

論文 パッシブソーラーの吸熱効果を利用したサーモグラフィー法によるコンクリートの損傷診断予測

江藤 亮*¹・柳内 睦人*²・金光 寿一*³

要旨：サーモグラフィー法を用いてコンクリート構造物を診断する場合には、太陽光を利用したパッシブ法が有効である。しかし、対象物の方位や角度によって吸熱量が異なり、深く進行したひび割れなどは評価できない可能性がある。そこで、本研究ではソーラーハウスと同様の効果を期待してエアークャップと黒色アルミ箔を組み合わせて吸熱効果を検討した。その結果、標準試験体との比較実験では上昇温度で 20 以上の有意差が得られた。また、熱伝導解析ではコンクリートの方位が既知であれば日射積分量からコンクリートの最大上昇温度、またその時刻が予測可能であることを明らかにした。

キーワード：サーモグラフィー法、パッシブソーラー、ひび割れ検出、熱伝導解析

1. はじめに

太陽光を利用したパッシブサーモグラフィー法では、検出可能となる熱負荷条件が問題となり、表面近傍部の変状は検出可能であっても、深く進行したひび割れなどの損傷部については評価できない可能性がある。このような問題を解決するためには、コンクリート面への吸熱量を増大し、熱損失をできる限り低減する必要がある。既に筆者らは熱吸収率及び熱伝導性の高い黒色アルミシートをコンクリート表面に密着させ、さらに軽量で取り扱いの簡単なエアークャップで覆うことによりソーラーハウスと同様の熱量が供給されることを確認している¹⁾。ところが、このコンクリートへの蓄積熱量では、エアークャップと単純にコンクリートを覆ったビニールシートとの比較実験から対流熱損失の抑制には空気層の高さ(厚み)が影響することが明らかとなった。従って、収熱性能は、隔壁空気層の状態を変えることによって、さらに向上が期待された。

そこで、本研究では各種隔壁(粒径・粒高)の異なるエアークャップを用いてコンクリートへ

の吸熱効果を検討するものである。一方、このパッシブソーラー法を有効に利用する場合には、季節によって太陽エネルギーが変化すること、また対象物となるコンクリート面の方位角及び角度(傾斜)が吸熱量に影響してくることから、両者の関係を明らかにしておくことが診断予測を行う上で重要となる。パッシブソーラー法が利用できるコンクリートの方位については、非定常熱伝導解析から入力日射量とひび割れ部に生じる温度差から予測した。

2. 実験概要

種々粒径・粒高及び層数の異なるエアークャップを用いた太陽光の吸熱効果は、屋外での基礎実験及び RC 梁での実験を行い、コンクリートの上昇温度から明らかにした。

2.1 屋外による基礎実験

実験は、平成 18 年 8 月 4 日 7:00 より 17:00 まで 5 試験体同時に行った。試験体は、幅 150×高さ 150×長さ 530mm で、黒色塗料で塗ったアルミシートをコンクリート表面に密着させ、さらに粒径・粒高及び層数の異なる各種エアークャップで

*1 日本大学 生産工学部土木工学科大学院 (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 中央工学校 土木測量学部講師 博(工) (正会員)

密封したもので、またN試験体は材料を用いない比較のための標準試験体である(表-1 参照)。エアークャップはポリエチレン製で無数の気泡をシート状にした緩衝材であるが、3層はキャップ両面がともにシートで覆われているものである。実験時の天候は快晴で、全天日射計(波長範囲:305~2,800nm, 感度:5mV/kW・m²)で測定した最大全天日射量は880W/m²であった(図-1 参照)。試験体への直達日射は、実験場所が建物間であるため8:30~15:20である。日射及び外気温によるコンクリート温度は、熱電対(T社製、芯線構成:0.64mm×2本)をコンクリート表面(黒色アルミシートとコンクリート間)に貼付けて測定した。なお、試験体の側面には厚さ50mmの発泡スチロールを貼付けている。実験状況を図-2に示す。

その結果を図-3に示す。集熱効果では2L32試験体が最も吸熱及び温室効果が得られている。上面温度が最も高くなった時刻は、13:15で67まで上昇している。N試験体との上昇温度差では、13:30に22.4もの有意差が得られた。ここに、同時並行で行った各種エアークャップの全天日射量に対する透過率(11:00~12:00の平均値)を表-2に示しておく。この透過率は全天日射量を基準に、日射計の上部10mmに各種エアークャップで日射を遮って得られた日射量との割合である。なお、厚さ6mmのガラスも比較のために行った。その全天日射量の透過率では、2L20, 2L32, ガラス, 2L10, 3L10の順に透過率が低下している。一方、上昇温度では2L32, 3L10, 2L20, 2L10, N試験体の順に大きくなっている。2層同士である粒径・粒高が異なる2L10, 2L20及び2L32を比較すると、2L10は日射透過率も低く上昇温度も最も小さい。2L20と2L32の比較では、2L20の方が日射透過率は良いものの上昇温度は2L32の方が高い。その熱損失の抑制効果では、2L20の粒径20mm, 粒高8mmよりも粒高の大きい2L32の方が小さいものと思われるが、収熱効果は逆に2L32が高く、今後、日射量と粒高の関係を明らかにする必要がある。一方、3L10は透過率が低い割には2番目の上昇温度となっている。空気層の状態

表-1 試験体一覧

試験体記号	エアークャップの種類		
	層	粒径(mm)	粒高(mm)
2L10	2	10	4
2L20		20	8
2L32		32	13
3L10	3	10	4
N	標準試験体		-

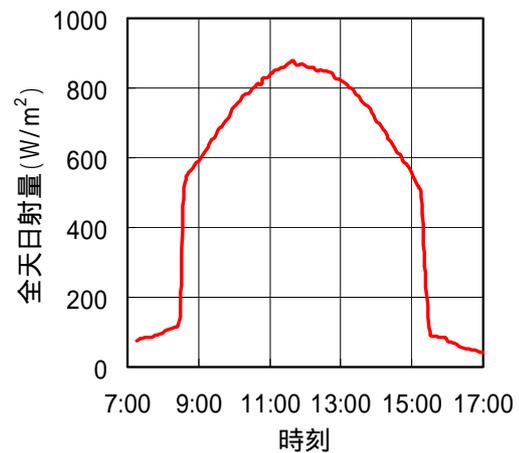


図-1 日射計で測定した全天日射量

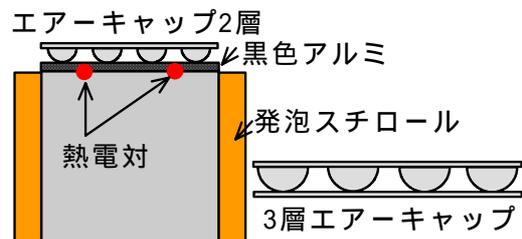


図-2 実験状況図

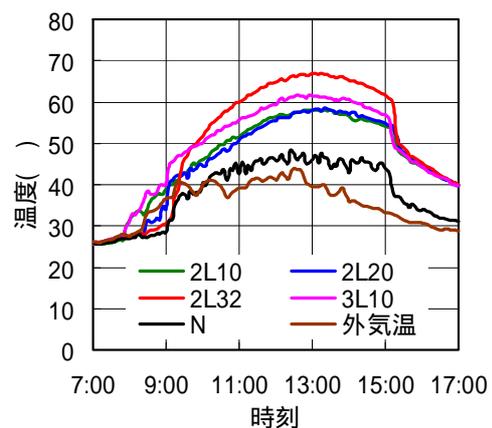


図-3 コンクリート温度の比較

表-2 日射透過率の相違

エアークャップ遮断日射量 / 全天日射量					ガラス	日射計
2L10	2L20	2L32	3L10			
0.84	1.04	0.96	0.73	0.92	1	

はビニールシートと同様であるが、3層のラミネート加工での断熱効果によって熱損失がより抑えられたものとする。

2.2 屋外による RC 梁の実験

RC 梁の実験は、静荷重載荷実験後に基礎実験と同様に RC 梁上面に黒色アルミシートを密着させ基礎実験で最も吸熱効果の得られた 2L32 のエアークラップで密封したものである。上面は絶えず日射を受け、底面は絶えず日陰となる構造物を想定したもので、上面から熱伝達されて得られた底面の表面温度変化と発生したひび割れ進展状況との関係から日射を受けることのない側からのひび割れ評価について検討した。

(1) 静荷重載荷実験及び測定方法

試験体は、長さ 2,800mm、幅 300mm、高さ 210mm で主鉄筋には D16 を 3 本、圧縮側に 2 本配置し、ひび割れ評価は降伏荷重にて中断したひび割れ発生から行った。赤外線カメラによる底面の温度測定〔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 0.15 (at30)〕は、高さ 2.3m の L 型鋼で試験体を支え、測定距離 1.65m の真下の位置から平成 18 年 9 月 19 日の 7:00~17:00 までの 10 時間を 20 分間隔で時系列の熱画像を得ることにした(写真-1 参照)。

(2) 熱画像からのひび割れ評価

測定日の天候は晴れ時々曇りで、最大全天日射量は 11:00 に 600W/m²、RC 梁への直達日射時間は 7:50~14:40 であり、最大風速は 4.3m/s であった。熱電対で測定したコンクリートの上面温度と赤外線カメラで撮影した底面温度の時系列変化を図-4 に示す。

その結果、コンクリートの上面温度は、13:10 に 55.5 となっており、外気温より約 25 ほど大きい。一方、底面温度の最大値は、15:20 に 32.2 となり測定開始時よりも約 9 ほど上昇している。図-5 は降伏荷重時に得られた側面のひび割れ進展状況(ひび割れ幅は除荷後に測定)と 15:20 の熱画像である。底面の長手方向の中心位置に沿った温度分布変化は、特にひび割れ番号の 6 と 7 間が形成するアーチ状のひび割れ及び底面

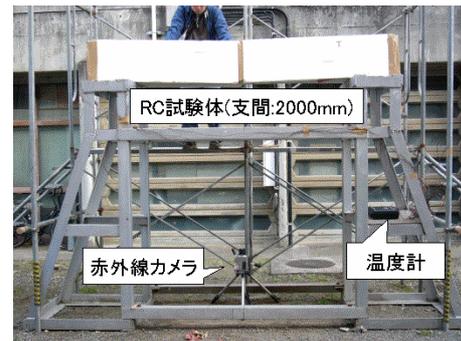


写真-1 RC 梁の実験状況

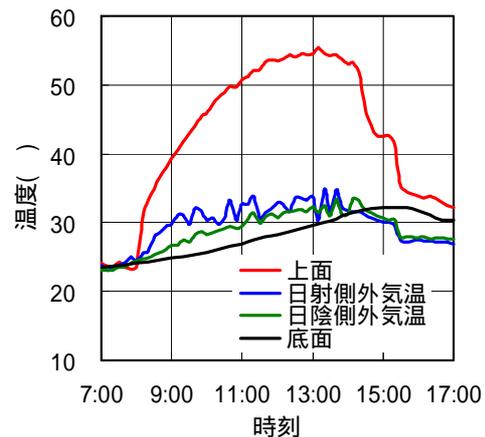


図-4 上面及び底面の温度変化

付近で枝分かれしたひび割れから熱移動が遮断されて健全部と比較すると放物線状に 0.3 程度の低温帯が確認される。このように、コンクリート厚さが 200mm 程度であれば、完全な日陰部であっても透過熱を利用すればコンクリート内部のひび割れ進展状況を推測することが可能である。

3. 数値シミュレーション

二次元非定常熱伝導解析では、吸熱材料を用いない通常のコンクリートとの比較からパッシブソーラー法の有効性及び利用できるコンクリートの方位について、入力日射量とひび割れ部に生じる温度差から予測した。

3.1 解析モデル

図-6 には想定したひび割れパターンを示す。コンクリートの厚さは RC 梁と同じく 210mm、想定したひび割れの角度は 35° とし、幅は 0.2mm、深さは 140mm の位置から水平な枝分かれを 100mm としたモデルである。メッシュサイズは、ひび割れ部に向かって要素密度が高くなるように分割し、ひび割れ内部は幅 0.2mm 方向を 2 分割した。

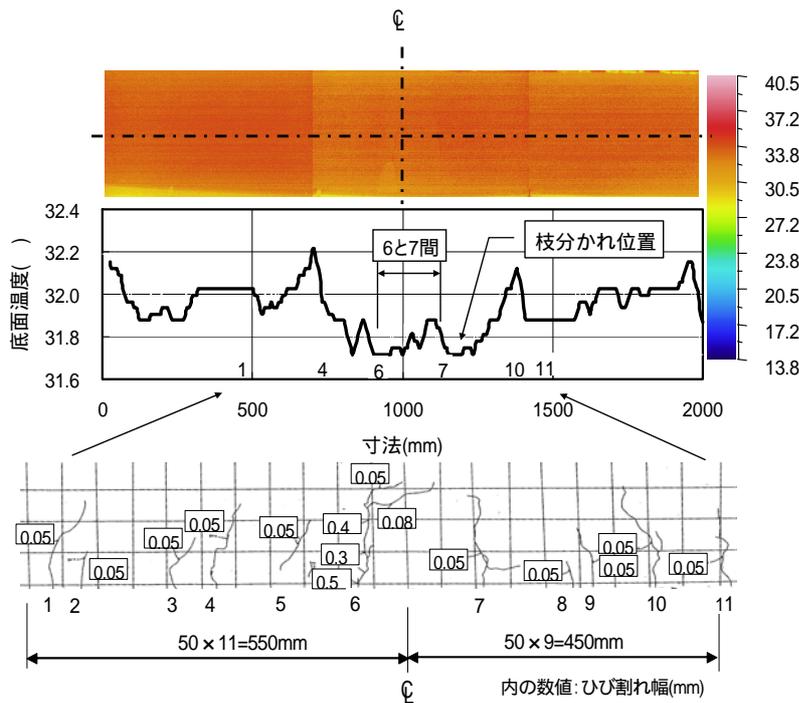


図-5 ひび割れ進展状況と熱画像(15:20)

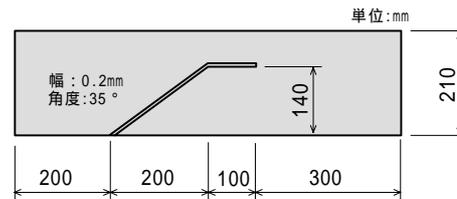


図-6 解析試験体モデル

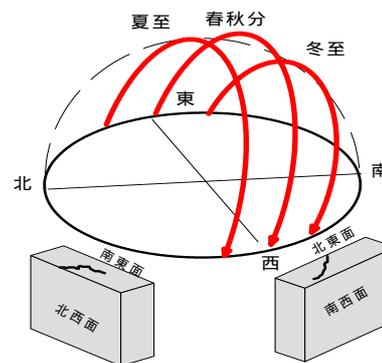


図-7 太陽方位と鉛直構造物

なお、対象構造物は図-7 に示すように鉛直なコンクリート壁を想定したもので、エアークャップは図-6 の上面(日の出側)及び低面(日没側)の両面に施したものとす。

3.2 入力日射量及び外気温と解析条件

表-3 には解析に用いた熱特性を、図-8(a), (b) には入力した各方位別の外気温を、図-9(a) ~ (d) には直達日射量を示す。図表中の記号Aはエアークャップ面をNは通常のコンクリートを示す。外気温は日射を受ける時間帯は基礎実験で得られた日射面側の温度を日陰時間帯は日陰面側で得られた温度を各方位別に算定された時刻にあわせて入力した。水平面の直達日射量は、基礎実験で得られた全天日射量(880W/m²)を基に、図-3 に示す 2L32 及びN試験体で得られたコンクリート温度の推移に一致するように日射量と熱伝達係数を変化させて繰り返し計算を行い再現した。次に各方位別の鉛直面への直達日射量では、この水平面で得られた直達日射量を基に計算した²⁾。なお、対象構造物の場所は東京で、日射を受けない時刻の日陰面には天空日射量の半分を入力した。また、解析時間は8月4日の0:00~24:00までの24時間とした。

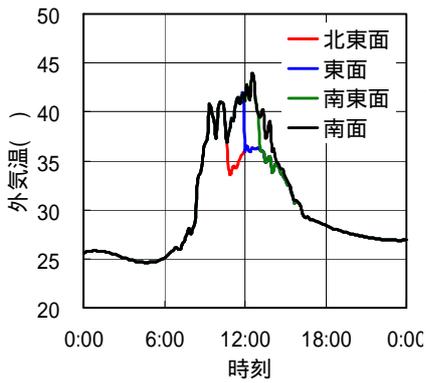
表-3 解析に用いた熱特性

材 料	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/(kg·K))	熱伝導率 (W/(m·K))	熱伝達係数 (W/(m ² ·K))
コンクリート	2,200	0.876	1.4	6(A)
ひび割れ	1.161	1.009	0.0256	14(N)

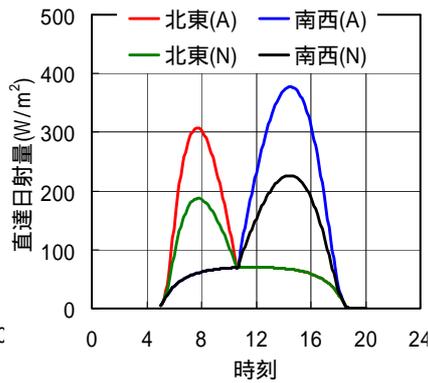
3.3 解析結果

図-10(a) ~ (d)は、図-9の日射量から得られた健全部のコンクリート温度である。当然のことながら直達日射を受ける時間が長くなるほど上昇温度も大きくなっているが、エアークャップと通常のコンクリートを比較すると日の出側、日没側ともに 10 程度の差であって、鉛直面の場合には図-3 に示す水平面ほどの温度差は得られていない。コンクリート温度が最大となる時刻は、北東面(45°)から北面(360°)になるほど遅くなっているが、北東面では9:40と17:40にピークが現れており、反対面である南西面の熱伝達が影響したことが分かる。北面も、最大日射時刻11:50に対して上昇温度のピークは17:20である。

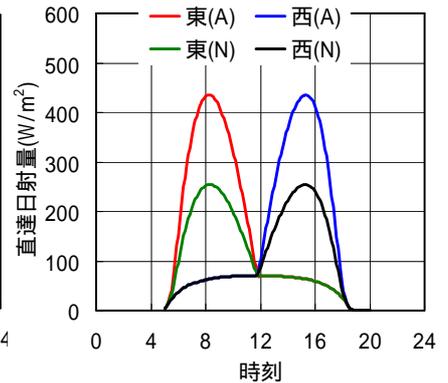
図-11(a), (b)は図-6に示すモデルの上面(日の出面)の左端から450mmの位置(枝分かれの中央)と底面(日没面)のひび割れ位置境界部(左端から200.2mm)の温度から健全部温度を減算した温



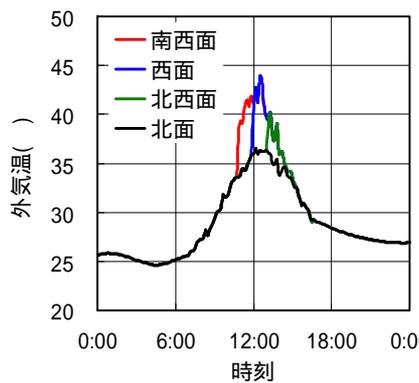
(a) 日の出



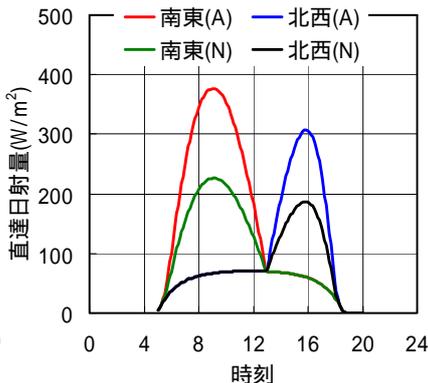
(a) 北東面 - 南西面



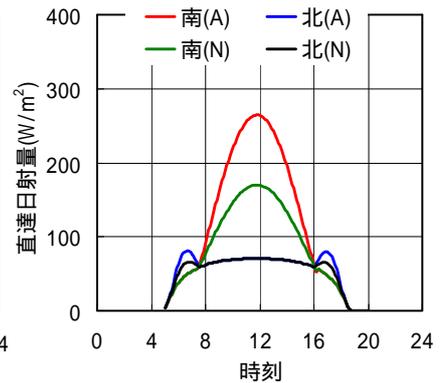
(b) 東面 - 西面



(b) 日没



(c) 南東面 - 北西面



(d) 南面 - 北面

図-8 入力外気温

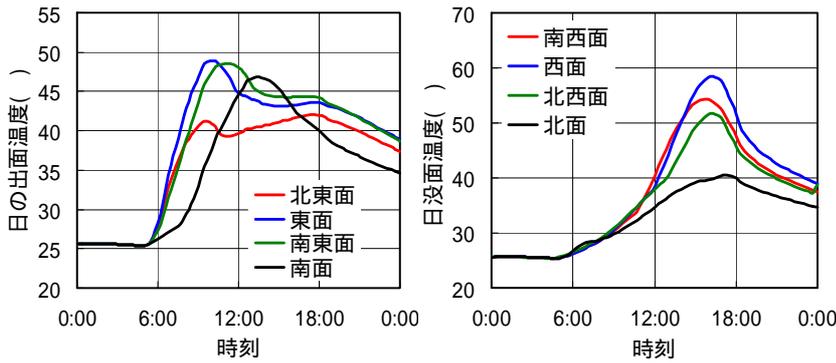
図-9 方位別入力日射量

度差変化である。この両者の位置は、上面及び底面で最も温度差が大きくなる箇所である。日の出側は、上面と枝分かれ部との距離は70mmである。そのエアークャップ(A)と通常(N)の温度差変化を比較すると、通常では0.13程度の温度差に対してエアークャップの東面及び南東面では0.3程度の温度差が得られており熱画像からも変状部として検出可能と思われる。一方、ひび割れ発生面である日没側のエアークャップでは、各面ともに通常の2倍以上の温度差となっており、ひび割れ発生位置から進展方向の確認が可能である。しかし、鉛直北面は両者ともに0.2程度の温度差であり、エアークャップの効果は得られていない。赤外線カメラでの測定では、このような特徴を有する温度変化からエアークャップを取り外す最適な診断時刻を各方位面別に予測する必要がある。

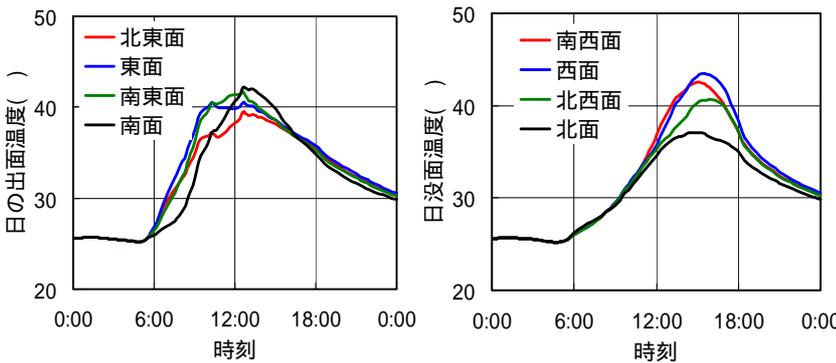
表-4は、図-9に示す各方位別の最大日射時刻と図-10に示すコンクリートの最大上昇温度時

刻を比較したものである。日の出側では最大温度時刻は最大日射時刻の2時間後、日没側では北面以外は1時間後である。また、図-13は最大上昇温度の時刻までの日射量を日の出時刻から図-9を積算した日射積分量と上昇温度の関係である。この上昇温度は、最大温度から日の出時の温度を減算したものである。日没側は、日の出側からの熱伝達によって若干上昇温度が大きくなるが、両者はほぼ比例関係にある。

本報告は、太陽高度の高い夏季での一例ではあるが方位は既知であり、年間を通して図-9の日射量も算出可能であることから、最大温度時刻及びその日射積分量も推定可能であり、日射積分量から上昇温度を予測することができる。また、エアークャップを外しての診断時刻は、可能な限り深い位置まで潜在するひび割れまでが評価できるように設定する必要がある。最大上昇温度の時刻は予測可能であり、図-11の最大温度との関係から北面以外は各方位ともに最

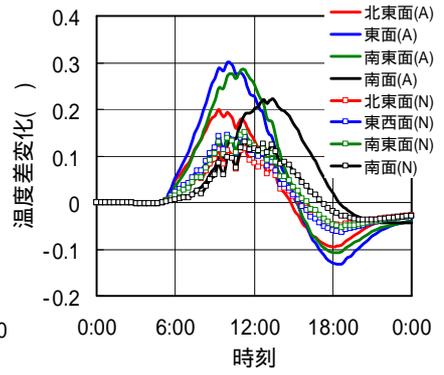


(a) エアーキャップ(日の出側) (b) エアーキャップ(日没側)

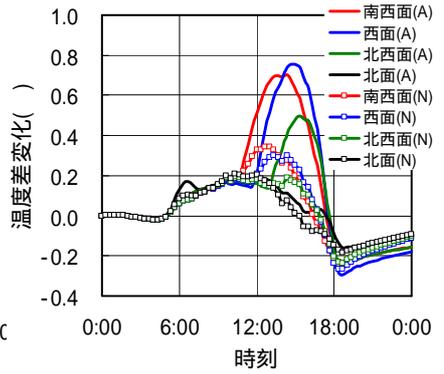


(c) 通常(日の出側) (d) 通常(日没側)

図-10 健全部の温度変化



(a) 日の出側(左端より 450mm)



(b) 日没側(ひび割れ境界部)

図-11 健全部との温度差変化

表-4 最大日射時刻と最大上昇温度時刻

最大日射時刻 / 最大上昇温度時刻			
日の出側		日没側	
北東	7:40 / 9:40	南西	14:30 / 15:40
東	8:20 / 10:20	西	15:20 / 16:20
南東	9:00 / 11:20	北西	15:50 / 16:40
南	11:50 / 13:20	北	11:50 / 17:20

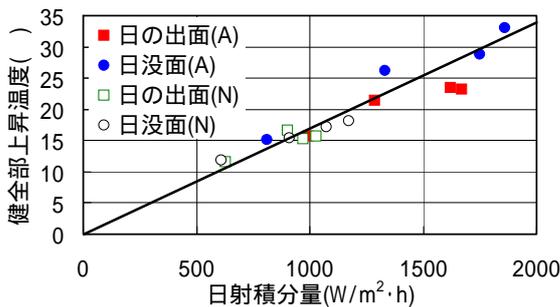


図-13 日射積分量と上昇温度の関係

大温度が得られる時刻を指標として測定すれば良いことになる。

4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

(1) 収熱効果は、エアーキャップの粒径 32mm・

粒高 13mm が最も上昇温度が大きくなり、標準試験体よりも 22 の有意差が得られた。

(2) 日陰面となる構造物を想定した RC 梁の実験では、上面からの熱伝達からひび割れ部には低温域が現れ、内部のひび割れ進展状況が評価できた。

(3) コンクリートの方位から最大温度時刻及びその日射積分量も推定可能であり、日射積分量から上昇温度を予測することができる。

(4) コンクリートの方位と最大上昇温度となる時刻には良好な相関性があり、エアーキャップを外しての測定時刻が予測できる。

参考文献

- 1) 金光寿一・柳内睦人・江藤 亮：太陽光促進加熱からの熱伝達を利用したコンクリート内部のひび割れ評価，シンポジウム コンクリート構造物への非破壊検査の展開，pp.85-94, (社) 日本非破壊検査協会，2006.8
- 2) 金山公夫・馬場弘：ソーラーエネルギー利用技術，pp.26-41, 森北出版