

アコースティック・エミッション波形
解析によるひびわれ発生機構の同定
に関する研究

学位論文

平成6年11月

重石光弘

－ 論文題目 －

アコースティック・エミッション波形解析による
ひびわれ発生機構の同定に関する研究

－ 著 者 －

重石光弘

－ 論文要旨 －

アコースティック・エミッション(AE)は、弾性体に蓄積された内部エネルギーの一部が、弾性波動として解放される現象をいう。本論文では、実際に目にみえるひびわれよりも以前に発生する微小ひびわれの形成によるエネルギーの解放現象に伴って発生するAEに着目し、その波動を検出して理論解析を行うことにより、弾性体におけるひびわれの発生機構を究明することを目的とする。その手段として、境界要素法の弾性波動の基礎式から導かれたAE波動の一般式によって求められたモーメントテンソルを解析する手法を提案した。具体的には、複数のセンサーにて検出されたAE波の初動部の振幅と到達時間により、そのAE波の発生源となった微小ひびわれの位置・方向・種類・大きさといった幾何学的諸量を逆解析するもので、コンクリートをはじめとし、岩体、地盤におけるひびわれの発生現象に適用を試みた。また、数値実験ならびに透明樹脂供試体におけるひびわれ現象の観察によって本手法の実験的考察を行い、本手法の破壊力学および工学的適用の可能性と将来性について述べた。

TITLE

Identification of Cracking Mechanism by Acoustic Emission Waveform Inversion

AUTHOR

Mitsuhiro SHIGEISHI

ABSTRACT

Acoustic emission (AE) is an energy-releasing phenomenon of the internal stored energy as elastic wave. Before cracks of them elastic materials come in visible, many invisible micro-cracks are generated around them. At the same time, AE waves are emitted from the micro-cracks. AE waveforms, which are detected as electric signals by AE sensors, contain information on the deformation and fracture of elastic materials, and they could represent of the micro-fracture mechanism. The object of this research is the clarification of cracking mechanisms of the elastic materials by using AE waveform analysis.

To accomplish this purpose, the procedure of AE source inversion by the moment tensor analysis is proposed. The procedure is derived from the equation of elastic wave by the boundary element method, and a computer code 'SiGMA' is developed. Tensor components of the 'moment tensor' are analyzed from locations of and first portions of AE waves. By the SiGMA analysis, the kinematics of micro-cracks, that are locations, opening directions, types of formation mode and volumes, can be obtained from detected AE wave signals. In this thesis, the procedure is tried to apply to several cases of experimental fractures in concrete, rocks, and subsurface. The theory of SiGMA analysis is briefly explained, and results of application are versatility discussed.

To verify the versatility of the SiGMA procedure, a SiGMA-2D analysis, which is modified for the two-dimensional problems, is proposed. The analytical solutions by the SiGMA-2D are compared with visible internal cracks by using transparent epoxy specimens. The same verification is performed in case of concrete and mortar plate specimens, and the applicability of the SiGMA analysis for practical situation is also confirmed.

Finally, the determination of crack volume in epoxy plate specimens is tried by using the SiGMA procedure and the calibrated sensor factors. The accurate calibration of AE sensor is the most important problem for crack volume estimation based on the SiGMA procedure. Therefore, the sensor calibration by using Davie's Bar is introduced.

アコースティック・エミッション波形解析による ひびわれ発生機構の同定に関する研究

【目次】

1 序論	1- 1
1.1 アコースティック・エミッション (AE)	1- 1
1.2 アコースティック・エミッションの研究の歴史	1- 3
2 アコースティック・エミッション(AE) 波形解析の基礎理論	2- 1
2.1 弾性波動	2- 1
2.2 AE 波動	2- 3
2.3 AE 波形解析	2- 5
(1) AE 発生源の位置標定	2- 5
(2) モーメントテンソル解析	2- 8
3 アコースティック・エミッション(AE) 波形解析の適用に関する考察	3- 1
3.1 AE 波形解析法 (SIGMA コード) の開発	3- 1
(1) モーメントテンソル解	3- 1
(2) モーメントテンソル解析 SIGMA コードの開発	3- 3
3.2 AE 波形の計測	3- 5
(1) AE 計測の原理	3- 5
(2) AE 波形の記録	3- 7
3.3 AE 波形解析の実際への適用	3- 9
(1) コンクリートに埋設されたアンカーボルトの引き抜き試験への適用	3- 9
(2) コンクリート円筒供試体の引張試験への適用	3- 15
(3) 鉄筋コンクリートにおけるひびわれ進展への適用	3- 19
(4) 岩盤の静水圧破碎試験への適用	3- 22
(5) 地盤のグラウト工における適用	3- 24
3.4 本章の結論	3- 29

4 アコースティック・エミッション(AE)波形解析法の	
実験的検証に関する考察.....	4- 1
4.1 2次元AE波形解析法(SIGMA- 2D).....	4- 1
(1) 2次元におけるAE源位置標定.....	4- 1
(2) 2次元におけるモーメントテンソル解析.....	4- 3
(3) 数値実験による検証.....	4- 5
4.2 板供試体を用いた実験に関する考察.....	4- 8
(1) 面内一軸圧縮試験による板供試体の混合モード破壊.....	4- 9
(2) 透明樹脂(PMMA)板による実験的検証.....	4- 9
(3) コンクリートおよびモルタル板供試体.....	4- 14
4.3 本章の結論.....	4- 16
5 アコースティック・エミッション(AE)波形解析による	
ひびわれ発生機構の定量的評価に関する考察.....	5- 1
5.1 クラックボリューム評価に関する考察.....	5- 1
5.2 AEセンサーの絶対感度校正.....	5- 4
5.3 透明樹脂(PMMA)板におけるクラックボリュームの評価.....	5- 8
5.4 AE法によるひびわれ発生機構の定量的評価の将来.....	5- 12
6 結論.....	6- 1
謝 辞	

1 序論

今日の世界のいたるところにおいては科学技術の進歩に伴い、社会資本の整備には最先端の科学技術が駆使されて、構造物の大型化、高機能化が著しく進んできている。このような構造物は日常の人間の諸活動に対して非常に重要な役割を果たす存在であり、しかも、その構造物の経済的価値は非常に高いものとなっている。したがって、これらの維持管理の面から安易な補修や交換は非常に困難なものとなっている。

構造物の機能を損なうことなく、その物理的な現状を正確に評価するための手法の開発が今日における急務とされているのはこのため、これに対して重要な役割を果たすものとして非破壊試験法に大きな期待が寄せられている。この需要に応えるべく、各研究分野における非破壊試験法の研究および開発が行われているが、本研究の対象としているアコースティック・エミッション（Acoustic Emission；AE）現象を用いたAE法は、この非破壊試験法の一つとして注目を浴びている。

AEは、外部から物体に蓄積した内部エネルギーが、マイクロクラックすなわち、目に見えない微小なひびわれの形成というエネルギーの解放現象において、それと同時にその解放されたエネルギーの一部が、マイクロクラックを発生源とした弾性波（AE波）として放射され、それが物体内部を伝播する現象をいう。

現在、AEの研究分野においては、観測点に到達するAE波の度数をもとに、その発生頻度や発生パターンを検証する、あるいは、観測されるAE波の波形から、エネルギー値やその減衰傾向を調査するなど、定性的な解析の研究成果が多く報告されている。

ここでの研究の目的は、発生したAE波をセンサーによって捉え、その応答によって得られる信号波形を理論解析することによって、AEの発生源となったマイクロクラックの幾何学的諸量（位置、方向、種別および規模）を定量的な逆解析法を開発することであり、さらにこれを実際の構造物や地盤に適用するための理論および手法を定めることにある。

1.1 アコースティック・エミッション（AE）

アコースティック・エミッション（Acoustic Emission：以下AEと略）とは、物体が破壊もしくは変形することによる「音響の放出」現象を言う。ガラス、木材などの破壊による音は日常においても馴染み深い。

実際の物体の破壊現象は、微小なレベルの破壊（マイクロクラック）が散在的に発生し、それらが進行して最終的な破壊（主破壊）に至るといった過程をとる。AEの研究分野においては、前述のような音として聞くことのできる可聴域の音響の放射現象を対象にはしておらず、これらの物体内部に発生する目に見えないような微小な破壊現象にともなって放出される耳に聞くことのできない微弱な波をAE波と呼んで、この波の放射・伝播現象を研究の対象としている。また、このAE波は、その発生源となった微小なレベルの破壊に関しての時間に依存する挙動その他の情報を含んでいるものと考えられる。図1.1にAEの発生から破壊音として聞こえるまでの概念を示す。

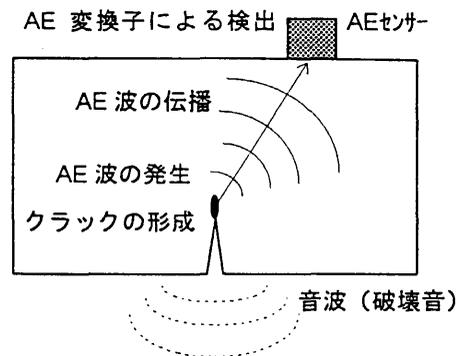


図 1.1 AE 波の発生・伝播・検出

特殊な材料を除いて固体材料は、第一義的に弾性体と考えることができるため、物体内部の破壊にともなって放出されるAE波は弾性波であると考えられる。

以上より、AEとは、「固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギーの解放過程によって発生する弾性波動現象」であると定義される。

AEは微小な破壊あるいは、それと同様なエネルギーの解放過程によって発生するが、具体的には、クラックと呼ばれるひびわれ現象の他に、結晶物質での転位、変態などが、発生原因として含まれる。定義に従えば、固体材料内部で弾性波動を発生させるような現象は、全てAEの発生原因となり得る。

クラックの発生におけるエネルギーの解放過程は、以下のように説明される。

固体材料に力あるいは変形が与えられると、その外力による仕事はひずみエネルギーとして材料内部に蓄積される。その蓄積量が限界まで達するとクラックの発生によりエネルギーが解放される。このときエネルギーの多くはクラックの表面の形成に消費されることになる。一方、クラック表面の形成以外に、光、熱、音、磁気などに変換されて消費されるエネルギーも存在し、AEとして観察される弾性波動はその一部であると考えられる。

AE現象とは、研究的にはAE計測装置で検出可能なもののみを指している。すなわち、非常に高感度な装置で検出できる微弱な弾性波動である。一般的な市販AE計測装置では60～100dBもの増幅によって、AE現象を検出している。さらに、弾性波動を検出するAEセンサーとしては、変換効率の優れたPZTなどの圧電素子が用いられることが多い。

感度の他にAEを特徴づける重要な因子は、その周波数成分であり、地盤や岩石を対象とする分野におけるAEは、かなり低い周波数成分も考慮することもあるが、基本的には数kHz～数MHzの高周波数成分が一般的である。これらをまとめたものを図1.2に示す。

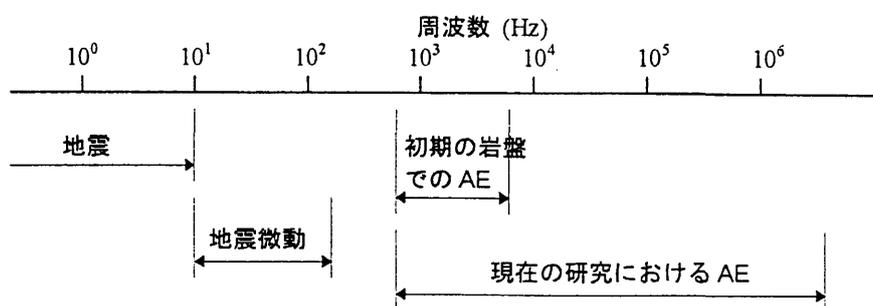


図 1.2 AE 計測と検出周波数

このように、AEの研究では、物体の主破壊以前に内部に形成される微小ひびわれ、あるいは類似なエネルギー解放過程によって発生した微小振幅で、高周波成分をもつ弾性波がその研究の対象とされる。

社会資本である土木構造物や建築構造物、あるいは工作機械や運搬機器、さらには新素材と呼ばれる高コスト高機能材料などの正確な破損および破壊の予知を行うことができれば、工学分野において非常に有意義である。材料の破壊予知の可能性は、主破壊に至る以前に生じるこれらの微小ひびわれを検出できるか否かに左右される。したがって、その微小ひびわれが生じる際に放出されたそのAE波を検出することにより、その物体の破壊予知が可能であると考えられる。

さらに、破壊に関する情報を含んだAE波形を適切に理論解析することができれば、その材料が主破壊に至る前の、材料内部の破壊現象を探ることが可能であると考えられ、また、破壊機構に関する諸パラメーターの算定、固体材料の疲労度の推定及び寿命の予測、あるいは様々な破壊現象の機構解明の際に利用できるものと期待されており、AE現象の定量化の研究は急務であると考えられる。

1.2 アコースティック・エミッションの研究の歴史

金属を対象とした分野において、錫や亜鉛などの双晶変形の際に発する音響現象すなわち「すず鳴り」(tin cry)は古くから知られており、およそ紀元前3500年の青銅器時代にはおそらく人間はAE現象に接していたものと考えられている¹⁾。また、記録史上で最も古いものは、アラビアの錬金術師 Jabian ibn Hayyan (彼は Gaber という名でよく知られている)が、これらの金属が熱せられた後に、再び冷却される際に発する音についての記述をしている²⁾。

AEに関する初期の研究としては、1936年のFriedrich Försterらによるマルテンサイト変態におけるAEの報告³⁾、1948年の当時ベル電話研究所の研究者であったWarren P. Masonらによる錫におけるAEの報告⁴⁾、あるいは1950年にはミュンヘン工科大学のJoseph Kaiserによる金属に引張負荷を掛けたときに生じるAEの報告⁵⁾がある。しかしながら、これまでの定説を翻し、1933年に旧東京帝国大学(現東京大学)の岸上冬彦教授がおこなった木板の曲げ破壊の実験に

において検出したA Eの報告⁸⁾をその最初とする考えもある。彼のA Eの計測方法は、鉄針によって検出したA E信号をコイルによって増幅させるという非常に原始的なものであったが、板の破壊進行過程でその主破壊の以前から非常に小さなひびわれによる音が放出されていることを既に指摘している。

金属材料における分野でのA Eは、1970年以降になると材料研究におけるA Eの使用、タンクなどの高圧容器での耐圧試験における欠陥の評価への適用とA Eの研究は目覚ましく活発になっている⁷⁾。

一方、岩盤および地震学の分野においては、鉱山での採鉱やトンネル工において、古くから「山鳴り」や「山はね」(rock burst)といった、可聴音を伴う破壊現象が知られていた。このように鉱山や岩盤におけるA Eの周波数帯域は数kHz程度といった非常に低いものであるため、A Eとは言わず、Microseismic Activityと呼ばれることがあるが、それぞれのひびわれ現象が、結晶体のずれによる規模、鉱山で落盤が生じるような場合の規模、あるいは地震のような断層のずれが生じる場合の規模と、それらの大小の差は著しいにせよ、これらは全てひびわれの生成とともに弾性波が発生し、それが伝播する現象に変わりなく、同一のものとみなすことができる^{8) 9) 10)}。

コンクリートの分野でA Eを検出し、破壊機構を研究しようとした試みは、1959年にはRüsch¹¹⁾が、1960年にはL'Hermite¹²⁾が、1965年にはRobinnson¹³⁾がそれぞれコンクリートの破壊に伴う内部構造の変化とA Eの発生特性の関係について報告している。1964年には北海道大学の横道英雄教授が「コンクリートにひびわれが生じるときの弾性波」¹⁴⁾としてその研究成果を発表している。

A Eの名が定着した1970年代以降、わが国では戦後の急激な社会資本の充実に伴って蓄積されたコンクリート構造物の維持補修が、重要な社会問題となった。ここにおいて、コンクリートにおけるひびわれの診断が重要な研究テーマとなり、ひびわれ現象と密接に関係したA E現象を利用した非破壊検査手法の開発が期待されている^{15) 16)}。

参考文献

- 1) T. F. Drouillard, "Introduction to Acoustic Emission Technology, Part 1: History of Acoustic Emission Research," *Nondestructive Testing Handbook, Second Edition, Volume 5, American Society for Nondestructive Testing*, pp. 2-3, 1987.
- 2) R. Russell, "The Works of Gaber," J. M. Dent & Sons Ltd., 1678.
- 3) F. Förster and E. Scheil, "Akustische Untersuchung der Bildung von Martensitnadeln," *Zeitschrift für Metallkunde*, vol. 28, no. 9, pp. 245-247, 1936.
- 4) W. P. Mason, H. J. McSkimin and W. Shockley, "Ultrasonic Observations of Twinning in Tin," *Physical Review*, vol. 73, no. 10, pp. 1213-1214, 1948.
- 5) J. Kaiser, "Untersuchungen über das Auftreten Geräuschen beim Zugversuch," Dr.-Ing. Dissertation, Technische Hochschule München, 1950.
- 6) 岸上冬彦, 「破壊の進行に関する一実験 (予報)」, *地震*, 6, pp.25, 1933.
- 7) T. F. Drouillard, *Acoustic Emission: A Bibliography with Abstracts*, Plenum Press, 1979.
- 8) H. R. Hardy Jr. and F. W. Leighton, *Acoustic Emission*, Trans Tech Publications, 1977.

- 9) H. R. Hardy Jr. and F. W. Leighton, Acoustic Emission II, Trans Tech Publications, 1980.
- 10) H. R. Hardy Jr. and F. W. Leighton, Acoustic Emission III, Trans Tech Publications, 1984.
- 11) V. H. Rüsç, "Physikalische Fragen der Betonprüfung," Zement-Kalk-Gips, no. 1, pp. 1-9, 1959.
- 12) R. G. L'Hermit, "Volume Changes of Concrete," Proc. of 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington D.C, pp. 659-694, 1960.
- 13) G. S. Robinson, "Method of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete," Proc. of International Conference on the Structure of Concrete, London, pp. 131-145, 1965.
- 14) 横道英雄, 池田郁雄, 松岡健一, 「コンクリートにひびわれが生ずるときの弾性波の伝播現象について」, セメント・コンクリート, 212, pp. 2-6, 1964.
- 15) 大津政康, 「コンクリート工学における非破壊試験法の現状」, コンクリート工学, vol. 31, no. 12, pp. 5-14, 1993.
- 16) 大津政康, 「コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション(AE)研究の歴史と現状」, 土木学会論文集, 496, pp. 9-19, 1994.

2 アコースティック・エミッション(AE) 波形解析の基礎理論

本章では、エネルギーの解放過程に放出されるアコースティック・エミッション波(AE波)が、弾性波であることに他ならないことを根拠に、弾性波動の基礎理論に基づいたAE波動の一般式を定義する。さらに、定義された一般式におけるモーメントテンソルが、AE波の発生源となるクラックの幾何学的諸量に関する情報を持つ成分であることを示す。

2.1 弾性波動

前章において、AE波はエネルギーの解放過程において発生する弾性波動であると定義したが、この意味するところは、発生および伝播する波動は、次式の弾性波動の基礎式を満足するものであるということである。いま、等方等質の弾性体を仮定すれば、総和規約を用いて、テンソル表示すると、

$$(\lambda + \mu) u_{j,ji}(\mathbf{x}, t) + \mu u_{i,ij}(\mathbf{x}, t) = \rho \ddot{u}_i(\mathbf{x}, t) \quad (2.1)$$

と書ける。ここで、 λ 、 μ はLaméの定数と呼ばれる弾性定数で、ヤング率 E とポアソン比 ν を用いるとこれらは、

$$\lambda = \sqrt{\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad \mu = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)}} \quad (2.2)$$

と表される。ここで、 ρ はAE波が伝播する媒体の密度である。

式(2.1)は、釣り合い式を変位 u_i で表現したものに他ならないが、AE波動においては波動成分を場所 \mathbf{x} と時刻 t の関数である変位 $u_i(\mathbf{x}, t)$ とみなすことができる。式(2.1)から導かれる重要な事実は、この基礎式にしたがう波動は2種類の伝播速度を持っていることである。それは、式(2.2)から、

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

と導くことができる。ヤング E 率とポアソン比 ν との関係を用いれば、

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

(2.4)

が得られる。 v_p , v_s が導かれる過程から、体積変形をともなう波動が v_p の速度で伝播し、体積変化のないせん断変形をともなう波動が v_s で伝播することがわかる。この v_p で伝播する波動が縦波（P波）、 v_s で伝播する波動が横波（S波）と呼ばれている。式(2.4)の関係より、常にP波はS波より速く伝播することがわかる。

以上のことから、AE現象として発生源から伝播する弾性波は、P波とS波で組成されていることがわかるが、実際には、AEセンサーは通常物体の表面に設置されることが多く、物体表面において観測される弾性波動はP波とS波だけとは限らない。

これは、図 2.1および図 2.2に示すように、弾性波が物体の表面に達することによって、反射波が生じることに起因する。

弾性波が境界面に入射するとき、破壊源で発生した弾性波動のP波あるいはS波だけでは、反射の際の境界条件を満足することはできない。そのため、図のようにP波・S波のいずれかの成分のみが入射したとしても、必ず反射P波あるいは反射S波が発生することになる。この入射角と反射角の関係は Snell の公式として知られており、次のようになる。

$$\frac{\sin\theta}{v_s} = \frac{\sin\theta'}{v_s} = \frac{\sin\theta''}{v_p}$$

(2.5)

これより明らかに $\theta = \theta'$ が成り立ち、同じ波動成分については入射角と反射角は等しくなる。

一般に、AEセンサーが検出する波動は、入射波と反射P波および反射S波の重合波であり、例えば、P波の入射（図 2.2において入射角 θ ）に対して検出点での面に垂直な方向の振幅は $v_p / v_s \equiv K$ とおけば、入射波の R 倍となる。ここに、

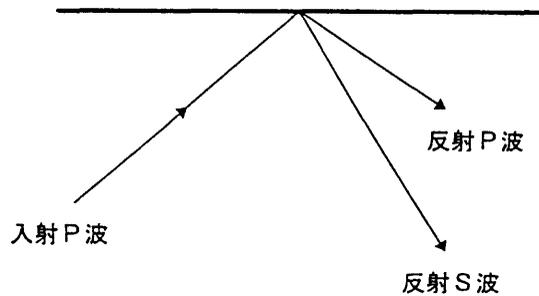


図 2.1 P波の自由表面での反射

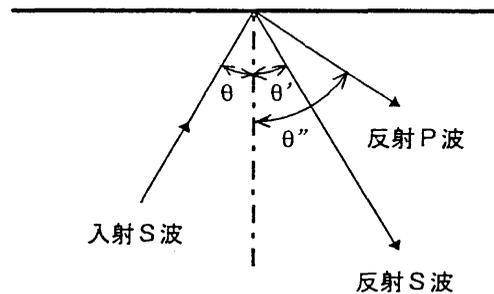


図 2.2 S波の自由表面での反射

$$R = \frac{2\kappa^2 \cos\theta (\kappa^2 - 2\sin^2\theta)}{(\kappa^2 - 2\sin^2\theta)^2 + 4\sin^2\theta \cos\theta \sqrt{\kappa^2 - \sin^2\theta}} \quad (2.6)$$

である。この R を反射係数と呼ぶ。表面に垂直に入射する場合には式(2.6)より $R=2$ となり、検出波の振幅は入射波に対して2倍となる。

式(2.5)より、 $v_p > v_s$ であるため、 $\theta < \theta''$ が導かれる。すなわち、P波はS波よりも常に表面に対して浅い角度で反射される。そこで $\theta'' = 90^\circ$ となる場合には、S波の入射波が境界で反射して表面に平行に伝播するP波を生じる。これはSP波と呼ばれ、SP波が現れるときの入射角、

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{v_s}{v_p} \quad (2.7)$$

は臨界角と呼ばれる。

図 2.3のように、入射角 θ_c がこの臨界角よりも大きい場合には、AEセンサーには入射P波、反射SP波、入射S波が順次到達する。

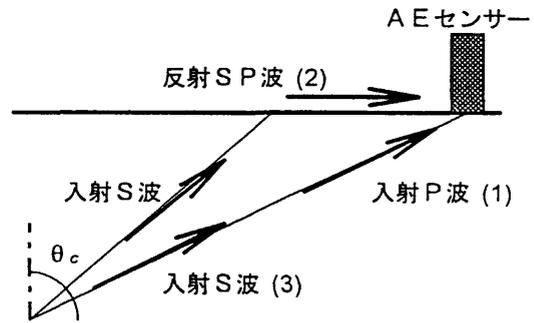


図 2.3 自由表面でのAE波の検出

2.2 AE波動

ここに述べるAE波動の基礎理論の特色は、境界要素法 (Boundary Element Method, BEM) を用いて弾性波動の基礎式を定式化したことである。

BEMによれば、境界 S で囲まれた物体 D の点 x における時刻 t での変位 $u_i(x, t)$ は、式(2.1)の解として、次のように書ける。

$$u_i(x, t) = \int_S [G_{ik}(x, x', t) * t_k(x', t) - T_{ik}(x, x', t) * u_k(x', t)] dS \quad (2.8)$$

ここで、 $t_k(x', t)$ 、 $u_k(x', t)$ は面 S 上の応力ベクトルと変位ベクトルであり、演算子 $*$ は時間に関する合成積を意味している。 $G_{ik}(x, x', t)$ は、BEMでは基本解とも呼ばれているが、ここでは他の研究との対応のためにグリーン関数と呼ぶことにする。これの持つ意味は、点 x' において x'_k 方向に $t = 0$ で瞬間的に力が作用した場合の、点 x における時刻 t での x_i 方向の変位を表している。また、 $T_{ik}(x, x', t)$ は、グリーン関数の変位による応力ベクトルを意味しており、等

方等質弾性体であるならば、点 x' での面 S の外向き法線方向ベクトルを n_i として次のようになる。

$$T_{ik} = \lambda G_{ij, j} n_k + \mu G_{ik, j} n_j + \mu G_{ij, k} n_j \quad (2.9)$$

以下では、この T_{ik} をグリーン関数 G_{ik} と混同しないよう、第2種グリーン関数と呼ぶことにする。

AEの発生源を数学的にモデル化するために、図 2.4のように物体 D の内部に2つの面 F^+ と F^- から構成される内部境界を考える。この2つの面が食い違うことにより、AEの発生源となるクラックが形成されることになる。これは、面 F^+ と F^- 上の変位ベクトルおよび応力ベクトルの間に、動的に不連続が生じるとモデル化させる。

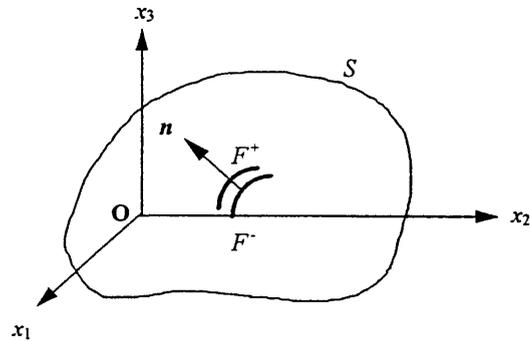


図 2.4 物体 D とクラック面 F^+, F^-

このとき、図 2.4のように面 F^- 上の法線方向ベクトル n_i を考え、さらに外部境界 S は十分遠くにあり、そこでの応力ベクトルと変位

は0であると仮定できれば、式(2.8)は面 F のみに関する境界積分に置き換えられる。そこで、応力ベクトルおよび変位ベクトルの面 F^+ と F^- 上における食い違い量を、それぞれ $f_k(x', t)$, $b_k(x', t)$ とおけば、次式が得られる。

$$u_i(x, t) = \int_F [G_{ik}(x, x', t) * f_k(x', t) + T_{ik}(x, x', t) * b_k(x', t)] dS \quad (2.10)$$

この式は、AEの発生源を一般化し、力の食い違い $f_k(x', t)$ と変位の食い違い $b_k(x', t)$ で表現している。これがAE波動の基礎式であり、式(2.10)に基づいたAEの波形理論は Generalized Theory of Acoustic Emission と名付けられている。

クラック面 F 上の力学的条件を考えると、クラックの端部を除き、クラック発生の前後のいずれの場合でも力の釣り合いは満足していると考えられる。すなわち、力の不連続量 $f_k(x', t)$ は、クラックの形状に対しては主な影響を及ぼしていないと考えられる。そこで、式(2.10)を第1項と第2項とに分けて考えれば、

$$u_i(x, t) = \int_F [G_{ik}(x, x', t) * f_k(x', t)] dS \quad (2.11)$$

$$u_i(x, t) = \int_F [T_{ik}(x, x', t) * b_k(x', t)] dS \quad (2.12)$$

となる。この2つの式に分けられることの意味は重要である。AEがクラックの形成によって発生する弾性波動であると考えれば、それは、理論的に式(2.12)によって表現できることを表している。一方、何らかの力が物体に加えられた場合に発生する弾性波動は式(2.11)によって表現される。すなわち、物体に外力を作用することによって発生する波動とAE波動とは、本質的に異なる式で表現されることになる。このことは、例えば、物体の表面上において鉛筆の芯を折り、外力を与えることによって得られる弾性波は、物体内部のクラックの形成によって発生するAE波とは全く無関係で、別のものであるということがわかる。

式(2.12)における変位の食い違い $f_k(x', t)$ は、転位論での Burger's vector に一致している。Eshelby の指摘にもあるとおり、結晶学における Volterra 転位があまりに著名なため、クラックと転位とは別のものと考えられることが多いが、数学的モデルにおいては全く同じもので、異なる点はただその規模の大小だけである。さらに、クラック面 F の規模を地殻内の断層面にまで拡大して考えれば、ここに述べたクラック面のモデルは、理論地震波形の研究において用いられる断層モデルとも一致する。

2.3 AE 波形解析

前章において、物体内部の微小な破壊によって放出されたAE波は、その放出された瞬間におけるその原因となった破壊についての情報を含んでいることを述べた。したがって、その検出されたAE波形に対し、理論解析を適切に行うことができれば、AE波形から物体内部の状態に関する情報が得られることが期待される。

ここでは、AEセンサーと信号処理および信号記録装置によって検出されたAEの信号波形を、これの発生原因となった物体内部の微小破壊による「結果」として捉え、この「結果」を生じさせた「因子」である微小破壊に関する種々の情報を導く解析法、すなわちAE波形の逆解析手法について概説する。

(1) AE 発生源の位置標定

AEの信号波形に着目した分野で、最も古くから研究されてきたのがAEが発生した位置の標定法(AE Source Location)であり、AEの発生源の「位置」に関する情報は、AEの波形解析を行う上で特に重要なパラメータのひとつである。

AEの発生源(破壊源)は、地震の震源探査と同様に、あるAE波が複数の観測点に到達するまでの時間の差からその発生源を特定するという手法によって決定することができる。

AE波が、弾性波動としてその発生源からAEセンサーへ直接到達するとき、AEセンサーに最初に到達するのは縦波(longitudinal wave, P波)で、その後横波(transverse wave, S波)

が到達することになる。もしAEセンサーが物体の表面に設置されている場合には、さらに表面波 (surface wave) が到達することになる。この他に、外部に面している境界からの反射や共振などの影響も考えれば、AE源の位置評定に有効な情報は、もっとも伝播速度が速いために他の攪乱を受けることが少ない縦波の初動部だけであると考えられる。

一般の破壊源探査の場合として、P波の伝播速度を v_p とし、図 2.5 (a) のようにある一つの基準AEセンサー T_0 の位置を原点とする3次元座標を考える。また、図 2.5 (b) のように基準AEセンサー T_0 へのP波初動部の到達時刻 t_0 に対し、他のAEセンサー T_1, T_2, \dots, T_n における到達時刻との相対時間差を t_1, t_2, \dots, t_n とする。

このとき、AE発生源の座標を $S(x, y, z)$ 、センサー T_i の座標を $T_i(a_i, b_i, c_i)$ とすれば、基準AEセンサー T_0 と他のセンサー T_i へのP波初動部の相対到達時間差 t_i と距離 r_i に関する次式が得られる。

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2} \\ r_0 &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ r_i - r_0 &= v_p t_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned}$$

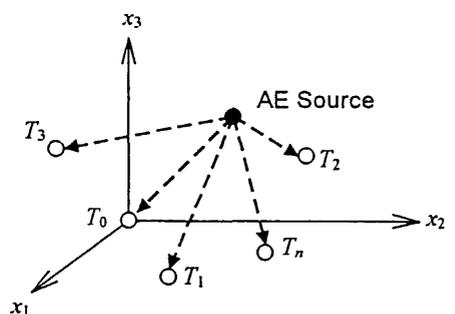
(2.13)

式(2.13)の第3式は、二葉双曲面の片側(一葉)の方程式で、破壊源の解は N 個の双曲面の交点として得られることを示している。

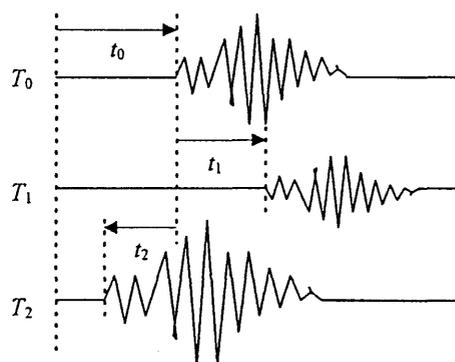
ただし、このままこの非線形連立方程式の解を直接求めるのは困難であるため、一般には式(2.13)を平方し、 i 番目と j 番目の方程式の差をとることによって、以下のような線形連立方程式を得る。

$$A_{ij}x + B_{ij}y + C_{ij}z + D_{ij}v_p^2 = E_{ij}$$

ここに、



(a)



(b)

図 2.5 AEセンサーの配置(a)と記録波形(b)

$$\begin{aligned}
A_{ij} &= 2 (a_i t_j - a_j t_i) \\
B_{ij} &= 2 (b_i t_j - b_j t_i) \\
C_{ij} &= 2 (c_i t_j - c_j t_i) \\
D_{ij} &= t_i t_j (t_i - t_j) \\
E_{ij} &= t_j (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) - t_i (a_j^2 + b_j^2 + c_j^2) \quad (i, j = 1, \dots, N)
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

ここで、 t_i がいづれも 0 でないならば、式(2.14)において一次独立な式は $N-1$ 個存在する。AE センサーの数は、基準センサー T_0 を含めて $N+1$ 個であったので、線形連立方程式によって 3 次元の破壊源探査 (未知数 x, y, z の決定) を行うには $N-1=3$ であるべきであり、したがって $N+1=5$ チャンネルの計測システムが必要である。

6 チャンネル以上の計測システムを用いた場合には、式(2.14)において P 波速度 v_p も未知数として決定できるが、一般には図 2.6 に示すように、解析対象そのものかまたはそれと同等の物に対して、超音波発信器による振動などの外部からの攪乱を入力し、その伝達時間と伝播距離から P 波の伝播速度を決定する。この時に得られる P 波の伝播速度は、後の解析の全過程で大きな影響を及ぼすことになるので慎重に行う必要がある。

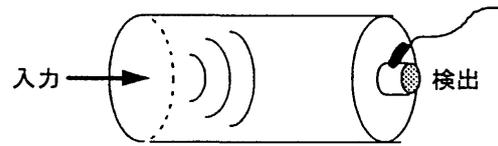


図 2.6 弾性波 (P 波) の伝播速度測定法

AE 発生源の位置標定とは、基本的に式(2.14)の連立方程式を解くことに他ならない。式(2.14)を行列表示すると、

$$\begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} & C_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{ij} - D_{ij} v_p^2 \end{Bmatrix}
\tag{2.15}$$

となる。

3 次元の破壊源探査において、6 チャンネル以上の計測システムを使用する場合には、式(2.15)において未知数よりも方程式の数が多くなり最小二乗法を適用することができる。

しかし、線形連立方程式では一つでも大きな計測誤差を含む方程式が存在すると、全体の解の精度は極端に悪くなるという事実から、計測チャンネルを増加させて最小二乗法を適用しても、式(2.15)の解は第一次の近似解と理解すべきである。

一次近似解の改良として、次のような反復法を用いる。式(2.15)より求めた一次近似解(x^0, y^0, z^0)に対して、真の解が($x^0 + \Delta x, y^0 + \Delta y, z^0 + \Delta z$)にあると考える。このとき距離 r_i は Taylor 展開により、次のように表現できる。

$$r_i = r_i^a + l_i^a \Delta x + m_i^a \Delta y + n_i^a \Delta z \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

ここに,

$$r_i^a = \sqrt{(x^a - a_i)^2 + (y^a - b_i)^2 + (z^a - c_i)^2}$$

$$l_i^a = \frac{x^a - a_i}{r_i^a}, \quad m_i^a = \frac{y^a - b_i}{r_i^a}, \quad n_i^a = \frac{z^a - c_i}{r_i^a} \quad (2.16)$$

式(2.16)を式(2.14)に代入すると,

$$\begin{bmatrix} l_i^a - l_0^a & m_i^a - m_0^a & n_i^a - n_0^a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{Bmatrix} = \{v_p t_i - r_i^a + r_0^a\}$$

$$(i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.17)$$

なる式を得る。5チャンネル以上のシステムを用いる場合、式(2.17)にも最小二乗法を適用することによって $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を決定することができる。そこで、 $(x^a + \Delta x, y^a + \Delta y, z^a + \Delta z)$ を新たな近似解として、式(2.16)と式(2.17)の過程を繰り返し、収束解が得られるまで反復計算を行うことになる。

以上より、5点以上の観測点でのAE波の到達するそれぞれの時間差によってAEの発生源の位置を特定する手法が示された。

(2) モーメントテンソル解析

① モーメントテンソルの物理的意味

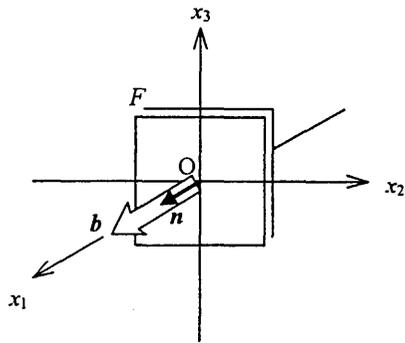
検出されたAEの信号波形からその逆解析によって得られるひびわれの発生機構に関する情報としては、幾何学的諸量 (kinematics) があげられる。前述したAE発生源の位置標定は、幾何学的諸量の中の「位置」を導くものであるが、ここでは、AE波形からその発生源となったマイクロクラックの「種類」や「形状」を決定することを考える。

式(2.12)の被積分関数を式(2.9)を用いて書き換えると,

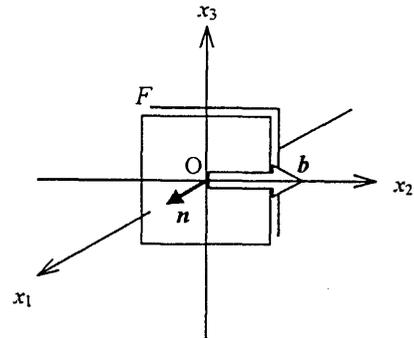
$$T_{ik} \cdot b_k = (\lambda G_{ij,j} n_k + \mu G_{ik,j} n_j + \mu G_{ij,k} n_j) b_k = G_{i p, p} m_{p q} \quad (2.18)$$

$$m_{p q} = \lambda b_k n_k \delta_{p q} + \mu b_p n_q + \mu b_q n_p \quad (2.19)$$

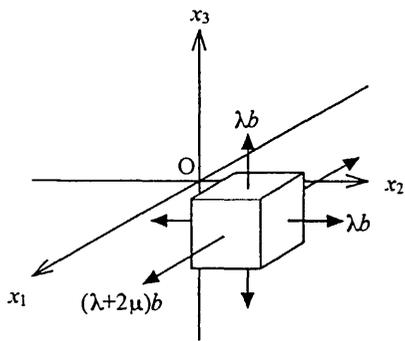
と書ける。この m_{pq} はモーメントテンソルと呼ばれるものであり、マイクロクラックの方向を決定するために有効な波形解析の手法をもたらす。



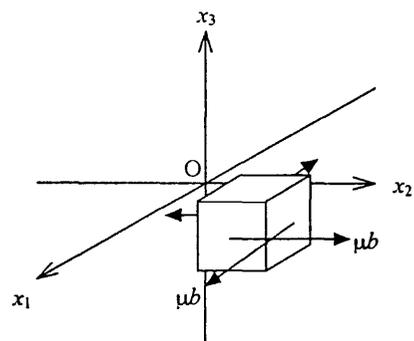
(a)



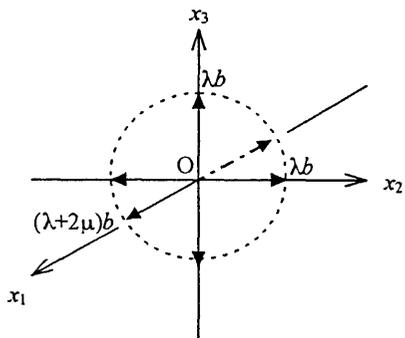
(a)



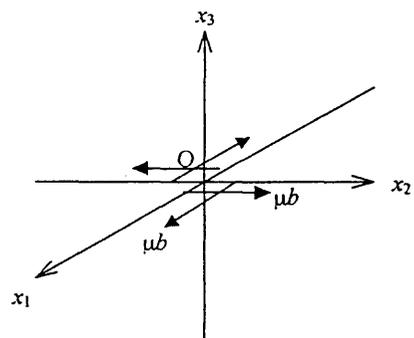
(b)



(b)



(c)



(c)

図 2.7 引張クラックのモデル(a)とこれに相当するモーメントテンソル(b)および dipole force model (c)

図 2.8 せん断クラックのモデル(a)とこれに相当するモーメントテンソル(b)および double-couple force model (c)

例えば、式(2.19)において図 2.7(a)のような、 $b=(1, 0, 0)$ 、 $n=(1, 0, 0)$ の引張クラックを考えると、図 2.7(b)のようにモーメントテンソルは表示できる。すなわち、応力で言えば、直応力成分のみが存在している状態と等しくなる。地震学における地震波の放射形式を利用した研究においては、引張クラックに対するAEの発生機構として dipole force と呼ばれる図 2.7(c)のよう

な等価な力学モデルを用いて説明している例があるが、クラックの方向が座標軸に対して傾いている場合には、モーメントテンソル成分表示では、せん断成分が加わるだけであるが、dipoleによって表示することは不可能であり、テンソル成分としての表示がより一般的で、かつ、理論的であると考えられる。

一方、図 2.8(a)のような $b=(0, 1, 0)$, $n=(1, 0, 0)$ のせん断クラックの場合には、図 2.8(b) のようになる。せん断クラックに対する A E の発生機構としては、前述の dipole と同様に、図 2.8(c) のような double-couple force が用いられることがある。

しかし、モーメントテンソル表示を用いれば、このような引張クラックとせん断クラックに対しての異なるモデルの導入は不必要であるばかりか、モーメントテンソル表示を用いれば、引張成分とせん断成分とが同時に含まれるような混合型クラックに対しても表示が可能となる。

② モーメントテンソルの固有値解析

モーメントテンソル m_{pq} は、応力やひずみなどと同じく 2 階のテンソルであるので、これに対して固有値解析を行えば、主値ならびに主方向を知ることができる。式(2.19)から固有値および固有ベクトルを求めると、

$$\begin{aligned}
 \text{第 1 (最大) 固有値} \quad e_1 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) \\
 \text{第 2 (中間) 固有値} \quad e_2 &= 2\mu b \nu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} \right) \\
 \text{第 3 (最小) 固有値} \quad e_3 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
 \text{第 1 固有ベクトル} \quad e_1 &= l + n \\
 \text{第 2 固有ベクトル} \quad e_2 &= l \times n \\
 \text{第 3 固有ベクトル} \quad e_3 &= l - n
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

となる。ここでは $\lambda=2\mu\nu/(1-2\nu)$ の関係を用いており、一方のクラック面の運動ベクトルすなわち Burger's vector b を、大きさ b と方向ベクトル l の積 $b=bl$ と表現している。

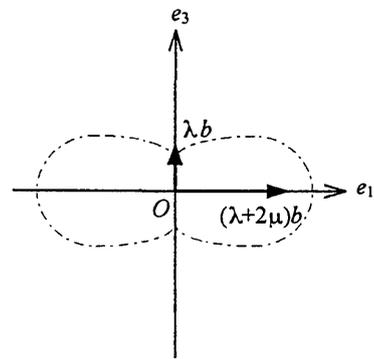
引張クラックならば、図 2.7(a) に示すようにクラック面に対する法線方向とクラック面の開口方向は同一であるから、 $l_k n_k=1$ となり、この場合の固有値として、 $2\mu b(1-\nu)/(1-2\nu)$, $2\mu b\nu/(1-2\nu)$, $2\mu b\nu/(1-2\nu)$, なる最大固有値と 2 重根の固有値を得る。また、クラック面の開口方向は座標軸と一致している場合を考えているので、図 2.7(b) のモーメントテンソル成分とその固有値および固有ベクトルの方向は一致し、クラックの開口方向は第一固有ベクトルの方向になる。

一方、せん断クラックでは、図 2.8(a)のようクラック面に対する法線方向とクラック面の転位方向は直交するため、 $l_k n_k = 0$ となり、この場合の固有値は、 $\mu b, 0, -\mu b$ となり、大きさが等しく符号の異なる 2 つの固有値と、0 である中間固有値が得られる。この場合は、図 2.8(b)において大きさが 0 でないモーメントテンソル成分の方向が第一固有ベクトルと第三固有ベクトルの中間方向となり、これらの和あるいは差がクラック面の転位方向あるいはクラック面の法線方向になる。

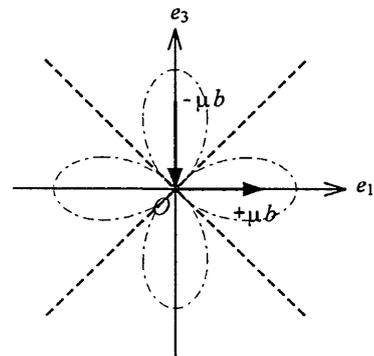
図 2.7(c)および図 2.8(c)に示される等価な力学モデルは、放射形式と関係づけられて議論されている。放射形式とは、あるクラックから発せられた弾性波 (AE 波) を、その発生源を中心とする同心球上の各点で観測した場合の P 波あるいは S 波の振幅の空間的分布を表したものである。引張クラックおよびせん断クラックの P 波の放射形式を、各々のモーメントテンソルの中間主面上に示したのが図 2.9 である。この図 2.9 をみてわかるように、モーメントテンソルの固有ベクトルの方向は、放射形式の主軸を構成している。

③ モーメントテンソルの固有値分解

モーメントテンソルは、AE 波の発生源であるクラック面の「方向」に関する情報を持つパラメータである。その主値と主方向は固有値解析によって求めることができるが、引張クラックかあるいはせん断クラックかによってそれらの主方向の持つ意味が大きく異なり、モーメントテンソル解析によるクラック面の「方向」の決定には、そのクラックが引張型かあるいはせん断型かを知ることが必要である。ここで、モーメントテンソルの固有値解析によって求められた主値すなわち固有値のもつ意味は重要である。



(a) 引張クラック



(b) せん断クラック

図 2.9 モーメントテンソルの固有値解析の結果と AE 波の放射形式

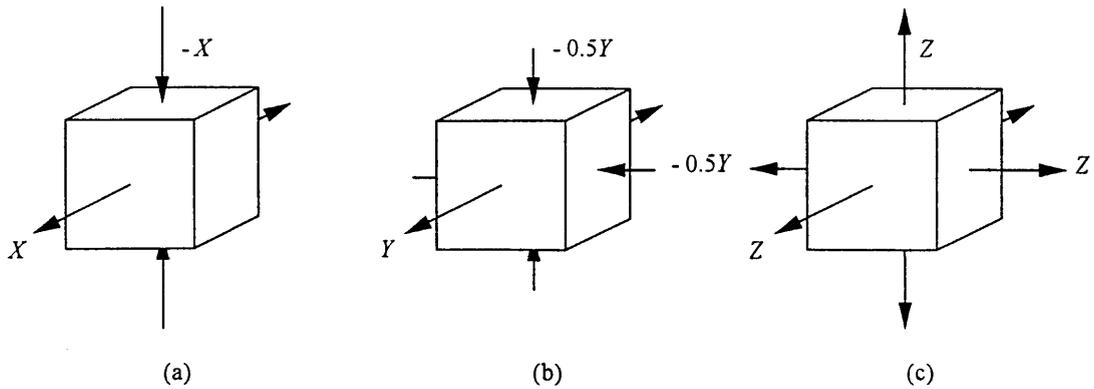


図 2.10 モーメントテンソルの固有値の成分；せん断成分(a), 引張偏差成分(b), 引張釣合成分 (c)

地震学によれば、モーメントテンソルの固有値は、図 2.10に示すように、せん断成分 X (shear component), 引張偏差成分 Y (CLVD: compensated linear vector dipole component), および引張釣合成分 Z (hydrostatic component) の3つの成分に分解することができる。図 2.10において正六面体のそれぞれの面は、正面(背面)が最大主面, 上面(下面)が最小主面, 右側面(左側面)が中間主面を表している。

これらからモーメントテンソルのそれぞれの固有値は次のように一意的に表すことができる。

$$\begin{aligned}
 \text{第1 (最大) 固有値} & \quad e_1 = X + Y + Z \\
 \text{第2 (中間) 固有値} & \quad e_2 = -0.5Y + Z \\
 \text{第3 (最小) 固有値} & \quad e_3 = -X - 0.5Y + Z
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

式(2.22)から、あるモーメントテンソルにおける各成分の構成比は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{せん断成分比 (shear ratio)} & \quad x = \frac{e_2 - e_3}{e_1} \\
 \text{引張偏差成分比 (CLVD ratio)} & \quad y = \frac{2}{3} \left(\frac{e_1 - 2e_2 + e_3}{e_1} \right) \\
 \text{引張釣合成分比 (mean ratio)} & \quad z = \frac{1}{3} \left(\frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_1} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

以上から、モーメントテンソルの各成分の構成比によって、そのAE波の発生源となったクラックが、引張モードであったのか、またはせん断モードであったのか、あるいはこれら2つの混合モードであったのかといったクラックの「種別」の分類に関して定量的な分類を行うこ

とができることになり，さらにモーメントテンソルの固有値解析の項に述べたように，それらの固有ベクトルからクラックの面の「方向」に関する幾何学的諸量が逆解析できることになる。

3 アコースティック・エミッション(AE) 波形解析の適用に関する考察

前章では、AE現象の定量化の一方法としてBEMの弾性波動の基礎式を起点としてAE波動理論を一般化し、モーメントテンソル解析に基づいたAE波形解析について述べた。

ここでは、AE波形解析を実際の工学的な問題へ適用することを目的に、AE波形解析の手続きおよびそのプログラムコードとAE波形の計測法について概説する。そして、それらの適用例として、

- 埋設されたアンカーボルトの引き抜きによる、コンクリートブロックのコーン状破壊
- 特殊なスリット孔を設けたコンクリートの八角柱供試体を用いての圧縮-引張破壊
- 鉄筋コンクリートボックスカルバートの隅角部における曲げ破壊
- ボーリング孔に設置されたパッカーによる岩体の静水圧破碎
- ダムの基礎地盤改良のためのグラウト注入

のそれぞれにおいて検出されたAE現象について適用した結果について考察する。

3.1 AE波形解析法(SiGMAコード)の開発

(1) モーメントテンソル解

前章では、モーメントテンソルが得られれば、クラックの種類と方向に関する情報が得られることを述べたが、それにはまず、検出されたAEの信号波形からモーメントテンソルの成分を決定すること、すなわちモーメントテンソル解を得ることが必要である。

式(2.12)の被積分関数を式(2.18)を用いて書き換えると、

$$u_i(x,t) = \int_F G_{ip,q}(x,x',t) m_{pq}(x') * S(t) dS \quad (3.1)$$

となる。ここで、時間関数は $S(t)$ と変数分離している。

モーメントテンソル m_{pq} は、3次元においては2階の対称テンソルであるから独立な成分は6個である。したがって原理的に3次元の場合には、破壊源探査と同様に6箇所以上の点でAE波形を検出し、それぞれの波動が式(3.1)を満足するような m_{pq} の各成分を求めればよい。しかしながら、式(3.1)から明らかなように m_{pq} の成分決定には時間関数 $S(t)$ との合成積は、本質的な役割を果たしていないと考えられる。したがって、式(3.1)のような複雑な計算を避け、

解析解が既知である無限弾性体のグリーン関数 G_{ip} を用いて、 $G_{ip} * S(t)$ の合成積の演算において、図 3.1 に示すような P 波の到達直後の項、すなわち初動部のみを取り出し、次式を得る。

$$u_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \frac{1}{r} \gamma_i \gamma_p \gamma_q m_{pq}(\mathbf{x}') \cdot DF \quad (3.2)$$

ここで、面積積分は微小面積であると考え、面積要素 DF の積で置き換えている。 r は発生源 \mathbf{x}' から検出点 \mathbf{x} までの距離であり、 γ_j はその方向の j 方向に対する余弦を表している。

式(3.2)は、境界面のない物体内を伝播する P 波の進行する i 方向への振幅を表しているが、実際には図 3.2 のように、AE センサーは感度指向性を持っており、その方向 s は AE 波の進行方向 i とは一致しない。またさらに、AE センサーは計測対象の表面、すなわち境界面上に設置されるのが一般的であり、AE 波は境界面上で反射の影響を受ける。

したがって、AE 発生源の位置標定後に、AE 波がその発生源から AE センサーへ進行する方向 r と、AE センサーの感度指向方向 s による補正係数 $Re(s, r)$ を考慮すれば、AE センサーによって検出する AE センサーの感度指向方向振幅 $A(\mathbf{x})$ と一致させることができ、式(3.2)は次のように書き改めることができる。

$$A(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \frac{1}{r} Re(s, r) \gamma_p \gamma_q m_{pq}(\mathbf{x}') \cdot DF \quad (3.3)$$

AE センサーを表面上に設置して AE 波を検出する場合には、補正係数 $Re(s, r)$ には、式(2.6)の反射係数 R をあてれば良い。また、AE センサーが埋め込まれて設置されるような場合は、補正係数 $Re(s, r)$ は、単に AE 波の入射方向 r の AE センサーの感度指向方向ベクトル s に対する余弦となる。

以上より、式(3.3)は m_{pq} の独立した 6 個の成分に関する連立一次方程式となる。ある AE センサー i における P 波初動部の振幅値お

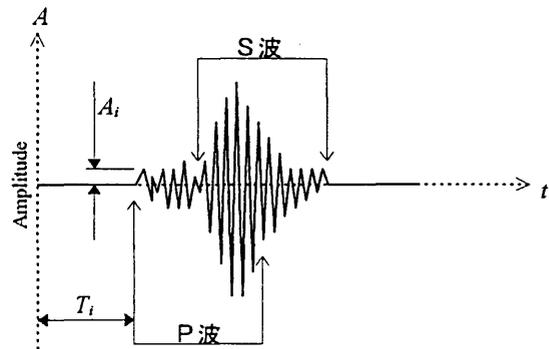


図 3.1 P 波初動部の到達時間と振幅値

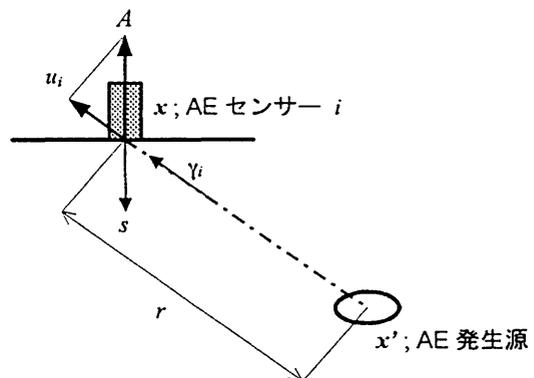


図 3.2 AE センサーによる AE 波動の検出

よび補正係数を A_i , Re_i , P波初動部がセンサー i へ入射する方向 r_i の j 方向余弦を γ_{ij} とおけば, 式(3.3)の行列表示は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ Re_1 \\ A_2 \\ Re_2 \\ A_3 \\ Re_3 \\ A_4 \\ Re_4 \\ A_5 \\ Re_5 \\ A_6 \\ Re_6 \end{bmatrix} = \frac{DF}{4\pi\rho v_p^3} \begin{bmatrix} \frac{\gamma_{11}\gamma_{11}}{r_1} & \frac{\gamma_{11}\gamma_{12}}{r_1} & \frac{\gamma_{11}\gamma_{13}}{r_1} & \frac{\gamma_{12}\gamma_{12}}{r_1} & \frac{\gamma_{12}\gamma_{13}}{r_1} & \frac{\gamma_{13}\gamma_{13}}{r_1} \\ \frac{\gamma_{21}\gamma_{21}}{r_2} & \frac{\gamma_{21}\gamma_{22}}{r_2} & \frac{\gamma_{21}\gamma_{23}}{r_2} & \frac{\gamma_{22}\gamma_{22}}{r_2} & \frac{\gamma_{22}\gamma_{23}}{r_2} & \frac{\gamma_{23}\gamma_{23}}{r_2} \\ \frac{\gamma_{31}\gamma_{31}}{r_3} & \frac{\gamma_{31}\gamma_{32}}{r_3} & \frac{\gamma_{31}\gamma_{33}}{r_3} & \frac{\gamma_{32}\gamma_{32}}{r_3} & \frac{\gamma_{32}\gamma_{33}}{r_3} & \frac{\gamma_{33}\gamma_{33}}{r_3} \\ \frac{\gamma_{41}\gamma_{41}}{r_4} & \frac{\gamma_{41}\gamma_{42}}{r_4} & \frac{\gamma_{41}\gamma_{43}}{r_4} & \frac{\gamma_{42}\gamma_{42}}{r_4} & \frac{\gamma_{42}\gamma_{43}}{r_4} & \frac{\gamma_{43}\gamma_{43}}{r_4} \\ \frac{\gamma_{51}\gamma_{51}}{r_5} & \frac{\gamma_{51}\gamma_{52}}{r_5} & \frac{\gamma_{51}\gamma_{53}}{r_5} & \frac{\gamma_{52}\gamma_{52}}{r_5} & \frac{\gamma_{52}\gamma_{53}}{r_5} & \frac{\gamma_{53}\gamma_{53}}{r_5} \\ \frac{\gamma_{61}\gamma_{61}}{r_6} & \frac{\gamma_{61}\gamma_{62}}{r_6} & \frac{\gamma_{61}\gamma_{63}}{r_6} & \frac{\gamma_{62}\gamma_{62}}{r_6} & \frac{\gamma_{62}\gamma_{63}}{r_6} & \frac{\gamma_{63}\gamma_{63}}{r_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

これにより, 6点以上の観測点にてAE波のP波初動部の振幅値が観測できれば, 前章にて解説したAE発生源の位置標定とともに, モーメントテンソル解 m_{pq} は簡単に決定できることになる。また, 7点以上の観測点におけるP波の初動部振幅値が与えられれば, 式(3.4)は最小二乗法が適用できる。

ただしここで注意すべきことは, m_{pq} の絶対値や微小面積要素 DF の値に関する情報は考慮していないため, モーメントテンソル解は, その成分の中での最大値に対する相対値として求められる。したがって, 振幅値として左辺に代入される計測値も相対値であればよいことになり, このことは, モーメントテンソル解を求める際に必要な計測システムは, 各チャンネルが等感度であるAE波形記録システムであれば良いことを意味しており, 周波数応答の平坦性や変位計でなければならないなどの問題は考慮しなくてもよい。これは, 本手法を用いる最大の利点ともなっている。

これまでに述べたAE波形解析法は, 既に3次元のAEの理論波形を用いた数値実験によるシミュレーションによって確認されており, その結果は相当に良好であることが報告されている。

(2) モーメントテンソル解析 SIGMA コードの開発

検出されたAE波形のP波初動部の到達時間と振幅値から, 前項の手法によって得られたモーメントテンソル解 m_{pq} に対し, 前章に述べた固有値解析ならびに固有値分解を行えば, AEの発生源であるクラックの種別と方向が決定できることになる。これら一連のAE波形からそ

の発生源であるクラックの幾何学的諸量を定量的に逆解析する手法は SiGMA (Simplified Green's function for Moment tensor Analysys) と名付けられている。

SiGMA の大きな特徴は、BEMの弾性波動の基礎式から一般化されたAE波動理論 (Generalized Theory of Acoustic Emission) に基づき、無限弾性体におけるグリーン関数を用いることによって、検出されたAE波動のP波初動部の到達時間と振幅値だけでクラックの幾何学的諸量 (種別・方向) が得られ、一切複雑な処理や計算を必要としない非常に簡素化されたものとなっていることである。このことは、AE波形の逆解析をコンピューターで処理する上でソフトウェアの実行時間を最小にでき、一般的なマイクロコンピューターを用いた、施工現場や製品工場などあらゆる場所で、現地におけるリアルタイムなAE波形逆解析が行うことができるなど、AE波形逆解析の構造物や材料への適用に関して大きな利点となる。

このようなAE波形解析法を工学へ適用するために、SiGMAのプログラムコードを開発した。これまで述べてきたAE波形解析法をフローチャートで示すと図3.3のようになる。

AE波形解析法 SiGMA をマイクロコンピューター上で実現する SiGMA ソフトウェアは、

■ MONITOR : AE波形情報抽出プログラム

P波初動部の各観測点間における到達時間差ならびにその振幅値を拾い出し、波形解析プログラムのためのデータセットを作成する環境を提供するプログラム。AE波形計測システムによって記録されたAEの信号波形をグラフィックス画面上に、時間 vs 信号振幅形式で表示し、マウスポインタにて任意の点の時間と振幅値を読み出すことができる。図3.3における(1)の部分の処理を行う。

■ SIGMA : AE波形解析プログラム

MONITORプログラムによって作成されたAE波形データ (P波初動部の到達時間およびその振幅値) をもとに、これまでに述べたAE波形解析のすべての手続き (AE源位置標定ならびにモーメントテンソル解析) を自動的に実行するプログラム。解析結果はレポートのためのテキスト形式ならびに解析結果を図化するためのプログラムで使用するデータセットとしても出力される。図3.3における(2)の部分の処理を行う。

■ PLOT : AE波形解析結果図化プログラム

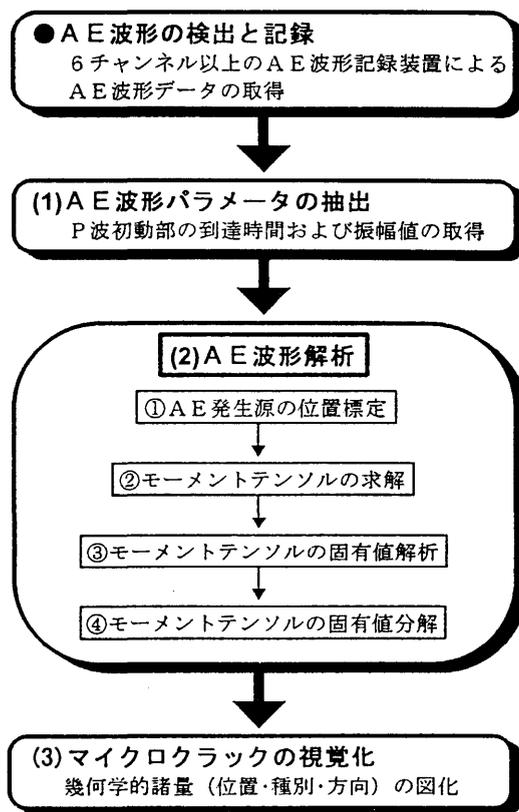


図 3.3 SiGMA のフローチャート

A E 波形解析プログラムの実行結果を可視化するプログラム。SIGMA プログラムによる解析結果（マイクロクラックの位置，種別および方向）を任意の面上の任意の矩形範囲に射影して，2次元表示した結果をX-Yプロッタに出力する。図 3.3における(3)の部分の処理を行う。

の3つのプログラムによって構成されている。

SiGMA ソフトウェアはオペレーティングシステム（OS）に MS-DOS®を用いて開発が進められ，当初のターゲットマシンは，わが国において最も普及率が高い NEC®社製のパーソナルコンピュータ，PC-9800™シリーズであった。しかし，国外において A E 波形解析法 SiGMA の発表を行うにつれて，SiGMA ソフトウェアに国際的な汎用性を求められるようになったため，世界の標準機となった感のある IBM®社製のパーソナルコンピュータ，PC/AT™およびその上位互換を含む互換機をターゲットマシンとして再構築され，これを正式公開版として公表している。

3.2 A E 波形の計測

(1) A E 計測の原理

A E は，図に示すような計測装置によって検出される。A E 現象により発生した弾性波は物体内を伝播し，その物体に取り付けられた A E センサーによってその波の動きが電気信号（一般には電圧）に変換される。その後，信号はアンプによって増幅され，帯域通過型のバンドパスフィルタによって周波数による弁別を受けて検出される。

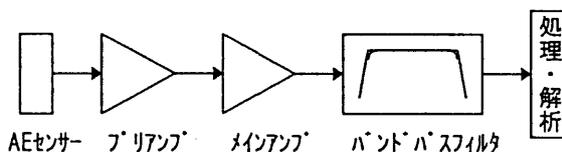


図 3.4 AE 検出装置の基本原理

検出波形は，計測装置の特性に大きく依存することに注意すべきである。特に，検出の基本となる A E センサーの性質は重要である。A E センサーに求められる性能は，A E 波は非常に微弱でありながら周波数帯域はさまざまであるため，高感度でかつ広帯域で忠実に振幅を再現できることである。

弾性波の検出器として用いられる代表的なものに地震計が挙げられるが，これは振幅の再現性は非常によいものの A E 波のように微弱な波動に対しての感度は乏しく，その周波数帯域も低い。また，地震計と同様，物体の慣性則を利用したバネ質量系のものでは加速度センサーがあるが，現在ではその実用周波数は数 kHz が上限である。最近のマイクロマシン製作技術の飛躍的な向上と相まって，高感度でかつ高周波成分にも追従できるような加速度センサーが現れ始めたが，それでも質量を小さくした分，低周波数帯域を犠牲にしなければならない。さらに，

微弱な振動に対し、特に高い周波数帯域での感度が良いPZTなどの圧電材料を使用したものもあるが、これは使用している圧電材料の組成によって周波数特性を変化させることが可能である。いずれにしてもこれらはすべて共振型のセンサーであるといえる。一般的にAEの検出という目的のために用いられる感度の良いAEセンサーはこの共振周波数を利用しており、逆に、AE波形の分析・解析を行うことを除けば、これらの共振周波数における卓越した感度を利用することができる。

このように実際の弾性波は、使用するAEセンサーの持つ振幅、周波数に対する応答特性によって、電気信号に変換された時点で、既に実際の弾性波の波形を忠実に検出しているものではないということは、深く認識しておくべきである。

さらにAEの検出において必要な、増幅器（アンプ）ならびに周波数選別器（フィルタ）もAEセンサーによって変換された電気信号を歪みなく処理するための性能が必要である。

アンプは、高いレベルで入力された電気信号に対しても飽和することがないように、広いダイナミックレンジと優れた線形性が必要とされ、さらに、低いレベルの入力に対しても雑音の無い、高いS/N比を確保できるものであることが必要である。このため、図3.4のようなプリアンプ（前置増幅器）とメインアンプ（主増幅器）による二段増幅回路が多用される。S/N比について言及すれば、AEセンサーの出力はおよそ数 μV から数百 μV 程度であるが、このような微弱な電気信号に対し、雑音の影響を低減させるため、センサーとプリアンプ間の接続は $1\text{M}\Omega$ 程度のハイインピーダンスとすることが多い。このため、センサーとプリアンプ間の信号の減衰を防ぐためにセンサーとプリアンプの距離は可能な限り短くする。

フィルタ（周波数選別器）の主な使用目的は雑音の除去である。雑音の原因は様々であるが、その多くは計測対象となる物体への外部からの攪乱（振動による断続的あるいは周期的な打撃など）が挙げられる。例えば、荷重装置や作業中の工作機械などの振動によっておこる物理的な雑音である。これらの雑音の周波数帯域は数kHz以下であることが多い。また、周辺雑音の中にはラジオやテレビジョンなどの電波によるかなり高い周波数成分をもつ雑音もあり、これらは数十MHz以上であるものが多い。計測対象の周波数帯域がこれらの雑音より高い場合にはハイパスフィルタを、逆に低い場合にはローパスフィルタを使用し、あるいはこれらを組み合わせてバンドパスフィルタとして使用する。

電氣的雑音の中にはAE計測器の中の処理・解析系にて使用されるCPUやモニタ装置のためのクロックジェネレータによる電波障害によるものも少なくない。A/D変換機能を持つ波形解析・記録装置と呼ばれる現在の機器にはほとんどがCPUを搭載しているので注意が必要である。時には蛍光灯の発振回路さえもその原因の一つとなることがある。一般にこれらの対策としては、計測機器類の接地（アース）および機器類を接続するケーブル（信号線）のシールドを十分にすることが効果的である。あらかじめ周辺雑音のレベルや周波数帯域の計測およびその原因の特定を行っておけば、実際のAE検出の際に、適切なフィルタリングを行うことができる。

AEセンサーにおける場合と同様に、アンプの周波数応答特性とフィルタがもつ周波数弁別機能は、検出後の波形を大きく特徴づけることになるので、計測対象とするAE波の持つ周波数帯域に対応できるような配慮が必要である。

(2) AE波形の記録

検出波形は地震波形と同様に、縦波（P波）、横波（S波）、表面波、境界での反射などが重合しており、非常に複雑であるが、さらに、AE発生の間隔が短いような場合には、それらのAEが発生する時間とAEの発生源からセンサーまでの距離との関係から、観測点すなわちAEセンサーに到達する時点では、複数のAE波が重畳された結果として検出されることもあり得る。本来、一つのAE波が立ち上がってから減衰してしまうまでの時間（継続時間）は、AE波が伝播する材料の特性によって決まる。したがって、コンクリートのような岩質材料の場合では、一つのAE波の継続時間は数 msec までであることが知られているので、これよりも長い継続時間を示すような波形は、複数のAE波形が一部重なり合っただけで連続的にAEセンサーへ到達したものとみなして良い。

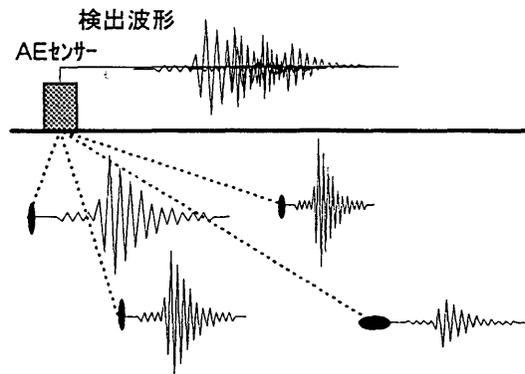


図 3.5 AE波の検出波形

SiGMAのようなAE波形解析やフーリエ解析のようなスペクトル解析には、できる限り実際の弾性波に忠実なAE波形データを収集することが重要であるが、AE波形の検出ならびにその記録を行う際の留意点として、次のようなことが挙げられる。

AE波形記録システムは、一般的に図 3.6 のようになる。前段（図中点線より左側）のAE波検出部から後段の波形記録部へ入力されるアナログ信号は、A/D変換器(①)によりデジタル信号に変換されて、メモリ(②)へ記録される。また、図には示していないが、実際にはメモリに書き込まれた信号波形は、一旦、別に用意されたバッファメモリあるいはハードディスクのようなデータ記録媒体に保存しておいて、後の波形解析に利用することになる。図 3.6はSiGMAを適用する際に必要

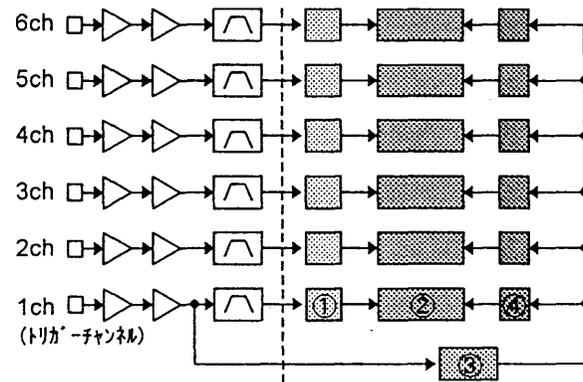


図 3.6 AE波形記録システム；

① A/D変換器、②メモリ、③振幅弁別器、④トリガ

な6チャンネルの仕様になっているが、ある一つのチャンネル（図中では1ch）をトリガチャンネルとし、あらかじめ決めておいたしきい値を超えるような信号が振幅弁別器(③)によ

り検出されると、トリガ回路(④)が働いて全チャンネルのメモリ書き込みを一斉に開始する仕組みとなっていて、これによりAE源位置標定において必要な、各チャンネルでのP波初動部の到達時間差が得られる。

AE波形記録部について注意すべきことは、A/D変換器の仕様である。アナログ信号をデジタル化する際の分解能が、入力信号に対してアナログ機器における周波数特性と同様な影響を与えてしまうからである。一般にA/D変換回路のサンプリング周波数と呼ばれる時間分解能すなわち単位時間に分解できるサンプル数と、データ分解ビット長すなわち1サンプルの階調は、背反する性質がある。A/D変換を行うCPUのクロック周波数が一定であるとした場合、データ階調を上げていけば、AE波形の振幅値に対しては精度よく数値表現できることになるが、1サンプルあたりにかかる処理時間が長くなるので、時間分解能が犠牲となる。逆に、時間分解能を上げて、AE波形の時間軸に対しての精度を上げようとすれば、1サンプルに対する処理時間に余裕がなくなり、データ階調が上げられないということになる。

前者の場合は、ローパスフィルタを用いた場合と同様な効果をもたらし、入力信号のサンプリング周波数を超える周波数成分は、無視される結果となる。これはスペクトル解析のような周波数領域での解析を行うときには十分な注意が必要である。後者の場合は、入力信号の振幅値に対する精度が犠牲となる。SIGMAを適用する場合にはある帯域の周波数成分のみに着目すれば、P波初動部の振幅値に対しての精度を重視すべきなので、着目する周波数帯域が犠牲にならない範囲内で、サンプル階調を上げていく方法が適切である。また、入力信号の振幅値の精度を上げる方法として、一般の波形解析では、一つの波形の全ての時間領域に対して計測機器のダイナミックレンジ内で、前段での増幅率を上げる方法をもちいるが、SIGMAにおいてはP波以外の部分が計測機器のダイナミックレンジを超えて飽和してしまっても、必要とする微弱なP波の部分のみを強調して波形記録を行う場合もある。ただしこの場合には、周辺雑音もまた同時に増幅を受けることを承知しておかねばならない。

AE波形解析を行う場合には、AE波形を記録するタイミングすなわちトリガのかけ方は重要である。トリガは入力信号の振幅値に対し、その時の雑音レベルよりも大きく、かつ微弱な信号を取りこぼさない様、可能な限り低いレベルにしきい値(トリガレベル)を設定し、これを超えた入力があった場合に信号波形を記録し始めるアウトトリガを設けるのが一般的である。またSIGMAにおいては全てのチャンネルにおいても波形の先頭情報であるP波初動部を一斉に記録する必要があるため、トリガがかかる時点(トリガポイント)よりも以前の信号波形も記録できる様、前置トリガを設ける必要が出てくる。

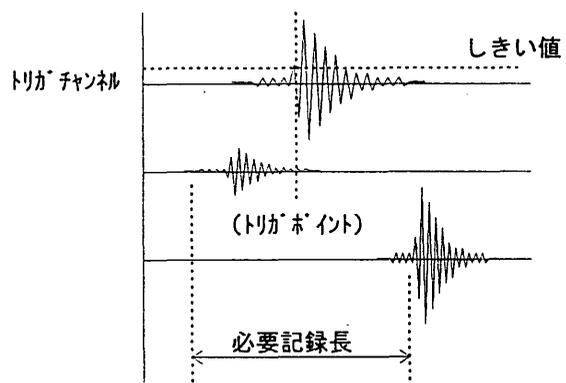


図 3.7 AE 波形の記録

さらに、1事象のAE現象を記録するに必要な記録長（サンプル長）も十分に検討しておく必要がある。1事象に対する波形記録サンプル長、AE波の伝播速度および計測対象とする領域の広さをそれぞれ勘案して、これまでに述べた、A/D変換器のサンプリング周波数ならびに前置トリガポイントの位置を決定する。SiGMAの場合、理論的には少なくとも、計測対象としている領域において、トリガチャンネルのAEセンサーの位置から最も遠方にあるAEセンサーの位置までにP波が伝播するまで時間およびこの時のP波が到達してからS波が到達するまでのP波のみの継続時間を加えた時間にわたって信号波形が記録できなければならないが、実際にはこれに多少の時間的ゆとりを持たせて、記録装置の記録サンプル長からサンプリング周波数を決定することになる。

AEセンサーについてさらに追記すると、AEセンサーの共振周波数付近の周波数帯域において最も感度がよく、AEの検出という目的のみにおいては、バンドパスフィルタの弁別帯域をこの周波数帯域に調整することが望ましいことは既に述べた。しかしながら、一般にAEセンサーの共振周波数付近の応答感度は、非常に複雑で、わずかに周波数が変化しただけで数10dB、倍率に換算すれば数10倍もの応答差がある。しかしながら、SiGMAのようにAE波形の振幅値に厳密さを求めるようなAE波形解析を用いる場合は、各チャンネルのAEセンサーの感度に平坦性があるものを使用する必要がある。最近では、かなり広い周波数帯域にわたり応答に平坦性を持つようなAEセンサーも開発されるようになってきているが、共振型のAEセンサーの場合でも、その感度を多少犠牲にして、共振周波数帯域よりも低い帯域で、周波数応答が平坦になっている帯域を使用することができる。さらに、AEセンサーの取り付け方法も注意しておく。AEセンサーを計測対象に取り付ける方法によって、AEセンサーの感度は著しく変化するからである。AEセンサーの検出面は、取り付け面に対してその全面にわたり密着させることが重要で、表面が粗かったり、凹凸があるような場合には、その隙間にAE波の伝播を妨げないような樹脂、シリコングリス、エレクトロンワックス等の充填材を使用するのが一般的である。また、AEセンサー本体を検出面に固定させる為には、接着剤を用いたり、何らかの方法によって押しつけたりする。これらの要素が検出波形にフィルタとして影響する。このように種々の因子により、実際にAEセンサーの仕様書等に記載されている周波数応答の公称値は参考程度のものであり、考えておく必要がある。

3.3 AE波形解析の実際への適用

(1) コンクリートに埋設されたアンカーボルトの引き抜き試験への適用

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。ここでのAE波形解析の対象は、アンカーボルトが埋め込

またコンクリートブロックにおいて、アンカーボルトを引き抜くことによって生じるコンクリートの破壊現象である。

主に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
- 支圧破壊および付破壊

があげられるがここではコンクリート部のコーン状破壊を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、その破壊過程において記録したA E波形にSiGMAを適用して得た結果について考察する。

① アンカーボルト引き抜き試験

アンカーボルト引き抜き試験に用いたコンクリート供試体は、アンカーボルトの引き抜きに対し、支点部の拘束を受けずにコーン状破壊を生じるように経験的に得られた大きさを持ち、図 3.8に示すように寸法を引き抜き面 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 、厚さ 30 cm 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 15 mm 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。強度試験の結果は、圧縮強度 554.0 kg/cm^2 、引張強度 39.3 kg/cm^2 、曲げ強度 53.4 kg/cm^2 であった。

アンカーボルトには引き抜き試験中の載荷荷重に対して降伏しないよう十分な引張強度をもつPC鋼棒 (SBPR-110/125, $\phi 17\text{ mm}$) を用い、図 3.9に示すよう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ボルト止めした。そして供試体が引き抜き荷重に対して、アンカープレート部の支圧力のみで抵抗するよう、アンカーボルトの全体にグリスを塗布してポリエチレンラップを巻き付ける

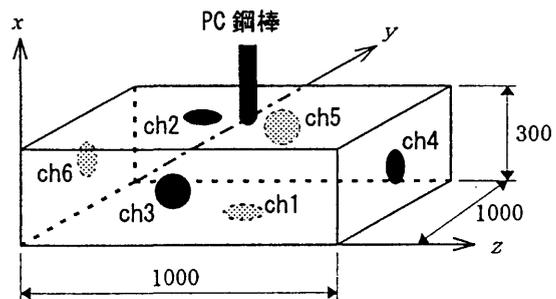


図 3.8 コンクリートブロック供試体

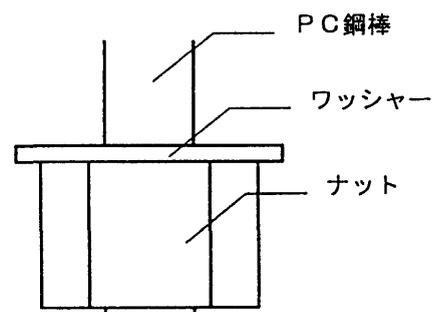


図 3.9 アンカー埋設部

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 10 cm となるように埋設した。A E セン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、供試体の各面の表面にそれぞれ配置した。

引き抜き試験に先立ち、後述するクラックの位置標定に際して必要な A E 波（P 波）の伝播速度の測定を行なった。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 cm × 10 cm × 40 cm）を用いて、超音波伝播速度を求めた結果、4150 m/sec であった。A E 波の伝播速度は引き抜き試験中も、また供試体のどの位置においても不変であるとしてこの値をクラックの位置標定に採用した。ちなみに、引き抜き試験の前に供試体の任意の点に疑似クラックとして A E センサーを取り付け、これより超音波パルスを供試体に入力した結果から求めた疑似クラックの位置標定の誤差は 30 mm 以内であった。

A E 波形の記録には、SiGMA に必要な条件である 6 チャンネルの計測システムを用いた。A E センサーには共振周波数が 140 kHz のものを使用し、A E センサーによって検出された A E 信号はプリアンプで 40dB、メインアンプで 20dB、合計 60 dB 増幅され、さらにバンドパスフィルターにより、周波数帯域が 30~80 kHz の A E 波形成分を弁別して、1 波形を 1 μsec のサンプリング間隔で 1024 サンプル長のデジタルデータに A/D 変換してウェーブメモリに記録した。ウェーブメモリに記録されたデータは、IEEE-488 (GP-IB) 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され、固定ディスク装置の磁気記録媒体に保存した。この際の 1 事象の記録にかかる所要時間は約 7 秒であった。

載荷方法は図 3.10 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 1 mm の硬質ゴムマットを挟んだ。前述の A E 波形データ転送にかかる処理時間を加味して、なるべく多数の A E イベント

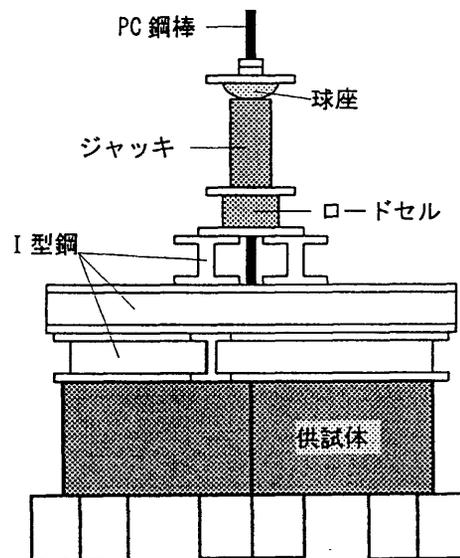


図 3.10 アンカーボルト引き抜き試験概要図

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、供試体の急速な破壊を防止するために、A E の発生挙動が急激に増加した場合には引き抜き力

を若干下げ、AE波形の収録が完了すると、さらに载荷を行うという方法を取り、供試体とジャッキとの反力がなくなるまで実験を続けた。

② SIGMA による AE 波形解析

前述の実験中において、収録できたAE事象は515イベント（波形データ数6090波形）であった。これらに対してSIGMAを適用してAE波形解析を行なった。

まず、AEの発生源となったクラックの位置標定を行うが、クラックの位置標定に必要な初期微動（P波）の各AEセンサーへの到達時間は、収録した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、マウスポインタを使用して読み取った。また同時に、モーメントテンソル解析に必要なP波の初動振幅値もあわせて読みとった。しかし、これらの波形データ中には、AEセンサーの応答感度やノイズなどが原因で、P波到達時間および初動部振幅値が不明瞭で読み取れないものもあり、それらは解析の対象から除外した。

さらに、求められたP波初動部に関する到達時間と初動部振幅値より、クラック位置標定、モーメントテンソル解析およびその固有値解析を行なった結果、解の発散などの数値計算上の問題によりクラックの位置やモーメントテンソル解が求められないものもあった。これらの原因には、P波初動部の不明瞭さによる到達時間あるいは振幅値の読み取りに誤りがあったか、または波形検出時における反射波あるいは複数のクラックからのAE波の重合波などを同時に取り込んでいたと考えられる。こうして216イベントのAE源に対して解析解が得られた。

次に、各イベントにおけるモーメントテンソル解の固有値の成分分解により、求められたせん断成分が45%未満であるものは、引張モードの影響が比較的大きい転位によるAEイベントであると考えて、引張卓越型イベントと便宜上表現した。逆に、せん断成分が55%より大きいものをせん断卓越型イベントと表現する。45%～55%であるイベントについてはそのAEがせん断卓越型であるか引張卓越型であるかの決定を避け、これを結果の対象から除いた結果、AE源であるクラックの種別および方向が決定できたのは187イベントであった。

③ 結果および考察

図 3.11にはアンカーボルトを引き抜き力と抜け出した長さとの関係を応力-歪み曲線にならって包絡線（実線）で示した。さらに、ボルトの抜け出し長に対するAEの発生挙動の時間的推移を引張卓越型（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、引き抜き荷重と抜け出し長との関係がほぼ線形的である初期段階では、AEの発生速度は比較的緩やかで、発生数においては引張卓越型イベントの方が先行しているが、さらに引き抜きが進むと次第にAEの発生が活発となり、せん断卓越型イベントが優勢となってきている。

コンクリート供試体のコーン状破壊が実際に目視で確認でき始めた最大耐力の直前あたりからは、両イベントとも発生が顕著となる。

図 3.12 (1), (2), (3)および(4)は、アンカーボルトの引き抜き試験の過程を図 3.11で示した4段階に分け、解析によって得られたAE源の位置とそれぞれの種別およびクラック面の方向を表示したものである。

図中の \ominus は引張卓越型の位置を表わし、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 はせん断卓越型の位置を表わし、それぞれの線分の方向が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。

ここで、各段階におけるイベント数は、(1)第1段階 53 イベント、(2)第2段階 41 イベント、(3)第3段階 44 イベント、および(4)第4段階 46 イベントであった。

$x - y$ 平面図において、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 $(x = 50 \text{ cm})$ の実測値を点線にて表示した。

AEの発生源となったマイクロクラックが、初期の段階ではアンカーボルト、特に支圧面であるアンカープレート部を中心に多発し、アンカーボルトの抜け出しによる供試体の破壊の進行に伴い、次第にその発生分布範囲が周囲へ広がっていくことが確認できる。平面図において、引張卓越型イベントの変位方向（引張クラックの開口方向）は、アンカーボルトの位置を中心にしてほぼ放射状になっている。また、正面図においては、引張卓越型イベントの変位方向は、破壊面に対しほぼ直角方向を指している。一方、主破壊面付近にあるせん断卓越型イベントの示す2方向のうちのいずれか（おそらくせん断クラックの面の方向）は、主破壊面と同じ方向

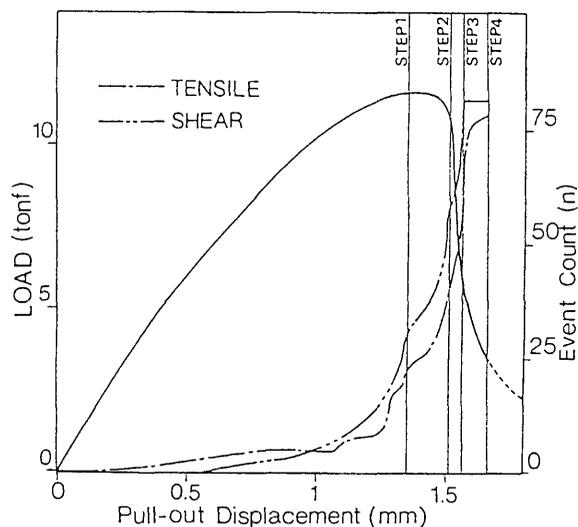
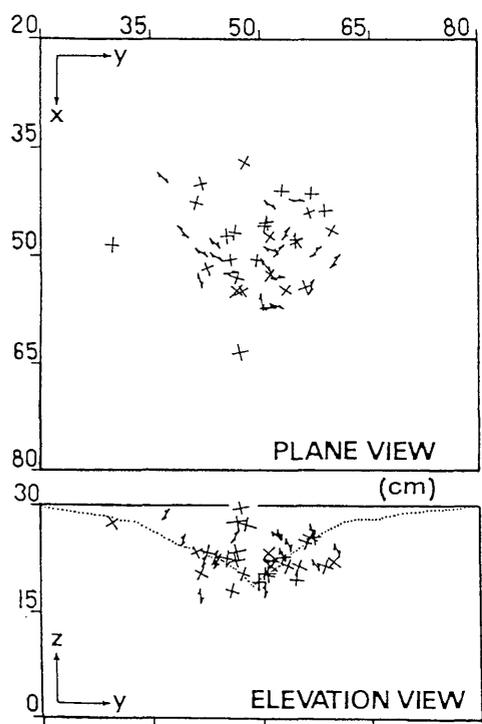


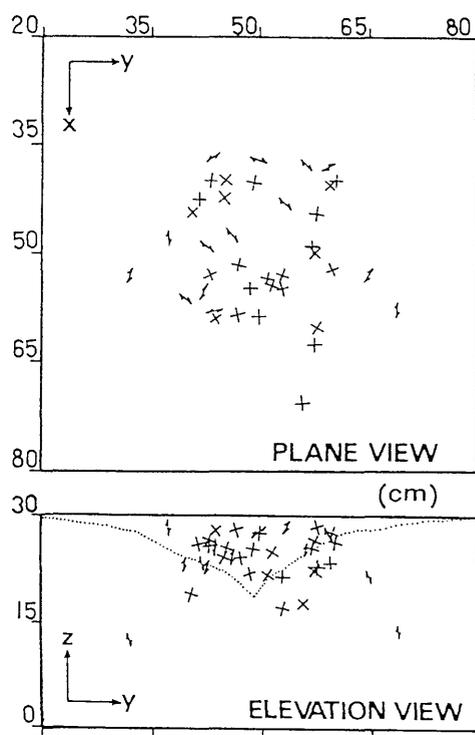
図 3.11 アンカーボルトの抜け出し長と引き抜き荷重ならびに AE 発生挙動との関係

を指している。そして、初期の段階においては、常に引張卓越型イベントは、せん断卓越型イベントの分布する領域より外側の領域に見られることが特徴的である。

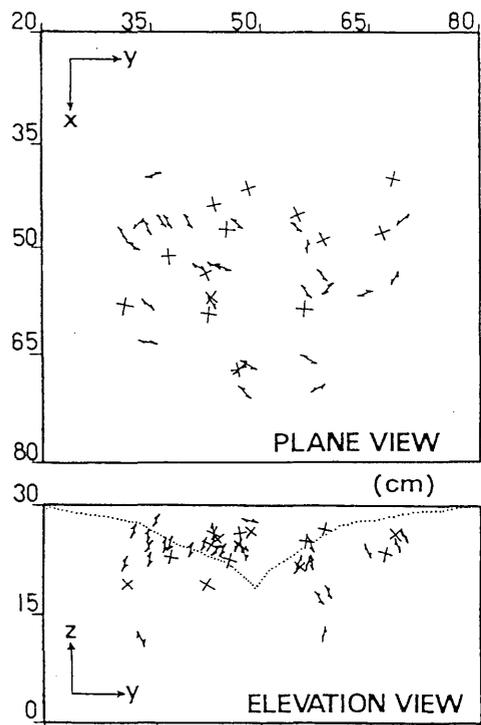
これらの結果により、アンカーボルトの引き抜きによるコンクリートブロックの破壊現象を考察すると、目に見えるひびわれ（主破壊面）の形成はマイクロクラックの集積および連結によるものであるとみることができる。また、ひびわれの形成過程として、エネルギーが局所的に集中した位置において先に引張型のクラックが生じ、その近傍の変位拘束を解放する。その時に形成されたマイクロクラックは近傍のクラックとの連結したり、あるいはさらにせん断型転位による規模の拡大を繰り返しながら、目に見えるひびわれ面を形成していくのではないかと考えられる。



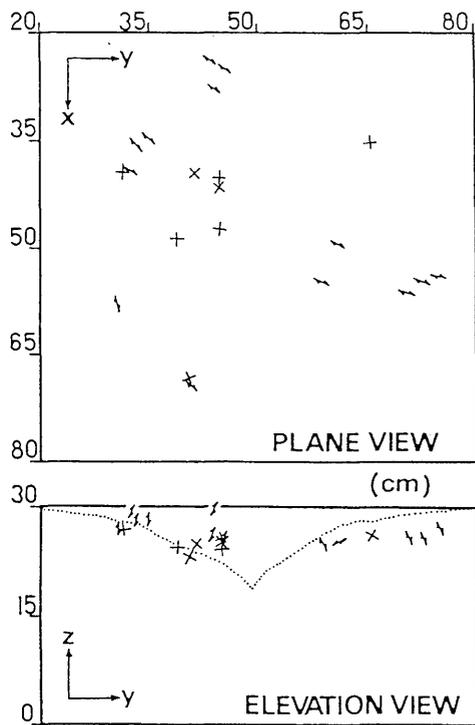
(1) 第1段階



(2) 第2段階



(3) 第3段階



(4) 第4段階

図 3.12 アンカーボルト引き抜き試験におけるAE波形解析結果

(2) コンクリート円筒供試体の引張試験への適用

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-変位曲線を得ることが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コンクリート引張強度試験法が提案されている。ここでは、このコンクリート引張強度試験法におけるコンクリート円筒供試体の圧縮引張による破壊現象にA E波形解析 SIGMA を適用し、その解析結果から圧縮引張によって生じる破壊現象について考察する。

① コンクリート円筒引張試験

この試験方法は図 3.13に示すように、円柱形のコンクリート供試体の上、下面よりコアドリルによって、直径の異なった円筒状のスリットを作成し、上下から圧縮力を作用させることで、供試体内部の二つのスリットにはさまれた部位に引張領域を生じさせ、引張破壊に導くものである。

今回の実験では図 3.14に示すような八角柱供試体（高さ 300 mm）を使用し、これに外側スリット（仕上がり内径 150 mm）と内側スリット（仕上がり外径 78 mm）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 150 mm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 15 mmの普通コンクリートで、材齢 4 ヶ月における圧縮強度は 511.0 kgf/cm^2 であった。

引張試験においては図 3.15に示すように、開口変位計にて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測定し、またロードセルにより荷重を測定して、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荷重と除荷を繰り返しながらロードセルによる反力がなくなるまで荷重した。

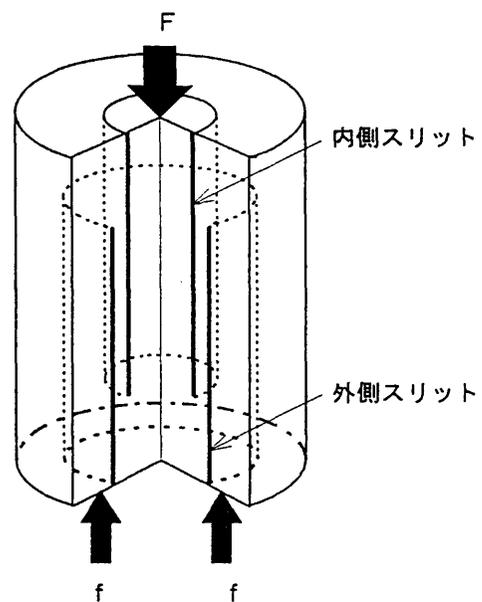


図 3.13 コンクリート引張強度試験

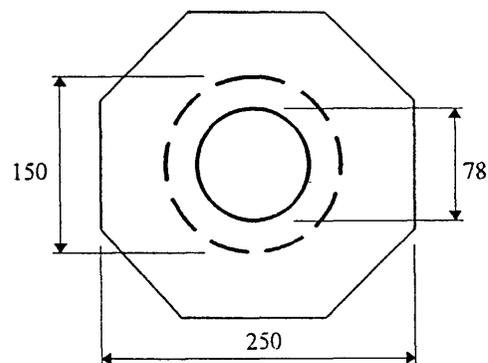


図 3.14 コンクリート八角柱供試体

AE計測に使用したAE計測システムの構成は、前節にて述べたアンカーボルト引き抜き試験において使用したものと同一で、AEセンサーには共振周波数が140kHzのものを使用し、AEセンサーは、図3.16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。

AEセンサーによって検出されたAE信号はプリアンプで40dB、メインアンプで20dB、計60dB増幅した。さらにバンドパスフィルタにより周波数帯域30~80kHzのAE信号を弁別し、1波形につきサンプリング間隔1 μsec でA/D変換した400サンプル長のデジタルデータをウェブメモリーに記録した。さらにウェ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、固定ディスク装置に記録した。この時の1イベントの記録にかかる所要時間は約6秒であった。

またクラック位置標定に際して必要なAE波(P波)伝播速度の測定を超音波伝播速度にて近似的に求めた結果は、4300m/secであった。AE波の伝播速度は载荷試験中も、また供試体中のどの位置においても不変であるとして、クラック位置標定においてはこの値を採用した。

② AE波形解析の結果および考察

前述の実験より、コンクリート円筒供試体の圧縮载荷による反力と供試体中央部の変位曲線が図3.17のように得られた。

载荷試験中に採取されたAEイベント総数は415イベントであったが、採取されたAE波形が不明瞭で、P波初動部の到達時間や初動振幅値が不明瞭なために読み取ることができなかつたり、数値計算における解の発散のために、クラックの位置標定ができたイベントは133イベントであった。また、固有値解析の結果において、せん断成分が100%を超えるなどして解析結果が不適当であると考えられるAEイベントを除くと、適当な結果を得られたAEイベントは124イベントとなった。

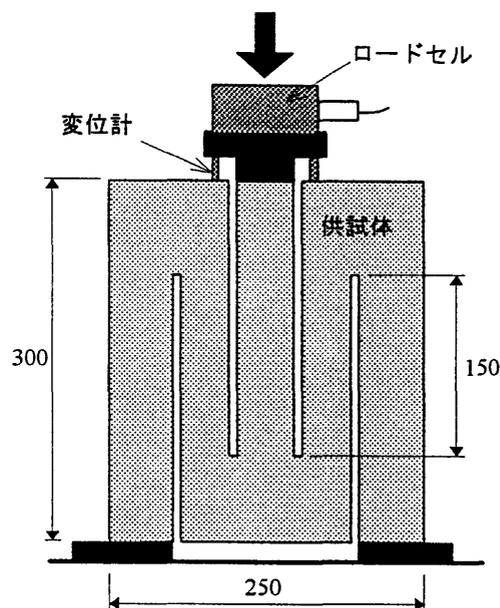


図 3.15 圧縮引張試験概念図

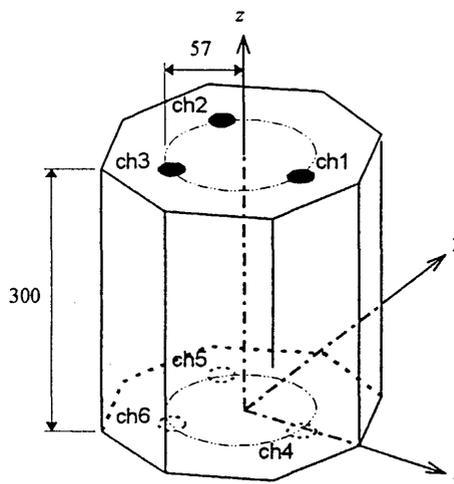


図 3.16 AEセンサーの配置

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 3.18に示すようになる。

AEの発生挙動は、供試体が最大耐力を示した以降より活発になり始め、特に弾性域から軟化域へ移行する遷移域において顕著である。

一旦、除荷して再び載荷するといった過程では、発生するAEイベントはその時点で既に生成されたひびわれのクラック面における摩擦や閉塞によるものと考えられ、AE波形は継続時間が長い連続型であるものが多い。この連続型のAE波形は、短い時間間隔で発生した複数のAE波を重合して検出した結果と考えられ、このような場合には単一のAE波形としてのP波初動部分の識別は非常に困難であり、SIGMAによるAE波形解析は不可能である。一方、AE波形が逆解析できたAEイベントのAE波形

は、ほとんどが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、言い換えれば、新たなクラックの発生によって生じたAEイベントであると考えられる。

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、SIGMAによる位置標定結果およびモーメントテンソル解析結果を、図 3.19(1), (2), および(3)に示す。図 3.19(1)は、図 3.18における弾性域 (AE Event No.30 まで) までの結果、図 3.19(2)は遷移域 (AE Event No.30~60), さらに図 3.19(3)は軟化域 (AE Event No.60 以降) までの結果を表示した結果である。図中の \ominus 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、その方向はひびわれ面の転位方向あるいは法線方向を示している。

図 3.19によれば、AEの発生源となったマイクロクラックが、引張試験の進行とともに破壊面を形成し、特に供試体の鉛直方向中央部の位置に集中している様子がわかる。

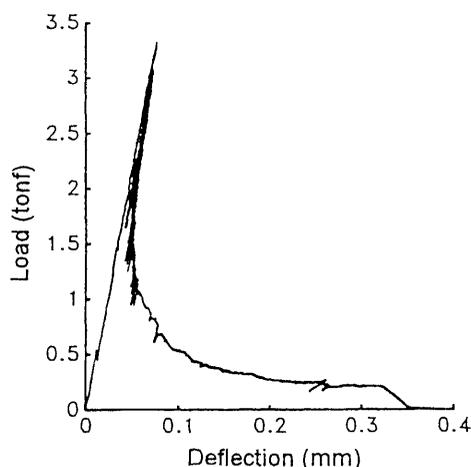


図 3.17 引張圧縮試験における荷重－変位曲線

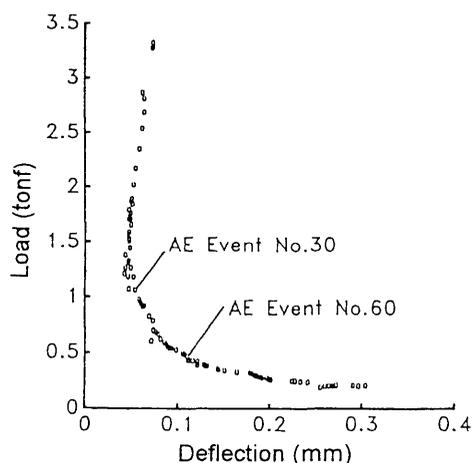


図 3.18 引張圧縮試験におけるAEの発生挙動

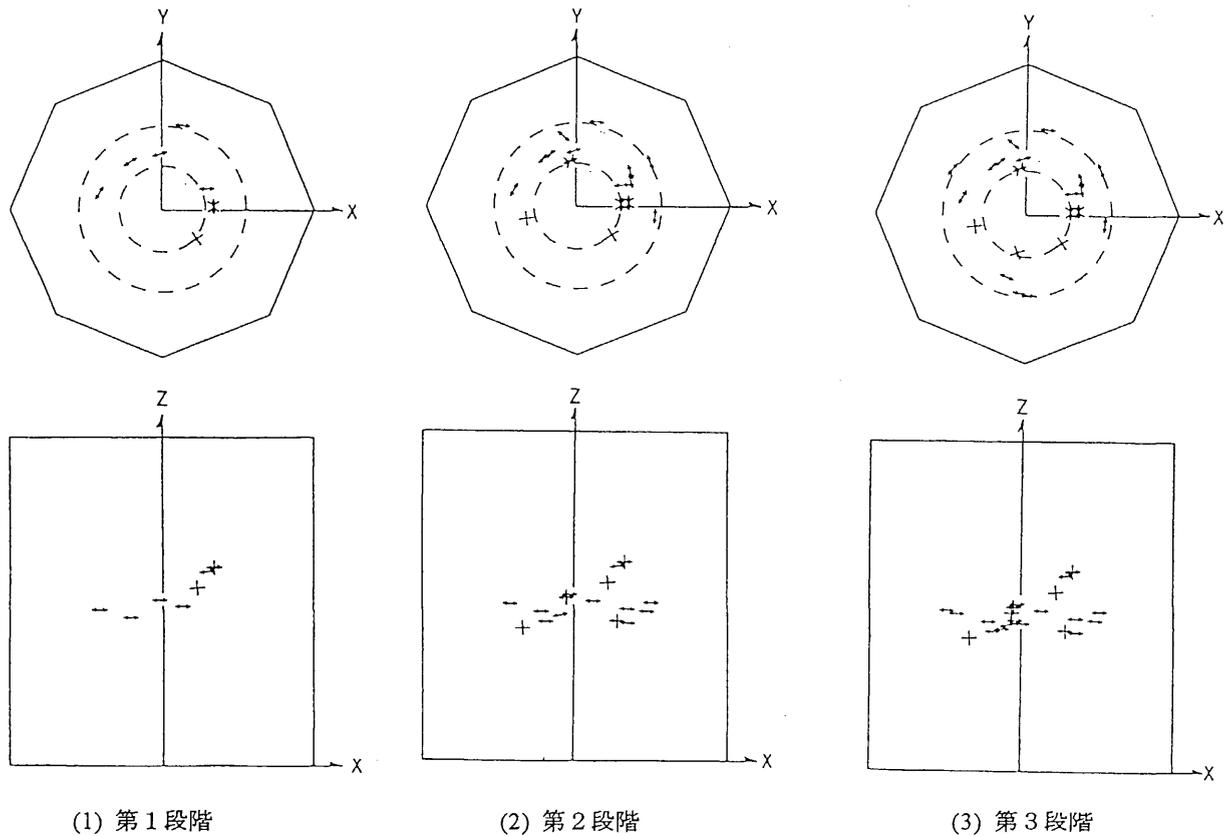


図 3.19 円柱供試体圧縮引張試験におけるAE波形解析結果

また、ほとんどの引張卓越型AEイベントのひびわれ面の開口方向は、 $x-y$ 面においては円周方向、また、 $x-z$ 面及び $y-z$ 面においては、水平方向すなわち引張応力の方向に対し直角方向を指しており、実際に供試体が破断した最終破壊面の開口方向と一致しない。

引張クラックは、拘束の最も小さい方向へ開口することはよく知られている事実であるが、今回の解析結果からも、引張クラックは載荷軸方向と垂直な方向すなわち拘束の最も小さな方向へ開口する様子が伺える。また、弾性体内部において、ある方向に引張応力が生じると、その方向に弾性体は膨張しようとするが、その分だけ収縮しようとする引張方向とは直角方向に圧縮応力が生じる。今回のAE波形解析結果の引張卓越型イベントは、この引張応力と直角方向をなす圧縮応力のために生じたものであると考えられる。したがって、この時に生じた引張方向と直交する最終破断面は、引張領域に生じる引張応力の方向と直交する拘束の最も小さな方向に開口する無数のマイクロクラックの集合および連結によって、形成されたものと考えられる。

以上により、AE波形解析SIGMAによって、スリット孔を設けたコンクリート円筒供試体の圧縮引張試験における供試体の破壊に関する新たな知見が得られた。すなわち、この時の引張破壊現象は目に見える引張ひびわれによる破壊は、引張方向に対して拘束が最も小となる直交方向に働く圧縮応力によるマイクロクラックの集積現象であると推測できる。

(3) 鉄筋コンクリートにおけるひびわれ進展への適用

建設分野における構造材料としては、おそらくコンクリートが最も多用されている。しかもコンクリート構造物および製品の多くは鉄筋コンクリートによるものである。その用途は多種多様でしかもその高い耐久性のために、それらは高温、高圧、高負荷あるいは放射能など厳しい環境のもとで使用されている。これら鉄筋コンクリート構造物および製品の長期使用のための維持管理手法は重要であり、材料内部の微小なひびわれの発生によって生じるAE現象を用いた、構造物及び製品の内部欠陥の検査方法が注目されている。そこで、AE波形解析法SiGMAを鉄筋コンクリート構造物におけるひびわれ進展現象に適用することを試みる。

ここでは、ボックスカルバートのような箱形ラーメン構造の隅角部が、繰り返し载荷を受けることによって生じるひびわれの進展に対して、AE波形解析法SiGMAを適用する。

① 箱形ラーメン隅角部の繰り返し载荷試験

ボックスカルバートのような鉄筋コンクリート箱形ラーメン構造の隅角部に繰り返し载荷を行うため、図3.20に示すような供試体を作製した。供試体は実際のボックスカルバートの隅角部のみを切り出した形状をしており、配筋として、供試体の隅角部およびハンチ部に沿って異形鉄筋D13およびD16を、また、正負鉄筋にはD16を配置した。

また、繰り返し载荷は、隅角部を開く方向に载荷し、

- 0tonf→1tonf→0.5tonf
- 0.5tonf→2tonf→0.5tonf
- 0.5tonf→3tonf→0.5tonf
-
- 0.5tonf→7tonf→0.5tonf

と1サイクルにつき1tonfずつ負荷を上げ(最終7tonf)、0.5tonfまで除荷することを7サイクル行った。

コンクリートのような岩質材料では、弾性波の減衰が非常に早く、特に高周波成分の伝播距離は非常に短い。

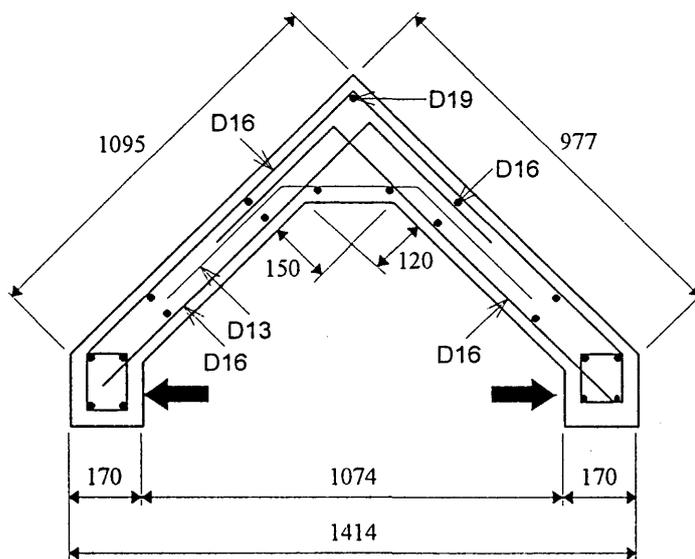


図 3.20 鉄筋コンクリートラーメン供試体

本実験においては供試体が比較的大きく、しかも鉄筋がAE波の伝播媒体であるコンクリート中に配筋されたことによって、高周波成分がコンクリートおよび鉄筋の境界での反射、散乱することが考えられる。AE波形解析法 SiGMA の原理上、AE源から直接伝播してくるAE波動を観察する必要があるため、このような反射波や散乱波となる高周波成分は検出しないほうが好ましい。したがってこれらの理由から、150kHzに共振周波数を持つ低周波タイプのAEセンサーを使用し、

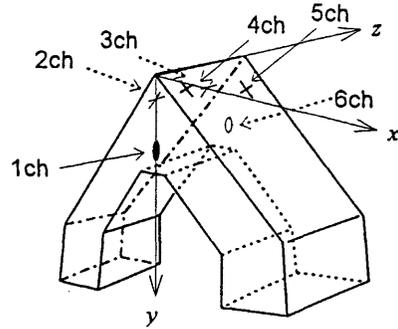


図 3.21 センサーの配置

低周波成分のみを検出することにした。AEセンサー図 3.21に示すように、側面に2チャンネルずつ両断面に1チャンネルずつを配置し、隅角部を取り囲むようにした。また、AE波形の記録には、AE波形解析法 SiGMA において最低限必要な6チャンネルのAE計測装置を使用し、AEセンサーによって検出されたAE信号は、プリアンプにて40dB、さらにメインアンプにて26dB増幅された後にA/D変換され(サンプリング周波数1Mhz)、4096samplesデータ長の波形として記録された。本実験においては1024イベントに相当するAE波形が検出された。

② AE波形解析の結果および考察

AE波形解析法 SiGMA によって有意な解析結果として得られたイベントは、収録された全1024イベント中の僅か19イベントでしかなく、供試体の大きさや形状、さらに、鉄筋によりAE波の伝播形態が複雑になったことによる影響が大きいことを意味する結果となった。x-y面におけるAE波形解析の結果を表 3.1に示す。

表 3.1 鉄筋コンクリート箱形ラーメン隅角部のAE波形解析結果(x-y面)

Loading Cycle	AE Event	Shear Ratio (%)	Source Location (m)			Crack Motion (deg)	
			x	y	z	Tensile	Shear
3	#31	72.6	-0.082	0.802	0.417		10.4
	#63	94.9	-0.243	1.034	0.412		16.2
4	#73	53.8	-0.096	0.365	0.208	24.5	12.3
	#96	33.7	-0.060	0.413	0.152	147.6	
	#101	53.1	0.037	0.336	0.268	36.4	171.2
5	#118	0.0	0.056	0.357	0.280	120.4	
	#126	72.1	-0.169	0.392	0.230		26.0
	#130	95.5	-0.151	0.246	0.271		43.8
	#131	93.6	-0.267	1.210	-0.239		6.0
	#139	0.0	0.202	0.263	0.229	118.3	
	#142	0.0	0.092	0.159	0.143	85.3	
6	#167	68.2	0.068	0.297	0.153		153.4
	#184	23.2	0.011	0.222	0.283	161.8	
	#199	56.5	0.118	0.259	0.224	123.6	143.0
	#202	22.7	0.089	0.281	0.144	154.5	
	#237	43.6	-0.062	0.246	0.178	16.7	58.8
	#239	56.3	-0.057	0.228	0.237		23.7
7	#320	15.9	-0.048	-0.054	0.227	168.4	
	#418	96.2	-0.151	0.871	0.479		9.7

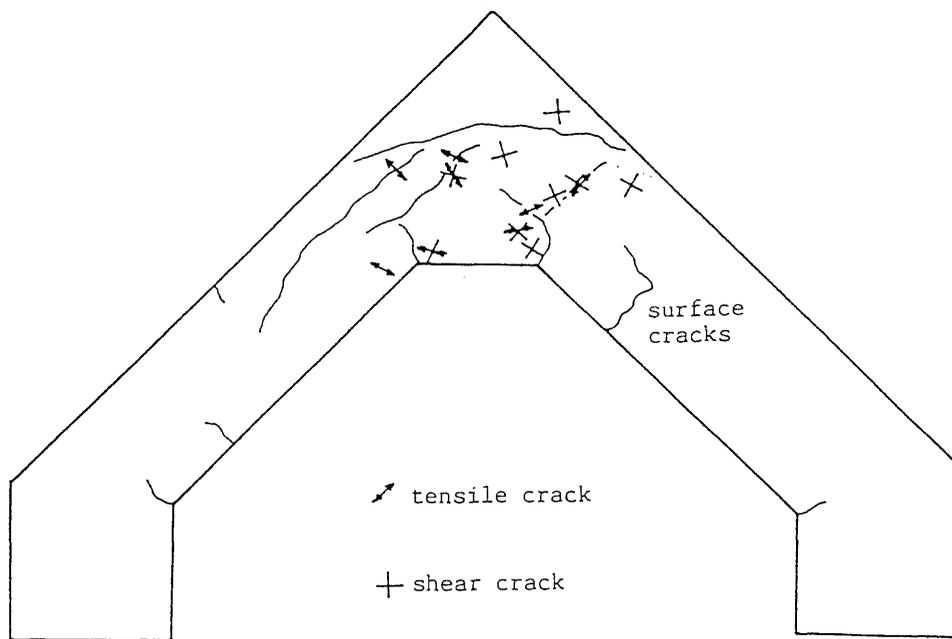


図 3.22 鉄筋コンクリート箱形ラーメン隅角部のAE波形解析結果 (x-y面)

表中の Crack Motion は、反時計回りに x 軸から y 軸方向へ回転する角度で示している。また、これらを図示したものが、図 3.22 である。図中には繰り返し載荷後に観察されたひびわれを実線にて併せて示している。ハンチ部の両端からは曲げ引張によるひびわれ、隅角部中央には圧縮によるひびわれ、そして、それらの間に位置するせん断によるひびわれが観測された。

AE 波形解析法 SiGMA による解析結果は、せん断成分が 40% 以下のものを引張卓越型イベントとし、その発生源であるマイクロクラックの位置とクラック面の開口方向を図中に \rightarrow で示した。一方、せん断成分が 60% 以上のものはせん断卓越型イベントとし、マイクロクラックの位置とその転位方向を \times で示した。また、せん断成分がこれらにあるものは混合型イベントとし、その位置にその両者の方向を重ねて示した。これらの AE 発生源の位置とその方向は観測されたひびわれとよい相関を示していることが分かる。

鉄筋コンクリートのように AE 波の伝播特性が複雑な観察対象の場合には、発生源から直接 AE センサーへ到達する AE 波のみを検出することが非常に困難となるため、AE 解析法 SiGMA による有意な解析結果は、均一な材料の場合に比べるとずっと少なくなる。しかも、破壊過程において、材料内部には無数のひびわれが次々と発生することになり、新たな境界面が形成されることにより AE 波の伝播特性はますます複雑なものとなる。したがって、AE 波形計測において可能な限り多くの AE 波形データを収集することが肝要である。

また、この場合に記録された AE 波形データからは、P 波初動部の位置を探し出すことが非常に困難である。有意でない解析結果の多くは、位置標定における収束計算にて解の発散により算出不能となったものが殆どで、これは P 波初動部の到達時間をパラメータとして与えると

きに、これに既に過大な誤差を含んでいたために、不適当な一次解（収束計算の初期値）が求められてしまうことに原因があると考えられる。

しかしこのことは、誤ったP波初動部に関する情報を与えれば、その多くが位置標定の段階で解析不能となり、モーメントテンソル解も求められないので、誤ったマイクロクラックの幾何学的諸量が結果として提供されることは殆どないということの意味しており、本実験においても示されたとおり、複雑な伝播経路・特性をもつ鉄筋コンクリートにおいては、求められた解析結果が僅かであっても、これらが示す情報の有意性が失われることはないものと考えられる。

(4) 岩盤の静水圧破碎試験への適用

岩盤の静水圧破碎実験は、ボーリングにより岩盤にボアホールを設け、パッカーを岩盤中に設置して水圧により岩盤に亀裂を生じさせ、岩盤の強度をはじめ、生じた亀裂の観察から岩盤の節理や既に潜在する亀裂などを調査するものである。

ここでは、岩盤の静水圧破碎試験において発生するAE波形を記録し、AE波形解析法SIGMAを適用することによって、岩盤におけるひびわれの進展ならびにその発生機構を同定することを試み、この適用性について検証する。

① 地下岩盤の静水圧破碎試験

今回、地下電力施設において行われた静水圧破碎実験では、珪土質岩盤に対し深さ10mの破碎実験孔を設け、これにパッカーを設置して水圧をかけることによって、岩盤の深さ5.68mの位置に亀裂を生じさせた。その際に、図3.23に示すように、破碎実験孔よりそれぞれ1m離れた位置に同じく深さ10mの4本の計測孔A₀、A₁、A₂およびA₃を設け、この中に破碎実験孔を取り囲むように10個のAEセンサー○を配置してAE波形を検出した。岩盤中を伝播するAE波が受ける強い減衰の影響から、その伝播距離を考慮して、AEセンサーには共振周波数25kHzの圧電型加速度計を用いた。AE波計測孔は、AEセンサーを配置した後にモルタルを注入して埋め戻し、再び岩盤と一体化して、AE波の計測を行った。実験により得られたAE波形の一例を図3.24に示す。

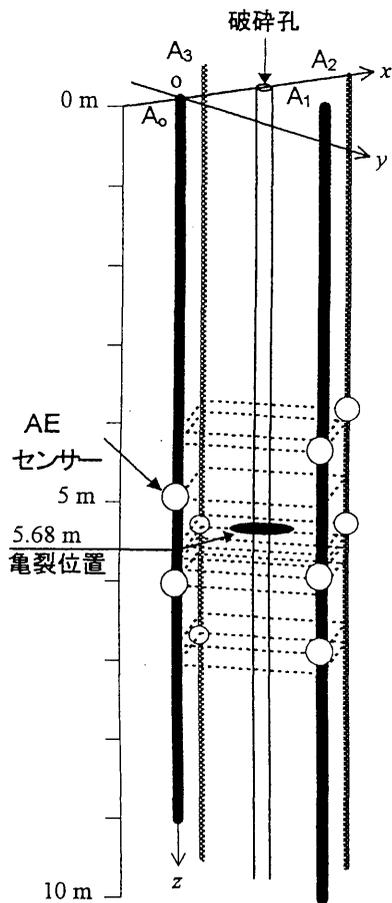


図 3.23 静水圧破碎実験における AE センサーの位置

EVENT# 14

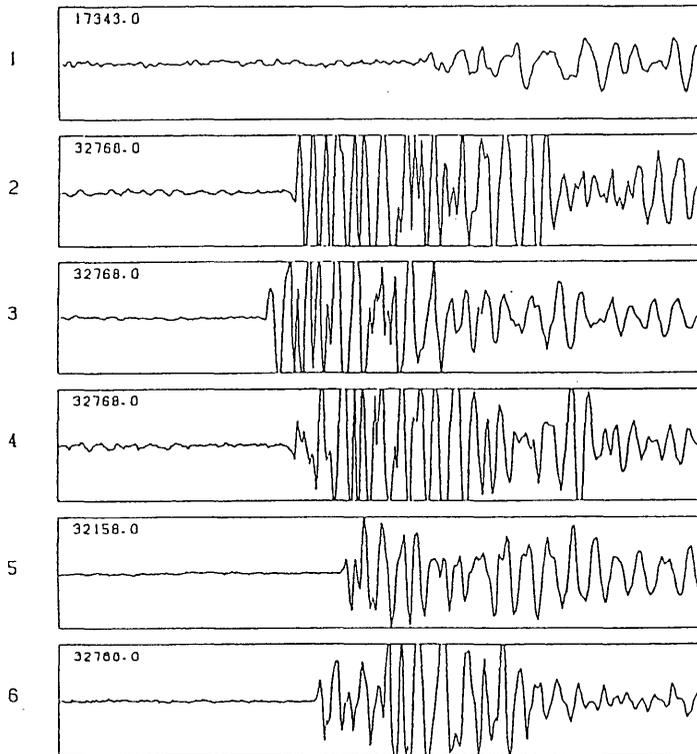


図 3.24 静水圧破碎実験における計測 AE 波形の一例

② AE 波形解析の結果および考察

実験により得られた、10 イベントの AE 波形についての解析結果 (鉛直 $y-z$ 面) を図 3.25 に示す。図中には、実験後に行った実験破碎孔内のボアホールカメラによる観察によって得られた孔内の岩盤の節理の方向を示している。これら 10 イベントの AE 発生源は、静水圧破碎によって生じ

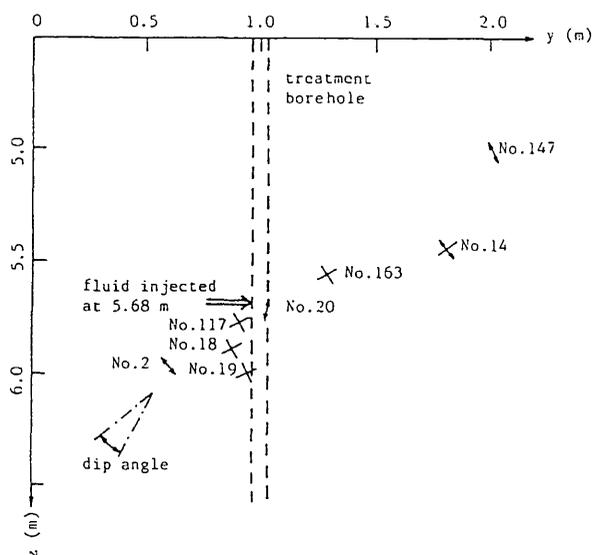


図 3.25 静水圧破碎実験における AE 波形解析結果

た亀裂の方向とほぼ同じ方向に連なった位置にあり、岩盤の最も拘束力の小さな節理に沿って亀裂が進展した様子が伺える。また、引張型イベントの指し示す引張クラック面の開口方向はこの節理の方向にほぼ直交しており、一方、せん断型イベントの転位方向が、この節理の方向にほぼ平行を指していることがわかる。

このように、A E波形解析法 SiGMA が岩盤におけるひびわれの発生機構を同定できる可能性があることが示されている。

(5) 地盤のグラウト工における適用

ダムなどの大規模な構造物を地表に建設するためには、それを支持する地盤には相当の強度が求められることとなる。一般的にはこれを岩盤に支持させることになるが、しかしわが国の国土には第三紀以後の固結度の低い岩盤層が広く分布しており、そのままでは大規模構造物を支持させるための支持強度が不足するため、岩盤に対して何らかの対策を施さねばならない。

地盤安定工法であるグラウト工は、岩盤の間にグラウトを充填して岩盤層を一体化させることによって、所定の支持強度が得られるように行うものである。しかしながら、支持強度の弱い岩盤にグラウト工を施工する際、その岩盤層が軟岩や脆弱岩であると、グラウトの注入圧によって岩盤層をいたずらに破碎してしまうばかりで、グラウトがリークしてしまい、結果的に支持地盤をさらに痛めてしまうことになる。また最悪の場合、岩盤を膨張させてしまうことによって地盤を持ち上げてしまい、上部構造物に対して有害な変形や力を与えてしまうことも考えられる。これらの原因として、現場における岩盤に対しての適切な注入圧と注入量の設定が困難であることがあげられる。

ここでは、前節の静水圧破碎におけるA E波形解析の結果をふまえ、岩盤にグラウトを注入する際に生じるA E波形を観測し、これにA E波形解析 SiGMA を適用することによって、岩盤内における破壊現象の把握を試みる。

① グラウト注入試験

今回の実験では、第三紀鮮新世小野田層の軟岩に属する亀裂性岩盤（炭質泥岩）と浸透性岩盤（砂岩）とが混在した、ダムの河床部の基礎地盤に対し、カーテングラウト工を施工する際に、グラウトの注入時に発生するA E波形を検出し、これにA E波形解析法 SiGMA を適用することによって、地中において生じている現象を把握することを試みた。

A Eセンサーには低周波タイプのものを使用し、同時に並行して行われている地上での建設作業による雑音の影響を避

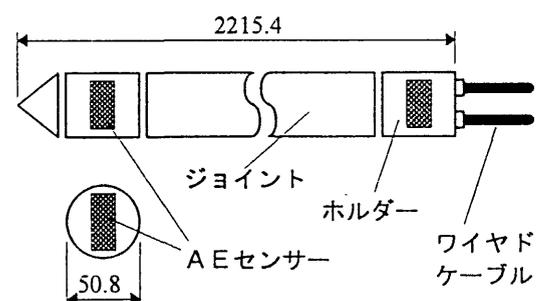


図 3.26 地中埋設A Eセンサーアセンブリ

けるため、地中に埋設する設置方法をとった。また、AE波形の観測孔として既設のカーテングラウト孔を利用するため、センサーを設置した孔を埋め戻すことはできず、AEセンサーを回収することができるように、図 3.26に示すような完全防水型鋼製アセンブリを作製し、これを孔内の地下水中に吊り下げてAE波を捕捉した。このAE検出用アセンブリには、プリアンプ内蔵型のAEセンサー2個が一組となり、地上からの操作によって、本体の上げ、下げおよび回転が可能で、AEセンサーの位置および感度指向方向を任意に調節できる仕様となっている。

図 3.27に示すように、実験注入孔であるパイロット孔を中心とした3本のカーテングラウト孔から、それぞれこのAE検出用アセンブリをグラウト注入深さを考慮した所定の深さまで吊り降ろし、いずれのAEセンサーも、その感度指向方向を注入孔に対して向けて設置した。なお、この時ダム軸はパイロット孔よりAE観測孔 A₃ を結ぶ方向にある。

試験にあたっては、通常実施されているダムグラウチングの方法に準じ、ステージグラウチングによって行われた。すなわち、

- 地上より、所要深度までボアホールを掘進
- 注入圧を階段状に昇降させる透水試験により、ルジオン値を決定
- 所定注入圧でのグラウトの注入

の手順を、一つの孔につき各所定深度にて繰り返して行い、その第4ステージ（-15m～-20m）および第5ステージ（-20m～-25m）における透水試験中の昇圧時に発生したAEを収録した。

② AE波形解析の結果および考察

検出されたAEイベントは、第4ステージにて約400イベント、第5ステージにおいて約1200イベントであった。しかしながら地上作業による雑音、地下水流による土砂の洗い出し、孔壁の崩落などAEの波形観察を行うには著しく劣悪な環境であった。したがって、これらの記録されたAEイベントのうちで、少なくとも5つのAEセンサーにおいて波形が記録でき、AE源位置標定が可能であったイベントは、それぞれ42イベント、26イベントに過ぎず、さらにこれらの中から、6つ全てのAEセンサーにおいて波形が記録でき、AE源となったクラックの方向と種別が決定できたイベントは、僅か31イベントおよび19イベントのみであった。

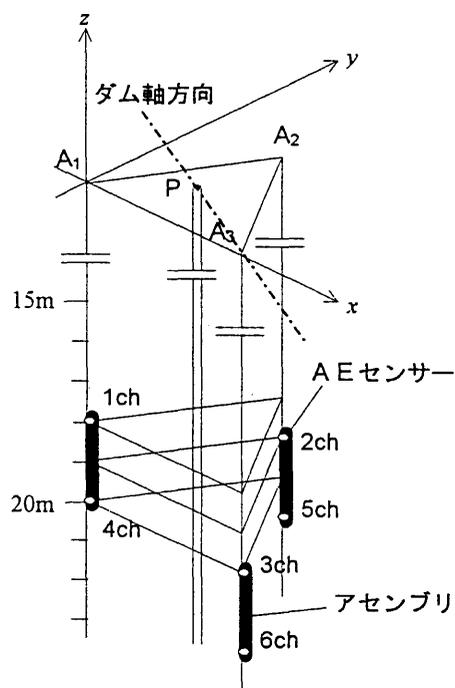


図 3.27 グラウト注入試験におけるAEセンサーの位置

これらの逆解析の結果として、図 3.28、図 3.29および図 3.30にAEの発生源の位置およびそのひびわれ面の方向を示した。図中において引張型イベントは \blacktriangleleft で示し、その長辺方向がひびわれ面の方向を示している。一方、せん断型イベントは \times にて示し、それらの線分方向はひびわれ面あるいはその法線方向を示している。また、AE源の位置のみ得られたイベントもまた参考のために、 \cdot で示している。

図 3.28に示す水平面の解析結果においては、AE源の位置がパイロット孔を中心に広がりを見せており、注入水の浸入の進展を示している。しかも引張型ひびわれ面の開口方向は、パイロット孔を中心とした円周方向を指しており、ひびわれが放射状に進展したことが推察できる。

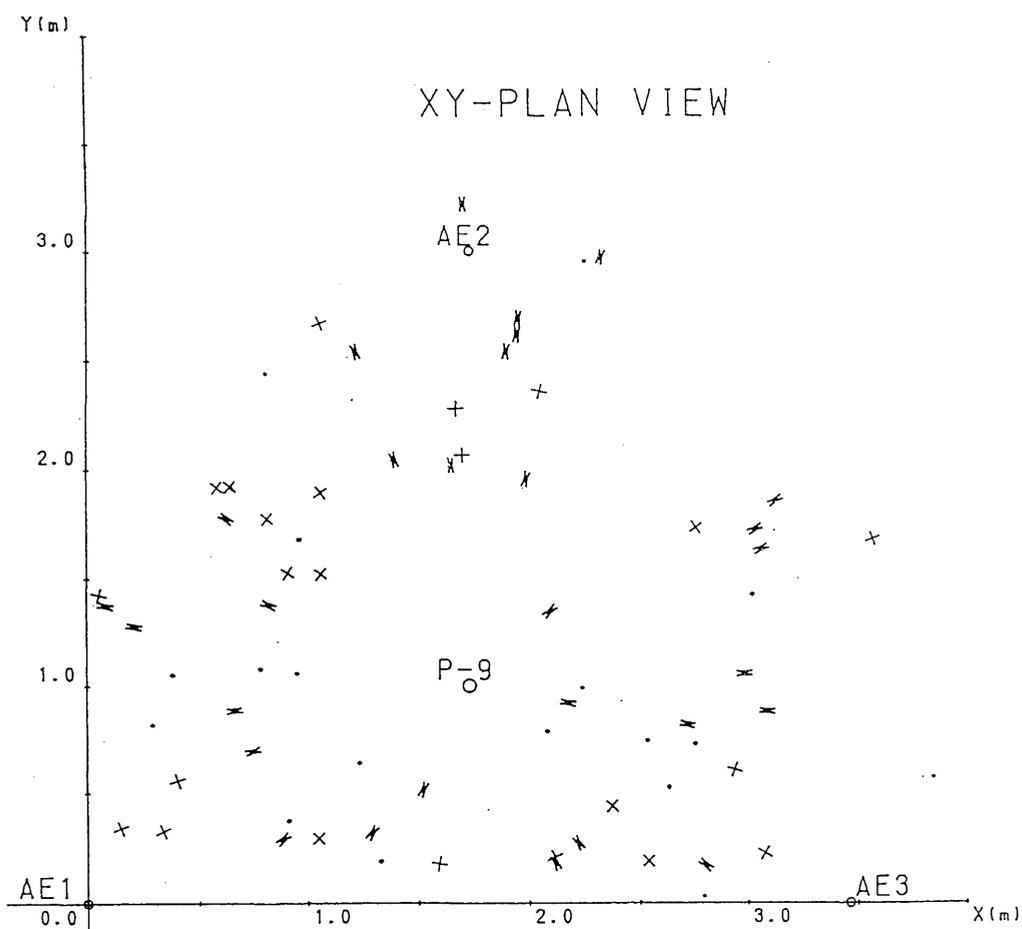


図 3.28 グラウト注入試験におけるAE波形解析結果；x-y平面図

図 3.29および図 3.30に示された鉛直面における解析結果では、深度-18m~-22m の範囲に AE 源が集合している様子が観察できる。しかもそれぞれの図から AE の発生源となったひびわれの面の傾きが、AE 観測孔 A₃および A₂から A₁ へ向かう方向に 45° の傾きを持っていることが分かる。これらの結果を地質構造と対比させてみると、事前のボーリングコアのサンプル採集の結果、ダム軸方向の層理が、AE 観測孔 A₃からパイロット孔へ向かう方向へ 40° ~60° の傾斜をもっていることがわかっており、AE 波形解析による結果は、岩盤層への注水による岩盤の破碎は、この層理に沿って生じたものであると考えることができる。

このように、AE 波形解析 SIGMA によって、岩盤のグラウト注入試験時の注入圧による岩盤の破碎、注入水の浸水状況が推定できることが判明した。

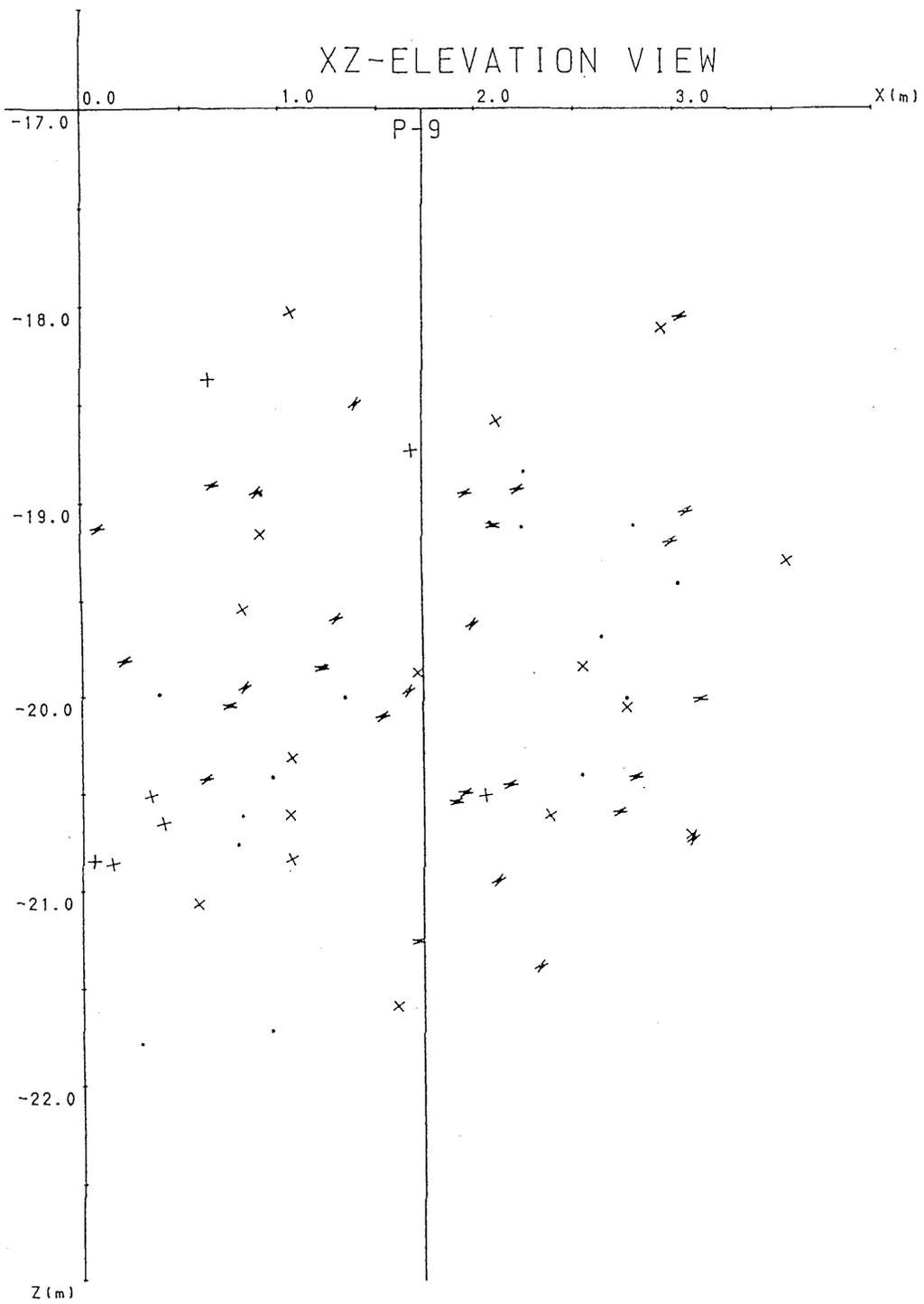


図 3.29 グラウト注入試験におけるAE波形解析結果；立面図 (x-z 面)

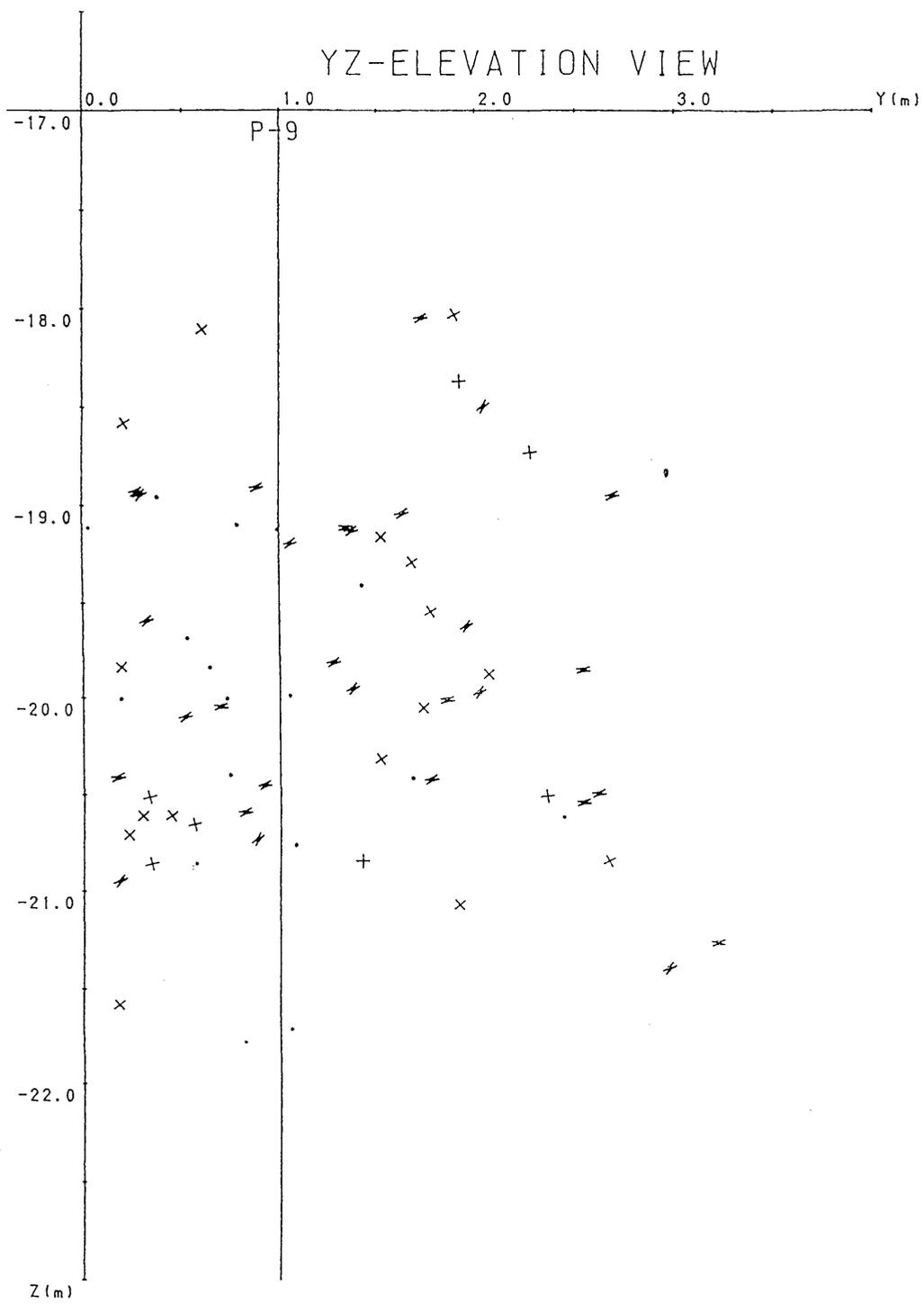


図 3.30 グラウト注入試験におけるAE波形解析結果；立面図 (y-z 面)

3.4 本章の結論

本章においては、一般化されたA E波動理論より導かれるモーメントテンソル解析法に基づいたA E波形解析法 SiGMA の概略を述べた。そして、これらの手続きを一般的なパーソナルコンピュータ上にて実行させるための一連のプログラムコードを開発し、SiGMA (Simplified Moment Tensor Analysis) と名付けた。また、これを実際に工学的に適用するために必要なA E波形の検出および記録といった、A E計測法についても併せて解説した。

このような、A E波形解析法 SiGMA を実際のコンクリート構造および岩盤におけるひびわれ現象に対して適用した。それらは、

- i) コンクリートブロックに埋め込まれたアンカーボルトを引き抜きによる、ブロックのコーン状破壊
- ii) コアスリットを加工したコンクリート円筒供試体による圧縮－引張破壊
- iii) 鉄筋コンクリートラーメン構造の隅角部における開口型曲げ破壊
- iv) 岩盤の静水圧破碎
- v) ダムグラウト工におけるグラウト注入時の岩盤中における静水圧破碎

である。それぞれにおいて、実際に検出されたA E波形に対してA E波形解析法 SiGMA を適用し、A E発生源であるマイクロクラックの幾何学的諸量（位置・方向・種別）を求めた。

コンクリート構造物である i), ii) および iii) においては、その主破壊（最終破断面）の位置とA E発生源の密集した位置とは一致しており、このことより、A E発生源であるマイクロクラックの集合および連結によって目に見えるひびわれが形成されることが確認された。また、i) においては、引張型A E発生源のマイクロクラックの開口方向は、目にみえるひびわれ面に対して直交しており、せん断型A E発生源のマイクロクラックの転位方向は、目にみえるひびわれ面に対してほぼ同一方向を指していることが観察され、最終破断面の位置とその方向に対してほぼ解析結果は一致した。特に、i) においては、ひびわれの発生機構として、引張型マイクロクラックがひびわれの進展を先導し、せん断型マイクロクラックがひびわれを助長させる様子が伺える結果を得た。しかし、ii) の圧縮－引張試験においては、そうした傾向はみられず、構造物が破壊する際の载荷条件や拘束条件によってひびわれの発生機構は異なり、必ずしもA E発生源であるマイクロクラックの面の方向と実際の最終破断面の方向は一致しないことが示された。

コンクリート構造におけるA E波形解析法 SiGMA の適用の応用として、iii) においては内部に鉄筋を配したコンクリートにおいて発生・伝播するA E波を対象にA E波形解析を行ったが、その複雑な伝播特性によって解析可能なA E波形を検出することが著しく困難となったにも関わらず、その結果は実際のひびわれ状況と非常に良い一致を見た。

岩盤におけるA E波形解析法の適用としては、iv) の岩盤の静水圧破碎時に発生したA E波形を対象に解析を行った。基礎的な静水圧破碎試験においては、ボアホールカメラによる静水圧破

砕による亀裂および節理の方向と A E 波形解析結果とはやはり良い一致が見られ、A E 波形解析法 SiGMA の岩盤における適用の可能性が示された。その応用として、v) の実際のダム建設現場での地盤安定処理工法であるグラウト工における岩盤の静水圧破碎に対する検討が試みられた。

以上、本章においては A E 波形解析手法 SiGMA による実際のコンクリート構造物および岩盤におけるひびわれ発生機構の同定を行い、その結果より本手法の工学的な問題への適用性が示された。

4 アコースティック・エミッション(AE) 波形解析法の実験的検証に関する考察

第2章においては、本研究で取り扱うAE波形逆解析手法の理論を述べ、第3章ではこれに基づいたAE逆解析手法、SiGMA(Simplified Green's Function for Moment Tensor Analysis)を、実際のコンクリート構造物および供試体の破壊現象に3次元問題として適用し、考察を行った。しかしながら、実際の破壊現象とSiGMAによるAE波形解析結果との比較検討を行う上で、現時点では弾性体内部の破壊状況を目視によって直接観察することが不可能であるために、最終破壊後の破断面からだけの考察にとどめている。したがって、実際に破壊進行状況(クラックの形成過程)が直接観察できるような状況を確保した上でAE波の検出および記録を行い、この時のSiGMAによる解析結果との比較検討を行う事が必要不可欠であり、今後の本研究の展望においても、非常に重要な問題であると考えられる。

4.1 2次元AE波形解析法(SiGMA-2D)

材料が外力によってひびわれを生じながら破壊にいたる様子が、その内部まで直接目視によって観察できる状況として、可能な限り薄い板状のものが、その面内方向に加えられる外力によって破壊あるいは破断するような場合を考える。ここでは、AE波形解析法SiGMAを板状の材料において生じるAEに適用すること、すなわち2次元問題における取り扱いについて概説する。

(1) 2次元におけるAE源位置標定

2次元問題における場合におけるAE源の位置標定に関しては、第2章で述べた3次元問題における場合と原理的な相違は全く無い。ただ単に、3次元における三方向成分のうちのある一つの方向成分に関する項を削除するだけで、2次元問題におけるAE源位置標定に関する諸式が得られる。

AE発生源の座標を、AE発生源の座標を $S(x, y)$ 、センサー T_i の座標を $T_i(a_i, b_i)$ とすれば、基準AEセンサー T_0 と他のセンサー T_i へのP波初動部の相対到達時間差 t_i と距離 r_i に関する次式が得られる。

$$\begin{aligned}
r_i &= \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2} \\
r_0 &= \sqrt{x^2 + y^2} \\
r_i - r_0 &= v_p t_i \quad (i = 1, 2, \dots, N)
\end{aligned}
\tag{4.1}$$

式(4.1)の第3式は、二葉双曲線の片側（一葉）の方程式で、破壊源の解は N 個の双曲面の交点として得られる非線形連立方程式である。解法の平易化のために、式(4.1)を平方し、 i 番目と j 番目の方程式で差をとることによって、以下のような線形連立方程式を得る。

$$A_{ij} x + B_{ij} y + D_{ij} v_p^2 = E_{ij}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
A_{ij} &= 2(a_i t_j - a_j t_i) \\
B_{ij} &= 2(b_i t_j - b_j t_i) \\
D_{ij} &= t_i t_j (t_i - t_j) \\
E_{ij} &= t_j (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) - t_i (a_j^2 + b_j^2 + c_j^2) \quad (i, j = 1, \dots, N)
\end{aligned}
\tag{4.2}$$

t_i がいずれも 0 でないならば、式(4.2)において一次独立な式は $N-1$ 個存在する。AE センサーの数は、センサー T_0 を加えて $N+1$ 個であったので、線形連立方程式によって 2次元の破壊源探査（未知数 x, y の決定）を行うには $N-1=2$ であるべきであり、したがって $N+1=4$ チャンネルの計測システムが必要である。

AE 源の位置決定とは、基本的に式(4.2)の連立方程式を解くことに他ならない。式(4.2) 行列表示すると、

$$\begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{ij} - D_{ij} v_p^2 \end{Bmatrix}
\tag{4.3}$$

となる。

2次元の破壊源探査においては、4チャンネル以上の計測システムを使用すれば、式(4.3)において最小二乗法を適用することができる。式(4.3)の解 (x^a, y^a) を第一次近似解として、真の解が $(x^a + \Delta x, y^a + \Delta y)$ にあると考える。このとき距離 r_i は Taylor 展開により、次のように表現できる。

$$r_i = r_i^a + l_i^a \Delta x + m_i^a \Delta y \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

ここに、

$$r_i^a = \sqrt{(x^a - a_i)^2 + (y^a - b_i)^2}$$

$$l_i^a = \frac{x^a - a_i}{r_i^a}, \quad m_i^a = \frac{y^a - b_i}{r_i^a}$$

(4.4)

式(4.4)を式(4.1)に代入すると、

$$\begin{bmatrix} l_i^a - l_0^a & m_i^a - m_0^a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} = \{v_p t_i - r_i^a + r_0^a\}$$

(4.5)

なる式を得る。4チャンネル以上のシステムを用いる場合、式(4.5)にも最小二乗法を適用することによって $(\Delta x, \Delta y)$ を決定することができる。そこで、 $(x^a + \Delta x, y^a + \Delta y)$ を新たな近似解と置いて、式(4.4)と式(4.5)の過程を繰り返し、収束解が得られるまで反復計算を行えばよい。

(2) 2次元におけるモーメントテンソル解析

AE波形解析によりAEの発生機構を解明するためには、AEの発生源に直接関連して発生するP波やS波のような実体波を対象にする必要がある。しかしながら物体表面の存在によってAE波動の中には実体波以外の波動が存在する。その代表的なものはReyleigh波とLamb波である。Reyleigh波は、表面波の一種で、検出点と発生源とが同一表面上にあるような場合に観測される弾性波で、その速度はS波よりも遅く、波の振動方向は伝播方向に垂直で、その振幅は物体表面

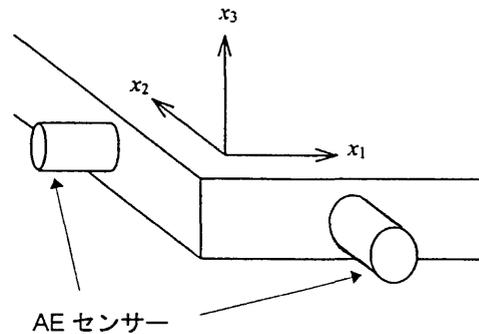


図 4.1 板材でのAEセンサーの取り付け

から遠ざかると指数的に減衰する。一方、Lamb波は、板波と呼ばれるもので、伝播波動成分の波長に対して物体の厚さが薄く、板材のように上下両面の表面が存在する場合に伝播する弾性波動である。この波には、多くの分岐モードがあり、その成分は分散性でしかも伝播速度は周波数に依存する複雑な波動である。

したがって、板材のような物体において可能な限り実体波のみを検出しようとするならば、図4.1のようにAE波センサーを板の厚さ面に取り付けて、センサーによるAE波の検出方向を板材と同一面内になるようにすることが必要である。

式(2.19)より、モーメントテンソル m_{pq} の各成分を表示すると、

$$m_{pq} = b \begin{bmatrix} \lambda l_k n_k + 2\mu l_1 m_1 & \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & \mu(l_1 n_3 + l_3 n_1) \\ \mu(l_2 m_1 + l_1 n_2) & \lambda l_k n_k + 2\mu l_2 n_2 & \mu(l_2 n_3 + l_3 n_2) \\ \mu(l_3 m_1 + l_1 n_3) & \mu(l_3 n_2 + l_2 n_3) & \lambda l_k n_k + 2\mu l_3 n_3 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

となる。

ここにおいて重要なことは、検出されるAE波動は、3次元の弾性波動に変わらないということである。このような2次元問題においてはモーメントテンソルは $x_1 - x_2$ 平面に存在しており、 x_3 方向の成分は0ベクトルとなり、式(4.6)は次のようになる。

$$m_{pq} = b \begin{bmatrix} \lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) + 2\mu l_1 m_1 & \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & 0 \\ \mu(l_2 m_1 + l_1 n_2) & \lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) + 2\mu l_2 n_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

しかしながら、図4.1のようなセンサー配置では、検出されるAE波の板材の表面に対し面外方向 x_3 成分は検出されない。したがって式(4.7)における m_{33} は直接導くことはできない。ここで、次のような近似計算を考える。式(4.7)の対角項 m_{ii} の計算から、

$$m_{11} + m_{22} = 2b\lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) + 2b\mu(l_1 m_1 + l_2 n_2) = 2b(\lambda + \mu)(l_1 m_1 + l_2 n_2) \quad (4.8)$$

となり、したがって m_{33} は、

$$m_{33} = b\lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}(m_{11} + m_{22}) = \nu(m_{11} + m_{22}) \quad (4.9)$$

と求めることができる。したがって、式(4.7)は次のように書き換えられる。

$$m_{pq} = b \begin{bmatrix} \lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) + 2\mu l_1 m_1 & \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & 0 \\ \mu(l_2 m_1 + l_1 n_2) & \lambda(l_1 m_1 + l_2 n_2) + 2\mu l_2 n_2 & 0 \\ 0 & 0 & \nu(m_{11} + m_{22}) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

これにより、3次元問題の場合と同様に、モーメントテンソルの主値と主方向を取り出すために固有値解析を行えば、固有値および固有ベクトルは、

$$\begin{aligned}
 \text{第1 (最大) 固有値} \quad e_1 &= \mu b \left(\frac{l_1 m_1 + l_2 m_2}{1 - 2\nu} + 1 \right) \\
 \text{第2 (最小) 固有値} \quad e_2 &= \mu b \left(\frac{l_1 m_1 + l_2 m_2}{1 - 2\nu} - 1 \right) \\
 \text{第3 (中間) 固有値} \quad e_3 &= \lambda b (l_1 m_1 + l_2 m_2) = b m_{33}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

$$\begin{aligned}
 \text{第1 固有ベクトル} \quad e_1 &= l + n \\
 \text{第2 固有ベクトル} \quad e_2 &= l - n \\
 \text{第3 固有ベクトル} \quad e_3 &= l \times n = (0, 0, 1)
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

となる。

これらより、3次元における場合と同様に固有値分解を行えば、 $x_1 - x_2$ 平面におけるA E波の発生源となったマイクロクラックの幾何学的諸量すなわち、それが引張型であるかせん断型であるかの種別、クラック面の方向ならびにその位置を解析することができる。

このように、A E波形解析法 SIGMA を2次元問題における場合に適用したA E波形解析法を、SIGMA-2D と名付けた。

(3) 数値実験による検証

2次元問題におけるA E波形逆解析手法 SIGMA-2D に対する検証として、3次元理論A E波形をシミュレーションすることにより、数値実験による検証を行った。

① 数値実験の概要

適当なクラックモデルを仮定してやれば、第2章に述べたA E波動の基礎式(2.12)から理論波形を計算的に求めることができる。ここでは図4.2に示すように、クラック面の法線方向 n が、 x_1 軸から反時計回りに角度 θ を成すようなクラックを考え、また、一方のクラック面は、法線方向よりさらに反時計回りに ϕ の角度の方向 l に転位するものとする。

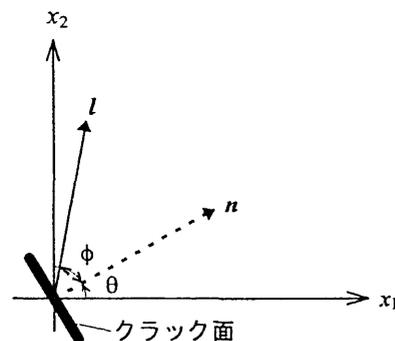


図 4.2 数値実験におけるクラックモデル

このとき、 θ が 30° 、 60° および 90° のそ

れぞれの場合において、 ϕ が純せん断型である -90° から純引張型である 0° を経て、再び純せん断型となる 90° まで 15° 刻みで変化させた場合のシミュレーションを行った。

また、図 4.3 に示すような $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ の方形板において図中の \circ で示す点をこのときの AE の発生源の位置とした。

このように、 $3 \times 13 \times 25$ の組み合わせにおいて AE イベントをシミュレートし、これらの AE イベントに対して、SIGMA-2D を適用して解析を行った $\theta = 45^\circ$ の場合の結果を表 4.1 に示す。表中の上段にはそれぞれの ϕ におけるモーメントテンソルの正規化された理論解とその固有値を示している。また、下段 ()

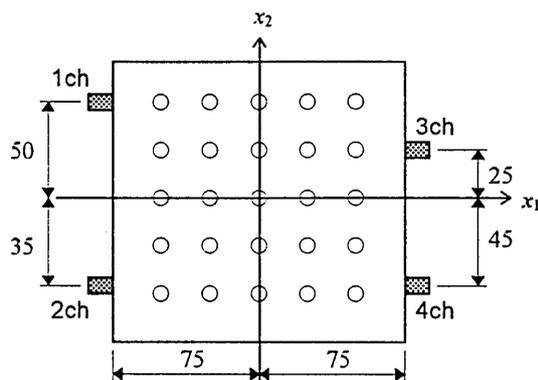


図 4.3 仮想 AE 源の位置

内には理論波形に対して 2 次元 AE 波形解析法 SIGMA-2D を適用して求められた結果を示している。特に、[] 内には、式 (4.9) によって近似された成分 m_{33} を示している。いずれの場合でも最大でも 5% 程度の誤差以内で、精度よく求められている。また、

表 4.1 モーメントテンソルおよびその固有値の理論解と解析解の比較 ($\theta = 45^\circ$)

ϕ (deg)	Moment Tensor Components				Eigen Values		
	m_{11}	$m_{12} (m_{21})$	m_{22}	m_{33}	e_1	e_2	e_3
-90	1.000 (0.978)	0.000 (0.009)	-1.000 (-1.000)	0.000 [0.004]	1.000 (1.000)	-1.000 (-0.978)	0.000 (0.004)
-75	1.000 (1.000)	0.185 (0.174)	-0.383 (-0.415)	0.123 [0.117]	1.000 (1.000)	-0.397 (-0.427)	0.120 (0.115)
-60	1.000 (1.000)	0.294 (0.283)	-0.019 (-0.054)	0.196 [0.189]	1.000 (1.000)	-0.091 (-0.117)	0.182 (0.177)
-45	1.000 (1.000)	0.375 (0.364)	0.250 (0.215)	0.250 [0.243]	1.000 (1.000)	0.082 (0.063)	0.216 (0.231)
-30	1.000 (1.000)	0.446 (0.435)	0.485 (0.451)	0.297 [0.290]	1.000 (1.000)	0.181 (0.171)	0.236 (0.234)
-15	1.000 (1.000)	0.517 (0.507)	0.723 (0.691)	0.345 [0.338]	1.000 (1.000)	0.233 (0.229)	0.247 (0.246)
0	1.000 (1.000)	0.600 (0.591)	1.000 (0.971)	0.400 [0.394]	1.000 (1.000)	0.250 (0.250)	0.250 (0.250)
15	0.723 (0.735)	0.517 (0.507)	1.000 (1.000)	0.345 [0.347]	1.000 (1.000)	0.233 (0.235)	0.247 (0.247)
30	0.485 (0.486)	0.446 (0.446)	1.000 (1.000)	0.297 [0.297]	1.000 (1.000)	0.181 (0.078)	0.236 (0.236)
45	0.250 (0.244)	0.375 (0.374)	1.000 (1.000)	0.250 [0.249]	1.000 (1.000)	0.082 (0.078)	0.216 (0.216)
60	-0.019 (-0.029)	0.294 (0.292)	1.000 (1.000)	0.296 [0.194]	1.000 (1.000)	-0.091 (-0.098)	0.182 (0.180)
75	-0.383 (-0.387)	0.185 (0.185)	1.000 (1.000)	0.123 [0.123]	1.000 (1.000)	-0.397 (-0.402)	0.120 (0.120)
90	-1.000 (-0.978)	0.000 (0.009)	1.000 (1.000)	0.000 [0.004]	1.000 (1.000)	-1.000 (-0.978)	0.000 (0.004)

また、モーメントテンソルの理論解より求められるせん断成分の比率 (Shear Ratio) のクラック面の法線方向と転位方向との間の角 ϕ による変化を図 4.4 に示す。この図から、転位方向 ϕ

とせん断成分との関係は直線的とはならず，すなわちせん断成分が 50%の場合でも，クラック面の転位方向は単純にクラック面の法線方向に対して 45° とはならない。実際にはこの時にはクラック面の転位方向はすでにクラック面の法線方向に対しておよそ 75° にも達しており，せん断成分のクラックの転位方向へ与える影響は線形的ではないことが分かる。この理論解におけるせん断成分に対して，理論波形の解析解によって求められたせん断成分の解析誤差は図 4.5 のようになり，この場合でも 3% 以内の誤差で解析できていることが分かる。

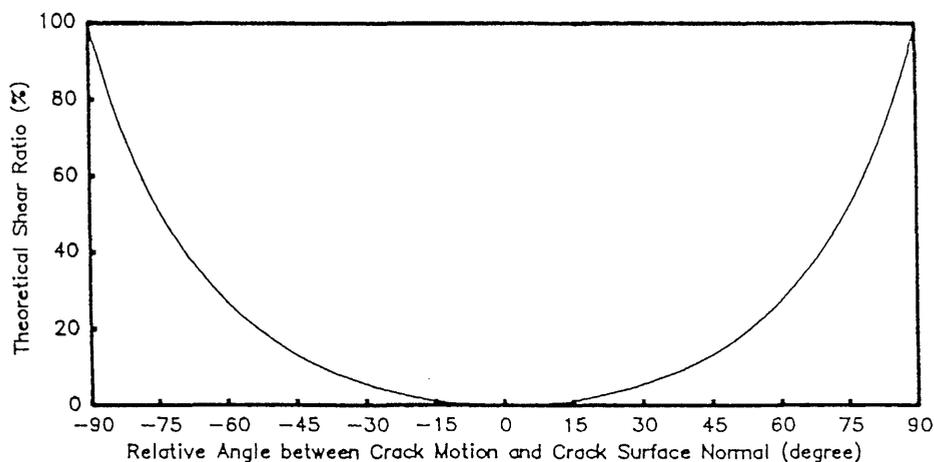


図 4.4 モーメントテンソル理論解によるせん断成分と転位方向との関係

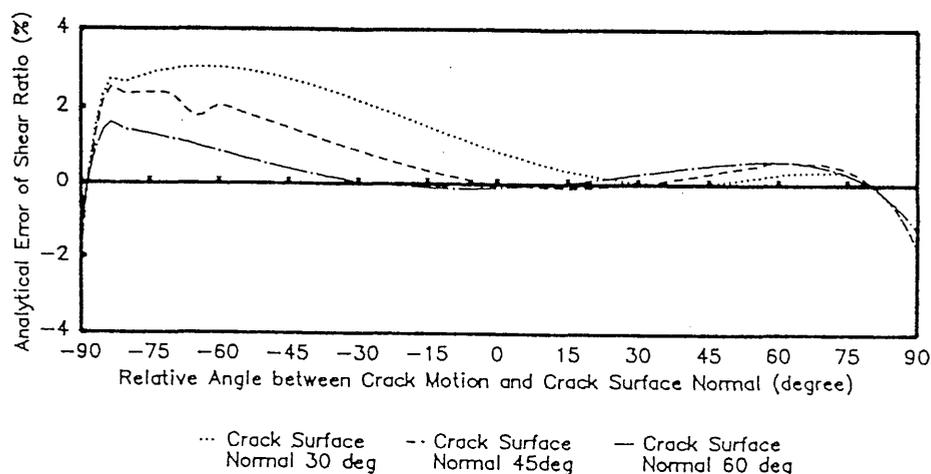


図 4.5 理論波形による解析解におけるせん断成分の解析誤差 ($\theta=45^\circ$)

クラック面の法線方向が $\theta=60^\circ$ の場合の純引張 ($\phi=0^\circ$) および純せん断 ($\phi=90^\circ$) の場合のクラックをシミュレートしたときの SIGMA-2D による解析結果を，その AE 源位置標定結果とあわせて図示したものが図 4.6 である。シミュレートしたクラックの法線方向ならびにクラック面の転位方向もほぼ正しく求められていることが認められる。

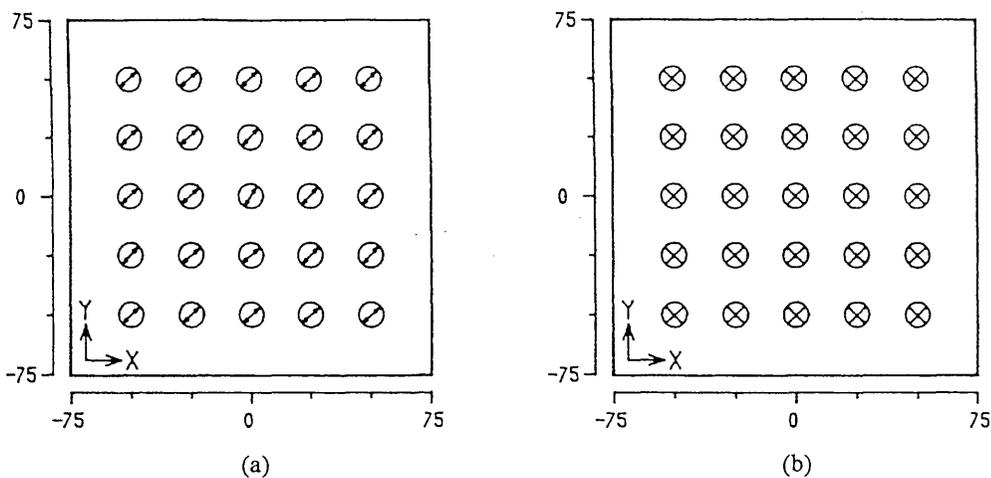


図 4.6 (a)引張型および(b)せん断型クラックの理論波形の解析結果 ($\theta=60^\circ$)

以上のように、2次元AE波形解析法 SIGMA-2D は、AE波動理論に基づく理論AE波形を用いたシミュレーション実験における観測波形より、その発生源であるクラックモデルの幾何学的諸量を逆解析できることが確かめられた。

4.2 板供試体を用いた実験に関する考察

前節においては、2次元AE波形解析法 SIGMA-2D が理論的に適用が可能であることを示したが、これを実際のひびわれ現象に適用して、実験的に検証する。そのためには、解析の対象となるひびわれ現象の発生から進展及び最終的な主破壊にいたるまでの過程における機構（メカニズム）が現時点において可能な限り明らかにされていること、また、供試体の内部を含めた全領域においてそのひびわれ現象の全過程を観察できることが必要である。

そこで、あらかじめ内部にひびわれを持つ板が、面内一軸圧縮荷重による混合モードの破壊現象を解析の対象に選び、板供試体には透明樹脂を用いることで、それらの条件を満足させ、その現象に対して、2次元問題としての取り扱いを考慮したAE波形解析法 SIGMA-2D を適用した。そして、その結果得られたAE源の幾何学的諸量すなわち、マイクロクラックひびわれの位置、種別および方向と、実際のひびわれおよびその発生機構とを比較検討した。

また、コンクリート板およびモルタル板を用いた供試体を用いた同様な実験を行い、岩質系の複合材料においての2次元AE波形解析法 SIGMA-2D の適用性を考察した。

(1) 面内一軸圧縮試験による板供試体の混合モード破壊

供試体は図 4.7に示すように、その厚さが辺長に対して十分に薄い方形板を使用し、これに対して面内一軸圧縮荷重を行うことにより、厚さ方向に関する変位、力等は、解析の上で考慮しないこととする。

このときその内部に、あらかじめ荷重軸方向に対して傾きを持つ細いスリットを設けておき、これに面内一軸圧縮荷重を載荷していくと、供試体は混合モード破壊にいたることが知られている。つまり、最初にそのスリットの先端部において、couple force によるせん断モードのひびわれが生じる。さらに荷重を続けると、ひびわれ発生モードはせん断モードから、次第に引張モードに推移しながら、新たな端部からひびわれが次々と進展していくことになる。

このようなひびわれの発生機構、すなわち、ひびわれが発生する位置、モード（種別）およびその方向が既知である破壊現象に対して2次元A E波形解析法 SiGMA- 2D を適用し、その結果を実際に観察したひびわれ現象との比較検討した。

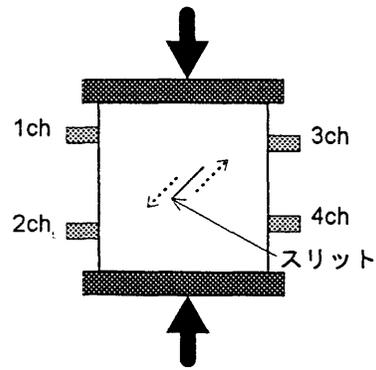


図 4.7 板供試体の面内一軸圧縮荷重

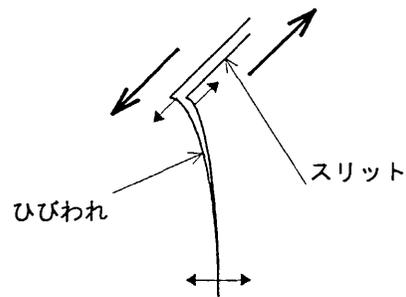


図 4.8 スリット先端部に生じるひびわれ

(2) 透明樹脂(PMMA)板による実験的検証

ひびわれの進展過程が、目視によって直接的に観測できるよう、透明の樹脂板による供試体を用いて実験を行った。

供試体に使用した材料は、PMMA（ポリメチル・メタアクリレート）と呼ばれるほぼ無色の透明樹脂であり、圧縮強度が 233.0 kgf/cm^2 、ポアソン比は 0.35 、および、P波の伝播速度が 2452 m/sec （すべて実測値）の脆性材料である。供試体は、辺長が 100 mm 、厚さが 6 mm の方形板で、この中央部に荷重荷重方向に対して 45° の傾きをもつ、幅 2 mm 、長さ 20 mm のスリットを工作した。

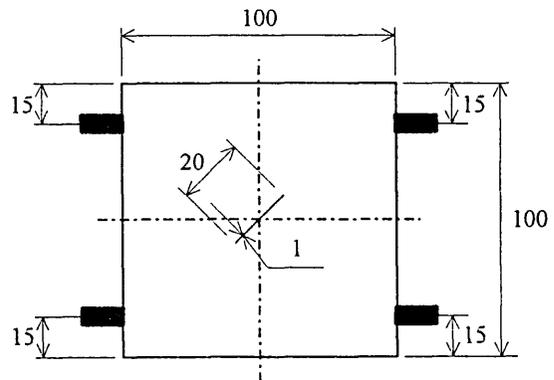


図 4.9 供試体の寸法

AE計測に関しては、2次元AE波形解析法 SIGMA-2D を適用するために最低限必要な4チャンネルのAE計測システムを用いた。また、AEセンサーには、共振周波数が1MHz、100～300kHzの周波数帯域に応答感度に平坦性を持ち、全面が厚さ面に対して密着できるよう、小型(φ5mm)のPZT系センサーを使用した。AEセンサーは、供試体両側面の先端および下端よりそれぞれ15mmの位置に両面粘着紙テープによって取り付けられた。

センサーによる検出信号は、プリアンプによって20dB、メインアンプによって40dB、AEセンサーの出力に対して60dB増幅した。また、ノイズを低減させるために、AEセンサーおよびプリアンプ間にはハイインピーダンスのケーブルを使用し、ケーブル長を0.5mとして、接地を確実に行った。また、AEセンサーの共振周波数に近い帯域の収録を避け、応答感度が平坦な周波数帯域内のAE波形を主に検出するため、検出信号を周波数弁別する事が一般的であるが、しかしなが

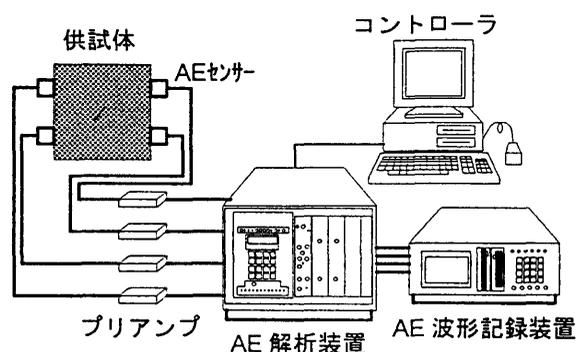


図 4.10 AE 波形計測装置システム

ら今回の実験では、PMMAにおけるAE波の周波数に関する伝播特性が未知であったために、特に周波数弁別を行わなかった。

AE計測装置がAE波形を記録するための装置トリガレベルは、メインアンプ出力が対センサー出力比で55dBのレベルに設定し、波形記録と同時にAEイベントの発生回数の計数もあわせておこなった。信号波形の記録においては、A/D変換におけるサンプリング周波数を2MHz、分解能を9bit(10Vp-p)とし、2048 samples/ch長のAE波形を収録した。

载荷に際しては、供試体の荷重載荷面(上端面)、試験機設置面(下端面)および試験機の載荷台にシリコングリスを塗布し、さらにその間にテフロンシートを挟んで、機械的ノイズの発生を抑えた。荷重載荷速度は150 kg/min程度でゆっくりと载荷し、供試体のスリット先端から生じたひびわれの方向が、载荷軸と一致するまで行った。

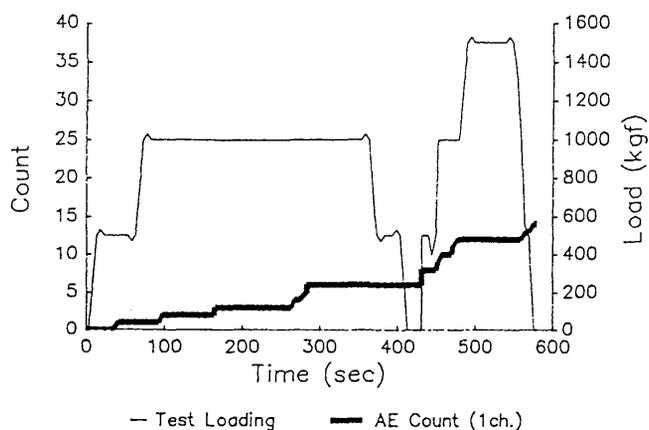
実験は、3 供試体について行った。載荷試験の経過時間と荷重、およびトリガチャンネルにおいて計測したAEの発生挙動の推移を図 4.11(a), (b)および(c)に示す。

PMMAは脆性破壊材料であり、その破壊速度は非常に高速であるため、突発的にひびわれが形成され、急速に破壊にいたった。しかしながら、AEの発生挙動が著しくなると、ロードセルによって示された反力は急減していることから、AEの発生源となったクラック面の生成によって内部に蓄積されていたエネルギーが解放されていることが、この図より推測できる。

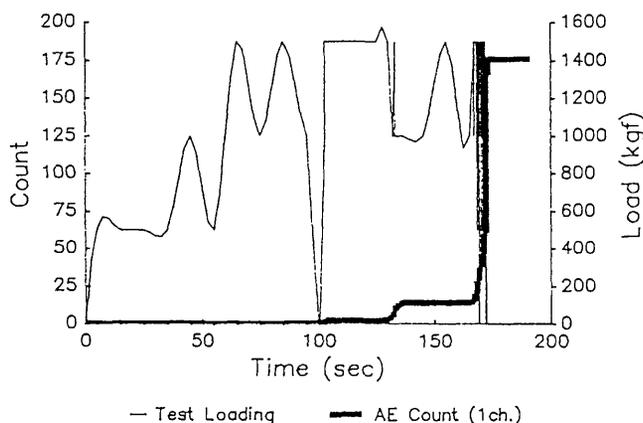
2次元AE波形解析法 SiGMA- 2D を適用して得られた解析結果を図 4.12(a), (b)および(c)に示す。

AE波形解析 SiGMA- 2D による逆解析が適用できたAEイベントは非常に少なく、供試体 No.1 でわずか4イベント、ひびわれの形成が認められても圧縮を継続し、最終的には面外方向への座屈による破壊によって粉碎した供試体 No.2 においても20イベント、供試体 No.3 でも、やはり4イベントしかなかった。

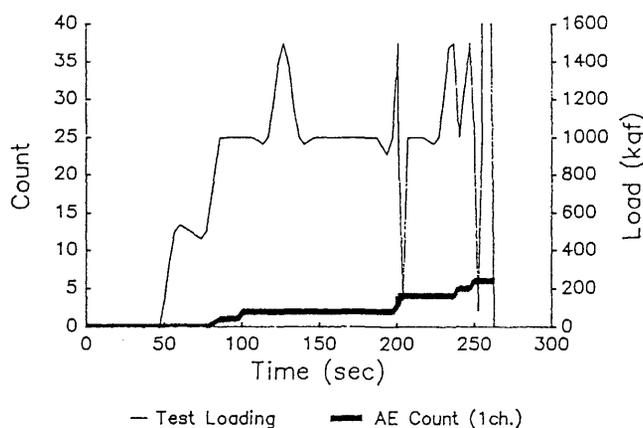
ここでも同様に、図中の \ominus は、SiGMA-2D によってせん断成分が 25%以下の引張型イベントを示しており、その方向はクラック面の開口方向である。また \times は、せん断成分が 75%以上のせん断型AEイベントである。この場合は直交している2方向のうちいずれか一方が転位方向を示し、他方がクラック面の法線方



(a) 供試体 No.1



(b) 供試体 No.2



(c) 供試体 No.3

図 4.11 PMMA 供試体の面内一軸圧縮荷重における荷重とAEの発生挙動 (1ch)

向を示す。さらに、せん断成分が25%~75%と求められたAEイベントは混合型AEイベントとして、その両モードにおける方向を重ね合わせて示している。

解析結果は非常に少ないものとなったが、その結果は非常に興味深い事実を示している。図を見て分かる通り、破壊源探査の結果と実際のひびわれの位置は一致しており、さらにせん断型イベントにおいては、その指し示す方向の一方は実際のひびわれの進展方向と一致している。また、引張型イベントにおいては、その方向はまさに実際のひびわれ面の方向に対して垂直で、その開口方向を示している。

これらの結果から、2次元AE波形解析法 SiGMA-2D によって、実際に生じているひびわれの発生機構をほぼ正しく同定できることが確認された。

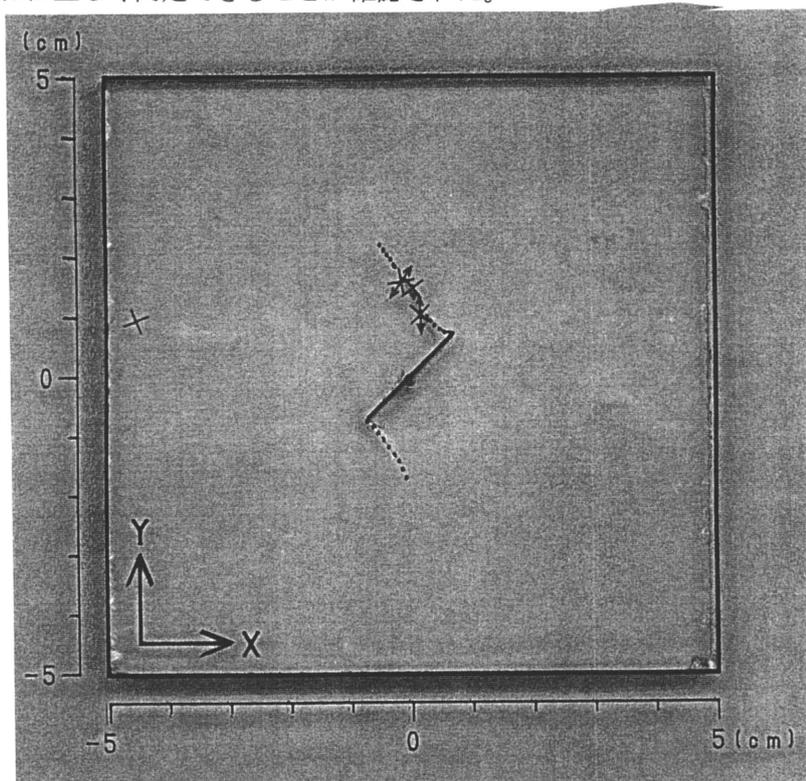


図 4.12(a) PMMA 供試体の混合モード破壊におけるAE波形の解析結果 (供試体 No.1)

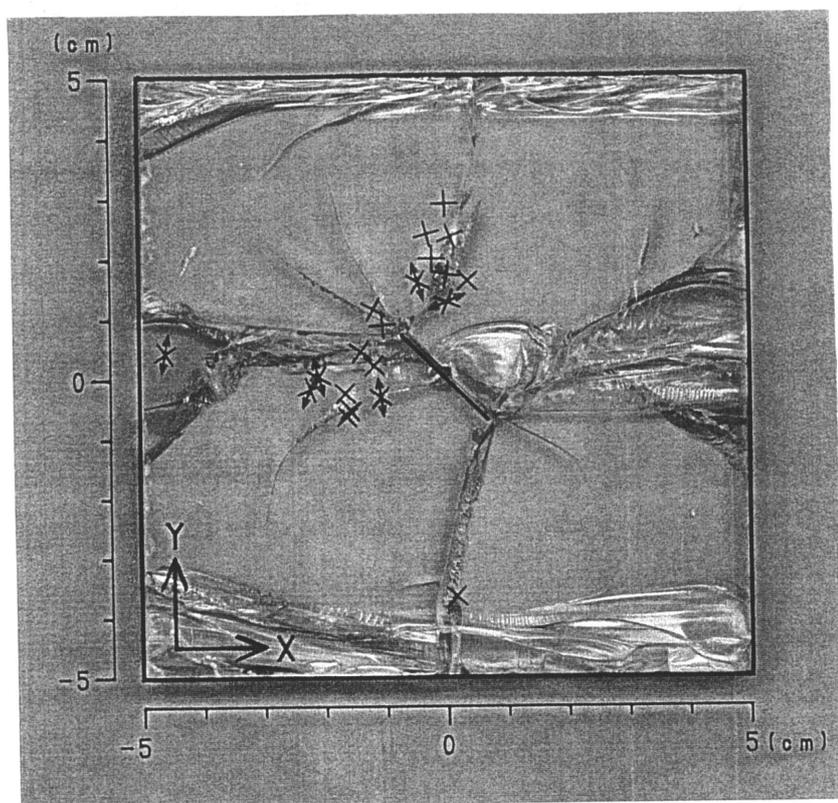


図 4.12(b) PMMA 供試体の混合モード破壊におけるAE波形の解析結果 (供試体 No.2)

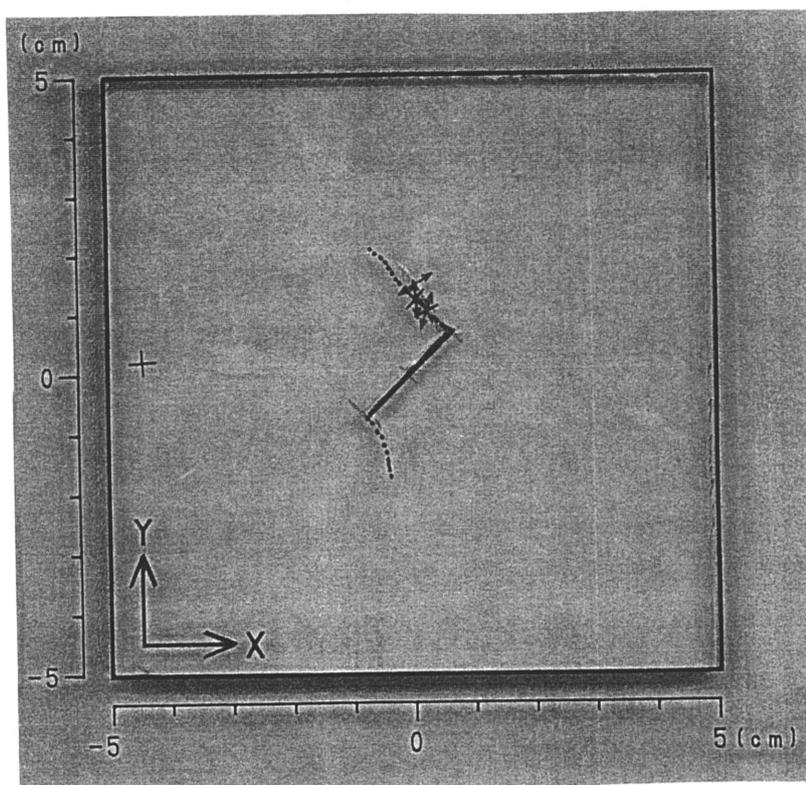


図 4.12(c) PMMA 供試体の混合モード破壊におけるAE波形の解析結果 (供試体 No.3)

(3) コンクリートおよびモルタル板供試体

PMMA 板供試体による結果を踏まえ、つぎに図 4.13に示すように、供試体となる方形板(100mm×100mm)に普通コンクリート(w/c=50%,s/a=45%,air=8%,最大粗骨材寸法 20mm)を用いて面内一軸圧縮載荷試験を行った。同様に、スリット(幅1mm,長さ20mm)は、載荷方向と45度の角度を成すように設けた

瞬時に供試体が破壊することを防ぐため、載荷速度を緩やか(250 N/min)にし、ひびわれがスリットの先端部から発生、進行していく際に発生するAE波を、供試体の両側辺に取り付けた4個のAEセンサー(共振周波数 1MHz)によって検出し、AE波形をデジタルメモリ(分解能 9bit, サンプル周波数 2Mhz, 記録長 2048samples)に記録した。

図 4.14にコンクリート供試体における試験時間と載荷荷重およびAEセンサー(ch.1)によって検出されたAEの発生挙動との関係を示す。荷重を載荷するに従ってAEの発生は指数的に増加し、AE発生源となったマイクロクラックが供試体の内部に加速度的に、形成されていく様子が伺える。また、同様にAE発生挙動が著しくなるに従って、反力も著しく変動しており、微小ひびわれの形成によって内部エネルギーが解放されていることを示している。AEの発生が急増するあたりでは特にその傾向が顕著である。

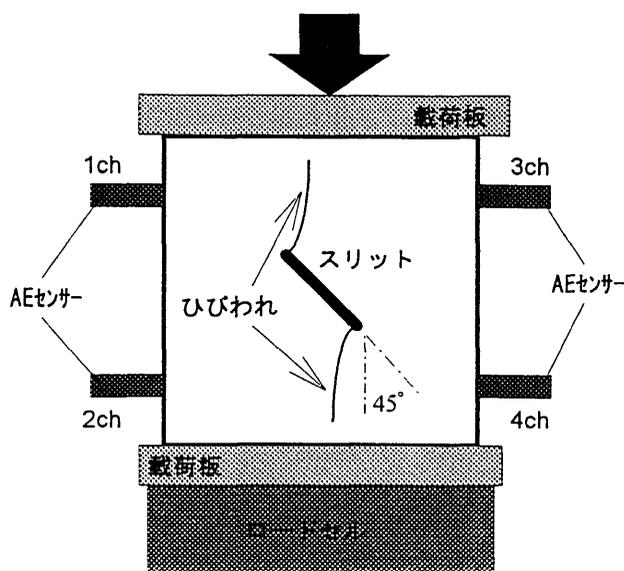


図 4.13 コンクリート板およびモルタル板による供試体の混合モード破壊実験

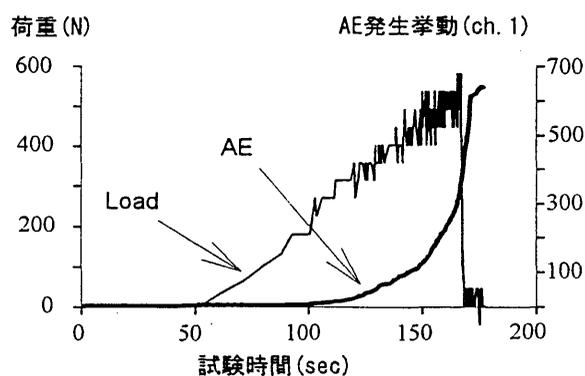
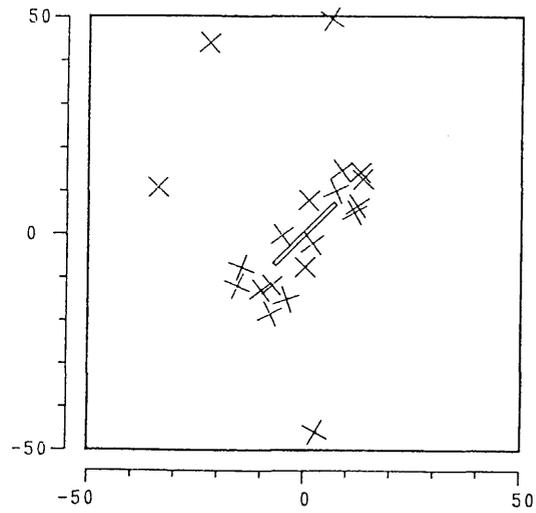


図 4.14 コンクリート板供試体の混合モード破壊試験における荷重とAE発生挙動の推移

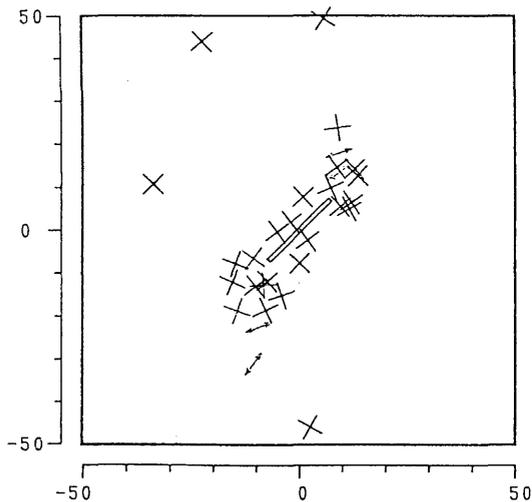
AE発生源となった微小ひびわれの発生モードの分類基準としてせん断成分比 X が ≥ 0.75 であればせん断型イベント、 $\leq 25\%$ ならば引張型イベントであるとした。

解析結果をAE発生挙動の特徴ごとに、载荷初期のAEが緩やかに発生した段階、AEが急増し、エネルギー解放が頻繁に行われている段階、そして主破壊に至った最終段階の3段階に分けて図4.15(A), (b)および(c)に示す。

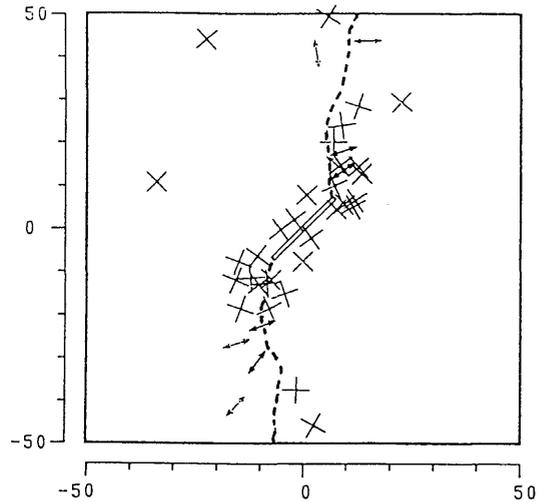
図中でせん断型AEイベントは、そのマイクロクラック面の転位方向および法線方向を指す \times 印でその発生箇所を示し、引張AEイベントのマイクロクラックは、クラック面の開口方向を指す \Rightarrow 印をその発生箇所を示した。



(a)AE 漸増期



(b)AE 急増期



(c)破壊後

図 4.15 コンクリート供試体の混合モード破壊におけるAE波形の解析結果

これらから、微小ひびわれが初期段階ではスリット近辺に集中して発生し、スリット先端部から進展する主破壊面(点線)を形成していく様子が観察できる。また、スリット先端には主破壊面の方向とほぼ一致したせん断モードの微小ひびわれが多数発生し、次第に主破壊ひびわれ面と直交する引張モードの微小ひびわれが発生するようになることも同時に伺える結果となっている。

さらに、これと同様にモルタル板を供試体において行った面内一軸圧縮試験による混合モード破壊の AE 波形解析結果を図 4.16 に示す。

この供試体においてはスリットの両端からひびわれは進展せず、ひびわれは上端からのみ進展した。しかしながら、解析により得られた AE の発生位置は確かに上端より進展したひびわれの近傍に多く分布しているが、スリット下端にも多少分布している。载荷初期の段階ではスリット両端にエネルギーが蓄積されていたものが、AE の発生すなわちマイクロクラックの生成による内部エネルギーの解放と残留内部エネルギーの再分配が繰り返されるにしたがって、スリット上端側に拘束の小さい領域が形成され、結果的に上端側のみひびわれが進展したものと考えられる。

またこの場合においても、それぞれの AE 源となったマイクロクラックの面の開口方向あるいは転位方向は、実際に生じたひびわれの進展方向に非常によく一致していることが伺える。

このように、樹脂材料のような均一な材料ばかりでなく、コンクリートやモルタルのような岩質複合材料においても、2次元 AE 波形解析法 SIGMA-2D は、ひびわれ発生機構の同定法として適用できることが判明した。

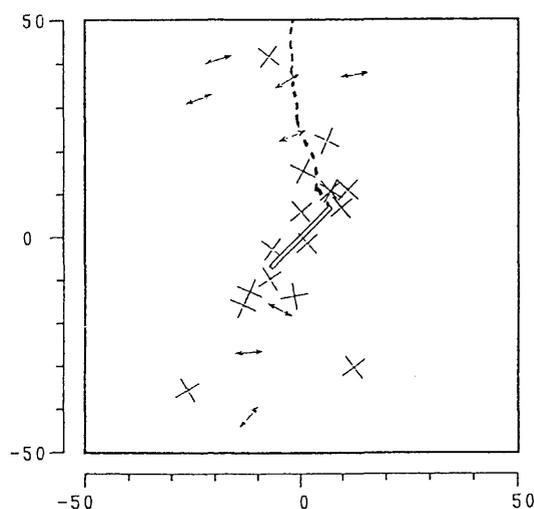


図 4.16 モルタル供試体の混合モード破壊における AE 波形の解析結果

4.3 本章の結論

本章では、3次元での AE 波形解析法 SIGMA の実験的検証として、ひびわれの発生および進展が観察可能な2次元の板供試体を用いた実験的考察を行った。

まず、2次元問題として AE 波形解析を行うための手法を概説した。実際には3次元波動である AE 波動の面外成分を近似することによってモーメントテンソル解を求めるこの手法は、SIGMA-2D と名付けられ、この手法によれば、3次元における AE 波形解析法 SIGMA のモーメントテンソル解析およびその固有値解析と全く同様に、AE の発生源マイクロクラックの2次元に関する位置、その面の方向および種別を決定することができる。

2次元 AE 波形解析法 SIGMA-2D の適用性を確認するために、一般化された AE 波動の基礎式を用いた数値実験による検証を行った。多種多様のクラックモデルの条件のもとで、理論 AE 波形をシミュレートし、これに対して本解析法 SIGMA-2D を適用した結果は、仮定したクラックモデルに対して数%以内の誤差で逆解析することが可能であることを示した。また、これと同時に、クラックの転位方向すなわち生成モードが、モーメントテンソルの固有値におけるせん断成分に及ぼす影響に関する新たな知見もまた得られた。

この2次元AE波形解析法 SiGMA-2D の持つ、実際のひびわれ現象に対する解析能力の検証実験として、透明樹脂板供試体を用いた混合モード破壊試験を行った。板供試体に対して面内一軸圧縮荷重を行うと、あらかじめ板供試体の中央部に加工しておいたスリットの先端より、せん断ひびわれが発生し、その進展に伴って、そのひびわれの進展モードが引張型に遷移していくが、これと同時に収録したAE波形に対して解析を試みた結果は、マイクロクラックの位置、面の方向および種別のいずれにおいても、実際のひびわれの進展状況と非常に良い一致を見ることができた。

さらに、コンクリート板およびモルタル板を用いた同様の試験を行って、等方等質でない岩質材料における適用性の検証も併せて行ったが、これらにおいても、実際に発生・進展したひびわれの状況と、2次元AE波形解析法 SiGMA-2D によって求められたAE発生源マイクロクラックの幾何学的諸量は、非常に良い一致を示した。

これらの結果により、2次元AE波形解析法 SiGMA-2D およびAE波形解析法 SiGMA を用いれば、AEの発生源であるマイクロクラックの幾何学的諸量を定量的に逆解析することが可能であることが示された。また、これらの解析結果を総合的に考察することによって、ひびわれ現象の発生機構を同定することが可能であることが示された。

5 アコースティック・エミッション(AE) 波形解析によるひびわれ発生機構の 定量的評価に関する考察

ここまでの研究成果として、AEの発生源となった微小ひびわれの発生した位置、微小ひびわれの発生モードおよび微小ひびわれ面の運動方向を同定するAE波形解析法 SiGMA を開発し、透明樹脂による実験的検証をはじめ、コンクリートや岩盤におけるAE波形に対して適用を行った。AE波形解析法 SiGMA を用いたAE波形解析において解析に必要なAE波形パラメータは、各観測点におけるAE波初動部(P波)の相対的な到達時間とその振幅値の2つのみであり、その非常に簡素化された解析手続きにより解析結果が迅速に得られ、それとともにコストパフォーマンスが優れていることが最大の利点となっている。それゆえ、本解析法 SiGMA の研究あるいは実地現場への導入は、非常に容易であると考えられる。ここでは、このAE波形解析法 SiGMA をさらに拡張し、AEの発生源となったマイクロクラックの規模を定量的に評価することを考える。また、これとともに必要となるAEセンサーの絶対感度校正法についても解説する。

5.1 クラックボリューム評価に関する考察

境界要素法に基づいたマイクロクラックの発生にともなう弾性波動すなわちAE波動は、既に定式化されており、AE波形解析法 SiGMA においては、AE波のP波初動部の到達直後の項を取り出して、式(3.1)で表わされる。すなわち、

$$A(x) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \frac{1}{r} \operatorname{Re}(s, r) \gamma_p \gamma_q m_{pq}(x') \cdot DF$$

$A(x)$: 観測点 x におけるAEセンサーの出力、 ρ : 伝播媒体の密度、 v_p : 伝播速度、 r : 観測点から発生源までの距離、 $\operatorname{Re}(s, r)$: AE波の入射角による補正係数、 s : AEセンサーの感度方向ベクトル、 γ : 観測点から発生源への方向ベクトル、 $m_{pq}(x')$: 発生源に関するモーメントテンソル、 DF : マイクロクラックの面積

(5.1)

また、モーメントテンソル m_{pq} は、 δ 関数 (Kronecker's Delta) を用いて次式で表わされる。

$$m_{pq} = b (\lambda l_k n_k \delta_{pq} + \mu l_p n_q + \mu l_q n_p)$$

(5.2)

3次元解析の場合には、6点以上の観測点におけるAE波のP波初動部の到達時間差とセンサー出力 A が得られれば、AE源の発生した位置が決定でき、さらに式(5.1)による連立方程式によりモーメントテンソルの各要素が決定できることになる。

このとき、式(5.1)からモーメントテンソル解を求めるには、センサー出力 A として各センサーの感度が同等であればよく、これら相互の相対的な振幅値でもよいが、式(5.1)におけるAE発生源であるマイクロクラックの規模(大きさ)までを定量的に決定しようとするならば、センサー出力 A には、AEセンサーの絶対感度を考慮した値を用いる必要がある。

また、AE波形解析法 SiGMA においては、連立方程式の解を求める上で、共通項である定数は整理され、モーメントテンソル解 m_{pq} は既にその各要素の中で絶対値が最大となる要素によって正規化されたもの、すなわち絶対値最大要素を1とした各要素間の相対値として求められるため、AE発生源であるマイクロクラックの規模を同定する場合には、これらモーメントテンソルの各要素を本来の値に復元する必要がある。

ここで、正規化されていない本来のモーメントテンソル m_{pq} において各要素の中で絶対値が最大である要素を $\max(m_{pq})$ とおけば、正規化後のモーメントテンソル m'_{pq} に対して、

$$m_{pq} = \max(m_{pq}) \cdot m'_{pq} \quad (5.3)$$

の関係が成り立つから、式(5.1)は次のように書き改められる。

$$\frac{A(x) \cdot r}{Re(s, \gamma) \gamma_p \gamma_q m'_{pq}} = \frac{\max(m_{pq})}{4\pi\rho v_q^3} \cdot DF \quad (5.4)$$

式(5.4)から、本来のモーメントテンソル m_{pq} における絶対値最大要素 $\max(m_{pq})$ が求められれば、AE発生源であるマイクロクラックの規模 DF が求められることとなる。

そこで、式(5.2)を $\lambda = 2\mu\nu/(1-2\nu)$ の関係を用いて整理すると、次式のように書き改められる。

$$m_{pq} = b\mu \left(\frac{2\nu}{1-2\nu} l_k n_k \delta_{pq} + \mu l_p n_q + \mu l_q n_p \right) \quad (5.5)$$

さらに、モーメントテンソル m_{pq} の固有値および固有ベクトルを再表示すれば、

$$\begin{aligned}
\text{第1 (最大) 固有値} \quad e_1 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) \\
\text{第2 (中間) 固有値} \quad e_2 &= 2\mu b \nu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} \right) \\
\text{第3 (最小) 固有値} \quad e_3 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right)
\end{aligned}
\tag{5.6}$$

$$\begin{aligned}
\text{第1 固有ベクトル} \quad e_1 &= l + n \\
\text{第2 固有ベクトル} \quad e_2 &= l \times n \\
\text{第3 固有ベクトル} \quad e_3 &= l - n
\end{aligned}
\tag{5.7}$$

であるので、したがって、式(5.7)より、

$$\begin{aligned}
l &= \frac{(e_1 + e_3)}{2} \\
n &= \frac{(e_1 - e_3)}{2}
\end{aligned}
\tag{5.8}$$

の関係を得ることができる。そこで、これらを単位ベクトル化して、全ての p および q についてそれぞれ式(5.5)右辺の括弧内に代入して値を求め、それらの中の最大要素を $\max(l, n)$ とすれば、

$$\max(m_{pq}) = b\mu \max(l, n)
\tag{5.9}$$

となり、式(5.4)に代入して、整理すれば次式を得る。

$$\frac{A(x) \cdot r}{Re(s, \gamma) \gamma_p \gamma_q m'_{pq}} = \frac{\mu \max(l, n)}{4\pi\rho v_q^3} (b \cdot DF)
\tag{5.10}$$

ここに、AE発生源であるマイクロクラックの面の転位方向への移動量 b とその面積 DF との積、すなわちマイクロクラックの体積 $b \cdot DF$ が得られ、AE源である微小ひびわれの規模が同定されることとなる。

以上により、AE波形解析法 SIGMA を拡張して、AE発生源となったマイクロクラックの規模（体積）を観測波形より同定するための理論が示されたが、ここで重要なことは、観測波形が絶対的な変位として求められていなければならないということである。それゆえ、AEセンサーの絶対変位に対する応答特性を明らかにしておくことの重要性がある。

5.2 AEセンサーの絶対感度校正

AE波形解析法 SIGMA を用いてAE発生源であるマイクロクラックの発生した位置、面の方向およびその種別（発生モード）を同定する場合には、AE波のP波初動部の振幅値としては、各チャンネル間の相対値を用いればよかった。しかしながら、前節において述べたとおり、マイクロクラックの規模（体積）までを同定の対象とする場合には、観測点における絶対的な変位としての振幅値 $A(x)$ が得られることが必要で、そのためには、AE波動に対するAEセンサーの動的特性を定量的に評価することが不可欠となる。

一般的にセンサーの特性評価を行なうためには、センサーへ明確な信号を入力して、その応答を観察しなければならない。この時の必要条件としては、

- センサーへどのような信号が入力されたかを知る原理が存在すること
- 物理的な把握が可能で単純な現象であること
- 精度向上が可能で現場での使用が簡単なこと

などが上げられる。

これらの条件を満たすために、本研究ではデービス棒（金属製の丸棒）を用いたAEセンサーの特性評価を行なった。本手法は元来、輸送機器や構造物における衝撃加速度の厳密測定を行うための加速度計の絶対校正法として、通産省工業技術院計量研究所において開発されたものであるが、ここでは、その加速度センサーの特性評価法をAEセンサーに対して応用し、変位入力に対するAEセンサーの周波数特性評価を行なった。図 5.1 にAEセンサーの特性評価装置の概念図を示す。

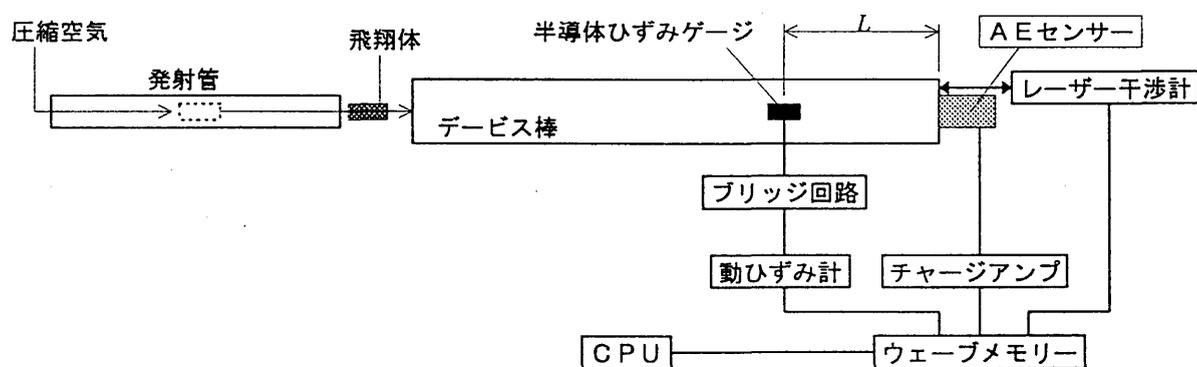


図 5.1 AEセンサー特性評価装置概念図

発射管内に送り込まれた圧縮空気の膨張により、発射管内の飛翔体がある運動量をもってデービス棒の端面に衝突すると、その瞬間に飛翔体はデービス棒に対して圧縮方向の変位を与えるが、飛翔体自体もその反作用としての圧縮変位を受けることになる。飛翔体の衝突面に受けた圧縮変位は圧縮波としてもう一方の端面へ伝播する。そして、端面における反射により振幅が逆転した引張波となって再び衝突面へと伝播し、飛翔体は衝突瞬間時にデービス棒へ与えた

圧縮方向の変位を相殺する引張方向の変位を与えることになり、結果的に飛翔体は丸棒と反発しあって跳ね返される。

そこで、飛翔体とデービス棒の端面との衝突によって生じた圧縮応力波は、デービス棒の弾性限度内ではデービス棒中を弾性波として伝播する。この時、一次元の弾性波の波動方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5.11)$$

$$C = \sqrt{E / \rho} \quad (5.12)$$

ここに、 u は棒の軸方向変位、 t は時間、 z は軸方向の空間座標、 C は棒中の縦弾性波伝播速度、 E は棒のヤング率、 ρ は棒の密度である。

ただし、AEセンサーの断面積および密度はデービス棒のそれに比べて十分に小さく、棒の自由端での応力波の反射にAEセンサーが及ぼす影響は無視できると仮定した。また、圧縮波は、棒の他方の自由端で反射し、引張波となって逆方向に伝播する。

ここで、反射の際に棒の自由端に生じる変位、すなわち棒端面の運動を精密に測定するため図 5.2 に示すようなレーザ干渉計を用いた。ここで用いるレーザ干渉計は、弾性波の反射時に生じる速度 $10^{-2} \sim 10^0 \text{ m/sec}$ 程度の運動の測定に適し、運動する試料の表面で反射したレーザ光のドップラーシフトをヘテロダイン検出し、試料の視線方向の速度および変位を測定するものである。

作動原理として、まず、エタロンにより周波数安定化させたアルゴンイオンレーザ光をそのまま分光して一部を参照光、一部を照射光とする。運動する棒の端面にて反射された物体光の周波数は、試料面の視線方向の速度に応じてドップラーシフトするが、これを集光し偏光板(P1)にて直線偏光とする。一方、参照光はフィルタ(F1)にて物体光と同程度まで減衰され、偏光板(P2)にて直線偏光とされた後、 $\lambda/4$ 波長板(QWP)によってP偏光成分とS偏光成分に 90° の位相差を与える。

これらの物体光と参照光はハーフミラー(HM)にて重合されてビート信号となり、偏光ビームスプリッタ(PBS)によってP偏光成分とS偏光成分に分離され、フォトダイオード(PD)によって

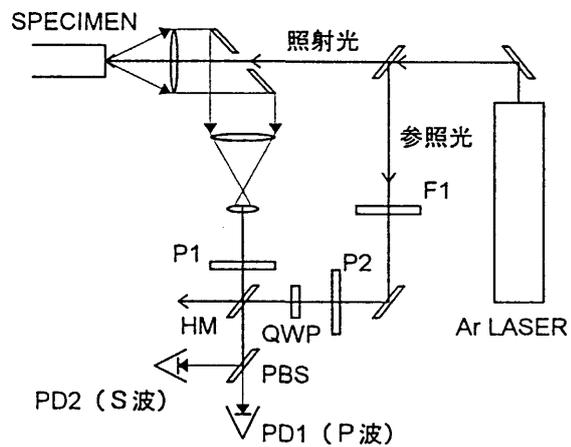


図 5.2 レーザ干渉計

それぞれ検出され、波形記録装置（サンプリング分解能 10bit, サンプリング周波数 100Mhz, サンプリング長 32Ksamples）に記録されることになる。

試料の端面の速度および変位の絶対値は、ビート信号の周波数およびフリンジ（干渉縞）の数から、それぞれ次式により求められる。

$$v(t) = \frac{\lambda}{2} f(t) \quad (5.13)$$

$$u(t) = \frac{\lambda}{2} n(t) \quad (5.14)$$

ここに、 $v(t)$ は試料端面の速度、 λ は照射レーザ光の波長、 $f(t)$ はビート信号の周波数、 $u(t)$ は試料端面の変位、 $n(t)$ はフリンジの累計数である。また、照射レーザ光の波長はアルゴンイオンレーザの場合およそ 515.4nm であり、および波形記録装置のサンプリング周波数から、本装置の変位分解能は 10nm 程度であった。

レーザ干渉計によって計測された自由端の変位波形 $\delta_m(t)$ を A E センサーへの入力波形とし、A E センサーの出力信号波形 $\alpha_m(t)$ を A E センサーの応答とすれば、A E センサーの伝達関数は次式で表わされる。

$$G_d(j\omega) = \frac{\mathcal{L}[\alpha_m(t)]}{\mathcal{L}[\delta_m(t)]} \quad (5.15)$$

ここに、 ω は角周波数、 $\mathcal{L}[\]$ はラプラス変換、 j は虚数単位である。

また、A E センサーの感度一周波数特性および位相一周波数特性は、それぞれ式(5.16)および(5.17)で与えられる。

$$g_d(j\omega) = |G_d(j\omega)| \quad (5.16)$$

$$\phi_d(j\omega) = \arg [G_d(j\omega)] \quad (5.17)$$

ここに、 $g_d(j\omega)$ ：変位入力に対する感度一周波数特性、 $\phi_d(j\omega)$ ：変位入力に対する位相一周波数特性である。

変位応答に対する周波数領域における感度校正は式(5.16)を用いることになるが、式(5.17)は、周波数領域におけるセンサーの位相遅れを表したものとなり、実際には、弾性波がセンサ

一に到達した時点に対して、センサーがこれに反応して応答を示すまでの時点に遅れがあることを示している。

実験によって得られた自由端の変位に対するレーザ干渉計の観察波形の高速フーリエ変換の結果を F_D 、AEセンサーの出力波形の高速フーリエ変換の結果を F_A とすると、AEセンサーの応答による出力信号 A は、次式により実変位 u へと補正することとなる。

$$u = A_f \frac{F_A(f)}{F_D(f)} \quad (5.18)$$

ここに、 A_f はAEセンサーの周波数領域 f における応答、 $F_A(f)$ および $F_D(f)$ は校正時におけるAEセンサーおよびレーザ干渉計の出力波形に対する高速フーリエ変換の周波数領域 f におけるスペクトル振幅値である。

以上により、デービス棒を用いた実際の弾性波に対するAEセンサーの変位応答に対する校正が行われることになる。

しかしながら、その原理からも分かるとおり、適用できる周波数領域には必ずと限界があることに注意を要する。すなわち、飛翔体とデービス棒の衝突によって発生させることのできる弾性波の周波数帯域は、飛翔体およびデービス棒の材料および形状に左右される。発生した弾性波の周波数帯域は、立ち上がり勾配が無限大に近いほど、より高い周波数成分まで含んだ広帯域のものとなるが、飛翔体とデービス棒の衝突面が互いに平面でかつ互いが同じ面積でそのいかなる点も同時に接触する時に、矩形波に近い理想的な勾配をもつ弾性波を発生させることができる。また、Skalakの指摘にもあるように、衝突面で発生した弾性波の立ち上がり勾配は、棒の側面（境界）の影響によりその伝播距離とともに高周波成分の減衰を受けて緩やかになってしまうことになる。これは、デービス棒の太さと伝播速度すなわち弾性係数と密度に依存するものである。したがって、金属材料におけるAE波のような、周波数帯域が数100kHz～数Mhzと非常に高い弾性波をこの原理によって発生させることは容易ではない。

さらに、ここで最も重要なことは、上述したAEセンサーの校正結果は、AEセンサー以外の機器すなわち、プリアンプ等の増幅器、ケーブル類およびAE波形記録装置等、AE検出部からその記録部に至るまでのAE計測系全体の校正結果であると考えられる必要がある。したがって、校正時にはこれらの機器をすべて同時に使用して校正を行うこと、さらに、実際のAE計測時には、AEセンサーからケーブルおよびAE計測機器の接続手順、ならびにその機器や機材自体をAEセンサー校正時と同じ条件にしなければならない。

5.3 透明樹脂 (PMMA) 板におけるクラックボリュームの評価

ここでは、デービス棒による感度校正を行ったAEセンサーを用いて、前章と同様な透明樹脂板 (PMMA) 板供試体の面内圧縮試験を行い、これまでに述べたAE波形解析法 SIGMA の拡張によるクラックボリューム評価を適用して、AE発生源であるマイクロクラックのボリュームの評価を試みた。

AEセンサーの感度校正には、前節に述べたデービス棒における飛翔体の衝突による平面弾性波を用いて、変位応答に対する感度校正を行った。

デービス棒 ($\phi 30 \times 2000\text{mm}$) および飛翔体 ($\phi 5.7 \times 10\text{mm}$) にはステンレス鋼を用い、飛翔体は空気圧 1.45kgf/cm^2 にて距離 100mm だけ加速され、およそ 19.5m/sec の速度でデービス棒に衝突させた。発生した弾性波のデービス棒中の伝播速度は、実測でおよそ 5007m/sec であった。この条件のもとで発生させることができる弾性波の周波数帯域は、レーザ干渉計による計測結果からおよそ 80kHz までであった。

使用したAEセンサーは、PZT 圧電素子をアルミニウム製のケースに取り付けたもので、共振周波数は 1MHz 、静電容量は 620pC 、電荷容量は 50nC (数値はいずれも製造元公称) である。

これらのセンサーは、後述する PMMA 板供試体の面内一軸圧縮試験の際と同様に市販の両面粘着紙テープにより取り付けられた。

したがって、本校正結果には、図 5.3 に示すような、粘着紙テープおよびセンサーの受感面のみを検出面に接触させ、センサー本体のケース部はセンサー受感体に支えられた状態での感度校正結果であり、センサーの変位応答に対する粘着テープによるダンピングおよびセンサー本体によるリングングの影響が含まれていることになる。

校正実験によって得られ、PMMA 板供試体の面内一軸圧縮試験に使用した 4 個の AE センサーの感度-周波数特性をまとめて図 5.4 に示す。この図から、およそ 60kHz 以上の周波数領域で著しい個体差が見られる。したがって、 $0 \sim 60\text{kHz}$ までの周波数領域におけるそれぞれの平均値を、各 AE センサーの実変位に対する応答感度とすることにした。その結果を表 5.1 に示す。

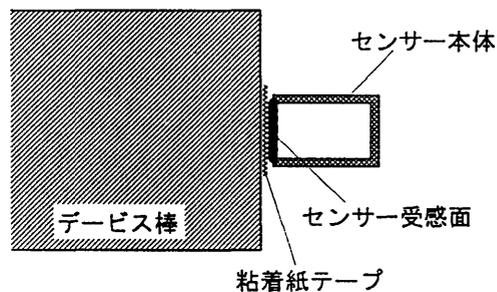


図 5.3 デービス棒へのAEセンサーの取付

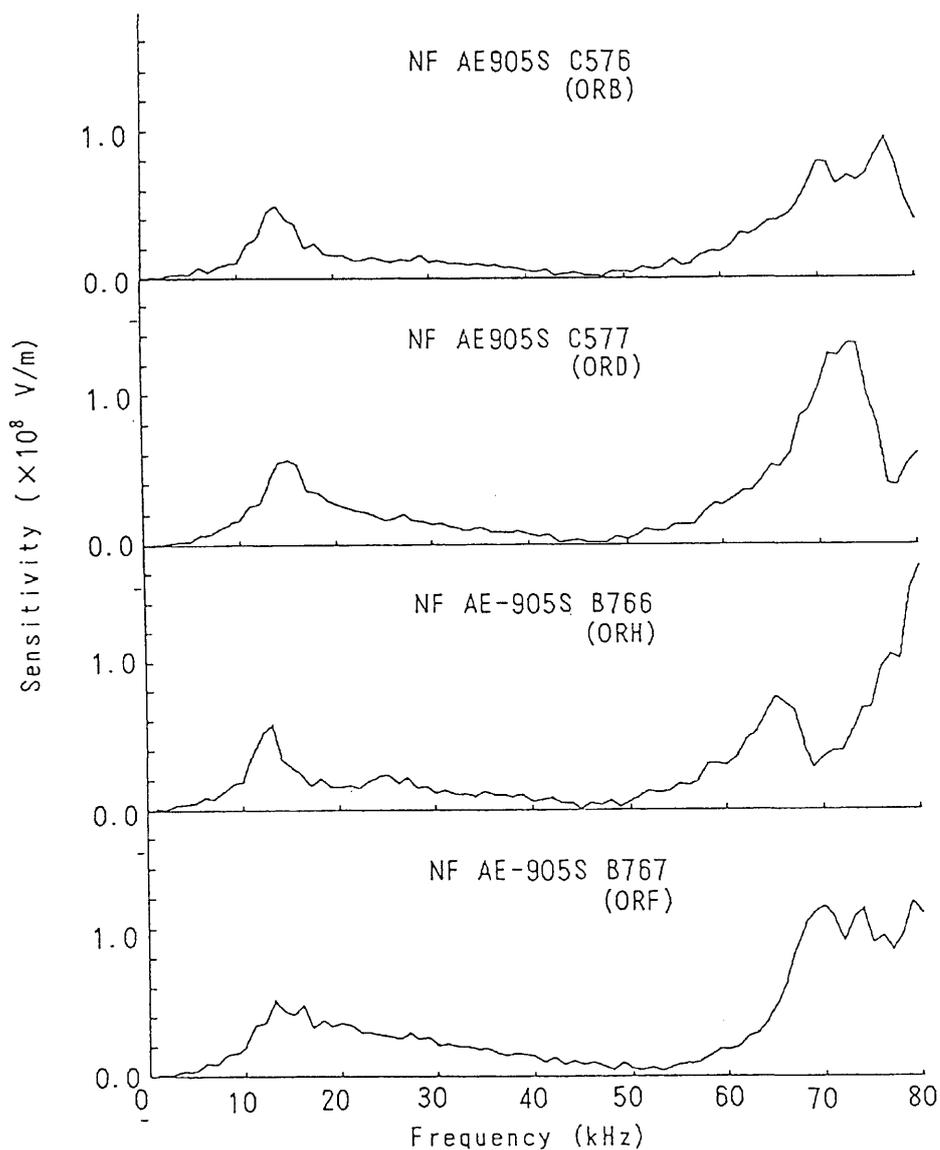


図 5.4 AEセンサーの実変位に対する感度—周波数特性

表 5.1 AEセンサーの実変位に対する応答出力

センサー名称および連番	実変位に対する応答感度 (V/m)
NF AE905S C576 (1CH)	0.11639×10^8
NF AE905S C577 (2CH)	0.15326×10^8
NF AE905S B766 (3CH)	0.18479×10^8
NF AE905S B767 (4CH)	0.14748×10^8

これらのAEセンサーの特性評価をもとに、第4章で述べた透明樹脂（PMMA板を用いた面内一軸圧縮荷重による混合モード破壊試験をさらにを行い、これにおいて計測されたAE波形より、その発生源であるマイクロクラックのボリュームを同定することを試みた。

本試験では、図5.5に示すような方形のPMMA板供試体（150mm×150mm×15mm）に、既存ひびわれとして、人工的にスリット（幅2mm、長さ30mm）を供試体中央に荷重軸に対して45°の傾きをもたせてあらかじめ加工しておき、試験中は荷重速度を1.5tonf/minとし、非常に緩やかに面内一軸圧縮荷重を荷重した。これは、供試体の急激な圧壊を防ぐと同時に、スリット先端から発生・進展するひびわれの形成過程を目視により観察することを容易にするためである。

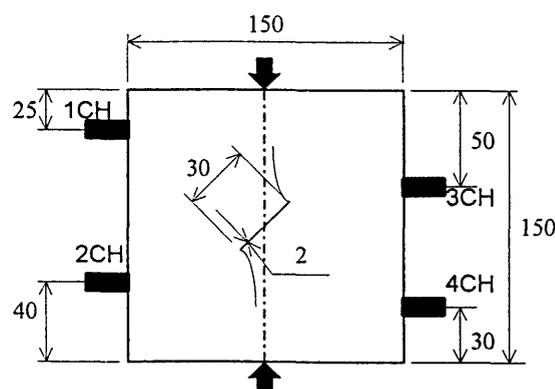


図 5.5 面内一軸圧縮荷重による混合モード破壊試験

実験により得られたAE波形より、2次元AE波形解析法SIGMA-2Dによって同定されたAEイベントは12イベントであった。それらのAE発生源であるマイクロクラックの位置とその発生モードによる種別およびその運動方向を図5.6に示す。図中においては、せん断成分が75%以上であるマイクロクラックを×にて、また、せん断成分が25~75%のマイクロクラックを引張とせん断の混合型として⇔と×を重ね合わせて表示している。本試験では、引張型すなわちせん断成分が25%以下であると同定されるマイクロクラックは見られなかった。

ひびわれは、人工的に設けられた既存ひびわれであるスリットの先端よりほぼスリットと直交する方向へ発生し、やがてそのひびわれが進展するにしたがって、その方向は荷重軸方向と一致するようになるが、AEの発生源の位置はそのひびわれが進展した経路に沿って標定されているのが分かる。また、スリットと方向を同じくしたせん断型のマイクロクラックがスリット先端部に集中して発生し、ひびわれが進展するにしたがって混合型のマイクロクラックが発生していく様子が観察される。

それらのマイクロクラックの体積を同定した結果を、x軸上における位置およびせん断成分に対応させて図示したものが、それぞれ図5.7および図5.8である。

図5.8より、せん断成分が50%を超えるマイクロクラックは、それらの体積が150mm³を超えて最大350mm³程度であるのに対し、せん断成分が50%より少ないマイクロクラックでは、それらの体積は170mm³より小さく、せん断成分が多いマイクロクラックは比較的せん断成分が少ないマイクロクラックよりも大きな規模で発生したことが伺える結果となっている。

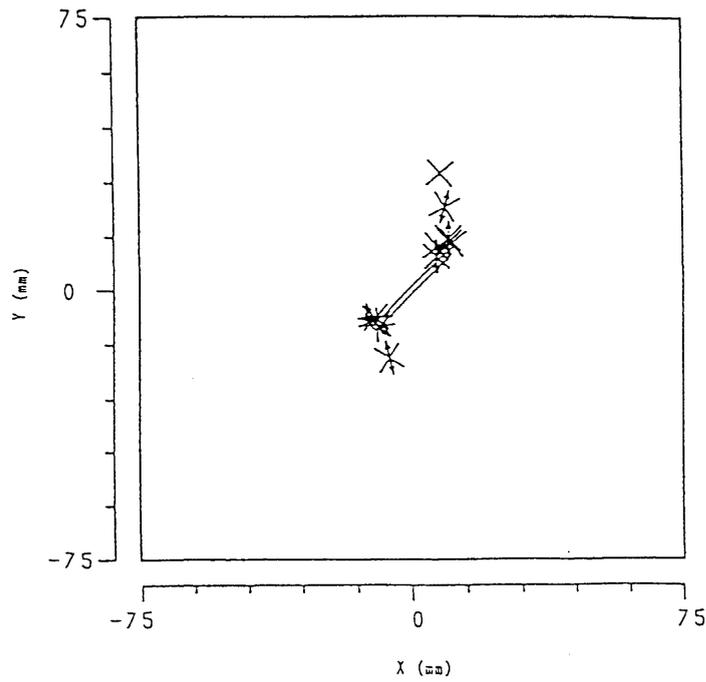


図 5.6 AE発生源のSIGMA-2Dによる解析結果

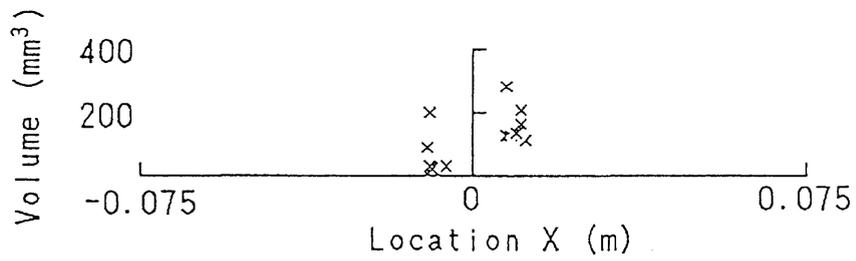


図 5.7 AE発生源の発生位置とマイクロクラックボリュームの関係

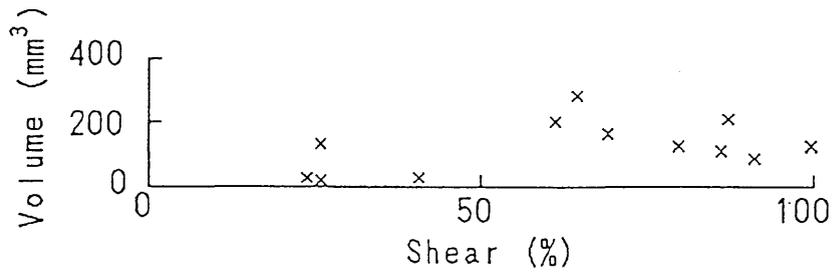


図 5.8 AE発生源のせん断成分とマイクロクラックボリュームの関係

5.4 AE法によるひびわれ発生機構の定量的評価の将来

本章においては、検出されたAE波形から、AE源の体積を同定する場合に必要とされるAEセンサーの絶対感度校正法を解説した。本校正法は、デービス棒の端面に対して飛翔体を衝突させることによって、棒中を伝播する一次元圧縮応力波の変位入力に対するAEセンサーの周波数特性評価を行なうことができる。本校正法は、その原理に加え、校正装置そのものが非常に簡単で、実際のAE計測現場にも容易に導入できる。ただし、金属のような高周波帯域のAE波に対応した校正を行うには、本手法では高周波の弾性波を発生させることは現在のところ容易ではない。ただし、本研究ではAE波形解析の対象をコンクリートや岩石などの低周波に属するAE波としており、これらに対応した校正法としては、デービス棒および飛翔体の材質や形状に適切なものを選択すれば、十分適用可能であると思われる。

また、絶対感度校正を施したAEセンサーの出力から、AE発生源であるマイクロクラックの幾何学的諸量すなわち、発生位置、発生モードおよび運動方向、さらには体積までを適切な計測方法によって検出、記録されたAE波形から定量的に求める手法もあわせて解説した。本手法は従来のAE源逆解析手法SIGMAを拡張したものであり、これまでのAE波形パラメータとしてAE波のP波初動部の相対到達時間差と振幅値だけでよいという解析法の平易さはそのままに、AE発生源であるマイクロクラックの体積までも同定できる。

実際の透明樹脂板の面内一軸圧縮荷重による混合モード破壊におけるAE波形から、その発生源であるマイクロクラックの体積について同定を試みた結果、せん断成分が大きいマイクロクラックは、それが小さいマイクロクラックに比べて大きな体積を持っており、せん断型マイクロクラックは、引張型マイクロクラックに比べて比較的大きな規模で発生することが伺える結果を得た。

しかしながら、AEセンサーの校正は、校正装置の限界から60kHzまでの周波数領域での検討にとどめたのに対して、実際の実験では、AE波形の検出および記録を行う際にはフィルタによる検出波形の処理は一切行っていなかったため、体積の同定においては、各チャンネル毎に得られた結果に大きなばらつきが見られ、ここではそれらの最小時近似による結果を示したに過ぎない。

これに対する検討項目として、計測の対象となるAE波の周波数領域の把握、その周波数領域での応答特性が平坦なセンサーの獲得およびセンサー校正法の改良、さらにはAE波形計測時における適切な周波数弁別処理（フィルタリング）があげられる。

AE波形解析によるAE発生源の定量的評価の将来性は、今後非常に期待されるものであると考えられる。AEを計測するための機器の高速化、高性能化およびダウンサイジングと相まって、構造物や材料にAEセンサーを取り付けて、常時AE波を観察しておくことにより、目に見えない内部のひびわれの発生や進展過程をリアルタイムで監視することが可能となるなど非破壊検査法としての使用法が考えられる。あるいは、破壊力学パラメータに対する今後の研

究成果とともに、ひびわれの発生機構として既存のひびわれ進展の定量的な予測がシミュレーション解析によって可能になることも予想される。

このように、AE波形解析によるひびわれの発生機構の同定法を、今後さらにそのハードおよびソフトの両面から継続、開発していくことは、工学的に非常に有意義であると考えられる。

6 結論

本論文は、A E 波形解析の工学への適用のため基礎研究として、コンクリートおよび岩質材料における A E 波形に対して理論解析を行うことによってひびわれの発生機構を同定する手法を確立するための研究成果をまとめたものである。

今日では構造物の大型化、高機能化が著しく進んでおり、このような構造物の重要な役割、および、その構造物の経済的価値の高さから、構造物の機能を損なうことなく、その物理的な現状を正確に評価するための手法の開発が今日における急務とされている。本研究で取り扱う A E 波形解析は、これに対して重要な役割を果たす非破壊試験法の一つとして注目を浴びている。

構造物の診断において重要な指標の一つとして、既存ひびわれの評価がある。ひびわれが構造物本来の機能に及ぼす影響を定量的に把握することが重要である。したがって、ひびわれの発生機構を同定することは非常に工学的に有意義なものとなり、このひびわれが発生した時に放出される A E 波動をパラメータとして、これを理論解析することによって、ひびわれの発生源に関する情報を導き出す逆問題の解法を確立し、実際のコンクリート構造物および岩盤へそれを適用することが本研究の目的である。

本研究においては、対象となった A E 波形データの不備もあり、A E 波形解析の実際への適用としての手法を完全に確立するまでには至らなかったが、数例の適用と検討の結果、その指針としての結論を見出すことができたものとする。本研究によって導かれた結論を要約すると以下の通りとなる。

第 2 章においては、境界要素法における弾性波動の基礎式より A E 波動の一般式を定義し、これより導かれるモーメントテンソルに着目することによって、その A E 波の発生源となったマイクロクラックの幾何学的諸量すなわち、クラックの位置、発生モード、クラック面あるいは転位の方向および規模を理論的に導くことができることを示した。

第 3 章では、定義された A E 波動の一般式に基づく A E 波形解析を実際の工学的な問題へ適用することを目的に、A E 波形解析の手続き SIGMA (Simplified Moment Tensor Analysis) およびそのプログラムコードと A E 波形の計測法が示された。

さらに、A E 波形解析法 SIGMA は、実際のコンクリート構造および岩盤におけるひびわれ現象に対しての適用が試みられた。すなわち、

- i) コンクリートブロックに埋め込まれたアンカーボルトを引き抜きによる、ブロックのコーン上破壊
- ii) コアスリットを加工したコンクリート円筒供試体による圧縮-引張破壊
- iii) 鉄筋コンクリートラーメン構造の隅角部における開口型曲げ破壊
- iv) 岩盤の静水圧破碎

v) ダムグラウト工におけるグラウト注入時の岩盤中における静水圧破砕

のそれぞれにおいて、実際に検出されたA E波形に対してA E波形解析法 SiGMA を適用し、A E発生源であるマイクロクラックの幾何学的諸量（位置・方向・種別）が求められた。

コンクリート構造物である i), ii)および iii)においては、その主破壊（最終破断面）の位置とA E発生源の密集した位置とは一致しており、このことより、A E発生源であるマイクロクラックの集合および連結によって目に見えるひびわれが形成されることが確認された。また、i)においては、引張型A E発生源のマイクロクラックの開口方向は、目にみえるひびわれ面に対して直交しており、せん断型A E発生源のマイクロクラックの転位方向は、目にみえるひびわれ面に対してほぼ同一方向を指していることが観察され、最終破断面の位置とその方向に対してほぼ解析結果は一致した。特に、i)においては、ひびわれの発生機構として、引張型マイクロクラックがひびわれの進展を先導し、せん断型マイクロクラックがひびわれを助長させる様子が伺える結果を得た。しかし、ii)の圧縮－引張試験においては、そうした傾向はみられず、構造物が破壊する際の载荷条件や拘束条件によってひびわれの発生機構は異なり、必ずしもA E発生源であるマイクロクラックの面の方向と実際の最終破断面の方向は一致しないことが示された。

コンクリート構造におけるA E波形解析法 SiGMA の適用の応用として、iii)においては内部に鉄筋を配したコンクリートにおいて発生・伝播するA E波を対象にA E波形解析を行ったが、その複雑な伝播特性によって解析可能なA E波形を検出することが著しく困難となったにも関わらず、その結果は実際のひびわれ状況と非常に良い一致を見た。

岩盤におけるA E波形解析法の適用としては、iv)の岩盤の静水圧破砕時に発生したA E波形を対象に解析を行った。基礎的な静水破砕試験においては、ボアホールカメラによる静水圧破砕による亀裂および節理の方向とA E波形解析結果とはやはり良い一致が見られ、A E波形解析法 SiGMA の岩盤における適用の可能性が示された。その応用として、v)の実際のダム建設現場での地盤安定処理工法であるグラウト工における岩盤の静水圧破砕に対する検討が試みられた。

以上、第3章においてはA E波形解析手法 SiGMA によって、実際のコンクリート構造物および岩盤におけるひびわれ発生機構の同定が可能であると同時に工学的見地からもにも利用価値が高いことを示した。

第4章においては、今後の本研究の展望においても、非常に重要かつ不可欠な問題として、3次元でのA E波形解析法 SiGMA の実験的検証として、ひびわれの発生および進展が観察可能な2次元の板供試体を用いた実験的考察を行った。

実際の破壊現象と SiGMA によるA E波形解析結果との比較検討を行う上で、現時点では弾性体内部の破壊状況を目視によって直接観察することが不可能であるために、最終破壊後の破断面からだけの考察にとどめているが、ここでは、実際に破壊進行状況（クラックの形成過程）が直接観察できるような状況を確保した上でA E波の検出および記録を行い、この時の SiGMA による解析結果との比較検討を行った。

まず、2次元問題としてA E波形解析を行うための手法を概説した。実際には3次元波動であるA E波動の面外成分を近似することによってモーメントテンソル解を求めるこの手法をSiGMA-2Dと名付け、3次元におけるA E波形解析法SiGMAでの取り扱いと全く同様に、A Eの発生源マイクロクラックの2次元に関する位置、その面の方向および種別を決定することができることを明らかにした。

2次元A E波形解析法SiGMA-2Dの適用性を確認するために、一般化されたA E波動の基礎式を用いた数値実験による検証を行った。多種多様のクラックモデルの条件のもとで、理論A E波形をシミュレートし、これに対して本解析法SiGMA-2Dを適用した結果は、仮定したクラックモデルに対して数%以内の誤差で逆解析することが可能であることを示した。また、これと同時に、クラックの転位方向すなわち生成モードが、モーメントテンソルの固有値におけるせん断成分に及ぼす影響が非常に大きいことも示された。

この2次元A E波形解析法SiGMA-2Dの持つ、実際のひびわれ現象に対する解析能力の検証実験として、透明樹脂板供試体を用いた混合モード破壊試験を行った。収録したA E波形に対して解析を試みた結果は、マイクロクラックの位置、面の方向および種別のいづれにおいても、実際のひびわれの進展状況と非常に良い一致を見ることができた。さらに、コンクリート板およびモルタル板における適用性の検証も併せて行ったが、これらにおいても、実際に発生・進展したひびわれの状況と、2次元A E波形解析法SiGMA-2Dによって求められたA E発生源マイクロクラックの幾何学的諸量は、非常に良い一致を示した。

以上第4章においては、2次元A E波形解析法SiGMA-2DおよびA E波形解析法SiGMAを用いれば、A Eの発生源であるマイクロクラックの幾何学的諸量を定量的に逆解析することが可能であることが実験的に証明された。また、これらの解析結果を総合的に考察すれば、ひびわれ現象による材料の破壊進行過程が観察できることが示された。

第5章においては、ここまでの研究成果である、A Eの発生源となった微小ひびわれの発生した位置、微小ひびわれの発生モードおよび微小ひびわれ面の運動方向を同定するA E波形解析法SiGMAをさらに拡張して、A Eの発生源となったマイクロクラックの規模を定量的に評価できることを示し、これとともに必要となるA Eセンサーの絶対感度校正法を解説した。

A Eセンサーの絶対感度校正法では、デービス棒の端面に対して飛翔体を衝突させることによって、棒中を伝播する一次元圧縮応力波の変位入力に対するA Eセンサーの周波数特性評価を行なうもので、その原理に加え、校正装置そのものが非常に簡単で、実際のA E計測現場にも容易に導入できる。ただし本手法では高周波の弾性波を発生させることは現在のところ容易ではないが、本研究にて取り扱うところのコンクリートや岩石などの低周波に属するA E波に対しては、その計測時には減衰の影響を考慮するためにより低周波を検出することが一般的であるとの見地から、デービス棒および飛翔体の材質や形状に適切なものを選択すれば、十分適用可能であると思われる。

また、絶対感度校正を施したA Eセンサーの出力から、A E発生源であるマイクロクラックの幾何学的諸量すなわち、発生位置、発生モードおよび運動方向、さらには体積までを適切な計測方法によって検出、記録されたA E波形から定量的に求める手法もあわせて解説した。本

手法は従来のAE源逆解析手法SiGMAを拡張したものであり、これまでのAE波形パラメータとしてAE波のP波初動部の相対到達時間差と振幅値だけでよいという解析法の平易さはそのままに、AE発生源であるマイクロクラックの体積までも同定できる。

実際の透明樹脂板の面内一軸圧縮载荷による混合モード破壊におけるAE波形から、その発生源であるマイクロクラックの体積について同定を試みた結果、せん断成分が大きいマイクロクラックは、それが小さいマイクロクラックに比べて大きな体積を持っており、せん断型マイクロクラックは、引張型マイクロクラックに比べて比較的大きな規模で発生することが伺える結果を得た。しかしながら、体積の同定においては、各チャンネル毎に得られた結果に大きなばらつきが見られ、ここではそれらの最小時近似による結果を示したに過ぎない。

これに対する検討項目として、計測の対象となるAE波の周波数領域の把握、その周波数領域での応答特性が平坦なセンサーの獲得およびセンサー校正法の改良、さらにはAE波形計測時における適切な周波数弁別処理（フィルタリング）があげられる。

AE波形解析によるAE発生源の定量的評価の将来性は、今後非常に期待されるものであると考えられる。AEを計測するための機器の高速化、高性能化およびダウンサイジングと相まって、構造物や材料にAEセンサーを取り付けて、常時AE波を観察しておくことにより、目に見えない内部のひびわれの発生や進展過程をリアルタイムで監視することが可能となるなど非破壊検査法としての使用法が考えられる。あるいは、破壊力学パラメータに対する今後の研究成果とともに、ひびわれの発生機構として既存のひびわれ進展の予測がシミュレーション解析によって可能になることも予想される。

このように、AE波形解析によるひびわれの発生機構の同定法は理論的にほぼ整備されてたといっても過言ではない。また、その実験的検証における成果から、実際の工学的な問題への適用に関しても基本的に可能であり、非常に有意な結果が得られることが示された。しかし、AE波の計測技術や、材料の弾性波伝播特性などをより詳しく検討する必要性があり、今後さらにそのハードおよびソフトの両面から開発を継続していくことは、工学的に非常に有意義であると考えられる。

謝 辞

本研究は、著者が、熊本大学における卒業研究に端を発し、以来研究生、修士課程および博士課程大学院学生として在籍した間に行った研究成果をまとめたものである。その間、終始御指導、ご鞭撻を賜った熊本大学工学部大津政康教授に深く感謝の意を表します。

著者のアコースティック・エミッションとの出会いは、熊本大学工学部4年次における卒業研究の課題として、熊本大学工学部大津政康教授（当時助教授）が手掛けておられたモーメントテンソル解析の数値実験による検討を通してであった。今を思えば、大津教授のコンクリートの健全性評価という工学的に非常に意義深い研究テーマの僅かではあるが、一部分に触れさせていただいたことにより、その後、入社した川田建設株式会社において技術開発の業務に就いた後も、コンクリート構造物の非破壊検査のための基礎的な知識を得るために再び熊本大学工学部研究生として再び大津教授のもとで指導を仰ぐことになり、ここに至った。第3章第3節における(4)岩盤の静水圧破砕におけるA E波形解析の適用は、著者が熊本大学工学部4年次の卒業研究から研究生として在籍した間にまとめたものである。

本研究における適用実験においては、供試体の作成から加工まで多くの作業を要した。これにおいて、実験室および機器、設備の使用を快諾され、それに関しての有益な御助言、御指導を戴いた熊本大学工学部友田祐一技官に深く感謝の意を表したい。また、A E計測に不可欠であるA E計測装置に関する貴重な御教示、御助言および御援助を多々戴いた日本フィジカルアコースティクス株式会社湯山茂徳氏に深く感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたって、第3章第3節における(1)アンカーボルトの引き抜き試験および、(2)コンクリート円柱供試体の圧縮-引張試験におけるA E波形データは、岐阜大学工学部小柳洽教授および六郷恵哲教授よりその貴重なデータを御提供いただきました。ここに感謝の意を表します。また、日本セメント株式会社中央研究所において実施した(3)鉄筋コンクリートラーメン構造の曲げ破壊試験においては、その供試体および実験機器、設備を御提供いただきました日本セメント株式会社岡本享久氏ならびに関係諸氏の方々に感謝の意を表します。(4)岩盤の静水圧破砕試験におけるA E波形データは財団法人電力中央研究所石田 毅氏（現在山口大学講師）ならびに佐々木俊二氏よりその貴重なデータを提供戴きました。ここに感謝の意を表します。竹中土木株式会社保野川ダム建設工事において実施した(5)ダムグラウト工における岩盤の静水圧破砕試験では、株式会社竹中工務店上田貴夫氏、同柿沢忠弘氏ならびに関係諸氏の方々より多大な御支援と御助力を戴きました。ここに感謝の意を表します。

そして、第4章および第5章における透明樹脂、コンクリートおよびモルタル板供試体を用いた面内一軸圧縮試験におけるA E波形の観察については、株式会社四国総合研究所の機器、機材および設備の御提供を戴きました。御便宜を図っていただきました株式会社四国総合研究所油野邦弘氏（現在四国電力株式会社）に深く感謝の意を表します。また、第5章第2節のA Eセンサーの絶対感度校正は、通商産業省工業技術院計量研究所力学実験室において行った

が、これは同研究所の梅田 章氏ならびに上田和永氏両名の同校正法の理論に関する御教示ならびに校正実験の御指導なくしては成し得なかった。ここに深く感謝いたします。

また、実験および解析の遂行には、熊本大学工学部ならびに大学院工学研究科に在籍した数多くの学友、中でも松山公年氏（現在日本工営株式会社）、福地伸一氏（同左）、竹村克則氏（現在京都市市役所）依田宗一氏（現在北野建設株式会社）の各位に御助力を戴きました。以上の諸氏に深く感謝いたします。

さらに、奨学研究生としての熊本大学工学部研究生ならびに熊本大学大学院工学研究科への派遣を快諾された川田工業株式会社川田忠樹氏、川田建設株式会社大樋邦夫氏および同森本洋三氏、また、本論文を起稿するにあたり便宜を図っていただいた熊本大学地域共同研究センター助教授上田 昇助教授、以上の諸氏に対して深く感謝したい。

また、本論文の完成を心待ちにし、また惜しめない修学への介助を戴いた重石 肇、久子の両親に感謝の意を表します。

最後に、本論文を著者の心の支えとなってくれた妻重石裕美、息子空太へ捧げる。