

論文 赤外線サーモグラフィーによる鋼板巻立てコンクリート橋脚の 空隙検査に関する研究

上田 信二^{*1}・福島 浩一^{*2}・鳥居 和之^{*3}・松田 康孝^{*4}

要旨：既存コンクリート橋脚の耐震補強としては、鋼板とコンクリートの隙間をエポキシ樹脂などで充填し、両者間の一体化を図る鋼板巻立て工法などがある。本研究では、本工法における充填材の充填度及び空隙の検出が可能かどうかを疑似空隙を設けたモデル試験体を用いて、赤外線サーモグラフィーにより調べた。その結果、画像処理を行うことによって各種充填材の充填度を確認することができた。また、鋼板表面を液体窒素により強制的に冷却することによって、空隙などの欠陥部を推定することができた。

キーワード：赤外線サーモグラフィー、鋼板巻立て工法、非破壊検査、欠陥部探査

1. はじめに

阪神大震災以後、鋼板巻立て工法が既存コンクリート橋脚の耐震補強に採用されている。本工法では、鋼板とコンクリートとの隙間をエポキシ樹脂または無収縮モルタルにて充填し、両者間の一体化を図っている。しかし、両者の隙間は狭く、また既存橋脚のコンクリート表面の平坦性も影響し、エポキシ樹脂等で完全に隙間を充填することは非常に困難である。

現在、充填度はハンマー等による叩き音及び注入孔からの充填材の噴き出しなどにより確認しているので、完全に充填度を把握することはできない。エポキシ樹脂等の充填度は、補強された橋脚の耐荷力及び耐久性に影響を及ぼすことが予想される。このような現状から、樹脂等の充填度をリアルタイムに検査できる手法の確立が望まれている。

本研究では、鋼板巻立て工法における樹脂等の充填度の検査システムを確立することを目的とし、赤外線サーモグラフィーを用いてモデル試験体における各種充填材料の充填状況及び空隙などの欠陥部を調べた。

2. 実験概要

2. 1 モデル試験体の概要

本研究に用いたモデル試験体を図-1に示す。建設省道路局復旧仕様[1]に従って、鋼板厚を6mm及び9mm、鋼板とコンクリート版との隙間を4mmとした。また、コンクリート版（500×700×100mm）

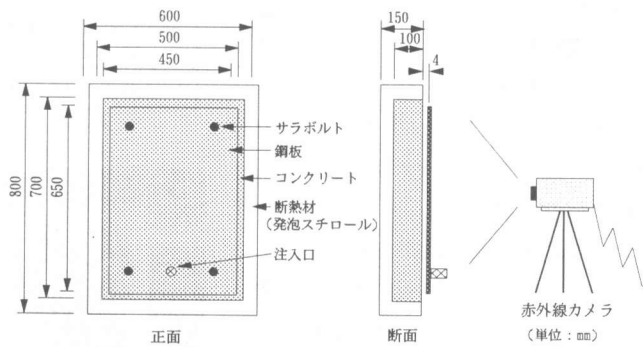


図-1 モデル試験体の概要

- * 1 真柄建設（株） 技術研究所主任研究員、（正会員）
- * 2 東亜合成（株） 技術研究所主任研究員
- * 3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科、工博（正会員）
- * 4 金沢大学大学院 工学部土木建設工学科、（正会員）

は、赤外線カメラによる撮影を行う面以外には、すべて発泡スチロール板を貼り付け、外部からの温度の影響を遮断した。

2. 2 充填材料の種類

充填材料は、表－1 に示すエポキシ樹脂夏用（略号；EPO(S)）、エポキシ樹脂冬用（略号；EPO(W)）、アクリル樹脂（略号；AAR）、ポリマーセメントモルタル（略号；PCM）の4種類である。

表－1 各種充填材料の諸性質

充填材料名	主 成 分		粘 度 ^{*2}	硬化時間
	主材（ベース）	硬化材（フィラー）		
EPO ^{*1}	エポキシ樹脂	変性ポリアミン	2000cps以下	8時間(20℃)
AAR	変性アクリル	変性イソシアネート	1600cps以下	12時間(20℃)
PCM	アクリルエマルジョン	水硬性無機粉体	500cps以下	24時間(20℃)

*1:エポキシ樹脂夏用・冬用はそれぞれ主剤と硬化剤の配合が相違

*2:20℃、B型粘度計にて測定

2. 3 実験方法

(1) 充填度の確認実験

モデル試験体の下端に設けた注入口より小型ポンプを用いて各種充填材料を注入した。注入に要する時間は10～15分間で、注入中及び注入後に鋼板表面を赤外線カメラ（表－2 参照）を用いて約1分間隔で撮影した。撮影した熱画像は、映像装置に内蔵されている記録装置にてフロッピーディスクに記録し、実験終了後、コンピュータにより熱画像の解析を行った。また、鋼板の表面と裏面、及びコンクリート表面に熱電対を設置し、データローガより各位置の温度を記録した。

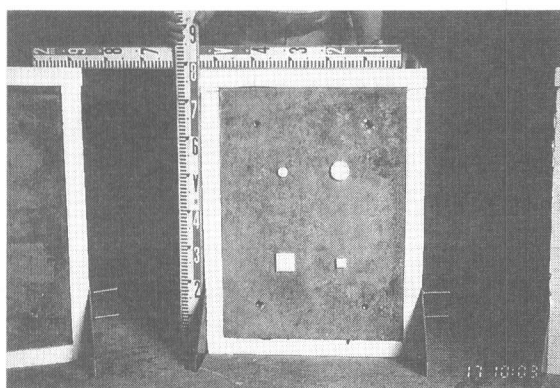
(2) 疑似空隙部の検出実験

空隙の影響による鋼板表面の温度差を明確にするために、モデル試験体表面を強制的に冷却し、その鋼板表面を赤外線カメラにより撮影する手法[2]を用いて実験を行った。

実験に用いたモデル試験体は、充填度の確認実験で注入終了した試験体を恒温実験室で3カ月放置したものであ

表－2 赤外線カメラの仕様

測定温度範囲	-10 ～ 120℃
撮 影 距 離	30cm 以上
検 出 波 長	3 ～ 5.4 μm
赤 外 検 出 器	電子冷却型スワイトセンサ 単素子
最小検出温度差	0.2℃ 黒体温度30℃にて
測定温度精度	レンジフルスケールの±2%
瞬 時 視 野 角	3mrad
測 定 視 野 角	水平 18 ～ 20°
	垂直 13.5 ～ 15°
走 査 線 数	120本
表示画素数(縦×横)	200 × 256



写真－1 疑似空隙の設置状況写真

る。疑似空隙は、写真－１に示すように、モデル試験体の製作時に発泡スチロール片（□：一片5.0cmと2.5cm、○：直径5.0cmと2.5cmの計4箇所）を鋼板とコンクリートの隙間に設置した。

鋼板の冷却には液体窒素を用いた。本実験では、厚さ10mm、幅450mm、長さ200mmの合板にタオルを巻き付け、このタオルに十分に液体窒素を染み込ませ、鋼板表面に接触圧が均等になるように押しあて、10秒～30秒間冷却を行った。冷却後、鋼板表面を赤外線カメラを用いて10秒間隔で撮影した。

3. 結果および考察

3. 1 充填度の確認実験について

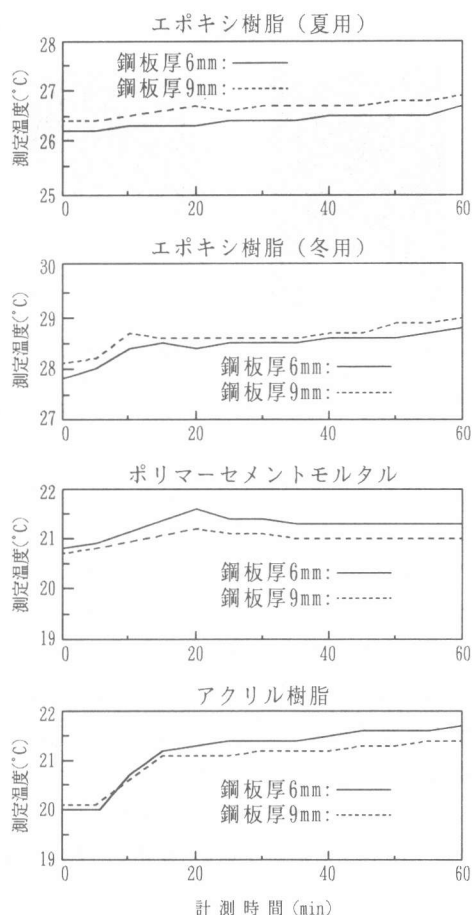
（１）原画像による充填度の確認

アクリル樹脂は、鋼板厚に関係なく充填度の確認が可能であった。しかし、エポキシ樹脂（冬用）及びポリマーセメントモルタルは鋼板厚がいずれの場合も確認不可能であった。ここで、各充填材注入時の熱電対による鋼板表面中央部の計測結果を図－２に、熱伝導率を表－３に示す。本実験実施前の各充填材の発熱特性試験において、アクリル樹脂は最も反応速度が速いという結果を得ている。また、図－２から分かるように、アクリル樹脂は、注入開始から約15分程度までの間、温度が急激に上昇している。従って、アクリル樹脂の速い初期反応と鋼板の高い熱伝導率に起因して、充填度の確認を可能にしていると推測される。

（２）画像処理による確認精度の向上

画像処理手法としては二値画像表示方法を用いた。本手法は、充填材料の注入を行う前の画像（初期画像）と注入開始後の画像との間で差分処理を行い、両者の温度変化量にしきい値を設定する方法である[3]。

原画像及び二値画像における充填度確認の結果を表－４に示す。アクリル樹脂は、鋼板厚に関係なく充填度の確認が可能であったが、エポキシ樹脂（冬用）及びポリマーセメントモルタルは、鋼板厚が6mmの場合の二値画像のみ充填度の確認が可能であった。また、エポキシ樹脂（夏用）はいずれの場合も充填度の確認は不可能であった。写真－２（a）～（d）は、充填材料としてアクリル樹脂を用いた試験体（鋼板厚：6mm）の注入開始から、3分後、6分後、9分後、



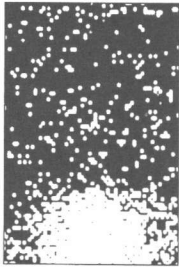
図－２ 熱電対による鋼板表面中央部の計測結果

表－３ 使用材料の熱伝導率

材 料 名	熱伝導率(kcal/mh [°] C)
コンクリート	0.86
鉄 板	71.8
発泡スチロール	0.01程度
エポキシ系樹脂	0.10
ポリマーセメントモルタル	1.10
アクリル系樹脂	0.01 ～ 0.05

12分後の二値画像を表示したものである。これらの写真より、しきい値 0.6°C の条件で二値画像処理を行うとアクリル樹脂は、時系列的に温度変化部分が抽出できるため、十分な精度で隙間への充填状況を確認することができる。

各種試験体の初期画像と注入開始15分後（充填完了）の画像との間で差分処理を行い、その画像の鋼板表面の画素温度ヒストグラムを求めた。この画素温度ヒストグラムより得られた温



(a)注入開始より
3分後



(a)注入開始より
6分後



(a)注入開始より
9分後



(a)注入開始より
12分後

写真－2 充填材料としてアクリル樹脂を使用した試験体の充填状況（鋼板厚：6mm）

度上昇値を表－5に示す。この表より、鋼板表面の温度変化が大きくなる充填材料ほど、赤外線サーモグラフィーによる充填状況の確認が可能となることが分かる。すなわち、 1°C 以上の温度変化を示す場合（アクリル樹脂）は、鋼板の厚みに関係なく、原画像及び二値画像ともに充填度の確認が可能となる。また、温度変化が $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ の場合〔エポキシ樹脂（冬用）・ポリマーセメントモルタル〕は、二値画像のみ充填度の確認が可能となり、温度変化が 0.5°C 以下〔エポキシ樹脂（夏用）〕では、原画像及び二値画像ともに充填度の確認は不可能となる。

3. 2 疑似空隙部の検出実験について

(1) 差分処理画像による疑似空隙の検出

各種モデル試験体についての冷却前と冷却後（10～240秒：10秒間隔）の画像をそれぞれ差分処理した。なお、撮影範囲は図－3に示すように鋼板面を上下に分けて撮影した。

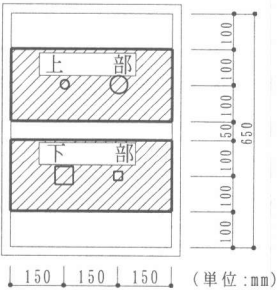
空隙の影響による鋼板表面の温度差は、各種充填材や鋼板厚に関係なく、冷却後から90秒前後経過した時点が最大となった。そこで、差分処理は、初期画像と90秒後の画像で行っ

表－4 赤外線カメラの原画及び二値画像における充填度検査の難易度

充填材料名	原画像		二値画像	
	鋼板厚		鋼板厚	
	6mm	9mm	6mm	9mm
E P O（S）	×	×	×	×
E P O（W）	×	×	○	×
A A R	○	○	○	○
P C M	×	×	○	×

表－5 鋼板表面の温度上昇値

充填材料名	鋼 板 厚	
	6mm	9mm
E P O（S）	0.46	0.20
E P O（W）	0.80	0.45
A A R	1.30	1.35
P C M	0.50	0.25

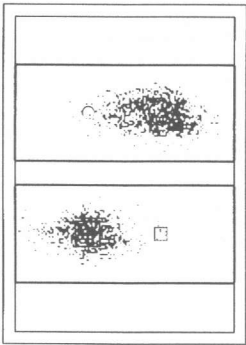


図－3 撮影範囲

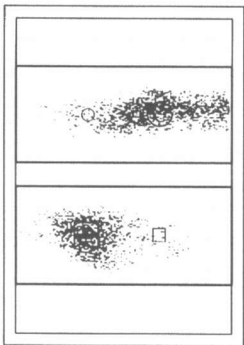
た。また、しきい値を、画像上の最高温度から1度引いた値（視覚的に見やすい）とし、二値画像表示した。

疑似空隙の検出が可能となったものは、エポキシ樹脂（夏・冬用）及びポリマーセメントモルタルの鋼板厚が6mmの場合である。しかし、アクリル樹脂は鋼板厚がいずれの場合も検出は不可能であった。表－3から分かるように、アクリル樹脂と発砲スチロールの熱伝導率は、ほぼ同程度ということから、空隙が検出できなかったと考えられる。

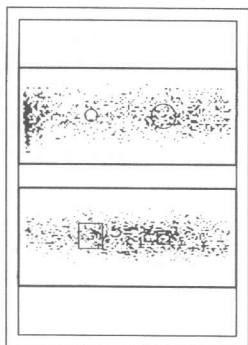
疑似空隙の検出が可能であったエポキシ樹脂（夏用）を写真－3、ポリマーセメントモルタルを写真－4に表示する。また、検出が不可能であったアクリル樹脂を写真－5に示す。エポキシ樹脂（夏用）の画像では、一片5.0cmの疑似空隙を確認することができるが、一片2.5cmの疑似空隙の確認は不可能であった。これは、鋼板の熱伝導率が大きいため、一片2.5cmの疑似空隙部の鋼板表面の温度分布が短時間に均一化したものと考えられる。



写真－3 エポキシ樹脂(夏用)



写真－4 ポリマーセメントモルタル
(鋼板厚：6mm)



写真－5 アクリル樹脂

(2) 画像処理による疑似空隙部の検出

画像処理手法としては充填度の確認実験と同様に二値画像表示方法[3]を用いた。ここでは、冷却前の画像と冷却後（90秒後）の画像を差分処理し、冷却面の画像の画素温度のヒストグラムから、平均値と標準偏差を求め、しきい値を設定し、二値化表示した。しきい値は、式(1)を用いて設定した。また、画素温度のヒストグラムは正規分布に従うものとする。

$$T_{\text{threshold}} = T_{\text{mean}} - t\sigma \tag{1}$$

ここに、 $T_{\text{threshold}}$ ：しきい値 t ：信頼確率に関する係数
 T_{mean} ：平均値 σ ：標準偏差

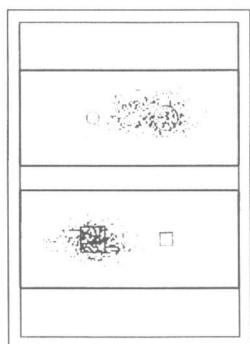
信頼確率に関する係数を1.645（信頼確率：95％）と設定した場合の画像処理解析結果を表－6に示す。本手法を用いても、2.5cmの疑似空隙はいずれも検出することはできなかった。信頼確率に関する係数を1.645と設定した場合のエポキシ樹脂（夏用）、ポリマーセメントモルタル及びアクリル樹脂の二値画像を写真－6～8に示す。

表－6 結果一覧表

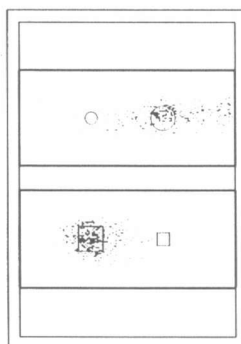
充填材料名	鋼 板 厚			
	6mm		9mm	
	上段	下段	上段	下段
EPO(S)	○	○	○	○
EPO(W)	○	○	○	○
AAR	×	×	×	×
PCM	○	○	○	○

表－6より、疑似空隙の検出が不可能であった鋼板厚が9mmのエポキシ樹脂（夏・冬用）及びポリマーセメントモルタルにおいて、しきい値を設け二値化表示することによって、空隙の検出を可能にすることができた。写真から分かるように本手法を用いることによって、より空隙部が、判定しやすくなった。また、差分画像で用いたしきい値（画像上の最高温度－1度）は、本手法において $t=1$ に相当する。従って、空隙の判定可能な信頼確率に関する係数は、 $1\sim1.645$ となる。このことは、相良らの試験結果[3]とよく一致するものである。

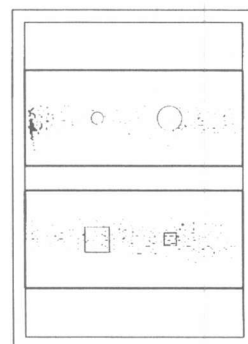
しかし、これらの実験はモデル試験体の結果であり、今後、環境条件や冷却方法に大きく左右される実構造物についての検討が必要であると考ええる。



写真－6 エポキシ樹脂（夏用）



写真－7 ポリマーセメントモルタル



写真－8 アクリル樹脂

（鋼板厚：6mm、信頼確率に関する係数： $t=1.645$ ）

4. まとめ

本実験条件の範囲内において、赤外線サーモグラフィ法の鋼板巻立て工法への適用性を検討した結果を以下にまとめる。

- （1）充填度確認の適用性は、充填材料の種類によって相違し、エポキシ樹脂（夏用）＜エポキシ樹脂（冬用）、ポリマーセメントモルタル＜アクリル樹脂の順番で評価が可能となった。
- （2）空隙などの欠陥部は、鋼板表面を液体窒素で強制的に冷却することで、赤外線サーモグラフィにより検出することできた。
- （3）しきい値を設け、二値化表示することによって、充填度や空隙部の検出が可能となった。

〔謝辞〕

本研究は、（財）北陸産業活性化センターの研究助成金を受けて実施したものであり、センターの関係者に深く感謝致します。また、実験に御協力頂いた真柄建設（株）の竹内勝信氏及び東亜合成（株）の森泰彦氏に感謝致します。

〔参考文献〕

- [1]建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様、1995.2
- [2]黒坂基，長滝重義，鎌田敏郎，矢崎剛吉：サーモグラフィ法による外殻鋼管コンクリートにおける鋼・コンクリート間の剥離評価、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集5、pp.1202-1203、1996
- [3]相良健一，魚本健人：炭素繊維シートで補修・補強されたRC構造物の欠陥の検知について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.1203-1208、1996