

京都大学工学部 正員 廣瀬 壯一  
九州電力 正員 千田 善晴

京都大学工学部 正員 丹羽 義次

### 1. はじめに

材料の破壊に伴って発生するAEは、地震波と類似な波動であると考えられ、その波形解析において、地震学の分野でよく用いられる転位モデルを適用することは妥当であると思われる。丹羽・大津らは、主に、点転位モデルを用いて、AEの発生機構に関して、多くの興味ある結果を得ている。本研究においては、AE発生源を、移動転位モデルによってモデル化し、その発生機構を明らかにしようとするものである。

### 2. 移動転位モデル

Fig. 1 に示すように、2次元均質等方弾性体V内にある転位面 $\Sigma$ を考え、 $\Sigma$ 上で $\Delta u(x, t)$ だけの変位のくい違い(転位)が生じたとすると、点Xにおける変位は、次式で表わされる。

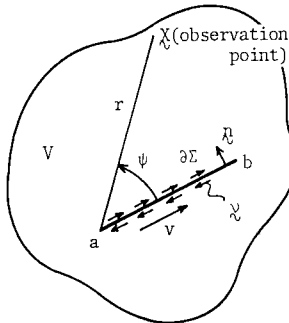


Fig. 1 移動転位モデル

$$u_k(x, t) = \int_{\Sigma} dt \int_{\Sigma} C_{ijpg}(\xi) G_{pg}(\xi, t - \tau; 0) n_j \Delta u_i(\xi, \tau) d\xi \quad (1)$$

ただし、 $C_{ijpg}$ 、 $n_j$ は、それぞれ、弾性定数、 $\Sigma$ 上の法線ベクトルを表わし、 $G_{pg}$ は、基本解である。ここで、転位面 $\Sigma$ 、転位 $\Delta u(x, t)$ に関して次のような仮定を行う。

- (I) 転位面 $\Sigma$ は平面であり、長さを $l$ とする。
- (II) 転位 $\Delta u$ は、 $\Sigma$ 上の至る所で、同じ方向 $\lambda$ 、同じ大きさを持ち、点aから点bに向って、一方向に一定速度 $v$ で伝播する。また、その立上り関数を $f(t)$ とする。

以上の仮定により、転位 $\Delta u(x, t)$ は次のように表せる。

$$\Delta u(\xi, t) = \frac{1}{2} f(t - \xi/v) (H(\xi) - H(\xi - l)) \quad (2)$$

ここで、 $H(\cdot)$ は、Heaviside関数であり、座標 $\xi$ は、点aを原点とし、 $\xi$ の正軸を転位面に一致するようになった。式(2)を式(1)に代入し、さらに、P波の遠方項のみを考慮すると、点Xにおける加速度 $\ddot{u}_k(x, t)$ のP波初動部分、

$\ddot{u}_k^{first}(x, t)$ は、

$$\ddot{u}_k^{first}(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi} \rho \alpha^{3/2}} \frac{C_{ijpg} n_j \mu_i}{\alpha \xi_0 - \cos \lambda} \frac{r_{pg} r_{hk}}{\sqrt{r}} \frac{f(t - \frac{r}{\alpha})}{\sqrt{t - \frac{r}{\alpha}}} \quad (3)$$

となる。ただし、 $r \equiv |x|$ 、また、 $\alpha$ 、 $\rho$ は、P波速度と密度を表わし、 $\lambda$ は、 $\xi$ と $\xi_0$ 軸のなす角である。一方、式(1)をフーリエ変換し、前と同様、P波の遠方項のみを考えると、加速度のフーリエ変換 $\hat{\ddot{u}}_k(x, \omega)$ は、

$$\hat{\ddot{u}}_k(x, \omega) = \frac{\omega^{3/2}}{2\sqrt{2\pi} \rho \alpha^{3/2}} \frac{C_{ijpg} n_j \mu_i}{\alpha \xi_0 - \cos \lambda} \frac{r_{pg} r_{hk}}{\sqrt{r}} \hat{f}(\omega) M(x, \omega) \quad (4)$$

$$M(x, \omega) \equiv e^{i(\omega r - \frac{\pi}{2})} \left\{ e^{i\omega l(t - \frac{r}{\alpha} - \frac{\cos \lambda}{\alpha})} - 1 \right\}$$

となる。ただし、 $\hat{f}(\omega)$ は $f(t)$ のフーリエ変換を表わす。

### 3. 波形解析法

前節における仮定より、決定すべきAE発生源のパラメータは次のように列挙される。

- (i) 転位の位置(破壊源の位置)
- (ii) 運動学的要因(破壊の方向 $\lambda$ 、速度 $v$ 、長さ $l$ )
- (iii) 動力学的要因(立上り関数 $f(t)$ 、立上り時間 $T_r$ )

本研究では、これらのパラメータを式(3)、あるいは、式(4)を用いて、次のように決定した。まず、破壊源の位置は、多チャンネルで観測されたAE初動の到達時間差より容易に計算できる。従って、式(3)、(4)における $r$ 、 $n_i$ などは既知となる。次に、任意の2点 $X_A$ 、 $X_B$ で得られたAEのP波初動に着目し、それぞれ、 $t_A - |X_A|/\alpha = t_B - |X_B|/\alpha$ を満たす時刻 $t_A$ 、 $t_B$ における振幅の比をとる。この時、

$$\Omega(v, \lambda) \equiv \ddot{u}_k^{first}(X_A, t_A) / \ddot{u}_k^{first}(X_B, t_B) \quad (5)$$

なる $\Omega$ は、破壊の速度 $v$ と方向 $\lambda$ を未知数とする関数となる。従って、AEをいくつかの点で検出し、式(5)を少なくとも2組、構成すれば、 $v$ と $\lambda$ は決定される。さらに、破壊源の位置、並びに、 $v$ 、 $\lambda$ は既知であるとして、任意の2点 $X_A$ 、 $X_B$ におけるP波のスペクトル比をとれば、

$$\Pi(l) \equiv \hat{\ddot{u}}(X_A, \omega) / \hat{\ddot{u}}(X_B, \omega) \quad (6)$$

となり、これより、破壊の長さ $l$ も決定できる。動力学的パラメータである立上り関数 $f(t)$ は、陽に求めること

が困難なので、ramp function であると仮定して、式(4)の  $\hat{a}_h(x, \omega)$  が実験で得られた加速度波形のフーリエ変換に最も一致するように立ち上がり時間  $T_r$  を決定した。

4. 実験、及び、結果

PMMA (商品名アクリライト) の  $110 \times 110 \times 10 \text{ mm}$  の供試体の載荷実験により、引張転位とせん断転位を発生させた。引張転位は、長さ  $10 \text{ mm}$  のスリットを入れている供試体の曲げ試験により発生させ (Fig. 2 参照)、せん断転位は、中央に長さ  $20 \text{ mm}$  のスリットを入れた供試体の圧縮試験の際のスリット面のすべりにより発生させた (Fig. 3 参照)。いずれの場合も、A~D の 4 チャンセルの AE 計測装置を用いて、Sampling time  $1 \mu \text{ sec}$  で波形を検出した。

結果の一例を Fig. 2、3 に示す。これらの図において破線は、実験後、観察されたクラックの位置を示し、黒丸は、求められた破壊源の位置を示す。また、各国の下图は、破壊源付近の拡大図であり、矢印の方向が、求め

られた破壊の進行方向を、矢印の長さが破壊の長さを表わしている。その他の得られた主な結果は、表としてまとめた。これらの結果より、破壊の位置、方向、長さとも、妥当な値が得られていることがわかる。また、破壊速度、立ち上がり時間については、その真値は未知であるが、立ち上がり時間は、いずれの場合も、約  $10 \mu \text{ sec}$  前後に収束している。破壊速度については、約  $200 \text{ m/sec}$  から、 $700 \text{ m/sec}$  までの広範囲に分布している (他の供試体の実験結果の中には、 $1500 \text{ m/sec}$  以上の値も得られた)。このばらつきの原因については、今のところ不明である。

参考文献

- 1) 丹羽, 小林, 大津, 土木学会論文報告集, 第214号, 1981.
- 2) Niwa, Y., S. Kobayashi, and M. Ohtsu, Proc. 3rd Conf. AE/MA in Geol. Struct. Mat., 1981.

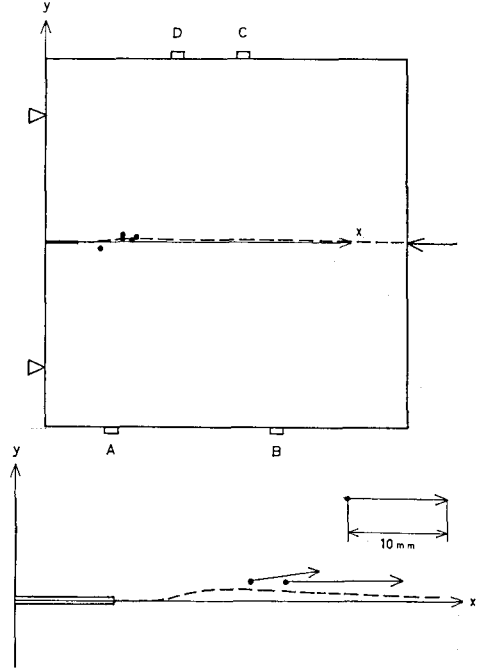


Fig. 2 引張転位に関する実験解析例

Table 1 得られた主な結果 (引張転位)

|      | LOCATION |        | VELOCITY<br>v (m/sec) | LENGTH<br>l (mm) | RISE TIME<br>Tr (μsec) |
|------|----------|--------|-----------------------|------------------|------------------------|
|      | x (mm)   | y (mm) |                       |                  |                        |
| No.1 | 23.8     | 2.3    | 280                   | 6.73             | 8.5                    |
| No.2 | 27.0     | 1.6    | 462                   | 11.63            | 9.0                    |

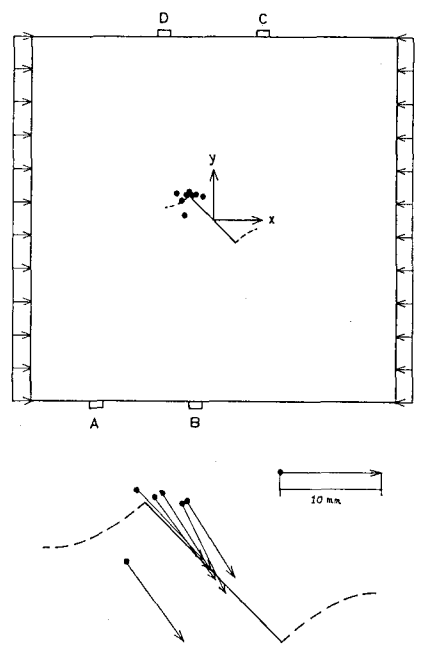


Fig. 3 せん断転位に関する実験解析例

Table 2 得られた主な結果 (せん断転位)

|      | LOCATION |        | VELOCITY<br>v (m/sec) | LENGTH<br>l (mm) | RISE TIME<br>Tr (μsec) |
|------|----------|--------|-----------------------|------------------|------------------------|
|      | x (mm)   | y (mm) |                       |                  |                        |
| No.1 | -5.2     | 7.6    | 492                   | 9.38             | 10.0                   |
| No.2 | -3.1     | 6.9    | 685                   | 10.28            | 10.0                   |
| No.3 | -3.1     | 6.9    | 623                   | 9.28             | 10.0                   |
| No.4 | -3.1     | 6.9    | 641                   | 10.39            | 11.0                   |
| No.5 | -5.9     | 7.5    | 154                   | 10.47            | 9.0                    |
| No.6 | -7.3     | 8.5    | 215                   | 10.09            | 8.5                    |