

論文 酸化反応熱を利用したサーモグラフィー法による損傷度評価

金光 寿一^{*1}・柳内 睦人^{*2}・木田 哲量^{*3}

要旨：近年，道路及び鉄道高架橋では初期欠陥や中性化に起因するひび割れやコンクリート片の剥落が数多く報告されている。しかし，サーモグラフィー法の診断では，測定面が日陰となる部位が多いこと，また，人為的な加熱が困難な高架橋も数多く存在していることから熱源の確保が課題となっている。そこで，本研究では測定面の反対側から供給する熱源として酸化反応熱を利用し，進展したひび割れがどの程度の熱量で検出可能なのかを実験及び解析から検討した。その結果，熱画像には熱伝達によってひび割れ進展に対応した温度変化が確認され，検出に必要な熱源として利用できることが明らかになった。

キーワード：サーモグラフィー法，酸化反応熱，損傷度評価，非定常熱伝導解析

1. はじめに

近年，道路及び鉄道高架橋では初期欠陥・損傷・劣化の進行で，スラブ，高欄，張出スラブ下面，桁座，電柱基礎，地覆からのコンクリート片の落下が数多く報告されている¹⁾。落下原因は道路橋では主として交通量の増加が，また鉄道橋では主としてかぶり不足箇所における鉄筋の腐食膨張圧によるものであるが，ひび割れ進展方向及びパターンは多種様々である。

その診断手法の一つであるサーモグラフィー法では，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変状部の検出が試みられている。ところが，パッシブ法では測定面が日陰の場合には変状部との温度差が期待できず，また測定面からのアクティブ法では温度むらや熱拡散から起こる検出精度に問題を残している。さらに，架設条件などでアクティブ法が適用できない橋梁も数多く存在している。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²⁾。しかし，舗装熱は道路橋の高欄部や張出スラブ及び鉄道橋の診断を想定した場合には利用することができない。

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熱源として酸化反応熱を利用し，進展したひび割れが検出可能なのかをRC梁に対して静荷重載荷実験を行い，発生したひび割れ進展状況と熱伝達により現れた表面温度分布変化との関係から内部評価を試みた。また，熱源としては酸化反応熱と同様に床暖房に用いられている面状発熱体，過熱水蒸気などが考えられるが，どの程度の熱量が供給されれば検出可能なのか供給熱を変化させて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内部評価するところに特徴がある。

2. 実験概要

本実験は，側面からひび割れ進展状況の確認

*1 中央工学校講師 土木測量学科 工修 (正会員)

*2 日本大学教授 生産工学部土木工学科 工博 (正会員)

が容易なRC梁に対して静荷重載荷実験を行い、酸化反応熱の熱伝達で現れた表面温度分布変化から内部評価を試みた。

2.1 試験体及び静荷重載荷実験

RC梁試験体を作製したコンクリートの配合は、W/Cが50%である。試験体は、長さ2,800mm、幅300mm、高さ210mmで主鉄筋にはSD295AのD16を3本使用し、せん断補強鉄筋はRC床版を想定して配置していない(図-1参照)。静荷重載荷実験は、走行荷重載荷実験装置を使用して、支間2,000mmの中央に車輪(直径400mm、幅250mm)を停止した状態で行い終局荷重の直前まで載荷した。なお、載荷実験では支間中央に変位計を設置して耐荷挙動を計測し、またコンクリート内部には熱電対を埋め込んで熱伝達を確認するとともに熱画像との比較を行った。

2.2 酸化反応熱の温度管理

酸化反応材は、市販されている使い捨ての防寒用の製品(大きさ:230×180×35mm)を試験体上面に直接敷設した。これらの酸化反応材は鉄粉を主成分としたもので、酸化反応を促進する触媒として塩や活性炭、パーミュライトなどの混合粉で構成されており、温度上昇では60程度、また10時間ほどの持続時間を有する。その温度管理では、気象条件及び酸化反応材からの熱放射によって温度降下が予測されるため、酸化反応材(袋)を2層とし、その上を断熱材で覆うことで防止した。さらに、熱量を有効に利用するため敷設の30分前に反応を開始した。

2.3 赤外線カメラによる測定方法及び条件

赤外線カメラ〔二次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域8.0~14.0 μ m、感度0.15(at30)〕による温度測定は、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10:00より10時間連続して時系列の熱画像を得ることにした(写真-1参照)。測定面は試験体が大きいため、試験体を三等分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である。また、試

験体は測定面以外からの熱の流入を遮断するため、側面に厚さ50mmの発泡スチロールを貼付けた。

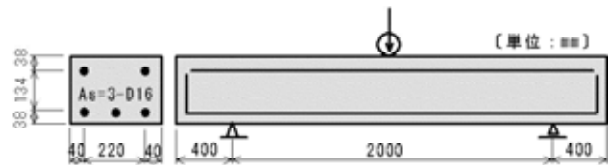


図-1 試験体及び配筋状態

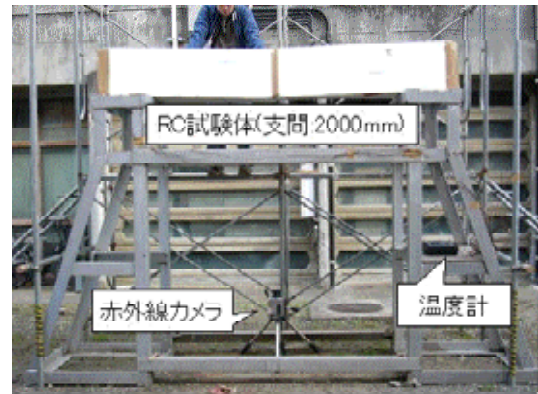


写真-1 測定状況

3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生状況

載荷実験時のコンクリートの圧縮強度は 37 N/mm²であり、試験体中央に設置した変位計の変化点から読み取った各耐力は、ひび割れ発生荷重が約6kN、降伏荷重が約65kNで、その後、75kNで打ち切った。打ち切った理由は、終局荷重まで載荷するとひび割れ幅が大きくなり過ぎ、また圧縮側に層状剥離が起ると熱移動が上面で遮断されてひび割れの進展状況の評価が正確にできなくなるためである。図-2に破壊後のひび割れ進展状況のスケッチ図を、また写真-2には中央部の展開図(底面及び両側面)を示す。なお、写真-2の内の番号は底面のひび割れ位置を、内の数値はひび割れ幅(mm)を示す。

その結果、破壊形態は図-2に示すひび割れ進展状況から集中載荷位置である試験体の中央部を挟んで、曲げ及びせん断力の影響からアーチ状のひび割れが形成されている。除荷後となる敷設開始直前のひび割れ幅は、スケールルーペ(ライト付き)にて測定した結果、側面の鉄筋位

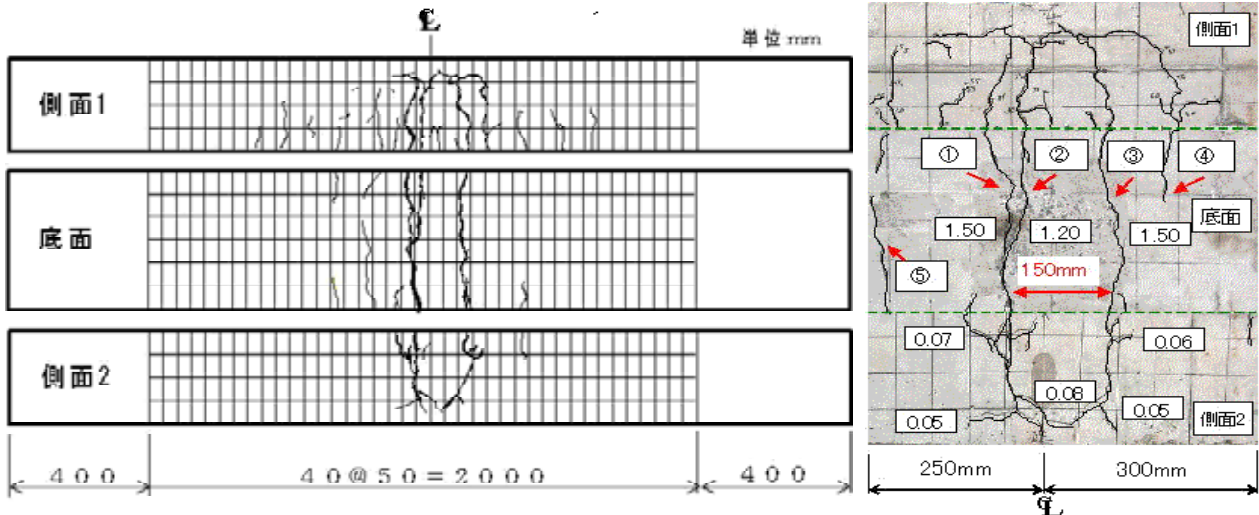


図-2 ひび割れ進展状況のスケッチ

写真-2 ひび割れ展開図

置では両側面ともに0.1mm以下、また底面中央では1.50mmが最大であった(写真-2参照)。

3.2 酸化反応熱で得られた熱画像と温度変化

図-3は熱電対で測定した酸化反応熱から得られたコンクリート上面温度(酸化反応材袋とコンクリート間)及熱電対を埋め込んで測定した各位置(上面からの寸法で表示)の内部温度と外気温、また赤外線カメラでの表面温度の時系列変化である。なお、内部温度の測定位置は試験体の両支点から内側200mmでの平均値(健全部)であり、赤外線カメラでの温度も同位置で得られたものである。測定日の天候は晴後曇りで、測定を開始した10:00(経過時間0分)の外気温(試験体下面の日陰で測定)は9.9℃、測定を終了した20:00は16.0℃であった。図-4には敷設後600分経過後の中央部の熱画像とその熱画像の中央を切断した温度変化を示す。なお、図中の内の番号は底面のひび割れ位置を示し、写真-2に対応している。

その結果、供給された上面からの酸化反応熱は30分前の反応開始によって敷設時には80℃程に達しており断熱材の効果から長時間同温度が保持されている。この熱伝達から得られた表面温度の上昇は、300分経過後で約14℃、600分経過後では約20℃も得られている。図-4の熱画像ではアーチ状に形成された領域で熱移動が遮断

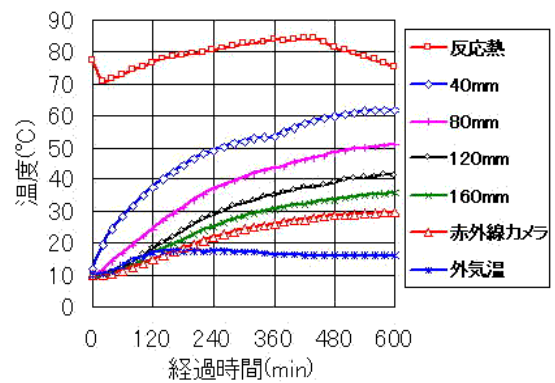


図-3 酸化反応熱と熱伝達温度

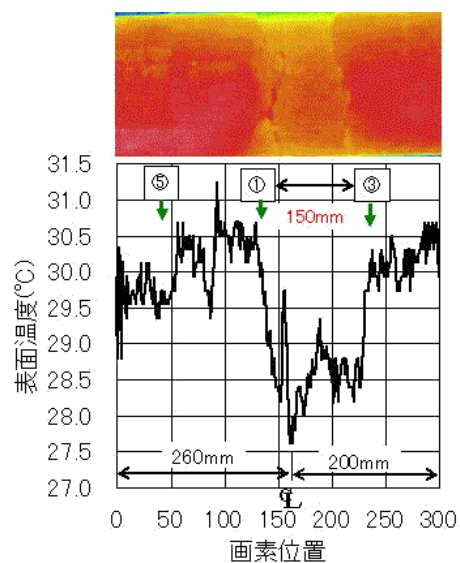


図-4 熱画像と表面温度変化(600分経過後)

され温度が明らかに小さくなっている。その領

域内150mmが示す温度は、健全部29.2より1.6程度低くなっており、ひび割れがアーチ状に形成されていれば、ひび割れの幅0.1mm程度で深さ150mmでも十分検出可能である。

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を使用して、どの程度の熱量が供給されればひび割れが検出可能なのかを酸化反応熱の供給温度を変化させて明らかにした。

4.1 解析モデルと解析設定条件

試験体モデルは、600×600×210mmとし、想定したひび割れは幅が0.2mmの一定で、角度は50°と70°及び35°とした。表-1に解析モデルの一覧を、図-5にはひび割れ角度50°のM1解析モデルの鳥瞰図を示す。なお、解析は対象のため中央を切断した1/2要素モデルとして10節点4面体要素でメッシュ分割した。表-2及び図-6には酸化反応熱の供給パターンを示す。

表-1 ひび割れ解析モデルの一覧

モデル記号	幅(mm)	角度(°)	領域(mm)	高さ(mm)
M1	0.2	50	60	70
			120	140
M2	0.2	70	50	140
		35	200	

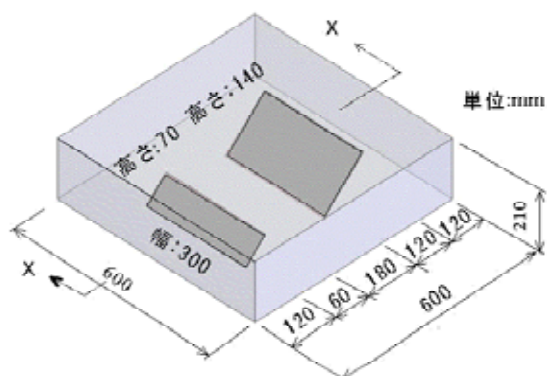


図-5 M1モデル(角度50°)

その供給パターンは、実際に得られた反応熱1を基準にして順に5 毎上昇させた。供給熱は

コンクリート上面に直接供給し、解析初期内部温度は外気温の0分時の値(8.7)を、また熱伝達係数は16.0(W/m²・K)の一定値とした。解析に用いた熱特性³⁾を表-3に示す。ただし、試験体側面は完全断熱境界とし、解析時間間隔は1分、出力は2分間隔で行った。

なお、図-6に示す供給時間を240分間にした理由は、鉄道橋の診断を想定したもので、終電から始発までの時間を利用するためである。

表-2 酸化反応熱の供給パターン

供給パターンと温度(°C)	経過時間(min)			
	0	20	240	300
反応熱1	49.7	75.2	78.9	8.1
反応熱2	54.7	80.2	83.9	8.6
反応熱3	59.7	85.2	88.9	9.1
反応熱4	64.7	90.2	93.9	9.6

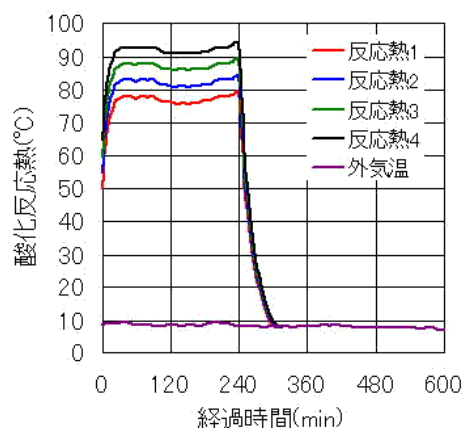


図-6 酸化反応熱の供給パターン

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)]
コンクリート	2,200	0.876	1.400
ひび割れ(空気)	1.161	1.009	0.0256

4.2 数値シミュレーション結果

図-7は、図-6に示す各酸化反応熱の熱伝達から得られた健全部の温度変化である。図-8には、反応熱1の供給熱から得られたひび割れ部と健全部との温度差(低温部温度差)を示す。図に示す低温部温度差は、ひび割れ進展方向のひび割れ境界部で得られた温度と健全部との温度差で

ある(図-9参照)。

その結果、熱伝達開始時間はコンクリート厚さ210mmの場合、約50分経過後から開始され最大上昇温度は300分経過後に得られた。また、低温部温度差の最大も300分経過後に得られており、ひび割れの傾きが大きくなるほど温度差が小さくなっている。図-9及び図-10は、M1モデルとM2モデルの300分経過後の分布画像と健全部との温度差変化である。ひび割れ境界部では急激な温度差変化が現れ、ひび割れ進展方向は健全部よりも低温部として、進展方向と反対側は逆に高温部となって現れている。

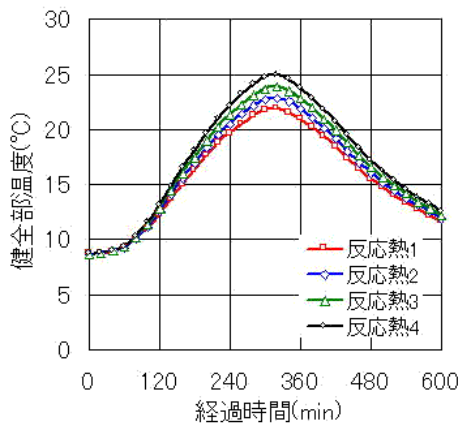


図-7 健全部の温度変化

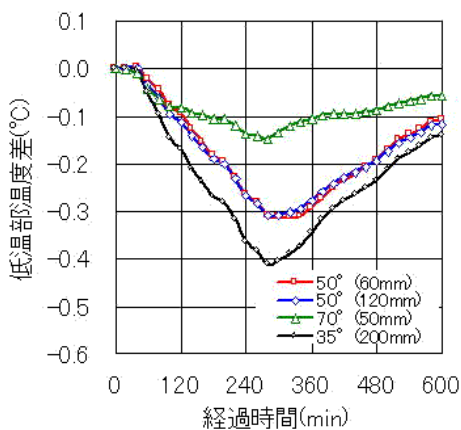


図-8 低温部温度差の変化(酸化反応熱1)

一方、ひび割れ領域(進展部の水平投影寸法)は進展位置に現れる変曲点から評価することができる。ひび割れの領域及び角度と温度差との関係では、図-9から角度が同じであれば領域寸法に関係なく低温部、高温部及びひび割れ進展

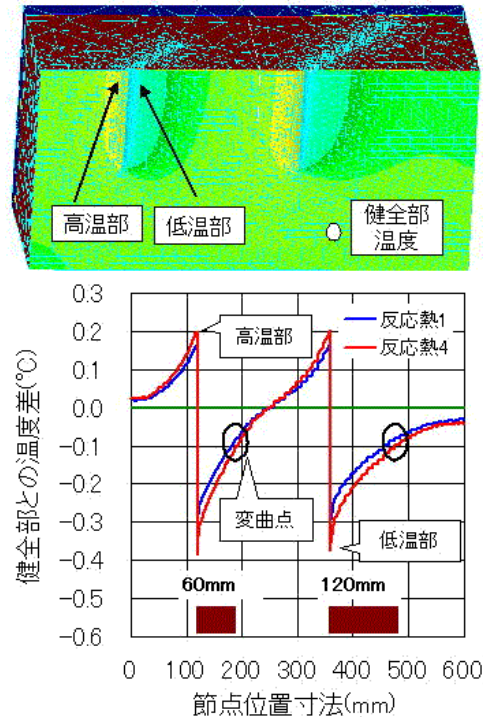


図-9 M1モデルの温度分布変化(300分後)

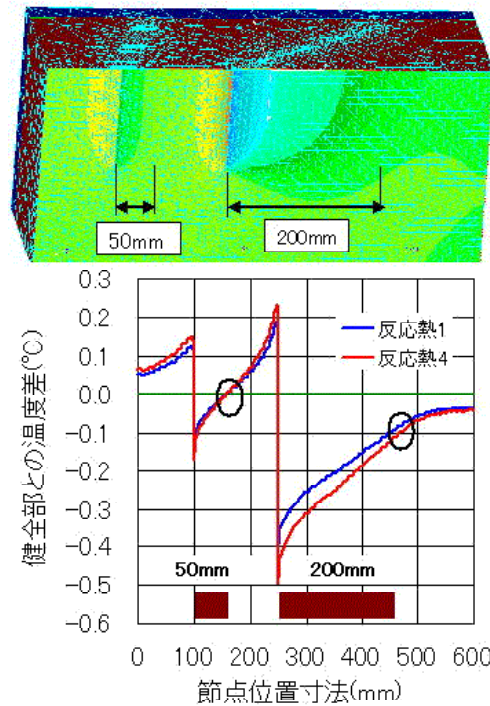


図-10 M2モデルの温度分布変化(300分後)

部の温度差が同じになることが分かる。

表-4及び図-11は、酸化反応熱とひび割れの低温部の温度差との関係である。表中の供給熱平均は図-6に示す各反応熱の敷設後から240分後までの平均値である。表及び図から上昇温度

及び供給熱と低温部温度差との間には比例関係が成立している。両者の関係では、ひび割れの角度が大きくなるほど供給熱量が大きくなっても温度差の増加率は小さい。検出可能な温度差は、赤外線カメラの温度分解能などによって異なるが、 -0.2 を検出可能な温度差と仮定すると、角度 50° では図-11の回帰式から上昇温度が約 8.2 程度必要であり、表-4に示す供給熱平均と上昇温度との関係から供給熱平均として 50 が必要となる。また、検出可能な角度は供給熱平均 75.5 で 63° まで、供給熱平均 90.5 で 69° となる。

表-4 酸化反応熱と低温部温度差

供給パターン	供給熱平均(°C)	上昇温度(°C)	角度(°)/領域(mm)			
			50/60	50/120	70/50	35/200
反応熱1	75.5	12.6	-0.31	-0.30	-0.15	-0.41
反応熱2	80.5	13.6	-0.34	-0.33	-0.16	-0.44
反応熱3	85.5	14.5	-0.36	-0.35	-0.17	-0.47
反応熱4	90.5	15.5	-0.38	-0.38	-0.18	-0.50

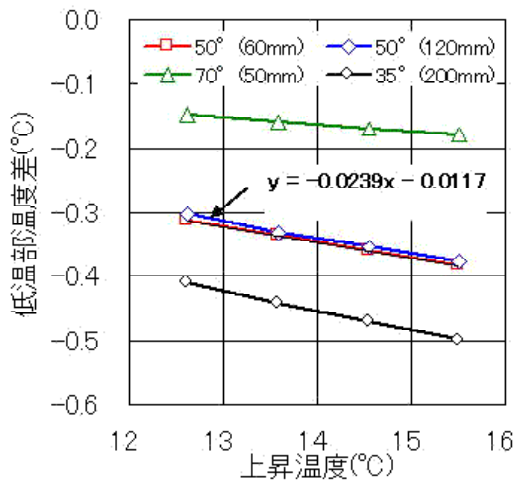


図-11 上昇温度と低温部温度差の関係

このように酸化反応材を利用した熱源は、取り扱いが簡単なこと、加熱部位に密着させて自在に敷設できること、持続時間が長いこと、反応時間を調整できること、また細かい鉄粉を使用することでさらに熱量が増加できることなどから、目視点検で確認された特定面部位の詳細検査として利用できるものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) RC梁の上面から敷設した酸化反応熱では、300分経過後で 14 , 600分経過後で 20 の上昇温度が得られ有効な熱源となりうる。
- (2) アーチ状に発生したひび割れ領域間の健全部との温度差は -1.6 ほど得られており、ひび割れ幅 0.1mm 以下の深さ 150mm が検出可能である。
- (3) シミュレーションで得られたひび割れ部の温度変化の特徴は、境界部では急激な変化が現れ、ひび割れ進展方向は健全部よりも低温部として、進展方向と反対側は逆に高温部となる。
- (4) ひび割れ先端部では、表面温度の推移に変化点が現れ、ひび割れ領域を評価することができる。
- (5) ひび割れ幅及び角度が同じ場合、進展長さ(領域)に関係なく領域内の温度差は等しくなる。
- (6) 供給熱とひび割れ部の温度差との間には比例関係が成立しており、ひび割れの角度が大きくなるほど供給熱量が大きくなっても温度差の増加率は小さくなる。
- (7) 検出可能な温度差を -0.2 に仮定すると、床版厚 210mm の場合、ひび割れ幅 0.2mm 、角度 50° では上昇温度が約 8.2 程度、240分間の供給熱平均として 50 が必要となる。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人 : 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711, V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2) 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
- 3) 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