

論文 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

金光 寿一^{*1}・柳内 睦人^{*2}・川久保 政亮^{*3}

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、雨の繰り返して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、本研究では降雨によりコンクリート中の欠陥部に浸透した水分が表面温度にどのように影響を及ぼすのかを明らかにするために、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、斜めひび割れは温度分布変化から方向まで評価できるものの、水分で満たされた内部空洞は表面温度分布変化が僅かであり、診断を誤る危険性がある。

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, 水分浸透, 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、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、既に降雨後の気象条件が及ぼす健全な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¹⁾。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。また、内部空洞を有する欠陥部の温度上昇は、乾燥試験体よりも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、降雨後の診断ではコンクリート中への水分移動や漏水によってひび割れや内部空洞など欠陥部への水の侵入が想定される。

そこで、本研究では降雨や漏水による水分が欠陥部へ侵入している場合の欠陥検出を想定し、水分浸透が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実験的及び熱伝導解析により検討した。

2. 実験概要

健全コンクリートは、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。欠陥試験体は、鉛直に進展したひび割れ、傾斜したひび割れ及び内部空洞の3つの試験体を水中浸漬して、これらの欠陥に吸水した水分が及ぼす温度上昇変化を検討した。赤外線カメラによる温度測定は、健全コンクリートは平成21年10月15日、欠陥コ

ンクリートは平成21年10月9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行った。

2.1 試験体及び欠陥部の仕様

実験に供した試験体一覧及び実験条件を表-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、スランプ8cm、粗骨材の最大寸法は20mmでW/C=45%、s/a=47.6%、Air=4.5%である。降雨を模擬したN及びP試験体への吸水は吸水前の含水率を一定にするため、先ず3日間110℃の乾燥炉で乾燥させて3日間ポリエステルシートで密封し、その後種々の実験条件で水中浸漬した。N試験体は赤外線カメラによる測定開始時刻7:00に併せて、12時間前(N2試験体)と30分間前(N3試験体)に水中浸漬して吸水した。なお、吸水面は1面(測定面)以外を防水加工して水中浸漬している。一方、擬似ひび割れを有するP1及びP2試験体は、幅150×高さ150×長さ530mmの中央に幅150×深さ50×厚さ5mmの発泡スチロールを鉛直(P1試験体)及び45°(P2試験体)に傾け設置してコンクリートを打設し、硬化後にアセトンにより溶かして作製したものである。内部空洞を有するP3試験体も同様に、幅150×150×厚さ5mmの発泡スチロールを深さ30mmの位置に埋め込んで、硬化後にアセトンで溶かして作製した(図-1参照)。これらP試験体への水中浸漬は全て12時間である。なお、実験に供したP3試験体は両側面が空いている空洞のために水中浸漬後に試験体の片側面をアクリル板で密着し、水を満たした後にもう一方の側面を密着して作製したものである。また、P1及びP2試験体は測定開始前にビペットにてひび割れ部に注水し

*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 日本大学大学院 生産工学研究科 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体記号	試験体寸法(mm)	欠陥部の状態	水中浸漬時間
N	N1	なし	乾燥
	N2		12時間
	N3		30分
P	P1	鉛直ひび割れ 150×50×5mm	12時間
	P2	斜めひび割れ(45°) 150×70×5mm	
	P3	空洞 150×150×5mm	

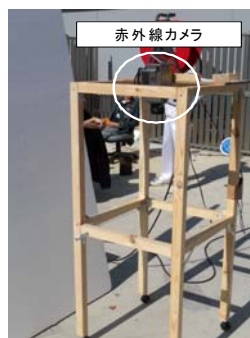


写真-1 測定状況 写真-2 含水率測定 (N試験体)

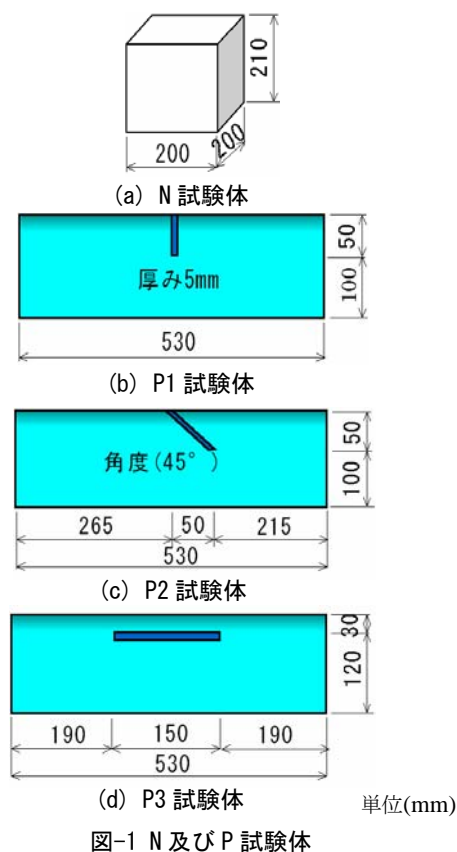


図-1 N及びP試験体

て上面まで満たしている。

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プロメータ型、波長領域 8.0~14.0 μm、最小温度分解能 0.05℃(at30℃)〕は、10月15日(N試験体)、10月9日(P試験体)の時刻7:00から17:00まで測定距離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(写真-1参照)。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、K社製の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、N試験体は図中の5箇所の平均とした。

(3) 日射量と外気温の測定

図-2には自動計測で得られた10月15日(N試験体)、10月9日(P試験体)の全天日射量と外気温を示す。日の出時刻は5:50、最大日射量は、15日が677W/m²(11:20)、9日が539W/m²(10:10)である。時刻7:00から17:00まで積算日射量は15日が4,100W/m²・h、9日が2,669W/m²・hであった。なお、気象庁の過去10年間の10月の快晴及び晴れの日射量の平均は664W/m²で、積算日射量は4,220W/m²・dである。図中には日射変動を検討するためにBouguern式²⁾で算出した快晴時の全天日射量を示しておく。なお、8:20までの実測日射量が少ないのは屋上の実験場所が隣の校舎で日陰になっているために天空日射量となっている。また、平均風速は15日が1.8m/s、9日が1.0m/sであった。

3. 実験結果及び考察

3.1 N試験体の水中浸漬実験による温度上昇変化

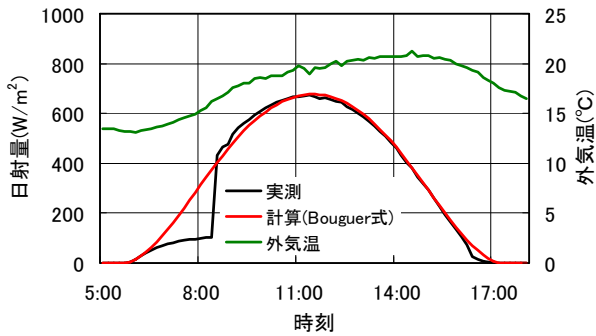
(1) 含水率の経時変化

図-3は、接触型水分計を用いて測定した含水率で深さ30mmまでの平均値である(写真-2参照)。深さ10mmまでの含水率は、測定開始時刻7:00では、乾燥後3日間放置したN1試験体が3.0%、N2試験体が7.3%、N3試験体が4.7%であった。一方、深さ30mmまでの含水率の時系列変化は、測定開始後しばらくは表面の濡れを確認することができるが、17:00までの減少率は0.5%程度と僅かである。

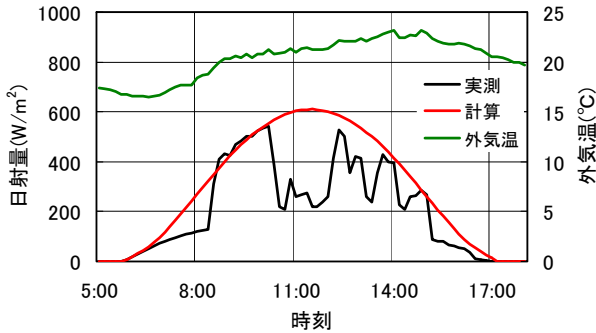
(2) 赤外線カメラから得られた熱画像と温度上昇変化

写真-3に時刻13:20に得られた熱画像を示す。各試験体には最大温度に対応した高温域を確認することができる。図-4は熱画像(試験体)の大きさ200×200mmに対して中央部(100×100mm、4,489pixel)で得られた温度を平均して示した時系列変化である。なお、この区間の7:00~17:00の標準偏差の平均値はN1が0.16℃、N2が0.19℃、N3が0.15℃であった。

その結果、各試験体は図-2(a)に示す日射エネルギーを受けて、水中浸漬時間(含水率)に対応した上昇量が得られ



(a) 10月15日(N試験体の実験時)



(b) 10月9日(P試験体の実験時)

図-2 日射量と外気温

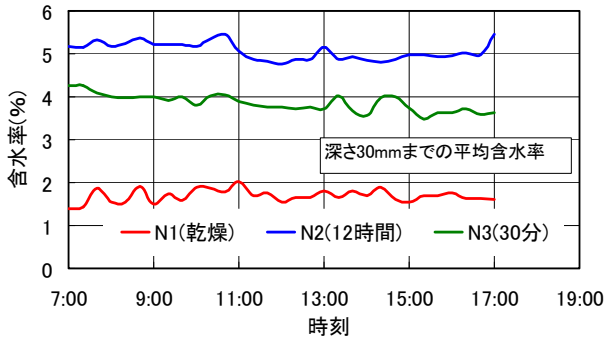


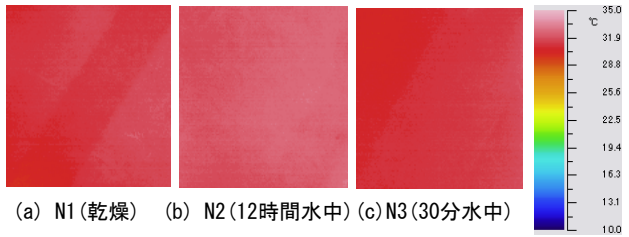
図-3 含水率の変化(N試験体)

ている。N1 試験体は 11.6°C (13:00), N2 試験体は 14.4°C (13:20), N3 試験体は 13.2°C (13:20) と含水率が高いほど温度上昇量が大きくなっている。このことは、横浜市港北区役所の屋上で実測されたモニタリング結果からも、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ており¹⁾、コンクリート表面の水分状態の相違が日射吸収量に影響していることが分かる。このような降雨が影響するコンクリート表面の温度上昇変化は、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³⁾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⁴⁾ことが影響したものである。

3.2 P 試験体の水中浸漬実験による温度上昇変化

(1) 含水率の経時変化

P 試験体は 3 日間 110°C で乾燥させた後、測定開始 12 時間前に水中浸漬したものである。図-5 には深さ 30mm まで



(a) N1 (乾燥) (b) N2 (12時間水中) (c) N3 (30分水中)

写真-3 N 試験体の熱画像(13:20)

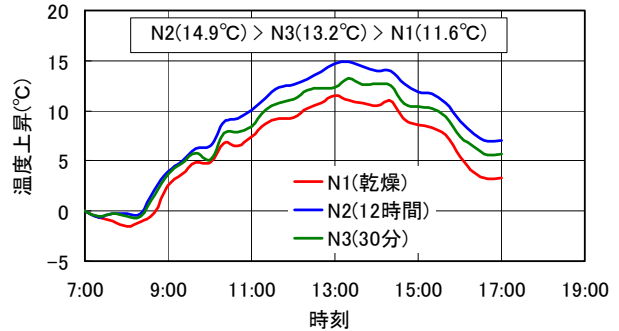


図-4 N 試験体の温度上昇

の含水率の平均を示す。P1 試験体は試験体中央のひび割れ端部から左右 30mm 離れた位置, P2 試験体はひび割れ進展方向にひび割れ端部から 30mm 離れた位置, また P3 試験体は中央位置の欠陥深さ(30mm)までの平均含水率である。

その結果, 図-3 に示す N 試験体と比較すると, 12 時間水中浸漬した N2 試験体とほぼ同様の結果が得られている。P2 試験体の含水率が若干高いのは, 吸水しているひび割れが傾斜しており, そのひび割れ位置と表面との間により多くの水分が滞水しているものと思われる。

(2) 赤外線カメラから得られた熱画像と温度上昇変化

1) P1 試験体

写真-4 に得られた熱画像を示す。熱画像の範囲は, P1 試験体の長さ 530mm に対して図中に示すとおり, 340.8mm(250pixel)の範囲である。この P1 試験体に設けたひび割れは幅 5mm の鉛直方向で, 時刻 14:20 の熱画像には筋状の温度変化が確認される。図-6(a)は図-2(b)の日射エネルギーを受けて上昇したひび割れ部(5mmの平均)と健全部の温度変化, 図-6(b)は, そのひび割れ部の温度から健全部の温度を減算した温度差である。この温度差の特徴を見ると水で満たされたひび割れ部の温度は健全部よりも低くなって現れ, 両者の温度差は 10:40 付近で-1.93°Cと最も大きくなり, 14:20 以降では健全部の温度に近づいてくる。図-7 には時刻 10:40 と 14:20 の試験体中央ラインのプロファイル温度を示す。この横軸の 0~340mm は熱画像の端部からの試験体寸法として表している。この温度変化を見ると, 10:40 ではひび割れ位置を中心に 150mm もの区間が健全部よりも低温度となって現れており, 水で満たされたひび割れ部の温度の影響が確認される。同じ容積のひび割れ部が水で満たされた場合と空気の場合とでは, 同じ日射供給量では水の方が密度, 比熱及び熱伝導率が大き

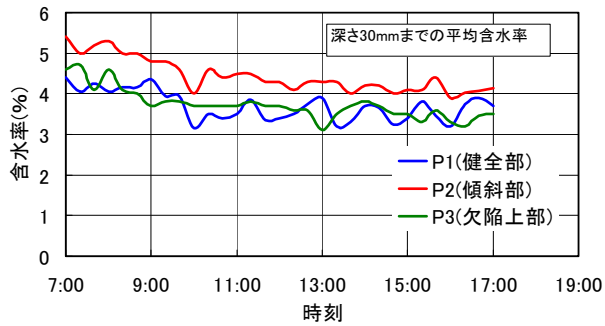


図-5 含水率の変化(P試験体)

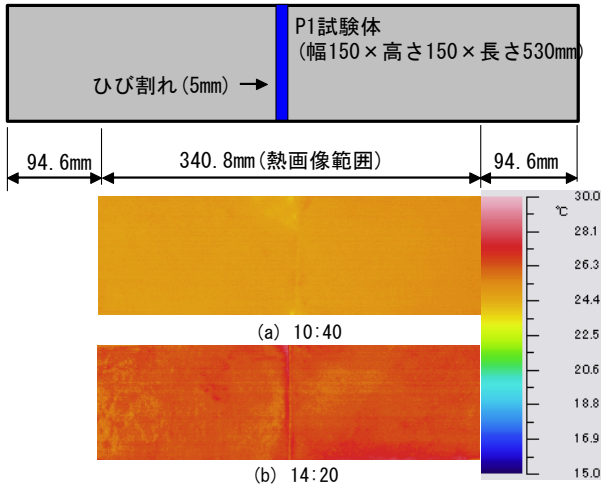


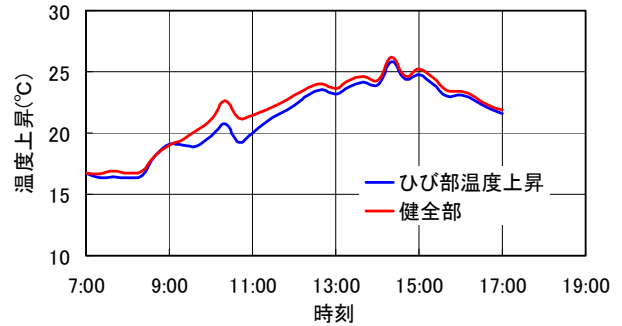
写真-4 P1試験体と熱画像

いために温度上昇量は小さくなる。一方、14:20の温度変化ではひび割れ部の水量が減少し開口部には空気層ができて健全箇所よりも高温域が現れている。

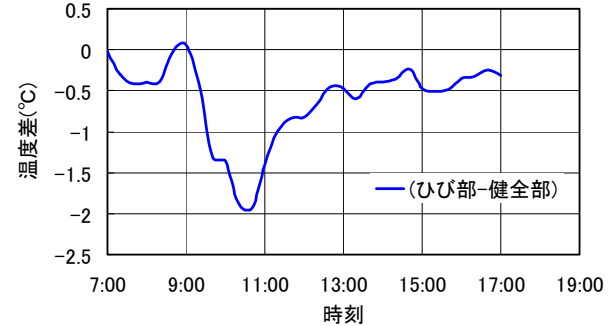
2) P2試験体

写真-5に時刻10:40と14:20に得られた熱画像を示す。

このP2試験体に設けたひび割れは熱画像の中央から右側に45°傾斜しており、そのひび割れ区間は50mmとなっている。熱画像からの斜めひび割れ方向の確認では、カラーバーの温度幅を調整するとひび割れ開口部は確認できるものの、区間の評価は困難であった。図-8(a)はひび割れ位置を挟んで左側及び右側(傾斜方向)の50mm区間と健全部(両端50mmの範囲の平均)の温度上昇変化である。また、図-8(b)は、その傾斜方向温度から左側温度を減算した温度差の変化である。この温度差の特徴では、10:00にひび傾斜部の方が左側よりも一度0.3℃ほど温度が高くなり、10:20からは14:20まで低く、その後はまた高くなっている。図-9には14:20の熱画像中央のラインプロファイルで得られた温度変化を示す。時刻14:20には、図-7(a)に示すP1試験体と同様に開口部には空気層ができて健全箇所よりも高温域が現れ、温度変化は僅かではあるがひび割れ傾斜方向と左側では異なり、熱画像での視覚的な評価はできなかった傾斜方向を評価できる可能性がある。このように温度変化からひび割れ方向が確認できる時間帯は時刻12:20から15:20であった。しかし、ひび割れ部に水が

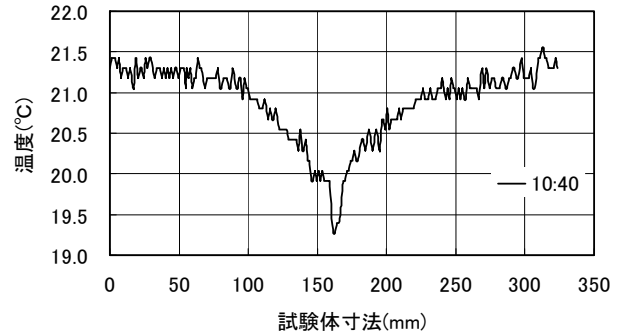


(a) 温度上昇変化

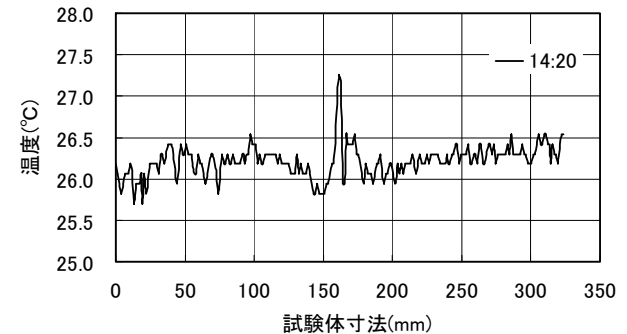


(b) ひび割れ部と健全部との温度差

図-6 P1試験体の温度上昇変化



(a) 10:40の温度分布



(b) 14:20の温度分布

図-7 P1試験体のラインプロファイル温度

供給され続けられれば判読できないものと思われる。

3) P3試験体

写真-6に時刻10:20と13:40に得られた熱画像を示す。

このP3試験体の欠陥部は幅150×150×厚さ5mmの内部空洞を深さ30mmに設けて、その空洞部に水を満たしたものである。しかし、熱画像からは全く空洞の存在を判読することはできない。図-10(a)は、熱画像の左端から50~80mmの範囲の健全部が示した平均温度を、最大値及び平均値は

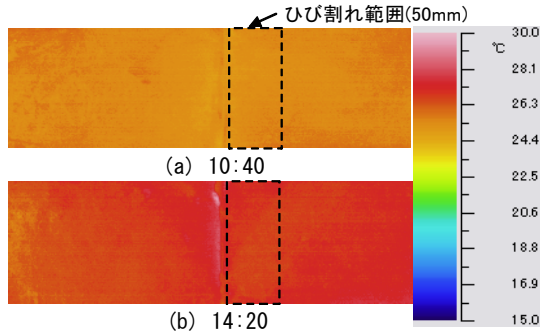
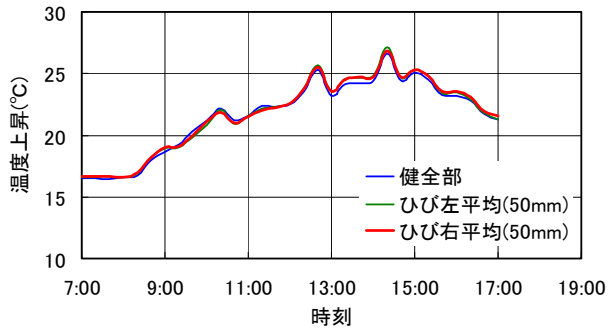
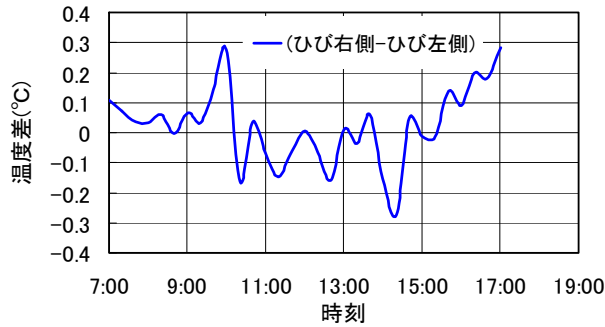


写真-5 P2 試験体(斜めひび割れ)



(a) 温度上昇変化



(b) ひびの左側と右側(傾斜)の温度差

図-8 P2 試験体の温度上昇変化

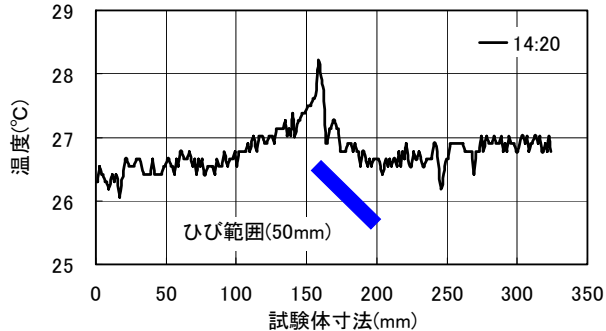


図-9 P2 試験体のラインプロファイル温度

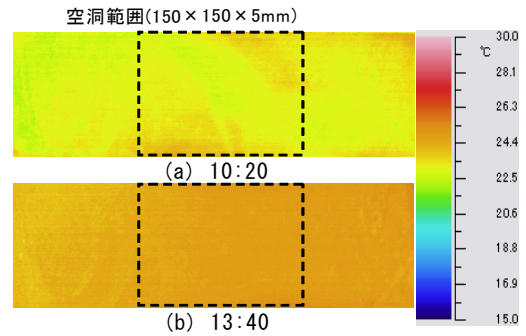
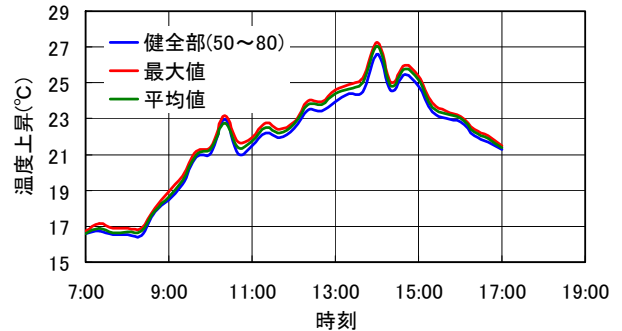
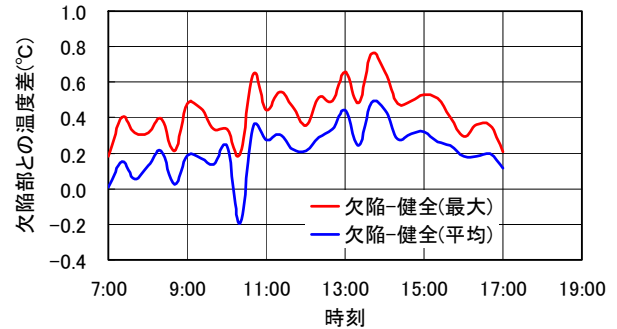


写真-6 P3 試験体(空洞深さ 30mm)



(a) 温度上昇変化



(b) 欠陥部(空洞)と健全部の温度差

図-10 P3 試験体の温度上昇変化

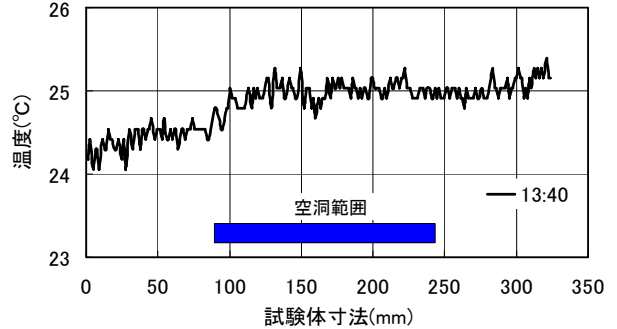


図-11 P3 試験体のラインプロファイル温度

空洞範囲内(10mm)で得られたものである。また、図-10(b)は空洞範囲で得られた最大値及び平均値から健全部の温度を減算したものである。図-11には13:40の熱画像中央のラインプロファイルで得られた温度変化を示す。

その結果、図-2(b)に示す日射量からも分かるように、10:10から曇りになり各位置の温度は急激に低下している。時刻10:20から14:00までの積算日射量は、Bouguer式で計算された積算日射量(快晴)と比較すると、その割合は59%である(図-2(b)参照)。空洞範囲の温度は健全部と比

較すると最大値では高温域で推移しているが、平均値では -0.2°C ほど低温域となっている。図-11は空洞範囲と健全部との温度差が最も大きくなった温度変化で、最大温度では 0.76°C 、平均温度で 0.48°C の差ではあるが空洞右側の温度も高くなっており、欠陥評価は難しいと思われる。

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。コンクリート中の水分状態及び内

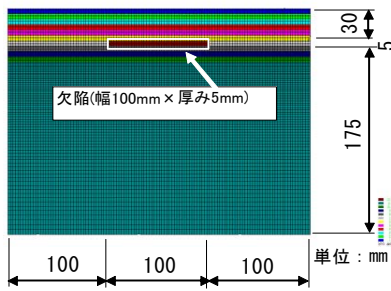
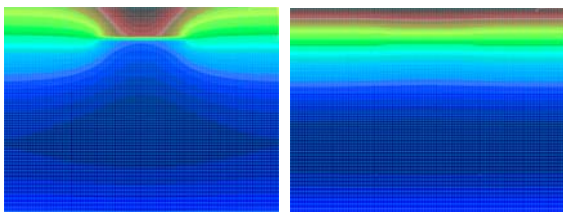


図-12 解析モデル

表-2 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^3)	[$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	[$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
コンクリート	2300	1.267	2.30	14
欠陥(空気)	1.161	1.009	0.0256	
欠陥(水)	999	4.182	0.59	



(a) 空気

(b) 水

写真-7 欠陥部を空気と水とした場合の熱画像(13:40)

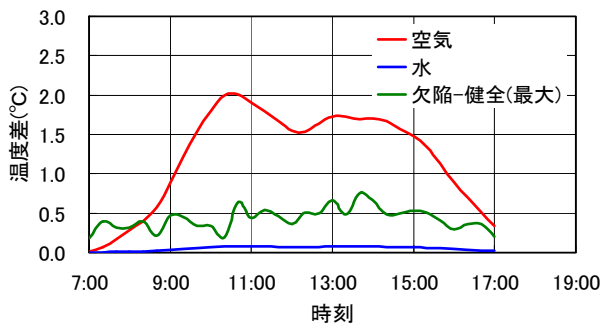


図-13 欠陥部と健全部との温度差変化

部欠陥(空隙)に水が満たされている P3 試験体を想定して欠陥部の温度差変化について実験結果と比較した。

(1) 解析条件

図-12 に解析モデルを表-4 に解析に用いた熱特性を示す。大きさは幅 300×高さ 210mm、内部欠陥は幅 100×高さ 5mm で、欠陥の内部は 1mm 間隔でメッシュを設けている。解析に用いた熱特性⁵⁾は、コンクリートは降雨によって含水している状態を想定したもので、欠陥部は水と空気の熱特性から温度変化を検討した。日射量と外気温は図-2(b)で、P3 試験体の健全部の温度上昇変化に一致するように熱量となる吸収日射量を設定した。また、熱伝達係数は $14\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の一定値としている。

(2) 欠陥部の含水状態と温度分布

写真-7 は、実験値で最大温度差となった時刻 13:40 のシミュレーション画像である。図-13 には欠陥中央と健全部との温度差変化を図-10(b)の実験結果とともに示す。

その結果、欠陥部が水で満たされている場合の健全部との最大温度差は時刻 10:40 に起こり、僅か 0.09°C の差である。温度分布変化からも欠陥の範囲はもとより、評価自体が無理である。P3 の実験結果では、13:40 に 0.76°C ほどの温度差が得られているが、空洞内の水が水分移動して僅かな空気層が生じたためと思われる。実験値とは欠陥部の大きさが異なるものの、欠陥部が空気層の場合には、 2°C 程の温度差が生じている。このようにパッシブサーモグラフィ法は、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、内部に潜在する介在物の熱特性によっては評価できない可能性がある。

5. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 水中浸漬時間を変えて行った健全なコンクリートの温度上昇量は、水中浸漬時間が長くなるほど大きくなり、降雨後の診断の有効性が示唆された。
- (2) 鉛直ひび割れに水が満たされている場合の診断は、熱画像では筋状の変化のみであるが、ラインプロファイルの温度分布の時系列変化ではひび割れ位置を中心として低温域の範囲が確認される。
- (3) 斜めひび割れに水が満たされている場合には、ラインプロファイルの温度分布変化がひび割れ進展方向と健全部とは異なり、時刻 12:20 から 15:20 まではひび割れ方向の評価が可能である。
- (4) 内部空洞に水が満たされている場合には、表面の温度分布変化は僅かであり終日評価することは困難である。熱伝導解析では、内部が空洞の場合には健全部との温度差は 2.0°C 、水では 0.1°C と大きく異なる。

参考文献

- 1) 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集, Vol. 31, No. 1, pp. 2053-2058, 2009. 7
- 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) 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集, Vol. 17, No. 1, pp. 285-288, 1995. 7
- 4) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 152-192, 1994
- 5) 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 回学術講演会, pp. 65-66, 2009. 9