

赤外線サーモグラフィによる コンクリート構造物の非破壊検査



研究ノート

阪上 隆 英*, 久保 司 郎**

Nondestructive Testing of Concrete Structures by Infrared Thermography

Key Words : Nondestructive Testing, Surface Temperature Distribution, Infrared Thermography, Delamination, Concrete Structure

1. はじめに

赤外線サーモグラフィは、物体表面から放射される赤外線エネルギーを赤外線センサで計測し、その強度分布を温度分布に換算・可視化表示する装置である。近年、赤外線サーモグラフィによる温度分布計測の精度・分解能が向上するとともに、機器の小型・軽量化、低価格化が進んでおり、これを背景に表1に示すように、様々な科学技術分野で赤外線サーモグラフィを応用した研究・開発が進められている。材料中の欠陥・損傷検出のための非破壊検査もその一つであり、建築・土木構造物、航空宇宙構造物から電子部品さらには生体材料に至るまで幅広い材料を対象に適用が検討されている^[1-4]。

トンネルや高架橋におけるコンクリート片剥落事故以来、コンクリート構造物を効率的に検査できる非破壊検査法の重要性が指摘され、赤外線サーモグラフィ法に期待が高まっている。赤外線サーモグラ

フィ法は、(1)検査のための足場設営が不要、(2)短時間に広範囲の検査が可能、(3)欠陥が視覚的に同定できる、(4)光学系の選択により大型構造物にも適用可能、などの特長を有していることから、建築・土木構造物の非破壊検査法として注目を集めている。

表1 赤外線サーモグラフィの応用技術

暗視・物体認識	<ul style="list-style-type: none"> ・軍事・防衛における暗視・目標識別 ・侵入者検知等のセキュリティ ・航空機、船舶、自動車における前方監視 ・災害遭難時の生存者捜索
医学・歯科学	<ul style="list-style-type: none"> ・循環器病・乳がんなど疾病の非侵襲診断 ・血行状態の観察 ・薬物反応の観察 ・外科手術における補助情報の提供 ・歯牙の初期う蝕の検出・う蝕程度の定量化
天文・地球科学	<ul style="list-style-type: none"> ・赤外線天文学 ・地球表面温度の計測 ・火山活動観測 ・生態系の観測
生態学・人文社会科学	<ul style="list-style-type: none"> ・人間や野生動物の行動・動作認識 ・犯罪捜査 ・遺跡調査、文化財調査
保守検査	<ul style="list-style-type: none"> ・電力・配電設備の異常検知 ・工業製品の製造工程における温度管理 ・化学反応塔や配管等の異常発熱検知 ・発電所や工場の排水温度管理 ・回転機器の摩耗あるいは潤滑不良などによる発熱検知 ・ブレーキやタイヤの発熱測定 ・電子回路あるいは電子部品の異常発熱検出
応力測定	<ul style="list-style-type: none"> ・熱弾性効果に基づく赤外線応力測定
非破壊検査	<ul style="list-style-type: none"> ・建築物外壁仕上げモルタル・タイルの浮き・剥離診断 ・コンクリート構造物の剥離検出・計測 ・航空・宇宙構造用複合材料の剥離検出・計測 ・石油タンク等の防食塗膜の劣化診断 ・鋼板等の裏面腐食の検出・定量化

*Takahide SAKAGAMI

1961年1月生

昭和63年 大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻 博士後期課程修了
現在、大阪大学大学院工学研究科・機械システム工学専攻、文部科学教官助教授、工学博士、材料力学・非破壊検査

TEL 06-6879-7305

FAX 06-6879-7305

E-Mail sakagami@mech.eng.osaka-u.ac.jp



**Shiro KUBO

1948年6月生

昭和51年 大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻 博士後期課程修了
現在、大阪大学大学院工学研究科・機械システム工学専攻、文部科学教官教授、工学博士、破壊力学・逆問題

TEL 06-6879-7304

FAX 06-6879-7305

E-Mail kubo@mech.eng.osaka-u.ac.jp



本稿では、赤外線サーモグラフィによる非破壊検査のコンクリート構造物診断について、著者らの研究の一部をご紹介させていただく。

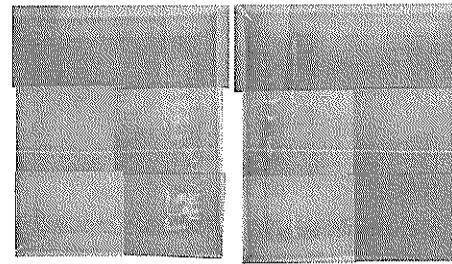
2. 赤外線サーモグラフィ法による検査効率の検証^[3]

昼夜の温度差あるいは日照などにより、構造物には自然に熱流が発生する場合がある。このような時、構造物中に剥離欠陥が存在するとその断熱効果により、構造物表面には局所的な温度変化が現れ剥離欠陥の検出が可能となる。このような手法は、構造物をアクティブ加熱する手法に対して、パッシブ赤外線サーモグラフィ法と呼ばれている。以下では、赤外線サーモグラフィ法が効率的な検査法であることを証明できる実験結果をご紹介する。剥離を有する可能性があるコンクリート高架橋床版2径間に対し、パッシブ赤外線サーモグラフィ法および従来から行われているテストハンマを用いた打音検査法を適用し、両者による検査結果を比較した。

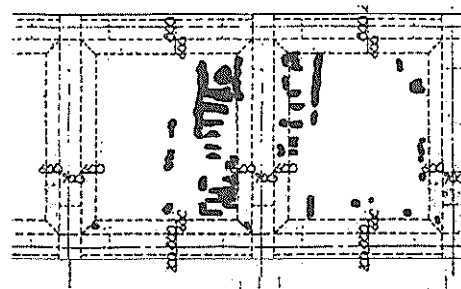
○赤外線サーモグラフィ法 赤外線サーモグラフィおよびテレビモニタを運搬台車に取付け、台車を移動させながら床版下面を順次検査した。赤外線サーモグラフィとしては、小型、軽量、安価な非冷却マイクロボロメータ赤外線センサを搭載した機種を用いた。検査員としては、赤外線サーモグラフィ法による検査経験1年の2名の土木技術者を選んだ。2名の検査員が赤外線映像を撮影しながら、テレビモニタに現れた赤外線画像を評価し、剥離がある可能性があると判断した箇所を工事図面に記入した。

○打音検査 打音検査は、高架橋保有会社が平素行っている保守検査法に従って行われた。高所作業車のゴンドラに2名の検査員が乗り、ゴンドラを移動させながらテストハンマにより床版下面の打音検査を行った。打音により剥離が検出された箇所には、検査員がチョークで印をつけ、さらに剥落の危険性のある箇所については、ハンマによるたたき落しを行った。打音検査の終了後、マーキングおよびたたき落しが施された箇所を、地上の検査員が工事図面に記入した。

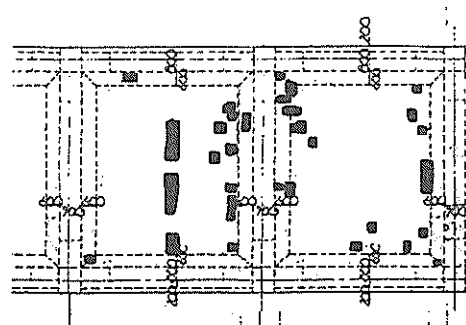
○検査結果 赤外線サーモグラフィにより計測された床版下面の赤外線画像を合成した、床版下面全域の赤外線画像を図1(a)に示す。赤外線画像において白く見える部分は高温部であり、剥離および補修のための充填材料の存在により温度が局所的に異なる領域を表している。赤外線画像をもとに検査



(a) 赤外線画像



(b) 赤外線サーモグラフィで検出された剥離



(c) 打音検査で検出された剥離

図1 パッシブ赤外線サーモグラフィ法および打音検査法によるコンクリート構造物の剥離検出結果の比較

員が剥離と判断した箇所を図1(b)に示す。さらに、打音検査により発見された剥離箇所を図1(c)に示す。図1(b)および図1(c)を比較すると、両手法による剥離検出結果は、良く一致していることがわかる。今回の検査に要した時間は、赤外線サーモグラフィ法が約30分、打音検査法が約120分であった。赤外線サーモグラフィ法による検査あるいは同手法の打音検査との併用により、検査所要時間を大幅に短縮できることが明らかになった。

3. アクティブ赤外線サーモグラフィ法による実構造物の剥離計測^[5]

トンネル等においては、上述のパッシブ赤外線サー

モグラフィ法が適用できないため、アクティブな熱負荷方法を検討する必要がある。著者らは、これまでに人工剥離欠陥を埋め込んだコンクリート供試体に対して、アクティブ加熱および冷却を行った際の供試体表面温度を計測し、剥離が存在する部分に生じる局所的な温度変化をもとに、剥離欠陥の検出・計測が可能であることを示してきた。ここでは、アクティブ赤外線サーモグラフィ法の実構造物への適用性を検討するため、コンクリート高架橋床版の下面に実際に発生した剥離を計測した結果を示す。

コンクリート床版下面に対し、石油ヒータによるアクティブ加熱および水噴霧時の気化熱によるアクティブ冷却を行った。加熱時間は10分間とし、冷却については水噴霧後15分経過した時に再び水噴霧を行った。石油ヒータにより10分間加熱した直後に得られた赤外線画像を図2(a)に、2回目の水噴霧による冷却から8分経過時の赤外線画像を図2(b)にそれぞれ示す。加熱画像においては、顕著な局所的高温領域、冷却画像においては顕著な局所的低温領域が検出され、その位置・形状は打音検査および検査終了後の破壊試験により得られた剥離の位置・形状と一致し、アクティブ赤外線サーモグラフィ法による剥離診断の有用性が確認できた。また、破壊試験から、剥離は中央部深さ約3cmに存在する鉄筋付近を起点とし、そこから周辺部に向かって成長し部分的に表面に到達しているものであることがわかった。

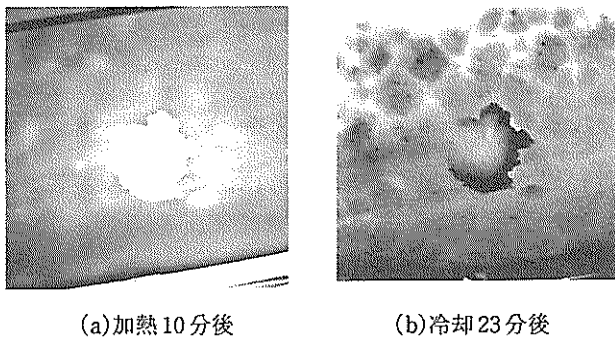


図2 アクティブ赤外線サーモグラフィ法による実構造物中の剥離検出結果

4. ロックインサーモグラフィ法による剥離計測^[6]

○ロックイン赤外線サーモグラフィ法 ロックインサーモグラフィ法^[7,8]は、試験体表面に現れる時間変動する温度場を、変動に関する参照信号に同期させて高精度に計測し、これをもとに欠陥検出を

行う非破壊試験法である。ロックイン計測のための参照信号には正弦波を用い、正弦値が正の時ヒータが点灯する加熱過程、負の時ヒータが消灯する冷却過程になるようにした。マイクロボロメータ赤外線カメラにより毎秒60フレームでデジタル計測された試験体表面温度に関するデータを、パーソナルコンピュータに取り込み、参照信号によりロックイン処理した。加熱装置として用いた石油ヒータから放射される赤外線には、赤外線カメラの計測波長領域の赤外線が含まれるため、加熱過程の計測データは、加熱装置から放射される赤外線の試験体表面での反射の影響を受ける。そこで、本実験では、冷却過程半周期分の赤外線計測データのみを有効データとしてロックイン数値処理を行う、半サイクルロックイン計測アルゴリズムを用いた。

○計測方法 まず、人工剥離欠陥を有するコンクリート試験体を計測対象として、加熱周期 T を10分から60分まで5分きざみに設定し、試験体表面の温度変動をロックイン計測することにより、剥離深さと位相遅れの関係を調べた。剥離部における位相遅れの平均値を P_d 、試験体全表面の位相遅れの平均値を P_m として、位相差 ΔP ($\Delta P = P_d - P_m$)を計算した。種々の欠陥深さおよび加熱周期に対して得られた位相差 ΔP を図3に示す。図より、 ΔP は、加熱周期に依存していることがわかる。加熱周期が大きくなるにつれて ΔP は大きくなり、ある加熱周期でピークを取った後減少しさらに負の値をとる。

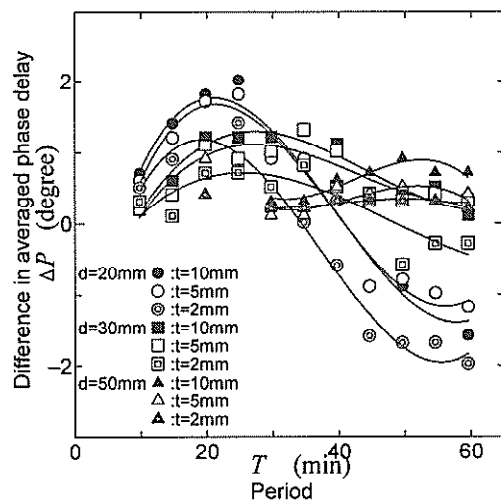


図3 ロックインサーモグラフィ法によるコンクリート構造物の剥離検出結果(人工剥離欠陥供試体に対して得られた位相差 ΔP と加熱周期 T の関係)

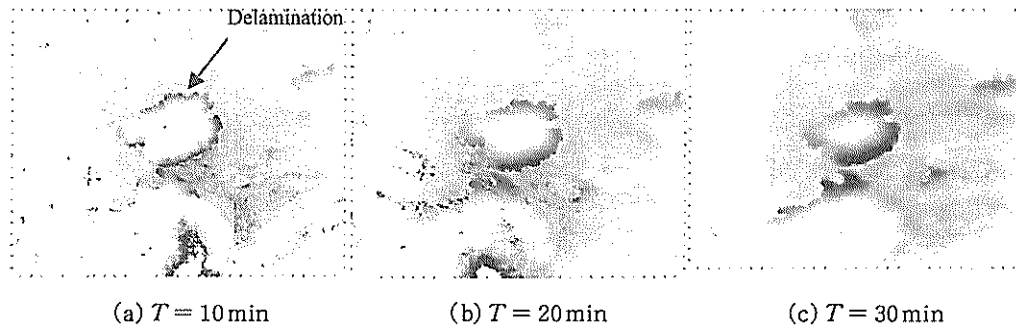


図4 ロックインサーモグラフィ法によるコンクリート構造物の剥離検出結果
(加熱周期 T の違いによる位相差画像の変化)

また、 ΔP がピークを取る加熱周期は欠陥が深い程長くなる。このことは、ある深さの剥離欠陥検出を行う場合における最適加熱周期の存在を示すとともに、加熱周期を変化させながら ΔP の計測を行うことにより、欠陥深さを定量的に推定できる可能性を示している。そこで、人工剥離欠陥に対して得られたこの関係をマスターカーブとして、実構造物の剥離欠陥の深さ推定に用いた。

○計測結果 ロックインサーモグラフィ法の実構造物への適用性を検討するため、ボックスカルバート床版下面に実際に発生した剥離を計測した。加熱周期 T を10分、20分および30分とした場合に得られた位相遅れ分布画像を図4に示す。 $T=10$ 分とした場合には、剥離部分における ΔP は、剥離の輪郭部で負値を、中心部で正值をとっていることがわかる。また、 T を20分、30分と長くするに従って、剥離の輪郭部で ΔP が負値をとる領域は内部へと拡大している。図3で得られた加熱周期と ΔP の関係を参考に、剥離深さを大まかに推定すると、剥離輪郭部で0~1cm、剥離の中心付近では2~3cmとなった。この推定結果は、計測終了後に剥離片を取り除くことにより、剥離深さを実測した結果とよく一致しており、ロックインサーモグラフィ法による剥離深さ計測の実現可能性が示された。

文 献

- [1] 阪上隆英, 小倉敬二: 赤外線画像による材料内部欠陥の検出, 精密工学会誌, 61巻, 5号, 1995, pp.630-635.
- [2] 阪上隆英, 久保司郎: 赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査技術の最近の話題, 非破壊検査, 48巻11号, 1999, pp.653-660.
- [3] 阪上隆英, 久保司郎: 赤外線サーモグラフィによる非破壊評価に関する最近の話題, 非破壊検査, 51巻6号, 2002, 印刷中.
- [4] Takahide Sakagami, Shiro Kubo: Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative non-destructive evaluations, Infrared Physics and Technology, Vol.43, Nos.3-5, 2002, pp.211-218.
- [5] 阪上隆英, 久保司郎, 原文人, 番匠谷隆: アクティブ熱負荷赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, 実験力学, Vol.1, No.1, 2001-4, pp.34-38.
- [6] Takahide Sakagami, Shiro Kubo: Development of a new nondestructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography, Infrared Physics and Technology, Vol.43, Nos.3-5, 2002, pp.311-316.
- [7] Takahide Sakagami, Shiro Kubo: Development of a new crack identification technique based on near tip singular electrothermal field measured by lock-in infrared thermography, JSME International Journal, Series A, Vol.44, No.4, 2001, pp.528-534.
- [8] Takahide Sakagami, Shiro Kubo, Yasuhiro Teshima: Fatigue crack identification using near-tip singular temperature field measured by lock-in thermography, SPIE Proceedings Series Volume 4020, 2000, pp.174-181.