

# 論文 赤外線サーモグラフィ法による豆板および連続繊維シートの剥離探査

小林 香木\*<sup>1</sup>・尼崎 省二\*<sup>2</sup>

**要旨:**本研究では、赤外線サーモグラフィ法による豆板および連続繊維シートの剥離の探査を行った。その結果、日陰にある硬化コンクリート表層部近傍の豆板探査では、熱画像により豆板が探査可能であり、探査可能時間帯は正午前後であること、豆板位置がコンクリート表面に近いほど豆板の探査可能時間が長くなることが判明した。また、連続繊維シートの熱画像による剥離探査では、剥離部が実際より大きく探査されること、人為的に温度変化を与えれば、直径 10 mm 以上の空隙が探査可能であることが判明した。

**キーワード:**赤外線サーモグラフィ法, 連続繊維シート, 豆板, 剥離, 探査

## 1. はじめに

コンクリート内部に豆板が存在すると、その部分は構造物の劣化を促進させると考えられる。既設構造物では、表層部近傍の豆板を探査することは維持管理の上で重要となる。

コンクリート構造物の補修・補強工法として、連続繊維シート接着工法がある。しかし、施工不良などにより連続繊維シートと構造物の接着面にピンホールなどの空隙が存在する場合があります、それは構造物の補強効果を低減する。

コンクリート構造物表面近傍の豆板、空隙あるいは連続繊維シートと構造物の接着面に存在する空隙などの欠陥は熱的特性を変化させる。そのため、外的要因によりコンクリートあるいは連続繊維シート表面に熱的变化が生じると、健全部と欠陥部表面に温度差が生じる。この温度分布を赤外線カメラにより測定することで、豆板および空隙などの探査が可能であると考えられる。コンクリート内部の欠陥探査に関する従来の研究では、供試体を与える熱的变化として日射あるいはヒーターを利用する<sup>1), 2)</sup>など人為的に行うものが主であるが、それらは実構造物に対して実施困難な場合も多い。本研究では、供試体を与える温度変化

を外気温の変化のみとした場合の硬化コンクリートの表層部近傍に存在する豆板の探査可能性を検討した。また、従来、直径 30 mm 以上の連続繊維シートの浮きは補修するのが望ましいとして、欠陥寸法およびシート層数等を変化させたシートの剥離探査に関する研究が多くなされている<sup>3), 4)</sup>。実構造物では、連続繊維シートの剥離寸法は直径 10 mm 程度の小さいものも多く、撮像距離との関係が問題になる。そこで、人為的に供試体表面に温度変化を与えた場合の連続繊維シートの剥離を、直径 10 mm および 50 mm でモデル化して撮像距離を変化させたときの剥離探査の精度を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 硬化コンクリート中の豆板探査

#### (1) 供試体

豆板は、あらかじめ 5 mm ふるいでウエットスクリーニングした粗骨材を、断面 100×100 mm で長さ 100, 200 および 300 mm の型枠で整形後、ビニールシートで覆ったものでモデル化し、図-1に示すように寸法 400×400×250 mm の供試体内部に設置した。その際、豆板埋設深さを確保するために、豆板の両端に塩化ビニルを張り付

\*1 立命館大学大学院 理工学研究科 環境社会工学専攻 (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)

け、スペーサーとした。ビニールシートは、打設中に豆板にモルタルが入るのを防ぐためであり、熱伝導率は  $0.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{5)}$  と小さいが、厚さ  $0.2 \text{ mm}$  と薄いため、断熱効果は小さいと考え使用した。各豆板寸法および豆板埋設位置を表-1に示す。

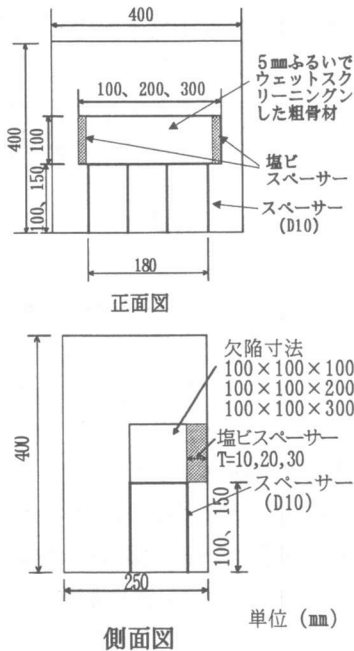


図-1 硬化コンクリート中の豆板探索に用いた供試体

表-1 豆板形状および豆板埋設深さ

豆板形状 (mm)	
	100×100×300
	100×100×200
	100×100×100
豆板埋設深さ T (mm)	
	10
	20
	30

(2) 撮像方法

コンクリート表面に与える温度変化は外気温の変化のみによるものとするため、供試体を屋外で日の当たらない場所に設置した。その際、供試体側面の温度変化の影響をなくすため、撮像面以外の面に厚さ  $3 \text{ cm}$  の発泡スチロール板を貼り付け、断熱した。撮像は冬季(11月~1月)

に、1時間間隔で24時間行った。撮像距離は、供試体全体が撮像できるように供試体撮像面から直角方向に  $3 \text{ m}$  とした。赤外線カメラの仕様を表-2に示す。供試体中央部には、実際のコンクリート温度を測定するために外気温および健全部、豆板部に相当する供試体表面に熱電対を取り付けた。

表-2 赤外線カメラの仕様

赤外線検知器	水銀・カドミウム・テルル 液体窒素冷却型		
応答波長	8.0~13.0 $\mu\text{m}$	測定温度範囲	-40~2000 $^{\circ}\text{C}$
温度分解能	30 $^{\circ}\text{C}$ で 0.05 $^{\circ}\text{C}$	装置作動範囲	0から40 $^{\circ}\text{C}$
瞬時視野	1.25mrad	指示画素数	512×480
温度指示誤差	指示値の1% または0.5 $^{\circ}\text{C}$ のいずれか大きい値	視野角	30°×28°
		焦点範囲	カメラ部前部 20cm以上

2.2 連続繊維シートの剥離探索

(1) 供試体

型枠内側の所定の位置に、直径  $\phi 10$  および  $50 \text{ mm}$  で厚さ  $2$  および  $5 \text{ mm}$  の鋼板を貼り付けて打設し、窪みを設けたコンクリート表面に、炭素繊維シート(目付量  $300 \text{ g}/\text{m}^2$ 、シート厚さ  $0.167 \text{ mm}$ 、以下 CF シートと略記)をエポキシ樹脂で1層貼り付け、剥離欠陥をモデル化した。

(2) 撮像方法

撮像は1月に行った。撮像距離  $L$ 、赤外線カメラの最小検知寸法  $L_{\min}$  および撮像条件を表-3に示す。 $L_{\min}$  は式(1)より算出した。

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

$\theta$ : 瞬時視野 (rad)

表-3 撮像条件

撮像距離 (m)	最小検知寸法 (mm)	温度変化の与え方
3	3.8	日射 15分
		冷却 15分
		恒温状態(温度変化なし、 恒温室内1日保管)
8	10.1	日射 3分後遮蔽
10	12.6	日射 3分後遮蔽
11	13.8	日射 3分後遮蔽

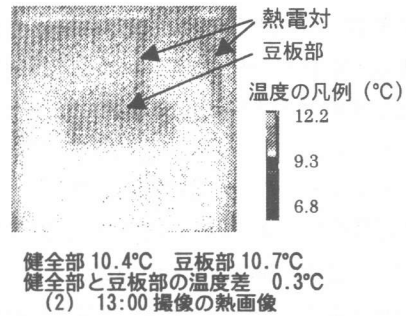
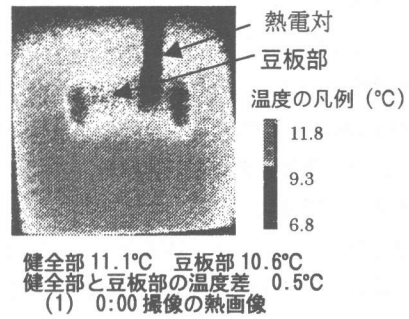
日射過程の測定は、あらかじめ周囲を厚さ 3 cm の発泡スチロールで覆い、断熱した供試体を、撮像面に日の当たる様に移動させ、撮像面の発泡スチロールを取り除いた直後に撮像した画像を初期画像とし、その後 10 秒間隔で 5 分間、30 秒間隔で 5 分間および 1 分間隔で 5 分間の、計 15 分間行った。冷却過程の測定は、室温  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 90% 以上の恒温恒湿室内に一日保管した供試体の、撮像面以外の面に発泡スチロールを張り付け、それを恒温恒湿室内より温度の低い ( $4^\circ\text{C} \sim 8^\circ\text{C}$ ) 場所に移動した直後の画像を初期画像とし、その後は日射過程と同様の間隔で、15 分間撮像を行った。なお、恒温恒湿室内から室外に出す前の供試体についても撮像距離 3m で撮像し、それを恒温状態とした。遮蔽過程の撮像は、日射 15 分過程と同じ方法で初期画像を撮像し、その後 10 秒間隔で 3 分間撮像を行い、直ちに日射を遮り、その後 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。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 硬化コンクリート中の豆板探査

熱画像による硬化コンクリート中の豆板探査結果の一例として、豆板形状  $100 \times 100 \times 200$  mm、豆板埋設深さ  $T=20$  mm の供試体を 0 時および 13 時に撮像した熱画像を図-2 に示す。0 時の熱画像では健全部が  $11.1^\circ\text{C}$ 、豆板埋設位置のコンクリート表面（以下、豆板部と表記）温度が  $10.6^\circ\text{C}$  と健全部の方が  $0.5^\circ\text{C}$  高く、13 時の熱画像では健全部が  $10.4^\circ\text{C}$ 、豆板部が  $10.7^\circ\text{C}$  と豆板部の方が  $0.3^\circ\text{C}$  高くなっており、豆板探査が可能であった。本実験では、熱画像での健全部温度のばらつきを考慮して、健全部と豆板部の温度差が  $0.2^\circ\text{C}$  以上あれば客観的な豆板探査が可能であると判断した。

図-2 に示した供試体と同一形状の豆板を、 $T=10$  mm および  $30$  mm に設置した供試体を 13 時に撮像した熱画像を図-3 に示す。図-2 および図-3 から、同一の豆板形状においては、豆板埋設



豆板形状  $100 \times 100 \times 200$  mm  
 $T=20$  mm

図-2 硬化コンクリート中の豆板探査結果の一例

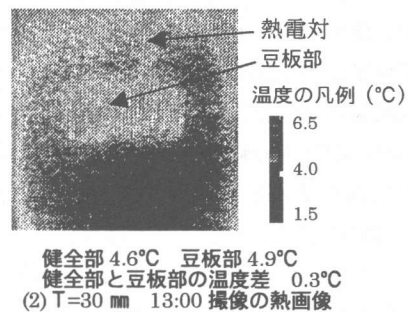
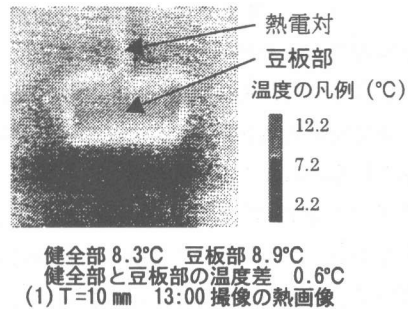


図-3 豆板形状  $100 \times 100 \times 200$  mm の豆板探査結果

深さに関係なく豆板部と認識できる範囲がほぼ等しいことが分かり、他の豆板形状でも同様の結果が得られた。そのため、表層部近傍(10~30mm)の豆板探査では、同一形状の豆板であれば、豆板埋設深さの変化が熱画像上の豆板寸法に及ぼす影響はないと考えられる。

図-2と同一の供試体を、熱電対により計測した外気温および供試体の温度経時変化を図-4に示す。豆板探査可能時間は①の時間帯であり、②の外気温上昇時と③の外気温下降時での豆板探査は困難であった。なお、熱電対で計測した温度とその部分を熱画像で計測した温度はほぼ等しいが、熱電対は点計測であり、熱画像は面計測であるため、熱電対による健全部と豆板部の温度差が0.2℃未満の場合でも、熱画像では健全部と豆板部の温度差が0.2℃以上になる部分を視認できることがあり、豆板の探査が可能な場合がある。

各供試体の豆板探査可能時間を図-5に示す。撮像開始時間が異なるため、時刻目盛りを42時間記述している。T=30mm以下、豆板形状100×100×100mm以上であれば、熱画像での健全部と豆板部の温度差が0.2℃以上になる時間帯があり、豆板の客観的な探査が可能であった。豆板探査可能時間は0時、12時前後の時間帯に多く見られる。これらの時間帯は、外気温が上昇から下降へまたは下降から上昇へ変化する時間帯であり、その前後の外気温の上昇時および下降時に、健全部と豆板部の温度が逆転し、その差が大きくなる。本実験では、外気温の上昇時および下降時に4℃程度の温度変化があれば、健全部と豆板部の温度差が0.2℃以上となり、豆板探査が可能であった。T=10mm、豆板形状100×100×100mmの供試体では12時から15時までは豆板が探査不可能であった。これは、12時以降外気温が下降したため健全部と豆板部の温度差が小さくなったものと考えられる。また、図-5から豆板埋設位置が深くなるとともに、豆板探査可能時間が短くなる傾向が得られた。これは、コンクリートの熱伝導率が小さく、

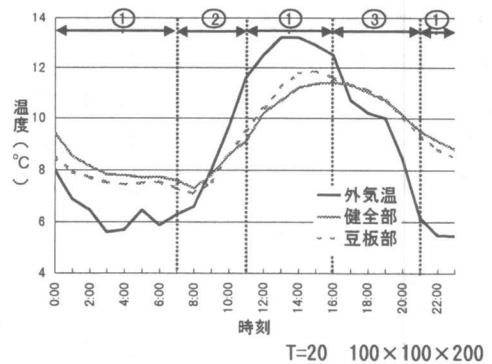


図-4 外気温、健全部および豆板部の温度経時変化

豆板埋設深さ(mm)	豆板幅(mm)	時刻							
		6	12	18	24	6	12	18	24
10	300								
	200								
	100								
20	300								
	200								
	100								
30	300								
	200								
	100								

■ 豆板探査可能時間  
 ▨ 豆板探査不可能時

図-5 硬化コンクリートの豆板探査可能時間

また、供試体表面と豆板の間のコンクリートとその周囲の健全コンクリートとの接触面が多くなり、その間の熱の移動が多くなるため、豆板がコンクリート撮像面におよぼす影響が小さいと考えられる。豆板の大きさの違いによる探査可能時間に大きな差が見られないのは、豆板の大きさの違いは幅だけであり、高さや奥行きが等しいためと考えられる。冬季の0時前後の時間帯では外気温の変化が小さいことも多く、その場合は0時前後の豆板探査が不可能なこともあるため、冬季に行う豆板探査は12時前後の時間帯に行うのがよいと考えられる。

### 3.2 連続繊維シートの剥離探査

熱画像による連続繊維シートの剥離探査結果の一例として、日射過程での供試体の、撮像開始から1分後の熱画像を図-6に、また、同じ過程で撮像した熱画像から得られた供試体の温度経時変化を図-7に示す。日射直後から、す

すべての欠陥部は健全部より高温になり、探査が可能であった。同じ供試体の冷却過程で撮像した熱画像から得られた温度経時変化を図-8に示す。撮像開始直後からすべての欠陥部が健全部より低温になり、欠陥部の探査が可能であった。また、同一の供試体において、恒温状態では、健全部が18.4°C、φ50mmの欠陥部が18.6°Cとなり、欠陥部が健全部より高温になり空隙探査が可能であったが、φ10mmの欠陥部は健全部温度とほぼ等しく、探査不可能であった。本実験においても豆板探査時と同様に、健全部と欠陥部の温度差が0.2°C以上で客観的な剥離探査が可能であると判断した。φ50mmの欠陥部が探査可能であったのは、健全部温度が高湿恒温恒室室内の温度より低く、わずかであるが、日射過程と同様の状態になっているためと考えられる。日射過程においては、撮像開始直後から30秒前後までの温度変化が激しく、その後は健全部温度といずれの空隙部の温度差に大きな変化は見られなかった。冷却過程においては、撮像開始直後から、健全部温度とすべての空隙部の温度差に大きな変化は見られなかったが、直前に測定した恒温状態では健全部と欠陥部の差が最大で0.2°Cであることを考えると、恒温高湿室外への移動時の30秒程度の間に大きな温度変化があったものと考えられる。空気熱伝導率は0.022 W/(m・K)と、コンクリートの熱伝導率1.2~2.4 W/(m・K)に比べて小さい<sup>6)</sup>ので、その差が健全部と欠陥部の、撮像開始直後の温度変化となって現れたと考えられる。図-7より、同じ空隙厚さにおいてφ50mmの欠陥部は、φ10mmの欠陥部に比べ、温度が高くなっている。これは、欠陥部中央のシートの熱が健全部方向へ拡散しにくいと考えられる。次に、φ10mm欠陥に対して異なる空隙厚さの欠陥部の温度変化を比較してみると、画像による両欠陥部の区別を視認することは困難であるが、画像から得られる欠陥部温度を見ると、空隙厚さ5mmの欠陥部温度は空隙厚さ2mmの欠陥部温度に比べ、わずかに高くなる傾向が

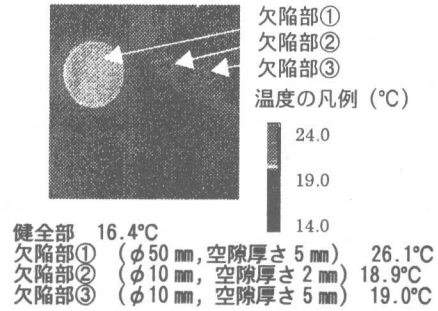


図-6 日射15分測定での、測定開始から1分後の熱画像の欠陥部拡大図

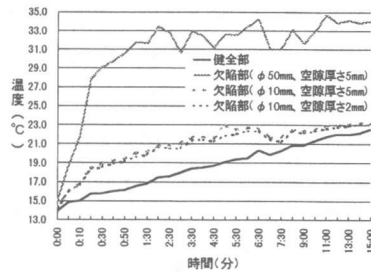


図-7 過熱状態での健全部および空隙部の温度経時変化

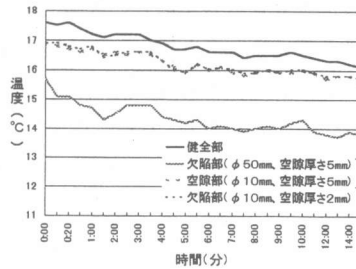


図-8 冷却状態での健全部および空隙部の温度経時変化

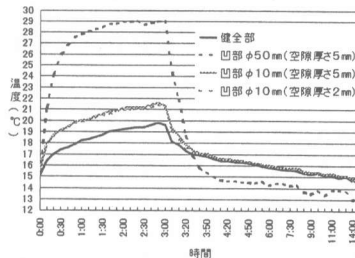


図-9 加熱・冷却状態での健全部および空隙部の温度経時変化

見られる。これは、空隙厚さ 5 mmの方が、2 mmに比べ、外部から得られた熱がコンクリート表面に伝わりにくいためであると考えられる。

次に、遮蔽過程において、撮像距離 8mのときの、熱画像から得られた温度経時変化を図-9に示す。この時の  $L_{\min}$  は 10.1 mmであり、日射を遮蔽するまでは、 $\phi 10$  mmの欠陥部は空隙厚さ 2 mmと 5 mmともに探査可能であった。 $L=10$  m ( $L_{\min}=12.6$  mm) にして、遮蔽過程の測定をおこなったときも同様に、日射を遮るまでは $\phi 10$  mmの空隙部が探査可能であった。欠陥部と健全部の境界は温度遷移帯となるため、境界付近の健全部温度は他の健全部よりも高くなっており、実際の欠陥部よりも大きく探査されたと考えられる。 $L=11$  mにして遮蔽過程の測定を行うと、測定時間中の $\phi 10$  mmの空隙部は探査不可能であった。検知される欠陥寸法の欠陥十寸法に対する比(以下、欠陥寸法比)は健全部と欠陥部の温度差によって変化し、その温度差は欠陥寸法に左右される。

日射中において $\phi 50$  mm欠陥部は $\phi 10$  mm欠陥部に比べて温度上昇が大きくなり、欠陥寸法比も大きくなると考えられるため、 $L_{\min}$  の関係から、シート1層の場合の $\phi 50$  mm欠陥部は、瞬時視野が 1.25mrad の赤外線カメラを用いて  $L=40$  m 程度の距離までならば探査可能であると考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、赤外線サーモグラフィ法により、硬化コンクリート中の豆板および連続繊維シートの剥離探査について検討した。

硬化コンクリート中の豆板探査結果を要約すると、以下のようである。

- (1) 冬季に外気温の変化のみによって供試体に温度変化を与えた場合、豆板埋設深さ 30 mm以下で寸法 100×100×100 mm以上の豆板は探査可能である。
- (2) 冬季の豆板の探査可能時間帯は、12 時前後の時間帯である。また、外気温上昇時

および下降時に 4°C程度外気温が変化すると、健全部の温度と豆板部の温度に差が生じる。

- (3) 豆板のモニタリングは、豆板埋設位置がコンクリート表面に近いほど容易である。
- (4) 表層部近傍において、同一の豆板形状であれば、豆板埋設位置の変化が熱画像での豆板寸法に及ぼす影響はない。

連続繊維シートの剥離探査結果を要約すると、以下のようである。

- (1) 直径 50 mmの空隙は、健全部の温度と欠陥部の温度が逆転するとき以外は探査可能であるが、直径 10 mmの空隙は、人為的に温度変化を与えないと探査不可能である。
- (2) 日射により、直径 10 mmの剥離欠陥は炭素繊維シート1層で撮像距離 10m以下の場合に探査可能である。
- (3) 探査可能な欠陥部寸法は、実際の欠陥部寸法に比べ、数mm程度大きくなる。

#### 参考文献

- 1) 桃木昌子, 山田和夫: サーモグラフィ法によるコンクリート内部探査結果におよぼす日射量の影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1215-1220, 1996
- 2) 柳内睦人, 魚本健人: 熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp.91-100, 1992
- 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.1203-1209, 1996
- 4) 宇佐美惣, 長田光司, 井ヶ瀬良則, 齊藤誠: 炭素繊維巻き立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1225-1230, 1999
- 5) 日本機械学会編: 伝熱工学資料, 日本機械学会, p.321, 1959
- 6) 熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, pp.201-206, 1990