

論文 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

金光 寿一*1・柳内 睦人*2

要旨: サーモ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、気象条件は晴れ、曇り、雨の繰り返りで日々変化するため、診断を誤らないためには特に降雨後の影響について明らかにしておく必要がある。そこで、本研究ではコンクリート中に吸水する水分状態が欠陥検出にどのように影響を及ぼすのかを明らかにするために、乾燥試験体と水中浸漬試験体から健全部および欠陥部の温度上昇変化の違いについて実験的に検討した。その結果、欠陥部の温度上昇量は水中浸漬試験体の方が大きくなり、降雨による含水率の増加が欠陥検出に有効であることが示唆された。

キーワード: サーモグラフィ法, コンクリート診断, 降雨, 含水, 日射量

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、時間帯、方位で複雑に変化し、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、既に快晴日の場合には方位の異なるコンクリート壁面に季節によってどの程度の日射量が供給され、欠陥部にはどの程度の温度差が得られるのかを熱伝導解析から明らかにしている¹⁾。しかし、天候は全日快晴ばかりではなく曇り、雨の繰り返りで、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が予測される。一般に、雨水を吸水したコンクリートは乾燥過程において気化熱により表面温度は低下することになるが、一方では水はコンクリートの2倍の熱容量を持ち、含水率が高いほど熱伝導率も大きくなるという特性がある²⁾。従って、表層部の含水率が減少して表層部の気化熱が収束すれば、逆に内部の水分が熱媒となって蓄熱量が増大する可能性がある。横浜市港北区役所から提供された日射量とコンクリート温度の関係³⁾では、降雨後に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。そのコンクリートへの水分移動に関する既往の研究⁴⁾では、水分の浸透深さはW/Cに影響され、W/Cが60%では表層部から深さ3cm程度までは降雨の影響が顕著であり、深さ5cm以上であれば水分分布の変動は極めて小さいことが明らかにされている。このようにサーモグラフィ法による内部診断は、太陽エネルギーによって欠陥部(空洞・空隙)の前面に蓄積される熱量を期待するもので、降雨による水分分布が蓄熱量に影響するものと考えられる。

そこで、本研究では降雨時の吸水が欠陥部前面に蓄熱さ

れて現れることになるコンクリート表面温度にどのような影響を及ぼすのかを乾燥試験体と水中浸漬した試験体との比較から実験的に検討した。本来、欠陥検出に及ぼす降雨の影響は、暴露実験から含水状態をモニタリングしながら並行して赤外線カメラで温度測定をするべきであるが、本実験では試験体を確実に飽和状態にして比較するため水中浸漬とした。パッシブサーモグラフィ法の診断精度の向上には、コンクリート中の含水率と熱移動、特に蓄熱との関係を明らかにしておく必要がある。

2. 実験概要

本実験では、降雨を想定したコンクリートへの吸水は打設後に水中浸漬して飽和状態にした試験体、乾燥炉で乾燥した試験体、気中養生した試験体の3パターンから含水量が及ぼす温度上昇変化の相違を比較した。各試験体の含水量は接触型水分計及び別途作成した150×150×530mm試験体を種々の厚みに順次切断し時系列の質量変化を測定した。赤外線カメラによる温度測定は、平成20年8月7日と8日の2日間である。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、試験体の傾き(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水平で行っている。

2.1 試験体及び欠陥部の仕様

実験に供した試験体一覧および実験条件を表-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、スランブ8cm、粗骨材の最大寸法は20mmでW/C=45%、s/a=47.6%、空気量は4.5%である。降雨を模擬したコンクリートへの吸水は打設後28日間水中養生し、その後28日間を気中養生した後に1面の吸水面以外を防水加工して1日間水中浸漬し、ポリエステルシートで密封して試験日まで3日間放置した(浸漬と表示)。

*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)

表-1 試験体一覧

試験体記号	試験体寸法(mm)	欠陥		実験条件	
		大きさ(mm)	深さ(mm)		
N	N1	200×200×100	なし		乾燥
	N2				浸漬
	N3				気中
S	S1	200×200×100	100×100×5 (発泡スチロール)	10	浸漬
	S2			20	
	S3			30	
K	K1	300×300×210	100×100×5 (空洞)	20	浸漬
	K2			40	浸漬
	K3			40	乾燥

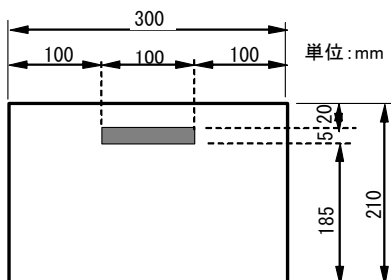


図-1 試験体(K1 試験体の例)



写真-1 赤外線カメラによる測定状況

乾燥試験体は3日間110℃の乾燥炉で乾燥した後、同様にポリエステルシートで密封して(3日間)実験開始時温度の一定を図った(乾燥と表示)。また、気中試験体は打設後28日間水中養生した後、さらに実験日まで33日間実験室内に放置したものである(気中と表示)。内部欠陥は、S試験体は幅100×100×厚み5mmの発泡スチロールを深さ10、20及び30mmの位置に埋め込んだもの、また、K試験体は幅100×100×厚み5mmを深さ20と40mmの位置に設けて硬化後にアセトンを通し込み溶かして作製したものである(図-1参照)。この欠陥部を発泡スチロールと空洞にすることで、含水率の相違が及ぼす蓄熱量を検討する。

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 8.0～14.0 μm、感度 0.05℃(at30℃)〕は、8月7日、8日の2日間の時刻7:00から17:00まで10時間を測定距離120cmの位置から20分間隔で熱画像の撮り込みを行った。撮影は効率よく測定を終えるため写真-1に示す赤外線カメラを支持するキャスター

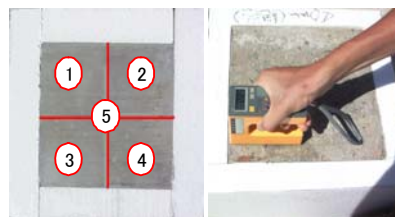


写真-2 含水率の測定状況

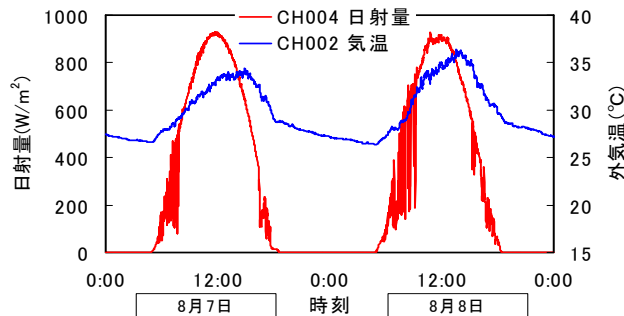


図-2 日射量と外気温

付の台を作成し、1列(水平)に並べた9試験体間を順次移動した。なお、試験体は測定開始(時刻7:00)の15分前に実験室から屋上に搬入し測定を開始した。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) 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。測定は健全部4箇所と欠陥部(試験体中央)の計5箇所、健全部は4箇所の平均とした。また、深さ方向の含水率を明らかにするために150×150×530mmの試験体を厚さ10、20、30、40、50mmに切断し時系列で質量を測定した。

(3) 日射量と外気温の測定

図-2には7日及び8日の日射量と外気温を示す。最大日射量は、7日が930W/m²、8日が918W/m²で、測定時間である時刻7:00から17:00まで積算日射量は7日が6,851W/m²・h、8日が6,373W/m²・hであった。また、測定時間内の平均風速は7日が2.7m/sec、8日が2.0m/secであった。相対湿度は7日の時刻7:00が72.4%、17:00が51.0%、8日が68.2%と55.1%であった。

3. 実験結果及び考察

3.1 水中浸漬実験による含水率の変化

(1) 切断試験体から得られた含水率の経時変化

実験に供した試験体は150×150×530mmの試験体を厚さ10、20、30、40、50mmに切断したものである。試験体は、1面の吸水面以外を防水加工し、110℃の乾燥炉で3日間乾燥した後70℃に降下した時点より3日間を水中浸漬した。なお、この含水率の変化は、絶乾状態からの質量変化を絶乾状態の質量で除した値である。また、同時にコ

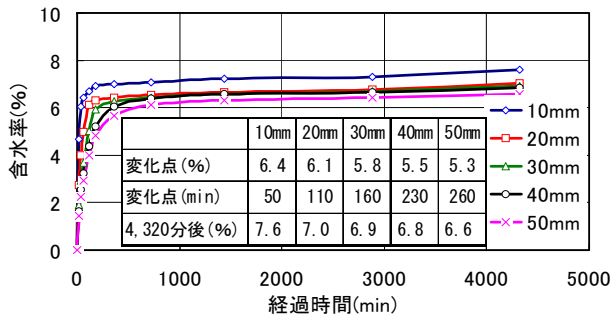
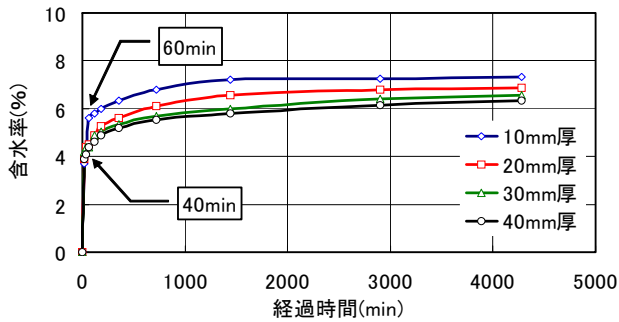
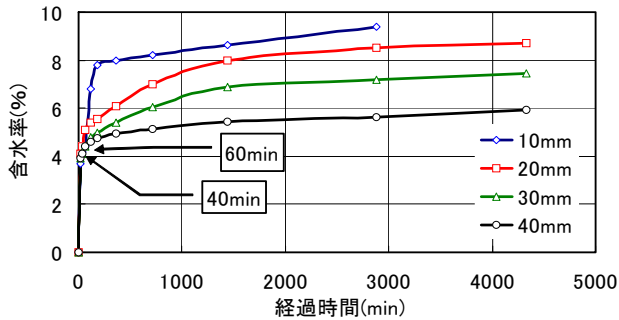


図-3 重量変化からの含水率変化



(a) 各切断厚みに対する含水率

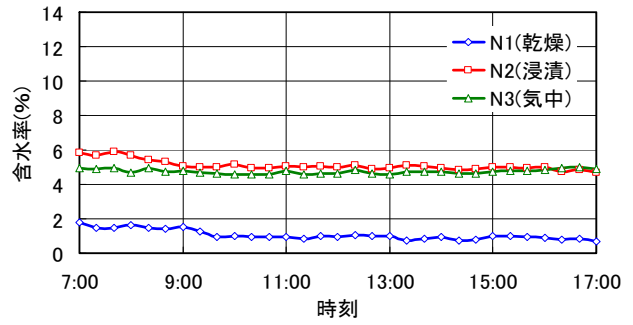


(b) 深さ方向の含水率(切断厚さ 40mm)

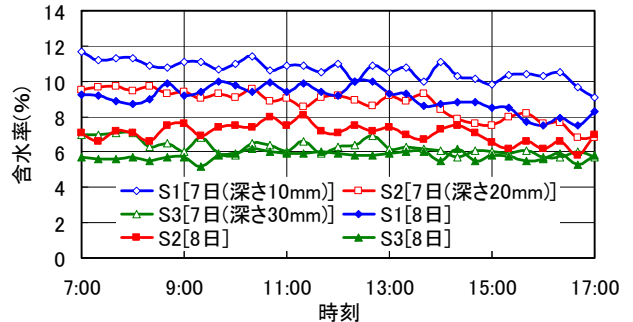
図-4 接触型水分計で測定した含水率変化

ンクリートモルタル接触型水分計を用いて深さ方向の含水率を測定した。図-3に絶乾状態からの含水率の変化を、図-4(a), (b)には接触型水分計から得られた含水率を示す。

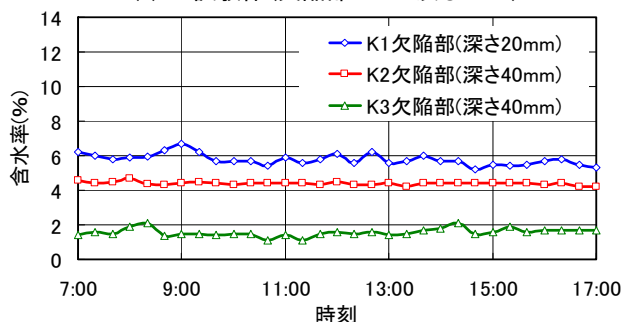
その結果、質量変化から得られた含水率の変化は、図中に示すとおり吸水量が緩慢となる変化点が現れる。試験体の厚みが薄いほど急激な変化となり、厚いほど緩やかに飽和水量に近づいている。変化点を迎えた以降3日目(4,320分)までの含水率の変化は、試験体厚さに関係なくほぼ同様の増加率となっている。一方、接触型水分計で得られた含水率は質量変化から得られた含水率変化と比較すると、360分経過時までの推移に若干の相違がみられるもののそれ以降の含水率は良く一致している。図-4(b)は切断厚さ40mmの試験体に対して、その深さ方向の含水率の経時変化である。深さ10mmまでの含水率は短時間で急激に増大し、4,320分後には測定範囲の12%を超えており表面近傍が高い含水率を示していることが分かる。しかし、図-4(a)に示す10mm厚及び20mm厚試験体の含水率変化と比較した場合では、40mmの試験体の深さ10mm及び20mmの方が高くなっており、試験体の厚みで深さ方向の含水率が異なる



(a) N 試験体(深さ 40mm までの平均 : 7 日)



(b) S 試験体(欠陥部 : 7 日及び 8 日)



(c) K 試験体(欠陥部 : 7 日)

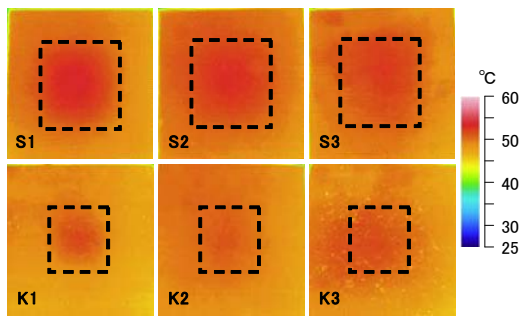
図-5 含水率の経時変化(蒸発過程)

ことが確認される。まず、浸漬初期から40分後までの含水率は同変化となっているが、60分後からは特に深さ10mm及び20mmに違いがみられ始める。これは、水分が内部に向かって移動する過程において、10mm厚試験体は短時間で飽和水量に近づき、それ以降は吸水速度が緩慢になるのに対し、試験体が厚くなると水分が不飽和状態である深い内部へと移動するために、更なる吸水から徐々に細孔部に吸着し含水率の増加につながったものと考えられる。

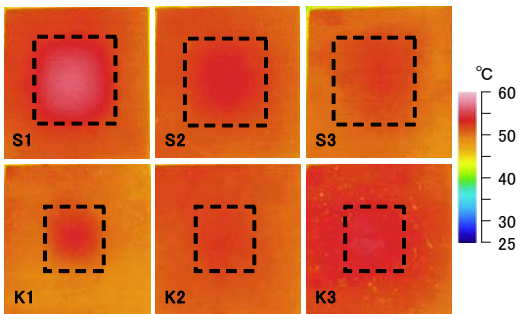
(2) N, S 及び K 試験体から得られた含水率の経時変化

図-5(a)~(c)に接触型水分計から得られた8月7日と8日の含水率変化を示す。図-5(a)はN試験体の深さ40mmまでの含水率で、(b)はS試験体の7日と8日、また(c)はK試験体の各欠陥深さまでの含水率である。

その結果、打設後28日間水中養生し、その後28日間を気中養生した後に1日間水中浸漬したN2試験体と水中養生後33日間放置したN3試験体の時刻7:00の含水率は5.8%と5.0%で僅かな差であった。この僅かな差は、図-3及び図-4(a)に示すとおり、40mmまでの含水率では5.5%程度(変化点)から含水量の増加は極端に緩慢になる



(a) 8月7日(13:00)



(b) 8月8日(13:00)

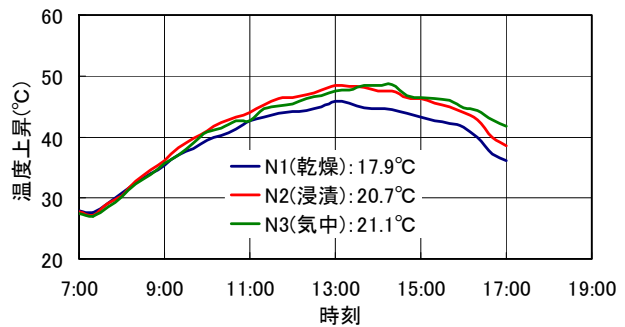
写真-3 S及びK試験体の熱画像

ことが要因と思われる。一方、欠陥部上面で測定した各欠陥深さまでの含水率は、S試験体では図-4(b)と同様に欠陥が浅いほど高い。しかし、同様に水中浸漬したK試験体の含水率は欠陥深さ20mmであるK1が6.2%でS2試験体と比較すると3.2%も低い。両者の欠陥部はS試験体が発泡スチロールでK試験体が空洞である。吸水時間は同じであり、K試験体では空洞内部へと吸着及び水分移動したものと考える。なお、水中浸漬した各試験体の健全部の深さ40mmまでの含水率では、図-5(c)のK2試験体で示す深さ40mmとほぼ同様であり、時刻7:00の平均で5.8%であった。このような欠陥部と健全部の含水率の相違がコンクリート表面の温度上昇変化に影響を及ぼすことになる。

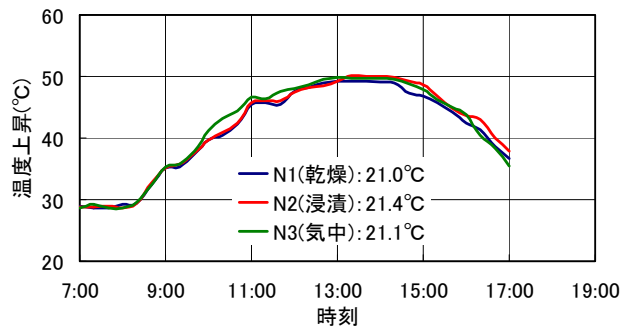
その日射受熱による水分蒸発量の経時変化は、図-5の比較から欠陥部が浅いほど欠陥部上面の含水率低下が著しく、深さ40mmまでの健全部の含水率低下は極僅かである。特に、8日の減少は図-2に示すとおり7日とほぼ同様の天候であるが、その減少率は時刻7:00から17:00までにS1で0.7%、S2で0.6%であった(図-5(b)参照)。既往の研究においても、含水率の時系列変化は表層部に近いほど乾燥開始とともに急激に減少する傾向が見られ、夏の高湿多湿の環境下においては降雨周期が短いと深さ1cmで500時間が経過しても元の含水率には戻らないことが確認されている⁴⁾。

3.2 赤外線カメラから得られた熱画像

写真-3(a), (b)に7日及び8日の時刻13:00に得られた熱画像を示す。両日ともに各欠陥位置には欠陥深さに対応した高温域を確認することができるが、特に欠陥深さ40mmであるK2及びK3試験体は7日の方が鮮明で、8日について

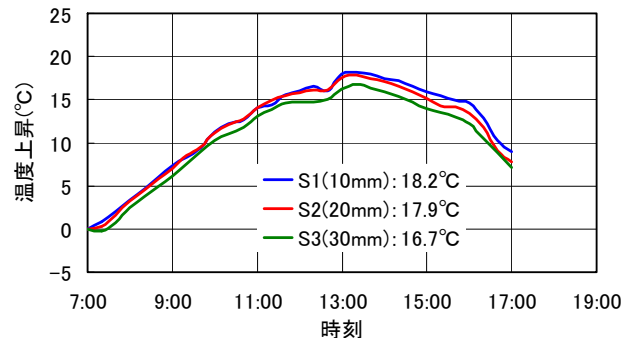


(a) 8月7日

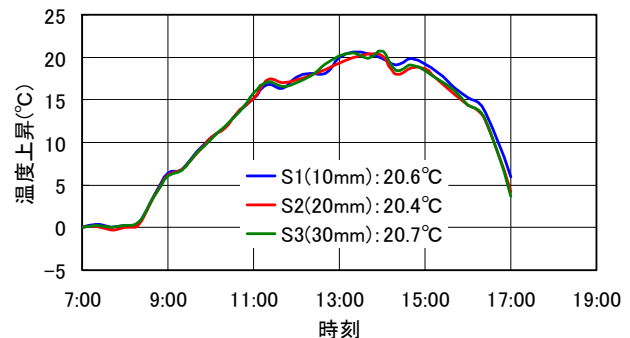


(b) 8月8日

図-6 N試験体の温度上昇



(a) 8月7日



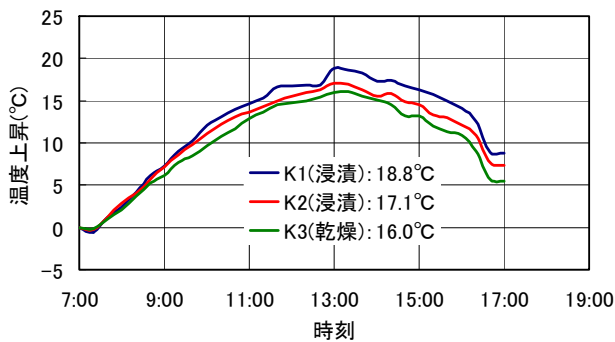
(b) 8月8日

図-7 S試験体の健全部の温度上昇

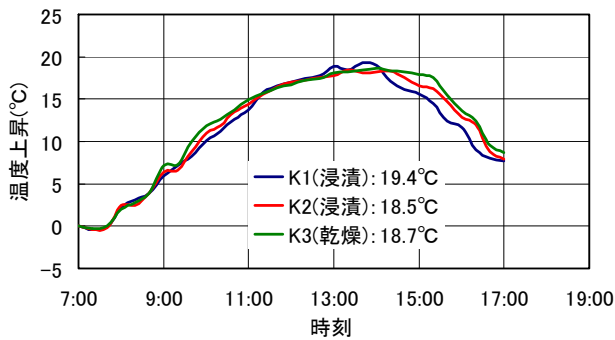
では視覚的に欠陥の位置を確認することは困難である。

(1) N試験体の温度上昇

図-6(a), (b)は各N試験体の中心位置(10画素平均:1画素1.5mm)で得られた温度上昇変化である。また、図中には時刻7:00からの最大温度上昇量を示す。7日の温度上昇量は試験体を乾燥したN1試験体よりも水中浸漬したN2試験体、また水中養生後33日間放置したN3試験体の方が2.5°C以上大きくなっている。時刻7:00の含水率(深さ



(a) 8月7日



(b) 8月8日

図-8 K 試験体の健全部の温度上昇

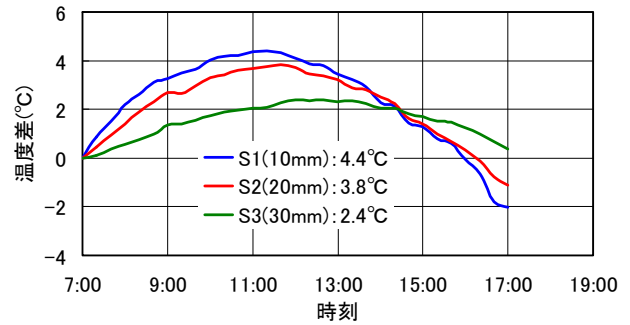
40mmまでの平均)は、N1、N2及びN3試験体が1.8%、5.8%、5.0%であった。温度上昇勾配はN1試験体と比べて時刻9:00以降も緩やかになることなく上昇している。健全箇所におけるこのような現象は、前報の横浜市港北区役所屋上での測定結果でも同様の傾向が得られている³⁾。ところが、8日の温度上昇変化は最大温度までは同じ推移となり、含水量の相違による影響はみられなくなる。

(2) S 試験体の温度上昇

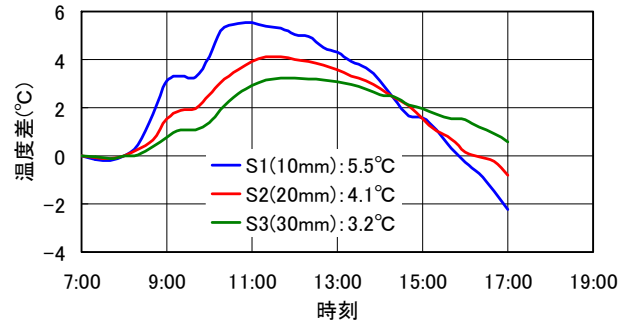
図-7(a)、(b)は各S試験体の健全部で得られた時刻7:00からの温度上昇変化である。この健全部の温度上昇は、試験体中央ラインの両端から25mm内側付近(10画素)の2箇所を平均した値である。水中浸漬した試験体の健全部の温度変化は、図-6(a)のN2試験体と同様の推移となるはずであるが、S1、S2及びS3試験体間で僅かに異なり、更に7日の時刻13:00で比較するとS試験体の方が約3°C程低くなっている。この各試験体間の相違は、欠陥の位置が浅いほど健全部温度も高くなっており、欠陥部からの熱移動が影響しているものと思われるが、N2試験体との相違は健全部温度の抽出位置が異なる以外の要因は見当たらない。なお、N試験体で得られた時刻13:00の標準偏差はN1試験体で0.3°C、N2及びN3は0.6°Cと0.8°Cであった。一方、各試験体の8日の温度上昇は、その推移及び最大温度ともに同じ推移となっている。

(3) K 試験体の温度上昇

図-8(a)、(b)は各K試験体の健全部(両端から25mm内側付近)で得られた温度上昇変化である。K1及びK2は水中浸漬、K3は乾燥炉で乾燥した試験体で、7日の7:00の健

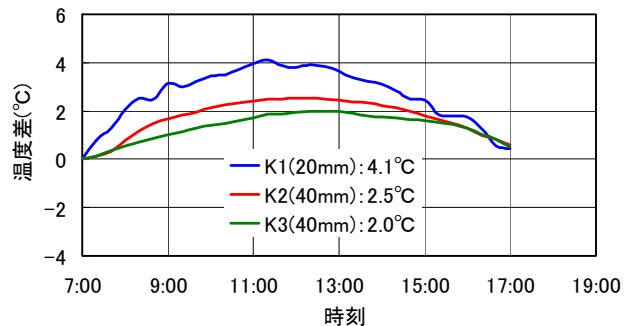


(a) 8月7日

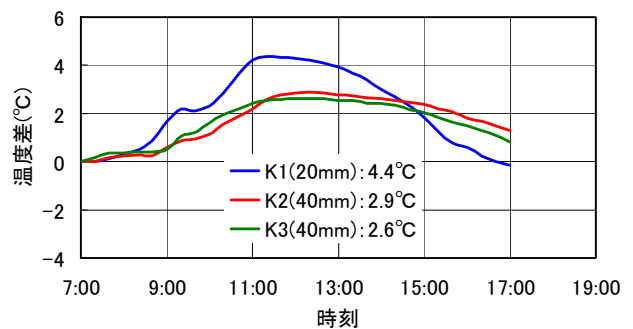


(b) 8月8日

図-9 S 試験体の欠陥部温度差



(a) 8月7日



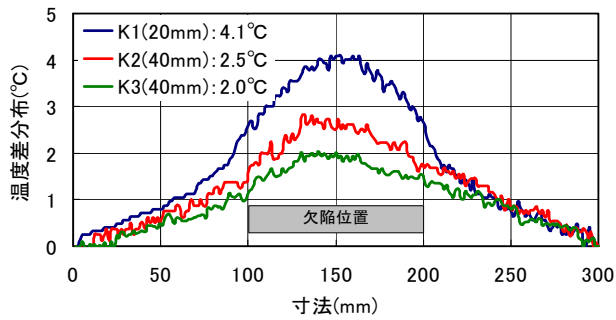
(b) 8月8日

図-10 K 試験体の欠陥部温度差

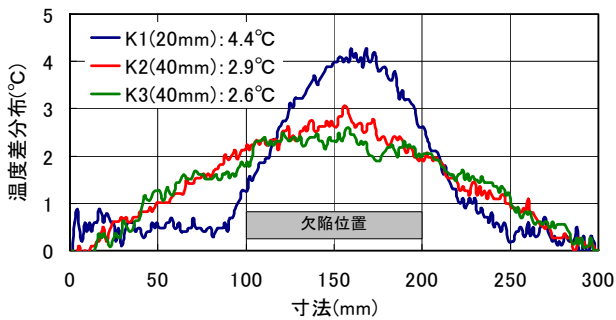
全部の含水率はそれぞれ5.4%、4.5%、0.8%である。その7日の温度上昇は欠陥部に蓄積された蓄熱量の移動の影響を受けているものと思われ、K1とK2試験体とを比較すると日射を受けるほど欠陥の位置が浅いK1試験体の方が大きくなっている。一方、8日はN及S試験体と同様に含水率の相違による温度上昇変化の差はみられない。

3.3 欠陥部の温度変化

図-9(a)、(b)はS試験体の欠陥部温度(試験体中心位置10画素平均)から図-7に示す健全部の温度を減算した欠



(a) 8月7日



(b) 8月8日

図-11 K試験体の欠陥部温度差分布

陥部が示す温度差変化である。図-10(a), (b)には同様に求めた K 試験体の温度差変化を示す。また、図-11(a), (b)には K 試験体の最大温度差となった試験体中央のラインプロファイルで得られた温度差分布変化を示す。

(1) 欠陥部の温度差

各 S 及び K 試験体の 7 日と 8 日の欠陥部の最大温度差を比較すると、いずれも 8 日の方が大きくなっている。この理由としては、7 日は日の出時刻 4:50 に対して屋上に搬入して実験を開始したのが 7:00 であり、また 8 日は 7 日の実験終了時刻 17:00 から 8 日の実験開始時 7:00 までの間、試験体はビニールシートで日射を遮っていたものの屋上に放置していたもので、この両者の実験条件の差が内部温度変化に影響したものと考える。このことは、図-6~8 に示す健全部の温度上昇量からも確認できる。一方、欠陥深さ 20mm の S2 及び K1 試験体の相違では、欠陥上面の含水率が S1 は 9.53%、K1 が 6.2% と異なっているが、その最大温度差は図中に示すとおり、3.8°C と 4.1°C とほぼ同様であり、含水率による相違は見受けられない。しかし、欠陥の深さ 40mm である K2 及び K3 試験体の温度差変化をみると、7 日では水中浸漬した K2 の方が乾燥試験体である K3 よりも 0.5°C 大きくなっている。また、8 日では時刻 7:00 から 10:00 頃までは曇りで日射が遮断され、この時刻までは乾燥試験体の方が大きい、11:40 以降は逆転している。このように含水率による影響は、健全部よりも欠陥部の方が大きいことが分かる。

(2) 温度差分布の相違

図-11(a), (b)は、その K 試験体の最大温度差時の温度分布である。両日の温度差分布は、深さ 20mm の K1 試験体は

8 日の方が欠陥寸法に対応した温度差分布形状となっている。これは、前述したとおり 7 日の温度上昇は健全部も乾燥試験体よりも含水率の影響を受けて上昇しており、欠陥中央から滑らかな線形分布になったものと思われる。一方、深さ 40mm の K2 及び K3 試験体は、逆に 7 日の方が欠陥寸法に対応した温度差分布形状となっており、特に 8 日の K3 試験体の熱画像は全面が同一温度のように見えて欠陥の判定が困難になっている(写真-3 参照)。

今後、降雨後のサーモグラフィ法による欠陥検出では、降雨量及びその時間帯と共に構造物の方位や傾き、さらに日射量が異なる季節別、風などの検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 乾燥後に水中浸漬した試験体の含水率変化は、吸水量が緩慢となる変化点が現れ、試験体の厚みが薄いほど急激に変化し、厚いほど緩やかに飽和水量に近づく。しかし、変化点以降の含水量の変化は急激に緩慢になり、試験体厚さに関係なくほぼ同様の増加率である。
- (2) 欠陥部上面で測定した各欠陥深さまでの含水率は欠陥が浅いほど高い。その日射受熱による含水率は、欠陥が浅いほど含水率低下が著しくなるものの、実験 2 日目の減少率は僅かである。
- (3) 日射によって得られた健全部の最大温度上昇量は、試験体を乾燥した N1 試験体よりも水中浸漬した N2 試験体、また水中養生後 33 日間放置した N3 試験体の方が 2.5°C 以上大きくなった。しかし、実験 2 日目には含水率の相違による温度上昇量の差は認められない。
- (4) 欠陥深さ 40mm の欠陥部温度差は、水中浸漬した K2 試験体の方が乾燥試験体である K3 よりも 0.5°C 大きくなっており、気象条件が整えば降雨後の診断が欠陥検出に有効であることが示唆された。

参考文献

- 1) 江藤 亮, 柳内陸人, 金光寿一: 熱伝導解析によるコンクリート壁面の方位別診断予測, 土木学会第 62 回 年次学術講演会, pp. 65-66, 2007. 9
- 2) 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, Vol. 12-1, pp. 395-400, 1990. 7
- 3) 金光 寿一, 柳内 陸人, 江藤 亮: パッシブサーモグラフィ法による降雨後のコンクリート診断への有効性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 30-2, pp. 751-756, 2008. 7
- 4) 柳 東佑ほか: コンクリート中の水分分布に及ぼす降雨の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 517-518, 2006. 9