

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740280
 研究課題名（和文） 広帯域センサーを用いた岩石の破壊成長にともなう弾性波減衰・弾性波速度の変化の検出
 研究課題名（英文） Temporal changes in broad-band wave attenuation and velocity of fracturing rock samples
 研究代表者
 川方 裕則（KAWAKATA HIRONORI）
 立命館大学・理工学部・准教授
 研究者番号：80346056

研究成果の概要：岩石試料を用いた三軸圧縮破壊試験において、広帯域弾性波測定用センサーを用いて、破壊の成長にともなう弾性波伝播特性の変化についてしらべた。破壊の進展につれて、圧縮軸方向に透過する P 波の速度は緩やかに低下し続け、振幅のみが急激に低下することが明らかにされた。本研究にて初めて実現された周波数解析からは、比較的高い周波数帯と低い周波数帯でのみ振幅の減少が認められたが、速度の逆数に相当する遅れ時間は徐々に増大するものの顕著な周波数依存性は認められなかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,700,000	0	2,700,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	180,000	3,480,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：アコースティック=エミッション，弾性波速度，弾性波減衰，岩石破壊試験，広帯域計測

1. 研究開始当初の背景

（1）地殻内部で発生する地震は、活断層においてせん断応力の高速な低下をともなう破壊が高速に伝播する現象である。実験室内では、この高速な応力低下をともなう破壊に先行して、比較的低速の応力低下をともなう破壊が低速で伝播する現象が見つけられている。この現象は、地震のような不安定な破壊現象に先行して発生するため、その詳細を理解することは地震発生機構の理解において非常に重要である。

（2）室内実験においては、高速破壊発生に先行する弾性波速度の低下がとらえられているが、破壊に関連した弾性波伝播特性を取り扱った研究は非常に少ない。これは、従来、室内実験に使用されていた弾性波測定用のセンサーが共振型のものであり、波形に関する情報を見ることができず、周波数特性に関する議論ができなかったためである。

（3）広周波数帯域をカバーする（600kHz-1600kHz 程度）弾性波測定用センサーは、耐油圧性能を持たないため、従来は圧

力容器内で使用することができなかった。この広帯域弾性波測定用センサーを封圧油からシールできるエンドピースが新たに設計され、製作された。これにより、岩石破壊実験時に広帯域弾性波測定用センサーが使用できるようになり、破壊にともなう弾性波動伝播特性の測定が実施できるようになった。

2. 研究の目的

岩石試料を用いた三軸圧縮破壊試験において、広帯域弾性波測定用センサーを用いて、試料内を透過伝播する弾性波の計測を実施し、破壊の成長にともなう弾性波伝播特性の変化について明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 破壊強度後を含む破壊過程におけるクラック生成を詳細に観察するために、我々によって開発された従来よりも広帯域のセンサーを使用できる計測システムを用いて岩石の三軸圧縮試験を行い、載荷軸方向の透過弾性P波の集録を行った。実験は、直径50 mm、高さ100 mmの円筒形のウェスターリー花崗岩を試料として用い、封圧80 MPa、常温、乾燥環境下で行われた。載荷後の試料を図1に示す。



図1. 載荷後の試料の様子。試料表面に成長途上の断層を確認することができる。

(2) 試料の上下のエンドピース内に600kHz-1600 kHzで高感度なトランスデューサ(Olympus-NDT社製V103-RM)を取り付け、1/40 s毎に50 Vの矩形パルスを片側から透過させた。電圧上昇に対応する透過波を下側のトランスデューサで受信し、100 MS/sで2 ms間集録された。S/N向上のため、100回スタックした波形を用いたが、スタック波形を調べた結果、200 kHz-1000 kHzで十分なS/Nが得られたため(図2)、透過P波について、初動の振幅・速度および初動付近の振幅スペクトル・位相スペクトルの時間変化を調べた。

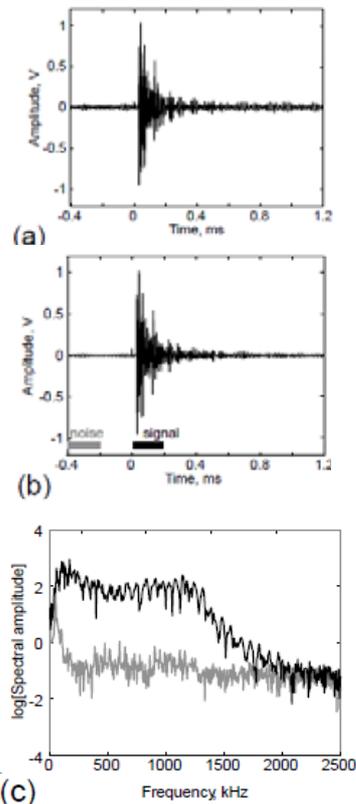


図2. (a)集録された生波形。(b)100回スタック後の波形。(c)スタックされた波形(黒)とノイズ部分(灰色)の振幅スペクトル。

4. 研究成果

(1) 我々は、まず透過P波の初動に着目して、その速度と振幅の時間変化を調べた。P波の初動到達は、ARモデル・フィッティングによる最適な初動到達点をAICを用いて推定するという手法を適用して推定した。また初動振幅は初動一周期分の両振幅で評価した。載荷開始時刻における振幅と速度を基準にして速度と振幅の変化を調べた。載荷開始時におけるP波速度は5952 m/sであった。載荷中に得られた典型的な波形の例を図3に示す。

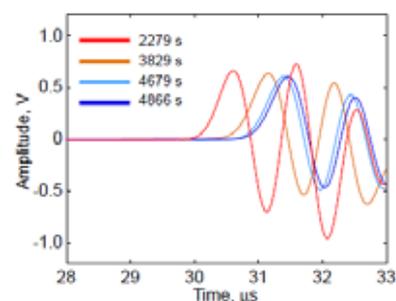


図3. P波初動付近の波形例。

(2) 図4に初動速度と初動振幅の時間変化を示す。試料の変形が収縮から膨張に転ずる

までは速度・振幅ともに増加傾向を示した。これは、既存の亀裂の閉塞と圧密による効果であると考えられる。試料の変形が膨張に転じてからはともに減少に転じている。ピーク強度以降は、速度は緩やかな減少を続けているが、振幅は軸応力の急激な低下と同期するように、急速な減少を示した。

(3) 破壊の進展は、亀裂の生成が卓越する

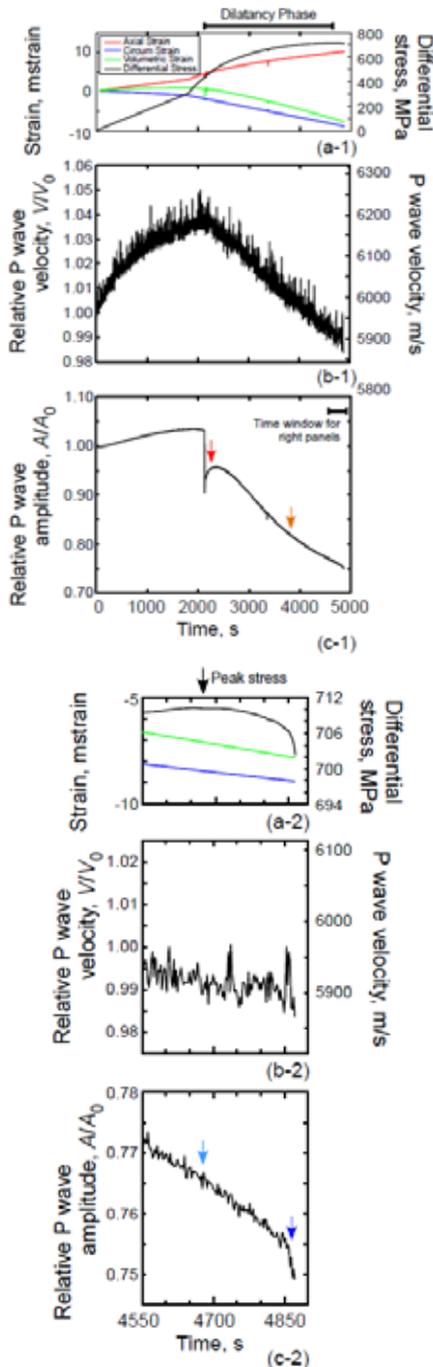


図4. (a)軸応力・ひずみ, (b)初動速度, (c)初動振幅の時間変化. 上半分は荷重開始から終了までを, 下半分はピーク強度付近の時間帯のみを示している.

プロセスから、亀裂の連結による断層面の形成が卓越するプロセスに遷移することが知られている。準静的な破壊の成長が可能な高度な試験では、軸応力を一定に保持するクリープ試験における破壊直前期や、ピーク強度後の軸応力の低下期などに後者の断層成長過程が発現する。断層の成長期には、地震と同様のせん断破壊に特徴的な4象限型の初動の極性分布を示す微小破壊が発生することが知られており、体積膨張時の開口型亀裂の卓越から、断層成長時のせん断型亀裂の卓越へと変化すると考えられる。

(4) 回収後の試料表面の断層成長の様子(図1)から、断層は荷重終了の直前に下側ですべり方向の成長が完了したと推察される。軸応力の急速な低下を考えると、このときに、試料内部に向けて断層が急激に成長したと考えられる。このことは、体積膨張時の開口型亀裂の卓越から、断層成長時のせん断型亀裂の卓越へと変化したという上記の考え方と矛盾しない。したがって、初動速度のゆるやかな低下に対して、振幅の低下のみが加速したことは、亀裂の卓越モードの変化を反映したものと推定される。

(5) 初動速度は、最も速く伝播する周波数成分に依存するため、ある特定の周波数帯のみに速度低下が現れたとしても、検出は難しい。一方で振幅は大きく変化する周波数成分があれば、それによって変化するため、検出されやすい。我々の計測結果は、これを支持するものであり、透過派の振幅のモニタリングが有効であることが示唆された。

(6) 次に、振幅スペクトルと位相スペクトルの変化から、周波数依存性の時間変化を調べた。振幅スペクトルは、基準時刻のスペクトルとの比をとることによって変化を調べた。位相スペクトルは、近接する2つの波形のクロススペクトルから算出される位相遅れを遅れ時間に変換し、これを時間に対して積算していくことによって求めた。これは、近接しない波同士の場合には、変化が大きすぎて、十分なコヒーレンスが得られず、推定値が信頼できない場合があるためである。推定された振幅スペクトル比と遅れ時間を図5に示すが、時間とともに振幅が低下し、速度が減少していく様子が見てとれる。振幅スペクトルについては、800kHz以上の高い周波数帯と400kHz程度のやや低い周波数帯のみ顕著な低下が確認された。速度の逆数に相当する遅れ時間については、顕著な周波数依存性は認められなかった。

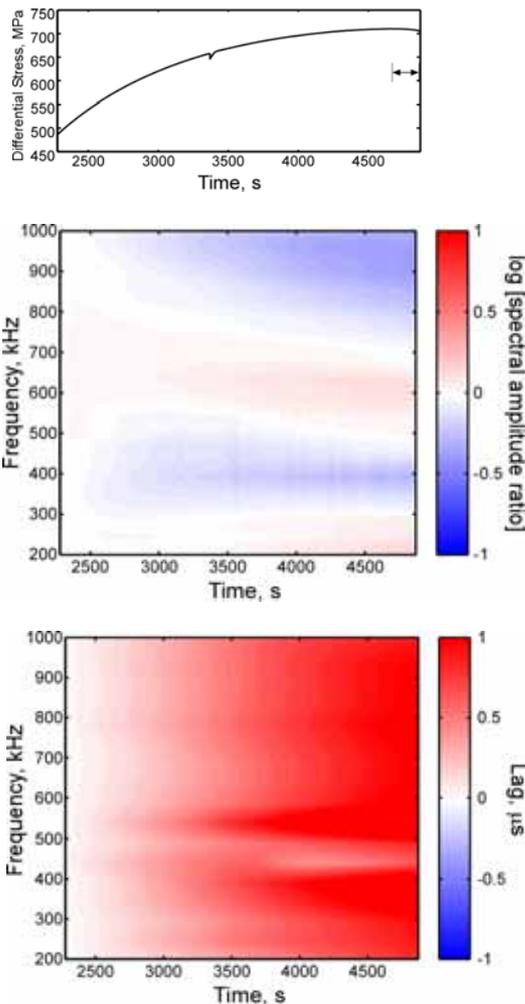


図5 .上から ,軸応力 ,振幅スペクトル比 ,遅れ時間の時間変化 .基準時刻は ,体積膨張の開始に合わせている .振幅は低下が青 ,増加が赤で ,遅れ時間は遅れが赤で表示されている .

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

N. Yoshimitsu, H. Kawakata, N. Takahashi, Broadband P waves transmitting through fracturing Westerly granite before and after the peak stress under a triaxial compressive condition, Earth Planets and Space, 掲載決定, 査読有

[学会発表](計5件)

吉光奈奈, 川方裕則, 高橋直樹, 岩石破壊時における透過P波のコヒーレンスと位相の時間変化, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月18日, 千葉.

H. Kawakata, N. Takahashi, N.

Yoshimitsu, M. Takahashi, A new system of broad-band elastic wave measurement in laboratory under triaxial compressive conditions, IASPEI 2009 Meeting, 2009年1月14日, Cape Town, South Africa.

N. Yoshimitsu, H. Kawakata, N. Takahashi, Frequency dependent change in amplitude of elastic wave transmitting through fracturing Westerly granite, 7th ASC General Assembly and SSJ 2008 Fall Meeting, 2008年11月26日, Ibaraki, Japan.

T. Okuno, H. Kawakata, N. Takahashi, M. Takahashi, Fault structure in Westerly granite samples extracted using a micro-focus X-ray CT scanning system, 7th ASC General Assembly and SSJ 2008 Fall Meeting, 2008年11月26日, Ibaraki, Japan.

川方裕則, 高橋直樹, 吉光奈奈, 広帯域センサーを用いた岩石の破壊成長にともなう弾性波速度の変化, 地球惑星科学連合大会, 2008年5月25日, 千葉.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

川方 裕則 (KAWAKATA HIRONORI)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 80346056