

パッシブサーモグラフィ法によるコンクリートの含水率と温度変化の関係

日大生産工(院) ○ 川久保政亮
 日大生産工 柳内 睦人
 中央工学校 金光 寿一

1. はじめに

日射量及び外気温の変動を利用したパッシブサーモグラフィ法は、加熱機器を利用するアクティブ法に比べて検査の効率性も高く、広範囲に均一な熱量が供給されることから大規模なコンクリート構造物の診断に適している。ところが、供給される太陽エネルギーは季節や天候によって変化し、特に降雨後にはコンクリートへの吸水が温度上昇変化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コンクリートの温度上昇変化や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いる。モニタリング及び実験結果では、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。また、内部に空洞を有する欠陥部の温度上昇は、コンクリート表面の含水率が高くなるほど健全部との温度差が大きくなり、降雨によるコンクリートへの吸水が欠陥検出に有効であることが示唆された。しかし、構造形態によっては降雨によるコンクリート表面への滞水が想定される。例えば、吹付けコンクリート法面などでは、その表面形状から雨水が凹部に滞水することが考えられる。

そこで、本研究では降雨後にコンクリート表面の滞水が健全コンクリート及び欠陥を有するコンクリート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。

2. 実験概要

降雨後のコンクリート法面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コンクリート及び欠陥を有するコンクリートの温度上昇変化の相違を比較した。

表-1 試験体一覧及び実験条件

試験体記号	欠陥部の状態(空洞)		注水条件
	大きさ(mm)	深さ(mm)	
N	N1	なし	なし
	N2		100cc
	N3		200cc, 300cc
S	S1	100×100×5	なし
	S2	20	100cc
	S3	30	200cc, 300cc

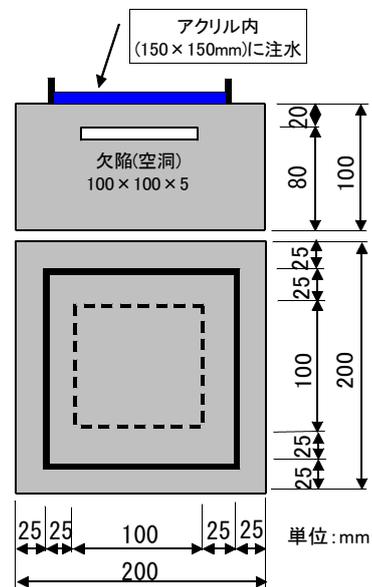


図-1 試験体(S2試験体)

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。測定日には日射量、外気温、湿度及び風速・風向の計測を行っている。なお、試験体の測定面は計測された水平面全天日射量との関係が容易となるように欠陥面を上向きにしている。

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/mm²、スランプ8cm、W/C=45%、s/a=47.6%及び空気量は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×厚さ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10mm)を貼付け、霧吹きを利用して、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、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。

a) 7月28日は水温を測定開始時のコンクリート温度と同じ水温(±0°C)にして注水し、水量はN2、S2試験体に100cc及びN3、S3試験体へは300ccとした。

b) 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、水量はN2、S2試験体に100cc、N3、S3試験体へは200ccとした。

c) 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

赤外線カメラによる温度測定〔二次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域8.0~14.0

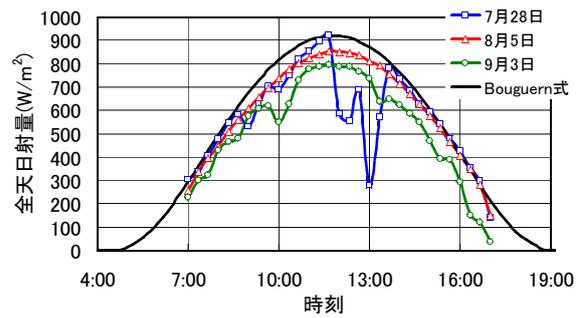
μm、感度0.05°C(at30°C)〕は、時刻7:00から17:00まで10時間を測定距離120cmの位置から7:00~8:00は10分間隔で、8:00以降は20分間隔で熱画像の撮り込みを行った。撮影は測定距離の一定を図るために赤外線カメラを支持するキャスター付の台を作成して行った。なお、試験体は測定開始(7:00)の15分前に実験室から搬入し注水後測定を開始した。また、測定面以外からの熱の流入を遮断するため、試験体の側面及び底面には厚さ50mmの発泡スチロールを貼付けている。

2.3 含水率の測定

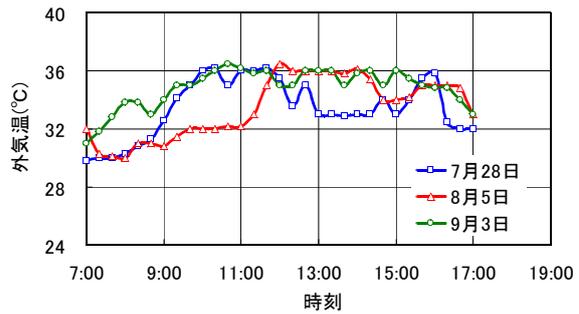
含水率の測定はコンクリートモルタル接触型水分計〔(HI-520):高周波容量式、測定範囲0~12%、厚み補正10~40mm〕にて行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 日射量と外気温



(a) 日射量



(b) 外気温

図-2 気象条件

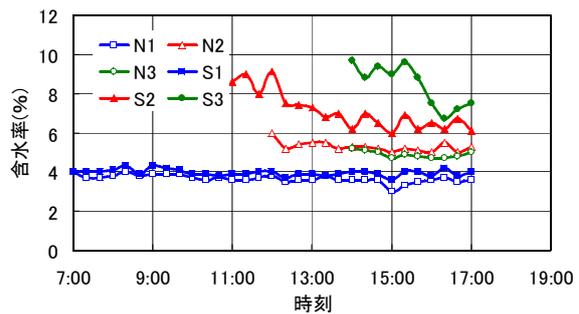


図-3 含水率の時系列変化(8月5日)

図-2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/m²、8月5日が854W/m²、9月3日が796W/m²である。測定時間である7:00~14:00まで積算日射量は7月28日が4,325W/m²・h、8月5日が4,761W/m²・h、9月3日が4,246W/m²・hであった。図中には日射変動を検討するためにBouguer式で算出した7月28日の全天日射量(快晴時)を示しておく。

その結果、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/m²・h、8月5日が4,835W/m²・h、9月3日が4,415W/m²・hで、実験日の日射量は、それぞれ83%、98%、96%になる。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。

3.2 含水率の時系列変化

図-3は8月5日に各試験体中央部を水分計で

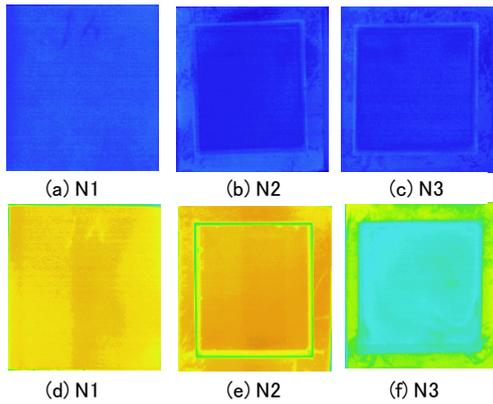


写真-1 N試験体熱画像(7月28日)

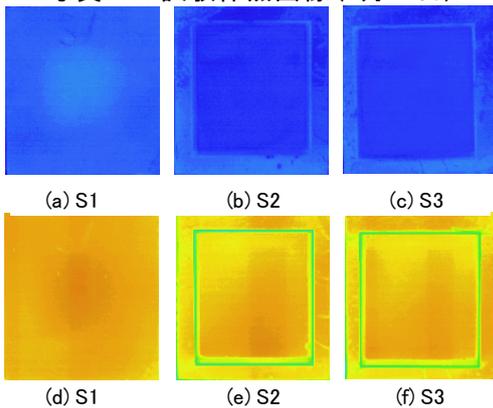
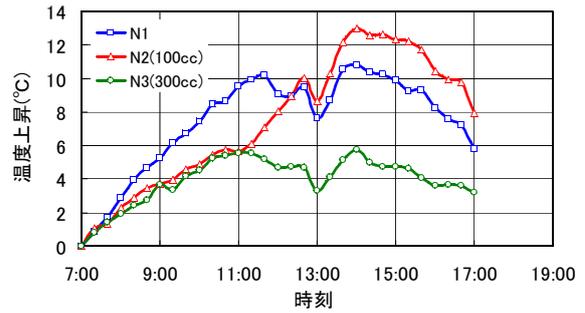


写真-2 S試験体熱画像(7月28日)

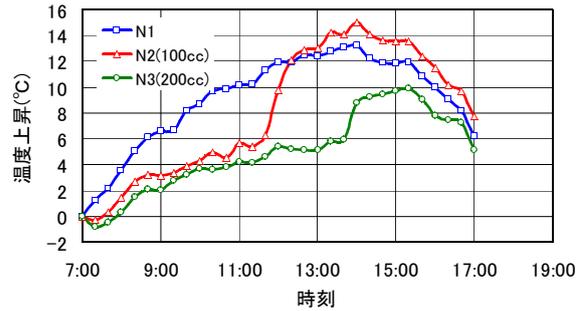
測定した深さ30mmまでの平均含水率である。その結果、N1及びS1試験体は同様の含水率を示しており、7:00では4.0%が図-2の気象条件により、17:00は約3.8%と僅かに減少している。N2及びS2試験体は測定開始時のコンクリート温度である27℃に水温を管理して100ccをアクリル内に注水したもので、その滞水により水分計で測定可能となった時刻は、N2が12:00で欠陥を有するS2は11:00であった。N2の含水率は6.0%、S2が8.6%で17:00には、それぞれ5.3%、6.1%に減少している。また、200ccを注水したN3試験体は測定できた時刻は14:00で5.2%が17:00には5.0%、S3試験体は14:00に9.7%が17:00には7.5%に減少している。なお、7月28日及び9月3日の含水率の時系列変化では水温の影響は見られず、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試験体の方が含水率が高くなっている。

3.3 熱画像と温度上昇変化

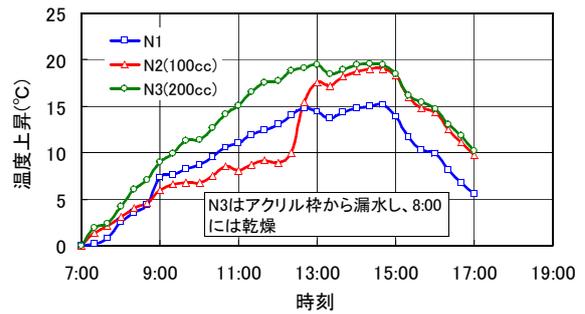
写真-1及び写真-2に7月28日に得られた熱画像を示す。写真の(a)~(c)は7:00に、(d)~(f)は14:00に得られた熱画像である。コンクリート表面に水分が無くなり、水分計にて含水率の測定が可能となった時刻は、N2試験体は



(a) 7月28日(水温±0°C)



(b) 8月5日(水温+5°C)



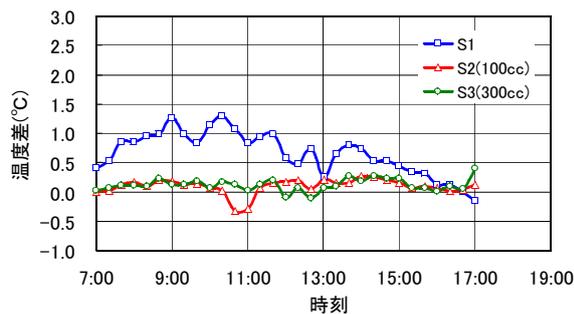
(c) 9月3日(水温-5°C)

図-4 N試験体の温度上昇変化

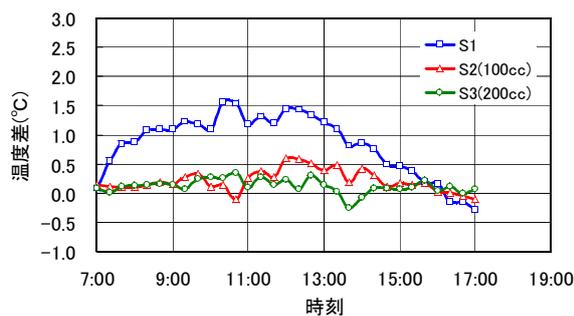
12:40、N3試験体は測定終了時の17:00のみ、S2試験体は11:40、S3は12:40であった。写真-1(f)は14:00の熱画像であるが、アクリル内には未だコンクリート表面に水が滞水して、アクリル枠外より温度が低いことが分かる。また、写真-2に示すS1試験体(欠陥深さ10mm)では、測定開始の7:00及び14:00ともに欠陥を判読することができる。

(1) N試験体の温度上昇変化

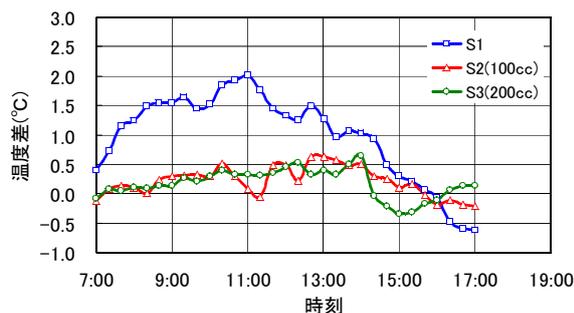
図-4は各実験日に得られたN試験体の温度上昇変化である。なお、図-4(c)に示すN3試験体はアクリル内に注水後漏水し8:00には表層部が乾燥したものである。水温及び注水量を変えた各試験日の温度上昇変化は、N1試験体と比較すると100cc注水したN2試験体の方が温度上昇量が大きくなっている。両者の最大温度差は、7月28日は15:20に2.95°C、8月5日は14:00に1.82°C、9月3日は15:40に4.54°Cである。



(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

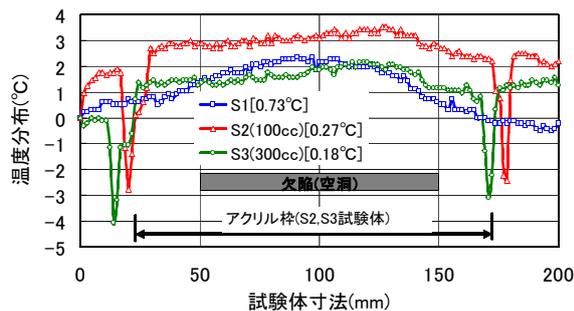


図-6 温度分布 (7月28日 14:00)

アクリル内に滞水していた水が蒸発し、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試験体よりも温度上昇が大きくなる。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。一方、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、ほぼ同様であった。

(2) S試験体の温度上昇変化

図-5は各実験日におけるS試験体の欠陥部温度から健全部温度を減算した温度差を時系列で示したものである。S1は注水していない試験体で欠陥の深さは10mmである。その欠陥部の最大温度差は、N1試験体の温度上昇量に比例して大きくなっており、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。なお、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-2(d), (e), (f)の中央ラインのプロファイル温度である。このようにS2及びS3試験体は、欠陥部と健全部との温度差も小さい。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時間帯についてはシミュレーションにより明らかにする。

4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 滞水しているコンクリートの温度上昇は、表面に滞水していた水が蒸発し、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、乾燥したコンクリートよりも4°C以上大きくなった。
- (2) 滞水しているコンクリートの欠陥検出では、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間帯に表層部が乾燥する必要がある。