

# 論文 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

江藤 亮\*<sup>1</sup>・柳内 睦人\*<sup>2</sup>・金光 寿一\*<sup>3</sup>

要旨：コンクリートの内部診断にサーモグラフィー法を採用する場合，検出可能となる熱負荷条件が必要であり，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については熱拡散から評価できない可能性がある。そこで，本研究では測定面ではなく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明らかにした。その結果，促進材料では半透明のエアークラップと黒色アルミ箔の組み合わせが最も吸熱量及び保温の効果が大きくなり，ひび割れ幅 0.2mm，角度 35° の領域が評価可能であることが分かった。

キーワード：サーモグラフィー法，太陽光，促進加熱，ひび割れ検出，非定常熱伝導解析

## 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<sup>1)</sup>。しかし，

舗装熱は道路橋の高欄部や張出スラブなど，他の部位の診断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。

\*1 日本大学 生産工学部土木工学科 (正会員)

\*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*3 中央工学校 土木測量学科講師 工修 (正会員)

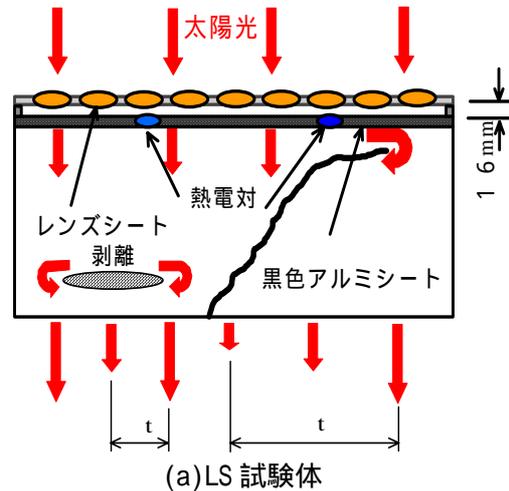
## 2.1 基礎試験体における促進加熱実験

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。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2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。以上、吸熱量及び温室効果(断熱効果)を期待する促進材料には、市販のエアーキャップ、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。

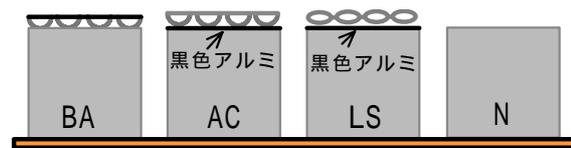
表-1には実験条件を図-1(a),(b)には実験状況を示す。試験体は、幅150×高さ150×長さ530mmで、BA試験体は黒色塗料で塗ったエアーキャップを試験体上面に覆い側面で密封したもの、AC試験体は黒色塗料で塗ったアルミ箔をコンクリート表面に接着させ、さらにエアーキャップ(半透明)で密封したもの、LS試験体はレンズシート(レンズ直径27mm,焦点距離16mm)を黒色アルミより焦点距離分だけ離し、周囲を幅10mmの発泡スチロールで支えたもの、またN試験体は促進材料のない比較のための標準試験体である。実験は、平成17年10月13日午前6時30分より16時30分まで4試験体同時に行った。測定日の天候は、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では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

表-1 実験要因

試験体記号	材料種類	重さ(g/m <sup>2</sup> )
BA	黒色エアーキャップ	61.3
AC	半透明エアーキャップ + 黒色アルミ箔	92.9
LS	レンズシート + 黒色アルミ箔	448.9
N	促進無し(標準)	-



(a)LS試験体



(b)各試験体の促進加熱

図-1 実験状況と評価法

クリート表面に貼付けて測定した。

## 2.2 実験結果

図-2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(試験体記号N)及びAC試験体のコンクリート温度を示したもの、また、図-3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-2及び図-3に示す標準試験体との比較では、AC試験体(エアーキャップ+黒色アルミ箔)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、黒色のエアーキャップで、半透明のエアーキャップと比較すると日射吸収率が高く、エアーキャップ自体が反

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、エアークャップは薄く、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:  $0.026\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )、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. RC はりのひび割れと熱画像

RC 梁の促進加熱実験では、静荷重載荷実験後に図-1 に示す試験体と同様に上面を黒色のビニールのみで密封し、上面から熱伝達されて得られた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ひび割れ評価について検討した。

#### 3.1 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(図-4 参照)。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  $8.0\sim 14.0\mu\text{m}$ 、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 17 年 9 月 13 日の 6:30~16:30 までの 10 時間を 10 分間隔で時系列の熱画像を得ることとした(写真-1 参照)。測定面は試験体が大きいため、試験体を三分割して赤外線カメラを移動して熱画像の撮り込みを行った。なお、赤外線カメラによる測定面は試験体の支点間の 2,000mm となっている。また、試験体は測定面以外からの熱の流入を遮断するた

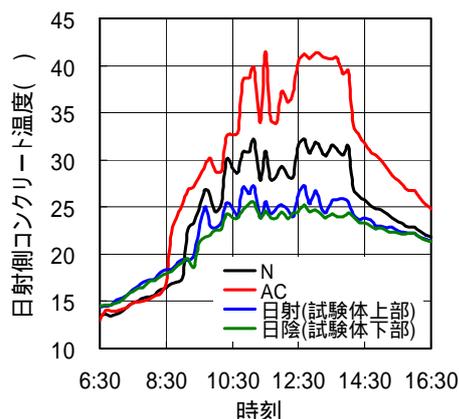


図-2 外気温とコンクリート表面温度

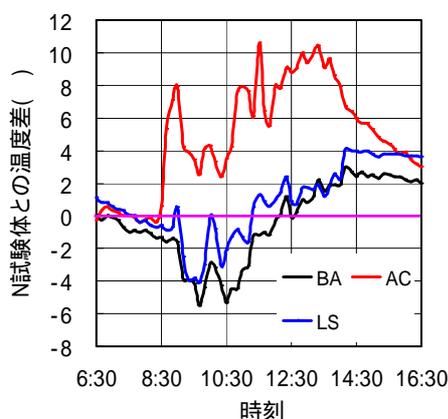


図-3 標準試験体との温度差

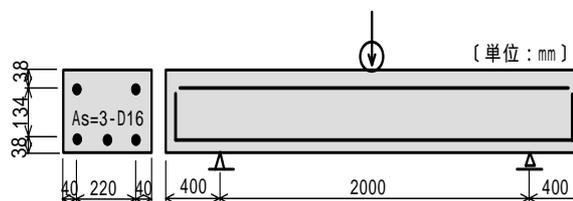


図-4 RC 梁試験体及び配筋状態

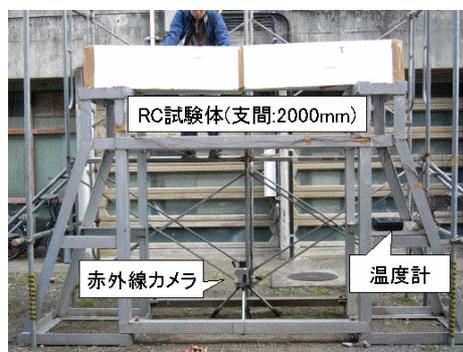


写真-1 測定状況(測定範囲: 支間 2000mm)

め側面に厚さ 50mm の発泡スチロールを貼付けている。

### 3.2 促進加熱で得られた熱画像

図-5 は熱電対で測定した測定開始時からの外気温(日射部)及び写真-1 に示す RC 梁上面に黒色のビニールを密封して得られたコンクリートの上面温度と赤外線カメラで撮影して得られた健全部の底面温度(表面温度変化)である。なお、この健全部の温度はひび割れ発生のない支点から 200mm と 1800mm の位置の平均温度である。

その結果、外気温の最大は 13:50 分に 35.5 が得られており、6:30 より約 10 ほど上昇している。黒色ビニールを介在して得られたコンクリートの上面温度は、13:30 分に 47.1 となっており、外気温より約 10 ほど大きい。この供給熱から得られた底面温度の最大値は、14:50 に 34.2 となり測定開始時よりも約 9 ほど上昇している。

図-6 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 16:00 の熱画像である。底面の中心位置に沿った温度分布変化は、ひび割れ番号の 6 と 7 間が

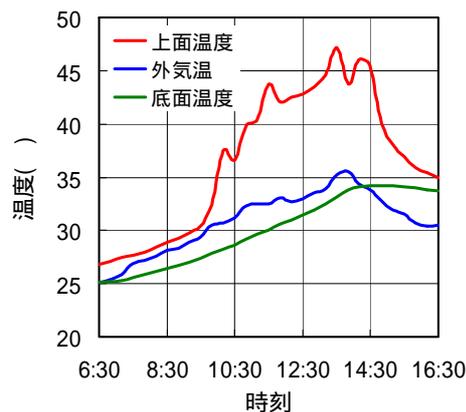


図-5 上面温度と底面温度の関係

形成するアーチ状のひび割れで熱移動が遮断されて僅かではあるが放射線状の低温域が確認される。ひび割れ 6 は右方向に進展し、7 はやや左側に進展しているため、上部から熱移動が遮断された熱拡散によって、あたかも内部に潜在する水平な剥離部と同様の温度分布変化を示したものと考える。

一方、一方向に進展している 4、9 及び 10 等は画素変動のために評価することが困難である。この一方向のひび割れと温度変化との関係はシ

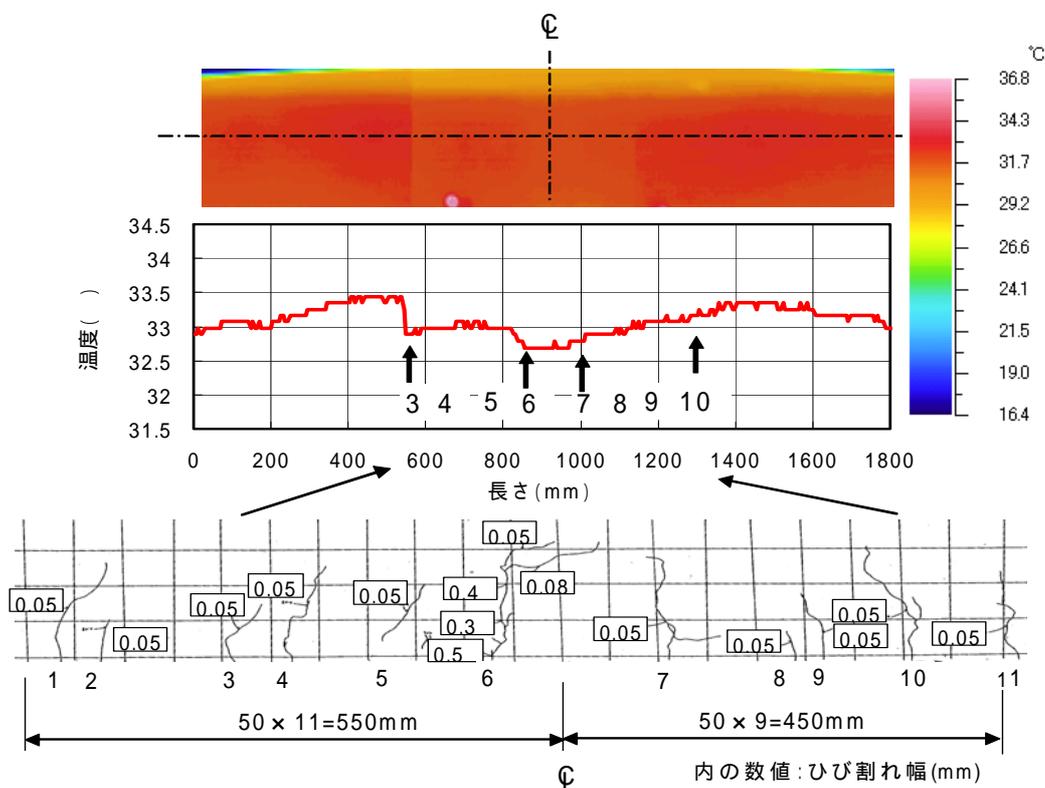


図-6 ひび割れ進展状況と熱画像(16:00)

ミュレーションから明らかにした。

#### 4. 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。

##### 4.1 解析モデルと解析条件

解析モデルの鳥瞰図を図-7 に示す。想定したひび割れは、角度は 70° と 35° で進展高さ(深さ)は 140mm、幅は 0.2mm である。なお、解析モデルは X 軸で切断した 1/2 モデルとして中間節点を有する 10 節点 4 面体 2 次要素でメッシュ分割した(図-9 参照)。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/m<sup>2</sup>・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。解析に用いた熱特性<sup>2)</sup>は表-2 に示すとおりである。

図-8 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。パターン 2 は、図-2 に示すエアキャップと 黒色アルミ箔の組み合わせから得られた AC 試験体の温度推移を想定したもので、外気温より 20℃ 大きくしたものである。

図-9(a),(b)にはパターン 2 で得られた 60 分及び 580 分経過後の熱画像を示す。また、図-10 には各供給熱から得られた健全部の温度を、図-11(a),(b)には図-9 の X 軸を切断して得られた健全部との温度差変化を示す。

その結果、図-9(b)に示す熱画像では、熱伝達によってひび割れ部で熱移動が遮断され低温域が確認される。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-10 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)となっている。図-11 はパターン 2 の供給熱で得られた各経過後の温度差変化である。例えば 35° のひび割れ領域寸法

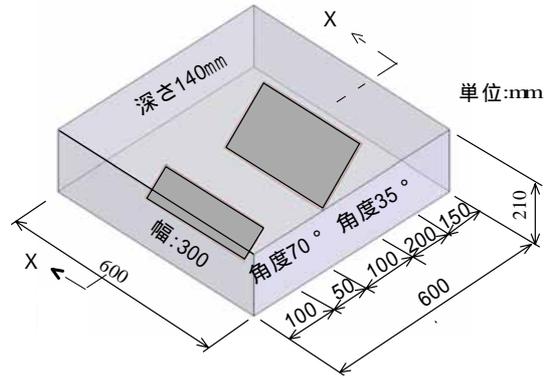


図-7 解析モデルの鳥瞰図

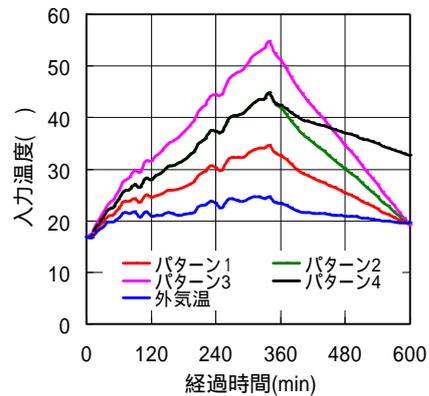
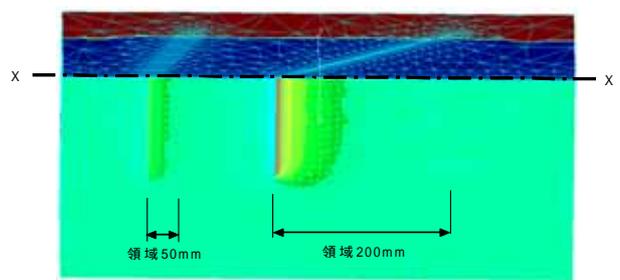


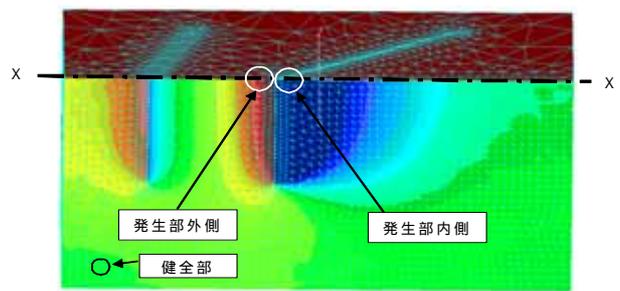
図-8 供給熱のパターンと外気温

表-2 解析条件

材 料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 [kJ/(kg・K)]	熱伝導率 [W/(m・K)]	熱伝達係数 (W/(m <sup>2</sup> ・K))
コンクリート	2,200	0.876	1.4	16
ひび割れ(空気)	1.161	1.009	0.0256	



(a)60 分経過後



(b)580 分経過後

図-9 熱画像(パターン 2)

(水平投影寸法 200mm)を精度良く評価するためには、領域先端部位置で温度差が0、つまり健全部と同じ温度になる必要があるが、温度変化の推移を見ると解析を終了した 600 分程度の経過時間が必要であることが分かる。

図-12 は、各パターンの供給熱から得られた健全部の最大上昇温度とひび割れ発生境界部のひび割れ内側(図-9 参照)の温度と健全部との最大温度差の関係である。検出可能なひび割れ部の温度差は使用する赤外線カメラの温度分解能に影響されるものの、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 )の使用によって角度 70° は進展方向が、また 35° では領域まで評価できるものとする。太陽エネルギーを利用したコンクリート内部のひび割れ評価は日射量が大きく影響することになるが、日射側ではひび割れ部に現れる蓄積熱を、また日陰側では熱伝達から遮断されて現れる透過熱を利用することにより、この両者の温度変化からひび割れ形態がより明らかにできるものとする。

## 5. 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)RC 梁を黒色ビニールのみで密封して得られ熱画像では、曲げ及びせん断力からコンクリート上部で枝分かれしたアーチ状のひび割れ間に緩やかな放物線状の低温域が現れ内部の進展形態が推定できた。
- (3)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。
- (4)コンクリート上面の吸熱量は、促進加熱によ

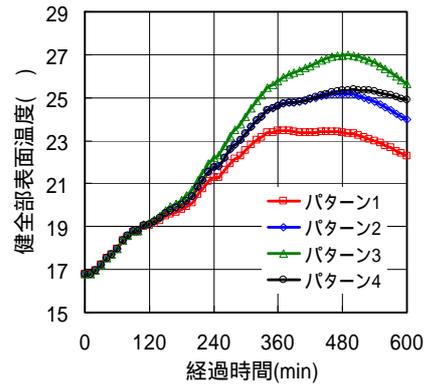


図-10 健全部の上昇温度(底面)

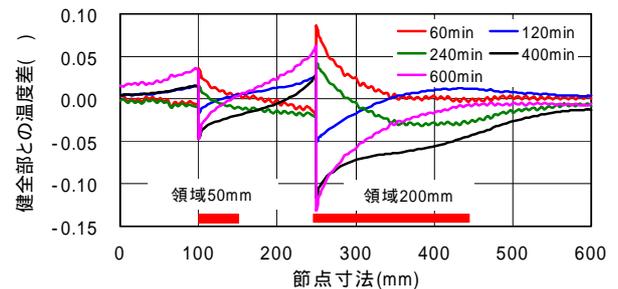


図-11 底面切断面の温度差変化(パターン 2)

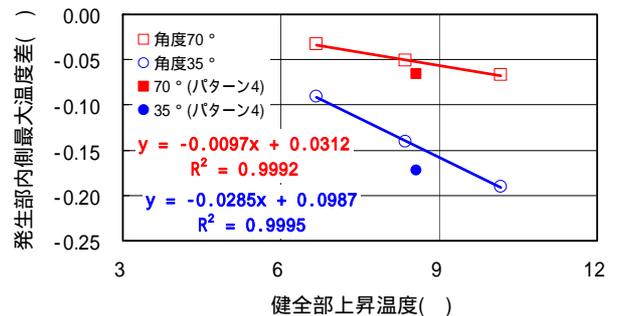


図-12 上昇温度とひび割れ発生部温度差

って外気温よりも 20 程度の上昇が得られれば幅 0.2mm の角度 70° では進展方向が、また 35° では領域寸法の評価が可能である。

## 参考文献

- 1) 金光寿一, 柳内睦人, 三星智典: 舗装熱を利用したサーモグラフィー法による 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
- 2) 日本機械学会編: 電熱工学資料, pp.317-322, (社)日本機械学会, 1986.10.