

論文 鉄筋コンクリート梁のせん断破壊機構のAE波形解析による考察

沢田 陽佑^{*1}・大野 健太郎^{*2}・下薗 晋一郎^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：巨大地震などによって生じる鉄筋コンクリート（RC）梁のせん断破壊は、RC 部材の耐力が急激に低下する脆性的な破壊のため、構造物に致命的な損傷を及ぼす危険性を有している。そこで本研究では、RC 梁のせん断スパン内におけるせん断破壊に AE 法を適用し、その破壊メカニズムを解明することを目的とした。得られた AE 波形に SiGMA 解析を適用した結果、載荷初期から破壊するまでの間に 3 段階の AE 発生挙動が確認され、せん断破壊が微小クラックの集積過程として機構的かつ可視的に明らかにできた。また、AE パラメータ解析と SiGMA 解析の結果を比較することにより、両解析による AE 発生機構の違いが確認された。

キーワード：アコースティック・エミッション、AE パラメータ解析、RC 梁、せん断破壊、SiGMA 解析

1. はじめに

1995年に起きた阪神淡路大震災に代表される巨大地震により、建物、道路、鉄道、通信、ライフライン等の各種社会基盤施設は甚大な被害を受けてきた。その結果、阪神淡路大震災では、数万人もの死傷者、30万人以上の被災者を出すという人的被害を被った。建造物の多くは鉄筋コンクリート（RC）構造物であり、このRC構造物の被害も例外ではなく、RC梁部材においては曲げ破壊、せん断破壊が多く報告されている¹⁾。RC梁部材のせん断破壊は脆性破壊であり²⁾、破壊の進行が急激で靱性に欠け、構造物に致命的な崩壊をもたらす危険性を有している。さらに、RC梁部材のせん断破壊に関するメカニズムは、曲げ破壊に比べ未だ説明が十分ではないとされている。

せん断補強鉄筋を有していないRC梁について、2点集中荷重を受ける長方形断面単純梁のせん断破壊形式は、せん断スパン(a)と引張り鉄筋までの有効高さ(d)の比、 a/d に依存して異なると知られている³⁾。

本研究では、RC 梁のせん断スパン内におけるせん断破壊に着目し、その破壊メカニズムを解明することを目的とした。RC 梁曲げ試験時にアコースティック・エミッション（Acoustic Emission：AE）法をせん断スパン内に適用した。AE とは、「固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー開放過程によって発生する弾性波動現象」とであると定義される⁴⁾。AE 法は、構造物から発生する弾性波特性から定量的な損傷度評価を行う手法であり、また構造物の健全性の診断、監視に対して高い能力を持つ非破壊検査手法として注目されている。供試体はせん断スパン有効高さ比 a/d を 1.97 とし、せん断スパン内でせん断破壊を起こすように作成

した。その供試体に 4 点載荷試験と AE モニタリングを行い、得られた AE 波形に、AE 波形解析手法の SiGMA(Simplified Green's functions for Moment tensor Analysis)解析⁵⁾を適用し、せん断破壊メカニズムを定量的に評価することを試みた。また、検出された AE 信号に AE パラメータ解析⁶⁾を行い、SiGMA 解析結果と AE パラメータ解析結果を比較し、考察を行った。

2. 解析理論

2.1 AE パラメータ解析

本研究で解析可能な AE パラメータを図-1 に示す。これら AE の発生に関するパラメータの変動を検討し、AE 発生源を定量的に評価することを試みた。本研究では、これらの AE パラメータから（社）日本建材産業協会規格(JCMS)で規格化されている⁶⁾RA 値（立ち上がり時間/最大振幅値）と平均周波数（カウント数/信号継続時間）の関係をを用いて、発生するひび割れが主として引張型かせん断型かを識別することにした。

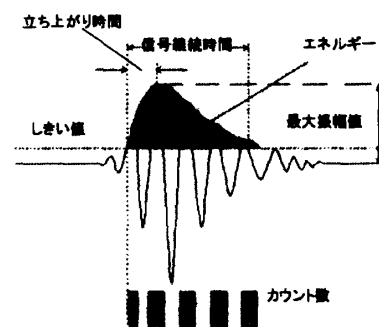


図-1 AE パラメータ

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻（正会員）

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻（正会員）

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻（非会員）

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博（正会員）

2.2 SIGMA 解析

検出されたAE信号波形を逆解析することにより、AE発生源となったひび割れの発生機構に関する情報が得られる。

AE波動の基礎理論⁷⁾によれば、弾性体の内部において発生したAE波が、弾性体の境界面上かあるいはその内部に設置されたAEセンサによって検出される時、このAEセンサにおいて発生源より伝播、到達してくるAE波の第一波における振幅値すなわち初動振幅値 $A(x)$ は次のように表される。

$$A(x) = C_s \frac{1}{R} \text{Ref}(s, \gamma) \gamma_p \gamma_q m_{pq}(x') \cdot DA \quad (1)$$

ここで、 C_s はセンサ感度も含めた物性値の係数、 R はひび割れ発生点 x' から検出点 x への距離であり、 γ_p 、 γ_q はその方向余弦を意味する。 $\text{Ref}(s, \gamma)$ は、センサ設置点での反射を考慮するための検出点への入射角を考慮した反射係数である。 m_{pq} はモーメントテンソルと呼ばれるものであり、マイクロクラックの方向を決定するために有効な波形解析の手法をもたらす。Lameの定数 λ 、 μ を用いて等方弾性体を仮定すれば、

$$m_{pq} = (\lambda_k n_k \delta_{pq} + \mu_l n_l + \mu_q n_p) \Delta V \quad (2)$$

となる。ここで、モーメントテンソル m_{pq} の各成分は次式のようにになる。

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} \lambda_k n_k + 2\mu_l n_l & \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & \mu(l_1 n_3 + l_3 n_1) \\ \mu(l_2 n_1 + l_1 n_2) & \lambda_k n_k + 2\mu_l n_l & \mu(l_2 n_3 + l_3 n_2) \\ \mu(l_3 n_1 + l_1 n_3) & \mu(l_3 n_2 + l_2 n_3) & \lambda_k n_k + 2\mu_l n_l \end{bmatrix} \Delta V \quad (3)$$

3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、式(1)の右辺は m_{pq} を除いて既知である。したがって、AE信号波形からP波初動振幅値を左辺に代入することにより、モーメントテンソルの成分に関する線形連立方程式を構成する。

モーメントテンソルは2階のテンソルであるので、主値と主方向を取り出すために固有値解析を行えば、固有値および固有ベクトルは

$$\begin{aligned} \text{第1 (最大) 固有値} \quad e_1 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) \Delta V \\ \text{第2 (中間) 固有値} \quad e_2 &= 2\mu b \nu \frac{l_k n_k}{1-2\nu} \\ \text{第3 (最小) 固有値} \quad e_3 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right) \Delta V \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{第1 固有ベクトル} \quad e_1 &= l + n \\ \text{第2 固有ベクトル} \quad e_2 &= l \times n \\ \text{第3 固有ベクトル} \quad e_3 &= l - n \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここでは、一方のクラック面の運動ベクトルすなわちBurger's vector b を、大きさ b と方向ベクトル l の積 $b=bl$ と表現している。

モーメントテンソルの固有値は、図-2に示すように、(a)せん断成分 X (shear component), (b)引張偏差成分 Y (CLVD: compensated liner vector dipole component), および(c)引張静水圧成分 Z (hydrostatic component) の3つの成分に分解することができる⁸⁾。図-2において正六面体のそれぞれの面は、正面(背面)が最大主面、上面(下面)が最小主面、右側面(左側面)が中間主面を表わしている。このことからモーメントテンソルのそれぞれの固有値は次のように一意的に表わすことができる⁹⁾。

$$\begin{aligned} \text{第1 (最大) 固有値} \quad e_1 &= X + Y + Z \\ \text{第2 (中間) 固有値} \quad e_2 &= 0 - 0.5Y + Z \\ \text{第3 (最小) 固有値} \quad e_3 &= -X - 0.5Y + Z \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)から、あるモーメントテンソルにおける各成分の構成比は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{せん断成分比} \quad X &= \frac{e_2 - e_3}{e_1} \\ \text{引張偏差成分比} \quad Y &= \frac{2}{3} \left(\frac{e_1 - 2e_2 + e_3}{e_1} \right) \\ \text{引張静水圧成分比} \quad Z &= \frac{1}{3} \left(\frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_1} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

以上から、モーメントテンソルの各成分の構成比によって、そのAE波の発生源となったクラックが、引張モード($X < 40\%$)、せん断モード($X > 60\%$)、あるいはこれら2つの混合モードであったのかといったクラックの「種別」の分類に関して定量的な分類を行うことができることになる。さらに、式(5)の固有ベクトルからクラックの面の「方向」に関する幾何学的諸量を知ることができる。

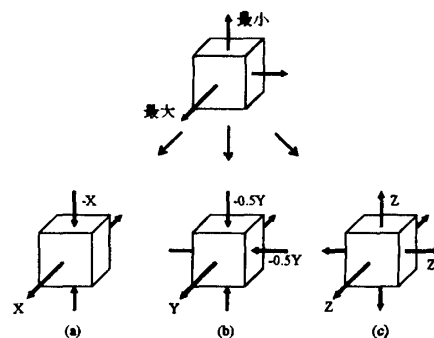


図-2 モーメントテンソルの固有値成分

表-1 コンクリート配合設計表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	
20	8	55	6	42	
単位量(kg/m ³)					
水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材G		AE剤 (cc)
			5~12mm	12~20mm	
175	318	717	589	589	127

表-2 コンクリートの力学的特性

圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ポアソン比	弾性係数 Gpa	P波速度 m/sec
29.7	3.03	0.2	28.2	4230

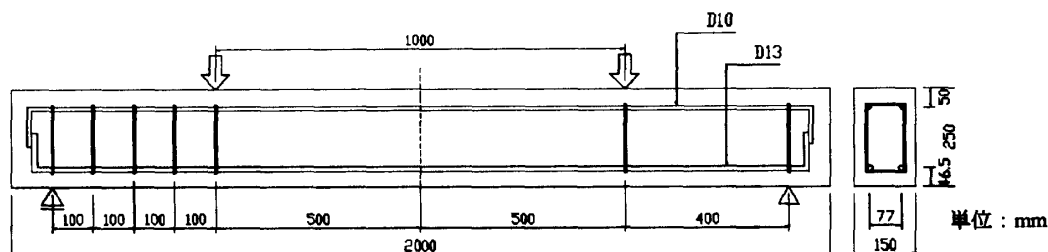


図-3 RC 梁概要図

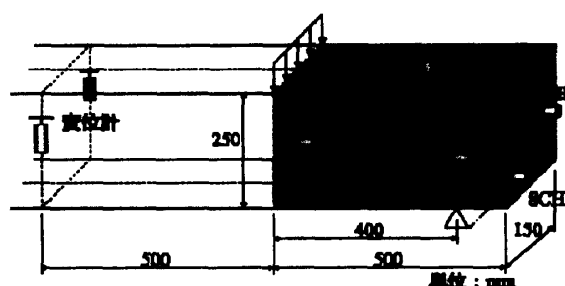


図-4 AE センサ設置概要図

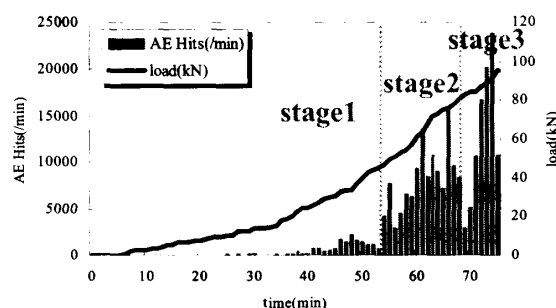


図-5 AE ヒット数と載荷荷量の時間的変化

3. 実験概要

実験に使用した供試体の概要とコンクリート配合およびコンクリートの力学的特性を表-1、表-2、図-3に示す。また、使用した鉄筋は $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 13\text{mm}$ の異形鉄筋であり、降伏点応力は 295N/mm^2 である。本実験では、供試体に確実にせん断破壊を発生させるため、せん断スパンの一方には 100mm 間隔でせん断補強鉄筋（スタールップ、 $\phi 5\text{mm}$ ）を5本設置し、もう一方にはせん断補強筋を設置しなかった。そのせん断スパン比は 1.97 である。載荷試験は、支点間距離 1800mm 、載荷点間距離 1000mm で実施した。載荷試験と同時にせん断補強鉄筋を有しないせん断スパン内で集中的にAE計測を行い、供試体の破壊に伴いAE計測を終了した。AE計測にはDiSP（PAC社製）を使用し、AEセンサはR15（共振周波数： 150kHz ）を用いた。SiGMA解析を行うためには6個以上のAEセンサが必要であり、本実験では、図-4に示すとおり供試体の片側のせん断スパン部に8個のAEセンサを取り付けた。AEセンサによって検出された信号はプリアンプによって 40dB 増幅した後、さらにメインアンプにて 20dB 増幅させて記録した。DiSPでは、メインアンプ出力のセンサ出力比が 42dB 以上となったところでトリガを機能させ、サンプリング周波数 1MHz で信号波形をA/D変換し、1波形を 1024words のデータとして記録した。

4. 解析結果

4.1 AE パラメータ解析

AEヒット数と載荷荷量の時間的変化を図-5に示す。最大荷重は 96.1kN であった。載荷初期段階では、AEヒットはほとんど確認されず、載荷荷重が増加していくことに伴いAEヒット数も増加する傾向が確認された。一般に、破壊寸前にAEヒット数は急激に増加するが、本実験でも同様の結果となった。そこで、各センサで検出されたAEヒットについて、ひび割れの識別に効果を発揮するRA値と平均周波数の関係を適用し、考察を行った。RA値と平均周波数の関係を図-6に示す。本研究では、RA値と平均周波数の比を $10:1$ にして行った。つまり、 $A\text{-FRQ}/\text{RA}$ 値 $<1/10$ の場合はせん断型のAE (Shear-mode)、 $A\text{-FRQ}/\text{RA}$ 値 $>1/10$ の場合は引張型のAE (Tensile-mode)と識別することとした。

各センサでのAE識別の結果を図-7に示す。せん断型と識別されたAEヒットの割合は、全てのセンサにおいて同程度であるのに対し、引張型と識別されたAEヒットの割合は、1CH、5CHで他のセンサと比較して多数検出された。これらは、1CH、5CHが供試体底部に配置されているため、初期曲げひび割れ形成時や斜め引張りひび割れ形成時に発生したAE信号を計測したと考えられる。

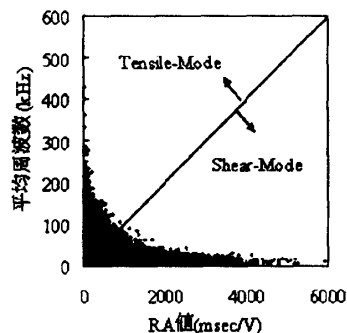


図-6 RA 値と平均周波数の関係

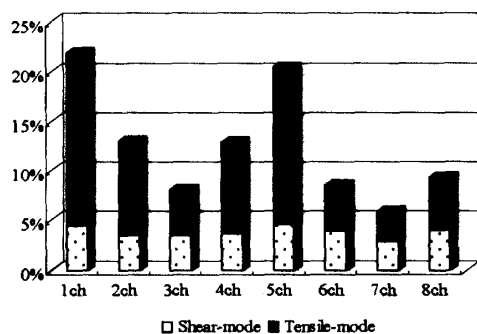


図-7 各センサ AE 識別判定結果

次に、破壊のメカニズムを時系列ごとに認識するために、図-5において一分間あたりのAEヒット数の特徴より載荷開始から破壊までを3段階に分けた。まず、載荷開始からAEヒット数が増大する前の53分までをStage1、54分から一度AEヒット数が減少する前(68分)までの14分間をStage2、69分から破壊までの6分間をStage3とした。表-3に各ステージにおけるすべての事象のAEパラメータ解析の結果を示す。いずれのStageにおいて、引張型と識別されたAE波形の割合が多かった。Stage2では、Stage1と比較して引張型のAEの割合が増加していた。これは、Stage2は曲げスパン内に多数の曲げひび割れを生じた時間を有しているためだと考えられる。Stage3では、Stage1、Stage2と比較してせん断型と識別された割合が増加していた。これは、せん断スパン内に斜めせん断ひび割れが生じたため、せん断型のAEが卓越したと考えられる。

4.2 SiGMA 解析

ここでは、AE計測によって得られたAE波形について初動振幅値と立上り時間を読み取り、SiGMA解析を行った結果を報告する。

今回のSiGMA解析において、縦波速度は4230m/sec、ポアソン比0.2であり、解析に使用したAEイベントは8個のAEセンサ全てで同定されたものとした。イベントを定義するための時間 Event Definition Time (EDT) は120μsecに設定した。EDTとは、AE波の第一波がセンサに到達した時間と他のセンサに到達したAE波の到達時間との差であり、最初に検出されたAE波から120μsec以内にその他の全てのAEセンサでAE信号を検出した

表-3 Stage ごとの引張型とせん断型の割合

	Shear-mode	Tensile-mode
Stage-1	33.2%	66.8%
Stage-2	25.0%	75.0%
Stage-3	38.6%	61.1%
Total	30.9%	69.1%

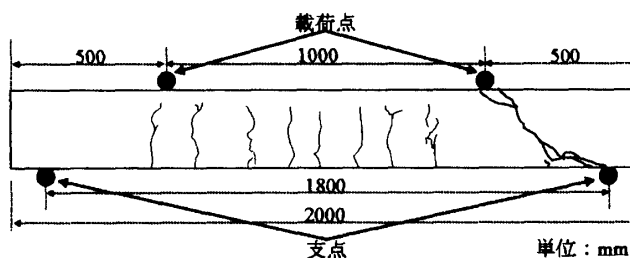


図-8 破壊時のRC梁図

ものだけをイベントと定義した。SiGMA解析結果を3次元空間で表示するために、3次元モデリングソフトLight Wave 3D (New Tek社製)を用いて図化した。図-8に破壊時のRC梁図を、図-9に各StageのSiGMA解析結果について、AE計測を対象としたせん断スパン内のAE発生源の位置標定結果とクラック形成モードの結果を示す。

Stage1では、AEヒット数が僅かであったことから同定されたAE発生源は6個であり、その位置は供試体曲げスパンに近いことが分かる。Stage2では多くのAE発生源が同定され、位置標定結果はStage1と比較して、せん断スパン中央に移動していることが確認できる。このことから、載荷荷重がある一定値を越えると、コンクリート内部の微小クラックが曲げスパン付近からせん断破壊面に移行することがわかる。目視において、Stage2の段階では、供試体表面にせん断ひび割れは確認されていないが、この段階においてせん断スパン内のコンクリート中には多数の微小クラックの形成が確認できる。Stage3では、せん断クラックは供試体高さ中央付近に集中し、引張クラックは供試体底面と上面に多く集中している。全てのAE事象と最終的に形成されたせん断ひび割れを図-9(g)に示す。この図より、位置標定されたAE発生源と最終的に形成されたせん断ひび割れ面が一致していることが確認され、引張型クラックが先行して供試体内の脆弱な部分から発生し、その後せん断型クラックがそれらの微小クラックを繋ぐように伸びていったと考えられる。

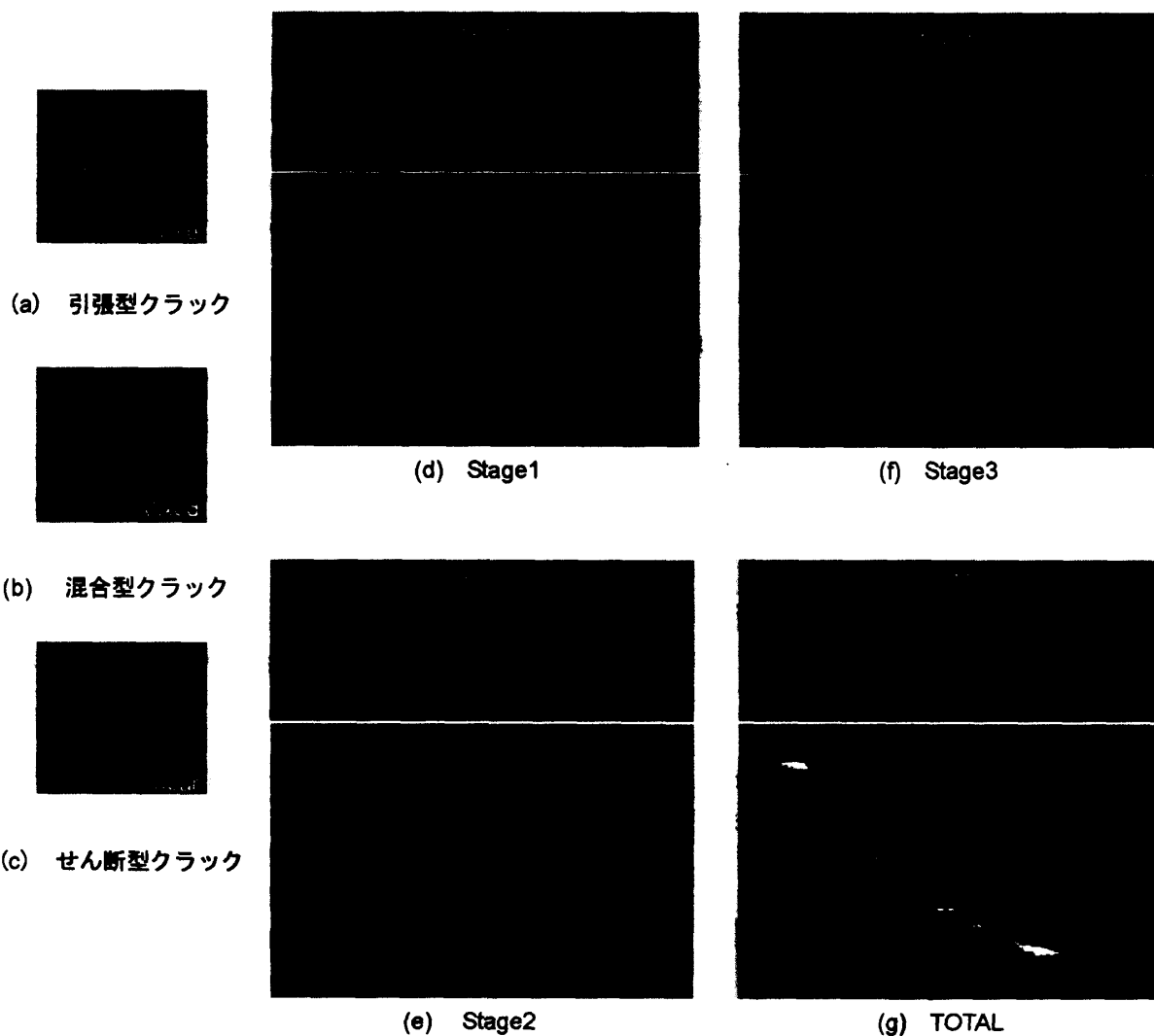


図-9 SiGMA 解析結果

5. AE パラメータ解析結果と SiGMA 解析結果の比較

図-10, 図-11 に AE パラメータ解析結果, SiGMA 解析結果を Stage 別に示す。この両解析結果を比較すると、いずれの Stage においても、引張型クラック、せん断型クラックの割合は一致していないことが分かる。この要因として、SiGMA 解析ではせん断スパン内の AE イベントのみを対象とされたのに対し、AE パラメータ解析では AE 計測中に検出された全ての AE ヒットを対象とされたと考えられ、対象とした AE 源の違いが影響したと考えられる。

そこで、AE パラメータ解析, SiGMA 解析において対象となる AE 源を統一するために SiGMA 解析で使った 445 個のイベントに対して AE パラメータ解析を適用したものを図-12 に示す。図-12 と比較しても引張型クラック、せん断型クラックの割合は一致していないことが認められた。ここで、RA 値と平均周波数の比を 2:1、

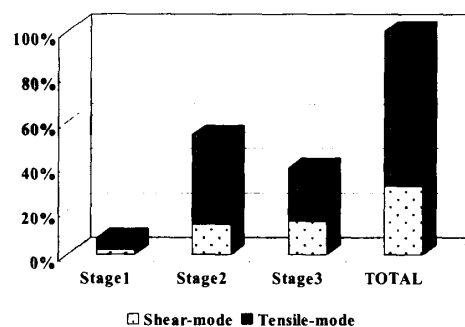


図-10 各 Stage での AE パラメータ解析結果

つまり、 $A\text{-FRQ}/RA$ 値 $< 1/2$ の場合はせん断型の AE (Shear-mode), $A\text{-FRQ}/RA$ 値 $> 1/2$ の場合は引張型の AE (Tensile-mode) と識別したグラフを図-13 に示す。この結果では、図-11 の SiGMA 解析結果と比較して、せん断型のクラックの割合がかなり一致していることが確認できる。また、図-11 の SiGMA 解析結果において、

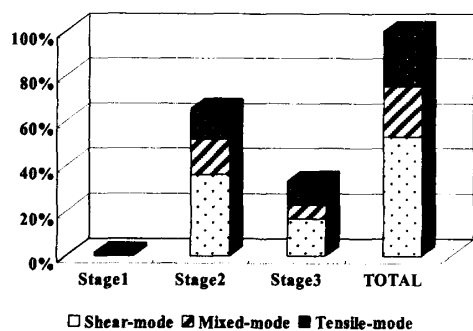
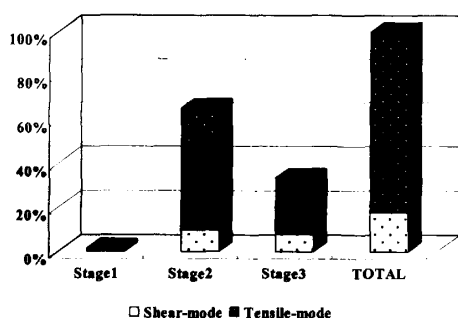
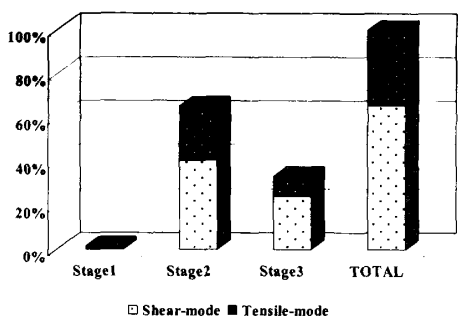


図-11 各 Stage での SiGMA 解析結果

図-12 SiGMA 解析で使った 445 個のイベント
に対しての AE パラメータ解析結果図-13 RA 値と平均周波数の比を 2:1 として
行った AE パラメータ解析結果

Mixed-mode と識別された AE 源は、図-13 の AE パラメータ解析結果での引張型に属することが示された。

6. まとめ

せん断スパン有効高さ比 a/d が 1.97 の RC 梁供試体に 4 点曲げ載荷試験と同時にせん断スパン内における AE モニタリングを行い、せん断破壊に至る微小クラックの進展状況に関する考察を行った。AE パラメータ解析の

結果、せん断型と識別される AE ヒット数の割合はどのセンサでも同程度であったのに対し、引張型と識別される AE ヒット数の割合はセンサ設置個所に依存して異なることが明らかとなった。AE 発生頻度の特徴より 3 段階の AE 発生挙動が存在することが確認され、SiGMA 解析の結果、微小クラックの発生から進展、破壊までを視覚的に明らかにすることができた。特に Stage2 では、供試体表面にせん断ひび割れは確認されていないにもかかわらず、解析により、コンクリート中に多数の微小クラックが形成されていたことが確認されたことは今後の破壊機構解明に貴重な成果を得た。また、RA 値と平均周波数の関係によるひび割れ識別基準は、現在のところ明確な指標がなく、本研究により、SiGMA 解析結果との一致が示されたことは、今後の識別基準に優位な成果であるといえる。

参考文献

- 1) 社団法人日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 鉄筋コンクリート造建築物 建築編 1，社団法人日本建築学会，1997
- 2) 社団法人日本材料学会：建設材料実験，社団法人日本材料学会，pp.211，2003
- 3) 谷川 恭雄，太田福男，尾形素臣，小野博宣，金子林爾，小池狭千朗，山田和夫：構造材料実験法（第3版），森北出版，pp.234-236，2003
- 4) 大津 政康：アコースティック・エミッションの特性と理論（第2版），森北出版，2005
- 5) 大津 政康，重石 光弘，湯山 茂徳，岡本 亨久：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
- 6) コンクリートの非破壊検査方法・アコースティック・エミッションによるコンクリートのひび割れ監視方法，社団法人日本建材産業協会規格，pp.47-64，2003
- 7) M.Ohtsu and K.Ono：A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Function in a Half Space，Journal of AE，Vol.3，No.1，pp.124-133，1984
- 8) L.Knopoff and M.J.Randall，J.Geophys：Res，Vol.75，pp.4957，1970
- 9) M.Ohtsu：Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of AE Source，Journal of Geophysical Research，Vol.94，No.B4，pp.6211-6221，1991