

アコースティック・エミッションによる破壊源探査

STUDIES OF SOURCE LOCATION BY ACOUSTIC EMISSION

丹羽義次*・小林昭一**・大津政康***

By Yoshiji NIWA, Shoichi KOBAYASHI and Masayasu OTSU

1. はじめに

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission, 略して AE と記す) とは、微小破壊に伴って発生、伝播する弾性波の放射を総称したよび名である。また、AE それ自体、あるいは AE を発生する現象を AE 現象と一般的によんでいる。

AE 現象は、材料とか構造物の変形、破壊過程の時々刻々に対応した非常に多種多量な情報を内蔵している。

これを分析し諸特性を解明することにより、材料試験、非破壊検査、構造体の総合安全性の評価など多方面に比較的簡便に応用することが期待されている。この AE の諸特性とか一般的な適用例などについては、他の論文¹⁾に述べてあるので参照されたい。

AE は、上述のように破壊に伴って放出される弾性波である。したがって、1つの AE 現象が発生すれば、必ずそれに対応した破壊源があるはずである。すなわち、AE の観測から、破壊源の位置とか、破壊の機構、規模に関連した情報が得られる。なかでも、破壊源の位置を調べることを主目的とした破壊源探査は、構造体やその部分の欠陥箇所の検出を目的とした非破壊検査とか、材料の破壊過程の追跡、破壊機構の解明などに関して、1つの新しい測定技術をもたらすものと期待されている。

これは、すでに金属分野での圧力容器および溶接部などの内部欠陥探査²⁾に、あるいは、鉱山における山はね探査網³⁾に適用され注目を浴びている。また、岩石実験では、茂木⁴⁾、Scholz⁵⁾らの研究に始まり、現在、Byerlee と Lockner^{6), 7)} らにより研究が進められている。

このように、破壊源探査は、材料および構造物内部の

微小破壊の成長過程を外部からの観測により、定量的かつ立体的に把握できる新しい手法として、その適用性がおおいに期待されている。しかしながら、この技術は、まだ適用例も少なく、確立されたものとは言い難い。AE 計測システムの開発、改良はもちろんのこと、基礎から応用まで含んだ広範囲な研究が要請されているゆえんである。

本論文は、コンクリート構造物の破壊過程における AE の発生特性に関する研究の一環として、破壊源探査について基礎的な研究を行ったものである。以下では、この研究において開発した破壊源探査の計測システムおよび手法について述べ、その適用例について検討を行うこととする。

2. 破壊源探査法

(1) 原理

破壊源探査は、いくつかの検出点からの AE の波形を同時記録し、その到達時間差から破壊源位置を決定するものであり、原理的には、地震の震源決定法となんら異なるところはない。しかし、AE 波は Fig. 1 に見られるように、縦波、横波、表面波、多重反射波などが複

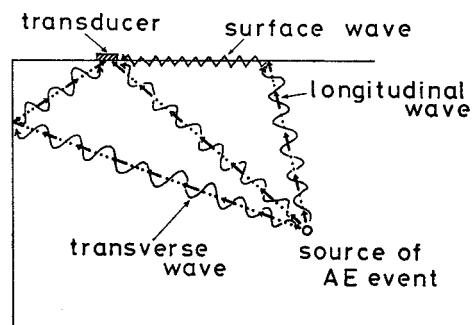


Fig. 1 Waves transmitted from a source of AE event

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

難に重なり合っているので、地震波のように縦波と横波の到達時間差、いわゆる P-S 時間差を判読することは困難である。したがって、金属での欠陥探査では、板材の二次元での破壊源探査を目的としているため、もっとも振幅の大きな表面波 (Rayleigh 波) の到達時間差が用いられている。また、三次元的には、縦波初動の到達時間差を用いるのが確実であろう。この時間差データから破壊源を決定する方法は、鉱山での山はね探査網、金属での欠陥探査などで、いくつかの処理法がとられている。以下では、それらも含めて、三次元的な破壊源探査の一般的な方法について検討する。

Fig. 2 に示すように基準とするトランステューサー T_0 を原点として三次元座標系をとり、 i 番目のトランステューサー T_i の座標を (a_i, b_i, c_i) とする。このとき破壊源を $S(x, y, z)$ 、縦波速度を v^p 、 S から原点までの到達時間を t_0 、 T_0 と T_i の縦波初動の到達時間差を t_i とすれば、 S からそれぞれのトランステューサーへの距離は次のような式で表わされる。

$$\begin{aligned} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} &= v^p t_0 \\ \sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2 + (z-c_i)^2} &= v^p (t_0 + t_i) \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} (i=1, 2, \dots, N-1) \end{array} \right. \quad (1)$$

この式は、 x, y, z, v^p, t_0 を未知数としたトランステューサー数 N 個の球面の方程式である。ここから解を求める方法¹⁰⁾も提案されているが、 t_0 はデータから直接

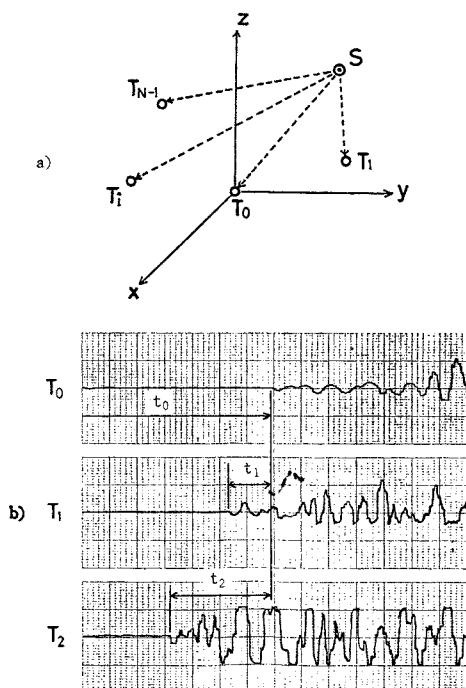


Fig. 2 a) Locations of a source and transducers T_0, T_1, \dots, T_{N-1} , b) acoustic emission signal records of transducers T_0, T_1 and T_2

には知られない量であるために、これを消去して、各トランステューサーへの到達時間差 t_i だけを用いた次のような式に変形する。

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

したがって、解は式 (2) で示される $N-1$ 個の双曲面の交点として得られる。式 (2) は x, y, z, v^p に関する非線形連立方程式であり、これを解くためには 5 個のトランステューサーが必要である。

さらに、式 (2) は直接計算には向きであり、各式を平方し差をとる、たとえば i 番目と j 番目の差をとることにより、式 (3) のような線形方程式に変形する。

$$\left. \begin{aligned} A_{ij}x + B_{ij}y + C_{ij}z + D_{ij}v^p &= E_{ij} \\ A_{ij} = 2(a_i t_j - a_j t_i) \\ B_{ij} = 2(b_i t_j - b_j t_i) \\ C_{ij} = 2(c_i t_j - c_j t_i) \\ D_{ij} = t_i t_j (t_i - t_j) \\ E_{ij} = t_j (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) - t_i (a_j^2 + b_j^2 + c_j^2) \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, N-1, j=1, 2, \dots, N-1) \quad (i \neq j)$$

式 (3) より、 $t_i \neq 0, t_j \neq 0$ ならば、一次独立な式は $N-2$ 個得られる。この連立方程式は簡単に直接解くことができる。この場合には、トランステューサー数が N 個であることより、 v^p が既知ならば 5 個、未知ならば 6 個のトランステューサーが最低必要である。

式 (3) が解かれるためには、左辺の行列式は 0 となつてはならないことは明らかである。これにはいくつかの場合が考えられる。たとえば、トランステューサーが同一面上に配置されていたり、破壊源を中心とする同一球面上に配置されているときなどがこのような場合にあたる。また、式 (2) を平方したため式 (3) と式 (2) とは必ずしも同値ではなく、式 (2) の双曲面が同一交点を持たない場合でも解を持つし、また、式 (3) の左辺の行列式が非常に 0 に近い場合には、まったく式 (2) の解と無関係な解が得られること¹⁰⁾もあるので注意が必要である。

この線形方程式の係数には計測データ t_i を含んでいため 計測誤差が直接に影響する。これを避けるために、一般には最小二乗法が用いられている。さらに、この解を一次近似として反復法により解を求める方法も提案されている¹⁰⁾。これらの方法では、 v^p が既知でも 5 個以上のトランステューサーが必要である。

(2) 破壊源位置の決定

破壊源位置の決定に際しては、計測誤差と解法の誤差を検討することが必要である。この場合、計測誤差には、① 計測装置の感度、② 時間差の読み取り精度、③

縦波速度の変動などがおもな要因となっている。

計測装置の感度に関するものは、AE の伝播特性とも関連しており、材料の内部構造に基づく消散とか、幾何学的原因による散乱、さらにトランスデューサーへの入射角なども問題となる。これはトランスデューサーの配置と密接に関係しており、これらを考慮して、どのチャンネルも等価な感度となるようにトランスデューサーを配置し、各チャンネルで縦波の初動を確実に捕えられるように計測システムを考案する必要がある。

時間差の読み取り精度は、測定装置の分解能の問題である。破壊源探査のリアルタイム処理システムでは、AE 波形を記憶するのではなく、各チャンネルに閾値電圧(threshold level)を設定し、あるチャンネルでこれをよぎって後、他のチャンネルで閾値をよぎるまでの時間差を求めており。しかしながら、この方法ではこの閾値の設定レベルにより時間差が異なることがあり、また、初動をとり逃す恐れもある。それを防ぐためには、AE の波形を直接記録するのが確実であろう。これには、十分な分解能を持った記憶および記録装置が必要である。

縦波速度の変動は、材料の破壊過程に固有なものであり、刻々と変化する内部構造に依存しており、実験中に順次検討することが必要であろう。

次に解法の誤差について検討する。われわれの用いた方法は、最小二乗法によらず、三次元的な破壊源探査に必要な最小のトランスデューサー数(4 個あるいは 5 個)で、破壊源の決定を行おうとしたものである。そのため縦波速度を既知とし、4 個の場合には、y 座標を仮定して前述の式(3)より解を求め、時間差を逆算し、次に再び y 座標を仮定し直し、式(2)の方程式を許容計算誤差(1 mm)内で満足するまで、この操作を繰り返した。また、5 個の場合には、式(3)より解を求め、その解を必ず式(2)に代入し、その解の検定を行った。この際、計算誤差が許容範囲内に収まらないものは除外した。

実際の破壊源探査に際しては、計測上の要因と解法上の要因が重なり合って、破壊源位置の精度に影響する。したがって、これらの個々の検討と、さらに精度検定の方法についても考察することが必要であろう。

(3) 実験装置

われわれの使用した計測装置のブロック・ダイヤグラム(1 チャンネル分のみ)を Fig. 3 に示す。トランスデューサーは、PZT-5 圧電素子($\phi 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 、共振周波数 900 kHz)を用い、供試体表面に直接接着した。AE 信号は、前置増幅器、波高弁別器で 60 dB 増幅して検出した。この際、波高弁別器のフィルターで周波数帯域を選択した。フィルターの使用により、AE 波形は

相当変化することは注目に値する。この例を Fig. 4 に示す。これは、モルタルの一軸圧縮下において観測された同一現象を、フィルターを変えて再生記録したものである。この結果に基づいて、われわれは、AE 波形を比較的忠実に再現し、縦波の初動も明確で、周辺雑音に妨げられない周波数帯域という条件を念頭において、10~

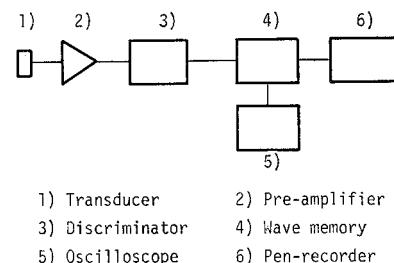


Fig. 3 Block diagram of the acoustic emission monitoring system used

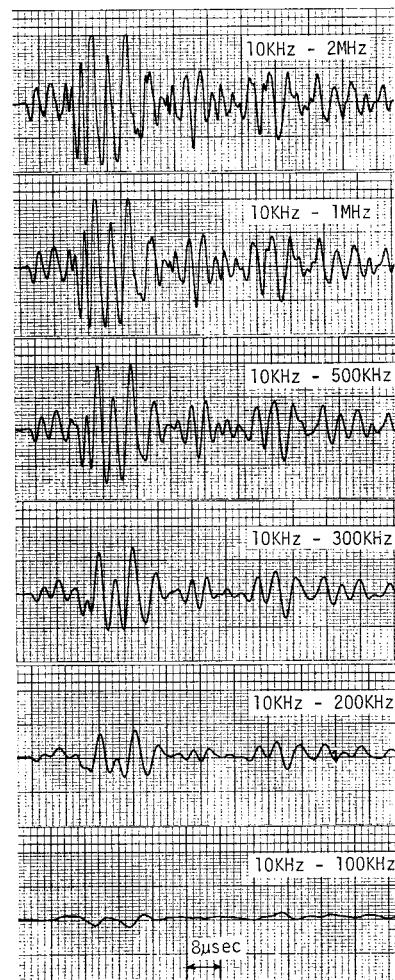


Fig. 4 Acoustic emission signals. The same signal is recorded with different frequency bands

300 kHz のバンドパスフィルターを採用した。この帯域は、ウェーブメモリの分解能 (1 μ sec) とも対応している。

4 チャンネルあるいは 5 チャンネルから検出された AE 波形は、ウェーブメモリ (デジタル波形記憶装置) により、サンプリング間隔 1 μ sec で同時記録した。この装置は、トリガー前の信号まで記憶できるため、初動の同時記録には、非常に有利である。この波動をオシロスコープでモニターして AE 波形であることを確認のうえ、20 000 倍に時間スケールを拡大し、記録紙上では 1 mm が 1 μ sec となるように記録した (その例は、Fig. 9, 13, 20 参照)。

これよりトランステューサーへの到達時間差は容易に読み取ることができ、破壊源が上述の計算より求められる。

(4) AE の伝播特性

破壊源探査は、原理的には Fig. 1 にも示したように、破壊源から伝播する波を供試体表面に接着したトランステューサーで検出することに基づいている。しかしながら、このときどのような波が検出されるかをあらかじめ知っておくことは、破壊源探査の精度評価のために必要である。

そこで一例として、Fig. 5 に示すように $\phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ のコンクリート円柱供試体に、トランステューサーを装着し、A' 点より 10 μ sec の z 方向方形パルスをファンクション・ジェネレーターにより入力した結果を示す。このときの A' と E 点の波形記録を Fig. 6 a) に示す。A' 点で入力後、34.5 μ sec 後に、E 点にはこのパルス信号による現象が到達しており、これより縦波速度は約 4 300 m/sec と計算される。また、E 点での初動が下向きであることに注意する必要がある。さらに A' 点からの入力による A, B 両点で検出した記録を Fig.

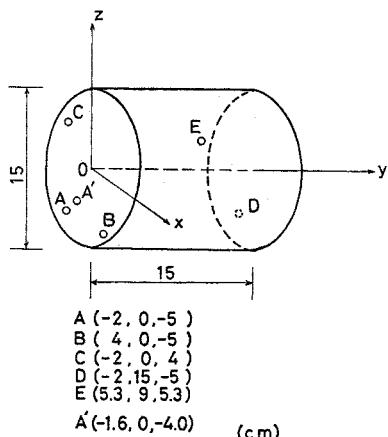
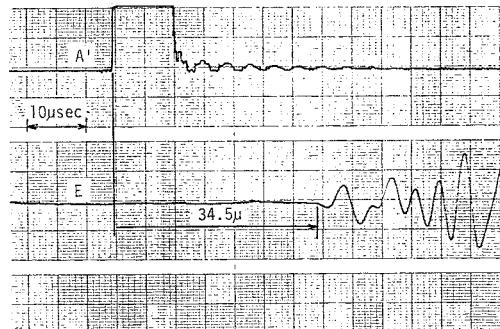
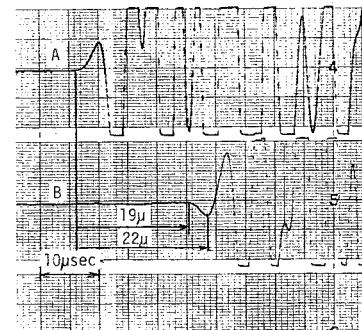


Fig. 5 Cylindrical specimen and location of transducers



a)



b)

Fig. 6 a) Waveform record of transducer E from a signal source A', b) Waveform records of transducers A and B from a signal source A'

6 b) に示す。ここでは、A, B 両点とともに E 点とはまったく異なる波動が見られ、A 点と B 点の初動の向きは逆転している。A, B 両点は A' と供試体の同一表面上にあり、そのため縦波が検出されにくいことが考えられる。また、記録されたこの現象は、時間的に判断して明らかに反射波ではない。これより A, B 両点の初動は、横波あるいは表面波であると考えられる。いま、A' 点に近いことから A 点の初動を表面波、B 点の初動を横波、次に位相の異なるところを表面波と考えると、A 点との到達時間差は、それぞれ 19 μ sec, 22 μ sec となる。A 点では表面波が検出されたと考えたので、これを考慮すると横波速度として 2 600 m/sec、表面波速度として 2 300 m/sec が得られる。これは縦波速度より計算により求めた横波速度、表面波速度によく一致する。

このように、破壊源探査の際には、その波形の位相にも十分注意をはらい、縦波の初動が検出されているかどうかを検討する必要があることがわかる。また、この初動の向きについては、地震の発生機構における押し引き分布などから考えて、破壊機構に関して重要な情報を秘めている可能性もあると考えられる。

(5) 破壊源探査の精度の検証

われわれの開発した破壊源探査法では、これまで述べてきたことから時間差の読み取り誤差は $1 \mu\text{sec}$ 以内であり、縦波速度から考えて計算誤差を含めても、5 mm 以内の精度で破壊源が求まると考えられる。しかし、トランシスデューサーの大きさ、その配置、さらに前述の誤差の要因が重なり合えば、この程度の誤差で収まる保証はない。そこで、精度を評価する方法として、既知のパルスを入力し、このときの検出データより信号源を求め、計算値と入力点の距離で精度を評価することにした。

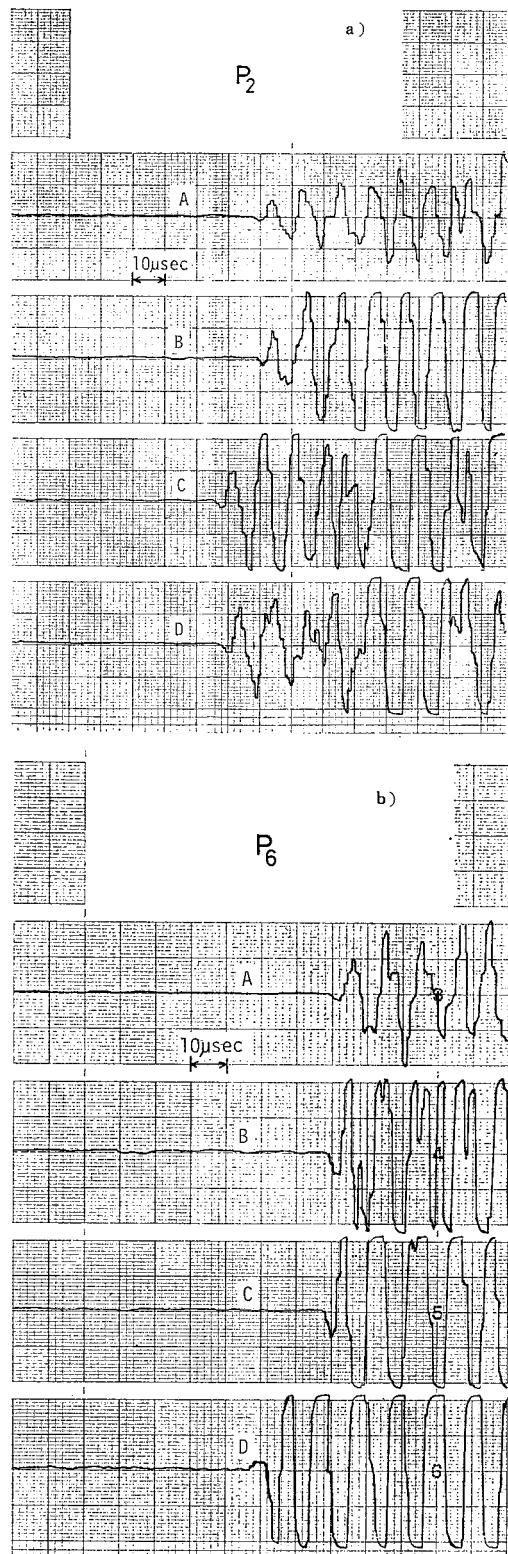
前述と同じ供試体に、A, B, C, D 点に装着した 4 個のトランシスデューサー (Fig. 5 参照) を用い、Table 1 に示す P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 , P_6 の 6 点から 100 kHz の方形波を入力した。検出波形の例を Fig. 7 a), b) に示す。 P_1 , P_2 , P_4 からの入力では Fig. 7 a) の P_2 の例と同じようにすべての初動の向きがそろっている。 P_5 , P_6 からの入力のときは、Fig. 7 b) の P_6 の例のように入力点と同一表面上に配置されたトランシスデューサーのチャンネルでは初動が不明確か、あるいは逆転している。また、 P_3 からの入力では、B, C のチャンネルで初動が不明瞭となっていた。

Table 1 Accuracy of source location in detection

Signal sources	Signal sources coordinates (cm)	Calculated coordinates by source location (cm)	Error (cm)
P_1	(-7.5, 6.0, 0.0)	(-7.8, 5.6, 0.0)	0.5
P_2	(-3.8, 11.0, 6.5)	(-4.4, 11.3, 7.1)	0.9
P_3	(7.5, 1.0, 0.0)	(7.4, -0.7, 0.4)	1.8
P_4	(0.0, 7.5, -7.5)	(-0.7, 7.5, -6.9)	0.9
P_5	(0.0, 0.0, 0.0)	(0.3, 1.2, 0.5)	1.3
P_6	(0.0, 15.0, 0.0)	(0.6, 12.6, 0.3)	2.4

これらの到達時間差から求めた計算結果と、誤差を Table 1 に示す。 P_3 , P_5 , P_6 では誤差が 10 mm を越えている。このような誤差は、縦波初動が確実にすべてのチャンネルで検出されなかつことに起因すると考えられる。 P_3 における B, C の両チャンネルでの初動の不明瞭さを、B, C 点と P_3 点の位置関係から考えると、ここでも P_3 から B, C 点への角度が非常に縦波の検出されにくい入射角になっていることがわかる。

したがって、われわれの破壊源探査法では、破壊源からの AE 信号のトランシスデューサーの入射角が、縦波初動を確実に検出しうる角度内にあり、かつすべてのチャンネルへの感度が等価となるように、トランシスデューサーを配置する必要がある。このとき、Table 1 の P_1 , P_2 , P_4 の結果が示すように、誤差は 10 mm 以内であると考えられる。

Fig. 7 Acoustic emission signals of four transducers, located as shown in Fig. 5, from a signal source a) at P_2 , b) at P_6

3. 破壊源探査の適用例

(1) 割裂試験における破壊源探査

割裂試験は、コンクリート、モルタル等の引張強度を求める試験として標準的なものであり、もっとも広く用いられている。この試験法は、円柱供試体に直径方向に対向した圧縮力を加えると、この直径上には、それと垂直方向にはほぼ一様な引張主応力が生じ、この応力により引張破壊（破断）が起こることを前提としている。しかしながら、この際の破壊機構については、引張応力だけで生じるのか、最大引張りひずみの可能性、さらに、瞬間に全断面が破壊されるかなどの疑問が残されている。これらのことを探査するために割裂試験における破壊源探査を行った。

a) 実験方法

実験を行った供試体は、精度の検討に用いたのと同じ $\phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ の円柱形であり、A（水：セメント：砂 = 0.6 : 1 : 2）、B（水：セメント：砂 = 0.3 : 1 : 0.5）、C（水：セメント：砂 = 0.8 : 1 : 5）、D（水：セメント：砂：粗骨材 = 0.64 : 1 : 2 : 4）の4種類の配合のものを

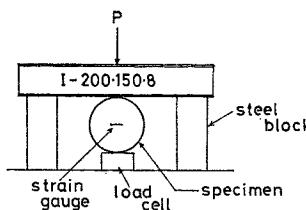


Fig. 8 Loading equipment for the split test

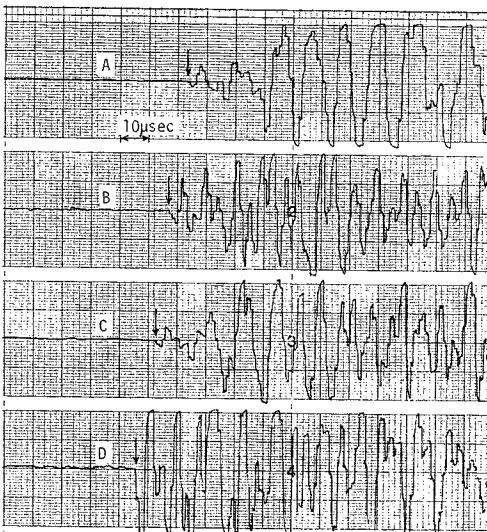
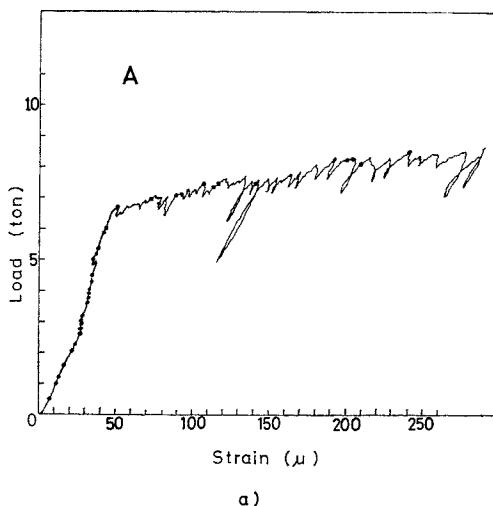


Fig. 9 Acoustic emission signals of four transducers located as shown in Fig. 5

作成した。砂は豊浦標準砂を用い、粗骨材は最大粒径 15 mm の碎石を使用し、20°C の水中養生を行った。

載荷には万能試験機を使用したが、通常の載荷法では、瞬間に破断面が形成されるため、割裂の破壊過程を十分には追跡しにくい。そこで、本実験では Fig. 8 に示すように I 型鋼 ($200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$) を介することにより試験機剛性を高め、供試体中央部の引張りひずみをロードセルの荷重とともに $x-y$ レコーダーに記録させ、荷重-ひずみを制御しながら実験を行った。

トランシスデューサーは Fig. 5 と同様に配置した。この配置において実験中に検出された波形の一例を Fig. 9 に示す。この到達時間差より、前述の方法で破壊源を決定した。なお、予備実験の結果から、縦波速度は、そ



a)

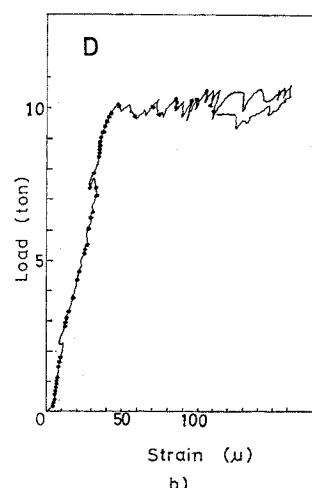


Fig. 10 Load-strain curve manually controlled in the split test of a) specimen A and b) specimen D. The solid circle represents the point at which a source is detected

それぞれ A : 3 700 m/s, B : 4 000 m/s, C : 2 800 m/s, D : 4 300 m/s と求められている。

b) 実験結果および考察

Fig. 10 a), b) に、供試体 A, D の荷重-ひずみ曲線を示す。このように、AE 計測中、最大耐力点付近においては、荷重を制御し、瞬間的な破断を防いだ。これにより、供試体表面の中央部荷重軸方向にヘヤークラックが生じるまで AE 計測を行った。また、図の曲線上には、破壊源を決定した現象が検出された点を黒丸印で示した。

この実験により求められた破壊源探査の結果を **Fig. 11 A, B, C, D** に示す。図中には、破線で実験後、供試体表面に観察されたヘヤークラックを示した。

Fig. 11 A には A 供試体の微小破壊位置を示した。載荷の過程と微小破壊位置には、それほど相関性は見られず、微小破壊は、供試体中央部の載荷軸を含む面付近に、発生しているのがみられる。また、ヘヤークラックは、図の側面図の右側の面で観察されたが、破壊源探査の結果も、これを裏づけている。

Fig. 11 B は B 供試体の結果である。この実験においては A と同様に側面図の右側の面にヘヤークラックが観察されたが、破壊源探査の結果からは、こちらの側ばかりに破壊源は存在している。これは、実験の際、荷重の偏心があったと考えられる。

Fig. 11 C, D には、それぞれ C, D 供試体の結果を示した。これらの実験でも破壊源の片寄っている側とヘヤークラックの発生した面とは、よく一致している。

この 4 つの結果は、破壊源位置の決定点数が、それほど多くないこともあり、微小破壊の発生位置の推移を明確に表わしていない。また、配合、材質による差異もそう明らかではない。しかし、すべての結果が、最終破断面上だけではなく、その周辺にも微小破壊が存在することを示している。

つまり、割裂の破壊過程は、載荷面を含むある領域（引張り領域）に微小なクラックがいくつも発生し、最終的にはこれらが集積されて破断面が形成され、破壊に至る過程であると考えられる。

このように、破壊源探査法を用いて、供試体内の破壊過程を追跡することにより、その過程での材料内部の構造的変化を推察する可能性が確かめられた。

(2) 鉄筋コンクリートはりにおける破壊源探査

破壊源探査法は、金属分野における内部欠陥探査への適用と同様に、複合材料からなる土木構造物についても適用し得ると考えられる。これが実用化されれば、欠陥箇所の検出、破壊過程の追跡等に非常に有効な道具となることはいうまでもない。

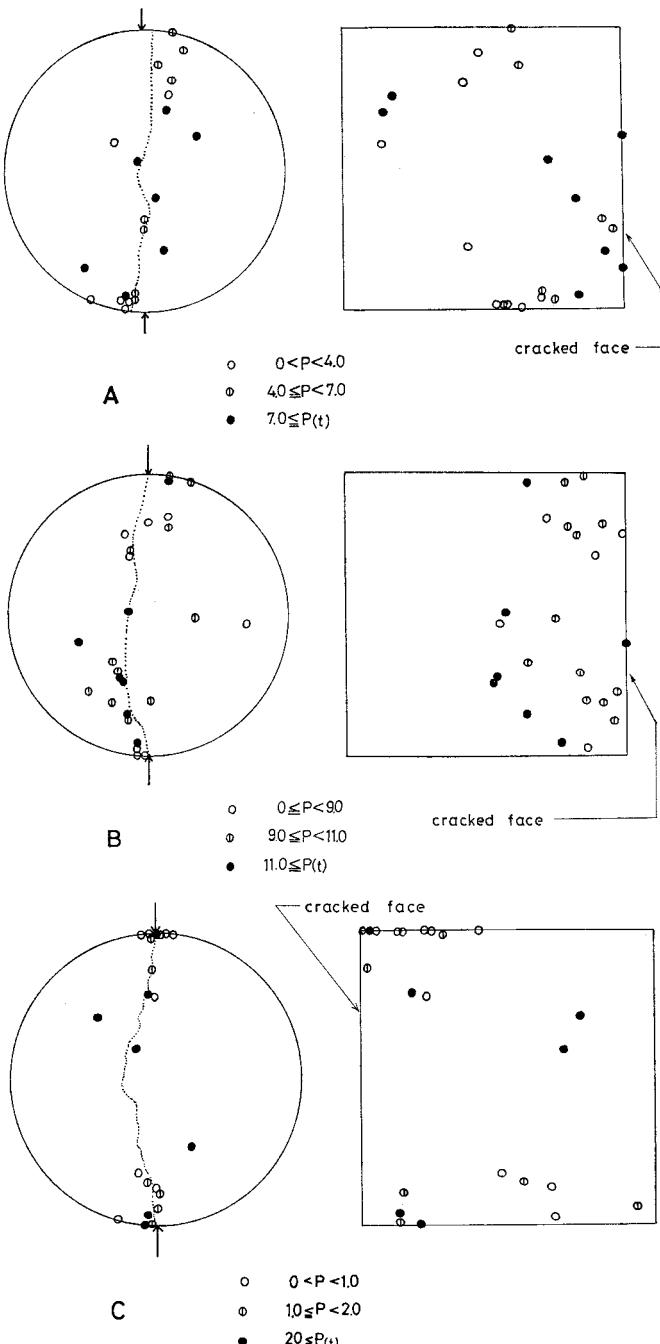


Fig. 11 Sources detected during the split test in specimens A, B, C and D, respectively

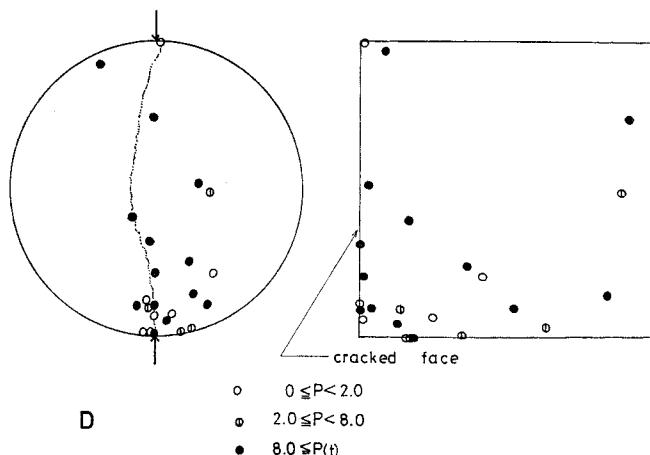


Fig. 11 (continued)

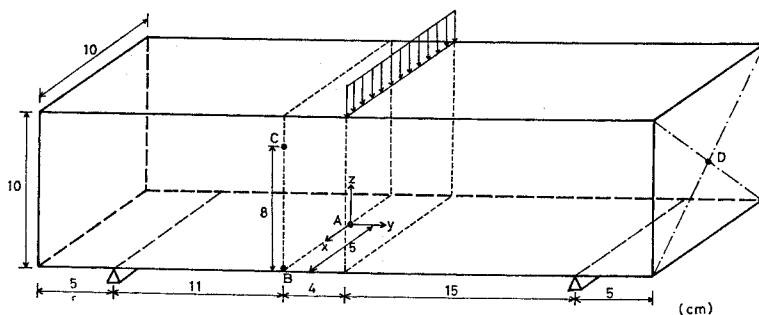


Fig. 12 The reinforced concrete beam model and location of transducers

ここでは、そのような適用性を検討する意味で鉄筋コンクリートはりの破壊過程における破壊源探査を行った。

a) 実験方法

実験に使用した供試体は、水：セメント：砂：粗骨材 = 0.44 : 1 : 2 : 1.5 の配合で鉄筋 (D 10) 一本を用いた $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ (鉄筋深さ $d = 8 \text{ cm}$) のはり供試体である。砂、粗骨材については前回の割裂試験と同じものを用い、養生も前回と同様に行った。この供試体に Fig. 12 に示すように 4 個のトランズデューサー A, B, C, D を配置し、中央載荷による曲げ試験を行った。なお、縦波速度は、予備試験の結果より、鉄筋とコンクリートを含めた複合材料の速度として、 4300 m/sec と求められた。

Table 2 Sources detected in the beam specimen during increasing load

No.	Load (kg)	Sources detected	No.	Load (kg)	Sources detected
1	0~1100	13	5	1460~1720	12
2	1100~1300	17	6	1720~1900	12
3	1300~1460	17	7	1900~2100	12
4	0~1460	22	8	2100~2340	12

b) 実験結果および考察

実験は、2回に分けて行った。1回目は、ひびわれ発生荷重までを目標に 1460 kg まで載荷した。この間に 90 個の AE 現象を検出し、47 点の微小破壊位置が決定された。結果を荷重レベルによって 3 段階 (No. 1, No. 2, No. 3) に分類して Table 2 に示す。また、検出された波形の例を Fig. 13 に示す。なお、可視表面ひびわれ発生荷重は、 1260 kg であった。

2回目は、1か月後に再びこの供試体を鉄筋降伏時まで載荷し、110 個の AE 現象を検出した。これから 70 点の破壊源位置を決定した。結果を 5 段階に分類して Table 2 (No. 4~8) に示す。

Fig. 14 には、Table 2 に示した合計 117 の破壊源を立面図、平面図、側面図にプロットして表わした。

Fig. 14 を見ると、No. 1 では、微小破壊はこの供試体の中央部引張側に全体にランダムに分布している。この段階ですでに、No. 2 段階で発見されたひびわれ発生位置 A に微小破壊が集中し始めていることが観察さ

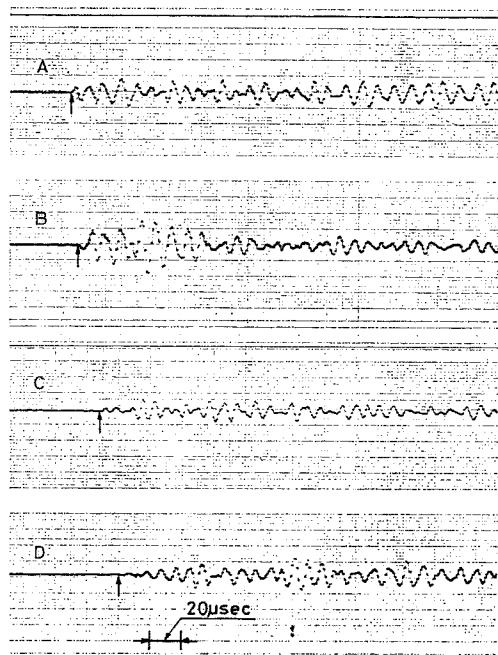


Fig. 13 Acoustic emission signals of four transducers located as shown in Fig. 12

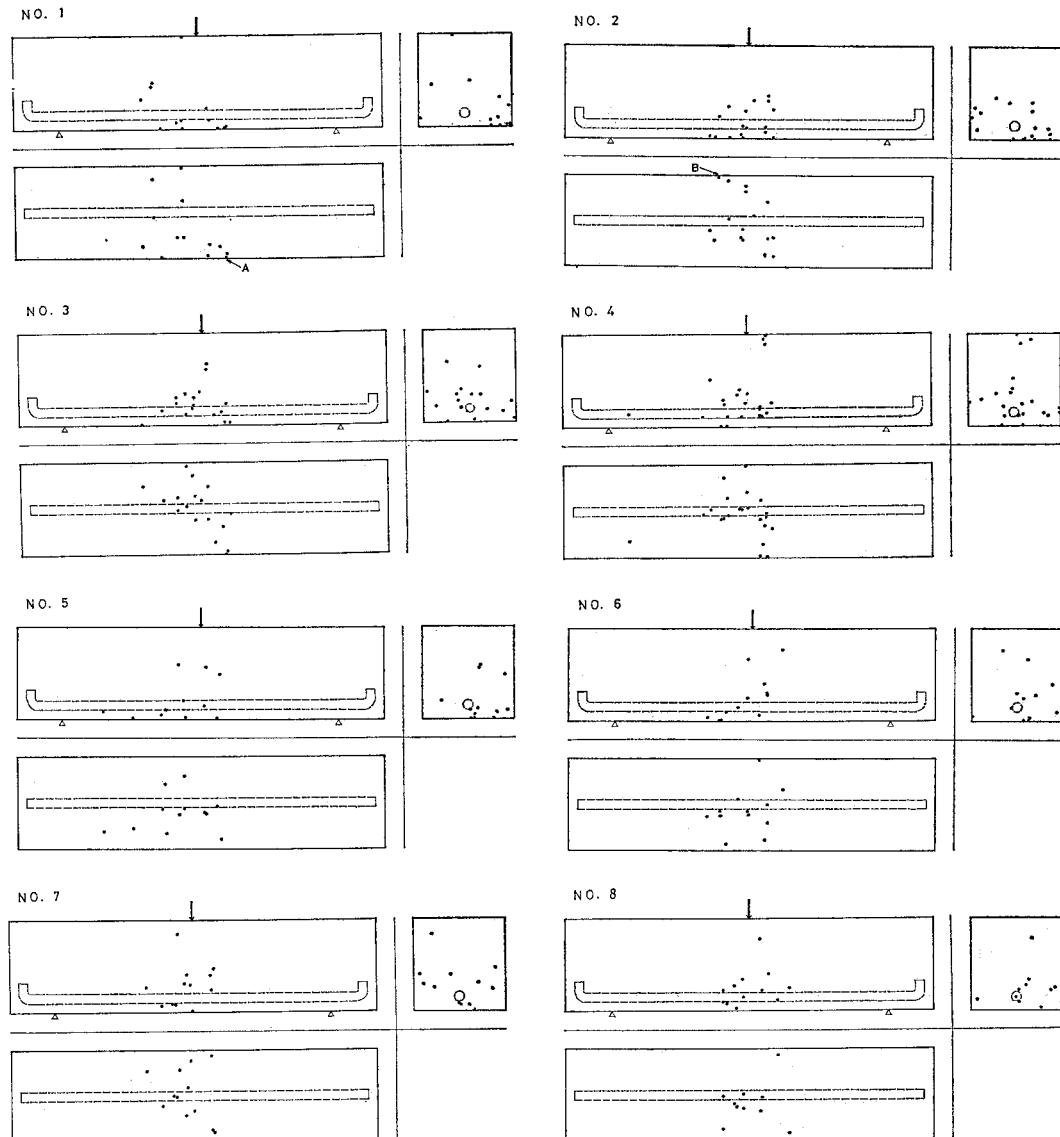


Fig. 14 Sources in the reinforced concrete beam detected during the bending test. No. 1 to No. 3 are in the first trial, and No. 4 to No. 8 are in the second trial

れる。

No. 2 に移ると、微小破壊は供試体引張側に集中しており、はりの引張り側で、ひびわれが発生し始めたと考えられる。この段階で、No. 1 に示した A の領域でひびわれが発見された。また、2回目の載荷試験時に初めて発見されたひびわれ発生位置Bに、すでに微小破壊が集中し始めているのが見られる。No. 3 では、No. 2 で発生した微小破壊が、下部から上方へ向って進行しているのが観察される。

この後、いったん除荷し、1か月後に再度同じ供試体について試験を行い、このような履歴をうけた供試体の挙動を調べた。

No. 4 は、1回目にうけた履歴荷重まで載荷を増加していく間に検出された破壊点をプロットしたものである。この段階では、鉄筋付近に微小破壊が集中して生じていることがわかる。これは、鉄筋とコンクリートの残留ひずみの相異により付着の部分を中心に、微小破壊が発生したためと考えられる。

このことは、No. 5 と比較してみれば理解できるであろう。No. 5 では、No. 4 とまったく異なって、再び微小破壊が供試体引張側で生じており、また、No. 2 とも異なる点で微小破壊が発生している。その後は、1回目と同様に No. 6, No. 7 に見られるように微小破壊は上方へ移動している。しかし、No. 8 に至ると、この段

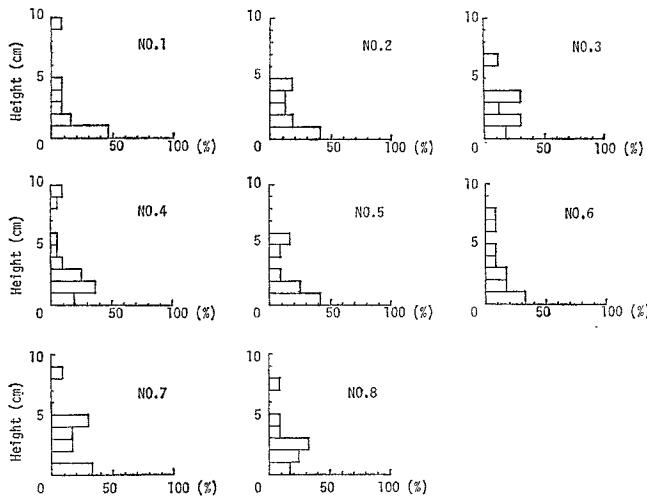


Fig. 15 Histogram of sources as a function of the height of the beam

階で鉄筋は降伏し始めたので、微小破壊は再び鉄筋付近に集中して生じることになった。なお、No. 1 に示した領域 A には、この時点では、1 mm 幅程度の表面ひびわれが生じ、ひびわれ先端は、はりの中央高さ程度まで成長した。No. 4~7 の各段階では、この成長過程に対応した微小破壊が発生しつづけていることがわかる。この事実は、今回の破壊源探査の信頼性を裏づけていると考えられる。

次に、この実験中の破壊源位置の移動の傾向を見る目的で、各荷重段階ごとに、微小破壊発生位置(その高さ)での頻度のヒストグラムを作成した。それを Fig. 15 に示す。Fig. 15 より No. 1 から No. 3 へ、また、No. 5 から No. 7 へと破壊源が上方へ移動している様子が、さらに No. 4, No. 8 において鉄筋付着部周辺に破壊源が集中している様子がよくわかる。

この実験の結果から、土木構造物においても、破壊源探査を適用する可能性が確かめられた。この事実は、コンクリート構造物などのクラック分布、およびその成長状況を刻々把握できることを示唆している。

(3) 一軸圧縮試験における破壊源探査

これまで示した 2 つの破壊源探査の例によって、これが材料試験から模型実験、構造物などあらゆる規模で、非常に広範囲な分野にわたり適用できることが期待される。特に、材料科学の分野では、従来、除荷後の供試体の切断面あるいは切片の観察によってしか追跡できなかった材料内部の微小破壊の成長過程を、供試体表面からの計測により、立体的に把握できる有効な手法となると考えられる。

このような考えのもとに、コンクリートの一軸圧縮下

における微小破壊の成長過程の追跡に、破壊源探査法を適用した。

a) 実験方法

実験には、碎石コンクリート(水:セメント:砂:碎石=0.63:1:2:2.9, 圧縮強度 435 kg/cm²)と軽量コンクリート(水:セメント:砂:軽量粗骨材=0.57:1:2:1.5, 圧縮強度 382 kg/cm²)の 2 種類について 10 cm × 10 cm × 30 cm の角柱供試体を作成した。砂、碎石はこれまでと同じものを用い、養生も同様にした。載荷は、サーボ制御方式の剛性試験機により行った。

AE 検出には、Fig. 16 に示す位置(A~F)にピックアップを配置し計測を行った。ここで F は縦波速度の検討ならびに精度検定用の入力カントラヌスデューサーであり、本実験では、この点より実験中に 10 μsec の Z 方

向方形パルスを入力した。

b) 実験結果および考察

Fig. 16 にも示したように、5 チャンネルでの AE 検出を行ったが、現実には初動の判別しにくい波形が存在したため、破壊源決定には、4 点あるいは 5 点での到達時間差により計算を行い、2 個以上のチャネルで初動の判別しにくい波形となった現象は、前回までと同様に計算から除外した。

一軸圧縮下では、破壊過程の進行につれて、縦波速度に異方性が現われ、その速度の値も変動することが知ら

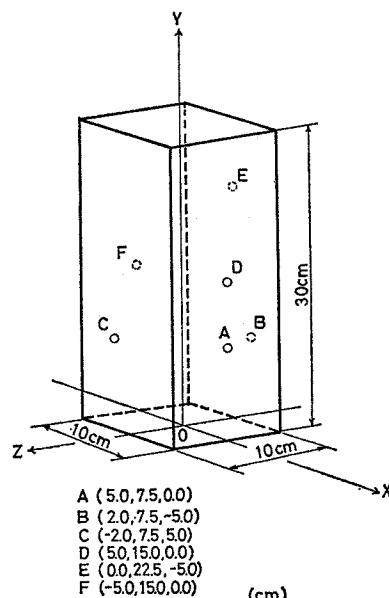


Fig. 16 The uniaxial compression test specimen and location of transducers

れている。そのため、われわれの破壊源探査法のように系全体が、破壊過程で均一な縦波速度を持つと考えた場合には、微小破壊発生位置に大きな誤差が生じる可能性がある。そこで、碎石コンクリートの実験ではF点から入力した100 kHzの方形波に対し、その各トランズデューサーへの到達時間差に差異が生じるあたりで、実験を打ち切った。

Fig. 17は、碎石コンクリートの荷重-変位曲線を示す。図中の曲線上にプロットした黒丸は、破壊源の決定された現象の検出された時点を示している。

前節までの実験と異なり、一軸圧縮下では微小破壊源は、供試体内のどこにでも存在しうる。そのため計算から除外した現象の位置によっては、系内の微小破壊の成長過程を見誤る恐れがある。そこで同図のように、過程をI, II, III領域に分類し、各領域で検出された全現象に対して、波形の到達順からおおまかに発生位置（供試体の両端部から10 cmの部分と中心部10 cmの部分）を求め、その個数をヒストグラムに表わした。ここで、

a) 破壊源の決定できたもの、b) 計算誤差の大きいもの

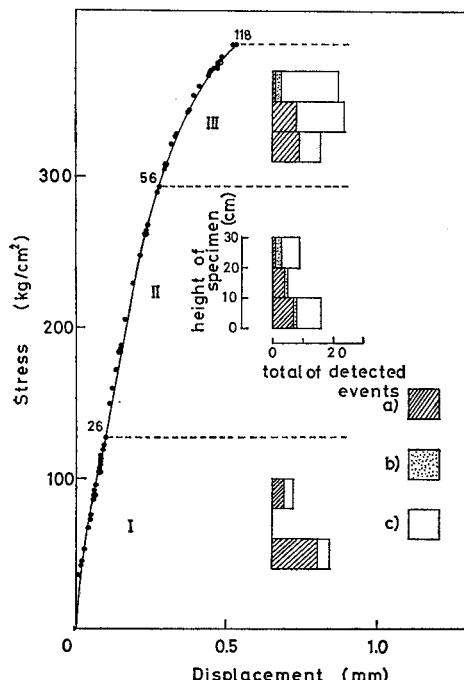


Fig. 17 Stress-displacement curve of the normal concrete specimen in the uniaxial compression test. The Solid circle represents the point at which a source is detected. The histogram shows total detected events expressed in the top, middle and bottom one-thirds of the height of the specimen, respectively. Total detected events are classified into: a) accurately located events, b) inaccurately located events and c) otherwise

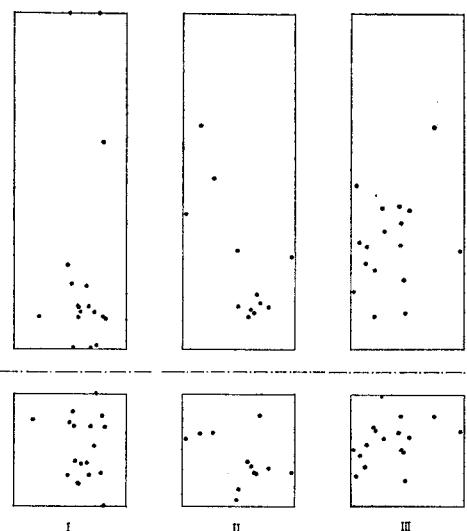


Fig. 18 Sources in the normal concrete specimen during the uniaxial compression test

および解が供試体内に存在しないもの、c) 計算から除外したもの、それぞれの個数を表わしている。

図より、供試体上部で生じたと思われる現象には、計算から除外したものが多いため、これは**Fig. 16**のようにトランズデューサーを供試体上部に1個、下部に3個配置したためであると考えられる。このように破壊形態によても、トランズデューサーの配置には十分な考慮が必要である。実験では118個の現象を検出し、49点の微小破壊源が決定された。その結果を**Fig. 18**(I, II, III)に示す。

Iでは載荷の初期に、微小破壊は載荷面および端面から供試体幅の1/2程度の奥の領域に円錐状に発生しているのが見られる。一軸圧縮時には、初期にAEが多発することが知られているが、これが端面の影響であることが確かめられた。この後、II, IIIと破壊過程の進行につれて、微小破壊源が供試体の端面から内部へと進展していくのが認められる。

この実験においては、載荷中に10回、10μsecのZ方向方形パルスFをより入力したが、その結果、縦波速度は4300 m/secであり、精度検討の結果からは破壊源検出誤差は6 mm以内であった。

次に軽量コンクリートの実験では、縦波速度が変化し始めて後の微小破壊の成長過程も検討するため、圧縮強度の9割程度まで載荷を行った。この荷重-変位曲線を**Fig. 19**に示す。図からも**Fig. 17**と同様に供試体上部で生じた現象には、発生位置の決定困難なものが多いことがわかる。

本実験では、終局付近まで載荷したために、前述の縦波速度の変化が生じると考えられた。簡単のために、縦

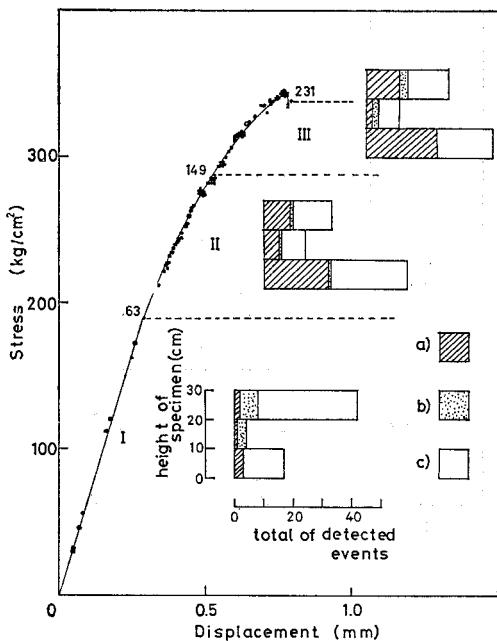


Fig. 19 Stress-displacement curve of the light weight concrete specimen in the uniaxial compression test

Table 3 Accuracy of source location in the light weight concrete specimen during the uniaxial compression test. Coordinates of the signal source at F are (-5.0, 15.0, 0.0)

No.	Stress state (kg/cm ²)	Calculated coordinates by source location (cm)	Longitudinal wave propagation speed (m/s)	Error (cm)
1	32	(-4.9, 14.9, 0.6)	4100	0.62
2	120	(-4.8, 14.2, -0.6)	4100	1.02
3	175	(-4.8, 14.5, -0.1)	4100	0.55
4	236	(-4.8, 14.5, -0.9)	4100	1.05
5	260	(-4.8, 14.4, 0.5)	4000	0.81
6	324	(-5.2, 14.7, -0.1)	3900	0.37
7	334	(-5.1, 14.9, -0.6)	3600	0.62

波速度について異方性はないものと仮定して、等方な平均速度として縦波速度を決定した。その結果は、縦波速度は 4100 m/sec から 3600 m/sec まで変動した。この場合の F 点からの入力による精度検討の結果を Table 3 に示す。これより今回求めた破壊源位置の標定誤差は、上述のような仮定のもとでも 10 mm 程度であると考えられる。

実験では 231 個の現象を検出し（検出された波形の一例を Fig. 20 に示す）、79 点の微小破壊位置を決定した。それを Fig. 21 (I, II, III) に示す。碎石コンクリートの結果と同様に、I, II と端面から内部へと微小破壊は進展し、II では、供試体全体に発生している。領域 III については、ここで微小破壊の発生形態をわかりやすくするために、発生領域で白丸と黒丸に区別してプロットした。この図より、微小破壊が連結され、最終破壊

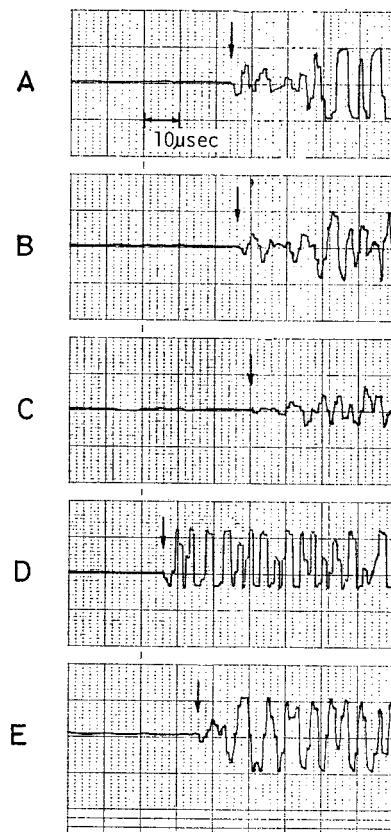


Fig. 20 Acoustic emission signals of five transducers located as shown in Fig. 16

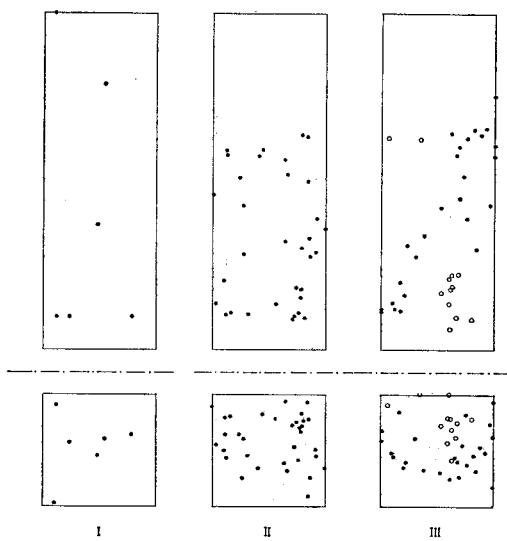


Fig. 21 Sources of the light weight concrete specimen during uniaxial compression test

面の形成へと移行していく様子が観察される。

以上から、一軸圧縮下の微小破壊の成長過程を追跡することも可能であろう。

4. 結論

本研究では、コンクリート構造物の破壊過程におけるAEの発生特性に関する研究の一環として、AEの破壊源探査法について基礎的な検討を試みた。

三次元的な破壊源探査に対しては、4個、あるいは5個のトランスデューサーを用いた計測システムで破壊源探査が可能であることが示された。また、このシステムによる破壊源探査法を割裂試験、鉄筋コンクリートはり試験、一軸圧縮試験に適用することにより、その適用性が認められた。

これより得られたおもな結論は、以下のようである。

(1) われわれの開発した計測システムは、縦波初動の到達時間差を1μsec以内の誤差で検出可能であり、このシステムによる破壊源探査の精度は10mm以内と考えられる。

(2) この精度の検討に際して、AEの波動伝播特性のいくつかが明らかになった。破壊源探査の際のトランスデューサーの配置には、破壊形態も考慮してどのチャネルもほぼ同じ感度となるよう、さらにAE信号の入射角が確実に縦波がとらえられる角度となるよう注意が必要である。

(3) 割裂試験の破壊源探査からは、このような供試体の破壊の成長過程を追跡し、材料内部の構造的変化を供試体表面からの計測により、立体的にとらえる可能性が確かめられた。また、この試験結果から、割裂の破壊過程は、載荷軸を含む面付近の供試体中央部の引張り領域に、微小なクラックが数多く発生し、これが最終的には連結されて面を形成することにより破断に至る過程であると考えられる。

(4) 鉄筋コンクリートはり試験からは、このような複合材料においても破壊源探査法が適用可能なことが認められた。また、この実験より、表面ひびわれ発生までの荷重履歴をうけた鉄筋コンクリートはりでは、履歴荷重までは、鉄筋付着部に微小破壊が集中するが、それ以上の荷重に対しては新たな破壊源から微小破壊が発生することも認められた。

(5) 一軸圧縮試験では、この際の微小破壊の成長過程が追跡された。この結果、一軸圧縮下では、微小破壊は、まず端面付近に集中して発生する。その後、供試体内部へと進展し、これが連結されて最終破壊面形成へと移行していくのが認められた。また、このようなクラック成長により縦波速度の変動が生じる破壊試験に対して

も、10mm以内の精度で破壊源探査を行うことができた。

5. あとがき

AEの破壊源探査は、数あるAEからもたらされる情報のなかでもっとも定量的なものである。本研究によって、土木工学分野での、その有用性は十分確かめられたと考えられる。しかしながら、この技術は完成されたものではなく、探査精度の向上、破壊源標定点数の増大、リアルタイムの処理等、計測装置、技術の両面でさらに研究の必要な問題が山積みしている。

破壊源探査法は、今後、破壊機構の解明、実在構造物の欠陥箇所の発見、クラックの成長状況の把握、健全度の推定等に、その利用価値は非常に高いと考えられ、その実用化への研究が待ち望まれている。

最後に、本研究の実験の遂行にあたり、京都大学土木設計学研究室の松尾哲彦氏、構造力学研究室の大森哲至氏、土木材料学研究室の六郷恵哲氏の各位にご援助いただいたことを付記し、感謝の意を表わしたい。

参考文献

- 1) 丹羽義次・小林昭一・大津政康：コンクリート構造物のアコースティック・エミッション特性に関する基礎的研究、土木学会論文報告集 No. 261, 1977.
- 2) Liptai, R.B., D.O. Harris and C.A. Tatro : An introduction to acoustic emission, Acoustic Emission, ASTM, STP 505, ASTM (1972).
- 3) Blake, W. : Quart. Colorad School of Mines, 67, No. 1, 1972.
- 4) Mogi, K. : Source location of elastic shocks in the fracturing process in rocks, Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 1968.
- 5) Scholz, C.H. : Experimental study of fracturing process in brittle rocks, J. Geophys. 73, 1968.
- 6) Byerlee, J.D. and D. Lockner : Acoustic emission during fluid injection into rock, Proc. First Conf. Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geological Structure and Material, 1975.
- 7) Lockner, D. and J.D. Byerlee : Acoustic emission and fault formation in rocks, ibid. 6).
- 8) Alpan Cete : Seismic source location in the Ruhr District, ibid. 6).
- 9) Miller, W. and S.T. Harding : Error analysis of a five-station P-wave location technique, Bull. Seismo. Soc. Am., 62, No. 4, 1972.
- 10) Salamon, M.D.G. and G.A. Wiebols : Digital location of seismic events by the underground network of seismometers using the arrival times of compressional waves, Rock Mech., 6, 1974.

(1977.8.23・受付)