

# 論文 非破壊試験法による連続繊維シート補強コンクリートの破壊進展過程の評価

岩波 光保<sup>\*1</sup>・松本 充生<sup>\*2</sup>・富田 芳男<sup>\*2</sup>・大即 信明<sup>\*3</sup>

要旨：本稿では、連続繊維シート補強コンクリートの破壊過程において重要な役割を果たす連続繊維シートの剥離進展過程を非破壊試験法により評価した。赤外線サーモグラフィ法による表面温度分布計測によれば、実際の载荷にともなう剥離進展を適確に捉えることができた。また本手法の妥当性の確認を有限要素法熱伝導解析によりあわせて行った。さらに、剥離進展の常時モニタリングを想定して、AE法による剥離の発生・進展検知手法の可能性についても示した。

キーワード：連続繊維シート補強コンクリート、破壊過程、剥離、赤外線サーモグラフィ、AE

## 1. はじめに

先般の阪神・淡路大震災を契機として、鉄道橋や道路橋の橋脚耐震補強工事が現在盛んに行われている。最近では従来からの鋼板巻立てによるものだけでなく、連続繊維シートを用いた補強工事も行われ、実績をあげている<sup>1)</sup>。この連続繊維シート補強工法は、炭素繊維シートやアラミド繊維シートなどといった高強度・高剛性の連続繊維シートを既存橋脚に対して、常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させながら積層・接着していき、両者を一体化させることにより、橋脚のせん断耐力やじん性を向上させるものである。本工法によれば、施工にあたって大型重機を必要とせず、また使用材料が軽量であることなどから、施工がきわめて容易であるというメリットを有しており、狭所や都市部の過密地域での補強工事において特に威力を発揮する工法であるといえる。

このような補強を施されたコンクリート部材においては、連続繊維シートとコンクリートの一体性が保たれることにより、はじめて補強効果が発揮されるものであり、連続繊維シート-コンクリート間の付着性状が極めて重要な役割

を担っている。これら両者間の付着不良（剥離）は、施工不良や供用中の過大外力や繰返し外力により発生するものと考えられる。このような剥離の発生およびその進展過程を適確に評価することは、補強を施した構造物の耐荷性能や耐久性を考える上で重要なポイントとなる。

既往の報告<sup>2)</sup>によれば、剥離をモデル化した実験を行った結果、剥離進展過程の評価に対する赤外線サーモグラフィ法の適用可能性が示されている。そこで本研究においては、有限要素法熱伝導解析により本評価法の妥当性について確認を行った後、実際の载荷によって生じる剥離の評価を行った。さらに、剥離進展のリアルタイムモニタリングを想定し、AE法による剥離評価手法についても検討を行った。

## 2. 赤外線サーモグラフィ法による剥離評価

### 2.1 熱伝導解析による妥当性の検証

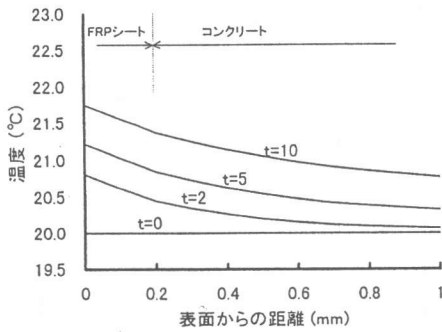
#### (1) 解析の概要

ここではまず、赤外線サーモグラフィ法による剥離評価手法の妥当性を確認するため、式(1)に示す熱伝導の基礎式に基づいて、ガラーキン法を用いて有限要素解析を行った。この際

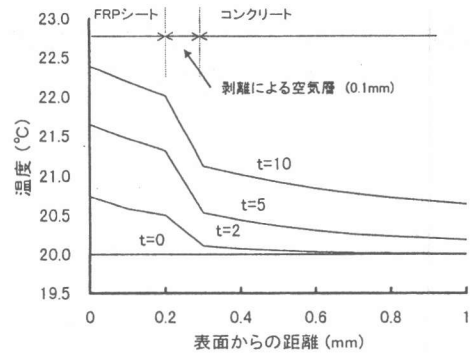
\*1 東京工業大学大学院博士後期課程 理工学研究科土木工学専攻（正会員）  
（日本学術振興会 特別研究員）

\*2 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻

\*3 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科（正会員）



(a) 剥離が存在しない場合



(b) 剥離が存在する場合

図-1 熱伝導解析結果

には、炭素繊維シートとコンクリートの間に剥離部分が存在するケースと存在しないケースについて、シート側から熱量を与えた場合の供試体内部の温度分布の違いについて検討を行った。解析に用いた各材料の諸物性値を表-1に示す。

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、T：温度，k：熱伝導率，c：比熱， $\rho$ ：密度である。

(2) 解析結果および考察

図-1に、剥離の有無が供試体内部の温度分布に及ぼす影響について解析を行った結果を示す。この図は、加熱を行っている間の温度分布の時間変化を示しており、シートとコンクリートの間に剥離が存在する場合、その部分の熱抵抗が他の部分と比較して大きいため、熱の移動が起こりにくくなり、結果的に表面温度が剥離が存在しない場合と比較して高くなっている。このことから、外部から熱を与えた場合に生じる表面温度分布の違いを赤外線サーモグラフィ法により計測することにより、連続繊維シート-コンクリート間の剥離を評価できることが理論的にも確認された。

2.2 剥離進展過程の評価

(1) 実験概要

続いて、炭素繊維シートを接着した供試体の曲げ載荷を行い、その際のシートの剥離進展過

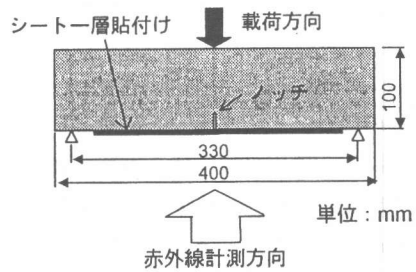


図-2 供試体概要および載荷方法

表-1 解析に用いた諸物性値

| 材料      | 熱伝導率<br>(W/m·K) | 密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 比熱<br>(J/kg·K) |
|---------|-----------------|----------------------------|----------------|
| コンクリート  | 1               | 2000                       | 800            |
| 剥離部分    | 0.02            | 160                        | 1400           |
| 炭素繊維シート | 0.7             | 1500                       | 1000           |

表-2 コンクリートの配合

| W/C | s/a | G <sub>max</sub> | W                    | C   | S   | G   | Ad    |
|-----|-----|------------------|----------------------|-----|-----|-----|-------|
| (%) | (%) | (mm)             | (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |       |
| 65  | 45  | 20               | 228                  | 351 | 723 | 890 | 1.755 |

表-3 炭素繊維シートの諸物性値

| 繊維目付                | 設計厚さ  | 引張強度  | 引張弾性率                | 破断伸度 |
|---------------------|-------|-------|----------------------|------|
| (g/m <sup>2</sup> ) | (mm)  | (MPa) | (MPa)                | (%)  |
| 200                 | 0.111 | 3550  | 2.35*10 <sup>5</sup> | 1.5  |

程を赤外線サーモグラフィ法により評価した。同時にシートに生じるひずみを計測し、ひずみ分布の変化から実際の剥離進展を追跡した。

実験には、図-2に示すように、10\*10\*40 (cm)のコンクリート直方体の1面に炭素繊維

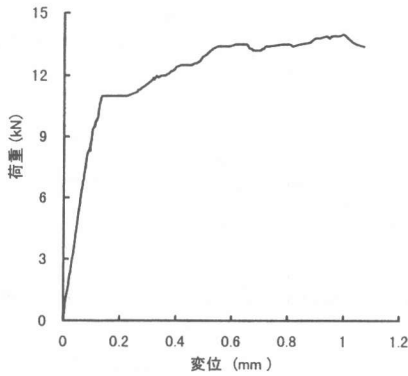


図-3 載荷荷重とスパン中央点変位の関係

シートを接着した供試体を用いた。供試体中央部に高さ1cmのノッチを設けることにより、シートの剥離が供試体中央から進展するように配慮した。用いたコンクリートの配合および炭素繊維シートの諸性質を表-2~3にそれぞれ示す。所定の配合条件のもとでコンクリート中の骨材量を調整するために、コンクリートの単位水量を比較的大きくした。そこでコンクリートの練混ぜに際しては、著しい材料分離を防止するため、セルロースエーテルを主成分とする増粘剤を用いた。また炭素繊維シートのコンクリート表面への接着は、グラインダーによる下地処理およびプライマー処理を行った後、所定の大きさ(8\*26(cm))に切断した炭素繊維シートをエポキシ樹脂を含浸させながら行った。

この供試体に対して、図-2のように、載荷を行うことにより、炭素繊維シート-コンクリート間に剥離を生じさせた。また剥離の進展にともなう炭素繊維シートのひずみ分布の変化を追跡するため、シート上にゲージ長5mmのひずみゲージを等間隔に7ヶ所貼付した。

赤外線サーモグラフィ法による供試体表面の温度分布の計測にあたっては、市販の赤外線計測装置を用いた。主な仕様としては、計測温度範囲-20~300℃、最小検知温度差0.1℃(黒体温度30℃)である。また計測時の赤外線カメラと供試体間の距離は150cmで一定とした。

剥離の有無により表面温度分布に顕著な差を

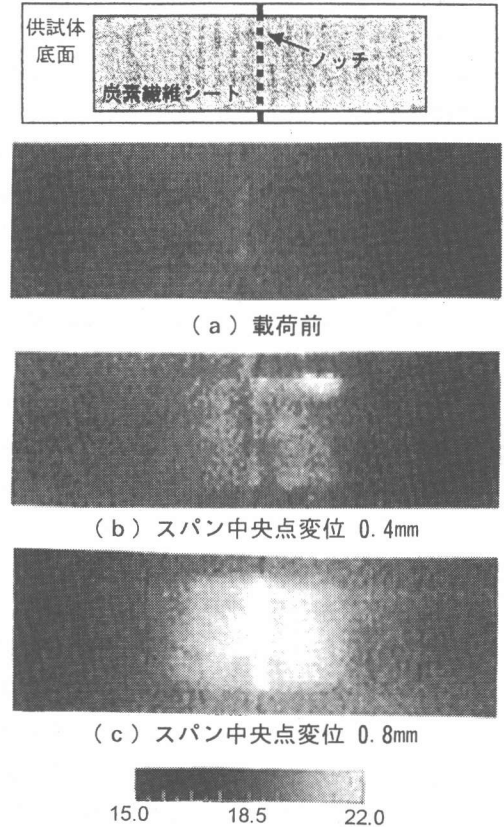


図-4 赤外線計測結果

生じさせるため、ハロゲンランプによる照射を行い供試体表面に対して適当な熱負荷を与えた。用いたハロゲンランプは、消費電力500Wの市販されているものであり、照射時間は10秒とした。また赤外線サーモグラフィ法による表面温度計測は、ハロゲンランプによる加熱終了直後に行った。

## (2) 実験結果および考察

図-3に、曲げ載荷時の載荷荷重-スパン中央点変位関係を示す。このように、炭素繊維シートによる補強効果により、最大荷重到達後も急激な荷重低下を起こすことなく、供試体の変形が進行している。この変形の過程において、炭素繊維シート-コンクリート間の付着破壊が発生し、供試体中央のノッチ付近から剥離が進展していくものと考えられる。この剥離進展状況を赤外線サーモグラフィ法により追跡した結

果を図-4に示す。これらは、それぞれ載荷前、スパン中央点変位 0.4mm および 0.8mm の時点における計測結果である。このように、供試体中央付近に著しい温度上昇部分が存在し、その左右に温度上昇が認められる領域が広がっている。この温度上昇領域はスパン中央点変位の増大にともなって大きくなっており、剥離進展過程を適確に捉えているものと考えられる。

このことを実証するため、載荷中に炭素繊維シートに生じたひずみの計測結果を図-5に示す。この図において、シートの位置はスパン中央点から供試体軸方向の距離に対応している。炭素繊維シート-コンクリート間に剥離が発生すると、その鉛直断面に作用する引張力はすべて炭素繊維シートが分担することになるため、炭素繊維シートに生じるひずみは急激に大きくなる。この図から明らかなように、スパン中央点変位が増加するにつれて、大きなひずみを生じている領域が左右に広がっていき、剥離が進展していく様子が確認できる。さらに、変位が 1.2mm の段階におけるシート上のひずみ分布と表面温度分布の比較を図-6に示す。このように、剥離の発生に起因してひずみが大きくなっている領域においては、表面温度も高くなっていることがわかる。したがって、連続繊維シート-コンクリート間の剥離進展過程を赤外線サーモグラフィ法による表面温度分布計測を行うことにより評価できることが明らかとなった。

さらに、表面温度分布の計測結果において、供試体中央に著しく温度が高い部分が存在している。これは、コンクリートに設置したノッチに相当する箇所であり、連続繊維シート補強コンクリート部材におけるコンクリートひび割れの検出手法としての赤外線サーモグラフィの可能性を示唆している。

### 3. A E 法による剥離進展モニタリング

#### 3.1 実験概要

ここでは、連続繊維シート補強コンクリート構造物の常時モニタリングを行う場合に最適な

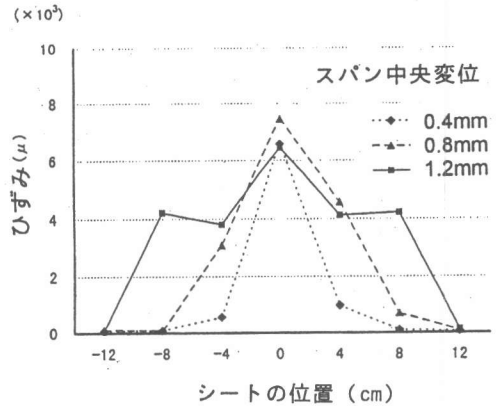
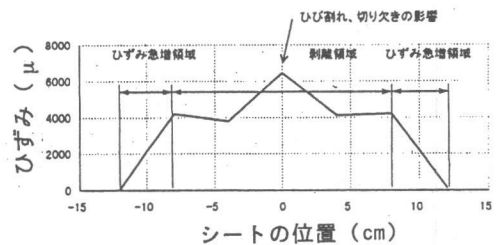
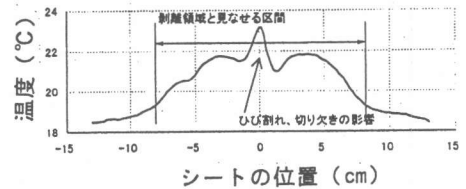


図-5 シート上のひずみ分布



(a) ひずみ分布



(b) 表面温度分布

図-6 ひずみ分布と表面温度分布の比較

手法である A E 法をとりあげ、A E 計測による剥離進展モニタリングについて検討を行った。その際には、検出される様々な A E 信号の中から、剥離の発生・進展に起因するものを抽出することが必要となる。そこで本研究では、その第一歩として、シートの剥離に起因する A E とコンクリートのひび割れに起因する A E を識別する手法について検討を行った。

#### (1) 供試体概要

シートの剥離とコンクリートのひび割れに起因する A E の発生特性の違いについて明らかにするため、梁の曲げ載荷中に発生する A E の計測を行った。用いた梁供試体は、無補強のもの

（「補強なし」）と梁底面に炭素繊維シートを1枚接着したもの（「補強あり」）の2種類であり、寸法はいずれも15\*15\*125(cm)である。用いたコンクリートの配合および炭素繊維シートの諸性質は前章のものと同一であり、配筋については主鉄筋にD16を2本用い、スターラップ（16本）を曲げ区間を除いて6cm間隔で配置し、梁のせん断破壊を防止した。

曲げ载荷中には、後述するAE計測だけでなく、スパン中央点変位についても計測を行い、载荷荷重の増大にともなう梁の力学挙動の変化を追跡した。

## (2) AE計測

供試体内部で発生したAEは、梁上面の端部に貼付した150kHz共振型センサにより検出され、プリアンプにて40dB、メインアンプにて40dBの合計80dBの増幅処理を行った後、AE計測システムにおいて解析・記録された。またしきい値は45dBに設定した。

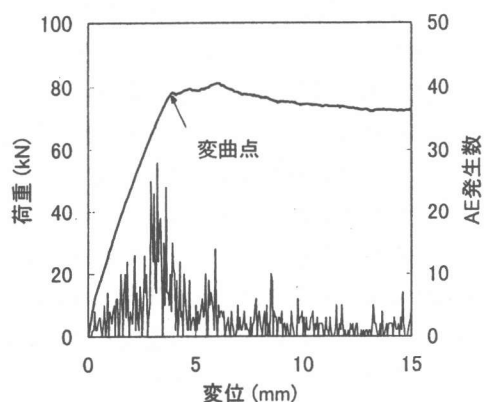
AE計測結果の整理にあたっては、リアルタイムでの解析・記録が可能で、生じている破壊現象を迅速に評価できるAE波形パラメータを用いた。この波形パラメータ解析は、原波形解析のように棄却されるデータがほとんどなく、実用上極めて有効な手法であるといえる。

## 3.2 実験結果および考察

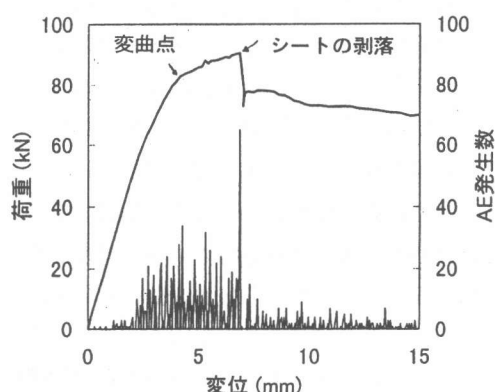
### (1) 梁の曲げ破壊過程の評価

図-7に、2本の梁供試体に対するAE計測結果を载荷荷重-スパン中央点変位関係とともに示す。「補強なし」供試体の場合、载荷初期からAEの発生が認められ、変位が約3mmのときにピークを迎えている。これらのAEは、コンクリートのひび割れに起因するものが支配的であるものと考えられる。そして、変位が4mmの段階で鉄筋が降伏し、梁の変形が急速に進んでいる。

一方、「補強あり」供試体の場合、変位が4mmのところ荷重-変位曲線が変曲点を迎えており、「補強なし」供試体の結果を考慮すると、この時点で鉄筋が降伏したものと考えら



(a) 「補強なし」供試体



(b) 「補強あり」供試体

図-7 AE計測結果

れる。しかしながら、炭素繊維シートの補強効果により、梁の変形が急速に進むようなことはなく、若干の最大荷重の上昇がみられる。そして、変位が7mmに達すると荷重が急激に低下し、同時にAEも多数発生している。これは、目視観察の結果から判断して、シートの剥落に相当している。これ以降は、シートの補強効果が期待できないため、「補強なし」供試体と同様の挙動を示している。

(2) シートの剥離に起因するAEの波形特性  
続いて、連続繊維シート-コンクリート間の剥離に起因するAEとコンクリートのひび割れに起因するAEの発生特性の違いについて検討を行った。この際には、「補強なし」供試体のAE計測結果において、そのピーク近傍において検出されたAEをコンクリートのひび割れに

起因するものとし、また「補強あり」供試体のピーク近傍において検出されたAEをシートの剥離に起因するものとして解析を行った。図-8に、両者のAEについて、平均周波数<sup>3)</sup>(カウント数の継続時間に対する比、図-9参照)の頻度分布を求めた結果を示す。これより、シートの剥離に起因するAEの平均周波数はひび割れに起因するものより低い傾向にあることがわかる。これは、それぞれの破壊の進展速度の違いがもたらしたものであると考えられ、コンクリートの様々なひび割れについて同様の解析を行った結果<sup>4)</sup>ともよく一致している。

さらに、「補強あり」供試体において、AEの発生がピークを迎える前に検出されたAEについても同様に、平均周波数の頻度分布を求めた結果を図-8にあわせて示す。このように、AE波形の周波数特性は剥離に起因するものとひび割れに起因するものの両方の特性が含まれている。これは、鉄筋降伏以前においては、コンクリートのひび割れに起因するAEが主に発生し、また鉄筋降伏～シートの剥離の段階においてはシートの剥離に起因するAEや鉄筋-コンクリート間の付着ひび割れなどが卓越して発生したことによるものと考えられ、実現象とよく対応している。また、ここで用いた平均周波数は、使用するAEセンサの周波数特性に大きく影響されるものであるが、本実験においてはすべてのケースにおいて同一のセンサを用いているため、その影響は小さいものと考えられる。

以上より、検出されたAE信号の平均周波数に着目することにより、連続繊維シートの剥離に起因するAEを識別することができることが明らかとなった。

#### 4. まとめ

本稿においては、連続繊維シート補強コンクリートの破壊過程において、重要な役割を果たすシートの剥離進展過程を各種非破壊試験法により評価した。その結果、赤外線サーモグラフィ法による表面温度分布計測を行うことにより、

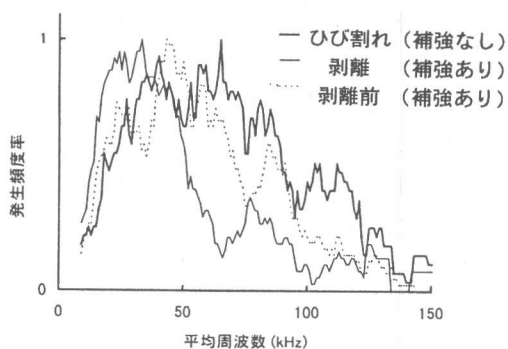


図-8 平均周波数の頻度分布

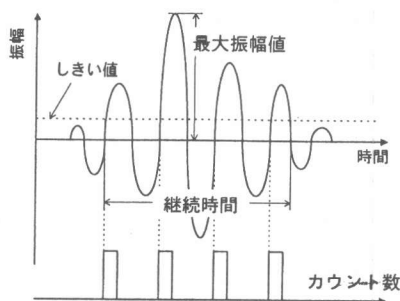


図-9 AE波形パラメータ

シートの剥離進展過程を捉えることが可能であり、また、リアルタイムモニタリングを想定したAE計測によれば、検出されたAE信号の平均周波数に着目することにより剥離の発生を検知できる可能性があることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書，1997.7.
- 2) 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, 1996.6.
- 3) 駒井謙治郎・箕島弘二・渋谷豊茂：一方向強化炭素繊維/エポキシ樹脂複合材料の引張破壊特性とAE波解析，日本機械学会論文集（A編），Vol.56, No.528, pp.72-79, 1990.8.
- 4) 岩波光保・鎌田敏郎・長瀧重義：AE法による鉄筋コンクリート梁のひび割れ種類の識別，非破壊検査，Vol.47, No.3, pp.207-212, 1998.3.