび割れ指数1.0以上を満足した。

表面と天端（角部）での最小ひび割れ指数について、無対策は0.77～0.93であり、ひび割れ発生確率²⁾に換算すると60%以上となった。一方、対策は養生温度を23℃から18℃に切替えたタイミング、および保温養生を終了した直後において1.19～1.28であった。すなわち、対策によってひび割れ発生確率²⁾を30%以下にまで低減できると推測した。表中で整理したひび割れ指数の着目点に限定すると、対策によるひび割れ指数の改善効果は、平均で0.38となった。

最小ひび割れ指数の分布について、無対策は1.0以下となる範囲が広く分布しているが、対策では表面すべてにおいて1.0以上を満足し、また広範囲で1.25以上を満足すると推測された。

4.3 保温養生下における封緘養生の適用性評価

(1) コンクリート供試体での適用結果

A橋脚では、封緘養生を模擬したコンクリート供試体（縦300×横300×厚さ50mm）を用い、保温養生空間内に暴露して、その適用性を確認した。封緘養生の適用性の評価項目は、目視観察、表面含水率（供試体表面の任意の3箇所をHI-520を用いて測定）、供試体質量減少率、封緘内の相対湿度とした。本報では相対湿度の結果のみ図-12に示し、他の項目はコメントのみ記す。

相対湿度は、封緘内では、脱枠材齢から保温養生終了

項目		無対策	対策
Tc：中心の最高温度	[°C]	47.4	48.7
Ts：表面の最高温度	[°C]	20.5	32.5
温度差=Tc-Ts	[°C]	26.9	16.2
Icr-1：天端（角部）		0.77	1.28
Icr-2：表面		0.93	1.19

[記号] Icr：表中に示す着目点での最小ひび割れ指数

時点まで92%以上で高い湿度環境を保持し、目視観察においても封緘内部は結露を認めた。他の評価項目について、保温養生終了後の目視観察においても、供試体表面は湿潤状態の濡れ色を呈した。供試体表面の含水率は、同養生終了後も10.8%であり、目視観察の結果と整合する結果であった。供試体の封緘前からの質量減少率は、0.03%と小さく、脱枠前と比べて質量は殆ど減少していなかった。これらのことから、保温養生下においても、封緘養生によってコンクリート表面から水分逸散に対して効果が期待できることを確認した。

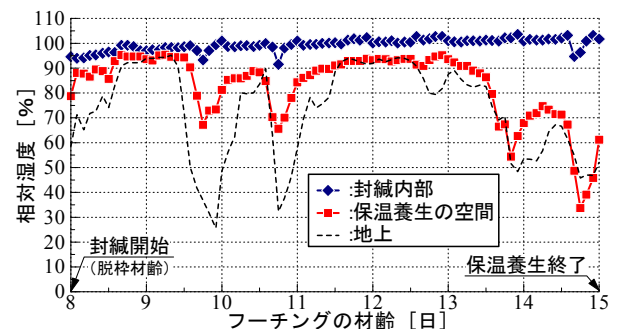


図-12 コンクリート供試体での封緘内の相対湿度

(2) フーチングでの適用性評価

B 橋脚のフーチング側面における封緘養生の実施状況を写真-4 に、封緘内での相対湿度の計測結果を図-13 に示す。実構造物での封緘養生の適用性確認は、フィルム材で部材を覆う直前に、ボス供試体傍らの表面に湿度計データロガーを取り付け、脱枠直後から保温養生終了まで封緘内の相対湿度を計測することで行った。

封緘内部は、脱枠から保温養生終了まで相対湿度84～94%で推移し、養生空間や気中部に対して、高い湿度を保持することができた。目視観察においても、フィルム材がフーチング表面に貼り付いている状況を確認した。このことから、部材周囲の雰囲気温度を制御する保温養生を適用した空間においても、封緘養生によってコンクリート表面を乾燥から保護することができた。



写真-4 フーチングでの封緘養生の実施状況

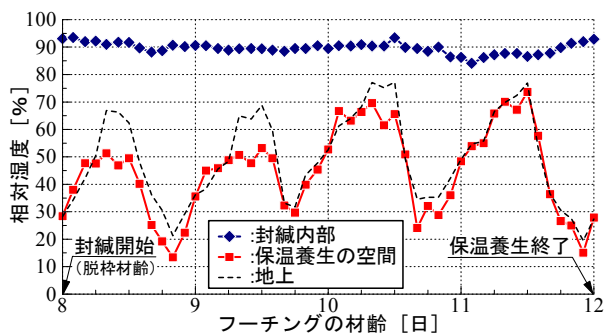


図-13 フーチングでの封緘内の相対湿度

5. まとめ

内部拘束が支配的となる橋脚フーチングへの温度ひび割れ対策として、温風ヒータによる保温養生と、プラスチックフィルムを用いた封緘養生を併用した。本対策での計測結果、および保温養生の終了時における留意点を以下に整理した。

- (1) 保温養生は、計 15 日間を 2 段階の温度で設定した。養生空間を温度制御した結果は、材齢 7 日まで設定値 23℃に対して平均 20.7℃、材齢 8～15 日まで設定値 18℃に対して平均 16.0℃であった。
- (2) 対策によって、フーチングの中心と表面の温度差は 10℃程度緩和することができ、ひび割れ指数を 0.77（ひび割れ発生確率 88.3%²⁾）から 1.19（同 28.2%²⁾）

に改善できた。

- (3) 保温養生下において、脱枠後に封緘養生を適用した結果、封緘養生内部では相対湿度 84%以上の高い値を保持でき、コンクリート表面からの乾燥を抑制することができた。
- (4) 施工中の現場作業員に対して、保温養生に関する作業性についてヒアリングを行った。その結果、保温開始までの養生空間の作製に若干手間を要したが、断熱材の加工や型枠への設置手間などは解消され、既往の保温養生と比較して施工性は良好であったというコメントを得た。
- (5) 冬期施工の A 橋脚では、目標ひび割れ指数を満足する範囲内で、保温養生の終了時にひび割れ指数の大きな低下を確認した。これより、保温養生を終了させるタイミングは特に留意する必要がある、工程の許す範囲で出来るだけ養生期間を長く確保し、保温空間の温度を段階的に外気温へ近づけた方が、より安全側の対策が行えていると言える。具体的には、本対策では 2 段階目の養生温度 18℃の後に、さらに数回の養生温度と日数を確保してから、保温養生を終了させる（例えば、2 段階目の 18℃の後に、3 段階目として材齢 16 日まで 14℃、さらに 4 段階目として材齢 17 日まで 10℃、このように外気温にすりつけて養生終了とする）方法等がより有効であろう。

本工事中において、対策を適用した橋脚フーチングでは、フーチング埋戻しまでの期間において、ひび割れは認められなかった。また、今回適用した保温養生と封緘養生の併用による温度ひび割れ対策は、これまでの保温養生と比べて、施工上の多くの課題を改善できたと考える。なお、養生空間の作製については、構造物や足場の形状・寸法によって、その方法が様々であると想定されるため、現場ごとに効果的な方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 秋山哲治, 前迫伸二, 赤塚吾郎, 坂之井秀輝: 断熱材の段階的取り替えによる保温養生期間の短縮, 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方法とその効果に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2005.8
- 2) 土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】および【施工編】, 2013.3
- 3) 壹岐直之, 福島賢治, 三浦克泰, 吉武勇: プラスチックフィルムを用いた長期的な封緘養生の効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.817-822, 2009.7
- 4) 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指針 2008, 2008.11