

# 論文 AE 法と BEM 解析による混合モードのひび割れ進展過程に関する考察

紙永 祐紀\*1・大津 政康\*2

**要旨:** ノッチ付きコンクリート供試体の偏心曲げ載荷試験を実施し, 混合モード下のひび割れ進展過程及び破壊進行領域の形成過程について実験的および解析的に検討した。実験にはアコースティック・エミッション(AE)法の SIGMA 解析を適用し, 微小ひび割れの機構解明を行った。一方, 解析では二領域境界要素法(BEM)を用い, 混合モードひび割れの進展をシミュレーション解析し, これらの結果より破壊モードの混在状況と変遷について検討した。  
**キーワード:** 混合モードひび割れ, 線形破壊力学, 応力拡大係数, 二領域 BEM 解析, AE 波形解析

## 1. はじめに

コンクリート構造物の破壊現象への破壊力学の適用は, 様々な分野で活発になされており, 多くの新たな知見が得られている<sup>1)</sup>。特にコンクリート中の引張ひび割れの進展に関しては, ひび割れ先端部における破壊進行領域の形成が知られており, その内部機構の実験的な解明にはアコースティック・ミッション(AE)の破壊源探査が適用されている<sup>2)</sup>。本研究では, ノッチ付きコンクリート供試体の偏心曲げ載荷による混合モード下のひび割れ進展を取り上げ, その内部機構の解明に境界要素法(BEM)と AE モーメントテンソル解析を適用し, 破壊進行領域内部での微小ひび割れ発生に関して, 混合モードの混在状況とその変遷過程を中心に考察を試みた。

このように BEM の離散化では, 領域の境界(インターフェイスを含む)での変位は線形, 応力(表面力)は一定となる内挿関数を用いている。したがって, ひび割れ以外の領域は線形弾性と見なし, 内部領域全体を均質と仮定している。つまり解析では破壊進行領域の形成は考慮されておらず, コンクリートの物性値として必要なものは, 弾性係数 E とポアソン比  $\nu$  のみである。

図-1 に実験を行った偏心載荷における解析モデルを示す。モデルの境界, インターフェイスの境界分割はともに 5mm 間隔としている。図中のインターフェイスは初期値であり, ひび割れ進展により新たな境界が形成され, それによって位置も変動する。ただし, 図中の梁上縁にある終点は移動しない。

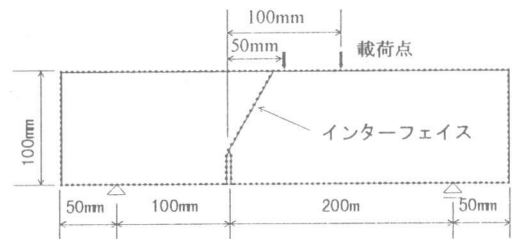


図-1 解析モデル

## 2. 解析手法

### 2.1 二領域 BEM モデル

BEM としては, 2次元ひずみ状態に対する2領域分割モデルを用い<sup>3)</sup>, ひび割れ進展解析を行った。ここで解析の対象としたひび割れは, 予め進展方向はわかっていないとして, ひび割れ先端で2つに分割された領域があると考えたモデルである。ひび割れ進展に伴って任意方向に境界が新たに移動し, その新たなひび割れ先端で連結された2領域が存在すると考える。

### 2.2 ひび割れ進展基準

コンクリートを線形弾性と仮定したことにより, 線形破壊力学の概念を用いて, ひび割れ

\* 1 住友建設 (株) (正会員)

\* 2 熊本大学教授 環境システム工学科 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合表

	最大 粒径 (mm)	W/C (%)	細骨 材率 (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (cc)	スランプ <sup>*</sup> (cm)	空気量 (%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
コンクリート	20	50	48	172	344	830	1021	104	6.0	6
モルタル				342	570	1140				

表-2 コンクリートの材料特性

	引張強度(MPa)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	ポアソン比
コンクリート	5.54	38.2	30.3	0.21
モルタル	3.84	39.0	21.9	0.19

は常に最大円周応力の方向（既存のひび割れに対する進展角  $\theta$ ）に進展すると考え、ひび割れが進展するかどうかについては、その方向に直角な方向での応力拡大係数が、 $K_{Ic}$ （限界応力拡大係数）を越えた場合とする以下のひび割れ進展基準<sup>4)</sup>を採用した。

ひび割れ先端部で式（1）により新たなひび割れ進展方向を決定し、5mm ひび割れを進め、対応する境界要素を設ける。進展長を5mmとしたのは過去の研究によるものであり、この程度のときにおいて安定解を得ることができる。その折の荷重は式（2）により決定する。このような操作を繰り返し、自動的にひび割れ進展をシミュレーション解析することにした。

$$K_I \sin \theta + K_{II}(3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (1)$$

$$\cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] = K_{Ic} \quad (2)$$

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用供試体

コンクリートとモルタルで40cm×10cm×5cmの角柱供試体について、限界応力拡大係数  $K_{Ic}$  を決定する実験のための中心ノッチを有する供試体と、混合モードひび割れを対象にした供試体中央部から5cm離れた偏心ノッチを有する2種類の供試体（図-1参照）を作成した。カッターで導入したノッチはいずれも深さ

30mm、幅1mmである。実験で用いたコンクリートとモルタルの配合を表-1に、水中養生28日材令での材料特性を表-2に示す。

#### 3.2 中心ノッチ・中心载荷試験

材令28日後の  $K_{Ic}$  を求めるために図-2に示す中心ノッチ・中心载荷試験を行った。ロードセルにより荷重をクリップゲージにより開口変位を計測し、载荷時に発生するAEの計測を行った。

実験で得られた荷重と開口変位、破壊進行領域形成前のAE発生数から既報<sup>5)</sup>による方法により、限界応力拡大係数  $K_{Ic}$  を決定した。それらの値はコンクリートで0.60 (MPa・m<sup>1/2</sup>)、モルタルで0.287 (MPa・m<sup>1/2</sup>)となった。

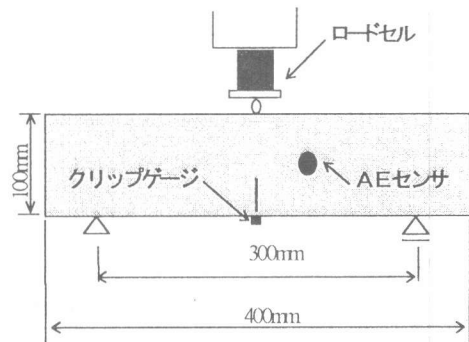


図-2  $K_{Ic}$  を決定するための実験

#### 3.3 偏心ノッチ载荷試験

混合モードを対象として偏心ノッチの供試体で中心に载荷する5cm偏心と、さらに偏心量を増した10cm偏心2通りの実験を行った。

これらの実験ではAE波形解析のためにAE

波形の検出を6チャンネルで行い、SiGMA解析を実施した。センサの配置を図-3に示す。

実験装置の接続は図-4のようになっており、AEセンサで検出された波動はプリアンプを経て波形処理装置(LACAN-AT)に入力され、その後、AEの波形信号は波形記録装置(TRA)に6チャンネル同時に記録される。ここで、AEセンサは200~1000kHzの周波数帯で応答が平坦な広域型で共振周波数150kHzのものを使用し、計測条件はプリアンプで40dB、メインアンプで20dB増幅し、しきい値は42dBの設定とした。混合モードの試験では、AE-SiGMA解析によれば、AEセンサにより計測されたAE波動の初動到達時間の差より発生源の位置が、AE波の発生源の位置と初動振幅値からモーメントテンソルが求められ、さらにその固有値の解析とその成分分解により微小ひび割れの種類、方向が決定される<sup>9)</sup>。

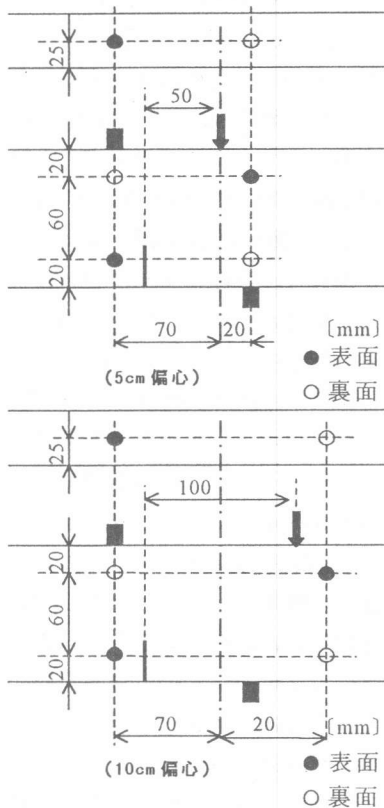


図-3 センサ配置図

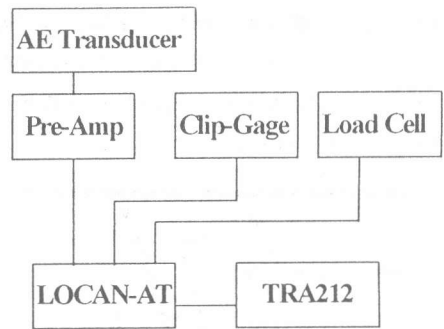


図-4 計測機器接続図

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 BEM解析結果

二領域BEMによりひび割れ軌跡を解析した結果と実験で実際に観察されたひび割れを比較した例として、モルタル供試体の結果を図-5に示す。解析には表-2の物性値と中心ノッチ・中心荷の実験で決定された $K_{Ic}$ を用いた。多少実際のひび割れとのずれが上部には見られるがノッチに近い付近ではよく一致していることがわかる。

この場合の荷重-開口変位の関係を図-6に示す。解析では図中の除荷点以降に大きな変動が見られたので示していない。ただし、その時点以降のひび割れ軌跡は図-5に白丸で示してある。実際には白丸以降の過程では破壊進行領域が形成され、非線形性が現れるものと推測される。また、ここでは示していないが他のパターンの例においても同様の結果が見られた。したがって、線形破壊力学によれば、ひび割れ進展方向については混合モード下でも予測可能であるが、内部機構の詳細やモードの変遷については十分な検討はできないことがわかる。

コンクリート供試体での例を図-7に示す。この場合には、実際のひび割れ面でも表と裏でのひび割れ面の位置に差異は少なく、解析の結果もよく一致している。既報<sup>7)</sup>によれば、破壊進行領域で形成されるこの微小クラックの規模はモルタルの方がかなり大きなことが報告されている。したがって、破壊進行領

域の形成の影響が線形破壊力学に基づいた解析に、コンクリートの場合が少ないために、ひび割れの軌跡のよい一致が見られたのではないかと考えられる。

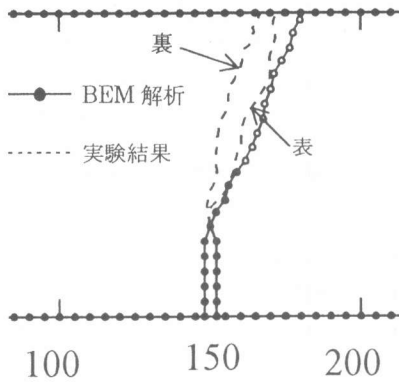


図-5 ひび割れ進展図  
(モルタル 5cm 偏心)

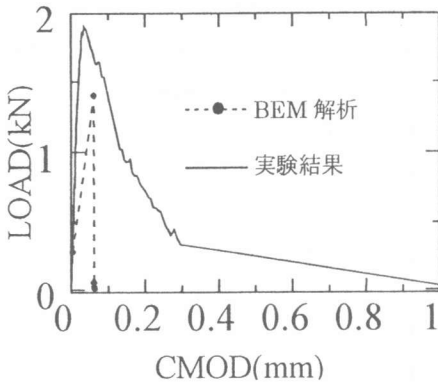


図-6 荷重-開口変位図  
(モルタル 5cm 偏心)

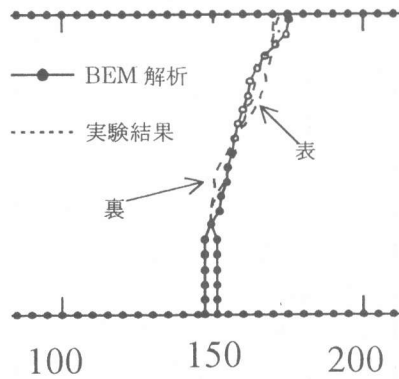


図-7 ひび割れ進展図  
(コンクリート 10cm 偏心)

#### 4.2 AE 波形解析結果

5 cm 偏心の場合のモルタル、コンクリート供試体でのSIGMA解析の結果を図-8, 9に示す。ここで、AE源は、それぞれの発生位置に引張クラック(矢印)とせん断クラック(X印)に分類されており、矢印の方向は引張クラックの開口方向、せん断クラックでのX印では2つの方向がせん断運動とクラックの法線との方向を示している。これより、モルタルではノッチ先端周辺に集中的に、コンクリートでは最終ひび割れ面を囲む広い領域にAEが発生しているという破壊源探査での結果<sup>2)</sup>が確認される。さらに、SIGMA解析によるとクラック(ひび割れ)のモードは複雑に混在していることが認められる。

SIGMA解析では、クラックの分類にせん断寄与率を用いている。これは、クラック面上でのずれ変位と開口変位の比に相当するもので、せん断クラックは60%以上、引張クラックは40%以下の場合として分類して図-8, 9には記載している。しかし、その結果のように複雑なモードの混在が認められたことより、個々のAE事象(微小クラック)で決定されたせん断寄与率の変遷について考察することにした。

その結果を図-10から図-13に示す。モードの変遷過程と実際の供試体での破壊進行とを対比させるために、これらの図中には、開口変位の変遷も示している。残念ながら、10 cm 偏心の供試体ではSIGMA解析で決定されたクラック数が少なく、多少考察を困難にしている。しかし、クラックの発生初期段階において微細なレベルで見ると、すべての場合を通して、せん断寄与率の大きなせん断型のクラックはせん断寄与率が小さな引張型のクラックの後に見られ、引張クラックが先行し、せん断クラックがそれに続く様子が明かに認められる。さらに、大きな開口変位の発生は、せん断クラックの発生にしたがってみられるようになり、このことから両者の密接な関連が伺える。特に、多くの事象の計測されたモ

ルタル供試体の 5cm 偏心の結果によれば、この引張型とせん断型の混在は、開口変位の拡大と共に、いずれかの過程に偏ることなく見られる。このことは、破壊進行領域内部でのクラックの発生は、引張クラックにせん断クラックが続きながら、繰り返し混在して生じることが明かになった。つまり、微細なレベルでは確かに引張クラックはせん断クラックに先行するが、それらの時系列的な発生の過程はいずれかに偏ることなく複雑に繰り返されて進行することが認められたと考えられる。また、ノッチ部の開口はせん断クラックの形成が大きな要因となっていることもわかる。

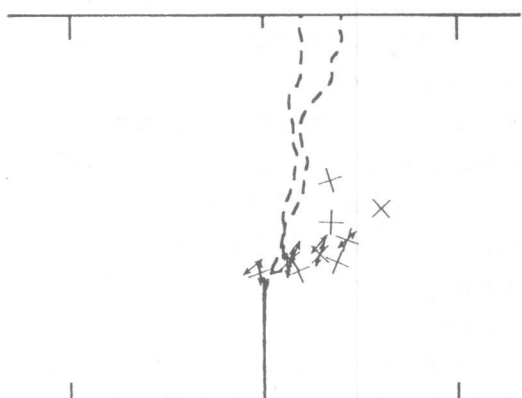


図-8 モーメントテンソル解析結果  
(コンクリート 5cm 偏心)

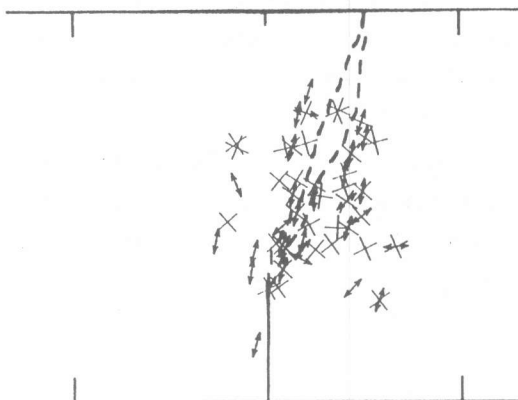


図-9 モーメントテンソル解析結果  
(モルタル 5cm 偏心)

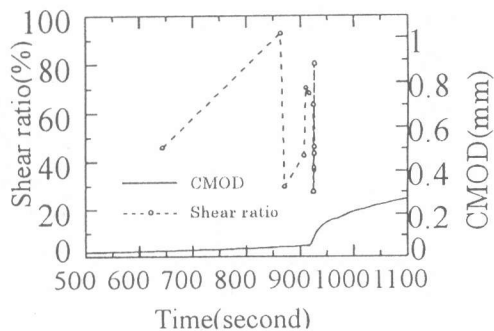


図-10 時間-せん断率-開口変位図  
(コンクリート 5cm 偏心)

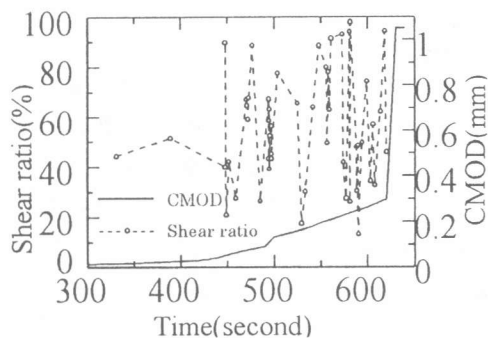


図-11 時間-せん断率-開口変位図  
(モルタル 5cm 偏心)

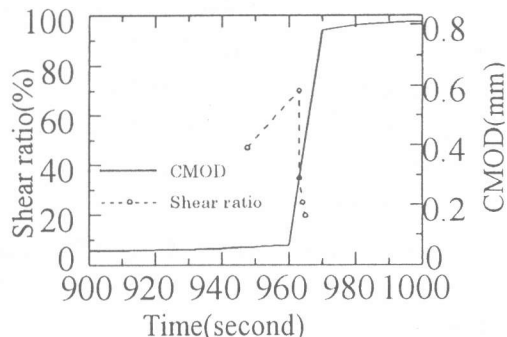


図-12 時間-せん断率-開口変位図  
(コンクリート 10cm 偏心)

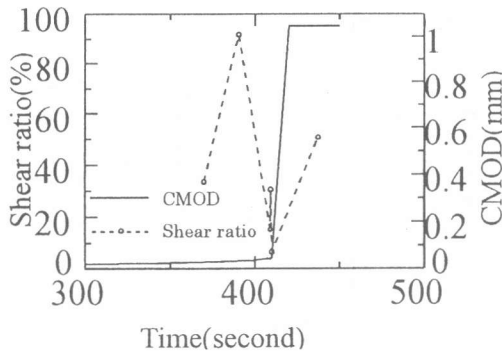


図-13 時間-せん断率-開口変位図  
(モルタル 10cm 偏心)

## 5. 結論

本研究では、ノッチ付き供試体の破壊試験での混合モードひび割れ進展過程を、決定された限界応力拡大係数を用いて BEM 解析によりシミュレーションし、また、その進展過程での機構解明のため AE 波形解析を行った。その結果以下のようなことが明らかになった。

(1) 混合モードひび割れの進展方向を BEM 解析でシミュレーションしたところひび割れ軌跡において一致がみられた。よって線形破壊力学によれば、ひび割れ進展方向については混合モード下でも予測可能であることがわかった。しかし、ひび割れ進展過程では破壊進行領域が形成され、非線形性が現れるため内部機構の詳細やモードの変遷については十分な検討はできない。

(2) AE - SIGMA 解析の結果、ひび割れ進展過程において破壊進行領域の形成過程では引張クラックが先行し、せん断クラックがそれに続く様子が認められた。さらに、大きな開口変位の発生は、せん断クラックの発生と密接に関連しており、破壊進行領域内部でのクラックの発生は、引張クラックにせん断クラックが続きながら、いずれかに偏ることなく複雑に繰り返されて進行することがわかった。

(3) 線形破壊力学を導入した BEM 解析により巨視的なひび割れ形態は予測が可能であり。さらに AE 波形解析によって破壊進行領域の形

成過程による破壊モードの混在と変遷を知ることができる。よって BEM 法と AE 法を合わせることにとりより、ひび割れ進展時のコンクリート内部機構が解明される可能性が明らかになった。

## 参考文献

- 1) Mihashi, H. and Rokugo, K. eds.: Fracture Mechanics of Concrete Structures, Vols. I, II, & III, Aedificatio, 1998. 10
- 2) Otsuka, K. Date, K. and Kurita, T.: Fracture Process Zone in Concrete Tension Specimen by X-ray and AE Techniques, *ibid* 1, Vol. I, 3-16, 1998. 10
- 3) Chahrour, A.H., Fukuchi, S., Ohtsu, M. and Tomoda, Y.: BEM Analysis of Mixed-Mode Crack Propagation in Center-Notched Concrete Beams, *Transaction of JCI*, Vol15, pp.201-208, Dec. 1993
- 4) Erdogon, F. and Sih, G.C.: On the Crack Extension in plates under Plane Loading and Transverse Shear, *J. Basic Eng.*, No12, pp.519-527, Dec. 1997
- 5) 大津政康, M.C. Munwam, 吉村伸一, 紙永祐紀: 破壊力学に基づいた鉄筋腐食による剥離ひび割れ進展の解析的考察, *コンクリート工学論文集* (投稿中)
- 6) 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, 1993.10
- 7) Ohtsu, M. and Ohtsuka, M.: Damage Evolution by AE in the Fracture Processzone of Concrete, *土木学会論文集*, No599/N-40, 177-184. 1998, 8