

(70) 断層モデルによるA E波動のシミュレーションについて

徳島大学工学部 正員 石垣 昌邦

徳島大学工学部

正員 藤井 清司

徳島大学工学部

正員 澤田 勉

1. まえがき

岩質材料の破壊に伴って発生するA E波動を微視的な地震動とみなし、これを断層モデルなどによって再現する試みは、A E波動の発生機構を説明するうえで有用である。大津らは¹⁾モルタルおよびコンクリート供試体の割裂試験および押し抜きせん断試験を行い、実験より得られたA E波動を転移モデルによってシミュレートし、両者を比較することによってA E波動の発生機構に考察を加えた。さらに、A E波動の周波数分析を発生機構解明のための波形解析法として位置づけ、食い違いモデル論に基づいて発生機構を決定する手法を提示した。²⁾

以上の研究においては、A E波動の初動部分が解析の対象にされた。しかしながら、一般のA E波動の解析においては、初動部のみならず強震部も重要であり、強震部の波動特性を把握することはA E波動の一般的特性を明らかにするうえで必要である。このような観点より、本研究では、モルタル供試体のせん断ずれ試験より得られるA E波動の強震部に注目して、これを断層モデルによってシミュレートすることを試みた。そして、両者を比較することによって、A E波動と理論波動の対応性について若干の考察を加えた。

2. 断層モデルによる理論波動の作成方法

Hirasawaらは³⁾Fig. 1に示すような円形クラックの破壊によって生ずる理論波動の解析解を求めた(Hirasawaモデル)。

このモデルの特徴は、円形クラックの破壊時の応力降下量に着目し、破壊の終端位相(Stopping phase)を考慮することによって短周期波を発生させる点にある。Akiらは⁴⁾Fig. 2のように断層面を多数の円形クラックに分割し、各々の円形クラックより生ずる要素波を重ね合わせることによって理論波動を作成する手法を提案し、これをbarrierモデルと名付けた。本研究では、A E波動が短周期波から成ることを考慮して、このモデルを用いて理論波動を作成する。Fig. 2に示す断層面上の任意の円形クラックから発生する要素加速度波のフーリエスペクトル $A(\omega)$ は、Fig. 1の座標系を用いると、次式のように表される。⁵⁾

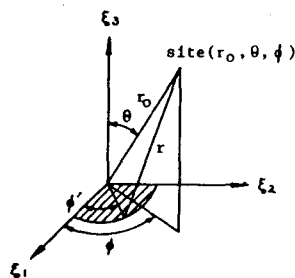


Fig. 1 Coordinate System of Circular Crack (After Sato and Hirasawa³⁾)

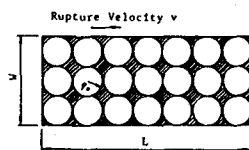


Fig. 2 Distribution of Circular Cracks on the Fault Plane (After Aki, et al⁴⁾)

$$\begin{aligned}
 A(\omega) = & F_s \cdot e^{-i\omega t_0/2} \cdot [a_1 \cdot (t_1 - t_0) \cdot \frac{\sin X}{X} \cdot e^{-i\omega t_0/2} \\
 & - a_2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{\sin Y}{Y} \cdot e^{-i\omega t_2/2} - (a_1 + a_2) \cdot (t_1 + t_2) \cdot e^{-i\omega t_1/2} \\
 & + a_2 \cdot (t_2 - t_0) \cdot e^{-i\omega(t_2 - t_1/2)}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 F_s = 振幅方位特性を表す係数、 i = 虚数単位、 ω = 角振動数であり、 $t_0, t_1, t_2, a_1, a_2, X$, および Y はそれぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned}
 t_0 = & r_0/\beta + d/v, \quad t_1 = \rho_0(1-k)/v + t_0, \quad t_2 = \rho_0(1+k)/v + t_0, \quad a_1 = 4\pi K v^3/(1-k^2)^2 \\
 a_2 = & \pi K v^3/\{k(1+k)\}^2, \quad X = \omega(t_1 - t_0)/2, \quad Y = \omega(t_2 - t_1)/2, \quad k = v \cdot \sin \theta / \beta, \quad K = 24\Delta\sigma / 7\pi\mu \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 r_0 =円形クラック中心から観測点までの距離、 θ =観測点の方位角、 β =S波速度、 d =断層面上の破壊開始点から円形クラックの中心までの距離、 v =破壊伝播速度、 ρ_0 =円形クラックの半径、 $\Delta\sigma$ =応力降下量、 μ =媒質のせん断弾性係数である。また、 t_0 =円形クラックの破壊開始時刻、 t_1, t_2 =破壊が停止する時刻、 a_1, a_2 =波動の振幅を表す係数である。以上のような要素加速度波のフーリエスペクトルを全要素について重ね合わせると、Fig. 2の矩形断層から射出される理論波の観測点での加速度スペクトルが得られる。ただし、式(1)では伝播経路の非弾性減衰(Q 値)の影響が含まれないので、式(1)に $R(\omega)=\exp(-r_0\omega/2Q\beta)$ を乗じて Q 値による減衰を考慮した。また、Fig. 2のように断層面を多数の円形要素に分割する際には、far-field の条件³⁾が満足されるように留意した。なお、観測点での理論加速度波の時刻歴は、上述の加速度フーリエスペクトルをフーリエ逆変換することによって求めた。

3. AE実験の概要

Fig. 3に示すように、2つのブロックを限定した接触面で接触させ、上下圧 P を一定に保ちながら、せん断荷重 Q を増加させてせん断ずれ試験を行った。せん断荷重 Q の載荷速度は最初必ず制御で 0.5mm/min としたが、AE 信号が検出され始めた後は載荷速度を下げた。載荷を制御するために、供試体の上面と側面にダイヤルゲージを取り付け、 $X-Y$ レコーダに荷重-変位曲線をプロットした。また供試体のせん断ずれより生ずるAE信号を測定するために、上部供試体のA, B, Cの位置に3個のAE変換子を付着させ、得られたAE信号をFig. 4の計測システムによって測定し記録した。Fig. 4に示すように、AE変換子で得られた信号は、プリアンプで増幅され、ディスクリミネータによって一定のしきい値で弁別された後、フロッピーディスク付デジタルオシロスコープに記録される。ただし、使用したデジタルオシロスコープでは、同時に2つの波形しか記録できないので、Fig. 3の点AおよびBに取り付けたAE変換子による波形をフロッピーディスクに収録した。記録されたAE信号のサンプリング時間間隔は $\Delta t = 1\mu\text{sec}$ であり、データ数は $N = 1024$ 個である。また、3個の変換子から得られるAE信号の到達時間差をディストリビューションアナライザーによって読み取り、AE発生源の破壊開始点を求めた。

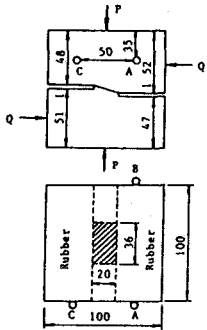


Fig.3 Size of Specimen

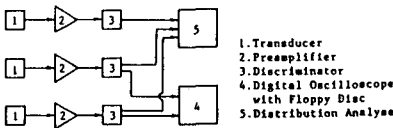


Fig.4 Block Diagram of AE Monitoring and Recording System

4. 実験結果

前述のようなAE実験を12個の供試体について行ったが、ここでは紙面の都合上、そのうちの2例についてのべる。Fig. 5には、上下圧 P を1tonとしたときの荷重-変位曲線を示した。この図に見られるように、荷重-変位曲線は滑らかではなく、変位が一定のもとでせん断荷重 Q は急激に低下する。これは典型的なスティックスリップ現象であり、実験ではこのようなスティックスリップが生じたときに多くのAE信号が検出された。以下では、変換子AおよびB (Fig. 3 参照) によってFig. 5のNo.1およびNo.2の点で検出されたAE信号を解析の対象とし、それらをNo.1-AおよびB, No.2-AおよびBと呼ぶことにする。

Fig. 6には、上述のAE実験より得られたNo.1-Aの波形とその非定常スペクトルを示した。ただし、非定常スペクトルは、時間一周波数平面に等高線で表示した。この図の波形を見ると、初動部がなくただちに強震部

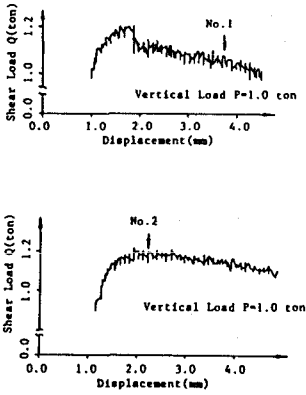


Fig.5 Load-Displacement Curve

が現れている。これは、ディスクリミネータに若干大きなしきい値を設定してAE波動を弁別し、初動部を除去したためである。この図に見られるように、AE信号は顕著な非定常性を示し、強震部の後ろに長い減衰部が続いている。この減衰部は表面波や反射波により構成されていると考えらる。一般に、表面波はS波などの実体波よりも長周期成分を多く含み、その位相は遅れるので、表面波は主に波形の後半部に現れる。このことより、非定常スペクトル図の15~50 kHzの成分波は表面波に対応していると考えられる。また、非定常スペクトル図の200~300 μsec の時間領域における50~400kHzのパワーの大きな成分は主にS波から成ると思われ、300 μsec 以後の非定常スペクトルには表面波および反射波の影響が顕著に現れている。

以上、1つのAE波動の波形特性および非定常特性について述べたが他のAE波動についても同様な結果が得られた。実験より得られたAE波動の特性を要約すると次のようになる。(1) AE波動の強震部の継続時間は100 μsec 程度であり主にS波から成る考えられる。(2) 強震部においては数10 kHz以上、とくに200~300kHzの成分波が卓越する。(3) 数10 kHz以下のやや長周期成分は強震部以降に現れ、表面波から成る考えられる。

以上のように、AE波動の強震部は主にS波から成る考えられるが、それが全て直達のS波から構成されているという保証はない。しかしながら、強震部ではかなりの部分が直達のS波から成る考えられるので、この強震部を対象にして次節でシミュレーションを行う。

Fig. 7は、上述の4つのAE波動の強震部の波形を示したものである。強震部としては、上述の非定常スペクトルの検討結果を参考にし、解析上の制約も考えて、AE波動の立ち上がり時刻から128 μsec の部分を取り出した。Fig. 8は、これら強震部のフーリエスペクトルをFFTにより計算し、両対数紙上にプロットしたものである。図よりAE波動の強震部のフーリエスペクトルは約50~400kHzの高周波数領域で有意な振幅を持ち、約300kHz以上においては振幅が減衰する傾向があることがわかる。

5. 理論波動とAE波動の対応性

実験より得られたAE波動の強震部を2. で述べた断層モデルを用いてシミュレートする。まず、理論波動を作成するために必要となるいくつかのパラメータを次のようにして決定した。

(a) 破壊開始点の位置

前述のAE実験における3個の変換子からの信号の到達時間差より、断層面を既知として2次元的な位置標定を行い、破壊開始点を求めた。

(b) 応力降下量 $\Delta\sigma$

Fig. 5の荷重-変位曲線の対応する点でのせん断荷重の降下量を接触面の面積で除して応力降下量を求めた。その結果、応

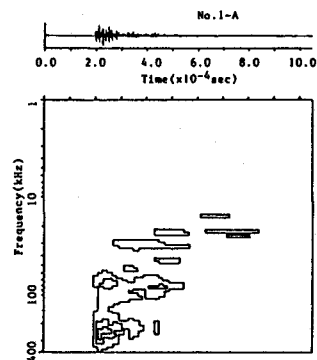


Fig. 6 Contour Representation for Evolutionary Spectrum of AE Wave

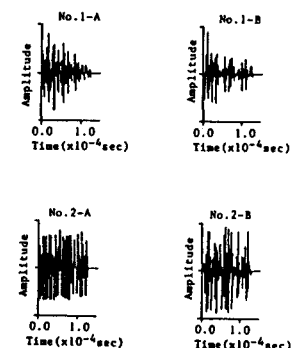


Fig. 7 Time Histories of Strong Shaking Part of AE Wave

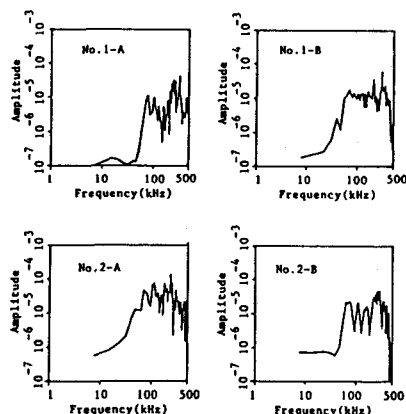


Fig. 8 Fourier Spectra of Strong Part of AE Wave

力降下型 $\Delta\sigma$ として次の値が得られた。

No 1 ; $\Delta\sigma = 6.7 \text{ bar}$

No 2 ; $\Delta\sigma = 7.6 \text{ bar}$

(c) 破壊伝播速度 v

大津ら²⁾と同様な手法により破壊伝播速度 v を求め、次のような値を得た。

No 1 ; $v = 70 \text{ m/sec}$

No 2 ; $v = 80 \text{ m/sec}$

(d) P波速度 α および S波速度 β

共鳴法により α を求めた結果、 $\alpha \approx 3,000 \text{ m/sec}$ が得られた。

S波速度 β は、ポアソン比を $\nu = 0.2$ と仮定して、 $\beta = 1800 \text{ m/sec}$ とした。

その他のパラメータとして、次の値を用いた。

せん断弾性係数 ; $\mu = 1 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$

Q値 ; $Q = 50$

以下では、上述の諸量を用い、2. で述べた手法によって理論波動を作成し、A E波動と比較する。

Fig. 9 および 10 には、前節で述べた A E 波動に対応する理論波動の時刻歴とそのフーリエスペクトルを示す。これらの図を Fig. 7 および 8 と比較すると、次のようなことが指摘できる。

(1) 理論波動の継続時間は A E 波動の 2 ~ 3 倍であり、波形はかなり異なっている。この主な原因は、理論波動を作成する際に用いた破壊伝播速度が小さすぎたためと考えられる。

(2) フーリエスペクトルが有意な振幅をもつ周波数領域は、A E 波動、理論波動とも数 10 kHz 以上の領域であり、両者のスペクトルの平均的な形状はほぼ類似している。このことより、本研究で用いた断層モデル (barrier モデル) は A E 波動のスペクトル形状を捉えるのに適していると考えられる。

(3) A E 波動のフーリエスペクトルは約 300 kHz 以上の高周波数領域で減衰する傾向がある。これに対し、理論波動ではそれが見られない。式(1)および(2)より、フーリエスペクトルの高周波数領域の振幅に影響するパラメータとして v および $\Delta\sigma$ が考えられる。また、伝播経路の Q 値の影響も大きい。これらのパラメータがスペクトル形状にどのように関与するかについては今後検討しなければならない。

5. あとがき

2つのブロック供試体のせん断ずれ試験より得られる A E 波動を断層モデル (barrier モデル) によってシミュレートし、それらと比較することによって、両者の対応性を検討した。barrier モデルによる理論波動のスペクトルは A E 波動のそれと概略的に類似した形状になった。しかしながら、推定したパラメータが一部不適切であったために十分な対応関係を把握するには至らなかった。これについては今後の検討課題にしたい。

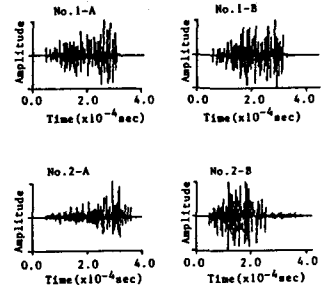


Fig.9 Time Histories of Theoretical Wave

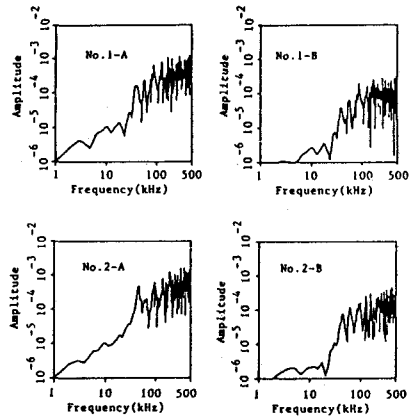


Fig.10 Fourier Spectra of Theoretical Wave

参考文献 1) 月羽・小林・大津 ; 土木学会論文集, No314, 1981年. 2) 大津 ; 土木学会論文集, No355, 1983年. 3) Sato and Hirasawa ; T. Phys. Earth., 21, 1973. 4) Papageogiou and Aki ; BSSA, vol. 73, No.3, 1983. 5) Aki and Richard ; Quantitative Seismology Theory and Method, pp. 804 ~ 805. 6) 亀田 ; 土木学会論文集, No235, 1975年.

(70) ON A SIMULATION OF THE WAVE OF ACOUSTIC EMISSIONS BY FAULT DISLOCATION MODEL

Masakuni ISHIGAKI

Kiyoshi FUJII

Tsutomu SAWADA

In order to clarify the source mechanism of acoustic emissions, it is useful that the simulation is conducted for the wave of acoustic emissions (AE) obtained from micro-fracture of rock materials, which is considered as micro earthquake motion.

In this study, the shear slippage experiments of two mortar specimens are carried out and we try to simulate the strong shaking part of AE waves by fault dislocation model that has been recently proposed by K. Aki et al.

The simulated waves are compared with AE waves obtained from experiments and the relationship of both waves is examined.

The results in this study are summarized as follows.

- (1) The stick slip phenomenon is found in the load-displacement curves obtained from shear slippage tests of two mortar specimens.
- (2) From evolutionary power spectra of AE waves, it is found that the powers of high frequency components above 50 kHz are large in the strong shaking part of the waves and the lower frequency components is considerably large after the strong shaking part. It is concluded from this fact that the strong shaking part of AE waves mainly consists of S-wave and the later part consists of surface wave.
- (3) The duration of simulated waves is 2 or 3 times longer than that of AE waves and both wave forms are considerably different each other. This is caused by small rupture velocity, which is estimated from the experiments.
- (4) Fourier spectrum of simulated waves has almost similar shape to that of AE waves. This fact shows that the fault dislocation model used in this study is suitable to investigate the spectral characteristics of AE waves. However, the spectral shape of simulated waves is more or less different from that of AE waves. This occurs from that the rupture velocity and Q-value didn't estimate accurately in this study.