

論文 AE-SiGMA 解析によるコンクリートの破壊進行領域の解明

大塚 政暢^{*1}・福岡 貴己^{*2}・友田 祐一^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：コンクリート曲げ破壊の進展に伴って形成される破壊進行領域の生成過程を明らかにするために、微細ひび割れ生成過程に発生するアコースティック・エミッション（AE）と呼ばれる弾性波動に対して波形解析（SiGMA解析）を行い、微細なひび割れ（クラック）の位置、方向、種類の同定を行った。さらに、後処理解析により信頼性の高いAEデータのみによる破壊進行領域の生成過程の考察を試みた。

キーワード：アコースティック・エミッション、破壊進行領域、SiGMA解析

1. はじめに

現在、アコースティック・エミッション（AE）法は、コンクリート内部で起こるひび割れ機構の同定の為の一手法として注目されている[1]。特にAE発生源のひび割れの発生位置、ひび割れの種類、ひび割れの方向については、マイクロコンピュータ程度の機器で大量にかつ迅速にモーメントテンソル解析が可能な手法としてSiGMA解析法が開発されている[2]。

コンクリートの破壊力学の分野では、ひび割れ先端には、微細ひび割れの累積により、非線形的な破壊進行領域が形成されると考えられている[3]。そこで、破壊力学で重要な研究テーマとなっている破壊進行領域の解明に、このSiGMA解析法を用いて、その生成過程を明らかにすることを試みた。

2. 実験概要

2.1 供試体

表-1に実験に用いたコンクリート及びモルタルの配合を示す。ここでの混和剤量は、AE剤10倍希釈液の液量である。図-1に試験に用いた供試体の寸法、実験時の載荷方法を示す。供試体には55cm×15cm×15cmの角柱を用い、中央下部に3cmのノッチを設けた。この供試体に対し荷重を増加させつつ曲げ荷重の負荷-制直を繰り返す漸増載荷試験を行った。同時に、このときのノッチの開口変位を制御する目的でノッチ中央部にクリップゲージを1個取り付けた。

また、AEセンサーは図-2の位置にそれぞれワックスを用いて取り付けた。

-
- * 1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻（正会員）
 - * 2 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻（正会員）
 - * 3 熊本大学技術官 工学部土木環境工学科
 - * 4 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

表-1 コンクリート及びモルタルの配合表

| 材質 | 粗骨材の 最大寸法 (mm) | スランブ の範囲 (cm) | 水セメ ント比 (%) | 細骨材 率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|--------|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|-----------|----------|----------|------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 |
| コンクリート | 20 | 18±1.5 | 50 | 45 | 181 | 362 | 754 | 1027 | 18cc |
| モルタル | | 18±1.5 | 50 | | 315 | 629 | 1258 | | |

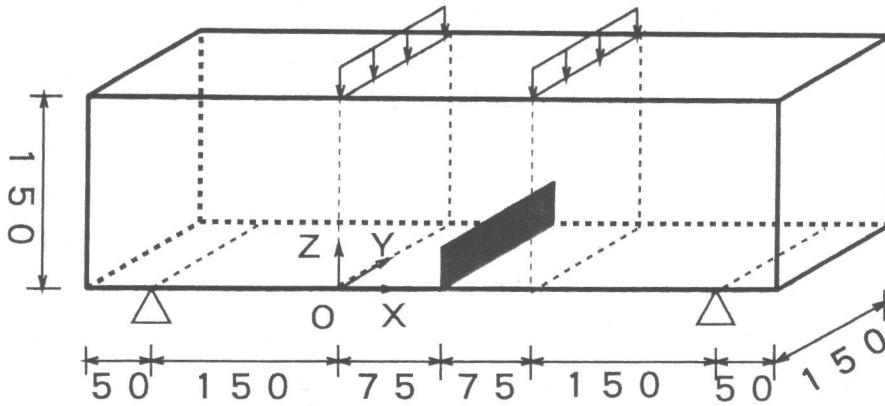


図-1 供試体寸法並びに載荷点 (単位: mm)

No. : (X, Y, Z)

1 : (0.195, 0.075, 0.150)

2 : (0.135, 0.150, 0.030)

3 : (0.015, 0.150, 0.120)

4 : (0.135, 0.000, 0.120)

5 : (0.015, 0.000, 0.030)

6 : (0.000, 0.075, 0.000)

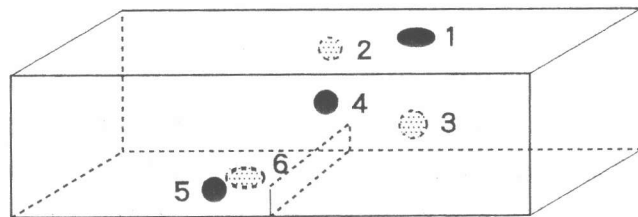


図-2 センサー位置 (単位: m)

2. 2 AE波形計測[5]

AE波形データの採取には、共振周波数150kHzのAEセンサーを6個使用した。これは後述のSIGMA手法によるモーメントテンソル解析に必要最小限の数である。AEセンサーの位置は図-2に示されている。AEの計測システムを図-3に示す。AEセンサーで検出されたAE信号は、プリアンプで40db増幅され、波形処理(LOCAN-AT)システム内部でさらに20db増幅されて入力される。その後、AEの波形信号は波形処理(TRA)システムのハードディスクに6チャンネル同時にデジタル収録される。こうして1つのAE事象に対して6個の波形データを持つ1つのAEデータセットが作成される。

同時に、ノッチ中央に設置したクリップゲージより得られる開口変位は、ロードセルより得られる荷重変位とともにx-yレコーダーに表示すると同時に、LOCAN-ATシステムのハー

ドディスクに出力される。

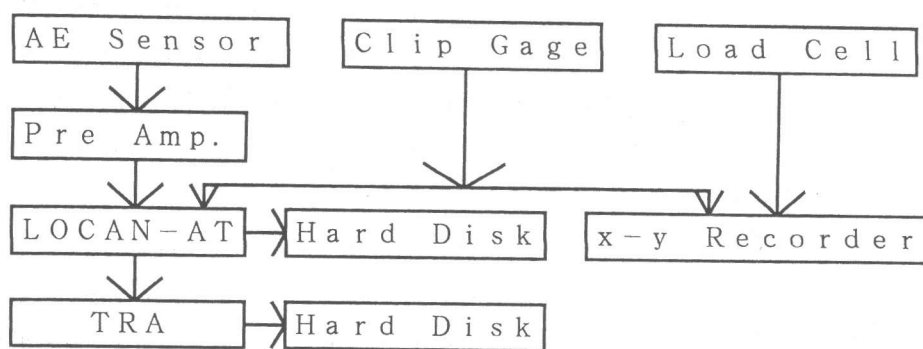


図-3 システム図

2.3 SiGMA解析

実験で得られたデータセットに対して、SiGMAコードによりモーメントテンソル解析を行う。SiGMAコードでは、6チャンネルで収録された波形データをコンピュータのCRT上に表示し、カーソル操作によりP波の到達時間(P1)とP波の初動振幅値(P2)を読み取る。そして第一段階でP1の到達時間差よりクラックの位置を3次元的に標定する。次の第2段階で、P2よりモーメントテンソルの成分を求め、これより固有値及び固有ベクトルを得る。第3段階では、前段階で得られた固有値を用いて、せん断成分X、引張偏差成分Y、引張等方成分Zの3成分を式(1)により決定する。

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

式(1)よりせん断(寄与)率(X)並びに引張(寄与)率(Y+Z)が決定されると、せん断率0%~40%を引張型クラック(Tensile Crack)、40%~60%を混合型クラック(Combined Crack)、60%以上をせん断型クラック(Shear Crack)としてクラックを分類することが出来る[2]。

これとは別に、SiGMAコードの第2段階で得られた固有値、固有ベクトルよりクラックの運動ベクトルI並びにクラックの法線ベクトルnが求められ、そのなす角も求められる。

2.4 後処理解析

解析で得られた結果には誤差の多い解も含まれていると考えられるため、誤差の少ない解、つまり信頼性の高い解を選別するために後処理解析を行った[4]。その方法として、得られたクラックの位置並びにクラックの方向に基づいてセンサ位置での理論波形を計算し、それを再度SiGMAコードによる解析を行い、得られたクラックの位置、クラックのせん断率を比較検討することにより解を選別した。本実験ではこの基準として、破壊源の座標(x, y, z)及びせん断率を用いた。許容される変動は、破壊源の各座標: ±3mm以内、せん断率: ±10%以内とした。

3. 結果および考察

以上のようにして求められた信頼性の高いデータセットのみについて、以下では考察する。本実験では、コンクリート供試体においては全データセット数121個、SiGMA解析可能であったデータセット数40個に対して最終的に使用可能なデータセット数は12個、モルタル供試体においては全データセット数846個、SiGMA解析可能であったデータセット数137個に対して最終的に使用可能なデータセット数は45個であった。

モルタル供試体におけるAE発生番号(ヒット番号)に対するSiGMAコードによる解析により標定されたクラックの位置のz座標をせん断、引張、混合の各クラック毎に示したものを図-4に示す。これより、初期には引張クラックが卓越して発生していること、終局に向かって混合クラックとせん断クラックが増加するようになることが分かる。また、計測後半においても、引張クラックはノッチ上方3.5cm近辺に集中して発生しているのに対し、せん断クラック並びに混合クラックがノッチ周辺から上方まで広い範囲で上昇しながら発生している点などが特徴的である。これより、破壊進行領域の進展時及びひび割れ面の形成時には主にせん断破壊が生じている点、破壊進行領域の生成時には引張破壊が生じ、ついでひび割れ成長時にはせん断破壊が生じる点などが明らかになったと考えられる。さらに、供試体をx-z方向に見たときの、評定されたクラックの位置、方向、種類並びに実際に観測された破断面を図-5に示す。これより、実際の破断面に沿ってクラックが生じている点、引張クラックの向きが斜め方向に開口している点、また実験の前半、後半を比較することにより、破壊が進むに従いクラックがノッチのより遠く、つまり、ノッチを中心としたある程度の幅の中で発生しているクラックが、破壊が進むとともにその幅を広げながら発生している点などが認められる。このことは、SiGMA解析の結果が実際の挙動と一致している点、破壊の進展に伴う破壊進行領域の広がりを良く示している。従って微細ひび割れの累積による破壊進行領域を同定するのにSiGMA手法は有効な手法であると考えられる。

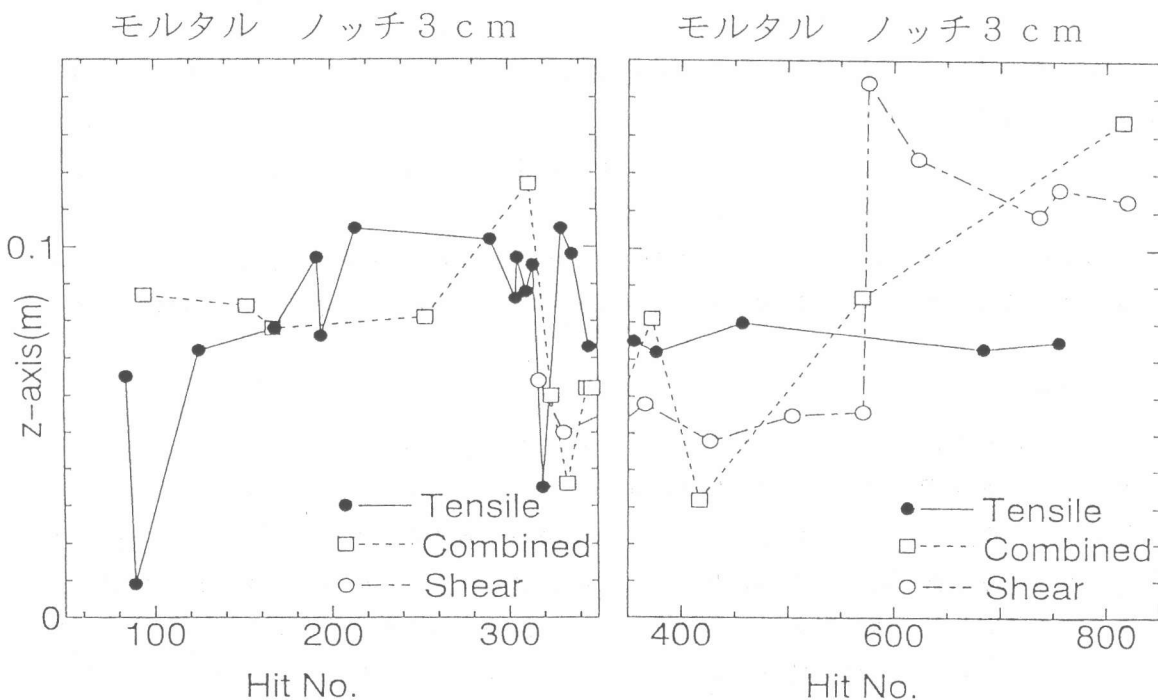
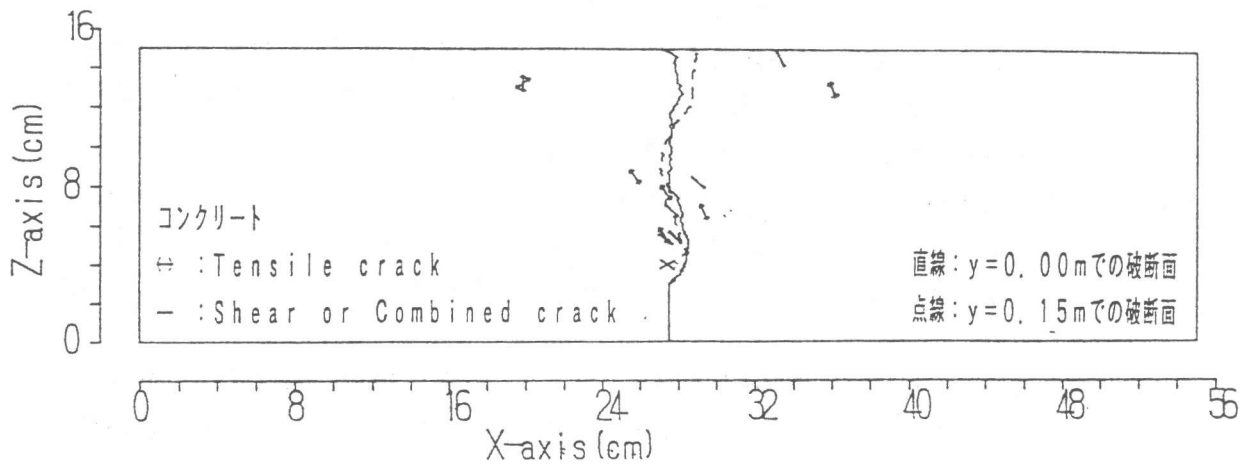
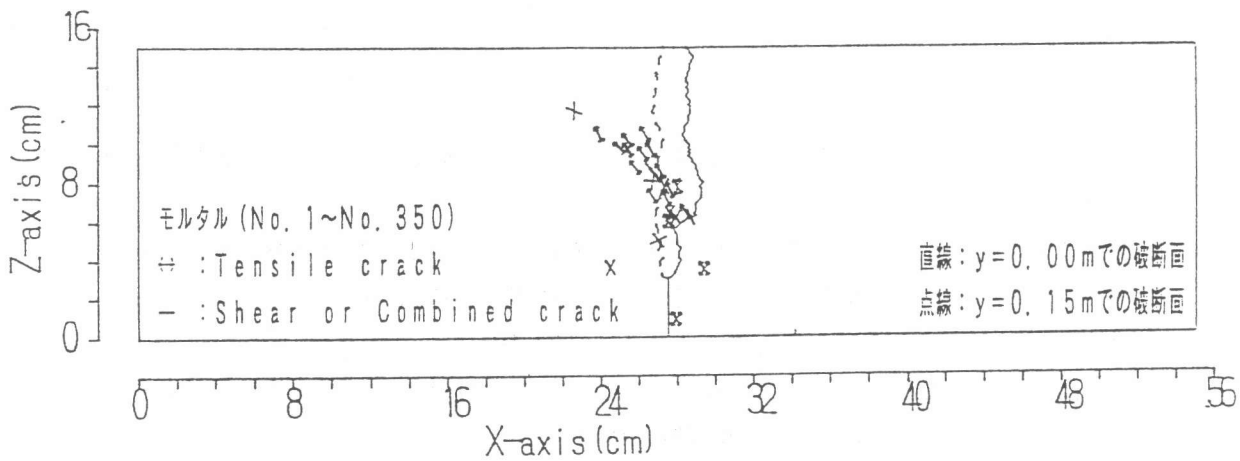


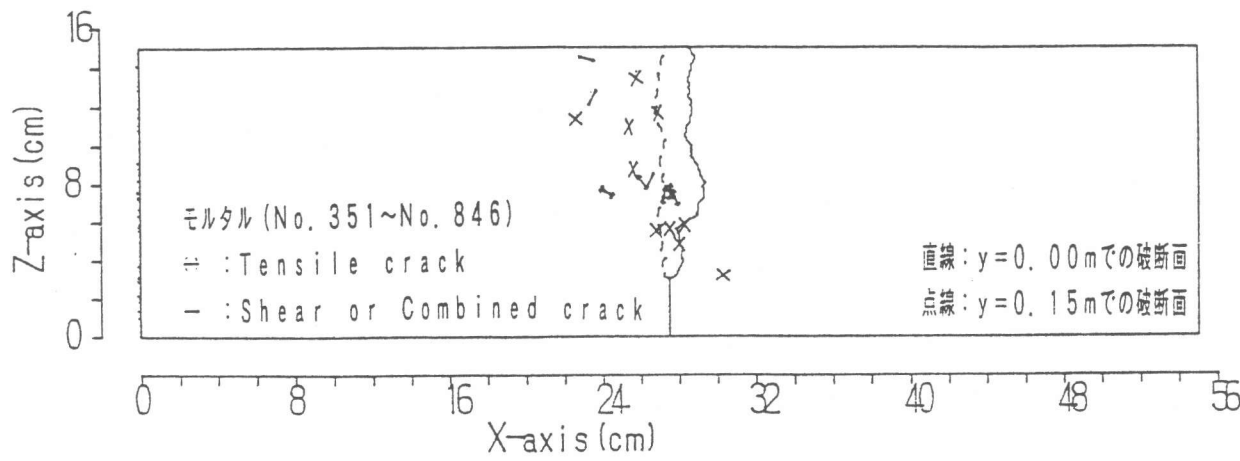
図-4 ヒット番号に対するクラックのz座標(クラック種類別)



(a) コンクリート



(b) モルタル前期



(c) モルタル後期

図-5 クラック発生位置

4. 結論

以上の結果より、以下のような点が明らかになった。

- (1) 破壊進行領域の生成時には引張破壊が生じ、ついでひび割れ成長期にはせん断破壊が生じる。これは、破壊初期には、引張クラックが供試体中央部に発生し、その周辺に進展して行き、続いてせん断クラックがノッチ周辺に発生する点より導かれる。
- (2) 破壊進行領域の進展およびひび割れ面の形成時には、主にせん断破壊が生じている。このことは、引張クラックが供試体中央部に集中して発生しているのに対し、せん断クラック、混合クラックがノッチ周辺から上方まで広範囲にわたり上昇しながら発生している点より導かれる。
- (3) 実際の破断面とそれぞれ検出された微細クラックの位置、方向はおおむねで一致する。このことより、AE法は、コンクリートの破壊進行領域を明らかにするにあたり、領域の構成要素のひび割れの位置、種類、方向を高い精度で検出できる点で極めて有効な判断指標になりうると考えられる。

参考文献

- 1) 丹羽義次・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、pp. 7-8、1988
- 2) 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、42(10)、pp. 570-575、1993. 10
- 3) 破壊力学の応用研究委員会報告書、JCI、1993. 10
- 4) 大津政康：AEモーメントテンソル解析におけるSIGMAコードの後処理解析に関する研究、非破壊検査、43(12)、pp. 776-782、1994. 12
- 5) 丹羽義次・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、pp. 10-26、1988