

# [51] AE法に基づいたひびわれ欠陥の総合的評価

正会員 大津政康 (熊本大学工学部)

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応、塩害をはじめとして、コンクリートに発生するひびわれ、あるいはクラックは、コンクリート構造物の耐久性に関係して、非常に重要な問題となっている。そのため、新たなひびわれの発生を検出、発生および進展機構の解明、さらに既存のひびわれパターンの検討などが可能となる総合的なひびわれ評価法の確立は、耐久性の問題に対する研究の急務であると考えられる。

本研究は、このような考察のもとに、内部ひびわれをも含めて外部から評価出来ることを念頭におき、コンクリート中を伝播する弾性波とアコースティック エミッション (Acoustic Emission, AE) 現象に着目し、AE法を用いて得られる計測データに基づいた、ひびわれ欠陥の総合的評価法を提案し、その有効性の検討を試みたものである。

## 2. 総合的評価法の概略

ここで提案する手法は、図-1に示すような新たなひびわれ欠陥の発生、進展の評価と既存のひびわれ性状の評価の両面が可能なることを目標としている。それらは、図中の下線で示された3つのパラメータを用いて検討される。ひびわれの発生、進展に対しては、その力学的条件を明らかにする必要がある。そこで、(1) 応力拡大係数  $K_{Ic}$  に着目し、これをAEの発生挙動と境界要素法 (BEM) 解析とから決定する。さらに、AE法を用いてひびわれに伴って発生するAE現象を検出し、(2) AE波形の情報から発生したひびわれの位置、向きを決定する。そして、既存のひびわれは、AEの計測装置に入力装置部を加えることによって計測できる部材の弾性的な共振特性 (弾性波フィルター特性) により検討する。

弾性波フィルター特性に関しては、別報で発表を行っているので、以下では上記のパラメータのうち(1)、(2)の項目について検討した基礎的な成果について述べる。

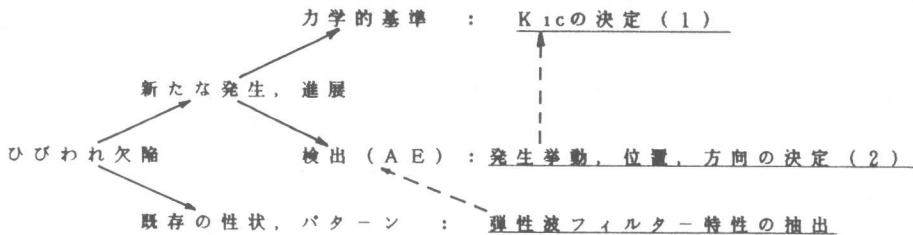


図-1 総合的評価法の概略図

## 3. 実験概要

実験には、AECコンクリート (AEC)、鋼繊維補強コンクリート (SFRC)、モルタル (MOR) の3種類の材料を用いた。その配合と圧縮および引張強度は表-1に示されている。粗骨材の最大寸法は20mmであり、鋼繊維にはセン断ファイバー (0.5x0.5x30mm) を体積混入率1%で使用し、SFRCおよびAECの配合では、AE剤をセメント重量の0.04%用いた。供試

表-1 材料の配合と物性値

Specimen	W	C	S	G	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )
AEC	201	347	810	1083	376	35.4
SFRC	181	347	742	1072	380	42.7
MOR	349	582	1164	-	373	36.0

体としては、(15x15x55cm)と(7.5x10x40cm)の中央にノッチを有する2種類のはりを使用した。ノッチとしては、頂角30度、厚さ3mm、長さ1.5cm、3.0cm、6.0cmの鋼板を、打設時に供試体中央部に挿入することにより人工的に設けた。

ノッチ深さ $a$ と供試体の組合せは、はり高さ $W$ との比 $a/W$ が0.15, 0.2, 0.3, 0.4の4種類となるようにした。

実験装置としては図-2に示すようなシステムを用いた。ノッチ先端からのひびわれの発生挙動はAEのイベント数として計数し、ノッチの開口変位、ロードセルによる荷重値と共にマイクロコンピュータに収録した。また、実験中に検出された代表的なAE波形は、ウェーブメモリによりデジタル量(1波形が、20MHzサンプリングによって50nsx1024wordsで表される)のデータとして記憶させ、それをペンレコーダに出力した。

#### 4. 限界応力拡大係数 $K_{Ic}$ に関する検討

限界応力拡大係数の実験は4種類の $a/W$ の供試体に対して各2本ずつ行った。そして、破壊荷重とともにAEの発生挙動からAE頻発時の荷重(参考文献1参照)を求めた。

限界応力拡大係数 $K_{Ic}$ の物性値としての有効性に関しては、寸法効果、ノッチ先端の塑性域およびプロセスゾーンの影響、コンクリート材料の非線形性などへの依存性が指摘されており、ノッチ深さ $a/W$ に対して一定とはならないという報告が多くなされている。これを、破壊靱性値としての取り扱いに依存するのではないと考え、ここでは、 $K_{Ic}$ はノッチ先端からの新たなひびわれの発生のみを支配するパラメータとした。そして、ひびわれが進展する際に観測されるAEの頻発に着目し、そのときの荷重値から $K_{Ic}$ を決定することを試みた。

既報(文献1)のように、これらの荷重値に対してノッチ付き供試体の3点曲げ試験に対する解析解を用いると、 $a/W$ の大きなノッチに対しては $K_{Ic}$ を大きめに評価することが知られている。これは、主に、供試体におけるノッチは、実際には無限に長い供試体中の開口量0の完全なスリットに対応するものではないにもかかわらず、それに対する解析解で $K_{Ic}$ を評価していることに問題があると考えられた。

そこで、実際に試験に用いた供試体形状に対応する $K_{Ic}$ を決定するため、境界要素法(BEM)に基づいた数値解析手法を開発した(文献2)。そして、AE頻発時の荷重値を用いて $K_{Ic}$ を求めることにした。それによって得られた結果を図-3に示す。図中には比較のために、従来の解析解を用いてAE頻発時の荷重から得られた $K_{Ic}$ の値をも示している。図から分るように、AEとBEMによって決定

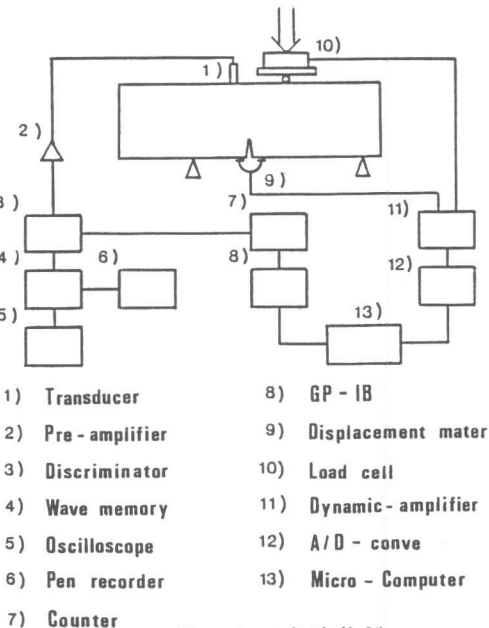


図-2 実験装置

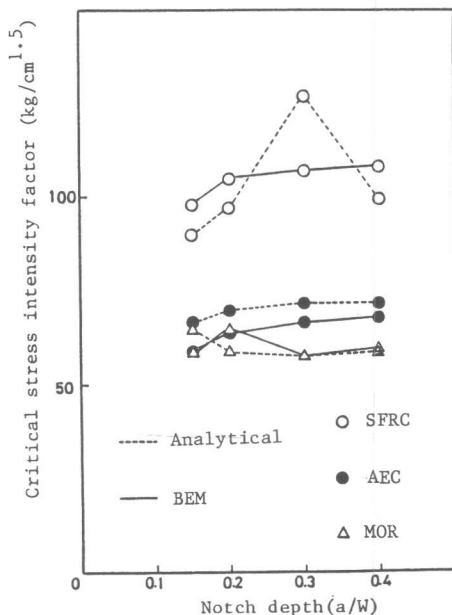


図-3 限界応力拡大係数 $K_{Ic}$

された $K_{Ic}$ は、ノッチ深さ $a/W$ に敏感ではなく、かなり安定した値として得られているが、解析解による $K_{Ic}$ は $a/W$ によりかなり変動している。これより、ノッチ先端からの新たなひびわれの発生を支配するパラメータと考えれば、 $K_{Ic}$ は物性値としてかなり有望であることが分る。

### 5. AEの波形解析

AEの発生挙動は、 $K_{Ic}$ の決定に用いられたが、発生する個々のAE波形はひびわれ（クラック）に関するあらゆる情報を含んでいることが知られている。ひびわれの発生位置は破壊源探査によって求められるが、ここではさらに、ひびわれの向き（方向）の決定の可能性について検討する。そこで、図-2に示す実験において非対称载荷の試験を行なって、ノッチ先端部から载荷点の方向へ斜めにひびわれを進展させ、その際に発生するAE波形を検出した。

AE波形の理論解析には、既報（文献3）の手法を用い、図-4に示すような検出面に対して $(\theta, \phi)$ 傾いた引張りクラックを考え、その発生によって半無限弾性体の表面で検出される垂直方向の加速度波形を数値解析によって求めた。したがって、理論波形では供試体側面からの反射波は考慮されていない。実験によって検出されたAE波形と解析によって得られたシミュレーション波形の1例を図-5に示す。実験では、1チャンネルの計測システムを用いたため破壊源探査が行えなかった。ひびわれの位置と方向は計測中に表面ひびわれを観察することにより決定し、それをシミュレーション解析の入力データとした。AE波形はSFR C（P波速度4200m/s）において深さ0.06m、 $\theta = 45$ 度として検出されたものであり、解析波形はその条件に対して得られたものである。解析では半無限体としているため後半の反射による波形は見られないが、初動部についてはかなりAE波形とよく対応していることが分る。

このように理論解析によってAE波形をシミュレートできることが、確かめられたことより、ひびわれの方向を決定する可能性を、シミュレーション解析によって得られた波形を用い、数値実験から検討することにした。

図-4に示す水平および鉛直方向に傾斜した引張りクラックモデルを考え、そのときに表面で検出されるシミュレーション波形を解析により求めた。検出点として選んだ表面上の点の座標を表-2に示す。引張りクラックの深さは、0.05mであり、図-5と同様に加速度波形を求めた。そして、3次元の破壊源探査の手法を用いてクラック発生位置の決定を試みた。

ここで考えたクラックの方向のデータは表-3の左欄に示されている。破壊源探査の結

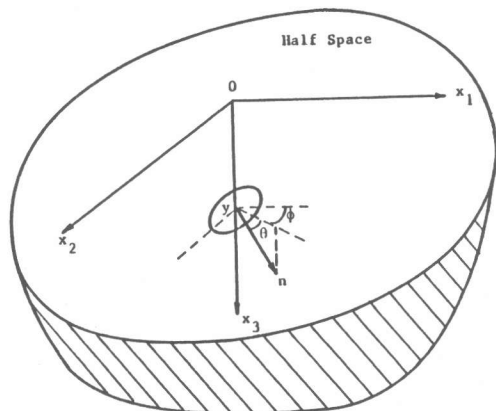


図-4 引張りクラックの解析モデル

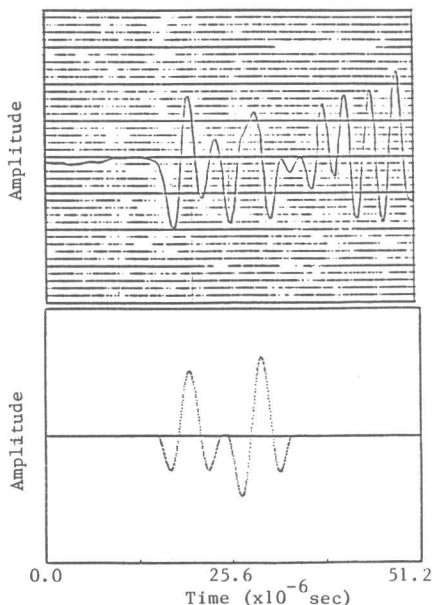


図-5 検出波形（上図）と解析波形（下図）

表 - 2 A E 検出点の位置

No.	( $x_1, x_2$ )(m)
1	(-0.05, 0.05)
2	(0.0, 0.05)
3	(0.05, 0.05)
4	(-0.05, 0.0)
5	(0.0, 0.0)
6	(0.05, 0.0)
7	(-0.05, -0.05)
8	(0.0, -0.05)
9	(0.05, -0.05)

果、総ての場合において、深さが0.051 m となったのを除けば、水平方向の座標は、クラックの水平座標を原点の位置へと変換すれば、全く表-2の座標に一致することが、認められ、精度良く破壊源探査されていることが分った。

検出されたA E波形からひびわれ(クラック)の方向を決定するには、放射形式を利用しなければならない。クラックにより発生したA E波動のP波初動の振幅は、地震波と同様に、ある規則性を持った空間的な分布に従うことが知られており、これが放射形式(文献4)と呼ばれる。

発生するのが、引張クラックの場合には、クラックから検出点への距離をr、その方向余弦をYとして、表面で観測される表面に垂直な方向のP波の振幅値uは、次式に従うことになる(文献4参照)。

$$u = A(2\nu/(1 - 2\nu) + 2(\gamma_k n_k)^2) \cos\theta$$

nは図-4に示すように、引張クラックの開口方向であり、 $\nu$ はポアソン比、Aは弾性定数から決定される定数である。上式から決定すべき量は、クラックの方向ベクトルあるいは表-3に示されている方向角である。ところが、上式から明らかなように、これはnに関する2次式となっているため、uを与えてもnを一意に決定することは不可能である。そこで、方向角を2.5度ずつ変化させて、上式より各検出点におけるuの分布を求め、破壊源探査の結果求められている検出点でのシミュレーション波形のP波初動の振幅値uの分布に最も良く一致する組合せを選ぶことにより、方向角を決定した。このと

表 - 3 引張クラックの方向

Cases tested	Results obtained
( $\theta, \phi$ )	( $\theta, \phi$ )
(0.0, 0.0)	(0.0, 0.0)
(10.0, 0.0)	(10.0, 0.0)
(20.0, 0.0)	(20.0, 0.0)
(90.0, 90.0)	(90.0, 90.0)
(30.0, 0.0)	(32.5, 0.0)
(45.0, 0.0)	(50.0, 0.0)*
(0.0, 15.0)	(0.0, 15.0)
(0.0, 45.0)	(0.0, 45.0)
(10.0, 15.0)	(10.0, 15.0)
(45.0, 45.0)	(50.0, 45.0)

き、P波の検出点での反射も反射係数を導入することにより考慮した。以上の手法により求められた引張クラックの方向は表-3の右欄に示されている。表中の結果より傾斜角が中間的(30度、45度)な場合を除けば、非常に精度良くクラックの方向が決定されていることが分る。これより、A E波形の初動の振幅値が多点の検出点で(少なくとも5点以上)求められれば、それより引張クラックの方向が決定可能であることが認められた。

## 6. 結論

1) A E法に基づいたひびわれの総合的評価法を提案し、力学的条件としての限界応力拡大係数 $K_{Ic}$ とA E波形の解析によるひびわれ方向の決定について検討を行った。

2) A E発生頻度の急増荷重とBEM解析によって決定された $K_{Ic}$ の値は、ノッチ深さa/Wの増加および供試体寸法の変化による変動が少なく、ひびわれ発生を支配する物性値として有望であることが認められた。

3) 検出波形とシミュレーション波形の一致を確認した後、シミュレーション波形を用いてひびわれの位置、さらに放射形式に基づいてひびわれの方向を決定することを試み、その有効性を確認した。

## 参考文献

1. 大津政康, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985.
2. M.Ohtsu & Y.Fukunaga, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kumamoto University, Vol.16, No.1, 1986.
3. M. Ohtsu & K. Ono, Journal of Acoustic Emission, Vol.3, No.1, 1984
4. 大津政康, 材料, Vol.32, No.356, 1983.