

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温度変化特性に関する研究

金光 寿一^{*1}・柳内 睦人^{*2}・川久保 政亮^{*3}・渡部 正^{*4}

要旨: パッシブサーモグラフィ法によるコンクリート診断は、均一な熱量が供給され大規模構造物の欠陥判定に適している。しかし、より大きな欠陥部の温度差を得るためには気象条件、特に降雨が及ぼす診断への影響について検討する必要がある。そこで、本研究ではコンクリート表面の水分状態が内部の健全部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、コンクリート表面の温度上昇変化は注水した水分量に対応して明瞭な相違が現れ、水分量が多いほど乾燥後に日射吸収量が増大して急激な温度上昇となり、水分が欠陥検出に有効な働きをすることが示唆された。

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, 水分, 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に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、天候は晴れ、曇り、雨の繰り返しであり、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。従って、現地での測定時における事前準備としては、特に測定日前日の気象条件を確認し、測定するか否かの判断が必要となる。この判断では、日本赤外線劣化診断技術普及協会のガイドライン¹⁾によると、1)降雨、降雪時の場合は延期する、2)日較差が7℃未満の場合は延期する、3)風速が5m/s以上の場合は延期することが示されている。また、雨天翌日などで表面が十分に乾いていない状態では、その湿潤部が熱画像に変温部として映ることがあるため、撮影時に対象面が乾いているかどうかを目視にて確認することが示されている。しかし、この雨天翌日に関しては測定条件が曖昧になる可能性があり、熱画像からの診断結果を定量的に予測するためには表層部の水分状態及び含水率との関連を把握した指標が不可欠と思われる。

そこで、本研究では乾燥過程におけるコンクリート表面の水分の影響を明らかにすることを目的に、コンクリート表面のみを濡らした状態から健全部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

本研究は、日射吸収量と温度上昇量との関係をより明瞭にするために、乾燥したコンクリートに対して表面のみを濡らした状態から健全部及び欠陥部の温度上昇変化について検討するものである。なお、赤外線カメラによる温度

測定は、平成23年8月24日は7:00~15:40及び9月8日は7:00~17:00まで行った。

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24N/mm²、スランプ8cm、w/c=50%、s/a=38.6%、空気量4.5%である。試験体は、幅200×200×高さ100mmの形状で打設後28日間水中養生し、その後恒温恒湿室内にて8月24日まで30日間空中養生したものである。試験体内部の欠陥は、幅100×100×厚み5mmの発泡スチロールを深さ10mm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。なお、作製時には発泡スチロールを底面側にワイヤーで固定してコンクリートを打設している。また、コンクリート表面への注水は、アクリル板を測定面に貼付け後に水を30cc、50cc及び70ccを測定開始(7:00)前に霧吹き器にて注水した。計算による幅200×200mmへの注水で滞水した深さは、それぞれ0.75mm、1.25mm、1.75mmとなる。供給した水の水温は、測定開始前のコンクリート温度に調整し、8月24日は28℃、9月8日は26℃である。

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

赤外線カメラ [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℃(at 30℃)]による温度測定は、時刻7:00より測定距離120cmの位置から20分間隔で熱画像の撮り込みを行った(写真-1参照)。試験体は測定開始の30分前に恒温恒湿室内から搬出し、注水後に表面温度の測定を開始した。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

*1 中央工学校 土木測量科講師 博(工) (正会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博(工) (正会員)

*3 東急建設(株) 修(工)

*4 日本大学 生産工学部土木工学科准教授 博(工) (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体記号		欠陥部の状態		注水条件
8月24日	9月8日	大きさ(mm)	深さ(mm)	水量(cc)
N8	N9	100×100×5	10	0
S30	M30			30
S50	M50			50
S70	M70			70

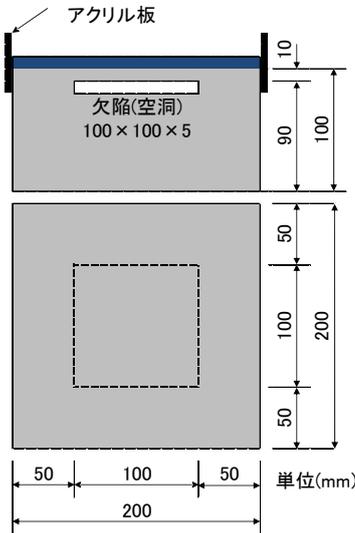


図-1 試験体

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。なお, 測定は目視で注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, 計測した全天日射量と外気温を示す。最大日射量は, 8月24日が838W/m², 9月8日が802W/m²である。時刻7:00~12:00までの積算日射量は8月24日が2,405W/m²・h, 9月8日が2,850W/m²・hであった。図中には日射変動を検討するためにBouguer式²⁾で算出した全天日射量(快晴時を予測)を示しておく。計算されたBouguer式の7:00~12:00までの積算日射量は8月24日が3,295W/m²・h, 9月8日が2,986W/m²・hとなり, 実験日の日射量は, それぞれ73%, 95%になる。外気温の上昇量は, 7:00からそれぞれ5.1℃(12:50), 7.1℃(13:30)であった。また, 風速は8月24日が最大3.0m/s, 平均1.6m/s, 9月8日が最大3.1m/s, 平均1.4m/sで, 平均湿度はそれぞれ60%, 48%であった。

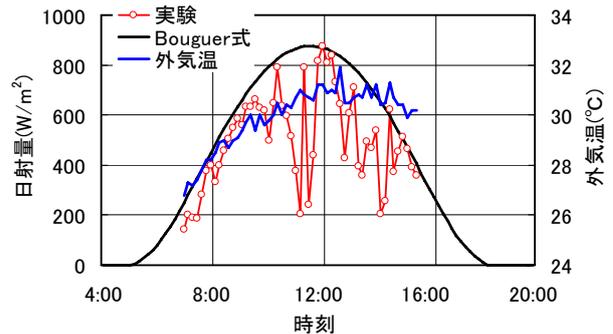
3. 実験結果及び考察

3.1 含水率の経時変化

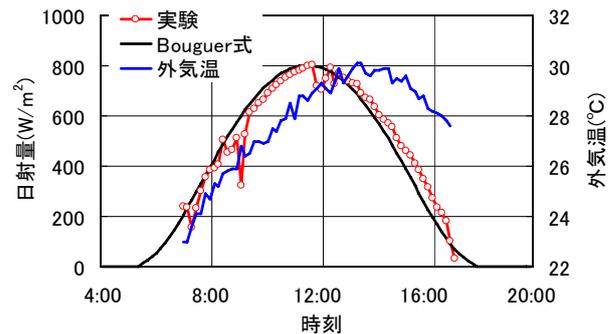
図-3(a), (b)は8月24日と9月8日に各試験体の健全部をコンクリートモルタル接触型水分計で測定した深さ10mmまでの含水率である。



写真-1 赤外線カメラ及び水分計の測定状況



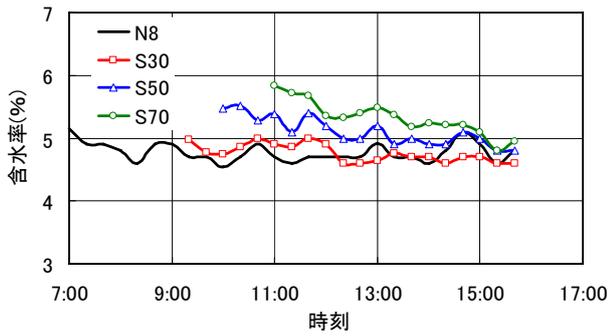
(a) 8月24日



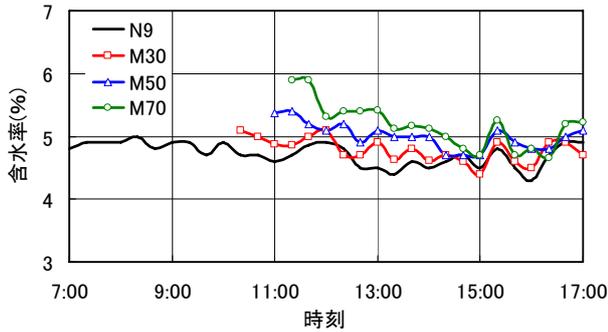
(b) 9月8日

図-2 気象条件

その結果, 各試験体に30cc, 50cc, 70cc注水して測定面が乾燥した測定開始時刻は, 8月24日が9:20, 10:00及び11:00に, また9月8日が10:20, 11:00及び11:40となり, 注水量と乾燥時刻には比例関係が成立している。乾燥時刻が9月8日の方が遅くなった要因は, 8月24日の実験後試験体を恒温恒湿室内(温度20±2℃, 湿度60±5%)にて保管し再使用したために内部水分が表層部に移動するようになり, より含水率が高くなっていったものと考えられる。また, 含水率の時系列変化は, 注水時に深さ10mm程度では約50分程度で部分的に飽和状態となり, その後の吸水は極端に吸水速度が遅くなる³⁾。その後, 乾燥時刻までは日射を受けて滞水が水蒸気となり大気中に逸散し, 乾燥後の蒸発過程では内部水分が含水率の高い方から低い方へ移動するようになり, 蒸発潜熱の影響から表面温度が低下するものと考えられる。しかし, 含水率の低下は非常に緩やかであり, 乾燥後の蒸発潜熱の影響は僅かな温度低下に留まるものと思われる。



(a) 8月24日



(b) 9月8日

図-3 含水率の時系列変化

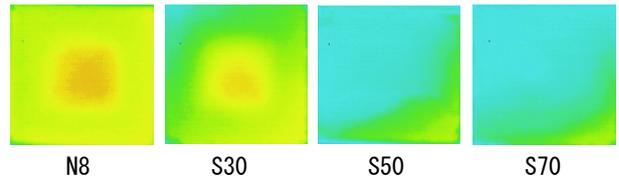
3.2 熱画像と温度上昇変化

写真-2(a), (b)及び写真-3(a)~(c)は、8月24日と9月8日に得られた熱画像である。8月24日の9:20の熱画像は試験体S30が目視によって乾燥と判断した時刻であり、試験体端部周辺には未だ水分の影響と思われる低温域が確認されるが、欠陥部を注水の無い試験体N8とほぼ同様に判読できる。また、未だに水分が残っている試験体S50及びS70は欠陥部を判読することはできない。このように水分が明らかに表面に残っている間は熱画像から欠陥部の判読は無理であるが、表面に水分が残っているか否かを知る手段となり得る。一方、全ての試験体が乾燥した12:00の熱画像では、70cc注水した試験体S70の方がN8よりも欠陥部の輪郭を鮮明に判読することができる。

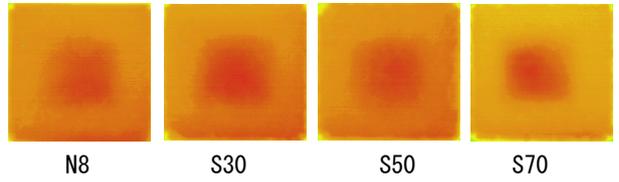
写真-3に示す9月8日の10:40の熱画像では、試験体M30は10:20に表面が乾燥し、N9よりも欠陥部をより鮮明に判読することができる。全ての試験体が乾燥した12:20の熱画像は、70cc注水した試験体M70の方がN9より欠陥部と健全部の温度差が大きく、輪郭を鮮明に判読することができる。一方、16:40の熱画像は欠陥上部に蓄積された熱量が放射され、逆に健全部よりも低温域となって現れている。その欠陥部の判読では、試験体M70の方がN9より判読し易くなっている。

(1) 健全部の温度上昇変化

図-4(a), (b)は両実験日に得られた健全部の温度上昇変化である。この健全部の温度は、図-5に一例を示すが熱画像の中央ラインのプロファイル温度から左端25mm及び175mm付近の5画素を平均して算出したものである。

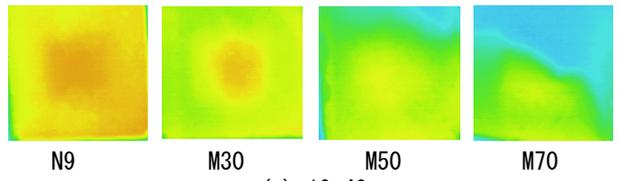


(a) 9:20

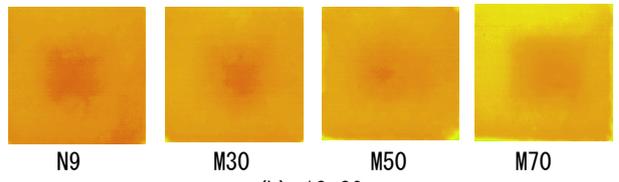


(b) 12:00

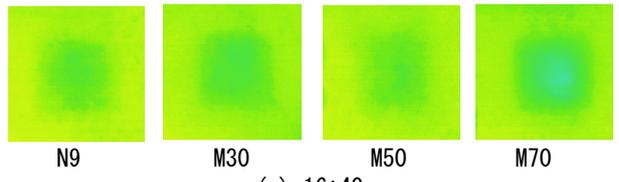
写真-2 熱画像(8月24日)



(a) 10:40



(b) 12:20



(c) 16:40

写真-3 熱画像(9月8日)

その結果、健全部の温度は注水した各試験体の表層部が乾燥し始める時刻から上昇勾配に変化点が現れる。注水した試験体は、乾燥試験体であるN8及びN9と比較して熱特性のパラメータである密度、比熱、熱伝導率がいずれも大きくなり、また、蒸発潜熱の影響から乾燥時刻までは表面の温度変化が小さくなるものの、アクリル枠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、注水量が多く乾燥時刻が遅いほど急激に温度上昇が始まる。その時刻は、目視で確認した乾燥時刻とは異なり、8月24日のS30では目視の9:20が8:20に、S50は10:00が9:20に、S70は11:00が10:00に、また、9月8日のM30は10:20が8:40に、M50は11:00が9:20に、M70は11:40が10:20に変化が現れ、それぞれ50分及び90分程度早まっている。温度の最大上昇量では、8月24日のN8が15.9℃、S30が16.2℃、S50が16.2℃、S70が16.8℃、また、9月8日のN9が15.9℃、M30が15.6℃、M50が15.6℃、M70が15.0℃で注水量による較差はみられない。この最大上昇量が同程度になった要因は、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日

射吸収率が大きくなる⁴⁾、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り日射吸収率が大きくなる⁵⁾ことから、熱特性のパラメータによる温度変動の減少を抑えたものと思われる。

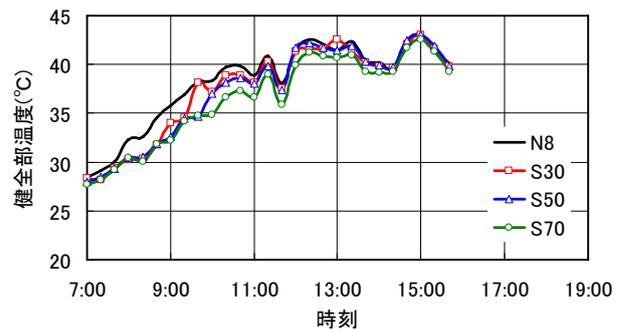
(2) 欠陥部の温度上昇変化

写真-4(a), (b)は、画像処理ソフトから得られた三次元画像である。図-6(a), (b)には各実験日における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す。欠陥部の温度は写真-4に示す熱画像中央のラインプロファイル温度の欠陥部範囲(100mm)を平均化したもの、健全部は左端25mm及び175mm付近を平均した温度である。

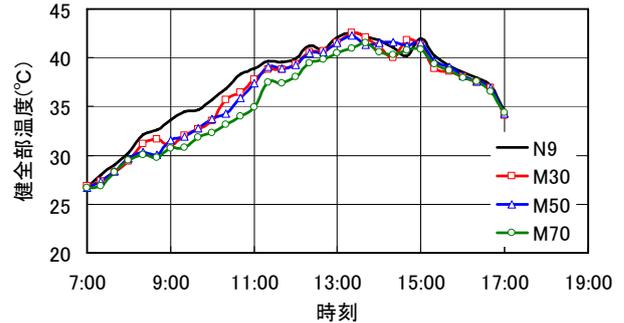
その結果、減算した8月24日の欠陥部の温度差は、図-2(a)の日射量に対応して大きく変動している。また、注水した試験体は、健全部が急激な温度上昇する同時刻までは負の温度差となっている。これは、写真-3(a)のM70に示すように乾燥過程が試験体の傾きによって一様ではなく、健全部の平均温度とする左端25mm付近が左端175mm付近及び欠陥部よりも高くなっていることが要因である。その後は、乾燥試験体N8とは異なる上昇勾配となる。全ての試験体が乾燥した後の最大温度差は12:20に、試験体N8は1.7℃、S30は3.0℃、S50は2.1℃、S70は3.3℃が得られている。写真-4(a)に示す三次元画像からも試験体N8よりもS70の方がより欠陥部に温度差が得られていることが分かる。一方、9月8日の最大温度差は、N9が1.7℃、M30が2.1℃、M50が1.9℃、M70が2.3℃である。両日の乾燥試験体N8及びN9と70cc注水したS70、M70との較差は1.6℃、0.6℃大きくなり、水分が欠陥検出に有効であることが分かる。この欠陥検出では、未だに滞水状態があれば乾燥時刻が遅いほど乾燥状態よりも温度上昇量が小さく、その後、滞水がなくなれば含水率が大きいほど熱伝導率が大きくなることから欠陥上部への蓄熱量が増大するものとする。しかし、注水量と欠陥部の温度差との関係では、両日ともに試験体S30及びM30がS50及びM50より大きくなっている。欠陥部の温度差が大きくなるためには、ある程度コンクリート内部に水分が吸収される必要がある。しかし、滞水状態がなくなり表層部が、濡れた湿潤状態になる時刻が早いほど日射吸収量が増大するものとする。なお、より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ことが不可欠である。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。解析モデルの大きさは、既往の研究⁶⁾で採用した幅300×高さ210mmで側面は完全断熱境界、



(a) 8月24日



(b) 9月8日

図-4 健全部の温度上昇変化

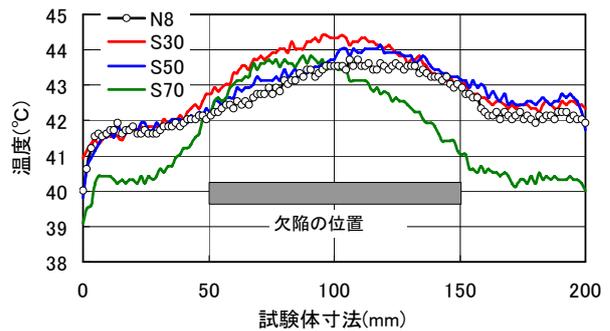
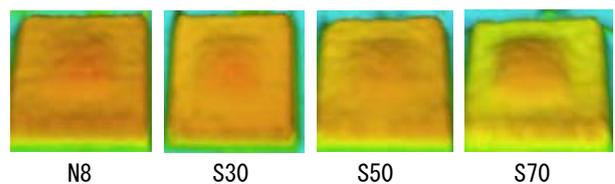
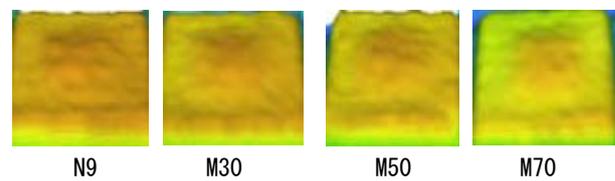


図-5 ラインプロファイル温度(8月24日 12:00)



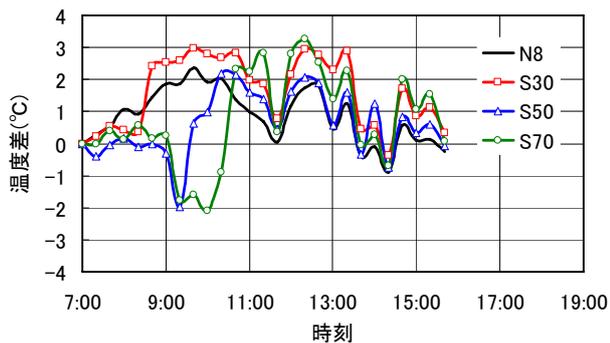
(a) 8月24日(12:20)



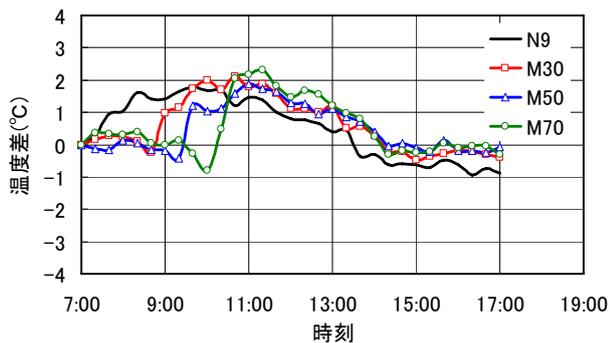
(b) 9月8日(11:20)

写真-4 三次元画像

試験体内部の欠陥は実験と同様に幅100×厚み5mmの内部を1mm間隔でメッシュを設けている。今回の試験体とは大きさは異なるが、目的とする欠陥部前面に蓄積される熱量には影響が小さいものとする。なお、解析は日射変動の小さい9月8日のコンクリートの温度上昇変化について実



(a) 8月24日



(b) 9月8日

図-6 欠陥部の温度差変化

験結果と比較した。

(1) 解析条件

図-7 に解析モデルを、表-2 に解析で用いた熱特性を示す。特に、コンクリート(湿潤)の熱特性は、含水率が高くなるほど大きくなるという既往の研究^{6), 7), 8)}から設定した。試験体 N9 の熱特性は、コンクリート乾燥(N9)の値を採用し、注水した試験体の熱特性では、密度及び比熱はコンクリート(湿潤)の値を採用し、滞水から水が無くなる時刻までは水の熱拡散率の値になるように熱伝導率($\lambda = \alpha \cdot c \cdot \rho$)を求めて比例関係で時系列に変化させた。その水の熱拡散率から求めた熱伝導率は $0.41 \text{ W(m} \cdot \text{K)}$ となり、コンクリート(湿潤)の $2.30 \text{ W(m} \cdot \text{K)}$ までを 7:00 から乾燥時刻まで比例関係で変化させた。なお、表中のコンクリート(湿潤)の熱伝導率は、最も含水率の高い試験体 M70 を想定したもので、M30 及び M50 の熱伝導率は、今回、コンクリート(乾燥)の熱伝導率と湿潤との差分値を注水量に比例して設定している。その熱伝導率は、M30 が $1.79 \text{ W(m} \cdot \text{K)}$ 、M50 が $2.01 \text{ W(m} \cdot \text{K)}$ となる。日射反射率及び蒸発潜熱の影響は、実験で得られた健全部の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 $21 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ と変えて解析し、最も実験値の温度変化に近似した $21 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ の一定値に設定した。解析時間間隔は 10 分、結果の出力は 20 分間隔で行った。

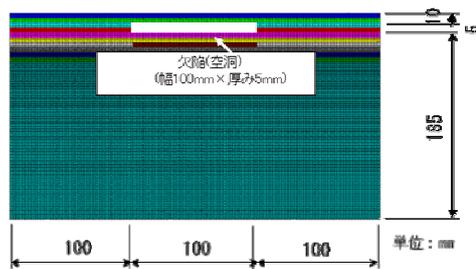


図-7 解析モデル(S試験体)

表-2 解析に用いた熱特性

材料	密度(ρ)	比熱(C)	熱伝導率(λ)	熱容量($c \cdot \rho$)	熱拡散率(α)
	(kg/m^3)	[$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	[$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]	[$\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-7}$]
水(滞水)	999	4.182	0.59	4,178	1.41
コンクリート(湿潤)	2,300	1.267	2.30	2,914	7.89
コンクリート乾燥(N9)	2,200	0.876	1.40	1,927	7.26
欠陥(空気)	1.161	1.009	0.0256	—	—

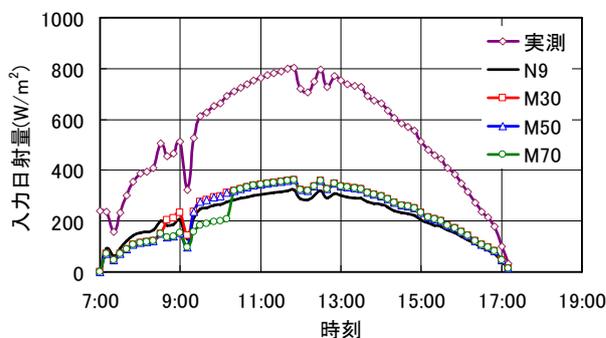
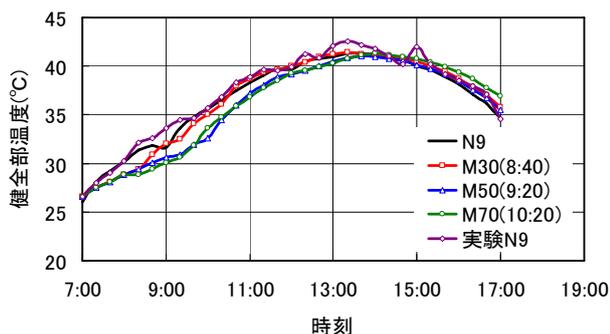


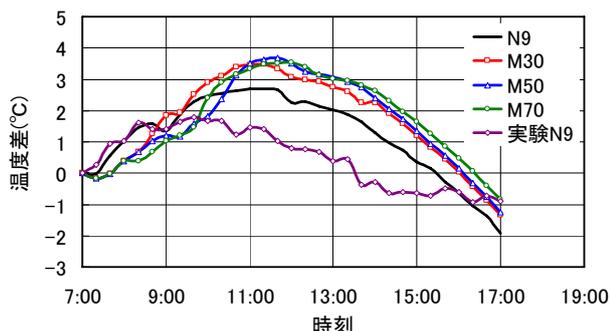
図-8 各試験体への入力日射量(9月8日)

(2) 水分状態と温度変化

図-9 (a), (b) に解析結果を示す。図-9 (a) は、赤外線カメラで得られた健全部温度(実験)と解析結果である。図中の凡例にはコンクリート表面が滞水状態から湿潤状態になった実験値での時刻を示す。また、図-9 (b) は、欠陥部 100mm 間の平均温度から健全部温度を減算した温度差である。解析に用いた吸収日射量は、乾燥試験体 N9 が測定した全日射量の 40% で、注水した各試験体では滞水時間帯が 30% で、その後の湿潤状態を 45% とすることで実験値の温度変化が再現された。熱拡散率(熱伝導率/密度・比熱)が大きいほど、表面の温度変化は小さくなるものの、湿潤状態以降では吸収日射量として乾燥時の 40% を 45% にすることによって実験値の温度変化と一致した(図-8 参照)。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り日射吸収率が大きくなるのが裏付けられた。特に、解析で得られた欠陥部の最大温度差は、試験体 N9 では実験値 1.8°C (9:40) に対し 2.7°C (11:00)、M30 は 2.1°C (10:40) が 3.5°C (11:20)、M50 が 1.9°C (11:00) が 3.7°C (11:40)、M70 が 2.3°C (11:20) が 3.5°C (12:00) といずれも解析結果の方が時間帯も遅く、平均して 1.3°C ほど大きくなった。同条件で解析した 8 月 24 日の試験体 N8 の最大温度差は 2.6°C (12:20) で実験値は 1.8°C (12:20)、



(a) 健全部



(b) 欠陥部の温度差

図-9 解析温度(9月8日)

実験値とは0.8°Cの差が生じている。積算日射量が多い9月8日の温度差の方が小さくなった要因は明らかではないが、解析値より小さく時間帯も遅くなったのは試験体作製時に欠陥部が10mmより深く、かつ5mmより薄くなったものと推察している。今回の解析結果では、乾燥試験体に対して注水量を変化させたものであるが、同時刻に滞水状態から湿潤な状態になれば含水率が大きいほど欠陥部の検出に必要な温度差が大きくなることが明らかとなった。このように最適な欠陥診断は、大雨後の翌日が晴天で表層部に水膜として残っている場合と考えられるが、図-9(b)の乾燥試験体との較差から南中時刻までに湿潤な状態にな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て診断へ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) 各試験体に30cc, 50cc, 70cc注水して乾燥した時刻を目視で確認すると、8月24日は9:20, 10:00及び11:00に、また9月8日は10:20, 11:00及び11:40となり、注水量と乾燥時刻には比例関係が成立した。
- (2) 表層部が乾燥した以降の含水率の低下は非常に緩やかであり、乾燥後の蒸発潜熱の影響は僅かな温度の低下に留まることが示唆された。
- (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判読する手段になり得る。その乾燥時刻の判読では、目視確

認よりも8月24日は50分、含水率の高い9月8日は90分ほど早くなった。

- (4) 熱画像からの欠陥判読では、水分が明らかに表面に残っている間は無理であるが、乾燥後では70cc注水した試験体S70の方がN8と比較すると欠陥部の輪郭まで鮮明に判読することができた。
- (5) 健全部の温度上昇は、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、注水量が多く乾燥時刻が遅いほど急激に変化する。
- (6) 乾燥試験体N8及びN9と70cc注水したS70, M70との較差は1.6°C, 0.6°C大きくなり、水分が欠陥検出に有効であることが分かる。
- (7) 熱伝導解析では、吸収日射量は、乾燥試験体N9が測定した全天日射量の40%で、注水した各試験体では滞水時間帯が30%で、その後の湿潤状態を45%とすることで実験値の温度変化が再現された。
- (8) 最適な欠陥診断は、大雨後の翌日が晴天で表層部に水膜として残っている場合と考えられるが、乾燥試験体との較差から南中時刻までに湿潤な状態にな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て診断へ有効に働くことが明らかになった。

参考文献

- 1) JAIRA 日本赤外線劣化診断技術普及協会：外壁の劣化損傷状況の赤外線調査ガイドライン, pp. 4-6, 2009
- 2) 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
- 3) 金光寿一, 柳内陸人：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
- 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. 17-1, 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
- 6) 金光寿一, 柳内陸人：パッシブサーモグラフィ法による欠陥診断に及ぼす含水率の影響, 土木学会第62回年次学術講演会, pp. 65-66, 2009
- 7) 長尾覚博, 中根淳：高温加熱されるコンクリートの熱伝導率, コンクリート工学年次論文報告集, 第12巻, 第1号, pp. 395-400, 1990
- 8) 渡辺博志, 河野広隆, 杉山嘉則：コンクリートの熱伝導特性の簡易試験法に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16-1, pp. 1341-1346, 1994