

# 繊維シート補強コンクリートはりのAEモーメントテンソル解析による破壊過程および補強効果の定量的評価

湯山茂徳<sup>1</sup>・李正旺<sup>2</sup>・大沢勇<sup>3</sup>・金原勲<sup>4</sup>・影山和郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 日本フイバコーポレーション(〒150-0011 東京都渋谷区東 2-17-10 岡本 LK ビル 8F)

<sup>2</sup>工博 日本フイバコーポレーション(〒150-0011 東京都渋谷区東 2-17-10 岡本 LK ビル 8F)

<sup>3</sup>東京大学助手 工学系研究科環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>4</sup>工博 東京大学教授 工学系研究科環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>5</sup>工博 東京大学教授 工学系研究科環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

切欠き付き繊維シート補強コンクリートはり供試体に対して中央点載荷曲げ試験を行い、検出される AE 信号を解析して、破壊過程および補強効果を定量的に評価した。モーメントテンソル解析により、破壊は三つの段階で進行し、破壊モードは、切欠き先端付近の小さな領域に発生するクラック、主クラックの進展、引張応力側から切欠き先端に向かって 45° 方向に発生・進展する斜めクラック、さらに補強繊維シートとコンクリート接着界面近くに発生する下部クラックに分類されることが明らかになった。また繊維シート接着による補強効果で、クラック発生荷重、および破壊第一段階の最大荷重が大きく増大することが示された。

**Key Words :** *acoustic emission, fiber reinforced plastic sheet, fracture process, moment tensor analysis, reinforcing effect, quantitative evaluation*

## 1. 緒言

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震により多数の鉄筋コンクリート橋脚に甚大な被害が生じた。これらの復旧工事や、その後の耐震補強工事の多くには、鋼板巻立て工法などの従来工法が用いられているが、より簡便で効果的な補強工法が望まれている。こうした中で、新しい耐震補強工法の一つとして、炭素、アラミド、ガラスなどの繊維シートを用いた補強法が注目されている<sup>1)</sup>。これは、現場施工により、コンクリート表面に繊維シートを貼り、エポキシ系の含浸樹脂を塗布して複合化させるという補強工法である。

繊維シートによる補強工法の特徴は、軽量(鋼材の比重の約 1/5)であるため、補強による重量増が小さいこと、高強度(鋼材降伏強度の約 10 倍)であるため、補強前後の部材の形状変化が少ないこと、ほとんどの環境で耐食性に優れていること、また貼

るだけという簡単な施工であるため熟練を必要とせず、重機なども不要であり、狭空間での作業が可能であること、などがあげられる。これらの特徴をもとに、今後さらに多くの適用が期待されている<sup>2)</sup>。

こうした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初めて補強効果が発揮される。したがって、載荷時において繊維シートとコンクリート間の付着状況や、部材全体の破壊進行過程を的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把握する上で、極めて重要である。

ところで、固体内で生ずる局所的微小変化に起因する弾性波を検出・解析する AE 法<sup>3)</sup>は、クラックの発生や進展に敏感なため、多くのコンクリート供試体や実構造物で適用されている<sup>4)</sup>。AE 法には、検出された信号に信号処理を行い、その強度や発生頻度の相対的比較を行うパラメータ解析と、6 個以上の波形からなる波形セットに弾性波動理論を適用

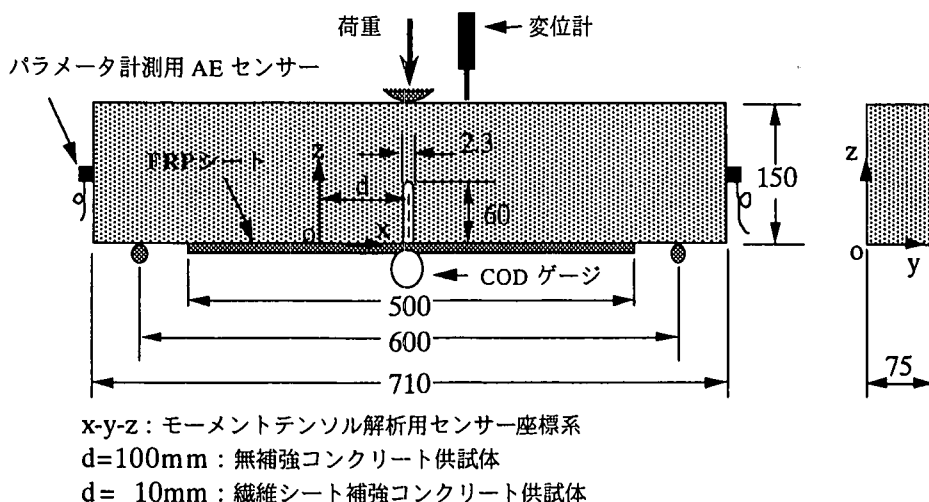


図-1 供試体の形状および AE センサー位置 (単位: mm)

表-1 コンクリートの配合、および圧縮・引張強度

| 水セメント比<br>W / C (%) | 細骨材率<br>s / a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |
|---------------------|-------------------|--------------------------|------|-----|-----|
|                     |                   | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 55                  | 45                | 176                      | 318  | 818 | 988 |
| 引張強度: 3.6MPa        |                   | 圧縮強度: 26.6MPa            |      |     |     |

し、AE 源となるクラックの種類、方向、また運動の方向などを定量的に評価するモーメントテンソル解析<sup>5)</sup>の2種類がある。

このうち、パラメータ解析は、古くから一般的に用いられてきた手法であり、クラックの発生や破壊の進行過程を定性的に評価することを目的に、広く用いられている。一方、モーメントテンソル解析は、クラックの発生状況を可視化し、さらに破壊進行過程を定量的に評価する手法として、各種コンクリート供試体<sup>6),7)</sup>や部材<sup>8)~10)</sup>において、近年広く適用されるようになった。

本研究では、一方向繊維シートで補強した切欠き付きコンクリートはりに対して中央点載荷曲げ試験を行い、破壊進行過程を AE モーメントテンソル解析を適用して定量的に評価し、さらに使用した補強材の補強効果について検討した結果を報告する。

## 2. 試験方法

### (1) 供試体

本研究では、片側切欠き付コンクリートはり供試

体を3体用いた。供試体の寸法は RILEM 試験法<sup>11)</sup>に準じたものであり、図-1にその形状が示されている。また、表-1にコンクリートの配合、および圧縮・引張強度がまとめられている。3体の供試体において、補強条件として、(1)一方向の CFRP (カーボン繊維) シート 1 層で補強したもの、(2)一方向の GFRP (ガラス繊維) シート 1 層で補強したもの、および(3)無補強のものを用意した。使用した繊維シートの諸物性値が、表-2に与えられている。補強した供試体では図-1に示されるように繊維シートを、コンクリートはりの引張応力側へ接着積層した。本試験における AE センサーの配置が、図-1と表-3に示されている。

### (2) 載荷方法

写真-1に、曲げ試験の実施状況が示されている。供試体への載荷は、定変位型万能試験機を用い、専用曲げ治具を介して行われた。供試体と、支点および載荷点との接点3箇所には、厚さ 0.2mm のポリプロピレンフィルムを1枚挿入した。これはプラスチック系複合材料の曲げ試験でよく用いられる手法で、支点および載荷点直下の応力集中を分散させる

表-2 使用した繊維シートの諸物性値

|       | 単 位              | カーボン繊維シート          | ガラス繊維シート           |
|-------|------------------|--------------------|--------------------|
| 繊維目付量 | g/m <sup>2</sup> | 200                | 300                |
| 設計厚さ  | mm               | 0.111              | 0.118              |
| 引張強度  | MPa              | 3446               | 1496               |
| 弾性係数  | MPa              | $2.29 \times 10^5$ | $7.23 \times 10^4$ |
| 破断伸度  | %                | 1.5                | 2.1                |

表-3 モーメントテンソル解析用 AE センサー配置

| CH | 繊維シート補強供試体 |       |       |      |      |      | 無補強供試体 |       |       |      |      |      |
|----|------------|-------|-------|------|------|------|--------|-------|-------|------|------|------|
|    | 位置 (m)     |       |       | 方向余弦 |      |      | 位置 (m) |       |       | 方向余弦 |      |      |
|    | x          | y     | z     | x    | y    | z    | x      | y     | z     | x    | y    | z    |
| 1  | 0.180      | 0.008 | 0.000 | 0.0  | 0.0  | -1.0 | 0.000  | 0.055 | 0.000 | 0.0  | 0.0  | -1.0 |
| 2  | 0.030      | 0.075 | 0.010 | 0.0  | 1.0  | 0.0  | 0.200  | 0.020 | 0.000 | 0.0  | 0.0  | -1.0 |
| 3  | 0.000      | 0.000 | 0.140 | 0.0  | -1.0 | 0.0  | 0.000  | 0.020 | 0.150 | 0.0  | 0.0  | 1.0  |
| 4  | 0.110      | 0.038 | 0.150 | 0.0  | 0.0  | 1.0  | 0.200  | 0.055 | 0.150 | 0.0  | 0.0  | 1.0  |
| 5  | 0.160      | 0.075 | 0.120 | 0.0  | 1.0  | 0.0  | 0.050  | 0.075 | 0.130 | 0.0  | 1.0  | 0.0  |
| 6  | 0.110      | 0.000 | 0.030 | 0.0  | -1.0 | 0.0  | 0.150  | 0.000 | 0.130 | 0.0  | -1.0 | 0.0  |

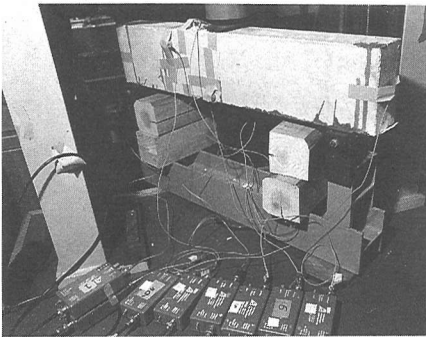


写真-1 曲げ試験の実施状況

ことにより、治具と供試体との間に生ずる摩擦雑音を軽減・除去することが可能となる。また、載荷時のクロスヘッド変位速度は、全試験を通して毎分1mmであった。

### (3) AE計測法

AE計測は、デジタル信号処理AEボードを装着したMISTRASシステム(PAC社製)2台で行った。通常のAEパラメータ計測には2チャンネルのシステムを使用し、モーメントテンソル解析には、6個以上の波形で構成される波形セットが必要となるため、6チャンネルのシステムを用いた。AEセンサ

ーとして、PAC R15(150kHz共振型)を真空シール用オイルコンパウンドを介して、写真-1および図-1に示すように供試体の表面に接着力の強い布テープで固着した。クラック進展にともなって発生するAE波は8個のAEセンサーで検出され、プリアンプで40dB増幅後、MISTRASシステムに入力される。モーメントテンソル解析を行うには、そのうち6チャンネル分の波形信号を、適切なしきい値に設定した主チャンネルからのトリガー信号により、全チャンネル同時に収録してAE波形セットを作成する。こうして得た波形データセットに対して大津・重石が開発したSiGMAコード<sup>6),12)</sup>を適用して解析を行った。本研究においてしきい値は50dBに設定し、サンプリング速度は2MHz、サンプリング長さは2kワードであった。なお、コンクリートは供試体の弾性波伝播速度は4000m/secであった。

### (4) モーメントテンソル解析

固体中の点yにおけるクラック発生による検出点xでのAE波動 $u_i(x,t)$ は、クラックベクトル $b(y,t)$ をクラック面上(ただし法線ベクトルを $n$ として)で定義すると、

$$u_i(x,t) = \int_S G_{ip,q}(x,y,t) * C_{pqki} b_k(y,t) n_i dS \quad (1)$$

と与えられる<sup>3)</sup>。ここでクラックベクトル $b_k(y,t)$

を運動の大きさ  $b$ 、運動方向  $l_k$ 、そして発生時間関数  $S(t)$  と分離すれば、クラックの幾何情報を表示するテンソルとして、次のようなモーメントテンソル  $m_{pq}$  が定義される。

$$m_{pq} = C_{pqk} l_k n_i \int_S b(y) dS \quad (2)$$

したがって式(1)は、

$$u_i(x,t) = G_{ip,q}(x,y,t) * m_{pq}(y) * S(t) \quad (3)$$

と書き換えられる。

さて、多量の AE 波形処理が容易なように、時間項を分離してモーメントテンソル成分を線形連立方程式から求める SIGMA コード<sup>12)</sup> にしたがえば、式(3)において、P 波初動に関係する項のみを時間項を除いて取り出し、グリーン関数には無限体の解を用いると検出点  $x$  での P 波初動の振幅値  $a(x)$  は、

$$a(x) = C \cdot \text{ref}(r_i) \cdot r_p r_q / R \cdot m_{pq}(y) \quad (4)$$

と表される。ここで  $C$  はセンサー感度も含めた物性値の係数、 $R$  はクラック発生点  $y$  から検出点  $x$  への距離であり、 $r_i$ 、 $r_p$ 、 $r_q$  はその方向余弦を意味する。また  $\text{ref}(r_i)$  は、センサー設置点での反射を考慮した検出点への入射角に依存する反射係数である。これにより、無限解を用いながら、半無限解に対する場合の処理が行える。

式(4)において、三次元位置標定により、クラックの発生位置が決定されていれば、右辺は  $m_{pq}$  を除いて、全てわかっている項である。したがって、モーメントテンソルは 2 階の対称テンソルであることから、少なくとも 6 箇所の検出点で得た P 波初動振幅値を左辺に代入して得られる連立方程式を解くことにより、モーメントテンソル成分を求めることができる。

こうして得たモーメントテンソルの固有値を求め、さらに引張型クラックとせん断型クラックでは、3 個の固有値に特徴ある差異が存在することに基づいた解析を行うことにより、AE 源となったクラックの種類、傾きの方向、運動の方向を決定することができる。

すなわち、固有値分解により、せん断型クラックにおいて主軸方向の最大値を  $X$  とすると、固有値として  $(X, 0, -X)$  が得られる。一方、引張型クラックの場合、引張成分は、もともと主軸の方向と一致しているので、その偏差成分は  $(Y, -0.5Y, -0.5Y)$

と与えられ、また引張成分のうち平均値の等方成分は、 $(Z, Z, Z)$  で表される。ここで、対象となる AE 源が、引張型およびせん断型の混合していることを仮定すると、第 1(最大)固有値で正規化された、以下の固有値分解式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 1.0 &= X + Y + Z \\ \text{第 2 固有値} / \text{第 1 固有値} &= 0 - 0.5Y + Z \\ \text{第 3 固有値} / \text{第 1 固有値} &= -X - 0.5Y + Z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

したがって、固有値が得られれば式(5)の比率  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  の決定は容易なため、これによりせん断型の寄与率： $X$  と、引張型の寄与率： $Y + Z$  を求めることができる。ここで純せん断型クラックの場合、 $b$  と  $n$  は垂直であり、 $X$  は 100% となる。一方、純引張型のクラックでは、 $b$  と  $n$  は同一方向を示し  $X$  は 0% となる。このようにして、AE 源(クラック)は、引張型 ( $X \leq 40\%$ )、中間型 ( $40\% < X < 60\%$ )、あるいはせん断型 ( $60\% \leq X$ ) に分類できる。

この解析法の特徴は、式(4)においてモーメントテンソル成分の決定は相対値でよいということである。このことは、AE 検出システムの感度特性に関係して、理論波形解析で一般に必要とされるような絶対感度校正は必要ではなく、等価な感度が保証されているか、そうでなければ試験後に感度補正が可能であればよいことを意味している。

### 3. 試験結果

#### (1) パラメータ解析によるクラック発生荷重および破壊靱性 $K_{Ic}$ の評価

材料の破壊靱性試験では、一般的に荷重-クラック開口変位曲線における非線形挙動の開始点として、5% オフセット値に対応する荷重を初期クラック発生荷重と定義している<sup>13)</sup>。しかしながら、繊維シートで補強された片側切欠き付コンクリートは供試体の場合には、その複合的特性により、荷重-クラック開口変位曲線から、クラック発生荷重を直接的かつ安定的に評価することは困難である。そこで、AE パラメータ解析により、AE 信号の検出数が急増する荷重値を、クラック発生荷重と定めることにした。

図-2 に一例として、無補強コンクリート供試体で得られた AE ヒット計数率、および荷重の履歴が示されている。ここで AE 信号が連続的に検出され、かつ指数関数的に増加し始める荷重値を、クラック

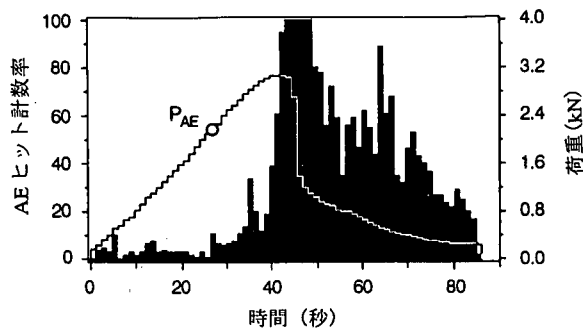


図-2 AE ヒット計数率および荷重の履歴

表-4 クラック発生荷重  $P_{AE}$  と破壊靱性  $K_{Ic}$

|                           | CFRP シート補強 | GFRP シート補強 | 無補強   |
|---------------------------|------------|------------|-------|
| $P_{AE}$ (N)              | 6220       | 3860       | 2350  |
| $K_{Ic}$ (MPa $m^{1/2}$ ) | 0.499      | 0.424      | 0.595 |

発生荷重  $P_{AE}$  と定めた。さらに  $P_{AE}$  を用い、繊維シートとコンクリートの境界における接着が完全であると仮定し、二次元平面ひずみ条件下で、有限要素法により、切欠き先端における平面ひずみ破壊靱性  $K_{Ic}$  を計算した<sup>14)</sup>。表-4に、コンクリート供試体、CFRP シート補強供試体、GFRP シート補強供試体でそれぞれ得た  $P_{AE}$ 、および  $K_{Ic}$  がまとめられている。この結果より、 $P_{AE}$  は繊維シート補強供試体の方が、無補強供試体に比べ 1.6 倍 (GFRP 補強) から 2.6 倍 (CFRP 補強) 程度大きいことがわかる。しかしながら、 $K_{Ic}$  において、各供試体間の差はせいぜい  $\pm 20\%$  程度であり、 $P_{AE}$  の場合に比べ、条件の違いによる差は小さい。これは、繊維シートの補強効果により、 $P_{AE}$  は補強供試体で見かけ上大きく増大するが、クラック発生時に切欠き先端で実際に働く荷重は、各供試体間で大きな差がないことによると考えられる。以上の結果から、繊維シートによる補強はクラック発生荷重 ( $P_{AE}$ ) を大きく増加させるが、材料特性値の一つである  $K_{Ic}$  には、ほとんど影響を及ぼさないことが示された。

## (2) モーメントテンソル解析

### a) 無補強供試体

表面クラック進展状況の目視観察結果により、破壊は最大荷重 (約 3060N) に至る第一段階 (この間供試体表面に明確な主クラックの進展は認められない。) と、それ以降急速にクラックが進展し終局破壊に至る第二段階に分けられることが確認された。

図-3に、無補強コンクリートはり供試体の、モーメントテンソル解析結果が示されている。ここで、

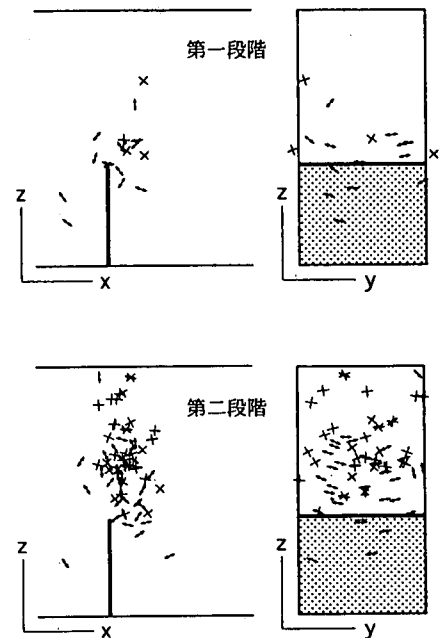


図-3 無補強コンクリート供試体のモーメントテンソル解析結果

両矢印 ( $\leftrightarrow$ ) は引張型クラック (せん断率  $X$  が 40%以下) を表し、その方向がクラック開口方向と一致している。またせん断型クラック (同 60%以上) はクロス (+) で表され、そのクロスの一方向がせん断の方向を与えている。さらに中間型クラック (同 40 ~ 60%) は、両者の合成として示されている。

無補強供試体において、目視観察結果に対応して、破壊は図-3に示されるように、二つの段階で進行する。すなわち第一段階は、最大荷重に到達するまでに観察されるもので、図に示されるように、クラックは大部分切欠き先端の比較的狭い領域内で発生している。また第二段階は、最大荷重到達後、供試体が最終破壊するまでに観察される。この場合、クラック発生は切欠き先端部より上方へ急速に移動し、主クラックを形成し、やがて終局破壊に至る。

#### b) 繊維シート補強供試体

表面クラックの目視観察結果によれば、破壊は三つの段階で進行する。それらは、主クラックの明確な進展は認められないが、切欠き先端付近で微小クラックが発生していると考えられる第一段階、切欠き先端より主クラックが進展し始めるとともに、供試体下部から中心部に向かって斜め上方向へクラックが発生・進展し、さらに供試体中央付近の下部でクラックが発生する第二段階、また主クラックの進展は終了し、繊維シートとコンクリートの境界付近のコンクリート内で、斜めクラックの発生した付近から載荷支点方向に向かってクラックが進展する第三段階である。

図-4に、繊維シート補強供試体の、破壊進行全過程で得られたモーメントテンソル解析結果が与えられている。上図は CFRP シート補強供試体の、また下図は GFRP 補強供試体の結果である。

図中でクラックは、その発生・進展の位置から大まかに(1)切欠き先端から供試体上部へ進展するもの、(2)切欠き先端に向かって、供試体下部から斜め上方向へ発生・進展するもの、(3)引張応力側のコンクリート下部に発生するもの、以上の三種類に分類される。

表面クラックの目視観察結果と対応して観察すると、破壊は図-5に示されるように進行する。すなわち、第一段階において、クラックは切欠き先端部の比較的近い領域のみで発生している。この場合、供試体下部にクラックは全く発生せず、図-3と比較することにより、無補強供試体の破壊進行第一段階におけるクラック発生挙動と類似していることがわかる。

第二段階において、クラックは切欠き先端から上部の、供試体表面近くでも発生するようになり、主クラックの進展が推測される。さらに供試体下部から中心部へ斜め上方向にクラックが発生・進展し、また供試体の下部中央付近でも発生するようになる。この時、供試体下部に生ずるクラックは、シート補強材とコンクリートの接着面ではなく、はり下部のコンクリート中に発生している。この段階で、繊維

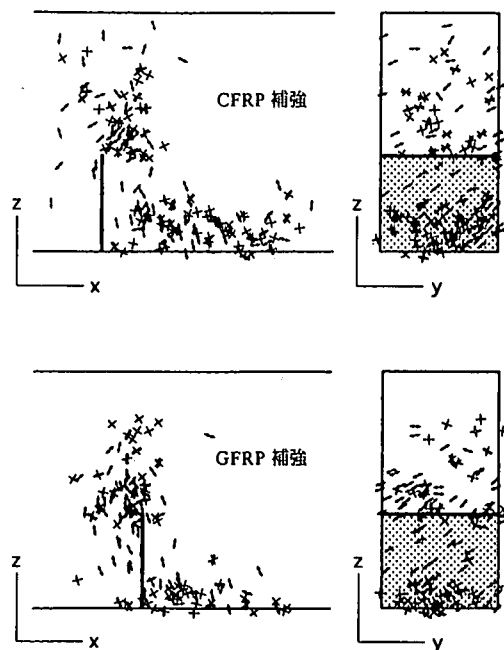


図-4 繊維シート補強供試体の破壊全過程におけるモーメントテンソル解析結果

シート補強材による切欠き先端の主クラックに対する拘束効果は、徐々に低下していると考えられる。

第三段階では、切欠き先端上部に、ほとんどクラックは発生せず、供試体下部のみで発生している。したがって、切欠き先端から生ずる主クラックの進展は、この時点で終了していると考えられる。また供試体下部のクラック発生は、斜めクラックの発生した付近から、載荷支点方向へと移動していた。

図-6に、それぞれの供試体に対する荷重履歴が示されている。CFRP シート補強供試体において、表面クラックの目視観察結果により、破壊過程の第一段階は、図中の C ①点（荷重約 6940N）までに、第二段階では C ①から C ②点（同 6940N ～ 9800N）に、また第三段階は C ②点（同 9800N）以降にそれぞれ対応している。一方、GFRP シート補強供試体では、第一段階は G ①点（荷重約 5600N）までに、第二段階は G ①から G ②点（同 5600N ～ 8300N）に、また第三段階は、G ②点（同 8300N）以降に対応している。

写真-2に、試験終了後に得られた繊維シート補強供試体の表面観察結果が与えられている。切欠き先端より生じた主クラック、および  $45^\circ$  斜め方向に生じたクラックが明瞭に認められる。これらは、図-4に与えられるモーメントテンソル解析結果で

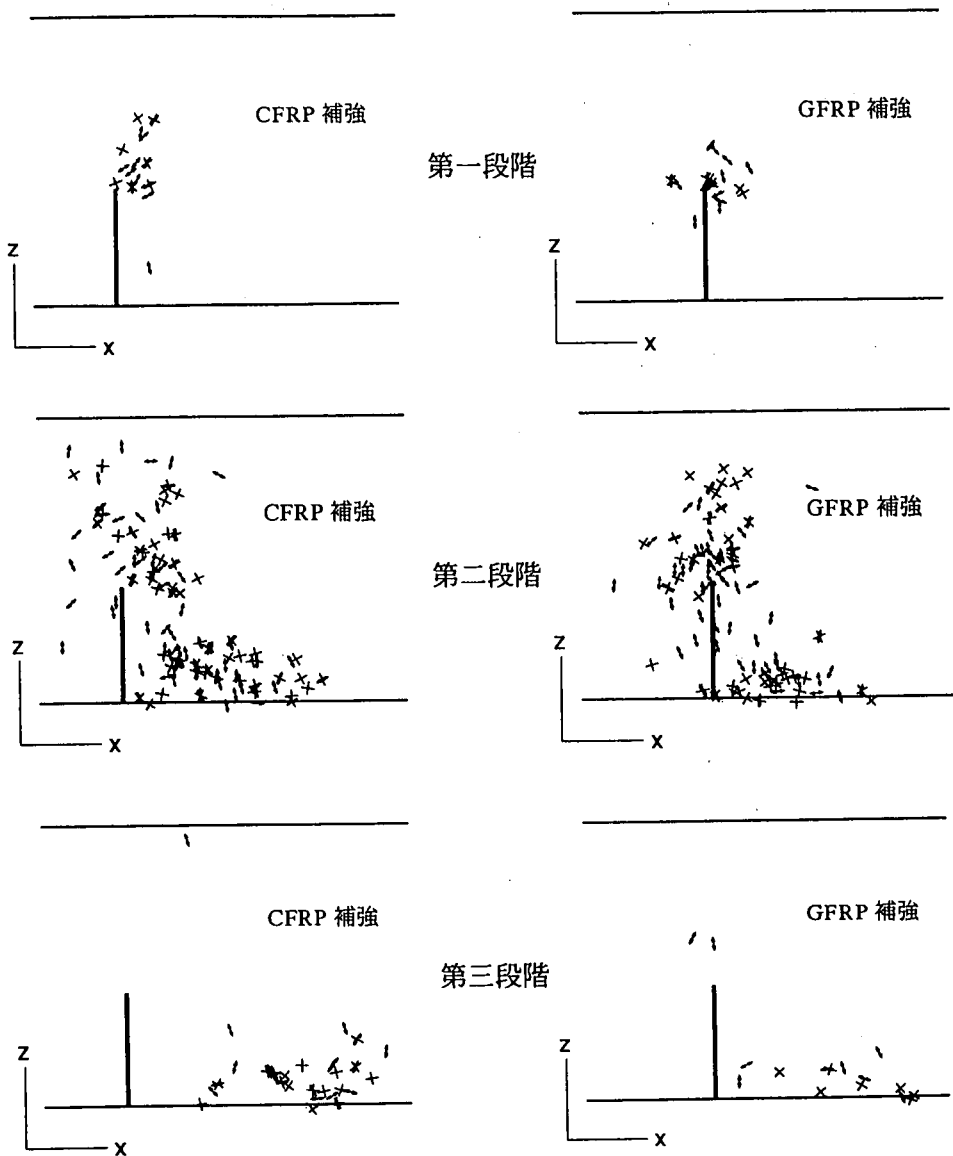


図-5 繊維シート補強供試体の各破壊段階におけるモーメントテンソル解析結果

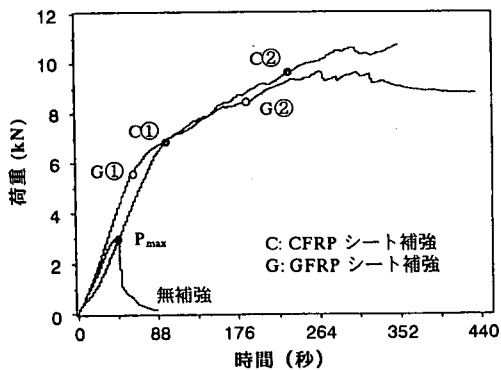


図-6 各供試体の荷重履歴

得たクラック発生位置、および方向に、ほぼ対応している。

表-5に、各供試体において、それぞれの破壊進行段階で得た、せん断型クラックの検出比率が与えられている。無補強供試体、繊維シート補強供試体を問わず、検出比率は、破壊過程の第一段階でほとんど同じである。この事実と、図-3および図-5に示される結果、すなわちクラック発生領域は切欠き先端付近に限定され、発生状況も極めて類似しているという事実から、第一段階のクラック進展は、補強、無補強を問わず同一の機構で生じたものと考えられる。

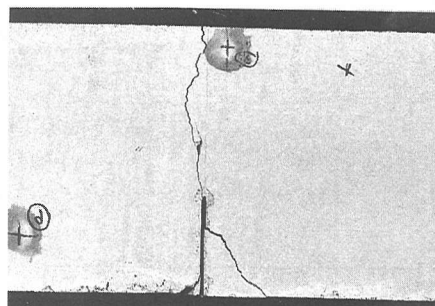
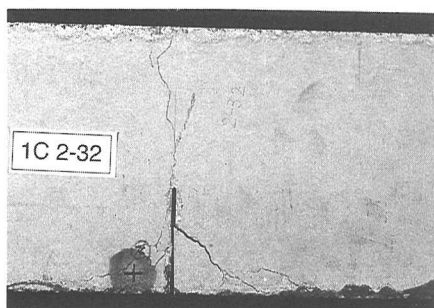


写真-2 試験終了後の繊維シート補強供試体の表面観察結果  
(左：CFRP シート補強，右：GFRP シート補強)

表-5 各破壊段階で得たせん断型クラックの検出比率

| 供 試 体      | せん断型クラック検出比率 (%) |      |      |
|------------|------------------|------|------|
|            | 第一段階             | 第二段階 | 第三段階 |
| 無 補 強      | 22               | 39   | -    |
| CFRP シート補強 | 20               | 26   | 38   |
| GFRP シート補強 | 21               | 28   | 48   |

一方、破壊の第二段階にはいると、無補強供試体と、繊維シート補強供試体の間で、せん断型クラック検出比率に大きな差が生じる。すなわち、比率は無補強の場合、17%増加するのに対し、補強供試体では6～7%の増加にとどまっている。無補強供試体で、検出比率が大きく増加する理由は、最大荷重到達後、第二段階に入り、主クラックが急速に進展して終局破壊に至る過程で、せん断型クラックの発生率が増加することによって考えられる。他方、補強供試体で検出比率の増加が小さいのは、主クラックの進展に加え、45°方向斜めクラックが進展するため、それにとまう引張型クラックの発生が寄与していると推察される。

さらに、繊維補強供試体においては、繊維シートとコンクリートの接着面付近で発生するクラックが支配的な第三段階にはいると、せん断型クラック発生率が増加すると考えられ、それに対応して検出比率は、大きく増加している。

#### 4. 考察

##### (1) 繊維シートによる補強効果

AE パラメータ解析により、初期クラック発生荷重  $P_{AE}$  は無補強供試体と比べ、繊維シート補強供試

体で、1.6～2.6 倍程度大きくなるが、有限要素法を用いた解析<sup>14)</sup>により、破壊靱性値  $K_{Ic}$  にはほとんど影響を及ぼさないことが示された。

一方、モーメントテンソル解析により、供試体の違いにかかわらず、クラック発生機構が同一と考えられる破壊の第一段階で、無補強供試体の最大荷重値は約 3060N であるのに対し、CFRP シート補強供試体では約 6940N、また GFRP 補強供試体では約 5600N と、1.8～2.3 倍程度大きくなることが明らかになった。

次に破壊の第二段階にはいると、無補強供試体では、急速に荷重が低下するのに対し、繊維シート補強供試体では、主クラックおよび 45°方向斜めクラックの進展、さらに供試体下部におけるクラック発生とともに荷重値が増加し続ける。また破壊の第三段階において、繊維シート補強供試体では、主クラックの進展は終了しているにもかかわらず、繊維シートとコンクリートの接着部が荷重を支え、接着界面付近で、45°方向クラックの発生部から載荷支点方向へとクラックが進展することにより、終局破壊に至るまで荷重が維持される。

これらの結果から、繊維シート接着による補強効果は、

- (1) 初期クラック発生荷重、および破壊第一段階における最大荷重値を大きく増加させる、



- (2) 破壊第二段階で、主クラックおよび  $45^\circ$  方向斜めクラックの進展、また供試体下部のクラック発生とともに荷重値をさらに増加させる、
- (3) 破壊第三段階に入り、主クラックの進展終了後も繊維シートとコンクリートの界面付近で支点方向にクラックが進展し、引き続き荷重値を維持する、
- 以上の三つに整理されることが明らかになった。

## (2) モーメントテンソル解析の精度と信頼性

これまでに種々の鉄筋コンクリート供試体<sup>6), 7)</sup>、および部材<sup>8) ~ 10), 15), 16)</sup>に対して、モーメントテンソル解析が適用されている。その解析精度に影響を及ぼす因子として、第一到達 P 波の到達時刻、および P 波最大振幅値の真値からの誤差があげられる。このうち、解析精度に最も大きな影響を及ぼすのは、位置標定精度、すなわち、P 波到達時刻の精度であるとされている<sup>17)</sup>。

さて、正確な位置標定を行うには、正確な P 波信号到達時刻を求める必要があり、そのためには理想的な AE 波伝播媒体（等方的かつ均一で境界条件を持たない）であることが要求される。しかしながら、実際の供試体においては細骨材、および粗骨材等の分布により、微視的には不均一部分が存在し、また载荷によりクラックが生じた後は、不均一性がさらに増大する。ただし、微視的不均一性に限れば、不均一部材の寸法より十分大きな波長を持つ弾性波であれば、近似的に均一な媒体中を伝搬する場合と同じ取扱いが可能であることが知られている<sup>17)</sup>。したがって、本研究ではこの点を考慮し、粗骨材の最大寸法（20mm）より大きな波長に対して最大感度を持つ 150kHz 共振型（受信波長は最大感度付近で 20mm ~ 40mm 程度）を使用した。

これまで行われてきたモーメントテンソル解析結果によれば、解析可能な有意な波形セットの全収録波形に対する比率は、計測条件の比較的良好な実験室における計測で 20 ~ 30%程度、寸法の大きな部材等ではせいぜい 10%程度、またダムなどの大型実構造物<sup>18)</sup>では 2 ~ 3%程度であると報告されている。実際、実験室段階での計測である本研究において、この比率は 20 ~ 30%であった。このように、解析可能な波形セット検出率が小さくなる原因として、実験室レベルの供試体ではクラック発生後は AE 波の伝播経路が複雑になり、正確な信号到達時刻を求めるのが困難な場合が生ずること、また部材あるいは実構造物においては、センサー間距離を大きくとらざるを得ないことが多く、AE 波の伝播減

衰により、全てのセンサーでデータ読み取り可能な波形セットを得られない場合が多くなること、などが考えられる。

このように、モーメントテンソル解析は、取得した全データを有効に活用可能なわけではなく、一部の有意な波形データについてのみ評価を行う解析手法である。しかしながら、(1)他の手法では、クラックの発生・進展過程を直接可視化することはできない、(2)他の手法では、クラックの種類を識別し、その方向、あるいは運動の方向を定量的に評価することはできない、(3)解析可能なデータは全データの一部であるが、有意なデータ数が十分多ければ、統計量としての意味を持つようになり、実際の現象を評価可能となる、等の理由により、破壊の進展過程を定量的に評価するうえで、極めて有効な手法と考えられる。

ところで、実際のクラック発生・進展は、供試体あるいは構造物の内部で生ずるため、目視などにより直接観察することはできない。このため、得られたモーメントテンソル解析結果の信頼性をいかに検証するかが重要な問題となる。すでに、この目的のために、解析結果の誤差を評価する手法が開発されている<sup>19)</sup>。これは、実測で得た波形セットのモーメントテンソル解析データをもとに、シミュレーション波形を合成し、この波形セットに再度同じ解析を適用し、実測で得た結果と比較する、という方法である。これにより、両方の解析結果が良く一致する場合は実測結果の信頼性が十分高く、また一致しない場合は信頼性が低いと判断できる。この方法を用いて実験室レベルの供試体で得られた結果に対して誤差評価を行った場合、データ数の 70 ~ 80%は十分信頼性が高いことが示されている。本研究においては、こうした誤差評価は実施していない。しかしながら解析されたのは、実験室レベルの供試体であるため、既存の報告を参考にすることにより、ある程度信頼性の期待される結果が得られたものと推察される。

## 5. 結論

繊維シート補強コンクリート供試体、および無補強供試体の三点曲げ試験を行い、検出された AE 波形信号にモーメントテンソル解析を適用し、以下の結果を得た。

- (1) AE 信号検出数の急増点で定義されるクラック

発生荷重  $P_{AE}$  は、無補強供試体に比べ、補強供試体では 1.6 ～ 2.6 倍程度増加していた。しかしながら、有限要素法を用い、 $P_{AE}$  より求めた破壊靱性値  $K_{IC}$  にこうした補強効果は見られず、むしろ補強供試体の方が、無補強供試体に比べ、かなり低下していた。

- (2) 破壊過程の第一段階では、補強、無補強供試体ともクラックは切欠き先端付近の小さな領域で発生するのが確認された。さらにその発生挙動、またせん断型クラック検出比率などの評価から、クラック発生・進展の機構は同一であると考えられた。第一段階における最大（最終）荷重は、補強供試体では無補強供試体の 1.8 ～ 2.3 倍程度に至り、著しい補強効果が見られた。
- (3) 破壊の第二段階に入ると、無補強供試体においては、主クラックの進展とともに、荷重値は急速に低下し、終局破壊に至る。一方、補強供試体においては、切欠き先端より主クラックの進展、また供試体下部より  $45^\circ$  斜め上方向へのクラックの発生・進展、さらに供試体下部中央付近でクラックが発生し、荷重値は増大し続けるのが確認された。
- (4) 補強供試体のみで見られる破壊の第三段階では、繊維シートとコンクリートの接着界面付近でクラックが発生・進展するが、接着部が荷重を支えるため、終局破壊に至るまで荷重値は維持されることが確認された。
- (5) 繊維シート補強コンクリート供試体の破壊過程、および補強効果を定量的に評価するのに、モーメントテンソル解析が極めて有効であることが示された。

## 参考文献

- 1) 涌井一、松本信之：新素材繊維シートによる鉄道高架橋の耐震補強、土木学会誌、Vol. 82, No. 5, pp. 10 - 12, 1997 年 5 月。
- 2) 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 年 7 月。
- 3) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版（株）、1988。
- 4) 湯山茂徳：最近の AE 法によるコンクリート構造物検査、非破壊検査、Vol. 44, No. 1, pp. 8-14, 1995。
- 5) 大津政康：アコースティック・エミッションの波形解析理論とモーメントテンソル解に関する考察、材料、Vol. 36, No. 408, pp. 1025-1031, 1987。
- 6) 重石光弘、大津政康：コンクリート構造物への AE 逆解析の適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 1, pp. 311-316, 1989。
- 7) 湯山茂徳、岡本享久、重石光弘、大津政康：モーメント・テンソル解析適用による鉄筋コンクリート供試体中に生ずるひび割れ進展過程の定量的評価と可視化、非破壊検査、Vol. 43, No. 8, pp. 514-522, 1994。
- 8) Yuyama, S., Okamoto, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M. : Acoustic emission generated in corners of reinforced concrete rigid frame under cyclic loading, *Materials Evaluation*, Vol. 53, No. 3, Mar., pp. 409-412, 1995。
- 9) 村上祐治、堤知明、松島学、湯山茂徳：鉄筋腐食により劣化した RC はりの AE モーメントテンソル解析、第 10 回 AE 総合コンファレンス論文集（日本非破壊検査協会）、pp. 171-176, 1995 年 11 月 9 日、10 日、高知。
- 10) Shiotani, T., Sakaino, N., Shigeishi, M., Ohtsu, M., Asai, Y., and Hayashi, T. : AE characteristics of full-scale concrete-piles under bending and shear load, *Proc. 6th Intern. Symp. AE from Compos. Mat.*, pp. 163-172, June 1-4, 1998, San Antonio, Texas, USA。
- 11) Shah, S. P. and Carpinteri, A. : *Fracture mechanics test method for concrete*, RILEM Committee 89-FMT (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures), CHAPMAN AND HALL。
- 12) 大津政康、重石光弘、湯山茂徳、岡本享久：AE モーメント・テンソル解析のための SiGMA コードの開発、非破壊検査、Vol. 42, No. 10, pp. 570-575, 1993。
- 13) 岡村弘之：線形破壊力学入門、培風館、1976。
- 14) Kageyama, K., Kimpara, I. and Esaki, K. : Fracture mechanics study on rehabilitation of damaged infrastructures by using composite wraps, *Proc. 10th Intern. Conf. on Composite Materials (ICCM-10)*, Poursartip, A. and Street, K., eds., Whistler, B. C., Canada, III, pp. 597-604, Aug. 1995。
- 15) 村上祐治、清水保、神山英幸、松島学、湯山茂徳：送電用鉄塔基礎の定着引抜き実験に関する変形挙動と AE 特性（その II、モーメント・テンソル解析）、第 9 回 AE 総合コンファレンス論文集（日本非破壊検査協会）、pp. 143-150, 1993 年 11 月 11 日、12 日、沖縄。
- 16) Uchida, M., Shibata, T., Mori, D., Okamoto, T., Ohtsu, M., and Kishi, T. : Structural integrity evaluation of concrete members by AE method, *Progress in AE VIII (USNDI)*, pp. 82-87, 1996。

- 17) Ohtsu, M., Okamoto, T., and Yuyama, S. : Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, Mar.- Apr., pp. 87-95, 1998.
- 18) Minemura, O., Sakata, N., Yuyama, S., Okamoto, T., and Maruyama, K. : Acoustic emission evaluation of an arch dam during construction cooling and grouting, *Construction and Building Materials*, Vol. 12, Nos. 6-7, pp. 385-392, 1998.
- 19) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳 : SiGMA 手法におけるモーメントテンソル解析の誤差に関する考察, 第9回 AE 総合コンファレンス論文集 (非破壊検査協会), pp. 25-30, 1993年11月11日, 12日, 沖縄.

(1998. 8. 25受付)

## QUANTITATIVE EVALUATION OF FRACTURE PROCESS AND REINFORCING EFFECT IN CENTER NOTCHED CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH FIBER PLASTIC SHEETS BY A MOMENT TENSOR ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION

Shigenori YUYAMA, Zheng-Wang LI, Isamu OHSAWA,  
Isao KIMPARA and Kazuro KAGEYAMA

Center notched concrete beams reinforced with carbon fiber (CFRP) and glass fiber (GFRP) reinforced plastic sheets were subjected to three-point bending. Fracture process and reinforcing effect were quantitatively evaluated by the analysis of AE signals detected during the tests. A moment tensor analysis showed that the fracture progresses in three stages, where cracks were generated in a small region at the notch tip, then along with main crack extension, initiation and extension of an inclined crack (45-degree) occurred from the tensile zone to the notch tip, and finally cracks were generated near the interface between the fiber sheet and concrete. It was shown that the load of crack initiation and the maximum load in the first stage of the fracture process increase greatly by the reinforcing effect of the bonded fiber sheets.