

## 論文 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

金光寿一\*<sup>1</sup>・柳内陸人\*<sup>2</sup>

**要旨:** 近年, コンクリート構造物の補強方法として連続繊維シート工法が採用されている。しかし, 接着施工のため下地コンクリート表面の劣化層の除去, また十分な不陸修正を実施しなければ剥離を起こす危険性がある。そこで, 本研究では打撃法を採用して, コンクリート表面に積層された炭素繊維シートの剥離寸法が定量評価できるか否か検討した。その検知手法は, まず検査の効率化を図るためにサーモグラフィー法から剥離の有無を確認した。その結果, 人為的な加熱により熱画像内には剥離状態を示す特徴的な温度分布パターンが現れ, 打撃法から剥離寸法を精度良く定量評価できることが分かった。

**キーワード:** 炭素繊維シート, 剥離検知, 打撃法, サーモグラフィー法, 周波数分布

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災以来, コンクリート構造物の補強方法としてコンクリート表面に炭素繊維, アラミド繊維などの連続繊維シートを接着する工法が注目されるようになった。しかし, 下地コンクリート表面の劣化層(風化・レイタンス・離型剤・剥離モルタル・塗装・汚れ等)の除去, また不陸修正(段差修正, 凸部除去, 凹部埋め)のでき具合が連続繊維シート施工の仕上げにそのまま反映され, 十分な修正を実施しなければ剥離を起こす危険性がある。現在, その剥離検知では, 目視, 指触, パールハンマーあるいは一部でサーモグラフィー法が併用されて行われているが, これらの手法では剥離寸法を定量的に評価することは困難である。特にサーモグラフィー法を利用した剥離評価では, 各種加熱方法<sup>1)~3)</sup>が適用され試みられてはいるが, 積層数が増加するに従って検知精度が低下し, 剥離の境界評価するまでには至っていない。

そこで, 本研究では, まずサーモグラフィー法からコンクリート表面に積層された炭素繊維シート(以下シートと記す)の剥離の有無が識別できる加熱条件の確認を行い, その剥離部に

対して打撃法を適用し, 剥離と完全接着されたシートの表面振動によって生じる打撃音の大きさや振動特性の相違から剥離寸法を定量的に精度良く評価できることを明らかにした。

## 2. 実験概要

サーモグラフィー法での加熱方法では, 温風ヒータを適用して加熱強度を変化させるとともに, その剥離の判定では検知したい剥離寸法に対応したメッシュを貼付け, メッシュ当たりの温度分布特性より検討した<sup>4)</sup>。また, 確認後の定量評価では打撃法を適用して, 周波数分布の相違より剥離寸法の境界評価を行った。

## 2.1 試験体

試験体は, N社製のシート(高強度カーボン, 目付量 200g/m<sup>2</sup>, シート厚 0.111mm)を RC プレキャスト版(600×450×60mm: 以下, RC 試験体と記す)に完全接着させたものと, 1層目のみに人為的な剥離を設けたものの2種類を製作した。今回, シートの剥離は, 結露, 水分, あるいは接着剤の塗布ムラなどの要因によって起こるシート裏面の接着不良を想定した。そのシート1層目の剥離部は, コンクリートの接着

\*1 中央工学校専任講師 土木建設科 工修(正会員)

\*2 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 工博(正会員)

面をサンダーで削った後にプライマー処理して1日養生を行い、その後、離型テープを貼付けエポキシ系の接着剤を使用してシートを接着し、含浸・脱泡作業を十分に実施して作成した。

また、シートの貼付け枚数は実橋脚補強の施工枚数とほぼ同等の6枚とし、各層1週間の養生後に加熱及び打撃実験を行った。

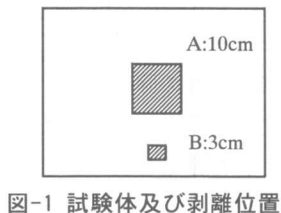


図-1 試験体及び剥離位置

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。その試験体と剥離位置を図-1に示す。

## 2.2 熱赤外線カメラによる観測条件

RC試験体への加熱は、高圧噴霧式温風ヒータ（平均発熱量112000kJ/h、温風噴出5.6m<sup>3</sup>/min）で行い、熱赤外線センサ（光導電型、応答波長領域8.0~12.0μm、感度30℃で0.1℃）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、加熱条件は、表-1に示す実験要因のとおりである。

表-1 実験要因

加熱方法	記号	加熱距離 (cm)	加熱時間 (sec)			積層数
			30	60	90	
温風ヒータ	CaseS	50	30	60	90	1~6
	CaseL	100	60	120	180	

## 2.3 打撃試験機による測定条件

使用したS社製の自動剥離試験機は、打撃周期5回/秒の性能を有するもので、打撃部から17mm離れた位置にあるマイクロフォンで1回毎に打撃音の強さを記録できるものである。

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。打撃位置は、剥離寸法10cmの内側に対して図-2に示すとおり境界面より1cm離れた位置から等間隔に計9点(②

~⑩) 打撃し、剥離寸法3cmは中央部を1点打撃した。なお、比較対象となる完全接着した試験体は各々の剥離位置付近をランダムに計9点打撃している。全ての測定条件を表-2に示す。

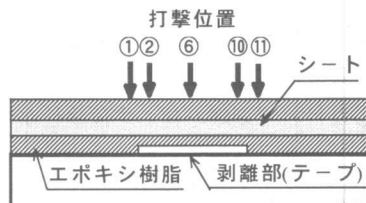


図-2 RC試験体及び打撃位置

表-2 実験要因

試験体	記号	剥離寸法 (cm)	積層数	打撃回数
RC接着	RS	0	1~6	9
	RC剥離	RH3		3×3
RH10		10×10		11

## 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、RC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 上昇温度

記号	積層数	加熱時間(sec)				
		30	60	90	120	180
CaseS1	1	30.5	54.5	64.0		
CaseS3	3	37.4	54.5	85.0	—	—
CaseS6	6	28.6	55.5	80.5		
CaseL1	1		33.2		55.9	62.9
CaseL3	3	—	49.5	—	49.5	74.1
CaseL6	6		31.6		43.5	70.1

また、写真-1(a)~(d)はCaseS6-30、CaseS6-90、CaseL6-60及びCaseL6-180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、CaseLの後の数字は積層数を示し、一の後には加熱時間及び剥離寸法を示す(表-1参照)。写真-1の熱画像を見ると、いずれも10cmの剥離を有する箇所(図-1参照)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層目までは確実に剥離を確認することができる。しかし、3cmの剥離を有する箇所は、いずれの加熱条件においても健全部との温度差が小さく、1層目より健全部とほぼ同様の熱画像を示し、視覚的に検知しようとする場合には不適切であった。

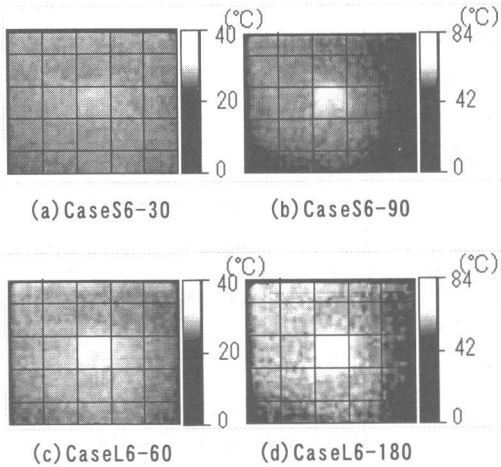


写真-1 表面温度分布画像

### 3.2 熱画像の選択

熱画像から剥離を検知する場合、加熱法に伴う最適な上昇温度と冷却時間が存在する。そこで、剥離を容易に判読できる加熱時間と冷却時間の選定について温度特性値<sup>3)</sup>及び標準偏差を用いて検討した。温度特性値は、試験体に検知したい剥離の大きさとして、剥離部に3cm及び10cmのメッシュを貼付け(写真-1参照)、その各剥離部の平均温度と健全部の平均温度との差分を示したものである。また、標準偏差は各剥離面積に対する熱放射の違いにより得られた温度データが平均値の付近でばらつく程度を示すもので、健全部と比較することで損傷検知

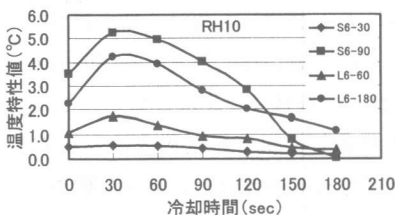
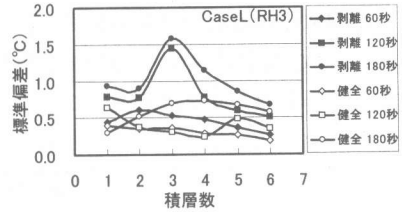
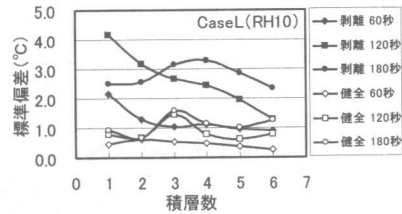


図-3 温度特性曲線

の指標<sup>4)</sup>となる。図-3にその一例として CaseS6-30-10, CaseS6-90-10, CaseL6-60-10及び CaseL6-180-10の温度特性曲線を示す。図-4(a)~(b)には剥離寸法3cm及び10cmで得られた CaseLの積層数と標準偏差との関係を示す。



(a) CaseL (RH3)



(b) CaseL (RH10)

図-4 積層数と標準偏差の関係

冷却時間の選択は、温度特性曲線を利用して行った。写真-1に示す熱画像から剥離部と確認できる温度差として0.5°C以上の温度差が必要であった。従って、図-3から剥離部が健全部と明瞭に分離できる時間範囲として、CaseS6-30においても加熱停止直後から2分程度以内であれば確認できることが分かる。また、剥離寸法3cmを抽出できる加熱条件及び積層数は、図-4(a)に示す標準偏差から検討した。図から健全部と剥離部が完全に分離していれば、画像処理によって抽出できることになる。60秒加熱で4層目、120秒で5層目、また180秒加熱で6層目まで確認できることが分かる。

シート剥離の検出法として、Xeフラッシュランプを使用したパルス加熱法<sup>3)</sup>では、2層目まで剥離寸法3cmを確実に可視像から確認することができる。本実験で適用した輻射加熱法では、加熱距離を短くした CaseS よりも、加熱時には既に剥離部の熱移動が生じている CaseL の方が

より鮮明な熱画像となっている。

#### 4. 打撃法の実験結果

サーモグラフィー法により確認されたシートの剥離部に対して、打撃法から剥離寸法の定量評価を行うものである。

##### 4.1 積層数による打撃波形の相違

図-5は、RC 接着試験体 1 層目の剥離中央部を打撃して得られた時系列の波形である。

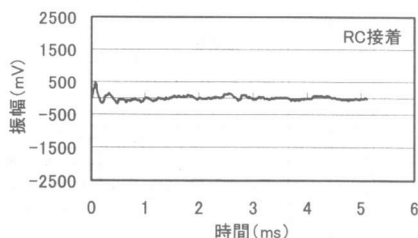


図-5 打撃波形(1層)

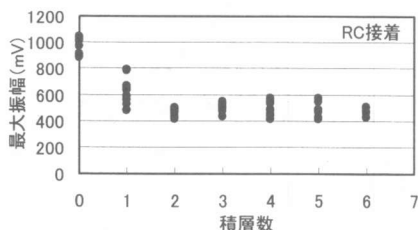
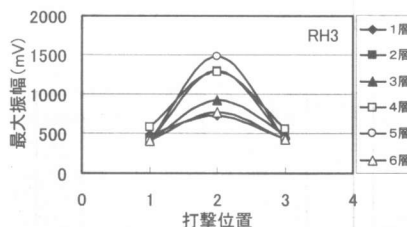


図-6 最大振幅 (RC接着試験体)

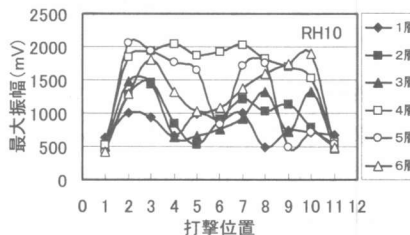
図-6は、そのRC 接着試験体の1～6層目までの各層を計9点打撃して得られた最大振幅である。なお、0層に示す値は、プライマー処理後に行ったシート貼付け前の最大振幅である。また、図-7(a)～(b)はRC 剥離試験体の剥離寸法3cm(記号:RH3)及び10cm(記号:RH10)で得られた打撃位置毎の最大振幅である。ただし、RH3及びRH10の打撃位置1,3及び1,11は剥離境界より外側健全部1cmの箇所を打撃したものである(図-2参照)。

今回使用した打撃試験機は打撃エネルギーが一定であり、シートが振動するほど振幅は大きくなる傾向にある。RC 接着試験体の最大振幅は、2層目以降、打撃位置によって最大157mV程度のばらつきを有するが、積層数に関係なく

ほぼ一定の値を示している。剥離中央部を打撃したRH3は、1層目から最大振幅が次第に大きくなり、RC 接着試験体の各層のばらつきを考慮しても振幅を利用して境界評価を行うことができる。一方、RH10の境界についても正確に評価できるものの、打撃位置5,8,9ではRC 接着試験体とほぼ同様の値を示しているものがあり、誤診を起こす危険性がある。しかし、このような位置については、多方向からの打撃あるいは両側位置の値から剥離の連続性は評価できるものとする。



(a)最大振幅 (剥離寸法3cm)



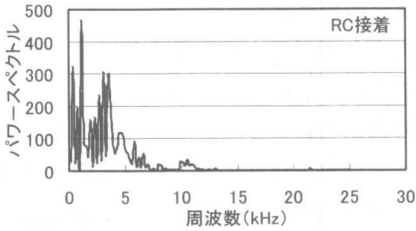
(b)最大振幅 (剥離寸法10cm)

図-7 最大振幅 (RC剥離試験体)

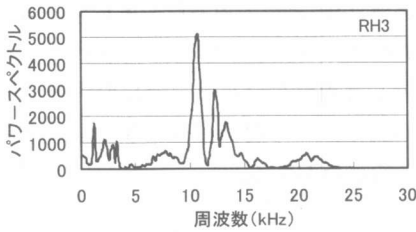
##### 4.2 積層枚数による周波数分布の相違

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FFT解析から周波数への転換を行い、さらに強調した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。このパワースペクトルは、各成分波を強調したもので、有限フーリエ係数の実数部と虚数部を2乗したものである。図-8(a)～(c)は、RC 接着試験体及び剥離試験体の5層目の中央部を打撃して得られた周波数分布である。RC 接着試験体の特徴は、積層数に関係なくいくつか同様なピーク値をもつ広がりのある周波数分

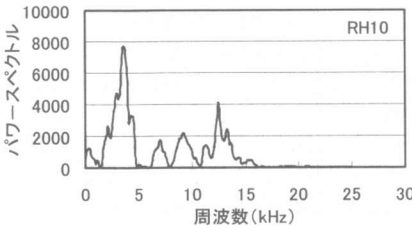
布となっているが、剥離を有する RH3 及び RH10 ではある一つの卓越した周波数が現れ、最大スペクトル値やスペクトル面積の大きさあるいは標準偏差、歪度、尖度などの分布形状差を比較することで両者を精度良く区分できる。



(a) RC接着



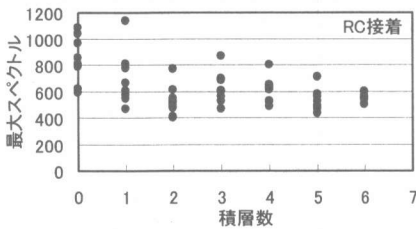
(b) RH3



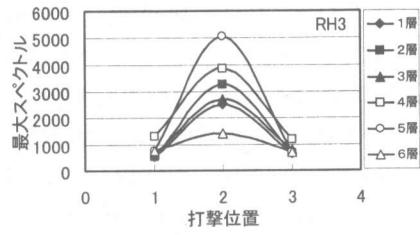
(c) RH10

図-8 周波数分布 (5層中央部)

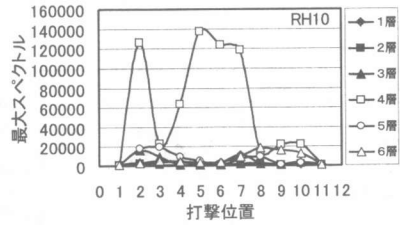
その得られた最大スペクトル及びスペクトル面積を図-9(a)～(c)及び図-10(a)～(c)に示す。接着試験体で得られた値と、図-9及び図-10の(b), (c)をそれぞれ比較することで、剥離寸法を精度良く評価することができる。



(a) RC接着

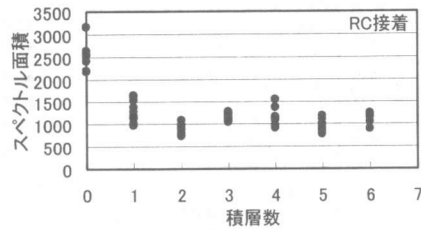


(b) RH3

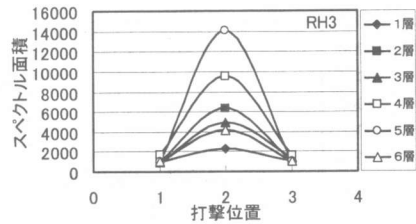


(c) RH10

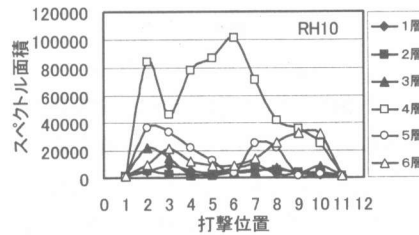
図-9 最大スペクトル



(a) RC接着



(b) RH3

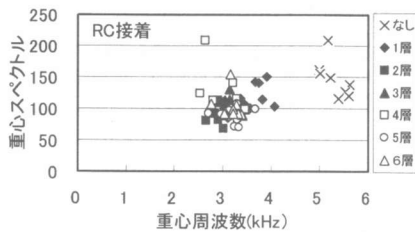


(c) RH10

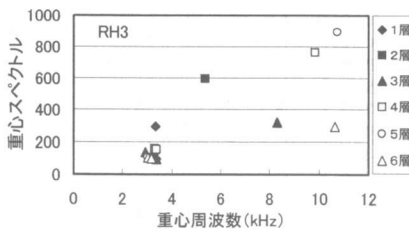
図-10 スペクトル面積

しかし、RH3では5層目が、RH10では4層目がそれぞれ最大値となり、いずれも6層目で

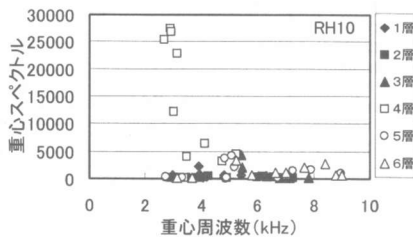
は減少している。特に、図-9(b)に示す RH3 では、5層目まで積層数に比例して最大値も大きくなるが積層数が6層目になると急激に減少している。これは、6層目以上の積層枚数に対しては評価できないということではなく、打撃エネルギーの強弱が問題であり、積層数によって打撃エネルギーを変えなければならないことを示唆している。



(a) RC接着



(b) RH3



(c) RH10

図-11 重心スペクトル

次に、図-11(a)～(c)に重心周波数と重心スペクトルの関係を示す。RC接着試験体の重心周波数は、ほぼ2.5～4.0kHz内ではらついているが、図に示すとおりRH3の中央打撃(打撃位置②)では積層数が増加するにつれ高周波数成分が多くなる傾向にある。一方、RH10についても同様な傾向が見られるが、打撃位置によってはRC接着試験体と同様な周波数を示すものもあり、スペクトルの大きさと形状差から剥

離評価を行う必要がある。

## 5. まとめ

本研究の所見は、以下のとおりである。

- (1) 温度特性曲線の線形の相違により最適な冷却時間が選択できた。
- (2) 温度分布形状より損傷を精度良く検知できる上昇温度が確認できた。
- (3) 打撃法を適用したシートの剥離検知では、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、剥離領域を精度良く評価することができた。
- (4) 剥離寸法 3cm の境界は精度良く評価できるものの、10cm では剥離部中央付近で完全接着した周波数分布と同様な形状を示すものがあり、一方向の打撃のみでは誤診を起す可能性がある。

## 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告集, Vol.18, No.1, pp.1203-1208, 1996.
- 2) 宇佐見惣・長田光司ほか：炭素繊維巻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.
- 3) 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, 日本非破壊検査協会, pp.25-29, 1998.
- 4) 金光寿一・柳内陸人・宮崎蒼士：トンネル内部の環境が及ぼす熱情報への影響と診断手法について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1291-1296, 1999.
- 5) 柳内陸人・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, No442/V-16, pp.91-100, 1992.