

論文 赤外線サーモグラフィ法による連続繊維シートの欠陥探査

小林 香木*¹・尼崎 省二*²

要旨: 本研究では、赤外線サーモグラフィ法により連続繊維シート補強の欠陥探査を行い、撮像距離、欠陥寸法、日射の有無、連続繊維シートの種類および層数が探査におよぼす影響を検討した。採用した欠陥はシートとコンクリート界面、シート界面およびシート内部である。その結果、シートとコンクリート界面の欠陥では熱画像により探査される欠陥部寸法は実際の欠陥寸法と異なって探査されることおよびシート界面とシート内部の両欠陥は探査可能であるが、欠陥がいずれの層に存在しても、健全部と欠陥部の温度差に大きな差が生じないことが判明した。

キーワード: 赤外線サーモグラフィ法、連続繊維シート、剥離、撮像距離

1. はじめに

コンクリート構造物の補強工法として、連続繊維シート接着工法がある。しかし、構造物への繰返し荷重の作用による劣化や施工不良などにより連続繊維シート（以下、シート）と構造物の界面もしくはシート界面が剥離する場合やシート内部に樹脂が含浸していない場合がある。それらは構造物の補強効果を低減する。そのためこれらの欠陥を探査する必要がある。

欠陥は熱的特性が健全部と異なるため、シート表面に熱的变化が生じると、欠陥位置のシート表面（欠陥部）と周囲の健全なシート表面（健全部）に温度差が生じる。この温度分布を赤外線カメラにより撮像することで、シート補強の欠陥探査が可能であると考えられる。

シート補強の欠陥としてシートとコンクリート界面の剥離をモデル化し、また、撮像距離一定の条件で、シートの種類および層数が探査におよぼす影響の検討が行われている¹⁾²⁾³⁾。しかし、シート補強の欠陥としてはシート界面およびシート内部で生じる場合も多く見られる。また、実構造物は近距離からの撮像が困難な場合も考えられる。

目付量の少ないシートを積層する場合に比べ、1層貼付で所定の強度が得られ、かつ施工を容易にするため、目付量 600g/m² 程度のシートが開発されつつある。しかしシートは高密度になるため、貼付時に樹脂がシート内部に十分含浸しない場合も考えられる。

そこで本研究では、シート補強の欠陥をシート・コンクリート界面、シート界面およびシート内部に作製し、シートの種類、積層数、欠陥寸法および日射の有無が欠陥探査の精度におよぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は寸法 B250×H400×W400mm とした。欠陥は図-1 に示すように、シート・コンクリート界面、シート界面およびシート内部に作製し

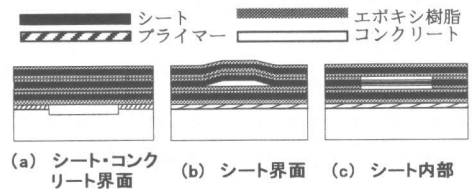


図-1 連続繊維シートの欠陥

*1 和歌山県 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

た。使用したシートは炭素繊維製 (CFRP) およびアラミド繊維製 (AFRP) である。シートが目付量および厚さを表-1 に示す。なお、シート界面およびシート内部の欠陥供試体に貼付したシートはCFRPおよびAFRPともに目付量 200g/m^2 のみとした。また、シートの貼付にはエポキシ樹脂を用いた。シートの貼付方法を図-2 に示す。なお、シートの継目は、シート厚さを一定にするため継ぎ重ねをしていない。

シート・コンクリート界面の欠陥は、型枠内側に欠陥と同寸法の鋼板を貼り付けて打設し、図-3 に示す位置に窪みを設けたコンクリート表面にシートを貼付し、モデル化した。欠陥寸法は直径10, 30, 50および100mmとし、厚さを4.5mmとした。シートの積層数は目付量 600g/m^2 以上のシートでは1層、それ以外は1, 3および5層とした。また、目付量 600g/m^2 以上のシートでは、コンクリート窪み位置のシートに樹脂が含浸している供試体と含浸していない供試体の2種類作製した。

シート界面の欠陥は、あらかじめ外径30mm、厚さ1mmのワッシャーを用いて図-1(b)に示す形状に樹脂で硬化させたシートを貼付することにより作製した。シート積層数は3および5層とし、各シート界面に欠陥を作製している。なお、ワッシャーおよび円筒管はシートを供試体に貼付する前に取り除いている。

シート内部欠陥は、所定の位置に樹脂を塗布せずシートを貼付することにより作製した。さらにシートを積層する場合は、未含浸部分以外に樹脂を塗布してシートを貼付し、シートの上から一様に樹脂を塗布した。

2.2 撮像方法

撮像は、外気温が 20°C 程度の高温時と 10°C 程度以下の低温時に行った。高温時に用いた供試体はシート・コンクリート界面供試体のみとし、低温時には全供試体を用いた。撮像は、日射後遮蔽過程と日陰の両者で行った。両撮像とも供試体の撮像面を除く周囲を厚さ3cmの発泡スチロールで覆い断熱した。

表-1 シート目付量および厚さ

シート種類	CFRP シート			AFRP シート		
目付量 (g/m^2)	200	300	600	200	415	623
シート厚さ* (mm)	0.111	0.167	0.35**	0.138	0.286	0.430

*: CFRP では炭素繊維の実断面積から設定した値
AFRP では目付を比重で割った値

** : 測定値

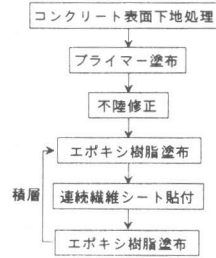


図-2 シート貼付手順

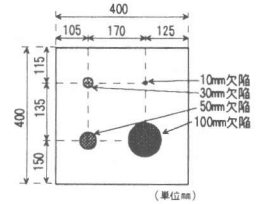


図-3 シートとコンクリート界面欠陥の配置

表-2 赤外線カメラの仕様

赤外線検知器	HgCdTe 液体窒素冷却型
応答波長	8.0~13.0 μm
温度分解能	30°C で 0.05°C
瞬時視野	1.25mrad
焦点範囲	カメラ部前部 20cm 以上

日射後遮蔽過程では、撮像面を発泡スチロールで覆い、日射遮蔽した供試体を撮像面に太陽光の当たる位置に移動し、撮像面の発泡スチロールを取り除いた直後の画像を初期画像とした。その後10秒間隔で3分間撮像し、直ちに日射を遮り、10秒間隔で2分間、30秒間隔で5分間、1分間隔で5分間の計15分間行った。

日陰撮像では、供試体を日射のない場所に一日置き、供試体温度を屋外の温度変動に慣らせた後、11時から15時の間²⁾に撮像を行った。

撮像に用いた赤外線カメラの仕様を表-2 に示す。撮像距離 L は、シート界面およびシート内部の欠陥供試体の場合に供試体表面全体が撮像できるように3mとし、シートとコンクリート界面の欠陥供試体では10あるいは30mm欠陥を対象に、赤外線カメラの最小検知寸法 L_{\min} および撮像条件を考慮して決定した。 L_{\min} は式(1)より算出した。

$$L_{\min} = 2L \tan(\theta/2) \quad (1)$$

ここで、 θ は瞬時視野(rad)である。

3 実験結果および考察

3.1 日射後遮蔽過程撮像

CFRP,目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ のシートを 1 および 5 層貼付した供試体の撮像開始から 3 分後の熱画像を図-4 に示す。両画像とも熱画像上に高温部が現れ、欠陥位置およびその形状が確認できるため欠陥探査は可能であった。本実験では、健全部との温度差が明確に生じた部分の位置および形状が供試体に作製した欠陥と一致する場合に欠陥探査が可能であると判断した。しかし、健全部と考えられる部分にも温度のばらつきが生じている。初期画像と 3 分後との差画像を図-5 に示す。温度変化量のみを抽出する差画像を用いると、熱的ノイズなどの影響が除去され、図-5(a)では明確な欠陥探査が可能である。しかし、図-5(b)において健全部と考えられる部分にも温度変化が生じている。樹脂の量が多い部分は、熱負荷を加えると他の健全部に比べて高温になる¹⁾。そのため健全部を欠陥部と誤って評価してしまう可能性がある。図-6(a)に示すように、その部分と他の健全部との温度差は日射遮蔽 15 分後の熱画像に生じていないこと、後述のシート内部欠陥と健全部の温度差にくらべて小さいこと、また、後述する日陰撮像の結果では供試体に与える熱負荷が小さいためその部分の温度差が顕著に表れていないことから図-5(b)における健全部と考えられる領域での高温部分は樹脂の塗布量が多い部分であると判断できる。また、本撮像結果は健全部との温度差がもっとも生じにくい 10mm 欠陥が画像上で明確となるように表示しているため、健全部領域での温度変化も顕著に現れていると考えられる。しかし、図-6(b)に示すように、30mm 以上の欠陥を探索対象として、画像の温度表示域あるいはその中心温度を変化させることにより、健全部領域での温度変化の影響を軽減でき、明確な欠陥探査が可能である。

目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ の CFRP シートを 1 層貼付した供試体の、高温時および低温時における表面温度の経時変化を図-7 に示す。いずれの場合も

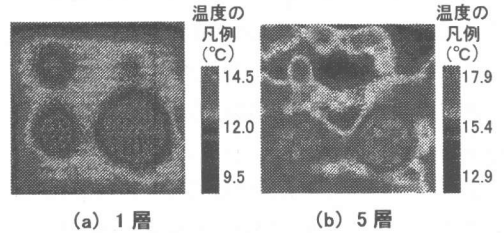


図-4 CFRP シート, 目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ の熱画像

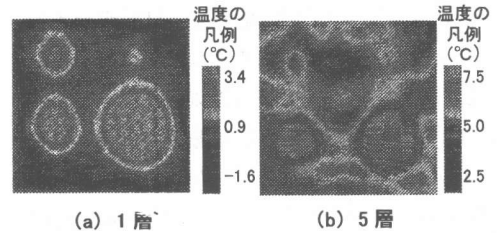


図-5 CFRP シート, 目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ の差画像

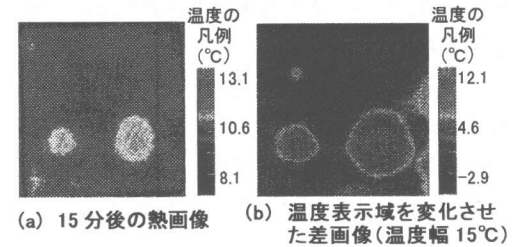
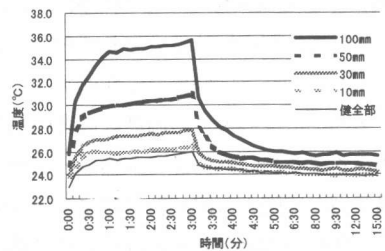
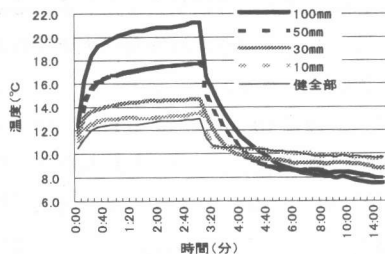


図-6 CFRP シート 5 層, 目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ の画像



(a) 高温時撮像



(b) 低温時撮像

図-7 CFRP シート 1 層, 目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ 供試体表面の温度経時変化

日射遮蔽後の 10mm 欠陥は健全部との温度差が小さく、画像上でその形状が確認することは困難であった。また、30mm 以上の欠陥において、高温時撮像では日射遮蔽後から撮像終了まで欠陥部温度は健全部温度より高いが、低温時撮像では日射遮蔽から 5 分後には健全部温度より低く探査可能となった。日射遮蔽直前の健全部と欠陥部の温度差が高温時に比べて小さいことに加え、高温時より外気温が低く、日射遮蔽後の供試体への冷却効果が大きくなるためと考えられる。そのため、撮像時の外気温により 30mm 以上の欠陥においても日射遮蔽後の探査は困難となる場合が考えられる。しかし、日射遮蔽後の撮像は、前述したように日射中での健全部温度のばらつきを軽減できるため、実構造部に適用する場合には日射遮蔽後にも撮像を行うことが推奨される。

いずれの場合も欠陥寸法が大きくなるにともない健全部と欠陥部の温度差は大きくなる傾向が得られた。欠陥寸法が大きくなるにともない欠陥部中央の熱が健全部方向に拡散しにくくなるためと考えられる。

欠陥部とその周囲の熱画像および欠陥の直径上の温度分布を模式化したものを図-8 に示す。欠陥部温度は同心円状に分布しており、欠陥部中心から健全部に向かい温度が低くなる。健全部と欠陥部の境界付近の温度は両者の温度差に影響されるため、熱画像で欠陥部と判断される高温領域の実際の欠陥寸法に対する比（欠陥寸法比）は健全部と欠陥部の温度差に影響され、その温度差は欠陥寸法などに左右される。すなわち健全部と欠陥部の温度差が大きくなるとともに欠陥寸法比も大きくなる。

図-9 に、3 分後に 10mm 欠陥の探査が可能であった限界の距離 L_{MAX} とシート積層数との関係を示す。AFRP および CFRP シートともに積層数が増加するにともない L_{MAX} は短くなっている。シート積層数の増加にともない、欠陥部の熱が健全部方向に拡散しやすくなり、健全部と欠陥部の温度差が生じにくいためと考えられる。

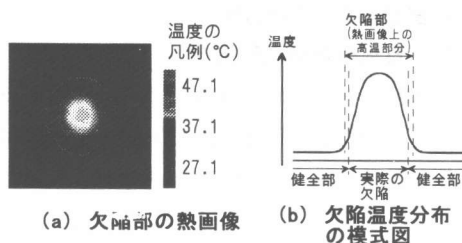


図-8 欠陥部温度分布

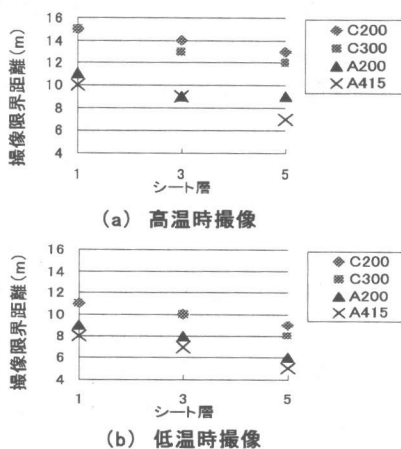


図-9 シート層数と 10mm 欠陥の撮像限界距離

表-3 目付量 600g/m² 程度の供試体の日射中における 10mm 欠陥の撮像限界距離

シート種類	C600		A623	
	高温時	低温時	高温時	低温時
含浸あり	15	10	11	9
含浸なし	11	8	9	6

単位 (m)

また、AFRP シートに比べ CFRP シートの L_{MAX} は長い傾向が得られた。後述する日陰撮像の結果では AFRP と CFRP シートの L_{MAX} に大きな差がなかった事から、AFRP および CFRP シートの表面色の違いによる日射吸収率の差によるものと考えられ、CFRP シート（黒色）は AFRP シート（黄色）に比べ、日射吸収率が高いため、健全部と欠陥部の温度差が大きくなったと考えられる。また、高温時と比較して低温時では L_{MAX} が短くなる傾向が得られた。高温時に比べ低温時では日射量が少なく、健全部と欠陥部の温度差が小さくなるためと考えられる。

目付量 600 g/m² 以上の供試体に対する 10mm 欠陥の L_{MAX} を表-3 に示す。CFRP および AFRP シートとも樹脂が含浸していない欠陥は含浸し

ている欠陥に比べ L_{MAX} が短くなっている。樹脂が含浸していない欠陥は繊維間に隙間が生じることに加え、シートの熱伝導率が大きいため、熱負荷がシートにおよぼす影響は小さくなり、健全部と欠陥部の温度差が生じにくくなるためと考えられる。また、樹脂が含浸している欠陥は、同程度のシート厚さに相当する CFRP および AFRP シート 3 層、目付量 200 g/m^2 の供試体と比較すると、 L_{MAX} が長くなっている。FRP シートの 1 層貼付に比べ、3 層貼付では使用する樹脂の量が多くなり、熱が拡散しやすくなるためと考えられる。すなわち、シートの目付量の違いに比べ、積層数の方が各欠陥の L_{MAX} におよぼす影響が大きいと考えられる。

シート界面およびシート内部の欠陥供試体における 3 分後の健全部と欠陥部の温度差を表-4 に示す。各温度差は、シート・コンクリート界面欠陥と健全部の温度差に比べて小さくなる傾向が得られた。シートはコンクリートに比べて熱伝導率が高いため、シート界面およびシート内部の欠陥は、その下側のシートへ熱が拡散しやすいためと考えられる。よって、シート界面およびシート内部欠陥はシート・コンクリート界面の欠陥に比べて欠陥寸法比が小さくなるため、 L_{MAX} が短くなると考えられる。また、各供試体とも欠陥がいずれの層に生じていても、最上層のシート内部欠陥を除き、欠陥部温度は健全部温度より高くなる。欠陥が表面に近くなるほど、欠陥下側に存在するシート数が多くなるため熱の拡散がしやすくなったものと考えられる。よって、シート界面あるいはシート内部欠陥の生じている層の違いが欠陥寸法比に与える影響は小さく、 L_{MAX} の差は小さいと考えられる。

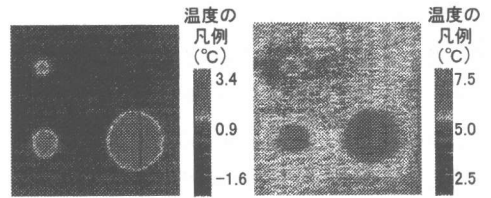
3.2 日陰撮像

CFRP、目付量 300 g/m^2 シートを 1 および 5 層貼付した供試体の低温時の熱画像を図-10 に示す。日陰撮像においては、日射時に比べて供試体に与える熱負荷が小さいため、10mm 欠陥部は健全部との温度差が小さく $L = 1 \text{ m}$ においてもその

表-4 撮像開始から 3 分後のシート界面およびシート内部欠陥の健全部と欠陥部の温度差

欠陥	健全部と欠陥部の温度差							
	シート界面欠陥				シート内部欠陥			
	AFRP		CFRP		AFRP		CFRP	
	3層	5層	3層	5層	3層	5層	3層	5層
2層目	1.2	1.6	3.2	3.7	1.4	1.7	2.5	4.6
3層目	1.4	1.0	3.1	3.5	-1.2	1.8	-0.5	4.7
4層目	-	1.2	-	4.4	-	1.7	-	4.2
5層目	-	0.9	-	4.7	-	-1.3	-	-2.1

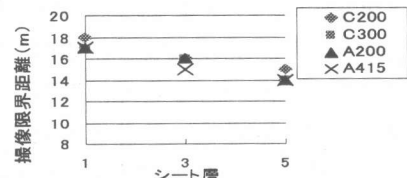
単位 (°C)



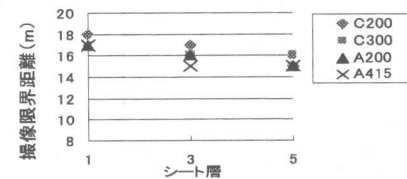
(a) 1層

(b) 5層

図-10 CFRPシート、目付量 300 g/m^2 の熱画像



(a) 高温時撮像



(b) 低温時撮像

図-11 シート層数と 30mm 欠陥の撮像限界距離

形状を確認できない場合があるため、日陰撮像では 30mm 欠陥を対象に撮像を行った。

図-11 に、30mm 欠陥の L_{MAX} とシート積層数との関係を示す。日射中の撮像と同様に、両シートともシート積層数が増加するにともない L_{MAX} が短くなる傾向が得られた。また、シートの種類の違いによる L_{MAX} の差は日射中における撮像の場合と比べて小さい。これは、シートの日射吸収率の違いによる影響がないためと考えられる。また、高温時と低温時における L_{MAX} に大きな差が生じていない。これは測定前日の外気温の高低差に大きな差が生じていないためと

考えられる。

目付量 600 g/m²程度の供試体に対する 30mm 欠陥の L_{MAX} を表-5 に示す。欠陥部に樹脂の含浸している供試体と含浸していない供試体の L_{MAX} の差は、日射中における撮像の場合にくらべて小さい。外気温が低いため、熱負荷の影響を受けにくい、樹脂の含浸していない欠陥は健全部より低温になり、両供試体の健全部と欠陥部の温度差の絶対値に大きな差が生じていないためと考えられる。また、樹脂の含浸している欠陥について、同程度のシート厚さに相当する目付量 200 g/m² でシート積層数 3 層の供試体と比較すると、L_{MAX} は長くなっており日射後遮蔽撮像と同じ傾向が得られた。

シート界面およびシート内部欠陥の供試体の健全部と欠陥部の温度差を表-6 に示す。両供試体とも健全部と各欠陥部の温度差は、日射後遮蔽過程の場合にくらべて小さいが、欠陥形状を確認することは可能であった。また、欠陥がいずれの層に生じていても、健全部と欠陥部の温度差に大きな差はない。すなわち、日陰実験においてもシート界面あるいはシート内部にある欠陥が L_{MAX} に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4. 結論

本研究では、赤外線サーモグラフィ法による連続繊維シートの剥離探査について検討を行った。その結果を要約すると、以下のようである。

- (1) 連続繊維シートの積層数が増加すると樹脂の塗布むらが生じやすく、供試体に与える熱負荷が大きいためその影響が画像に現れやすくなる。しかし、熱負荷を小さくすると塗布むらの影響を軽減でき、明確な欠陥探査が可能となる。
- (2) 供試体に与える熱負荷を大きくすると、健全部と欠陥部の温度差は大きくなり、撮像できる限界の距離は長くなる。
- (3) シート界面およびシート内部の欠陥は、シート・コンクリート界面に存在する同寸法の欠陥にくらべて撮像できる限

表-5 目付量 600g/m²程度の供試体の日陰における 30mm 欠陥の撮像限界距離

シート種類	C600		A623	
	高温時	低温時	高温時	低温時
含浸あり	19	18	18	17
含浸なし	18	18	18	17

単位 (m)

表-6 シート界面およびシート内部欠陥の健全部と欠陥部の温度差

欠陥	健全部と欠陥部の温度差							
	シート界面欠陥				シート内部欠陥			
	AFRP		CFRP		AFRP		CFRP	
	3層	5層	3層	5層	3層	5層	3層	5層
2層目	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4
3層目	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	-0.4	0.3
4層目	-	0.2	-	0.3	-	0.2	-	0.4
5層目	-	0.2	-	0.3	-	-0.2	-	-0.4

単位 (°C)

界の距離は短くなるが、生じている層の違いが撮像できる限界の距離におよぼす影響は小さい。

謝辞

本研究の実施にあたりご協力頂いた東レ・デュポン株式会社に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.1203-1209, 1996
- 2) 三井雅一, 福澤公夫, 沼尾達弥: 赤外線サーモグラフィ法を用いた FRP シート・コンクリート間の欠陥検出, 土木学会論文集, No.655, p. 48, pp.107-117, 2000
- 3) 魚本健人, 渡部正: サーモグラフィ法による表面被覆材の剥離および内部コンクリートのひび割れ検査法に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム, pp.97-102, 1992
- 4) 渡部正, 魚本健人: 型わく面の熱画像解析によるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究, 土木学会論文集, No.478, V-21, pp.51-59, 1993