

岩石の圧縮破壊過程の弾性波応用計測法 に関する一考察

ON ACOUSTIC TESTS TO EVALUATE ROCK FAILING PROCESS UNDER COMPRESSION

福井卓雄*

By Takuo FUKUI

This paper is concerned with searching of the damage parameters in the failing process of rock-like materials under compression. Two kinds of acoustic tests, the acoustic emission counting and the transmitting wave form analysis, were performed during the uniaxial compression test of tuffaceous rock. Obtained test parameters are the acoustic emission count ratio to loading stress, the transmitting wave form, the cross-correlation function and the power spectrum ratio between the wave forms at the initial and the loading states, etc. These test records are examined their parametrical significance in comparison with the theoretical predictions by the continuous damage mechanics and the dispersion relations of elastic waves in cracked material model. The results suggest that the acoustic test parameters may give the information of the microcrack size and density as well as the number of them, and the test well illustrates the phase changing in the process of rock failure.

1. はじめに

岩石やコンクリートなどの岩質材料の破壊過程を実験的に追跡する手法の確立は、これらの材料でつくられた構造物あるいは自然岩盤の破壊程度を非破壊的に評価するための基礎となる。本研究は、AE（アコースティック・エミッション）計測法、透過弾性波計測法などの、材料中に発生し、伝播する弾性波を収集・解析する計測法（弾性波応用計測法）によって岩質材料の破壊の進行程度を非破壊的に評価するための基礎的な知見を得ることを目的としている。

よく知られているように、圧縮荷重下の岩質材料では、応力の増加とともに、内部構造の不均一に起因する微小クラックが発生し、その密度が高まっていつて微小クラック同士が結合するようになり、ついには大きな不連続面を形成して破壊するに至る¹⁾。材料の構成物質そのものは破壊の直前まで線形的な性質を有していることも多く、材料の破壊は、微小クラックの発生とその結合による不安定構造の形成によるものと考えられている。この観点を力学モデルとして表現したものが連続損傷モデル^{2,3)}・クラックモデル⁴⁾である。

弾性波応用計測法によって得られるデータには、材料中に発生する欠陥の量の推移、材料中を伝播する弾性波の特性の変化など、通常の静的な試験からは得られない量が含まれる。これらのデータと通常の静的試験データとの参照、および上記力学モデルから得られる予測との比較検討を行なうことによって、弾性波応用計測法から得られるデータの意義を力学的に解釈することができるであろう。ここでは、この方針にした

* 工修 福井大学講師 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京3-9-1)

がって一軸圧縮荷重下の軟岩の破壊過程を追跡する実験を行ない、得られたデータの解釈を試みる。本論文では、まず、福井市周辺における代表的な岩石の一つである海成凝灰岩を用いて、岩石の一軸圧縮荷重下におけるAE計測および透過弾性波計測の実験を行なった結果を述べる。つぎに、それらの実験結果を、連続損傷モデル・集合クラックモデルなどの理論モデルからの結果をもとに解釈し、弾性波を用いた岩石の圧縮破壊過程の追跡手法について考察する。

2. 実験概要

(1) 岩石試料

実験に使用した岩石は、福井市内足羽山に産する新第三系の火山礫凝灰岩（通称、笏谷石）でグリンタフに含まれるものである⁵⁾。一般に、軟質で空隙が多く吸水性が良い（吸水率が10%以上になるものもある）。石材として採取されているものは、細粒ないしは中粒で、灰緑色を呈し、均質である。石罅、床張りなどに用いられている。類似の岩石は福井市周辺一帯に分布しており、1989年7月に生じた国道305号線の崖崩れの崩落岩石もこれと近縁のものであつて⁶⁾、工学的にも重要なものである。

試料として使用した岩石は、採石場で採取されたもので、比較的均質なものを選んだ。成層方向にコアを抜き切断した後、両端面を研磨して整形し、50mmφ×100mmの円筒供試体とした。

(2) AE計測実験

一軸圧縮応力下において、荷重増加中および繰り返し载荷中のAE発生数を計測し、あわせて、縦ひずみおよび横ひずみを計測した。AE発生数の計測システムを図1に示す。AE信号は供試体に接着したPZT圧電素子（共振周波数、約280KHz、縦波）により受信され、プリアンプ（帯域、10K~1MHz）を介して検知機により検知され、それをカウンターで計数する。検知機としてはオシロスコープのトリガー部を利用し、100μsecの不感時間をとったパルス法で検知した。AEの計数間隔は10秒である。同時に、プリアンプからの出力をトランジェントメモリに送りAE波形の検証をしている。

供試体の载荷には、リーレー型万能試験機を用い、2.5MPa/minの応力増加速度となるように手動で制御した。荷重は試験機の見盛（最小目盛、50Kg重）を目視で20秒間隔に読み取った。ひずみは、供試体側面中央の対する二点に縦横にひずみゲージを張り、縦ひずみおよび周方向ひずみを20秒間隔で計測した。

(3) 透過弾性波測定実験

一軸圧縮応力下において、供試体を横断する方向に弾性波を透過させ、载荷応力の変化にともなう受信波形の変化を観察した。計測システムを図2に示す。発信子および受信子は供試体側面中央の対する二点に直接接着している。発信側では、関数発生機により立ち上がりが20nsecのパルスを1秒毎に発生させ、それをPZT圧電素子（共振周波数、約280KHz、縦波）に送り、供試体に波を入射する。同時に、トリガー用のパルスをトランジェントメモリに送って、波の発生時刻を確定する。受信側では、PZT圧電素子（共振周波数、約2MHz、縦波）で波を受信し、プリアンプ（帯域、10K~300KHz）を介して、トランジェントメモリ（サンプリング間隔、100nsec）に記録する。受信波形は8bit×1Kwordのデジタルデータとして収録される。

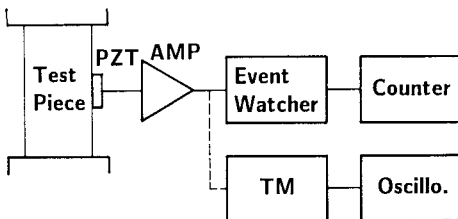


図1. AE計測システム

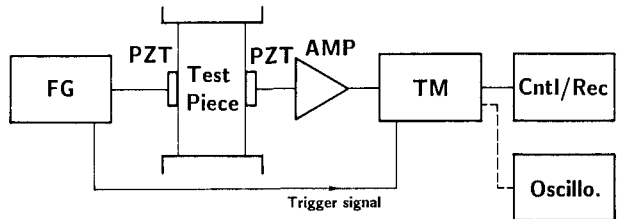


図2. 透過弾性波計測システム

波形の記録は応力が 2MPa 増加する毎に行なった。

载荷には、MTS材料試験機を用い、油圧サーボ機構による荷重速度制御試験を行なった。応力増加速度は 1MPa/min で一定とした。検証のため、この場合にも、(2)と同様の方法で縦横のひずみを測定している。

3. 実験結果

3.1 AE計測実験の結果

一定応力増加速度の条件のもとで、単純载荷試験と繰り返し载荷試験とを行ないAE計測実験を行なった。結果を図3、4に示す。いずれの図においても、(a)は応力～ひずみ・AE計数率(20秒間のAE発生数)関係を、(b)はAE発生率・非弾性横ひずみ増加率～応力関係を表わしている。また、図3(c)はAE発生率～非弾性横ひずみ増加率関係を表わしている。これらの図において、体積ひずみ ε_V は、縦ひずみ(軸ひずみ) ε_A と横ひずみ(周方向ひずみ) ε_L とから、 $\varepsilon_V = \varepsilon_A + 2\varepsilon_L$ の関係をを用いて求めた。また、AE発生率、非弾性横ひずみ増加率は応力の増分に対する比率として定義している。ここで、非弾性横ひずみは以下のような考えにもとづいて定義している。

ひずみの非弾性成分を定義するためには、まず、ひずみの弾性成分をきちんと定義する必要がある。ここでは、図4(a)の繰り返し载荷試験の結果から「破壊荷重近くを除いては、除荷開始初期の応力～ひずみ関係は弾性的である」と仮定する。繰り返し载荷試験の場合には、応力ひずみ曲線よりただちに弾性ひずみ成分 ε^E を決定することができ、非弾性ひずみ成分 ε^I は $\varepsilon = \varepsilon^E + \varepsilon^I$ の関係をを用いて求めることができる。単純载荷試験の弾性ひずみ成分を決定するためには、次の操作を行なった。

まず、繰り返し载荷試験を何回か行なった結果、次の事実が明らかになった。すなわち、载荷初期の体積ひずみの勾配を K^N とし、除荷初期の勾配を K^E とすると、その比率は $K^N/K^E = 0.66$ でほぼ一定である。また、除荷初期の縦ひずみの勾配 E_A^E と横ひずみの勾配 E_L^E との比率(Poisson比)は $-E_A^E/E_L^E = 0.16$ でほぼ一定である。これらの関係をを用いて、単純载荷試験の体積ひずみの初期勾配 K^N の値から、弾性横ひずみ勾配を $E_L^E = -(1 - 2 \times 0.16) / (0.66 \times 0.16) K^N$ の式で決定した。試料とした岩石は空隙が多く载荷初期から非弾性的な挙動を示すが、このような方法で弾性ひずみと非弾性ひずみとを分離することができ、

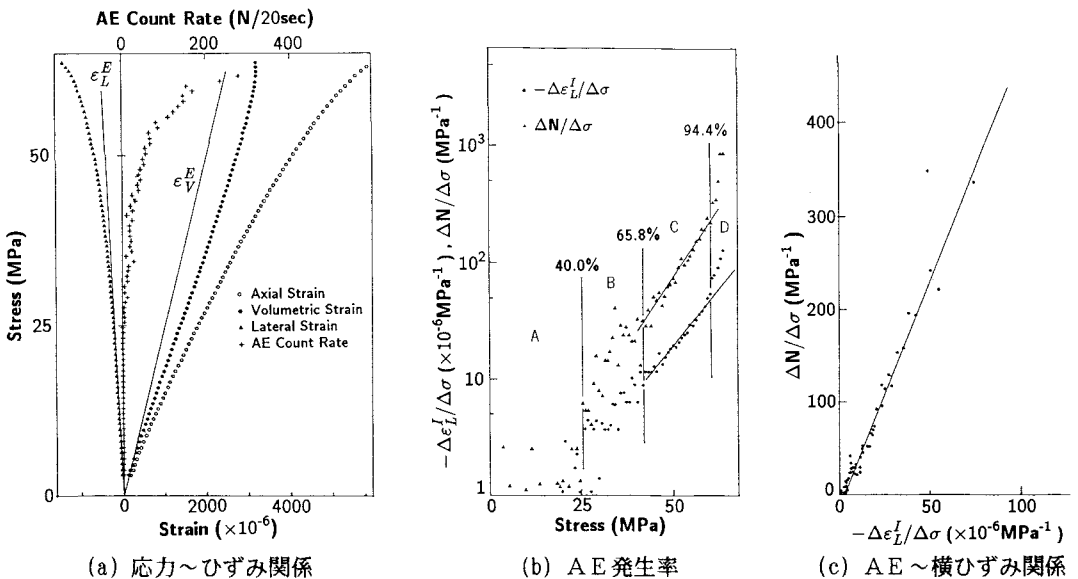
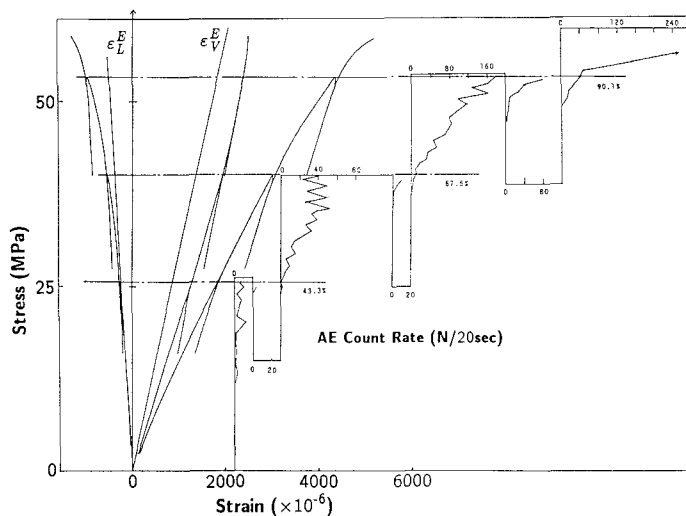
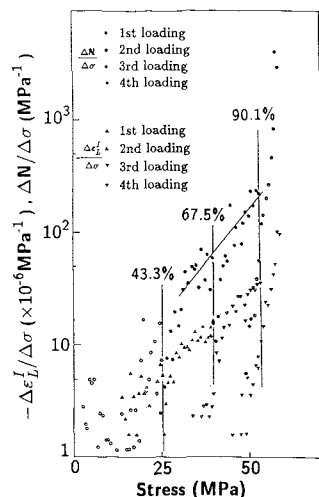


図3. 一軸圧縮単純载荷試験における笏谷石のAE発生特性



(a) 応力～ひずみ関係とAE計数率



(b) AE発生率

図4. 一軸圧縮繰返し載荷試験における笏谷石のAE発生特性

これによって、単純載荷試験と繰返し載荷試験の結果を矛盾なく比較できた。

この岩石の非弾性変形の特徴は、図3、4(a)に見られるように、軸方向変形の体積変形に対する寄与が目立って大きいことである。とくに低応力レベルにおいては、横変形の体積変形に対する寄与はほとんどない。これはこの岩石の体積変形がもともと存在している空隙の押しつぶしによって生じているためだと考えられる。

破壊の進行の状況は、AE発生率の立場からみると、図3(b)に示されるように4段階に分けられる。A段階はAEの発生がほとんど見られないか、または、ばらつきの大きい散発的な発生がみられる段階である。すでに先行荷重によって微小クラックが形成されてしまっていてそれが動かないか、あるいは、もともと存在する空隙がただ変形するだけで新しいクラックを形成しないか、であろう。図4(b)に見られる載荷初期のAE発生は、むしろ空隙の押しつぶしによって生じているものであろう。B段階は、つぎのC段階とともに破壊の進行段階である。AEは相当数発生し、横変形にも非線形の影響が現れる。しかし、AE発生率などにはまだばらつきがみられる。C段階は、最も着実な破壊の進行が観察される段階である。図4(a)に見られるように、繰返し載荷に対しても岩石自体はまだ安定ではあるが、AE発生率は着実に増加しており、それにとまって非弾性横ひずみも増加する。岩石が湿潤状態にあるときには、この段階で横ひずみの伸びが顕著となり崩壊してしまう。D段階は、供試体の構造的な不安定が進行し崩壊に向かう段階である。

AE発生率と変形との関係を探るために、非弾性横ひずみの増加率を図3、4(b)にプロットしてある。AEの発生が岩石内の微小クラックの発生または拡大伸長に関連していると仮定するならば、「一軸圧縮の条件下ではクラックが軸方向に伸長する」という良く知られた事実から、その効果は横ひずみの非弾性成分に最も顕著に現れるはずである⁷⁾。とくに、試料とした岩石においては、体積変形は主として空隙の押しつぶしによって生じていると考えられるので、AE発生数と非弾性体積ひずみとの対応はつけにくい。むしろ、図3(c)に示されるように、崩壊にいたる直前を除いては、AE発生数と非弾性横ひずみ増加率とはよく対応している。また、図3、4(b)に表わされているように、とくに、B・C段階で、AE発生率と非弾性横ひずみ増加率との対応が顕著である。このことは、破壊荷重の90%程度以下においては、破壊は比較的均質に進行していることを示唆する。

図4(b)には、AE発生率で見たKaiser効果の発現が示されている。ここでも、Kaiser効果の現れるの

はB・C段階以下の応力レベルである。また、非弾性横ひずみの増加率もAE発生率に対応して Kaiser効果と同様の挙動をすることも興味深い。

3.2 透過弾性波の波形特性

乾燥状態および湿潤状態の岩石について、一軸圧縮載荷し、応力方向と垂直に透過させた波の波形特性の変化の様子を観察した。結果を図5、6に示す。AE計測の実験結果から明らかなように、破壊の進行とともに微小クラックの数が増加し、供試体スケールの岩石が非線形的な挙動をしている場合でも、岩石の構成物質そのものは線形弾性的な性質を保持していると考えられる。また、ここで透過させている波そのものは極めて小さなものである。したがって、計測している波動は弾性波であると考えて良いだろう。また、応力レベルが大きくなることによる透過波形の変化は、次々に生じる微小クラックによって透過弾性波の散乱の状況が変化することに伴って引き起こされるものと考えられる⁸⁾。

各図において、(a)はそれぞれの応力レベルにおいて受信された透過波形を示す。発信子・受信子は縦波型のものであるので主として縦波の透過の様子を示すが、受信された波形には横波や表面波の影響も混じっている。また、受信信号には10K~300KHzのバンドパスフィルタがかかっているため、受信波形は相当に

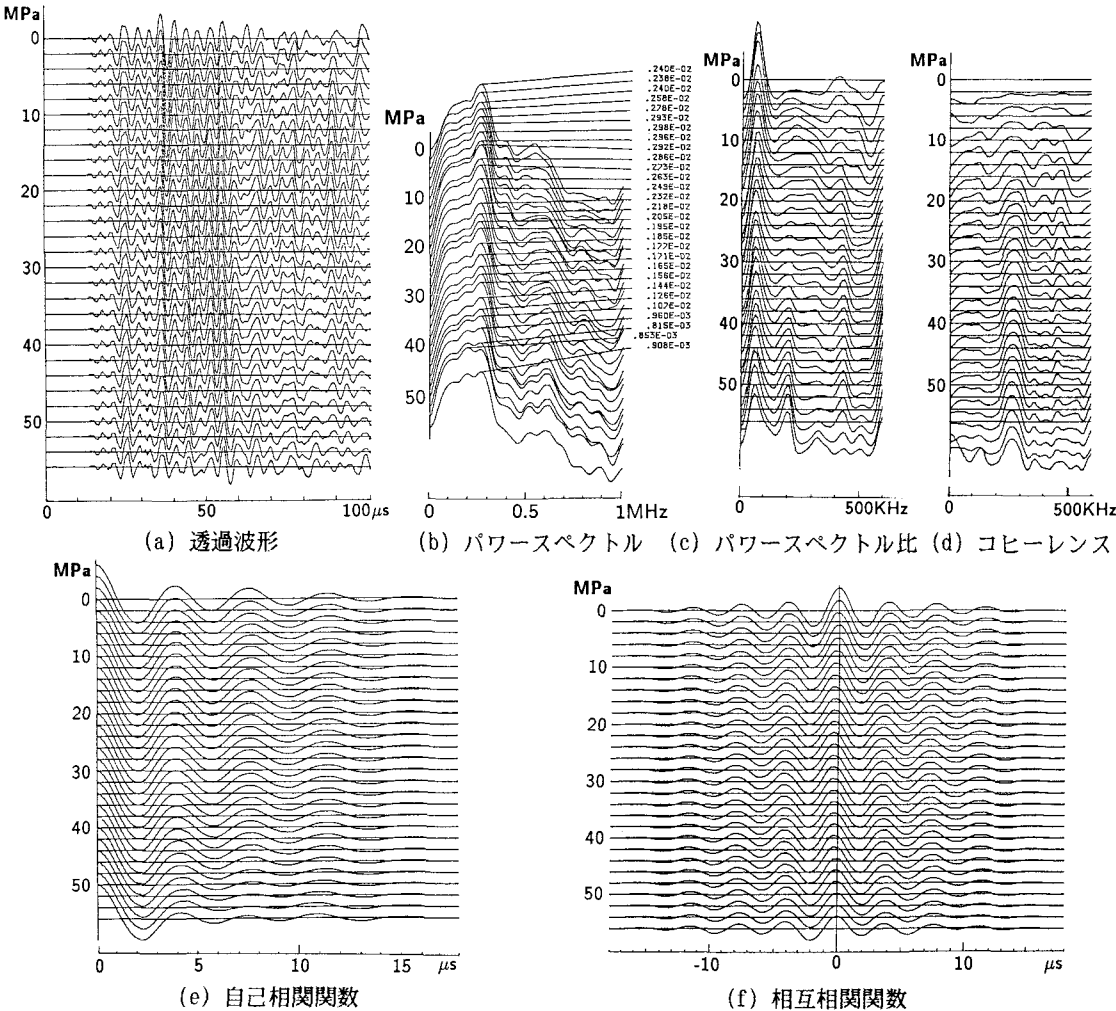


図5. 一軸圧縮試験における乾燥笏谷石の透過弾性波特性

ひずんでいる。さらに、湿潤状態の岩石の場合には、岩石内の水分が電氣的な雑音を励起するのでS/N比はかなり悪化している。これら多くの制約が存在するものの、なお、受信波形とその変化の様子は多くの情報を伝えている。縦波および横波の変化の様子、岩石内部で変動が起こった後それが再び別の安定状態に移行していく様子などである。

透過波形の変化の様子をもう少し詳しく観察するために、得られた波形データについて周波数解析を行った。(b) にパワースペクトルを、(c) にパワースペクトル比を、(d) にコヒーレンスを、(e) に自己相関関数を、(f) に相互相関関数を示している。このうち、パワースペクトル比・コヒーレンス・相互相関関数は応力レベルがゼロのときの波形データを基準として算出している。すなわち、相互相関関数は応力ゼロの波形と各応力レベルの波形との相互相関をとっており、コヒーレンスはそれに対応するクロススペクトルをもとに算出している。また、パワースペクトル比は応力ゼロの波形のパワースペクトルに対する各応力レベルの波形のパワースペクトルの比である。

自己相関関数の図は波形のゆがみの様子を示している。乾燥岩では、波形の変化の様子は図5(a)からは明確ではないが、図5(e)によれば、第二波以降のピーク値とピーク時間が破壊の進行とともに変化し、とくに、C段階以降の変化が大きくなっている様子が読み取れる。また、コヒーレンスの図5(d)によれば、周波数成分ごとの相互関係においては、変化のきざしは破壊応力の1/3程度の応力レベルですでに明らかに現れており、発信子の共振周波数である 280KHz 付近を除けば相互関係が著しく落ちていることが読める。湿潤岩の場合には、自己相関関数の図6(e)は破壊過程の途中で生じた波形の大きな変動を明らかにしている。コヒーレンスの図6(d)では、载荷過程の前半と後半とのパターンがまったく異なっており、このあいだに大きな変動を生じたことが読める。

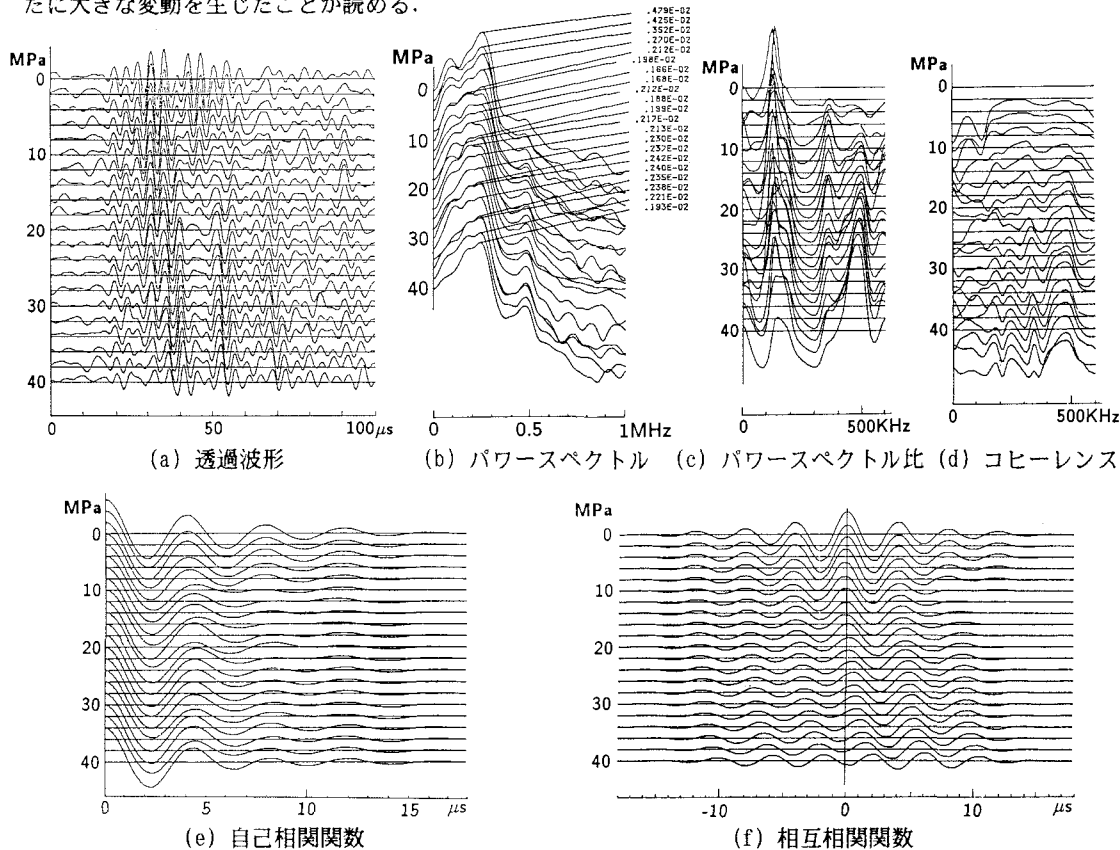


図6. 一軸圧縮試験における湿潤笏谷石の透過弾性波特性

相互相関関数の図は受信波の速度の変化の様子を良く表現している。乾燥岩の図5(f)では、載荷後、速度は一旦速くなり（空隙が押しつぶされるためであろう）、破壊の進行が進むと、再び遅くなっている。一方、湿潤岩の図6(f)では、速度の上昇はほとんどなく、破壊応力の1/2以前から波の到達が遅くなりはじめ、破壊直前には相当の遅れを生じている。

パワースペクトルおよびパワースペクトル比の図は透過弾性波の周波数の変化を示している。とくに、パワースペクトル比の図は周波数成分による波の透過率の変化を表わしている。乾燥岩の図5(c)では、載荷後、130KHz と 310KHz 付近に谷ができ、400KHz 付近（フィルタを通してしているのでこの付近のデータの信頼性は低い）に山ができる。破壊応力の1/3程度まで、これらの谷は徐々に深さを増していき、その中心周波数も高い方にずれていく。その後、破壊応力の2/3程度から、190KHz 付近の山が高さを増してきて、破壊前には 250KHz 付近にも深い谷ができる。360KHz および 410KHz 付近にあった谷と山とは全体が低くなって破壊前には消滅してしまう。これらより低い周波数帯域の 60KHz 付近に山が続くが、これが現象を反映したものであるのかどうかには疑問がある。湿潤岩の図6(c)ではスペクトルの乱れが大きいが、140KHz 付近の山、300KHz 付近の谷、350KHz 付近の山の変化の様子は明らかである。パワースペクトル比の図における周波数成分ごとの透過率の変化は、岩石中に発生する微小クラックの大きさとその密度とに関連するものと考えられる。その計測の可能性については 4.2 において考察する。

4. 理論モデルによる実験結果の解釈

4.1 連続損傷モデルによる解釈

前節で得られた計測データを、連続損傷モデルの立場で解釈してみよう。連続損傷モデルは材料の微視的で均質な破壊の進行を連続体モデルとして表現しようとするものである。材料に潜在的に存在する微小欠陥、あるいは、それから発生する微小クラックなどを追跡し、構造体そのものを不安定にさせる巨視的な不連続が生ずる以前の、破壊の前駆現象を表現しようとするものである。モデルそのものは、欠陥を均質に含む材料内部における静的な応力の釣合を根拠として導かれている。AE 計測実験の結果をみると、試料として用いた岩石では、C 段階の応力レベルまでは AE の発生は規則的であり、変形量もそれに対応して規則的に変化している。すなわち、A～C 段階においては、破壊は比較的均質に進行しているといえ、連続損傷モデルを適用できる条件が整っている。ここでは、京谷ら^{2,9)}により岩盤の力学特性評価に用いられた損傷テンソルを用いて実験の結果を解釈してみる。

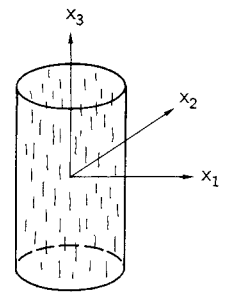


図7に示されるように円筒供試体に座標系を定義する。二種類のクラック群に対応する損傷テンソル D^0 , D^a を考えよう。 D^0 は岩石に初期から存在する等方的な空隙をあらわし、 D^a は応力の増加とともに発生する微小クラックを表わすとする。微小クラック面の方向は載荷軸 (x_3 軸) に垂直であるとする。京谷ら²⁾によると、損傷テンソル D^0 , D^a は

$$D_{ij}^0 = D^0 \delta_{ij}, \quad D_{ij}^a = D^a (\delta_{ij} - \delta_{i3} \delta_{j3}) \quad (1)$$

で表わされる。ここに、係数 D^0 , D^a は、クラックの長さとその分布密度に比例する量である。岩石の構成物質に作用する実質応力 σ^* とみかけの応力 σ との関係は、 $\sigma^* = \sigma (I - D)$ で与えられるから、岩石の構成物質が等方線形弾性体であると仮定し、応力の対称性を考慮すると、初期空隙に対するみかけの弾性係数は

$$E_{ijkl} = (1 - D^0) [\lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})] \quad (2)$$

微小クラックに対するみかけの弾性係数は

$$E_{ijkl} = (1-D^A)[\lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})] + \frac{D^A}{2}[\lambda(\delta_{ij}\delta_{k3}\delta_{l3} + \delta_{kl}\delta_{i3}\delta_{j3}) + \mu(\delta_{ik}\delta_{j3}\delta_{l3} + \delta_{jk}\delta_{i3}\delta_{l3} + \delta_{il}\delta_{j3}\delta_{k3} + \delta_{jl}\delta_{i3}\delta_{k3})] \quad (3)$$

となる。ここに、 λ 、 μ は岩石の構成物質の Lamé 定数である。これらの結果より、初期空隙に対しては、等方的に $1-D^A$ に比例するみかけの弾性係数の低減がみられる。実験結果では载荷初期から異方的な非弾性ひずみが得られているので、実験結果に適合させるためには、空隙の押しつぶしを表現するための損傷テンソルを重ねてやる必要があるであろう。一方、一軸荷重状態に対しては、(3)は、構成物質の変形とまったく同じものを与え、非線形横ひずみは生じない。これは、損傷テンソルが、開口しないクラックを前提として、導入されているためであって、非弾性の横変形を導入するためには、荷重によるクラック周辺の変形を考慮したクラックモデル⁴⁾のような考え方が必要であろう。

微小クラックに対する損傷モデルに弾性波を伝播させてみよう。韓ら⁹⁾はこの問題についていくつかの数値解析を行なっている。ここでは、簡単に弾性波の伝播特性だけを見る。まず、(3)に対するアコースティックテンソル¹⁰⁾をつくってみると

$$A_{ik}(\mathbf{m}) = \frac{1}{\rho} \left\{ (1-D^A)[(\lambda+\mu)m_i m_k + \mu\delta_{ik}] + \frac{D^A}{2}[(\lambda+\mu)m_3(\delta_{i3}m_k + \delta_{k3}m_i) + \mu(\delta_{ik}m_3^2 + \delta_{i3}\delta_{k3})] \right\} \quad (4)$$

となる。ここに、 ρ はみかけの質量密度であり、 $\mathbf{m}$ は波の伝播する方向を表わす単位ベクトルである。供試体を横断する波として x_1 軸方向の波を考えると、 $\mathbf{m} = (1, 0, 0)$ である。このとき(4)は

$$A_{11} = (1-D^A)\frac{\lambda+2\mu}{\rho}, \quad A_{22} = (1-D^A)\frac{\mu}{\rho}, \quad A_{33} = \left(1 - \frac{D^A}{2}\right)\frac{\mu}{\rho}, \quad A_{ij} = 0 \quad (i \neq j) \quad (5)$$

となる。すなわち、縦波および x_2 軸方向に運動する横波の速度は $\sqrt{(1-D^A)}$ に比例して減少し、 x_3 軸方向に運動する横波の速度は $\sqrt{(1-D^A)/2}$ に比例して減少する。これらは透過弾性波の速度の遅れを示唆している。しかしながら、一般的に言えば、連続損傷モデルは静的力学モデルであって、弾性波の周波数による透過性の違いなどの現象は表現できない。損傷のスケールに対して波長の十分に長い運動についてだけ適用するべきであろう。

4.2 集合クラックからの弾性波の散乱による解釈

透過弾性波の計測から得られた「周波数成分によって弾性波の透過率が異なる」という現象を解釈するために、欠陥が一様に分布している空間を透過する弾性波の特性について検討する。

まず、弾性体中に球形の空洞が規則的に配列されている場合を検討する。ひとつの解が Achenbachら¹¹⁾によって得られている。彼らは、まず、平面上に格子配列された球形空洞を考え、それに縦波の平面波を斜めに入射させたときの透過係数と反射係数を求めている。この問題ではウェイブガイドの場合と同様なカットオフ周波数の問題が生じる。すなわち、系に固有の振動モードが存在し、低いモードでは低い周波数の波しか透過せず高い周波数の波は平面から離れると減衰してしまう。モードが高いほど高い周波数の波を透過するようになる。0次モードについての答えが得られている。次に、彼らは、球形空洞が配列された平面を層状に重ねて3次元の格子を構成し、層に垂直に縦波を入射させて、球形空洞の3次元格子を透過する弾性波を考え、分散式を周波数と透過波の波数(位相速度)との関係として得ている。分散式より得られている結果は次のようである。周波数を徐々に増大させていくと、波数(実数)も徐々に増大していく。しかし、周波数がある値に近づくと、波数の増大の仕方が大きくなり(位相速度が小さくなる)、ついには限界値に達する。波数が限界値に到達すると、それ以上の周波数に対しては波数は虚数となり波は透過できなくなる。すなわち、透過できる波の周波数に空白域ができる。周波数をさらに高くすると再び波は透過するようになる。周波数の空白域の広さは空洞の径に対する格子間隔が小さいほど(空洞が密なほど)大きくなる。

次に、クラックによる散乱について検討する。Sotiropoulosら¹²⁾は2次元空間の直線に沿って並んだクラック列による透過係数と反射係数とを求めている。彼らの得た結果をもとにして、文献¹¹⁾の手法を用いて、層状に並んだクラック面を透過する波の特性について考察する。図8(a)のように、クラック平面に縦波が入射する場合を考える。Sotiropoulosらの結果は入射周波数によらずに使える形なので、3次元でも同じ形が使えると仮定すると、透過係数 T と反射係数 R とは

$$T = 1 + \frac{v}{l} f(k_L a, l/a), \quad R = \frac{v}{l} f(k_L a, l/a) \quad (6)$$

のように表わせる。ここに、 l は平均的なクラック間隔、 v はクラック開口体積、 f は $k_L a$ と l/a との複素関数でクラック相互の影響を表す。 k_L は縦波の波数、 a は平均的なクラックの大きさである。次に、図8(b)のようにクラック面が層状に並んだものを透過する縦波について考える。文献¹¹⁾の結果を用い、透過波の波数の虚部がゼロであると仮定すると、透過波の波数 q と縦波の波数 k_L との間には次の関係が成り立つ。

$$\cos q l = \cos k_L l - \frac{\text{Im}(T)}{|T|^2} \sin k_L l \quad (7)$$

ここで、 $\text{Im}(T)/|T|^2 \ll 1$ であると仮定すると

$$\cos q l \cong \cos(k_L + \phi)l, \quad \phi \cong \sin \phi \cong \frac{\text{Im}(T)}{|T|^2}$$

となって

$$q \cong k_L + \frac{\text{Im}(T)}{|T|^2} \quad (8)$$

の関係が得られる。破壊の進行とともに、クラック間隔 l は小さくなり、クラック開口体積 v は大きくなる。また、クラックは伸長して大きくなる。すなわち、 ϕ の絶対値が大きくなる。また、それと同時に、 f は $k_L a$ に対して変動する関数なので、透過しやすい周波数の帯域が変化する。

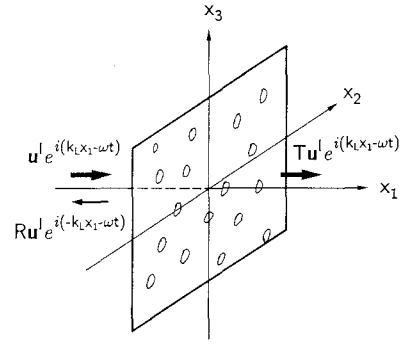
さて、以上の考察をもとに図5、6(c)を見ると、周波数成分に対する透過率の変動は破壊が進行するほど大きくなる。また、载荷初期と破壊直前を除いては透過帯域に大きな変動がないので、発生する微小クラックの大きさはほぼ一様であると予想される。

5. おわりに

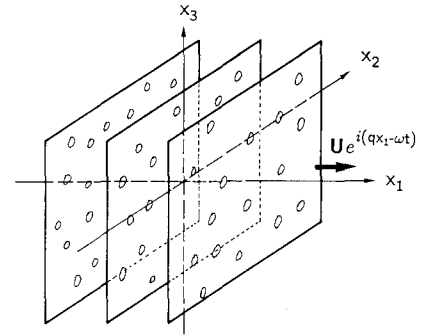
岩質材料の圧縮破壊過程を追跡し評価する手法を確立するための基礎として、材料中に発生し伝播する弾性波を利用する実験を行い、その結果を連続損傷モデル・集合クラックモデルから得られる理論的予測と比較検討した。実験は、一軸圧縮荷重下の軟岩について、AE計測実験と透過弾性波計測実験との二種類を行い、それぞれ次のデータを得た。

- (1) AE計測： AE計数率 (AE発生数, AE発生率)
- (2) 透過弾性波計測： 透過弾性波形 (自己相関関数, 相互相関関数, パワースペクトル, パワースペクトル比, コヒーレンス)

ただし、括弧内は一次データを加工して得た二次データである。これら二種類の計測はほとんど同じ計測シ



(a) クラック面による透過と反射



(b) クラック面の層を透過する波

図8. 分布クラックの中を透過する波

システムを使って実行できる。上の計測と同時に通常の静的試験のデータも収録した。

実験結果および理論モデルによる予測との比較から、それぞれのデータは材料の破壊の進展における次の情報の指標となっていることがわかった。

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| (1) A E発生数, A E発生率: | 材料内部の微小破壊の進展度 |
| (2) 透過波形, 自己相関関数, コヒーレンス: | 破壊の進展の変化の様相 |
| (3) 相互相関関数: | 透過波の速度 |
| (4) パワースペクトル, パワースペクトル比: | 周波数成分の透過率(微小欠陥の大きさ, 密度) |

これらの内(2)~(4)については、今後のデータの蓄積、背景となる理論の整備などが必要であろうが、これらのデータは破壊の進行過程を多面的にとらえるための有効な指標となるものと考ええる。

謝辞

本論文は、入澤淳一君、市川孝至君、石田勝君が福井大学建設工学科あるいは大学院に在学中に行なった研究の成果を著者が新たな視点から再構成したものである。これら三君の在学中の努力に深く感謝する。

参考文献

- 1) Brace, W.F., Paulding, B.W., Jr. and Scholz, C. : Dilatancy in the Fracture of Crystalline Rocks, J. Geophys. Res., Vol. 71, pp. 3939-3953, 1966.
- 2) 京谷孝史, 市川康明, 川本脩万: 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文集, 358号/III-3, pp. 27-35, 1985.
- 3) Chaboche, J.L. : Continuum Damage Mechanics: Part I -- General Concepts, Part II -- Damage Growth, Crack Initiation, and Crack Growth, J. Appl. Mech., Vol. 55, pp. 59-72, 1988.
- 4) Nemat-Nasser, S. and Obata, M. : A Microcrack Model of Dilatancy in Brittle Materials, J. Appl. Mech. Vol.55, pp. 24-35, 1988.
- 5) 塚野善蔵, 三浦静, 安川克巳, 宮永剛太郎: 福井市足羽山北西部の洞窟(採石跡)に関連した重力異常について, 福井大学学芸学部紀要II(自然科学), Vol. 15, pp. 73-86, 1965.
- 6) 三浦静(代表): 越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究, 平成元年度文部省科学研究費補助金総合研究(A)研究成果報告書, 1990.
- 7) 入澤淳一, 福井卓雄: 岩の一軸圧縮破壊過程におけるA E発生数と横歪みの相関について, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第3部, pp. 348-349, 1980.
- 8) 福井卓雄, 市川孝至, 石田勝: 岩の圧縮破壊過程における透過弾性波の波形特性, 昭和56年度関西支部年次学術講演会講演概要, III-25, 1985.
- 9) 韓思雄, 京谷孝史, 市川康明, 川本脩万: 損傷力学モデルによる不連続性材料の動的力学特性の評価について, 土木学会論文集, 400号/III-10, pp. 65-74, 1988.
- 10) Gurtin, M.E. : The Linear Theory of Elasticity, Handbuch der Physik, Band VIa/2, (Ed. C. Truesdell), pp. 1-295, Springer, 1972.
- 11) Achenbach, J.D. and Kitahara, M. : Harmonic Waves in a Solid with a Periodic Distribution of Spherical Cavities, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81, pp. 595-598, 1987.
- 12) Sotiropoulos, D.A. and Achenbach, J.D. : Reflection of Elastic Waves by a Distribution of Coplanar Cracks, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 84, pp. 752-759, 1988.

(1990年10月12日受付)