

# 論文 パッシブサーモグラフィ法によるコンクリート表面の水分状態が及ぼす欠陥部の蓄熱特性に関する研究

川久保 政亮<sup>\*1</sup>・柳内 睦人<sup>\*2</sup>・金光 寿一<sup>\*3</sup>・白井 成也<sup>\*4</sup>

**要旨:** サーマグラフィ法からコンクリートの内部診断を行う場合には、太陽光を利用したパッシブ法が効率的である。しかし、期待するコンクリートの表面温度は気象条件や内部欠陥の状態により大きく変動することになり、診断を誤らないためには気象条件が及ぼす診断時刻などの適切な判断が要求される。そこで、本研究では降雨後のコンクリート表面の水分状態が健全部コンクリート及び欠陥部の温度上昇にどのような影響を及ぼすのかを実験的及び熱伝導解析により検討した。その結果、表面に滞水していた水が蒸発し、コンクリート表面が乾燥すると急激な温度上昇が始まるが、欠陥検出は表層部の乾燥する時間帯に影響される。

**キーワード:** パッシブサーモグラフィ法, コンクリート診断, 降雨, 欠陥評価, 熱伝導解析

## 1. はじめに

パッシブサーモグラフィ法は加熱機器の必要もなく簡便で効率性も高く均一な熱量が供給されることから大規模構造物の診断に適している。ところが、入射する太陽エネルギー量は季節、天候で、また構造物の方位や傾斜で複雑に変化し、熱画像からの検出精度に影響を及ぼすことになる。筆者らは、既に降雨後の気象条件が及ぼす健全部コンクリートの温度上昇変化、また欠陥部の温度上昇変化について積算日射量の相違から明らかにしてきた<sup>1)</sup>。さらに欠陥部の温度上昇変化については、欠陥部への水分浸透がコンクリート表面温度(欠陥評価)にどのような影響を及ぼすのかを検討してきた<sup>2)</sup>。その結果、健全コンクリートの温度上昇は大雨後の翌日が晴天の場合には、晴天が連続する気象条件よりも積算日射量に対する温度上昇量が大きくなることが確認された。しかし、診断を誤らないためには種々降雨条件が及ぼす診断時刻などの適切な判断が要求される。赤外線調査では、診断の信頼性の向上を図るために撮影の環境条件や構造形態から内部変状が確認できる条件なのかを総合的に判断する必要がある。

そこで、本研究ではさらに降雨後にコンクリート表面に雨が滞水した場合を想定して、その表面の乾燥過程における健全部コンクリート及び欠陥部の温度上昇変化について実験的及び熱伝導解析により検討した。

## 2. 実験概要

前報では、降雨によるコンクリートへの吸水量が降雨時間に影響することから、水中浸漬時間を変えて温度上昇変化の相違を比較した。これは、降雨が日の出時刻までには上がりコンクリート表面が湿潤な状態を想定したもので

あって、本実験ではコンクリート表面に未だに滞水している状態で温度上昇変化の相違を比較するものである。

降雨後のコンクリート診断を想定した試験体への注水は、降雨温度と滞水量を考慮して水温及び注水量を変えて赤外線カメラにより健全部コンクリート及び欠陥部の温度上昇変化の相違を比較した。赤外線カメラによる温度測定は、平成22年7月28日、8月5日及び9月3日の7:00~17:00までの10時間である。

### 2.1 試験体及び実験条件

実験に供した試験体一覧及び実験条件を表-1及び表-2に、また作製した試験体を図-1に示す。コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメントを使用し、呼び強度40N/mm<sup>2</sup>、スランプ8cmでW/C=45%、s/a=47.6%、空気量は4.5%である。N及びS試験体は、幅200×200×高さ100mmで、打設後28日間水中養生し、その後実験室内にて空中養生させたものである。N試験体は欠陥を設けていない試験体で、欠陥を有するS試験体には、幅100×100×厚み5mmの発泡スチロールを深さ10mm、20mm及び30mmの位置に埋め込んで、硬化後にアセトンで溶かして空洞にしている。コンクリート表面の滞水は、アクリル板(幅150×150×高さ50mm)を貼付け100cc、200cc及び300ccを測定開始前に注水した。そのアクリル内に滞水した水の高さは、前報の湿潤な状態に比べてそれぞれ4.4mm、8.8mm及び13.2mmになる。コンクリート表面に供給した水の水温及び水量を種々変化させた実験日は次のとおりである。

- 1) 7月28日は水温を測定開始時のコンクリート温度(±0℃)にして注水し、水量はN2, S2試験体に100cc, N3, S3試験体へは300ccとした。
- 2) 8月5日は測定開始時のコンクリート温度よりも5℃

\*1 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*3 中央工学校 土木測量科講師 博(工) (正会員)

\*4 中央工学校 都市環境学科

表-1 試験体一覧

試験体記号		欠陥部の状態(空洞)	
		大きさ(mm)	深さ(mm)
N	N1	なし	
	N2		
	N3		
S	S1	100×100×5	10
	S2		20
	S3		30

表-2 実験条件

実験日	No.	水温(°C)	注水条件	滞水深さ(mm)
7月28日	N1	±0	なし	—
	N2		100cc	4.4
	N3		300cc	13.2
	S1		なし	—
	S2		100cc	4.4
	S3		300cc	13.2
8月5日	N1	+5	なし	—
	N2		100cc	4.4
	N3		200cc	8.8
	S1		なし	—
	S2		100cc	4.4
	S3		200cc	8.8
9月3日	N1	-5	なし	—
	N2		100cc	4.4
	N3		200cc	8.8
	S1		なし	—
	S2		100cc	4.4
	S3		200cc	8.8

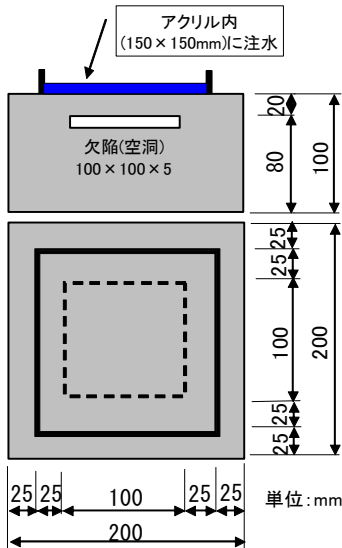


図-1 試験体(S2試験体)

高い水温(+5°C)にして注水し、水量は N2, S2 試験体に 100cc、N3、S3 試験体へは 200cc とした。

- 3) 9月3日は測定開始時のコンクリート温度よりも 5°C低い水温(-5°C)にして注水し、水量は N2, S2 試験体に 100cc、N3、S3 試験体へは 200cc とした。

## 2.2 赤外線カメラによる温度測定と含水率の測定

### (1) 赤外線カメラによる温度測定



写真-1 測定状況

写真-2 含水率測定

赤外線カメラによる温度測定〔2次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域 8.0~14.0μm、感度 0.05°C(at30°C)〕は、時刻 7:00 から 17:00 まで 10 時間を測定距離 120cm の位置から 7:00~8:00 は 10 分間隔で、8:00 以降は 20 分間隔で熱画像の撮り込みを行った(写真-1 参照)。なお、試験体は測定開始(7:00)の 15 分前に実験室から搬入し、注水後に測定を開始した。また、測定面以外からの熱の流出入を遮断するため、試験体の側面及び底面には厚さ 50mm の発泡スチロールを貼付けている。

### (2) 含水率の測定

含水率の測定はコンクリートモルタル接触型水分計〔(HI-520):高周波容量式、測定範囲 0~12%、厚み補正 10~40mm〕にて行った。測定状況を写真-2 に示す。なお、測定は滞水した水がコンクリート表面から消えた状態から行っている。

### (3) 日射量と外気温の測定

図-2(a),(b)には自動計測で得られた 7:00~17:00 までの全天日射量と外気温を示す。最大日射量は、7月28日が 922W/m<sup>2</sup>、8月5日が 854W/m<sup>2</sup>、9月3日が 796W/m<sup>2</sup>である。7:00~14:00 までの積算日射量は7月28日が 4,325W/m<sup>2</sup>・h、8月5日が 4,761W/m<sup>2</sup>・h、9月3日が 4,246W/m<sup>2</sup>・hであった。図中には日射変動を検討するために Bouguer 式<sup>3)</sup>で算出した 7月28日の全天日射量(快晴時)を示しておく。計算された Bouguer 式(快晴日)の 7:00~14:00 までの積算日射量は7月28日が 5,232W/m<sup>2</sup>・h、8月5日が 4,835W/m<sup>2</sup>・h、9月3日が 4,415W/m<sup>2</sup>・h となり、実験日の日射量は、それぞれ 83%、98%、96%になる。7:00~17:00 までの平均外気温は7月28日が 33.5°C、8月5日が 33.5°C、9月3日が 34.8°Cで、7:00 からの温度上昇はそれぞれ 6.4°C、4.5°C及び 5.5°Cであった。特に、8月5日は日射変動が見られないものの、11:00 以降 4°C以上の気温変化が起こっている。また、平均風速は7月28日が 2.8 m/s、8月5日が 2.4m/s、9月3日は 2.1 m/s であった。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 含水率の経時変化

図-3は8月5日に各試験体中央部を水分計で測定した深さ 30mm までの含水率である(写真-2 参照)。表-3にはコン

クリート表面から水が消えて(乾燥)測定可能となった測定開始時間を示す。

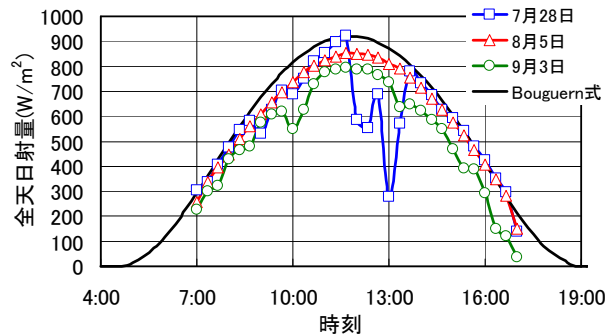
その結果、N1 及び S1 試験体は同様の含水率を示しており、7:00 では4.0%が図-2の気象条件により、17:00には約3.8%と僅かに減少している。N2 及び S2 試験体は測定開始時のコンクリート温度である 27℃に水温を+5℃で管理(32℃)して100ccをアクリル内に注水したもので、その滞水により水分計で測定可能となった時刻は、N2が12:00で欠陥を有するS2は11:00であった。N2の含水率は6.0%、S2が8.6%で17:00には、それぞれ5.3%、6.1%に減少している。また、200ccを注水したN3試験体は測定できた時刻は14:00で5.2%が17:00には5.0%、S3試験体は14:00に9.7%が17:00には7.5%に減少している。含水率の相違では、いずれもN試験体とS試験体を比較すると、若干欠陥部(空洞)を有するS試験体の方が高含水率となっている。なお、9月3日のN3試験体の測定開始時が7:40になった理由はアクリル板からの水漏れである。

### 3.2 熱画像と温度上昇変化

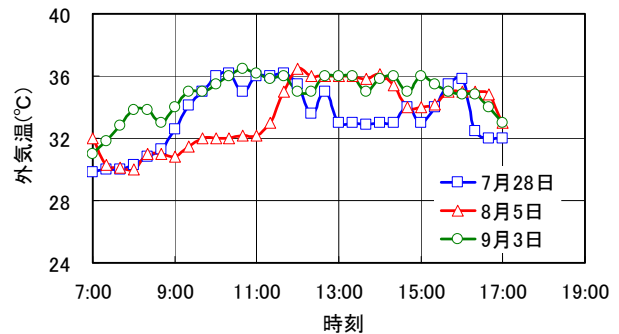
写真-3及び写真-4に7月28日に得られた熱画像を示す。写真-3(a)～(c)は7:00に、(d)～(f)は14:00に得られた熱画像である。コンクリート表面に水が無くなり、水分計にて含水率の測定が可能となった時刻は、N2試験体は12:40、N3試験体は測定終了時の17:00、S2試験体は11:40、S3は12:40であった。写真-3(f)は14:00の熱画像であるが、アクリル内には未だコンクリート表面に水が滞水して、アクリル枠外より温度が低いことが分かる。赤外線カメラによる水温の測定では、霧状の水蒸気温度の測定はできないものの、ビーカー内の水温などは可能であることを確認している。また、写真-4に示すS1試験体(欠陥深さ10mm)では、測定開始の7:00及び14:00ともに欠陥を判読することができる。しかし、欠陥の深さ20mm、30mmのS2及びS3試験体では、アクリル内の乾燥状態が一樣ではなく、視覚的に欠陥を評価するには誤診を起こす危険性がある。

#### (1) N試験体の温度上昇変化

図-4は各実験日に得られたN試験体及び外気温の温度上昇変化である。水温及び注水量を変えた各試験日の温度上昇変化は、N1試験体と比較すると100cc注水したN2試験体の方が温度上昇量は大きくなっている。両者の最大温度差は、7月28日は15:20に2.95℃、8月5日は14:00に1.82℃、9月3日は15:40に4.54℃である。アクリル内に滞水していた水が吸収及び蒸発し、ある程度コンクリート表面が乾燥すると急激に温度上昇が始まり、乾燥状態のN1試験体よりも上昇量が大きくなる。コンクリート表面の温度上昇量は、表面が濡れている方がコンクリート表面の濃淡が乾燥時の灰色よりも濃くなり<sup>4)</sup>日射吸収率が大きくなること、また表面に水膜(水分)を含んでいる方が乾燥している場合よりも反射率が小さくなる<sup>5)</sup>ことが影響したもの



(a) 日射量



(b) 外気温

図-2 気象条件

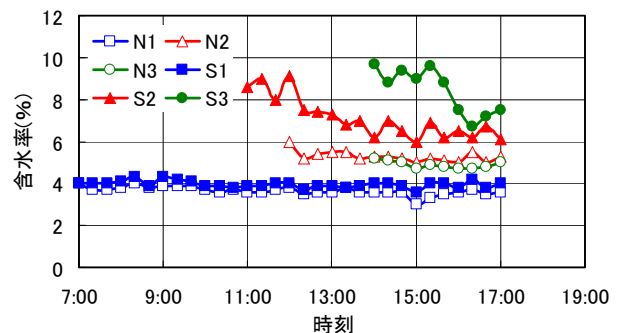


図-3 含水率の時系列変化(8月5日)

表-3 注水条件とコンクリート表面の乾燥状況

試験体	水温(°C)	注水条件(cc)	測定開始時間	含水率(%)		
				開始時	17:00	
7月28日	±0	N1	なし	7:00	4.5	3.0
		N2	100	12:40	5.4	4.5
		N3	300	17:00	4.4	4.4
		S1	なし	7:00	4.5	3.3
		S2	100	11:40	10.4	6.1
		S3	300	12:40	9.8	5.8
8月5日	+5	N1	なし	7:00	4.0	3.6
		N2	100	12:00	6.0	5.3
		N3	200	14:00	5.2	5.0
		S1	なし	7:00	4.0	4.0
		S2	100	11:00	8.6	6.1
		S3	200	14:00	9.7	7.5
9月3日	-5	N1	なし	7:00	3.2	3.3
		N2	100	12:20	5.5	4.1
		N3	200	※7:40	4.4	4.1
		S1	なし	7:00	3.3	3.5
		S2	100	11:40	5.5	4.7
		S3	200	15:00	5.4	4.9

と思われる。図-4(c)に示すN3試験体はアクリル内に200ccの注水後に漏水し8:00には表層部が乾燥したもので、N1

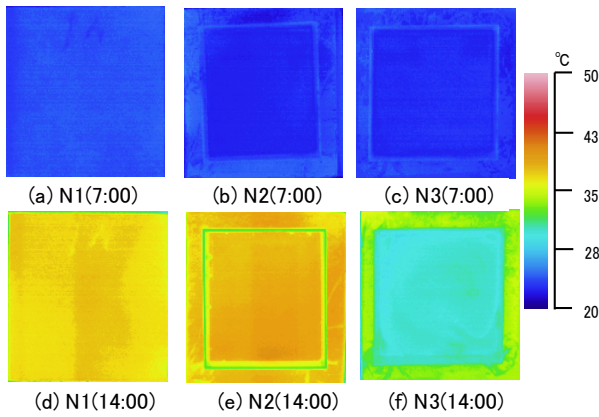


写真-3 N試験体の熱画像(7月28日)

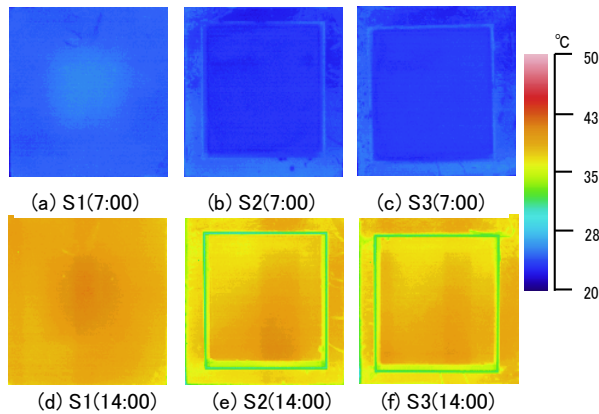


写真-4 S試験体の熱画像(7月28日)

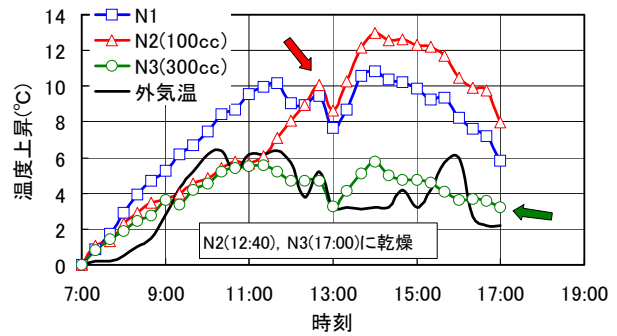
試験体との比較からも表面が濡れていた方が温度上昇量は大きくなることが明らかである。

一方、8月5日の温度上昇量は、9月3日に比べると小さい。積算日射量は、前述したとおり8月5日の方が大きい、8月5日は風が強く、特に11時以降の両日の平均風速差は2m/s程度生じている。8月5日のN3試験体(注水200cc)の温度上昇は、14:00頃には表層部が乾燥し温度上昇を示しているが、この時刻の日射量は減少傾向にあり、N2試験体と比較すると温度上昇率は小さい。

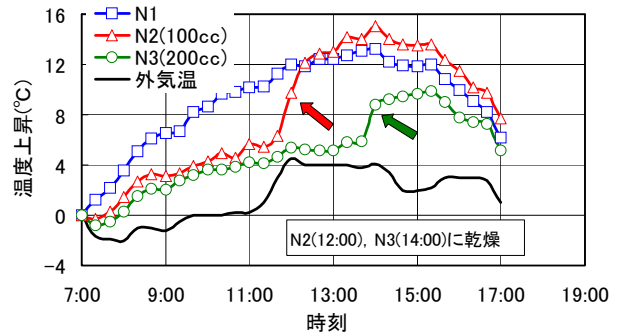
また、水温と温度上昇変化との関係では、8月5日は測定開始時のコンクリート温度よりも5°C高い水温(+5°C)にして注水した影響から、7:00以降は若干低くなっているものの、7月28日の±0°C、9月3日の-5°Cの時系列変化はほぼ同様である。

## (2) S試験体の温度上昇変化

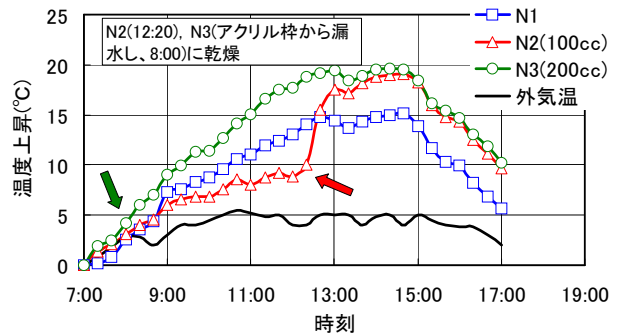
図-5(a)～(c)は各実験日におけるS試験体の欠陥部範囲(100mm)の平均温度から健全部温度(アクリル板外側平均)を減算した温度差を時系列で示したものである。そのS1試験体の欠陥部の最大温度差は、7月28日が1.29°C(10:20)、8月5日が1.57°C(10:20)、9月3日が2.01°C(11:00)である。また、100cc注水した欠陥深さ20mmのS2試験体は、7月28日が0.27°C(14:00)、8月5日が0.59°C(12:00)、9月3日が0.63°C(12:40)で、いずれも表層部が



(a) 7月28日(水温±0°C)



(b) 8月5日(水温+5°C)

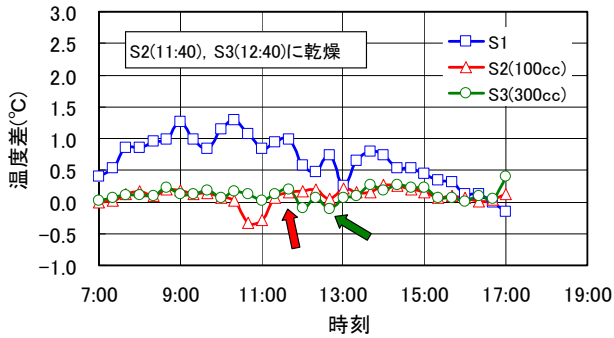


(c) 9月3日(水温-5°C)

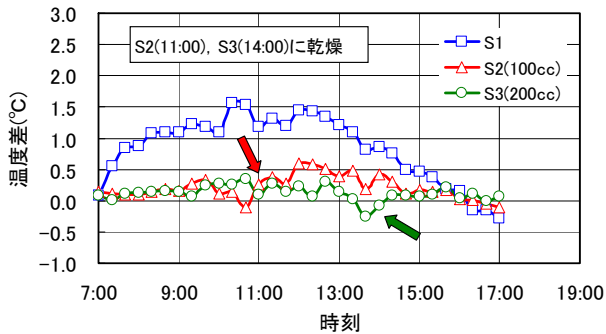
図-4 N試験体の温度上昇変化

が乾燥して1～2時間後に現れている。一方、欠陥深さ30mmのS3試験体は、200cc及び300ccを注水したもので、7月28日が0.27°C(14:20)、8月5日が0.22°C(15:40)、9月3日が0.50°C(13:40)である。表層部が乾燥した時刻は12:40以降で、欠陥深さも30mmであり、健全部との温度差を期待することは無理である。

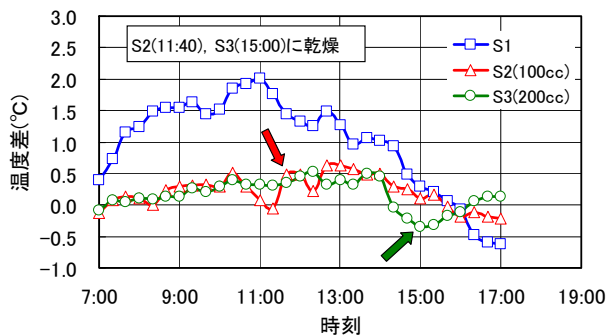
図-6は、写真-4(d)、(e)、(f)の中央ラインの左端温度を0°Cとして示したプロファイル温度である。その温度差では、欠陥の深さ20mmのS2、10mmのS1、30mmのS3の順に高くなっている。アクリル内(150mm)の欠陥部範囲と健全部との温度差でみると、S1は明らかに両者の温度差から欠陥部を確認できるものの、S2及びS3の温度差は僅かである。アクリル外の健全部との温度差は、アクリル外の左右の温度が異なっているために図中に示した温度差しか得られない。大きな温度差を得るためには、太陽エネルギーによって欠陥部の前面に蓄積される熱量が期待できる時



(a) 7月28日(水温±0°C)



(b) 8月5日(水温+5°C)



(c) 9月3日(水温-5°C)

図-5 S試験体の温度上昇変化

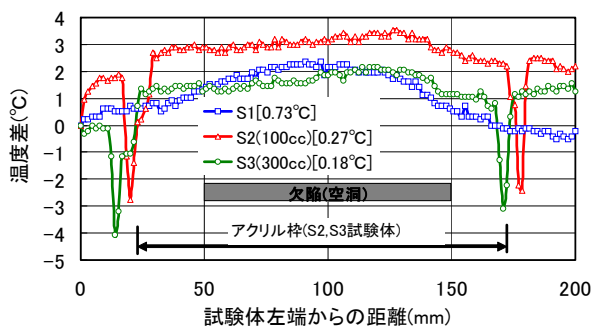


図-6 プロファイル温度(7月28日; 14:00)

間帯に表層部が乾燥する必要がある。この表層部が乾燥し、蓄熱量が期待できる温度差についてはシミュレーションにより明らかにする。

#### 4. 熱伝導解析

二次元非定常熱伝導解析は、汎用 FEM プログラム COSMOS/M を使用した。解析は日射変動の小さい 8 月 5 日

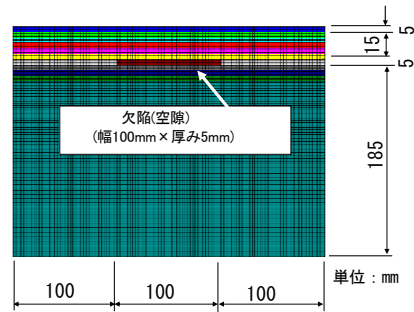


図-7 解析モデル(S2 試験体)

表-4 解析に用いた熱特性

材料	密度	比熱	熱伝導率	熱伝達係数
	(kg/m <sup>3</sup> )	[kJ/(kg·K)]	[W/(m·K)]	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
水(滞水)	999	4.182	0.59	21
コンクリート(湿潤)	2,300	1.267	2.30	
コンクリート(乾燥)	2,200	0.876	1.40	
欠陥(空気)	1.161	1.009	0.0256	

のコンクリートの健全部と欠陥部の温度上昇変化について実験結果と比較した。

##### (1) 解析条件

図-7 に解析モデルを表-4 に解析に用いた熱特性を示す。解析モデルの大きさは幅 300×高さ 210mm、内部欠陥は実験と同様の幅 100×厚み 5mm で、欠陥の内部は 1mm 間隔でメッシュを設けている。S2 試験体の滞水から水が無くなるまでの状態は、解析モデルの表面から深さ 5mm までを水の熱特性とし、実験で得られた 11:00 にコンクリートの熱特性(湿潤)になるように比例関係で時系列変化させて与えた(表-4 参照)。その蒸発潜熱の影響は、今回、実験で得られた温度上昇変化とのすり合わせによって吸収(入力)日射量を低減しながら再現した(図-8 参照)。水面あるいはコンクリート表面と外気との対流顕熱については、熱伝達係数を 10, 14, 18 及び 21W/(m<sup>2</sup>·K)と変えて解析し、最も実験値の温度上昇に近似した 21W/(m<sup>2</sup>·K)の一定値に設定した。なお、解析モデルではアクリル板は無視し、モデル表面の全てに滞水しているものと仮定している。解析時間間隔は 10 分、結果の出力は 20 分間隔で行った。

##### (2) 欠陥部の温度変化

図-9 は赤外線カメラで得られた表面温度(実験)と解析結果である。その解析温度は、11:00 頃までは滞水温度の上昇が、またそれ以降はコンクリート表面温度の上昇が再現されている。N2 試験体は 12:00 に表面が乾燥しているが、乾燥時刻の相違のみで温度上昇の勾配は S2 と近似している。一方、図-10 は欠陥部 100mm の中央温度から健全部温度を減算した温度差変化である。この図中の凡例の 10mm, 20mm 及び 30mm は欠陥の深さを示すもので、注水なし(乾燥)と比較したものである。滞水条件の温度差は表面が乾燥する 11:00 までは欠陥として評価できるものではないが、滞水がなくなると急激に欠陥部の温度が上昇し始める。深さ

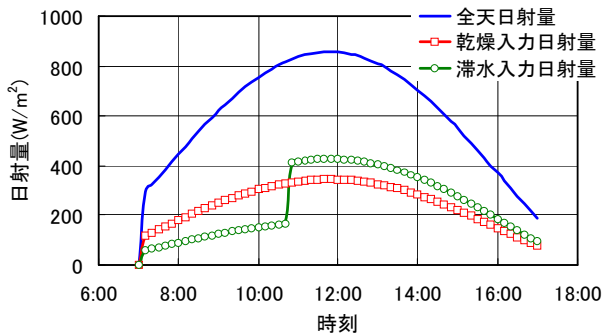


図-8 供給した日射量(8月5日)

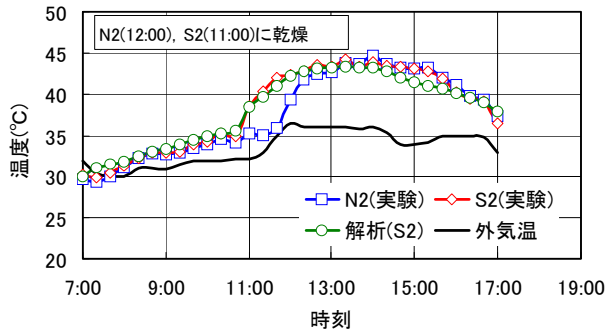


図-9 実験結果と解析結果との比較

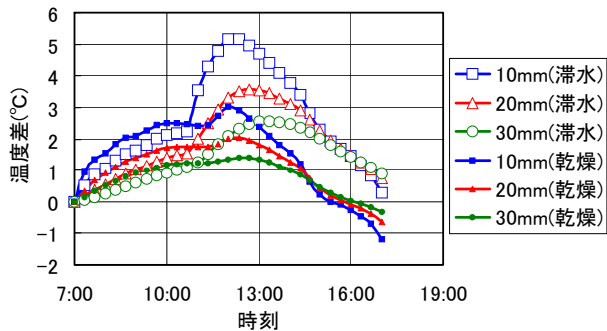


図-10 欠陥部の温度差変化

10mm, 20mm, 30mmの滞水と乾燥の温度差の較差は、それぞれ2.14°C, 1.53°C, 1.15°Cと滞水条件の入力日射量が11:00までは少ないにも拘わらず温度差は大きくなる。実験値と同様に欠陥範囲100mmでの平均温度差では、それぞれ1.71°C, 1.22°C, 0.93°Cとなり、実験値S2は0.59°Cで1.22°Cよりも小さい(図-5(b)参照)。実験値の温度差が小さくなった理由としては、アクリル板が直達日射量を遮ったためと考えられる。赤外線調査では、撮影の環境条件や気象条件から内部変状が確認できる適切な診断時刻を判断する必要がある。このように降雨によりコンクリート表面が滞水状態にあっても、南中時以前に乾燥すれば乾燥状態が続く気象条件よりも水分が蓄熱量を高め診断に有効に働くことが明らかになった。

## 5. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

(1) アクリル内に100cc(滞水深さ4.4mm)注水したN2試験

体の深さ30mmまでの含水率の変化は、コンクリートへの吸水あるいは蒸発により12:20頃には表面が乾燥し、5.6%が17:00には4.6%に減少した。

- (2) アクリル内に200cc(滞水深さ8.8mm)及び300cc(滞水深さ13.2mm)注水したN3試験体の乾燥時刻は、それぞれ14:00, 17:00頃となり、欠陥を設けたS試験体では乾燥時刻が若干早まる傾向がみられた。
- (3) 熱画像では、コンクリート表面に滞水している状態から乾燥時刻、また乾燥後の温度上昇を視覚的に確認することができる。
- (4) 注水した試験体の温度上昇量は、コンクリート表面が湿潤状態にまで減少すると日射吸収率が高まって直ちに急激な温度上昇が始まり、最大温度では注水しない試験体よりも2~4°C程度大きくなる。また、乾燥時刻が早いほど健全部コンクリートの温度上昇量は大きくなる。
- (5) 水温と温度上昇変化との関係では、コンクリート温度よりも高い水温にして注水した場合には注水以降に初期温度よりも若干温度が低くなるものの、水温をコンクリート温度と同様に、あるいは低くした場合の時系列温度には変化が見られない。
- (6) 欠陥部と健全部との温度差は、欠陥部が浅いほど最大温度差となる時刻が早くなり、注水した試験体の欠陥部の最大温度差は、表層部が乾燥して1~2時間後に現れている。欠陥部が深い場合、表層部が乾燥する時刻が南中時以降になると健全部との温度差を期待することは無理である。
- (7) 熱伝導解析では、コンクリート表面の水分が南中時以前に乾燥すれば欠陥上面の蓄熱量を高め診断に有効に働くことが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 金光寿一, 柳内睦人: パッシブサーモグラフィ法によるコンクリートの欠陥検出に及ぼす降雨の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 31, No. 1, pp. 2053-2058, 2009. 7
- 2) 金光寿一, 柳内睦人, 川久保政亮: パッシブサーモグラフィ法によるコンクリート欠陥部への水分浸透の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 32, No. 1, pp. 2053-2058, 2010. 7
- 3) 金山公夫, 馬場弘: ソーラーエネルギー利用技術, 森北出版, pp. 56-83, 2004. 5
- 4) 地濃茂雄: 降雨濡れによるコンクリート表面の色調変化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 285-288, 1995. 7
- 5) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 152-192, 1994