

論文

[1051] コンクリート構造物への AE 逆解析の適用

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

弾性材料におけるアコースティック・エミッション（以下AEと略）現象そのものは、その弾性材料の微小な破壊（ひびわれ）の形成に伴う弾性波の放射現象である。言い換えれば、その破壊現象に関する情報の放出現象であるとも考えられる。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、弾性材料及び構造物の破壊機構の解明に適用できる可能性がある。これにより今日ではAE現象の定性化、定量化の研究が盛んに行なわれている次第である。

著者らは、AE現象の定量化の一方法として境界要素法（BEM）の弾性波動の基礎式を起点としてAE波形理論を一般化し、さらにそれに基づいたAE波形の逆解析手法を提案してきた¹⁾。

本論文はそのAE波形の逆解析手法を実際のコンクリート構造物に適用した場合の一例を報告するものである。

アンカーボルトは設備機器などをコンクリート構造物に設置する場合やSRC構造の柱脚接合部などにひろく用いられている。ここでAE波形逆解析の対象としたのは、アンカーボルトを有するコンクリート構造物におけるボルトの引き抜きによって生じるコンクリートの破壊現象である。

アンカーボルト部の破壊現象としては、アンカーボルト部の降伏および破断、コンクリート部のコーン状破壊、支圧破壊および付着破壊が考えられるが、ここではコンクリート部がコーン状破壊する場合を想定したアンカーボルトの引き抜き試験を行い、その破壊過程で発生したAE波形の逆解析を行い、その結果について考察する。

ただし、5チャンネルのAE計測システムを用いた小供試体における実験²⁾に対する解析結果は既に報告済みである³⁾。ここでは、小供試体での実験ではコーン状破壊を生じなかった例があったことと、さらに解析精度の向上を図るために6チャンネルのAE計測システムを用いた大供試体での再検討を行なった。

2. アンカーボルト引き抜き試験の概要⁴⁾

①供試体：試験に用いたコンクリート供試体は、アンカーボルト引き抜きに対し、支点部の拘束を受けずにコーン状破壊を生じるような大きさとし²⁾、図-1に示すように寸法を引き抜き面

100cm×100cm、厚さ30cmとした。この供試体に使用したコンクリートは最大粗骨材15mmの普通コンクリートで、打設二日後に脱型し、さらに屋外で約一ヶ月間湿布養生したものである。各強度試験結果

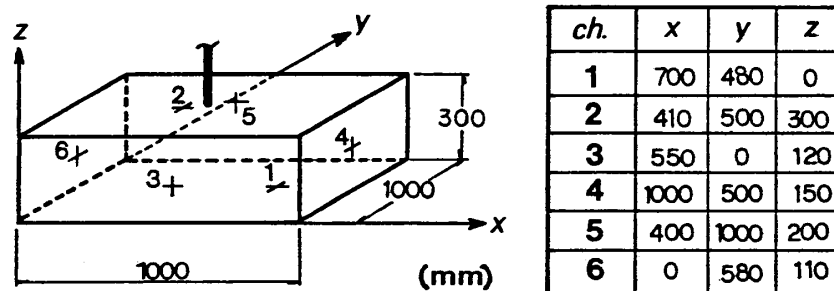


図-1. 供試体寸法およびセンサー位置

を表-1に示す。アンカーボルトには引き抜き試験中において降伏しないP C鋼棒 (SBPR-110/125、 $\phi 17\text{mm}$) を用い、これにアンカープレートとしてワッシャー ($\phi 44\text{mm}$ 、 $h=3.2\text{mm}$) をナット (対角距離 $d=40.4\text{mm}$ 、 $h=27\text{mm}$) とシアノアクリレート系接着剤にて接着してネジ止めた (図-2)。そして引き抜き力をアンカープレート部の支圧力のみで抵抗させるよう、グリスを塗布しポリエチレンラップを巻き付けることでコンクリートとの付着を切り、アンカープレート上面までの埋め込み深さが 10cm となるように埋設した。

②AE計測：AE波形データの採取には後述するモーメントテンソル解析に必要な最小限の6チャンネルの計測システムを用いた (図-3)。トランスデューサー (AEセンサー) 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センサー面にグリスを塗布し、専用のボンディングホルダーを使用して供試体の各面に図-1の座標位置に配置した。トランスデューサーによって検出されたAE信号は 60dB (プリアンプで 40dB 、ディスクリミネーターで 20dB) 増幅され、さらに周波数帯域 $30\sim 80\text{kHz}$ のAEイベントをウェーブメモリーによってA/D変換し、一事象につきサンプリング間隔 $1\mu\text{sec}$ で 1kwords 分を記録した。さらにウェーブメモリーに記録されたAE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に転送した後、固定ディスク装置の磁気記録媒体に記録した。この一事象の記録にかかる所要時間は約7秒であった。

③AE波伝播速度計測：引き抜き試験を行なう前に後述するAE源位置標定に際して必要なAE波 (P波) の伝播速度 V_p の測定を行った。本試験用供試体と同時に同配合のコンクリートで作製した曲げ試験用角柱供試体 ($10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 40\text{cm}$) において超音波伝播速度を求めた結果、 $V_p=4150\text{m/sec}$ であった。AE波の伝播速度は引き抜き試験中も、また供試体中のどの位置においても不変であるとしてこの値を採用した。ちなみに、引き抜き試験の前に供試体の任意の点に疑似AE源としてトランスデューサーを取り付け、これより超音波パルスを入力して求めた疑似AE源位置標定の誤差は 30mm 以内であった。

④載荷方法：載荷方法は図-4に示すようにセンターホール型油圧ジャッキを手動ポンプによって作動させてアンカーボルトに引き抜き力を加えた。また引き抜き時の偏心対策として球座を用いた。引き抜き力は供試体の引き抜き面の四辺にI型鋼を配置して供試体とジャッキとの反力をセンターホール型ロードセルによって計測し、またアンカーボルトの抜け出し量はアンカーボルトと供試体の角との相対変位を変位計によって計測した。また供試体、鋼材、ジャッキ等間の

表-1.強度試験結果

COMPRESSIVE STRENGTH	TENSILE STRENGTH	BENDING STRENGTH
554	39.3	53.4

(kgf/cm^2)

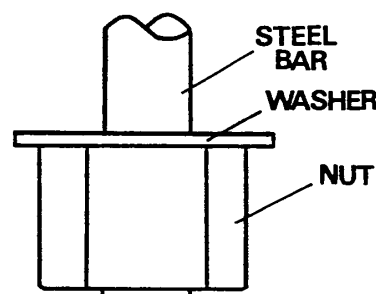


図-2.アンカープレート部

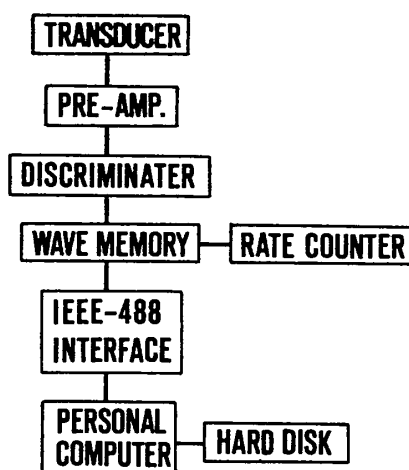


図-3.AE計測システム

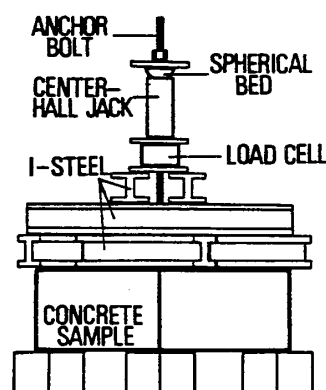


図-4.載荷装置

ガタつきによる機械的なノイズを低減するため、これらの間には厚さ1mmの硬質ゴムマットを挟んだ。前述のAE波形データ転送処理時間の点を加味して、なるべく多くのAEイベントを採取するためにデータ転送中には載荷を停止した。さらに最大引き抜き力付近以降では、供試体の瞬間的な破壊を防止するためAEイベントの発生数をレートカウンターで観察し、AEイベント発生数が急激に増加した場合には引き抜き力を一旦下げ、さらに実験を続けた。

3. AE波形データの逆解析⁵⁾

こうして得られた515イベント×6チャンネルのAE波形データに対して逆解析を行なった。そのフローチャートを図-5に示す。以下、逆解析手法の概略を述べる。

①AE源位置標定⁶⁾：AE源の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は、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、マウスデジタイザーを使用して読みとった。また同時に、モーメントテンソル解析に必要なP波の初動振幅値も併せて読みとった。

これら1イベントあたり6チャンネルのP波到達時間より最小二乗法を用いてAE源の位置の第1解を求め、さらにテイラー展開式に基づいた解の収束計算を行なってAE源の位置を標定した。トランスデューサーの応答感度やAE計測システムのノイズなどが原因で正確なP波到達時間および初動振幅値が読み取れないものもあり、それらは解析の対象から削除した。

②モーメントテンソル解析⁷⁾：既報¹⁾の解析理論によれば、モーメントテンソル m はテンソル表示にて次式により表わされる。

$$m_{pq} = C_{kjpq} \cdot n_j \cdot b_k \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 C_{kjpq} ：4階のAE波伝播媒体の弾性常数テンソル、 n_j ：ひびわれ(AE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であり、結局モーメントテンソル m は、応力などと同じ2階のテンソルである。したがって、モーメントテンソルの固有値解析を行なえば、その主値と主方向とを取り出すことができ、その結果がもつ重要な意味は次のようにまとめられている⁷⁾。

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 ：AE波伝播媒体のポアソン比、 μ ：Laméの定数である。

また実際には、ひびわれ面の変位が純引張あるいは純せん断であるということは極めて希であり、ひびわれの多くはその複合型であると考えられ、求められた固有値によりその変位をせん断成分、引張偏差成分(CLVD)および引張等方成分とに分解することができる⁸⁾。

実際に検出されたAE波形データからモーメントテンソルを求める際には、AE波のP波初動部分だけに着目してAE波形解析の基礎式⁷⁾を変形させた次式を用いた。

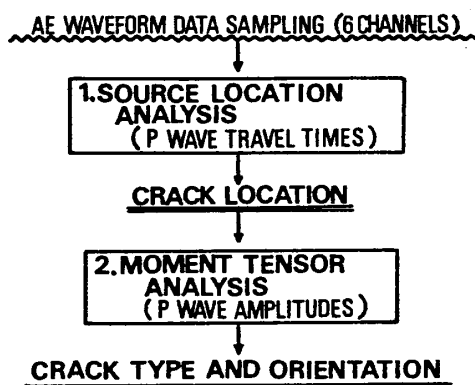


図-5. 逆解析フローチャート

$$u_i(x) = \gamma_i \gamma_p \gamma_d \cdot m_{pd} / (4 \pi \rho R \cdot V_p) \quad \dots\dots(2)$$

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 - AE 源) 方向ベクトルの i 方向成分、 ρ : AE 波伝播媒体密度、 R : 位置 x と AE 源との距離、 V_p : P 波伝播速度である。この式より各 AE イベントに対してそのモーメントテンソル解を求め、固有値解析およ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した。

4. 結果および考察

前節の手法を用いて逆解析を行なったが、解析に用いたプログラムにおける数値計算上の問題により AE 源位置標定の解やモーメントテンソル解が求められなかったりしたものもあった。この原因の多くは P 波初動部の検出を行なう際に生じた読み取り誤差からくるものと考えられ、ノイズと AE 信号とを分離、識別す

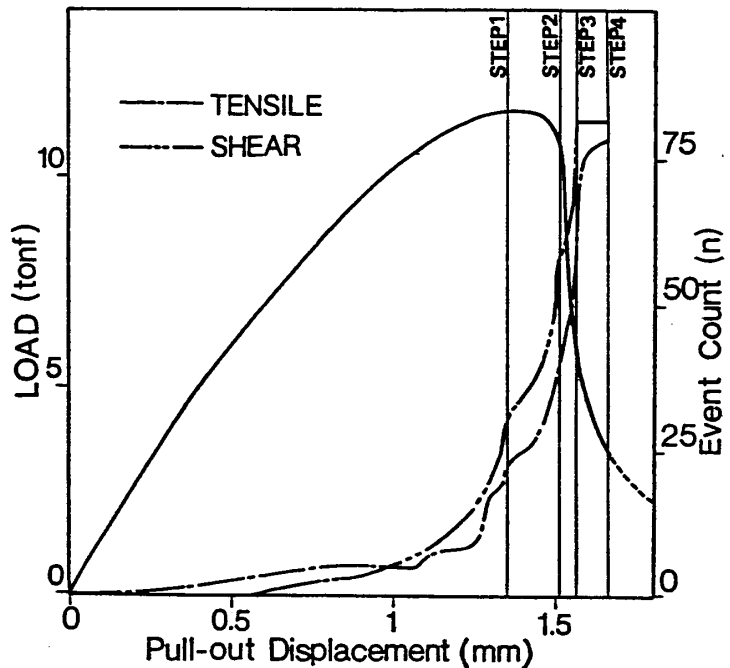


図-6. (引き抜き力-引き抜き量) 曲線および AE イベント発生累計

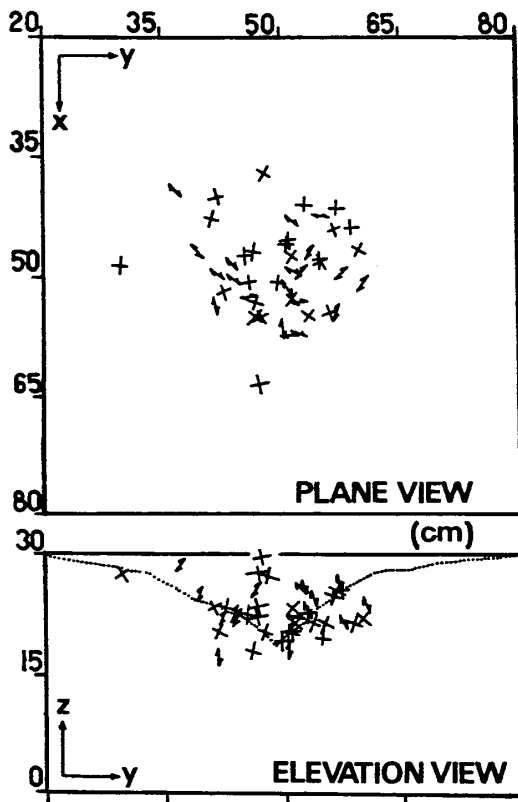


図-7A. AE 源位置および逆解析結果 (第1段階)
($\rightarrow$ 引張卓越型, $\times$ せん断卓越型)

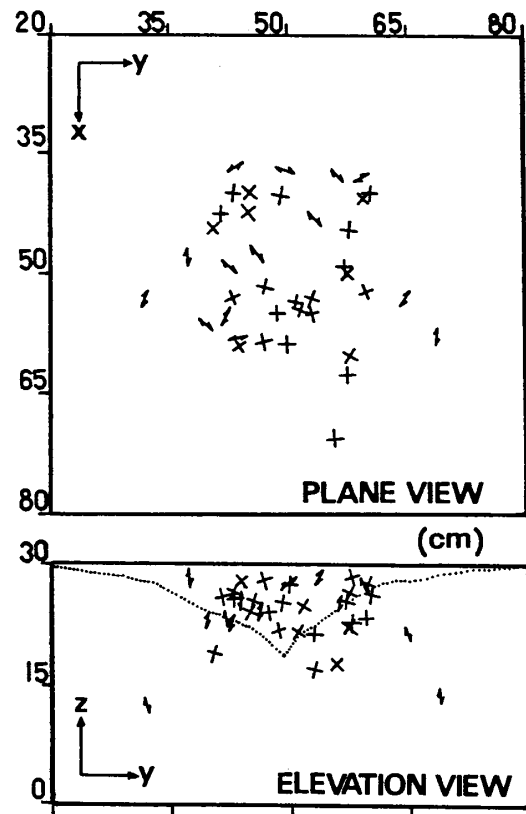


図-7B. AE 源位置および逆解析結果 (第2段階)
($\rightarrow$ 引張卓越型, $\times$ せん断卓越型)

る手法の開発が必要であろう。こうして逆解析ができたAEイベント数は 216イベントであった。さらに各イベントについて求められたモーメントテンソル解の固有値からせん断成分を取り出した結果、せん断成分が45%~55%であるイベントについてはそのイベントがせん断卓越型であるか引張卓越型であるかの決定は避けて、これを結果の対象から除き、以下モーメントテンソル解の固有値のせん断成分が45%未満であるものを引張卓越型イベント、55%より大きいものをせん断卓越型イベントと表現する。これによって逆解析の結果は 187イベントとなった。

図-6にはアンカーボルトの引き抜き力と引き抜き量との関係を応力-歪み曲線に倣って包絡線(実線)で示した。さらに、ボルトの引き抜き量に対するAEイベント発生累計を引張卓越型(一点鎖線)、せん断卓越型(二点鎖線)に分けて表示した。

これより、引き抜き力と引き抜き量がほぼ線形的である初期段階ではAEイベントの発生速度は比較的に緩やかで、累計数においては引張卓越型イベントの方が先行している。さらに引き抜きが進むと次第にAEイベント発生が活発となり、せん断卓越型イベントが優勢になる。コンクリート供試体のコーン状破壊が実際に観測でき始めた最大耐力の少し前あたりからは、両者のイベント発生が顕著である。

図-7(A)、同(B)、同(C)、同(D)は、AE源位置標定結果とモーメントテンソル解析によって得られた各イベントの種別および変位方向を図-6中に示した実験の各段階に分けて表示したものである。図中の $\leftrightarrow$ は引張卓越型イベントを表わし、矢印の方向は微小ひびわれの開口方向を示している。一方、 $\times$ はせん断卓越型イベントを表わし、微小ひびわれのひびわれ面方向およびその法線方向を示している。また、各段階におけるイベント数は、第1段階(A) 53イベント、第2段階(B) 41イベント、第3段階(C) 44イベント、第4段階(D) 46イベントである。

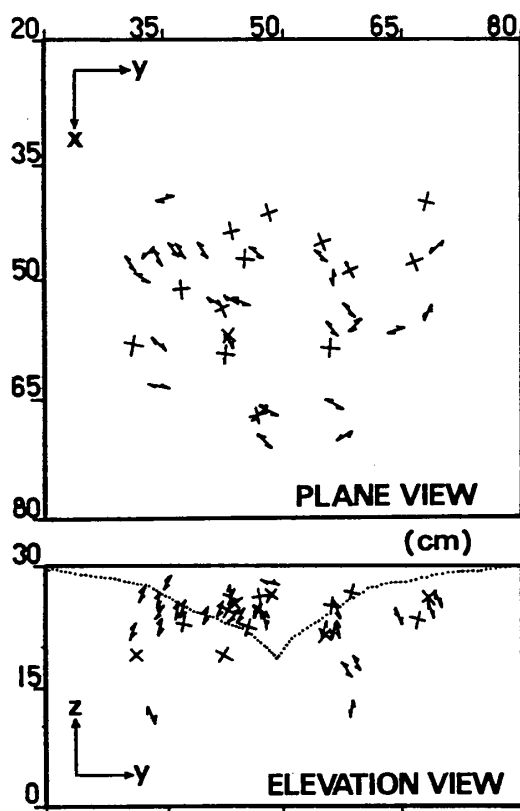


図-7(C). AE源位置および逆解析結果(第3段階)
($\leftrightarrow$ 引張卓越型, $\times$ せん断卓越型)

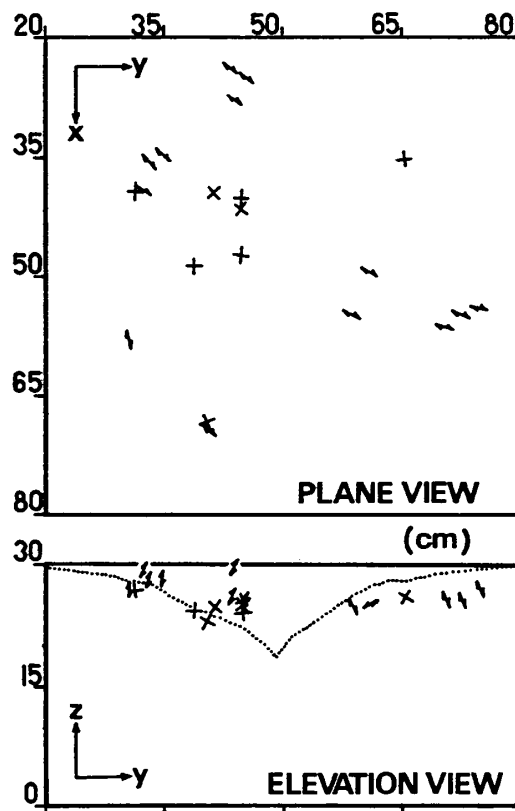


図-7(D). AE源位置および逆解析結果(第4段階)
($\leftrightarrow$ 引張卓越型, $\times$ せん断卓越型)

$x-y$ 平面図においては図の中心すなわち座標位置 $(x, y) = (50\text{cm}, 50\text{cm})$ がアンカーボルトの埋設位置である。また $y-z$ 正面図には、コーン状破壊面の中央線位置 ($x = 50\text{cm}$) での実測値を点線にて表示した。

微小ひびわれ (AE 源) はまずアンカーボルト、特に支圧面であるアンカープレート部を中心にして次第に周囲へ進展して行く様子がはっきり確認できる。また AE イベントは破壊面からアンカーボルト側で多く発生しており、引張卓越型イベントの変位方向 (微小ひびわれの開口方向) は平面図においてはほぼ放射状で、正面図においては破壊面付近にあるものは破壊面に対しほぼ直角方向を指している。またせん断卓越型イベントにおける 2 方向のうち 1 方向は引張卓越型イベントと同じような方向を指している。さらに、初期の段階では常により外側の領域に引張卓越型イベントが見られることが特徴的である。

破壊現象的にみれば、目に見えるひびわれ (破壊面) の形成は微小ひびわれ (AE 源) の集合によるものであると考えられる。今回の実験、解析の結果、ひびわれの形成過程としては引張型の微小ひびわれが生じることでその点近傍の変位拘束を解放し、さらにせん断型の微小ひびわれとともにひびわれ面を形成していくのではないかと考えられる。

5. まとめ

AE 波形の逆解析手法として著者らの提案するモーメントテンソル解析法をアンカーボルト部を有するコンクリート構造物に適用し、そのアンカーボルト引き抜き試験における破壊現象を観察、考察した。その結果、AE 源である微小ひびわれが試験の結果生じたコーン状破壊面を形成する過程が観察でき、本手法の有効性が確認された。

本論文を執筆するにあたり、岐阜大学工学部土木工学科の小柳 治先生、六郷恵哲先生ならびに岩瀬裕之先生より貴重な AE 波形データを提供していただきました。最後に、諸氏の方々へ厚くお礼申し上げます。

〈参考文献〉

- 1) M.Ohtsu; 'Source kinematics of acoustic emission based on a moment tensor', NDT international, vol.22, no.1, pp.14-20, Feb., 1989
- 2) 岩瀬, 津曲, 六郷, 小柳; 「アンカーボルトの引抜きと AE 計測」, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第2号, pp.573-578, 1987
- 3) M.Ohtsu, M.Shigeishi, H.Iwase; 'AE Observation in the Pull-out Process of Shallow Hook Anchors', Proc. of JSCE (in press)
- 4) 小柳, 岩瀬, 六郷, 斎藤; 「アンカーボルトの引抜きと AE 破壊源探査」, 昭和63年材料学会講演概要集
- 5) 重石, 大津; 「アコースティック・エミッションの波形解析によるアンカーボルト引き抜き試験の観察」, 土木構造・材料論文集, 第4号, pp.69-77, Jan., 1989
- 6) 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
- 7) M.Ohtsu; 'Source Inversion of Acoustic Emission Waveform', Proc. of JSCE, no.398/I-10, Structural Eng./Earth-quake Eng., vol.5, no.2, pp.275s-283s, Oct., 1988
- 8) 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