

論文

[1030] AE波形逆解析によるコンクリート円筒引張試験の観察

正会員○重石光弘（熊本大学工学部）

正会員 大津政康（熊本大学工学部）

1. はじめに

アコースティック・エミッション（以下AEと略）現象は、弾性材料における微小破壊（微小ひびわれの形成）にともなう弾性波（AE波）の放射現象であり、そのAE波は、発生源の小さな破壊現象に関する情報としてとらえることができる。したがって、そのAE波を適切に採取し、理論解析することができれば、構造物材料の目に見えない内部の破壊現象を探ることができる。さらに、破壊機構に関する諸量の算定や弾性材料の疲労度及び寿命予測、あるいは様々な破壊現象の解明に利用できる一手法として期待されており、今日ではAE現象の定性化、定量化の研究が盛んに行なわれている。

本論文は岐阜大学のグループによって行なわれたコンクリート円筒引張試験¹⁾において採取されたAE波形データに対し、著者らの提案するモーメントテンソルを用いたAE波形の逆解析法を適用し、コンクリート円筒供試体の破壊現象の観察結果と考察を述べたものである。

2. AE波形逆解析²⁾

著者らは、境界要素法（BEM）の弾性波動の基礎式を起点としたAE波動理論ならびにそれに基づいたAE波形の逆解析法すなわちモーメントテンソル解析法を提案し、さらにそれをコンクリート構造物の破壊現象に対して実際に適用してきた³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。今回のモーメントテンソルを用いたAE波形の逆解析法の流れを図-1に示し、それらの手順をまとめると以下ようになる。

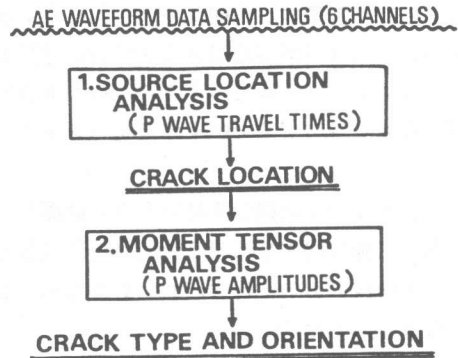


図-1. AE逆解析流れ図

① AE源位置標定：

採取されたAE波形データをパーソナルコンピュータのCRT画面上に再現し、AE源位置標定に必要な初期微動（P波）の各トランスデューサーへの到達時間と、後のモーメントテンソル解析に必要なP波初動振幅値をマウスを使用して読みとる。1イベント（今回は6チャンネル）分のP波到達時間から最小二乗法によりAE源の位置の第1近似解を求め、さらに収束計算を行なってAE源の位置を標定する。

②モーメントテンソル解析⁶⁾：

AE波形解析の基礎式をAE波のP波初動部分だけに着目して変形させた次式を用いて、各AEイベントに対してのモーメントテンソルを求め、固有値解析及び固有値分解を行なって、微小ひびわれ（AE源）の種別（引張orせん断）とそのひびわれ変位の方向を決定する。

$$u_i(x) = \gamma_i \gamma_p \gamma_q \cdot m_{pq} / (4 \pi \rho R \cdot V_p) \dots (1)$$

ここで、 $u_i(x)$ ：位置xでの（位置x-AE源）方向の振幅値

γ_i : (位置 x - A E 源) 方向ベクトルの i 方向成分

ρ : A E 波伝播媒体密度, R : 位置 x と A E 源との距離, V_p : P 波伝播速度

モーメントテンソル \mathbf{m} はテンソル表示にて次式により表わされる。

$$m_{pq} = C_{kj pq} \cdot n_j \cdot b_k \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 $C_{kj pq}$: 4 階の A E 波伝播媒体の弾性定数テンソル

n_j : ひびわれ (A E 源) のひびわれ面法線方向ベクトル

b_k : ひびわれ面の変位方向ベクトル

結局モーメントテンソル \mathbf{m} は、応力と同じ 2 階のテンソルであるからモーメントテンソルの固有値解析を行えば、その主値と主方向とを取り出すことができる。その固有値解析の結果がもつ重要な意味は、

1) せん断ひびわれに対応するモーメント・テンソルの固有値は、 μb , 0 , $-\mu b$ となり、せん断変位の方向すなわちひびわれ面の方向は最大固有ベクトルと最小固有ベクトルとの和で表される。

2) 引張ひびわれの場合には、モーメント・テンソルの固有値は、 $2\mu b(1-\nu)/(1-2\nu)$, $2\mu b\nu/(1-2\nu)$, $2\mu b\nu/(1-2\nu)$ となり、引張変位の方向すなわちひびわれの開口方向は最大固有ベクトルの方向に一致する。

ここで、 ν : A E 波伝播媒体のポアソン比, μ : L a m é の定数

となることである。しかし実際には、純引張のひびわれあるいは純せん断のひびわれというものは極めて希であり、その多くは引張とせん断とが合成されたものであると考えられる。そこで、先に求められた最大、中間及び最小固有値よりひびわれによる変位をせん断成分、引張偏差成分 (CLVD) ⁷⁾ 及び引張等方成分の 3 成分に分解することを考え、その結果せん断成分を 60% 以上含むモーメントテンソルを示す A E イベントをせん断卓越型イベントとし、一方せん断成分が 40% 以下の A E イベントを引張卓越型イベントとして分類することにした。

3. コンクリート円筒引張試験と A E 計測¹⁾

今回の引張試験並びに A E 計測は岐阜大学工学部土木工学科において行なわれたものであるが、その概略を以下に示す。

① コンクリート円筒引張試験:

一般にコンクリートの純引張試験では、変位制御を完全に行なってもそれによって最大耐力以降も安定した荷重-変位曲線を得るということは極めて困難であるが、圧縮試験機を用いて比較的容易に純引張試験を行える新しい円筒引張試験法が提案されている⁸⁾。

この試験方法は、円柱型のコンクリート供試体の上下より直径の異なる円筒状のスリットをコアドリルによって加工し、上下から圧縮力を作用させることで供試体内部に引張領域を生じさせ、引張破壊を生じさせるものである。本試験法の概

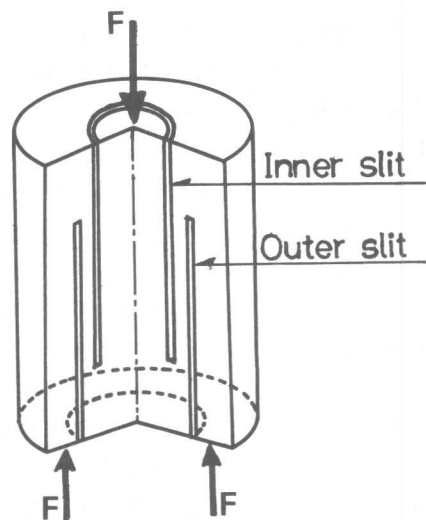


図-2. 円筒引張試験

念図を図-2に示す。

今回の実験では図-3に示すような八角柱供試体（高さ 300mm）を使用し、これに外側スリット（仕上がり内径 150mm）と内側スリット（仕上がり外径78mm）を加工した。また内側と外側の両スリットのオーバーラップ部すなわち引張領域の長さは 150mmとなるようにした。供試体の作製に使用したコンクリートは最大粗骨材寸法15mmの普通コンクリートで、材齢4カ月における圧縮強度は 511kgf/cm^2 であった。引張試験においては図-4に示す様に、開口変位計により供試体中央の円柱状部とその外側の円筒状部との相対変位を、ロードセルにより荷重を測定し、さらに供試体が最大耐力を示した後は、急激な破壊が生じないように载荷と除荷を繰り返して図-5に示す様な荷重-変位図が得られた。

② A E 波形計測：

A E 計測に使用した A E 計測システムの構成を図-6に示す。トランスデューサーには共振周波数が140kHzのものを使用し、トランスデューサーは図-7に示す様に供試体の上面（ $z = 300\text{mm}$ ）及び下面（ $z = 0\text{mm}$ ）にそれぞれ3チャンネルづつを配置した。トランスデューサーによって検出された A E 信号はプリアンプで40dB、ディスクリミネーターで20dB、計60dB増幅され、さらに周波数帯域 30~80kHzの A E 信号を A/D 変換し、サンプリング間隔 $1\mu\text{sec}$ で400words分をウェーブメモリーに記録した。さらにウェーブメモリーに記録された A E 波形データはIEEE-488インターフェースを介してパーソナルコンピューターに転送し、固定ディスク装置に記録した。この1イベントの記録にかかる所要時間は約6秒であった。また A E 源位置標定に際して必要となる P 波伝播速度 V_p の測定を超音波伝播速度にて求めた結果、 $V_p=4300\text{m/sec}$ であった。A E 波の伝播速度は引張試験中も、また供試体中のどの位置においても不変であるとして、A E 源位置標定においてはこの値を採用した。

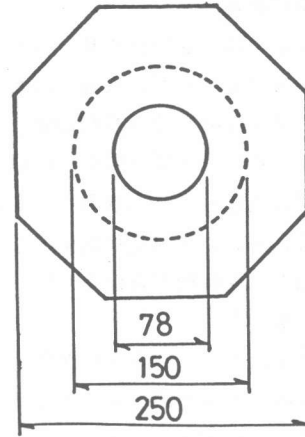


図-3.八角柱供試体

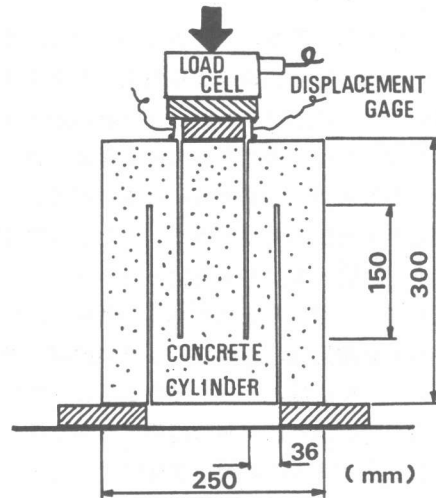


図-4.試験装置

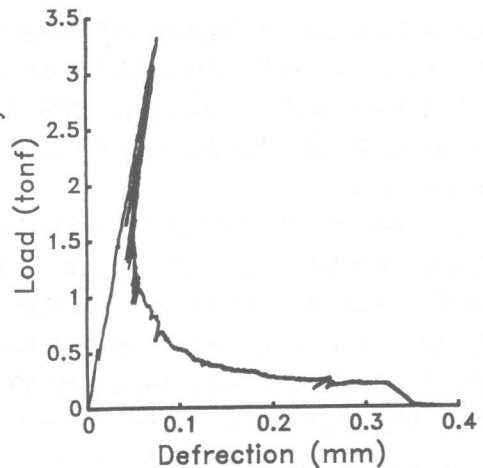


図-5.荷重-変位

4. 結果及び考察

引張試験中に採取されたAEイベントの総数は415イベントであったが、採取されたAE波形が不明瞭でP波到達時間及び初動振幅値が読み取り不能であったり、AE源位置の近似解の収束計算において解が発散したり、さらにはモーメントテンソル解析において不適当な結果となったAEイベントを除き、逆解析できたAEイベントは124イベントとなった。

逆解析できたAEイベントの発生時点を（荷重-変位）軸のグラフ上にプロットすると、図-8の様な荷重-変位図（図-5）のほぼ包絡線を示した。

一旦除荷して再び載荷するといった過程すなわち図-5における包絡線より内側で発生するAEイベントは、既存ひびわれのひびわれ面どうしの摩擦や細かな塵などによるものと考えられるが、そのAE波形は連続型あるいは不規則で、P波初動部分が不明瞭なものが多く、したがって逆解析ができず、図-8上に表現できなかった。一方逆解析ができ、図-8上にプロットされたAEイベントのAE波形は、そのほとんどが内部（歪み）エネルギーの解放によって発生するといわれる突発型であり、供試体が履歴荷重状態から新たな荷重状態へ変化する際の微小な破壊現象を示しているものと考えられる。

さらに図-8からAE発生状況を見ると、最大耐力を示しある程度まで変形が元に戻る弾性域まではAEイベントの発生はゆるやかであるが、荷重約1.3tonf-変位約0.05mmから後、荷重に対して変位が急速に進む軟化域ではAEの発生が活発となっている。

次に供試体のスリットに挟まれた引張領域に位置標定されたAEイベントについて、その位置標定結果及びモーメントテンソル解析結果を図-9①、②、③に示す。図-9①は、図-8における弾性域（図-8上のAE Event No. 30までの）までの結果、同②は遷移域（図-8上のAE Event No. 30~60）、さらに同③は軟化域（図-8上のAE Event No. 60以降）までの結果を順次プロットし

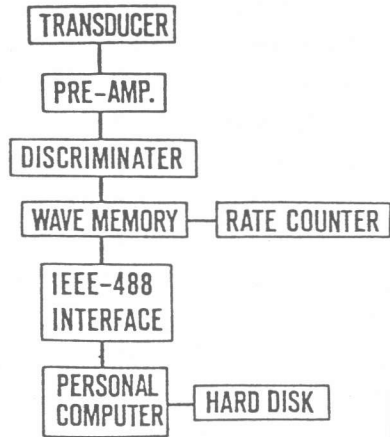


図-6. AE計測装置

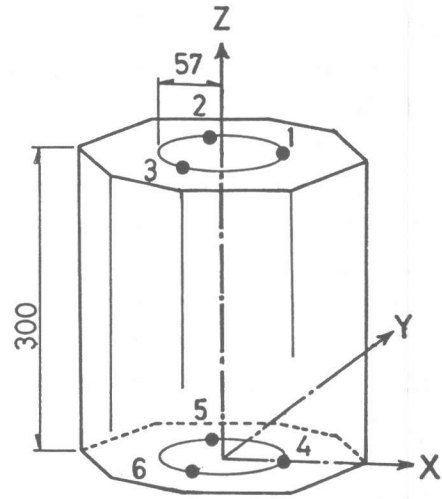


図-7. トランスデューサー配置

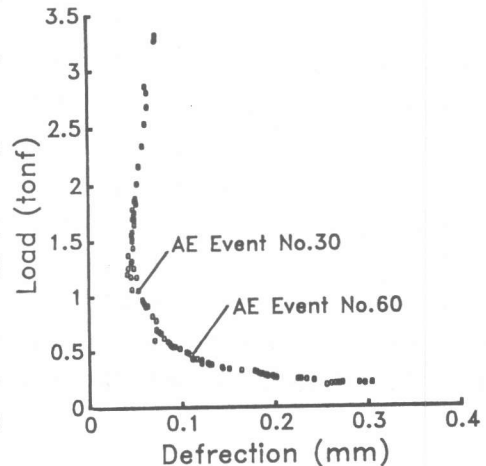
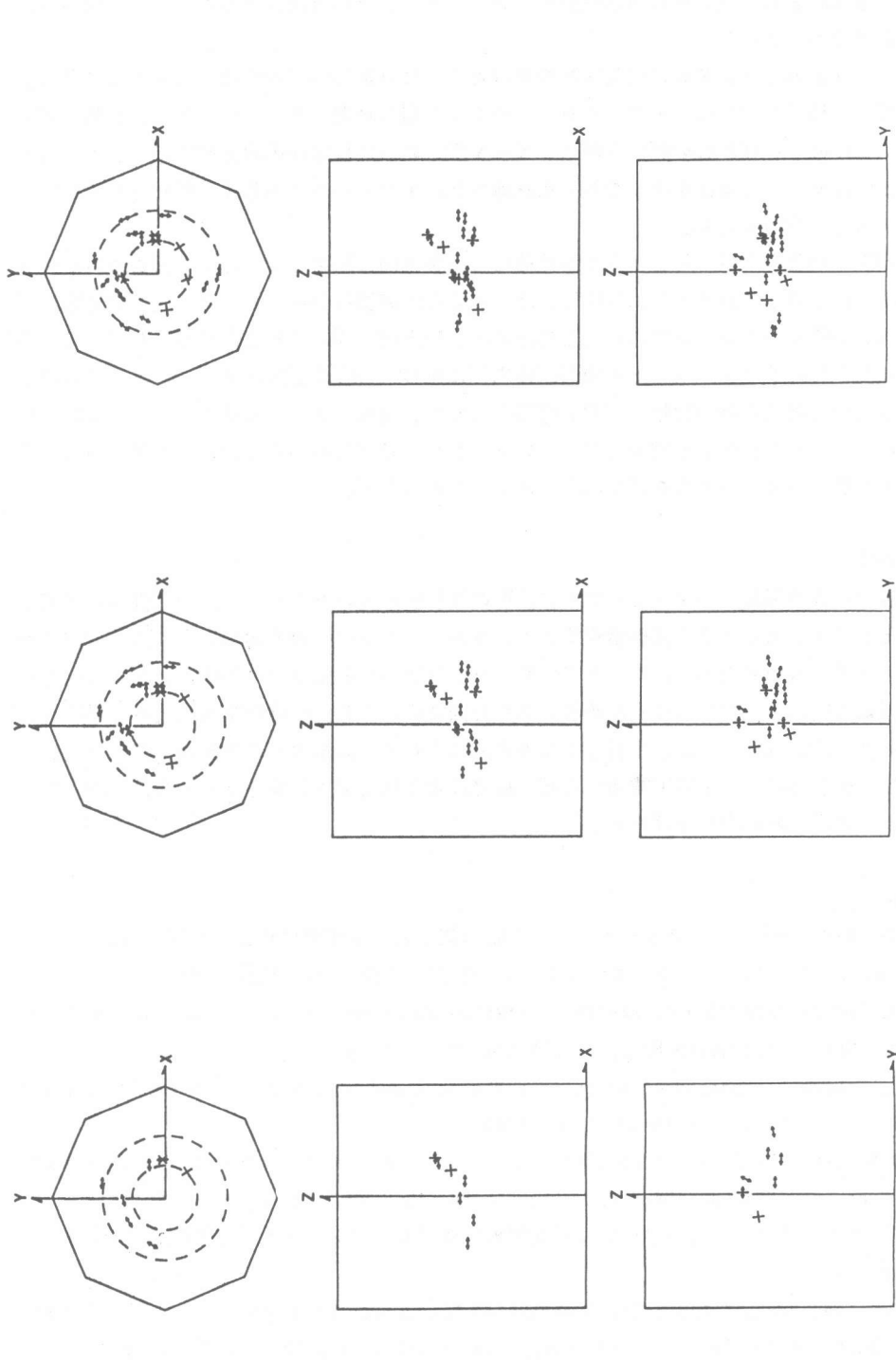


図-8. AE発生状況



① = 弾性域 (AE Event No. 30 まで) ② = ① + 遷移域 (AE Event No. 30 ~ 60) ③ = ① + ② + 軟化域 (AE Event No. 60 以降)

図-9. A E 源位置標定及び A E 波形逆解析結果 (↔: 引張卓越型イベント, ×: せん断卓越型イベント)

ている。図中の \leftrightarrow は引張卓越型イベントであることを示すと同時にその方向は引張ひびわれ面の開口方向を示す。また、 \times はせん断卓越型イベントを示し、その方向はせん断ひびわれ面の方向及び法線方向を示している。

これら図-9をみるとA E源は引張試験の進行とともに供試体の高さ中央部に集中して破断面を形成していく様子がわかる。また、それらの多くが引張卓越型のA Eイベントで、引張卓越型A Eイベントの微小ひびわれの開口方向は、X-Y面においてはほぼ円周方向を指し、X-Z面及びY-Z面においてはほぼ水平すなわち供試体内部に生じているであろうと予想される引張応力の方向に対して直角である。

弾性体内部に引張力が生じると、その弾性体には引張方向に膨張しようとする引張歪みを生じるが、引張方向に対して直角方向には収縮しようとする圧縮歪みが生じる。また、3次元応力下においては、引張モードのひびわれは最も拘束の小さい方向へ開口することが知られている。今回の引張試験におけるコンクリート円筒供試体内部に生じた引張卓越型A Eイベントによる微小ひびわれの開口方向は圧縮载荷軸の方向と直交しており、拘束のより小さな方向に対して応力が解放されたことをうかがわせる結果となっている。さらに考察を進めるために、今後は他のA Eパラメータや破壊力学との融合を図る必要があると考えられる。

5. あとがき

材料試験中の破壊現象モニターとしてA E波形の逆解析法をコンクリート円筒引張試験に適用したが、その結果、供試体の引張破壊現象はマクロ的にみれば引張の方向に対して直角方向の破断面を形成する引張破壊であったが、ミクロ的にみれば微小な引張ひびわれは、引張方向に対して直角な圧縮方向に生じていることが確認されたと同時に、A E法の材料試験結果の評価法への適用の可能性が示された。また、本報告を執筆するにあたり、岐阜大学工学部の小柳 治先生、六郷 恵哲先生ならびに関ヶ原工業㈱の岩瀬 裕之氏より貴重なA E波形データを御提供下さいました。ここに深くお礼申し上げます。

〈参考文献〉

- 1)小柳,六郷,岩瀬,小山;「コンクリートの円筒引張試験とA E破壊源探査」,材料学会,1988
- 2)丹羽,大津;「アコースティック・エミッションの特性と理論」,森北出版,1988
- 3)M.Ohtsu;'Source Inversion of Acoustic Emission Waveform',Proc. of JSCE, no.398/1-10, Structural Eng./Earth-quake Eng., pp.275-283, Oct., 1988
- 4)M.Ohtsu;'Source kinematics of acoustic emission based on a moment tensor', NDT international, vol.22, no.1, pp.14-20, Feb., 1989
- 5)M.Ohtsu, M. Shigeishi, H. Iwase;'AE Observation in the Pull-out Process of Shallow Hook Anchors',Proc. of JSCE, no.408/V-11, Concrete Eng. & Pavements, pp.177-186, Aug., 1989
- 6)重石,大津;「コンクリート構造物へのA E逆解析の適用」,コンクリート工学年次論文集,11-1, pp.311-316, 1989
- 7)Knopoff,L. and Randall,M. J. ;'The Compensated Linear-Vector Dipole : A Possible Mechanism for Deep Earthquakes', J. of Geophysical Reserch, vol.75, no.26, pp.4957-4963, 1970
- 8)Luong,M. P. ;Revue Francaise de Geotechnique, no.34, pp.69-74, 1986