

論文 サーモグラフィー法及び打音法を利用した炭素繊維シート補強 コンクリートの剝離検知手法

金光寿一*¹・柳内睦人*²・三星智典*³・黒古剛司*³

要旨:近年,連続繊維シート工法の剝離検査手法では,検査効率の高いサーモグラフィー法が注目されている。本研究では,剝離を検出するための画像処理法として,得られた熱画像に検知したい剝離寸法に対応したメッシュを貼付け,各メッシュ当たりの画素数分布曲線の相違から剝離評価を行った。さらに,剝離の領域評価では,打音法を適用し剝離寸法の定量評価を行った。その結果,剝離判定では,メッシュ内の表面温度と画素数を乗じた面積を閾値とすることで,より健全部との分離が可能となった。また,打音法では表面振動によって生じる振動特性の相違から剝離領域が定量的に評価できることが分かった。

キーワード:炭素繊維シート,剝離検知,サーモグラフィー法,打音法,画素数分布曲線

1. はじめに

現在,連続繊維シート工法の剝離診断に関する研究では,検査効率の高いサーモグラフィー法^{1)~3)}が適用され,実現場を想定した諸条件から適用範囲や評価法などについて報告されている。しかし,いずれの諸条件においても積層数が増加するにつれて熱画像が不鮮明となり,検知精度が低下するという問題点がある。従って,熱赤外線センサで得られた熱画像から剝離検知の精度向上を図るためには,平均温度差,近傍温度差などを閾値に適用した差分画像から剝離部の抽出を試みることになる⁴⁾。しかし,観測面全面を利用した平均温度差や近傍温度差などの相対温度差のみでは,温度上昇に伴う加熱むらや剝離部からの熱移動,また実際には,確認のとれない剝離部の大きさ及び剝離パターンの相違などから誤診を起こす危険性がある。その改善策として,筆者らは画像処理法として得られた熱画像上に検知したい剝離寸法に対応した大きさのメッシュをパソコン上で重ね合わせ(以下,メッシュの貼付けと称する),そのメッ

シユエリア毎に得られた表面温度の差分から剝離評価の検討を行ってきた⁵⁾。しかし,実現場では剝離部に対応したメッシュを貼付けることは困難であり,メッシュのずれによってメッシュ内の温度分布が異なることになる。

そこで,本研究では剝離位置に対してメッシュをずらし,メッシュ内に存在する剝離の面積が変化した場合の剝離評価について検討した。その剝離の判定評価では,メッシュ毎に得られた表面温度と画素数で示される画素数分布曲線の相違を示す統計量が熱画像の2値化を目的としたクリッピング処理⁶⁾の閾値へ適用できるか否か剝離の検知指標の構築について検討した。さらに,剝離判定後の領域評価では打音法を適用し,剝離と完全接着された炭素繊維シート(以下,シートと記す)の表面振動によって生じる振動特性の相違から剝離領域が定量的に評価できることを明らかにした。

2. 実験概要

2.1 試験体

*1 中央工学校専任講師 土木建設科 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)

*3 日本大学大学院 生産工学研究科

試験体は、N社製のシート(高強度カーボン,目付量 200g/m², 施工厚 0.45mm, 熱伝導率 18W/m・K)を RC プレキャスト版(600 × 450 × 60mm)に完全接着させたもの(以下, RC 試験体と記す)と, コンクリート表面とシート間に 2パターン及び各積層間に 1パターンの疑似剥離を設けたものの計 4種類を作製した。

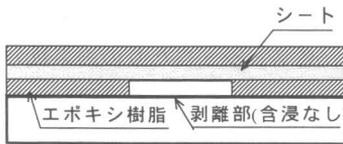


図-1 RG試験体(樹脂含浸不良)

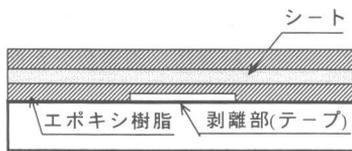


図-2 RH試験体(接着不良)

表-1 試験体一覧

試験体	剥離状態	記号	剥離寸法 (cm)	積層数	打撃回数
RC接着	—	RC	—	1~6	9
RG剥離	含浸不良	RG3	3 × 3	1~5	4
		RG10	10 × 10		11
RH剥離	接着不良	RH3	3 × 3	1~6	4
		RH10	10 × 10		11
RHR剥離	積層間	RHR3	3 × 3	6	4
	接着不良	RHR10	10 × 10		11

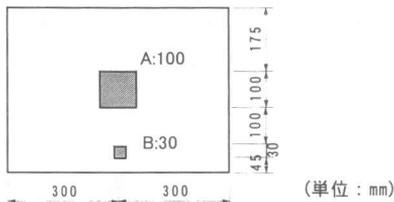


図-3 試験体及び剥離位置

そのシートの剥離パターンは, 接着剤の塗布ムラによる樹脂含浸不良(以下, RG 試験体と記す)と結露や水分などの要因によって起こるシート裏面の接着不良(以下, RH 試験体と記す)及び接着不良を各積層間(以下, RHR 試験体と記す)に設けた 3種類を想定した。RG 試験体の剥離部は, コンクリート表面にエポキシ系接着剤を塗布しないことで作製し(図-1 参照), RH 及び RHR 試験体の剥離部は離型テ

ブをコンクリート表面(RH 試験体)及びシートに貼付け(RHR 試験体), テープの上から接着剤を塗布することで作製した(図-2 参照)。また, シートの貼付け枚数は, 今回使用した打撃試験機のエネルギーの関係から RG 試験体は 5層まで, RH 及び RHR 試験体は 6層までとし, 各層 1週間の養生後にサーモグラフィー法による温度測定及び打撃実験を行った。なお, 検知したい剥離の大きさは 3 × 3cm 及び 10 × 10cm の正方形とした。その試験体一覧を表-1に, 剥離位置を図-3に示す。

2.2 熱赤外線センサによる観測条件

実験に用いた試験体は, サーモグラフィー法にとって最も検知が困難と考えられる剥離空隙の小さい接着不良を対象とした(図-2 参照)。その RH 試験体への加熱方法は, 高圧噴霧式温風ヒータ(平均発熱量 112,000kJ/h, 温風吐出量 5.6m³/min)を使用して加熱時間を変えて行い, 熱量の強弱が熱画像にどのような影響を与えるのか検討した。実験要因を表-2に示す。

表-2 実験要因

記号	加熱距離 (cm)	加熱時間 (sec)				積層数
		30	60	90		
CaseS	50	30	60	90	1~6	

また, 熱赤外線センサ(非冷却 2次元マイクロメータ, 応答波長領域 8.0-14.0 μm, 最小温度分解能 30℃黒体にて 0.15℃)による温度測定は, 測定距離 1.7m の位置から加熱停止直後より 3分間連続して時系列の熱画像を得ることにした。なお, 測定時の外気温は 28 ± 2℃である。

2.3 打撃試験機による測定条件

測定に使用した打撃試験機は, 打撃周期 5回/秒の性能を有するもので, 打撃部から 17 mm 離れた位置にあるマイクロフォンによって 1回毎に打撃音の強さが記録できるものである(図-4 参照)。試験体への打撃は, その固定条件や支持条件の差異による内部振動をより一定にするためゴムマット上で行った。その剥離領域を

評価する打撃点の総数は、表-1に示すとおりであり、各剥離寸法間を均等に 1cm 間隔で打撃した。なお、比較対象となる完全接着した RC 試験体は、対角線上を均等に 9 点打撃して固定条件や支持条件の差異を確認した。

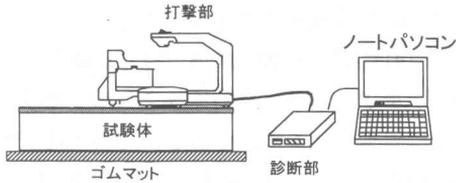


図-4 測定状況

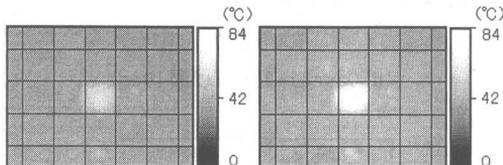
3. サーモグラフィー法の実験結果

3.1 実験要因が及ぼす熱画像への影響

表-3は、RH 試験体が表-2の加熱時間によって上昇した加熱停止直後の全面平均温度である。

表-3 加熱停止直後の上昇温度

記号	積層数	加熱時間(sec)		
		30	60	90
CaseS	1	30.5	54.5	64.0
	3	37.4	54.5	85.0
	6	28.6	55.5	80.5



(a) CaseS6-30

(b) CaseS6-90

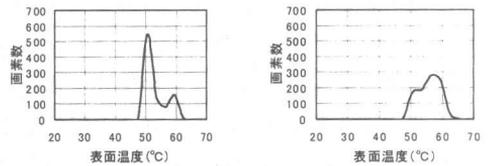
写真-1 表面温度分布画像 (RH試験体6層)

また、写真-1(a)、(b)はCaseS6-30、CaseS6-90における加熱停止後1分経過時に得られた熱画像である。なお、CaseSの後の数字は積層数を示し、-の後は加熱時間を示す。写真-1は、6層の最小と最大の上昇温度時の熱画像であり、写真-1(b)の90秒加熱の方がより鮮明に剥離部を確認することができる。10cmの剥離を有する箇所には剥離の境界を明確に判読するまでには至らないまでも、高温部を示す灰色が現れており、6層までは確実に剥離

を確認することができる。しかし、3cmの剥離箇所は、いずれの加熱条件においても温度差が小さく、3層目より健全部とほぼ同様の熱画像を示し、カラーバーの調整を行っても視覚的には剥離を検知することはできなかった。

3.2 熱画像の選択

熱画像から剥離を検知する場合、剥離部と健全部間には検知可能な温度差が必要であり、その上昇温度に伴う冷却時間が存在する。この検知可能な熱画像の選択は、剥離が確認できない実現場を想定して、剥離位置に対してメッシュをずらし(写真-1は剥離位置に対応)、メッシュ内の剥離面積の割合が変化した場合について画素数分布曲線の相違から検討した。図-5(a)、(b)は、CaseS6-90-10で得られた画素数分布曲線である。なお、記号の加熱時間90秒の後の数字は剥離寸法を示す。また、図に示す剥離占有率は、メッシュの大きさ10cm内に存在する剥離面積の割合を示す。



(a) 剥離占有率25%

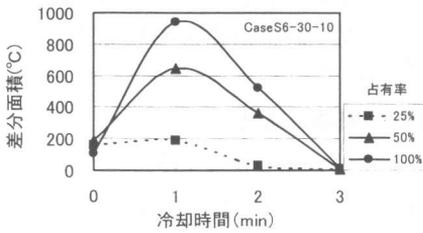
(b) 剥離占有率50%

図-5 画素数分布曲線の相違 (1分経過時)

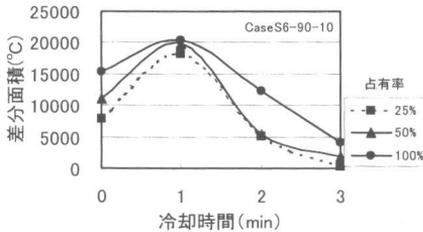
このように、10cmメッシュ内の剥離占有率25%と50%では、画素数分布曲線の形状差及び面積(表面温度×画素数)に明瞭な差異が現れており、どのようにメッシュを貼付けても定量的に評価できるものと考えられる。

図-6(a)、(b)は、最適な冷却時間を選定するために求めたCaseS6-30-10及びCaseS6-90-10の画素数分布曲線の差分面積と冷却時間の関係である。なお、この図で示す差分面積とは、各剥離占有率で得られた画素数分布曲線の面積から健全部で得られた11箇所のメッシュ内の平均面積を引いたものである。従って、剥離評価に

必要な加熱停止直後の上昇温度と冷却時間の関係は、図-6から最も大きな相対差を示す冷却時間から検討した。



(a) CaseS6-30-10



(b) CaseS6-90-10

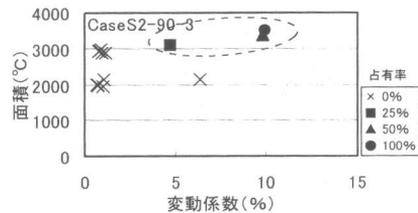
図-6 差分面積と冷却時間の関係

その結果、両者ともに1分経過時において相対差が最も大きくなっており、この1分経過時を剥離判定時間に選定した。また、メッシュ内の最小剥離占有率である25%が検知できる加熱停止直後の上昇温度は、図-6(a)の相対差からみて30秒加熱で得られた28℃程度は必要と考える(表-3参照)。このように熱画像の選択では、表面温度と画素数の影響が大きく左右し、その両者を乗じた面積を指標とすることでより精度の向上が図れるものとする。

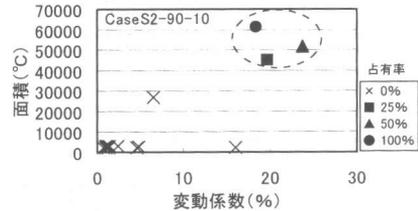
3.3 剥離の判定指標及び判定評価

剥離の判定評価は、メッシュ内の画素数と表面温度で得られた画素数分布曲線の変動係数と面積の相違がクリッピング処理の閾値へ適用できるか否か検討した。図-7(a)~(d)は、90秒加熱の1分経過時に得られた2及び6層の試験体に対して、剥離寸法3及び10cmを検出するために、熱画像に3及び10cmメッシュを個々に貼付けて得られた画素数分布曲線の面積と変動係数の関係である。なお、図中の×印(0%)は健全部11箇所、また25、50及び100%は

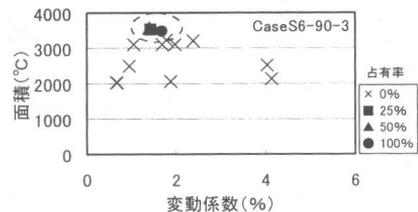
メッシュ内の剥離占有率を示す。その結果、図-7(a)、(b)に示す2層試験体では、剥離部で得られた変動係数と面積(破線箇所)が健全部の値(×印)とは完全に分離しており、メッシュをどのように貼付けても両指標を閾値として剥離3及び10cmを評価することができる。一方、図-7(c)、(d)に示す6層試験体では、剥離部の変動係数が小さくなり、変動係数を利用した閾値処理では誤診を起こす。しかし、面積は健全部以上の値を示しており、剥離3cm(CaseS6-90-3)の剥離占有率25%まで評価することができる。



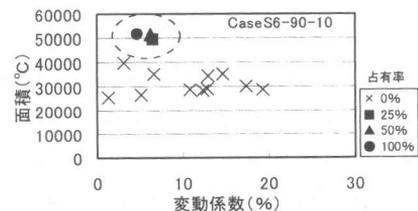
(a) CaseS2-90-3 (2層3cm)



(b) CaseS2-90-10 (2層10cm)



(c) CaseS6-90-3 (6層3cm)



(d) CaseS6-90-10 (6層10cm)

図-7 面積と変動係数の関係

4. 打音法の実験結果

一般に、得られた打撃波形の特徴をより明確にするためには式(1)のFFT解析から算出されるパワースペクトル表示によってそれぞれの波形の違いを比較することになる。

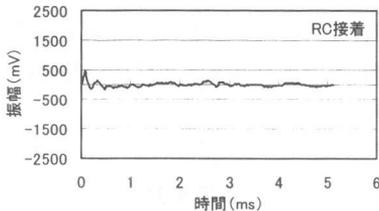
$$X_k = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp(-i(2\pi km/N))$$

$$P_k = \{ \text{Re}(X_k) \}^2 + \{ \text{Im}(X_k) \}^2 \quad (1)$$

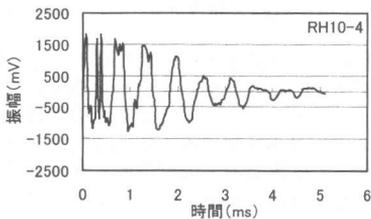
ここに、 C_k : 入力信号, N : データ個数, P_k : パワースペクトル, $\text{Re}(X_k)$: X_k の実数部, $\text{Im}(X_k)$: X_k の虚数部

4.1 積層数による打撃波形の相違

図-8(a), (b)は、積層が1層であるRC試験体の中央部、積層が4層であるRH試験体のRH10(剥離 10cm)の中央部を打撃して得られた256点の時系列波形である。剥離を有するRH試験体の方がより最大振幅が大きくなり、位相差も異なって現れている。



(a) RC試験体 (1層中央部)



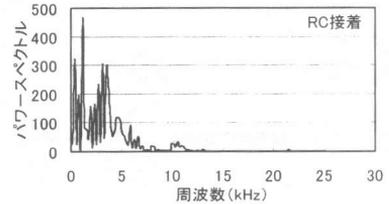
(b) RH試験体 (RH10-4層中央部)

図-8 打撃波形の相違

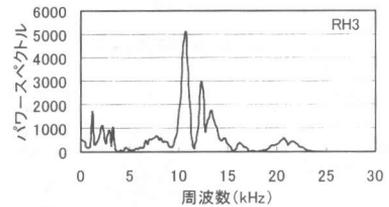
4.2 積層枚数による周波数分布の相違

図-9(a), (b)は、積層が5層であるRC試験体の中央部及び積層が5層であるRH試験体のRH3(剥離 3cm)を打撃して式(1)より算出した周波数分布である。RC試験体の特徴は、積層

数に関係なくいくつか同様のピーク値をもつ周波数分布となっている。しかし、剥離を有するRH3ではある一つの卓越した周波数が現れ、そのピーク値や面積の大きさ及び分布形状差を示す歪度、尖度を比較することで両者を区別することができる。



(a) RC試験体 (中央部)



(b) RH試験体 (RH3中央部)

図-9 周波数分布の相違 (5層試験体)

図-10は、RC試験体を対角線上に9点打撃して得られたスペクトルの面積と積層数との関係である。図からシートを完全接着したRC試験体は、支持条件、固定条件及び積層数に関係なくほぼ一定値を示している。

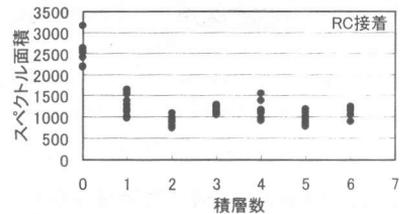
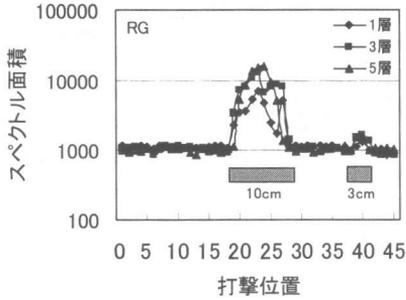


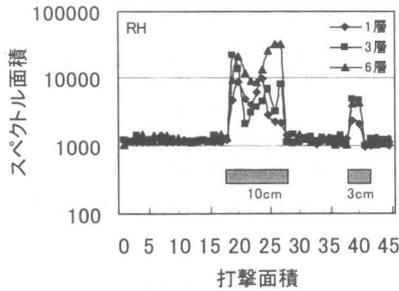
図-10 スペクトル面積と積層数 (RC試験体)

図-11(a)~(c)は、RG, RH及びRHR試験体で得られたスペクトルの面積と打撃位置の関係である。図の打撃位置は、10cm及び3cmの剥離位置の中心を試験体の短辺方向の端部から1cm間隔で打撃した打撃点の数として示してい

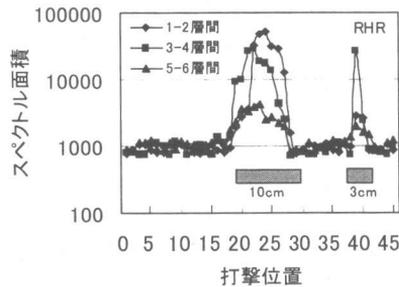
る(図-3 参照)。その結果、図-11から剥離寸法 10cmについては、スペクトル面積が剥離の境界部より急激に大きくなっており、図-10及び図-11の完全接着部の値と比較することで RG 試験体は 5 層まで、RH 及び RHR 試験体は 6 層まで精度良く剥離領域評価を行うことができる。



(a) RG試験体(樹脂含浸不良)



(b) RH試験体(接着不良)



(c) RHR試験体(積層間接着不良)

図-11 スペクトル面積と打撃位置

一方、剥離寸法 3cm の評価では、積層数の増加に伴いスペクトル面積が小さくなり、シート両面から含浸した RH 及び RHR 試験体は評価できるものの、樹脂含浸不良である RG 試験体の剥離 3cm(図-11(a) 参照)では誤診を起

す危険性がある。しかし、これは 5 層以上の積層層数に対して評価できないということではなく、打撃エネルギーの強弱が問題であり、積層数によって打撃エネルギーを変えなければならないことを示唆している。

5. まとめ

本研究での結果は、以下のとおりである。

- (1) 得られた熱画像から剥離の判定評価を行う場合、メッシュ毎に得られた画素数分布曲線の相違を利用することで検知精度の向上が図れた。
- (2) 画素数分布曲線の面積と冷却時間の関係から最適な冷却時間及び検知可能な上昇温度が選択できた。
- (3) 剥離判定では、メッシュをどのように貼付けても画素数分布曲線の面積から剥離寸法 3cm の 6 層まで評価することができた。
- (4) 打音法を適用したシートの剥離領域評価では、完全接着と比較すると打撃振幅及び周波数分布に明確な差異が現れ、剥離寸法を精度良く評価することができた。
- (5) 積層数の増加及び剥離パターンによって打撃エネルギーを変えた方が、より剥離領域評価の精度向上が図れる。

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, Vol.18, No.1, pp.1203-1208, 1996.
- 2) 坂上隆英・久保司郎・込山貴仁ほか：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, 第2回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム, 日本非破壊検査協, pp.25-29, 1998.12
- 3) 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/V-48, pp.107-117, 2000.8
- 4) 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, No442/V-16, pp.91-100, 1992.2
- 5) 金光寿一・柳内睦人：打撃法による炭素繊維シート補強コンクリートの剥離評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.379-384, 2000.7
- 6) 画像処理ハンドブック編集委員会編：画像処理ハンドブック, (株)昭晃堂, p277, 1989.3