

三軸圧縮下の花崗岩試料における破壊にともなう 透過弾性波の走時の変化について

今堀敦史，川方裕則，（立命館大学），高橋直樹（三井住友建設）

はじめに

震源断層近傍の弾性的・非弾性的変化をとらえることを目的として、震源近傍を透過する地震波を用いた研究が行われてきた（例えば、Sato, 1987）。1970年代には地震発生に先行する弾性波速度変化に関する報告もおこなわれたが、信頼性に欠けるものがほとんどであった。一方、実験室においては、岩石の圧縮破壊に先行して弾性波速度が変化することが知られている。Lockner et al. (1977)は、岩石試料を用いた三軸圧縮破壊試験を実施し、軸荷重が破壊強度に至る過程で弾性波速度が低下することを示した。Yukutake (1989)は、弾性波を多点観測することによって、空間解像度は低いものの弾性波走時トモグラフィーをおこない、最終破断面近傍で局所的に弾性波速度の低下が見られることを示唆する結果を得た。Yoshimitsu et al. (2009)は、破壊強度到達後の破壊過程を詳細に調べることに伴い、破壊強度到達後の軸応力低下過程においてさらに弾性波速度の低下が見られることを明らかにした。しかしながら、封圧下での広帯域弾性波計測技術(Kawakata et al., 2011)を利用した1点計測であったため、速度変化の空間分布を得ることはできなかった。そこで、本研究では、Yoshimitsu et al. (2014)によって可能となった多点での広帯域弾性波計測技術を利用して、花崗岩試料を用いた三軸圧縮試験を実施し、破壊強度到達後の軸応力低下過程も含めた弾性波速度変化の空間分布を調べる。

実験・計測

直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱形に加工された Westerly 花崗岩試料を使用し、室温乾燥条件下で、三軸圧縮試験を実施した。封圧は、深さおよそ 1.5 km に相当する 50 MPa とした。封圧と軸差応力の時間履歴を図 1 に示す。試料の側面には、図 2 に示すように、1 箇所のみ 90 度間隔で残りが 45 度間隔となるような 7 箇所を受振用の広帯域弾性波トランスデューサを貼り付けたが、各トランスデューサの高さが異なるようにした。そのうちの 1 箇所には弾性波の震源としての送振用圧電トランスデューサ（以後、送振子）、3 箇所には受振用圧電トランスデューサを隣り合うように貼り付けた。

実験開始から封圧が 50 MPa になるまでに、封圧 10 MPa 毎に弾性波を送振し、载荷中はおおよそ荷重 50 kN 間隔（破壊強度に近づくにつれて荷重の変化が見られなくなるため、約 3 分間隔に変更）で弾性波を送振した。1 計測につき、送振子に 10 V のステップ電圧を 100 回以上繰り返し与えて弾性波を送振した。封圧上昇開始から除荷終了までに計 64 回の計測をおこない、試料内を透過した弾性波をサンプリング周波数 20 MHz で集録した。

解析・結果・考察

集録された波形には、三軸圧縮試験機のサーボモータの駆動に伴うノイズや送振にとも

なう電氣的なノイズが含まれていたため、計測ごとに 100 回分の受振波形をスタックしたものを解析に使用した。64 個のスタック波形（図 3）から初動走時を読み取り、P 波速度の変化率を求めた。図 4 に例として 2 番と 8 番のトランスデューサ（図 2）で得られた波形から推定された速度変化率を示す。封圧の上昇とともに P 波速度が増加し、载荷中もしばらく増加を続けるが、封圧上昇開始から 3000 秒後付近で速度低下に転じ、その後は低下し続けた。この傾向は、ほぼすべてのトランスデューサの記録において共通していた。速度上昇は試料の圧密による効果を、速度低下はクラックの発生にともなう空隙率の上昇による効果を示していると考えられる。

次に、後続相の時間変化について検討する。図 5 に振幅の時刻歴を封圧上昇開始時からの時間変化として表したカラーマップの例を示す。従来の研究においては初動走時のみが解析に用いられてきたが、本研究では良質の広帯域波形記録が得られたために、いくつかの後続相についてもその到達の時間変化を追うことができる。

すべての波線は反射時以外に曲がらないものと仮定した上で、P 波、S 波の直達波と反射回数が 3 回までの反射波、および表面波の波線経路をすべて計算した。この際、広帯域トランスデューサは受振面に対して直交方向に振動する波に対して感度が高いため、実体波については、トランスデューサへ入射する波の入射角が 20 度以上の P 波、70 度以下の S 波のみに限定した。P 波速度を 6000 m/s、S 波速度を 3465 m/s と仮定した場合（载荷開始時にほぼ相当）の計算走時を図 5 に併せて示した。完全ではないもののいくつかの相で大振幅と計算走時の一致が見られる。このように、直達波だけでなく反射波も含めて考えることによって、波線数、ならびに波線の通過する領域の広さが改善されるため、高空間分解能の弾性波走時トモグラフィーをおこなうことが可能になると期待される。

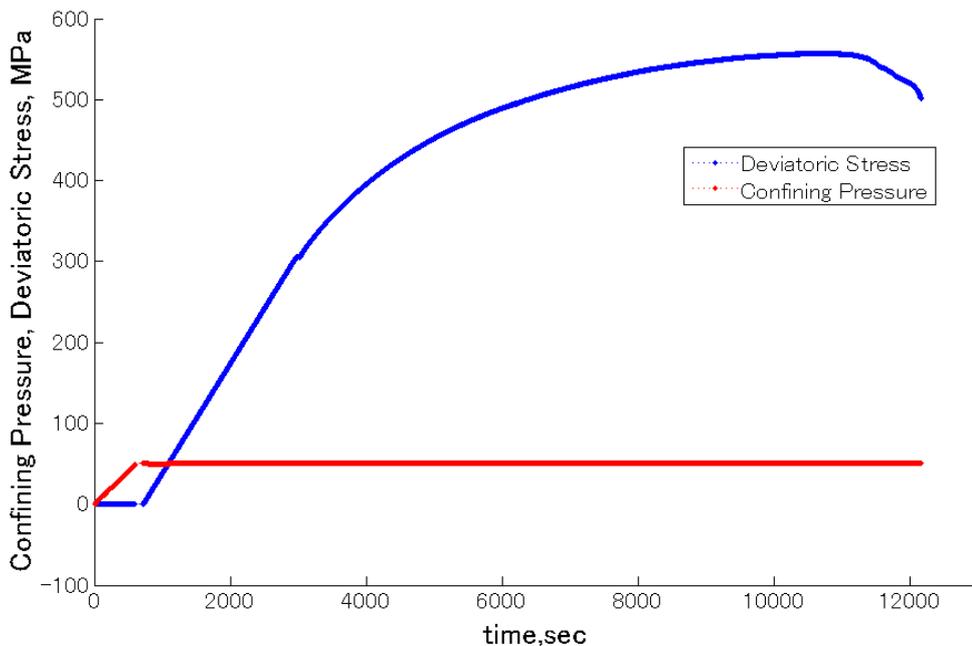


図1. 封圧と軸差応力の時間履歴。赤線は封圧、青線は軸差応力を各々示している。

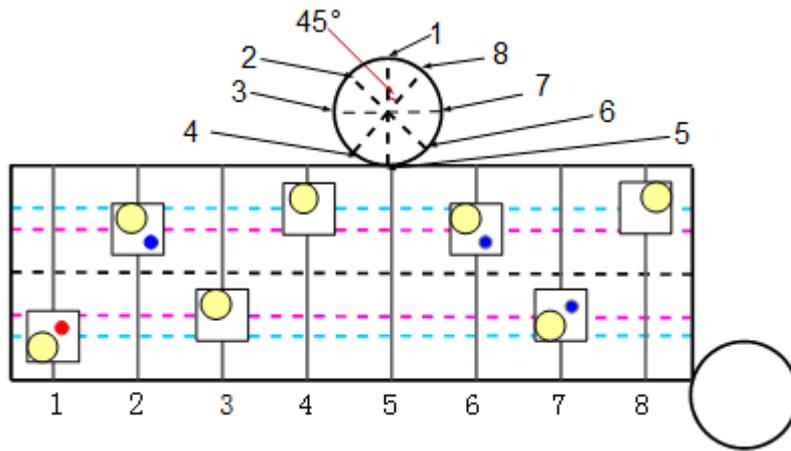


図2. 試料展開図を模式的に示したもの。試料側面に貼り付けたトランスデューサの位置を●と●、送振子を●で示す。●が広帯域弾性波トランスデューサに対応しており左から 1~7 番, ●が受振用圧電トランスデューサに対応し左から 8~10 番とした。また, - - - が試料の軸方向中心であり, - - - から 30 mm の位置を - - -, 20 mm の位置を - - - である。

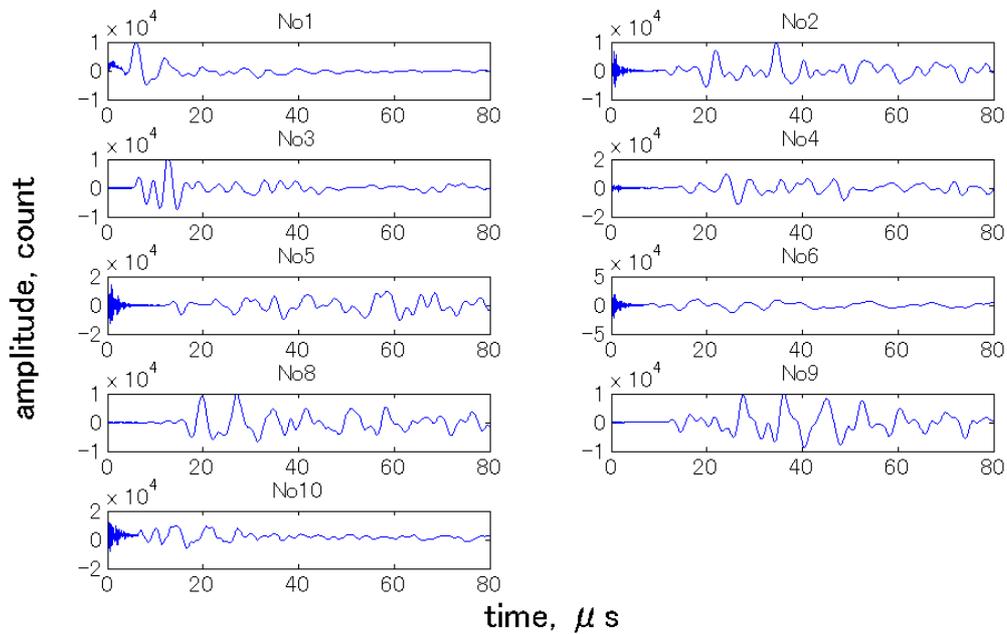


図3. 集録された波形記録を 100 回分スタックして得られたスタック波形の例(軸差応力が約 3MPa の時の計測)。

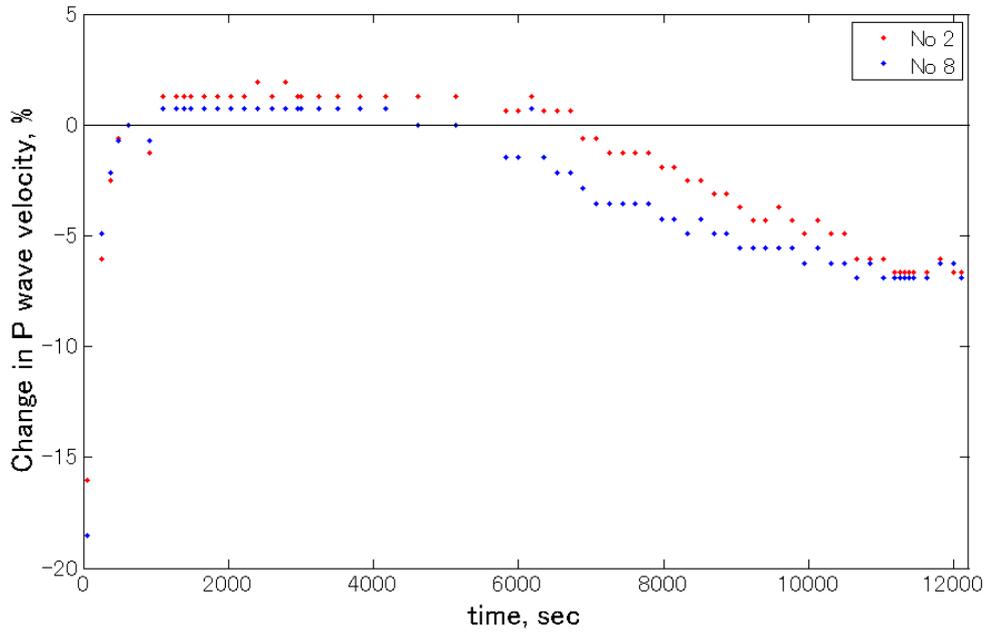


図4. 荷重開始時の速度を基準としたP波速度の時間変化率。赤・青の点線は各々2番と8番のトランスデューサで得られた波形記録から推定された速度変化率を表している。

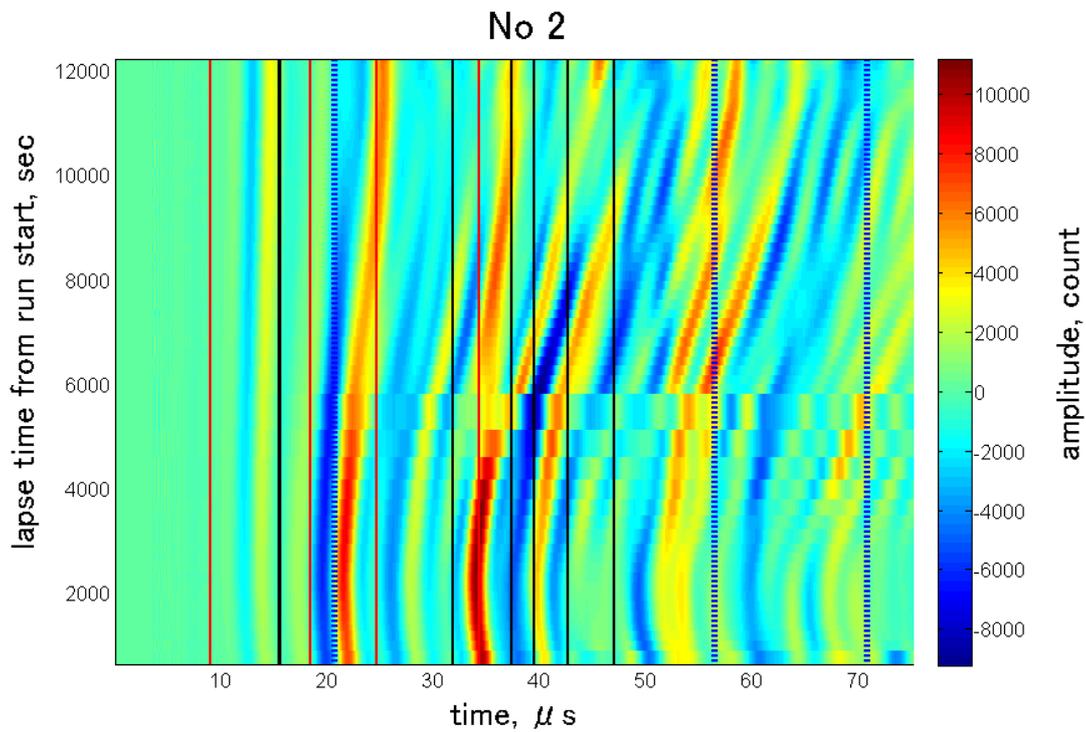


図5. 振幅の時刻歴を封圧上昇開始時からの時間変化として表したカラーマップ。縦方向の直線は、顕著にとらえられると期待される直達波と反射波、および表面波の計算走時。赤線はP波、黒線はS波、青の破線は表面波を各々表している。