

アコースティック・エミッション波動の放射形式に関する考察[†]

大津政康*

Radiation Pattern of Acoustic Emission

by

Masayasu OHTSU

(Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto)

Acoustic Emission (abbreviated as AE) is the transient elastic wave emission due to microfracturing in a solid. In the previous paper, theoretical representation of AE wave motions in concrete was reported by applying the theory of dislocation and elastodynamics. Once sources are mathematically described by the dislocation model, AE waveforms generated by various types of source mechanisms are characterized with emphasis on features of the radiation pattern, which is the spatial distribution of amplitude and polarization of first motions.

In this paper, fundamental studies in regard to radiation patterns of AE wave motions are reported. Such patterns are verified in the experiments. In the source location experiments, the types of sources can be classified into two groups from AE characteristics based on the radiation pattern. They are associated with tensile cracks and others.

From the relation between the radiation pattern and the dislocation model, in addition, the orientations of dislocation models may be determined. The improved source location technique useful for such an attempt is developed and applied in the experiments. The results show that the determination of source kinematics by the aid of the radiation pattern is promising in concrete.

(Received Jan. 25, 1982)

キー・ワード：アコースティック・エミッション，放射形式，破壊源探査

1 緒言

材料の破壊に伴って発生するアコースティック・エミッション(AE)は、多くの分野でその特性について、基礎から応用に関する研究が行われている。¹⁾

著者らは、発生機構の解明に関連して、AE 波動を転位モデルより発生する弾性波動と考えた場合の理論的な考察を既に報告している。本論文は、それに基づいて、転位モデル論から導かれる波動の一特性に関して検討し、その適用性を考察したものである。

地震学においては、古くから、一つの地震に対して各地で記録された地震波の振幅が、震源を中心として規則的な空間分布を生じることが知られていた。特に、深発地震では、押し引き分布と呼ばれる縦波の初動分布の顕著に得られることが知られている。このような地震波動における縦波あるいは横波の初動の方向と振幅値の空間的な分布は、放射形式(Radiation Pattern)^{2), 3)}と呼ばれる。そして、転位モデルと放射形式

との対応関係に基づいて、放射形式から地震断層の向きおよび断層運動の方向を決定する試みが行われて⁴⁾いる。

AE 波動においても、そのような議論が可能かどうかは非常に興味あるところである。これは、また、AE の発生機構として導入した転位モデルの妥当性の検討にもなるであろう。さらに、AE 波動に基づいて、破壊機構の分類、転位モデルの決定を行うことが可能ならば、AE の波形解析において放射形式は非常に重要なパラメータになると考えられる。

2 AE 波動の発生機構と放射形式

2・1 転位モデルと放射形式

AE の発生機構を転位モデルで考えた場合には、検出点での変位 $u_i(t)$ は、次のような 2 式で表現される。⁵⁾

$$u_i(t) = \int_0^t G_{ij}(x, t-t'; x') f_j(t') dt' \quad (1)$$

$$u_i(t) = \int_0^t T_{ij}(x, t-t'; x') [u_j(t')] dt' \quad (2)$$

ここで、 f_j は応力の不連続により生じる集中力、 $[u_j]$ は転位面での変位の不連続量である。 $G_{ij}(x, t-t'; x')$

[†] 原稿受理 昭和57年1月25日

* 正会員 熊本大学工学部 熊本市黒髪

は、時刻 t' において点 x' で j 方向に瞬間に力が作用した場合に、時刻 t における点 x での i 方向の変位を表すグリーン関数である。また、 T_{ij} は、 λ 、 μ を Lamé の定数、 $G_{ik,l'}$ が点 x' に関する空間微分を意味するとして、転位面の法線ベクトル ν_i を用いて、次のように表される。

$$T_{ij} = \lambda G_{ik,k} \nu_j + \mu (G_{ij,l'} + G_{il,j'}) \nu_i \quad (3)$$

放射形式とは、これらの式(1)、(2)において、ある転位モデルを仮定した場合に、転位面から十分に遠く離れた地点で得られる振幅の空間的な分布形である。そのため、一般的には波動の伝ばする系が無限弾性体であるとして考察している。

無限弾性体に対するグリーン関数 G_{ij} を表示すれば、次のようにある。³⁾

$$G_{ij}(x, t-t'; x')$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4\pi\rho} (3\gamma_i\gamma_j - \delta_{ij}) \frac{1}{r^3} \int_{r/v_p}^{r/v_s} \tau \cdot \delta(t-t'-\tau) d\tau \\ &+ \frac{1}{4\pi\rho v_p^2} \gamma_i \gamma_j \frac{1}{r} \delta\left(t-t'-\frac{r}{v_p}\right) \\ &- \frac{1}{4\pi\rho v_s^2} (\gamma_i \gamma_j - \delta_{ij}) \frac{1}{r} \delta\left(t-t'-\frac{r}{v_s}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ρ は媒質の密度、 v_p 、 v_s はそれぞれ縦波、横波の速度である。 γ_i は、点 x' から点 x への方向ベクトルを表しており、その距離が $r=|x-x'|$ である。また、 $\delta(t-t')$ はデルタ関数を意味している。

以下では、上記の式に基づいて、各々の転位モデルより得られる縦波初動の放射形式を求める。

(1) 集中力の場合

式(1)において、次のような集中力 $f_j(t')$ を考える。

$$f_j(t') = F \cdot n_j \cdot H(t') \quad (5)$$

ここで、 F は集中力の大きさ、 n_j はその作用する方向を示す単位ベクトル、 $H(t')$ はステップ関数である。

式(5)を式(1)に代入し、変位 u_i から方向ベクトル γ_i と同方向の成分を取り出せば、次のようになる。

$$u_i \cdot \gamma_i = \frac{F}{4\pi\rho v_p^2} \cdot \frac{1}{r} (\gamma_j n_j) H\left(t - \frac{r}{v_p}\right) \quad (6)$$

ここで、グリーン関数は式(4)を用いたが、遠方であることから、 r^{-1} より負べきの大きな項は距離 r とともに速やかに小さくなることを考慮して、 r^{-1} の項のみを対象とした。また、式(4)の第3項は γ_i 方向をとり出すことにより 0 となる。これは、横波成分が波の伝ば方向に直角な振動方向をもつことと対応している。

式(6)で、作用した力の大きさと伝ば媒質の性質および距離に関する項を除けば、検出点に縦波が到達したときに生じる伝ば方向の変位成分の項として $\gamma_j n_j$ が残る。これが、縦波初動の放射形式を示す。

いま、Fig. 1 (a) のように、集中力が座標の原点で x_3 方向に作用している場合を考える。

極座標表示によって、 $\gamma = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi,$

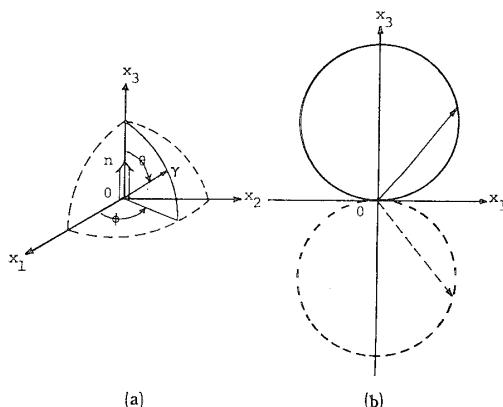


Fig. 1. Dislocation model and radiation pattern, (a) a point force and (b) the radiation pattern for P-wave.

$\cos \theta$) とすれば、 $n=(0, 0, 1)$ であることより、縦波初動の放射形式 $u^{(p)}$ は、次のようになる。

$$u^{(p)} = \gamma_j n_j = \cos \theta \quad (7)$$

これを、 x_1-x_3 平面で描けば、Fig. 1 (b) のようになる。図で実線は正の変位、破線は負の変位を表している。

(2) せん断転位の場合

式(2)で、次のような転位モデルを考える。

$$[u_i(t')] = U n_i H(t') \quad (8)$$

ただし、せん断転位を考えていることより、転位面の法線ベクトル ν と転位の方向ベクトル n は直交しているとする。

式(4)のグリーン関数を式(3)に代入して T_{ij} を求め、これと式(8)を用いて式(2)で、 γ_i 方向の寄与する成分を r^{-1} の項のみから求めれば、

$$u_i \gamma_i = \frac{\mu U}{4\pi\rho v_p^3} \cdot \frac{1}{r} \cdot 2(\gamma_j n_j)(\gamma_i \nu_i) \delta\left(t - \frac{r}{v_p}\right) \quad (9)$$

となる。この式では、 $2(\gamma_j n_j)(\gamma_i \nu_i)$ が、縦波の放射形式に対応している。

Fig. 2 (a) に示すようなせん断転位を考えれば、 $\nu=(0, 0, 1)$ 、 $n=(1, 0, 0)$ であることより、

$$u^{(p)} = 2(\gamma_j n_j)(\gamma_i \nu_i) = \sin 2\theta \cos \phi \quad (10)$$

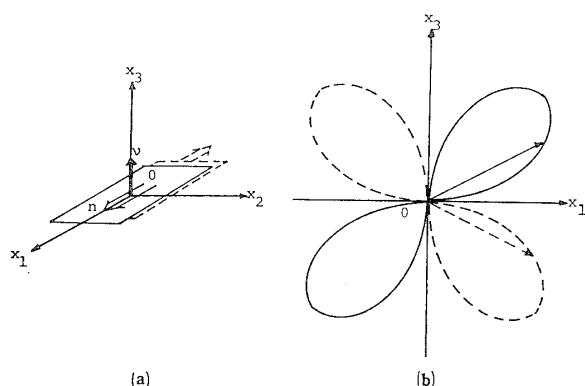


Fig. 2. Dislocation model and radiation pattern, (a) a shear dislocation and (b) the radiation pattern for P-wave.

となる。

これより、 x_1-x_3 平面での縦波初動の放射形式を描けば、Fig. 2 (b) のようになる。図では、四つの象限で正負交互の変位が見られるが、これが地震学で著名な縦波初動の押し引き分布である。

(3) 引張転位の場合

この場合には、式(8)のような転位モデルで ν と n が一致する場合を考える。

せん断の場合と同様にして、縦波の寄与する成分を求めれば、次のようになる。

$$u_i r_i = \frac{\mu U}{4\pi\rho v_p^3} \cdot \frac{1}{r} \left[\frac{\lambda}{\mu} + 2(r_i \nu_i)^2 \right] \delta(t - \frac{r}{v_p}) \quad (11)$$

したがって、Fig. 3 (a) に示すような引張転位を考えれば、ポアソン比 σ を用いて、放射形式 $u^{(p)}$ は、次のようになる。

$$u^{(p)} = \frac{2\sigma}{1-2\sigma} + 2 \cos^2 \theta \quad (12)$$

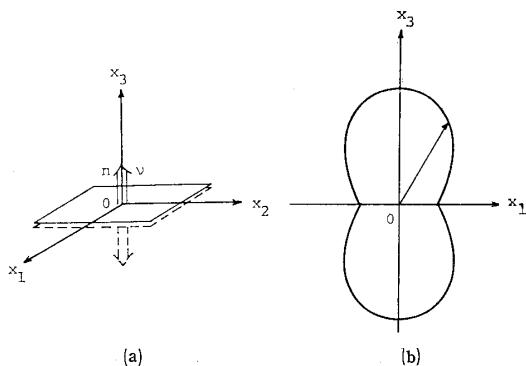


Fig. 3. Dislocation model and radiation pattern, (a) a tensile dislocation and (b) the radiation pattern for P-wave.

上式より、ポアソン比 $\sigma=0.25$ の場合における x_1-x_3 平面での放射形式を求めれば、Fig. 3 (b) のようになる。図より、引張転位の場合には、他の場合と異って、すべての方向で縦波初動は正となっていることがわかる。

2・2 無限体と半無限体の初動比較

放射形式の誘導では、遠方項 (far field term)³⁾ と呼ばれる r^{-1} の項のみを考慮した。ところが、実際に検出される AE 波動は、遠方とは考えられない近距離

の場合もあり、無限体ではなく半無限弾性体での波動と考えるのが妥当である。²⁾

それらの相違による放射形式への影響を検討するため、グリーン関数から求められる波動の縦波、横波成分の振幅値を対象として考察する。

無限体のグリーン関数は、式(4)に示してあるが、時間に対してステップ関数的に力が作用する場合の解で比較する。式(4)のデルタ関数をステップ関数で置換し、 $t-t' \equiv t$ とする。半無限体のグリーン関数との比較を容易にするため $\pi^2 \mu r$ を乗じて無次元化したものを UN_{ij} とすれば、

$$\begin{aligned} UN_{ij}(x, t-t'; x') &= \frac{\pi}{4} (3r_i r_j - \delta_{ij}) \left[\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{v_s t}{r} \right)^2 - \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \right\} H\left(t - \frac{r}{v_p}\right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{v_s t}{r} \right)^2 - 1 \right] H\left(t - \frac{r}{v_s}\right) \right] \\ &\quad + \frac{\pi}{4} r_i r_j \left\{ \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 H\left(t - \frac{r}{v_p}\right) - H\left(t - \frac{r}{v_s}\right) \right\} \\ &\quad + \delta_{ij} H\left(t - \frac{r}{v_s}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。

上式に基づいて、放射形式を求める際に対象とした遠方項のみを UF_{ij} とするならば、それは式(13)の右辺第2項、3項で与えられる。

半無限のグリーン関数は数値積分により求められるが、その詳細は別報を参照されたい。ここでは、それを HG_{ij} と記すこととする。

実際にいくつかの場合のグリーン関数を求め、 UN_{ij} 、 UF_{ij} 、 HG_{ij} における縦波、横波の振幅値の比較を行った。選ばれた問題は、弾性体内部に作用する集中力に対する変位を求めており、 HG_{ij} では自由表面での変位となっている。計算に際しては、後の実験に対応するように媒質はモルタルを想定し、 $v_p = 4000 \text{ m/sec}$ 、 $\sigma = 0.2$ とした。

HG_{ij} と UN_{ij} の縦波および横波の振幅比 (GNP, GNS), HG_{ij} と UF_{ij} の振幅比 (GFP, GFS) を数値計算により求めた結果の例を Fig. 4 に示す。この検討により、入射角 θ の変化について横波の振幅比は非常に大きく変動するが、縦波初動の HG_{ij} の振幅比

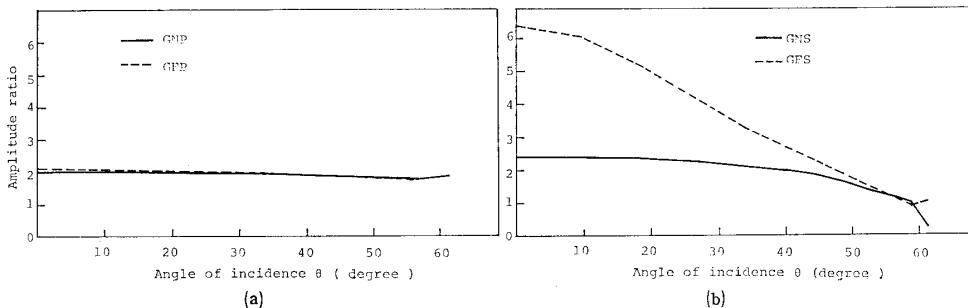


Fig. 4. Amplitude ratio HG_{33}/UN_{33} and HG_{33}/UF_{33} for (a) P-wave and (b) S-wave.

は、 UN_{ij} , UF_{ij} のどちらに対しても角度 θ とは無関係にほぼ 2 倍であることがわかった。したがって、縦波初動のみを対象とするならば、無限体における遠方項のみを考慮して誘導した放射形式が、AE 波動においても得られるであろうことが確認できた。

3 AE の検出波動と放射形式

3・1 縦波初動の放射形式の実験的検証

本節の実験は、AE 波動を転位モデルから発生する弾性波動と考えることの妥当性の検討も兼ねている。

以後の実験で使用する AE 計測装置は、既報のものと全く同じものである。⁶⁾

(1) 集中力の場合

実験には、セメント：標準砂：水 = 1 : 2 : 0.6 のモルタルと Table I に示すような配合のコンクリートの供試体を使用した。φ 15 cm × 15 cm の円柱を軸方向に切断した半円柱供試体の切断面中心に設置した変換子に方形波電圧パルスを入力することにより、集中力を生じさせた。そして、入射角度 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ の位置に AE 変換子を装着し、検出された縦波初動の振幅値を読み取った。

Table I. Mix proportion of concrete.

Maximum gravel size (mm)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	W/C (%)	S/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
10	313	119	63.5	34.2	626	1 252

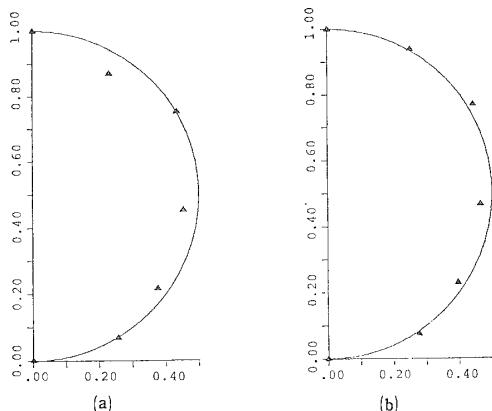


Fig. 5. Experimental results of radiation patterns ▲ due to a point force, (a) mortar and (b) concrete.

$\theta = 0^\circ$ の振幅値を 1 として、それぞれの角度における検出振幅の比を、実験結果より求めたものを Fig. 5 に示す。図には、Fig. 1 (b) の第 1 象限の理論曲線も示してある。モルタル、コンクリート供試体とともに、放射形式の理論曲線の上に実験値▲がほぼ分布しているのがわかる。

(2) せん断転位の場合

実験としては、スリットモデル供試体の一軸圧縮試

験を行った。供試体は、10.5 cm × 10.5 cm × 1.0 cm の PMMA の板に、20.0 mm × 0.4 mm のスリットを設けたものである。この試験では、引張転位とせん断転位が発生することが知られているが、ここでは除荷時に発生するせん断転位からの AE 波動を検出した。

4箇所の変換子で検出された AE 波動をすべて同時記録し、縦波初動の向きからせん断転位によると考えられるもので、供試体のほぼ中央で発生した現象の波形記録を抽出した。

求められた結果の 1 例を Fig. 6 に示す。実験結果は、Fig. 2 (b) の第 2 象限と対応するため破線で示した理論曲線とよく一致している。

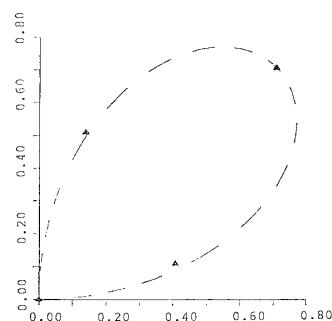


Fig. 6. Experimental result of radiation patterns ▲ due to a shear dislocation.

(3) 引張転位の場合

中心に φ 10 mm の空洞をあけた円柱供試体の割裂試験を行った。供試体の配合は、前述の集中力の場合の供試体と同様である。5箇所に AE 変換子を装着し、載荷中に AE 波動を検出した。データとしては、空洞付近で発生したと考えられるすべての検出点への到達時刻のほぼ等しいもののみを採用した。

結果の例を Fig. 7 に示す。図より、Fig. 3 (b) の第 1 象限に対応した理論曲線の上に、実験値▲がほぼ分布しているのがわかる。

以上のように、3種類の代表的な転位モデルから導

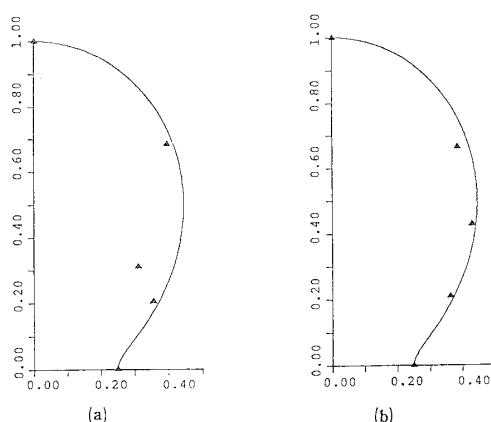


Fig. 7. Experimental results of radiation patterns ▲ due to a tensile dislocation, (a) mortar and (b) concrete.

かれるそれぞれの放射形式に対して、実験的な検証を行うことができた。

3・2 破壊機構の分類に関する実験的考察

ここまで結果より、AE 現象が発生した際に、多点で波動を検出すれば、初動振幅の空間分布は放射形式に従うと考えられる。そのような情報は、破壊源探査での波形記録そのものから得ることが可能である。

(1) 破壊機構の分類法

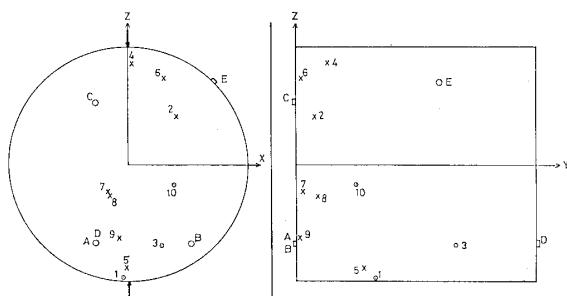
Fig. 1, 2, 3 を参照すれば、縦波初動の向きのみによって、破壊機構を分類できることがわかる。それは、引張クラックの場合のみすべての方向で変位が正となることに着目し、それとその他の機構に分類するものである。

破壊源探査には、5 チャンネルの計測システムを使用した。⁸⁾ したがって、変換子の位置と転位の方向によつては、せん断転位の場合の4象限モデルが完全には得られないこともあろう。そのような場合にも、この分類法は有効である。

(2) 適用例

上述の分類法を、割裂試験、単鉄筋はりの曲げ試験での破壊源探査に適用した。割裂用供試体 ($\phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$)、曲げ供試体 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, D10 1 本使用) とともに、放射形式の実験的検証で使用したのと同じ配合のモルタル、コンクリートから成っている。

割裂試験での結果の例を Fig. 8 に示す。試験後の観察によれば、破壊源の密に分布している側の面で表面ひび割れが見られた。図では、引張転位以外の機構による現象は、その表面ひび割れの付近に多く見られる。したがって、それらは開口したクラックの閉塞あるいはすべりなどにより発生したのではないかと考えられる。



No.	No.
1 3.30 ton	6 7.96 ton
2 3.80 ton	7 8.50 ton
3 4.52 ton	8 8.94 ton
4 6.58 ton	9 9.44 ton
5 7.46 ton	10 9.60 ton

Fig. 8. Detected sources in the split test of concrete, sources ○ due to tensile cracks and × otherwise. The number of sources and the load value at which the corresponding sources were detected are shown below the graph.

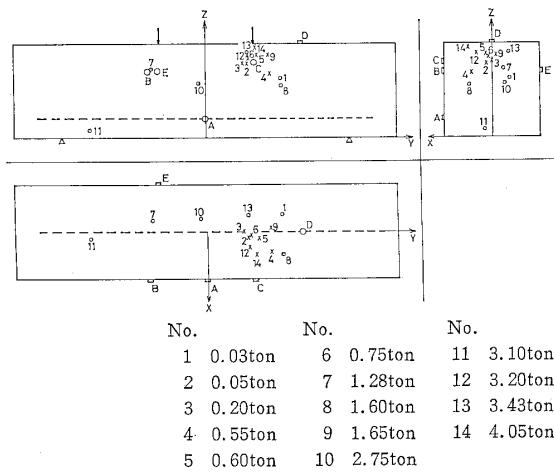


Fig. 9. Detected sources in the bending test of a reinforced concrete beam, sources ○ due to tensile cracks and × otherwise. The number of sources and the load value at which the corresponding sources were detected are shown below the graph.

単鉄筋コンクリートはりの曲げ試験結果を Fig. 9 に示す。図の結果では、供試体の下部には引張クラックによる現象が主に見られ、供試体上部、特に載荷点付近にはそれ以外の機構による現象が多く見られる。これは、供試体下部の曲げひび割れの発達および載荷点付近のコンクリートの圧壊などに対応していると考えられる。

以上の結果より、破壊源探査の際に、波形の初動に着目し放射形式を考慮すれば、破壊の位置のみならず、機構に関する情報ももたらされることが示された。

3・3 転位モデルの運動学的要因の決定に関する実験的考察

つぎに、破壊機構の分類のみならず、放射形式に基づいて転位モデルを決定する方法について考察する。

それは、AE 変換子は設置された面に対する法線方向の成分を検出すると考えられることより、それを考慮した式(6), (9), (11)と同様な式を各検出点について立て、その式から未知量である n , v などのベクトルを決定するものである。

(1) 集中力の場合

実験には、Fig. 10 に示すような $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ の角柱供試体を用いた。この供試体も前と同じ配

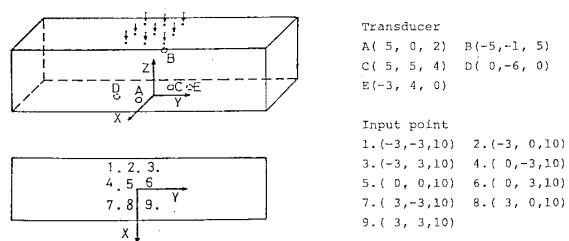


Fig. 10. Location of transducers and input points in the experiment for a point force.

合のモルタル、コンクリートを使用して作成した。

実験では、図の1から9の入力点に設置した変換子に方形波パルスを入力し図の座標の z 軸方向に集中力を作用させた。そして、発生したAE波形をA点からE点に装着したAE変換子により検出した。波形データから破壊源探査を行った後、各検出点に対して立てた初動の振幅値を用いた連立方程式系からの集中力の作用方向 n を決定した。これには最小自乗法を使用した。

コンクリート供試体の実験結果をFig. 11に示す。コンクリート供試体での作用点9に対するAE波形では、雑音のため信頼すべきデータが得られず、結果は除外した。図より、探査位置は、実際の作用点の位置に対して、全体的に1cm程度の誤差で求まっていることがわかる。集中力の作用方向も、探査精度の良いものについては、かなり良く決定されている。

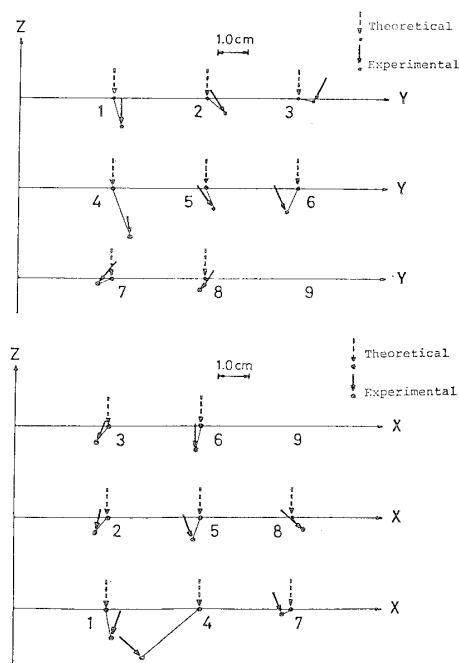


Fig. 11. Detected sources and directions of point forces obtained in a concrete specimen.

結果をもう少し詳細に検討するため、入力点3, 5, 7の三つの場合に、各検出点で得られた初動の振幅値と、半無限のグリーン関数を計算して得られた縦波振幅値を比較したものをFig. 12に示す。実線が解析値、破線が実験値を示している。図では、解析、実験とともに、最大振幅を1として他の検出点での振幅はそれに対する比で表している。入力点5の場合には、実験と解析はほぼ同様な傾向を示している。入力点3, 7の場合にはかなり異なる傾向を示し、入力点7に対する検出点A, Cの実験値では符号まで異っている。入力点7に対する検出点A, Cでのグリーン関数を調べた結果、この場合には、縦波の振幅は小さく、横波の振幅は逆向きで大きいことがわかった。これは、変換子への波動の入射角が検出面に対し浅い場合の特徴である。これより実験では、雑音のために縦波以後に現れた波動を検出した結果、振幅値が逆転したと考えられる。

(2) せん断および引張転位の場合

実験としては、せん断転位の放射形式の検証と同じスリットモデル供試体の一軸圧縮試験を行った。前述のようにこの試験ではせん断転位と引張転位が発生する。それらの転位は、2次元問題として取り扱ってよいと考えられたため、Fig. 13(a), (b)に示すような4チャンネルの計測システムを使用した。供試体中央部から発生するAE波動に対して、Fig. 13(a)に示す変

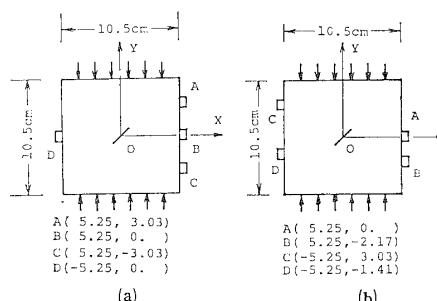


Fig. 13. Slit model specimen and location of transducers for (a) tensile dislocations and (b) shear dislocations.

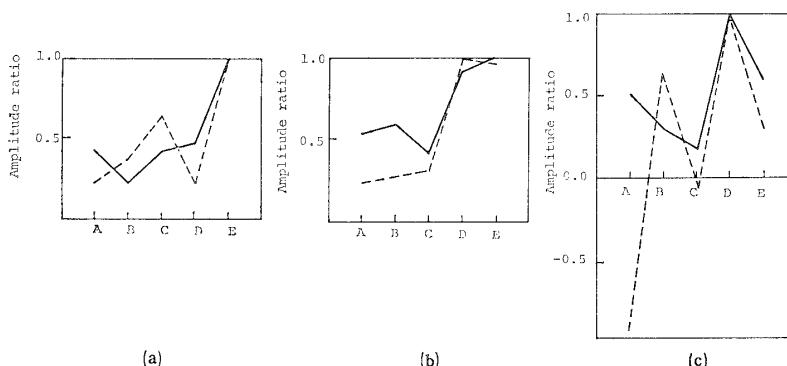


Fig. 12. Comparison between the amplitude of P-wave for a half space and obtained by experiments, due to a point force at the point (a) 3, (b) 5, and (c) 7 shown in Fig. 10.

換子の配置では、第1近似解が特異となりやすい。そのため、せん断転位の破壊源探査を目的として変換子配置を変化させたものが、Fig. 13 (b)である。⁸⁾

Fig. 13 (a)の変換子配置での載荷実験中に検出されたAE波動から破壊源の位置を決定し、さらに初動の振幅値から n 、 ν を決定した引張転位の例をFig. 14 (a)に示す。図で破線は、実験中に観察された引張クラックを示している。転位の発生位置は、ほぼスリットの両端部にあり、かつ、求められた転位面と変位のくい違いの方向は、実際に観察された引張クラックの方向と非常によく一致している。

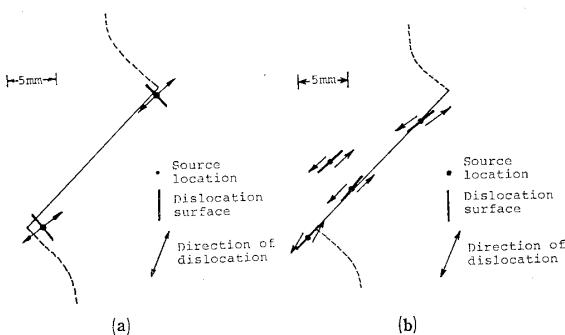


Fig. 14. Location of sources, orientation of dislocation surfaces, and direction of discontinuity in displacements obtained by the experiments for (a) tensile dislocations and (b) shear dislocations.

つぎに、Fig. 13 (b)の変換子配置の実験により得られたせん断転位に関する結果をFig. 14 (b)に示す。図のように、転位面はスリット面上にほぼ分布しており、転位上の変位成分もその面での摩擦すべりとして予測されるものとその方向はよく一致している。

この実験の結果より明らかのように、引張転位、せん断転位ともに、放射形式から求めた結果は、実験中に観察されたものと見事に一致している。

4 結 言

放射形式というAE波形の一特徴から、AE波動を転位モデルから発生する弾性波動と考える妥当性が示された。さらに、破壊源探査法に適用すれば、転位モデルの運動学的要因の決定が行えることも認められた。そのような新しい破壊源探査法は、コンクリート構造物の微小破壊の監視において、有益な情報をもたらすものとなると考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたって終始ご指導、ご鞭撻を賜わった京都大学工学部丹羽義次教授、ならびに小林昭一教授に深く感謝の意を表したい。また、実験、解析にあたっては、京都大学構造力学研究室の仲村治朗氏に援助いただいた。同氏に謝意を表するものである。

(昭和56年10月7日 第36回土木学会年次学術講演会にて一部講演)

参 考 文 献

- 1) 第3回 AE総合カンファレンス論文集(1981) 日本非破壊検査協会
- 2) 丹羽義次、小林昭一、大津政康、土木学会論文報告集, No. 314, 125 (1981).
- 3) K. Aki and P. G. Richards, "Quantitative Seismology Theory and Method" (1980) W. H. Freeman Company, San Francisco
- 4) K. Kasahara, Bull. Seism. Soc. Am., **53**, No. 1, 1 (1963).
- 5) Y. Niwa, S. Kobayashi and M. Ohtsu, Proc. 3rd Conf. AE/MA in Geol. Stru. Mat. (1981).
- 6) 丹羽義次、小林昭一、大津政康、奥田和男、土木学会論文報告集, No. 314, 137 (1981).
- 7) 小林昭一、材料, **20**, 164 (1971).
- 8) 丹羽義次、小林昭一、大津政康、土木学会論文報告集, No. 276, 135 (1978).