

コンクリートのひびわれ診断への AE 法の適用[†]

大津 政 康*

Diagnostic Application of AE to Crack Inspection in Concrete

by

Masayasu OHTSU*

As a diagnostic application of the acoustic emission (AE) waveform analysis, crack inspection based on the moment tensor analysis is proposed. Because moment tensor components contain information on crack kinematics, the decomposition of eigenvalues of the moment tensor is possible and the contributions of shear motion and tensile motion to crack nucleation can be determined from the ratio of eigenvalues. Thus, cracks are classified into the type of dominant motion. After the crack types are determined, crack orientations can be decided from the directions of eigenvectors.

The procedure developed was applied to a pull-out test of anchor bolt and a cylindrical tension test. The results confirm the applicability of the procedure to inspecting internal cracks by the quantitative AE waveform analysis based on the moment tensor inversion.

Key words : Acoustic emission, Moment tensor inversion, Crack inspection in concrete, Pull-out test, Cylindrical tension test

1 緒 言

コンクリート構造物に発生するひびわれは、最近では社会的な問題として捉えられることも少なくなく、ひびわれ診断技法の確立はコンクリート工学における研究の急務であると考えられる。このような背景のもとに維持管理に関連したさまざまな取り組みがなされているが、ひびわれの検査技術の開発はここで重要な位置を占めると思われる。

コンクリート構造物の劣化度診断に関連してひびわれを検討する場合には、圧縮部と引張部に発生するひびわれを分けて考えることが必要である。その概念図を Fig. 1 に示す。圧縮部では曲げひびわれの進展は阻

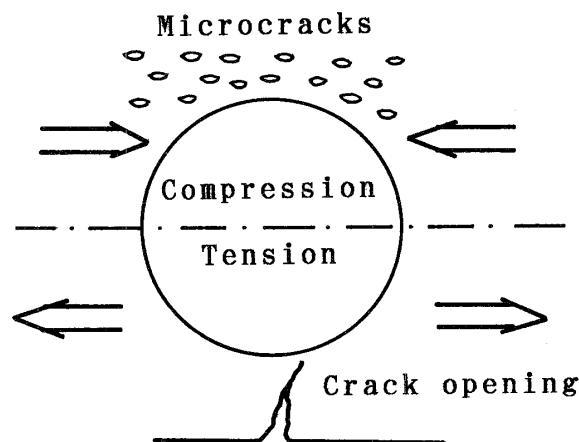


Fig. 1. Mechanisms of crack nucleation in concrete.

止されることから、疲労などにより微小なひびわれが集積される。この部分の評価を目的とした検査には弾性率とか超音波速度の測定あるいは SI 法¹⁾などによる構造部材の損傷度の決定などがある。この他に、筆者らは圧縮部の累積微小ひびわれを、コア供試体の圧縮試験にアコースティック・エミッション (AE) 法²⁾を適用し評価する方法を提案している。

一方、引張部においては引張ひびわれが発生・進展する。これは、コンクリートの引張強度が圧縮に比べて低いため生じる固有の現象であり、劣化度評価の見地からは進展状況の把握が関心事となる。AE 法は、この内部ひびわれの進展をモニターする検査法として有用であり³⁾、内部ひびわれの追跡には破壊源探査法が開発されている^{4),5)}。そして、AE 法によるひびわれ情報の抽出に関して、前報では AE 波形の定量的な解析を行えば、ひびわれの幾何学的な情報を与えるモーメントテンソルが決定できることを報告した⁵⁾。本報告では、この理論に基づいてひびわれ診断での検査を目的とした実用的な手法として破壊源探査によるひびわれ発生位置の決定に加えて、さらに、ひびわれの種類と方向まで決定できる AE 波形解析法を提案する。そして、適用例によって、ひびわれ進展の予測に重要な情報をもたらす可能性を明らかにする。

2 AE の波形解析手法

2・1 モーメントテンソル逆解析

[†] 前報は材料36巻408号1025頁 (1987年) に掲載済である。

原稿受理 平成2年11月17日 Received Nov. 17, 1990

* 正会員 熊本大学工学部 熊本市黒髪, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kurokami, Kumamoto

検出点での AE 波形の変位成分 $u_i(x, t)$ は、ひびわれ発生点 y でのひびわれの幾何学的情報であるモーメントテンソル成分 $m_{pq}(y)$ と伝達媒体のグリーン関数の空間微分 $G_{ip,q}(x, y, t)$ を用いて、

$$u_i(x, t) = G_{ip,q}(x, y, t) m_{pq}(y) * S(t) \quad (1)$$

とテンソル表現できる。ここで、 $S(t)$ はひびわれの発生時間関数であり、逆合積と呼ばれる波形解析はこの時間関数を決定することである。モーメントテンソルとは、次式のように弾性定数テンソル C_{ijpq} とひびわれ面の法線ベクトル n_j とひびわれの運動方向ベクトル b_i から得られるテンソルであり、次のように書ける。

$$m_{pq} = C_{ijpq} b_i n_j \quad (2)$$

要するに、モーメントテンソルには、弾性定数に加えてひびわれの面の方向と運動の方向に関する情報が含まれていることがわかる。したがって、ひびわれの幾何学的な情報を抽出するには、この成分を決定することが必然的となる。

弾性波動問題で検出波動から擾乱源の推定を行う逆問題の解析は、地震学を別にすれば非常に新しい分野であり、現在までのところ超音波に関連して幾つかの研究が見られる程度である。AE の場合には、検出波動が式 (1) の左辺にあたるので、これを用いてモーメントテンソルの成分を決定することが逆問題となる。モーメントテンソル成分の決定に関しては、逆合積も含めて積分方程式として解析する方法が提案されているが、筆者らは線形連立方程式を解くだけの、多量の AE 波形解析のコンピュータ処理に適した SiGMA (Simplified Green's Function for Moment tensor Analysis) と名づけたプログラムコードを開発した。¹¹⁾ 式 (1) から P 波初動に関係する項のみを取り出すことにより、検出点 x での P 波初動の振幅値 $a(x)$ は、

$$a(x) = D \cdot \text{RF}(r_i) \cdot r_p r_q / R \cdot m_{pq}(y) \quad (3)$$

と表すことができる。ここで D は検出時の相対感度係数、 R はひびわれ発生点 y から検出点 x への距離であり、 r_i 、 r_p 、 r_q などはその方向余弦を意味する。

そして、 $\text{RF}(r_i)$ は検出点での入射角を考慮した反射係数である。

破壊源探査によりひびわれの発生位置が決定されていれば、式 (3) の右辺は m_{pq} を除いてすべてわかっている項である。したがって、P 波初動振幅が求められれば、式 (3) は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ことがわかる。ここで、モーメントテンソルは 2 階の対称テンソルであることより、独立な 6 個の成分を決定するために少なくとも 6 箇所の検出点が必要である。

2・2 固有値分解によるひびわれ同定法

求められたモーメントテンソルの成分の分析に関しては、幾つかの方法が提案されているが、^{10), 12)} いずれも一般性に欠けており実用的ではないと考えられる。そこで、固有値解析に基づく方法を考案した。これは、テンソルの性質から主成分が必ず固有値および固有ベクトルとして得られることに着目し、さらに、引張りひびわれとせん断ひびわれでは 3 個の固有値に特徴ある差異が存在することに基づいたものである。⁶⁾

モーメントテンソルが求められた後に固有値分析を行い、固有値と固有ベクトルを決定する。この場合、前報で述べたようにひびわれが引張型かせん断型かで固有値のあり方は異なるはずであるが、⁶⁾ 実際には混合された形で得られることが多く、固有値のままではその分類は容易ではない。そこで、せん断型と引張型が混合されていることを仮定として、卓越している成分の方に分類する方法を考案した。

3 個の固有値を唯一に分解できることを目的として、固有値を最大固有値で正規化し、その内におけるせん断成分を X 、引張成分の内の偏差成分を Y 、引張成分の内の等方成分を Z とすれば、3 個の固有値は Fig. 2 のように一意に分解することができる。ここで、引張りの偏差成分は地震学に習って、¹³⁾ CLVD (Compensated Linear Vector Dipole) と示してある。図より、次のような固有値の分解式を得ることができる。

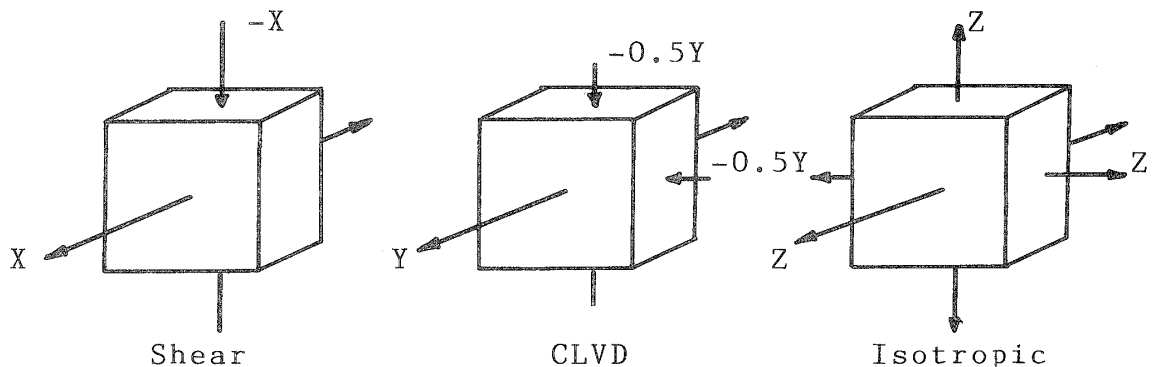


Fig. 2. Decomposition of eigenvalues of moment tensor components into shear component, CLVD component, and isotropic component.

$$1.0 = X + Y + Z$$

$$\text{第2固有値/第1固有値} = 0 - 0.5Y + Z \quad (4)$$

$$\text{第3固有値/第1固有値} = -X - 0.5Y + Z$$

固有値が得られていれば、式(4)の比率 X 、 Y 、 Z を決定することは容易なことであるので、これよりせん断型の寄与率： X と引張型の寄与率： $Y+Z$ を求めることができる。この分類法の長所は X 、 Y 、 Z の相対的な比率を決定すればよいから、式(3)でのモーメントテンソル成分の決定も相対値でよいという点である。このことは、AE 検出システムの感度特性についても関係し、理論波形解析で一般に必要とされるような絶対的な感度較正は必要ではなく、等価な感度が保証されているか、そうでなくても試験後に感度を等価とするための補正が可能であればよいということを意味する。

前報での結果より⁶⁾、引張ひびわれの開口方向は第1固有ベクトルの方向であることがわかっているため、引張型と分類されたひびわれは第1固有ベクトルの方向に開口するモードが卓越していると考えられる。一方、せん断型の場合には第1固有ベクトルと第3固有ベクトルは、ひびわれ法線ベクトルと運動ベクトルとのそれぞれ和と差に相当することより、せん

1. AE Waveforms detected at more than 6 ch.

[Digital sampling]

(P wave arrival times)

[Source location analysis]

2. Crack location

(P wave amplitudes)

[SIGMA analysis]

3. Moment tensor components

[Eigenvalue analysis and decomposition]

4. Crack type and orientation

Fig. 3. Flow chart of the crack analysis by AE waveforms.

断ひびわれでの直交する法線と運動の方向はこの2つのベクトルの方向から決定できる。

2.3 AE 逆波形解析法

ここまでの理論に基づいて開発した AE 波形の逆解析法のフローチャートを Fig. 3 に示す。3次元の破壊源探査には、P 波初動の到達時刻の検出できる5箇所以上の検出点があればよいが³⁾、SIGMA コードによるモーメントテンソル解析には、前述のように6箇所以上の検出点が必要となる。そこで、図のように6箇所以上の検出点で波形記録を行う。そして、P 波の到達時間差より破壊源（ひびわれ発生源）の位置を決定する。つぎに P 波の初動振幅値を求め、式(3)からモーメントテンソルの成分を決定する。最後に、固有値解析を実施し、式(4)からひびわれを卓越する成分のタイプに分類し、その結果から固有ベクトルを用いてひびわれの方向決定を行う。これが、ひびわれ診断を目的とする AE 波形解析システムの概要である。

3 適用例

これまでに述べた AE 逆波形解析を適用した例として、アンカーボルトの引き抜き試験と円筒引張試験での解析結果を報告する。いずれの実験も岐阜大学土木工学科実験室で実施されたものであり、6チャンネルで検出された AE 波形をディスク上に記録したものを Fig. 3 のフローチャートに従って後処理を実施したものである。

AE 波形の計測システムは共振周波数 140 kHz の AE センサを用い、プリアンプで 40 dB、ディスクリミナイタで 20 dB 増幅し、周波数帯は 30 kHz~80 kHz のバンドパスフィルタを採用した。そして、AE 波形はデジタル波形記録装置でサンプリング時間間隔 1 MHz で 1024 語のデータとしてディスク上に収録した。

3.1 アンカーボルト引き抜き試験

試験では、100 cm×100 cm×30 cm の直方体コンクリートブロックに 10 cm の深さに埋め込んだアンカーボルトを引き抜き、その際に発生する AE を直方体の6面に設置した AE センサで検出した。この計測の詳細は別報¹⁴⁾を参照されたい。コンクリートの圧縮強度は 554 kgf/cm² であり、荷重はセンターホールジャッキにより実施した。引き抜き試験装置の概要は Fig. 4 に示す。実験では、AE 発生頻度の発生挙動を観察し、急激な破壊が発生しないように荷重を制御した。AE 逆波形解析結果の例を Fig. 5 に示す。これは、引き抜き荷重とアンカーボルトの引き抜き量のグラフにおいて、最大荷重点まで（ステージ I）に観測された AE 事象と破断面の観測された最終段階（ステージ IV）での事象の平面図と正面図とを描いたものである。ひびわれ発生源の位置に引張ひびわれお

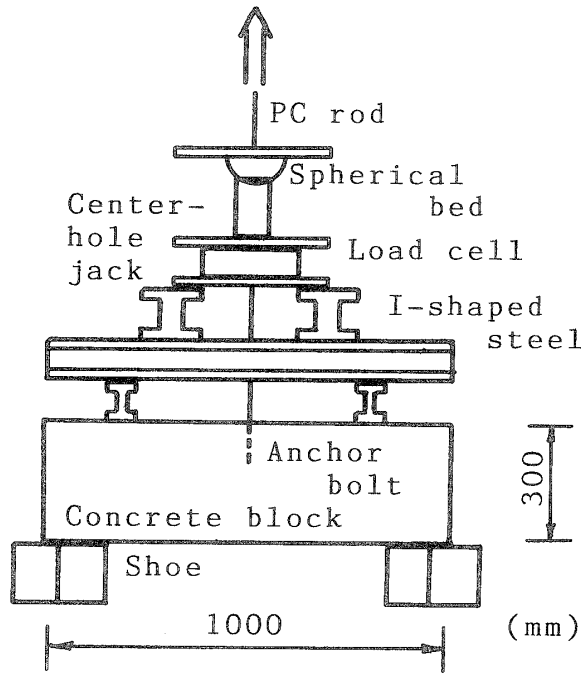


Fig. 4. Pull-out test of anchor bolt from the concrete block.

よびせん断ひびわれを記号により分類して示している。引張ひびわれの場合には矢印の方向がひびわれの開口方向と一致し、せん断の場合には直交する2線分の方がそれぞれ、ひびわれの法線方向とせん断すべりの運動方向に一致するようにプロットしている。

当初の考えでは、ひびわれのタイプの分類には、式(4)を解いて X の比率が 50% 以上ならばせん断型、50% 以下ならば引張型と分類することにしてしたが、解析を行ったところ、 X の値は 55% 以下で 45% 以

上というような事象が幾つか認められた。前報⁶⁾の数値実験の結果から 5% 程度のモーメントテンソルの解析誤差は避けられないものであることが知られているため、これらの事象を $X=50%$ という基準で分類することは多くの誤りを含むことが予測できた。そこで、 $X>55%$ ならばせん断型、 $X<45%$ ならば引張型として分類することにし、その中間の値のものは解析対象から除外することにした。

図中の正面図における破線は最終破断面を示している。実際にはコーン状に発生した AE 発生位置をこのような透視図で表したため、破断面から離れた位置にひびわれが発生したかのように見える事象も見られるが、実際にはそれぞれのひびわれ発生位置は実際の破断面とかなりよく一致していることが認められた。

ステージ I では引張ひびわれは、最終破断面の半分程度の位置にその開口方向とほぼ一致して観察される。一方、せん断ひびわれはアンカー底部に密集して見られ、その方向は破断面に平行である。ステージ IV では、引張ひびわれは開口方向を一致させながらほぼ破断面の先端で観察され、平面図では中心から放射状に開口している。ステージ I および IV を比較すれば、最終破断面の形成過程によく対応して、ひびわれの進展状況が観察されていることがよくわかる。また、いずれのステージでも全体として引張ひびわれは、探査されているひびわれ群の外縁部に分布しており、せん断ひびわれがそれに囲まれて発生している様子が観察される。岩質材料の破壊は、初めに微小な引張ひびわれが発生し、それが連結されて最終の主破壊面が形成されると考えられるが、ここでの結果は引張ひびわれに追隨す

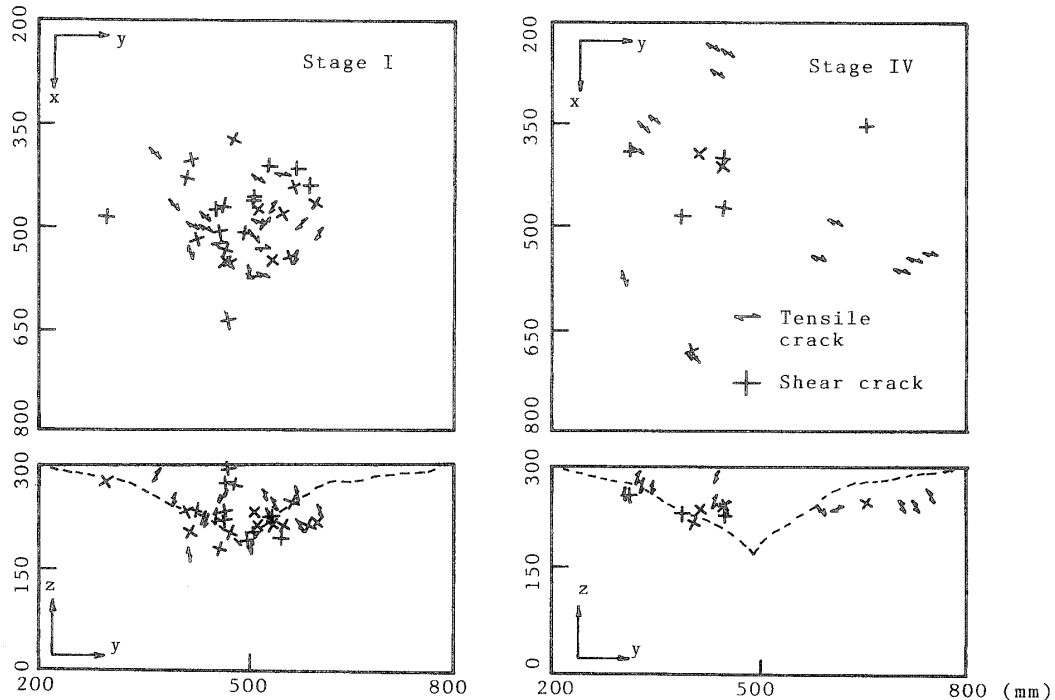


Fig. 5. Crack locations, types, and orientations analyzed at stages I and IV.

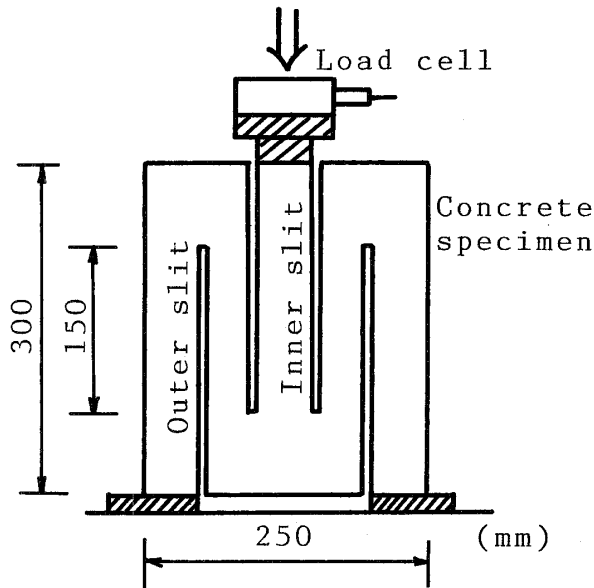


Fig. 6. Tensile test of the cylindrical specimen.

るかたちでせん断ひびわれが発生したことを示唆していると思われる。

3・2 円筒引張試験

円筒引張試験とは、Fig. 6 のように円筒形供試体に径の異なる円形のスリットを上端および下端から設け、内側スリットに囲まれた部分に圧縮荷重を加え、その反力を外側スリットの外部領域で支えることにより、2つのスリットで囲まれた領域で引張破壊を生じさせ

る試験法である。

実際に実験を行ったのは、Fig. 7 に示すように六角柱の供試体であり、コンクリートの圧縮強度は 511 kgf/cm^2 であった。この試験の詳細については別報¹⁵⁾を参照されたい。

試験では、わずかな AE 事象しか検出できなかったため、荷重-変位曲線のピークを過ぎた直後までをステージ I、始めから最終段階までのすべてをステージ III として Fig. 7 に示す。ステージ I からステージ III へと平面図で x 軸の回りから反時計方向へ回転しながら引張領域でひびわれが進展している様子が観察される。また、解析された事象は引張ひびわれに分類されたものが卓越しており、破壊モードは引張破壊であることが認められる。しかしながら、供試体は正面図で上下方向に破断したにもかかわらず、引張ひびわれの開口方向はそれに直角な円周方向となっている。一方、数少ないせん断ひびわれは破断面に平行となっている。解析データが少ないため、結論として述べることは問題があると思われるが、せん断ひびわれの方向が破断面に平行である点から類推すると、最終破断面に対して、本試験法で初期に発生する引張ひびわれの方向には、ここでの結果のように载荷軸に直角な方向に形成される可能性もあると考えられる。このように、本手法によれば破壊過程でのひびわれ発生の機構についての情報がもたらされと思われる。

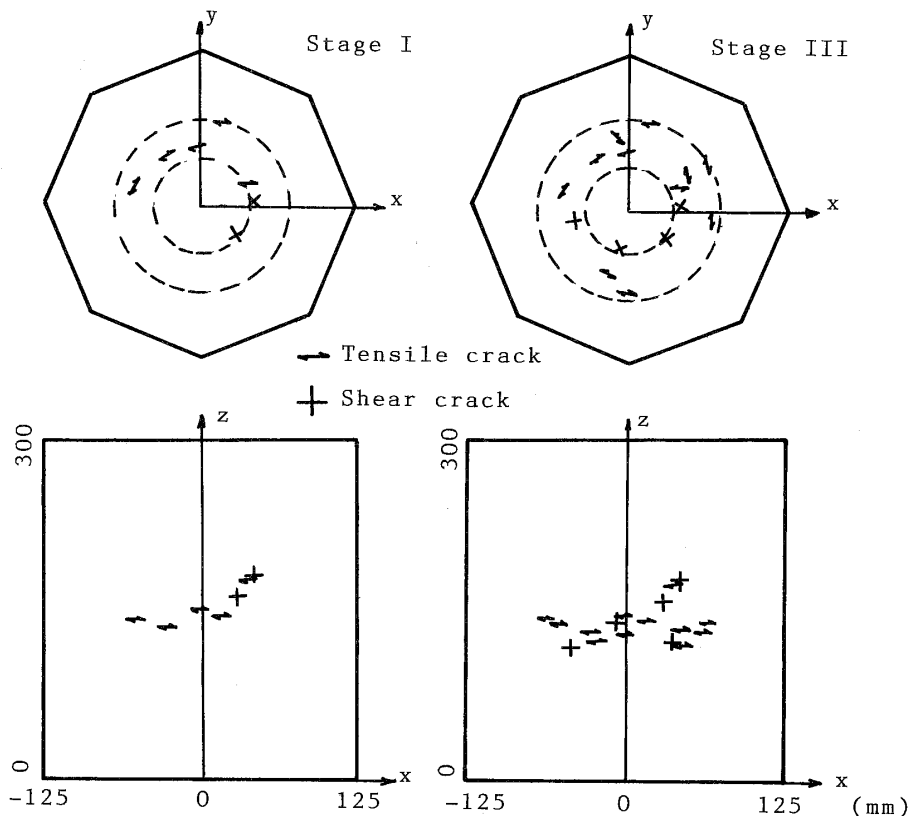


Fig. 7. Crack locations, types, and orientations analyzed at stage I through stage III.

4 結 言

コンクリートに発生するひびわれ診断のための検査法として AE 法の逆波形解析法を提案した。得られた結果に見られるように、実験室でのデータからはひびわれ診断に重要なひびわれの発生位置、タイプ、運動方向が分析できることが明らかになった。

引張ひびわれとせん断ひびわれの分類と方向の決定は、ひびわれの進展位置の他に今後の進展方向の予測にもつながる情報であり、今後、標準的な屋外検査法としての確立に期待したい。

適用例で示した解析の AE 波形は、すべて岐阜大学の小柳治教授および六郷恵哲助教授のご厚意により提供いただいたものであることを明記し、両氏に深く感射する。なお、本報告でのソフトウェア開発は、文部省科学研究費補助金・試験研究 (B) 課題番号 01850111 によるものであることを付記し、解析に携わった大学院生の重石光弘氏と共に謝意を表す。

(平成 2 年 6 月 27 日 コンクリート工学年次講演会にて一部講演)

参 考 文 献

- 1) J. L. Beck, "Nondestructive Evaluation for Performance of Civil Structures," eds. M. S. Agbabian and S. F. Masri, p. 192 (1988) USC. Los Angeles
- 2) 大津政康, 森永浩通, セメント・コンクリート論文集, **43**, 394 (1989).
- 3) 丹羽義次監修, 大津政康, "アコースティック・エミッションの特性と理論" (1988) 森北出版
- 4) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康, 土木学会論文報告集, **276**, 135 (1978).
- 5) J. F. Labuz, S. P. Shah and C. H. Dowding, J. Engineering Mechanics, ASCE, **115** (9), 1935 (1989).
- 6) 大津政康, 材料, **36**, 1025 (1987).
- 7) K. Aki and P. G. Richards, "Quantitative Seismology Theory and Methods," I, II (1980) W. H. Freeman and Company, San Francisco
- 8) J. D. Achenbach, D. A. Sotiropoulos and H. Zhu, J. Applied Mechanics, **109**, 754 (1987).
- 9) D. A. Sotiropoulos and J. D. Achenbach, Int. J. Solids Structures, **24** (2), 165 (1988).
- 10) M. Enoki and T. Kishi, "Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation," eds. S. K. Datta *et al.*, p. 307 (1989) North-Holland, Amsterdam
- 11) M. Ohtsu, *ibid.*, p. 357.
- 12) A. K. Maji, C. Ouyang and S. P. Shah, J. Materials Research (in press).
- 13) L. Knopoff and M. J. Randall, J. Geophys. Res., **75** (26), 4957 (1970).
- 14) 重石光弘, 大津政康, コンクリート工学年次論文報告集, **11-1**, 311 (1989).
- 15) 重石光弘, 大津政康, コンクリート工学年次論文報告集, **12-1**, 185 (1990).