

[1090] AE 法によるひびわれ診断に関する考察

正会員 大津政康 (熊本大学工学部)

1. はじめに

戦後の急激な社会資本の整備にともなって蓄積されたコンクリート構造物は、維持管理への配慮が必要な時期にさしかかりつつある。なかでも、コンクリートに発生するひびわれについては、アルカリ骨材反応、塩害などの経年変化による劣化以外の要因も加わって、深刻な社会問題ともなっている。それゆえ、コンクリート構造物におけるひびわれに関する研究は、現在の急務であると考えられる。このことは、コンクリート工学の分野での、示方書、指針などにひびわれの補修についての項目が加わりつつある点からも推測することができよう。

構造物のひびわれの研究に関しては、図-1に示すように設計、施工、供用時の段階が考えられる。ひびわれの抑制を考慮した設計、発生を制御しうる施工の選択は勿論であるが、供用時においては的確な調査、

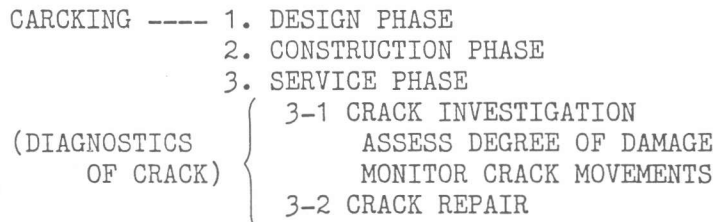


図-1 ひびわれ診断の概念

診断が必要であろう。さらに、その診断結果に基づいて的確な措置、補修法の選択がなされねばならないと考えられる。

著者等は、これまでアコースティック・エミッションの発生特性に基づいたひびわれ欠陥の評価について研究を行っており¹⁾、本研究はこれらの成果をもとにひびわれ診断の方法について考察し、計測手法とそれによる基礎的な研究成果についてまとめたものである。

2. ひびわれ診断の方法

アコースティック・エミッション (AE) とは、コンクリートにおいてひびわれ発生により生じる弾性波の総称である。それゆえ、AEの観察さえすることが可能ならば、コンクリート内部でのひびわれの進展は検出することができる。しかしながら、AEはひびわれの新たな発生によってのみ検出されることより、既存のひびわれに対しては、あまり有効な手法とは言えない。ひびわれが、進展しない限りAEは発生しないからである。

Assessment of Deterioration of Crack Movements
Monitoring
Impact Detection

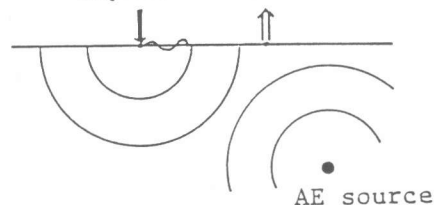


図-2 アコースティック・エミッションと超音波 (弾性波) による診断

そこで、既存のひびわれに対しては金属材料における超音波探傷と同様に、コンクリート部材を伝播する波動成分のひびわれによる攪乱を検出することを考える。この概念を示したものが、図-2である。ここで、超音波と表現したが、すべての固体材料中を伝播する波動は音波ではな

く弾性波であることに注意されたい。これは、可聴音域（20 kHz 以下）を越える周波数成分をもつ波動を総称して超音波と慣例的に呼ぶためである。AE 計測装置の対象周波数領域は、一般に 1 kHz - 1 MHz であることより、当然のことながら AE 計測装置は超音波探傷に適用可能である。

図のように、AE の検出システムに対して、外部からの弾性波の入力、伝播とひびわれの発生による AE 波動を考える。既存のひびわれの位置あるいはパターンの検討とか部材の劣化度の評価には、入力された弾性波の伝播挙動の変化を検出し、新たなひびわれの進展の検出および発生位置と方向の決定には AE 波動を検出しようとするものである。これは、言わば医者 of 打診と聴診器にたとえることができよう。

弾性波を用いた超音波探傷には、衝撃パルス法、パルス・エコー法²⁾などが知られている。これらは、基本的に波動情報の時間領域での解析を目的としている。そのため、狭い周波数帯域にのみ応答特性をもつトランスデューサ（変換子）および計測系を使用している。一方、広い周波数応答特性をもつ計測装置を用いた波動情報の周波数領域での解析を目的とした方法は、超音波スペクトロスコーピーと名付けられており³⁾、コンクリートへの適用が研究されつつある⁴⁾。著者等のグループも同様な考えのもとに、弾性波動の周波数領域での伝播特性について研究を進めており、周波数領域での変化に着目していることより、弾性波フィルター特性と名付けて基礎的な成果を報告している⁵⁾。

3. 計測装置

AE 法に基づいたひびわれ診断のための計測装置のブロック・ダイアグラムを図-3に示す。弾性波検出部としての AE 計測装置は AE トランスデューサ、プリアンプ、ディスクリミネイタが基本的な構成をなしている

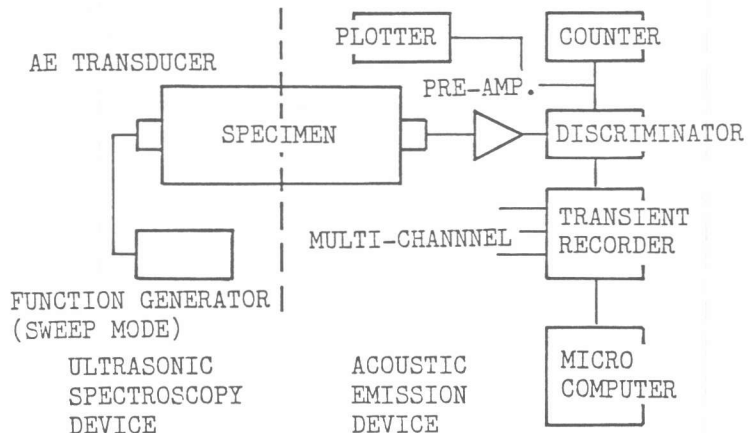


図-3 計測装置ブロック・ダイアグラム

。トランスデューサは、市販の公称共振周波数 1 MHz の圧電型トランスデューサであり、全体で 60 dB（1000 倍）増幅し、計測周波数帯域は 1 kHz - 300 kHz とした。個々の AE 現象の発生に対してディスクリミネイタはパルス出力をカウンターに行う、それゆえ AE 頻度（発生個数）はカウンターにより計数することができる。また、ひびわれ発生源の情報を AE から得るためには、AE の波形分析を行わねばならない。これには、トランゼント・レコーダ（高速波形記憶装置）が必要である。波形分析はマイクロコンピュータによって行うが、ひびわれの位置とか方向まで決定するには、図中にも示すように AE トランスデューサからトランゼント・レコーダまでを多チャンネルに有するシステムが必要となる。

入力弾性波は、ファンクション・ジェネレータから電気信号を発生させ、圧電型 AE トランスデューサの可逆性を利用して、この電気信号をトランスデューサに直接入力することにより、発生させることにした。

4. 測定原理

検出される弾性波 $u(x, t)$ は、パルスとして入力される外力を $f(y, t)$ 、ひびわれ面 F でのくいちがい量を $b(y, t)$ とすれば、次のような一般式で表すことができる⁶⁾。

$$u(x, t) = G(x, y, t) * f(y, t) \quad (1)$$

$$u(x, t) = \int_F T(x, y, t) * b(y, t) ds \quad (2)$$

ここで、 $*$ は時間に関する合成積を意味し、 $G(x, y, t)$ および $T(x, y, t)$ は、それぞれ y 点での力あるいは変位にたいする x 点での応答を表わす境界要素法でよく知られている基本解である⁷⁾。

超音波スペクトロスコープでは、出力を周波数領域で検討することより、式 (1) のフーリエ変換を考えることにより、

$$U(f) = G(f)F(f) \quad (3)$$

を得る。ここで、 $U(f)$ 、 $G(f)$ 、 $F(f)$ は、それぞれ式 (1) における $u(t)$ 、 $G(t)$ 、 $f(t)$ のフーリエ変換を意味する。式 (3) から、 $F(f)$ には外力の他に検出装置の周波数応答特性も含めると考えることにすれば、検出波動の周波数特性 $U(f)$ は、それにコンクリート部材の応答特性 $G(f)$ をかけたものであることがわかる。そこで、 $G(f)$ のスペクトルは、次式より求められる。

$$\| G(f) \| = \| U(f) / F(f) \| \quad (4)$$

これが、定義におけるコンクリート部材の超音波スペクトロスコープであり、FFTを用いてフーリエ解析を行った例が報告されている⁴⁾。それに対して、著者等は、式 (3) に基づいて簡便な計測法を用いている⁵⁾。式 (3) において、 $F(f)$ が周波数 f に無関係な一定値 C であれば、

$$\| U(f) \| = C \| G(f) \| \quad (5)$$

となり、出力自身がスペクトロスコープとして理論的には得られることになる。周波数に無関係な一定値とは、入力信号で考えれば電圧一定で種々の周波数の周期関数であればよいので、ファンクション・ジェネレータのスイープモードを使用することにより入力することができる。図-3の計測装置にスイープモードと記入してあるのはこのためである。

AEの計測では、検出だけを目的とする場合には、図-3に示すカウンターがあれば、頻度として計数できるので、式 (2) のような理論式は不要である。しかし、ひびわれ発生の情報が必要な場合には、AEの波形解析を式 (2) に基づいて行うことになる。

基本解 $T(x, y, t)$ は、P波が x 点に到達後しか成分をもたないことより、検出点 x の位置に依存し、距離 $\| x - y \|$ によって到達時間差を生じることになる。これが、ひびわれ位置を決定する破壊源探査の原理である。理論的には、最低5箇所の検出点があれば3次元の破壊源探査は行うことができる。さらに、ひびわれのタイプと進展方向を決定するには、式 (2) を変形して、そ

メント・テンサー表示 M_{pq} 、

$$T(x, y, t) * b(y, t) = \partial G(x, y, t) / \partial y * s(t) M_{pq}(y) \quad (6)$$

を求めればよいことが、明らかになっている⁸⁾。ここで、 $s(t)$ はひびわれ発生源でのくいちがいを表す関数 $b(y, t)$ の時間関数を表わしている。

5. 結果および考察

5-1 超音波スペクトロスコピー

超音波スペクトロスコピー（弾性波フィルター）のコンクリート部材での実験結果と FEM による共振解析の結果の例を図-4 に示す。図-4 の b) は、中央に 3 cm ノッチを有する 10 cm X 10 cm X 40 cm のコンクリート供試体の上部に出力トランスデューサを取付けて得られた 20 kHz までのスペクトロスコピーを示している。この実験的に得られたスペクトルを、理論的に解明するため、FEM による共振解析を行った。これは、ソニック法などで与えられている共振周波数と部材寸法の関係式が、1 次元振動の仮定から求められたものであり、実際の部材に対しては適用できないと考えられたためである。

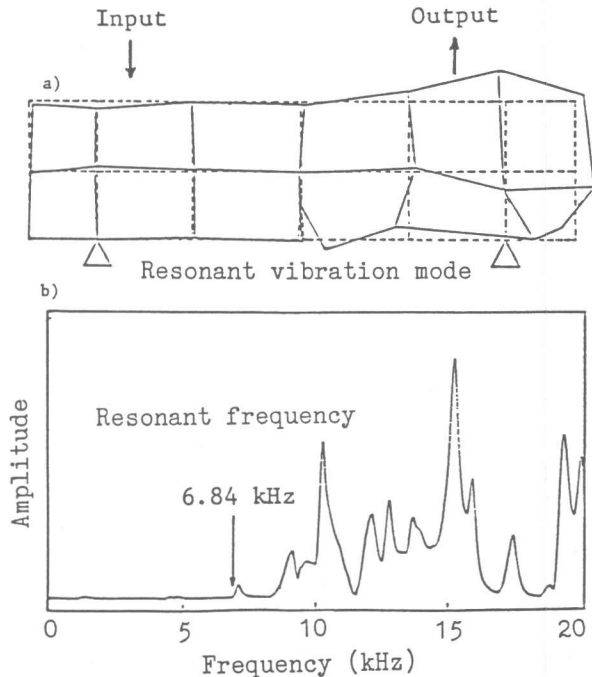


図-4 はり供試体の超音波スペクトロスコピー
(A Eコンクリート供試体：3 cm ノッチ)

図-4 の a) に示すような要素分割を用いて固有値解析を行い、部材の固有振動数と振動モードを求めた。その結果、実験で求めた周波数領域に数多くの共振点が存在することが明らかになった。そこで、図に示す出力点での振幅が、大きな最低次の共振モードを取りだしプロットした。ここで、変位振幅はかなり誇張して示されている。このモードに対応する固有振動数は 6.84 kHz であり、スペクトロスコピーにおける初期ピーク周波数と非常によく対応していることが観測される。ノッチ（ひびわれ）を有する部材の固有値解析結果によれば、固有振動数はノッチ深さによって小さくなることが知られており、この結果より、初期ピーク周波数の低下によりひびわれ深さを判定する可能性が示されたと考えられる。

5-2 コア供試体の内部微小ひびわれ

コンクリートの一軸圧縮試験においては、A E は初期の荷重盤との接触による発生を除けば、ひずみの非線形挙動が顕著となる破壊荷重の 70 % 程度の荷重レベルまでは、ほとんど A E は発生せず、それ以後は急激に加速度的に発生し供試体の最終破壊に至ることが知られている。これは、70 % までの間に発生した微小ひびわれが、進展し連結される過程に対応して A E が発生していることを示している。

このことより、コンクリート構造物のコア供試体の圧縮試験において、既に発生している微小ひびわれの程度を判定することが可能となる。図-5は、国道10号線の竹の下跨線橋（大分県南海郡直川村）のコンクリート床版から取り出されたコア供試体のA Eの発生

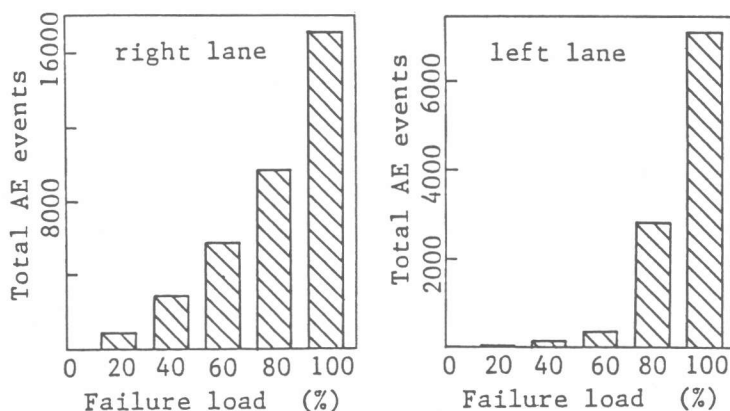


図-5 コア供試体の一軸圧縮試験結果

生頻度の試験結果を示したものである。表面のアスファルト舗装の排水状態が悪く損傷が予想された右車線のコアでは載荷の初期からA Eが多数発生しているのに対し、状態の良かった左車線のコアでは、フレッシュな供試体と類似な発生挙動をしていることがわかる。これより、右車線部のコンクリート床版には、すでにかなりの微小ひびわれが発生していることが推測される。

5-3 A Eの波形解析

A Eの波形解析としては、実験的に多チャンネルでのA E波形を得ることができなかつたために、著者が以前にA Eの理論波形解析を行っ

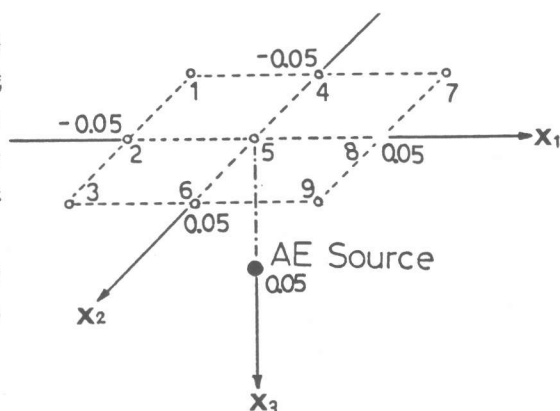


図-6 シミュレーション解析におけるA E発生源とトランスデューサの配置 (1-9)

た際に開発した波形

表-1 モーメント・テンサー解とその固有値解析結果

DEGREE	MOMENT TENSOR			EIGENVALUE	(θ, ϕ) VECTOR
TENSILE	1.000	0.152	0.101	1.000	9.77, 14.81
$\theta = 10$		0.465	0.027	0.409	-
$\phi = 15$	SYM.		0.451	0.405	-
TENSILE	1.000	0.396	0.199	1.000	20.14, 45.00
$\theta = 20$		1.000	0.199	0.419	-
$\phi = 45$	SYM.		0.732	0.411	-
SHEAR	0.384	0.095	-1.000	1.000	-34.82, 15.35
$\theta = 10$		0.045	-0.268	0.016	-0.32, -74.87
$\phi = 15$	SYM.		-0.393	-1.016	-
SHEAR	0.541	0.521	-0.856	1.000	-24.79, 45.00
$\theta = 20$		0.541	-0.856	0.012	0.00, -45.00
$\phi = 45$	SYM.		-1.000	-0.962	-

形解析には最低6箇所で

所の検出が必要である。材料は、通常のコンクリートを対象としてP波速度は4000m/s

、ポアソン比は0.2とした。そして、深さ5cmの位置で発生したひびわれによって図に示す9箇所の点で検出されるAE波動を計算した。

仮定したひびわれは、引張ひびわれとせん断ひびわれであり、解析例は表-1に示されている。ここで、 ϕ 、 θ はひびわれ面に立てた法線方向を示しており、引張ひびわれではこの方向に開口し、せん断ひびわれでは、この方向に直角下方にずれが生じると仮定した。後の波形解析では、P波振幅の各検出点での相対的な比のみが必要であることより、ひびわれの規模は1×1mmに固定して求めた。まず、波形のP波の到着時間差から破壊源探索によりひびわれ発生位置を決定した。その結果、探索誤差は1mm以下であることが認められた。次に、P波初動の振幅値の比から提案した手法を用いて⁸⁾モーメント・テンサーを各ひびわれに対して決定した。その例が表-1に示されている。ただし、成分は全て最大値で正規化してある。第一列に仮定したひびわれとその方向を示し、解析の結果えられた諸量が第二列より示されている。

モーメント・テンサーに関しては、その固有値解析をおこなえば、ひびわれのタイプ、方向が求められることをすでに明らかにしているが⁸⁾、それはこの結果でも確認できる。引張ひびわれでは最大固有値1と二つの等しい固有値が得られ、せん断ひびわれでは±1と0の固有値が得られることになっているが、決定された固有値もほぼそのようになっている。さらに、引張ひびわれでの最大固有値に対応する固有ベクトルの方向は、ひびわれの方向に一致することになっているが、表に示されているとおり、ベクトルより求めた ϕ 、 θ の値はシミュレーション解析でのものとよく一致している。一方、せん断ひびわれでは、±1の固有値に対するベクトルの方向はせん断面と45度の角度をなすことが知られている。せん断の結果では下方へのひびわれに対応して、固有値1に対するベクトルの方向は水平角 ϕ は等しく、垂直方向 θ は仮定したひびわれ面の方向と-45度異なっている。

6. 結論

AE法に基づいたひびわれ診断法の計測手法、測定原理について考察し、基礎的な研究成果について報告した。超音波スペクトロスコピーによるひびわれの評価、コア試験による微小ひびわれ判定、AEの波形解析によるひびわれ機構の決定などの可能性が明らかになった。

参考文献

- 1) 大津政康：AE法に基づいたひびわれ欠陥の総合的評価、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、201-204.： 2) N. J. Carino, M. Sansalone, and N. N. Hsu: A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Journal, March-April, 1986, 199-208.： 3) W. Sachse: Ultrasonic Spectroscopy of a Fluid-filled Cavity in an Elastic Solid, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No. 3, 1974, 891-896.： 4) 尼崎省二、明石外世樹、高木宜章：超音波スペクトロスコピーのコンクリートへの適用に関する基礎的研究、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第5部、1986、121-122.： 5) 坂田康徳、大津政康：弾性波フィルター特性によるコンクリートのひびわれ評価法に関する基礎的研究、コンクリート工学、Vol. 24, No. 7, 1986, 135-145.： 6) M. Ohtsu and K. Ono: The Generalized Theory and Source Representations of Acoustic Emission, Journal of Acoustic Emission, Vol. 5, No. 4, 1986, 124-133.： 7) 境界要素法の理論と応用、境界要素法研究会編、コロナ社、1986.： 8) M. Ohtsu and K. Ono: Crack Orientations and Moment Tensor Solutions in Acoustic Emission, Progress in Acoustic Emission III, Japanese Society of Nondestructive Inspection, 1986, 771-778.