論文　暑中コンクリートの初期養生方法がコンクリート温度および若材齢ひずみに及ぼす影響

浅井　洋[*1]・谷口　秀明[*2]・三加　崇[*3]・三上　浩[*4]

要旨：夏期のコンクリート養生方法が若材齢のコンクリート表面付近の温度およびひずみに及ぼす影響について検討した。打ち込み直後のコンクリート表面付近の温度は，主に日射や水分蒸発量の違いに起因すると考えられた。パラフィンワックス養生剤の使用は，表面仕上げ直後の水分の蒸発を抑制するのに効果的であった。収縮ひずみの低減を図るには，散水を一時的に行うだけでは不十分であり，養生マットや養生シートにより湿潤状態を持続することが重要であることを示した。また，日射熱による蓄熱量や初期水分蒸発量についても示した。

キーワード：コンクリート温度，コンクリートひずみ，養生マット，養生シート，日射熱，蓄熱

1. はじめに

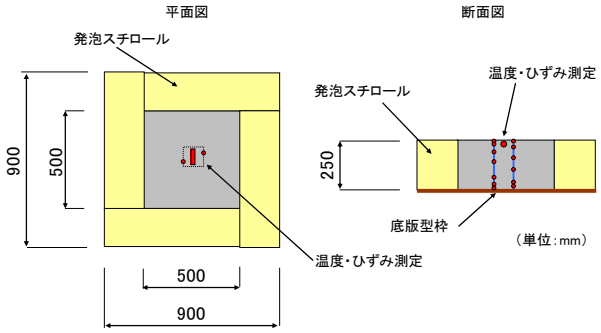
夏期にコンクリートを施工する場合には，コンクリート打ち込み温度が高くなるばかりでなく，打ち込み後のコンクリート表面に直射日光が当たり，表面は急激な乾燥を受けることが予想される。十分に強度発現していない若材齢のコンクリートには，初期の養生方法によっては，乾燥による収縮や日射による温度変化の影響を大きく受けると考えられる。初期の養生を適切に行い，初期欠陥を誘引する要因を排除する必要がある。直射日光や風による表面の急激な乾燥に対して，シートなどで日よけや風よけを設けることが基本になっている[1)]。しかしながら，直射日光が及ぼすコンクリートの温度上昇や水分の一散に関して定量的に示されたものは少なく，養生マットや養生シートにより湿潤状態を保つことが，温度上昇や収縮ひずみの緩和に期待できる程度を把握しておくことは重要である。

著者らは，比較的大きな断面を対象とした試験体で，養生方法による比較や水分供給による温度変化についてすでに報告した[2)]。本稿では，表面仕上げの面積が広く，日射の影響を受け，水分蒸発の影響を受けやすいプレストレストコンクリート橋の上床版を対象とし，夏期に施工するコンクリートの若材齢における養生方法がコンクリートの温度およびひずみに及ぼす影響について検討した。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体を**図－１**に示す。試験体は，厚さ 250mm の床版を 500×500mm で切り出した寸法としたが，鉄筋は配置していない。部材の連続性を考慮し，四面を幅 200mm の断熱材（発泡スチロール，発泡倍率 90%）で覆い，側面からの熱の出入りを極力抑制した。底面は，鋼製型枠を使用した。**表－１**に示す試験体中央の深さ方向の温度（熱電対）を測定した。上下縁付近の測定位置は近接しているため，試験体中央 100×100mm の範囲に FRP 製棒材を立て，分散して配置した。深さ 0mm の測定値は，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。コンクリート表面から 20mm の位置のひずみ（ひずみ計，見かけの弾性係数 40N/mm^2）も測定した。



図－１　試験体形状

表－１　測定位置

表面からの距離(mm)	0	10	20	30	50	100	125	150	200	220	230	240	250
温度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ひずみ			○										

2.2 配合および打ち込み

使用材料を**表－２**に，配合表を**表－３**に示す。プレストレストコンクリートを想定し，セメントには早強ポル

*1 三井住友建設（株）　技術研究開発本部技術開発センターＰＣ技術グループ長　(正会員)
*2 三井住友建設（株）　技術研究開発本部技術開発センター土木構造材料グループ　博(工)　(正会員)
*3 三井住友建設（株）　技術研究開発本部技術開発センターＰＣ技術グループ　工修　(正会員)
*4 三井住友建設（株）　技術研究開発本部技術開発センター主席研究員　博(工)　(正会員)

トランドセメントを使用した。配合は，水セメント比40%，空気量 4.5%（実測値 3.9%）である。荷卸し時のスランプは 10.5cm であった。コンクリートは，生コンクリートプラントで製造し，アジテータ車に $2m^3$ を積み込み，最初の約 $0.5m^3$ 以上を除外して試験体を No.1 から順次打ち込んだ。

2.3 試験条件

試験体は**表－４**に示す 8 体であり，各試験体の表面の養生方法および散水の有無を示す。試験体 CS の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り，コンクリート打ち込み直後にこて仕上げを行い，表面に密着するように覆って表面からの水分の蒸発を抑制した。シートはコンクリートに密着しただけであり，中央付近は封緘状態であるが，シート端部は特別に密閉にはしていない。SH の養生は，コンクリート表面から約 100mm の位置に 12mm 合板を設置して直射日光を遮断したが，コンクリート表面からの水分の蒸発や通風は行える状態とした。養生マットを敷設する試験体は，養生開始時に散水を行った。スポンジ製養生マットは，スポンジ厚 7mm で薄黄色のものを用いた。白色シートは，ポリエチレン製防炎シートである。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たもので，材齢 1 日以降の散水は行わなかった。PW の養生は，コンクリート打ち込み直後にパラフィンワックス養生剤をコンクリート表面に散布(散布量 40g)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散布（散布量 40g）した。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。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 日まで行った。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。

試験体は，一日を通じて直射日光があたる屋外に設置した。また，降雨を遮る施設はない。位置図を**図－３**に示す。試験は，2008 年 7 月 22 日から 8 月 7 日にかけて行い，栃木県に位置する研究施設（緯度：36.377，経度：139.867）で行った。試験期間中の環境条件測定結果を**図－４**に示す。養生を行った材齢 3 日の期間は，日中はおおむね晴れており，気温も 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。

2.4 蒸発する水分量の測定

コンクリート打ち込みから養生マットを敷設する間の約 2 時間，試験体上面から蒸発する水分量の測定を行った。測定方法を**図－２**に示す。下面を解放した 600×600×300mm のアクリル容器内に温・湿度計を設置し，試験体上面に被せた。アクリル容器内の湿度が高くなるのを 30 秒間隔で温度と湿度を測定した。測定時間は 3 分間とし，アクリル容器を撤去して内部を雰囲気に戻した。上記の測定を同一試験体で 30 分に 1 回の頻度で測

表－２　使用材料

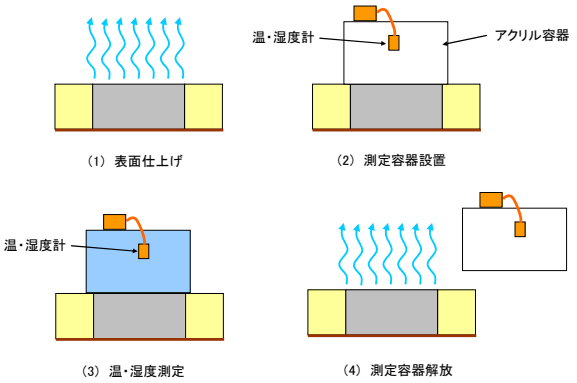
記号	名称	材料物性
C	セメント	早強ポルトランドセメント 密度3.14g/cm^3，比表面積4530cm^2/g
S	細骨材1	葛生産砕砂　吸水率2.22% 粗粒率2.70，密度（表乾）2.67g/cm^3
	細骨材2	鬼怒川水系陸砂　吸水率1.31% 粗粒率2.80，密度（表乾）2.62g/cm^3
G	粗骨材	栃木市鍋山　吸水率0.81% 実積率60.0%，密度（表乾）2.65g/cm^3
Ad	混和剤	AE減水剤標準形Ⅰ種

表－３　配合表

水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	単位量 (kg/m^3)					
		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－４　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



図－２　蒸発量測定方法

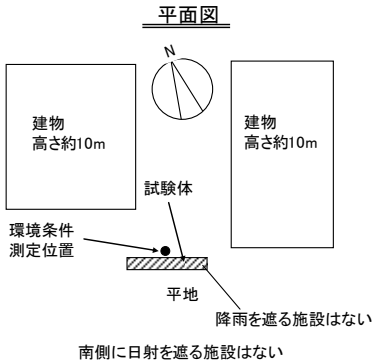
定した。試験体は，N，　SH，SM，および PW である。測定時は，養生マットを敷設していない SM の養生条件は，N と同じである。

3. 試験結果

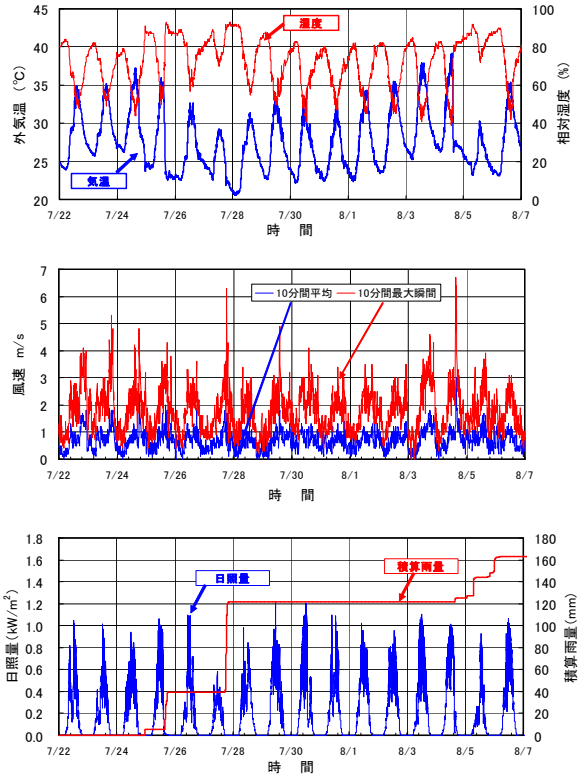
3.1 養生マット・養生シートの効果

コンクリート表面温度の履歴を**図－５**に示す。試験は，7 月 22 日 13:45 から 14:30 にかけてコンクリート打ち込み作業および 1 回目のこて仕上げを行った。約 1 時間後に 2 回目のこて仕上げを行い，養生マットおよび養生シートを敷設した。養生開始時刻は 16:45 である。CS は 1 回目のこて仕上げ直後に表面を透明シートで覆った。打ち込み後の温度上昇に着目すると，CS は養生を開始した直後から表面温度が上昇し始める。これは，コンクリート表面から水分が蒸発しないため蒸発潜熱による温度低下が小さいことが一因と考えられる。最高温度も N に比べて 15℃以上高い。同じく，SM，SM+WS および AM+WS も養生マット敷設直後から表面温度が上昇しており，表面を覆うことによる保温効果が顕著に表れている。AM+WS と SM+WS とでは，材質が異なる養生マットを使用したが，おおむね同じ挙動を示している。**図－６**にコンクリート断面温度分布の推移を示す。14:30 はコンクリート打ち込み直後のデータであり，16:30 は養生マットや養生シートの敷設を行う直前のデータである。このとき，打込み直後に透明シートで覆った CS，およびこて仕上げ時に養生剤を使用した PW を除いて各試験体の温度分布に顕著な差は認められない。その後，養生マットおよび養生シートを敷設した。17:30 のデータからこれらの養生効果が現れている。N，SH，および SP では，断面中央付近の温度が高く，表面付近は外気と接して温度が低い。内部温度が最大に達した 21:00 の内部と外部の温度差は 15℃以上に達している。一方，SM，SM+WS，および AM+WS の表面温度は，養生マットを敷設しない試験体に比べて高く，21:00 の試験体内部と表面との温度差は 7℃以下に抑えられる。養生マットおよび養生シートの敷設は，熱エネルギーの一部を外部に放出しないため，内部温度全体が上昇し，中央部ではシート養生を行わないものに比べて，5℃程度高い。また，上面と下面の温度差も養生マットを敷設しない試験体より小さい。SM と SM+WS とでは顕著な違いは認められない。CS は，透明シート敷設直後から表面温度上昇を示し，16:30 のデータにおいても内部温度より表面温度が高い。すなわち，水和熱以外にコンクリート表面からの熱の供給があるものと考えられ，日射熱の影響が考えられる。太陽光の中には，赤外線が含まれており，物体にあたり，吸収されると熱エネルギーになる。これを本稿では日射熱と称す。

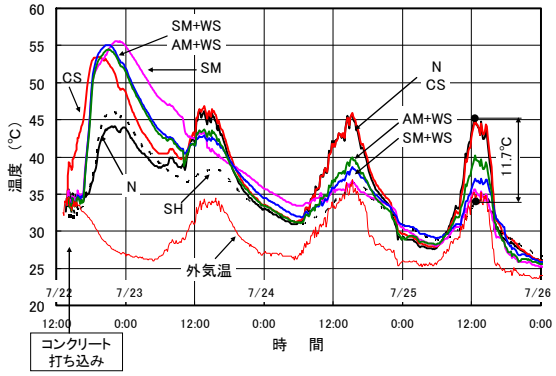
次に，**図－５**の最高温度から温度下降域に着目すると，



図－３　試験位置



図－４　環境条件



図－５　コンクリート表面温度の履歴

SM+WS より SM の方が温度を高く維持している。SM+WS の養生マットのスポンジ層の水分は，シートによって保持され蒸発が抑制されるのに対して，SM のスポンジ層の水分は順次蒸発して空隙となって空気を抱え込み保温効果が高まったものと考えられる。7 月 24 日以降の日中の温度履歴に着目すると，日射を遮らない N および CS は，日中の温度が 45℃以上に達し，日変化は 15℃以上である。これに対して，日射を遮った SH の温度は明らかに低く，養生方法によって最大 11.7℃の差が生じている。養生マットと白色シートを併用した SM+WS および AM+WS の日中温度は，N と SH の間であり，AM+WS の温度変化が若干大きい。白色シートは，日射熱の一部を反射し，残りを吸収するため両者の間に位置したと考えられる。SM は，スポンジ内の空気層が影響していると考えられ，夜間は保温効果があり，日中の最高温度は SH と同程度で暖まり難い傾向にある。

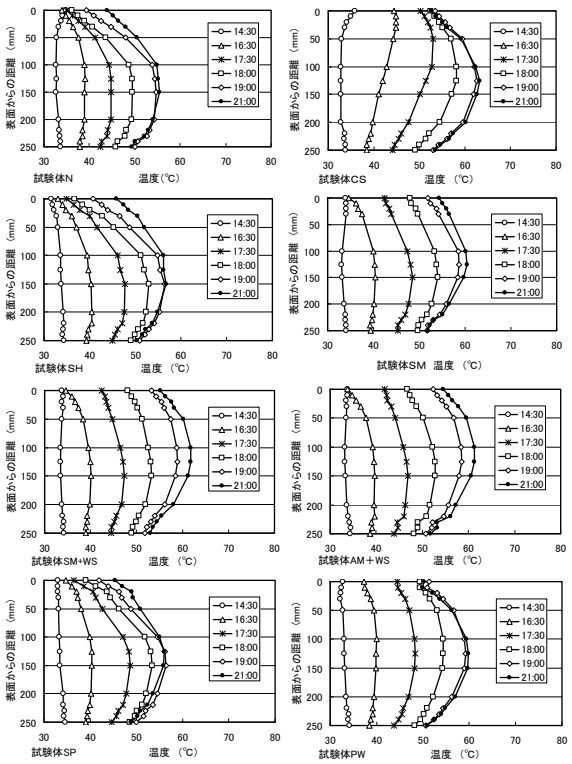
図－７にコンクリート表面から 20mm 位置のひずみ変化を示す。熱膨張ひずみは除去した。SM+WS の養生マットを使用して湿潤状態に保ったコンクリートひずみは封緘に近い CS と同じ程度に保つことができ，養生を行わない N より初期の収縮を 50μ 程度緩和できる。材齢 1 日目のみ散水養生を行った AM+WS は，毎日散水を行った SM+WS と同程度のひずみを示しており，アクリル繊維製マットの保湿効果の持続性が確認できる。また，SP のひずみは，10:00 と 14:00 の散水直後に一時的に小さくなるが，N とほぼ同じひずみを示し一時的な散水だけでは収縮緩和として十分でないことがわかる。すなわち，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が重要であることを示している。

3.2 養生剤の効果

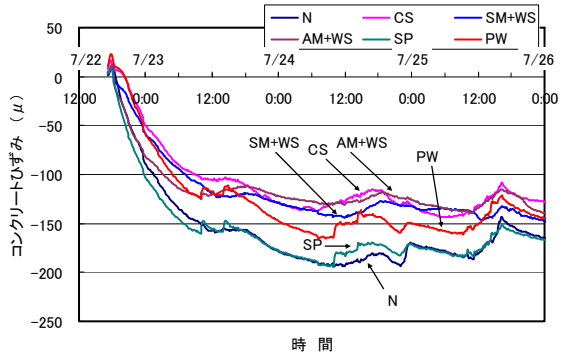
養生剤を使用した試験体 PW のコンクリート表面温度の変化を**図－８**に示す。PW の表面温度は CS に比べて遅れて上昇するが， SP と比べれば早い時期に上昇し始める。**図－６**に示した 16:30 の温度分布によれば，内部温度の上昇とともに表面温度も増加しており，CS の温度上昇分布に近く，表面の温度低下が小さい。すなわち，表面からの水分の蒸発が抑制され，表面の温度低下を抑制していると推測される。**図－７**に PW のコンクリートひずみ変化を示す。SP と PW は養生剤散布の有無の違いである。PW は SP に比べて 30μ 程度初期の収縮ひずみが低減される。

3.3 初期水分蒸発量

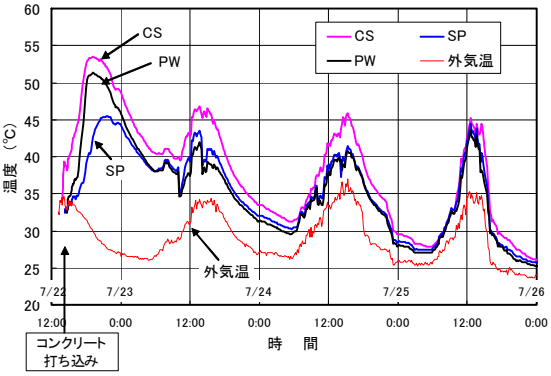
コンクリート打ち込み直後の表面からの単位蒸発量の推移を**図－９**に示す。相対湿度，飽和水蒸気量，および飽和水蒸気圧は式(1)～(3)の関係があり，これらの式より絶対湿度すなわち，空気 1m^3 中に含まれる水蒸気量 m



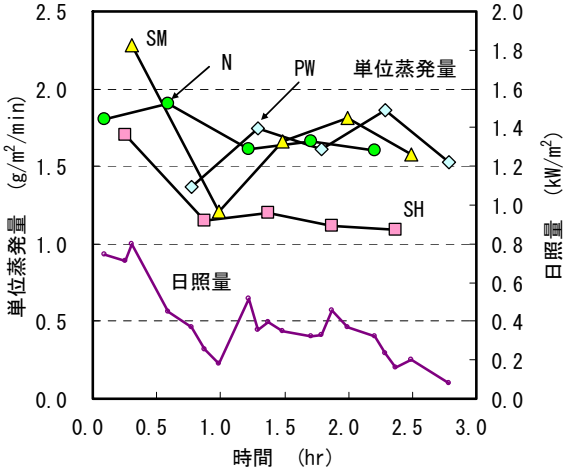
図－６　コンクリート断面温度分布



図－７　ひずみ変化（表面より 20mm）



図－８　コンクリート表面温度の履歴



図－９　単位蒸発量の推移

について整理すると式(4)が得られる。

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

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

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

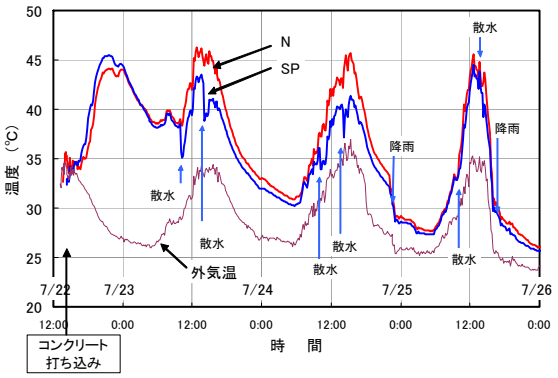
$$m = 237.15 \times \frac{6.11U(\%)}{(273.15 + T) \times 100} \times 10^{\frac{7.5T}{(T+237.3)}} \tag{4}$$

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

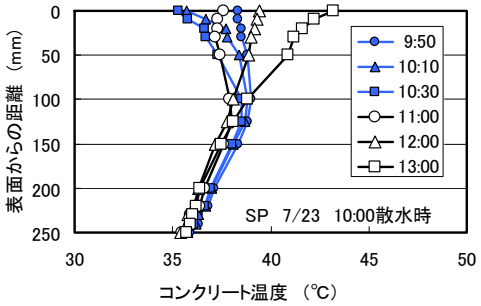
各試験体の打ち込み完了時間が異なることから，試験体 N の打ち込み完了(13:45)からの時間で表した。また，このときの日照量も合わせて示し，時間の経過にともない減少していることがわかる。単位蒸発量は，コンクリート方面から蒸発する水分量を単位面積，単位時間あたりで示したもので，3 分間で測定した平均値である。単位蒸発量は，打ち込み直後に大きく，1 時間程度から 1.6～1.7g/m^2/min に落ち着く傾向にある。SH の初回（0.26hr）の値は，まだ日陰養生を行っていないことから N と条件が同じであり，N の値と大きく変わらない。2 回目（0.87hr）以降の値では，日陰養生によって 0.5g/m^2/min 程度低下することがわかる。SM は本測定中，養生マットを敷設していないため N と同条件である。PW の初回（0.77hr）の値は小さいが，日照量も小さいことや SM でも低下が認められることから，こて仕上げ時の養生剤の水分蒸発低減効果は本実験では明らかでなかった。

3.4 散水および降雨の影響

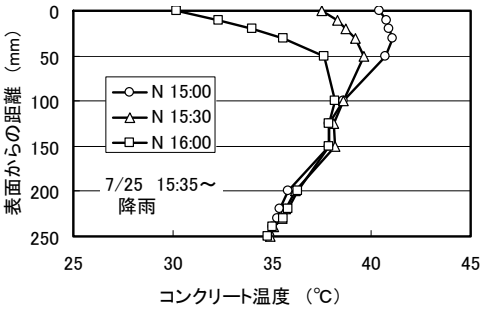
散水の有無による表面温度の違いを**図－１０**に示す。SP のコンクリート表面温度は，散水する度に約 4℃の低下が認められる。その後，温度は散水前程度まで回復するが，散水していない N に比べると低い。7 月 23 日 10:00 の散水時のコンクリート温度分布を**図－１１**に，7 月 25 日夕刻の降雨時の温度分布を**図－１２**に示す。散水や降



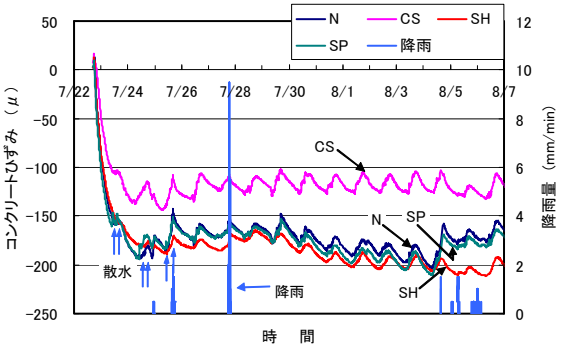
図－１０　散水による表面温度の比較



図－１１　コンクリート表面温度の履歴



図－１２　コンクリート表面温度の履歴



図－１３　コンクリートひずみ変化（降雨の影響）

雨によってコンクリート温度が短時間で影響を受けることがわかり，その範囲は表面から深さ 50～100mm 程度である。

図－１３にコンクリートひずみの経時変化と降雨量を示す。試験体 N および SP は，降雨によって表面が湿潤状態になるが, CS および SH は降雨の影響を受けない。CS は表面に透明シートを密着させた封緘状態にあり, 材齢 1.5 日程度の間に 120μ程度の収縮ひずみが生じ，その後の収縮量に顕著な増加は認められない。SP のひずみは，散水直後に 10 数μ回復するが，約 1 日経過する間に N と同じひずみを示すようになる。N および SP ともに 7 月 25 日および 8 月 4 日の降雨の影響を受け，合板によって雨が遮られる SH に比べて 30μ程度ひずみが回復し，収縮ひずみが小さくなっている。これによると降雨によるひずみの回復期間は，散水に比べて長い傾向を示している。これは，散水量の違いによるものと考えられる。すなわち，1 試験体に 1 日に散布した水量が 1 リットルであるのに対し，降雨による水量は，7 月 25 日が 8.5 リットル，8 月 4～5 日が 10.4 リットルと 8～10 倍の違いがある。また，降雨は散水に比べて時間をかけて水分が供給されるため，コンクリートへの浸透量も多く，ひずみの回復期間が長期にわたったものと考えられる。

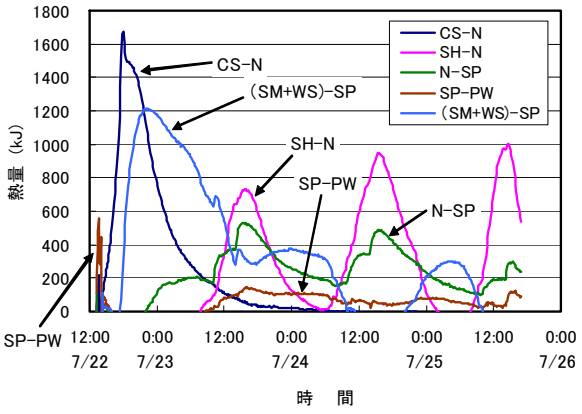
3.5 蓄熱量の比較

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。このような熱量の出入りは養生方法によって異なると考えられる。**図－１４**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。たとえば，凡例中の CS-N は CS の蓄熱量から N の蓄熱量を差し引いた値である。蓄熱量 Q は式(5)より算出した。

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

ただし， V ：温度測定範囲の体積（$=0.5^2 s$），
s：温度測定間隔(m)， ρ：密度（円柱供試体による測定値 2340kg/m^3）， ΔT ：温度差（=T－20℃），T：コンクリート温度， c_c ：コンクリートの比熱[3]（$=3.03\times10^3/\rho$）

CS-N は打ち込み後から増加し，18:00 をピークにその後低下し，翌日以降差が認められない。透明シートにより水分蒸発を許容しないことによるものと考えられ，初期の蒸発の影響は他の要因に比べて著しく大きい。SH-N は日向と日陰の差であり，直射日光による影響が示される。本試験体では，日射によりコンクリートは 1000kJ 程度多く蓄熱することがわかる。N-SP は散水によって一散される熱量を示している。1 日 2 回の散水時間帯では，1 回の散水で 150kJ 程度の熱量が奪われている。SP-PW は，養生剤の効果を示している。施工直後に増加しており，初期の放熱を低減している。すなわち，水分の蒸発を抑制する効果が示されていると推察される。一方，そ



図－１４　蓄熱量の比較

の後の熱量に顕著な差は見られない。(SM+WS)-SP の初期の増加は CS-N より遅く，17:30 頃から上昇し始めており，保温効果が影響していると考えられる。その後の熱量の推移においても，夜間に増加しており，養生マットおよび養生シートの使用は保温効果に大きく寄与していることが明らかである。

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) コンクリート表面温度は，直射日光によって日中に上昇して 45℃以上になり，日変化は 15℃以上になる。

(2) 白色シートは，日射熱の一部を反射し，温度上昇を緩和すると考えられる。

(3) コンクリート表面の収縮ひずみを低減するには，一時的な散水だけでは効果が小さく，養生マットなどにより水分供給を持続させることが効果的である。

(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。

(5) 打ち込み直後の水分蒸発量は，1.6～1.7g/m^2/min 程度であり，コンクリート表面が日向と日陰では 0.5 g/m^2/min 程度の差が生じる。

参考文献

1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書［施工編］，2008

2) 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

3) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，2008