

# 暑中コンクリートの初期養生方法がコンクリート温度に及ぼす影響

## The Influence of Early Age Curing Methods on Concrete Temperatures at Hot Weather Condition

浅井 洋 HIROSHI ASAI

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

三加 崇 TAKASHI SANGA

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

暑中に実施するコンクリートの施工では、初期の乾燥や若材齢に受ける日射によってひび割れの発生が懸念される。特に、橋梁の上床版は日射を受ける面積が広く、水分の蒸発が著しいと考えられる。本研究では、夏期の施工において日射を受けるコンクリートを対象に、温度変化やひずみの変化を測定するとともに、ひび割れ発生を抑制する養生方法について検討した。この結果、養生マットおよび養生シート、表面仕上げ剤の初期の養生効果について示した。

キーワード：コンクリート温度、日射、温度変化、養生マット、養生シート

When placing concrete under the hot weather condition, drying shrinkage and exposure to sunlight in early age involve the issue of crack occurrence. Especially the slab in the bridge has large surface area and evaporation is remarkable. In this research, temperature change and strain change for the concrete specimens which is exposed to sunlight in construction in summer time were measured and curing methods which controls crack occurrence were discussed. And the effectiveness of curing mats, curing sheets and surface finishing agents to controlling cracks is demonstrated.

**Key Words:** Concrete Temperature, Exposure to Sunlight, Thermal Variation, Curing Mat, Curing Sheet

### 1. はじめに

暑中のコンクリートの施工では、若材齢に受ける乾燥や日射の影響によってひび割れの発生が懸念される。特に、橋梁の上床版では、打込面積が広く、日射による水分蒸発の影響を受けやすいと考えられる。また、使用されるコンクリートは、設計基準強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の低水セメント比のものが多く、強度が十分発現しない若材齢期に自己収縮や乾燥収縮、水和熱などで生じる引張応力に加え、日射で暖められた表面に散水や降雨による急激な温度変化<sup>1)</sup>が生じるとひび割れを誘引する恐れがある。このような日光の直射や風などによる水分の逸散が予想されるコンクリートの打込みおよび養生では、直射日光や風を遮ることを目的にシートを設置するのがよいとされている<sup>2)</sup>。また、コンクリートを湿潤状態に保ち力学的性能および耐久性を十分発揮させるために、養生マット敷設や散水、湛水も行われている。

本研究は、暑中の直射日光を受ける環境下でプレストレストコンクリート橋の上床版を施工することを想定

し、表面の養生方法が部材の温度およびひずみに及ぼす影響を把握し、適切な養生方法を検討することを目的として実施した。

### 2. 実験概要

#### (1) 試験体概要

試験体はプレストレストコンクリート橋の上床版のように、面的に広がった部材を想定した。コンクリートの配合は設計基準強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$ とし、水セメント比は40%である。セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。使用材料および配合を表-1および表-2に示す。試験体は図-1に示す $500 \times 500\text{mm}$ 、厚さ $250\text{mm}$ の寸法とし、部材の連続性から側面に厚さ $200\text{mm}$ の発泡スチロールを設置して側面からの熱の出入りを最小限に抑えた。試験体には鉄筋を配置していない。試験体製作時の底板には、鋼製型枠を使用した。実橋の養生と同じように、材齢3日まで上面を養生した。試験体は、表-3に示す8試験体で、それぞれ養生方法を変えて屋外に設置した。

養生期間中の試験体深さ方向の温度分布を測定した。測定位置は、試験体中央 100×100mmの範囲にFRP製棒材を立て、上下の熱電対が接触しないように分散して配置した。深さ 0mm として表示した値は、コンクリート表面から 2～3mm の位置の測定値（以下、表面温度）である。また、コンクリート表面から 20mm の位置にひずみ計を設置し、コンクリートひずみを測定した。

(2) 養生方法

各試験体の養生方法を表-3に示す。試験体Nは、上面を全く養生しない試験体である。コンクリート打込み直後にこて仕上げを行い、約2時間後に再度こて仕上げを行った後はそのまま放置した。試験体CSは、コンクリート打込み直後にこて仕上げを行い、表面に密着するように透明シートで覆って表面からの水分の蒸発を遮断した。表面を覆った透明シートは、厚さ 0.15mm のポリエチレンシートである。試験体SHの養生は、コンクリート表面から約100mm上方に 12mm 厚の合板を設置して直射日光を遮断した。コンクリート表面と合板との間から水分は蒸発し、風も通る状態とした。

養生マットを敷設する試験体は、2回目のこて仕上げを行った後、養生マットを敷設して散水し、養生を開始した。試験体SMおよびSM+WSに用いたスポンジ製養生マットは、スポンジ厚 7mm である。試験体AM+WSに使用したアクリル繊維製マットは、従来の養生マットより保水性に優れるとされているもので、材齢1日以降の散水は行わなかった。試験体SM+WSおよび試験体AM+WSに用いた白色シートは、厚さ約0.3mmのポリエチレン製シートであり、養生マットの上に敷設した。試験体SPは、1日に2回散水するだけで、養生マットや養生シートを使用していない。試験体PWの養生は、パラフィンワックス養生剤を使用した試験体で、コンクリート打込み直後に1回目の散布してこて仕上げを行い、約1時間後に再度こて仕上げを行った後、コンクリート表面に2回目の散布を行った。養生剤の1回の散布量は 40g/0.25m<sup>2</sup> である。材齢1日以降の散水養生は、コンクリート表面温度上昇が著しい 10:00 と最高温度を示す 14:00 を基準にして行い、1回の散水量を 500ml とした。この水量は、1回の散水でコンクリート表面と養生マットが十分湿潤状態となる量であり、これ以上の散水は外部に流出することから決定した。養生マットや白色シートによる養生および底版型枠は材齢3日の夕刻に撤去し、散水も材齢3日まで行い、それ以降の養生は行っていない。CSの透明シートおよびSHの合板による日陰養生はその後も継続した。

一日を通じて直射日光があたり、かつ近くに降雨を遮

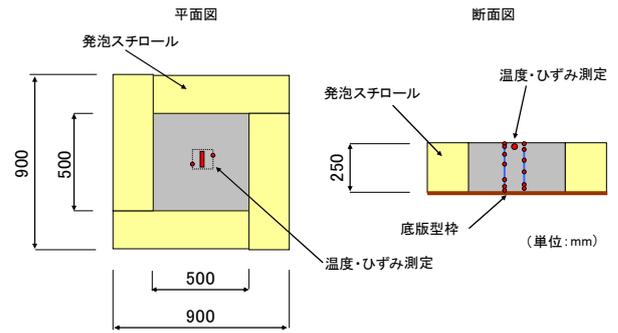


図-1 試験体形状

表-1 使用材料

記号	名称	材料物性
C	セメント	早強ポルトランドセメント 密度3.14g/cm <sup>3</sup> 、比表面積4530cm <sup>2</sup> /g
S	細骨材1	葛生産砕砂 吸水率2.22% 粗粒率2.70、密度(表乾)2.67g/cm <sup>3</sup>
	細骨材2	鬼怒川水系陸砂 吸水率1.31% 粗粒率2.80、密度(表乾)2.62g/cm <sup>3</sup>
G	粗骨材	栃木市鍋山 吸水率0.81% 実積率60.0%、密度(表乾)2.65g/cm <sup>3</sup>
Ad	混和剤	AE減水剤標準形I種

表-2 コンクリート配合

水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		水 W	セメント C	細骨材1 S1	細骨材2 S2	粗骨材 G	混和剤 Ad
40.0	42.0	166	415	218	508	1006	4.77

表-3 試験体養生方法

No.	記号	表面養生	打込み完了	養生開始	散水
1	N	養生無	13:44	—	無
2	CS	透明シート	13:52	13:53	無
3	SH	日陰	13:54	13:56	無
4	SM	スポンジ製養生マット	13:57	16:44	2回/日 10:00, 14:00
5	SM+WS	スポンジ製養生マット +白色シート	14:00	16:44	1回/日 10:00
6	AM+WS	アクリル繊維製マット +白色シート	14:04	16:45	材齢1日 10:00のみ
7	SP	散水養生	14:16	16:07散水	2回/日 10:00, 14:00
8	PW	パラフィンワックス養生剤	14:19	16:36散布	2回/日 10:00, 14:00

る施設はない屋外に設置した。試験期間は、2008年7月22日から8月7日であり、試験場所は栃木県下野市(緯度:北緯36.377°, 経度:東経139.867°)である。試験期間中の環境条件の測定結果を図-2に示す。養生を行った材齢3日までの間は、日中はおおむね晴れており、気温は35℃程度に上昇している。日中の相対湿度は45%程度まで下がっているが、夜間には80%以上を示している。また、材齢2日の深夜に5.5mm、材齢3日夕刻に

34mmの降雨があった。試験期間を通して、平均風速1～2m，最大瞬間風速3～4m程度であり，夕刻に風が強い傾向にある。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 日射が打込直後の水分蒸発に及ぼす影響

コンクリート打込直後から養生マットを敷設するまでの間の養生方法として，コンクリート表面を日陰にする方法や養生剤を使用する方法が考えられる。そこで，コンクリート打込直後から養生マットを敷設するまでに蒸発する水分量の測定を行った。測定方法は図-3に示すように，下面を解放した600×600×300mmの亚克力容器内に温・湿度計を配置し，試験体上面に被せて蒸発した水分による容器内の相対湿度の上昇と温度とを測定した。その後，亚克力容器を試験体上面から撤去して容器内部を雰囲気に戻した。測定は30分に1回の頻度で行い，1回の測定は容器を被せて3分間測定した。試験体は，N，SH，SM，およびPWである。ここで，SMは養生マットを敷設していないためNと同条件である。コンクリート打込直後の表面からの単位蒸発量の推移を図-4に示す。相対湿度，飽和水蒸気量，および飽和水蒸気圧は式(1)～式(3)の関係があり，これらの式より絶対湿度すなわち，空気1m<sup>3</sup>中に含まれる水蒸気量mについて整理すると式(4)が得られる。

$$U(\%) = \frac{m}{a} \times 100 \quad (1)$$

$$a = 237 \times \frac{E(T)}{(273.15 + T)} \quad (2)$$

$$E(T) = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T}{(T+237.3)}} \quad (3)$$

$$m = 237.15 \times \frac{6.11U(\%)}{(273.15 + T)} \times 10^{\frac{7.5T}{(T+237.3)}} \quad (4)$$

ここに，U：相対湿度(%)，m：絶対湿度(g/m<sup>3</sup>)，a：飽和水蒸気量(g/m<sup>3</sup>)，E(T)：温度T(°C)における飽和水蒸気圧(hPa)

各試験体の打込完了時間が異なることから，試験体Nの打込完了(13:45)からの時間で表した。単位蒸発量は，コンクリート表面から蒸発する水分量を単位面積，単位時間あたりで示したもので，3分間の平均値である。

NとSMの単位蒸発量は，1時間後以降で1.6～1.7g/m<sup>2</sup>/minに落ち着く傾向にあるが，SMの初回(0.31hr)の値はNの3回目(1.22hr)までの値に比べて大きく，反対に2回目(0.99hr)の値は小さい。NとSMのそれぞれの値と日照量とを比較すると，日照量が大きいくほど単位蒸発量も大きい傾向がある。SHの初回

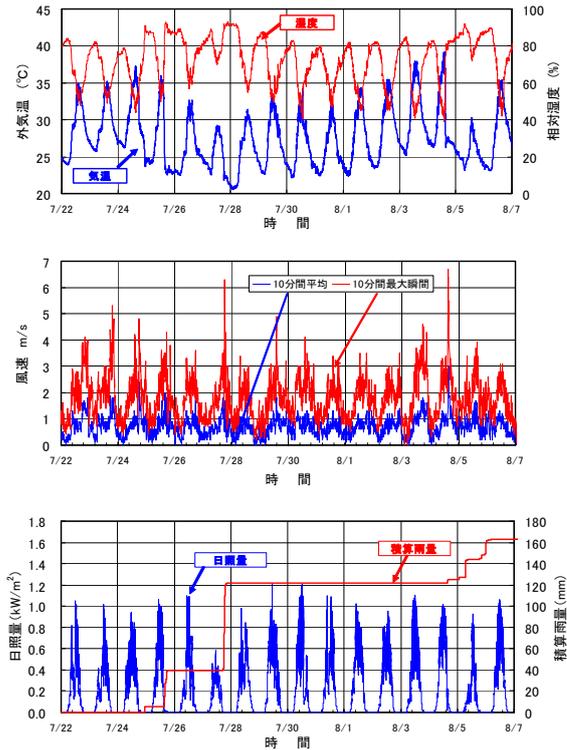


図-2 環境条件

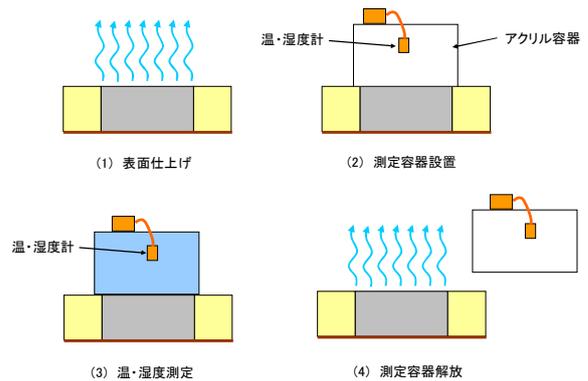


図-3 蒸発量測定方法

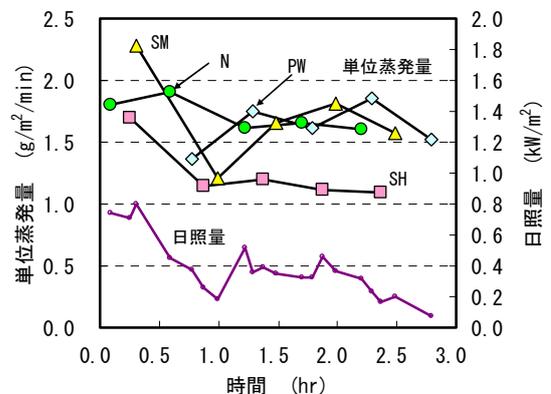


図-4 単位蒸発量の推移

(0.26hr)の値は，まだ日陰養生を行っていないことからNと条件が同じであり，Nの値とはほぼ一致している。

日陰にした2回目(0.87hr)以降の値は、他の試験体に比べて $0.5\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$ 程度低く、日陰にすることで水分の蒸発を30%程度低減できる。PWの初回(0.77hr)の値は小さいが、日照量も小さいことから養生剤の水分蒸発低減効果は明らかでない。日照量と単位蒸発量の関係を図-5に示す。SHの日陰のデータの日照量は $0\text{kW}/\text{m}^2$ とした。この結果によると、日陰の単位蒸発量は $1.2\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$ であり、日照量 $1\text{kW}/\text{m}^2$ の増加に対して単位蒸発量の増加は約 $1.0\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$ であった。PWの単位蒸発量は他の試験体とほぼ同じ傾向にあり、本実験方法では養生剤による水分蒸発の低減効果は明らかでなかった。図-2に示す環境条件によれば、日中の日照量が $1\text{kW}/\text{m}^2$ に達することもあり、日射による水分の蒸発は大きな割合を占めることが明らかである。

(2) コンクリート表面の温度変化

コンクリート表面温度の履歴を図-6に示す。養生開始時刻は16:45である。養生を全く行わないNのコンクリート表面温度は、21:30に最高温度 $44.1^\circ\text{C}$ に達している。翌日にかけて温度が低下しているが、日射を受けて再び上昇している。その後は、日射の影響と外気温の影響

を受けて変動し、日中の表面温度は $45^\circ\text{C}$ に達している。7月24日23:00および25日夕刻に降雨があり、表面温度は低下している。表面を透明シートで覆ったCSの表面温度は、敷設直後から温度上昇し、最高温度 $53.5^\circ\text{C}$ (19:00)に達している。材齢1日以降の温度変化はNと同程度であり、日射の影響や透明シートの保温効果は養生を行わない場合とほぼ同じと考えられる。したがって、打込直後のNとCSの温度の違いは、水分蒸発に伴い蒸発潜熱として奪われた熱量に起因すると考えられる。コ

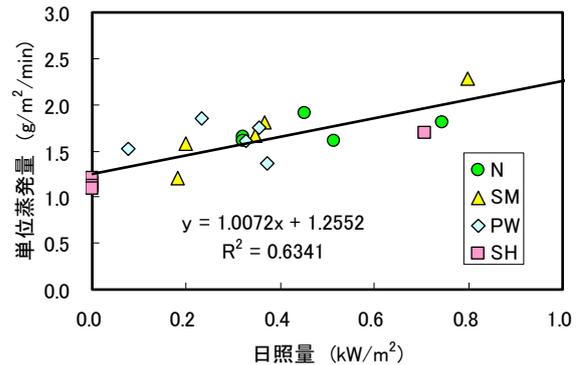


図-5 日射量と単位蒸発量の関係

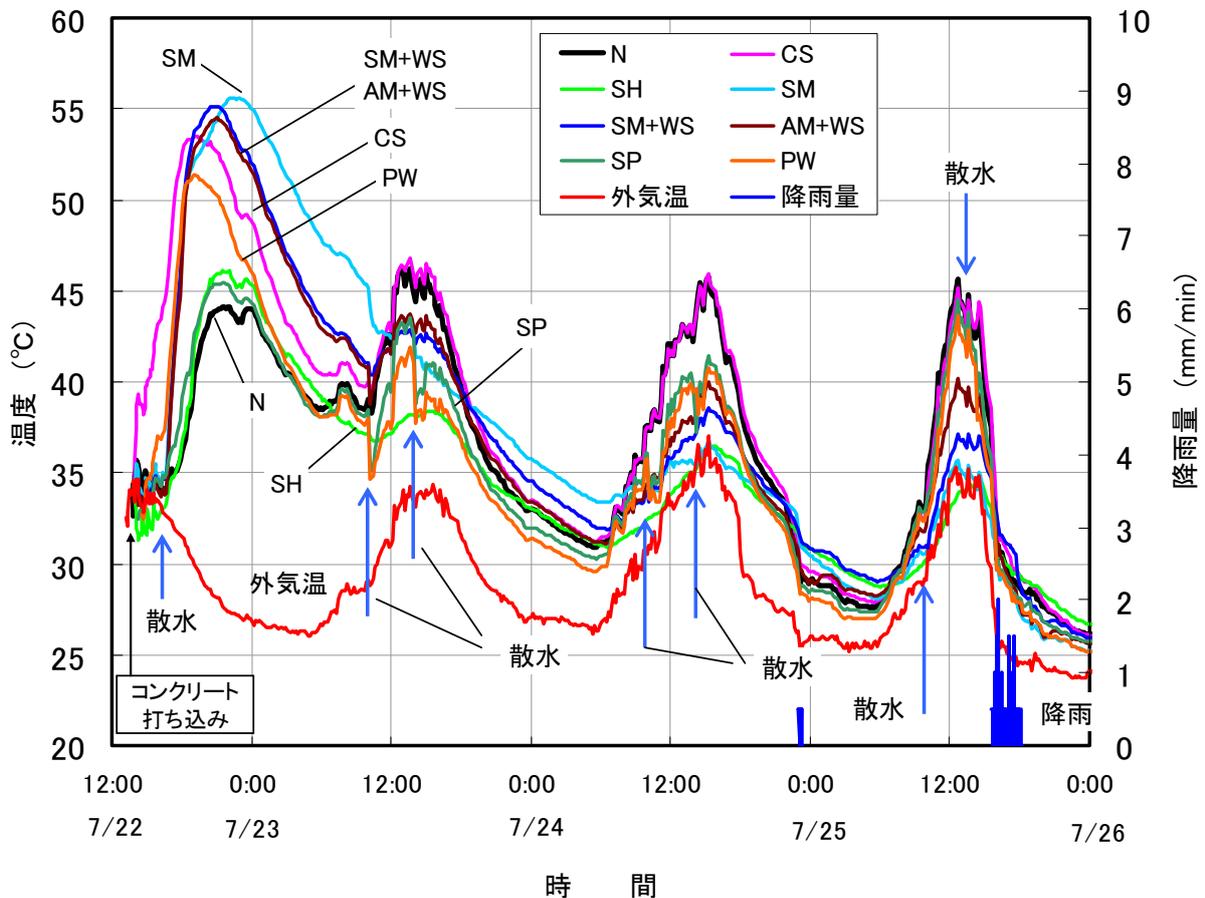


図-6 コンクリート表面温度履歴

ンクリート表面を日陰にした SH の表面温度は、日射の影響を受けないため N より若干低く、夜間の温度変化は N とおおむね同じである。N と SH の日中の表面温度の違いは、日射によるものと考えられ、 $10^{\circ}\text{C}$ 以上の差が生じる。

スポンジ製養生マットを使用した SM の表面温度は、養生マット敷設直後から上昇し、最高温度は  $55.6^{\circ}\text{C}$  (20:00) に達した。養生を開始したのが日射の影響が少なくなった夕刻(16:44)であることから、養生マットが水和熱の放熱を抑制した保温効果によるものと考えられる。この保温効果は、温度低下時にも現れており、CS に比べて温度低下の勾配は緩やかである。また、N や CS と比較して日中の表面温度は低いが、夜間の温度低下は小さく保たれている。この結果、SM の表面温度の日変化は N に比べて小さく、SH と同程度である。養生マットと白色シートとを併用した SM+WS と AM+WS を比較すると、AM+WS の日中の表面温度は SM+WS よりも高く、夜間は低く、アクリル製マットに比べスポンジ製マットの方がわずかに保温性がよい傾向を示している。SM と SM+WS とを比較すると、打込後の最高温度はほぼ同じであるが、温度低下時の表面温度は SM の方が高く保たれている。すなわち、白色シートを養生マット上に敷設することにより保温効果が低下したことを意味している。この傾向は材齢 1 日以降にも認められ、SM の値に比べて変動が大きい。この原因は、養生マットのスポンジ内の水分が蒸発し、そこにできた空気層が保温効果に寄与していると推測される。

SP は 1 日 2 回の散水以外は N と同条件である。材齢 1 日の 10:00 と 14:00 の散水直後に  $3 \sim 5^{\circ}\text{C}$  の温度低下が認められる。散水後の温度は再び上昇するが N の表面温度までは回復しない。養生剤を使用した PW の表面温度は、散布とともに上昇している。最高温度は  $51.4^{\circ}\text{C}$  (19:00) であり、透明シートを敷設した CS に比べて若干低い。材齢 1 日以降の温度は SP とほぼ同じであり、散水による温度変化も同じ傾向を示している。このことより、養生剤の使用は水分蒸発抑制に効果的であると言える。

### (3) 試験体断面の温度分布

図-7 にコンクリート打込から 10 時間後までの温度分布を示す。14:30 はコンクリート打込直後の温度分布であり、16:30 は養生マットや養生シートの敷設を行う直前の温度分布である。試験体内部の最大温度は、19:00 から 21:00 の間で生じている。N の断面内の温度分布によれば、16:30 には水和熱による試験体内部の温度上昇が認められる。しかし、表面温度の上昇はごくわずかであ

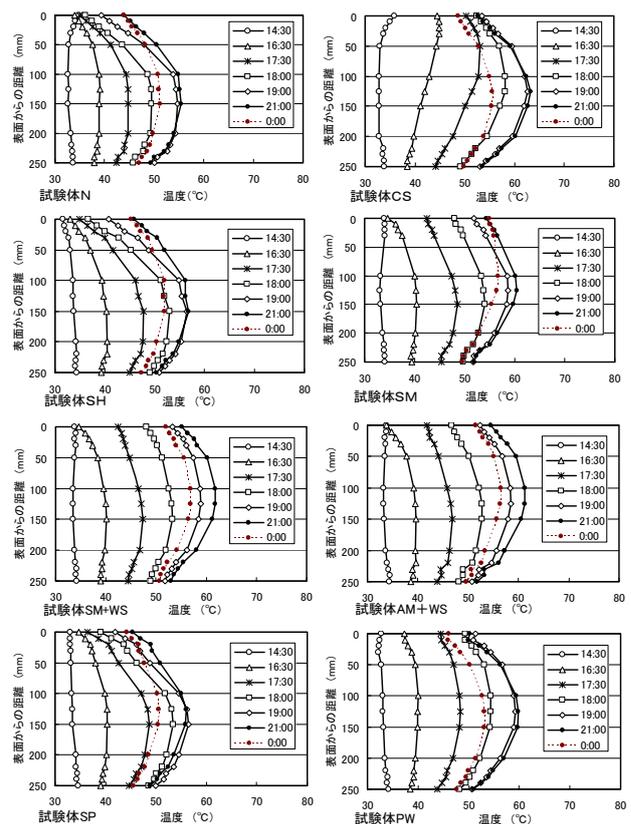


図-7 試験体断面温度分布

り、19:00 頃まで温度上昇を示していない。このときの試験体内部と表面との温度差は  $15.4^{\circ}\text{C}$  に達している。空気層と同程度の熱伝達率<sup>3)</sup>とされる鋼製型枠を使用した底板側の温度と比較しても上面の温度は低く、風や蒸発潜熱の影響を受けていると考えられる。SH や SP は N とおおむね同じ温度分布を示している。CS の温度分布は、水和熱により内部温度が上昇する以前に、表面温度が上昇している。これは、蒸発潜熱による温度低下よりも日射による表面からの熱の供給が大きいことによると考えられる。SM や SM+WS, AM+WS の温度分布は、養生マットを敷設する直前の 16:30 の値が N と同様に温度上昇が認められない。敷設 1 時間後の 17:30 の表面温度は、内部温度と同程度の上昇を示し、内部と表面の温度差が約  $7^{\circ}\text{C}$  に抑えられている。PW の温度分布は、SM などと同様に内部と表面の温度が同じように上昇している。PW はこて仕上げの段階で散布して養生できるため、SM では養生開始前で表面の温度上昇が認められなかった 16:30 の値がすでに内部と同程度の上昇を示している。内部と表面の温度差は約  $9^{\circ}\text{C}$  である。このことから、養生剤の散布は、コンクリート打込直後の水分蒸発を抑え、これに伴い内部と表面の温度差は低減されたと考えられる。

(4) コンクリートひずみ

図-8にコンクリート表面から20mm位置のひずみ変化を示す。いずれの試験体も収縮している。Nは材齢2日で190 $\mu$ の収縮を示している。Nは散水を行っていないが、7月24日23:00の降雨により約20 $\mu$ のひずみが回復している。CSの収縮ひずみは小さく、材齢2日で120 $\mu$ 程度である。Nの収縮ひずみとの差は、乾燥収縮によるものと考えられる。SHの日中のひずみはNの値より若干小さく、コンクリート表面を日陰にすることによる乾燥収縮を若干低減しているように思われる。SHは降雨の影響を直接受けないため、24日深夜の降雨でひずみは回復していない。この結果、NとSHとの収縮ひずみの大小が逆転している。SMは養生シートを併用したSM+WSと比べて材齢1日までの収縮が大きい。これは、水和熱により夜間に養生マットに含まれる水分が蒸発したことが原因していると考えられる。SMにおいても散水して養生マットを湿潤状態にすると収縮ひずみの回復が認められる。SM+WSとAM+WSの両者の収縮ひずみには若干の違いは認められるが、ほぼ同じ挙動を示している。SM+WSは毎日散水を行っており、材齢1日目のみ散水を行ったアクリル繊維製養生マットは湿潤状態を維持することが確認できた。SPは散水を行うたびに収縮ひずみの回復が認められる。しかし、その回復は一時的なものであり、Nと同程度の収縮ひずみを示している。このことより、散水だけを行うような一時的な湿潤状態ではなく、養生マットなどを用いて湿潤状態を持続することの重要性を明らかにした。PWは打込直後CSとおおむね同じひずみの推移を示しているが、次第に大きくなりNとCSの値のほぼ中間の値を示した。養生剤は打込直後の初期に効果的であり、コンクリート硬化後は養生マットなどを併用して養生することが望ましいと考えられる。

図-9に試験期間のコンクリートひずみの推移を示す。養生期間以降、CSとSHを除いて表面の養生を撤去している。透明シートを敷設し続けたCSのひずみは100~125 $\mu$ 程度を推移し、乾燥収縮の進行は顕著でない。日陰養生を継続したSHのひずみは、降雨によってコンクリート表面は湿潤状態にならないため、徐々に収縮ひずみが増加する傾向を示している。これに対して、NはSHと同様に収縮を示していたが、8月4日から6日にかけて降雨によって収縮ひずみが回復している。SM、AW+WSおよびPWは、養生期間はNに比べて収縮量が小さく抑えられていたが、養生を終了後徐々に収縮ひずみが増加し、1週間後にはNと同程度の収縮ひずみを示している。これより、3日間の養生で収縮ひずみを低減しても、将来に亘り収縮ひずみの低減が継続されるわけ

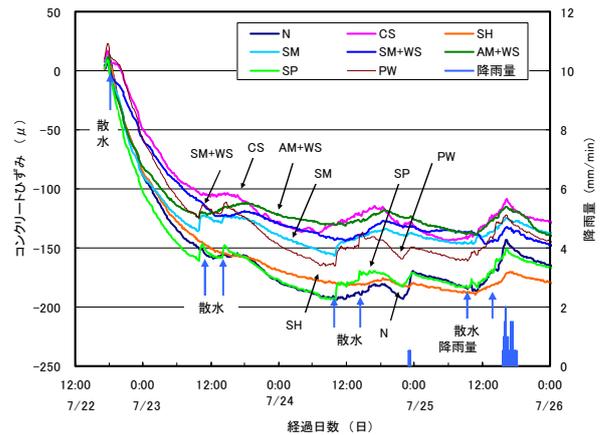


図-8 養生期間のコンクリートひずみ

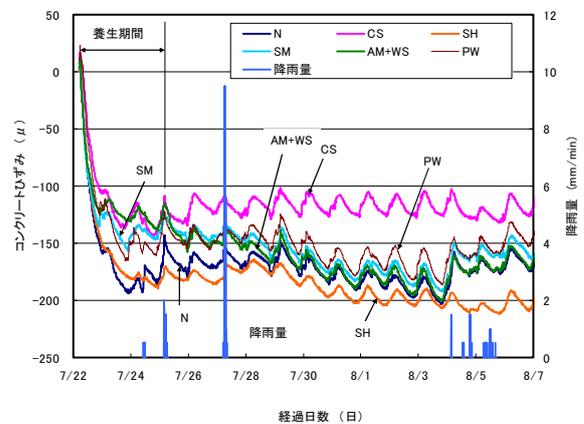


図-9 コンクリートひずみ

ではないことを示している。

(5) 蓄熱量の比較

コンクリート表面の養生方法により、コンクリート表面温度や断面の温度分布、コンクリートひずみの推移などに与える影響を示した。コンクリートの水和熱は、蒸発潜熱や熱伝導、ふく射などによって熱量が奪われ、直射日光があたることによって熱量が供給される。図-10は、試験体内部に蓄積された熱量の差を示したものである。蓄熱量Qは式(5)より算出した。

$$Q = \sum V \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot c_c \quad (5)$$

ただし、V : 温度測定範囲の体積 (=0.5<sup>2</sup>s)  
 s : 温度測定間隔 (m), ρ : 密度 (円柱供試体による測定値2,340kg/m<sup>3</sup>), ΔT : 温度差 (=T - 20°C),  
 T : コンクリート温度, c<sub>c</sub> : コンクリートの比熱<sup>3)</sup> (=3.03 × 10<sup>3</sup>/ρ)

CS-NはCSの蓄熱量とNの蓄熱量の差であり、水分の蒸発に伴って失われる蓄熱量を示している。この値は

打込直後から増加し、18:00をピークにその後低下して翌日以降差が認められない。これより、水分の蒸発は初期に著しく、他の要因に比べて影響が大きいことが明らかである。翌日以降に差が認められないのは、Nの表面が乾燥し蒸発量が少なくなったためと考えられる。N-SHは日射による蓄積量を示している。7月25日および26日のピークでは約1,000kJを示しており、日々蓄熱と放熱が繰り返されている。このピーク時の熱量は、試験体全体の温度を約5.3℃上昇させる値であり、日射を受ける床版は5℃程度の温度荷重を想定する必要がある。SM-SPおよび(SM+WS)-SPは、水分蒸発の抑制と水和熱の保温効果、日射による熱供給の抑制による蓄熱量を示している。材齢2日の日中の蓄熱量は0以下であり、日射による熱の供給を抑制していることが明らかである。夜間には蓄熱量が増加しており、保温効果によるものと推察される。N-SPは散水によって奪われる熱量を示している。1回の散水で150kJ程度の熱量が奪われている。これは、約60gの水分の蒸発によって奪われる熱量に相当する。PW-SPは、養生剤が水分蒸発を抑制することで蓄積された熱量である。養生剤の効果は、散布直後に生じており、初期の効果はSM+WSと同程度である。材齢1日以降では蓄熱の効果は認められず、散布した水分は養生剤を用いないSPと同量量の蒸発が生じていると考えられる。

以上の結果から、コンクリート打込直後に養生剤を使用し、コンクリート表面の硬化を確認した後、養生マットあるいは、養生マットと養生シートを併用して湿潤状態を保つことが推奨される。

#### 4. まとめ

本試験で用いたコンクリートの配合および気象条件の範囲で、以下のことが明らかになった。

- ①日射を受けるコンクリートの表面温度は45℃以上になり、日変化は15℃以上になる。
- ②打込直後の水分蒸発量は1.6～1.7g/m<sup>2</sup>/min程度であり、コンクリート表面を日陰に保つことで0.5g/m<sup>2</sup>/min程度蒸発量を低減することができる。
- ③散水だけ行うような一時的な養生ではコンクリート表面の収縮ひずみを低減する効果は小さく、湿潤状態に保った養生マットをコンクリート表面に敷設するなどにより水分供給を持続することが重要である。
- ④養生剤の使用は、コンクリート打込み直後から養生マット敷設までの初期の水分保持に効果的である。コンクリート硬化後は湿潤状態に保った養生マット

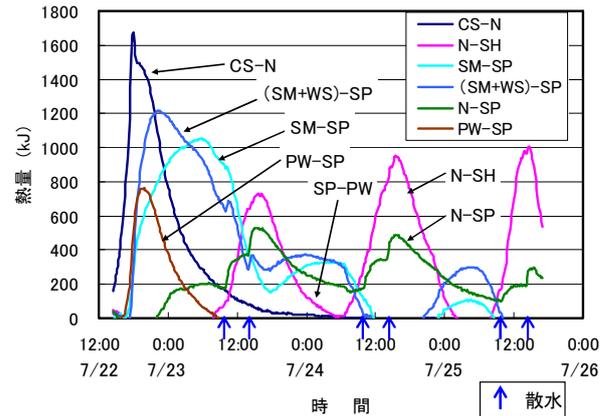


図-10 蓄熱量の比較

を併用した養生を行うことが望ましい。

#### 参考文献

- 1)浅井洋, 谷口秀明, 三加崇, 三上浩:日射が若材齢コンクリートに及ぼす影響について, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第8集, 2008.10
- 2)土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2008
- 3)土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2008