

太陽光促進加熱を利用したサーモグラフィー法によるコンクリートの内部診断

中央工学校 金光寿一 日大生産工 柳内睦人
日大生産工 木田哲量

1. はじめに

道路橋の補修及び補強の目安となる損傷度の評価では、コンクリート内部に潜在している浮きや剥離(空洞・空隙)を、また、ひび割れの進展状況(幅・角度・深さ・進展パターン)を確認することが重要となる。このような内部診断にサーモグラフィー法を採用する場合には、検出可能となる熱負荷条件が必要であり、現在、日射量及び外気温の変動を利用したパッシブ法と各種人為的な加熱や冷却を利用するアクティブ法から試みられている。ところが、これらはいずれも変状部下部に蓄積される熱量を期待するもので、測定面からの熱源では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熱拡散から評価できない可能性がある。既に筆者らは、これらの問題点が解決できる熱源の確保として、道路橋のスラブでは測定面の反対側から供給されるアスファルト舗装時における舗設熱の利用を提案し、パッシブ法との比較から検出できる欠陥の大きさや深さに、また検出可能となる許容時間にも有効であることを明らかにしている¹⁾。しかし、舗装熱は道路橋の高欄部や張出スラブなどの診断を想定した場合には利用することが困難である。

そこで、本研究では舗装熱が利用できないこれらの部位に対する反対側からの熱源として太陽光での促進加熱を利用し、どの程度の熱量が供給され反対側へ熱伝達されるのかを

基礎実験及び三次元非定常熱伝導解析から明らかにした。一般にサーモグラフィー法の診断は、表層部の欠陥検出を目的として利用されているが、本手法は測定面を加熱及び冷却する手法とは異なり、測定面の反対側から供給される熱伝達のレスポンス現象の相違を利用してコンクリート内部全体を評価するところに特徴がある。

2. 実験概要

舗装熱が利用できない部位に対する熱源としては、これまでに温風ヒータ、酸化反応熱を利用して実験を行ってきた。本研究では、簡便に均一な加熱が可能であること、大規模な構造物に適用できること、加熱装置が必要なく費用が安いこと、環境に優しいことなどからパッシブ法の応用として太陽光の促進加熱から検討した。

2.1 基礎試験体における促進加熱実験

太陽光及び外気温の利用では、促進材料の熱特性や色の違いあるいはその設置方法によって日射吸収率や放射率に差が生じることになる。図-1は測定面の反対側からの日射及び外気温の熱伝達を示す概略図である。コンクリートへの吸熱量を少しでも大きくするための材料では、反射率が小さく、熱の伝わり易さである熱伝導率が大いこと、また、材料の熱の蓄えやすさを示す熱容量が大いことが要求される。ところが、測定面で得られる熱量は、日射量の変動に連動して供給され

る熱量が敏感に変動するものと思われ、方位、あるいは一時的に曇りによってこれまで蓄熱された材料表面からの二次放射熱となって放出され、日射量及び外気温による熱供給が低下することが予測される。このような場合には、温室効果と同様に蓄熱された熱量が外部に放出することができない透過率の低い材料が要求される。一方、促進材料の色では赤外線を完全に吸収する黒色が望まれる。なお、吸熱量及び温室効果(断熱効果)を期待する促進材料には、市販のエアークリップ、凸型レンズシート及び黒色アルミ箔を利用してコンクリート表面の上昇温度を確認した。

表-1には実験条件を、図-2には実験状況の一例を示す。試験体は、幅150×高さ150×長さ530mmで、BA試験体は黒色塗料で塗ったエアークリップを試験体上面に覆い側面で密封したもの、AC試験体は黒色塗料で塗ったアルミ箔をコンクリート表面に接着させ、さらにエアークリップ(半透明)で密封したもの、LS試験体はレンズシート(レンズ直径27mm、焦点距離16mm)を黒色アルミより焦点距離分だけ離し、周囲を幅10mmの発泡スチロールで支えたもの、またN試験体は促進材料のない比較のための標準試験体である。実験は、平成17年10月13日午前6時30分より16時30分まで4試験体同時に行った。測定日の天候は、晴れ後曇りで、試験体上面付近で測定した外気温は測定開始時は14.4℃、最高気温は11時10分の27.2℃、終了時は21.4℃であった。日射及び外気温によるコンクリートの上昇温度は、熱電対(T社製、芯線構成：0.64mm×2本)をコンクリート表面に貼付けて測定した。図-3は、試験体上部(日射)及び試験体下部(日陰)の外気温と標準試験体のコンクリートの上昇温度を示したもので、また、図-4は各試験体で得られたコンクリートの上面温度から標準試験体の上面温度を減算した温度差である。

その結果、図-4に示す標準試験体との比較では、AC試験体(エアークリップ+黒色アルミ箔)

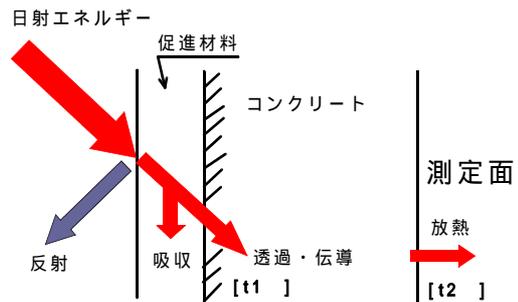


図-1 促進材料と熱伝達の概略図

表-1 実験条件

試験体記号	促進材料の種類と組合せ
BA	黒色エアークリップ
AC	エアークリップ(半透明) + 黒色アルミ箔
LS	レンズシート(半透明) + 黒色アルミ箔
N	促進無し(標準)

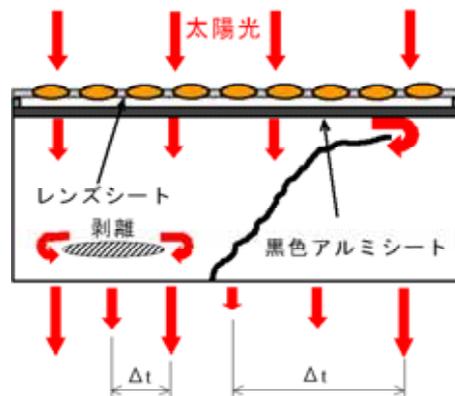


図-2 実験状況と評価法(LS試験体)

が最も促進材料の組み合わせとして吸熱及び温室効果が得られることが分かった。標準試験体との比較では、11:30には10.6℃、13:20には10.4℃大きくなっている。BA試験体は、黒色のエアークリップで半透明のエアークリップと比較すると日射吸収率が高く、エアークリップ自体が反射することなく加熱され、コンクリート上面に対して放熱することになる。しかし、エアークリップは薄く、また、介在することになる空気層の熱移動は熱伝導、熱対流、熱放射で行われるものの伝える力も弱く(熱伝導率：0.026W/(m・K))、熱容量も非常に小さいために逆に標準試験体よりも上昇温

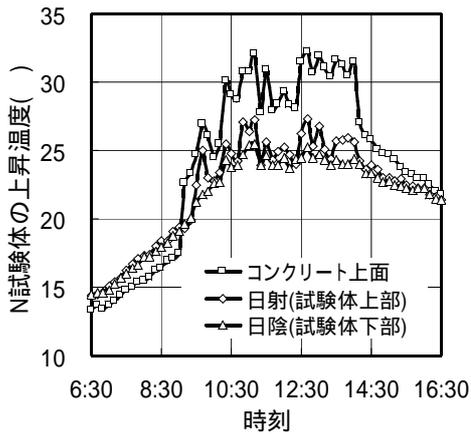


図-3 外気温と標準試験体の上昇温度

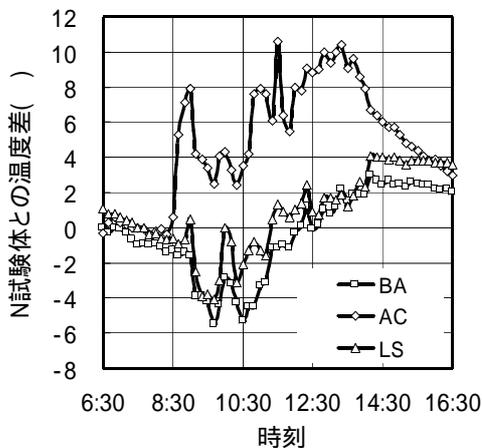


図-4 標準試験体との上昇温度差

度が低くなったものとする。一方、凸型レンズシートと黒色アルミを併用したLS試験体は、太陽光の集光力を利用するもので黒色アルミとの併用でBA試験体よりは若干上昇温度は大きくなっているものの、標準試験体と比較するとBA試験体と同様に上昇温度が小さい。標準試験体より上昇温度が低くなった理由は、レンズシートによるスポット加熱となり最も熱の伝わりやすいアルミにおいても広範囲にコンクリート表面を加熱できなかったものとする。

3. 数値シミュレーション

三次元非定常熱伝導シミュレーションには、汎用FEMプログラムCOSMOS/M Ver2.7を使用し、コンクリートの上面温度とひび割れ部で現れ

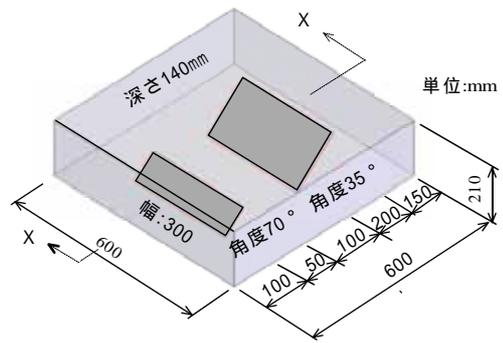


図-5 解析モデルの鳥瞰図

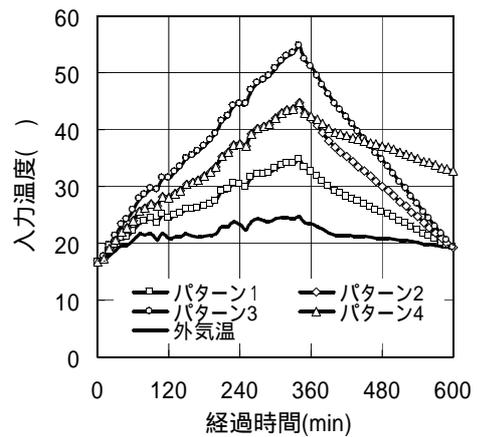


図-6 供給熱のパターンと外気温

た温度差との関係から、どの程度の熱量が供給されれば赤外線カメラから進展したひび割れが評価できるのかを明らかにした。

3.1 解析モデルと解析条件

解析モデルの鳥瞰図を図-5に示す。想定したひび割れは、角度は70°と35°で進展高さは140mm、幅は0.2mmである。なお、要素モデルは1/2モデルとして10節点四面体要素でメッシュ分割した。試験体側面は完全断熱境界し、初期内部温度は16.8℃、熱伝達係数は16.0(W/m²・K)の一定値で解析時間間隔は2分、結果の出力は4分間隔で行った。

図-6は、促進加熱から得られるコンクリート上面温度を想定した4つの供給熱パターンと外気温である。図-7にはパターン2で得られた580分経過後の熱画像を示す。また、図-8には各供給熱から得られた健全部の表面温度を、図-9(a),(b)には図-7のひび割れ発生部で得ら

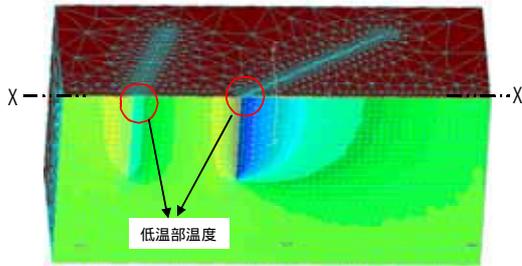


図-7 580分経過後の熱画像(パターン2)

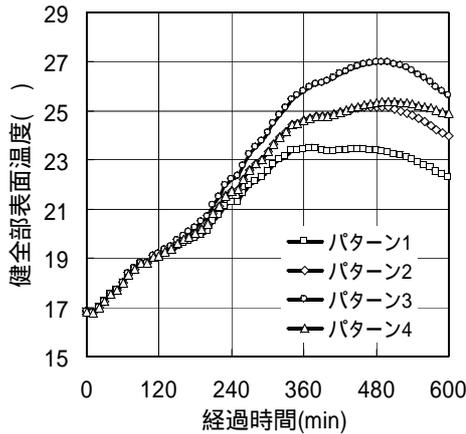


図-8 健全部の表面温度

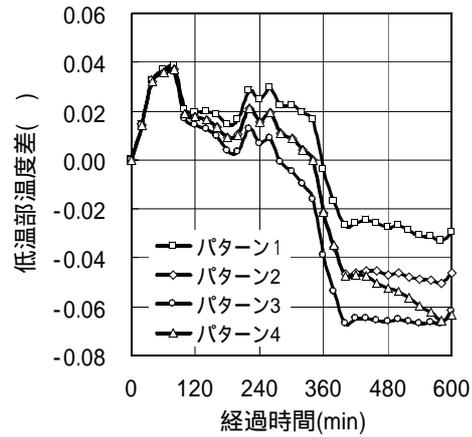
れた低温部と健全部との温度差を示す。

その結果、各供給熱から熱伝達されて得られた健全部の最大上昇温度は、図-8からパターン1で6.7 (370分後)、パターン2で8.4 (470分後)、パターン3で10.2 (490分後)、パターン4で8.6 (500分後)となった。図-9では供給熱の熱移動がひび割れ部で遮断されて健全部よりも徐々に低温域に推移する様子が分かる。その最大温度差は、角度70°では、パターン1で-0.03、パターン2で-0.05、パターン3で-0.07、パターン4で-0.07で、いずれも580分経過後である。パターン2の供給熱は基礎実験のAC試験体とほぼ同様であり、最新の赤外線カメラ(温度分解能0.025)の使用によって評価できるものとする。

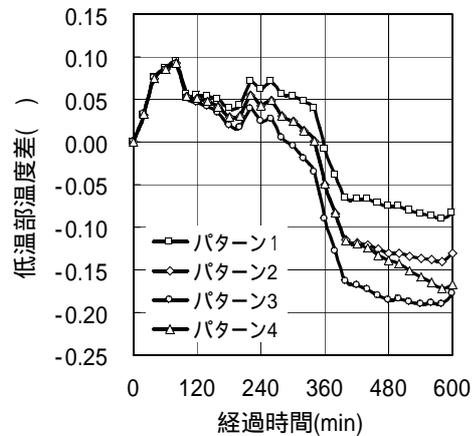
4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

(1) 太陽光を利用する促進材料及び設置方法は、半透明のエアキャップと黒色アルミ箔の



(a) 角度70°



(b) 角度35°

図-9 ひび割れ低温部温度差の相違

組み合わせが最も吸熱量及び保温の効果が大きくなり、コンクリートの上面温度は、標準試験体に比べて10以上大きくなった。

(2) シミュレーションでは、外気温の上昇が最大になる時間帯まではひび割れ領域下側は高温域を示し、その後、反対側からの供給熱の熱伝達によって急激に低温域に推移することが明らかになった。

(3) コンクリート上面の吸熱量は、促進加熱によって外気温よりも20程度の上昇が得られれば幅0.2mm、角度70°の評価が可能である。

参考文献

- 1) 金光寿一, 柳内睦人他: 舗装熱を利用したサーモグラフィ法によるRC床版内部の欠陥検出に関する研究, 土木学会論文集, NO.732, V-59, pp.95-108, 2003.5

